T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK TESİSLERİNDE AŞIRI AKIM RÖLESİ VE DİFERANSİYEL RÖLE İLE KORUMA, GÜVENLİK VE SİSTEM PERFORMANSININ ARTIRILMASI

Uğur Ali KARATAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Eş Danışman

Dr. Furkan KARAKUŞ

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RAYLI SİSTEMLERİN ELEKTRİK TESİSLERİNDE AŞIRI AKIM RÖLESİ ve DİFERANSİYEL RÖLE İLE KORUMA, GÜVENLİK VE SİSTEM PERFORMANSININ ARTIRILMASI

Uğur Ali KARATAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 19/03/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Recep YUMURTACI Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Furkan KARAKUŞ Metro İstanbul Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Fatma Gülşen ERDİNÇ, Üye
İstanbul Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Raylı Sistemlerin Elektrik Tesislerinde Aşırı Akım Rölesi ve Diferansiyel Röle ile Koruma, Güvenlik ve Sistem Performansının Artırılması" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Uğur Ali KARATAŞ

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Eğitimi, çağdaş bir toplumun temel taşı olarak gören; akıl ve bilimi rehber kılmamızı öğütleyen; bizlere düşünmeyi, sorgulamayı, üretmeyi öğreten ve "Vatanını en çok seven, görevini en iyi yapandır." sözüyle sorumluluk bilincini aşılayan Başöğretmen Gazi Mustafa Kemal Atatürk'e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım. Bugün bir akademik unvanın eşiğinde durabiliyorsam, bu onun açtığı aydınlık yolda ilerleyebilme fırsatına sahip olduğum içindir.

Yüksek lisans sürecimde bilgi, tecrübe ve desteğiyle her zaman yol gösterici olan saygıdeğer danışmanım Sayın Doç. Dr. Recep Yumurtacı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda eşdanışmanım Dr. Furkan Karakuş'a da teşekkür ederim. Kendilerinin yönlendirmeleri ve katkıları, bu çalışmanın bilimsel temellerini sağlamlaştırmada önemli rol oynamıştır. Ayrıca, çocukluk yıllarımdan bu yana eğitim yolculuğumda yanımda olan, bilgileriyle, emekleriyle ve tecrübeleriyle gelişimime katkı sunan tüm kıymetli öğretmenlerime de yürekten teşekkür ederim.

Yüksek lisans ders sürecimde destek olan Entes Elektronik AŞ'ye, tez sürecimde ise her türlü kolaylığı sağlayan şefim Selim Gülle'ye, Metro İstanbul AŞ'ye ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayat yolculuğumun her adımında yanımda olan, sevgileriyle beni var eden, destekleriyle gücümü artıran çok kıymetli anneme ve babama; çocukluğumun neşesi, gençliğimin dostu, her zaman yanımda hissettiğim biricik kız kardeşime şükranlarımı ve sevgilerimi sunarım. Sizlerin sonsuz sevgisi ve desteği, hayatımın her anında bana rehberlik etti ve bugünlere ulaşmamda en büyük güç kaynağım oldu. Son olarak yüksek lisans sürecimin her anında yanımda olan, sabrıyla, içten desteğiyle ve sevgisiyle tüm zorlukları birlikte göğüslediğimiz, varlığıyla bana güç ve huzur veren sevgili eşime teşekkürlerimi sunarım.

Uğur Ali KARATAŞ

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ xii

TABLO LİSTESİ xvi

ÖZET xvii

ABSTRACT xix

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Taraması....1

1.2 Tezin Amacı....17

2 RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ 19

2.1 Raylı Sistemlerin Tarihçesi....19

2.2 Raylı Sistem Türleri....21

2.2.1 Metro Sistemleri....21

2.2.2 Hafif Raylı Sistemler....21

2.2.3 Tramvay Sistemleri....22

2.2.4 Monoray Sistemleri....22

2.2.5 Yüksek Hızlı Trenler (YHT)....23

2.2.6 Banliyö Trenleri....23

2.2.7 Maglev Trenler....24

2.2.8 Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler....25

3 RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN ORTA GERİLİM SİSTEMLERİ 26

3.1 Transformatörler....26

3.1.1 CER Gücü Transformatörleri....28

3.1.2 İç İhtiyaç Transformatörleri....36

3.2 Orta Gerilim Hücreleri....38

3.3 Devre Kesiciler 38
3.4 Ayırıcılar 39
3.5 Ölçü Transformatörleri 39
3.5.1 Akım Tranformatörleri 40
3.5.2 Gerilim Transformatörleri 50
3.6 Koruma Röleleri 56
3.6.1 Aşırı Akım Röleleri 56
3.6.2 Diferansiyel Röleler 56
3.6.3 Mesafe Röleleri 57
3.6.4 Gerilim Röleleri 57
3.6.5 Yönlü Röleler 58

4 ORTA GERİLİM TESİSLERİNDE KULLANILAN KORUMA SİSTEMLERİ 59

4.1 Direfansiyel Koruma Sistemi 59
4.1.1 Çalışma Prensibi 59
4.1.2 Bileşenler 60
4.1.3 Uygulama Alanları 61
4.2 Aşırı Akım Koruması 75
4.2.1 Anlık Aşırı Akım Rölesi 76
4.2.2 Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölesi 77
4.2.3 Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi 79
4.2.4 Yönlü Aşırı Akım Röleleri 83
4.3 IEC61850 İletişim Protokolü 93
4.3.1 Güç Sistemlerinde Karşılaşılan Zorluklarda IEC61850'nin Önemi ..93
4.3.2 IEC61850 SİSTEMİNE GİRİŞ 103
4.3.3 IEC 61850 Kullanıcı Spesifikasyonları, Standartlar ve Son Kullanıcılar 108
4.3.4 IEC61850 ile İlgili Hizmetlerin Uygulanması (Implementation of Services Related to IEC61850) 113
4.3.5 IEC61850 Uygulaması İçin Planlama (Planning for IEC 61850 Implementation) 120
4.3.6 SCADA Uygulamaları İçin IEC61850 (IEC61850 for SCADA Applications) 123

5 RAYLI SİSTEMLERDE AŞIRI AKIM RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU, SEÇİCİLİK VE GÜVENLİK 137

5.1 Koordinasyonun tanımı ve önemi 137
5.1.1 Aşırı akım rölelerinde koordinasyonun teknik gereksinimleri 138
5.1.2 ETAP programı gibi simülasyon araçlarıyla koordinasyon analizi . 140
5.2 Seçiciliğin tanımı ve önemi 142
5.3 Güvenliğin tanımı ve önemi 144
5.3.1 Olası arızalarda rölelerin hızlı ve güvenilir müdahalesi 145
5.3.2 IEC61850'nin güvenlik açısından önemi ve katkısı 147

6 SAYISAL VERİLER VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI 150

6.1 Mevcut şebeke yapısının tanıtımı 150
6.1.1 M1 Hattı 150
6.1.2 M4 Hattı 153
6.1.3 M8 Hattı 156
6.2 Simülasyon Çalışması 158

7 SONUÇ 170

KAYNAKÇA 172

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 177

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
ADPSS	Advanced Digital Power System Simulator (Gelişmiş Dijital Güç Sistemi Simülatörü)
AG	Alçak Gerilim
AMI	Advanced Metering Infrastructure (Gelişmiş Ölçüm Altyapısı)
ANSI	American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)
ATP	Alternative Transients Program
BF	Breaker Failure (Kesici Arızası)
BZT	(Barium Zirconate Titanate)
CIM	Common Information Model (Ortak Bilgi Modeli)
CT	Current Transformer (akım transformatörü)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DER	Distributed Energy Resources (Dağıtık Enerji Kaynağı)
DFR	Digital Fault Recorder (Dijital Arıza Kaydedici)
DFT	Discrete Fourier Transform (Ayrık Fourier Dönüşümü)
DG	Distributed Generation (Dağıtılmış Üretim)
DIS	Data and Information Structure
DiD	Defence-in-Depth (Derinlemesine Savunma)
DPZ	Distribution Protection Zone (Dağıtım Koruma Bölgesine)
DRP	Disaster Recovery Plan (Felaket Kurtarma Planı)
DT	Definite Time (Sabit Zaman)
EI	Extremely Inverse
EMS	Energy Management System (Enerji Yönetim Sistemi)
ETAP	Electrical Transient Analyzer Program
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)

GAMS	General Algebraic Modelling Systems (Genel Cebirsel Modelleme Sistemleri)
GAPC	Generic Automatic Process Control)
GGIO	Generic Process I/O
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Events (Genel Nesne Yönelimli Trafo Merkezi Olayları)
HMI	Human Machine Interface (İnsan Makine Arayüzü)
HVDC	High Voltage Direct Current (Yüksek Gerilim Doğru Akım)
ICCP	Inter-Control Centre Communications Protocol (Kontrol Merkezleri Arası İletişim Protokolü)
IDMT	Inverse Definite Minimum Time (Ters Sabit Minimum Zaman)
IDS	Intrusion Detection System (Saldırı Tespit Sistemi)
IEC	The International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IED	Intelligent Electronic Devices (Akıllı Elektronik Cihazlar)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IoT	Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IP	Internet Protocol (İnternet Protokolü)
Ip	Pick-up Current (Çalışmaya Başlama Akımı)
IPS	Intrusion Prevention Systems (Saldırı Önleme Sistemi)
IRPCTS	Intelligent Relay Protection Collaborative Testing System (Akıllı Röle Koruma İşbirliği Test Sistemi)
IS	International Standard (Uluslararası Standart)
İZBAN	İzmir Banliyö Treni
LAN	Local Area Network (Yerel Alan Ağı)
LMD	Local Mean Decomposition (Yerel Ortalama Ayrıştırma)
LPIT	Low Power Instrument Transformers (Düşük Güçlü Enstrüman Transformatörleri)
MAC	Media Access Control (Medya Erişim Kontrolü)
MMC	Modular Multilevel Converter (Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü)
MMS	Manufacturing Message Specification (Üretim Mesajı Spesifikasyonu)
MOV	Metal Oxide Varistor (Metal Oksit Varistör)
MTA	Maximum Torque Angle (Maksimum Moment Açısı)
MU	Merging Unit (Birleştirme Birimi)
NO	Normally Open (Normalde Açık)
OG	Orta Gerilim

OPC	Open Platform Communications (Açık İletişim Platformu)
PACS	Protection, Automation and Control Systems (Koruma, Otomasyon ve Kontrol Sistemleri)
PIOC	Protection Instantaneous Overcurrent
PMU	Phasor Measurement Unit (Fazör Ölçüm Ünitesi)
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design (Güç Sistemleri Bilgisayar Destekli Tasarım)
PSRC	Power System Relaying and Control Committee (Güç Sistemi Röle ve Kontrol Komitesi)
PTOC	Protection Time Overcurrent (Koruma Süresi Aşırı Akım)
PTP	Precision Time Protocol (Hassas Zaman Protokolü)
RCA	Relay Characteristic Angle (Röle Karakteristik Açısı)
RES	Renewable Energy Source (Yenilenebilir Enerji Kaynağı)
RTDS	Real Time Digital Simulator (Gerçek Zamanlı Dijital Simülatör)
SAMU	Stand-Alone Merging Units (Bağımsız Birleşen Birimler)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Sistem Kontrolü ve Veri Toplama)
SCD	Substation Configuration Description (Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması - SCD)
SCL	Substation Configuration Description Language (Yapılandırılmış Kontrol Dili)
SCU	Substation Concentrating Unit (Sistem Konsantrasyon Ünitesi)
SI	Standard Inverse (Standart Ters)
SIEM	Security Information and Event Management (Güvenlik Bilgi ve Olay Yönetimi)
SIPS	System Integrity Protection Schemes (Sistem Bütünlüğü Koruma Planları)
SNTP	Simple Network Time Protocol (Basit Ağ Zaman Protokolü)
STATCOM	Static Synchronous Compensator (Statik Senkron Kompanzatör)
SV	Sampled Value (Örneklenmiş Değer)
TASE	Telecontrol Application Service Element (Telekontrol Uygulama Hizmeti Elemanı)
TCP	Transmission Control Protocol (İletişim Kontrol Protokolü))
TR	Teknik Rapor
TS	Teknik Özellik
TWFL	Travelling Wave Fault Locator (Yolculuk Dalgası Arıza Yer Belirleyici)
UPFC	Unified Power Flow Controller (Birleşik Güç Akışı Kontrol Cihazı)

VI	Very Inverse (Çok Ters)
VPN	Virtual Private Network (Sanal Özel Ağ)
VSC	Voltage Source Converter (gerilim kaynağı dönüştürücü)
WAN	Wide Area Network (Geniş Alan Ağı)
WCA	Water Cycle Algorithm (Su Döngüsü Algoritması)
WSCC	Western System Coordinating Council
XML	Extensible Markup Language (Genişletilebilir İşaretleme Dili)
YG	Yüksek Gerilim
YHT	Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 İlk demir raylı atlı tramvay (İngiltere) **20**
Şekil 2.2 M4 metrosu (İstanbul, Kadıköy-Sabiha Gökçen Havalimanı) **21**
Şekil 2.3 T1 tramvayı (İstanbul, Kabataş-Bağcılar) **22**
Şekil 2.4 São Paulo monorayı (Brezilya) **23**
Şekil 2.5 TCDD yüksek hızlı tren **23**
Şekil 2.6 İZBAN banliyö treni (İzmir) **24**
Şekil 2.7 Şanghay maglev treni **25**
Şekil 2.8 M5 metrosu - tam otomatik sürücüsüz metro (İstanbul, Üsküdar-Samandıra metrosu) **25**
Şekil 3.1 Vakum altında kapsüllenmiş alüminyum sargılı Dyn11 kuru tip CER transformatörü (ABB Marka) **29**
Şekil 3.2 Ünalan istasyonuna ait CER gücü tek hat ekranı **30**
Şekil 3.3 CER ve servis transformatörlerine ait örnek tek hat diyagramı **30**
Şekil 3.4 Transformatör merkezi ile tren arası elektrik enerjisi aktarımı süreci **31**
Şekil 3.5 Siemens Geafol CER transformatörüne ait YG/AG terminalleri, sargı terminalleri ve fanlar **31**
Şekil 3.6 M5 metrosuna ait Siemens marka CER transformatörü etiketi **32**
Şekil 3.7 SIEMENS markasına ait CER transformatörü imalat çizimi **32**
Şekil 3.8 M5 metrosu Bulgurlu istasyonunda bulunan CER transformatörü test raporu **33**
Şekil 3.9 ABB marka kuru tip transformatör izolasyon sistemi sınıfları **35**
Şekil 3.10 ABB markasına ait CER transformatörü imalat çizimi **35**
Şekil 3.11 M4 metrosu Esenkent istasyonu CER transformatörü etiketi **36**
Şekil 3.12 M4 metrosu Esenkent istasyonunda yer alan ABB markasına ait iç ihtiyaç transformatörü etiket bilgisi **37**
Şekil 3.13 M4 metrosuna ait OG hücreleri **38**
Şekil 3.14 OG gerilim kesicisi (ABB Marka) **39**
Şekil 3.15 Akım transformatörlerinin sembolleri **41**
Şekil 3.16 AG akım transformatörleri **43**

Şekil 3.17 OG akım transformatörleri **43**
Şekil 3.18 Akım transformatörlerinde akım yönleri **45**
Şekil 3.19 Akım transformatörlerinde polarite tayini **46**
Şekil 3.20 Diz noktasını (doyma gerilimi) temsil eden ikincil (sekonder) uyarım eğrisi **48**
Şekil 3.21 Gerilim transformatörlerinin şematik gösterimi **51**
Şekil 3.22 Gerilim transformatörünün yapısı **52**
Şekil 3.23 Faz-faz arası gerilim transformatörü **54**
Şekil 3.24 Faz-toprak gerilim transformatörü **55**
Şekil 3.25 M4 metrosuna ait diferansiyel röle **57**
Şekil 4.1 Çalışma prensibi **60**
Şekil 4.2 Fonksiyon bloğu **62**
Şekil 4.3 Çalışma prensibi **63**
Şekil 4.4 Fonksiyon bloğu **65**
Şekil 4.5 Çalışma prensibi **66**
Şekil 4.6 Demaraj akımı algılama mantığı **67**
Şekil 4.7 Temel koruma prensibi **68**
Şekil 4.8 Dış arıza sırasında diferansiyel akım örneği **69**
Şekil 4.9 Güvenli çalışma fonksiyonunun çalışma mantığı **70**
Şekil 4.10 Dengeli düşük kademe çalışma mantığı **71**
Şekil 4.11 Diferansiyel koruma çalışma karakteristiği. (LS) düşük kademe ve (HS) yüksek kademe bölgesini gösterir. **71**
Şekil 4.12 Ani yüksek ayar kademesinin çalışma mantığı **73**
Şekil 4.13 Doğrudan karşıyı-açtırma fonksiyonunun çalışma mantığı **74**
Şekil 4.14 Hat diferansiyel uygulamaları **74**
Şekil 4.15 Koruma iletişimi denetimi iletişim arızalarını tespit eder **75**
Şekil 4.16 Anlık aşırı akım rölesi zaman - akım grafiği **76**
Şekil 4.17 Sabit zamanlı aşırı akım rölesi zaman - akım grafiği **79**
Şekil 4.18 Normal ters, çok ters, aşırı ters ve sabit zamanlı aşırı akım rölelerinin eğrilerinin karşılaştırılması (IEC 60255 characteristics; TMS=1.0) **80**
Şekil 4.19 Normal ters ve çok ters zamanlı aşırı akım rölelerinin eğrilerinin karşılaştırılması **81**
Şekil 4.20 Röle ve sigorta karakteristiklerinin karşılaştırması **82**
Şekil 4.21 Farklı röle tiplerinin karşılaştırması **83**
Şekil 4.22 Yönlü aşırı akım rölesi çalışma özellikleri **85**

Şekil 4.23 Faz hataları için karakteristik açı ayarı **88**
Şekil 4.24 Toprak hataları için karakteristik açı ayarı **89**
Şekil 4.25 Bir uçtan beslenen radyal şebeke **91**
Şekil 4.26 Her iki uçtan beslenen radyal şebekede arıza meydana gelmesi **91**
Şekil 4.27 Rölelere yön özelliğinin entegre edilmesi **92**
Şekil 4.28 Paralel beslemede arıza durumu **93**
Şekil 4.29 Trafo merkezi mimarisi **101**
Şekil 4.30 IEC61850 serisinin modelleme ve haritalama bölümleri arasındaki ilişki **106**
Şekil 4.31 Jeneratör bölmesi tek hat şeması **109**
Şekil 4.32 Farklı koruma bölgelerinin tanımı **110**
Şekil 4.33 Temel koruma fonksiyonları ve arayüzleri tanımlanması **111**
Şekil 4.34 Akıllı elektronik cihazların tanımlanması **112**
Şekil 4.35 Ayar dosyaları dahil belirtilen her şey **113**
Şekil 4.36 İşlevsellik ve profillere genel bakış **114**
Şekil 4.37 MMS protokolü **115**
Şekil 4.38 GOOSE protokolü **117**
Şekil 4.39 SV trafiğine örnek **118**
Şekil 4.40 İletim sistemi **119**
Şekil 4.41 Her sistem için birden fazla konsantratör **125**
Şekil 4.42 Alt istasyon konsantratör ünitesi-SCU **125**
Şekil 6.1 M1A Yenikapı-Atatürk Havalimanı metro hattı istasyonları **151**
Şekil 6.2 M1B Yenikapı-Kirazlı metro hattı istasyonları **151**
Şekil 6.3 M4 Kadıköy-Sabiha Gökçen Havalimanı metro hattı istasyonları **154**
Şekil 6.4 M8 Bostancı-Parseller metro hattı istasyonları **156**
Şekil 6.5 Simülasyonda ele alınan M1 hattına ait 3 istasyonun ETAP modeli **159**
Şekil 6.6 Yenikapı transformatör merkezi ETAP modeli **160**
Şekil 6.7 Aksaray transformatör merkezi ETAP modeli **160**
Şekil 6.8 Ulubatlı transformatör merkezi ETAP modeli **160**
Şekil 6.9 CER trafosuna ait rölenin kumanda ettiği kesici **161**
Şekil 6.10 CER trafosuna ait röleye bağlı akım trafosu **161**
Şekil 6.11 CER trafosuna ait rölenin aşırı akım koruması ayarları **162**
Şekil 6.12 CER trafosu kolunda meydana gelen 3 faz simetrik arıza durumu **163**
Şekil 6.13 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü **163**

Şekil 6.14 Yardımcı trafoya ait rölenin kumanda ettiği kesici **164**
Şekil 6.15 Yardımcı trafoya ait röleye bağlı akım trafosu **164**
Şekil 6.16 Yardımcı trafoya ait rölenin aşırı akım koruması ayarları **165**
Şekil 6.17 Yardımcı trafo kolunda meydana gelen 3 faz simetrik arıza durumu **166**
Şekil 6.18 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü..... **166**
Şekil 6.19 Ring hattına ait diferansiyel rölenin kumanda ettiği kesici..... **167**
Şekil 6.20 Ring hattına ait röleye bağlı akım trafosu **167**
Şekil 6.21 Ring hattına ait rölenin diferansiyel koruma ayarları..... **168**
Şekil 6.22 Ring hattında meydana gelen 3 faz arıza..... **168**
Şekil 6.23 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü..... **169**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 M1 Metrosuna ait transformatör bilgileri **27**

Tablo 3.2 M4 Metrosuna ait transformatör bilgileri **28**

Tablo 3.3 Standart Doğruluk Sınıfları 0.1, 0.2, 0.5 ve 1 için Hata Sınırı **47**

Tablo 4.1 Fonksiyon Tanımı **62**

Tablo 4.2 Fonksiyon Tanımı **65**

Tablo 4.3 Röle karakteristiğine rölelerin açma sürelerinin hesaplandığı denklemler (IEC 60255-151) **79**

Tablo 4.4 IEC61850'nin kapsadığı işlevsel alanlar **104**

Tablo 4.5 IEC61850 için varlık alanları **105**

Tablo 4.6 IEC 61850-7-4'e göre mantıksal düğümlerin (LN'ler) açıklaması **110**

Tablo 6.1 Ring ve TEİAŞ besleme hattı röle ayarları **151**

Tablo 6.2 CER ve yardımcı trafo röle ayarları **152**

Tablo 6.3 Ring hattı röle ayarları **152**

Tablo 6.4 CER ve yardımcı trafo röle ayarları **152**

Tablo 6.5 Ring ve TEİAŞ besleme hattı röle ayarları **152**

Tablo 6.6 CER trafosu röle ayarları **153**

Tablo 6.7 Yardımcı trafo röle ayarları **153**

Tablo 6.8 M4 hattı faz-2 kısmı (Fevzi Çakmak-Yayalar-Kurtköy-Sabiha Gökçen) röle ayarları **155**

Tablo 6.9 M8 hattı örnek alınan 3 istasyonun (Dudullu-Modoko-İmes) röle ayarları **157**

ÖZET

Raylı Sistemlerin Elektrik Tesislerinde Aşırı Akım Rölesi ve Diferansiyel Röle ile Koruma, Güvenlik ve Sistem Performansının Artırılması

Uğur Ali KARATAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Tesisleri Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Eş-Danışman: Dr. Furkan KARAKUŞ

Bu çalışma, kent içi raylı sistemlerde (metro ve tramvay) kullanılan orta gerilim elektrik sistemlerinin elemanları, bu sistemlerde karşılaşılan arızalar ve koruma mekanizmaları üzerine detaylı bir analiz sunmaktadır. Çalışma, özellikle elektrik sistemlerindeki orta gerilim elemanlarının kritik işlevlerini ve bu elemanların arıza durumlarında nasıl tepki verdiğini inceler. Bu bağlamda, arızaların doğası ve bu arızalara müdahalede kullanılan çeşitli koruma sistemleri ile rölelerin detaylı bir değerlendirmesi yapılmıştır.

Elektrik tesislerinde kullanılan koruma sistemleri, sistem güvenliği için hayati öneme sahiptir. Aşırı akım koruma röleleri ve diferansiyel koruma röleleri üzerine yapılan bu inceleme, özellikle seçicilik, hızlı müdahale kapasitesi, güvenilirlik, ekonomik verimlilik ve arıza lokalizasyonu gibi durumları ele almaktadır.

Çalışmada, uluslararası anlamda tanınan bir markaya ait diferansiyel rölenin saha test sonuçlarına yer verilmiş, bu sonuçlar teorik bulguları destekleyici nitelikte olup, diferansiyel koruma sistemlerinin etkinliğini doğrulamaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında aşırı akım koruma rölesi testleri Omicron cihazı kullanılarak IEC (The International Electrotechnical Commission) standartlarına göre yapılmıştır.

Ek olarak, tezde bir metro hattının ETAP programında yapılan simülasyonu ve bu simülasyonun sonuçları incelenmiştir. Bu simülasyon, koruma sistemlerinin tasarımı ve uygulamasında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmede ve optimizasyon stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir referans noktası olabilir. Simülasyon sonuçları, pratik uygulamaların teorik modellemelerle de uyumlu olduğunu göstererek, sistem tasarımında önemli düzeltmeler ve iyileştirmeler için fikir vermektedir.

Sonuç olarak, bu tez, raylı sistemlerde orta gerilim elektrik tesislerinin korunması ve işletilmesinde karşılaşılan zorluklara yönelik çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Araştırma, bu alanda daha derinlemesine çalışmalar için güçlü bir temel oluşturmayı hedeflemekte ve koruma uygulamaları için önerilerde bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Raylı Sistemler, Orta Gerilim, Koruma Sistemleri, Diferansiyel Röle, Aşırı Akım Rölesi.

ABSTRACT

Protection With Overcurrent and Differential Relay of Rail Systems Electrical Installations, Increasing Security and System Performance

Uğur Ali KARATAŞ

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep YUMURTACI

Co-supervisor: Dr. Furkan KARAKUŞ

This study presents a detailed analysis of the medium-voltage electrical systems elements used in urban rail systems (metro and tramway), the faults encountered in these systems, and their protection mechanisms. The study specifically examines the critical functions of medium-voltage components in electrical systems and their responses to faults. In this context, a comprehensive evaluation of fault characteristics and the various protection systems and relays employed to address these faults has been conducted.

Protection systems used in electrical facilities are crucial for ensuring system security. This examination of overcurrent protection relays and differential protection relays focuses on key attributes such as selectivity, rapid response capability, reliability, economic efficiency, and fault localization. The study includes field test results of a differential relay from a globally recognized brand, which substantiate the theoretical findings and confirm the effectiveness of

differential protection systems. Additionally, tests on overcurrent protection relays were conducted using the Omicron device in accordance with IEC (International Electrotechnical Commission) standards.

Furthermore, the thesis evaluates the simulation of a metro line conducted using the ETAP software and examines the outcomes of this simulation. This simulation serves as a significant reference point for overcoming challenges in the design and implementation of protection systems and for developing optimization strategies. The results demonstrate consistency between practical applications and theoretical modeling, offering insights for significant corrections and improvements in system design.

In conclusion, this thesis aims to provide solutions to the challenges encountered in the protection and operation of medium-voltage electrical facilities in rail systems. The research aspires to establish a solid foundation for more in-depth studies in this domain and to offer recommendations for the broader implementation of protection systems.

Keywords: Rail Systems, Medium Voltage, Protection Systems, Differential Relay, Overcurrent Relay.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Taraması

Raylı sistem elektrik tesislerindeki sorunların önlenmesi ve güvenliğin artırılması amacıyla yapılan bu çalışma, orta gerilim elektrik sistemleri, diferansiyel ve aşırı akım koruma sistemlerinin incelenmesini ve literatür taraması ile uzman görüşlerinin değerlendirilmesini içermektedir. Raylı sistem elektrik tesislerindeki diferansiyel röle ve aşırı akım rölesi uygulamaları, elektrik tesislerinin güvenliğini sağlamak adına büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı, sorunların tespit edilmesi ve çözümlerin sunulması yoluyla raylı sistem elektrik tesislerinin verimliliğini ve güvenliğini artırmaktır. Bu doğrultuda, orta gerilim elektrik sistemleri incelenmiş ve mevcut uygulamalar değerlendirilmiştir. Ayrıca, diferansiyel ve aşırı akım koruma sistemleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiş ve bu sistemlerin raylı sistem elektrik tesislerinde nasıl uygulandığı açıklanmıştır. Bu çalışmada ayrıca literatür taramasına ve uzman görüşlerine yer verilmiştir. Bu kaynaklardan elde edilen bilgiler, diferansiyel röle ve aşırı akım rölesi uygulamalarının avantajları ve dezavantajları hakkında detaylı bilgi verilmiş ve karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik öneriler sunulmuştur. Sonuç olarak, raylı sistem elektrik tesislerindeki diferansiyel röle ve aşırı akım rölesi uygulamaları, elektrik tesislerinin güvenliğini artırmada etkili bir yöntemdir ve bu çalışma, bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirme yapma olanağı sunmaktadır.

Tez konusu ile ilgili olarak daha önce literatürde verilmiş çalışmaların özeti aşağıda sunulmuştur:

"A Coordinated Multi-Element Current Differential Protection Scheme for Active Distribution Systems" isimli makalede, Dağıtılmış Üretim (Distributed Generation - DG) entegrasyonlu dağıtım sistemlerine uygun çok elemanlı hat diferansiyel

koruma yaklaşımı üzerinde durulmuştur. Mevcut diferansiyel koruma şemalarından farklı olarak, bu yaklaşım, her Dağıtım Koruma Bölgesine (Distribution Protection Zone - DPZ) birden fazla diferansiyel eleman uygulayarak etkin bir zaman dereceli şema oluşturmayı hedeflemiştir. Bu yöntem, kritik hata direnci değerine sahip hatalara karşı hassas bir diferansiyel kullanımını içermektedir. Ayrıca, dağıtılmış üretim beslemesinden kaynaklanan harici hatalar sırasında gereksiz açmaları önlemek için bloklama temelli mantık uygulanmış ve yedek koruma için bir kesici arızası (Breaker Failure - BF) şeması tasarlanmıştır. Gerçek bir dağıtım sistemi üzerinde yapılan zaman bazlı hata simülasyonları, tasarlanan koruma şemasının performansını artırdığını ve geleneksel yaklaşıma göre üstünlüğünü ortaya koymuştur[1].

"An Energy Differential Relay for Long Transmission Lines" isimli makalede, uzun iletim hatları için enerji diferansiyel rölesi araştırılmıştır. Önerilen koruma yönteminde, korunan hatta kısa bir zaman diliminde beslenen net enerjiyi hesaplamak için iki farklı yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemler, iletim hattındaki enerji akışını ve dağıtılmış elemanların enerji tüketimini iç hata olmadığı varsayımıyla hesaplamaktadır. İç hata olmadığında, bu iki yöntemin enerjileri eşit çıkmaktadır. Önerilen teknik, yüksek güvenilirlik, hızlı tepki süresi ve yüksek dirençli toprak hatası koşullarında mükemmel performans göstermektedir. Yöntemin performansı, EMTP (Elektromanyetik Geçişler Programı - Electromagnetic Transients Program) simülasyon testleriyle doğrulanmıştır[2].

"Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks" isimli makalede, dağıtım ağlarında aşırı akım rölelerinin optimal koordinasyonu için geleneksel optimizasyon tekniklerinin yanı sıra metasezgisel optimizasyon tekniklerinin de koruma röle koordinasyon çalışmalarında dikkat çektiği vurgulanmıştır. Su Döngüsü Algoritması (Water Cycle Algorithm - WCA), rölelerin uygun ayarlarını seçmek ve tüm olası arıza durumları için minimum işletme sürelerini belirlemek amacıyla optimal röle koordinasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu çalışmada, yer hataları altında döngü tipi dağıtım ağlarında WCA'nın uygulanışı sunulmuştur. Yer hatalarının incelenmesi sırasında, fazdan toprağa kapasitans göz önünde bulundurularak hem hava hatları hem de yer altı kabloları modellenmiştir. Arıza koşulları altında sistemde dolaşan kablo kapasitif akımları seçiciliğin kaybolmasına

neden olabilir. Seçiciliği korumak için optimizasyon problemine yeni kısıtlamalar eklenmiştir. Böylece, toplam işletme süresinde bir artışla seçici koruma sağlanmıştır. WCA ile üretilen sonuçlar, Genel Cebirsel Modelleme Sistemleri (General Algebraic Modelling Systems - GAMS) kullanılarak uygulanan doğrusal programlama ile karşılaştırılmıştır. Hava hatları ve yer altı kabloları için ayrı ayrı benzer toplam işletme süreleri elde edilmiştir. Hem hava hatları hem de yer altı kabloları senaryolarında, sistem doğrusal programlama ve WCA kullanılarak seçici ve optimal şekilde korunmuştur[3].

"Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection" isimli makalede, yeni koruma ekipmanlarının dinamik performansının araştırılmasının önemi vurgulanmıştır. Bu amaçla, MATLAB kullanılarak tam dinamik bir güç sistemi modeli geliştirilmiştir. SimPower araç seti ile güç sistemi ağlarının ve modern dijital koruma ekipmanlarının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Güç diferansiyel rölesinin performansını değerlendirmek amacıyla, iç ve dış tüm hata olasılıklarını kapsayan eksiksiz bir hata test seti hazırlanmıştır. Sonuçlar, hattın ortasında bile tüm iç hata türleri için üstün röle hassasiyetini doğrulamıştır. Tüm topraklama hataları, 150 ohm'a kadar olan hata direncinde başarıyla tespit edilmiştir. Ayrıca, şema tüm dış hata koşullarına ve hem kararlı hem de kararsız güç salınımlarına karşı mükemmel bir stabilite göstermiştir. Hassas ve kararlı operasyon, başarılı bir ünite koruma rölesi için temel bir konudur. Bu nedenle, güç diferansiyel rölesinin iletim hatlarına uygun koruma sağlama yeteneği açıkça gösterilmiştir[4].

"Enhancing grid protection: The crucial role of resistive-type superconducting fault current limiters in transmission line current differential relays" isimli makalede, direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcılarının hat akımı diferansiyel röle operasyonlarına olan önemli etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu araştırma, güç sistemi korumasını artırmaya yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

Ana bulgular şunlardır:

- Hata Akımı Kısıtlaması: Direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcıları, hata akımlarını etkin bir şekilde kısıtlamakta ve hata akımı büyüklüğü ile ters orantılı olarak şebeke bütünlüğünü korumaktadır.

- Geliştirilmiş Röle Performansı: Direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcılarının entegrasyonu, akım diferansiyel rölelerinin hassasiyetini, güvenilirliğini ve güvenliğini önemli ölçüde artırarak şebeke korumasında büyük bir ilerleme sağlamaktadır.
- Evrensel Hassasiyet İyileştirmesi: Direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcıları, çeşitli hata türlerinde röle hassasiyetini sürekli olarak artırmakta ve bu da onların çok yönlülüğünü ve farklı senaryolarda uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.
- Hassasiyet Üst Sınırı: Direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcıları ile hassasiyet iyileştirmesinin bir üst sınırı vardır ve bu eşik aşıldığında ek iyileştirmeler gözlenmemektedir.

Yapılan bu araştırmalar, direnç tipi süperiletken hata akımı sınırlayıcılarının akım diferansiyel koruma ile etkili bir şekilde koordine olduğunu ve şebeke korumasını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir[5].

"Improved differential relay for busbar protection scheme with saturated current transformers based on second order harmonics" isimli makalede, güç sistemlerinde kritik bir öneme sahip olan baraların korunması için yeni bir diferansiyel röle şeması önerilmiştir. Baraların, birçok devrenin bağlantı noktası olması nedeniyle, diferansiyel koruma rölesinin hatalı çalışması sonucunda sağlıklı devrelerin kesilmesine yol açabilmektedir. Bu çalışmada, dalların akım transformatörlerinin ikincil akımlarının ve diferansiyel akımın ikinci dereceden harmonik bileşenini çıkarmak için Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform - FFT) tekniği kullanılmıştır. Önerilen şema, diferansiyel akımı eşik akımla karşılaştırarak bir işletim sinyali ve akım transformatörlerinin ikincil akımlarının ikinci dereceden harmoniklerinin cebirsel toplamını diferansiyel akımın ikinci dereceden harmonik bileşeni ile karşılaştırarak bir kısıtlama sinyali üretir. Önerilen şema, PSCAD kullanılarak simüle edilmiş ve test edilmiştir. Dalların akım transformatörlerinin doygunluğu, yük empedansı, kalıcı manyetik akı ve hata direnci kontrol edilerek sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen şemanın iç hatalara çok hızlı tepki verdiğini ve dış hatalara karşı yüksek güvenlik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu şema, sinyal işleme için basit ve yaygın olarak kullanılan FFT tekniğini kullandığından, diğer önerilen şemalara göre daha basit ve sağlamdır[6].

"Differential relaying scheme for tapped transmission line connecting UPFC and wind farm" isimli makalede, Birleşik Güç Akışı Kontrol Cihazı (Unified Power Flow Controller - UPFC) ve rüzgar çiftliğini içeren iletim hattı koruması için dalgacık ve Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform - DFT) tabanlı bir diferansiyel röle şeması önerilmektedir. Bu şema, hesaplanan işletim ve kısıtlama sinyallerinin belirlenen eşik değerlerine göre açma sinyalini vermek veya baskılamak üzerine çalışmaktadır. Önerilen diferansiyel şema, arıza yerindeki geniş değişiklikler, arıza direnci, arıza başlangıç açısı, kaynak empedansı ve ters güç akışı dahil olmak üzere, UPFC ve rüzgar çiftliği parametrelerindeki değişiklikleri içeren hataları tespit etmek ve sınıflandırmak için doğrulanmıştır. Bu röle şemasının, tek uçlu veri kullanan mesafe röleleme şemasına kıyasla birim koruma sağlama konusunda oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir. Test sonuçları, önerilen röleleme şemasının iç ve dış hataları arıza başlangıcından itibaren iki döngü içinde ayırt etmede yüksek seçiciliğe sahip olduğunu göstermektedir[7].

"New Overcurrent Relay Coordination Method Through Time Intervals to Enhance Microgrid Protection" isimli makalede, mikro şebekelerin dinamik koşullarının, elektrik şebekesinin kullanıcılarına güvenilir ve güvenli güç sağlaması için yeni stratejiler bulmayı gerektirdiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada sunulan formülasyon, yönlü aşırı akım rölesinin birincil ve yedek fonksiyonları için önceden belirlenmiş zaman aralıkları boyunca koordinasyonunu garanti etmektedir. Röleler arasındaki işlevsel bağımsızlık, her zaman eğrisinin zaman aralıklarına uyacak şekilde hesaplanmasıyla elde edilir. Önerilen algoritma ile elde edilen geleneksel olmayan zaman eğrileri, önceden belirlenmiş çalışma aralıklarına uyum sağlamak için gerekli esnekliği sunmaktadır. Sonuçlara göre, önerilen koordinasyon yöntemi, incelenen güç sistemlerinde röleler için daha kısa çalışma süreleri göstermekte ve röleler arasındaki çalışma süreleri benzer olduğundan, birincil ve yedek koruma fonksiyonları için eşit bir profil sergilemektedir. Önerilen koordinasyon yöntemi, topolojik değişiklikler ve ada oluşumu gibi ağın dinamik operasyonları için çok avantajlıdır, çünkü sadece etkilenen rölelerin ayarlarının güncellenmesi gerekmekte ve bu durum incelenen vakalarda geleneksel koordinasyon yöntemlerinden daha düşük çalışma süreleri sağlamaktadır. Önerilen koordinasyon yöntemi, mikro şebekelerin yüksek dinamik çalışma koşulları nedeniyle uygulanmış olup, alt iletim veya dağıtım sistemleri gibi diğer elektrik sistemlerine de uygulanabilir[8].

"High-Speed Algorithm for Detecting the Moment of Mode Change in Protection Based on the Differential Principle" isimli makalede, mevcut yöntemlerin mod değişikliklerini tespit etmede diferansiyel koruma ve otomasyonun tüm özelliklerini tam olarak sağlamadığı belirtilmektedir. Çalışmada geliştirilen ve otomatik korelasyon fonksiyonuna dayanan algoritma, diferansiyel korumanın çalışma süresini 3 milisaniyenin altında tutarak doğru çalışmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Geliştirilen algoritmanın güvenilirliği, elektrik ekipmanlarının farklı çalışma modlarına bağımlı değildir ve bu özelliğiyle mevcut yöntemlere göre daha avantajlıdır. Bu çalışma, röle koruma ve otomasyon cihazı geliştiricileri için pratik bir öneme sahiptir. Ayrıca, geçici kısa devre koşullarında mevcut diferansiyel koruma algoritmalarını iyileştirme ve röle ile korumanın özelliklerini geliştirme potansiyeline sahiptir[9].

"Relay algorithm for STATCOM compensated line using differential current ratio" isimli makalede, STATCOM (Static Synchronous Compensator) ile dengelenmiş iletim hattı için her iki uç akımını kullanan bir koruma algoritması önerilmektedir. Koruma kararları için her iki uç akımının oranının büyüklük ve açı bilgisi kullanılmaktadır. Algoritmanın performansı, farklı arıza türleri, arıza konumları, arıza direnci, hat uzunluğu, senkronizasyon hataları, kanal gecikmesi, STATCOM konumu, akım transformatörü doyumu ve dengeleme seviyeleri gibi çeşitli durumlar için Western System Coordinating Council (WSCC) 9-baralı standart bir sistemde test edilmiştir. Önerilen yöntem ayrıca, Hindistan enerji şebekesinde 400 kV'luk bir iletim hattında kaydedilen arıza verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Önerilen algoritmanın mevcut şemalarla karşılaştırmalı değerlendirmesi doğru bulunmuştur. GPS destekli yüksek hızlı iletişim altyapılarına sahip modern enerji sistemlerinde, önerilen algoritmanın pratik uygulamalar için uygun olduğu görülmüştür[10].

"Fault Detection and Location of Photovoltaic Based DC Microgrid Using Differential Protection Strategy" isimli makalede, yeni bir diferansiyel akım tabanlı arıza tespiti ve mesafe hesaplama şeması önerilmektedir. Bu çözüm, DC kablo hataları ve fotovoltaik seri ark hatası için aynı diferansiyel akım ifadesine dayanan hızlı ve etkili arıza tespiti ile doğru arıza yeri hesaplamasını içermektedir. Makale, Moore-Penrose sahte ters tekniğine dayanan yeni bir ayrık zaman çerçevesi, yinelemeli olmayan, hızlı ve doğru arıza sınıflandırma ve arıza mesafesi hesaplama

şeması önermektedir. Bu koruma şeması, şebeke ile bağlantılı çoklu fotovoltaik tabanlı çok terminalli doğru akım düşük gerilim dağıtım ağı için önerilmiştir. Önerilen DC mikro şebeke sistemi, koruma etkinliğinin doğrulanması amacıyla çeşitli arızalara (fazdan faza, fazdan toprağa) maruz bırakılmıştır. En kötü senaryo olarak, fotovoltaik sistemin uygun topraklamadan yoksun olduğu durumdaki DC ark arızası sunulmuştur. MATLAB/Simulink platformunda yapılan kapsamlı bir vaka çalışması yapılmıştır. Bu DC korumanın doğrulaması, fotovoltaik seri ark hataları için TMS320C6713 DSP tabanlı test tezgahında gerçekleştirilmiştir. Önerilen hızlı tespit ve arıza mesafesi hesaplama şemasının verimliliği için açma süresi (Ts) ve yüzde hata dikkate alınmıştır[11].

"A Current Transformer (CT) Saturation Detection Method for Bus Differential Protection" isimli makalede, dış arızalar sırasında akım transformatörü doygunluğunu tespit etmek için devir katsayısı ve arıza başlangıç zamanını kullanan bir yöntem önerilmektedir. Devir katsayısı ve arıza başlangıç zamanı, anlık akım sinyallerinden hesaplandığı için, önerilen teknik akım transformatörü doygunluğunu simülasyon çalışmasında gösterildiği gibi önemli bir zaman gecikmesi olmadan tespit edebilmektedir. Alınan sonuçlar, önerilen yöntemin hem hızlı hem de geç akım transformatörü doygunluğu durumlarında, doygunluğun ciddiyetine bakılmaksızın etkinliğini göstermektedir. Ayrıca önerilen yöntem, herhangi bir fazör miktarı kullanmadığı için fazör hesaplamasının getirdiği hesaplama yükünü ortadan kaldırmaktadır[12].

"A Current Transformer Saturation Identification Method of Transmission Line Based on Current Sample Data" isimli makalede, iletim hatlarındaki akım transformatörü doygunluğunu tespit etmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Akım diferansiyel koruma sistemlerinin performansı, akım transformatörü özelliklerinden etkilenmektedir ve akım transformatörü doygunluğu, akım dalga şekillerinde bozulmalara ve hatalı çalışmalara neden olmaktadır. Mevcut yöntemler arasında ayar değerinin yükseltilmesi, akım diferansiyel korumasının engellenmesi ve doygunluk akımı telafisi yer almaktadır. Çeşitli tespit yöntemleri akım dalga şekli özellikleri, akım harmonik bileşeni, dalgacık analizi, matematiksel morfoloji, Hilbert dönüştürücü, Yerel Ortalama Ayrıştırma (Local Mean Decomposition - LMD) ve parametre tanımlamasını içermektedir. Ancak, bu yöntemler iç veya dış arızalardan kaynaklanan akım transformatörü doygunluğunu tespit edememektedir

ve duyarlılıkları örnekleme frekansı ve veri penceresi tarafından etkilenmektedir. Önerilen yöntemde, hattın iki tarafındaki akım örnekleme verileri karşılaştırılarak akım transformatörü doygunluk tespit düzlemi oluşturulmuştur. Dış arızalar, iç arızalar ve dış arızalardan kaynaklanan akım transformatörü doygunluğu düzlemde farklı bölgelerde yer almaktadır. Bu yöntem, akım transformatörü doygunluğunu hassas ve hızlı bir şekilde tespit edebilmekte ve veri penceresi uzunluğundan etkilenmemektedir. Bu çalışma, iletim hattı koruma sistemlerinin performansının artırılması ve akım transformatörü doygunluğunun doğru tespiti üzerine önemli katkılar sunmaktadır[13].

"CT Saturation Effects on Performance of Digital Overcurrent Relays" isimli makalede, IEEE PSRC (Power System Relaying Committee) tarafından yayınlanan teoriye dayanarak, bir aşırı akım rölesinin yanıtını değerlendirmek amacıyla MATLAB'de verimli ve doğru bir akım transformatörü modeli uygulanmıştır. Bu model, aynı parametrelerle yapılandırılmış Gerçek Zamanlı Dijital Simülatör (Real Time Digital Simulator - RTDS) donanım akım transformatörü modelinin geçici davranışıyla karşılaştırıldığında başarılı bir yanıt göstermiştir ve benzer akım transformatörü sinyal tepkileri sunmuştur. İki yöntem arasındaki röle zaman operasyon gecikmesinde gözlemlenen küçük fark, matematiksel akım transformatörü modellerinin aynı olmaması nedeniyle kabul edilebilir düzeydedir. Ancak, her iki yöntemde de doygunluğun aşırı akım rölesi yanıtı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Düşük seviyeli simetrik arıza akımı ve standart yük değerleri dikkate alındığında, röle operasyon zaman gecikmesi çok kısa olmuş ve akım transformatörü doygunluğu altında röle operasyonunda sorun yaratmamıştır. Ancak, aşırı akım rölesi yanıtı, yüksek seviyeli arıza akımına, arıza akımındaki DC bileşene, yüksek X/R oranına, standart yükün katlarına ve çekirdekte kalan manyetik akıya maruz kaldığında akım transformatörü doygunluğundan büyük oranda etkilenmiştir. Bu makale, belirli bir uygulama için akım transformatörü performansının sistem koşullarına bağlı olduğunu ve doygunluk etkilerini değerlendirmek amacıyla IEEE standardı C37.110-2007 tarafından tanımlanan kriterlere uygun olması gerektiğini göstermektedir. RTDS tarafından gerçekleştirilen donanım içi döngü simülasyonu, rölelerde test için hızlı ve etkili bir yöntem olarak kanıtlanmış olup, testlerin daha fazla tekrarlanabilirliğini ve akım

transformatörü doygunluğundan dolayı bozulmuş dalga şekillerinin gerçek zamanlı analizini sağlamaktadır[14].

"Improvement of Differential Protection Performance by External Faults Associated with a Current Transformer Saturation" isimli makalede, koruma sistemlerinin akım transformatörünün ikincil tarafında birincil akımın doğru bir şekilde yeniden üretilmesini gerektirdiği ve demir çekirdekli akım transformatöründe doygunluğun yaygın bir sorun olduğu vurgulanmaktadır. Akım transformatörü doygunluğu, akım ölçümünde yanlışlıklara yol açar ve bu nedenle koruma röleleri ve akımı giriş sinyali olarak kullanan kontrol cihazlarının yanlış çalışmasına neden olabilir. Bu çalışma, akım transformatörü doygunluğunun diferansiyel koruma üzerindeki etkisini önlemek için akım transformatörünün ikincil tarafına metal oksit varistör (MOV) elemanı ekleyerek verimli ve pratik bir çözüm sunmaktadır. EMTP (Electromagnetic Transient Program) - ATP (Alternative Transients Program) kullanılarak yapılan simülasyon çalışması, akım transformatöründe doygunlukla ilişkili bir arıza, koruma bölgesi dışında meydana geldiğinde diferansiyel korumanın kararlı kaldığını göstermiştir. Bu çalışmada, akım transformatöründe doygunlukla ilişkili olarak koruma bölgesi dışında bir arıza meydana geldiğinde, doğrusal olmayan metal oksit varistör elemanı kullanılarak diferansiyel koruma performansının iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Çözüm, EMTP-ATP kullanılarak test edilmiş ve doğrulanmıştır. Önerilen çözüm basittir ve tüm nesil diferansiyel röleler ve gelecekteki röle nesilleri için uygulanabilir. Bu pratik çözümün koruma sistemlerine entegrasyonu, koruma performansını iyileştirir ve birçok işletmede meydana gelebilecek yanlış açmaları önler, böylelikle hizmet elemanlarının devre dışı kalmasının ve dolayısıyla önemli ekonomik kayıpların meydana gelmesinin önüne geçilmiş olunur[15].

"The Impact Analysis of Current Transformer's Saturation to Relay Protection" isimli makalede, akım transformatörü doygunluğunun türleri ve temelleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmakta ve bu durumun çeşitli röle koruma cihazlarına olan etkisi analiz edilmektedir. Ayrıca, bir transformatör merkezinde akım transformatörü doygunluğu nedeniyle yüksek gerilim hattının aşırı açma arızasının bir örneği incelenmiştir. Bu etki analizinin araştırması, gelecekte bu tür arızaları doğru bir şekilde tanımlamak, bulmak ve çözmek için bazı temeller sunmaktadır. Güç sistemi ana şebekesi, kentsel güç şebekesi ve kırsal şebeke inşaat ve yenileme projelerinin

uygulanması ile sistemin kısa devre kapasitesi artmaktadır. Bazı akım transformatörleri, büyük kapasiteli operasyon gereksinimlerini karşılayamamakta ve akım transformatörü doygunluğu nedeniyle röle koruma cihazlarının yanlış çalışması veya yanlış kullanımına neden olmaktadır. Ancak, finansal kısıtlamalar ve diğer nedenlerden dolayı, çalışan devre kesicileri, akım transformatörlerini ve röle koruma cihazlarını tüm güç şebekesinde yenilemek mümkün değildir. Bu nedenle, sistemin kısa devre kapasitesinin yeniden hesaplanması, akım transformatörü doygunluk oranının incelenmesi ve röle koruma cihazlarının doygunluğa karşı direnç yeteneğinin analiz edilmesi gerekmektedir. Böylece, uygun önlemler alınarak röle koruma cihazlarının doğru çalışması ve güç şebekesinin güvenli ve istikrarlı çalışması sağlanmalıdır[16].

"Impact and Opportunities of Medium-Voltage DC Grids in Urban Railway Systems" isimli makalede, güç elektroniği bileşenlerinin sayısındaki artış nedeniyle orta gerilim doğru akım şebekelerinin mevcut alternatif akım dağıtım şebekelerine kıyasla iyi bir alternatif olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada, gelecekteki orta gerilim doğru akım dağıtım şebekelerine bağlanan kentsel demiryolları için transformatör merkezlerinin avantajları ve ek esneklikleri araştırılmıştır. Olası topolojiler sunulmuş ve verimlilikler karşılaştırılmıştır. Kentsel demiryolu sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla, mevcut orta gerilim alternatif akım şebekesinin orta gerilim doğru akım şebekesine dönüştürülmesi önerilmektedir. Bu adım, demiryolu işletmecisinin rejeneratif enerjiyi daha fazla kullanmasını ve normal operasyon sırasında genel verimliliği artırmasını sağlayacaktır. Ayrıca, enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları orta gerilim doğru akım şebekesine daha az çaba ile entegre edilebilir ve daha verimli işletilebilir. Bunun yanı sıra, orta gerilim doğru akım şebekesi ile hızlı şarj istasyonlarının kurulumu daha az karmaşıktır ve hızlı bir şarj altyapısının oluşturulmasını sağlar. Ancak, bu yaklaşım, makalede tanıtılan ve modellenen orta gerilim doğru akım ile beslenen bir transformatör merkezi gerektirmektedir[17].

"Investigating the Best Topology for Traction Power Substations in a Medium Voltage DC Railway Electrification System" isimli makalede, orta gerilim doğru akım çekiş gücü transformatör merkezleri için tristör dönüştürücü, kaskadlı iki seviyeli gerilim kaynağı dönüştürücü (voltage source converter - VSC) ve tam köprülü alt modüllere sahip modüler çok seviyeli dönüştürücü (Modular Multilevel

Converter - MMC) tasarlanmış ve karşılaştırılmıştır. Her topolojinin nominal değerleri, gerekli yarı iletken bileşenlerin sayısı ve güç verimliliği analitik olarak değerlendirilmiştir.Analitik hesaplamalar, iletim özelliklerinin doğrusallaştırılması, sıcaklıktan bağımsızlık ve veri sayfalarında belirtilen maksimum veya tipik değerlerin kullanılması gibi yaklaşık değerler içermektedir. Bununla birlikte, bu hesaplamalar topolojilerin karşılaştırılması için yararlı bir temel sağlamaktadır. Karşılaştırmada dikkate alınması gereken başka faktörler de vardır. Örneğin, yüksek sayıda seri yarı iletkenin bağlanması, gerilim bölücü devreler ve doğru kapı devreleri gerektirir, bu da dönüştürücünün maliyetini ve tasarım çabalarını artırır. Ayrıca, doğru bir karşılaştırma yapmak için, topolojiler doğru akım ve alternatif akım tarafında aynı dalga formu kalitesinde karşılaştırılmalıdır. Bu makalede sunulan analizlere ve mevcut arka plana göre, her topolojinin performansı karşılaştırılmıştır. Doğru akım tarafındaki arıza akımlarını sınırlama yeteneği, orta gerilim doğru akım çekiş gücü transformatör merkezlerinde oldukça istenen bir durumdur, çünkü bu, koruma sisteminin daha düşük akım derecelerine ve maliyetlere sahip doğru akım devre kesicileri kullanmasını sağlar. Bu nedenle, doğru akım arıza akımlarını tristör kapı sinyalleri ile kontrol edebilen yüksek verimli tristör dönüştürücüler, orta gerilim doğru akım çekiş gücü transformatör merkezleri için uygun adaylardır. Ancak, doğru akım gerilimi düzenlendiğinde güç faktörü ve harmonik kalitesi önemli ölçüde azalır. Diğer yandan, orta gerilim doğru akım demiryolu elektrifikasyon sistemi, güç akışı ve gerilim profilinin kontrol edilmesi gereken çok terminalli bir doğru akım ağıdır. Tam köprülü alt modüllere sahip modüler çok seviyeli dönüştürücüler, bu tür bir uygulama için iyi seçeneklerdir[18].

"VSC-Based MVDC Railway Electrification System" isimli çalışmada, birbirine bağlı doğru akım alt sistemlerinden oluşan bir demiryolu sistemi öngörülmektedir. Bu sistem, toplu alternatif akım iletim sistemi, mobil yükler (trenler), yenilenebilir enerji jeneratörleri ve depolama cihazları arasında enerji alışverişi yapabilen, esnek ve modüler bir yapıya sahiptir. Bu şekilde demiryolu altyapısı, geniş bir coğrafi alana yayılan bir doğru akım süper mikro şebeke olarak görülebilen dağıtılmış bir enerji merkezi haline gelir. Önerilen paradigmanın temel yapı taşı, doğru akım otobüsü ile alternatif akım sistemleri (hem harici alternatif akım şebekesi hem de lokomotif motorları) arasında doğal bir arayüz oluşturan gerilim kaynağı

dönüştürücüsüdür. Bu çalışma, demiryolu elektrifikasyonu için yeni bir orta gerilim doğru akım paradigmasını önermenin yanı sıra, hem 3 kilovolt hem de 24 kilovolt doğru akım sistemlerinde sorunsuz çalışmak üzere tasarlanmış iki yeni lokomotif tasarımını da tanıtmaktadır. Bu lokomotiflerde bulunan bazı yapı taşları, yüksek hızlı ve yüksek gerilimli güzergahların şehir içi ulaşım sistemlerine yeterince yakın olduğu yerlerde yararlı olabilecek doğru akım-dönüştürücü köprüleri tarafından paylaşılmaktadır. İspanya'daki mevcut bir yüksek hızlı demiryolu üzerinden niteliksel ve sayısal olarak gösterilen bu çerçevenin avantajları, aynı trafik için daha az kurulu güç ve demiryolu altyapısının karmaşıklığı, daha basit ve modüler lokomotif tasarımları ve alternatif akım iletim şebekesine daha dostça entegrasyon gibi unsurları içermektedir. Olası dezavantajlar arasında ise alternatif akım-doğru akım ve doğru akım-doğru akım dönüştürücülerin hala geliştirilme aşamasında olması ve daha maliyetli koruma ve anahtarlama ekipmanlarının devreye alınması gerekliliği bulunmaktadır[19].

"Medium-Voltage DC Electric Railway Systems: A Review on Feeding Arrangements and Power Converter Topologies" isimli makalede, orta gerilim doğru akım demiryolu sistemleri için önerilen teknolojik çözümler incelenmiştir. Elektrifikasyon ağı tasarımı için iki ana yaklaşım bulunmaktadır:

1. düşük gerilim doğru akım veya orta gerilim alternatif akım üst hatları ile birlikte orta gerilim besleyiciler kullanmak

2. orta gerilim doğru akım üst hatları kullanmak.

Makalede, literatürde sunulan topolojilerin demiryolu çekiş sistemlerinin gereksinimlerini ne ölçüde karşıladığı değerlendirilmiştir. Çekiş gücü transformatör merkezleri ve güç elektronik transformatörler için yüksek güçlü alternatif akım-doğru akım dönüştürücülerin araştırmaları, önerilen çözümlerin avantajlarını ve dezavantajlarını göstermiştir. Orta gerilim doğru akım demiryollarında bazı önemli sorunlar vurgulanmıştır. Literatürde kontrol şemaları, stabilite analizi ve korozyon sorunları incelenmiş olmasına rağmen, güç elektronik dönüştürücüler ile sinyalizasyon sistemi arasındaki etkileşim, uygun koruma ekipmanlarının geliştirilmesi (örneğin, yüksek akımlı orta gerilim doğru akım devre kesicileri) ve ekonomik analizler daha fazla dikkat gerektirmektedir. Örneğin, orta gerilim alternatif akım ve orta gerilim doğru akım demiryolları arasında maliyet

karşılaştırması yapmak, orta gerilim doğru akım demiryollarının fizibilitesini ve potansiyel faydalarını incelemeye yardımcı olacaktır. Gelecekteki araştırmaların yönü, güç elektronik çekiş transformatörlerinde geniş bant aralıklı yarı iletkenlerin uygulanmasına odaklanmalıdır. Bu, çok modüler bir sistemde gerekli cihaz sayısını azaltacak ve verimliliği artıracak, güvenilirliği tehlikeye atmadan gerçekleştirilecektir. Orta gerilim doğru akım elektrifikasyon sistemleri, demiryolu endüstrisi için yenidir. Bu nedenle, bunların kurulumu ve işletimi için yeni düzenlemeler ve standartlar geliştirilmesi gerekmektedir. Belirtilen tüm alanlarda, diğer orta gerilim doğru akım ağlarından (örneğin, orta gerilim doğru akım dağıtım ağları) elde edilen bilgi, gelecekteki orta gerilim doğru akım demiryolu elektrifikasyon sistemlerinin tasarımı için başlangıç noktası olarak kullanılabilir[20].

"The Analysis of Relay Protection Communication Mechanism Based on IEC61850" adlı çalışmada, geleneksel röle koruma sistemlerinin kablo ile bağlantılı sinyal iletimine dayandığı ve bu durumun farklı işlevler ve uygulamalar tarafından belirlenen birçok izole cihazdan oluşan bir yapı oluşturduğu vurgulanmaktadır. Farklı işlev ve profesyonel bilgilerinin ayrılması, röle koruma cihazlarının özel mikro yapısını ve özel ikincil kabloları gerektirmektedir. IEC61850, nesne yönelimli modelleme teknolojisine dayanan, iletişim modeli, veri toplama, veri formatı, iletişim protokolü ve veri uygulaması gibi konularda röle koruma iletişimini belirleyen bir standarttır. Bu standart, farklı uzmanlık alanları, uygulamalar ve bileşenler arasında bilgi tanıma, bilgi alışverişi ve veri paylaşımını gerçekleştirmeyi sağlar. Bu makalede, Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması (Substation Configuration Description - SCD) belgesinin yapısı tanıtılmış, SCD'nin oluşumu ve SCD ile akıllı elektronik cihazların (IED) yapılandırılması süreci analiz edilmiştir. Dijital transformatör merkezlerinin bilgi paylaşımı iletişimini incelemek amacıyla, röle koruma Genel Nesne Yönelimli Trafo Merkezi Olayları (Generic Object Oriented Substation Events - GOOSE) mesajları iletişim örneği olarak kullanılmıştır. Koruma cihazı örnekleme, iletim, veri işleme, GOOSE mesajlarını iletme ve uyarlanmış röle koruma iletişim süreci analiz edilmiştir. Son olarak, tak-çalıştır dinamik geçişin yapılandırılabilir röle koruma varsayımı ortaya konulmuştur. Dijital transformatör merkezlerinin en büyük avantajı bilgi paylaşımıdır ve koruma bilgilerinin paylaşımı, röle koruma mimarisi ve

organizasyon şeklinde devrim yaratacaktır. IEC61850 standardına göre oluşturulan SCD dosyası, dijital transformatör merkezi röle koruma iletişim mekanizmasının çekirdek içeriğidir ve farklı cihazlar, farklı uygulamalar ve koruma bilgilerinin farklı konumları arasında karşılıklı tanıma ve karşılıklı iletişim için bir iletişim köprüsü oluşturmaktadır[21].

"A New Virtual Relay Protection Simulation System of Substation Based on IEC61850 Standard" isimli çalışmada, geleneksel ikincil devrelerin yerine iletişim ağı kullanan akıllı transformatör merkezlerinin, ağdaki sanal dijital sinyalin fiziksel elektrik sinyalinin yerini aldığı ve işlev bilgi sinyali ile iletişim ağı kablolaması arasında bire bir karşılık gelmediği vurgulanmaktadır. Akıllı transformatör merkezlerinde, akıllı elektronik cihazlar yaygın operasyonel platform olarak kullanılır ve işlevsel yapılandırma durumu cihazlarda yansıtılamaz. Geleneksel koruma simülasyon sistemleri donanıma dayalıdır ve koruma mekanizmalarının iç süreçlerini göstermek zordur. Bu makalede, IEC61850 standardına dayalı yeni bir sanal röle koruma simülasyon sistemi önerilmektedir. Bu sistem, sanal devreleri ve koruma sinyallerini görsel olarak gösterir, gerçek zamanlı kapalı döngü testi ile tam bir arıza durumunu simüle edebilir, koruma prensiplerinin ve ikincil devrelerin dinamik mantıksal süreçlerini gösterir ve bu da koruma eğitimi için faydalı olabilir. Yapılan araştırmada, IEC61850 standartlarına dayalı yeni bir sanal röle koruma simülasyon sistemi önerilmektedir. Bu sistem, akıllı transformatör merkezlerinde birincil ve ikincil sistemlerin koruma operasyonlarını gösterebilir ve iç prensipleri dinamik grafikler şeklinde sunabilir, farklı cihazlar arasındaki iletişim sinyallerini görsel olarak gösterebilir. Akıllı transformatör merkezinin iletişim ağı IEC61850 standartlarına dayalı olduğu ve simülasyon sistemi öğretim ve eğitim amaçlı inşa edildiği için, bu makale simülasyon sistemi yapısal modelleme ve sanal koruma sisteminin bileşen yapısı hakkında yeni fikirler sunmaktadır. Bu sistem, daha kapsamlı koruma cihazı modelleri sunar ve farklı koruma yapılandırmalarına entegre edilebilir. Grafiksel çalışma ortamına dayalıdır, çalışma arayüzü basit ve net, çıktılar ise anlaşılır ve açıktır. Ancak, bu sistem iki veya daha fazla koruma cihazında koruma yapılandırması yapamaz ve bitişik bileşenlerin yedek koruma eylem durumunu kontrol edemez. Gelecekte, arıza teşhis sistemi ile bağlantı kurmak için bu durumun ele alınması gerekmektedir[22].

"Optimal Coordination of Protective Relays" isimli makalede, elektrik dağıtım sisteminin hayati bir parçası olan iletim hatları için mesafe röleleri ve yönlü aşırı akım rölelerinden oluşan koruma şemaları ele alınmıştır. Koruyucu rölelerin koordinasyonu, sistemin korunması açısından çok önemlidir. Hem mesafe hem de aşırı akım rölelerini dikkate alarak aşırı akım rölelerinin optimum ayarlarını otomatik olarak belirleyen bir yöntem sunulmuştur. Ayrı röle hesaplamaları seçicilik kaybına yol açabilir. Her bir aşırı akım rölesi için çeşitli röle karakteristikleri göz önünde bulundurulmuş ve bunlardan en iyisi Genetik Algoritma(Genetic Algorithm - GA) kullanılarak optimal röle koordinasyonu için seçilmiştir. Yöntem, altı beslemeli bir örnek güç ağı üzerinde faz toprak ve çift hat toprak arızalar için test edilmiş ve elde edilen sonuçlar yöntemin doğru ve verimli olduğunu göstermiştir[23].

"Design and Operation of the IEC61850 9-2 Process Bus Used for the Protection System" isimli çalışmada, dijital transformatör merkezlerinin ve IEC61850 standardının koruma rölelerinin geleceği için temel oluşturduğu vurgulanmaktadır. IEC61850 standardı, "Transformatör Merkezlerinde İletişim Ağları ve Sistemler", dijital transformatör merkezlerinin koruma ve kontrol şemaları için iletişim sisteminin temelini sağlamaktadır. IEC61850 standardında bölüm 9-2, birincil ekipman ile bölge seviyesindeki akıllı elektronik cihazlar (IEDs) arasında veri transferi sağlayan Ethernet tabanlı iletişim ağı olan veri ağı yolunu tanımlar. Bu makalede hem IEC61850 hem de geleneksel röle kullanarak bir besleyici koruma şeması üzerinde yapılan performans testlerinin sonuçlarını rapor edilmiştir. Ayrıca, süreç otobüsündeki veri, transfer trafiği kapasitesini aştığında ve veri paketlerinin kaybolduğu durumlarda IEC61850 rölesinin performansını inceleyen testler gerçekleştirilmiştir. Dijital transformatör merkezi için iletişim standardı olan IEC61850'nin tanıtılması, gelecekteki koruma ve kontrol sistemleri için temel sağlamıştır. Alternatif iletişim yolu mimarileri ve şirketin işletme performans gereksinimlerine dayanarak, yıldız yapı incelenmek üzere seçilmiştir. Bir RTDS gerçek zamanlı simülatör kullanarak ekstra yüksek gerilim iletim sistemi modellemesi ile yıldız mimarisi kullanan bir IEC61850 koruma şemasının performansı araştırılmıştır. Belirli şema, yerel uçta bir IEC61850 rölesi ve uzak uçta benzer işletim prensiplerini kullanan geleneksel bir röle ile izinli erişim altı koruma şemasını kullanmıştır. Testler, iki rölenin çok benzer bir performansa sahip

olduğunu ve benzer açma süreleri ile tepki verdiğini göstermiştir. Süreç veri yolu aşırı yüklendiğinde IEC61850 rölesinin performansını incelemek için yapılan testler, besleme yolu veri hacmini yönetemediğinde koruma performansının tutarlı olduğunu ve açma sürelerinin arttığını göstermiştir[24].

"Development of Dynamic Test System for Digital Relay Protection Based on IEC61850 Standards" isimli çalışmada, dijital transformatör merkezlerinde elektronik akım transformatörleri ve IEC61850 seri standartlarının benimsenmesiyle birlikte, geleneksel analog sinyallerin yerini dijital sinyallerin aldığı vurgulanmaktadır. Mevcut simülasyon sistemleri bu tür arayüzler sunamadığı için, dijital transformatör merkezlerinde elektronik akım transformatörlerine dayanan ikincil cihazlar test edilememekte ve araştırılamamaktadır. Bu çalışmada, gerçek zamanlı dijital röle koruma için bir test sistemi tanıtılmaktadır. Çin Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen ADPSS (Advanced Digital Power System Simulator - Gelişmiş Dijital Güç Sistemi Simülatörü) sistemine ikincil arayüz eklenerek, IEC61850 standartlarına dayalı kapalı döngü bir test sistemi oluşturulmuştur. Yapılan testler, sistemin dijital transformatör merkezlerinin uygulanmasını iyileştirmede önemli olduğunu ve yüksek kullanım değerine sahip olduğunu doğrulamaktadır. IEC61850 iletişim standardına dayalı dijital transformatör merkezi ekipmanlarının test ihtiyaçlarını karşılamak için, orijinal ADPSS'ye veri dönüşüm arayüzü eklenmiş ve yeni koruma cihazlarının kapalı döngü testi gerçekleştirilmiştir. Yeni platformda 220 kV iletim hattının elektromanyetik simülasyon modelleri oluşturulmuş ve enerji standartlarına göre çok sayıda simülasyon testi yapılmıştır. Bu, sistemin dijital korumalar için gerekli ikincil özellikleri ve test ortamını sağlayabileceğini ve çok yönlülüğe sahip olduğunu göstermiştir. Yeni kapalı döngü gerçek zamanlı simülasyon sistemi, yaklaşan dijital transformatör merkezi inşası için deneysel bir araştırma aracı sunmakta olup, dijital koruma ve diğer ikincil ekipmanların teknik performansını ve güvenilirliğini artırmada pratik bir değere sahiptir[25].

"Research of Substation Area Protection Test Based on Relay Protection Collaborative Testing System" isimli makalede, yeni nesil akıllı transformatör merkezlerinin önemli özelliklerinden biri olan transformatör merkezi alan koruma uygulaması ele alınmaktadır. Transformatör merkezi alan koruması, BZT(Barium Zirconate Titanate) cihazları, hat korumaları ve baralar arası diferansiyel

korumaları içeren bir set içinde yer almakta ve yerinde korumalar için yedeklilik sağlamaktadır. Transformatör merkezi alan korumasının yüksek entegrasyonlu doğası gereği, farklı tip ve üreticilerden koruma cihazları arasında işbirliği performansı için daha yüksek gereksinimler ortaya çıkmaktadır. Bu makalede, akıllı röle koruma işbirliği test sistemi (Intelligent Relay Protection Collaborative Testing System - IRPCTS) tabanlı yeni bir transformatör merkezi alan koruma yöntemi sunulmaktadır. SCD dosyalarının eşleşmesi, GOOSE sanal terminal ile ilişkili özellikler ve akıllı elektronik cihazlar (IEDs) arasındaki koordinasyon iş performansı, akıllı röle koruma işbirliği test sistemi platformuna dayalı basit bara koruma testi ile doğrulanmıştır. Yeni nesil akıllı transformatör merkezlerinde transformatör merkezi alan korumasının işbirliği karakteristiğini test etmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, transformatör merkezi alan koruma testlerinin gerçek röle cihazlarına ihtiyaç duymadan yapılmasını sağlar ve hata ayıklama verimliliğini büyük ölçüde artırır. Bu yöntemi kullanarak güç kesintisi olmadan akıllı transformatör merkezlerini yeniden yapılandırılabilir ve genişletilebilir[26].

1.2 Tezin Amacı

Tezin temel amacı, raylı sistem elektrik tesislerinde aşırı akım koruma rölesi ve diferansiyel röle uygulamalarının güvenlik ve sistem performansını artırma potansiyelini incelemektir. Güvenlik ve performansın sağlanması, koruma sistemlerinin etkin ve doğru bir şekilde uygulanmasıyla mümkün olacaktır. Bu amaçla, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin teknik özellikleri, çalışma prensipleri ve uygulama alanları detaylı bir şekilde incelenecektir.

Aşırı akım ve diferansiyel rölelerin raylı sistemlerde güvenlik ve güvenilirlik üzerindeki etkileri analiz edilerek, çeşitli arıza senaryoları ve bu senaryolar altında uygulanan koruma yöntemlerinin etkinliği karşılaştırılacaktır. Bu analizler, mevcut koruma stratejilerinin değerlendirilmesi ve sistem performansını artırmaya yönelik optimize edilmiş çözümler ve yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Tezin bir diğer önemli amacı, teorik bulguların pratik uygulamalarla test edilmesidir. Bu kapsamda, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin gerçek sistemler

üzerindeki performansları ölçülerek, bu rölelerin etkinliği ve güvenilirliği analiz edilecektir. Uluslararası güvenilirliğe sahip bir firmanın diferansiyel rölelerine ait saha test sonuçları paylaşılacak ve bu sonuçlar teorik bulgularla karşılaştırılacaktır. Elde edilen veriler ışığında, raylı sistem elektrik tesislerinde kullanılan koruma sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilecektir.

Ayrıca, uluslararası standartlar ve protokoller, özellikle IEC61850, incelenerek bu standartların raylı sistemler elektrik tesislerindeki koruma sistemleri ile entegrasyonunun sağladığı avantajlar değerlendirilecektir. Bu standartların kullanımı, koruma sistemlerinin güvenilirliğini ve etkinliğini artırarak, raylı sistemlerin genel performansına olumlu katkılar sağlayacaktır.

Ayrıca, ETAP simülasyon programı kullanılarak yapılan elektrifikasyon çalışmaları ve röle ayarlamaları gösterilecektir. Bu simülasyonlar, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin etkinliğini ve pratik uygulamalardaki performansını doğrulamak amacıyla kullanılacaktır.

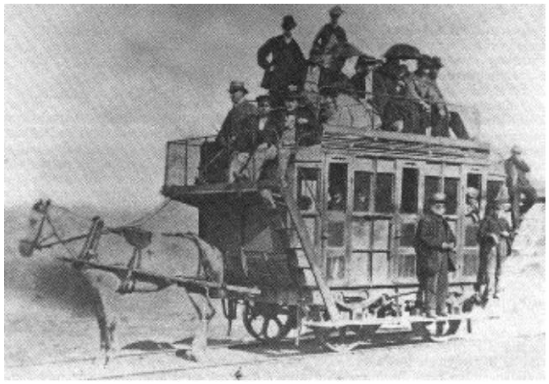
Sonuç olarak, bu tez çalışması, raylı sistemler elektrik tesislerinin daha güvenli, verimli ve güvenilir bir şekilde işletilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular ve sonuçlar, sektördeki mevcut uygulamaların iyileştirilmesine ve yeni nesil koruma çözümlerinin geliştirilmesine yönelik önemli bilgiler sunacaktır.

2
RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİ

Raylı sistemler, modern şehirlerde ulaşımı kolaylaştırmak için tercih edilen önemli sistemlerdir. Bu sistemler, sadece şehir içi değil aynı zamanda şehirlerarası ulaşım için de tercih edilmekte olup, yüksek kapasiteli çözümler sunmaktadır[27]. Raylı sistemlerin çevre dostu, hızlı ve güvenilir olması, bu sistemleri popüler bir ulaşım seçeneği yapmaktadır. Gelişmiş bir tarihe sahip olan raylı sistemler sürekli olarak yenilenmekte ve modernize edilmektedir. Günümüzde, çeşitli türdeki raylı sistemler arasında metro, hafif raylı sistem, tramvay, monoray, yüksek hızlı trenler (YHT), banliyö trenleri, maglev trenler ve tam otomatik sürücüsüz sistemler gibi birçok seçenek bulunmaktadır. Bu sistemler, kalabalık nüfuslu bölgelerde en çok tercih edilen ulaşım alternatifleridir ve şehirlerin ulaşım sorunlarına etkili çözümler sunmaktadır. Raylı sistemlerin kullanımı, şehirlerin ulaşım ihtiyaçlarına cevap verebilmek için her geçen gün artmaktadır. Bu sistemlerin avantajları ve sunduğu kolaylık nedeniyle, birçok şehir raylı sistemleri ulaşım ağlarına dahil etme hedefiyle hareket etmektedir. Bu şekilde, şehirler hem daha sürdürülebilir ve çevreci bir ulaşım seçeneği sunmakta hem de trafik sorunlarını azaltmaktadır. Genel olarak, raylı sistemler toplu taşıma alanında önemli bir yer tutmakta ve şehir yaşamını daha kaliteli hale getirmektedir.

2.1 Raylı Sistemlerin Tarihçesi

Raylı sistemlerin tarihi, 19. yüzyıla kadar uzanmaktadır. İlk kez atlarla çekilen tramvayların ortaya çıkmasıyla başlayan raylı sistemler, zamanla teknolojinin ilerlemesiyle büyük bir dönüşüm ve evrim geçirmiştir. Demiryolu ve tramvaylar, hem şehir içinde hem de şehirlerarası ulaşımda önemli bir rol oynamış ve insanların ulaşım ihtiyacını karşılamada büyük bir etkiye sahip olmuştur.



Şekil 2.1 İlk demir raylı atlı tramvay (İngiltere)

Raylı sistemlerin tarihçesi, endüstri devrimi ile daha da hız kazanmış ve büyük bir gelişme sürecine girmiştir. Bu süreçte, demiryolları ve tramvay hatları hızla yayılarak, dünya genelinde birçok şehirde kullanılmaya başlanmıştır. Raylı sistemler sayesinde, başka türlü ulaşımın mümkün olmadığı bölgelere bile kolayca erişim sağlanmış ve toplumların birbirleriyle bağlantısı artmıştır.

Günümüzde raylı sistemler, modern ve gelişmiş yapılarıyla birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Yüksek hızlı trenler, metrolar, tramvaylar ve hafif raylı sistemlerle hem kişilerin hem de yüklerin hızlı ve güvenli bir şekilde taşınması sağlanmaktadır. Ayrıca, raylı sistemler çevre dostu ulaşım seçenekleri olarak da ön plana çıkmaktadır. Az miktarda enerji kullanımı ve düşük karbon salınımıyla, sürdürülebilir ulaşımın öncüsü olarak kabul edilmektedir.

Raylı sistemlerin tarihçesi, teknolojinin sürekli gelişimiyle birlikte daha da ileriye taşınmaktadır. Yeni teknolojiler ve yenilikçi çözümlerle, raylı sistemlerin güvenlik, hız, konfor ve verimlilik açısından daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir. Gelecekte, daha hızlı tren hatları, akıllı tren sistemleri ve enerji verimliliği sağlayan çözümlerle raylı sistemlerin kullanımı daha da yaygınlaşacak ve toplumların ulaşım ihtiyaçlarına daha iyi yanıt verecektir.

Sonuç olarak, raylı sistemlerin tarihçesi önemli bir evrim geçirmiş ve günümüzde modern ve sürdürülebilir ulaşımın bir parçası haline gelmiştir. Bu sistemler, geçmişten günümüze kadar sürekli olarak gelişmekte ve toplumların hareketlilik ihtiyaçlarını karşılarken, aynı zamanda çevre dostu ve verimli bir ulaşım seçeneği sunmaktadır. Gelecekte de raylı sistemlerin daha da ilerlemesi ve yenilikçi çözümlerle donatılması beklenmekte ve toplumların hızlı, güvenli ve sürdürülebilir ulaşım ihtiyaçlarına yanıt vereceği düşünülmektedir[28].

2.2 Raylı Sistem Türleri

Raylı sistemlerin farklı yapı ve türleri bulunmaktadır. Metro sistemleri, şehir içinde hızlı ve yoğun ulaşımı sağlarken hafif raylı sistemler daha kısa mesafeli ve düşük kapasiteli taşımacılık için kullanılır. Tramvay sistemleri genellikle şehir içinde tercih edilirken, monoray sistemleri ise tek ray üzerinde ilerleyerek genellikle turistik bölgelerde kullanılır. Yüksek hızlı trenler uzun mesafelerde hızlı ulaşım imkanı sunarken, banliyö trenleri genellikle şehir içi taşımacılığı kapsar. Maglev trenler ise manyetik alanlarla hareket eder ve yüksek hızlı trenlerden farklı bir teknoloji sunar. Otomatik sürücüsüz sistemler ise geleceğin ulaşımının hedefine doğru ilerlemektedir.

2.2.1 Metro Sistemleri

Metro sistemleri, yoğun şehir trafiğini rahatlatmak ve hızlı ulaşım imkanı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Yeraltında veya yüksek platformlarda hizmet veren metro sistemleri, genellikle büyük şehirlerde tercih edilmektedir. Yolcu kapasitesi ve hızı yüksek olan bu sistemler, elektrikli motorlar yardımıyla hareket ederler. Metro hatlarında güvenlik ve sistem performansı oldukça önemlidir, bu yüzden diferansiyel ve aşırı akım röle uygulamaları bu sistemlerde çokça kullanılmaktadır. Diferansiyel röleler, hat koruması sağlayarak karşılaşılabilecek arızaları minimum seviyeye indirir, aşırı akım röleleri motorları ve hatları aşırı ve kısa devreye karşı koruyarak güvenli bir seyahat imkanı sunar [29].



Şekil 2.2 M4 metrosu (İstanbul, Kadıköy-Sabiha Gökçen Havalimanı)

2.2.2 Hafif Raylı Sistemler

Hafif raylı sistemler, genellikle kent içi ulaşımı desteklemek amacıyla kullanılan toplu taşıma sistemleridir. Bu sistemler, metro sistemlerinden daha düşük

kapasiteye sahip olup, genellikle şehir içi ulaşımında tercih edilmektedir. Hafif raylı sistemler, tramvay sistemlerinden daha hızlı ve modern bir taşıma hizmeti sunarlar. Genellikle yolcu yoğunluğunun daha az olduğu bölgelerde kullanılan hafif raylı sistemler, çevre dostu ve ekonomik bir ulaşım seçeneği olarak değerlendirilmektedir. Sürekli gelişen teknolojiyle birlikte hafif raylı sistemlerin altyapısı da sürekli iyileştirilmektedir, bu da güvenlik ve sistem performansının artırılmasına katkı sağlamaktadır [30].

2.2.3 Tramvay Sistemleri

Tramvay sistemleri, şehir içi ulaşımda önemli bir role sahip olup, raylı sistemlerin bir türü olarak kabul edilir. Yolculukların genellikle kısa ve şehir içi güzergahlarda yapıldığı tramvaylar, yaygın olarak kullanılmaktadır. Tramvay sistemlerinde yolcu taşımacılığı hedeflenirken, aynı zamanda trafiği rahatlatma ve çevreye duyarlı bir ulaşım seçeneği sunma amacı da güdülmektedir. Tramvay hatları genellikle elektrikli olduğundan, elektrik tesislerinde güvenlik ve performans ön planda tutulmalıdır. Bu bağlamda, diferansiyel röle ve aşırı akım rölesi uygulamaları, tramvay sistemlerinde güvenliği artırmak ve sistem performansını optimize etmek için büyük önem taşımaktadır [31].



Şekil 2.3 T1 tramvayı (İstanbul, Kabataş-Bağcılar)

2.2.4 Monoray Sistemleri

Monoray sistemleri, tek bir ray üzerinde hareket eden trenleri kullanan bir raylı sistem türüdür. Diğer raylı sistemlerden farklı olarak, monoray trenleri tek bir ray üzerinden ilerler ve bu sayede daha az alan kaplar. Bu sistem genellikle şehir içi ulaşımda tercih edilir çünkü yüksek yolcu kapasitesine sahiptir. Monoray trenleri, diğer trenlere göre daha yüksek hızlara ulaşabilir ve yüksek manevra kabiliyetine sahiptir. Elektrik tesisleri açısından, monoray sistemlerinde differansiyel ve aşırı

akım röle uygulamaları önemli bir konudur çünkü güvenlik ve sistem performansını artırmaya yardımcı olabilir [32].



Şekil 2.4 São Paulo monorayı (Brezilya)

2.2.5 Yüksek Hızlı Trenler (YHT)

Yüksek hızlı trenler, raylı sistemler içinde önemli bir yere sahiptir. Hem yolcu hem de yük taşımacılığında tercih edilen YHT'ler, uzun mesafelerde hızlı ve konforlu bir ulaşım imkanı sunar. Elektrik tesislerinde YHT'ler için özel güvenlik ve performans standartları bulunmaktadır. Yüksek gerilim ve yüksek hızlı trenlerin enerji ihtiyaçları dikkate alınarak elektrik tesislerinin dizaynı yapılmalıdır. Diferansiyel röleler ve aşırı akım röleleri, YHT'lerin elektrik tesislerinde güvenlik ve performansın artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. YHT'lerin elektrik sistemlerindeki koruma ihtiyaçları özel olarak ele alınmalı ve koruma rölelerinin doğru uygulanması sağlanmalıdır.



Şekil 2.5 TCDD yüksek hızlı tren

2.2.6 Banliyö Trenleri

Banliyö trenleri, şehir merkezlerini çevreleyen ve genellikle yoğun nüfuslu yerleşim bölgelerini birbirine bağlayan demiryolu sistemlerini ifade eder. Kısa mesafeli seyahatler için ideal olan banliyö trenleri, genellikle yüksek yolcu

kapasitesine sahip ve sık seferlerle hizmet verirler. Bu trenler, şehir içi ulaşımının önemli bir parçası olarak günlük yaşamda yaygın olarak kullanılmaktadır. Banliyö trenleri, genellikle elektrikli sistemlerle çalışır ve elektrik tesislerinde koruma rölelerinin uygulanması güvenlik ve sistem performansının artırılmasında önemli bir rol oynar. Koruma sistemleri, banliyö trenlerinin elektrik sistemlerinde kullanılarak, olası arızaların hızlı bir şekilde algılanması ve müdahale edilmesi sağlanır, böylece güvenli ve kesintisiz bir seyahat deneyimi sunulur [33].



Şekil 2.6 İZBAN banliyö treni (İzmir)

2.2.7 Maglev Trenler

Maglev trenleri, manyetik levitasyon kullanarak hareket eden ve raylarda temas olmadan ilerleyen yüksek hızlı tren sistemleridir. Bu sistemde trenler raylar yerine manyetik alanlar aracılığıyla yükseltilir ve taşınır, bu da sürtünme direncini minimuma indirerek daha yüksek hızlara ulaşmayı sağlar. Maglev trenleri genellikle yüksek hızlı ulaşım sistemleri olarak tercih edilirler ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Ülkeler arasında rekabetin arttığı bugünlerde, maglev trenlerin kullanımı ve geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Bu yüksek teknoloji trenleri, gelecekte raylı sistemlerin taşımacılık sektöründeki yerini daha da güçlendirebilir [34].



Şekil 2.7 Şanghay maglev treni

2.2.8 Tam Otomatik Sürücüsüz Sistemler

Tam otomatik sürücüsüz sistemler, raylı sistemlerde giderek daha fazla tercih edilen bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, insan müdahalesine gerek kalmadan trenlerin otomatik olarak hareket etmesine olanak tanır, güvenlik ve verimlilik açısından önemli avantajlar sunar. Yapay zeka ve sensör teknolojileri sayesinde trenler arasındaki mesafe ve hızın en iyi şekilde yönetilmesi sağlanır. Bu da kazaların önlenmesine yardımcı olurken, sistem performansının artırılmasına katkı sağlar.

Tam otomatik sürücüsüz sistemler, raylı sistemlerde geleceğin standartları arasında yer almaktadır [35].



Şekil 2.8 M5 metrosu - tam otomatik sürücüsüz metro (İstanbul, Üsküdar-Samandıra metrosu)

3
RAYLI SİSTEMLERDE KULLANILAN ORTA GERİLİM SİSTEMLERİ

Raylı sistemlerde kullanılan orta gerilim elektrik sistemleri, enerjinin güvenli ve sürekli iletimini sağlayan önemli bir bileşendir. Orta gerilim elektrik sistemleri genellikle transformatörler kullanılarak başlar ve enerjinin dağıtımını sağlamak üzere orta gerilim hücrelerine, devre kesicilere ve ayırıcılara bağlanır. Bu sistemler, yüksek gerilimdeki elektriği uygun düzeylere düşürmek ve raylı sistemlerin ihtiyacına göre dağıtımını yapmak amacıyla özenle tasarlanmıştır. Elemanların uyumlu çalışmasıyla sistemin dengeli ve güvenilir bir şekilde işlemesi sağlanır. Bu sayede, elektrik kesintileri ve arızalar minimum seviyeye indirilir, kullanıcıların güvenliği ve konforu sağlanır. Sistemin genişleyen taleplerini karşılamak için sürekli olarak güncellenen bir yapıya sahiptirler. Ayrıca, güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlandığı için yangın riski de en aza indirilmektedir. Orta gerilim elektrik sistemleri, enerji dağıtımı alanında önemli bir rol oynar ve günlük hayatın vazgeçilmez bir parçasıdır.

Raylı sistemlerde kullanılan orta gerilim elektrik sistemlerinin elemanları arasında transformatörler, orta gerilim hücreleri, devre kesiciler, ayırıcılar, ölçü transformatörleri, koruma röleleri ve kablo sistemleri yer almaktadır. Bu elemanlar, enerjinin güvenli ve etkili bir şekilde iletilmesini sağlar ve raylı sistemlerin elektrik altyapısını oluşturur. Her bir elemanın belirli bir görevi ve önemi bulunmaktadır.

3.1 Transformatörler

Raylı sistemlerde kullanılan transformatörler, elektrik enerjisinin farklı gerilim seviyelerine dönüştürülmesini sağlayan elemanlardır. Bu transformatörler, enerjinin güvenli ve verimli bir şekilde iletilmesi ve dağıtılması için kritik öneme sahiptir. Raylı sistemlerde başlıca iki tür transformatör kullanılır. Bunlar Cer gücü

transformatörleri ve iç ihtiyaç transformatörleridir. Cer transformatörleri, trenlerin hareket etmesi için gerekli olan yüksek güçte elektrik enerjisini sağlar ve genellikle yüksek gerilimleri alçak gerilimlere dönüştürerek elektrikli trenlerin tahrik sisteminde kullanılan motorlarına enerji sağlar. İç ihtiyaç transformatörleri, istasyonlar ve sinyalizasyon sistemleri gibi raylı sistemlerin diğer bileşenlerine enerji sağlar ve daha düşük güç gereksinimlerine sahip sistemler için elektrik enerjisini uygun gerilim seviyelerine dönüştürür. Raylı sistemlerde kullanılan bu iki tip transformatör, hem güvenli hem de kesintisiz bir enerji arzı sağlayarak sistemin verimli bir şekilde çalışmasını destekler [36].

Tablo 3.1 M1 Metrosuna ait transformatör bilgileri

İstasyon İsmi		**CER**		**İÇ İHTİYAÇ**		**Kurulu Güç**
		TR Adeti	**TR Gücü**	**TR Adeti**	**TR Gücü**	
1.	Yenikapı	1	3,3 MVA	2	1,6 MVA	6,5 MVA
2.	Aksaray	2	2,4 MVA	1	1 MVA	5,8 MVA
3.	Ulubatlı	2	2,4 MVA	1	1 MVA	5,8 MVA
4.	Sağmalcılar	2	2,4 MVA	1	1 MVA	5,8 MVA
5.	Otogar	2	3,3 MVA	1	1 MVA	7,6 MVA
6.	Mimarsinan	2	2,4 MVA	1	630 KVA	5,43 MVA
7.	Belpa	2	3,3 MVA	1	630 KVA	7,23 MVA
8.	Bakırköy	-	-	1	630 KVA	0,63 MVA
9.	Bahçelievler	2	2,4 MVA	1	1,6 MVA	6,4 MVA
10.	Yenibosna	2	2,4 MVA	1	1 MVA	5,8 MVA
11.	DTM	1	2,4 MVA	1	630 KVA	3,03 MVA
12.	Havalimanı	-	-	1	1 MVA	1 MVA
13.	Ferhat Paşa	-	-	2	1,25 MVA	2,5 MVA
14.	Esenler Garaj Sahası	1	2,4 MVA	-	-	2,4 MVA
15.	Esenler	-	-	1	630 KVA	0,63 MVA
16.	Menderes	2	2,4 MVA	2	2 MVA	8,8 MVA
17.	Üçyüzlü	-	-	2	2 MVA	4 MVA
18.	Bağcılar	2	2,4 MVA	2	2 MVA	8,8 MVA
19.	Kirazlı	1	2,4 MVA	2	2 MVA	6,4 MVA
Toplam Kurulu Güç						94,55 MVA

Tablo 3.2 M4 Metrosuna ait transformatör bilgileri

İstasyon İsmi		CER		İÇ İHTİYAÇ		Kurulu Güç
		TR Adeti	TR Gücü	TR Adeti	TR Gücü	
1.	Kadıköy	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
2.	Kadıköy Jeneratör			1	0,25 MVA	0,25 MVA
3.	Ayrılıkçeşme	2	3,3 MVA	2	2,5 MVA	11,6 MVA
4.	Acıbadem			2	2 MVA	4 MVA
5.	Ünalan	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
6.	Ünalan Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
7.	Göztepe	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
8.	Göztepe Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
9.	Yenisahra	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
10.	Yenisahra Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
11.	Kozyatağı	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
12.	Kozyatağı Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
13.	Bostancı	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
14.	Küçükyalı	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
15.	Küçükyalı Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
16.	Maltepe	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
17.	Maltepe Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
18.	MBA (Maltepe Bakım Alanı)	2	3,3 MVA	2	2,23 MVA	11,06 MVA
19.	Huzurevi			2	1,6 MVA	3,2 MVA
20.	Huzurevi Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
21.	Gülsuyu	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
22.	Esenkent	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
23.	Hastane			2	2 MVA	4 MVA
24.	Soğanlık	2	3,3 MVA	2	1,6 MVA	9,8 MVA
25.	Soğanlık Teknik Hacim			2	0,63 MVA	1,26 MVA
26.	Kartal	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
27.	Kartal Jeneratör			1	0,25 MVA	0,25 MVA
28.	Yakacık	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
29.	Pendik	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
30.	Tavşantepe	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
31.	Fevzi Çakmak	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
32.	Yayalar	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
33.	Kurtköy	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
34.	Sabiha Gökçen	2	3,3 MVA	2	2 MVA	10,6 MVA
Toplam Kurulu Güç						241,04 MVA

3.1.1 CER Gücü Transformatörleri

Kent içi raylı sistemlerde trenlerin hareketini sağlamak için kullanılan elektrik enerjisi, cer transformatörleri sayesinde sağlanır. Bu transformatörler, trenlerin tahrik gücü için kritik bir bileşen olup, özellikle çift sekonderli tasarımları ile öne çıkar. Cer transformatörlerinin temel görevi, yüksek gerilimli AC enerjiyi tren motorları için uygun olan daha düşük gerilimli AC enerjiye dönüştürmektir. Bu dönüşüm, enerjinin verimli ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Örneğin,

1500 V DC sistemlerin kullanıldığı metro hatlarında, cer transformatörleri 34,5 kV AC orta gerilimi biri yıldız bağlı ve biri üçgen bağlı olan çift sekonderli 1200 V AC orta gerilime düşürür. Benzer şekilde, 750 V DC sistemlerin kullanıldığı metro ve tramvay hatlarında, 34,5 kV AC gerilim çift sekonderli 580 V AC gerilim seviyesine indirgenir.



Şekil 3.1 Vakum altında kapsüllenmiş alüminyum sargılı Dyn11 kuru tip CER transformatörü (ABB Marka)

Çift sekonderli cer transformatörleri, her iki sekonder sargısında farklı dalga açılarına sahip çıkışlar verir. Bu tasarım, doğrultma işlemi için daha uygun dalga şekilleri sağlar ve böylece hem harmonik bozulma azaltılır ve hem de enerji verimliliği artırılır. Orta gerilim hücrelerinden alınan 34,5 kV gerilim, cer transformatörlerinin çıkışında çift sargı ile farklı dalga açıları oluşturularak iki ayrı çıkış sağlar.

Cer transformatörleri, metro hatları ve tramvaylar gibi şehir içi raylı sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Bu transformatörler, trenlerin hızlanması, yavaşlaması ve frenlemesi sırasında değişen güç taleplerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Yüksek dayanıklılık ve güvenilirlik sunan cer transformatörleri, sürekli kullanımda yüksek performans gösterir ve enerji kayıplarını minimize eder.

Teknik Özellikler ve Avantajlar:

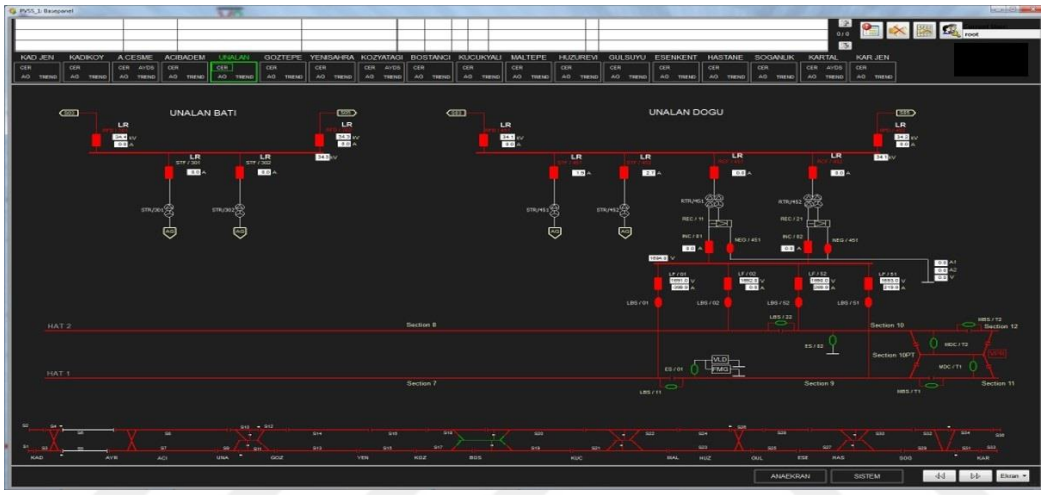
Yüksek Güç Kapasitesi: Cer transformatörleri, trenlerin yüksek güç gereksinimlerini karşılayacak kapasitededir.

Verimlilik: Enerji kayıplarını minimize ederek sistemin genel verimliliğini artırır.

Güvenilirlik: Dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerle üretilen cer transformatörleri, raylı sistemlerin kesintisiz ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

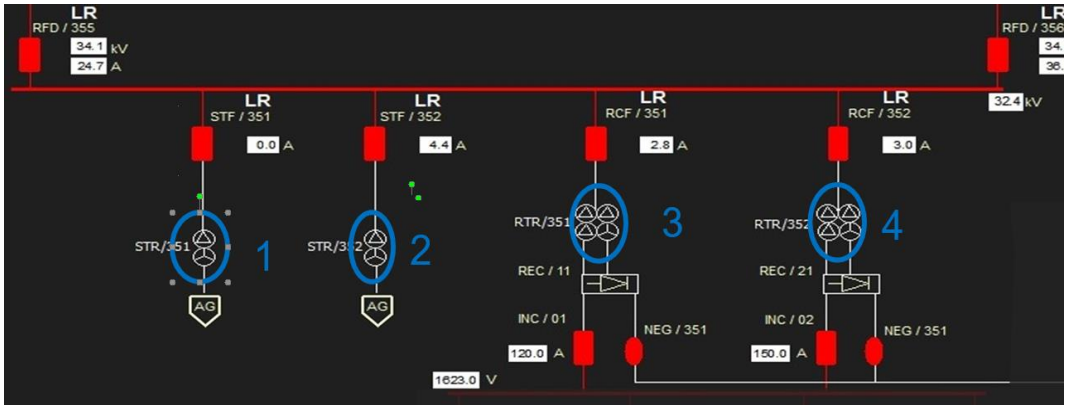
Esneklik: Çift sekonderli yapı, farklı gerilim seviyelerinde ve dalga şekillerinde enerji sağlayarak doğrultma işlemlerini optimize eder.

Cer transformatörleri, raylı sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan kritik bileşenlerdir. Doğru seçilmiş ve bakımları düzenli yapılan cer transformatörleri, şehir içi ulaşım sistemlerinin performansını ve güvenliğini artırır.

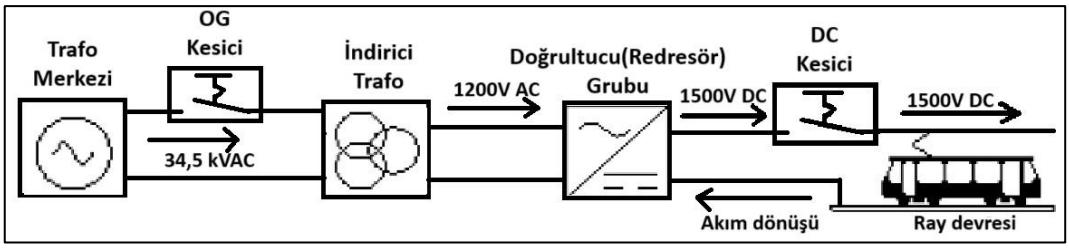


Şekil 3.2 Ünalan istasyonuna ait CER gücü tek hat ekranı

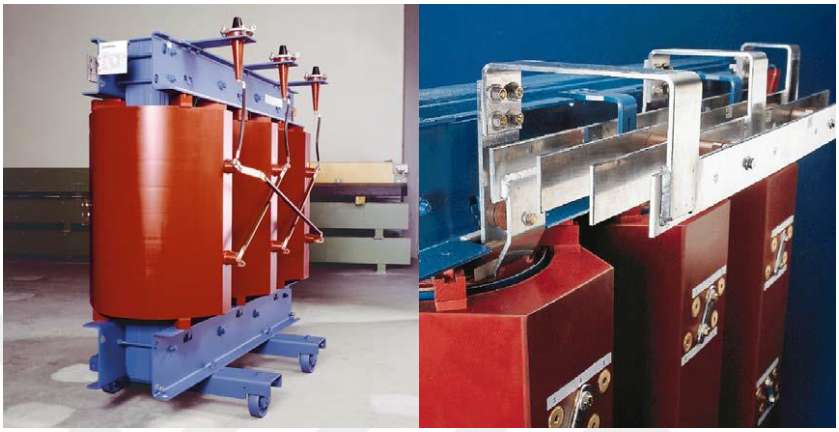
Transformatörden gelen 34500V AC, indirici transformatörlerden geçerek M4 metro hattında 1200V AC'ye (M1 metro hattında 580V AC'ye) oradan da doğrultucular vasıtasıyla M4 metro hattında 1500V DC'ye (M1 metro hattında 750V DC'ye) çevrilir.



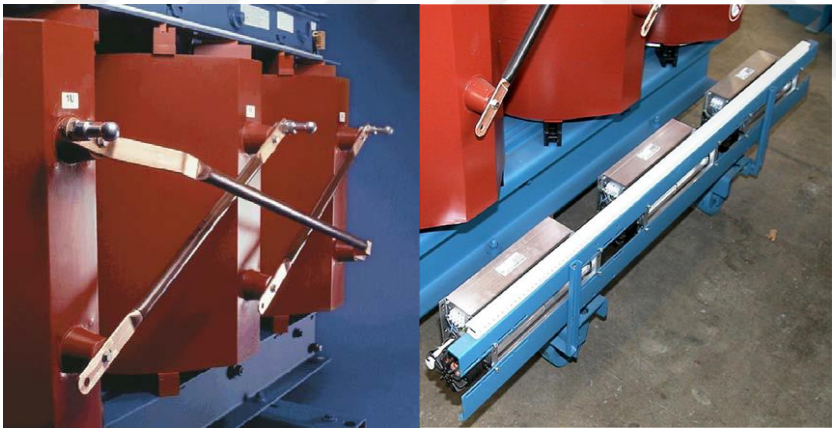
Şekil 3.3 CER ve servis transformatörlerine ait örnek tek hat diyagramı



Şekil 3.4 Transformatör merkezi ile tren arası elektrik enerjisi aktarımı süreci

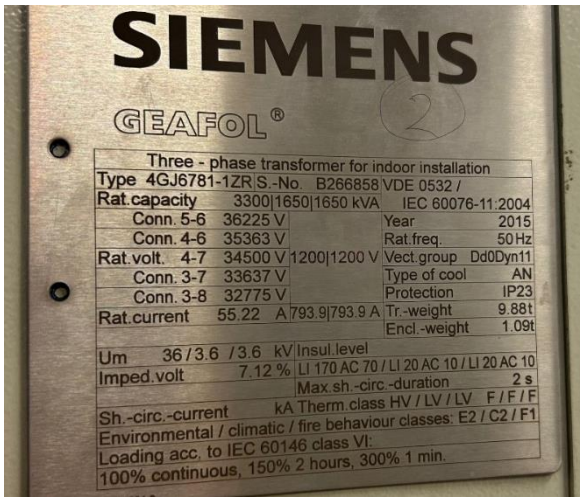


YG Terminalleri(34,5 kV) AG Terminalleri

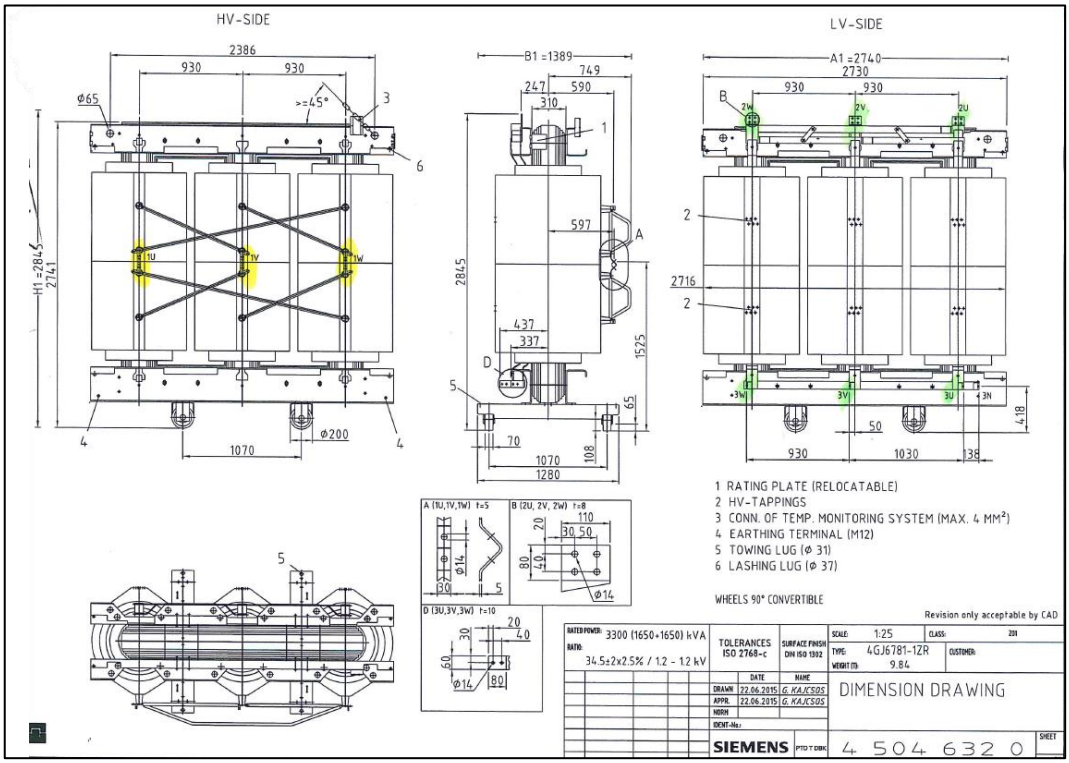


Sargı Terminalleri Fanlar

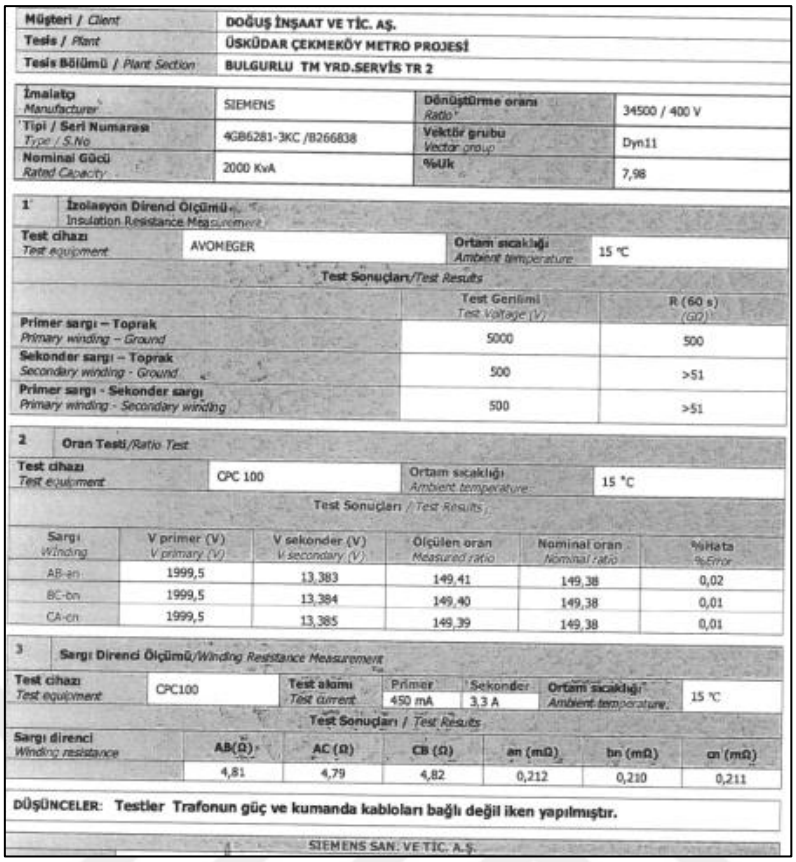
Şekil 3.5 Siemens Geafol CER transformatörüne ait YG/AG terminalleri, sargı terminalleri ve fanlar



Şekil 3.6 M5 metrosuna ait Siemens marka CER transformatörü etiketi



Şekil 3.7 SIEMENS markasına ait CER transformatörü imalat çizimi



Müşteri / Client	DOĞUŞ İNŞAAT VE TİC. AŞ.
Tesis / Plant	ÜSKÜDAR ÇEKMEKÖY METRO PROJESİ
Tesis Bölümü / Plant Section	BULGURLU TM YRD.SERVİS TR 2

İmalatçı Manufacturer	SIEMENS	Dönüştürme oranı Ratio*	34500 / 400 V
Tipi / Seri Numarası Type / S.No	4GB6281-3KC /B266838	Vektör grubu Vector group	Dyn11
Nominal Gücü Rated Capacity	2000 KvA	%Uk	7,98

1 İzolasyon Direnci Ölçümü / Insulation Resistance Measurement

Test cihazı Test equipment	AVOMEGER	Ortam sıcaklığı Ambient temperature	15 °C

Test Sonuçları/Test Results

	Test Gerilimi Test Voltage (V)	R (60 s) (GΩ)
Primer sargı – Toprak Primary winding – Ground	5000	500
Sekonder sargı – Toprak Secondary winding - Ground	500	>51
Primer sargı - Sekonder sargı Primary winding - Secondary winding	500	>51

2 Oran Testi/Ratio Test

Test cihazı Test equipment	CPC 100	Ortam sıcaklığı Ambient temperature	15 °C

Test Sonuçları / Test Results

Sargı Winding	V primer (V) V primary (V)	V sekonder (V) V secondary (V)	Ölçülen oran Measured ratio	Nominal oran Nominal ratio	%Hata %Error
AB-an	1999,5	13,383	149,41	149,38	0,02
BC-bn	1999,5	13,384	149,40	149,38	0,01
CA-cn	1999,5	13,385	149,39	149,38	0,01

3 Sargı Direnci Ölçümü/Winding Resistance Measurement

Test cihazı Test equipment	CPC100	Test akımı Test current	Primer	Sekonder	Ortam sıcaklığı Ambient temperature	15 °C
			450 mA	3,3 A		

Test Sonuçları / Test Results

Sargı direnci Winding resistance	AB(Ω)	AC (Ω)	CB (Ω)	an (mΩ)	bn (mΩ)	cn (mΩ)
	4,81	4,79	4,82	0,212	0,210	0,211

DÜŞÜNCELER: Testler Trafonun güç ve kumanda kabloları bağlı değil iken yapılmıştır.

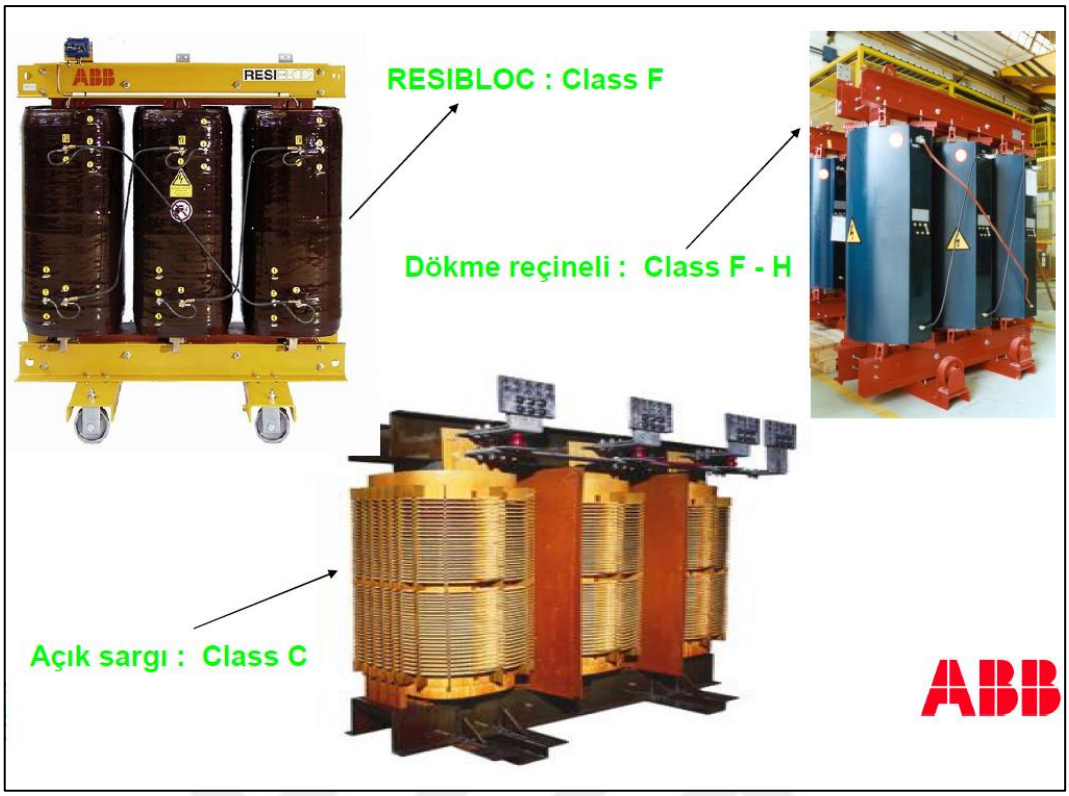
SIEMENS SAN. VE TİC. A.Ş.

Şekil 3.8 M5 metrosu Bulgurlu istasyonunda bulunan CER transformatörü test raporu

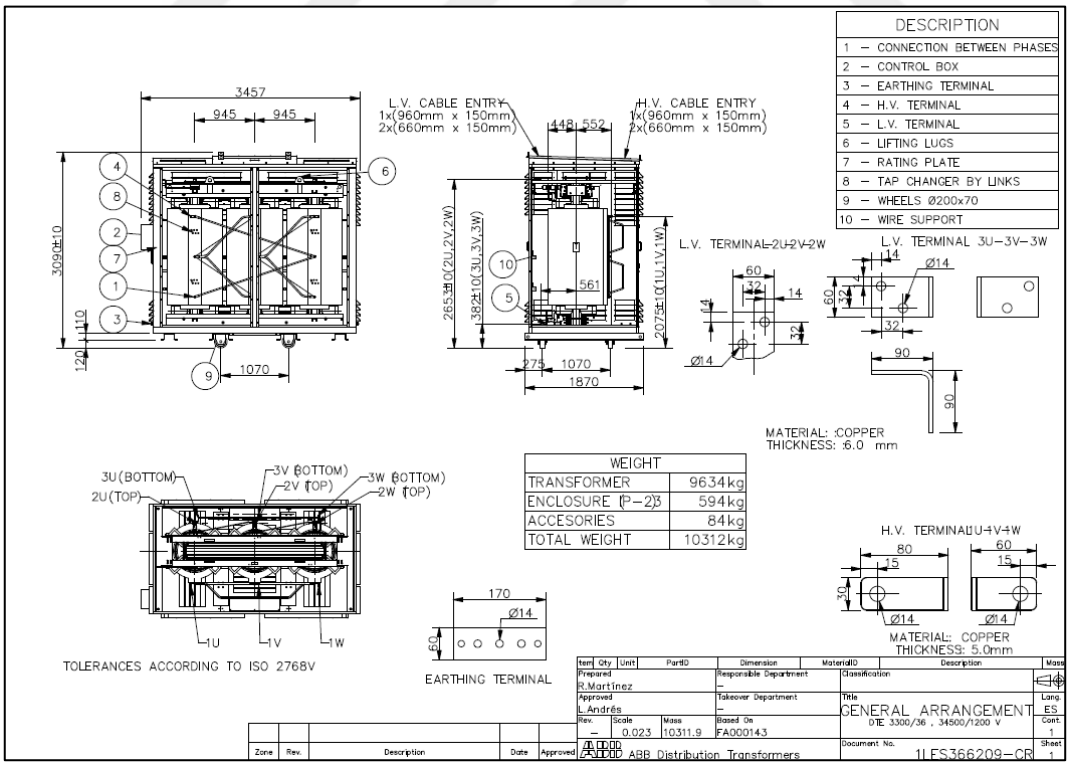
CER Transformatörü Test Standartları:

- IEC 60076-1 : Power Transformers Part 1:General
- IEC 60076-2 : Power Transformers Part 2:Temperature – Rise
- IEC 60076-3 : Power Transformers Part 3:Insulation Levels Dielectric Tests and External Clearances in Air
- IEC 60076-4 : Power Transformers Part 4:Guide to the Lightning Impulse and Switching Impulse Test –Power Transformers and Reactors
- IEC 60076-5 : Power Transformers Part 5:Ability to withstand Short Circuit
- IEC 60076-8 : Power Transformers Part 8:Application Guide
- IEC 60076-10 : Power Transformers Part 10:Determination of Sound Level
- IEC 60076-11 : Power Transformers Part 11:Dry Type Transformers
- IEC 60726 : Dry – Type Power Transformers (Bu eski standart komple yürürlükten kaldırılmıştır)
- IEC 60076-12 :Power Transformers Part 12: Loading Guide for Dry Type Power Transformers

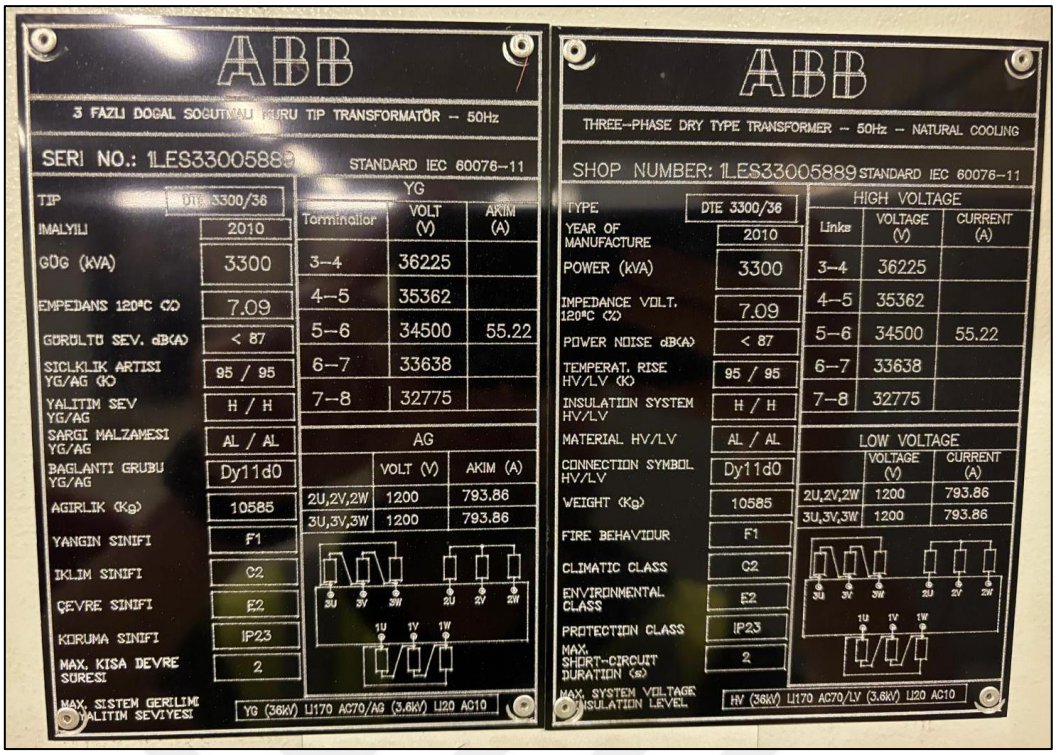
- IEC 60076-17 : Evaluation of Electromagnetic Fields around Power Transformers
- IEC 60076-18 : Power Transformers Part 18: Measurement of Frequency Response
- IEC 60214-1 Ed.2.0 – Tap Changers Part 1: Performance Requirements and Test Methods
- IEC 60060-1 : High Voltage Test Techniques Part 1:General Definitions and Test Requirements
- IEC 60060-2 : High Voltage Test Techniques,Measuring System
- IEIEC 60270 : High Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements
- ANSI/IEEE Std C57.12.00 : IEEE Standart General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power and Regulating Transformer
- ANSI/IEEE Std C57.12.90 : Standart Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power and Regulating Transformer
- IEEE Std C57.12.91 : IEEE Standart Test Code for Dry Type Distribution and Power Transformers
- ANSI/IEEE C57.98-1993 : Guide for Transformer Impulse Tests
- ANSI/IEEE C57.123 IEEE : Guide for Transformer Loss Measurement
- ANSI IEEE Std C57.104 : IEEE Standart Test Procedure for Thermal Evaluation of Liquid – Immersed
- IEC 61378-1 : Converter Transformers Part 1:Transformers for Industrial applications
- IEC 146 : Semi Conductor Converters
- BS EN 50329:2003 + A1:2010: Railway Application – Fixed Installation – Traction Transformers



Şekil 3.9 ABB marka kuru tip transformatör izolasyon sistemi sınıfları[37]



Şekil 3.10 ABB markasına ait CER transformatörü imalat çizimi



Şekil 3.11 M4 metrosu Esenkent istasyonu CER transformatörü etiketi

3.1.2 İç İhtiyaç Transformatörleri

Raylı sistemlerde iç ihtiyaç (servis) transformatörleri, trenlerin hareketi dışında kalan çeşitli sistemlerin enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Bu transformatörler; istasyonlar, sinyalizasyon sistemleri, aydınlatma, ısıtma, havalandırma ve diğer yardımcı sistemler(asansörler, yürüyen merdivenler vb.) için gerekli olan elektrik enerjisini sağlar.

İç ihtiyaç transformatörlerinin başlıca görevi, 34,5 kV yüksek gerilimli elektrik enerjisini daha düşük ve kullanılabilir seviyelere düşürmektir. Raylı sistemlerde, genellikle 34.5 kV AC orta gerilim hatlarından alınan enerji, iç ihtiyaç transformatörleri aracılığıyla 400V veya 230V AC gibi alçak gerilim seviyelerine dönüştürülür. Bu dönüşüm, çeşitli yardımcı sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar [38].

Kullanım Alanları:

İç ihtiyaç transformatörleri, raylı sistemlerin farklı bileşenlerinde yaygın olarak kullanılır:

İstasyonlar: Yolcu bekleme alanları, bilet gişeleri, turnikeler ve asansörler gibi istasyon içi sistemler için enerji sağlar.

Sinyalizasyon Sistemleri: Trenlerin güvenli hareket etmesini sağlayan sinyalizasyon cihazlarının çalışması için gerekli enerjiyi sağlar.

Aydınlatma: İstasyonlar, tüneller ve diğer raylı sistem altyapısının aydınlatılması için kullanılır.

Havalandırma ve Isıtma: Yolcuların ve çalışanların konforu için gerekli olan havalandırma ve ısıtma sistemlerine enerji sağlar.

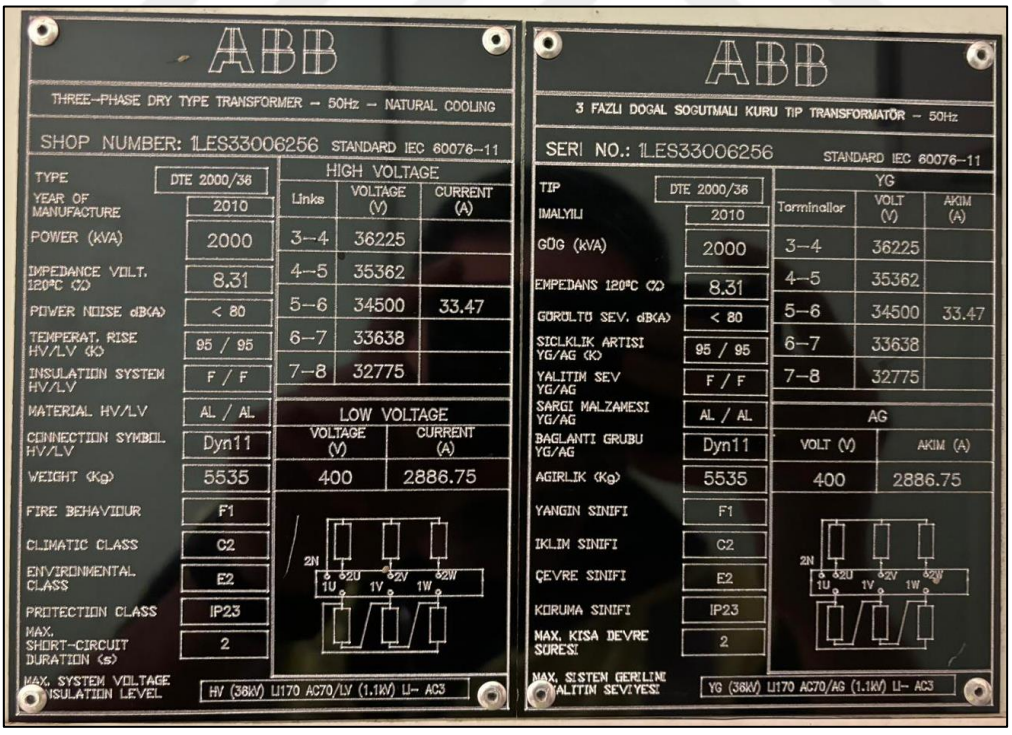
- Teknik Özellikler ve Avantajlar:

Güç Kapasitesi: İç ihtiyaç transformatörleri, farklı güç gereksinimlerine sahip sistemlere uygun kapasitede üretilir.

Verimlilik: Düşük enerji kayıpları ile yüksek verimlilik sağlar.

Güvenilirlik ve Dayanıklılık: Uzun ömürlü ve güvenilir çalışma için yüksek kaliteli malzemelerle üretilir.

Çok Yönlülük: Farklı gerilim seviyelerinde enerji sağlama kapasitesi ile çeşitli uygulamalara uygunluk gösterir.



Şekil 3.12 M4 metrosu Esenkent istasyonunda yer alan ABB markasına ait iç ihtiyaç transformatörü etiket bilgisi

İç ihtiyaç transformatörleri, raylı sistemlerin verimli ve güvenli bir şekilde çalışması için hayati öneme sahiptir. Bu transformatörler, trenlerin hareketi dışındaki tüm yardımcı sistemlerin enerji ihtiyacını karşılayarak, genel sistem performansını ve güvenliğini artırır. İç ihtiyaç transformatörlerinin doğru seçimi ve düzenli bakımı, raylı sistemlerin kesintisiz ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar [39].

3.2 Orta Gerilim Hücreleri

Orta gerilim hücreleri, raylı sistemlerde orta gerilim elektrik sistemlerinin temel yapı taşlarından biridir. Hücreler, enerjinin güvenli bir şekilde dağıtımını ve kontrolünü sağlar. Bu elemanlar, devreleri koruyarak sistemin performansını artırır ve güvenlik düzeyini yükseltir. Orta gerilim hücreleri, elektrik sistemlerinde güvenli ve verimli bir enerji iletimi için kritik bir rol oynar [40].



Şekil 3.13 M4 metrosuna ait OG hücreleri

3.3 Devre Kesiciler

Raylı sistemlerde kullanılan devre kesiciler, enerjinin akışını kontrol eden ve ani kesintilere karşı koruma sağlayan önemli bileşenlerdir. Bu elemanlar, elektrik hattındaki aşırı akım durumlarında devreyi açarak sistemi korurlar [40].



Şekil 3.14 OG gerilim kesicisi (ABB Marka)

3.4 Ayırıcılar

Ayırıcılar, orta gerilim elektrik sistemlerinde devreler arasında yalıtım sağlayan ve bakım çalışmaları için devreleri ayıran önemli elemanlardır. Raylı sistemlerde kullanılan ayırıcılar, enerji iletimini güvenli bir şekilde kontrol eder ve bakım süreçlerini kolaylaştırır. Bu elemanlar, sistemdeki güvenlik ve performansı artırmada önemli bir rol oynar [40].

3.5 Ölçü Transformatörleri

Ölçü transformatörleri AC elektrik sistemlerinde kullanılan, ölçü aletlerini ve koruma rölelerini, yüksek gerilime maruz bırakmamak için primer gerilimden izole ederek personel için güvenli çalışma imkanı sağlarlar. Ölçü transformatörlerinin kullanılması ile farklı primer değerlere karşılık olarak, standart sekonder değerler elde edilir. Bu sayede sekondere bağlanan ölçme, koruma ve kontrol cihazlarının belirli gerilim ve akım değerlerinde çalışması ile birlikte küçük boyutlu imal edilmelerini sağlarlar [41].

Standartlar [41]:

TS 620 EN 600444 - 1 Ölçü Transformatörleri – Bölüm 1: Akım Transformatörleri

TS 718 EN 60044 – 2 Gerilim transformatörleri – Bölüm 2: Endüktif Gerilim transformatörleri

IEC 60044 - 1 Instrument transformers – Part 1: Current transformers

IEC 60044 - 2 Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers

IEC 60044 - 5 Instrument transformers – Part 5: Capacitor voltage transformers

IEC 60044 - 6 Instrument transformers – Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance

IEC 60044 - 7 Instrument transformers – Part 7: Electronic voltage transformers (IEC 60044-1:1999)

IEC 60044 - 8 Instrument transformers – Part 8: Electronic current transformers

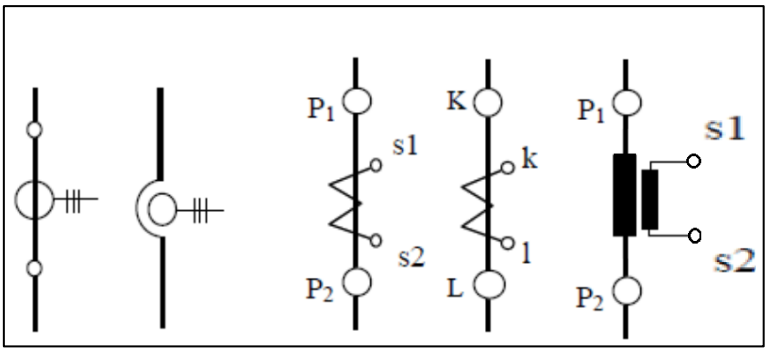
3.5.1 Akım Tranformatörleri

3.5.1.1 Tanımı

Akım transformatörleri, elektrik sistemlerinde önemli bir rol oynayan özel transformatörlerdir. Bu cihazlar, bağlı oldukları devredeki yüksek akımları belirli bir oranda küçülterek, bu küçültülmüş akımı sekonder terminallere bağlı ölçüm, koruma veya kontrol cihazlarına iletir. Aynı zamanda, akım transformatörleri bu cihazları, devredeki yüksek gerilimlerden izole ederek güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Özellikle yüksek gerilimli sistemlerde, ölçüm ve koruma cihazlarının doğrudan bağlanması mümkün olmadığından, akım transformatörleri ölçü ve koruma sistemlerinde kritik bir görev üstlenir.

Bu transformatörler, primer devreden geçen yüksek akımları manyetik bir kuplaj ile düşük seviyelere indirger. Sekonder devreye aktarılan bu küçültülmüş akım, aşırı akım röleleri, sayaçlar, akım ölçer cihazlar veya diğer koruma rölelerine bağlanır. Böylece, devredeki yüksek akımların doğrudan cihazlara ulaşması engellenmiş olur. Bunun sonucunda:

- Ölçüm ve koruma cihazlarının yüksek akımlar karşısında zorlanması önlenir ve cihazlar daha düşük akımlarla güvenli bir şekilde çalışır.
- Orta gerilim (OG) ve yüksek gerilim (YG) devrelerinde cihazların aşırı gerilimlere maruz kalmasının önüne geçilir, bu sayede hem cihazların ömrü uzar hem de sistemdeki arıza riskleri minimize edilir.
- Aynı zamanda, akım transformatörleri sistemdeki akım dengesizliklerini algılayarak arıza tespit ve koruma sistemlerinin devreye girmesine olanak tanır [42].



Şekil 3.15 Akım transformatörlerinin sembolleri

3.5.1.2 Yapısı

Akım transformatörlerini oluşturan kısımlar şunlardır:

- Primer (Birincil) Sargı:

  Birincil sargı, genellikle yalnızca bir veya birkaç turdan oluşur ve yüksek akım taşıyan hat ile seri olarak bağlanır. Bu sargı, devreden geçen akımı algılayarak akım transformatörünün çalışmasını sağlar.

- Sekonder (İkincil) Sargı:

Sekonder sargı, primer sargıdan daha fazla sarım içerir ve birincil sargıdan gelen yüksek akımı, koruma ve ölçüm cihazlarına uygun düşük bir akıma dönüştürür (örneğin 5A veya 1A). Sekonder devre, genellikle aşırı akım rölelerine veya ölçü cihazlarına bağlanır.

- Manyetik Nüve:

Akım transformatörünün çalışmasını sağlayan en önemli elemandır. Primer devreden geçen akım, nüvede bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, sekonder sargıda bir akım indükler. Manyetik nüve, genellikle yüksek geçirgenliğe sahip silisyumlu sacdan yapılır ve akı kayıplarını minimize edecek şekilde tasarlanır.

- İzolasyon Malzemesi:

Primer ve sekonder sargılar arasındaki elektriksel yalıtımı sağlamak için yalıtım malzemeleri kullanılır. Bu, transformatörün güvenli ve kararlı çalışması için kritik

öneme sahiptir. Yalıtım malzemesi genellikle reçine ya da özel bir yağ dolgu sistemi olabilir.

- Muhafaza:

Akım transformatörünün dış etkilere karşı korunması için bir muhafaza bulunur. Bu muhafaza, transformatörün dış ortam koşullarından (nem, sıcaklık değişiklikleri, toz) etkilenmemesi için gereklidir ve transformatörün fiziksel dayanıklılığını artırır.

- Klemensler (Bağlantı Uçları):

Primer ve sekonder sargıların uçlarına bağlanarak dış devreye bağlantı yapılmasını sağlar. Klemensler genellikle birincil devrede daha büyük çaplı, sekonder devrede ise daha küçük çaplı bağlantılar sağlar [42].

3.5.1.3 Kullanılma Amaçları

1. Yüksek akım geçen devrelerde doğrudan akım ölçümü tehlikeli olduğundan, akım transformatörleri devredeki yüksek akımları güvenli ve ölçülebilir seviyelere düşürerek ölçü cihazlarına iletir (örneğin 1A veya 5A).
2. Elektrik sayaçlarıyla birlikte kullanılarak yüksek elektrik tüketimlerinin ölçümünde kullanılır. Büyük santraller veya santraller gibi yüksek güç tüketiminin olduğu yerlerde akım transformatörleri, sayaçlara 1A veya 5A seviyesinde güvenli akım değerleri iletir.
3. Wattmetre, voltmetre ve enerji analizörleri gibi cihazların sağlıklı değerler altında çalışması için gerekli akım seviyesini sağlar. Bu sayede sistemdeki güç ve enerji tüketiminin doğru bir şekilde ölçülmesi sağlanmış olur.
4. Kesici ve ayırıcı cihazların açma-kapama durumu sırasında geçen akımı ölçerek, bu cihazların doğru çalışıp çalışmadığının izlenmesine katkı sağlar.
5. Elektrik sistemi üzerinde sürekli akım izleme yapılmasını sağlar. Bu sayede sistemdeki anormallikler veya performans değişiklikleri tespit edilip, koruma ve kontrol röleleri ile müdahale edilebilir.

3.5.1.4 Kullanıldığı Gerilime Göre Çeşitleri

AG Akım Transformatörleri:

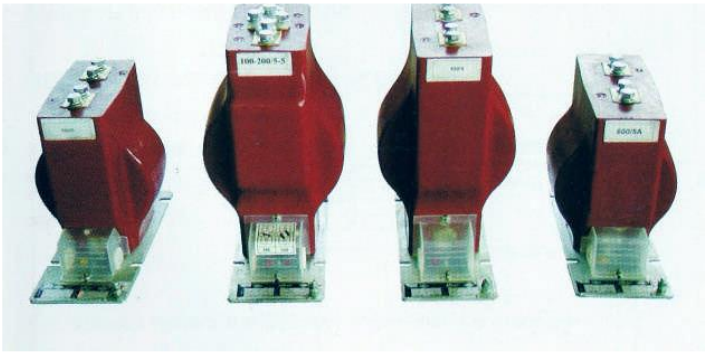
Alçak gerilim şebekelerinde kullanılan akım transformatörleri, dağıtım transformatörünün çıkışında fazlar arası 400 V gerilim seviyesinde çalışır. Bu tip transformatörler, iş yerleri ve fabrikalar gibi bu gerilim seviyesinde çalışan tesislerde tercih edilir. Alçak gerilimde genellikle kuru tip akım transformatörleri kullanılır, çünkü bu tip transformatörler düşük gerilimli sistemler için uygun ve güvenilirdir.



Şekil 3.16 AG akım transformatörleri

OG Akım Transformatörleri:

Orta gerilim şebekeleri, alçak gerilim ve yüksek gerilim şebekeleri arasında bir köprü görevi görür ve enerji iletiminde en yaygın kullanılan şebeke türüdür. Ülkemizde genellikle 3-36 kV aralığında çalışırlar. Bu şebekelerde, kuru tip akım transformatörleri tercih edilir.



Şekil 3.17 OG akım transformatörleri

3.5.1.5 Akım Transformatörü Etiket Değerleri

Akım transformatörlerinin etiketlerinde aşağıdaki bilgiler bulunmaktadır:

Çalışma sınıfı, akım transformatörünün hassasiyetini ifade eder. Ölçüm amaçlı kullanılanlar için doğruluk sınıfı (class) 0,1-0,2-0,5 aralığındadır. Koruma amaçlı transformatörlerde ise 5P ve 10P sınıfları tercih edilir.

Sekonder nominal akımı (Is), transformatörün çıkış akımıdır. Standart sekonder akımları 1A veya 5A olarak üretilir. Sekonder devreye bağlanan ölçü aletleri bu akım değerlerine göre üretilirler. En yaygın sekonder akımı 5A'dir, ancak akım transformatörleri ve cihazlar arası uzaklık büyükse sekonder akımı 1A olarak alınır.

Primer nominal akımı (Ip), transformatörün birincil tarafındaki çalışma akımıdır. Primer akımları genellikle 10-12,5-15-20-25-30-40-50-60-75-100 amper gibi belirli değerlerin 5 veya 10 katları olur. Akım transformatörleri primer akımlarının %20 fazlasına kadar çalışabilirler. Örneğin, sekonder akımı 5A olan bir transformatörde bu durum 6A'lik bir çıkışa karşılık gelir.

Akım dönüştürme oranı, primer akımının sekonder akımına oranını gösterir ve genellikle etiketlerde 75/5A, 100/5A, 1000/5A gibi ifadelerle belirtilir.

Sargı oranı (ns), primer ve sekonder sargıların sayısı arasındaki orandır. İdeal koşullarda sargı oranı ile dönüştürme oranı birbirine eşittir.

Kullanma gerilimi, akım transformatörünün çalışabileceği nominal gerilimdir ve genellikle kV cinsinden ifade edilir.

Duyarlılık yükü ve gücü (VA), sekonder devrede oluşan empedansı gösterir ve güç katsayısı ile birlikte volt-amper (VA) birimiyle belirtilir.

Doyma katsayısı (aşırı akım faktörü, n), emniyet katsayısı olarak tanımlanır. Ölçü transformatörlerinde $n \leq 5$ olmalıdır. Koruma transformatörlerinde ise bu değer 10, 15 veya 20 gibi daha yüksek olabilir. Koruma tipi akım transformatörlerinde $n \geq 10$ olmalıdır.

Nominal frekans (Hz), akım transformatörlerinin çalışma frekansıdır.

Yalıtkan tipi, transformatörlerde kullanılan yalıtkan malzemenin türünü ifade eder.

Termik sınır akımı (Ith), bir akım transformatörünün bir saniye boyunca hasar görmeden dayanabileceği primer kısa devre akımının efektir değeridir. Bu değer etiketlerde genellikle kA cinsinden veya primer akımının katları şeklinde gösterilir.(örneğin, 10 kA veya 200 x In vb.)

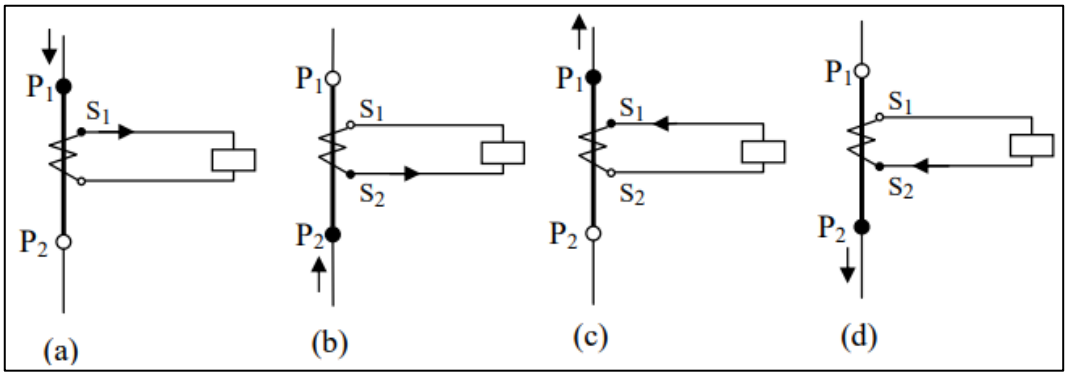
Dinamik dayanım akımı (Idyn), kısa devre anında oluşan ilk periyottaki darbe akımının yarattığı mekanik kuvvetlere karşı transformatörün dayanabileceği maksimum primer akımdır. Termik nominal akımın 2,5 katı büyüklüğünde olur. Akım transformatörleri Idyn akımlarına göre izole edilirler. Idyn akımları akım transformatörlerinin etiketlerinde verilmeyebilir.

3.5.1.6 Akım Transformatörlerinde Polarite

Bir akım tansformatörünün polaritesi, primer ve sekonder sargılarındaki akım yönlerinin ilişkisini ifade eder. Primer sargıya giren veya çıkan akıma bağlı olarak, sekonder sargıdaki akımın yönü belirlenir. Primer sargıya akımın girdiği veya çıktığı uç polarite olarak kabul edilebilir. Primer sargıya akımın giriş yaptığı uç polarite olarak kabul edilirse, sekonder sargıda akımın çıkış yaptığı uç polarite olarak alınmalıdır (Şekil 3.18 (a) ve (b)). Benzer şekilde, primerde akımın çıkış yaptığı ucu polarite olarak seçilirse, sekonderde polarite ucu, akımın sekondere giriş yaptığı uç olacaktır (Şekil 3.18 (c) ve (d)).

Aşağıdaki şekilde, primer sargıda yapılan polarite seçimine göre sekonder polarite uçları belirlenmiş ve işaretlenmiştir. Şekil incelendiğinde, primer akım yönü göz önüne alınmaksızın şu sonuçlar elde edilir: Eğer P1 primer polarite ucu olarak seçilmişse, sekonderdeki polarite ucu S1 olur. Eğer P2 primer polarite ucu olarak belirlenmişse, sekonderdeki polarite ucu S2 olacaktır.

Bu şekilde polarite belirleme, özellikle koruma rölelerinin doğru çalışması açısından büyük önem taşır [42].



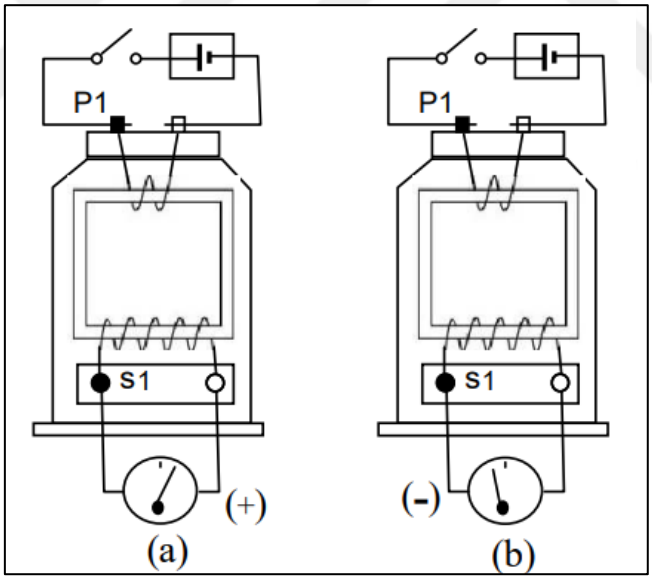
Şekil 3.18 Akım transformatörlerinde akım yönleri

Akım Transformatörlerinde Polaritenin Tayini: Akım transformatörlerinin primer ve sekonder terminallerindeki polarite işaretlemeleri genellikle üreticiler tarafından önceden yapılır. Bu işaretlemeler, yukarıda anlatılan kurallar çerçevesinde polarite

uçlarının belirlenmesi için yeterlidir. Ancak, üretim sürecinde nadiren de olsa işaretleme hataları yapılabilir veya uzun süre kullanımda akım transformatörleri üzerindeki bu işaretlemeler silinebilir. Bu gibi durumlarda, polaritenin doğruluğunu teyit etmek veya polaritenin tayini için basit bir test gereklidir.

Polarite doğrulama testi için, Şekil 3.19'da gösterilen basit devreyi kurmak yeterlidir. Test sırasında, doğru polarite uçlarının (P1 ve S1) primer ve sekonder devrelerde pilin ve DC ampermetrenin (+) uçlarına bağlanması önemli bir adımdır. Anahtar kapatıldığında, ampermetrenin sapma yönü izlenir. Eğer sapma saat yönünde gerçekleşiyorsa, işaretleme doğru yapılmış demektir. Ancak, ampermetre ters yönde saparsa, işaretlemenin hatalı olduğu anlamına gelir.

Bu durumda, genellikle sekonderdeki polarite ucu değiştirilerek, S2'nin polarite ucu olarak kabul edilmesi gerekir. Şekil 3.19(a) doğru, Şekil 19(b) ise hatalı işaretlemenin sonuçlarını göstermektedir. Bu basit test, yanlış işaretlemelere karşı bir doğrulama aracı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.19 Akım transformatörlerinde polarite tayini

3.5.1.7 Akım Transformatörlerinde Doğruluk Sınıfı

Her cihazda olduğu gibi akım transformatörlerinde de belirli hata oranları mevcuttur. Bu hatalar, akım transformatörünün doğruluk sınıfıyla ifade edilir ve ölçüm ya da koruma amaçlı kullanımda dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir. Akım transformatörlerinde doğruluk sınıfı, çıkış değerinin beklenen ve gerçek değeri arasındaki farkın izin verilen maksimum yüzdesi olarak

tanımlanır. Ölçülen akım ile gerçek akım arasındaki fark, iki ana hata türü üzerinden değerlendirilir: akım hatası ve faz açısı hatası. Akım hatası, primer ve sekonder devreler arasındaki farkı ifade ederken, faz açısı hatası, akım transformatörünün primer ve sekonder akımları arasındaki faz farkını belirtir. Bu hataların temel nedeni, akım transformatörünün primer akımının bir kısmının, transformatörünün manyetik nüvesinin mıknatıslanması için harcanmasıdır.

Ölçüm amaçlı kullanılan akım transformatörlerinde doğruluk sınıfı, akım transformatörünün belirli bir akımda ne kadar doğru ölçüm yapabileceğini ifade eder. IS-2705 standardına göre, ölçüm için kullanılan akım transformatörlerinde doğruluk sınıfları 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3 ve 5 olarak belirlenmiştir. Bu sınıflar, akım transformatörünün maksimum izin verilen hata yüzdesini ifade eder. Örneğin, 0.1 sınıfındaki bir ölçüm transformatörü, 100 A akımı ölçerken maksimum ±0.1% hata payı ile 99.9 A ile 100.1 A arasında bir değer gösterebilir. Ölçüm doğruluğunun kritik olduğu durumlarda, daha düşük hata oranına sahip doğruluk sınıflarının tercih edilmesi, sistem güvenliği ve performansı açısından önemlidir.

Tablo 3.3 Standart Doğruluk Sınıfları 0.1, 0.2, 0.5 ve 1 için Hata Sınırı

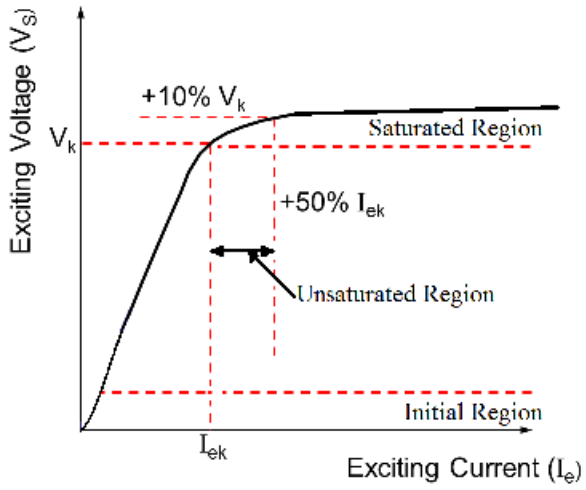
Accuracy Class	±% Ratio Error at % of Rated Current				±% Phase displacement Error in minute at % of Rated Current			
	5	*20*	*100*	*120*	*5*	*20*	*100*	*120*
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60

Koruma amaçlı kullanılan akım transformatörlerinde ise doğruluk sınıfı biraz farklı bir şekilde ele alınır. Koruma transformatörlerinin doğruluk sınıfları da IS-2705 standardına göre belirlenmiştir ve bu sınıflar 5P, 10P ve 15P olarak adlandırılır. Buradaki "P" harfi, transformatörün koruma amaçlı olduğunu belirtirken, sayılar ise izin verilen maksimum hata oranını ifade eder. Örneğin, 5P sınıfında bir koruma transformatörü, %5 hata payına sahip olabilir. Bu, 100 A'lik bir akımda 95 A ile 105 A arasında bir değer gösterebileceği anlamına gelir. Koruma sistemlerinde hata oranının yüksek olması, koruma rölelerinin yanlış tetiklenmesine veya gecikmesine neden olabilir; bu yüzden doğruluk sınıfının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir [42].

3.5.1.8 Akım Transformatörlerinde Doyma

Akım tranformatörünün primer akımına orantılı bir çıkış akımının üretilemediği durumu tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Normal şartlar altında primerden geçen akım artırıldığında, sekonderden geçen akım da (akım oranının belirleyeceği ölçüde) artmaktadır. Bu artış primer anma akımını geçtikten sonra bir süre daha devam etmektedir. Primer akımdaki artış devam ettiğinde, önce akım oranı bozulur ve daha sonra sekonderdeki yükselme durur. Primer akım bu değerin üstüne ne kadar çıksa da, sekonderden geçen akım değişmez. Sekonder akımın değişmemeye başladığı noktaya "doyma sınırı" denir. Akım Transformatöründe doygunluğun temel nedeni, büyük birincil akım, küçük bir doğru akım (DC), sekonderde yüksek yük ve sekonder devredeki açık devre gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir.

Doygunluk, akım transformatörü çekirdeğinde kullanılan manyetik malzemelerin özellikleriyle ilgilidir. Genellikle, ölçüm amaçlı kullanılan akım transformatörlerinin çekirdekleri, nominal akımın küçük katlarında doygunluğa ulaşır. Ancak, koruma sınıfı akım transformatörleri geniş bir nominal akım aralığında çalıştırılabilir. Sekonderde indüklenen elektromotor kuvveti (EMF), Şekil 2'de gösterilen doyma bölgesi diz noktası gerilimi (Vk) seviyesini aştığında, çekirdek doygunluğa girer.



Şekil 3.20 Diz noktasını (doyma gerilimi) temsil eden ikincil (sekonder) uyarım eğrisi

Ölçü akım transformatörlerinin primer akımının normal çalışma aralığında (anma akımının %5-%120 arası) fonksiyonunu yeterli doğrulukta yerine getirebilmesi

gerekir. Ölçüm cihazlarının aşırı akıma maruz kalmasını önlemek için; belirlenen çalışma aralığının üzerindeki akımlarda ise doyuma (saturate) ulaşması istenir.

Koruma akım transformatörleri değişik arıza koşullarının tespiti için, düşük değerlerden anma akımının çok üstündeki değerlere kadar geniş bir aralıkta yeterli doğrulukta çalışabilmelidir. Olası en yüksek arıza akımlarına kadar doyuma ulaşmaması istenir.

Aşırı derecede yüksek birincil akım ve yüksek sekonder yük, akım transformatörü çekirdeğinde yüksek manyetik akım yoğunluğuna yol açmaktadır. Manyetik akı yoğunluğu çekirdeğin tasarlanan sınırına ulaştığında, doygunluk oluşur. Akım transformatörü doygunluğunun sonuçları gösterilmektedir.

Akım transformatörlerinde doygunluk, şu faktörlere bağlıdır:

-Akım transformatörünün fiziksel özellikleri (boyut, nominal değer, sargı direnci, doygunluk gerilimi)

-Sekondere bağlı yük (röle, ölçü cihazı veya koruma ekipmanı ile bağlı kablo iletkenleri)

-Primer akım büyüklüğü, DC offseti (sistemin X/R oranı)

-Çekirdekteki artık manyetik akı

Akım Transformatörü Doymasının Dijital Aşırı Akım Rölelerinin Performansına Etkileri: Elektrik güç sistemlerinin genişlemesi, yüksek arıza akımlarının ortaya çıkmasına neden olmakta ve bu durum, koruma cihazlarının düzgün çalışmasını sağlamak için daha fazla dikkat gerektirmektedir. Bu bağlamda, akım transformatörleri kritik bileşenlerdir; çünkü bu cihazlar, sistemdeki yüksek akımlara erişim sağlayarak, sekonder tarafta azaltılmış bir yansıma ile koruma rölelerinin ağdaki arızaları ve bozulmaları zamanında ve doğru bir şekilde tanımlamasına olanak tanır. Dolayısıyla, koruma sisteminin doğru çalışması, akım transformatörlerinin performansına bağlıdır ve başarılı bir şekilde çalışabilmeleri için sistem arızaları sırasında akım sinyallerinin mümkün olduğunca doğru bir şekilde yeniden üretilmesi gerekmektedir. Ancak, bu arzu edilen özellik ile çelişen bir durum olarak, akım transformatörlerinin çekirdekleri, yüksek arıza akımlarına maruz kaldıklarında yüksek akı yoğunlukları tutarak doygunluğa ulaşabilir.

Özellikle elektrik dağıtım sistemlerinde, düşük oranlı akım transformatörlerinin yüksek arıza akımları nedeniyle doygunluğa ulaşması, aşırı akım rölelerinin yanlış çalışmasına yol açabilir. Bu sorun, çeşitli tesislerde üretim kaybına veya bu sisteme bağlı kritik ekipmanların zarar görmesine neden olabilir.

Bu bağlamda, IEEE C37.110 2007 Standardı, akım transformatörlerinin AC ve DC doygunluğunu önlemek için seçim kurallarını içeren önemli bir belgedir. Bu önerilerin birçoğu, akım transformatörünün çekirdek boyutunun artırılmasını gerektirmektedir. Öte yandan, akım transformatörlerinin devre kesicileri ve otomatik yeniden kapama sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olarak dahil edilmesi istenen tasarımlarda, boyutları genellikle sınırlayıcı bir faktördür.

Akım transformatörleri, belirli bir akım seviyesine ulaşıldığında manyetik çekirdeklerinin doygun hale gelmesiyle sınırlı bir çalışma aralığına sahiptir. Doygunluk durumu, transformatörün akım sinyalini doğru bir şekilde iletme yeteneğini kaybetmesine neden olur. Bu durum, aşırı akım koşullarında, transformatörden çıkan akım değerlerinin yanıltıcı hale gelmesine yol açabilir. Doygunluğun aşırı akım rölelerine etkisi şunlardır:

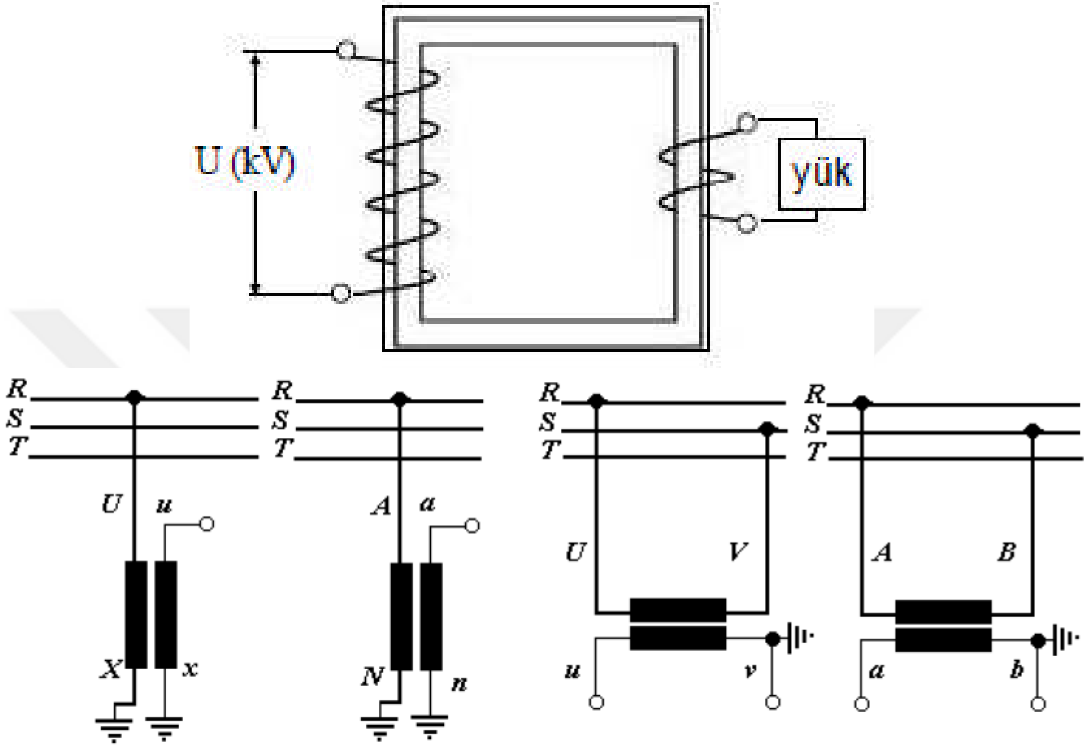
1. Yanlış Algılama: Doygunluk, transformatörden çıkan akım sinyalinin doğruluğunu bozar. Aşırı akım röleleri, bu yanıltıcı sinyalleri kullanarak, hatalı alarmlar verebilir veya gerçek aşırı akım durumlarını gözden kaçırabilir. Bu, sistemin güvenliğini tehlikeye atar.
2. Gecikmeli Tepki: Akım transformatörlerinin doygunluğu, aşırı akım rölelerinin tepki süresini uzatabilir. Doygunluk nedeniyle, transformatör çıkışındaki akım değeri zamanında iletilemez, bu da rölelerin tepkisinin gecikmesine neden olur. Sonuç olarak, tehlikeli durumların önlenememesi söz konusu olabilir.
3. Sistem Güvenliği: Doygunluğun etkileri, sistem güvenliği üzerinde ciddi sonuçlar doğurabilir. Yanlış veya gecikmeli alarmlar, elektrik ekipmanlarının aşırı yüklenmesine ve potansiyel olarak hasar görmesine yol açabilir.

3.5.2 Gerilim Transformatörleri

3.5.2.1 Tanımı

Devredeki primer gerilimi belli bir oranda küçülterek (fazlararası 100V, faz-toprak arası $100/\sqrt{3}$V) bu gerilimle sekondere bağlı aletleri besleyen ve onları yüksek gerilimden koruyan elemanlara gerilim transformatörleri denir. Primer devreye

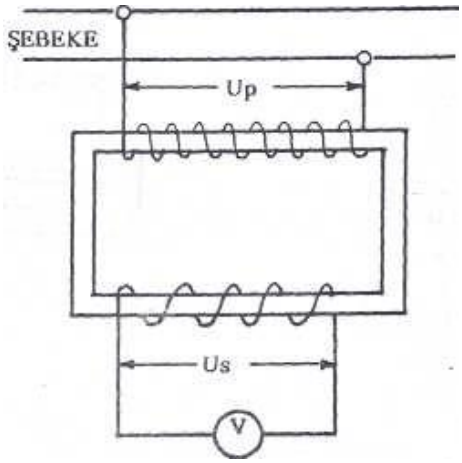
bağlı olarak yüksek gerilimleri manyetik bir kuplaj yoluyla küçültüp sekonder devreye aktarırlar, böylece bu devreye bağlı cihazlar yüksek gerilimden izole edilir ve güvenli bir şekilde çalıştırılır. Voltmetre, koruma röleleri ve sayaçlar gibi cihazların gerilim ölçü transformatörleri sayesinde büyük gerilimler ile zorlanması önlenir. Böylece bu cihazlarla güvenli ve doğru ölçümler yapılabilir [42].



Şekil 3.21 Gerilim transformatörlerinin şematik gösterimi

3.5.2.2 Yapısı

Gerilim ölçü transformatörleri genellikle demir çekirdek, primer ve sekonder sargılar, soğutma yolu ve muhafaza kısımlarından oluşur. Demir çekirdek, sargıların etrafında bulunur ve manyetik devrenin tamamlanmasını sağlar. Primer sargı, giriş gerilimine bağlanırken, sekonder sargıdan çıkış gerilimi alınır. Primer sargıları çok sarımlı ince tellerden oluşmuştur, sekonder sargıları ise nominal yükte kaybın çok az olmasını sağlayacak kalınlıkta tel ile sarılmıştır. Soğutma yolu, transformatörün çalışması sırasında oluşan ısıyı dağıtmak için kullanılır. Muhafaza kısımları ise transformatörü dış etkenlerden korur ve güvenli bir şekilde kullanımını sağlar.



Şekil 3.22 Gerilim transformatörünün yapısı[42]

Bir gerilim transformatörü aşağıdaki kısımlardan meydana gelir:

1. Birincil (Primer) Sargı: Yüksek gerilimli güç sistemine doğrudan bağlanan kısımdır. Yüksek gerilimi düşük gerilim seviyelerine indirgeyerek, ölçüm cihazlarının güvenli çalışmasını sağlar. Bu sargı, genellikle ince iletkenlerden yapılmış olup, yüksek gerilime dayanacak şekilde tasarlanmıştır.
2. İkincil (Sekonder) Sargı: Birincil sargıdaki yüksek gerilimden indüklenen düşük gerilimi alır ve ölçüm cihazlarına, koruma rölelerine ya da gösterge sistemlerine iletir. Düşük gerilimde çalışan bu sargı, ölçüm ve koruma cihazlarına bağlanır ve bu cihazların doğru ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. İkincil sargının dönüş sayısı, birincil sargı ile orantılıdır ve bu oran gerilim seviyesini belirler.
3. Manyetik Çekirdek: Gerilim transformatörünün merkezi bileşenlerinden biri olan manyetik çekirdek, birincil sargıdan gelen manyetik akıyı ikincil sargıya yönlendirir. Manyetik çekirdek genellikle demirden yapılır ve manyetik devreyi oluşturur. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olmalıdır, böylece enerji kayıplarını minimize eder. Transformatörün verimliliği büyük oranda çekirdeğin kalitesine bağlıdır.
4. İzolatörler: Birincil sargı ve diğer bileşenlerin, topraklanmış yapı ya da metal parçalarla temas etmemesi için izolatörler kullanılır. İzolatörler genellikle porselen, kompozit veya polimer malzemelerden yapılmıştır ve yüksek gerilimde güvenli bir izolasyon sağlar.
5. Yağ veya Reçine Dolgusu (İzolasyon Malzemesi): Gerilim transformatörleri, yüksek gerilim yalıtımını sağlamak ve ısı dağılımını iyileştirmek için yağ

dolumu veya reçine ile doldurulur. Yağ dolumu olan gerilim transformatörleri, elektriksel ve termal izolasyonu artırmak için mineral yağı kullanır. Katı reçine dolumlu olanlar ise genellikle dış ortam koşullarına daha dayanıklıdır. Bu malzeme, transformatör içinde oluşabilecek aşırı ısınma ve elektriksel gerilimlere karşı koruma sağlar.

6. Terminal Bağlantıları: Birincil ve ikincil sargılar, sistemin diğer bileşenlerine bağlanmak için terminal bağlantılarına sahiptir. Bu terminaller, gerilim transformatörünün dış dünya ile bağlantısını sağlar. Genellikle yüksek gerilim ve düşük gerilim bölümleri için ayrı bağlantılar mevcuttur.
7. Topraklama Sistemi: Gerilim transformatörleri genellikle güvenlik amacıyla topraklanır. Bu, izolasyonun bozulması durumunda meydana gelebilecek kazaları önlemek için kritik bir bileşendir. Topraklama, cihazın metalik dış yüzeyini ve belirli iç bileşenleri kapsar.
8. Korozyon ve Dış Etkenlere Karşı Koruma Kılıfı: Gerilim transformatörlerinin dış yüzeyi, genellikle metal bir koruma kılıfı ile kaplanır. Bu kılıf, transformatörü dış etkenlere (yağmur, rüzgar, güneş ışığı vb.) karşı korur ve aynı zamanda mekanik hasarlardan da muhafaza eder. Çoğu zaman bu koruyucu kılıf, korozyona dayanıklı malzemelerle kaplanmıştır.
9. Havalandırma veya Soğutma Sistemi: Bazı büyük gerilim transformatörleri, sıcaklığı düzenlemek için bir soğutma sistemi ile donatılabilir. Yağ dolumlu transformatörlerde, ısının dağıtılması için radyatör veya soğutucu kanatlar kullanılabilir.

3.5.2.3 Kullanım Amaçları

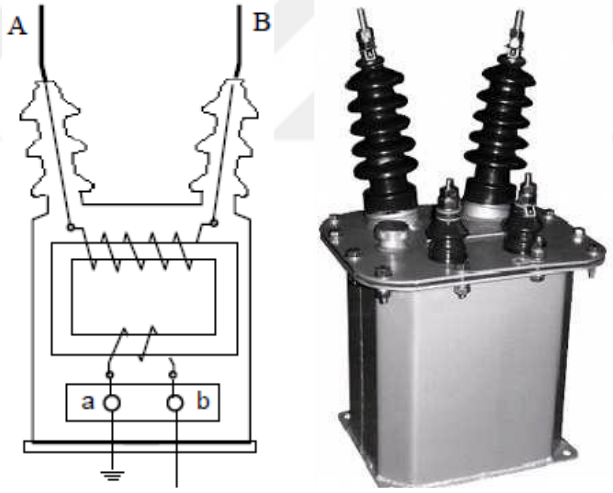
1. Gerilim ölçü transformatörleri, primer sargısındaki yüksek gerilimi, ölçü aletleri ve koruma rölelerinden ayırarak güvenli bir çalışma ortamı sağlar. Bu izolasyon, ekipman ve personel güvenliği açısında oldukça kritiktir.
2. Sistemde gerilim transformatörlerinin kullanılması sayesinde yüksek gerilimlerle doğrudan bağlantı ihtiyacı ortadan kalktığı için röleler ve ölçü cihazlarının daha küçük boyutlarda üretilmesine imkan sağlanmış olur.
3. Yüksek gerilimlerin doğrudan ölçülmesindense, gerilim ölçü transformatörleri kullanmak maliyet açısından daha verimlidir. Bu sayede hem ekonomik bir çözüm sağlanır hem de ekipman maliyetleri düşer.

4. Farklı primer gerilim seviyelerine karşılık olarak, transformatör aracılığıyla belirlenmiş ve standart sekonder gerilim değerleri elde edilir. Bu, sistemin güvenilir şekilde çalışmasına olanak tanır.

3.5.2.4 Bağlandıkları Yere Göre Gerilim Transformatörlerinin Çeşitleri

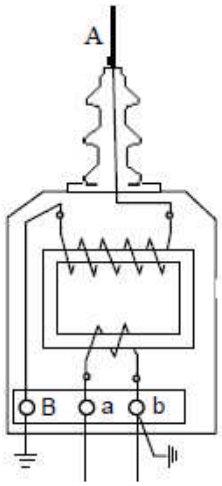
Gerilim ölçü transformatörleri bağlandıkları yere göre ikiye ayrılır. Bunlar Faz-Faz Gerilim Transformatörü ve Faz-Toprak Gerilim Transformatörüdür.

Faz - Faz Gerilim Transformatörü: Sistemde iki faz arasına bağlanarak çalıştırılan transformatörlerdir. Bu tip transformatörler, fazlar arasındaki gerilimi ölçmek için kullanılırlar. İki faz arasına bağlanarak kullanıldıkları için iki tane izolatör bulunmaktadır. Primer sargının uçları bu izolatörlerle dışarıya çıkarılır. Orta gerilim şebekelerinde, dengeli yük taşıyan sistemlerde genellikle üç faz-toprak gerilim transformatörü yerine, iki faz-faz gerilim transformatörü kullanılabilir. Bu tip transformatörlerin görünümü ‘V’ harfine benzediği için bu bağlantı "V montajı" olarak da adlandırılır.



Şekil 3.23 Faz-faz arası gerilim transformatörü [42]

Faz - Toprak Gerilim Transformatörü: Tek izolatörlü (buşing) tip gerilim transformatörleri olarak kullanılır. Bu transformatörlerde, primer sargının bir ucu (polarite olmayan uç) doğrudan topraklanırken, diğer ucu (polarite uç) ise şebekenin faz iletkenine bağlanır.



Şekil 3.24 Faz-toprak gerilim transformatörü[42]

3.5.2.5 Gerilim Transformatörü Etiket Bilgileri

Gerilim ölçü transformatörlerinin üzerindeki etiketlerde, çeşitli teknik bilgiler ve performans özellikleri bulunur:

Çalışma sınıfı, gerilim transformatörlerinin doğruluk seviyesini gösterir. Ölçüm amaçlı transformatörler için 0,1-0,2-0,5-1 gibi sınıflar kullanılırken, koruma amaçlı olanlarda 5P veya 10P sınıfları tercih edilir.

Gerilim dönüştürme oranı, primer sargı geriliminin sekonder sargı gerilimine oranını ifade eder. Bu oran genellikle 34,5/0,1kV, 1500/100V, 1000/120V gibi sayısal değerlerle gösterilir.

Sargı oranı, primer ve sekonder sargıların sarım sayısına oranıdır. İdeal koşullarda, sargı oranı ile gerilim dönüştürme oranı birbirine eşittir.

Anma yalıtım seviyesi: Gerilim transformatörünün, belirli bir süre boyunca dayanabileceği maksimum gerilim seviyesini gösterir ve kV cinsinden ölçülür. Bu değer, elektriksel zorlanmalara karşı cihazın direncini belirtir.

Çalışma frekansı: Genellikle 50 Hz veya 60 Hz olarak belirlenen, transformatörün çalıştığı frekans aralığıdır.

Primer nominal gerilimi: Transformatörün girişine uygulanacak çalışma gerilimidir ve genellikle 0,3 kV'dan başlayarak 380 kV'a kadar değişen değerlere sahip olabilir.

Sekonder nominal gerilimi: Primerde belirtilen gerilim uygulandığında, sekonder uçlardan alınan çıkış gerilimidir. Fazlar arasındaki gerilimde 100-120V arası

değerler görülürken, faz-toprak transformatörlerinde bu değerlerin √3'e bölünmesiyle hesaplanan gerilim kullanılır.

Nominal Güç: Transformatörün çıkış gücü VA cinsinden belirtilir. Gerilim transformatörleri 15-30-60-90-120-150-180 VA nominal güçlerinde imal edilir.

Kullanım alanı ve üretici bilgisi: Transformatörün iç veya dış mekanda kullanıma uygun olup olmadığı ve üretici firmanın adı da etiket üzerinde yer alır.

3.6 Koruma Röleleri

Röleler orta gerilim elektrik sistemlerinde önemli bir role sahip ekipmanlardır. Şebekenin arızalara karşı korunmasını sağlarlar. Bu cihazlar sistemde meydana gelen arızaları tespit edip, anormal durumdan etkilenen bölümleri izole ederek hasarı önler ve sistem kararlılığını korur. Orta gerilimde yaygın olarak kullanılan röle tipleri aşağıda anlatılmıştır.

3.6.1 Aşırı Akım Röleleri

Aşırı akım röleleri, orta gerilim sistemlerinde en yaygın kullanılan koruma cihazları arasındadır. Akım önceden belirlenmiş bir eşiği aştığında çalışırlar ve aşırı yüklere ve kısa devrelere karşı koruma sağlarlar. İki ana aşırı akım rölesi türü vardır: anlık ve zaman gecikmeli. Anlık aşırı akım röleleri özellikle kısa devre arıza koşullarına anında yanıt verirken, zaman gecikmeli röleler gereksiz yere devre dışı kalmadan geçici aşırı yükleri barındırarak kısa bir gecikmeye izin verir. Bu röleler, transformatörleri, hatları ve diğer kritik bileşenleri korumak için gereklidir. *(Aşırı akım röleleri hakkında ayrıntılı bilgi 4.2 başlığı altında yer almaktadır.)*

3.6.2 Diferansiyel Röleler

Diferansiyel röleler, fark akımı prensibine göre çalışan orta gerilim elektrik sistemlerinde hat başı ve hat sonu arasındaki akım farklılıklarını algılayan ve koruma sağlayan önemli bileşenlerdir. Raylı sistemlerde kullanılan diferansiyel röleler, hat korumasını güçlendirmek ve sistemde olası arızaları önlemek için tasarlanmıştır. *(Diferansiyel röleler hakkında ayrıntılı bilgi 4.1 başlığı altında yer almaktadır.)*



Şekil 3.25 M4 metrosuna ait diferansiyel röle

3.6.3 Mesafe Röleleri

Empedans röleleri olarak da bilinen mesafe röleleri, röle konumu ile arıza noktası arasındaki empedansı ölçerek iletim hatlarını korur. Bir arıza meydana geldiğinde empedans düşer ve belirlenen bir eşik değerinin altına düşerse röle çalışır. Bu röleler, röleden uzaklığa göre üç bölgeye ayrılır: Bölge-1, korunan hattın, hat başından itibaren %80'ini kapsar. Bölge-2, korunan hattın tamamını ve komşu hattın %50'sini kapsar. Bölge-3 korunan hattın ve komşu hattın tamamını kapsar. (Koruma bölge mesafeleri ülkeden ülkeye farklılık gösterebilir.) Mesafe röleleri, ağdaki farklı koruma bölgeleri arasında seçici koruma sağlamak için çok önemlidir.

3.6.4 Gerilim Röleleri

Gerilim röleleri sistem gerilimini izler ve gerilim önceden belirlenmiş bir aralıktan saptığında çalışır. Düşük gerilim röleleri, hassas ekipmanlara zarar verebilecek ve verimsiz çalışmaya yol açabilecek gerilimin kabul edilebilir seviyenin altına düştüğü koşullara karşı koruma sağlar. Öte yandan, aşırı gerilim röleleri, yalıtım bozulmasına ve ekipman arızasına neden olabilecek aşırı gerilim seviyelerine karşı koruma yapar. Gerilim röleleri, orta gerilim sistemlerinin kararlılığını ve performansını korumak için son derece önemlidir.

3.6.5 Yönlü Röleler

Yönlü röleler, ileri ve geri yöndeki arızaları ayırt ederek güç akışının yönünü algılamak için tasarlanmıştır. Bu yetenek, gücün çeşitli yönlerde akabileceği birden fazla güç kaynağı ve birbirine bağlı ağlara sahip sistemlerde önemlidir. Bu röleler, arıza yönünü belirleyerek yalnızca arızalı bölümün izole edilmesini sağlayarak genel sistemin bütünlüğünü korur. Yönlü aşırı akım ve yönlü mesafe röleleri, ring şebekelerde ve ağ şebekelerde kullanılır. Orta gerilim şebekelerinin hat uzunlukları kısa olduğu için mesafe röleleri kullanılmaz. Mesafe röleleri iletim hatlarının korunmasında kullanılır.

4
ORTA GERİLİM TESİSLERİNDE KULLANILAN KORUMA SİSTEMLERİ

Orta gerilimli elektrik tesislerinde raylı sistemler için koruma sistemleri büyük önem taşır. Bu sistemlerin içinde, en sık rastlananı diferansiyel koruma sistemidir. Elektrik tesislerinde aşırı yüklenmeyi önlemek için aşırı akım koruması kullanılırken, yalıtım hatalarına karşı sistemi güvenceye alan toprak hatası koruması da mevcuttur. IEC 61850 iletişim protokolü ise, farklı cihazlar arasındaki iletişimi mümkün kılar ve böylece sistem performansını yükseltir.

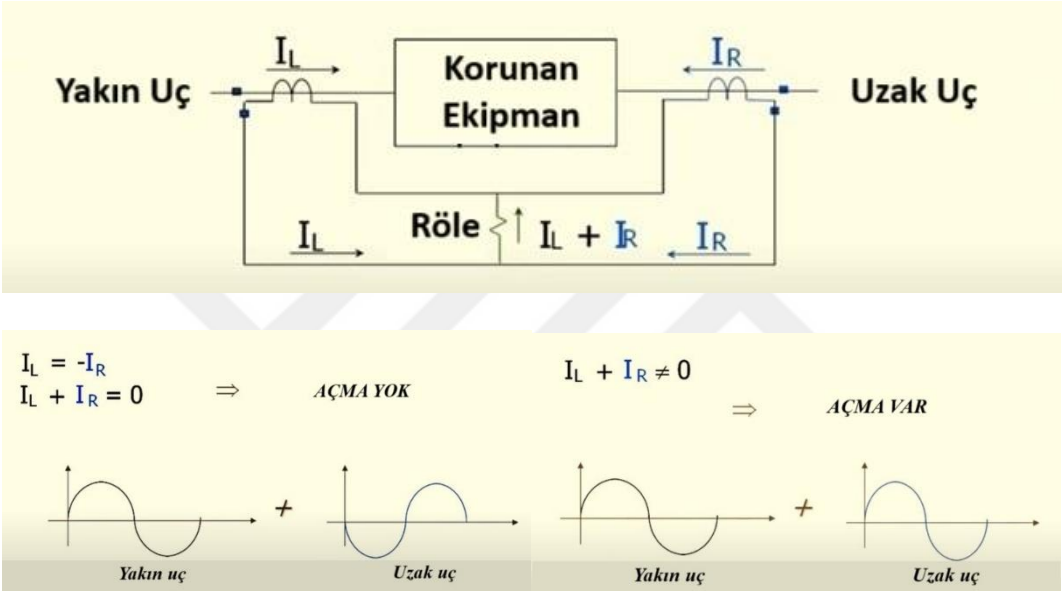
4.1 Direfansiyel Koruma Sistemi

Raylı sistem elektrik tesislerinde diferansiyel koruma sistemleri, elektrik ağındaki hayati ekipmanları güvenli bir şekilde korumak amacıyla kullanılır. Bu sistemler, hat başı akımı ile hat sonu akımı arasındaki anormal akım farkını algılar ve hatların güvenliğini garanti eder. Akım transformatörleri (CT), diferansiyel röleler ve yardımcı donanımlardan oluşan diferansiyel koruma sistemleri, transformatör, generatör ve hat gibi çeşitli uygulama alanlarında koruma sunar, güvenli bir operasyon sağlar ve sistem performansını iyileştirir.

4.1.1 Çalışma Prensibi

Raylı sistem elektrik tesislerinde kullanılan diferansiyel koruma sistemlerinin çalışma prensibi oldukça basittir. Korunan ekipmanın giriş ve çıkış noktalarındaki akım farkını sürekli olarak karşılaştırmak ve herhangi bir kaçak veya arıza durumundaki akım farkını algılayarak hemen koruma işlemi gerçekleştirmektir. Bu sayede, olası zararları önleyerek sistemdeki güvenliği sağlamaktadır. Diferansiyel koruma sistemi, akım transformatörleri ve diferansiyel röleler gibi önemli bileşenleri içermektedir. Akım transformatörleri, korunan ekipmana seri olarak

yerleştirilir ve diferansiyel röleler giriş ile çıkıştan geçen akımları sürekli olarak karşılaştırır. Eğer bu karşılaştırma sonucunda bir fark oluşursa, bunu diferansiyel röle tespit eder ve kesiciye açma (trip) kumandası verir. Diferansiyel röle, belirlenen eşik değerin üzerinde bir akım farkı algıladığında devreye girer ve kaçak durumuyla ilgili sinyal verir. Böylece, herhangi bir tehlikeli durum oluştuğunda sistem tarafından anında kesiciye açma kumandası verilerek elektrik enerjisinin kesilmesi sağlanır. Bu sayede, olası hasarların önüne geçilerek elektrik tesisinin güvenliği maksimum seviyede tutulur.



Şekil 4.1 Çalışma prensibi

4.1.2 Bileşenler

Diferansiyel koruma sistemlerini oluşturan bileşenler arasında akım transformatörleri (CT), diferansiyel röleler ve yardımcı donanımlar bulunmaktadır. Akım transformatörleri, sistem içindeki akımı ölçerken diferansiyel röleler, fark akımlarını algılayıp koruma imkanı sağlar. Sistem performansını ve güvenilirliğini yükseltmek amacıyla, yardımcı donanımlar kullanılır.

Akım Transformatörleri (CT): Akım transformatörleri (CT), raylı sistem elektrik tesislerinde diferansiyel koruma sistemlerinin ana bileşenlerinden biridir. Bu transformatörler, hat üzerinde taşınan akımı ölçer ve differansiyel rölelerin doğru işleyişini garanti eder. CT'lerin doğru pozisyonlanması ve kalibre edilmesi, sistemin koruma kapasitesini direk etkiler.

Diferansiyel Röle: Diferansiyel röleler, raylı sistem elektrik tesislerinde kullanılan koruma sistemlerinde, fark akımını algılayarak hatları korumak için kullanılan önemli bir bileşendir. Bu röleler, giriş ve çıkıştaki akım değerlerini sürekli olarak karşılaştırır ve hatların güvenliği etkin bir şekilde sağlar ve olası arızalar karşısında hızlı bir müdahale imkanı sunar.

Yardımcı Donanımlar: Raylı sistem elektrik tesislerinde diferansiyel koruma sistemlerinde kullanılan yardımcı donanımlar, sistem performansını geliştirmek ve güvenilirliği sağlamak için tasarlanmış ilave bileşenlerdir. Çoğunlukla rölelerin yanında bulunan bu donanımlar, sistemde oluşabilecek yüksek akım ve gerilim değerlerine karşı koruma sağlar ve arızaları minimum düzeye indirir.

4.1.3 Uygulama Alanları

Diferansiyel koruma sistemlerinin raylı sistem elektrik tesislerinde bir dizi farklı uygulama alanları vardır. Bu alanlar arasında transformatör, generatör, bara ve hat koruması bulunur. Transformatör koruması, enerji dönüşümünde kilit bir rol oynarken generatör ve hatların korunması, sistemin güvenli çalışmasını sağlar.

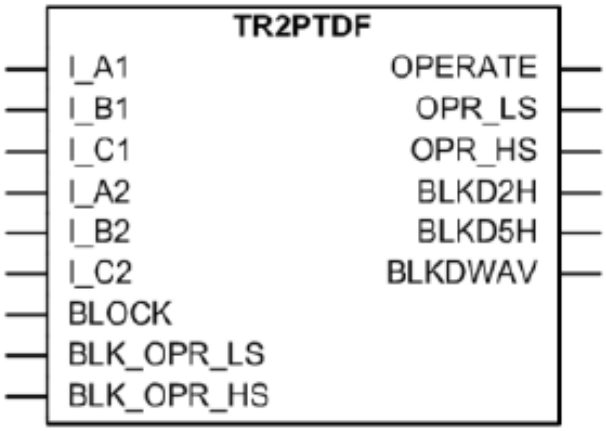
4.1.3.1 Transformatör Koruması (87T)

Transformatör koruması, ANSI 87T koduna uygun olarak geliştirilen diferansiyel koruma sistemlerinin önemli bir bileşenidir. Transformatörler, enerji dönüşümünde kritik bir rol oynar ve bu nedenle doğru bir şekilde korunmaları hayati önem taşır. Diferansiyel koruma sistemleri, transformatörlerin anormal akım ve gerilim durumlarına karşı etkili bir şekilde korunmasını sağlar. Transformatörlerin korunması, enerji şebekesindeki güvenilirliği ve sürekli hizmet vermeyi sağlayan bir görevi yerine getirir. Transformatörlerde meydana gelebilecek hasarlar genellikle büyük elektrik kesintilerine yol açabilir. Diferansiyel koruma sistemleri ise transformatörlerin bu tür potansiyel risklere karşı korunmasını sağlar. Diferansiyel koruma sistemleri, yüksek hassasiyete sahip olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, transformatörlerde meydana gelebilecek en küçük bir akım veya gerilim değişikliği tespit edilerek hızlı bir şekilde tepki verilir. Bu da transformatörün anında korunmasını sağlar ve olası bir arızanın önüne geçer. Diferansiyel röleler transformatörlerin giriş ve çıkış akımlarını karşılaştırarak transformatör içinde bir iç arıza varsa tespit ederek anormal durumlarda alarm verir veya koruma işlemlerini başlatır. Bu röleler, transformatördeki akım dalgalanmalarının izlenmesini sağlar

ve gerektiğinde acil müdahaleye olanak tanır. Sonuç olarak, transformatör koruması, enerji sistemlerinin güvenilirliği ve sürekli hizmet sağlamak için vazgeçilmez bir bileşendir. Diferansiyel koruma sistemleri ve röleler, transformatörlerin anormal durumları algılayarak hızlı bir şekilde korunmasını sağlar. Bu sayede, transformatörlerin performansı artar ve olası arıza riskleri önlenmiş olur.

Tablo 4.1 Fonksiyon Tanımı[43]

Fonksiyon tanımı	IEC 61850 tanımı	IEC 60617 tanımı	ANSI/IEEE C37.2 cihaz numarası
2 sargılı trafolar için tutuculu ve ani diferansiyel koruma	TR2PTDF	3dI>T	87T



Şekil 4.2 Fonksiyon bloğu[43]

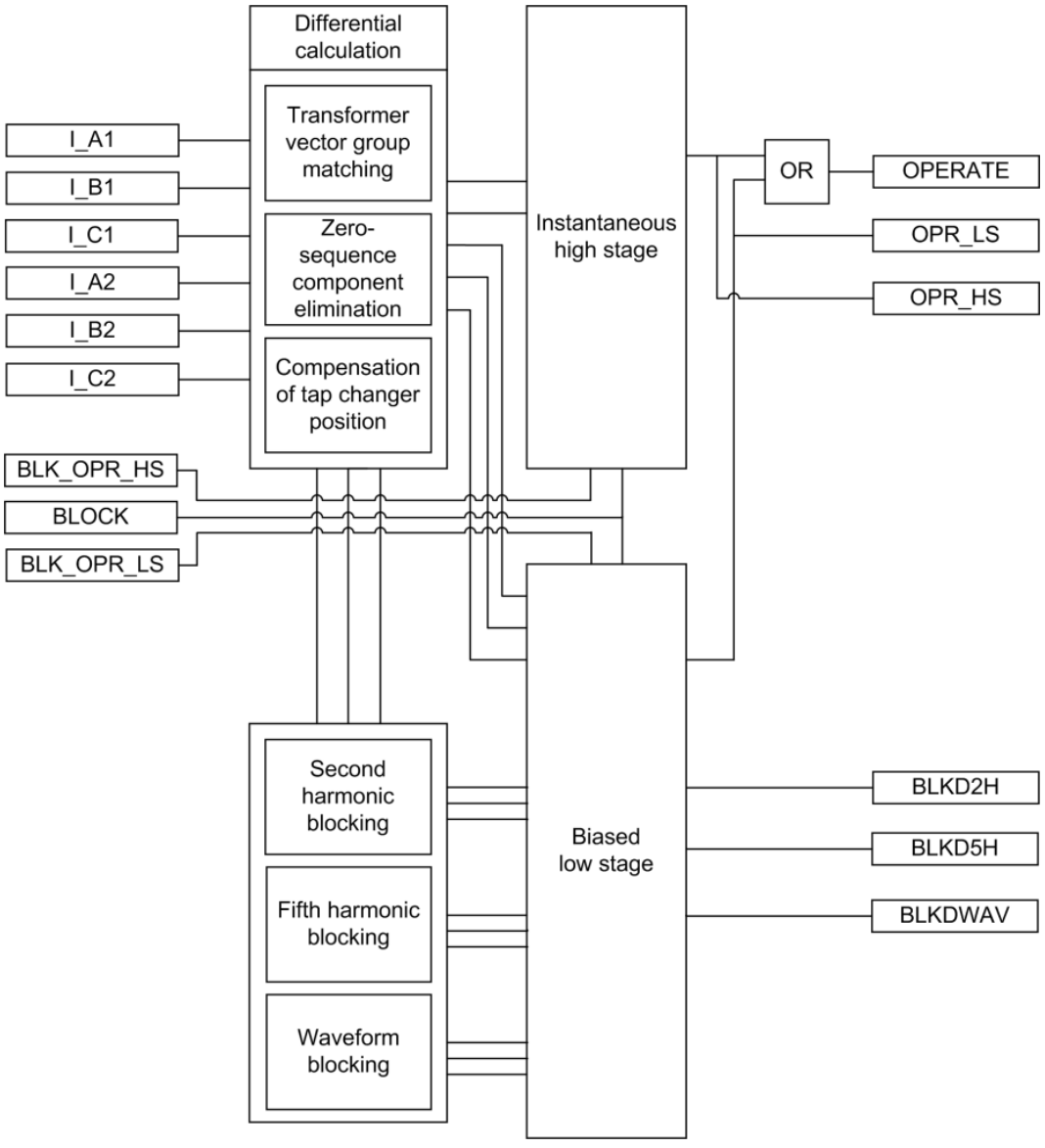
- Fonksiyonellik

TR2PTDF, transformatör diferansiyel koruma sistemi, iki sargılı transformatörleri ve generatör-transformatör bloklarını korumak için tasarlanmıştır. Bu koruma sistemi, düşük eğilimli ve yüksek ani aşamalar içermektedir. Düşük eğilimli aşama, koruma yapılan bölgeden geçen yüksek akımlardan oluşan ölçüm hatalarını artırarak, hataların hızlı bir şekilde temizlenmesini sağlayıp kararlı kalır. İkinci harmonik engelleme, dalga formu tabanlı algoritmalarla birlikte, düşük aşamanın transformatör giriş akımları nedeniyle çalışmamasını sağlar. Beşinci harmonik engelleme ise, ihmal edilebilir transformatör aşırı manyetizasyonu nedeniyle oluşan diferansiyel akımda düşük aşamanın çalışmasını önler. Ani yüksek aşama, harmoniklerinden bağımsız olarak yüksek diferansiyel akımla ciddi hataların çok hızlı bir şekilde temizlenmesini sağlar. Ayar karakteristiği, daha hassas

ayarlanabilir. Ayar değişikliği nedeniyle dönüşüm oranının düzeltilmesi, kademe değiştirici durum bilgisine dayalı olarak otomatik olarak yapılır.

- Çalışma Prensibi

Fonksiyon, Operation ayarı ile etkin veya etkisiz kılınabilir. İlgili parametre değerleri, "On" (Etkin) ve "Off" (Pasif)'dir. Transformatör diferansiyel korumanın çalışması, aşağıdaki fonksiyon şemasında gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Çalışma prensibi[43]

4.1.3.2 Generatör Koruması (87G)

Raylı sistem elektrik tesislerinde ANSI 87G koruması, enerji üretiminde ve dağıtımında büyük öneme sahip olan differansiyel koruma sistemlerinin, generatörlerin güvenliğini sağlamak için kullanıldığı alanlardan sadece biridir.

Generatörler, demiryolu sistemlerindeki elektrifikasyon sürecinde hayati rol oynayan ve yüksek akım ve gerilim değerlerine maruz kalan kritik ekipmanlardır. Bu nedenle, generatörlerin güvenli ve sürekli bir şekilde çalışmasını sağlamak için etkili bir koruma sistemi gerekmektedir. Raylı sistemlerde kullanılan differansiyel koruma sistemleri, generatörlerin anormal durumlarında hızlı ve doğru bir şekilde müdahale ederek, ciddi hasarları önler. Bu sistemler, generatörün üzerinde oluşabilecek herhangi bir diferansiyel akımını algılayarak, hızlı bir şekilde reaksiyon gösterir ve generatörü otomatik olarak durdurur. Bu sayede, potansiyel tehlikeler en aza indirilir ve generatörlerin güvenli bir şekilde çalışması sağlanır. Raylı sistem elektrik tesislerinde kullanılan ANSI 87G korumaları, genellikle yüksek hassasiyete sahiptir ve farklı koruma ayarlarına sahip olabilir. Bu sayede, generatörlerin güvenlik ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir. Ayrıca, bu koruma sistemleri genellikle generatörlerin yanı sıra şalt ekipmanları, transformatörler ve diğer kritik bileşenlerin korunması için de kullanılır. Raylı sistem elektrik tesislerinde ANSI 87G korumasının kullanılması, müşterilerin güvenlik endişelerini azaltır ve elektrik tesislerinin daha güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlar. Bu koruma sistemi, enerji üretiminde ve dağıtımında oluşabilecek olası arızaları minimize ederken, işletme maliyetlerini de düşürür. Bu nedenle, raylı sistem elektrik tesislerinde ANSI 87G korumasının kullanılması, sektördeki önemli bir uygulama alanını oluşturur ve güvenli ve sürdürülebilir işletmelerin temelini oluşturur.

4.1.3.3 Hat Koruması (87L)

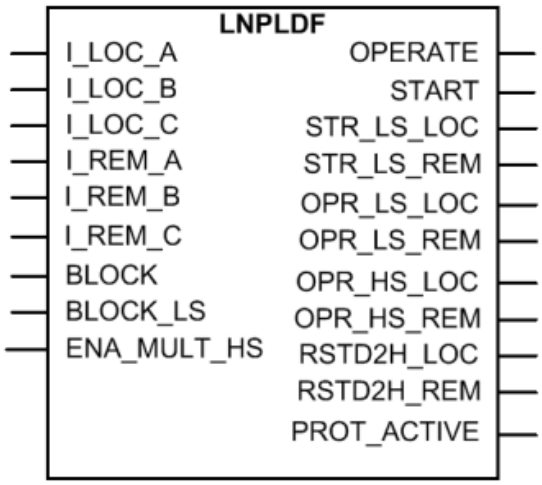
Hat koruma (ANSI 87L), raylı sistemlerde elektrik hatlarının diferansiyel korumasının temelini oluşturan önemli bir sistemdir. Hat üzerinde sürekli akım değerlerini izleyerek herhangi bir farklılıkta hızla müdahale eden bu koruma sistemi, hat segmentini korur. 87L koruması ile röleler, hat arızalarını belirleyerek ilgili segmenti izole eder ve böylece sistemin güvenliğini sürdürür. Raylı sistemlerde enerji kesintileri ve kazaların önlenmesi ile sistem verimliliği artar. Raylı sistemlerde enerji kesintileri ve kazaların önlenmesi ayrıca işletim sürekliliği ve yolcuların güvenliği için büyük önem taşır. Bu nedenle, hat koruma sistemi olan 87L, mevcut yapısı ve fonksiyonlarıyla raylı sistemlerin güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. 87L röleleri, elektrik hatlarında meydana gelen arızaları hızlı bir şekilde tespit eder ve bunlara anında müdahale eder. Bu sayede hat

segmentinde oluşabilecek hasarlar en aza indirilir ve sistemin güvenliği sağlanır. Hat koruma sistemi aynı zamanda enerji tasarrufu ve verimlilik sağlayarak raylı sistemlerin sürdürülebilirliğini artırır. Hat koruma sistemi, farklı raylı sistemlerde kullanılabilir ve her bir sistemin ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir. Sistem, gerçek zamanlı akım izleme ve hızlı müdahale özellikleriyle hatlardaki güvenlik düzeyini yükseltirken aynı zamanda operasyonel maliyetleri düşürür.

Sonuç olarak, hat koruma sistemi olan 87L, raylı sistemlerin güvenliğini ve verimliliğini artırırken enerji kesintilerini önler ve kazaların oluşma riskini azaltır. Bu sistem sayesinde raylı sistemlerin operasyonel performansı yükselirken aynı zamanda kullanıcıların güvenliği sağlanır. Hat koruma sistemi, raylı sistemlerin başarılı bir şekilde işletilmesi ve geliştirilmesi için vazgeçilmez bir bileşendir.

Tablo 4.2 Fonksiyon Tanımı

Fonksiyon tanımı	IEC 61850 tanımı	IEC 60617 tanımı	ANSI/IEEE C37.2 cihaz numarası
Hat diferansiyel koruma ve ilgili ölçümler, tutuculu ve ani kademeler	LNPLDF	3dI>L	87L



Şekil 4.4 Fonksiyon bloğu[43]

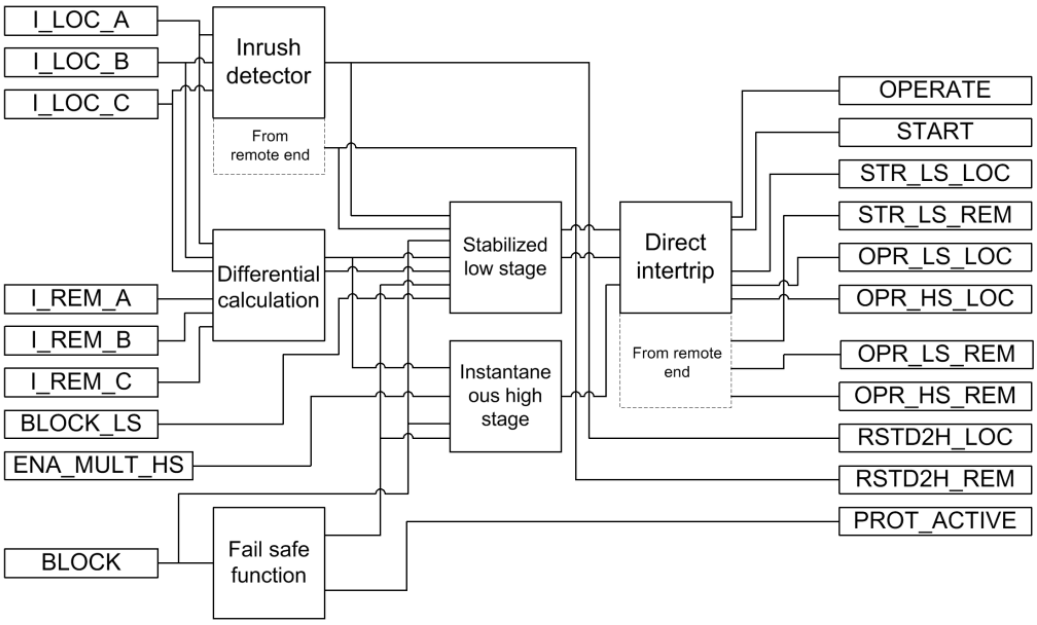
- Fonksiyonellik

Faz ayrımlı hat diferansiyel koruma sistemi olan LNPLDF, dağıtım şebekesi hatları ve kablolarında fider diferansiyel koruma olarak kullanılır. LNPLDF, düşük ve tutucu kademelerle birlikte yüksek ve ani kademeleri içerir. Tutucu düşük ayar, iç arızaların hızlı bir şekilde temizlenmesini sağlarken, korunan bölgeden geçen ve ölçüm hatalarını artıran yüksek dış arıza akımları sırasında kararlı çalışmayı

sürdürür. İkinci harmonik tutuculuk, düşük ayarın, güç transformatörünün enerjilenmesi sırasında mıknatıslama akımları nedeniyle yanlış çalışmasını önler. Tutucusuz yüksek ayar ise, harmoniklerinden bağımsız olarak yüksek diferansiyel akımla meydana gelen ciddi arızaların hızlı bir şekilde temizlenmesini sağlar. Düşük kademe için çalışma zamanı karakteristiği, sabit zaman (DT) veya belirli minimumlu ters zaman (IDMT) olarak seçilebilir. Doğrudan ara açma, yerel kriterler olmasa bile her iki ucun da açılmasını sağlar.

- Çalışma Prensibi

Bu fonksiyon, işlem ayarı ile aktif hale getirilebilir ve devre dışı bırakılabilir. İlgili parametre değerleri, açık ve kapalı olarak belirlenmiştir. Fonksiyon ayrıca, işlem ayarının "Test/bloke" konumuna getirilmesiyle test moduna da ayarlanabilir. Hat diferansiyel koruma fonksiyonun çalışma presibi ve ilgili ölçümler, tutuculu ve ani kademeler, bir modül şeması kullanılarak gösterilmiştir.



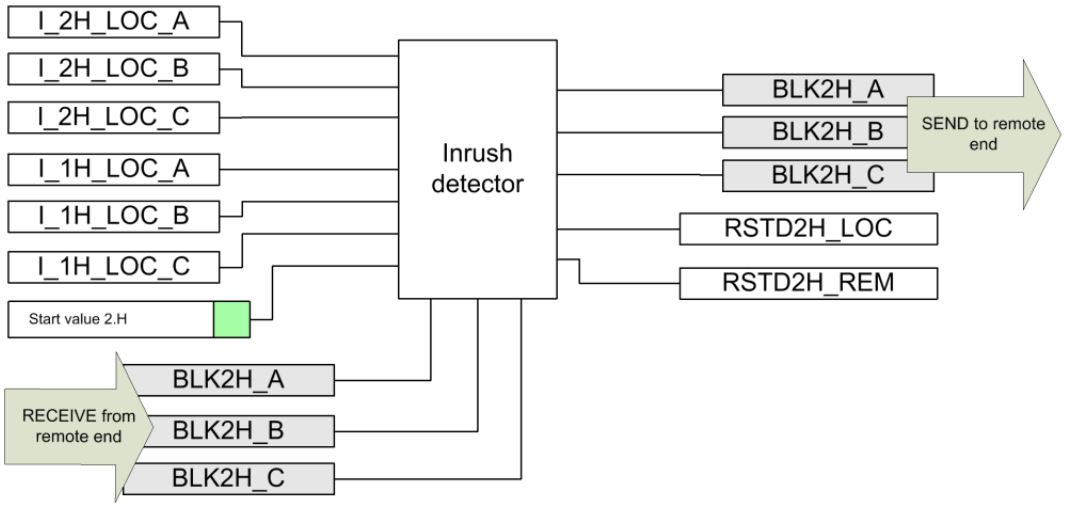
Şekil 4.5 Çalışma prensibi[43]

- Demeraj dedektörü

Transformatör demeraj (kalkış, yol alma) akımları, ölçülen faz akımlarında yüksek miktarda ikinci harmoniğe neden olur. Demeraj dedektörü, transformatörlerdeki demeraj durumlarını belirler. Restraint mode (Tutma modu) parametresi ile ikinci harmonik temelli yerel kilit seçilip kullanılabilir. İkinci harmonik kilit seçildiğinde ve ani yığılma (inrush) akımı tespit edildiğinde, yerel uçta düşük ayar kademesi için

kilit etkinleştirilir. Ani yığılma akım algılayıcısı, I_2H_LOC_A ikinci harmonik akımın I_1H_LOC_A temel frekans akımına oranını hesaplar. Bu hesaplanan değer, 2.H Başlatma Değeri (Start value 2.H) parametresinin ayar değeriyle karşılaştırılır. Eğer hesaplanan değer ayar değerini aşarsa ve I_1H_LOC_A temel frekans akımı nominal akımın yüzde yedisinden fazla ise, BLK2H_A çıkış sinyali etkinleştirilir. Ani yığılma akım algılayıcısı diğer fazları da aynı yöntemle yönetir.

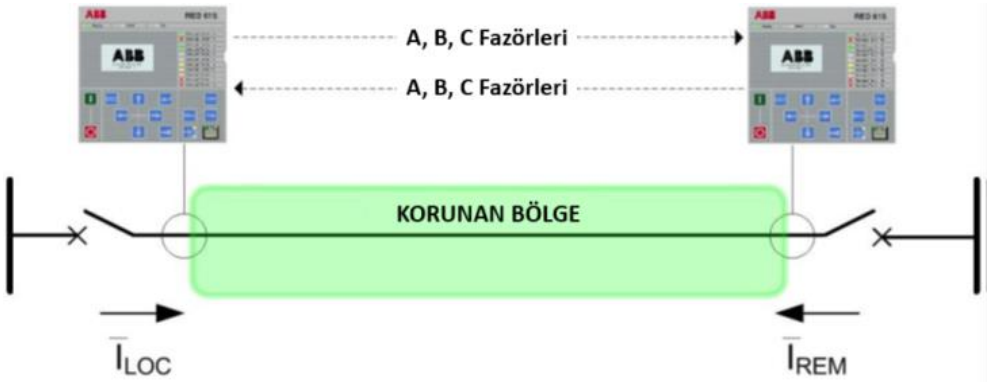
Yerel olarak tespit edilen transformatör ani yığılma akımı, aynı zamanda yerel Restraint mode (Tutma modu) ayar parametresi değerinden bağımsız olarak bir ikili bildirim sinyali olarak uzak uca iletilir. Tutuculu düşük ayar iç kilit etkinleştirildiğinde, RSTD2H_LOC ve RSTD2H_REM çıkışları, ani yığılma akımının yerel veya uzak uçta ya da her ikisinde birden tespit edilmesine bağlı olarak aynı anda aktif hale gelir.



Şekil 4.6 Demaraj akımı algılama mantığı[43]

- Diferansiyel hesaplama

Çalışma prensibi, koruma bölgesine giren ve çıkan akımların, veri alışverişi için kullanılan iletişim kanalları üzerinden her iki uçta yapılan diferansiyel akım hesaplamasına dayanır. Normal çalışma koşullarında, diferansiyel akımlar neredeyse sıfırdır. Faz ayrımlı olan diferansiyel koruma, her iki uçta diferansiyel akımların ayrı ayrı hesaplanmasını sağlar.



Şekil 4.7 Temel koruma prensibi[43]

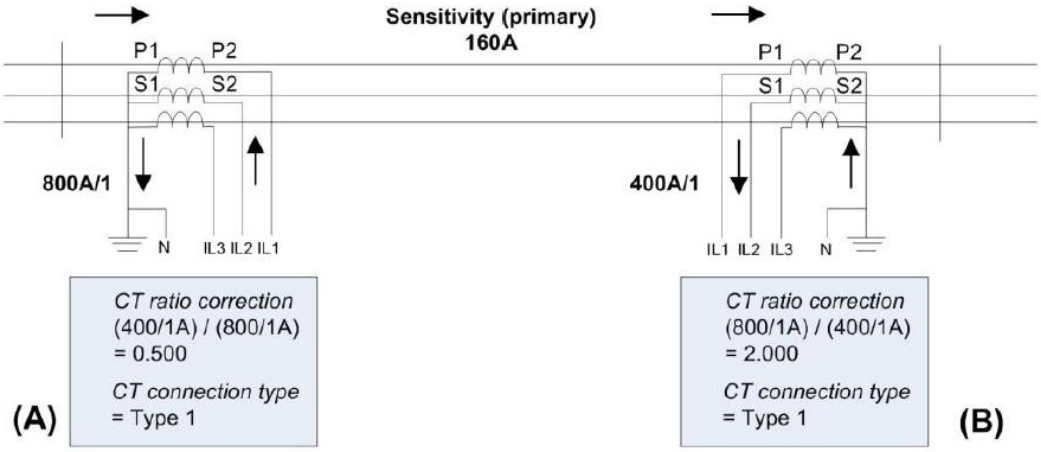
Diferansiyel akım IΔ (Id), her iki uçta da 4.1'deki formülle hesaplanır:

$$I_d = \left|\overline{I_{LOC}} + \overline{I_{REM}}\right| \quad (4.1)$$

Tutucu akım Ibias (Ib), her iki uçta da 4.2'deki formülle elde edilir:

$$I_b = \frac{\left|\overline{I_{LOC}} - \overline{I_{REM}}\right|}{2} \quad (4.2)$$

Akım transformatörlerinin yıldız noktalarının konumuna bağlı olarak, yerel ve uzak akımların polaritesi farklı olabilir ve bu durum hesaplama algoritmalarının yanlış çalışmasına sebep olabilir. Ayrıca, her iki uçtaki akım transformatörü (CT) dönüştürme oranları farklı olabilir; diferansiyel akım hesaplamalarının her iki uçta da doğru olmasını sağlamak için bu oranların dengelenmesi gereklidir. Çalışma karakteristiği ile ilgili ayarlar, her iki hat ucundaki nümerik rölelere (Akıllı Elektronik Cihazlar, IED) akım transformatörü sekonder nominal akımı yüzde olarak girilmelidir. Gerçek primer ayar için, her iki hat ucundaki ilgili akım transformatörü oranları dikkate alınmalıdır. Nominal düzeylerdeki farkın denkleştirilmesi için akım transformatörü oranı düzeltme (CT ratio correction) parametre değerlerinin nasıl seçileceği, aşağıdaki örnekte açıklanmıştır. Örneğin, 160 A primer akım, IED (A) için 160A / 800A x %100 = %20'ye ve IED (B) için 160A / 400A x %100 = %40'a eşit olacaktır. Akım transformatörü oranı düzeltme ayar parametresi, iki IED'de farklı oranlara sahip akım transformatörlerinin kullanılması durumunda uygulanır. Bu ayarın gerçek koruma kademesi ayarları üzerinde bir etkisi yoktur.

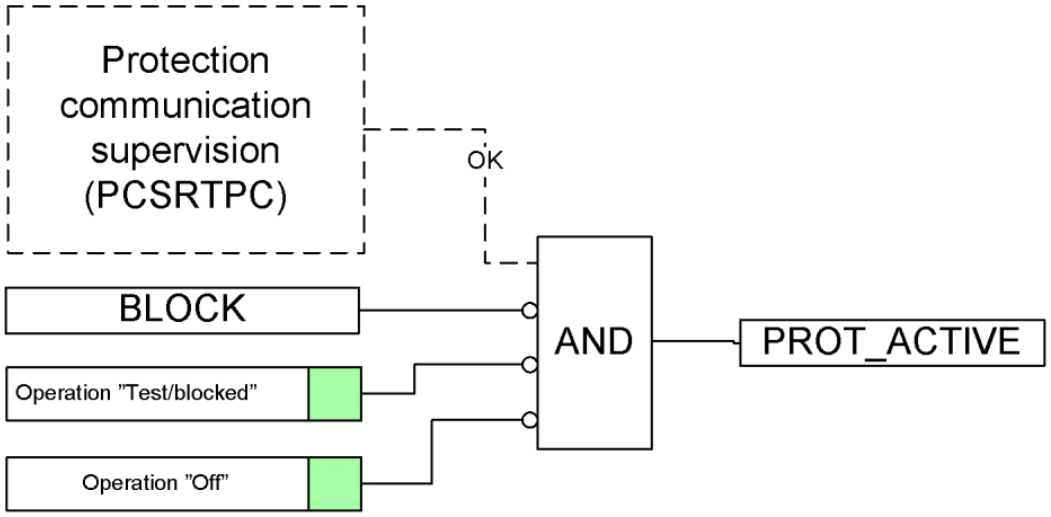


Şekil 4.8 Dış arıza sırasında diferansiyel akım örneği[43]

Akım Transformatörü bağlantı tipi, iki ihtimale göre seçilir:

1. Yerel ve uzak akım transformatörü sekonder akım yönleri birbirine ters olduğunda her iki uçta "Type 1 (Tip 1)" seçilir (varsayılan). "Type 1", akım transformatörlerinin yıldız noktalarının her iki hat ucunda da bara veya hat tarafında (aynı) olduğunda seçilmelidir.
2. Yerel ve uzak akım transformatörü sekonder akım yönleri aynı olduğunda her iki uçta "Type 2 (Tip 2)" seçilir. Tip 2, akım transformatörlerinin yıldız noktalarının biri hat ucunda hat tarafında ve diğer hat ucunda ise bara tarafında seçilmelidir.

Güvenli çalışma fonksiyonu: İletişim girişimi sırasında yanlış çalışmayı önlemek için, koruma iletişim denetimi iletişim kanalında şiddetli girişim tespit ettiğinde LNPLDF fonksiyonunun çalışmasını kilitler. Bir iletişim kesintisi sırasında diferansiyel düşük ayar kademesi başlatma aldığında, zamanlayıcı reset aşaması etkinleştirilir.



Şekil 4.9 Güvenli çalışma fonksiyonunun çalışma mantığı[43]

Fonksiyon, işlem ayarı ile "Test/blocked (Test/kilitli)" durumuna da alınabilir. Bu özellik, devreye alma sırasında da kullanılabilir. Fonksiyonun mantıkla bloke edilmesi için BLOCK girişi sağlanmıştır. Fonksiyon bloke edildiğinde, izlenen veriler ve ölçülen değerler hala mevcut olur ancak ikili çıkışlar bloke edilir. Fonksiyon bloklandığında, doğrudan ara açma da bloklanır. Koruma fonksiyonunun çalışmaya hazır olduğu zamanlarda, PROT_ACTIVE çıkışı her zaman aktiftir. PROT_ACTIVE artçı koruma fonksiyonları için bir bloke sinyali olarak kullanılabilir.

Dengeli düşük kademe: Dengeli düşük kademede, yük akımı arttıkça, açma için gerekli olan diferansiyel akım da artar. Bu durum, normal çalışma halinde veya dış arızalar sırasında oluşur. İç arıza meydana geldiğinde, korunan nesnenin her iki tarafındaki akımlar arızaya doğru akar ve stabilize akımını önemli ölçüde düşürür. Bu durum, iç hatalar sırasında dahili arızalar sırasında çalışmayı daha hassas hale getirir. Düşük kademe, bir zaman gecikmesi fonksiyonu içerir.

Düşük kademenin, görünen diferansiyel akımı dikkate alması çeşitli faktörlerden etkilenir:

• Koruma bölgesi içinde küçük dağılmış yükler

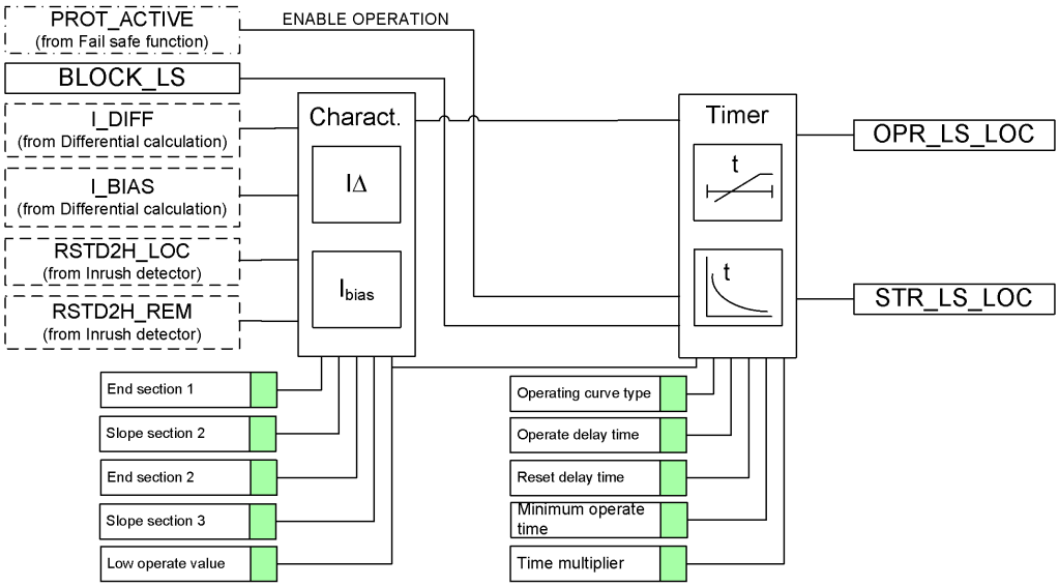
• Akım transformatörü hataları

• Akım transformatörü doyumu

• Haberleşme kanalının gidiş-dönüş yollarındaki küçük asimetriler

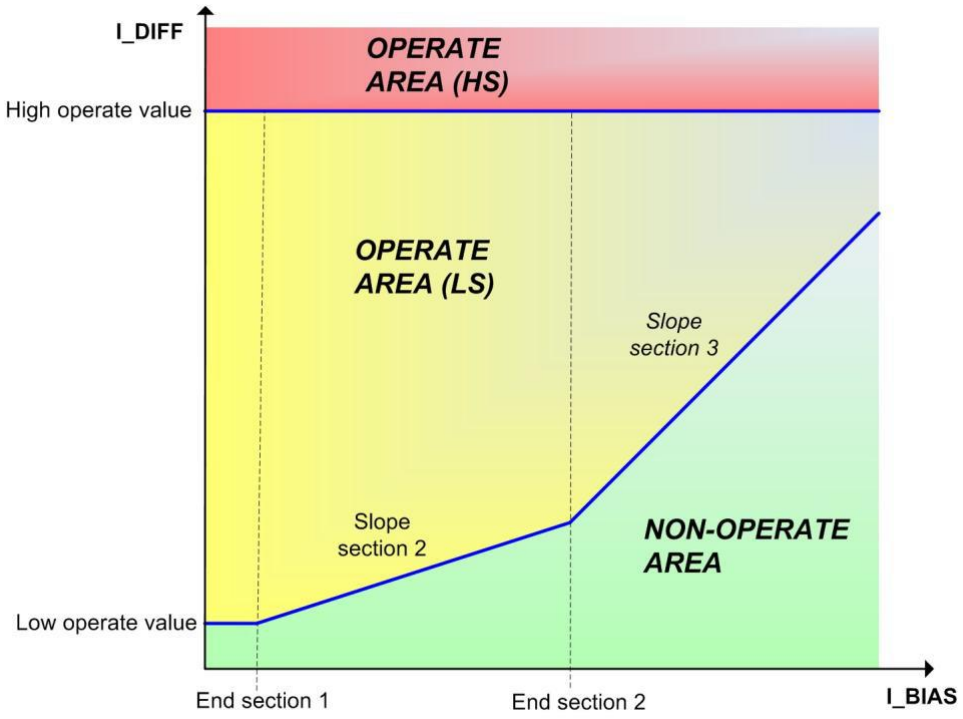
• Küçük kararlı hat şarj akımı

Zamanlayıcı, hesaplanan diferansiyel akım, stabilize akım ve ayarlanmış diferansiyel karakteristiğe göre etkinleştirilir.



Şekil 4.10 Dengeli düşük kademe çalışma mantığı[43]

Sabitlik işlevin çalışmasını etkiler.



Şekil 4.11 Diferansiyel koruma çalışma karakteristiği. (LS) düşük kademe ve (HS) yüksek kademe bölgesini gösterir.[43]

Diferansiyel fonksiyonun çalışma karakteristiği eğrisinin eğimi, farklı bölüm aralıklarında değişir:

• Bölüm 1: 0.0 < Ib/In < Bölüm 1 sonu (End section 1). Bu aralıkta, açma için gerekli olan diferansiyel akım sabittir. Diferansiyel akım değeri, fonksiyon için seçilmiş olan temel ayar (Düşük akım değeri) ile aynıdır. Temel ayar, hattın yüklenmemiş akımının, dağılmış yük akımının ve akım transformatörlerinin küçük hatalarının ortaya çıkmasına izin verir. Ayrıca, işletim karakteristiğinin genel seviyesini etkilemek için de kullanılabilir.

• Bölüm 2: Bölüm 1 sonu (End section 1) < Ib/In < Bölüm 2 sonu (End Section 2). Bu bölüm, başlatma oranının etki alanı olarak adlandırılır. Bu bölümde, başlatma oranındaki değişiklikler, karakteristiğin eğimini etkiler. Yani, yük akımındaki değişime kıyasla diferansiyel akımda açma için değişimin ne kadar büyük olacağını etkiler. Başlatma oranı, akım transformatörü hatalarını dikkate almalıdır.

• Bölüm 3: Bölüm 2 sonu (End section 2) < Ib/In. Bu bölümde eğim ayarlanırken, bir dış arıza olduğunda ve diferansiyel akım çoğunlukla doymuş akım transformatörleri tarafından üretildiğinde, korumanın gereksiz çalışmasını önlemeye dikkat edilmelidir.

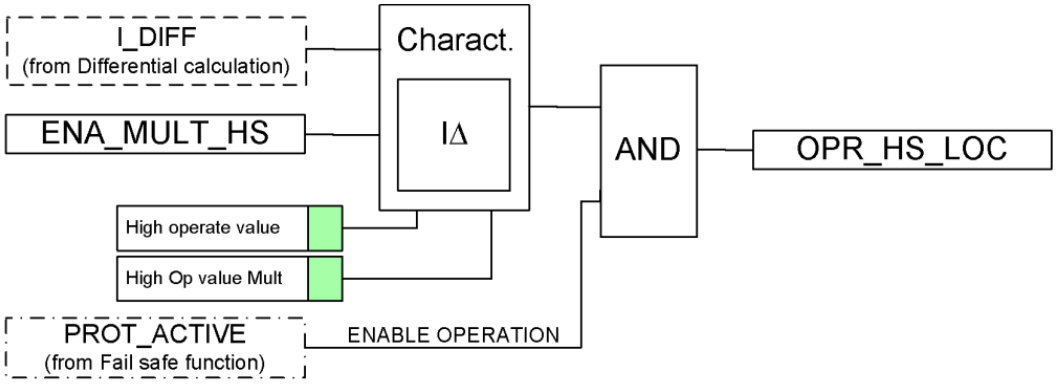
Diferansiyel koruma sistemi, temel frekans bileşenlerine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu sistem, hassas ve kararlı bir performans sergiler; akımın DC bileşeni ve harmonikleri, yanlış çalışmalara sebep olmaz.

- Zamanlayıcı

Zamanlayıcı etkinleştirildiğinde STR_LS_LOC çıkışını aktif hale getirir. Ayarlanan çalışma eğrisi tipine bağlı olarak, zamanlayıcı özellikleri DT veya IDMT'ye göre belirlenir. Çalışma zamanlayıcısı, DT modunda ayar gecikme süresi ile belirlenen değerine veya ters zaman eğrisi ile tanımlanan maksimum değere ulaşırsa, OPR_LS_LOC çıkışı aktif hale gelir. Çalışma modu IDMT'ye göre ayarlandığında, standart ters zaman karakteristikleri bölümünde sunulan IDMT denklemlerinde, düşük çalışma değeri referans değer (Başlatma değeri) olarak kullanılır. Bir düşme durumu meydana geldiğinde, zamanlayıcı sıfırlama durumu aktif hale gelir. Sıfırlama, DT karakteristiklerine göre yapılır.

- Ani yüksek ayar kademesi

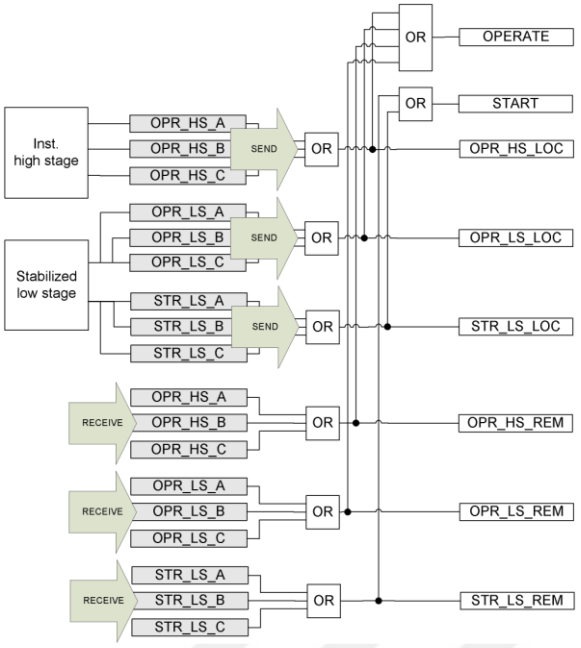
Tutuculu düşük ayar kademesine ek olarak, LNPLDF'nin anlık yüksek ayar kademesi de bulunmaktadır. Ani yüksek ayar kademesi tutucusu çalışır. Ani yüksek kademe, diferansiyel akım genliği, yüksek işletim değeri ayarının belirlediği değerden daha yüksek olduğunda hemen devreye girer. Eğer ENA_MULT_HS girişi aktifse, yüksek çalışma değeri ayarı içsel olarak Yüksek çalışma değeri çarpanı ayarı ile çarpılır.



Şekil 4.12 Ani yüksek ayar kademesinin çalışma mantığı[43]

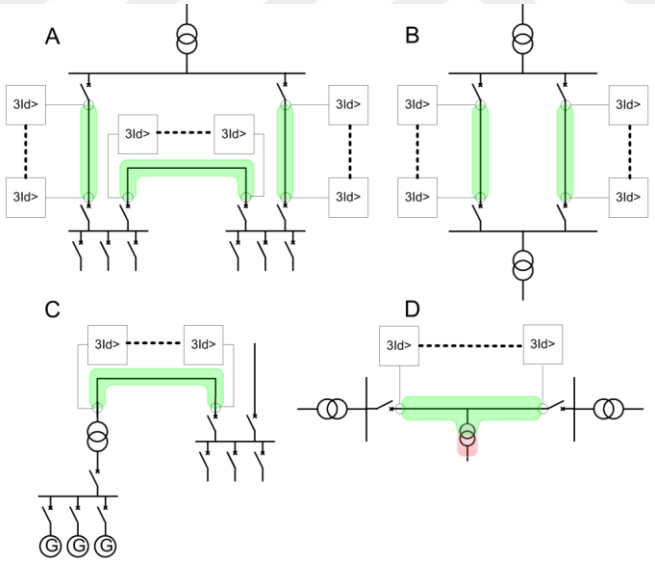
- Doğrudan karşıyı açtırma

Doğrudan karşıyı-açtırma, bir arıza tespit edildiğinde, korunan hattın her iki ucundaki devre kesicilerin eşzamanlı olarak açmasını sağlamak için kullanılır. Başlatma ve çalışma sinyalleri, iletişim yoluyla uzak uca gönderilir. Hat diferansiyel koruma sisteminin doğrudan karşıyı açma fonksiyonu LNPLDF'ye dahildir. OPERATE çıkış, hem yerel hem de uzak uçlardaki her iki kademenin çalışma sinyallerini birleştirir, böylece yerel olarak doğrudan karşıyı açma sinyali için kullanılabilir.



Şekil 4.13 Doğrudan karşıyı-açtırma fonksiyonunun çalışma mantığı[43]

Başlatma ve çalışma sinyalleri, düşük ve yüksek kademeler için, lokal ve uzak uçlar ayrı ayrı sağlanır.

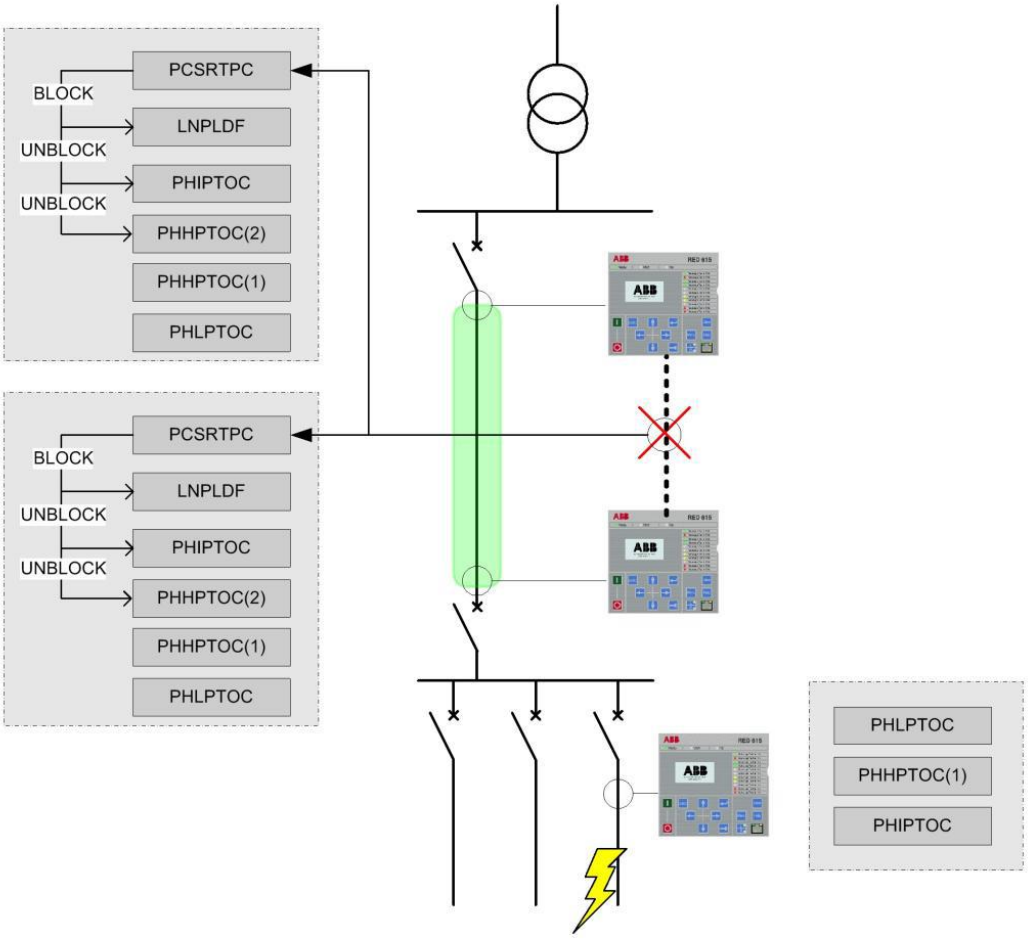


Şekil 4.14 Hat diferansiyel uygulamaları[43]

- İletişim denetimi

Tipik bir hat diferansiyel koruma uygulaması, ana koruma olarak LNPLDF'yi içerir. Yedek aşırı akım fonksiyonlarına koruma iletişim arızası durumunda gerek duyulur. İletişim denetimi fonksiyonu, koruma birimleri arasındaki iletişimde bir arıza tespit ettiğinde, hat diferansiyel korumasını engelleyerek ve aşırı akım

fonksiyonlarını serbest bırakarak hattın güvenli çalışması garanti edilmiş olur. Bir iletişim arızası tespit edildiğinde, koruma iletişim gözetimi fonksiyonu LNPLDF hat diferansiyel korumasını bloke eder ve aşırı akım korumasının anlık ve yüksek ayar kademelerini (örneğin, 2. kademe) serbest bırakır. Bu fonksiyonlar, uzak uç fider koruma IED'si için yedek koruma sağlamak amacıyla kullanılır. Seçiciliğin normalden daha zayıf olabileceği bir durum oluşsa da, sistem için koruma hala mevcut olmalıdır.



Şekil 4.15 Koruma iletişimi denetimi iletişim arızalarını tespit eder[43]

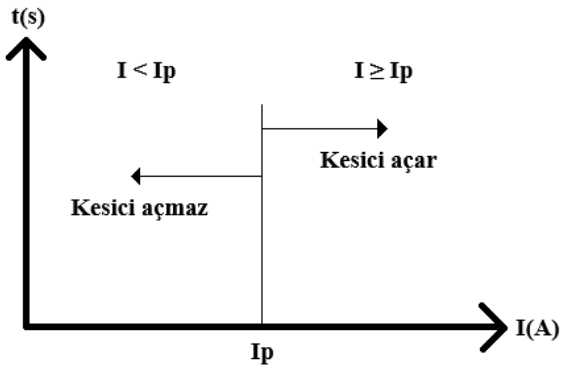
4.2 Aşırı Akım Koruması

Orta gerilim koruma sistemlerinde rol alan aşırı akım koruması, tesislerin aşırı akım arızalarına karşı korumasını sağlar. Eğer bir cihazın nominal akım değerini geçen bir akım tespit edilirse, bu koruma sistemi devreye girer ve cihazları bu aşırı akımın zararlarından korur. Bunun sonucunda aşırı akım koruması, tesislerde sıkça karşılaşılan büyük hasarları ve arızaları engellerken sistemin güvenliğini de korur.

Böylece tesislerdeki ekipmanların uzun süreli kullanımını sağlar ve sistem performansını iyileştirir.

4.2.1 Anlık Aşırı Akım Rölesi

Elektrik sistemlerinde aşırı akım durumlarında kısa sürede hızlı bir şekilde koruma sağlamak amacıyla kullanılan bir koruma rölesidir. Bu tip röleler, herhangi bir zaman gecikmesi olmadan çalışır ve akımın belirlenen eşik değerini (çekme akımı – pickup current (Ip)) aşması durumunda hemen devreyi açar. Diğer tip aşırı akım rölelerinden farkı, çalışması sırasında zamana dayalı bir gecikme olmaksızın hemen tepki verebilmesidir, bu nedenle arıza durumlarında ekipmanların korunması için kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.16 Anlık aşırı akım rölesi zaman - akım grafiği

Anlık aşırı akım rölesinin çalışma prensibi basit bir manyetik etkiye dayanır. Röle içerisindeki akım bobini, manyetik çekirdek etrafına sarılmıştır. Bu bobin üzerinden geçen akım, rölenin eşik değeri akımını aştığında, manyetik çekim kuvveti artar ve rölede bulunan demir bir parça çekirdek tarafından çekilir. Bu hareket sonucunda normalde açık (NO) olan kontaklar kapanır ve röle devreyi açarak koruma sağlar. Rölenin bu çalışma prensibi, manyetik alanın kuvvetlenmesi ile temasların kapanmasına dayanır. Çalışma süresi teoride anlık olsa da, pratikte rölenin tepki süresi birkaç milisaniye civarındadır.

Bu tip rölenin en önemli parametrelerinden birisi, çekme akımının doğru ayarlanmasıdır. Çekme akımı, sistemde korunması gereken elemanların maksimum yük akımı göz önünde bulundurularak seçilir. Bu eşik değeri doğru seçilmezse, röle ya gereğinden önce tetiklenerek gereksiz açmalara neden olabilir ya da korunması gereken bir arıza durumunda geç tepki verebilir.

Anlık aşırı akım röleleri, genellikle 0,1 saniyeden daha kısa bir sürede çalışır. Rölenin çalışma süresi, akımın ne kadar hızlı bir şekilde artış gösterdiği ile ilgilidir. Rölenin çalışmaya başlaması için gereken minimum akıma çekme akımı denir. Bu değer genelde sistemde beklenen normal işletme koşullarının üzerinde ancak kısa devre veya toprak arızası gibi aşırı akım durumlarına karşı devreyi açtıracak şekilde ayarlanır. Bu tip röleler, ANSI standardına göre 50 numaralı cihaz kodu ile tanımlanır. ANSI 50 cihazı, yönsüz bir anlık aşırı akım koruma rölesini ifade eder. Uluslararası IEC 61850 standardına göre, bu röleler "Protection Instantaneous Over Current" (PIOC) olarak adlandırılarak tanımlanır. Bu düğüm, rölenin hızlı tepki verebilmesini sağlamak için geliştirilmiş algoritmaları içerir[44].

Anlık aşırı akım röleleri, genellikle yüksek kısa devre akımlarının oluştuğu yerlerde kullanılır. Tipik olarak enerji kaynağına yakın olan çıkış hatları (feeder), bara sistemleri (busbar) ve transformatörler gibi elemanların korunmasında tercih edilir. Bu noktalarda oluşabilecek aşırı akımlar, sisteme ve elektrik devre ekipmanlarına ciddi zarar verebileceğinden, hızlı tepki veren rölelerin kullanılması son derece önemlidir. Örnek olarak, enerji kaynağına yakın yerlerde meydana gelen bir kısa devre, akımın hızla artmasına neden olur ve gecikmesiz bir şekilde rölenin hızlı müdahale etmesi gereklidir. Bu tip durumlarda, rölelerde yaşanabilecek küçük bir zaman gecikmesi bile büyük maddi kayıplara yol açabilir ve sistemin uzun süre devre dışı kalmasına neden olabilir.

Anlık aşırı akım rölelerinin en büyük avantajı, kısa devre veya toprak arızası gibi hızlı ortaya çıkan olaylarda sistemin korunmasına olanak sağlayan düşük tepki süresidir. Belirli bir zaman gecikmesi olmadan çalışması, sistemin yüksek hızlı koruma ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Bu sayede, ekipmanların hasar görmesi önlenir ve enerji kesintileri en aza indirgenmiş olur.

4.2.2 Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölesi

Sabit zaman gecikmeli aşırı akım rölesi, belirli bir akım seviyesinin üzerine çıkıldığında, ayarlanmış bir zaman gecikmesinden sonra devreyi kesen bir koruma cihazıdır. Bu röle, ayarlanabilir bir zaman gecikmesi ve akım seviyesi ile çalışır; ancak, zaman gecikmesi akımın büyüklüğüne bağlı değildir. Röle, akımın ayarlanan eşik değerini aştığında devreye girer ve önceden belirlenen bir süre sonunda devreyi keser.

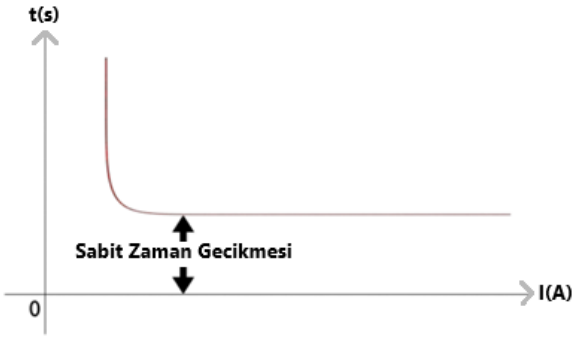
Bu tür rölelerde ayar parametrelerinin seçimi genellikle kolaydır. İkinci bir korumanın gerektiği durumlarda, röle ayarlarının, uzak uçta oluşabilecek arıza altındaki akımdan daha düşük, ancak en yüksek olası yük altında devreye girmeyecek şekilde yapılması gerekmektedir. Büyük motorların kalkış anlarındaki demaraj akımları veya transformatörlerin manyetik doyma akımları gibi geçici yük durumlarına karşı uygun bir ayar yapılmalıdır.

Sabit zaman gecikmeli aşırı akım rölesi, ters zaman gecikmeli aşırı akım rölesine benzer şekilde çalışsa da, farkı sabit bir zaman gecikmesi ile devreyi açmasıdır. Akım değeri ne kadar büyük olsa da, rölenin devreyi açma süresi sabittir ve bu süre, röle kullanıcısı tarafından ayarlanabilir. Bu tür röleler, özellikle iletim hatları ve transformatörlerde, belirli bir süre gecikmesiyle devrenin açılması gerektiğinde tercih edilir.

Sabit zaman gecikmeli rölenin çalışması için iki koşulun sağlanması gerekmektedir. Akım, röle tarafından belirlenen eşik değerini aşmalı ve arıza en az rölenin zaman ayarı (açma süresi) kadar uzun sürmelidir. Modern röleler, birden fazla koruma aşaması içerebilir ve her aşama için ayrı akım ve zaman ayarları girilebilir. Bu tür rölelerde, çalışma süresi sabittir ve akımın büyüklüğünden bağımsızdır. Ayrıca, bu röleler kolayca koordinasyon sağlanabilecek bir yapıya sahiptir ve arıza konumundan veya besleme değişkenliğinden bağımsız olarak sabit bir açma süresine sahiptir.

Sabit zaman gecikmeli röleler, aşırı akım değerine ulaşıldığında devre kesiciyi tetiklemek için belirli bir süre geciktirme mekanizması kullanır. Kullanıcı, hem akım alma seviyesi hem de zaman gecikmesini ayarlayabilir ve bu ayarlamalarla röle, belirlenen sürenin ardından devreyi kesmek üzere bir sinyal üretir. Özellikle yedek koruma olarak kullanılan bu röleler, ana rölenin devreye girmemesi durumunda devreye girer ve gecikmeli bir şekilde devre kesiciyi tetikleyerek devreyi açar.

Bu röleler, genellikle ANSI 51 cihaz numarası ile tanımlanır ve IEC 61850 standardına göre PTOC (Protection Time Overcurrent) mantık düğümüyle ilişkilendirilir. Bu röle algoritması, gecikmeli olarak aşırı akımların devreyi kesmesi için kullanılır ve genellikle ana koruma sistemi başarısız olduğunda yedek koruma olarak işlev görür [45].



Şekil 4.17 Sabit zamanlı aşırı akım rölesi zaman – akım grafiği

4.2.3 Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi

Ters zamanlı aşırı akım rölesi, aşırı akım röleleri arasında en yaygın kullanılan tiplerden biridir. Bu röle, adından da anlaşılacağı gibi, rölenin çalışma süresinin akımın büyüklüğüyle ters orantılı olduğu bir prensibe dayanır. Yani, geçen akım ne kadar büyükse, rölenin devreyi açma süresi o kadar kısalır; buna karşılık, daha düşük akım seviyelerinde, rölenin çalışma süresi artarak 10 saniyeye kadar uzayabilir. Bu özellik, geçici akım artışlarının (örneğin motorların kalkış anında olduğu gibi) rölenin yanlış açmasına sebep olmasını engellemeye yardımcı olur.

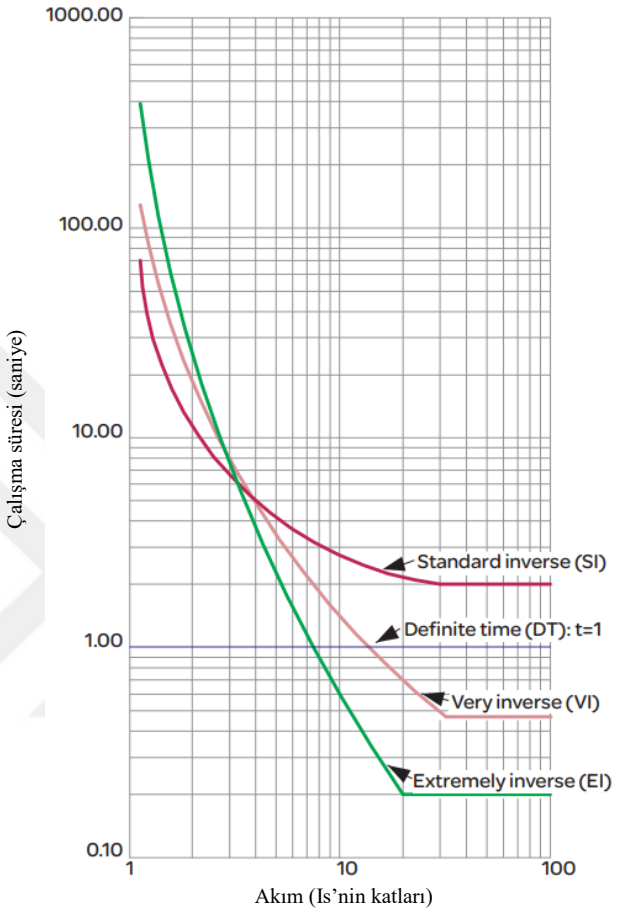
Aşağıdaki tabloda röle karakteristiklerine göre rölelerin açma sürelerinin (t) hangi denklemlere göre hesaplandığı gösterilmiştir[46].

Tablo 4.3 Röle karakteristiğine rölelerin açma sürelerinin hesaplandığı denklemler (IEC 60255-151)

Röle Karakteristiği	Denklem (IEC 60255)
Normal Ters (SI)	$t = TMS \cdot \frac{0,14}{I_r^{0,02} - 1}$
Çok Ters (VI)	$t = TMS \cdot \frac{13,5}{I_r - 1}$
Aşırı Ters (EI)	$t = TMS \cdot \frac{80}{I_r^2 - 1}$
Uzun Zaman Ters	$t = TMS \cdot \frac{120}{I_r - 1}$

Ir = I / Is , I = ölçülen akım , Is = röle ayar akımı , TMS = zaman çarpanı ayarı(time multiplier setting)

Aşağıdaki grafikte Normal Ters, Çok Ters ve Aşırı Ters Zamanlı Aşırı Akım rölelerinin açma zamanı (operating time) bakımından Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölesiyle karşılaştırması gösterilmektedir. (Zaman ayar çarpanı (TMS) "1" olarak alınmıştır.)



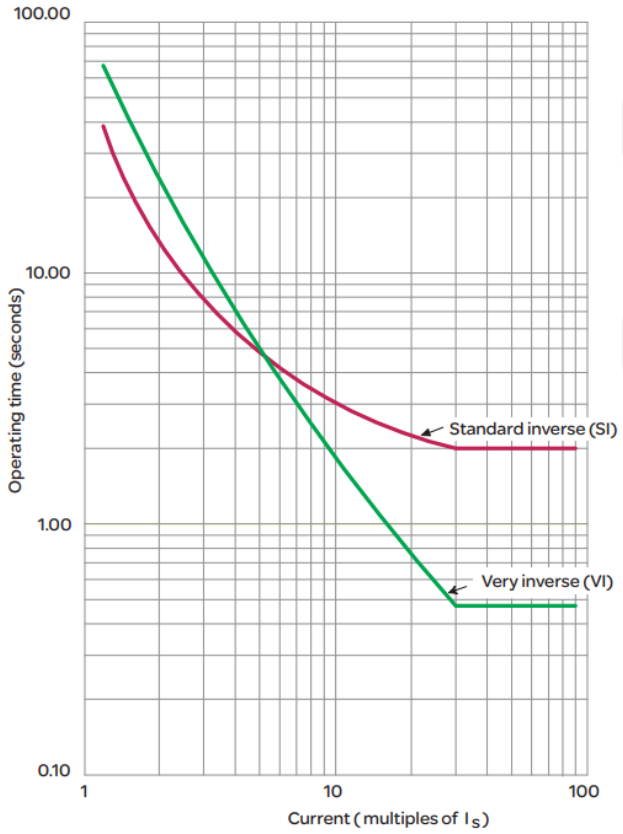
Şekil 4.18 Normal ters, çok ters, aşırı ters ve sabit zamanlı aşırı akım rölelerinin eğrilerinin karşılaştırılması (IEC 60255 characteristics; TMS=1.0) [47]

4.2.3.1 Normal Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi (Standard Inverse Time Overcurrent Relay) (SI)

Normal ters zamanlı röleler, akım büyüklüğündeki değişimlere bağlı olarak röle çalışma süresinde daha küçük değişiklik yapar. Bu tür röleler genellikle endüstriyel uygulamalarda ve enerji dağıtım sistemlerinde tercih edilir. Akım seviyeleri değişse de bu rölelerin zaman karakteristiği daha dengeli olduğundan, orta düzeyde hassasiyet ve hız gerektiren sistemlerde kullanılır. Özellikle, ani yükselmelerin uzun süreli arızalara neden olmadığı sistemlerde uygundur.

4.2.3.2 Çok Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi (Very Inverse Time Overcurrent Relay) (VI)

Çok ters zamanlı aşırı akım rölesi, normal ters zamanlı röleye göre akım büyüklüğüne daha duyarlıdır ve akım arttıkça çalışma süresi daha hızlı bir şekilde azalır. Bu röle, özellikle kaynaktan uzak yerlerde arıza akımının nispeten düşük olmasının beklendiği uygulamalarda tercih edilir. Dik karakteristikleri nedeniyle özellikle toprak arızalarında etkili bir röledir. Örneğin, düşük akım seviyelerinde hassasiyetin önemli olduğu sistemlerde, çok ters zamanlı röleler daha etkili koruma sağlar.



Şekil 4.19 Normal ters ve çok ters zamanlı aşırı akım rölelerinin eğrilerinin karşılaştırılması[47]

4.2.3.3 Aşırı Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi (Extremely Inverse Time Overcurrent Relay) (EI)

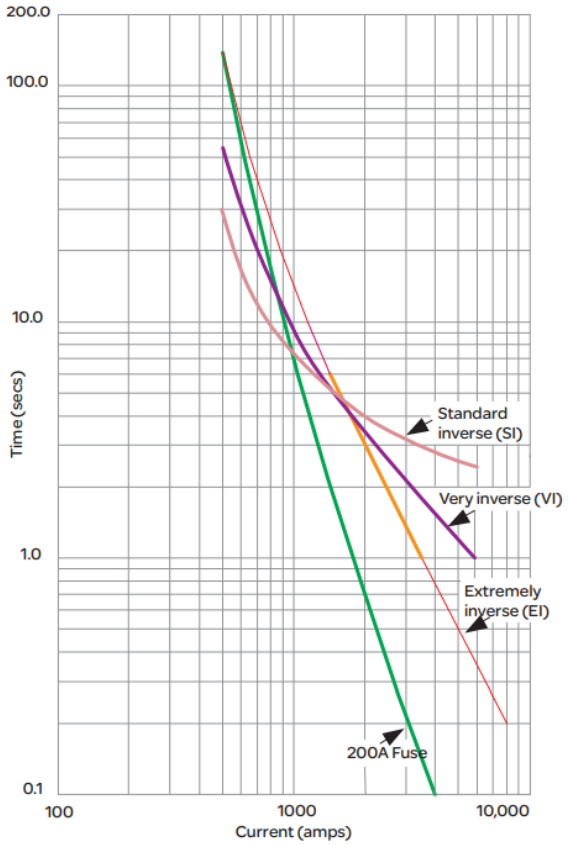
Aşırı ters zamanlı röle, tüm ters zamanlı röleler arasında akım büyüklüğündeki değişikliklere en hızlı tepki veren röledir. Bu özellikleri sayesinde, arıza durumlarına çok daha hızlı yanıt verirler. Genellikle kabloların, motorların, transformatörlerin ve ısıtıcılar, pompalar gibi ekipmanların aşırı ısınmaya karşı

korunmasında kullanılırlar. Bu tip rölelerin kullanımı, yüksek anahtarlama akımlarına rağmen kısa bir zaman gecikmesi kullanılmasını mümkün kılar. Aşırı ters zamanlı aşırı akım röleleri arıza akımının arıza konumuna bağlı olduğu durumlarda kullanılır. Özellikle, yüksek akım seviyelerinin olduğu ve hızlı müdahale gerektiren sistemlerde kritik öneme sahiptirler.

Aşırı ters zamanlı aşırı akım rölesindeki açma süresi 4.3'deki formülle hesaplanır:

$$t = TMS \cdot \frac{80}{I_r^2 - 1} \qquad (4.3)$$

Bu formüldeki "Ir" aşırı akım rölesindeki trip akımını ifade etmektedir. Ir = I / Is formülü ile bulunmaktadır. "I" ölçülen akım, "Is" röle ayar akımıdır. TMS kısaltması "time multiplier setting" yani zaman çarpanı ayarıdır.



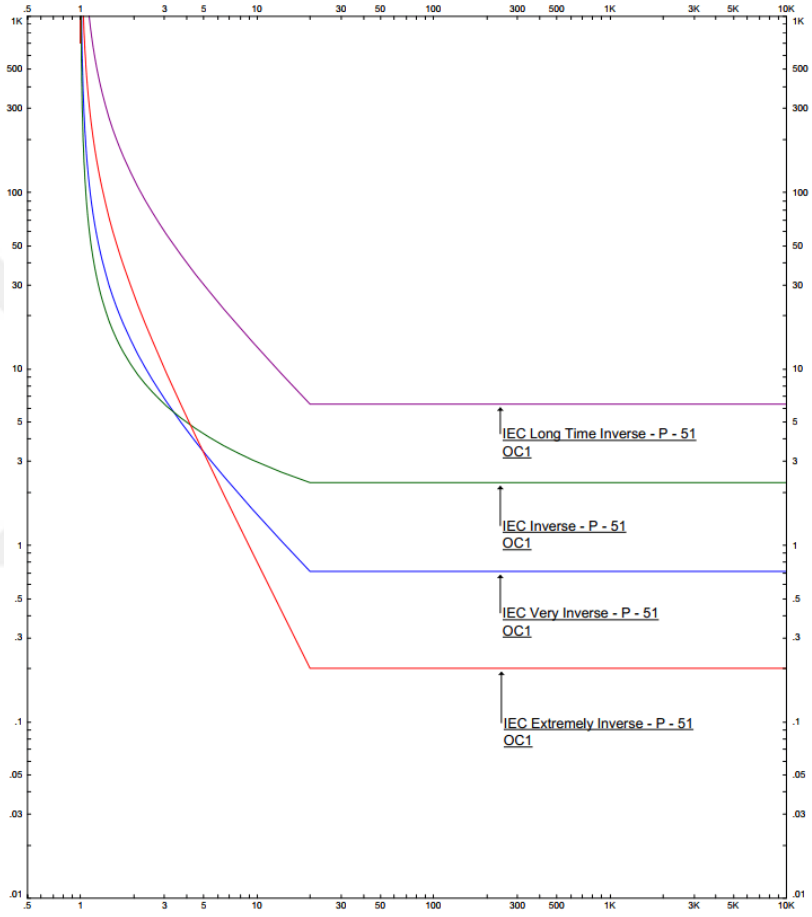
Şekil 4.20 Röle ve sigorta karakteristiklerinin karşılaştırması[47]

4.2.3.4 Uzun Zaman Ters Aşırı Akım Rölesi (Long Time Inverse Overcurrent Relay)

Adından da anlaşılacağı gibi, uzun zaman ters akım rölesi, oldukça uzun çalışma süresine sahiptir ve devreyi açma süresi 60 saniyeye kadar çıkabilir. Bu röle, diğer

aşırı akım rölelerine kıyasla daha az hassas olduğundan, arıza riskinin düşük olduğu kurulumlarda tercih edilir. Özellikle toprak arızalarına karşı koruma sağlamak için kullanılır. Toprak hatalarına karşı uzun süreli dayanıklılığın önemli olduğu yerlerde, uzun zaman röleleri sistemin daha az kritik alanlarını koruma amaçlı yerleştirilebilir.

Aşağıdaki grafikte Uzun Zaman Ters, Normal Ters, Çok Ters ve Aşırı Ters aşırı akım rölelerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Farklı röle tiplerinin karşılaştırması

4.2.4 Yönlü Aşırı Akım Röleleri

Yönlü aşırı akım röleleri, modern güç sistemlerinde arızaları önlemek, güvenliği sağlamak ve sistem sürekliliğini korumak için kritik bir koruma bileşeni olarak kullanılır. Bu rölelerin temel görevi, akımın yönünü algılayarak sadece belirli bir yöndeki arızalara tepki vermektir. Bu özellik, güç sistemlerinde özellikle çift yönlü akım akışının olduğu durumlarda —örneğin, dağıtık enerji kaynakları ve büyük santrallerin bulunduğu ağlarda— oldukça önemlidir. Yönlü aşırı akım röleleri,

sistemdeki anormal durumları tespit ettiğinde koruma önlemlerini devreye sokar, ağın arızalı bölümlerini seçici bir şekilde izole eder ve güç şebekesinin güvenilirliğini sağlar.

Bu röleler, akımın yönünü algılama prensibine göre çalışır; belirli bir yöndeki akım akışına yanıt verirken, karşı yönde akım olduğunda devreye girmez. Akım transformatörleri ve yönsel elemanlar gibi özel algılama cihazları kullanılarak bu yön hassasiyeti sağlanır; böylece rölenin bulunduğu konuma göre akım yönü hakkında bilgi alınır. Sistem arıza yaptığında ve akım önceden belirlenen yönde aktığında, yönlü aşırı akım rölesi koruma mekanizmalarını devreye sokarak arızalı bölümü izole eder. Bu, sistemin diğer bileşenlerinin zarar görmesini engelleyerek sistem güvenliğini artırır.

Yönlü röleler, empedans röleleri, yönlü aşırı akım röleleri ve yönlü güç röleleri gibi çeşitli tiplerde kullanılır ve her biri farklı özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir. Yönlü aşırı akım röleleri genellikle dağıtım ağlarında ve büyük santrallerin korunmasında kullanılırken; empedans röleleri, iletim hatlarının korunmasında önemli bir rol oynar. Bu röleler, yalnızca sistem güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda arızanın yalnızca etkilenen bölümde izole edilmesine izin vererek sistem sürekliliğini de destekler.

Yönlü aşırı akım rölelerinin sunduğu avantajlar arasında seçici arıza tespiti, hızlı tepki süreleri ve geliştirilmiş sistem güvenilirliği bulunur. Bu röleler, arızalı bölgeyi doğru bir şekilde izole ederek, güç arzının kesintiye uğramasını en aza indirir ve yaygın arızaların önlenmesini sağlar. Ancak, yönlü rölelerin ayarlarının yapılması ve koordinasyonu, özellikle çok sayıda bileşenin birbiriyle bağlantılı olduğu karmaşık ağlarda zorluklar yaratabilir. Örneğin, bir güç sisteminde aşırı yüklenme veya sistemdeki geçici dalgalanmalar gibi dış faktörlerden kaynaklanan yanlış açmalar, operasyonel zorluklara yol açabilir ve bu nedenle yönlü rölelerin kalibrasyonu ve test edilmesi önem taşır. Akıllı şebeke teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, yönlü rölelerin performansı daha da iyileştirilmektedir. Senkrofazör ölçümleri ve dijital iletişim sistemleri gibi yeni teknolojilerin entegre edilmesi, yönlü rölelerin daha hızlı, doğru ve esnek bir koruma sağlama yeteneklerini artırmaktadır. Bu yeni nesil röleler, gerçek zamanlı verilerden yararlanarak öngörüye dayalı arıza tespiti yapabilmekte ve adaptif koruma stratejileri

sunabilmektedir. Bu da gelecekte güç sistemlerinin daha verimli çalışmasını ve bakım gereksinimlerinin azaltılmasını sağlamaktadır.

4.2.4.1 Röle Karakteristiği

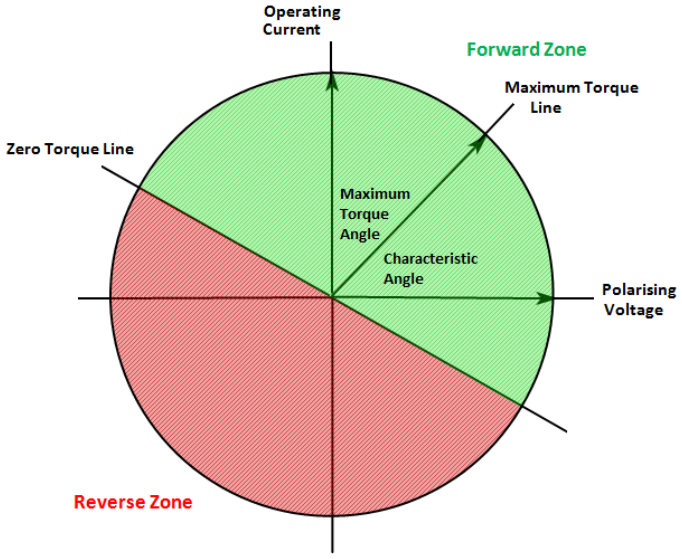
Tipik bir ters zamanlı yönlü aşırı akım rölesi, anlık bir ünite ve zaman aşırı akım ünitesi olmak üzere iki elemandan oluşur. Aşırı akım ünitesinin ayarlanması gereken iki değer bulunmaktadır: Çekme akımı değeri (Ip) ve zaman kadranı ayarı (TDS). Çekme akımı değeri (Ip), rölenin çalıştığı minimum akım değeridir. Zaman kadranı ayarı, her akım değeri için cihazın çalışma süresini (T) tanımlar ve normalde T-M eğrisi olarak verilir, burada M, röle arıza akımının çekme akımına oranıdır.

$$M = \frac{I}{I_p} \tag{4.4}$$

Genel olarak aşırı akım röleleri aşağıda verilen tipteki karakteristik fonksiyona yanıt verir:

$$T = f\left(TDS, I_p, I\right) \tag{4.5}$$

Yönlü rölelerin çalışma bölgeleri, polarize gerilim ve karakteristik açı yardımıyla tanımlanır.



Şekil 4.22 Yönlü aşırı akım rölesi çalışma özellikleri[60]

Polarizasyon Gerilimi: Yönlü rölelerin akımın yönünü tespit edebilmesi için referans bir gerilime ihtiyacı vardır. Bu referans gerilimi, gerilim

transformatörlerinden alınır ve "polarizasyon gerilimi" olarak adlandırılır. Röle, hat akımı tanımlanan yönde olduğunda ve bu akım aşırı akım ayar değerini aştığında çalışır.

Röle Karakteristik Açısı: Karakteristik açı, yönlü rölenin maksimum hassasiyetle çalışabilmesi için referans veya polarizasyon geriliminin ayarlandığı faz açısını ifade eder. Bu açı, rölenin hangi yönde çalışacağını belirlediği için "Yön Açısı" olarak da adlandırılır.

Maksimum Tork Açısı: Maksimum tork açısı, hata akımının faz gerilimine göre yaptığı açıdır. Bu açı, beklenen hata açısıdır ve tamamen öngörülebilirdir. Faz hataları ve toprak hataları için bu açı farklılık gösterir.

Merkez Bölge veya Maksimum Tork Hattı: Merkez bölge, rölenin maksimum hassasiyet gösterdiği karakteristik açı hattıdır. Bu hat üzerinde röle akımı, referans veya polarizasyon gerilimiyle faz uyumu içindedir.

Sıfır Tork Hattı: Bu hat, çalıştırma (operasyon) ve engelleme (inhibit) bölgelerini ayıran sınırdır.

İleri Bölge: İleri bölge, maksimum tork hattının her iki tarafında ±85°'lik bir açıyla tanımlanır.

Geri Bölge: Geri çalışma bölgesi, ileri bölgenin ayna görüntüsüdür.

Hata Durumunda Gelen Değişiklikler: Bir hata meydana geldiğinde, iletim hattı veya bara üzerindeki gerilim, hatanın şiddeti oranında azalır ve akım normal değerlerin çok üzerine çıkar. Hata akımı genellikle gerilimden faz geride (lagging) bir doğaya sahiptir. Sağlıklı fazların büyüklüklerinde ve faz açılarında değişiklik olmaz.

4.2.4.2 Röle Ayarları

TDS ve I_p olmak üzere iki ayarın hesaplanması, yönlü aşırı akım rölesi koordinasyon çalışmasının en önemli kısmıdır. Genel olarak, yönlü aşırı akım röleleri süreleri ayarlanabilir zaman ayarlarına (TDS) sahipken, belirli kademe aralıklarına sahip akım başlama (I_p) ayarları sunar.

Bu nedenle, bu kısıt şu şekilde ifade edilebilir:

$$\mathrm{TDSi}_{\min} \leq \mathrm{TDSi} \leq \mathrm{TDSi}_{\max} \qquad (4.6)$$

$$I_{Pimin} \leq I_{Pi} \leq I_{Pimax} \quad (4.7)$$

Yönlü aşırı akım koruması, faz ve toprak hataları için farklı çalışır. Bu fark, polarizasyon gerilimlerinin seçiminde görülür.

- Faz Hataları için Yönlü Aşırı Akım Koruması

Polarizasyon Gerilimleri: Faz hatası elemanları, faz hatalarında polarizasyon miktarının kaybolmasını önlemek için dörtte bir faz kayması bağlantısıyla çalışır. Yani, her bir akım elemanı, diğer iki fazdan türetilen bir gerilimle yönlendirilir. Bu bağlantı, referans ve işletim büyüklükleri arasında 90°'lik bir faz kayması (Akım, Gerilimden Önde) oluşturur.

Her bir faz akımı, diğer iki faz arasındaki gerilimle karşılaştırılır. Örneğin, I_{L1} akımı, V_{23} gerilimiyle karşılaştırılır. Bu polarizasyon gerilimleri röle içerisinde tanımlıdır ve harici bir ayar yapılmasına gerek yoktur.

Maksimum Tork Açısı: Beklenen hata açısı, elektromekanik rölelerde Maksimum Tork Açısı olarak adlandırılır. Faz hataları için bu açı genellikle havai hatlarda -30° ve yeraltı kablolarında -45°'dir.

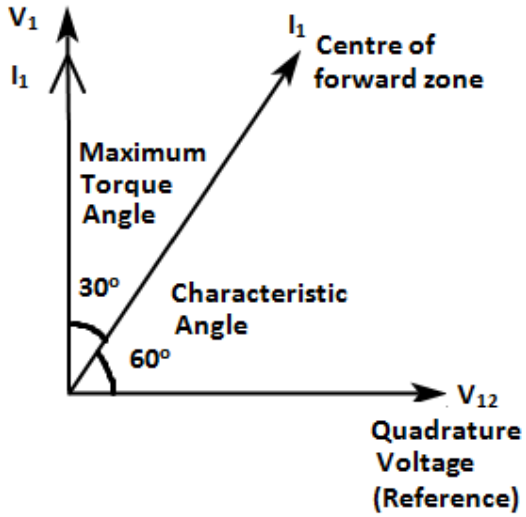
Bu açı, karakteristik açının hesaplanmasında ve merkez bölgenin tanımlanmasında kullanılır. Sayısal rölelerde maksimum tork açısı için bir ayar bulunmaz.

Karakteristik Açı Ayarı (Relay Characteristic Angle) (RCA): Rölenin Karakteristik Açısı, faz hatası koruma ayarları içinde tanımlanır. RCA ayar aralığı genellikle -95° ile +95° arasındadır. Yönlü aşırı akım rölesini konfigüre ederken bu ayar mutlaka belirtilmelidir.

Örnek: Bir faz hatasının -30° de meydana geldiğini varsayalım. Bu durumda, hata akımı gerilimden 30° geridedir. Bu açı maksimum tork açısıdır.

Karakteristik Açı = Dörtte bir faz kayması açısı – Maksimum Tork Açısı (4.8)

Karakteristik Açı = 90° - 30° = 60°



Şekil 4.23 Faz hataları için karakteristik açı ayarı[60]

İleri Bölge Merkezi: İleri bölge, rölenin maksimum hassasiyetle çalıştığı alandır. İleri bölge merkezi, referans gerilim açısı (Vref Angle) ile karakteristik açının (Char Angle) toplamıdır.

İleri bölge merkezi = Vref Açısı + Karakteristik Açı (4.9)

İleri bölge merkezi = 0° + 60° = 60°.

Minimum Gerilim Ayarı: Ölçülen polarizasyon gerilimi, minimum gerilim ayar seviyesinin altına düştüğünde, yönlü koruma çıkışı üretilmez ve dolayısıyla yön koruma fonksiyonu devre dışı kalır.

Bu minimum gerilim ayarı, sigorta arızası veya otomatik sigorta açma durumlarında rölenin yanlış çalışmasını önlemek için tasarlanmıştır.

- Ölçülen Toprak Arızaları için Yönlü Akım Koruması

Polarizasyon Gerilimleri: Toprak hatalarını algılamak için yönlü toprak hatası elemanlarında sıfır faz sırası polarizasyon tekniği kullanılır. Polarizasyon gerilimi, uygun akım (I_0) ile onun eşdeğer gerilimi (V_0) karşılaştırılarak elde edilir.

Bu gerilimler yalnızca toprak hatası durumlarında oluşur. Hataya maruz kalan fazın gerilimi düşerken, diğer fazlar sağlıklı kalır. Bu polarizasyon gerilimleri röle içerisinde tanımlıdır ve harici bir ayar yapılmasına gerek yoktur.

Maksimum Tork Açısı(Maximum Torque Angle - MTA): Elektromekanik rölelerde, beklenen hata açısı Maksimum Tork Açısı olarak adlandırılır. Bu açı, kullanılan nötr topraklama tipine bağlı olarak genellikle 0° ile -90° arasında değişir.

Dirençle Topraklanmış Sistemler: 0°

Dirençli Topraklama ile Topraklama Transformatörü: -15°

Katı Topraklanmış Dağıtım Sistemleri: -45°

Katı Topraklanmış İletim Sistemleri: -65°

Reaktansla Topraklanmış Sistemler: -90°

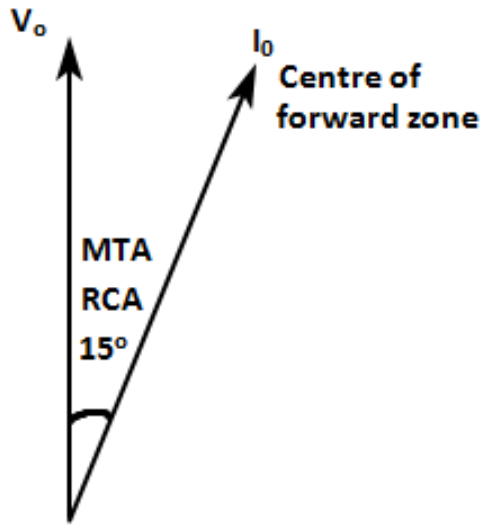
Maksimum Tork Açısı, karakteristik açının hesaplanmasında ve ileri bölgenin merkezinin belirlenmesinde kullanılır. Sayısal rölelerde maksimum tork açısı için bir ayar bulunmaz.

Karakteristik Açı Ayarı (Relay Characteristic Angle) (RCA): Rölenin Karakteristik Açısı (RCA), toprak hatası koruma ayarlarında belirtilir. RCA ayar aralığı genellikle -95° ile +95° arasındadır. Yönlü aşırı akım rölesinin konfigürasyonunda bu ayar mutlaka belirtilmelidir.

Örnek: Bir dirençle topraklanmış sistemde -15° açısında bir toprak hatası meydana geldiğini varsayalım. Bu durumda hata akımı, gerilimden 15° geridedir (Maksimum Tork Açısı):

Karakteristik Açı = 0° - Maksimum Tork Açısı (4.10)

Karakteristik Açı = 0° - 15° = -15°



Şekil 4.24 Toprak hataları için karakteristik açı ayarı[48]

İleri Bölge Merkezi: Rölenin maksimum hassasiyetle çalıştığı bölge olan ileri bölge merkezi 4.11'deki formülle hesaplanır:

İleri Bölge Merkezi = Vref Açısı + Karakteristik Açı (4.11)

İleri Bölge Merkezi = 0° - 15° = -15°

Minimum Gerilim Ayarı: Bu ayar, tüm hata türleri için geçerli ortak bir ayardır. Daha önce belirtildiği gibi, ölçülen polarizasyon gerilimi bu seviyenin altına düştüğünde yönlü bir çıkış üretilmez ve yön koruması devre dışı kalır.

Minimum gerilim ayarı, sigorta arızası veya otomatik sigorta açma durumlarında rölenin yanlış çalışmasını önler.

- Türetilmiş Topraklama Hataları için Yönlü Akım Koruması

Toprak hatalarını algılamak için sıfır faz sırası (Zero Phase Sequence) veya negatif faz sırası (Negative Phase Sequence) polarizasyon tekniği kullanılır.

Sıfır Faz Sırası Polarizasyonu: Sıfır faz sırası gerilimleri şu durumlarda kullanılabilir:

Sıfır faz sırasına yol sağlayabilen beş sargılı bir güç transformatörü kullanıldığında,

Açık delta bağlantılı bir güç transformatörü kullanıldığında.

Bu tür bağlantılar, sıfır faz sırası polarizasyon gerilimleri sağlar. Bu durumda, sıfır faz sırası gerilimleri (V_0) ve sıfır faz sırası akımları (I_0) polarizasyon için kullanılır.

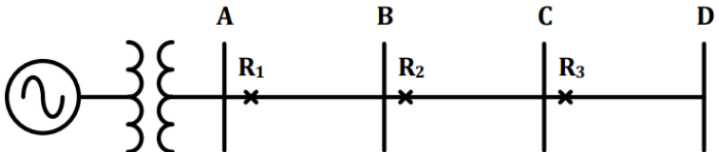
Negatif Faz Sırası Polarizasyonu: Eğer iki fazlı (fazlar arası) bir güç transformatörü veya üç sargılı bir güç transformatörü kullanılıyorsa, sıfır faz sırası gerilimleri mevcut olmaz. Bu durumda, polarizasyon için negatif faz sırası gerilimleri (V_2) ve negatif faz sırası akımları (I_2) kullanılır.

* Rölenin karakteristik açısı, maksimum tork açısı ve minimum gerilim ayarı, Ölçülen Toprak Hataları başlığında açıklandığı gibi aynı şekilde uygulanır.

- Güç Sisteminde Yönlü Aşırı Akım Koruması

Aşırı akım rölesi ile korunan bir uçtan beslenen radyal şebekede, kaynak yakınındaki devre kesici aktif olduğunda (açma yaptığında) şebekede enerji gider ve kaynak tarafından beslenen tüm trafo merkezleri ayrılmış olur.

Örneğin, Şekil 4.25'e göre A bölümündeki R1 rölesi nedeniyle devre kesicinin açması, B bölümü, C bölümü ve D bölümü için enerjiyi keser. Radyal şebeke her iki uçtan beslenirse, tüm yük noktalarında kesintisiz besleme mümkündür.

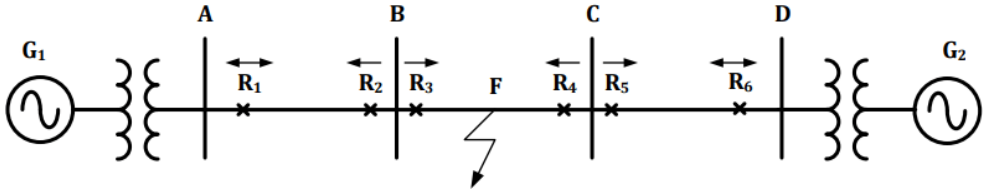


Şekil 4.25 Bir uçtan beslenen radyal şebeke[61]

Şekil 4.26'da gösterildiği gibi B ile C bölümü arasında arıza meydana geldiğinde, R3 ve R4 rölesi yalnızca o bölümün devre kesicilerini açtırır. A, B, C ve D bölümleri kesintisizdir ve gücü beslemeye devam eder.

Bu tür bir düzenleme için rölelerin ayarlanması, radyal şebekedeki besleme kaynaklarına uygulanan zaman ayrımı ilkesine göre gerçekleştirilir.

R1, R3 ve R5 röleleri jeneratör G1'in; R6, R4 ve R2 röleleri jeneratör G2'nin yanısıradır.



Şekil 4.26 Her iki uçtan beslenen radyal şebekede arıza meydana gelmesi[61]

Şekil 4.27'de gösterildiği gibi, F noktasında arıza meydana geldiğinde, R2 ve R5 röleleri B ve C bölümünü izole etmek için çalışır ancak iki uçtan da enerji akışı olduğu için beslemeyi kaçırır böylece bu bölümlerin enerjisi kesilmemiş olur. Bu durumun çözümü için röleye yön özelliğinin entegre edilmesi gerekmektedir.

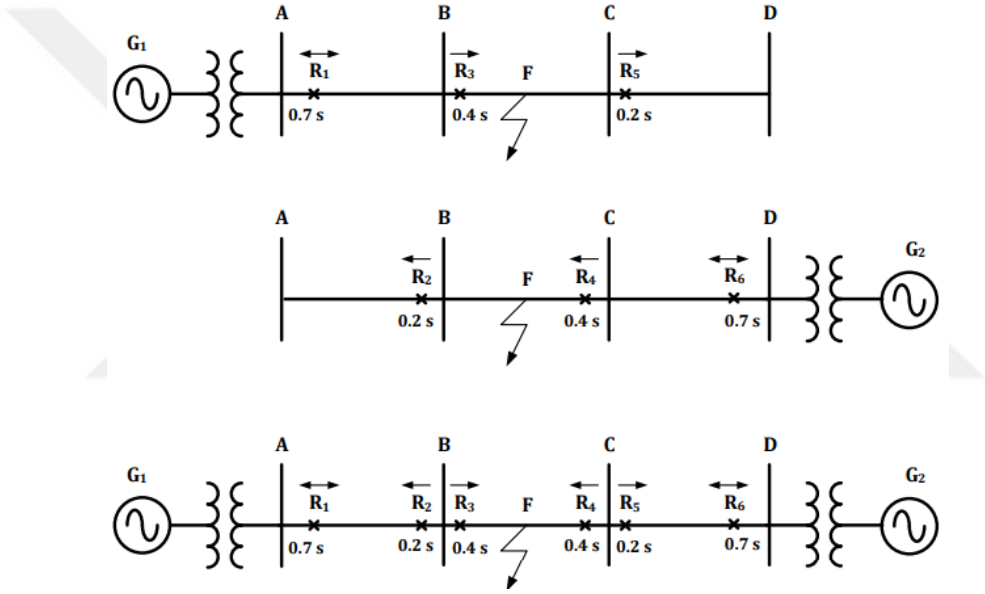
Yönlü aşırı akım koruması, akım belirtilen yöndeki çekme akım değerini aştığında çalışır. Yönlü aşırı akım röleleri, aşırı akım korumasıyla ileri veya geri yönlerde çalışır. Yönlü röle ileri yönde ayarlanmışsa, ileri bölgede bir arıza meydana gelirse yalnızca röle çalışır. Tersine, röle ters yönde ayarlanmışsa, geri bölgede bir arıza meydana gelirse yalnızca röle çalışır.

Genel olarak, ileri yönün baradan uzağa (korunan bölgeye doğru) güç akışını, ters yönün ise baraya doğru güç akışını ifade ettiğini belirtir.

ABF ve DCF arıza akımları, R2 ve R5 röleleri için baraya doğru, R3 ve R4 röleleri için baradan uzağa doğru (korunan bölgeye doğru) akar. Tüm bu röleler, yalnızca çalışması amaçlanan yönde çalıştıkları bir yön özelliği ile geliştirilmiştir. Çalışma yönü bir ok ucu ile gösterilir.

F'deki bir arıza için, R2 ve R5 rölelerinin çalışması kısıtlanır çünkü arıza akımının yönü her ikisi için de çalışmazken, R3 ve R4 röleleri arızayı izole ederek 0,4 saniye sonra çalışır.

Jeneratörler R1 ve R6'ya en yakın röleler genellikle çift başlı oklarla gösterilerek yönsüz tutulur. Yönlü röleler paralel besleyici ve ring şebeke sisteminin korunması için kullanılır.

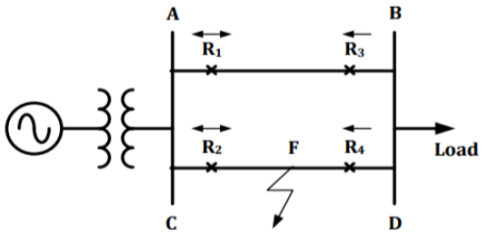


Şekil 4.27 Rölelere yön özelliğinin entegre edilmesi[61]

Şekil 4.28'de gösterildiği gibi, paralel besleyici için F'de arıza meydana geldiğinde, CD hattının R2 ve R4 rölesi o bölümün devre kesicisini devre dışı bırakmalı ve tam yük gücü kısa bir süre için AB hattı üzerinde akmalıdır. R3 rölesine yönlü özellik eklenmemişse, R3, R4 ve R1 röleleri devre dışı kalır.

Seçici çalışmayı ayırt etmek için, R3 ve R4 röleleri yönlü olarak eklenir. R1 ve R2 röleleri yönsüz aşırı akım röleleridir.

R1 rölesi, R4 rölesiyle aynı seviyede olmalıdır; böylece R1, F'deki gibi hataları temizleyemezse ikincisine yedek röle olarak görev yapmalıdır. Benzer şekilde, R2, R3 ile koordineli olmalıdır.



Şekil 4.28 Paralel beslemede arıza durumu[49]

4.3 IEC61850 İletişim Protokolü

IEC61850, Koruma, Otomasyon ve Kontrol Sistemleri (Protection, Automation and Control Systems (PACS)) için geçerli uluslararası bir standarttır. IEC61850 uygulamasının kapsamı, aşağıdakiler dahil olmak üzere çok çeşitli alanlarda büyümeye devam etmektedir:

• koruma,

• otomasyon,

• Sistem Kontrolü ve Veri Toplama (SCADA),

• ölçüm

• durum izleme.

IEC61850, trafo merkezindeki Akıllı Elektronik Cihazlar (IEDs) ile ilgili sistem gereksinimleri arasındaki dijital iletişim için gereken işlevlerin yapılandırılması ve parametrelendirilmesi için mühendislik tanımlarını ve süreçlerini sağlar. Bu nedenle, kendisi bir protokol değil, bir protokol kullanarak iletişim kurmak için birlikte çalışabilirliğe sahip IED'lerin yapılandırılmasıdır. Dijital bir trafo merkezinin temel bir parçasıdır [50].

4.3.1 Güç Sistemlerinde Karşılaşılan Zorluklarda IEC61850'nin Önemi

Bu bölüm, IEC61850 tabanlı sistemlerin kullanımı için daha geniş nedenleri ve avantajları ortaya koymaktadır. Küresel ölçekte meydana gelen toplumsal dönüşümler ve güç sistemlerindeki değişimlere dikkat çekilmekte, bu değişimlerin beraberinde getirdiği zorluklar vurgulanmaktadır. Ardından, hem geleneksel hem de yeni ortaya çıkan güç sistemi sorunlarını çözme potansiyeline sahip olan IEC61850 tabanlı sistemlerin özellikleri ve uygulama alanları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

4.3.1.1 Değişen Güç Sistemi ve İlgili Sürücüler

Elektrik sektöründe yaşanan köklü dönüşümler, toplumsal değişimlerin bir yansımasıdır ve güç sistemleri, özellikle Koruma, Otomasyon ve Kontrol Sistemi (PACS) için yeni gereksinimler ve fırsatlar ortaya çıkarmaktadır. IEC61850 standardı, bu dönüşüm süreçlerinde karşılaşılan zorluklara yönelik çözümler geliştirilmesi ve uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Aynı zamanda, geleneksel güç sistemlerindeki koruma ve otomasyon sorunlarını ele almak için de etkili bir araçtır.

Dünyadaki sosyal ve ekonomik kapsayıcılığın artışı, enerjiye olan talebin büyümesine yol açmaktadır. Daha konforlu yaşam standartlarına ulaşmak isteyen bireylerin ihtiyaçları artarken, çevresel farkındalık ve teknolojik gelişmeler yeni enerji kaynaklarına yönelimi teşvik etmektedir. Elektrik, enerji üretiminde farklı kaynaklar (nükleer, kömür, hidroelektrik, güneş, rüzgar vb.) arasında geçiş yapılmasına olanak sağlayarak enerji altyapısında merkezi bir rol üstlenmektedir.

Yakın gelecekte şebekelerde yapılması gereken değişiklikler, kamu hizmetlerini hız, maliyet etkinliği ve sınırlı insan kaynaklarıyla bu projeleri hayata geçirmeye zorlamaktadır. IEC61850, bu zorlukların üstesinden gelinmesinde ve enerji sektöründeki dönüşümlerin kolaylaştırılmasında önemli bir destek sağlamaktadır.

- Toplumsal Değişimler

Yirminci yüzyıl, hızlı ve önemli toplumsal değişimlerin yaşandığı bir dönem olmuştur. Ancak bu değişim süreci, yirmi birinci yüzyılın ilk yıllarında daha da hız kazanmıştır.

Bu dönemde, teknoloji, ekonomi, kültür, tıp ve politika gibi alanlardaki ilerlemeler, insanların yaşam biçimlerini büyük ölçüde etkilemiştir. Yirmi birinci yüzyılda ise teknolojik ilerlemeler, küresel ekonominin yükselişi, kentleşme ve dünya çapında sosyal ve çevresel sorunlara dair artan endişeler ön plandadır. Teknolojinin yaygınlaşması, ekonomilerin büyümesi ve artan seyahat olanaklarıyla birlikte, daha yüksek yaşam standartlarını destekleyen sistemlerin güvenilirliği ve maliyet etkinliği konusunda daha yüksek beklentiler oluşmaktadır.

- Çevresel Değişim

Çevreye duyulan ilgi tarih boyunca bazı kültürlerde ve bölgelerde var olmuştur. Ancak, küresel çevre sorunlarına dair farkındalığın artmasıyla birlikte, daha güçlü

eylem çağrıları ortaya çıkmıştır. Çevreciler, doğal çevrenin korunması, iyileştirilmesi ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi gerektiğini savunmaktadır. Giderek artan kirlilik, doğal kaynakların azalması ve iklim değişikliği öne çıkan çevresel sorunlardır. İklim değişikliği, büyük ölçekli sera gazı emisyonları nedeniyle artan küresel ısınma ve aşırı hava koşullarıyla kendini göstermektedir. Fosil yakıtların enerji tüketiminde yakılması, sera gazı emisyonlarının başlıca nedenidir. Geleneksel enerji sistemleri, elektrik üretimi için kömür, petrol ve gaz yakarak çevreye zararlı gazlar salmıştır. Ancak toplumun ve hükümet politikalarının baskısıyla, enerji sistemleri fosil yakıt temelli üretimden uzaklaşmaya yönelik bir dönüşüm içerisindedir. Ayrıca aşırı hava koşullarının enerji sistemleri üzerinde ciddi etkileri olduğu görülmektedir. Örneğin, artan orman yangını riski veya daha şiddetli kasırgalar nedeniyle altyapılara verilen hasar bu etkiler arasındadır.

- Teknolojik Değişim

Yüzyıllar boyunca yenilikçi yöntemler ve yeni teknolojiler geliştirilip uygulanmıştır. Eğitim teknolojisi, bilgi teknolojisi, nanoteknoloji, optik, biyoteknoloji, bilişsel bilim, robotik ve yapay zeka gibi birçok farklı alanda gelişen yeni teknolojiler, toplumsal hayatta geniş çapta kullanılmaktadır.
Bu teknolojiler arasında özellikle enerji sistemleri, yenilenebilir enerji üretimi, enerji depolama ve iletişim ağları gibi alanlarda önemli bir uygulama alanı bulmaktadır.

- Sosyal Değişim

Sosyal değişim, zamanla davranış ve kültürel değerlerdeki değişimleri ifade eder. Bu değişimlere nüfus artışı, teknoloji ve bilgi sistemlerindeki ilerlemeler gibi etkenler katkıda bulunmaktadır. Son yıllarda, küresel nüfusun yeniden dağılımında önemli bir değişim yaşanmıştır. Dünya giderek daha fazla küresel olarak birbirine bağlanmakta, ortak değerler ve endişeler paylaşılmaktadır. Ayrıca, gelişmekte olan ülkelerin dünya nüfusundaki payı artış göstermektedir. Yaşam standartlarının yükselmesi ve birçok ülkede toplumsal sistemlerin gelişmesiyle birlikte altyapının geliştirilmesi, güvenilirliği, maliyet etkinliği ve sürdürülebilirliği konularında daha yüksek beklentiler oluşmuştur. Bu sosyal değişimler, enerji sistemlerinin dönüşümünü de derinden etkilemiştir.

- Değişen Güç Sistemleri ve Enerji Sektörü

Elektrik tedarik sistemleri, çağdaş toplumlardaki tüm kritik altyapılar arasında önemli bir rol oynar. Toplumsal değişimlerle birlikte akıllı nesneler ve internetin hızlı gelişimi doğrultusunda, elektrik tedarik sistemlerinin bu değişimlere ayak uydurması, bu uygulamalar için gerekli olan hizmet kalitesini sağlamaya devam edebilmesi için önemlidir. Enerji sistemi bileşenlerinde ve genel enerji sistemi planlaması ile işletme yöntemlerinde yapılan çoğu değişiklik ve yenilik, diğer endüstrilerdeki gelişmelerle paralel bir şekilde ilerlemektedir.

Alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasındaki artışla beraber, günümüzdeki elektrik şebekesinin yeniden yapılandırılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. Önümüzdeki 20 yıl içinde milyonlarca rüzgar enerjisi santrali ve çok megavatlık fotovoltaik tesislerin iletim şebekelerine bağlanacağı ve dünya çapında on milyonlarca Dağıtık Enerji Kaynağı (DER) –hem yenilenebilir hem de yenilenemez– hem iletim hem de dağıtım şebekelerine bağlanacağı tahmin edilmektedir. Mevcut büyük ölçekli enerji depolama teknolojileri, örneğin pompalı depolama sistemleri, bataryalar ve volanlar gibi yeni teknolojilerle tamamlanacaktır. Mevcut elektrik şebekelerinin yapısı, genellikle üretim, iletim, dağıtım ve tüketici arasında doğrusal bir bağlantı olarak temsil edilmektedir ve güç aktarımı tek yönlü bir şekilde gerçekleşir. Dağıtık üretim ve depolamanın evrimiyle birlikte, gelecekteki elektrik ağı, birçok farklı kaynağın birbirine bağlanabileceği ve güç aktarımının iki yönlü gerçekleşebileceği karmaşık bir akıllı şebeke olarak görülmektedir. Uç noktalar, fotovoltaik, küçük hidroelektrik, Stirling makineleri, nükleer enerji, batarya depolama, jeotermal, rüzgar, yakıt hücresi, kombine çevrim, gaz türbinleri, karşılıklı motorlar, dalga enerjisi gibi her türlü enerji santralinden olabilir. Bu dağıtık kaynaklar ve destinasyonlar ayrıca sanal güç santralleri olarak birleştirilebilir, tek bir kaynak olarak yönetilebilir ve acil durumlarda şebekeden bağımsız olarak veya bağlı olarak mikro şebeke olarak işletilebilir.

Enerji sistemlerinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketici alanlarında mevcut olan tüm yeni teknolojilerin tam olarak kullanılması, yalnızca akıllı şebekelerin içerisinde tanımlanan cihazlar, sistemler ve modern kaynakların kullanılabilirliği ile mümkündür. Bu gelişmiş yeni iletişim eğilimleri, gelişen otomasyon gereksinimlerini, gelişmiş ölçüm altyapısı (Advanced Metering Infrastructure

(AMI)) ve trafo merkezleri arası iletişim ve telekomünikasyon ağı yakınsamasını içerir.

Telekomünikasyon yakınsaması eğilimlerine paralel olarak, güç sektöründeki bilgi işleme, bilgi teknolojilerindeki temel gelişmeleri istikrarlı bir şekilde benimsemektedir. Dağıtılmış donanım ve yazılım içeren beşinci nesil bilişim, dijital trafo merkezlerinde konuşlandırılmakta olup, gelecekteki uygulamaların geliştirilmesi için ana itici güçlerden biri olarak görülmektedir. Uzaktan erişim sistemleri ve siber güvenlik gibi unsurlar, güç sistemi uygulamaları için temel hususlardır.

Güç sistemi otomasyonundaki değişimin bir parçası olarak, beşinci nesil uygulama teknolojisinin geliştirilmesi devam etmektedir. Bu beşinci nesil (5G), dağıtılmış donanım ve otomatik yazılım kullanımıyla ilgilidir. Temel olarak IEC 61850 standardı tarafından yönlendirilen bilişim ve telekomünikasyondaki tüm yeni gelişmeleri kullanmanın yanı sıra, senkrofazörler kavramına dayalı yeni uygulamalarla trafo merkezi ve trafo merkezleri arası otomasyon planlanmaktadır. Kontrol merkezi otomasyonu, şebeke operasyonuna zeka sağlamayı amaçlayan mevcut geliştirmenin merkezi odak noktasıdır.

Gelecekte şebeke üzerinde büyük bir etkiye sahip olacak toplumsal eğilimler ve uluslararası politikalar da bulunmaktadır:

- ✓ Çevresel hususlar ve anlaşmalar (Kyoto protokolü ve iklim değişikliği konusunda Paris anlaşması) üretim türü ve güç hattı inşaatı için seçenekleri sınırlamaktadır.
- ✓ Bazı ülkelerde nükleer enerjiden çekilme.
- ✓ Düzenlemeler (Yenilenebilir Enerji Kaynağının (RES) önceliklendirilmesi, tarife teşvikleri (üretim vergisi kredileri), DER için arayüz gereksinimleri).
- ✓ Enerji piyasası, borsa takas otoritesi, enerji borsası ticareti, sistem hizmetleri piyasası (gerilim ve frekans düzenlemesi, pik yük üretimi ve pik tedarik yönetimi).

Güç sistemi paydaşları ve tüketici beklentileri de uygulanan sistemler ve teknolojiyle birlikte değişmiştir. Daha güvenilir, daha ulaşılabilir, daha güvenli, maliyet açısından optimize edilmiş, daha akıllı ve daha yalın bir güç sistemi beklenmektedir[50].

4.3.1.2 Güç Sistemlerinde Ortaya Çıkan Zorluklar

Bir önceki bölümde anlatılan toplumdaki birçok değişiklik güç sistemlerinde ortaya çıkan değişikliklere neden olduğundan, çözülmesi gereken yeni güç sistemi zorlukları vardır.

- İklim Değişikliği Zorlukları

İklim değişikliğiyle mücadele, elektrik enerjisinin ısıtma, ulaşım ve endüstriyel sistemlerde doğrudan kullanımını artırarak güç sistemlerini dönüştürmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtılmış üretimi yaygınlaşırken, fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye geçiş, üretim noktalarını ve şebeke yapısını değiştirmektedir. Bu süreç, düşük gerilimli ağlarda stabilite ve güç akışında tersine dönüş gibi sorunlar yaratarak yeni koruma ve otomasyon çözümleri gerektirmektedir.

Gelecekte, iletim seviyesine bağlı büyük santrallerin yanı sıra gömülü ve yönetilebilir dağıtık enerji kaynaklarının karışımı öne çıkacaktır. Ancak, birçok dağıtık enerji kaynağı, geleneksel jeneratörler kadar kararlılık sağlayamamakta ve arıza durumlarında sorun yaratmaktadır. Bu durum, mevcut şebekelerde arıza giderme sürelerini kısıtlayabilir. Artan iletişim ve talep kontrol sistemleri ihtiyacı, Dağıtım Durum Tahmini (Distribution State Estimation) gibi uygulamaları tetikleyebilir ve senkrofazör gibi senkronize ölçümleri gerektirebilir.

- Teknolojik Değişimden Kaynaklanan Zorluklar

Malzeme, optik, yarı iletkenler ve üretim tekniklerindeki gelişmeler, enerji depolama (batarya), güneş ve rüzgar enerjisi, kablolar, ölçü trafoları/sensörler, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) ve esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) gibi birincil ekipman çözümlerini geliştirmiştir. Bu yenilikler, farklı üretim türlerini planlama ve bu teknolojileri farklı özelliklere sahip güç sistemi bölümlerine entegre etme gibi zorlukları beraberinde getirmiştir. Ayrıca, düşük arıza akımı katkısı ve farklı çalışma modlarının kontrol edilmesi gereksinimi, koruma ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

İkincil sistemlerde ise iletişim, bilgi ve otomasyon teknolojilerinde değişiklikler dikkat çekmektedir. Fiber optik kablolar, bakır kabloların yerini alırken dijital sinyaller artık trafo merkezlerinin birincil ekipmanlarla doğrudan etkileşim sağlanan süreç seviyesine kadar ulaşmıştır. Bu, cihazlar arası ve trafo merkezleri

arası iletişim kapasitesini artıran daha küçük ve daha akıllı çok işlevli cihazlar ile gözlemlenmektedir. Ancak, farklı üreticilerden gelen cihazların birlikte çalışabilirliği, siber güvenlik ve test/devreye alma personelinin eğitimi gibi zorluklar devam etmektedir.

- Toplumsal Değişimden Kaynaklanan Zorluklar

Toplumsal değişimler, güç sistemlerinden daha yüksek güvenilirlik, dayanıklılık, güvenlik, maliyet optimizasyonu ve performans beklentileri doğurmuştur. Gelişen birincil ekipman türleri ve birbirine bağlı güç sistemi ağları, bu performans hedeflerini karşılamak için yeni koruma ve otomasyon fırsatları sunmaktadır. PACS (Koruma, Otomasyon ve Kontrol Sistemleri), sistem bütünlüğünü izlemek ve sağlamak için kritik rol oynamaktadır.

- Kamu Hizmeti Kuruluşlarından Kaynaklanan Zorluklar

Kamu hizmeti kuruluşları, güç sistemlerini geliştirme, işletme ve bakım görevlerini yerine getirirken artan baskılarla karşı karşıyadır. İnsan kaynağı eksikliği ve sınırlı bütçelerle yeni sistemlerin hızla geliştirilmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu bağlamda, kamu hizmeti kuruluşlarının daha akıllı yöntemlerle çalışması ve mevcut kaynaklarıyla daha fazla iş başarması beklenmektedir.

4.3.1.3 IEC 61850'nin Güç Sistemindeki Zorluklara Çözüm Sağlayan Özellikleri

- Koruma, Otomasyon ve Kontrol ile Yeni ve Geleneksel Zorluklara Yanıt

Elektrik güç sistemlerindeki yeni teknolojik gelişmeler, PACS (Koruma, Otomasyon ve Kontrol Sistemleri) çözümlerinin de paralel bir şekilde gelişmesini gerektirir. Bu gereklilik, inverter tabanlı ağlar, mikro şebekeler, dağıtık üretim ve depolama sistemine sahip tüketici-üreticiler, elektrikli araç destek sistemleri ve fiziksel/siber güvenlik gibi yeni nesil sistemlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, sosyal değişim ve güvenilirlik ile şebeke optimizasyonu gibi beklentilerin artması da bu zorlukları pekiştirmektedir.

IEC61850, bu zorlukların üstesinden gelmek için uygun bir altyapı sunar. Geleneksel enerji akış yapısının yerine, üretim ve tüketimin her noktada gerçekleşebildiği yeni bir modele geçiş sürecinde, her bir sistemin koruma, otomasyon ve kontrol mekanizmalarının güvenli bir şekilde entegre edilmesi

gerekmektedir. IEC61850, veri modeli ve tanımlı fonksiyonlara dayalı yapısıyla cihaz bağımsız bir çözüm sunar ve farklı teknolojilerin bir arada çalışabilmesini sağlar.

Ayrıca, geleneksel şebeke hedefleri (örneğin, anahtarlama cihazlarının birbirini kilitlemesi) için de çözümler sunmaya devam eder. Bu standart, maliyet etkinliği, kısa süreli proje tamamlama hedefleri ve sınırlı insan kaynakları gibi enerji sektörü zorluklarını da ele alır. Standardizasyon sayesinde mühendislik süreçlerini hızlandırır ve verimliliği artırır.

- IEC61850 Standardının Genel Özellikleri

IEC61850, geleceğin koruma, otomasyon ve kontrol çözümlerinin temelini oluşturur. Özellikle kendi kendini tanımlama ve genel konfigürasyon sağlama yeteneği ile dikkat çeker. Süreç hattında örneklenmiş akım ve gerilim değerlerini desteklemesi, düşük güçlü ölçü trafoları (LPIT) gibi yeni teknolojilerin kullanımını kolaylaştırır.

Başlangıçta trafo merkezleri için geliştirilen bu standart, artık trafo merkezi-EMS ve trafo merkezi-trafo merkezi iletişimini de kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu özellikler, yeni nesil güç sistemlerinin dinamik yapısına uyum sağlama açısından kritik önem taşır.

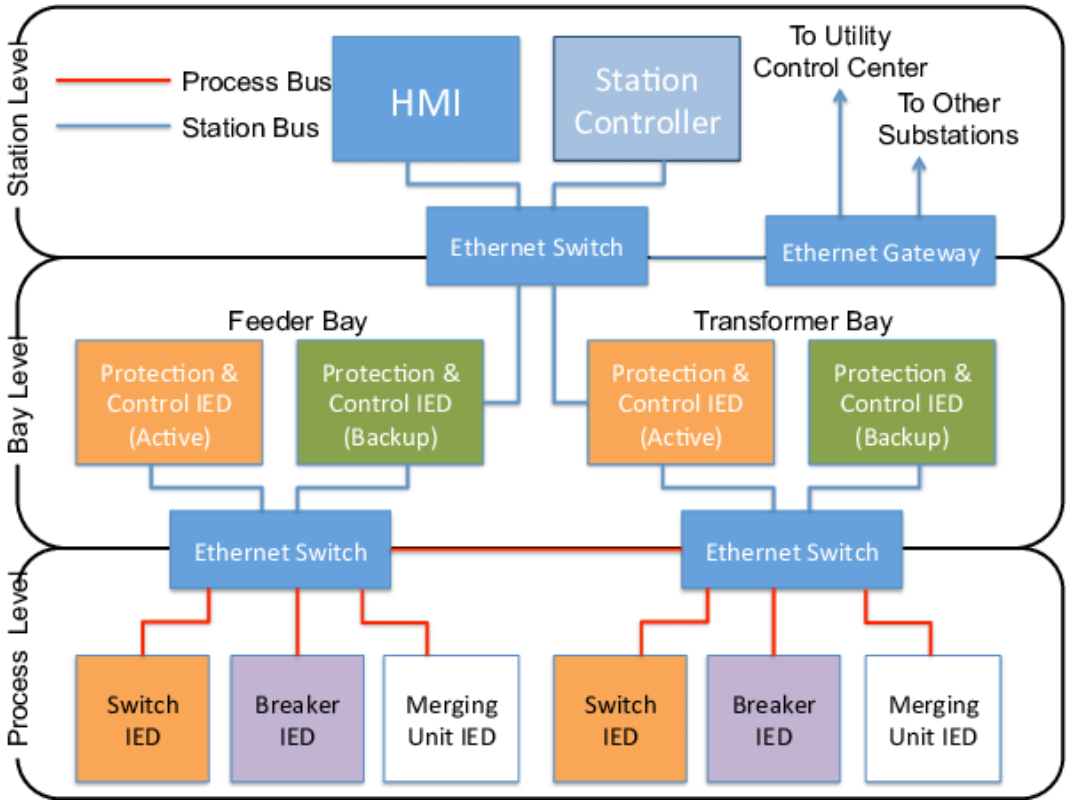
- IEC61850'nin Diğer Standartlara Göre Genel Avantajları

IEC61850, yalnızca bir haberleşme protokolü (örneğin, IEC60870-5-1xx serisi, DNP3.0, Modbus gibi) değil, daha kapsamlı bir standartlar bütünüdür. Bu standart, çevresel gerekliliklerden proje yönetimine, mühendislik süreçlerinden araçlarına, fonksiyon modellemesinden uygunluk testlerine ve uygulama önerilerine kadar geniş bir kapsam sunar.

IEC 61850, istasyon seviyesi, bara seviyesi ve süreç seviyesi olmak üzere trafo merkezindeki üç temel seviyede haberleşmeyi kapsayan en kapsamlı ve tanınmış standart haline gelmiştir. Bu durum, diğer standartların genellikle yalnızca bir veya iki seviyeyi kapsamasıyla farklılaşır. Ayrıca, merkezi haberleşme sistemlerindeki sorgulama temelli iletişim yerine, yüksek hızlı olay tabanlı iletişim sağlamasıyla öne çıkar. IEC61850'nin istemci-sunucu mimarisi, birden fazla istemcinin (örneğin, yedeklilik amaçlı) kullanılabilmesini mümkün kılar [50].

Diğer haberleşme standartlarına kıyasla IEC61850'nin başlıca avantajları şunlardır:

- ✓ Ethernet Kullanımı: Ethernet, bir cihazın ihtiyaç duyduğu anda mesaj göndermesine olanak tanır. Bu yöntem, merkezi sistemlerdeki gibi bir ana cihazın mesaj akışını yönetmesi gerekmediği için darboğaz sorununu ortadan kaldırır.



Şekil 4.29 Trafo merkezi mimarisi[51]

- ✓ Çoklama (Multicasting): Ethernet, bir cihazın mesajını aynı anda birden fazla cihaza iletmesini sağlar, bu da zaman açısından kritik mesajların performansını artırır ve ağ trafiğini azaltır.
- ✓ Gerçek Zamanlı İzleme: Sistemin ve bileşenlerin sağlık durumunun gerçek zamanlı izlenmesi, hatalara hızlı ve verimli şekilde müdahale etmeyi sağlar.
- ✓ TCP/IP Entegrasyonu: IEC61850, veri transferini TCP/IP üzerinden yaparak kamuya açık veya özel veri ağlarında güvenilir iletişim sağlar.
- ✓ Geleceğe Uyumluluk: Haberleşme teknolojisinde olası değişiklikler, yalnızca soyut modellerin yeni bir profile eşlenmesini gerektirir ve sistemin temel yapısına minimum etki eder.
- ✓ Genişletilebilir Veri Modeli: Standart, açıkça tanımlı ve genişletilebilir bir veri modeli sunar; bu, sistemin bileşenlerinin kolay entegrasyonunu sağlar.

- ✓ Otomatik Tanımlama: IEC61850 cihazları, kendilerini istemci uygulamalarına manuel konfigürasyona gerek kalmadan tanımlayabilir.
- ✓ XML Tabanlı Konfigürasyon Dili: Standart, sistem araçları arasında yapılandırma verilerinin değişimini formal bir şekilde sağlar ve manuel veri eşleştirme ihtiyacını ortadan kaldırır.
- ✓ Zaman Senkronizasyonu: Ethernet üzerinden SNTP (Simple Network Time Protocol) ve PTP (Precision Time Protocol) gibi yöntemlerle zaman senkronizasyonu sağlar. PTP, 1 mikro saniyeden daha iyi doğrulukla süreç seviyesindeki uygulamalar için idealdir.

IEC61850, bu özellikleriyle yalnızca mevcut zorlukları ele almakla kalmaz, aynı zamanda gelecekteki ihtiyaçlara uyum sağlama potansiyeli sunar.

- IEC61850 Uygulamalarının, Özelliklerinin ve Avantajlarının Özeti

Çeşitli güç sistemi zorluklarına çözümler sağlamak için IEC 61850'nin uygulamaları, özellikleri ve avantajları şu şekilde özetlenebilir:

Bilgi Değişimi ve Dağıtık Veri Yönetimi: IEC61850, yenilenebilir enerji ve dağıtık üretim gibi alanlarda ihtiyaç duyulan veri değişimi ve mantıksal şemaların kullanılmasını kolaylaştırır.

Trafo merkezlerinde ve trafo merkezleri arasında hızlı, güvenli ve geniş alanlı bilgi akışı sağlamak için tasarlanmıştır.

Trafo merkezi içi uygulamalar: devre kesici kilitleme, otomatik tekrar kapama ve senkronizasyon kontrolü gibi şemalar.

Trafo merkezleri arası uygulamalar: geniş alan yük atma, dağıtık enerji üretim şemaları, ada modunu önleme gibi sistemler.

Standartlaşma ile Daha Hızlı Uygulama ve Hataların Azaltılması: IEC 61850, farklı üreticilerin cihazları arasında veri değişimini kolaylaştıran bir veri modeli ve hizmetleri standartlaştırır, böylece iletişim uyumluluğunu sağlar.

Substation Configuration Description Language (SCL) sayesinde, otomasyon sistemlerinin yapılandırılması ve cihazların ayarlarının yapılması kolaylaşır.

Yenilemeler ve genişletmeler, standart nesne modelleri ve iletişim tanımları sayesinde yeniden mühendislik gerektirmeden yapılabilir.

Ekonomik Çözümlere Odaklanma: Trafo merkezi maliyetlerini azaltır: fiziksel boyutların küçülmesi, daha az bakır kablo kullanımı, mühendislik ve devreye alma süreçlerinin sadeleşmesi gibi avantajlar sağlar.

Fiber tabanlı dijital yaklaşımlar, kurulum ve sonraki modifikasyon maliyetlerini düşürür.

Daha Hızlı Kurulum ve Daha Az Test İhtiyacı: IEC61850 tabanlı sistemlerin kurulumu, sahada daha az test gerektirir ve primer ekipman kesintilerini en aza indirir.

Fabrikada test edilen sistemlerin sahadaki sorunları azaltması, zaman kazandırır.

Daha Küçük Fiziksel Alan Gereksinimi: Dijital sensörler ve fiber tabanlı sinyallerle daha az cihaz kullanımı, trafo merkezlerindeki fiziksel alan gereksinimlerini azaltır.

Süpervizyon, İzleme ve Analiz: Geleneksel sistemlere göre, GOOSE mesajlarının sürekli tekrarlanması ve numune değerlerin sürekli akışı sayesinde iletişim yollarının ve işlevlerin durumu güvenilir bir şekilde izlenebilir.

Hataların tespitinde hızlı ve güvenilir çözümler sağlar; bu durum özellikle geleneksel kablolu sistemlerde genellikle zaman alıcıdır.

Güvenlik: Geleneksel akım trafoları (CT) ile çalışırken karşılaşılan riskler, LPIT (Düşük Güçlü Enstrüman Transformatörleri) kullanımıyla tamamen ortadan kaldırılabilir.

Süreç veri yolu ile bakım görevlerindeki güvenlik riskleri de azaltılır.

IEC61850'nin sağladığı bu avantajlar, modern güç sistemlerinin gereksinimlerine yanıt veren güvenilir, ekonomik ve hızlı çözümler sunar.

4.3.2 IEC61850 SİSTEMİNE GİRİŞ

4.3.2.1 IEC61850 Tanımı

IEC61850 standart serisi olan "Enerji Tesis Otomasyonu için İletişim Ağları ve Sistemleri", endüstride koruma ve otomasyon için kullanılan cihazların, en az kablolu cihazlar kadar, bir iletişim bağlantısı üzerinden birlikte çalışabilir olmasını sağlama ihtiyacına dayanmaktadır.

IEC61850 standardının amacı, performans ve maliyet gereksinimlerini karşılayan, aynı zamanda gelecekteki teknolojik gelişmeleri destekleyen bir mühendislik ve

Akıllı Elektronik Cihaz(IED) yapılandırması sunmaktır. IEC61850 sisteminin faydalı olmasındaki temel nokta, bu cihazların (IEDs) arasındaki açık bilgi alışverişinin desteklenmesidir.

IEC61850 bir otomasyon sistemi uygulamasını mümkün kılan bir araçtır. Herhangi belirli bir proje için tanımlanmış uygulama değildir. Tesis sahibi, tesis teknik personeli ve sistem entegratörünün gereksinimlerine uygun işlevlerin ve iletişim seçeneklerinin doğru uygulamasını seçmek için birlikte çalışmaları gerekir. Bu da sonrasında bu gereksinimleri karşılamak için uygun bir akıllı elektronik cihaz (IED) kombinasyonuna olanak tanır. Bu, ilk etapta cihazların seçildiği daha sonrasında ise bunların nasıl bağlanacağına karar verildiği geleneksel kablo tabanlı sisteme kıyasla daha ince işçilik gerektiren ama dikkat çekici bir değişikliktir. Bu nedenle "cihaz tabanlı" olmaktan ziyade "işlev tabanlı" dır.

IEC61850'nin kapsamı, her türlü şebeke ve gerilim seviyesi için enerji tesis otomasyonunu içerir. Standardın ölçeklenebilirliği ve kullanılan iletişim teknolojisinin desteklediği uygulama, üretim, depolama, iletim, dağıtım ve son tüketici seviyelerine kadar elektrik altyapısının tüm seviyelerini kapsar. Standardın 2002'deki adı olan "Alt İstasyonlarda İletişim Ağları ve Sistemleri", 2010 yılında "Enerji Tesis Otomasyonu için İletişim Ağları ve Sistemleri" olarak değiştirilmiştir. Aşağıdaki tabloda IEC61850 standardının kapsadığı işlevsel alanlardan bazıları listelenmiştir.

Tablo 4.4 IEC61850'nin kapsadığı işlevsel alanlar

Protection	Power quality	Event record management
System operation monitoring	Metering	Alarms
System controls	Scheduling	…
Automation	Condition monitoring	

IEC61850 standardına göre güç hizmeti (power utility) ifadesi genel kullanımdan çok daha geniştir, mevcut ve gelişmekte olan elektrik güç sistemlerinin tüm yönlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Uygulama, tüm elektrik altyapısı biçimlerini kapsamaktadır, örneğin standart Tablo 2'deki varlık alanlarını içerir.

Tablo 4.5 IEC61850 için varlık alanları

Substations of all voltage levels, AC and DC	Hydro power dam and water flow	Electric vehicles
Overhead transmission lines	Distributed energy resources	Energy storage systems
Underground cables	Wind turbine mechanics and environment	Industrial and mining consumers
Generation (all types)	Traction	

Özellikle, trafo merkezi iletişim teknolojilerindeki yüksek yatırımlar ve bu teknolojinin endüstriyel süreçlerin tüm alanlarına (Nesnelerin İnterneti—IoT) güçlü bir şekilde entegrasyonu, IEC 61850'nin bu uygulama aralığında en yüksek gerilim seviyelerinden düşük gerilim tüketici seviyelerine kadar etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Temel olarak, bu standart iletişim anlamında "sadece bir protokol" değildir ve otomasyon sisteminin mühendisliği ve uygulanması için üç temel unsurdan oluşur:

- yapılandırılmış bir mühendislik süreci tanımı, üç mühendislik aracı ve altı dosya türü,
- cihazlar içinde Mantıksal Aygıtlar(Logical Devices), Mantıksal Düğümler (Logical Nodes), Veri Nesneleri (Data Objects) ve Veri Özellikleri(Data Attributes) olarak tanımlanan veri modeli,
- Üretim mesajı spesifikasyonu (Manufacturing Message Specification(MMS)), Genel Nesne Yönelimli Trafo Merkezi Olayı (Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE)) ve Örneklenmiş Değerler (Sampled Values(SV)) olmak üzere üç protokol.

Bu sayede, kullanılan iletişim ortamı ve protokolden bağımsız bir şekilde, cihazlar içindeki işlevler arasında bilgi doğru bir şekilde değiştirilebilmektedir.

Aşağıda verilen IEC61850'nin diğer temel unsurları, mühendislik ve işletme aşamalarında görev alacak personeller tarafından iyi anlaşılması gerekmektedir.

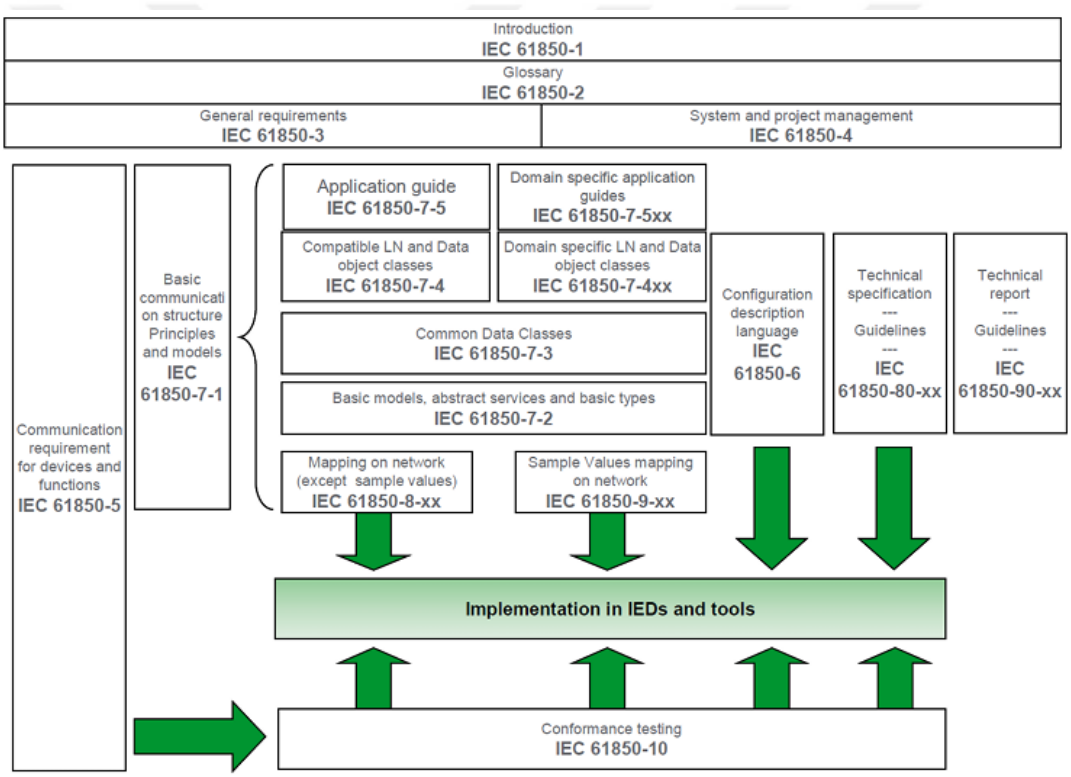
- çevresel dayanıklılık özellikleri
- proje yönetimi
- işlev modellemesi
- Akıllı Elektronik Cihaz (IED) uyumluluk sertifikası

Akıllı elektronik cihazların birlikte çalışabilirliğini sağlamak için, protokol yığını ve medya tanımlamaları dahil tüm katmanlar, ana akım iletişim teknolojisinden yapılan iyi tanımlanmış bir seçime dayalı olarak standartlaştırılmıştır.

4.3.2.2 IEC61850 Serisi Kavramına Genel Bakış

IEC61850 standardının bazı bölümleri tamamen onaylanmış resmi Uluslararası Standartlardır (IS). Diğer bazı bölümler henüz resmî olarak standardize edilmemiş olmakla birlikte, anahtar spesifikasyonlara işaret eden Teknik Özellikler (TS) veya "iyi önerilen uygulamalar" olarak yayımlanmıştır. Ayriyeten bazı bölümler, sektöre genel rehberlik sağlayan Teknik Raporlar (TR) olarak sunulmuştur.

Standardın her bir Bölümü, sistemin ve/veya IED'nin belirli yönlerini tanımlar:



Şekil 4.30 IEC61850 serisinin modelleme ve haritalama bölümleri arasındaki ilişki[52]

- IEC61850-1: IEC 61850 serisine giriş ve genel bakış sunar.
- IEC61850-2, Standardın çeşitli bölümlerindeki elektrik dağıtım otomasyon sistemleri bağlamında kullanılan belirli terminoloji ve tanımların sözlüğünü içerir.
- IEC61850-3: İletişim ağının kalite gereklilikleri, çevresel koşullar ve yardımcı hizmetler açısından genel gereksinimlerini belirler.

- IEC61850-4: Sistem ve proje yönetimiyle ilgili mühendislik süreci, PACS'ın yaşam döngüsü ve kalite güvencesine dair kuralları kapsar.
- IEC61850-5: Elektrik dağıtım otomasyonu sistemlerinde gerçekleştirilen işlevlerin ve cihaz modellerinin iletişim gereksinimlerini belirtir.

IEC61850'nin aşağıdaki bölümleri, akıllı elektrik cihazlar tarafından kullanılan temel prensipleri ve modelleme yöntemlerini tanımlar,

- IEC61850-6: İletişimle ilgili akıllı elektronik cihaz yapılandırmalarını ve parametrelerini, iletişim sistemi yapılandırmalarını, şalt sahası yapılarını ve bunlar arasındaki ilişkileri tanımlamak için bir dosya biçimi belirtilmektedir. Mühendislik araçları arasında uyumlu bir şekilde bilgi alışverişini sağlayan "Trafo Merkezi Konfigürasyon Tanımlama Dili" (SCL) formatı tanımlanmaktadır.
- IEC61850-7: Veri modeli yapısına dair detaylar içermektedir.
- IEC61850-7-5: Trafo merkezi otomasyon uygulamaları için bilgi modellerinin kullanımı tanımlanmaktadır. Farklı trafo merkezi uygulamaları için Mantıksal Düğümlerin ve IEC 61850-7-4'te tanımlanan verilerin nasıl uygulanacağına dair net örnekler sunulmaktadır. Örnekler, izleme işlevinden koruma engelleme şemalarına kadar uygulamaları kapsamaktadır.
- IEC61850-7-4: Trafo merkezi otomasyon işlevleri için özel bilgi modelleri tanımlanmaktadır (örneğin, kesicinin konum durumuyla ilgili bilgileri veya bir koruma fonksiyonunun ayarlarını). IEC Teknik Komite 57'nin kapsamındaki diğer alanlara özgü bilgi modelleri ise 61850-7-4xx serisinde tanımlanmıştır.
- IEC61850-7-3: Yaygın kullanılan bilgiler listelenmektedir (ör. çift nokta kontrolü, üç fazlı ölçüm değerleri).
- IEC61850-7-2: Bilgilerin nasıl değiştirileceğini açıklayan servisler belirtilmektedir.

IEC61850 sistemlerinde kullanılan üç iletişim protokolü (MMS, GOOSE, SV) aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır:

- IEC61850-8-1, IED'ler arasında bilgi iletişimi için özel olay ve raporlama araçlarını tanımlar (örneğin uygulama katmanı, kodlama)—bilgi alışverişi sırasında bilgiyi nasıl serileştireceğini, yani:

- SCADA, raporlama ve kontrol için kullanılan Üretim Mesajlaşma Servisi (MMS)
- Fonksiyon durumu ve değişiklikler için Genel Nesne Yönelimli Sistem Olayı (GOOSE)
- IEC 61850-9-2, gerçek zamanlı analog değerlerin iletişimi için Örneklenmiş Değer (SV) mekanizmasını tanımlar (Bölüm 7-4 T grubu Mantıksal Düğümlerinde tanımlanan 22 sensör: akım, gerilim, sıcaklık, basınç, titreşim, debi, …)

4.3.3 IEC 61850 Kullanıcı Spesifikasyonları, Standartlar ve Son Kullanıcılar

4.3.3.1 Koruma Fonksiyonları

Trafo merkezi koruma fonksiyonları, elektrik güç sistemi parametrelerini izler. Generatörler, fiderler, transformatörler, baralar, reaktörler gibi tüm güç devrelerinin gerekli koruma ve yalıtım işlevlerini sağlar. Anormal koşullarda alarm ve açma komutları sağlayarak sistemi hasardan korumaya katkıda bulunur.

Koruma fonksiyonları şunlar olabilir:

Yerel: Enerji miktarlarının doğrudan yerel proses arayüzünden elde edilerek tek bir cihazda uygulanır. Bir örneği faz aşırı akım korumasıdır.

Dağıtılmış: Koruma fonksiyonunun farklı bileşenleri farklı cihazlarda yer alır ve işlevi uygulamak için ağ üzerinden iletişim kurar. Buna bir örnek bara korumasıdır. Merkezi: Koruma fonksiyonunun tüm bileşenleri merkezi bir cihazda uygulanır.

IEC61850'de, koruma fonksiyonları P grubundan mantıksal düğümler kullanılarak uygulanır. Örneğin, aşırı akım koruma elemanı için PTOC düğümü kullanılabilir.

Koruma fonksiyonları, cihazlar arası eşler arası iletişim hizmetleri kullanılarak uygulanır.

4.3.3.2 Spesifikasyon Süreci

İşletmelerin tüm operasyonel yönlerinin verimliliğini artırmak için spesifikasyon süreci, farklı işlevleri entegre eden standart koruma, otomasyon ve kontrol şemalarına dayanmalıdır. Bunların geliştirilmesi ve uygulanması, elektrik güç sistemi varlıklarının yaşam döngüsüne dahil olan tüm katılımcılar tarafından anlaşılan ve kabul edilen bir iç standardizasyon sürecinin tanımlanmasını gerektirir.

Bu süreç şu unsurları belirlemelidir:

• Koruma, otomasyon ve kontrol felsefesi

• Ayarlar ve diğer parametreler

• Farklı uygulama türleri için işlevsel ve performans gereklilikleri

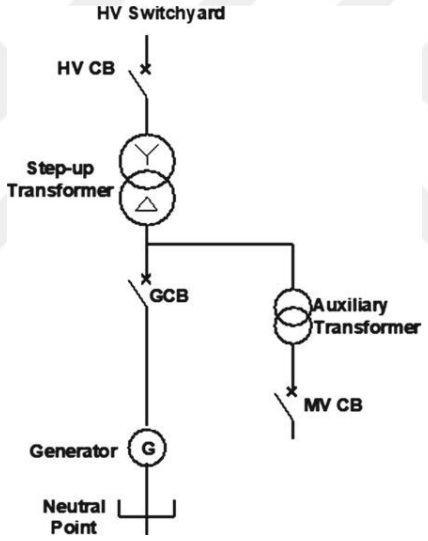
• Entegrasyon kısıtlamaları

• Uygulama çeşitliliğine ve teknoloji değişikliklerine uyum sağlama yeteneği

• Uzun vadeli kararlılık ve sürdürülebilirlik

• Tasarım verimliliği.

Aşağıdaki bölümlerde, standardizasyon sürecinin dört aşamasına genel bir bakış sunulmaktadır. Sürecin geliştirilmesini göstermek için bir jeneratör barası örnek olarak alınmıştır. Birincil sistemin temel tek hat diyagramı Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31 Jeneratör bölmesi tek hat şeması

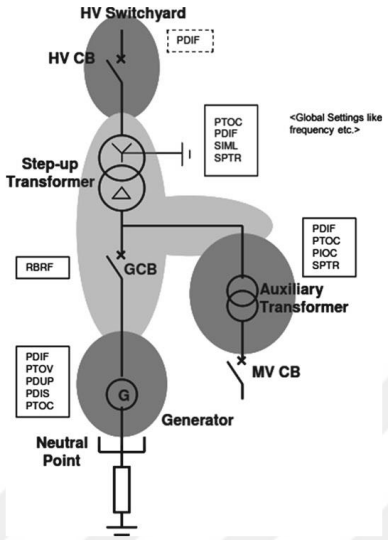
- Standart Şema - Şablon

Bu bölüm, şemanın kavramsal tanımıdır ve genellikle koruma ve kontrol felsefesinin belirli bir elektrik güç sistemi ekipmanı türüne uygulanmasının açıklamasıdır. Şablonlar, bir sonraki aşamada gerekli olacak tüm bileşenleri içermelidir.

Bu aşamada, işlevsel gerekliliklerin ve entegrasyon kısıtlamalarının tanımlanması gereklidir. Bu gereklilikler, bara topolojisi, gerilim seviyesi, iletişim, bara türü (örneğin transformatör, hat vb.) gibi detaylı gereksinimleri kapsar ve bazı arayüzlerin ve işlevlerin tanımlanmasını sağlar. Ayrıca, reaktif güç üretimi, güç

sisteminin topraklama durumu, istasyon kritikliği veya koruma felsefesi gibi sistemle ilgili konuların ele alınması gereklidir.

Bu aşamada genel bırakılan unsurlar, birincil ekipman veya akıllı elektronik cihaz türleridir.



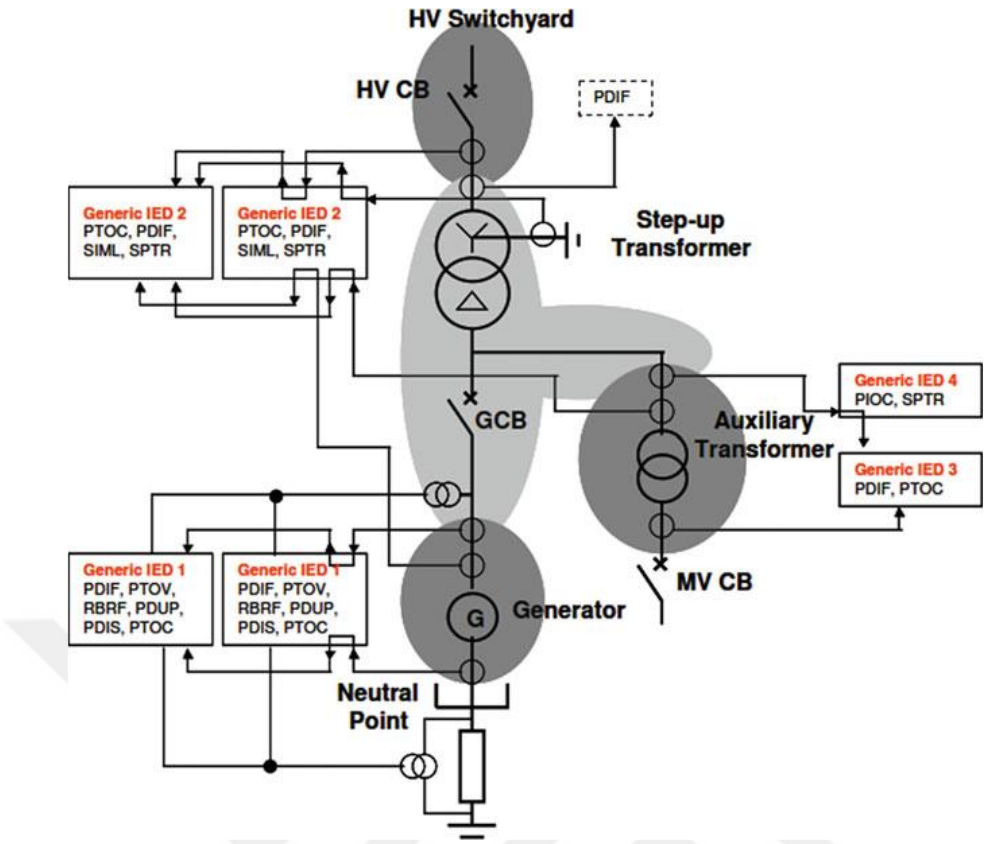
Şekil 4.32 Farklı koruma bölgelerinin tanımı

- Standart Şema - Tanımlama

Standart bir şemanın bu geliştirme aşaması, şema kapsamında yer alan belirli bara türüne uygun birincil ekipmanı ve donanım arayüzlerini tanımlar. Bu şema, aynı veya benzer türdeki yeni veya mevcut tesislerde dış bağlantı kabloları, sinyalleşme ve ekipmanda hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabilir. İşlevlerin genel veya soyut akıllı elektronik cihazlara atanması da bu aşamada belirlenir.

Tablo 4.6 IEC 61850-7-4'e göre mantıksal düğümlerin (LN'ler) açıklaması

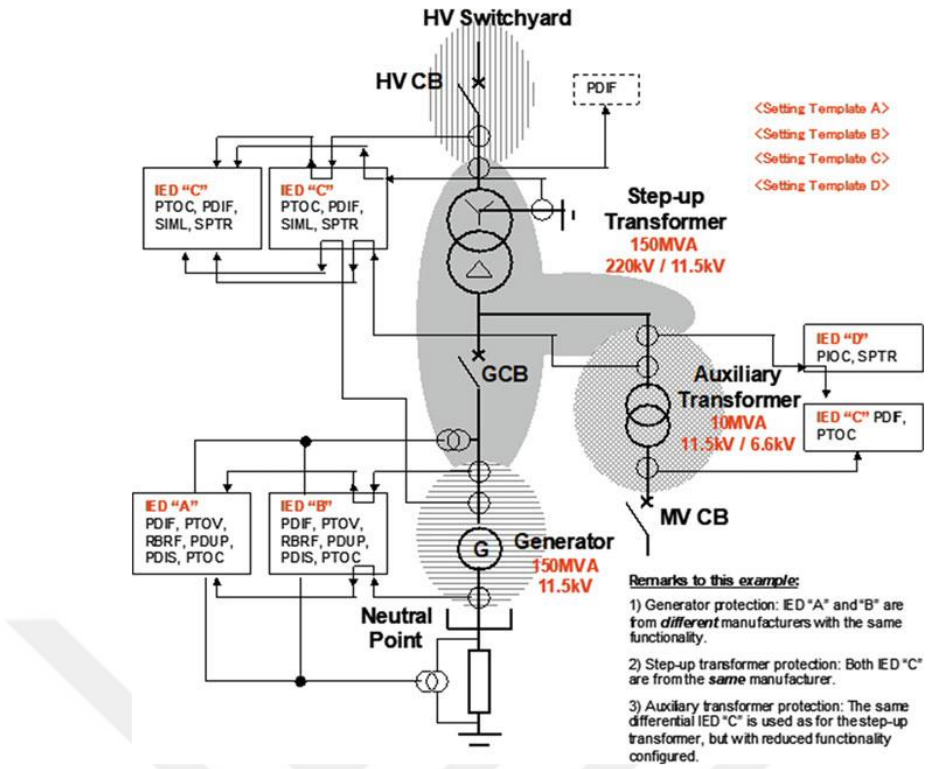
Logical node	IEEE C37.2	Description
PDIF	87G, 87T, …	Differential protection
PTOV	59G, 59GN	Overvoltage protection
PDUP	32	Reverse power protection
PDIS	21	Distance (impedance) protection
PTOC	51/51N/46	Time overcurrent protection
PIOC	50	Instantaneous overcurrent protection
RBRF	50BF	Breaker failure protection
SIML	26T	Insulation medium supervision (liquid, e.g. oil)
SPTR	63T, 49T	Power transformer supervision



Şekil 4.33 Temel koruma fonksiyonları ve arayüzleri tanımlanması

- Standart Şema - Uygulama

Bu aşama "standart şema" olarak kabul edilir. Bu, onaylanmış belirli akıllı elektronik cihazların (IED) veya diğer ikincil ekipmanların kullanımını içerir. Akıllı elektronik cihaz seçimi, aşama "B"de şema şablonu için tanımlanan tüm işlevlerin ve işlevsel unsurların seçilen cihazlarda mevcut olmasını sağlamalıdır. Bu standardizasyon seviyesinde, programlanabilir şema mantığı dahil olmak üzere akıllı elektronik cihazların genel ayarları tanıtılır. Bu aşamada yerel ayarlar veya sahaya özgü diğer yapılandırma parametreleri bulunmamaktadır.



Şekil 4.34 Akıllı elektronik cihazların tanımlanması

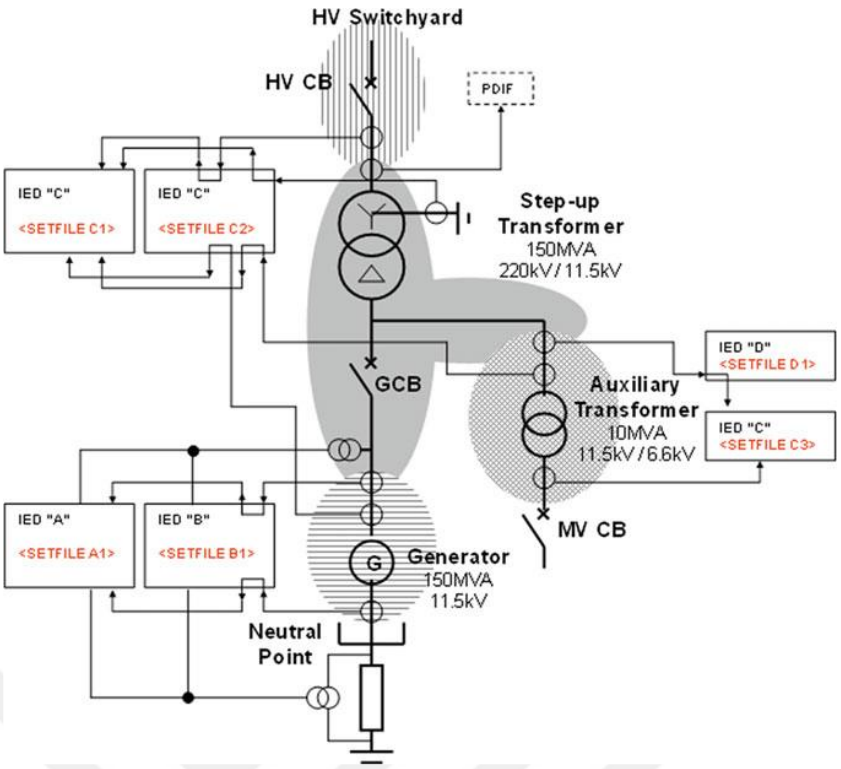
Bir standart şema, aynı veya benzer türdeki yeni ya da mevcut tesislerde iç bağlantı kabloları, sinyalleşme, ekipman veya etkinleştirilen işlevsel unsurlarda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir.

Kullanıcının aynı şema için farklı akıllı elektronik cihazlar (örneğin farklı üreticilerden) kullanmak istemesi durumunda, yukarıdaki tanımlara uygun farklı bir şema şablonu uygulaması ortaya çıkar.

- Standart Şablon - Örnekleme

Bu aşama, standart şemanın sahaya özgü bir uygulamasıdır (C aşamasından türetilmiş standart bir şema şablonunun somutlaştırılmasıdır). Bu aşamada, saha ve uygulamaya özel ayarlar uygulanır ve tüm donanım tanımlanır.

Somutlaştırma, ayar parametreleri ve sahaya özel adlandırma dışında herhangi bir değişikliği hariç tutarken, aşama "D"deki özelleştirme, standart şemanın birincil donanım bileşenlerindeki varyasyonlara uyarlanması fırsatını sunar.

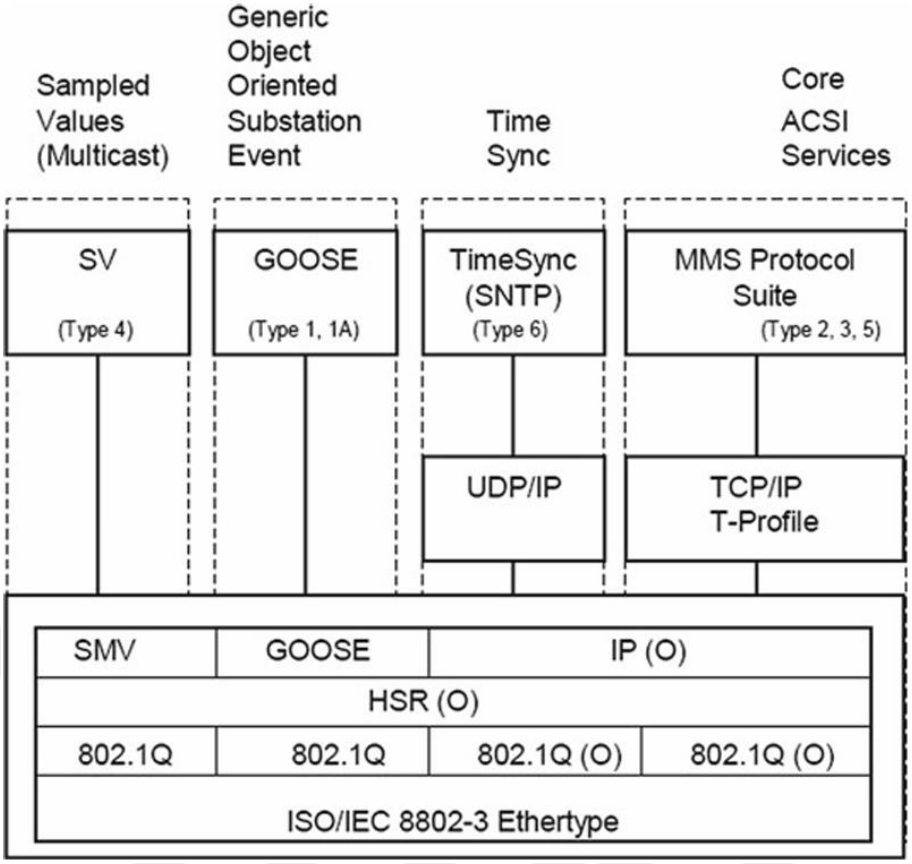


Şekil 4.35 Ayar dosyaları dahil belirtilen her şey

4.3.4 IEC61850 ile İlgili Hizmetlerin Uygulanması (Implementation of Services Related to IEC61850)

IEC61850-5'te belirtilen mesaj türleri ve performans sınıfları;

- Tür 1 (hızlı mesajlar)
- Tür 1A (açma komutları)
- Tür 2 (orta hızda mesajlar)
- Tür 3 (düşük hızda mesajlar)
- Tür 4 (ham veri mesajları)
- Tür 5 (dosya transfer işlevleri)
- Tür 6 (zaman senkronizasyon mesajları)



Şekil 4.36 İşlevsellik ve profillere genel bakış[53]

4.3.4.1 SCADA İle İlgili Hizmetler

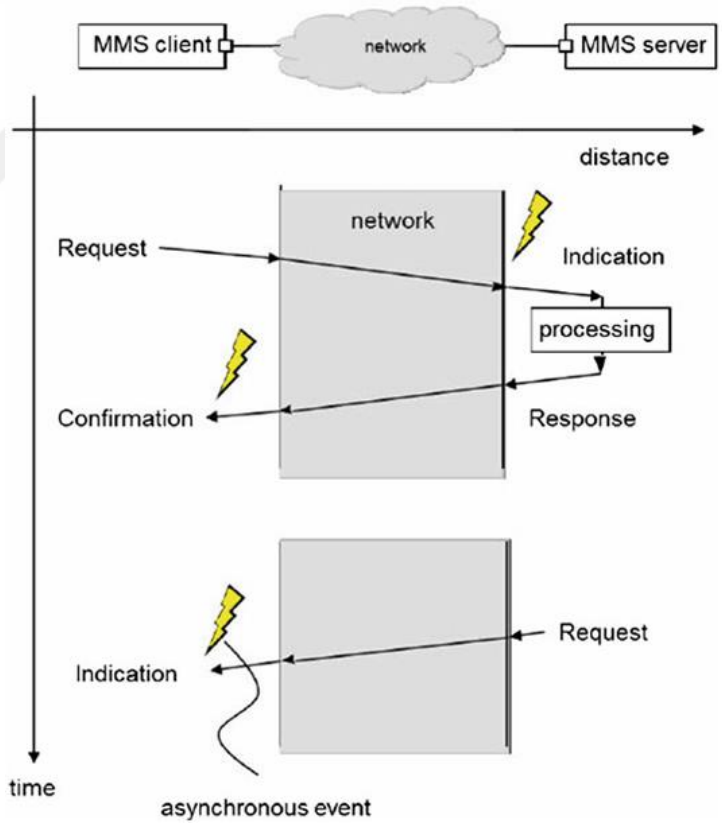
IEC61850-7-2, SCADA ile ilgili hizmetleri ve bu hizmetlerin davranışlarını tanımlar. İki taraflı uygulama ilişkilendirme modeli, hem doğrulanan (confirmed) hem de doğrulanmayan (unconfirmed) veri aktarımlarını uygulamak için bir istemci-sunucu yaklaşımını benimser. Bu hizmetleri sağlayan sunucuların, verileri iletmek için istemcilerden ilişkilendirme talepleri alması gerekir. Ayrıca, ilişkiyi sonlandırmak için bir ilişki bırakma (release association) hizmeti de sunulur. Bu hizmetler, MMS (Üretim mesajı spesifikasyonu(Manufacturing Message Specification)) protokolüyle uygulanır.

- Üretim Mesajı Spesifikasyonu (Manufacturing Message Specification (MMS))

IEC 61850-8.1 kapsamında tanımlanan MMS trafiği, SCADA, bir OPC (Open Platform Communications(Açık İletişim Platformu)) sunucusu veya bir ağ geçidi gibi bir MMS istemcisinin aynı seviyedeki tüm Akıllı Elektronik Cihazlara (IEDs) erişmesine olanak tanır. MMS, IP tabanlı (3. Katman) bir protokoldür.

Bu trafik hem İstasyon Veriyolu (Station Bus) hem de Süreç Veriyolunda (Process Bus) dolaşabilir. Ancak, Süreç Veriyolu üzerindeki tüm IED'lerin MMS desteği sağlaması gerekmez (IEC 61850-9).

MMS protokolü, ağ katmanında (3. Katman) çalışan bir istemci-sunucu protokolüdür. Bu nedenle IP adreslerini kullanır ve yönlendiriciler arasında iletişim kurabilir. Bir işletim modunda, istemci (genellikle SCADA veya geçit), MMS sunucusuna sahip bir akıllı elektronik cihaza belirli bir veri öğesi için bir talep gönderir. Bu cihaz, IP adresiyle tanımlanır. Sunucu, istemcinin IP adresine bir yanıt mesajı ile istenen veriyi gönderir. Diğer bir işletim modunda, istemci, bir olay meydana geldiğinde sunucunun kendiliğinden bir yanıt göndermesini talep edebilir. Olayların kaybolmasını önlemek için MMS, hata tespiti ve kurtarma için TCP (Transmission Control Protocol(İletişim Kontrol Protokolü)) protokolüne dayanır. Bir MMS sunucusu aynı anda birden fazla istemciyi destekleyebilir; ancak her istemci bireysel olarak işlenir.



Şekil 4.37 MMS protokolü

4.3.4.2 Koruma ve Kontrol Hizmetleri

IEC61850, koruma ve kontrol düzeneklerine bağlı cihazlar arasında yüksek hızlı veri alışverişi sağlamak için bir dizi hizmet sunar.

Koruma ve kontrol ile ilgili hizmetler için IEC61850 temelde iki protokol tanımlar:

- Bölüm 8-1: Nesne Yönelimli Genel Sistem Olayı - GOOSE
- Bölüm 9-2: Örneklenmiş Değerler - SV

GOOSE ve SV, koruma sistemlerinin çalışması için özel olarak geliştirilmiş protokollerdir.

Koruma uygulamaları, düşük gecikmeli yüksek hızlı veri taşımayı ve GOOSE gibi bir iletişim protokolü kullanıldığında onay gerektirmez. Kesici açma sinyalleri, direkt olarak devre kesicileri açma işlemini gerçekleştiren cihazlara iletilir.

Kontrol uygulamaları, örneğin kesici ve ayırıcıların açma ve kapama talepleriyle ilgili kilitleme işlemlerine (interlocking) yönelik sinyaller gerektirebilir. Bu tür sinyaller yüksek hızda iletilmelidir, ancak koruma sinyallerine kıyasla daha düşük öncelik taşır. Ayrıca, kontrol uygulamaları, birincil ekipmanları ayıran cihazlara komutlar göndermelidir.

SCADA'nın bir parçası olarak gönderilen kontrol komutları ile kilitleme ile ilgili olanlar arasında ayrım yapmak önemlidir. SCADA komutları, ağ iletişiminde daha az öncelik, doğrulama ve güvenlik, veri bütünlüğü ve ağ geçiş kabiliyeti gibi diğer özellikleri sağlamak için daha büyük bir yığın katmanını geçmek zorundadır.

Bu tür hizmetler için IEC61850-7-2, çok noktalı bir uygulama ilişkilendirme modeli sağlar. Veriler, sunucu tarafından ağa gönderilir ve bu durumda aboneler olarak bilinen istemciler tarafından alınır. IEC61850'de çok nokta yayın ve yüksek hızlı iletim ile hızlı alım işleme sağlayan tercih edilen protokol GOOSE protokolüdür.

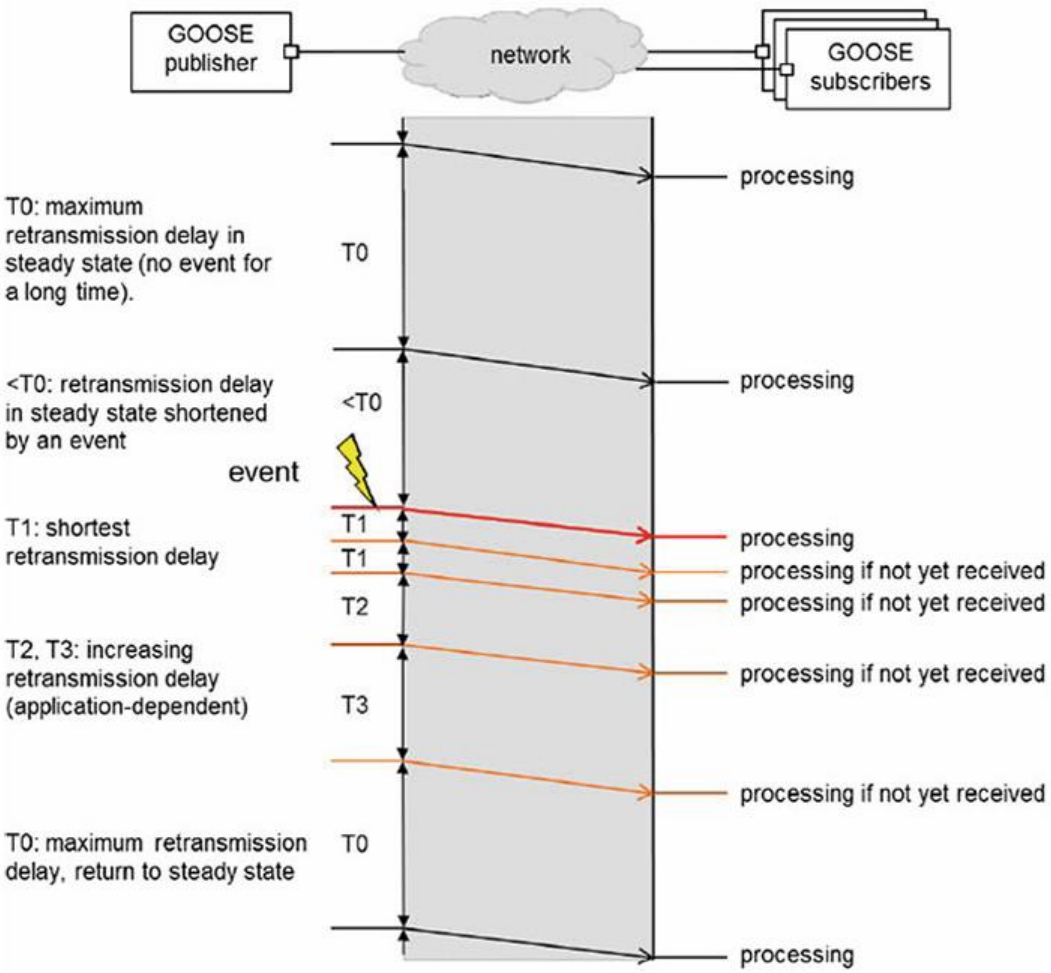
- Genel Nesne Yönelimli Trafo Merkezi Olayı (GOOSE)

GOOSE trafiği, akıllı elektronik cihazların verileri yatay olarak baralar arasında ya da dikey olarak proses seviyesi ile bara seviyesi arasında paylaşmasına olanak tanır (IEC61850-8.1). Bu iletişim, özellikle durum sinyalleri, açma sinyalleri, kilitleme ya da ölçüm verileri için kullanılır. Trafik genellikle İstasyon Veriyolu veya Proses Veriyolu üzerinden akar (IEC61850-9).

GOOSE mesajları, Ethernet'in sunduğu çoklu yayın işlevselliğinden yararlanılarak Katman 2'de (bağlantı katmanı) üzerinde değişim sağlar. GOOSE iletişimi olay tabanlı bir iletimden ve nispeten yavaş bir döngüsel iletimden oluşur.

Bir akıllı elektronik cihaz, önceden yapılandırılmış bir olay gerçekleştiğinde, bu olayla ilgili değişken değerlerini taşıyan bir GOOSE mesajı gönderir. GOOSE mesajları çok noktaya yayın olduğu için alıcı tarafından onaylanmaz. Geçici hataları önlemek amacıyla aynı mesaj belirli zaman aralıklarında (T1, T2, T3) tekrar gönderilir. Mesajın kaynağının erişilebilirliğini doğrulamak için GOOSE mesajları düşük hızda döngüsel olarak (T0) tekrar edilir. GOOSE mesajları yalnızca yerel ağda (LAN) çalışır ve Katman 2'de faaliyet gösterdikleri için yönlendiriciler üzerinden ağa geçiş yapamazlar.

GOOSE iletişimi yayıncı/abone modeli üzerine kuruludur. Yeni bir değer geldiğinde, eski değeri sıraya almadan onun yerine geçmesi beklenir. Ancak bu süreç kesin bir kural değildir ve bazen sıraya alma mekanizması da kullanılabilir. Bu yapı, GOOSE mesajlarının hızlı ve güvenilir bir şekilde kritik koruma ve kontrol uygulamalarında kullanılmasını sağlar.



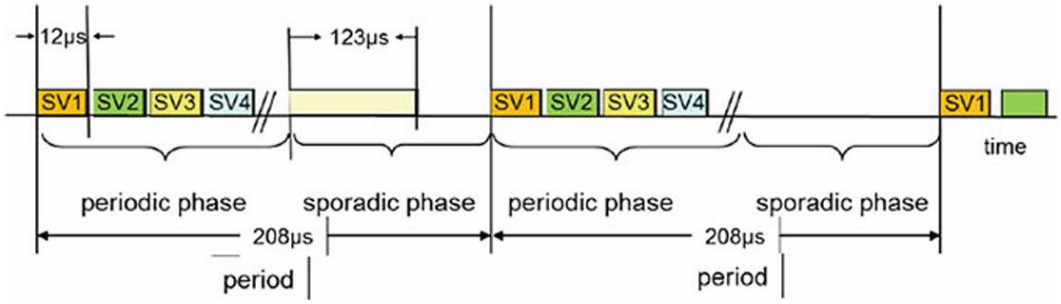
Şekil 4.38 GOOSE protokolü

- Örnek Değer (SV)

IEC61850-9-2 standardında tanımlanan SV trafiği, gerilim ve akım örneklerini taşır. Bu trafik genellikle Proses Veriyolu üzerinden akar, ancak baralar arası koruma ve fazörler gibi uygulamalar için İstasyon Veriyolu üzerinden de iletilebilir (IEC61850-9).

Örneklenmiş değerler protokolü, temel olarak sensörlerden akıllı elektronik cihazlara analog değerlerin (akım ve gerilim) iletilmesi için kullanılır. GOOSE protokolü gibi, SV protokolü de Katman 2 çoklu yayın işlevselliğini kullanır ve mesajlar, MAC adresleri (Media Access Control Address) ve mesaj gövdesindeki bir tanımlayıcı ile tanımlanır. GOOSE protokolünde olduğu gibi, SV için de yeniden iletim mekanizması yoktur; kaybolan bir örnek, bir sonraki başarılı örnekle üzerine yazılarak güncellenir.

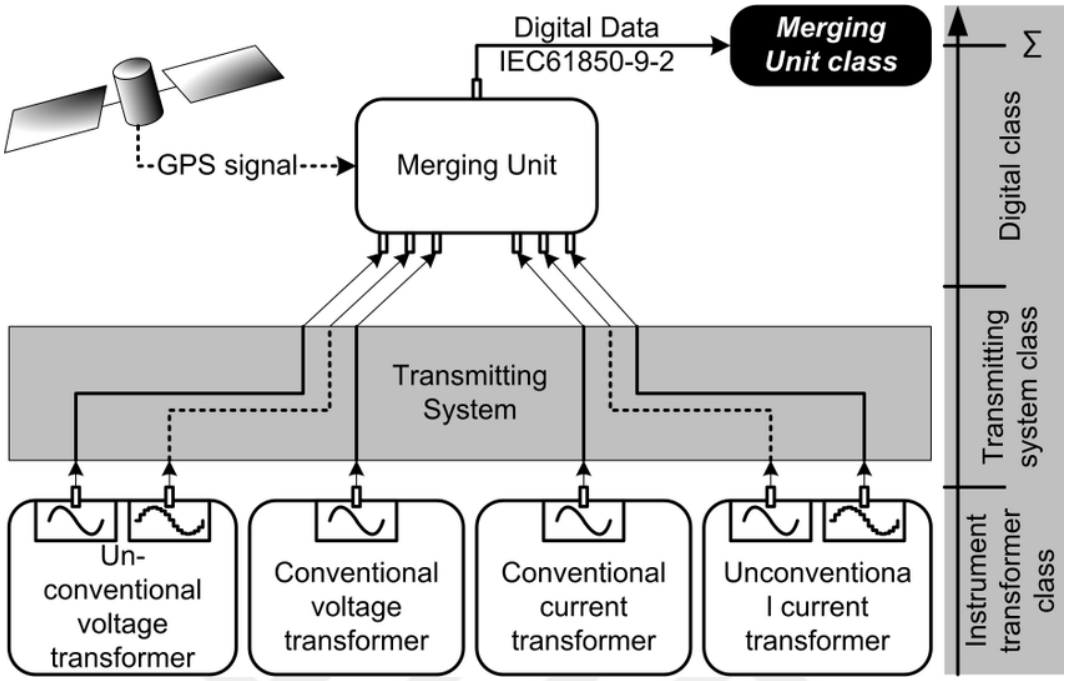
SV mesajları, GOOSE mesajlarından farklı olarak, tamamen döngüsel bir şekilde ve kısa periyotlarla iletilir. UCA 61850-9-2LE uygulama kılavuzu, 50 Hz'lik bir şebekede 250 µs, 60 Hz'lik bir şebekede ise 208,3 µs'lik bir iletim periyodunu öngörür. Bu nedenle SV mesajlarının boyutu küçük tutulur. Tipik bir SV mesajı yaklaşık 160 bayttır ve 100 Mbit/s hızında yaklaşık 12 µs sürer. Bu süre, 100 Mbit/s hızında 123 µs'lik maksimum boyutlu bir FTP (File Transfer Protocol) mesajına da yer açacak şekilde planlanmıştır; böylece bir veriyoluna bağlı SV göndericilerinin sayısı sınırlı tutulur.



Şekil 4.39 SV trafiğine örnek

Rastgele sıkışıklıkları önlemek için aynı veriyolundaki tüm SV kaynakları aynı periyotla çalışmalı ve tercihen zaman bölmeli çoklama (time division multiplexing) gibi bir yöntem uygulamalıdır. IEC61869-9 standardı, Birleştirme Birimi(MU(Merging Unit)) için profil tanımlarını içerir ve UCA61850-9-2LE

profiliyle geriye dönük uyumluluk sağlar. Bu yapı, IEC61850 sistemlerinde SV mesajlarının verimli bir şekilde kullanılmasını destekler.



Şekil 4.40 İletim sistemi[54]

- Zaman Senkronizasyon Hizmetleri

Zaman senkronizasyonu, olay sırası analizi, enerji ticareti için ölçümleme ve örneklerin hizalanması gibi belirli uygulamalar için gerekli bir hizmettir.

MMS veya GOOSE protokollerinin çalışması için ağ genelinde senkronize bir yıl/ay/gün/saat/dakika/saniye zaman damgasına ihtiyaç duyulmaz. Eski elektromekanik rölelerde zaman kavramı olmadığı gibi, koruma sistemleri de cihazlar farklı yıl referansları ile çalışsa bile doğru şekilde işlevini yerine getirir. Ancak, bazı SV uygulamaları için, her birleştirme biriminin (SV mesajının yayımlayıcısı) her bir saniyelik pencerenin başlangıcında doğru bir senkronizasyon tutarlılığına sahip olması gerekir; bununla birlikte yıl/ay/gün/saat/dakika gibi bilgiler genellikle önemsizdir.

Küçük ağlarda IRIG-B/1 saniyede bir darbe yöntemi, bir mikrosaniyeye kadar senkronizasyon tutarlılığı sağlayabilir. Ancak pratikte, SV mesajları için IEEE 1588 PTP (v2) zaman senkronizasyonu, IEC 61850-9-3'te tanımlanan özel trafo merkezi profili ile sağlanmalıdır. Bu durum, ağ anahtarlarının da IEEE 1588 şeffaf saat (transparent clock) özelliğine sahip olması gerektiği anlamına gelir. 2010

öncesi eski ağlarda kullanılan anahtarlar bu özelliğe sahip olmadığından değiştirilmesi gerekebilir, ancak gelecekte bu tür bir yenileme ihtiyacını önlemek için yeni alınacak anahtarların bu özelliği desteklemesi akıllıca olacaktır.

4.3.5 IEC61850 Uygulaması İçin Planlama (Planning for IEC 61850 Implementation)

4.3.5.1 IEC61850 Çözümü Uygulama Planlaması

Koruma, otomasyon ve kontrol sistemleri, son yıllarda hem Akıllı Elektronik Cihazların (IED) işlem kapasitesindeki artış hem de bu cihazlar arasında veri alışverişini iyileştiren güvenli iletişim ağlarının kullanımı ile önemli bir teknolojik evrimden geçmiştir.

Koruma, otomasyon ve kontrol sisteminin (PACS) gereksinimleri, uygulanacak olan IEC 61850 modelleri ve hizmetlerine uygun olarak İstasyon ve Süreç Seviyesi göz önüne alınarak belirlenir. Bu gereksinimler, birincil ekipman ile koruma ve kontrol cihazları arasında ve IED'ler arasında iletişim yoluyla veya kablolu olarak gönderilecek sinyalleri tanımlar. Ayrıca PACS fonksiyonları, durum, ölçüm ve kontrol sinyallerinin edinimi için gerekli performansı ve mantıksal ile fiziksel Ethernet ağ altyapısını belirler. Bu gereksinimler, şalt sahasındaki birincil ekipmandan SCADA sistemi (İnsan Makine Arayüzü - HMI) ve Uzaktan Operasyon Merkezlerine kadar tanımlanmalıdır.

IEC61850'nin İstasyon Seviyesi'nde kullanımı, özellikle kontrol odası üzerinde etkisini konsolide etmiştir. Süreç Seviyesi'ndeki uygulama ise şalt sahasını, birincil ekipmanı ve kontrol odasının tüm altyapısını etkiler. Bu nedenle, IEC61850 standardına dayalı bir çözüm uygulama kararı, projenin başında alınmalı ve inşaat, elektrik, koruma ve otomasyon, devreye alma, bakım, varlık yönetimi ve işletim gibi tüm alanların katkılarıyla şekillenmelidir.

- Şalt Sahası Ekipmanları ve Kontrol Odası Üzerindeki Etkiler

IED'lerin işlem ve iletişim kapasitesindeki evrim, mimari, yedeklilik ve çok işlevli uygulamalara farklı alternatiflerin uygulanmasını mümkün kılar.

IEC61850, anlam içeren kendi kendini tanımlayan (semantik) bir veri modeli sağlar. Önceki protokollerin (IEC60870-5-101, DNP3) aksine, bilgiler mantıksal bir şekilde yapılandırılır ve nesneler ve alt nesneler şeklinde sınıflandırılarak daha

detaylı bilgi sunar. Bu yapı, cihazların işletim sistemlerinde yeniden tasarımı ve daha fazla işlem gücü gerektirir.

Tüm iletişim, IED'ler ile şalt sahası ekipmanları ve aralarındaki ethernet altyapısına dayanır. Bu da cihazların, ağ tasarımında tanımlanan işlevselliklere (yedeklilik mekanizmaları, zaman senkronizasyonu ve protokoller: MMS, GOOSE, Sampled Values) sahip olmasını gerektirir.

Koruma ve kontrol işlevlerinin dijital bir ortama taşınması, sanallaştırma ve merkezi kontrol üniteleri gibi yeni konseptlerin uygulanmasını mümkün kılar. Bu da daha az cihaz, daha az elektrik kablolaması ve şalt sahasından gelen akım devrelerinin bulunmadığı daha güvenli bir kontrol odası anlamına gelir.

Kontrol odaları ve istasyon çevresindeki kablo destek sistemleri, fiber optik kabloların montaj gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmalıdır. Kontrol odalarında, elektrik tesislerine veya endüstriyel sistemlere özel uyarlanmış yapılandırılmış kablolama teknikleri uygulanır. Ağ mimarisinin tasarımı, kullanılacak kablo türlerini belirler.

Şalt sahasında, ölçüm ve durum bilgilerini iletişim sinyallerine (Sampled Value ve GOOSE) dönüştüren ekipmanlar, Bağımsız Birleştirme Üniteleri (Stand-Alone Merging Units - SAMU) veya düşük güçlü enstrüman transformatörleri (LPIT) olarak kullanılabilir. LPIT'ler, geleneksel transformatörlerin doygunluk problemlerinden etkilenmez ve aynı anda ölçüm ve koruma amaçlı kullanılabilir.

Ayrıca, devre kesiciler ve ayırıcılar gibi anahtarlama cihazları, durum bilgilerini yayınlayıp komut alabilen elektronik cihazlarla donatılacaktır. Motorların çalıştırılması veya enerji depolama sistemlerinin yeniden yüklenmesi gibi işlemler için elektrik devreleri kullanılmaya devam edilecektir.

Güç transformatörleri ve reaktörler gibi cihazlara elektronik bileşenlerin entegre edilmesi, çalışma koşullarının raporlanmasını ve bakım faaliyetlerinin optimize edilmesini kolaylaştırır. Bu elektronik bileşenler, sert çevresel koşullara dayanıklı ve yüksek elektromanyetik etkiler altında yüksek performanslı çalışacak şekilde tasarlanmalıdır.

- Şebeke İşletmecileri Üzerindeki Etkiler

Koruma, otomasyon ve kontrol sistemlerinin teknolojik evrimi, elektromekanik çözümlerden dijital teknolojilere geçişi sağlamış ve bu süreç, tasarım, işletim, bakım, test ve yaşam döngüsü yönetimi prosedürlerini kökten değiştirmiştir. Bu değişim, profesyonel profil, organizasyon yapısı, teknolojik kaynaklar ve kullanılan araçların tüm aşamalarda yeniden şekillendirilmesine yol açmıştır.

Şebeke işletmecileri genellikle koruma, kontrol, iletişim ve telekomünikasyon uzmanlıklarını şirketin farklı birimlerine ayırarak organize olmuşlardır. Bu yapı, süreçlerin farklı seviyelere bölünmesini ve her seviyede belirli sorumlulukların tanımlanmasını sağlar. Örneğin, her uzmanlık alanına ait saha ekipleri ve destek/analiz için merkezi mühendislik ekipleri ayrı faaliyetler yürütür. Yeni projeler genellikle mühendislik ekipleri tarafından bağımsız olarak geliştirilir ve işletme aşamasında mevcut ekipmanlarla entegre edilir.

IEC61850 ile birlikte, dağıtılmış IED'ler ve Ethernet tabanlı iletişim sistemlerinin kullanımı, cihazların işlevselliğini ve ekipler arasındaki sınırları değiştirmiştir. Artık rutin görevlerin bölümlere ayrılmış bir şekilde yürütülmesi mümkün değildir. Ekipler, ağ, bilgisayarlar, iletişim protokolleri, yönlendiriciler ve zaman senkronizasyonu gibi yerel iletişim ilkelerini anlamak ve uygulamak zorundadır. Bu gereklilik, koruma, kontrol ve izleme bilgisiyle birleştirilmelidir.

Şirketler, bu zorluklarla başa çıkmak için süreçlerin uyarlanması, ekiplerin entegrasyonu ve farklı seviyelerde bilgi ve faaliyetlerin tanımlanması stratejilerini benimsemektedir. Belgelerin yönetimi, yazılım ve veri tabanı uygulamaları gibi araçların modernleştirilmesi, ayrıca izleme sistemlerinin uygulanması da kritik bir ihtiyaçtır. Bunun yanı sıra, uzmanların uzaktan destek verebilmesini sağlayacak bir altyapının oluşturulması, maliyetlerin ve erişilebilirliğin optimize edilmesinde temel bir rol oynamaktadır.

Tüm bu ekipler için iki temel eylem hayati öneme sahiptir: nitelikli insan gücünün yetiştirilmesi ve uygun iş araçlarının sağlanması. Bu, IEC61850 sistemlerinin kavramsal olarak anlaşılmasını, yapılandırma ve teşhis araçlarına yönelik eğitimi içerir. Yazılım araçları, uygulanan teknolojinin seviyesine ve her ekibin uzmanlık ve sorumluluğuna uygun şekilde tanımlanmalıdır.

Bu prensipler, teknolojilerin ve özelliklerin kademeli olarak pekiştirilmesiyle uygulanmaktadır. Ekipler, artan bir iş birliği ile çalışmakta, uzmanlar birbirine destek sağlamakta ve kontrol, koruma ve izleme alanlarında temel bilgi paylaşımı yapılmaktadır.

4.3.6 SCADA Uygulamaları İçin IEC61850 (IEC61850 for SCADA Applications)

4.3.6.1 Genel Hususlar

Eski tip elektrik güç trafo merkezlerinde kontrol ve denetim, genellikle tek hat şemasının gösterildiği paneller aracılığıyla gerçekleştiriliyordu. Bu panellerde, ekipmanın durumunu belirten pozisyon ışıkları, komutların işletilmesi için kullanılan anahtarlar ve alarm durumlarını göstermek üzere duyurucular bulunmaktaydı. Koruma sistemlerinin devreye girmesi ise mekanik bayraklarla işaretlenmekteydi.

Koruma, otomasyon ve kontrol sistemlerinin dijitalleşmesiyle birlikte bu geleneksel arayüzler yerini, ekranlı gösterimler, alarmlar ve olay sıralarını içeren grafik tabanlı insan makine arayüzlerine (HMI) bırakmıştır. Bu dönüşüm, işlemlerin daha verimli ve kullanıcı dostu bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımıştır.

Denetim sistemleri olarak bilinen SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), güç sistemlerinin kontrol merkezlerinden izlenmesi ve yönetilmesi amacıyla tasarlanmıştır. SCADA, ölçüm ve ekipman durumu gibi sistem koşullarını izleyerek birincil ekipmanın kontrolünü sağlamaktadır. Ayrıca, Enerji Yönetim Sistemi (EMS) kapsamında yer alan bu yapı, güç sistemlerinin gerçek zamanlı kontrolünü destekleyen birçok işlevselliği de içermektedir.

SCADA'nın trafo merkezlerinde uygulanması, geleneksel yöntemlere kıyasla büyük bir dönüşüm yaratmıştır. Daha önce paneller, anahtarlar ve pozisyon göstergeleri ile çalışan operatörler, fare, ekranlar ve alarm listeleri gibi yeni dijital araçlara uyum sağlamak zorunda kalmıştır. Benzer şekilde, bakım ekipleri de bilgisayarlar, Ethernet ağları ve iletişim protokolleri gibi alanlarda bilgi birikimlerini geliştirmek durumunda kalmıştır.

IEC61850 standardının yaygınlaşması ve yeni teknolojik gelişmeler, denetim sistemlerinin koruma ve kontrol sistemleriyle tam entegrasyonunu mümkün

kılmıştır. Bununla birlikte, bu sistemler de birincil ekipman veya Bağımsız Birleştirme Üniteleri (Stand-Alone Merging Units) ile entegre hale gelecektir. Geleneksel kablolu bağlantılar yerini, Ethernet ağları üzerinden iletişim protokollerine bırakmaktadır.

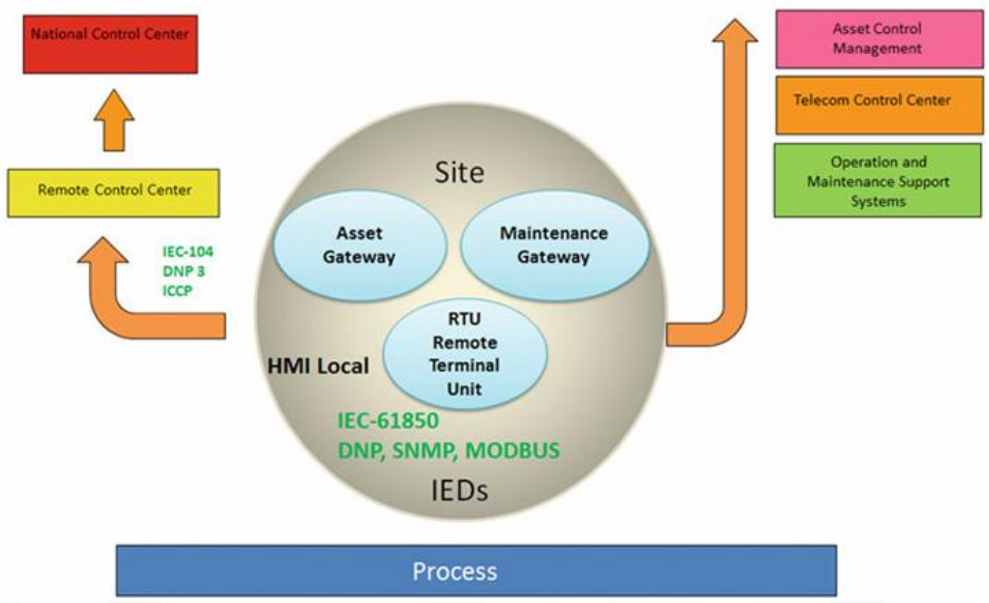
Trafo merkezlerinin dijitalleşmesi, sunulan hizmetlerin çeşitlenmesini de beraberinde getirmiştir. Bu kapsamda öne çıkan faydalar şunlardır:

- Güç sistemine ilişkin verilerin daha görünür hale gelmesi, kontrol, koruma ve denetim süreçlerini iyileştirmiştir.
- PMU (Fazör Ölçüm Ünitesi) uygulamaları, sistem fazörlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlamış ve güvenlik ile kararlılık değerlendirmelerinde önemli iyileştirmelere olanak tanımıştır.
- TWFL (Yolculuk Dalgası Arıza Yer Belirleyici) uygulamaları, arıza yerinin daha hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesine katkı sunmuştur.
- Özellikle transformatör gibi birincil ekipmanların izlenmesi, operasyonel güvenlik, bakım yönetimi ve olay değerlendirme süreçlerini optimize etmiştir.
- Koruma, otomasyon ve kontrol sistem altyapısının izlenmesi ve yönetimi, bakım yönetiminin daha etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamış ve sistemin kullanılabilirliğini artırmıştır.
- Hem birincil hem de ikincil ekipmandan elde edilen geniş veri setleri, varlık yönetimini daha etkin hale getirmiştir.
- Gerçek zamanlı analizlere olanak tanıyacak şekilde, olay kayıtları ve DFR (Dijital Arıza Kaydedici) verileri gibi bilgiler sağlanmıştır.

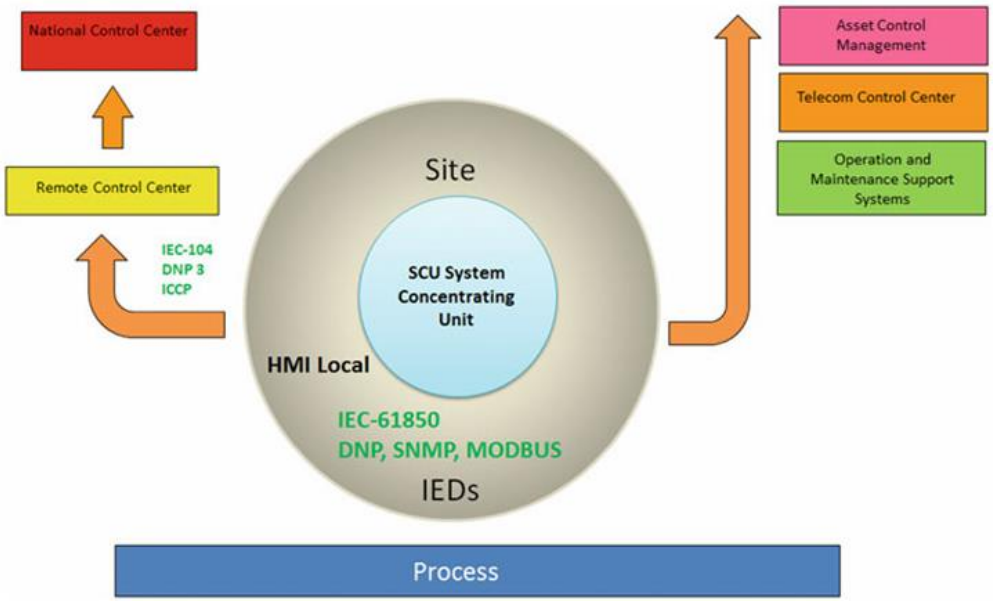
Bu sistem veri kümesinin yönetim stratejisi, her şirketin vizyonuna, altyapısına ve mevcut sistemlerine bağlı olarak değişebilir. Bu doğrultuda, her bir sistemden veri toplayan birden fazla konsantratör kullanılabileceği gibi, tüm sistemler için bilgiyi sağlayan tek bir konsantratör de tercih edilebilir.

Şekil 4.41, her bir sistem için birden fazla konsantratörün kullanıldığı tipik bir uygulamayı göstermektedir. Bu durumda, her konsantratör kendi spesifik verilerini toplar ve bu verileri uygulama sistemine iletir.

Şekil 4.42 ise tek bir konsantratör ile sağlanan bir çözümü göstermektedir.



Şekil 4.41 Her sistem için birden fazla konsantratör[55]



Şekil 4.42 Alt istasyon konsantratör ünitesi-SCU[55]

Yerel SCADA tüm verileri toplayarak Sistem Konsantrasyon Ünitesi (SCU) işlevini üstlenir, yalnızca işletim verilerini yerel HMI arayüzünde sunar ve gerekli tüm bilgileri ilgili uzmanlık alanına göre uzak sistemlere iletir.

4.3.6.2 Yerel SCADA Uygulaması

Bir trafo merkezinde, ilk adım veri toplama sürecinin nasıl gerçekleşeceğini ve bu verilerin nasıl bilgiye dönüştürüleceğini tanımlamaktır. Dijital bir çözümde, trafo merkezleri bir dizi IED (koruma röleleri, veri toplama ve kontrol ünitesi, çoklu

ölçüm cihazları, ekipman izleme üniteleri, uzak terminal üniteleri) ile donatılmıştır. Bu cihazlar, yerel iletişim için Ethernet altyapısı (anahtarlar, dönüştürücüler, terminal sunucuları, yönlendiriciler) ve bir hesaplama altyapısı (Trafo Merkezi Konsantrasyon Ünitesi, HMI, izleme ve mühendislik bilgisayarları) kullanır.

Denetim sisteminin planlanması, bir veri yapısı (Veri ve Bilgi Yapısı—DIS(Data and Information Structure)) kullanılmasını gerektirir. DIS, koruma ve otomasyon, izleme, teşhis ve destek işlevlerini karşılamalıdır. IEC61850 standardı ve CIM(Common Information Model) (Ortak Bilgi Modeli) göz önünde bulundurularak, DIS, uygulamaların etkileşim kurmasına olanak sağlayan sistematik bir yaklaşımı güçlendirmeli ve operasyonel hiyerarşinin tüm seviyelerinde işlevsel uygulamayı kolaylaştırmalıdır.

DIS şu gereksinimleri karşılamalıdır:

- En iyi maliyet-fayda oranı: Veriyi bilgiye yalnızca bir kez, en düşük hiyerarşik seviyede ve minimum maliyetle dönüştürmek,
- Tutarlılık: Veriyi veya bilgiyi yalnızca doğrulama sonrasında ve belirli bir uygulama için gereken kalite seviyesine ulaştığında kullanmak,
- Evrensellik: Aynı veri veya bilgiyi tüm işlevler, operatöre gösterim ve kurumsal yayılım için kullanmak,
- Yedeklilik: Belirli bir kalite seviyesi sıralamasına göre doğrulama için bol miktarda veri kullanmak,
- Güvenilirlik: Koruma güvenilirliği ve güvenlik kavramlarını tüm işlevlere genişletmek,
- Siber güvenlik: Bölgesel ve ulusal kontrol merkezlerinin Küresel Enerji Yönetim Sistemi için belirtilen temel gereklilikleri karşılamak,
- Paylaşım: Tek bir işlevin (örneğin, bileşen koruma) sahibi ile çoklu işlevlerin (örneğin, sistem bütünlüğü koruma düzenekleri - SIPS(system integrity protection schemes)) sahibi arasında aynı veri veya bilgiyi kullanmak,
- Ölçeklenebilirlik: Her işlev ve hiyerarşik seviyede yalnızca o seviyedeki sistem görevleri için gerekli veriyi kullanmak.

Trafo merkezi ortamında çeşitli iletişim protokollerinin bir arada bulunması kaçınılmazdır. Trafo Merkezi Konsantrasyon Ünitesi (SCU(Substation Concentrating Unit)), birçok protokolle birlikte çalışabilirlik yeteneğine sahip

olmalıdır. Ayrıca, toplanan veriyi bilgiye dönüştürmek için gerekli işlem ve zeka kapasitesine sahip olmalıdır. Bu alanda yapılan yatırımlar, veri trafiğini optimize etmek ve bilgi kalitesini artırmak açısından kritik önem taşır. Ayrıca, bozulma dosyaları ve günlük dosyalarının DER ve rölelerde yakalanması gibi bazı ek işlevler de mümkündür. SCU, aynı zamanda kurumsal bir standartta bir veritabanını yaygınlaştırarak operasyon, bakım ve izleme sistemleri için bilgi sağlayabilir.

SCADA'nın yapılandırılması, belirli bir yazılım temelinde gerçekleştirilir. Bu süreçte izlenecek adımlar şunlardır:

- İletişim mimarisinin tanımlanması,
- Yedeklilik gereksinimlerinin tanımlanması,
- İletişim bağlantılarının (Akıllı Elektronik Cihazlar (IEDs)) ve protokollerin tanımlanması,
- Toplanacak işaretlerin listesinin oluşturulması,
- SCADA içinde sinyallerin işlenmesi,
- Tek hatlı ekranların hazırlanması,
- Tamamlayıcı ekranların oluşturulması,
- Veri geçmişinin tanımlanması,
- Veritabanı yapılandırmasının belirlenmesi,
- Kullanıcıların ve profillerin tanımlanması,
- Diğer seviyelere iletilecek bilgilerin tanımlanması.

Bu faaliyetleri gerçekleştirmek için gereken kaynaklar, kullanılan ürünlere, şirketin standartlarına ve yardımcı araçlara bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

4.3.6.3 SCADA ve IEC61850 Standardı

Denetleme sisteminin uygulanmasında amaç, verilerin gerçek bilgilere dönüştürülmesini ve tasarlayıcıların yorumuna açık olan manuel ayarlardan kaçınılarak sürecin optimize edilmesidir.

Bunu gerçekleştirmenin en iyi yolu, yapılandırılmış bilgi sağlamak amacıyla bir veri modelinin uygulanmasıdır. IEC61850 standardı bu ihtiyacı karşılayan, model tabanlı tanımlayıcı bir yapılandırma sunmaktadır. Bu yapılandırma, mantıksal düğümler, özniteliklerin tanımı ve iletişim altyapısının tanımını içerir.

IEC61850 standardına uygun olarak, enerji tesislerinde kullanılan Trafo Merkezi Yapılandırma Açıtanımlayıcı yapılandırma dosyası, SCADA sistemlerinin temel yapı taşı olarak kullanılabilir. Bu dosya, akıllı elektronik cihazlardan (IEDs) gelen tüm gerekli bilgileri içermekle birlikte, cihazların durumlarını, ölçümlerini ve fonksiyonel sağlıklarını izlemeye olanak sağlar. Ancak bu yapılandırma dosyasının uygulanmasında bazı hususlara dikkat edilmelidir:

- Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyası, gözetim sistemi için gerekenden çok daha fazla bilgi içermektedir.
- Standartta tanımlanmamış veya özelleştirilmiş işlevler için kullanılan genel GGIO(Generic Process I/O) ve GAPC(Generic Automatic Process Control) nesneleri bulunmaktadır.
- Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyasında kullanılan terminoloji ve açıklamalar, SCADA kullanıcılarının ihtiyaçlarını tam olarak karşılamamaktadır.
- Dosya, alarm listelerinde hangi renklerin ve ses seviyelerinin kullanılacağını tanımlamamaktadır.
- Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyasında hangi bilgilerin ekranlarda nasıl gösterileceği veya hangi koşullarda kalıcı ya da isteğe bağlı olarak sunulacağı tanımlanmamıştır.
- Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyasında proje açıklamalarına dayanan terminoloji, operasyonel açıklamalarla uyumlu olmayabilir ve zaman içinde değişiklik gösterebilir.
- Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyası, SCADA'dan eski sistemlerle, IEC61850 standardına uygun olmayan cihazlarla ya da yerel ve diğer protokollerle veri alışverişine ilişkin bilgileri içermeyebilir.

Bu nedenle, SCADA sistemlerinin tam anlamıyla yapılandırılması ve tanımlanması için Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyasına ek olarak başka bilgi kaynaklarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle iki ana bilgi kaynağı dikkate alınmalıdır:

Sinyal Listesi: Bu liste, tüm sinyallerin, ölçümlerin ve komutların işlenmesi ve adlandırılması için bir sözlük kullanır ve SCADA veritabanını tanımlar. Genellikle şu bilgileri içerir:

- Sinyallerin fiziksel ve mantıksal kaynak bilgileri,
- Her sinyalin protokol ve adres bilgileri,
- Operasyonel terminoloji,
- Şirket standartlarına uygun tanımlayıcılar ve açıklamalar,
- Alarm seviyesi ve bilgilerin hangi ekranlarda görüntüleneceği gibi işleme tanımları.

Şablon: SCADA ekranlarının otomatik olarak oluşturulabilmesi için renk tanımları, yazı tipleri, hat düzenleri ve koruma bayrakları gibi ayrıntılı bilgileri içerir. Şablonlar, genellikle şu bilgileri içerir:

- İşlev: İletim hattı, transformatör, yardımcı hizmet, bara gibi detaylar,
- Gerilim seviyesi,
- Tesis düzeni,
- Ekran detay kutularına ilişkin ek bilgiler.

Modern SCADA sistemleri, bu tanımlamaları entegre edebilir ve veritabanı ile tek hat diyagramlarını otomatik olarak oluşturabilir.

Günümüzde, bu süreçte en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, Excel tablosunda programlama yapmayı sağlayan uygulama arayüzleri gibi araçlardır. Bu araçlar, özellikle Trafo Merkezi Yapılandırma Açıklaması(SCD) dosyasını içeri aktarma, bir sözlük tanımı oluşturma ve proje bilgilerini operasyonel ve işlem açıklamalarına dönüştürme imkanı sunmaktadır. Kullanılan gözetim ve veri yönetim sistemine bağlı olarak, şirketin uygulama standartlarına uygun şablonlar aracılığıyla ekranların doğrudan dışa aktarılması dahi mümkün olmaktadır.

Bu otomasyon sürecinin avantajları şunlardır:

- SCADA sisteminin tamamını yapılandırmak için daha az zaman harcanması,
- Tanımlı standartlara daha fazla uyum ve kalite güvencesi,
- Sistemde güvenli değişiklikler yapma kolaylığı,
- Uygulanan tüm bilgilerin dokümante edilmesi,
- Sistemler çalışmaya devam ederken büyük ölçekte güvenilir değişiklikler yapabilme imkanı.

Bu süreçler, IEC61850 standardının sağladığı veri modeliyle desteklenerek, enerji tesislerinde operasyonel verimliliği ve güvenliği artırmak için önemli bir zemin oluşturur.

4.3.6.4 SCADA İletişimi

Yerel SCADA iletişimi, Üretim Mesajı Spesifikasyonu (MMS) temel alınarak gerçekleştirilir ve proje SCD'si, iletişim bağlantılarının yapılandırılması ve uygulanması için kullanılır. Ancak mevcut kurulumlar göz önüne alındığında, yerel SCADA'nın bazen eski iletişim sistemleriyle çalışacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, SCADA'nın hem IEC61850 çözümleriyle hem de eski sistemlerle uyum sağlayacak şekilde hazırlanması gerekmektedir.

İletişim protokolleri zamanla evrim geçirmiştir. Başlangıçta bellek alanı taramaları kullanan Modbus gibi protokollerden, seri iletişimde kullanılan DNP 3.0 veya IEC 101 gibi master-slave protokollerine geçiş yapılmıştır. Daha sonra, Ethernet ağında TCP/IP üzerinden çalışan IEC 104 ve DNP 3.0 gibi protokollere yönelme gerçekleşmiştir. Ancak en önemli değişim, istemci-sunucu tabanlı bir protokol olan MMS'nin uygulanmasıyla yaşanmıştır. MMS, isteğe dayalı komutlarla çalışan modern bir protokol olarak öne çıkmaktadır.

MMS'nin avantajı, IED'nin (Akıllı Elektronik Cihaz) bilgiyi erişilebilir hale getirmesi ve istemcinin (bu durumda SCADA), hangi bilginin kendisi için önemli olduğuna karar vermesidir. Daha sonra, bu bilgi değiştiğinde yalnızca istemci yapılandırmasının değiştirilmesi yeterlidir.

Bunun yanı sıra MMS, COMTRADE dosyalarının elde edilmesini de mümkün kılar. Bu, koruma performans kayıtlarının gerçek zamanlı olarak kullanılabilir hale gelmesi anlamına gelir. Bu kayıtların koruma ekipleriyle paylaşılması, olayların analiz edilmesi ve tarihsel bir veri tabanının oluşturulması için stratejiler uygulanabilir.

SCADA, aynı zamanda mantıksal düğümdeki sağlık parametrelerini okuyabilir. Bu, koruma, kontrol veya ölçüm işlevlerinin koşullarını ve sınırlamalarını gerçek zamanlı olarak bilmek açısından oldukça önemlidir.

4.3.6.5 SCADA Sisteminin Yönetimi

Dijital bir trafo merkezinde kontrol seçenekleri giderek yerel SCADA sistemine daha bağımlı hale gelmektedir. SCADA'nın devre dışı kaldığı durumlarda, kontrol seçenekleri genellikle çok kısıtlıdır ve mümkün olduğunca kaçınılması gereken durumlardır. Bu durumlarda yerel kontrol gerekebilir, ancak bu, çoğu kurulumun uzaktan kontrol edildiği günümüz uygulamalarında operasyonu oldukça zorlaştırır.

MMS tabanlı IEC61850 çözümü uygulandığında, kullanılabilirlik olasılığı büyük ölçüde artar. Bunun nedeni, cihazların birden fazla istemci bağlantısını desteklemesidir. Bu da bakım müdahalesi gerektiğinde, aktif hizmetin sürdürülmesine, SCADA'nın yedeklerinden birinin güncellenmesine, tutarlılığının kontrol edilmesine ve minimum kesintiyle veya hizmeti durdurmadan paralel olarak geri dönüş yapılmasına olanak tanır.

SCADA, doğal olarak sık güncellenen bir sistemdir. Bu güncellemeler; durumların veya ölçümlerin izlenmesindeki düzeltmeler, yeni bara sistemlerinin eklenmesi ya da yeni işlevlerin uygulanması gibi değişiklikler içerebilir. Ayrıca, sistemin çalıştığı bilişim altyapısı da yaşam döngüsü boyunca değişiklikler, düzeltmeler ve yenilemeler gerektirir.

Bu sürekli güncelleme özelliği nedeniyle, veritabanının etkin bir şekilde yedeklenmesi önemlidir. Yedekleme, sistemin çalışmasını etkileyen tüm dosyaları kapsamalıdır.

Bir diğer önemli husus, yalnızca güç sistemi sinyallerinin değil, aynı zamanda tüm işlevlerin, hizmetlerin ve cihazların sağlık durumuna ilişkin geniş bir kayıt hacminin tutulabilmesidir. Bu verilerin her ekip için doğru zamanda erişilebilir olması büyük önem taşır. Veriler, sistem performansını analiz etmek ve önleyici bakım eylemlerini planlamak için işlenmelidir. Koruma, otomasyon ve kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı izlenebilmesi, güç sisteminin güvenilirliğini garanti altına almak için temel bir faktördür

4.3.6.6 Uzaktan Sistemler

Uzaktan sistemler üç ana yönde ele alınabilir: operasyon merkezleri, varlık yönetim merkezleri ve destek merkezleri.

Tesislerin dijitalleşme süreci, cihazların mikroişlemci teknolojisini benimsemesi ve Geniş Alan Ağı (WAN) sayesinde artırılmış bant genişliği ve daha güvenli alternatif rotalarla uzaktan kontrolün güvenli bir şekilde yapılmasına olanak tanımıştır.

Operasyon merkezleri, bir şirketin işletim stratejilerine bağlı olarak çeşitli görevleri yerine getirebilir. Bunlar, bir uzaktan kumanda istasyonunun veya enerji santralinin tam kontrolünü, kısmi kontrolünü veya yalnızca operasyon koordinasyonunu içerebilir. Buradaki önemli nokta, operasyonun nasıl gerçekleştirileceğine dair kararların teknoloji ile sınırlı olmaması, sadece işletim süreçlerinin verimliliğine yönelik kararlara bağlı olmasıdır.

Yerel SCADA'nın operasyon merkezleriyle iletişim kurma şekli, her şirketin uygulamalarına göre değişir.

DNP3 ve IEC 60870-5-104 protokolü kullanılarak iletişim kurulması hâlâ oldukça yaygındır ve yerleşik bir uygulamadır. Ancak, bu protokoller veriyi işlevsel anlamı olmayan bir adresle tanımlanan bilgiye dönüştürmeyi gerektirir. Bu nedenle, bir veri modeli iletişimi uygulamak için IEC 61850 çözümüne daha uygun olduğu görülmektedir.

Bu odağa sahip iletişim protokolü, IEC 60870-6/TASE.2 (Telekontrol Uygulama Hizmeti Elemanı 2) standardı olan Inter-Control Centre Communications Protocol—ICCP'dir. IEC 61850 ile aynı şekilde MMS kullanır.

Bu doğrultuda, bir veri modeli protokolü istemci sunucusundan faydalanarak yalnızca veri değil, bilgi de üst seviyelere gönderilir.

Bazı SCADA sistemleri, ICCP(Inter-Control Centre Communications Protocol) sunucusunu genel bir sunucu olarak yapılandırmaya olanak tanır. Bu, tüm veritabanını kendisine bağlanan istemciye sunması anlamına gelir. Bu yaklaşımın avantajı, belirli bir istemci sistemi için hangi noktaların sunulacağını yapılandırmaya gerek kalmamasıdır; bunun yerine istemci, hangi noktaların ilgisini çektiğini kendisi belirler. Bu, dağıtım yapılandırmasındaki hataların olasılığını azaltır ve operasyon merkezi tarafından istenen bilgilerin değiştirilmesini ve yeni bağlantıların eklenmesini kolaylaştırır.

Daha önce belirtildiği gibi, tesislerde cihazlardan, hizmetlerden ve Ethernet ağından gelen yüksek hacimde durum verisi bulunmaktadır. Bu veriler, yerel SCADA ile veya hatta uzaktaki operasyon merkezi ile entegre olabilen veya olmayabilen varlık

yönetim merkezlerine iletilir. Bu merkezler ise verileri operasyon ve bakım ekiplerine ileterek, gerekli ekibe uygun zamanda spesifik bilgileri sağlar. Bu bilgiler, operasyon, bakım ve sistemlerin yaşam döngüsü analizi ve karar verme süreçleri için kullanılabilir. Nihai yönetim sistemleri genellikle şirketlerin kurumsal ortamında yer alır, böylece bilgiye erişim kolaylaşır ve daha güvenli hale gelir. Aynı zamanda gerçek zamanlı verilere erişim olmadan performans ve siber güvenlik unsurları korunur. "IEC61850 Sistemleri için Bakım ve Varlık Yönetimi" başlıklı bölüm, bu sistemler için bakım ve varlık yönetimi konusunu ele alarak konunun diğer yönlerini ortaya koymaktadır.

Tüm teknolojik ilerlemelerle birlikte ortaya çıkan çok önemli bir değişiklik, gerçek zamanlı desteğin sağlanmasıdır. Elektrik enerjisi şirketleri, bu erişimler için özel WAN ağları inşa etmişlerdir. Bu, bir koruma, otomasyon, kontrol ve telekomünikasyon uzmanının herhangi bir sistem ve cihaza erişerek özellikle sistemin kullanılabilir olmadığı karmaşık durumlarda gerçek zamanlı olarak kontroller ve düzeltmeler yapmasını sağlamaktadır.

Kurulum çözümü olarak IEC61850 kullanıldığında, bu müdahale özel bir verimlilik kazanmaktadır, çünkü kullanılan hizmetleri devre dışı bırakmadan uzaktan erişim ve testlere olanak tanımaktadır. Böylece tespitler çok daha verimli hale gelmekte ve değişiklikler için yapılan müdahale çok daha güvenli olmaktadır.

4.3.6.7 Siber Güvenlik Unsurları

"IEC61850 Sistemleri ile Siber Güvenlik Entegrasyonu" başlıklı bölümde, bir IEC61850 çözümünde siber güvenlik unsurları ele alınmıştır. Bu bölümde öne çıkan nokta, gözetim sisteminin farklı yerel, uzak ve kurumsal sistemleri entegre ettiğini göz önünde bulundurarak, siber güvenliğe dair kapsamlı bir bakış açısının önemidir.

Tehditler, iki kaynağa göre değerlendirilebilir: iç riskler ve dış riskler. İç tehditler, çok endişe vericidir; çünkü bu durum, yalnızca koruma ve otomasyon sisteminin nasıl çalıştığını değil, aynı zamanda saldırı vektörlerini mümkün kılan en savunmasız erişim noktalarını bilen birinin varlığını ifade eder. Bu nedenle, siber güvenlik öncelikle dahili olarak başlamalıdır. Örneğin, şirket ağına erişimi olan memnuniyetsiz çalışanlar (veya eski çalışanlar) gibi içeriden gelen tehditlerin, aşırı yetkiler ve/veya yetersiz erişim gibi insan hataları ve yapılandırma ile operasyon

hatalarının neden olabileceği olayları önlemek için iyi uygulamalar, uygun güvenlik politikaları ve teknik önlemler uygulanmalıdır. Siber olaylar her zaman hedeflenmiş saldırılarla gerçekleşmez ve dahili olaylar, bu tür önlemlerle önlenebilir.

Sadece kurum çalışanlarını değil, aynı zamanda IEC61850 cihazlarını ve sistemlerini sağlayan şirketleri, sistem entegratörlerini ve genellikle sistemin herhangi bir yerinden erişim gerektiren koruma ve otomasyon tasarım, test ve devreye alma süreçlerini destekleyen danışmanları da dikkate almak gerekir.

Dış riskler, yakın tehditler ve hedeflenmiş saldırılara karşı korunmayı içerir ve daha katı koruma önlemleri, uygun ekipman ve teknolojilerin kullanımı ile kısıtlı erişim kontrollerinin uygulanmasını gerektirir. Ayrıca, sistemi işletip bakımını yapan teknik personelin eğitimi son derece önemlidir. Çoğu durumda, insanlar güvenlik zincirinin en zayıf halkasıdır ve sosyal mühendislik adı verilen bir mekanizma yoluyla şirketlere sızma ve manipülasyon için ilk saldırı vektörü olarak kullanılabilirler.

Bu stratejilerden birinde ve IEC62443 standardında sunulan önemli bir kavram, Derinlemesine Savunma (Defence-in-Depth, DiD) kavramıdır. Temel prensip, yalnızca tek bir güvenlik önlemine güvenmemektir. Bu şekilde, her biri diğer katmanları destekleyen birden fazla koruma katmanı inşa edilmelidir. Bu, sistemin güvenliğini artırır ve bir katmanda ihlal gerçekleşse bile ilerlemeyi zorlaştırır, tehdidi tespit etmek ve zamanında koruyucu önlemler almak için süre kazandırır.

Koruma, otomasyon ve kontrol sistemleri (PACS) ile doğrudan ilgilenmenin yanı sıra, spesifik ürünlerin ve siber güvenlik sistemlerinin uygulanması gereklidir. Başlıca unsurlar şunlardır:

Uzak Erişim (VPN): Dijital bir trafo merkezinin sistemlerini yönetmek için uzak erişim temel bir kaynaktır. Ancak, özellikle erişim kamu ağ altyapısından geliyorsa, güvenli ve şifreli erişim sağlayan bir sanal özel ağ (VPN) uygulanması önemlidir. Harici uzak erişimlerde, çok faktörlü kimlik doğrulama (örneğin, iki faktörlü kimlik doğrulama) mekanizmaları düşünülmelidir.

Güvenlik Duvarları (Firewalls): Ağ trafiğini analiz ederek, hangi veri iletimi veya alımı işlemlerinin yapılabileceğini belirleyen ve yetkisiz olanları engelleyen,

kurallar ve talimatlara dayalı bir donanım veya yazılım tabanlı güvenlik çözümüdür.

Erişim Kontrolü ve Hesap Yönetimi: Kullanıcı hesaplarını kimlik doğrulamak, kullanıcı rollerini haritalamak ve uygulama sırasında yönetim ve kurallar sağlamak için merkezi bir yönetim sistemi anlamına gelir.

Kayıt ve İzleme: Ekipman günlüklerinin toplanması ve bilgi izlemenin gerçekleştirilmesi. Bu, bir SysLog Sunucusu, bir SysLog Aracısı ve genellikle SOC'de (Güvenlik Operasyon Merkezi) bulunan bir SIEM (Güvenlik Bilgi ve Olay Yönetimi) ile güvenlik olaylarının merkezi yönetimi anlamına gelir.

Kötü Amaçlı Yazılımlara Karşı Koruma: Kötü amaçlı yazılımlara karşı koruma, iki stratejiyle hareket eden yazılım gerektirir:

Kara listeleme (klasik antivirüs),

Beyaz listeleme (uygulama beyaz listesi).

Güçlendirme (Hardening): Güvenli yapılandırma yoluyla ürünlerin ve çözümlerin güvenliğini artırmayı ifade eder. Örneğin, gereksiz yazılımları, kullanıcı adlarını veya girişleri kaldırarak, kullanılmayan portları ve protokolleri devre dışı bırakarak veya donanım/işletim sistemini güçlendirerek saldırı yüzeyini azaltır.

Yedekleme ve Geri Yükleme: Yedekleme ve geri yükleme işlemi, veri kaybı, donanım arızaları veya doğal afetler, yangın veya sel gibi tesislere zarar verilmesi durumunda sistemin tamamının geri yüklenmesini sağlar. Bu süreç, güvenlik olaylarından kurtulma ve hizmet reddi ile kötü amaçlı yazılımlar gibi durumları içerir. Yedekleme ve geri yükleme, aşağıdakileri içeren bir Felaket Kurtarma Planı'nın (DRP) temelini oluşturur:

Uygulama: Örneğin, donanım yazılımı ve işletim sistemi,

Yapılandırma: HMI ekranları, mantık ve kontrol ile koruma ayarları ve anahtar/yönlendirici ayarları,

Gerçek zamanlı: Örneğin, olay listesi, ölçüm ve hata günlükleri.

Tespit Sistemleri: Ethernet ağı üzerindeki tüm trafiği gerçek zamanlı olarak izleyen, saldırıları tespit etmek için kullanılan iki temel sistem vardır:

Saldırı Tespit Sistemi (Intrusion Detection System (IDS)),

Saldırı Önleme Sistemi (Intrusion Prevention Systems (IPS)).

Trafo merkezi otomasyon sistemleri için, trafo merkezi otomasyon bölgesine ek koruma sağlamak amacıyla ağ tabanlı bir IDS önerilir. Çünkü "yanlış pozitif" durumunda, hizmetlerin kesintiye uğraması riski bulunmamaktadır.

5
RAYLI SİSTEMLERDE AŞIRI AKIM RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU, SEÇİCİLİK VE GÜVENLİK

5.1 Koordinasyonun tanımı ve önemi

Raylı sistemlerin elektrik tesislerinde kullanılan koruma sistemleri, sistemin güvenilirliği, sürekliliği ve performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Koordinasyon, bir arıza meydana geldiğinde koruma cihazlarının birbirleriyle uyum içinde çalışmasını ifade eder. Bu uyum, koruma cihazlarının doğru zamanlamalarla ve öncelik sırasına göre müdahalede bulunmasını sağlar. Örneğin, raylı sistemlerde kullanılan bir orta gerilim besleme sisteminde, primer ve sekonder koruma cihazlarının birbirlerini destekleyecek şekilde ayarlanması, koordinasyonun temelini oluşturur.

Bu bağlamda koordinasyonun amacı, bir arızanın sistemin geneline yayılmasını engellemek ve yalnızca arızanın meydana geldiği bölgeyi izole etmektir. Bu sayede, sistemin geri kalan kısmı normal çalışmasını sürdürebilir. Özellikle raylı sistemlerde, enerji sürekliliği yolcu taşımacılığı açısından hayati önem taşıdığından, koordinasyonun sağlanamaması büyük aksamalara ve ekonomik kayıplara neden olabilir.

Raylı sistemlerde koordinasyonun önemi, hem sistem güvenilirliği hem de enerji sürekliliği perspektifinden değerlendirilebilir. Koordinasyon, şu nedenlerle kritik bir rol oynar:

Arızaların Sınırlandırılması: Koordinasyon, bir arızanın yalnızca meydana geldiği bölgeyle sınırlı kalmasını sağlar. Bu durum, sistemin geri kalanının etkilenmeden çalışmaya devam etmesini mümkün kılar.

Enerji Sürekliliği: Raylı sistemlerde enerji kesintileri, hem yolcu memnuniyetini hem de işletme sürekliliğini olumsuz etkiler. Koordinasyon sayesinde, enerji sürekliliği korunarak hizmet aksamaları en aza indirgenir.

Ekonomik Verimlilik: Gereksiz açmaların önlenmesi, ekipmanların ömrünün uzatılmasına ve bakım maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlar. Bu durum, özellikle büyük ölçekli raylı sistemlerde önemli bir maliyet avantajı sunar.

Yedek Koruma Desteği: Koordinasyon, bir koruma cihazının çalışmaması durumunda yedek koruma cihazlarının devreye girmesini sağlar. Bu, sistem güvenilirliğini artıran önemli bir faktördür.

Raylı sistemlerin enerji altyapısı genellikle oldukça karmaşık olduğundan, koordinasyon stratejilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşır. Aşırı akım röleleri, diferansiyel röleler ve yönlü röleler gibi farklı koruma cihazlarının zamanlama ayarları ve çalışma sıralarının uyumlu bir şekilde düzenlenmesi, koordinasyonun başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlar.

Sonuç olarak, koordinasyon, raylı sistemlerde güvenilir bir enerji altyapısının temeli olup, hem güvenlik hem de verimlilik açısından vazgeçilmezdir. Bu nedenle, koordinasyon stratejileri sistem tasarımından itibaren dikkatle ele alınmalıdır.

5.1.1 Aşırı akım rölelerinde koordinasyonun teknik gereksinimleri

Aşırı akım rölelerinde koordinasyon, arıza durumunda sistemin doğru bölgesine müdahale edilmesini sağlamak için koruma cihazlarının çalışma sırasının ve zamanlamasının titizlikle ayarlanmasını gerektirir. Teknik gereksinimler, koruma cihazlarının güvenilirlik, hız ve seçicilik özelliklerine dayanır ve bu gereksinimlerin karşılanması, sistem güvenliğini ve sürekliliğini doğrudan etkiler.

Aşırı akım rölelerinde etkili bir koordinasyon sağlanabilmesi için şu teknik gereksinimler karşılanmalıdır:

- Zaman Koordinasyonu (Time Grading): Koruma rölelerinin çalışma sürelerinin arıza akımına olan uzaklıklarına göre sıralanmasıdır. Bir rölenin çalışma süresi, bir önceki rölenin arızayı temizlemesine olanak tanıyacak şekilde gecikmeli olmalıdır. Genellikle bu gecikme süreleri, rölelerin çalışma karakteristiklerine bağlı olarak 0,2 ile 0,5 saniye arasında belirlenir.

Örneğin: Bir raylı sistem OG ring hattında primer koruma rölesi hızlı bir şekilde devreye girerken, sekonder koruma rölesi gecikmeli olarak çalışır ve böylece yalnızca ilgili bölgenin etkilenmesi sağlanır.

- Akım Koordinasyonu (Current Grading): Aşırı akım rölelerinin çalışma akımlarının, sistemdeki normal işletme koşullarını ve arıza durumlarını dikkate alarak ayarlanması gerekir. Bir rölenin çalışma akımı, bağlı olduğu koruma bölgesinin sınırları içinde olmalıdır. Bunun için, rölenin çalışma akımı, maksimum yük akımının üzerinde, arıza akımının ise altında seçilmelidir. Böylece, röle gereksiz yere çalışmaz ve arıza durumunda hızlı bir şekilde devreye girer.

- Ters Zaman (Invers Zaman) Karakteristiklerinin Kullanımı: Ters zaman karakteristikli röleler, arıza akımının büyüklüğüne bağlı olarak çalışma süresini ayarlar. Arıza akımı ne kadar büyükse rölenin çalışma süresi o kadar kısa olur. Bu özellik, koordinasyon stratejilerinde önemli bir avantaj sağlar, çünkü rölelerin doğru sırayla ve hızlı bir şekilde devreye girmesine olanak tanır.
- Yedek Koruma (Backup Protection): Bir rölenin çalışmaması durumunda, arızayı temizlemek için yedek bir rölenin devreye girmesi gerekir. Bu, röleler arasındaki koordinasyonun bir parçası olarak dikkatle planlanmalıdır. Yedek koruma, özellikle raylı sistemlerde enerji sürekliliği açısından büyük öneme sahiptir.

- Arıza Akımı Seviyeleri ve Koordinasyon: Sistem tasarımında, kısa devre akımlarının büyüklüğü ve dağılımı dikkate alınarak rölelerin koordinasyonu yapılmalıdır. OG sistemlerinde, özellikle transformatör, katener hattı ve enerji dağıtım hatlarında meydana gelebilecek arıza akımları doğru bir şekilde hesaplanmalı ve röle ayarlarına yansıtılmalıdır.

Aşırı akım rölelerindeki koordinasyonun etkinliği, teorik hesaplamaların yanı sıra simülasyonlar ve saha testleri ile doğrulanmalıdır. Simülasyon yazılımları (örneğin ETAP) sayesinde, farklı arıza senaryoları analiz edilerek koordinasyon stratejilerinin etkinliği test edilebilir. Ayrıca, sahada yapılan testlerle rölelerin çalışma sırası ve zamanlamaları kontrol edilerek sistemin güvenilirliği artırılır.

Sonuç olarak aşırı akım rölelerinde koordinasyonun teknik gereksinimleri, hem arızaların hızlı bir şekilde giderilmesi hem de sistemin kesintisiz işletilmesi için hayati bir öneme sahiptir. Bu gereksinimlerin doğru bir şekilde uygulanması, raylı sistemlerin güvenilirliği ve verimliliği üzerinde doğrudan bir etki yaratır.

5.1.2 ETAP programı gibi simülasyon araçlarıyla koordinasyon analizi

Raylı sistemlerin enerji altyapısında koruma rölelerinin etkin bir şekilde koordinasyonunu sağlamak, sahada gerçekleştirilecek testler kadar simülasyon analizleri ile de mümkündür. ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) gibi simülasyon araçları, karmaşık enerji sistemlerinde koordinasyon stratejilerinin doğruluğunu değerlendirmek ve optimize etmek için güçlü bir araç sağlar. Bu tür yazılımlar, hem teorik hem de pratik açıdan sistem tasarımı ve analizi için geniş kapsamlı olanaklar sunar.

ETAP, enerji sistemlerinin modellemesi ve analizi için kullanılan bir simülasyon platformudur. Özellikle raylı sistemlerde aşırı akım rölelerinin ve diğer koruma cihazlarının koordinasyonunu değerlendirmek için sıklıkla tercih edilmektedir. Programın sunduğu başlıca özellikler şunlardır:

- Koruma Koordinasyon Analizi: ETAP, rölelerin çalışma süreleri, akım değerleri ve diğer ayar parametrelerini görsel bir arayüz üzerinden simüle ederek koruma koordinasyonunun doğruluğunu analiz eder. Rölelerin koordinasyon eğrileri, farklı arıza senaryolarına göre optimize edilebilir ve herhangi bir çakışma veya uyumsuzluk durumunda düzeltmeler yapılabilir.
- Arıza Akımı Hesaplamaları: Kısa devre analiz modülü sayesinde sistemdeki arıza akımları ve bu akımların dağılımları doğru bir şekilde hesaplanabilir. Bu hesaplamalar, röle ayarlarının yapılmasında temel bir rol oynar.
- Zaman ve Akım Karakteristiklerinin Optimizasyonu: ETAP, rölelerin zaman-ters karakteristiklerini (inverse-time characteristics) ve sabit zaman gecikmelerini (definite-time delays) kolaylıkla ayarlama olanağı sunar. Böylece rölelerin koordinasyon stratejilerine uygun şekilde çalışması sağlanır.
- Dinamik Simülasyon ve Senaryo Analizi: ETAP, dinamik sistem davranışlarını ve farklı arıza senaryolarını analiz ederek, rölelerin çeşitli koşullarda nasıl tepki vereceğini değerlendirme imkânı sağlar. Örneğin, OG ring hattında meydana

gelebilecek bir kısa devre arızasında, ilgili rölenin doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığı gözlemlenebilir.

- Otomatik Koordinasyon Raporları: Simülasyon sonrası ETAP, koordinasyon raporlarını otomatik olarak oluşturur. Bu raporlar, rölelerin çalışma sırasını, zamanlamalarını ve akım eşiklerini detaylı bir şekilde analiz ederek sahada uygulanabilir sonuçlar sunar.

Raylı sistemlerin enerji altyapısı genellikle yüksek karmaşıklığa sahiptir ve bu nedenle sahada test yapmak maliyetli ve zaman alıcı olabilir. ETAP gibi simülasyon araçları, gerçek sistemin dijital bir modelini oluşturup arıza analizlerini bu model üzerinde gerçekleştirerek önemli avantajlar sağlar. Örneğin:

- OG Besleme Sistemleri: Bir raylı sistem OG besleme hattında kullanılan aşırı akım rölelerinin zamanlama ayarları ve akım değerleri, ETAP üzerinden simüle edilerek sahada doğrulama öncesi optimize edilebilir.
- Katener Hatları: Katener hattında meydana gelebilecek kısa devre arızalarının simüle edilmesiyle, rölelerin koordinasyon stratejileri doğrulanabilir.
- Transformatör Koruması: Transformatörlerdeki diferansiyel rölelerin ve sekonder koruma cihazlarının çalışma sınırları ETAP ile hassas bir şekilde analiz edilebilir.

ETAP Kullanımının Avantajları:

- Zaman ve Maliyet Tasarrufu: Simülasyonlar, sahada yapılması gereken testlerin yükünü azaltır ve maliyetleri düşürür.
- Detaylı Analiz: Rölelerin çalışma performansı, farklı arıza senaryoları altında detaylı bir şekilde incelenebilir.
- Hata Tespiti ve Düzeltme: Simülasyon sırasında koordinasyon hataları tespit edilerek saha uygulamaları öncesinde düzeltilebilir.
- Rekabet Avantajı: Daha güvenilir ve optimize edilmiş bir sistem tasarımı, işletme maliyetlerini azaltarak raylı sistem işletmecilerine rekabet avantajı sağlar.

Sonuç olarak, ETAP ve benzeri simülasyon araçları, raylı sistemlerin enerji altyapısındaki koruma koordinasyonunun doğruluğunu değerlendirmek ve

iyileştirmek için vazgeçilmez araçlardır. Bu yazılımlar, teorik modelleme ile saha uygulamaları arasında bir köprü görevi görerek, koruma cihazlarının koordinasyon stratejilerinin optimize edilmesini sağlar. Bu sayede, sistemin güvenilirliği, enerji sürekliliği ve güvenliği önemli ölçüde artırılabilir.

5.2 Seçiciliğin tanımı ve önemi

Raylı sistemlerin enerji altyapısında koruma sistemlerinin tasarımında seçicilik, sistemin güvenilirliği ve işletme sürekliliği açısından kritik bir prensip olarak öne çıkar. Seçicilik, koruma rölelerinin yalnızca kendi sorumluluk alanlarına müdahale etmesini ve diğer bölgelerdeki sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamayı ifade eder. Bu ilke, enerji sürekliliğini garanti altına almak ve arızaların etkilerini en aza indirmek açısından büyük önem taşır.

Seçicilik, bir arıza durumunda yalnızca arızanın meydana geldiği bölgenin izole edilmesini sağlayan koruma stratejisidir. Örneğin, bir raylı sistem OG ring hattında meydana gelen kısa devre arızasında, sadece ilgili bölgedeki kesici devreye girerken diğer bölgeler enerji sağlamaya devam eder. Bu yaklaşım, yolcu taşımacılığı gibi kesintisiz hizmet gerektiren sistemlerde büyük bir avantaj sunar.

Seçicilik, genellikle şu iki temel yöntemle sağlanır:

- Zaman Seçiciliği: Koruma cihazlarının çalışma sürelerinin, arıza bölgesine olan uzaklıklarına göre ayarlanmasıdır. Daha yakındaki röleler hızlı çalışırken, uzaktakiler gecikmeli olarak devreye girer.
- Akım Seçiciliği: Koruma rölelerinin çalışma akımı eşiklerinin, arıza akımlarının büyüklüğüne göre belirlenmesidir. Daha büyük akımlar için devreye girecek röleler önceliklidir.

Raylı sistemlerde seçiciliğin sağlanması, aşağıdaki nedenlerle son derece önemlidir:

- Enerji Sürekliliği:

Seçicilik, arıza durumunda sistemin yalnızca küçük bir bölümünün etkilenmesini sağlar. Bu, raylı sistemlerde enerji sürekliliğini garanti altına alarak yolcu taşımacılığının aksamasını önler.

- Arızaların Yayılmasının Önlenmesi:

Seçici bir koruma sistemi, arızanın etkilerini yalnızca ilgili bölgeyle sınırlayarak daha geniş bir alanı koruma altına alır. Örneğin, OG ring hattındaki bir arıza yalnızca tek bir hat kesicisini devreye sokar ve diğer enerji besleme hatlarının çalışmaya devam etmesine olanak tanır.

- Ekipmanların Korunması:

Seçicilik, arıza akımına yalnızca ilgili rölenin müdahale etmesini sağlayarak diğer rölelerin gereksiz yere devreye girmesini engeller. Bu durum, hem ekipmanların ömrünü uzatır hem de bakım maliyetlerini azaltır.

- Yolcu Güvenliği:

Raylı sistemlerde enerji sürekliliği, yalnızca işletim performansı açısından değil, aynı zamanda yolcuların güvenliği açısından da kritiktir. Seçicilik sayesinde, enerji kesintileri veya sistem arızaları sırasında yolcuların tahliyesi için gerekli sistemler (örneğin acil aydınlatma) çalışmaya devam eder.

Raylı sistemlerde seçiciliği sağlamak için aşağıdaki teknik kriterler dikkate alınır:

- Röle Koordinasyonu: Zaman ve akım koordinasyonu, rölelerin seçici bir şekilde çalışmasını sağlar.
- Hassasiyet: Koruma rölelerinin doğru bölgede ve uygun hassasiyetle çalışması, seçicilik için temel bir gerekliliktir.
- Yön Algılama: Yönlü röleler, arıza akımının yönüne göre seçicilik sağlar.
- Arıza Senaryolarının Analizi: Farklı arıza senaryoları üzerinde yapılan simülasyonlar, seçiciliğin etkinliğini doğrulamak için kullanılır.

Sonuç olarak, seçicilik, raylı sistemlerin enerji altyapısında güvenilir bir koruma sisteminin en temel bileşenlerinden biridir. Bu ilkenin etkin bir şekilde uygulanması, hem sistem güvenilirliği hem de enerji sürekliliği açısından hayati bir öneme sahiptir. Özellikle karmaşık enerji dağıtım sistemlerinde, seçicilik kriterlerinin titizlikle sağlanması, arıza durumlarının etkilerini en aza indirmekte ve sistem performansını artırmaktadır.

5.3 Güvenliğin tanımı ve önemi

Raylı sistemlerin enerji altyapısında güvenlik, koruma sistemlerinin hızlı, doğru ve kararlı bir şekilde çalışarak hem sistem ekipmanlarını hem de yolcu güvenliğini koruma kapasitesini ifade eder. Güvenlik, yalnızca arıza durumlarında sistemin doğru şekilde çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji sürekliliğini ve işletme performansını da doğrudan etkiler.

Güvenlik, koruma sistemlerinin herhangi bir arıza durumunda:

- Hızlı: Arızaya mümkün olan en kısa sürede müdahale etmesi,
- Doğru: Yalnızca arızanın meydana geldiği bölgeye müdahale etmesi,
- Kararlı: Gereksiz çalışmaları engelleyerek sistemin stabilitesini koruması anlamına gelir.

Bu prensipler, raylı sistemlerin karmaşık enerji altyapısında enerji sürekliliğinin ve sistem güvenilirliğinin korunması için kritik bir öneme sahiptir.

Raylı sistemlerde güvenliğin sağlanması için şu unsurlar kritik öneme sahiptir:

- Koruma Rölelerinin Doğru Ayarlanması: Rölelerin hassasiyet seviyeleri ve zaman gecikmeleri, güvenliği sağlamak için dikkatlice ayarlanmalıdır.
- Düzenli Bakım ve Testler: Koruma cihazlarının performansı düzenli olarak test edilmeli ve gerekli durumlarda ayarları güncellenmelidir.
- Modern Teknolojilerin Kullanımı: Dijital röleler ve IEC61850 protokolü gibi modern teknolojiler, güvenliğin sağlanmasında önemli bir avantaj sağlar.
- Simülasyon ve Analiz: Farklı arıza senaryoları, simülasyon araçlarıyla analiz edilerek güvenlik stratejileri optimize edilmelidir.

Sonuç olarak, raylı sistemlerde güvenlik, hem teknik hem de operasyonel gerekliliklerin bir sonucudur. Koruma sistemlerinin hızlı ve doğru bir şekilde çalışmasını sağlayan güvenlik prensipleri, enerji sürekliliği, yolcu güvenliği ve ekipmanların korunması açısından kritik bir rol oynar. Özellikle modern teknolojiler ve uluslararası standartlar, güvenliğin sağlanmasında büyük bir destek sunmaktadır. Güvenliğin titizlikle uygulanması, raylı sistemlerin sürdürülebilir bir şekilde işletilmesini mümkün kılar.

5.3.1 Olası arızalarda rölelerin hızlı ve güvenilir müdahalesi

Raylı sistemlerin enerji altyapısında meydana gelebilecek olası arızalar, yalnızca ekipmanlara zarar vermekle kalmaz, aynı zamanda enerji sürekliliğini ve yolcu güvenliğini de doğrudan etkiler. Bu nedenle, koruma rölelerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde müdahale etmesi, sistemin güvenliği ve performansı açısından kritik bir gerekliliktir. Rölelerin müdahale kapasitesi, doğru tasarım, hassas ayarlar ve modern teknoloji entegrasyonuyla mümkün hale gelir.

Raylı sistemlerde rölelerin müdahale etmesi gereken başlıca arıza türleri şunlardır:

- Kısa Devre Arızaları:

Hat, katener veya transformatör gibi ekipmanlarda meydana gelen faz-faz veya faz-toprak kısa devre arızaları, yüksek akım seviyelerine yol açar. Bu tür arızalar sırasında röleler, hızlı bir şekilde çalışarak arızalı bölgeyi izole etmelidir.

- Toprak Arızaları:

Özellikle orta gerilim sistemlerinde yaygın olan toprak arızaları, sistemin güvenilirliğini tehdit eden en önemli arıza türlerinden biridir. Röleler, toprak akımındaki anomalileri algılayarak müdahale etmelidir.

- Aşırı Yük Durumları:

Sistem üzerindeki yüklerin beklenen seviyelerin üzerine çıkması durumunda, aşırı akım röleleri devreye girerek ekipmanların aşırı ısınmasını önler.

- Arıza Akımının Yönüne Bağlı Problemler:

Özellikle OG ring hatlarında, arıza akımının yönü önemli bir göstergedir. Yönlü röleler, arıza akımının geldiği yöne göre seçici bir müdahale gerçekleştirir.

Hızlı müdahale, sistemin zarar görmesini ve arızaların yayılmasını engellemek için hayati öneme sahiptir. Rölelerin hızlı müdahale kapasitesini sağlayan başlıca unsurlar şunlardır:

- Ters Zaman Karakteristikleri:

Rölelerin ters zamanlı (inverse-time) karakteristiklere sahip olması, arıza akımının büyüklüğüne göre çalışma sürelerini otomatik olarak ayarlamalarını sağlar. Daha büyük akımlarda röleler daha hızlı çalışır.

- Doğru Ayar Eşikleri:

Rölelerin çalışma akımı ve zaman eşikleri, sistemdeki maksimum yük ve minimum arıza akımı değerlerine göre ayarlanmalıdır. Bu ayarlar, gereksiz müdahaleleri önlerken hızlı müdahaleyi mümkün kılar.

- Modern İletişim Teknolojileri:

IEC61850 protokolü gibi teknolojiler, röleler arasındaki veri alışverişini milisaniyeler içinde gerçekleştirerek arıza durumunda hızlı bir müdahale sağlar. Özellikle GOOSE mesajlaşma sistemi, kritik bilgilerin anlık olarak iletilmesine olanak tanır.

Rölelerin yalnızca hızlı değil, aynı zamanda güvenilir bir şekilde çalışması gerekir. Güvenilir müdahale, yanlış alarmların ve gereksiz enerji kesintilerinin önlenmesi açısından önemlidir. Güvenilirliği artıran başlıca unsurlar şunlardır:

- Hassasiyet:

Rölelerin hassasiyet seviyeleri, yalnızca belirli bir eşik değeri aşıldığında çalışacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu, yanlış müdahaleleri engeller.

- Yedek Koruma:

Bir rölenin çalışmaması durumunda, diğer rölelerin yedek koruma sağlayacak şekilde tasarlanması güvenilirliği artırır. Örneğin, bir diferansiyel rölenin çalışmaması durumunda aşırı akım rölesi devreye girebilir.

- Düzenli Test ve Bakım:

Rölelerin performansı düzenli olarak test edilmeli ve gerekli durumlarda ayarları güncellenmelidir. Sekonder enjeksiyon testleri gibi yöntemler, rölelerin doğru çalıştığını doğrulamak için yaygın bir şekilde kullanılır.

Bir OG ring hattında meydana gelen kısa devre arızasında:

- Arıza noktasına en yakın röle, zaman gecikmesi olmadan hızlı bir şekilde devreye girer.
- Daha uzakta bulunan röleler, yalnızca birincil röle başarısız olduğunda devreye girecek şekilde gecikmeli çalışır.
- Yönlü röleler, arıza akımının yönüne göre yalnızca ilgili bölgeye müdahale eder.

Bu müdahale mekanizması, hem hızlı hem de güvenilir bir koruma sağlar ve enerji sürekliliğini mümkün kılar.

Sonuç olarak, olası arıza durumlarında rölelerin hızlı ve güvenilir müdahalesi, raylı sistemlerin güvenliği ve enerji sürekliliği açısından vazgeçilmezdir. Rölelerin doğru tasarımı, hassas ayarları ve modern iletişim teknolojileriyle desteklenmesi, arızalara anlık ve doğru bir şekilde yanıt verilmesini sağlar. Bu da sistem güvenilirliğini artırarak hem ekipmanların korunmasına hem de yolcu güvenliğine doğrudan katkı sağlar.

5.3.2 IEC61850'nin güvenlik açısından önemi ve katkısı

Modern enerji sistemlerinde koruma ve kontrol altyapısının etkinliği, yalnızca fiziksel cihazların performansına değil, aynı zamanda iletişim altyapısının güvenilirliğine de bağlıdır. IEC61850 standardı, enerji altyapısında koruma, kontrol ve izleme işlevlerini entegre eden, dijital bir iletişim platformu sağlayarak güvenlik

açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle raylı sistemlerin karmaşık yapıları göz önüne alındığında, IEC61850'nin sağladığı güvenlik katkıları hayati bir öneme sahiptir.

Güvenlik açısından IEC61850'nin katkıları şunlardır:

- Hızlı ve Güvenilir Veri İletimi: IEC61850'nin sunduğu GOOSE mesajlaşma sistemi, arıza durumlarında koruma cihazlarının milisaniyeler içinde bilgi alışverişi yapmasını sağlar. Bu hız, rölelerin arızalara anında müdahale edebilmesi için kritik bir gerekliliktir. Örneğin:
  - Bir OG ring hattında meydana gelen kısa devre arızasında, GOOSE mesajları, ilgili röleye anında bilgi aktararak gereksiz gecikmeleri önler.
  - Geleneksel sistemlerde 100 ms'yi bulan gecikmeler, IEC61850 ile 3-4 ms seviyelerine düşürülür.
- Eşzamanlı ve Koordineli Çalışma: IEC61850 protokolü, koruma rölelerinin ve diğer kontrol cihazlarının eşzamanlı ve koordineli çalışmasını mümkün kılar. Bu koordinasyon, sistemin genel güvenliğini artırırken, gereksiz enerji kesintilerini önler.
  - Örneğin, diferansiyel röleler ile yönlü röleler arasındaki haberleşme, IEC61850 üzerinden senkronize edilir ve doğru zamanda doğru müdahale gerçekleştirilir.
- Standartlaştırılmış İletişim: IEC61850, farklı üreticiler tarafından geliştirilen cihazlar arasında uyumlu bir iletişim sağlar. Bu, sistemin genişletilmesi veya modernizasyonu sırasında cihaz entegrasyonunu kolaylaştırır ve güvenlik açıklarını minimize eder.
- Kapsamlı İzleme ve Diagnostik Yeteneği: IEC61850, enerji altyapısındaki cihazların sürekli izlenmesini ve arıza durumlarında detaylı teşhis yapılmasını sağlar. Bu özellik, hem arıza müdahalelerinin hızını artırır hem de gelecekteki olası sorunları önlemek için gerekli verileri sağlar.
- Siber Güvenlik ve Koruma: Modern enerji altyapıları, yalnızca fiziksel tehditlere değil, aynı zamanda siber saldırılara da karşı korunmalıdır. IEC61850, siber güvenlik için gelişmiş protokoller ve şifreleme yöntemleri sunar. Bu standart, aşağıdaki güvenlik önlemlerini içermektedir:
  - Erişim Kontrolü: Yetkisiz erişimlere karşı koruma.
  - Veri Şifreleme: İletilen bilgilerin üçüncü taraflar tarafından ele geçirilmesini engeller.

- Yetkilendirme ve Kimlik Doğrulama: Cihazların ve operatörlerin kimliğini doğrulayarak sistem güvenliğini artırır.

Avantajlar ve Teknik Katkılar:

- Zaman ve Maliyet Tasarrufu: Hızlı veri iletimi ve kolay entegrasyon, sistem tasarımı ve bakımı sırasında zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.
- Sistem Güvenilirliği: IEC61850, hata payını azaltarak sistem güvenilirliğini artırır.
- Esneklik: Standartlaştırılmış yapı, sistemlerin kolaylıkla genişletilmesine olanak tanır.

6
SAYISAL VERİLER VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

6.1 Mevcut şebeke yapısının tanıtımı

6.1.1 M1 Hattı

M1 hattı, İstanbul'un en eski raylı sistem hatlarından biri olup, Metro İstanbul tarafından işletilmektedir. Hattın tamamı, M1A Yenikapı - Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı - Kirazlı olmak üzere iki kola ayrılmaktadır. Toplamda 23 istasyon ve 26,8 (Yenikapı-Otogar-Atatürk Havalimanı ve Otogar-Kirazlı arası sistemin toplam km verisi) km uzunlukta olan bu hat, İstanbul'un raylı sistem altyapısının önemli bir parçasını oluşturur. Hattın elektrifikasyon sistemi, katener üzerinden sağlanmakta ve ring şebeke yapısıyla güç sürekliliği sağlanmaktadır.

Yenikapı - Otogar güzergâhında M1A ve M1B hatlarında ortak kullanılan 8 istasyon, Otogar - Atatürk Havalimanı güzergâhında M1A hattına ait 10 istasyon ve Otogar - Kirazlı güzergâhında ise M1B hattına ait 5 istasyon olmak üzere sistemde toplamda 23 istasyon bulunmaktadır. İstasyonların 10 tanesinde bir adet ada peronu, 11 tanesinde iki adet kenar peronu ve Otogar'da ise hatlar arasında aktarmayı sağlamak için iki adet ada peronu bulunmaktadır. Kirazlı istasyonunda M3 metro hattına aktarma imkânı bulunmaktadır. Tüm istasyonlarda kapalı oturma alanları ve toplamda 135 yürüyen merdiven ve 65 asansör bulunmaktadır.

12 adet yer altı istasyon: Aksaray, Atatürk Havalimanı, Bağcılar Meydan, Bahçelievler, Bakırköy-İncirli, Emniyet-Fatih, Kirazlı, Menderes, Otogar, Topkapı-Ulubatlı, Üçyüzlü, Yenikapı.

4 adet viyadük istasyon: Davutpaşa-YTÜ, DTM-İstanbul Fuar Merkezi, Esenler, Merter.

7 adet hemzemin istasyon: Ataköy-Şirinevler, Bayrampaşa-Maltepe, Kocatepe, Sağmalcılar, Terazidere, Yenibosna, Zeytinburnu



Şekil 6.1 M1A Yenikapı-Atatürk Havalimanı metro hattı istasyonları



Şekil 6.2 M1B Yenikapı-Kirazlı metro hattı istasyonları

M1 hattında Yenikapı, DTM, Esenler Garaj Sahası ve Kirazlı'da birer adet; Aksaray, Ulubatlı, Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Belpa, Bahçelievler, Yenibosna, Menderes ve Bağcılar'da ikişer adet olmak üzere toplam 24 adet CER trafosu bulunmaktadır. Toplam CER trafosu kurulu gücü 62,1 MVA'dır. Yenikapı, Ferhat Paşa, Menderes, Üçyüzlü, Bağcılar ve Kirazlı'da ikişer adet; Aksaray, Ulubatlı, Sağmalcılar, Otogar, Mimarsinan, Belpa, Bakırköy, Bahçelievler, Yenibosna, DTM, Havalimanı ve Esenler'de birer adet olmak üzere toplam 24 adet İç İhtiyaç trafosu bulunmaktadır. Toplam İç İhtiyaç trafosu kurulu gücü 32,45 MVA'dır. M1 hattı toplam kurulu gücü 94,55 MVA'dır.

6.1.1.1 M1 Hattı Röle Ayarları

Ulubatlı istasyonu röle ayarları Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Ring ve TEİAŞ besleme hattı röle ayarları

ULUBATLI	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	I> (İleri)	I> (İleri)	I> (Geri)	I> (Geri)	Io>	Io>	Io> (İleri)	Io> (İleri)	Io> (Geri)	Io> (Geri)
			Operating Curve Trip Eğrisi	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI
H01 Aksaray Ring 3411	**400/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**5 In**	**1,05 In**	**5 In**	**1 In**	**5 In**	**1 In**	**0,70 In**	**0,100 A**	**0,50 In**	**0,2 In**	**0,5 In**	**0,2 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**
H03 TEİAŞ Giriş 3431	**1250/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**3,2 In**	**0,52 In**	**5 In**	**1 In**	**5 In**	**1 In**	**0,32 In**	**0,052 A**	**0,50 In**	**0,2 In**	**0,5 In**	**0,2 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**
H06 Ring TM9	**400/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**5 In**	**1,6 In**	**5 In**	**1 In**	**5 In**	**1 In**	**2,5 In**	**0,16 In**	**0,50 In**	**0,2 In**	**0,5 In**	**0,2 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**
H07 Ring 3421	**400/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**5 In**	**1,05 In**	**0,9 In**	**1 In**	**5 In**	**1 In**	**0,70 In**	**0,1 In**	**0,50 In**	**0,2 In**	**0,5 In**	**0,2 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,1**	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,2**

Tablo 6.2 CER ve yardımcı trafo röle ayarları

ULUBATLI	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	I>>	Io>	Io>
			Operating Curve Trip Eğrisi	Instantaneuos	IEC SI	Instantaneuos	DT	IEC SI
H02 Cer Trafo-1 3441	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	4 In	1,1 In	0,5 In	0,2 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,2	0,5	0,5	0,1
H04 Yardımcı Trafo 3461	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	1,8 In	0,36 In	5 In	0,3 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,3	0,5	0,5	0,1
H05 Cer Trafo-2 3451	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	4 In	1,1 In	0,5 In	0,2 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,2	0,5	0,5	0,1

Aksaray istasyonu röle ayarları Tablo 6.3 ve Tablo 6.4'de verilmiştir.

Tablo 6.3 Ring hattı röle ayarları

AKSARAY	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	I> (İleri)	I> (İleri)	I> (Geri)	I> (Geri)	Io>	Io>	Io> (İleri)	Io> (İleri)	Io> (Geri)	Io> (Geri)
			Operating Curve Trip Eğrisi	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI
H01 Ulubatlı Ring 3421	400/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	5 In	1,20 In	5 In	1 In	5 In	1 In	0,60 In	0,300 A	0,50 In	0,2 In	0,5 In	0,2 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,05	0,5	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2
H03 Yenikapı Ring 3471	400/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	5 In	1,20 In	5 In	1 In	5 In	1 In	0,60 In	0,300 A	0,50 In	0,2 In	0,5 In	0,2 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,05	0,5	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2

Tablo 6.4 CER ve yardımcı trafo röle ayarları

AKSARAY	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	I>>	Io>	Io>
			Operating Curve Trip Eğrisi	Instantaneuos	IEC SI	Instantaneuos	DT	IEC SI
H02 Cer Trafo-1 3441	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	4 In	1,1 In	-	0,2 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,2	-	0,5	0,1
H04 Yardımcı Trafo 3461	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	2 In	0,26 In	5 In	0,16 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,1	0,5	0,5	0,2
H05 Cer Trafo-2 3451	50/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	4 In	1,1 In	-	0,2 In	0,1 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,2	-	0,5	0,1

Yenikapı istasyonu röle ayarları Tablo 6.5, Tablo 6.6 ve Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.5 Ring ve TEİAŞ besleme hattı röle ayarları

YENİKAPI	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	I> (İleri)	I> (İleri)	I> (Geri)	I> (Geri)	Io>	Io>	Io> (İleri)	Io> (İleri)	Io> (Geri)	Io> (Geri)
			Operating Curve Trip Eğrisi	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI	Instantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI	DT	IEC SI
H01 Aksaray Ring 3421	400/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	0,4 In	2 In	5 In	1 In	5 In	1 In	0,10 In	0,300 A	0,50 In	0,2 In	0,50 In	0,2 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,4	0,4	0,5	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2
H03 Ring TM	400/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	5 In	1,6 In	5 In	1 In	5 In	1 In	2,5 In	0,16 In	0,50 In	0,2 In	0,5 In	0,2 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2
H04 Teiaş Giriş	1250/5	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	0,52 In	3,2 In	5 In	1 In	5 In	1 In	0,20 In	0,50 In	0,50 In	0,2 In	0,50 In	0,2 In
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	0,6	0,6	0,5	0,2	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2

Tablo 6.6 CER trafosu röle ayarları

YENİKAPI	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>	I>	Io>	Io>
			Operating Curve Trip Eğrisi	İnstantaneuos	IEC SI	DT	IEC SI
H02 Cer Trafosu 3411	**40/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**4 In**	**0,78 In**	**0,2 In**	**0,1 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,5**	**0,2**	**0,5**	**0,1**

Tablo 6.7 Yardımcı trafo röle ayarları

YENİKAPI	CT	Röle Modeli	Relay Parameters	I>>	I>>	Io>	Io>>
			Operating Curve Trip Eğrisi	IEC SI	DT	IEC SI	DT
H00A Yardımcı Trafo-1 3461	**40/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**0,54 In**	**4 In**	**0,10 In**	**0,20 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,3**	**0,02**	**0,2**	**0,04**
H00B Yardımcı Trafo-2 3462	**40/5**	REF542 Plus	Current Value Akım Değeri	**0,54 In**	**4 In**	**0,10 In**	**0,20 In**
			Time (t) / Time Constant (Tp) Zaman / Katsayı	**0,3**	**0,02**	**0,2**	**0,04**

6.1.2 M4 Hattı

M4 hattı, İstanbul'un Anadolu Yakası'nda konumlanmış olup, elektrifikasyon altyapısı ile modern bir metro hattı olarak öne çıkmaktadır. Kadıköy'den başlayarak, son durak olan Sabiha Gökçen Havalimanı'na kadar toplamda 33,5 kilometre uzunluğunda bir güzergâha ve 23 istasyona sahiptir. Hattın tamamı yer altında inşa edilmiştir ve İstanbul'un ulaşım altyapısında önemli bir yere sahiptir. Hattın elektrifikasyon sistemi, enerji sürekliliği, güvenliği ve yüksek işletme verimliliğini sağlamak amacıyla ileri teknolojilerle donatılmıştır. Sistem, 1500 V DC gerilim seviyesinde çalışmakta ve rijit katener yapısı üzerinden enerji iletimi gerçekleştirmektedir.

Hatta enerji temini, rijit katener sistemi ile sağlanmaktadır. Bu sistem, özellikle tünel içi raylı sistemler için geliştirilmiş bir yapı olup, hareketli tel yerine sabit bir alüminyum profil kullanılarak tasarlanmıştır. Rijit katener sistemi, bakım gereksinimlerini azaltmasının yanı sıra, yüksek mekanik dayanıklılık ve enerji iletiminde kararlılık sağlamaktadır. Ayrıca, bu sistemin kullanımı ile enerji kayıpları en aza indirilmekte ve hat boyunca kesintisiz bir enerji akışı sağlanmaktadır.

Enerji besleme yapısı, dört ana noktadan sağlanmakta ve bu noktalar arasında bir ring şebeke bağlantısı bulunmaktadır. Bu konfigürasyon, herhangi bir besleme noktasında meydana gelebilecek arızalara karşı sistemin kesintisiz çalışmasını temin etmektedir. Ayrıca, enerji sürekliliğini artırmak amacıyla jeneratör destekli bir sistem tasarlanmıştır.

Enerji kesintisi durumunda, devreye alınan jeneratörler sayesinde tünellerde bulunan trenler en yakın istasyona yönlendirilmekte ve yolcuların tahliyesi güvenli bir şekilde sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra, aydınlatma ve elektronik kontrol sistemleri gibi kritik altyapılar, kesintisiz güç kaynakları (UPS) aracılığıyla 3 saat boyunca enerji ile beslenebilmektedir. Bu yapı, acil durum senaryolarında sistemin güvenilirliğini artırmaktadır.

Hattın enerji yönetimi, Esenkent Kumanda Merkezi bünyesindeki gelişmiş bir SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistem, enerji tüketimi, voltaj seviyeleri ve olası arıza durumlarını gerçek zamanlı olarak izlemekte ve yönetmektedir. SCADA sistemi, enerji altyapısının performansını optimize etmek ve olası arızalara hızlı bir şekilde müdahale etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 6.3 M4 Kadıköy-Sabiha Gökçen Havalimanı metro hattı istasyonları

M4 hattında toplam 42 adet CER trafosu bulunmaktadır. Toplam CER trafosu kurulu gücü 138,6 MVA'dır. İç İhtiyaç trafosu sayısı 68'dir. Toplam İç İhtiyaç trafosu kurulu gücü 102,44 MVA'dır. M1 hattı toplam kurulu gücü 241,04 MVA'dır.

Tablo 6.8 M4 hattı faz-2 kısmı (Fevzi Çakmak-Yayalar-Kurtköy-Sabiha Gökçen) röle ayarları

		CT	RÖLE MODELİ	INVERSE TIME OVERCURRENT ANSI 51 (PHLPTOC)			INSTANTANEOUS OVERCURRENT ANSI 50 (PHHPTOC)			EARTH FAULT ANSI 50N (EFLPTOC)			DIRECTIONAL INVERSE TIME OVERCURRENT ANSI 67-1 (DPHLPDOC)			DIRECTIONAL INSTANTANEOUS OVERCURRENT ANSI 67-2 (DPHHPDOC)			DIRECTIONAL EARTH FAULT ANSI 67N (DEFLPDEF)			DIRECTION	LINE DIFFERANTIAL ANSI 87L (LNPLDF)		
				Operating Curve Type	Start Value 3I>	Time Multiplier	Operating Curve Type	Start Value 3I>>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value I0>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value 3I>->	Time Multiplier	Operating Curve Type	Start Value 3I>>>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value II>->	Operate Delay Time		Operating Curve Type	Operate Delay Time	Low Op. Value %Ir	High Op. Value %Ir
Fevzi Çakmak	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED 615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms					
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
Yayalar	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED 615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	1250/5A	RER615	IEC SI	0,85xIn	0,4	DT	2xIn	600 ms	DT	0,2xIn	600 ms	IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED 615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
Kurtköy	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	1250/5A	RER615	IEC SI	0,85xIn	0,4	DT	2xIn	600 ms	DT	0,2xIn	600 ms	IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED 615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
Sabiha Gökçen	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100
	IC İHTİYAÇ TR	40/5A	REF615	IEC SI	0,96xIn	0,3	DT	13,56xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	CER TR	60/5A	REF615	IEC SI	1,06xIn	0,3	DT	6,09xIn	100 ms	DT	0,2xIn	100 ms														
	RİNG GİRİŞ-ÇIKIŞ	600/5A	RED615										IEC SI	0,9xIn	0,3	DT	4xIn	400 ms	DT	0,2xIn	400 ms	REVERSE	DT	45 ms	20	100

6.1.3 M8 Hattı

M8 hattı, İstanbul'un Anadolu Yakası'nda, kuzey-güney aksında bağlantı oluşturan ve tamamen sürücüsüz işletme teknolojisiyle donatılmış modern bir metro hattıdır. 14,27 kilometre uzunluğundaki bu hat, 13 istasyondan oluşmaktadır.

Hattın tasarımı, özellikle bölgedeki doğu-batı doğrultusundaki hatları kuzey-güney yönünde bağlamak üzere planlanmıştır. M8 Metro Hattı'nın elektrifikasyon sistemi, enerji sürekliliği ve güvenilirliği sağlamak amacıyla 1500 V DC rijit katener sistemi kullanılarak tasarlanmıştır.

Hat, sürücüsüz işletme teknolojisi ile çalıştığı için tüm istasyonlarda tam boy Peron Ayırıcı Kapı Sistemi (PAKS) bulunmaktadır. Bu sistem, yolcu güvenliğini artırmanın yanı sıra enerji verimliliğini destekleyen bir yapıya sahiptir. M8 Hattı'nda kullanılan metro araçları Hyundai Rotem tarafından üretilmiş olup, toplamda 40 vagon (10 adet 4'lü tren seti) hattın işletmesinde kullanılmaktadır. Trenlerin işletme süresi tek yön için 26 dakika olup, pik saatlerde 6 dakikalık sefer sıklığıyla çalışmaktadır.

Hattın kumanda merkezi ve depo sahası, Metro İstanbul Behiç Erkin Yerleşkesi'nde M5 Üsküdar-Çekmeköy hattıyla ortak olarak konumlanmıştır. Depo sahasında metro araçlarının bakım, onarım ve park işlemleri gerçekleştirilmektedir.

M8 hattında tüm istasyonlar yer altında konumlandırılmıştır. Hatta toplam 160 adet yürüyen merdiven ve 51 adet asansör bulunmakta olup, bu altyapı yolcu erişimini kolaylaştırmaktadır. İstasyon çıkışlarının inşası açılıştan sonra da devam etmektedir.



Şekil 6.4 M8 Bostancı-Parseller metro hattı istasyonları

M8 hattında toplam 16 adet CER trafosu bulunmaktadır. Toplam CER trafosu kurulu gücü 52,8 MVA'dır. İç İhtiyaç trafosu sayısı 28'dir. Toplam İç İhtiyaç trafosu kurulu gücü 44,8 MVA'dır. M1 hattı toplam kurulu gücü 97,6 MVA'dır.

Tablo 6.9 M8 hattı örnek alınan 3 istasyonun (Dudullu-Modoko-İmes) röle ayarları

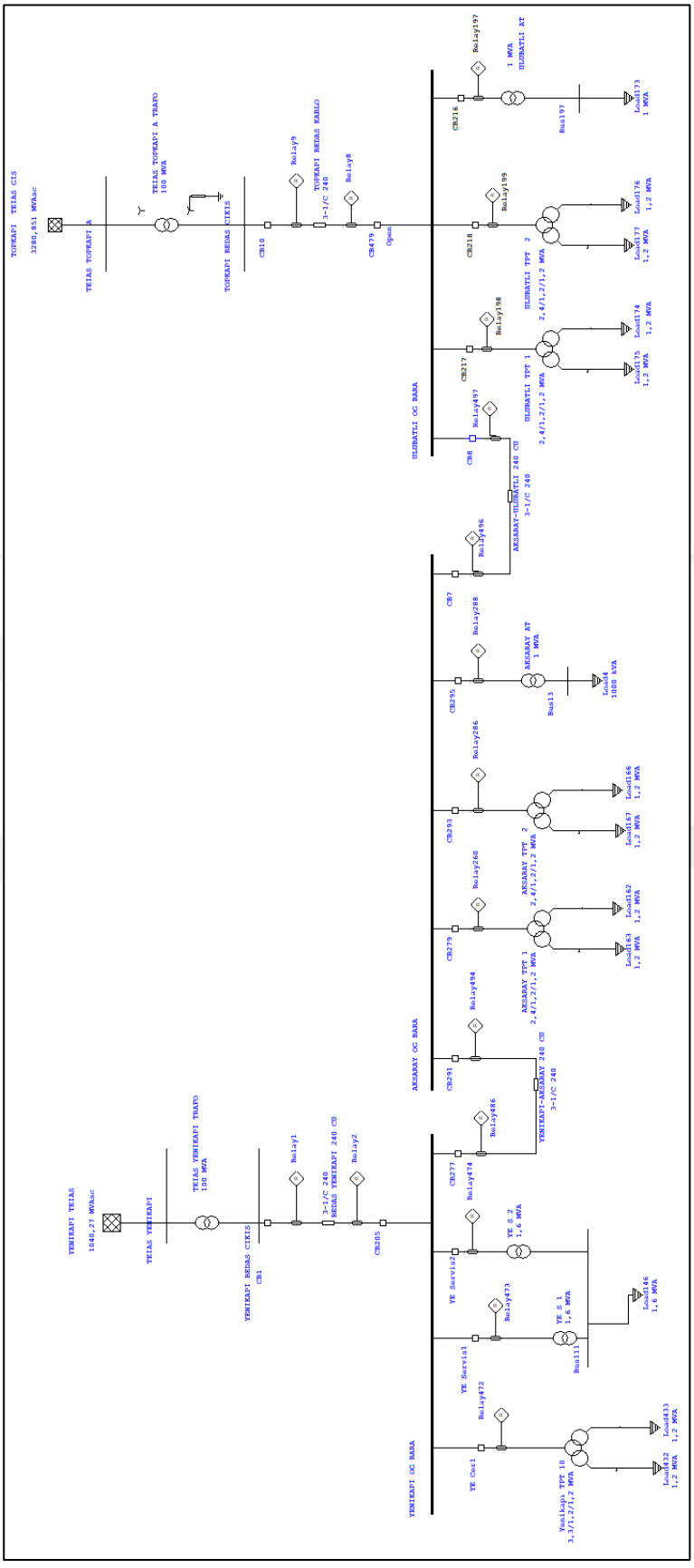
		CT	RÖLE MODELİ	INVERSE TIME OVERCURRENT ANSI 51 (PHLPTOC)			INSTANTANEOUS OVERCURRENT ANSI 50 (PHHPTOC)			EARTH FAULT ANSI 50N (EFLPTOC)			DIRECTIONAL INVERSE TIME OVERCURRENT ANSI 67-1 (DPHLPDOC)			DIRECTIONAL INSTANTANEOUS OVERCURRENT ANSI 67-2 (DPHHPDOC)			DIRECTIONAL EARTH FAULT ANSI 67N (DEFLPDEF)			DIRECTION	LINE DIFFERANTIAL ANSI 87L (LNPLDF)			
				Operating Curve Type	Start Value 3I>	Time Multiplier	Operating Curve Type	Start Value 3I>>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value I0>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value 3I>->	Time Multiplier	Operating Curve Type	Start Value 3I>>>	Operate Delay Time	Operating Curve Type	Start Value I0>->	Operate Delay Time		Operating Curve Type	Operate Delay Time	Low Op. Value %Ir	High Op. Value %Ir
Dudullu	RÜNG-A ÇIKIŞ	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,23xIn	0,44	DT	1,6xIn	500 ms	DT	0,2xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	OG 1 TEİAŞ GİRİŞ	1000/1A	REF 615 H	IEC SI	1xIn	0,31	DT	1,9xIn	700 ms	DT	0,3xIn	700 ms														
	OG 2 TEİAŞ GİRİŞ	1000/1A	REF 615 H	IEC SI	1xIn	0,31	DT	1,9xIn	700 ms	DT	0,3xIn	700 ms														
	RÜNG-B ÇIKIŞ	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,22xIn	0,42	DT	1,6xIn	500 ms	DT	0,2xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	MODOKO-DUDUL LU RÜNG-A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,24xIn	0,49	DT	1,7xIn	500 ms	DT	0,22xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	DUDULLU-DUDUL LU İÇERİ ALMA RÜNG A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,6xIn	0,79	DT	2,9xIn	500 ms	DT	0,46xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	MODOKO-DUDUL LU RÜNG-B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,38xIn	0,35	DT	1,7xIn	500 ms	DT	0,22xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	CER TR 1	75/1A	REF 615 J	IEC VI	0,85xIn	0,2	DT	5,95xIn	100 ms	DT	0,22xIn	100 ms														
	CER TR 2	75/1A	REF 615 J	IEC VI	0,85xIn	0,2	DT	5,95xIn	100 ms	DT	0,22xIn	100 ms														
	DUDULLU-DUDUL LU İÇERİ ALMA RÜNG B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,6xIn	0,71	DT	2,8xIn	500 ms	DT	0,44xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
Modoko	İMES-MODOKO RÜNG-A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,26xIn	0,53	DT	1,8xIn	500 ms	DT	1,8xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	MODOKO-DUDUL LU RÜNG-A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,58xIn	0,76	DT	2,8xIn	500 ms	DT	2,8xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İMES-MODOKO RÜNG-B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,4xIn	0,38	DT	1,8xIn	500 ms	DT	1,8xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	MODOKO-DUDUL LU RÜNG-B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,44xIn	0,8	DT	2,7xIn	500 ms	DT	2,7xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
İmes	TÜRK İŞ BLOKLARI-İMES RÜNG-A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,41xIn	0,45	DT	1,9xIn	500 ms	DT	0,26xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	CER TR 1	75/1A	REF 615 J	IEC VI	0,85xIn	0,2	DT	5,95xIn	100 ms	DT	0,22xIn	100 ms														
	CER TR 2	75/1A	REF 615 J	IEC VI	0,85xIn	0,2	DT	5,95xIn	100 ms	DT	0,22xIn	100 ms														
	İMES-MODOKO RÜNG-A	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,57xIn	0,72	DT	2,7xIn	500 ms	DT	0,42xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	TÜRK İŞ BLOKLARI-İMES RÜNG-B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,42xIn	0,41	DT	1,9xIn	500 ms	DT	0,26xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000
	İÇ İHTİYAÇ TR 1	30/1A	REF 615 J	IEC VI	1,03xIn	0,5	DT	18,56xIn	100 ms	DT	0,27xIn	100 ms														
	İMES-MODOKO RÜNG-B	600/1A	RED 615 D										IEC SI	0,41xIn	0,78	DT	2,6xIn	500 ms	DT	0,4xIn	500 ms	REVERSE	DT	50 ms	20	2000

6.2 Simülasyon Çalışması

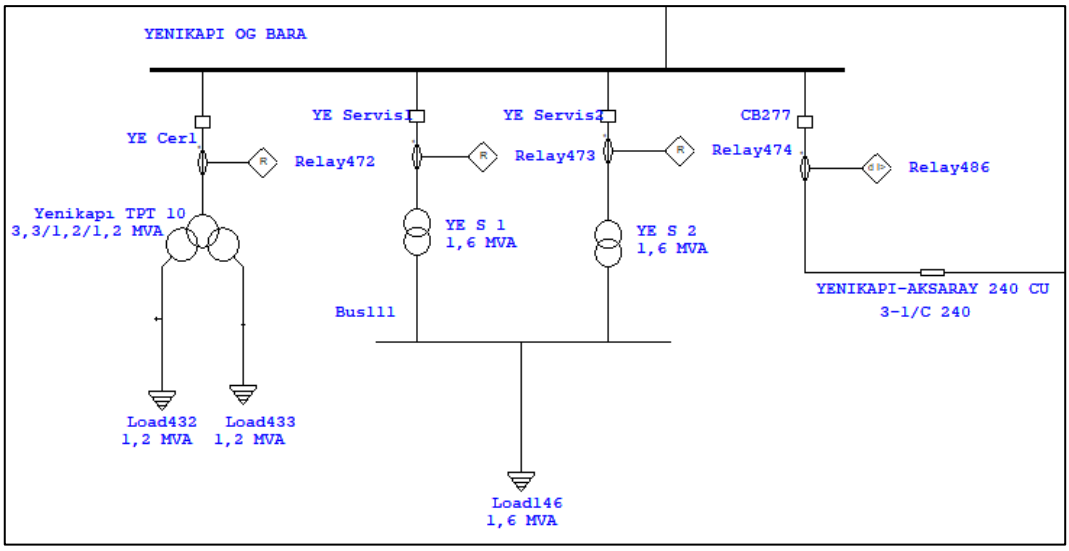
Bu bölümde, raylı sistemlerin elektrik tesislerinde aşırı akım ve diferansiyel rölelerin koruma, selektivite ve koordinasyon açısından nasıl bir performans gösterdiği, ETAP 12.6.0 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Simülasyon çalışması M1 metro hattı özelinde gerçekleştirilmiş olup, Yenikapı, Aksaray ve Ulubatlı istasyonlarında bulunan koruma röleleri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, farklı arıza senaryoları oluşturularak rölelerin selektivite ve koordinasyon performansları değerlendirilmiştir.

Simülasyon çalışmasının temel amacı, röle ayarlarının uygunluğunu test etmek, selektivite ve koordinasyon sağlayıp sağlamadığını analiz etmek ve sistemin arızalara karşı ne kadar hızlı ve güvenilir bir şekilde yanıt verdiğini değerlendirmektir. ETAP simülasyonunda, hattaki rölelerin ayarları sisteme girilerek farklı arıza senaryoları test edilmiştir. Seçilen istasyonlar arasındaki koordinasyon sağlanarak, koruma sisteminin doğruluğu teyit edilmiştir.

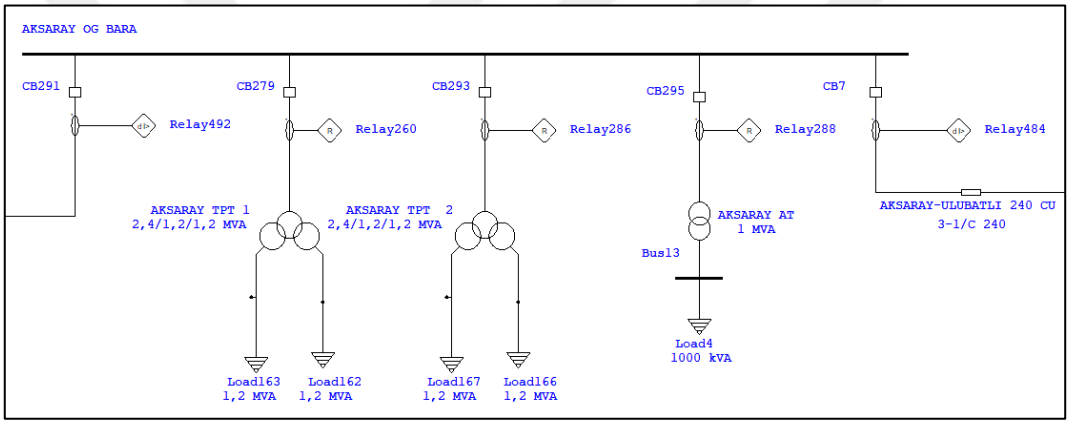
M1 hattında bulunan Yenikapı, Aksaray ve Ulubatlı istasyonları özelinde aşırı akım ve diferansiyel rölelerin ayarları belirlenmiştir. Rölelerin zaman-akım eğrileri (TCC), ters zaman karakteristikleri, gecikme süreleri ve koordinasyon sağlayacak şekilde ayarlanması sağlanmıştır.



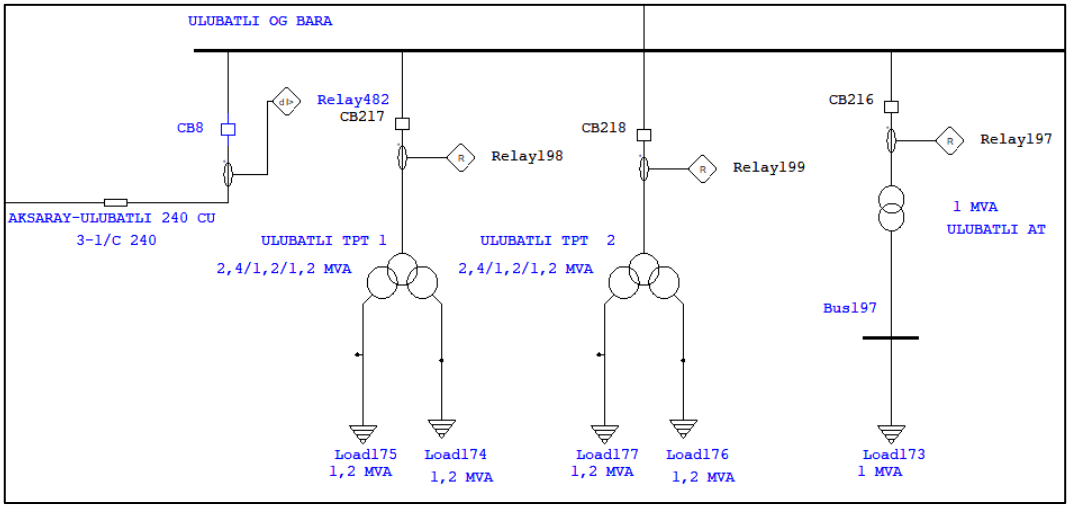
Şekil 6.5 Simülasyonda ele alınan M1 hattına ait 3 istasyonun ETAP modeli



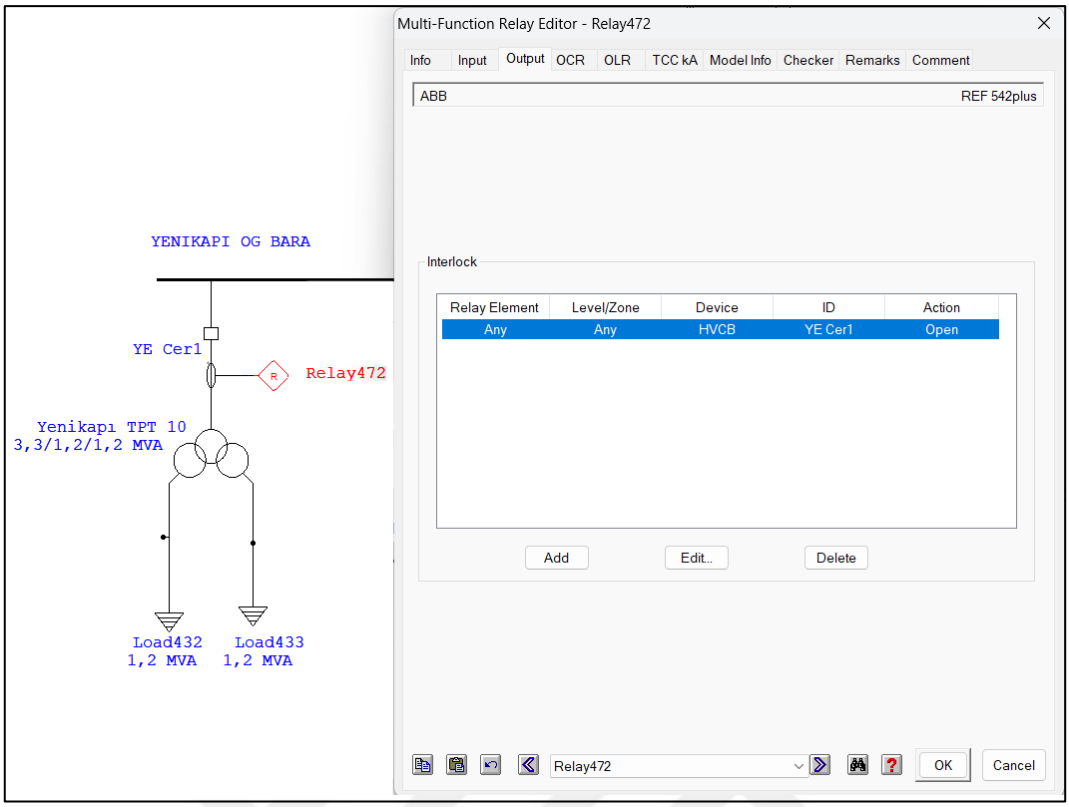
Şekil 6.6 Yenikapı transformatör merkezi ETAP modeli



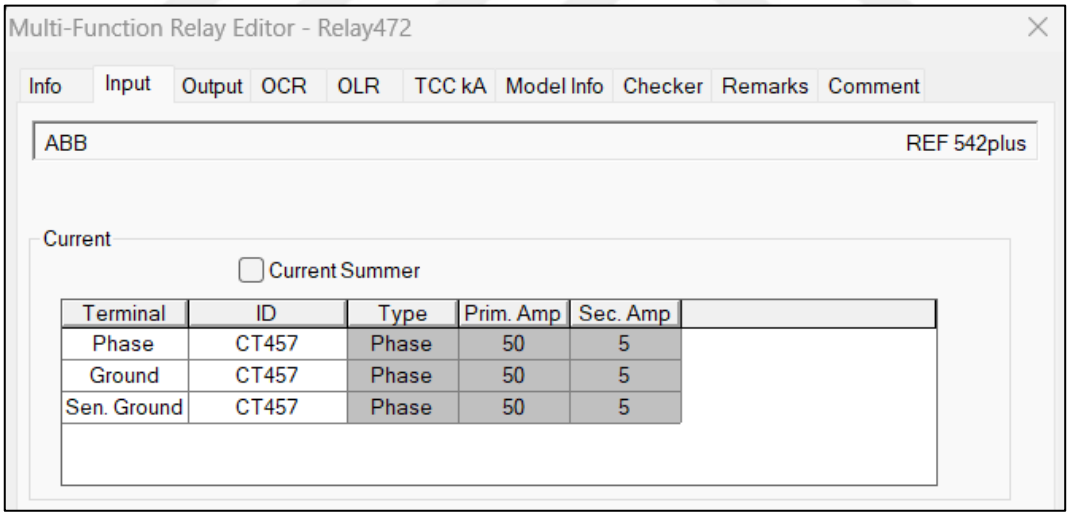
Şekil 6.7 Aksaray transformatör merkezi ETAP modeli



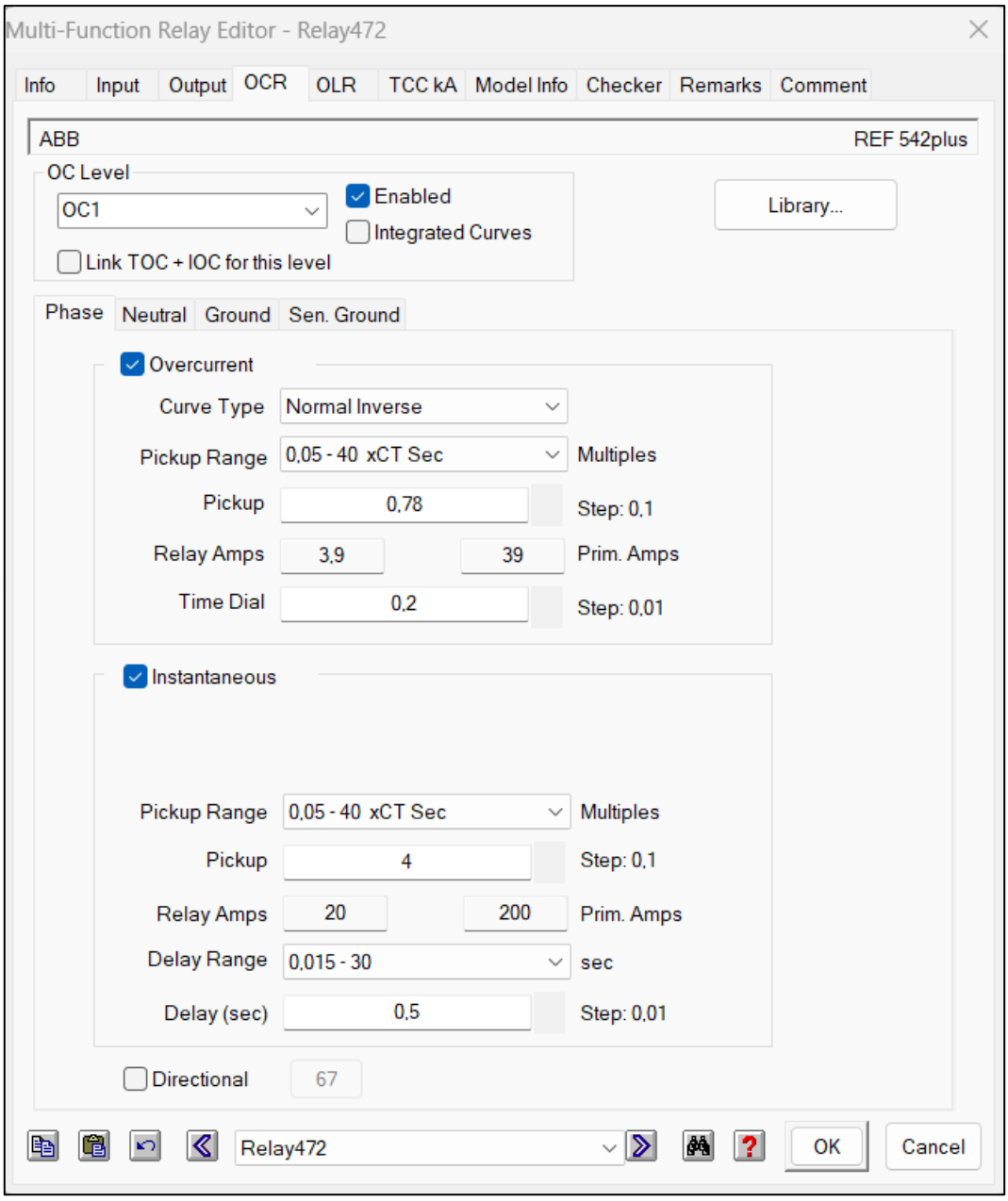
Şekil 6.8 Ulubatlı transformatör merkezi ETAP modeli



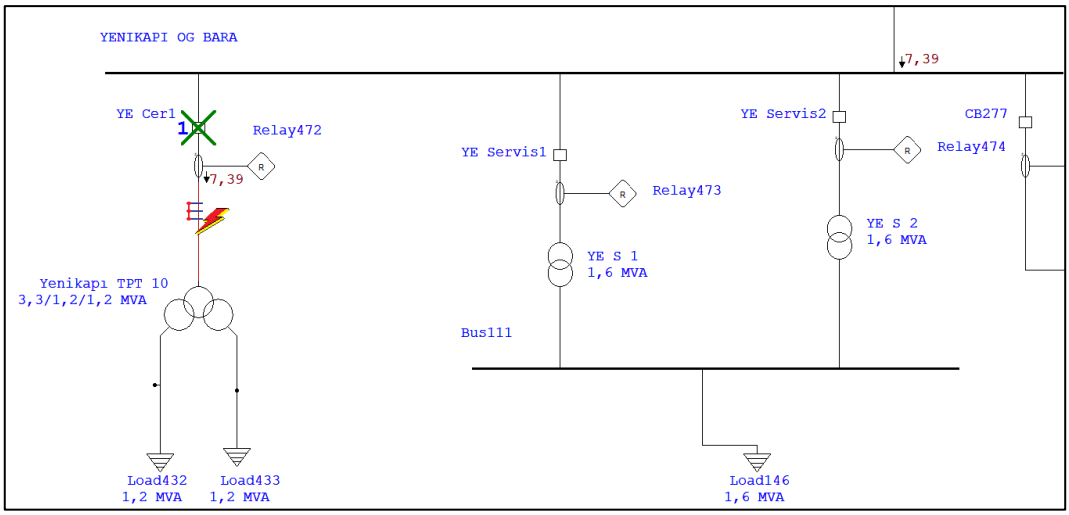
Şekil 6.9 CER trafosuna ait rölenin kumanda ettiği kesici



Şekil 6.10 CER trafosuna ait röleye bağlı akım trafosu



Şekil 6.11 CER trafosuna ait rölenin aşırı akım koruması ayarları



Şekil 6.12 CER trafosu kolunda meydana gelen 3 faz simetrik arıza durumu

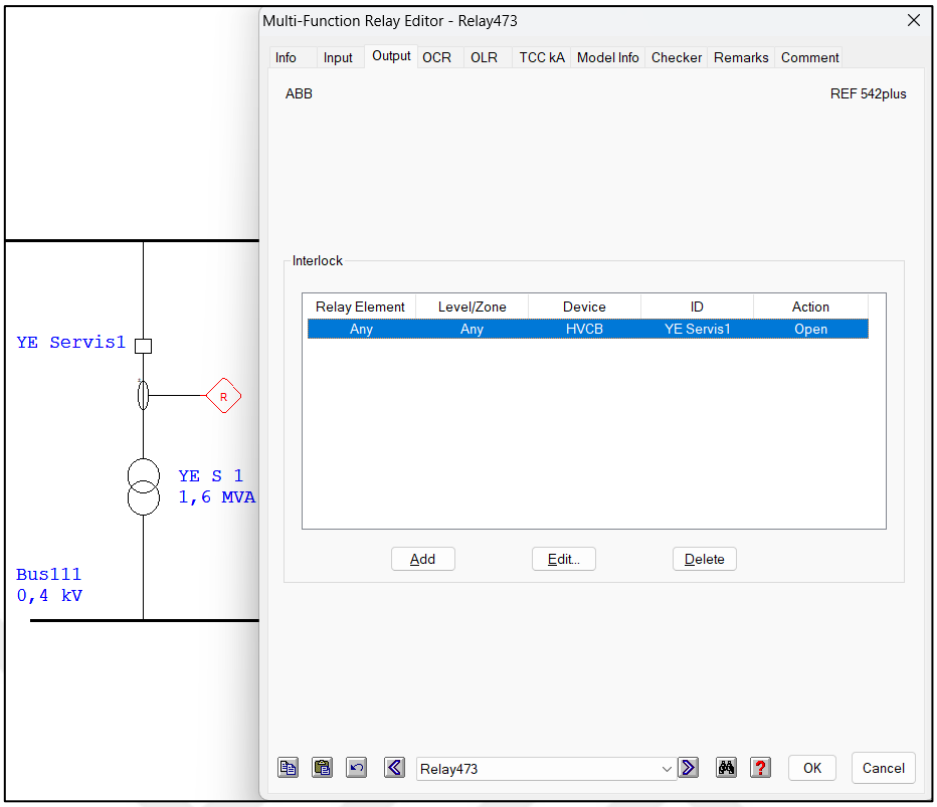
Sequence-of-Operation Events - Output Report: deneme

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between Yenikapı TPT 10 & CT457. Adjacent bus: YENIKAPI OG BARA

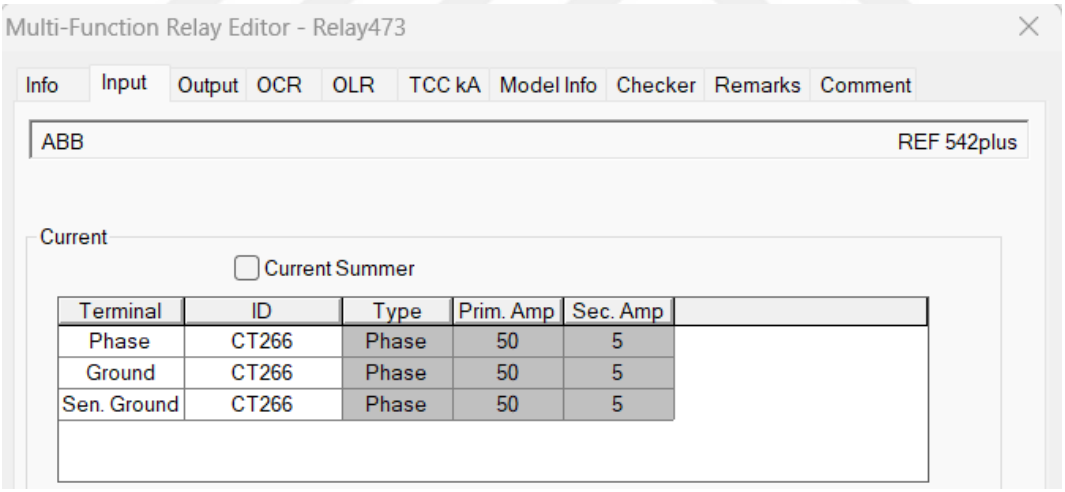
Data Rev.: Base Config: Normal Date: 03-02-2025

Time (...	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
0,4	Relay1	7,392	< 0,4		Overload Acceleration - Accel
0,4	Relay472	7,392	< 0,4		Overload Acceleration - Accel
10,4	YE Cer1		10,0		Tripped by Relay472 Overload Acceler...
40,0	Relay1	7,392	40,0		Jam
40,0	Relay472	7,392	40,0		Jam
50,0	YE Cer1		10,0		Tripped by Relay472 Jam
101	Relay1	7,392	< 101		Overload Phase - Thermal
453	Relay472	7,392	453		Phase - OC1 - 51
463	YE Cer1		10,0		Tripped by Relay472 Phase - OC1 - 51
500	Relay1	7,392	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay472	7,392	500		Phase - OC1 - 50
510	YE Cer1		10,0		Tripped by Relay472 Phase - OC1 - 50
600	Relay2	7,392	600		Phase - OC1 - 50
660	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 50
672	Relay1	7,392	672		Phase - OC1 - 51
1686	Relay2	7,392	1686		Phase - OC1 - 51
1746	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51

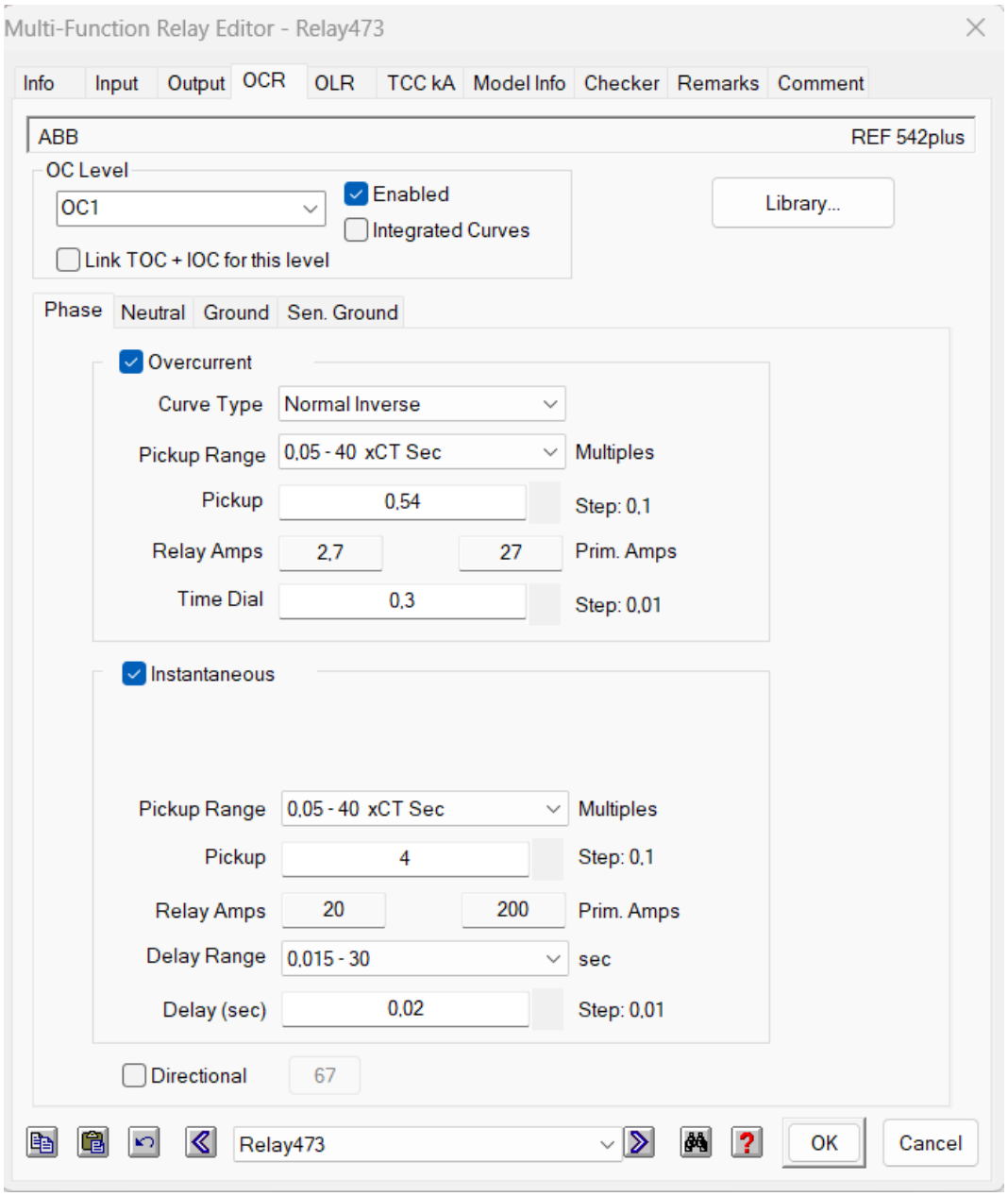
Şekil 6.13 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü



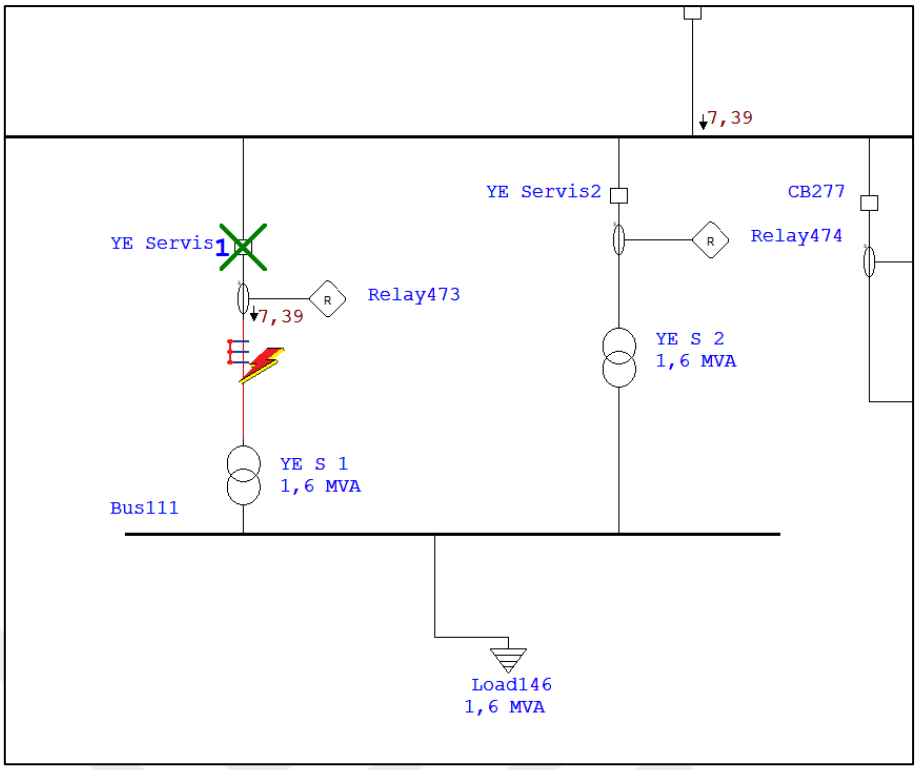
Şekil 6.14 Yardımcı trafoya ait rölenin kumanda ettiği kesici



Şekil 6.15 Yardımcı trafoya ait röleye bağlı akım trafosu



Şekil 6.16 Yardımcı trafoya ait rölenin aşırı akım koruması ayarları



Şekil 6.17 Yardımcı trafo kolunda meydana gelen 3 faz simetrik arıza durumu

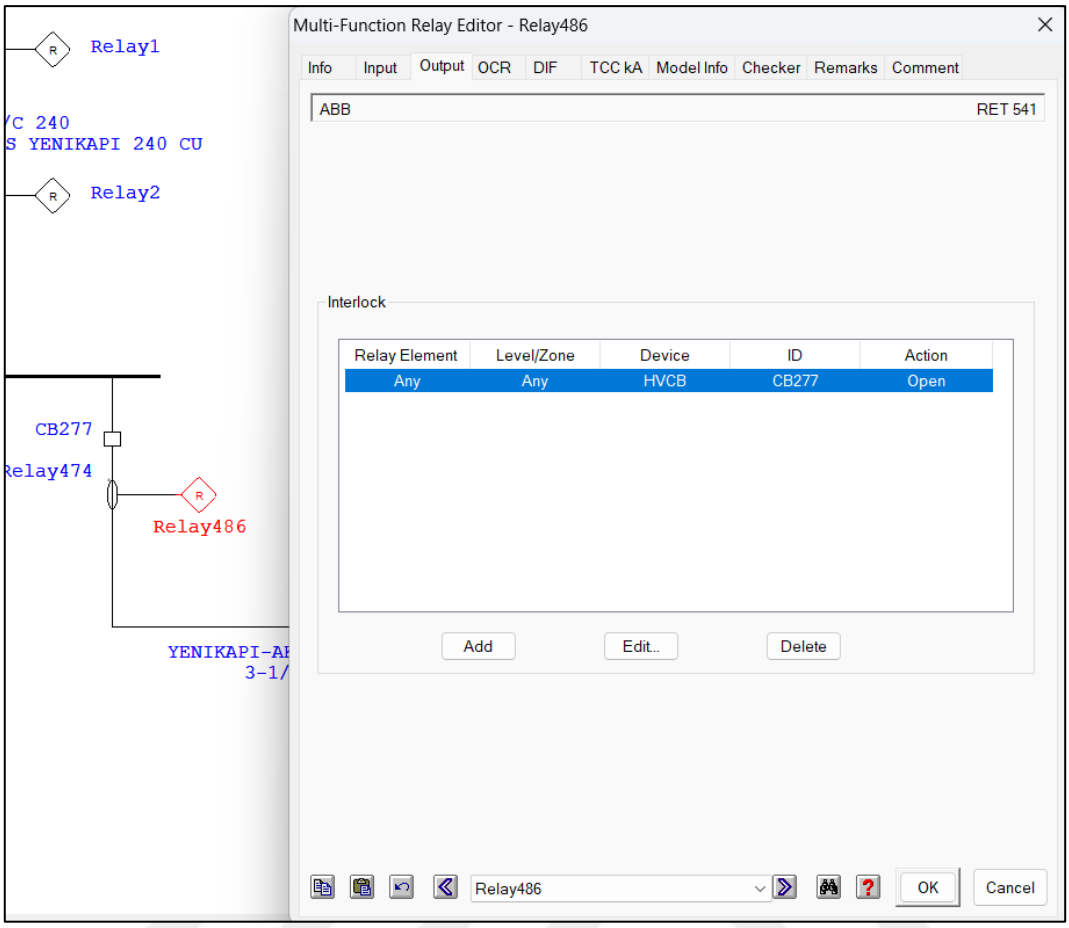
Sequence-of-Operation Events - Output Report: deneme

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT266 & YE S 1. Adjacent bus: YENIKAPI OG BARA

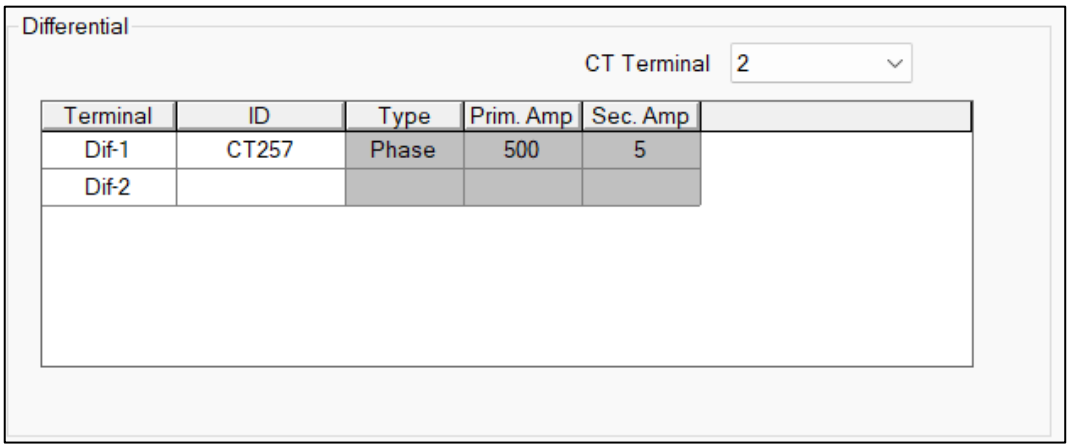
Data Rev.: Base Config: Normal Date: 03-02-2025

Time (...	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
0,4	Relay1	7,392	< 0,4		Overload Acceleration - Accel
0,4	Relay473	7,392	< 0,4		Overload Acceleration - Accel
10,4	YE Servis1		10,0		Tripped by Relay473 Overload Acceler...
20,0	Relay473	7,392	20,0		Phase - OC1 - 50
30,0	YE Servis1		10,0		Tripped by Relay473 Phase - OC1 - 50
40,0	Relay1	7,392	40,0		Jam
40,0	Relay473	7,392	40,0		Jam
50,0	YE Servis1		10,0		Tripped by Relay473 Jam
101	Relay1	7,392	< 101		Overload Phase - Thermal
500	Relay1	7,392	500		Phase - OC1 - 50
600	Relay2	7,392	600		Phase - OC1 - 50
660	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 50
672	Relay1	7,392	672		Phase - OC1 - 51
680	Relay473	7,392	680		Phase - OC1 - 51
690	YE Servis1		10,0		Tripped by Relay473 Phase - OC1 - 51
1686	Relay2	7,392	1686		Phase - OC1 - 51
1746	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51

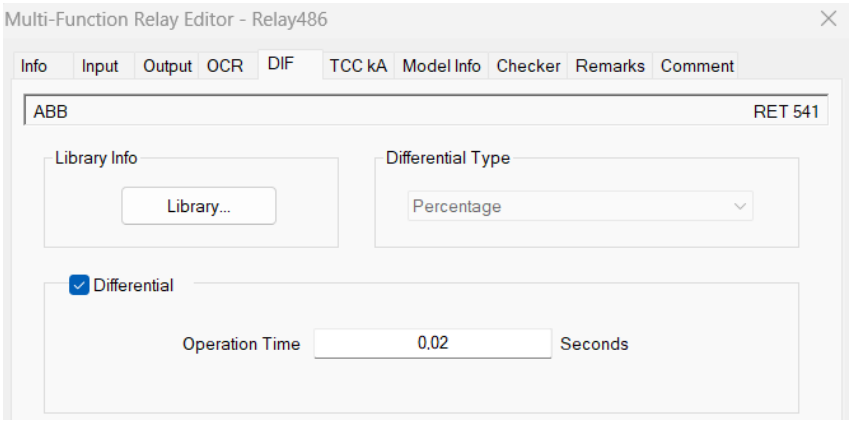
Şekil 6.18 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü



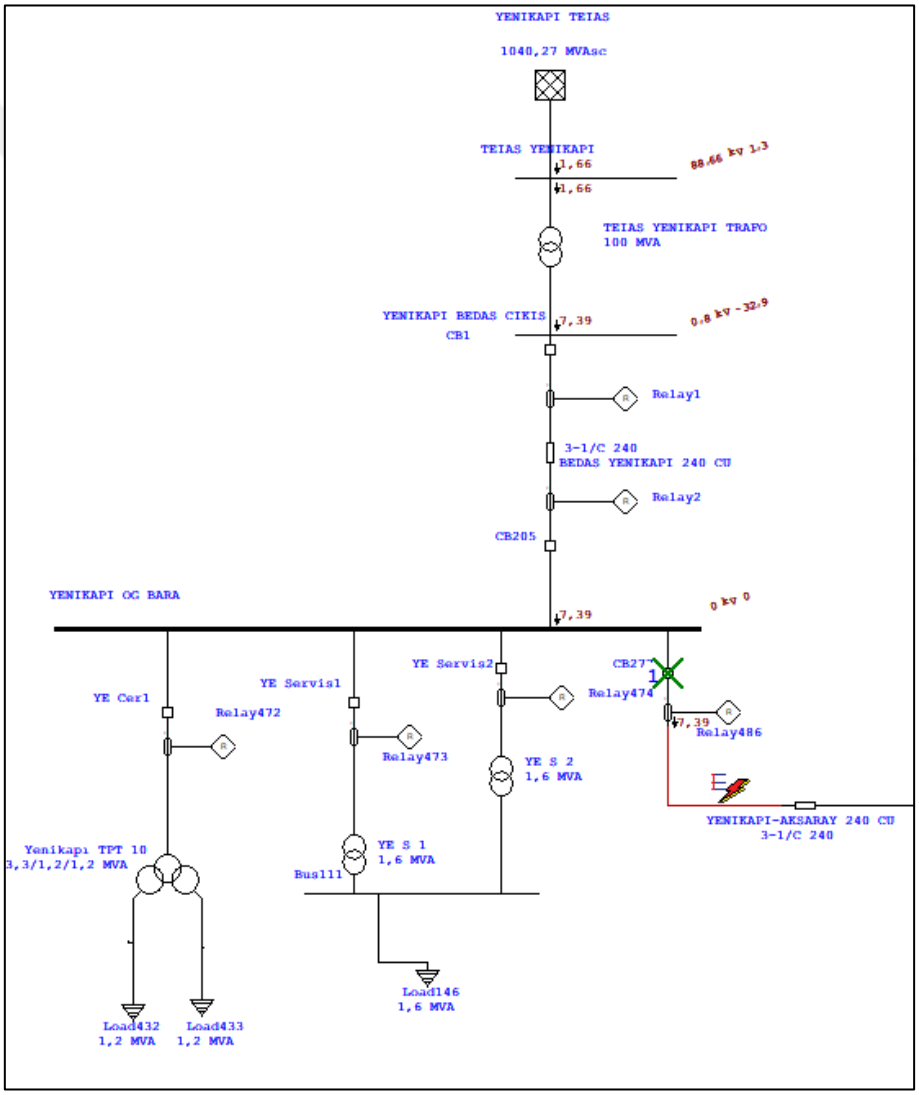
Şekil 6.19 Ring hattına ait diferansiyel rölenin kumanda ettiği kesici



Şekil 6.20 Ring hattına ait röleye bağlı akım trafosu



Şekil 6.21 Ring hattına ait rölenin diferansiyel koruma ayarları



Şekil 6.22 Ring hattında meydana gelen 3 faz arıza

Sequence-of-Operation Events - Output Report: deneme

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT257 & YENIKAPI-AKSARAY 240 CU. Adjacent bus: YENIKAPI OG BARA

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 03-02-2025

Time (...	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
0,4	Relay1	7,392	< 0,4		Overload Acceleration - Accel
20,0	Relay486		20,0		Phase - 87
30,0	CB277		10,0		Tripped by Relay486 Phase - 87
40,0	Relay1	7,392	40,0		Jam
101	Relay1	7,392	< 101		Overload Phase - Thermal
500	Relay1	7,392	500		Phase - OC1 - 50
600	Relay2	7,392	600		Phase - OC1 - 50
660	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 50
672	Relay1	7,392	672		Phase - OC1 - 51
1686	Relay2	7,392	1686		Phase - OC1 - 51
1746	CB205		60,0		Tripped by Relay2 Phase - OC1 - 51

Şekil 6.23 Arıza anında meydana gelen olay örgüsü

7
SONUÇ

Bu tez çalışmasında, raylı sistemler elektrik tesislerinde orta gerilim elektrik sistemlerinin yapısı, bu sistemlerde karşılaşılan arızalar ve bu arızalara karşı kullanılan koruma sistemleri derinlemesine incelenmiştir. Çalışmamızın ana ekseni, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin raylı sistemler elektrik tesislerinde koruma, güvenlik ve sistem performansını artırma üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Raylı ulaşım sistemlerinin tarihçesi ve türlerine ilişkin detaylı bir inceleme yapılmış, bu sistemlerin modern şehirlerdeki önemine vurgu yapılmıştır. Raylı sistemlerde kullanılan orta gerilim elektrik sistemlerinin genel yapısı ve elemanları ayrıntılı olarak ele alınmış; orta gerilim besleme ve ring bölümü, gerilim alçaltma bölümü, AC-DC dönüşüm ve dağıtım bölümü, katener ve ray hattı bileşenleri detaylandırılmıştır.

Orta gerilimde sıkça karşılaşılan arızalar; kısa devreler, toprak arızaları ve faz arızaları olarak sınıflandırılmış ve bu arızaların sistem üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Bu arızalara karşı kullanılan koruma sistemleri; aşırı akım röleleri, diferansiyel röleler, hat koruma röleleri ve diğer ileri düzey koruma mekanizmaları ile incelenmiştir. Özellikle IEC 61850 iletişim protokolünün kullanımı, koruma sistemlerinin etkinliğini artırma ve entegrasyon kolaylığı sağlama açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Hat koruması (87L) üzerine yapılan teknik araştırmalarda, diferansiyel rölelerin orta gerilim sistemlerinde sunduğu yüksek seçicilik ve hızlı müdahale kapasitesi öne çıkmaktadır. Diferansiyel rölelerin arıza anında hızlı ve doğru açma yapabilmesi, sistemin genel güvenliğini artırmakta ve arızaların minimize edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada, diferansiyel rölelerin hem teorik hem de pratik uygulamaları ele alınmış, saha testleri ve OMICRON cihazı ile yapılan testlerle desteklenmiştir.

ETAP programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, bir metro hattının elektriksel yapısının modellenmesini ve bu model üzerinde aşırı akım ve diferansiyel röleler kullanılarak koruma stratejilerinin uygulanmasını içermektedir. Simülasyon sonuçları, rölelerin arıza anında nasıl açma yaptığını ve arıza lokalizasyonunu göstermiştir. Bu simülasyonlar, teorik modellerin pratik uygulamalarla ne kadar uyumlu olduğunu ortaya koymuş, saha testleri ve OMICRON cihazı ile yapılan testlerle doğrulanmıştır.

Simülasyon ve saha testlerinden elde edilen veriler, aşırı akım ve diferansiyel rölelerin arıza tespitinde ve müdahalede sağladığı yüksek hassasiyeti ve güvenilirliği göstermiştir. Özellikle diferansiyel rölelerin, hat korumasında sunduğu üstün performans, sistem güvenliğini ve operasyonel verimliliği artırmada kritik bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışması, raylı sistemler elektrik tesislerinde aşırı akım ve diferansiyel rölelerle sağlanan koruma yöntemlerinin etkinliğini ve bu yöntemlerin sistem güvenliği ve performansını artırmadaki rolünü kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, diferansiyel rölelerin yüksek seçicilik, hızlı müdahale, güvenilirlik, ekonomik verimlilik ve arıza lokalizasyonu konularında üstün performans sergilediğini göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, diferansiyel rölelerin daha geniş kapsamlı saha testleri ile farklı raylı sistem uygulamalarında test edilmesi ve bu testlerden elde edilen verilerin analiz edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, IEC 61850 protokolünün farklı uygulama senaryolarında nasıl optimize edilebileceği ve bu optimizasyonun sistem güvenliği üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

Sonuç olarak, bu tez, raylı sistemler elektrik tesislerinde koruma ve operasyonel verimliliğin artırılması konusunda önemli katkılar sağlamaktadır. Bu çalışma, alandaki araştırmacılar ve mühendisler için sağlam bir referans kaynağı olmakta ve koruma sistemlerinin daha geniş kabul görmesi ve uygulanması için yol göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1.] V. C. Nikolaidis, G. Michaloudis, A. M. Tsimtsios, D. Tzelepis, and C. D. Booth, "A Coordinated Multi-Element Current Differential Protection Scheme for Active Distribution Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 5, pp. 4261-4271, Oct. 2022.

[2.] M. Wen, D. Chen, and X. Yin, "An energy differential relay for long transmission lines," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 56, pp. 147-153, Jan. 2014.

[3.] M. B. Atsever, O. Karacasu, and M. H. Hocaoglu, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks," 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 31 Aug.-3 Sep. 2021,

[4.] T. A. Kawady, A.-M. I. Taalab, and E. S. Ahmed, "Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 5, pp. 390-397, Jun. 2010.

[5.] Q. Dong, H. Wang, B. Chen, N. Zhang, W. T. B. de Sousa, and Y. Liu, "Enhancing grid protection: The crucial role of resistive-type superconducting fault current limiters in transmission line current differential relays," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 156, Feb. 2024.

[6.] M. Qais, U. Khaled, and S. Alghuwainem, "Improved differential relay for bus bar protection scheme with saturated current transformers based on second order harmonics," Journal of King Saud University - Engineering Sciences, vol. 30, no. 4, pp. 320-329, Oct. 2018.

[7.] L. N. Tripathy, M. K. Jena, and S. R. Samantaray, "Differential relaying scheme for tapped transmission line connecting UPFC and wind farm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 60, pp. 245-257, Sep. 2014.

[8.] Y. González and A. Conde, "New Overcurrent Relay Coordination Method Through Time Intervals to Enhance Microgrid Protection," IEEE Access, vol. 9, pp. 166792-166803, Dec. 2021.

[9.] V. A. Solovyev and E. N. Kolobrodov, "High-Speed Algorithm for Detecting the Moment of Mode Change in Protection Based on the Differential Principle," 6th International Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2023.

[10.] S. Gangolu, S. Sarangi, and R. Mohanty, "Relay algorithm for STATCOM compensated line using differential current ratio," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 155, Part A, 109473, Jan. 2024.

[11.] S. Dhar, R. K. Patnaik, and P. K. Dash, "Fault Detection and Location of Photovoltaic Based DC Microgrid Using Differential Protection Strategy," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 5, pp. 4303-4312, Sep. 2018.

[12.] M. Hossain, I. Leevongwat, and P. Rastgoufard, "A Current Transformer (CT) Saturation Detection Method for Bus Differential Protection," Power Systems Conference (PSC), 2018.

[13.] X. Wang, H. Liu, Z. Zhou, Y. Guo, and D. Du, "A current transformer saturation identification method of transmission line based on current sample data," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 2017.

[14.] A. L. M. Coelho and P. M. Silveira, "CT saturation effects on performance of digital overcurrent relays," International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (ADAP2011), Beijing, China, 2011.

[15.] F. Mahfoud, G. C. Lazaroiu, T. Kherbek, and T. Hayder, "Improvement of differential protection performance by external faults associated with a current transformer saturation," International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM), Bucharest, Romania, 2017.

[16.] N. Xu, J. Dong, and S. Zheng, "The impact analysis of current transformer's saturation to relay protection," China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shenzhen, China, 2014.

[17.] A. Hinz, M. Stieneker, and R. W. De Doncker, "Impact and opportunities of medium-voltage DC grids in urban railway systems," 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016.

[18.] S. Sharifi, T. Kamel, and P. Tricoli, "Investigating the best topology for Traction Power Substations (TPSs) in a Medium Voltage DC (MVDC) railway electrification system," 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Ghent, Belgium, 2021

[19.] A. Gómez-Expósito, J. M. Mauricio, and J. Maza-Ortega, "VSC-Based MVDC Railway Electrification System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 1, pp. 422-431, Feb. 2014.

[20.] S. Sharifi, I. F. Ferencz, T. Kamel, D. Petreuş, and P. Tricoli, "Medium-voltage DC electric railway systems: A review on feeding arrangements and power converter topologies," IET Electrical Systems in Transportation, vol. 12, no. 4, pp. 1104-1113, Sep. 2022.

[21.] H. Wang, Z. Cai, Z. Su, and Z. Zhu, "The analysis of relay protection communication mechanism based on IEC61850," Int. Conf. Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Oct. 2011

[22.] Y. Zhao, Z. Gao, Y. Zhu, T. Wang, and R. Mu, "A new virtual relay protection simulation system of substation based on IEC61850 standard," 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, Oct. 2016.

[23.] D. S. Nair and S. Reshma, "Optimal coordination of protective relays," International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), Dindigul, India, Feb. 2013.

[24.] X. Sun, M. A. Redfern, P. A. Crossley, L. Yang, H. Y. Li, and U. B. Anombem, "Design and operation of the IEC61850 9–2 process bus used for the protection system," 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012), Birmingham, UK, Apr. 2012.

[25.] T. Baofeng, L. Xianmei, Y. Xiao, and F. Hui, "Development of dynamic test system for digital relay protection based on IEC61850 standards," The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Oct. 2011.

[26.] J. Song, X. Zou, D. Zhou, B. Shen, P. Zeng, and Y. Zhu, "Research of substation area protection test based on relay protection collaborative testing system," China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shenzhen, China, 23-26 Sep. 2014.

[27.] Farhad, S., Saeed, T., and Seyed, H., "Power Dıstrıbutıon System Analysıs Of Urban Electrified Railways", Power Electronics Specialists Conference, South Korea, 2006.

[28.] Milli Eğitim Bakanlığı MEGEP, (2006), ‘’Raylı Sistem Teknolojisi’’, Ankara

[29.] Keskin, D., “Kent İçi Raylı Sistemlerde Elektromekanik Sistemler Yatırım Maliyetleri,” Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, 2020.

[30.] Aydın, T., “Hafif Raylı Sistemlerin Elektrik Güç Beslemesinde Güvenilirlik Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.

[31.] A. Y. Bahadıroğlu, Tramvay Sistemlerinde Katenersiz Çözümlerin İncelenmesi ve İstanbul Özelinde Katenersiz Sistemler ile Kıyaslanması, Yüksek Lisans Tezi, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı, İstanbul, 2021.

[32.] S. T. Altuntaş, Sürdürülebilir Kent İçi Ulaşım Bakışıyla, İstanbul Kent İçi Raylı Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Karşılaştırma, Yüksek Lisans Tezi, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı, İstanbul, 2021.

[33.] Armin Elektrik, "Raylı Sistemlerin Özellikleri Nelerdir?," [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.armin.com.tr/rayli-sistemlerin-ozellikleri-nelerdir. [Erişim: 12 Ocak 2025].

[34.] Kara, H., “Enerji Tüketim Bazlı AHP Yöntemi İle Raylı Sistem Güzergah Seçimi Ve Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.

[35.] Albrecht, T.,"Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control", Computers in Railways IX, WIT Press, 74: 885-894, 2004.

[36.] F. Karakuş ve R. Yumurtacı, "Raylı Sistemlerde Orta Gerilim Elektrifikasyon Sisteminin Modellenmesi ve Besleme Senaryolarının Belirlenmesi," EMO Bilimsel Dergi, cilt 8, sayı 1, ss. 41-48, Haz. 2018.

[37.] M. Goggioli, "Dry-type Transformers," ABB Data Center Forum, Singapore, 2017.

[38.] Aktif Elektroteknik A.Ş., "Raylı Sistemler," Şubat 2021.

[39.] ABB, “ABB BA Transformers-1-13-Nov-12,” İstanbul, 2012.

[40.] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, “Orta Gerilim Modüler Ölçüm Hücreleri,” Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.

[41.] S. Güldar, "Ölçü Transformatörleri: Elektronik Ölçü Trafoları," Elektrik Mühendisleri Odası, 10 Ekim 2012.

[42.] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, “Elektrik-Elektronik Teknolojisi: Ölçü Transformatörleri,” Mesleki ve Teknik Eğitim Genel Müdürlüğü, Ankara, 2011.

[43.] ABB, “RELION® Protection and Control 615 series Technical Manual,” Document ID: 1MRS756887, Product Version: 5.0 FP1, Revision: Q, Mar. 6, 2023.

[44.] Elektrik Mühendisleri Odası (EMO), “Koruma Röleleri ve İşlevleri,” Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, Türkiye, 2013.

[45.] IEEE Standard Association, "IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations," IEEE Std C37.2-2008, pp. 1–64, Oct. 2008.

[46.] International Electrotechnical Commission, "IEC 60255-151: Measuring relays and protection equipment – Functional requirements for overcurrent protection," IEC, Geneva, Switzerland, 2009.

[47.] Schneider Electric, "Overcurrent Protection for Phase and Earth Faults," SE, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.se.com/ww/en/tools/npag-online-re14y/pdf/C1-Overcurrent_Protection_for_Phase_and_Earthfaults.pdf. [Erişim: 14 Ocak 2025].

[48.] Electeng Materials, "Directional Over Current Relay 67", [Çevrimiçi]. Mevcut: https://electengmaterials.com/directional-over-current-relay-67/#google_vignette. [Erişim: 14 Ocak 2025].

[49.] Electrical Sphere, "Directional Overcurrent Relay Protection in Power System", [Online]. Mevcut: https://electricalsphere.com/directional-overcurrent-relay-protection-in-power-system/#google_vignette. [Erişim: 14 Ocak 2025].

[50.] P. Bishop, and N.-K. C. Nair, “IEC 61850 Principles and Applications to Electric Power Systems,” 2nd ed., Study Committee B5: Protection and Automation, CIGRE Green Books, Compact Studies, CIGRE, Paris, France, 2023.

[51.] K. Wen, "Research on Key Technology of Primary Protection System in Intelligent Substation," IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science,2020.

[52.] Energinet, “Specification of IEC61850 Information Exchange for DER,” Denmark, 2022.

[53.] A. V. Kabović, M. M. Kabović, and V. V. Čelebić, "Software realization on the MSC nanoRISC hardware platform, for communication according to the IEC61850 standard," Telfor Journal, vol. 7, no. 1, pp. 20–25, 2015.

[54.] J. C. Toctaquiza, "Experiencia en la instalación de equipos compactos aislados en gas SF6 a 138 kV en el sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito," Ekim 2021.

[55.] P. Bishop, and N.-K. C. Nair, “IEC 61850 Principles and Applications to Electric Power Systems,” 2nd ed., Study Committee B5: Protection and Automation, CIGRE Green Books, Compact Studies, CIGRE, Paris, France, 2023.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. U.A.Karataş, R.Yumurtacı, F.Karakuş, "Raylı Sistem Elektrik Tesislerinde Diferansiyel Röle Uygulamaları, Güvenlik ve Sistem Performansının Artırılması," 4.Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi, Ankara, 2024.