T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RİNG YAPISINA SAHİP BİR MİKROŞEBEKEDE DİFERANSİYEL VE YÖNLÜ AŞIRI AKIM KORUMA ŞEMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ahmet ERTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RİNG YAPISINA SAHİP BİR MİKROŞEBEKEDE DİFERANSİYEL VE YÖNLÜ AŞIRI AKIM KORUMA ŞEMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Ahmet ERTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 18.02.2026 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

Jüri Üyeleri

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

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

Doç. Dr. Fatma Gülşen ERDİNÇ, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Ring Yapısına Sahip Bir Mikroşebekede Diferansiyel ve Yönlü Aşırı Akım Koruma Şemalarının Karşılaştırmalı Analizi" 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.

Ahmet ERTAŞ

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Biz gençlere açtığı aydınlık yol, ilim ve irfan dolu eşşiz mirası için, cumhuriyetimizin kurucusu, büyük önder Gazi Mustafa Kemal Atatürk'e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım. Onun vizyonu ışığında, ülkemize faydalı bir birey olabilmek benim için en büyük motivasyon kaynağıdır.

Tez çalışmamın her aşamasında engin bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Recep Yumurtacı'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimimle eş zamanlı yürüttüğüm profesyonel iş hayatımda, bana sağladıkları imkanlar ve gösterdikleri anlayış için Siemens A.Ş. ailesine ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, her kararımda yanımda duran ve desteklerini benden esirgemeyen kıymetli aileme şükranlarımı sunarım. Özellikle, karşılıksız sevgisiyle beni büyüten, iyi bir insan olmanın önemini anlamamı sağlayan, fedakârlığı ve emekleriyle hayatımın mimarı olan anneme; hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim sonsuz sevgisi için minnettarım.

Son olarak, bu yoğun sürecin her anında sabrıyla ve sevgisiyle yanımda olan, her zorluğu birlikte aştığımız hayat arkadaşım, varlığıyla bana güç veren sevgili eşime yürekten teşekkür ederim.

Ahmet ERTAŞ

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Giriş ve Motivasyon....1

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 2

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

2.1 Mikroşebekelerde Koruma Yaklaşımlarına Genel Bakış....3

2.2 Mikroşebekelerde Koruma Zorlukları 3

2.2.1 Değişken Kısa Devre Akım Seviyeleri 4

2.2.2 Çift Yönlü Güç Akışı 5

2.2.3 İnverter Tabanlı Dağıtık Üretim Kaynaklarının Davranışı 6

2.2.4 Şebeke Topolojisi ve Ring Yapılar 6

2.2.5 İşletme Koşullarının Değişimi 7

2.3 Geleneksel ve Modern Koruma Teknikleri....8

2.3.1 Yönsüz ve Yönlü Aşırı Akım Koruması 8

2.3.2 Diferansiyel Koruma 10

2.3.3 Adaptif ve Hibrit Koruma Yaklaşımları 13

2.4 Karşılaştırmalı Çalışmalar ve Literatürdeki Açıklar....15

3 MİKROŞEBEKELER VE KORUMA TEKNİĞİ **18**

3.1 Mikroşebeke Tanımı ve Yapısı.....18

3.2 Koruma Tekniği ve Röleler.....19

3.2.1 Aşırı Akım Koruması 21

3.2.2 Yönlü Aşırı Akım Koruması 29

3.2.3 Diferansiyel Koruma 35

4 SİSTEM MODELİ VE METODOLOJİ **42**

4.1 Simulasyon Ortamı 42

4.2 Mikroşebeke Test Sistemi Topolojisi 43

4.3 Primer Sistem Bileşenleri.....44

4.3.1 Diferansiyel Koruma 44

4.3.2 Transformatörler 44

4.3.3 Dağıtım Hatları 45

4.3.4 Eşdeğer Şebeke 46

4.4 Koruma Sistem Modeli 47

4.4.1 Ölçü Transformatörleri 47

4.4.2 Yönlü Aşırı Akım Koruması 47

4.4.3 Diferansiyel Koruma 53

4.5 Kısa Devre Analizi ve Model Değerlendirmesi 53

4.6 Metodolojik Yaklaşım.....54

5 SİMULASYON SENARYOLARI VE SONUÇLARI **56**

5.1 Giriş.....56

5.2 Simulasyon Senaryoları 56

5.3 Arıza Koşulları 57

5.4 Kısa Devre Analizleri.....59

5.5 Koruma Ayar Stratejileri ve Simulasyon Sonuçları 60

5.5.1 Transformatör Çıkış Fideri Ayarları 60

5.5.2 Dağıtım Hattı Fideri Koruma Ayarları 63

5.5.3 Transformatör Çıkış Fideri Sonuçları 64

5.5.4 Dağıtım Hattı Fideri Sonuçları 74

5.6 Karşılaştırmalı Tartışma 81

6 SONUÇ **83**

6.1 Genel Özet 83

6.2 Temel Bulgular 83

6.3 Pratik Değerlendirmeler 85

6.4 Çalışmanın Katkıları 86

6.5 Gelecek Çalışmalar için Öneriler 87

KAYNAKÇA **88**

A MİKROŞEBEKE TEK HAT DİYAGRAM **92**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **93**

KISALTMA LİSTESİ

AG	Alçak Gerilim
ANSI	American National Standards Institute
APA	Advanced Protection Assessment
CAPE	Computer Aided Protection Engineering
CT	Current Transformer
CTI	Coordination Time Interval
CWA	Continuous Wavelet Analysis
DG	Distributed Generation
DLG	Double Line to Ground Fault
GA	Genetic Algorithm
GOOSE	Generic Object-Oriented Substation Events
GPS	Global Positioning System
IEC	International Electrotechnical Commission
LP	Linear Programming
LTL	Line-to-Line Fault
MVA	Mega Volt Ampere
PCC	Point of Common Coupling
PMU	Phasor Measurement Unit
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power System Simulator
PTP	Precision Time Protocol
PU	Per Unit
PV	Photovoltaic
RKA	Röle Karakteristik Açısı
SV	Sampled Values
TCC	Time Current Characteristic
TMS	Time Multiplier Setting
TPH	Three Phase Fault

VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VT	Voltage Transformer
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Örnek bir mikroşebeke yapısı **18**
Şekil 3.2 Aşırı akım rölesi [38] **22**
Şekil 3.3 Sabit zamanlı aşırı akım röle karakteristiği **24**
Şekil 3.4 Ters zamanlı aşırı akım röle karakteristiği **24**
Şekil 3.5 Ters zamanlı aşırı akım karakteristikleri **26**
Şekil 3.6 Akım selektivitesi **27**
Şekil 3.7 Zaman selektivitesi **28**
Şekil 3.8 Lojik selektivite [42] **28**
Şekil 3.9 Yönlü aşırı akım röle çalışma bölgeleri [44] **30**
Şekil 3.10 Polarizasyon gerilimi ve akımlar **31**
Şekil 3.11 Yönlü toprak korumada ölçülen I0 ve V0 değerleri [38] **31**
Şekil 3.12 Yönlü toprak korumada ölçülen akım ve gerilim değerleri [38] **32**
Şekil 3.13 Paralel çalışan hatlarda yönlü aşırı akım koruma **33**
Şekil 3.14 Paralel çalışan trafolarda yönlü aşırı akım koruma **34**
Şekil 3.15 Kapalı ring yapısında yönlü aşırı akım koruma **35**
Şekil 3.16 Bir düğüm noktasına giren ve çıkan akımlar **36**
Şekil 3.17 Dış arıza durumunda diferansiyel rölenin davranışı **36**
Şekil 3.18 İç arıza durumunda diferansiyel rölenin davranışı **37**
Şekil 3.19 Diferansiyel röle eğim karakteristiği [46] **38**
Şekil 3.20 Diferansiyel röle akım trafosu doyumunda akım davranışı **40**
Şekil 3.21 Akım dalga şekli analizi [46] **41**
Şekil 4.1 Mikroşebeke tek hat diyagramı **43**
Şekil 4.2 Eşdeğer şebeke girdi verileri **46**
Şekil 5.1 Dağıtım hattı arıza noktaları **58**
Şekil 5.2 Transformatör arıza noktaları **58**
Şekil 5.3 Transformatör çıkışı faz akım-zaman eğrisi **62**
Şekil 5.4 Transformatör çıkışı toprak HV akım-zaman eğrisi **62**
Şekil 5.5 Transformatör çıkışı toprak LV akım-zaman eğrisi **63**
Şekil 5.6 Dağıtım hattı faz akım-zaman eğrisi **64**

Şekil 5.7 Dağıtım hattı toprak akım-zaman eğrisi **.....64**
Şekil 5.8 Transformatör çıkışları arıza simulasyon sonuçları (aşırı akım) [51] **..65**
Şekil 5.9 T5 transformatör çıkışı sekonder taraf arıza (Senaryo-B/aşırı akım)**...68**
Şekil 5.10 T5 transformatör çıkışı sekonder taraf arıza (Senaryo-A/aşırı akım)**...68**
Şekil 5.11 T3 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-B/aşırı akım)**.....69**
Şekil 5.12 T3 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-A/aşırı akım) **.....70**
Şekil 5.13 Transformatör çıkışları arıza simulasyon sonuçları (diferansiyel)[51] **71**
Şekil 5.14 T5 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-A/diferansiyel) **...73**
Şekil 5.15 T5 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-B/diferansiyel)**....74**
Şekil 5.16 Dağıtım hattı çıkışları arıza simulasyon sonuçları (aşırı akım) [51] **....75**
Şekil 5.17 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-A/aşırı akım) **.....77**
Şekil 5.18 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-B/aşırı akım)**.....78**
Şekil 5.19 Dağıtım hattı çıkışları arıza simulasyon sonuçları (diferansiyel) [51] **.78**
Şekil 5.20 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-A/diferansiyel)**.....81**
Şekil 5.21 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-B/diferansiyel)**.....81**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Aşırı akım koruma ANSI kodu ve IEC sembolu [39]**.....23**
Tablo 3.2 Ters zamanlı röle karakteristikleri [37]**.....25**
Tablo 4.1 Mikroşebeke test sistemi transformatör verileri **.....45**
Tablo 4.2 Mikroşebeke test sistemi hat verileri **.....45**
Tablo 4.3 Mikroşebeke modeli akım ve gerilim transformatörleri **.....47**
Tablo 4.4 Aşırı akım röleleri faz ayarları**.....48**
Tablo 4.5 Aşırı akım röleleri toprak ayarları **.....51**
Tablo 5.1 Çalışma senaryoları**.....57**
Tablo 5.2 Kısa devre analiz sonuçları**.....60**
Tablo 5.3 Transformatör çıkış fiderleri aşırı akım simulasyon sonuçları**.....66**
Tablo 5.4 Transformatör çıkış fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları **.....71**
Tablo 5.5 Dağıtım hattı fiderleri aşırı akım koruma simulasyon sonuçları **.....75**
Tablo 5.6 Dağıtım hattı fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları **.....79**

ÖZET

Ring Yapısına Sahip Bir Mikroşebekede Diferansiyel ve Yönlü Aşırı Akım Koruma Şemalarının Karşılaştırmalı Analizi

Ahmet ERTAŞ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Dünyada enerji ihtiyacının gün geçtikçe artması ve dağıtık üretim birimlerinin şebekeye engtegrasyonuyla birlikte güç sisteminde şebeke yapısı değişmektedir. Üretim kaynakları, depolama birimleri ve kontrol edilebilen yüklere sahip olan mikroşebekeler, farklı işletme koşulları altında enerji sürekliliğini sağlayabilmesi, daha kontrol edilebilir bir şebeke yapısı sunması ve verimliliğin artması gibi avantajlarının olmasıyla birlikte koruma koordinasyon açısından zorlukları da beraberinde getirmektedir. Mikroşebekelerde yönlü aşırı akım röleleri, basit olmaları, maliyetleri ve uygulama pratikliğiyle en çok kullanılan koruma yöntemlerindendir. Ancak yönlü aşırı akım koruma rölelerinin etkinlikleri, dinamik bir yapıya sahip olan mikroşebekelerde farklı işletme koşulları altında ve farklı arıza akımı seviyelerinde olumsuz şekilde etkilenebilmektedir. Öte yandan diferansiyel koruma röleleri, sistemin işletme yapısından bağımsız olarak koruma bölgeleri içindeki arızalarda hızlı arıza tespitiyle birlikte seçici bir koruma yapabilmektedir. Bununla birlikte diferansiyel koruma şemaları görece yüksek maliyetlidir ve sağlam bir haberleşme altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma, ring yapısına sahip bir mikroşebekede yönlü aşırı akım ve diferansiyel koruma

şemalarının karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. PSS®Sincal ve Gridscale X APA yazılımları kullanılarak modellenen mikroşebekede iki temel senaryo incelenmiştir. 350'den fazla arıza simulasyonu, şebekeye bağlı ve dağıtık üretim kaynaklarının devrede olduğu ve dağıtık üretim kaynaklarının devre dışı olup yalnızca şebekeden beslenme yapıldığı iki senaryo için analiz edilmiştir. Çalışma sonuçları, şebekede yeterli kısa devre akımının bulunduğu durumlarda yönlü aşırı akım rölelerinin verimli ve seçici koruma yaptığını fakat kısa devre akımının yeterli seviyede olmadığı senaryolarda güvenli bir koruma yapılamayabileceğini göstermiştir. Öte yandan diferansiyel koruma, şebekenin işletme yapısından ve gücünden bağımsız olarak her iki senaryoda da hızlı ve seçici bir koruma sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikroşebeke, yönlü aşırı akım koruma, diferansiyel koruma

ABSTRACT

Comparative Analysis of Differential and Directional Overcurrent Protection Schemes in a Ring-Structured Microgrid

Ahmet ERTAŞ

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep YUMURTACI

The grid structure of the power system is changing as a result of the global energy demand and the integration of distributed generation units into the grid. Microgrids, which have generation sources, storage units, and controllable loads, offer benefits such as ensuring energy continuity under different operating conditions, providing a more controllable grid structure, and increasing efficiency, but also bring challenges in terms of protection and coordination. In microgrids, directional overcurrent relays are among the most widely used protection methods due to their simplicity, cost-effectiveness and practicality. However, the effectiveness of directional overcurrent protection relays can be negatively affected under different operating conditions and at different fault current levels in microgrids, which have a dynamic structure. On the other hand, differential protection relays can provide selective protection with rapid fault detection in the event of faults within the protection zones, regardless of the system's operating structure. However, differential protection schemes are relatively expensive and require a robust communication infrastructure. This study presents a comparative analysis of directional overcurrent and differential protection schemes in a microgrid with a ring structure. Two main scenarios were examined in a microgrid modeled using

PSS®Sincal and Gridscale X APA software. Over 350 fault simulations were analyzed for two scenarios: one where grid-connected and distributed generation resources were active, and another where distributed generation resources were offline and power was supplied solely from the grid. The study results showed that directional overcurrent relays provide efficient and selective protection when sufficient short-circuit current is present in the network but may not provide reliable protection in scenarios where the short-circuit current is insufficient. On the other hand, differential protection provided fast and selective protection in both scenarios, regardless of the network's operating structure and power.

Keywords: Microgrid, directional overcurrent protection, differential protection

1
GİRİŞ

1.1 Giriş ve Motivasyon

Dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye gün geçtikçe artan entegrasyonu, modern elektrik şebekelerinin yapısını ve işletmesini büyük ölçüde dönüştürmüştür. Geleneksel radyal dağıtım şebekeleri, zamanla daha dinamik ve merkezden uzak üretim kaynaklarının bulunduğu yapılara evrilerek hem şebeke bağlantılı hem de ada modunda çalışabilme yeteneğine sahip hale gelmiştir. Mikroşebekeler, değişmekte ve gelişmekte olan modern güç sistemlerinde güvenilirlik, esnek işletme koşulları sağlaması ve verimliliğin artması gibi konularda önemli faydalar getirmektedir. Mikroşebekeler; dağıtık üretim kaynakları, enerji depolama sistemleri ve kontrol edilebilir yüklerden oluşan hem ana şebeke ile birlikte hem de şebekeden bağımsız olarak ada modunda çalışabilen yapılardır.

Mikroşebekeler enerji sürekliliği sağlama anlamında ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte çevresel anlamda önemli avantajlar sunmakla birlikte, koruma sistemi tasarımı ve koordinasyonu açısından yeni zorlukları da beraberinde getirir. Geleneksel radyal şebekelerde sistem empedansıyla birlikte arıza akımı seviyeleri sabit ve tek yönlü güç akışı olduğundan, klasik koruma yöntemleriyle koruma koordinasyon görece kolay şekilde sağlanabilir. Ancak mikroşebekelerde güç akışının çok yönlü olması, güç elektroniği tabanlı üretim kaynaklarının senkron generatörlere göre çok daha düşük arıza akımı katkısı sağlamaları ve ada modunda çalışma olasılığıya birlikte ana şebekeden gelecek olan yüksek miktardaki kısa devre katkısının olmama durumu, arızanın tespitini ve seçici bir koruma yapısı oluşturmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle mikroşebekelerde güvenilir koruma koordinasyon sağlamak için yeni koordinasyon yaklaşımlarına ve ayar optimizasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması, PSS®Sincal ve GridScale X APA yazılımında modellenenen ring yapısına sahip bir mikroşebede diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma şemalarının farklı işletme koşulları altındaki ve farklı arıza tiplerindeki davranışlarının karşılaştırmalı bir analizini gerçekleştirmeyi hedeflemektedir.

Çalışmanın temel gayeleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Senkron generatörler ve yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretim kaynakları, ana şebeke bağlantısı ve kontrol edilebilir yüklerden oluşan tipik bir mikroşebeke test modeli oluşturmak.
- Bu modele koruma felsefesi olarak yönlü aşırı akım ve diferansiyel koruma fonksiyonlarını uygulamak.
- Koruma yapısının iki farklı işletme senaryosu altında davranışını incelemek:
    a) Dağıtık üretimin devrede olduğu şebeke bağlantılı işletme,
    b) Dağıtık üretimin devre dışı olduğu yalnızca şebeke beslemeli işletme.
- Farklı arıza noktalarında gerçekleştirilen farklı tiplerdeki arızaların her iki koruma şeması altında, seçicilik performansını ve güvenilirliğini karşılaştırmak.

Bu çalışma yeni bir koruma algoritması yapısı geliştirmeyi amaçlamamakta olup sık kullanılan mevcut koruma yöntemlerinin gerçekçi mikroşebeke koşulları altında performanslarını değerlendirmeye odaklanmaktadır. Elde edilen sonuçların, düşük arıza akımı seviyelerinde ve çift yönlü enerji akışı durumlarında yönlü aşırı akım korumasının sınırlamalarını ortaya koyması ve diferansiyel korumanın sağladığı teknik üstünlüğü pratik gereklilikler çerçevesinde açıklığa kavuşturması beklenmektedir.

2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Mikroşebekelerde Koruma Yaklaşımlarına Genel Bakış

Mikroşebekeler, genellikle enterkonnekte dağıtık üretim kaynaklarını, kritik olan ve kritik olmayan yükleri ve lokal depolama sistemlerini içeren şebekeye bağlı ve ada modunda çalışabilen yapılar bütünü olarak tanımlanabilir. Mikroşebekeler, dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonuyla birlikte ana şebekeden bağımsız ada modunda veya ana şebekeyle koordineli bir şekilde çalışabilirler. Bu özellikleri, mikroşebekeleri modern güç sistemlerinin temel ve önemli bileşenlerinden biri haline getirmiştir. Mikroşebekeler güvenilirliğin artması, şebekeyi daha iyi kontrol etme yeteneği sağlaması ve enerji verimliliğinin artması gibi faydalarının olmasıyla beraber koruma sistemi tasarımı ve koordinasyonu açısından bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Geleneksel koruma felsefesi güç sistemindeki tek yönlü güç akışı, sabit empedans ve kısa devre seviyelerine göre geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, mikroşebekelerdeki dinamik işletme koşulları altında seçici bir koruma yapılabilmesi adına yetersiz kalmaktadır [1].

Bu bölümde, mikroşebekelerde koruma koordinasyon yapılmasına ilişkin temel zorluklar ele alınmakta, literatürde önerilen geleneksel ve modern koruma yöntemleri özetlenmekte ve bu tezde diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma yöntemlerinin karşılaştırılmasına neden ihtiyaç duyulduğu açıklanmaktadır.

2.2 Mikroşebekelerde Koruma Zorlukları

Mikroşebekelerde gerçekleştirilen koruma koordinasyonu, tek yönlü güç akışının olduğu geleneksel dağıtım şebekelerine göre daha karmaşık ve zordur. Değişken kısa devre akım seviyelerinin varlığı, çift yönlü güç akışı, inverter tabanlı dağıtık

üretim kaynaklarının şebekede baskın olması, şebeke konfigürasyonu ve işletme koşullarının sürekli değişmesi bu zorlukların en temel kaynaklarıdır.

Literatürde mikroşebekelerde gerçekleştirilen koruma koordinasyon çalışmalarında, bu zorlukların koruma sistemlerinin güvenilirliğini, seçiciliğini ve hızını direkt olarak etkilediği belirtilmektedir [1], [2].

2.2.1 Değişken Kısa Devre Akım Seviyeleri

Mikroşebekelerde arıza akım seviyeleri, sistemin şebekeye bağlı veya ada modunda çalışmasına ve dağıtık üretim kaynaklarının tipine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Şebekeye bağlı işletme modunda, ana şebekenin katkısı sayesinde arıza akımları görece yüksek seviyelerdeyken, ada modu işletme modunda arıza akımları çok daha küçük seviyelerdedir. Bu durum, konvansiyel aşırı akım rölelerinin seçici şekilde çalışmasını engelleyebilmektedir.

Rezaei ve Uddin [1], mikroşebekelere bağlanan inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının özellikle ada modunda çalışmada bir kısa devre durumu meydana geldiğinde, arıza akımına katkılarının nominal akımlarının 2-3 katında sınırlandırıldığını ve bu durumda aşırı akım koruma rölelerinin kör kalabildiğini yani koruma cihazlarının açma eşik değerinin mevcut kısa devre seviyesinden daha küçük olabileceğini veya arıza tespitiyle rölelerin çalışması için çok uzun çalışma zamanı gerekebileceğini belirtmiştir. Bunun sonucunda da arızalı kısmın izole edilemeyip arızanın daha çok büyüdüğü ve yıkıcı hale geldiği durumlarda karşılaşılabildiği ifade edilmiştir. Benzer şekilde Rath ve ark. [2], dinamik ve belirsiz arıza akımı durumunun varlığı ve evirici tabanlı üretim kaynaklarının güç elektroniği anahtarlamalarından kaynaklı limitli kısa devre katkısının rölelerin arıza tespiti yapacak kadar kısa devre katkısı yapamamasına ve kör kalmasına sebep olabileceğini belirtmektedir.

Ayvaz [3] tarafından gerçekleştirilen araştırmada ise, dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonunun sayısı arttıkça güç kalitesi anlamında aktif güç kaybının azalması ve reaktif güç kaybının artması olumlu bir çıktı olarak elde edilse de arıza akımına olan katkı da büyük miktarda artacağı için rölelerin açma sürelerinin kısalacağı, primer röle ile yedek röle arasındaki güvenli zaman aralığının bozulabileceği ve koruma koordinasyonun olumsuz anlamda etkilenebileceği vurgulanmaktadır.

Mikroşebekelerin dinamik yapısı, kısa devre akım seviyelerinin çok değişken seviyelerde olabilmesine ve koruma koordinasyon anlamında sorunlara yol açabilmektedir. Buna bağlı olarak, mikroşebekelerde yeni ve dinamik koruma yaklaşımlarının değerlendirilmesine ve uygulanmasına ihtiyaç olduğu açıktır.

2.2.2 Çift Yönlü Güç Akışı

Dağıtık üretim kaynaklarının güç sisteminin farklı noktalarından şebekeye bağlanması, hem normal yük koşulları altında hem de arıza durumlarında çift yönlü güç akışının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, geleneksel yönsüz aşırı akım rölelerinin doğru çalışması noktasında önemli bir engel olmaktadır.

Srivastava ve ark. [4], mikroşebekelerde dağıtık üretim kaynaklarının penetrasyonun artmasıyla çift yönlü güç akışının oluşması ve buna bağlı olarak geleneksel tek yönlü akım varsayımını kullanan koruma sistemlerinin sorun yaşayabileceğini göstermiştir. Mikroşebekelerde yönsüz koruma rölelerinin kullanımı, rölelerin arıza tespiti yapamayıp körleşmesine, yanlış açmaya ve koordinasyonun bozulmasına sebep olabilir. Benzer şekilde, Karimi ve ark [5], çift yönlü güç akışının güç ihtiyacının çok olduğu durumlarda enerji sağlama, sürekli ve kararlı bir şebeke oluşturma gibi faydalarının olmasıyla birlikte koruma açısından özenle değerlendirilmesi gereken bir nokta olduğunu ifade etmiştir. Arıza akımının yönünün tespiti son derece önem arz etmektedir. Arıza yönünün tespiti yapılmadığı takdirde, arızalı bölgeye uzak olan ve çalışmaması gereken röleler açabilir ve normal işletmesine devam etmesi gereken baraların ve bölgelerin enerjisi arızalı olmamasına rağmen kesilebilir.

Çift yönlü güç akışından kaynaklı sorunları gidermek adına yönlü aşırı akım röleleri tercih edilse de, dağıtık üretim kaynaklarının sayısı arttıkça kısa devre akımının yönünün dinamik olarak değişmesi ya da yön tayini için gerilim bilgisini kullanan yönlü rölelerin baraya veya kaynağa yakın arızalarda gerilim bilgisini okuyamayıp yön tayini yapamadığı koşullarda seçici ve güvenilir bir koruma yapılma durumu ortadan kalkabilmektedir. Bu çerçevede Beikbabaei ve ark. [6], yön bilgisini direkt hesaplayan röle lojikleri yerine çift yönlü güç akışından kaynaklı elektriksel davranışları veri temelli olarak makine öğrenmesiyle tespit eden bir koruma felsefesinin özellikle inverter temelli üretim kaynaklarının baskın olduğu şebekelerde çok daha faydalı olabileceğini ifade etmiştir.

2.2.3 İnverter Tabanlı Dağıtık Üretim Kaynaklarının Davranışı

Senkron generatörlerin aksine inverter tabanlı dağıtık üretim kaynakları, kendilerini ve güç elektronik bileşenlerini yüksek kısa devre akımlarından koruyup sağlıklı bir işletme sağlayabilmek amacıyla arıza akımına sınırlı seviyede katkı sağlarlar. Bu durum, mikroşebekelerde arıza akımlarının hem büyüklüğüne hem de karakteristiğine etki etmektedir.

Sanati ve ark. [7], inverter temelli dağıtık üretim kaynakların fazla sayıda olduğu mikroşebekelerde geleneksel aşırı akım rölelerinin hassasiyetinin önemli şekilde azaldığını belirtmiştir. Ayrıca inverter kontrol algoritmalarının arıza anındaki davranışı, ölçülen akım dalga şekillerinin normal işletme koşullarındaki durumundan farklı olmasına neden olabilmektedir.

Altaf ve ark. [8], inverter temelli üretim kaynaklarının bulunduğu mikroşebekelerde koruma felsefelerinin oluşturulmasında yalnızca akım büyüklüğüne dayalı kriterlerin yetersiz kaldığını ve alternatif koruma prensiplerinin değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Mikroşebekeler için oluşturulan koruma felsefesinin akım set değerinin aşıldığında çalışma mantığından çok dalga şekli analizi, enerji ve empedans değişimi gibi farklı yöntemlerden faydalanması gerektiği çalışmanın çıktısı olarak ifade edilmektedir.

2.2.4 Şebeke Topolojisi ve Ring Yapılar

Mikroşebekeler, enerji sürekliliğini sağlamak, yüklerin gerektiğinde devreye alınıp gerektiğinde devreden çıkarılabildiği daha esnek bir işletme yapısının olduğu ring yapılarda çalışabilmektedir. Ancak ring topolojiler, birden fazla güç akış yolu oluşturduğu için koruma bölgelerinin tanımlanmasını ve aşırı akım rölelerinin koordinasyonunu zorlaştırmaktadır.

Satpathy ve ark. [9], mikroşebekelerdeki dinamik yapıdan dolayı geleneksel aşırı akım koruma yöntemlerinin her koşulda seçiciliği sağlayamadığını ifade etmiştir. Farklı topolojilerde arıza akımının farklı kaynaklardan beslenmesi durumundan dolayı aşırı akım röleleri gecikmeli veya yanlış çalışabilmektedir. Ayrıca, bakım ve enerji yönetimi sağlamak adına şebekede yapılabilecek değişiklikler de sabit ayarlı rölelerin sempatik açma yapmasına yani sağlam olan fiderin açmasına veya körleşmeye sebep olabilir.

Sheta ve ark. [10], ring yapısına sahip mikroşebekelerde diferansiyel ve haberleşme tabanlı koruma yöntemleriyle daha güvenilir çıktılar elde edildiğini belirtmiş, ancak bu yaklaşımların ölçüm noktaları arasındaki GPS veya PTP protokolleriyle gerçekleştirilen senkronizasyonun, haberleşme hataları gibi görece daha karmaşık yapıları içermesinin ve maliyetli olmasının değerlendirilmesi gereken önemli kriterler olduğunu ifade etmiştir.

2.2.5 İşletme Koşullarının Değişimi

Mikroşebekelerin en belirgin özelliklerinden biri, şebekeye bağlı ve ada modu arasında sık geçiş yapabilmeleridir. Bu geçişler sırasında sistem empedansı, arıza akımı seviyeleri ve güç akış yönleri önemli ölçüde değişmektedir. Sabit ayarlı koruma röleleri, bu değişken işletme koşullarına her zaman uyum sağlayamamaktadır.

Kumari ve Naick [11], bu problemi ortadan kaldırabilmek adına adaptif koruma yöntemlerini önermiştir. Optimum röle ayarları muhtemel tüm işletme koşullarına göre hesaplanmıştır. Koruma cihazı ayarlarının işletme koşullarına göre değiştirilmesiyle daha seçici bir koruma gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Ancak adaptif koruma uygulamalarının iyi bir haberleşme altyapısı gerektirmesi pratik uygulamalarda problemler oluşturabilmektedir.

Benzer şekilde Mohamed ve ark. [12], geleneksel sabit ayarlı koruma yöntemlerinin değişken şebeke yapılarında yetersiz kaldığını belirtmektedir. Sistemin olası tüm durumlarını ve gerçekleşme ihtimallerini değerlendiren olasılıksal bir yaklaşımla yaşayan bir koruma yapısının olması gereksimini ifade etmektedir.

Yukarıda özetlenen zorluklar değerlendirildiğinde, geleneksel yönsüz aşırı akım koruma yöntemlerinin mikroşebekelerin dinamik yapısı karşısında çoğu zaman yetersiz kaldığı görülmektedir. Özellikle ring yapılı ve inverter temelli dağıtık üretim kaynaklarının baskın olduğu mikroşebekelerde, klasik aşırı akım koruma yaklaşımlarının tek başına güvenilir ve seçici bir koruma sağlaması zorlaşmaktadır.

Bu nedenle literatürde sunulan çalışmalarda, mikroşebekeler için alternatif ve daha gelişmiş koruma yöntemlerine olan gereksinim açıkça belirtilmektedir. Bu gereksinim, diferansiyel ve adaptif koruma yaklaşımlarının daha gerçekçi, farklı arıza tipi ve senaryolarında mikroşebeke uygulamaları için değerlendirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2.3 Geleneksel ve Modern Koruma Teknikleri

2.3.1 Yönsüz ve Yönlü Aşırı Akım Koruması

Aşırı akım röleleri, basit olmaları, düşük maliyetleri ve pratik uygulamalardaki uzun senelerdir var olan işletme tecrübeleri nedeniyle dağıtım şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu röleler, genellikle arıza akımı önceden belirlenip ayarlanan bir set değerinin aştığı zaman belirlenen çalışma karakteristiğine göre açma yapan koruma cihazlarıdır. Açma karakteristiklerine göre sabit zamanlı veya ters zamanlı olabilen aşırı akım röleleri, beslemenin tek bir yöne doğru olduğu klasik radyal dağıtım şebekelerinde güvenilir bir koruma yöntemi olarak kabul edilmektedir [13].

Ancak modern güç sisteminde dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonu ile birlikte, geleneksel yönsüz aşırı akım rölelerinin çalışma mantıkları büyük ölçüde etkisiz kalmaktadır. Özellikle çift yönlü güç akışı, şebeke işletme koşullarına ve üretim kaynaklarının çeşidine göre dinamik olarak değişen arıza akım seviyeleri ve ring konfigürasyonlar, yönsüz aşırı akım rölelerinin sağlıklı ve seçici bir koruma yapmasını engellemektedir.

Yönsüz aşırı akım röleleri, arıza akımının yalnızca büyüklüğünü değerlendirip eşik değerinin geçilmesi durumunda çalışmakta ve akımın yönüyle ilgili bir değerlendirme yapmamaktadır. Bu nedenle, yeterli arıza akımının bulunduğu ve arıza akımının tek yönden beslendiği radyal şebekelerde seçici bir koruma sağlanabilmektedir. Ancak mikroşebekelerde dağıtık üretim kaynaklarının şebekenin farklı noktalarına bağlanmasıyla birlikte arıza akımına katkı çok farklı yönlerden olabilmektedir.

Kılıçkıran ve ark. [14], yönsüz aşırı akım koruma cihazlarının mikroşebeke sistemlerinde yanlış açmalara ve seçicilik kaybına yol açabileceğini göstermiştir. Çalışmada özellikle dış arızalarda, dağıtık üretim kaynaklarının arıza akımına katkısı nedeniyle rölelerin iç arıza varmış gibi davranabildiği yani sempatik açma yapabildiği rapor edilmiştir. Bu durum, sistem güvenilirliğini olumsuz etkilemekte ve gereksiz yere enerji kesintilerinin olmasına sebep olmaktadır.

Yönsüz aşırı akım rölelerinin eksiklerini gidermek amacıyla arıza akımının yönünü algılayıp buna göre çalışan yönlü aşırı akım röleleri geliştirilmiştir. Yönlü aşırı akım röleleri, arıza akımının büyüklüğünün yanı sıra yönünü de değerlendirerek

çalışmakta ve bu sayede çift yönlü güç akışının bulunduğu sistemlerde daha seçici bir koruma sağlamayı hedeflemektedir.

Yıldırım ve ark. [15], yönlü aşırı akım rölelerinin mikroşebeke uygulamalarında kullanılabilirliğini incelemiş ve uygun koordinasyon sağlandığında yönsüz rölelere kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir. Çalışmada, röle koordinasyonunun optimizasyon tabanlı yöntemlerle geliştirilebileceği vurgulanmıştır. Optimizasyon algoritmalarıyla rölelerin çalışma akımı ve zaman çarpanı (TMS) değerleri hassasiyetle hesaplanmaktadır ve böylece yanlış çalışmaların önüne geçilmiş olunur. Benzer şekilde, Biswal ve ark. [16], yönlü aşırı akım rölelerinin koordinasyonunun özellikle ring yapıdaki ve çok fazla üretim kaynağının bulunduğu mikroşebekelerde karmaşık bir optimizasyon problemi haline geldiğini belirtmiştir. Arıza akımının yönü ve büyüklüğünün işletme koşullarına göre değişmesi, röle ayarlarının sabit tutulmasını zorlaştırmakta olup daha dinamik bir ayar yapısının varlığına ihtiyacı göstermiştir. Genetik Algoritma (GA) veya Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi yöntemlerle röle ayarları optimize edilip her koşulda seçici bir koruma yapılması hedeflenebilir.

Yönlü aşırı akım koruma cihazları, çift yönlü güç akışından kaynaklı sorunların giderilmesinde iyileştirmeler sağlasa da mikroşebekelerin ada modunda işletildiği senaryolarda özellikle inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının sınırlı kısa devre katkıları nedeniyle rölelerin kör kalması durumu gerçekleşebilmektedir.

Alam ve ark. [17], mikroşebekelerde yönlü aşırı akım rölelerinde birden fazla ayar grubunun kullanılabileceğini önermiştir. Çalışmada, şebekenin işletme moduna göre farklı röle ayar grupları devreye alınmaktadır. Bu yöntemde güvenilir ve sağlıklı bir haberleşme altyapısı olması gerekmektedir.

Ayvaz [3], ada modunda çalışmada yönlü aşırı akım rölelerinin performansının ciddi şekilde azaldığını ve bazı senaryolarda rölelerin kör kaldığını bazı senaryolarda ise röleler arası güvenli zaman aralığının sağlanamadığını belirtmiştir. Dağıtık üretim kaynaklarının sayısının 10% arttırılması bile yönlü aşırı akım rölelerin koordinasyonunu bozabilmektedir. Bu durum, yönlü aşırı akım koruma yönteminin mikroşebekelerde tek başına güvenli bir işletim ve koruma sistemi için yeterli olamayacağını göstermektedir.

Yönlü ve yönsüz aşırı akım koruma teknikleri, mikroşebekelerde belirli koşullar altında verimli bir şekilde kullanılabilir olmakla birlikte, farklı işletme senaryoları, inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının baskın olduğu ve ring yapısına sahip işletmelerde seçici bir koruma yapamayabilmektedir. Yönlü aşırı akım röleleri, yönsüz rölelere göre daha iyi özellikler sunmasına rağmen, düşük arıza akımı seviyeleri ve karmaşık şebeke işletme koşulları nedeniyle her zaman güvenilir, hızlı ve seçici bir koruma sağlayamamaktadır.

Bu nedenle literatürde, aşırı akım tabanlı koruma yöntemlerinin mikroşebekelerde adaptif koruma yöntemleriyle desteklenmesi ya da difreransiyel koruma gibi kısa devre akımına bağlı olmayan koruma yöntemleriyle koruma koordinasyonun yapılabileceği vurgulanmaktadır. Bu iki koruma yönteminin farklı tipte arızalarda ve farklı işletme senaryolarında karşılaştırılmalı olarak gerçekçi mikroşebeke modeli üzerinde simule edilmesi bu tez çalışmasının temel motivasyonlarından birisi olmuştur.

2.3.2 Diferansiyel Koruma

Diferansiyel koruma, koruma bölgesine giren ve çıkan akımların karşılaştırılması temeline dayanan ve yalnızca iç arıza durumlarında çalışacak şekilde tasarlanan bir koruma yöntemidir. Bu yöntemde, sistemin kısa devre seviyesinden bağımsız olarak arıza tespiti yapılabilmektedir ve bu özellikleri sayesinde diferansiyel koruma teknik anlamda önemli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Mikroşebekelerde arıza akım seviyelerinin işletme koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmesi ve inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının kısa devre akımına sınırlı katkısı, diferansiyel korumanın literatürde giderek daha fazla ilgi görmesini sağlamıştır [7], [10].

Diferansiyel korumanın en önemli avantajı, bir iç arıza anında arızayı çok hızlı bir şekilde tespit edip korunan ekipmanı izole etmesidir. Koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda, bölgeye giren ve çıkan akımların vektörel toplamlarının sıfır olması nedeniyle röle bir fark akımı tespit etmeyip çalışmamakta, yalnızca iç arızalar güvenilir şekilde algılanmaktadır. Bu özellik, özellikle ring yapılı ve çok fazla üretim kaynağının bulunduğu şebekelerde önemli bir üstünlük sağlamaktadır.

Baba ve ark. [18], mikroşebekelerde diferansiyel korumanın farklı işletme koşullarında altında tutarlı bir performans sergilediğini göstermiştir. Çalışmada,

diferansiyel korumanın düşük arıza akımı seviyelerinde dahi güvenilir ve seçici bir şekilde çalışabildiği belirtilmiştir.

Sanati ve ark. [7], inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının yoğun şekilde olduğu mikroşebekelerde diferansiyel koruma cihaz performanslarını kapsamlı bir şekilde incelemiş ve bu yöntemin kısa devre akım büyüklüğünden bağımsız çalışabilmesi sayesinde geleneksel koruma yöntemlerine göre belirgin avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca, diferansiyel korumanın ada işletme modunda şebekeye bağlı işletme moduna göre olumsuz bir performans göstermediği ifade edilmiştir. Buna rağmen, geleceğin şebeke yapısında inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının düşük arıza akımı ve yüksek harmonik üretimi gibi özelliklerinin klasik diferansiyel koruma mantığını da zorlayabileceği vurgulanıp makine öğrenmesi destekli, hızlı iletişim altyapısına sahip yeni nesil koruma stratejilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

Sharma ve Samantaray [19], fazör ölçüm birimleri (PMU) kullanılarak sağlanan ve veri altyapısıyla geliştirilen diferansiyel koruma yaklaşımının birleştirilmesiyle seçici bir koruma gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Simulasyon sonuçları, yüksek zaman çözünürlüğüne sahip senkronize ölçümler sayesinde, arıza tespitinin çok kısa sürelerde gerçekleştirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Diferansiyel koruma cihazları, hızlı, seçici ve güvenilir bir koruma sağlayabilmek için sağlam ve güvenilir bir haberleşme altyapısına ihtiyaç duymaktadır. Diferansiyel korumada, korunan böglenin her iki ucunda ölçülen akımlar karşılaştırılır ve bu şekilde bir iç arıza olup olmadığına karar verilir. Bu gereksinim, diferansiyel korumanın en önemli zorluklardan biri olarak değerlendirilmektedir.

De La Cruz ve ark. [20], IEC 61850 tabanlı haberleşme altyapısı kullanılarak geliştirilen diferansiyel röle uygulamasını incelemiş ve haberleşme kanalı üzerinden gelen senkronize verilerle şebekenin işletme modundan bağımsız bir korumanın etkin bir şekilde yapılabileceğini göstermiştir. Çalışmada, fiber optik altyapı üzerinden gerçekleştirilen IEC 61850 standardı sayesinde, ölçüm verilerinin düşük gecikme ve yüksek güvenilirlikle iletilebildiği vurgulanmıştır.

Sheta ve ark. [10], diferansiyel koruma yöntemlerinin haberleşme gecikmelerine karşı hassas olduğunu belirtmiş, ancak modern dijital haberleşme sistemlerinin yaygınlaşmasıyla bu sorunun büyük ölçüde azaltılabileceğini ifade etmiştir.

Bununla birlikte, haberleşme altyapısının maliyeti olması ve siber güvenlik riskleri, diferansiyel korumanın pratik uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir.

Diferansiyel koruma cihazları hızlı, seçici ve güvenli koruma gerçekleştirerek mikroşebekeler için önemli avantajlar sunsa da, bazı sınırlamalara sahiptir. Akım transformatörlerinin doyuma girmesi, ölçüm hataları ve haberleşme gecikmeleri, yanlış açmalara veya gecikmeli çalışmaya neden olup koordinasyonu bozabilmektedir.

Chotani ve Kumar [21], diferansiyel koruma şemalarında akım trafosu doygunluğunun özellikle yüksek akımlı geçici durumlarda yanlış diferansiyel akım oluşmasına yol açabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, modern diferansiyel rölelerde eğimli diferansiyel karakteristikler kullanılmakta ve gerçek bir arıza akımının varlığı bu sayede tespit edilebilmektedir.

Altaf ve ark. [8], mikroşebeke sistemlerinde diferansiyel koruma şemalarının uygulamalarında cihazlar arası haberleşme gecikmelerinin ve senkronizasyon problemlerinin önemine vurgu yapmıştır. Özellikle büyük kapasiteli mikroşebekelerde, haberleşme altyapısının doğru bir şekilde çalışması koruma güvenliği açısından çok kritiktir.

Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, diferansiyel korumada rölelerin kısa devre akımının büyüklüğünden bağımsız çalışabilmesi önemli bir avantaj olarak görülmektedir. Karmaşık mikroşebekelerde ve inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının baskın olduğu şebekelerde aşırı akım rölelerine göre daha seçici ve güvenilir çalışmaktadır.

Öte yandan, diferansiyel koruma şemalarının güvenilir bir haberleşme altyapısına olan ihtiyacı ve görece yüksek maliyeti, bu yöntemin mikroşebekelerin tamamında yaygın olarak faydalanılmasınının önündeki en büyük engellerdir. Literatürde, diferansiyel koruma ile yönlü aşırı akım koruma şemalarının detaylı simulasyon ve analizlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi gerektiği açıkça ifade edilmektedir. Bu ihtiyaç, bu çalışmanın temel gayelerinden birini oluşturmaktadır.

2.3.3 Adaptif ve Hibrit Koruma Yaklaşımları

Mikroşebekelerde şebekeye bağlı işletme modundan ada moduna geçişlerin çok sık olması, sabit ayarlara sahip klasik koruma fonksiyonlarının dinamik sistem yapısı içerisinde yetersiz kalmasına ve seçici koruma yapılamamasına sebep olmaktadır.

Şebekeye bağlı ve ada modu arasında sık geçişler, dağıtık üretim kaynaklarının devreye girip çıkması ve güç akış yönlerinin değişmesi, koruma rölelerinin sabit açma ayar akımı ve zaman ayarlarıyla güvenilir şekilde çalışmasını zorlaştırmaktadır. Bu çerçevede literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda, mikroşebekeler için adaptif koruma yaklaşımlarına olan ilgi son yıllarda fazlaca artmıştır.

Adaptif koruma, şebekenin anlık işletme durumuna göre röle ayarlarının dinamik olarak güncellenmesi temeline dayanarak çalışmaktadır. Bu yöntemde, arıza akımı seviyeleri, güç akışı yönü, dağıtık üretim kaynaklarının sayısı, bağladığı noktalar ve işletme modu gibi parametreler sürekli izlenerek röle akım set değerleri ve zaman gecikmeleri gerçek zamanlı olarak güncellenmektedir [22], [11].

Aşırı akım röleleri, mikroşebekelerde adaptif koruma şemalarının en temel bileşeni olarak kullanılmaktadır.

Alam ve ark. [17], birden fazla ayar grubuna sahip rölelerin kullanıldığı bir adaptif koruma şeması önermiş ve farklı işletme senaryolarına göre farklı röle ayarlarının otomatik olarak devreye alınabildiğini çalışmalarıyla göstermiştir. Farklı topolojiler için Lineer Programlama (LP) veya benzer algoritmalarla en doğru akım ve zaman ayarı hesaplanabilir. Bu yöntem sayesinde, şebekeye bağlı çalışma ve ada modu işletmeleri için ayrı koruma felsefeleri ve ayarları uygulanabilmektedir.

Saldarriaga-Zuluaga ve ark. [23], birden fazla üretim kaynağının bulunduğu mikroşebekeler için adaptif koruma ayarlarının uygulanabilirliğini, üretim kaynaklarının devreye alınıp devreden çıkarıldığı senaryolara göre göstermiştir. Çalışmanın sonucunda rölelerin ayarlarının esnek bir koruma felsefesi altında dinamik olarak yeniden güncellendiğinde selektivitenin arttığı ve yanlış açmaların büyük ölçüde önüne geçildiği ifade edilmiştir.

Chae ve ark. [24], mikroşebekelerde ana kaynağa uzak noktalarda üç fazlı kısa devre arızaları meydana gelmesi durumu için adaptif koruma koorinasyon sistemi geliştirmiş ve farklı işletme koşulları altında koruma cihazlarının performansını

incelemiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, adaptif röle ayarlarının özellikle kısa devre akımının düştüğü senaryolarda güncellenip seçici bir koruma yaptığı gözlemlenmiştir.

Adaptif koruma yöntemlerinin doğru bir şekilde çalışması için iyi bir ölçüm altyapısı, haberleşme sistemleri ve merkezi kontrol birimleri gerekmektedir. Haberleşme gecikmeleri veya veri kayıpları durumunda koruma sisteminin performansı olumsuz şekilde etkilenebilmektedir [11].

Mikroşebekelerde, tek bir koruma yöntemi her koşulda seçici bir şekilde koruma yapamacağı için hibrit koruma yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlarda birden fazla koruma fonksiyonu birbirlerine yedeklilik ve tamamlayıcılık sağlayacak şekilde aynı anda uygulanmaktadır.

Banerjee ve ark. [25], dağıtım şebekeleri için geliştirilen hibrit koruma şemalarında, şebekenin olası tüm işletme senaryolarında adapte olabilen ayarlarla birlikte farklı koruma prensiplerinin birlikte kullanılmasıyla sistem güvenilirliğinin artırılabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, Sheta ve ark. [10], hibrit koruma yaklaşımlarının doğru haberleşme ve ayar parametreleriyle mikroşebekelerde verimli şekilde koruma yapılabildiğini ifade etmektedir.

Zarei ve Parniani [26], alçak gerilim mikroşebekeler için geliştirilen ve mikroşebekenin işletme modundan bağımsız çalışan bir hibrit koruma rölesi tanıtmıştır. Çalışma sonuçları, hibrit yaklaşımın hem iç hem de dış arızalar için başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir.

Son yıllarda, adaptif ve hibrit koruma şemalarının performansını artırmak amacıyla yapay zeka ve optimizasyon tabanlı yöntemler literatürde yaygın olarak incelenmektedir. Bakkar ve ark. [27], sezgisel algoritmalar kullanılarak röle ayarlarının optimize edilebileceğini ve karmaşık mikroşebeke yapılarında daha esnek koruma çözümleri geliştirilebileceğini ortaya koymuştur.

Shad ve ark. [13], aşırı akım rölelerinde iki farklı ayar grubunu optimizasyon yöntemlerinden faydalanıp kullanarak koordinasyonu sağlamıştır. Burada farklı işletme gruplarında aşırı akım röleleri için optimum çalışma performansları bulunması hedeflenmiştir.

Teorik olarak bu yöntemler faydalı olsa da, hesaplamalardaki karmaşıklığı ve pratik uygulamalarda zorlukları bulunmaktadır. Bundan dolayı, adaptif korumalar ve

yapay zekanın da kullanıldığı yöntemler simulasyon seviyesinde değerlendirilmektedir.

Literatürde bulunan çalışmalar değerlendirildiğinde, adaptif ve hibrit koruma yapılarının mikroşebekelerde farklı işletme koşulları altında koruma koordinasyon açısından büyük avantajlar sunduğu görülmektedir. Geleneksel koruma yapılarının yetersiz kaldığı modern mikroşeebekelerde daha seçici bir koruma sağlayabilmek için adaptif koruma yapıları büyük önem arz etmektedir.

Koruma tekniği anlamında adaptif ve hibrit koruma yapılarının büyük avantajı olsa da, sağlam ve güvenilir bir haberleşme altyapısına olan ihtiyacı, sistem karmaşıklığı, görece yüksek maliyeti ve uygulama anlamındaki pratik eksikliği günümüzde yaygın olarak kullanımının önündeki engellerdir. Bu yöntemlerin farklı işletme ve arıza koşulları altındaki veriminin incelenmesi günümüz ve gelecek çalışmalar için önemli bir ihtiyaçtır.

2.4 Karşılaştırmalı Çalışmalar ve Literatürdeki Açıklar

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde mikroşebekelerde koruma yapıları büyük ölçüde tek bir koruma fonksiyonunun belli bir işletme koşulu altında çalışıldığı görülmektedir. Aşırı akım koruma ve özellikle sistemin işletme yapısına göre değişen ayarları içeren adaptif aşırı akım koruma şemaları, farklı optimizasyon yöntemleriyle ayarları belirlenen koruma şemaları, diferansiyel koruma şemaları gibi çalışmalar incelenmiş olsa da simulasyonlarla karşılaştırmalı analizleri sınırlı düzeyde kalmıştır.

Karmaşık mikroşebekelerde farklı yönlerdeki güç akışının varlığı, farklı arıza akım karakteristikleri, değişen şebeke işletme yapıları klasik aşırı akım koruma röleleriyle seçici bir koruma yapılabilmesini engelleyebilmektedir [1], [18].

Biswal ve ark. [16], aşırı akım rölelerinde farklı işletme senaryolarına uyum sağlayabilen opmimum ayar uygulamaları yapılarak mikroşebekelerde efektif bir koruma koordinasyon yapılabileceğini ifade etmiştir. Benzer şekilde Srivastava ve ark. [4], yönlü aşırı akım röleleriyle birlikte çift yönlü güç akışının olduğu şebekelerde güvenilir bir koruma yapılabileceğini ifade etmiştir.

Bu çalışmalarda aşırı akım rölelerinin çalışmalarındaki büyük etkiyi kısa devre akım seviyelerinin büyüklüğü oluşturmaktadır. Mikroşebekelerin ada modunda

çalışması durumunda veya inverter tabanlı dağıtık üretim kaynaklarının fazlaca baskın olduğu şebekelerde arıza akım seviyelerinin kısıtlı olması aşırı akım korumalarının çalışmasını olumsuz anlamda etkilemektedir [7], [11]. Mikroşebekelerin ada modunda çalışması şebekeden gelen kısa devre katkısını sınırlandırmaktadır. İnverter temelli dağıtık üretim kaynakları ise elektronik bileşenlerini korumak adına sınırlı seviyede kısa devre katkı yapmaktadırlar. Bunun sonucu olarak, geleneksel aşırı akım koruma yöntemlerinden tek başına faydalanıldığında özellikle farklı işletme modlarının varlığında aşırı akım koruma yöntemlerinin yetersiz kalabileceği görülmektedir.

Diferansiyel koruma, mikroşebekelerde baralar, transformatörler, hatlar ve generatörler gibi kritik ekipmanlarda bir arıza durumunda ani temizleme sağlamaktadır. Sanati ve ark. [7], inverter temelli dağıtık üretim kaynakların baskın olduğu şebekelerde diferansiyel koruma yapılarının aşırı akım koruma yöntemlerine göre daha seçici ve güvenilir çıktılar verdiğini göstermiştir. Sharma ve Samantaray [19] ise PMU tabanlı diferansiyel koruma yaklaşımlarının yüksek bir hassasiyetle etkin bir çözüm sunduğunu ifade etmiştir.

Öte yandan, diferansiyel koruma yapılarının güvenilir ve sağlam haberleşme altyapısına olan bağımlılığı, sorunsuz bir ölçüm senkronizasyonu ihtiyacı ve görece yüksek maliyetleri, bu yöntemin mikroşebekelerin tamamında kullanılmasını zorlaştırmaktadır [28].

Mikroşebekelerin değişken yapısına uyum sağlayabilen en önemli koruma yapılarından birisi adaptif korumadır. Adaptif korumalar, dinamik şebeke işletme yapılarına uyum sağlayabilmeleri ile öne çıkmaktadır. Alam ve ark. [17], adaptif aşırı akım röle ayar gruplarının kullanılmasıyla mikroşebekelerde seçici korumaların yapılabileceğini belirtmiştir.

Bununla birlikte literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu, farklı koruma fonksiyonlarının performanslarını tek bir koruma felsefesi kapsamında değerlenirip detaylı simulasyon çalışmalarıyla karşılaştırmalı sonuçlar sunmamaktadır. Ayrıca, koruma ayarları haricinde gerçekçi şebeke modellerinde haberleşme gecikmeleri, senkronizasyon problemleri gibi kriterleri de değerlendiren çalışmalar sınırlı sayıda kalmaktadır [8].

Yapılan literatür araştırması sonucunda tespit edilen temel eksiklikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

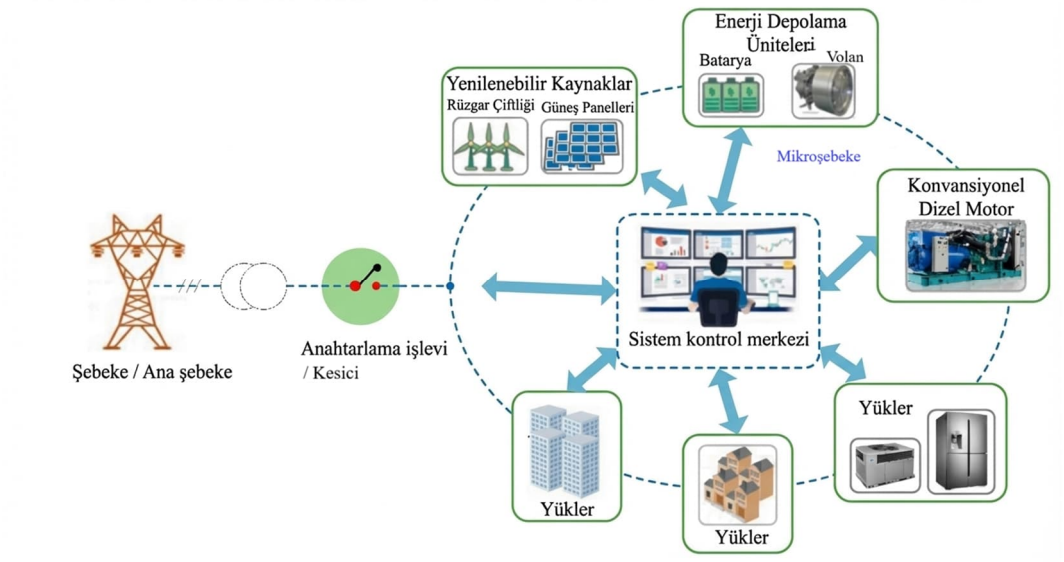
- Mikroşebekelerde, diferansiyel koruma ve yönlü aşırı akım koruma şemalarının detaylı analizlerle doğrudan karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlı sayıdadır.
- Çalışmaların çoğunda sadece tek bir işletme modu (şebekeye bağlı veya ada modu) değerlendirilmiştir.
- Arıza senaryoları olarak tek bir arıza tipinin uygulandığı detaylı analiz yapılmasının önüne geçmiştir.

Bu tez çalışması, söz konusu eksiklere gidermeyi amaçlayarak ring yapısına sahip örnek bir test mikroşebeke modeli üzerinde, diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma yöntemlerinin hem şebekeye bağlı ve üretim kaynaklarının devrede olduğu hem de üretim kaynaklarının devre dışı olup sadece şebekeden beslendiği koşullar altında incelemektir. Çalışmada, şebekenin farklı noktalarında farklı arıza tipleri simule edilerek koruma cihazlarının performansları karşılaştırılıp avantajları ve sınırılamaları ortaya konulmaktadır.

3
MİKROŞEBEKELER VE KORUMA TEKNİĞİ

3.1 Mikroşebeke Tanımı ve Yapısı

Klasik güç sistemlerinde elektrik enerjisi büyük güçlü üretim santrallerinde üretilip yüksek gerilim hatları ile iletilip dağıtım şebekeleriyle son tüketiciye iletilmektedir. Bu elektrik enerjisinin aktarımının tek yönlü gerçekleştirildiği bir yapıdır. Fosil yakıtların giderek tükenmesi, artan enerji ihtiyacı, çevresel koşullarla birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu şebeke yapısının değişime uğramasıyla sonuçlanmaktadır [29]. Bu noktada mikroşebeke kavramı ortaya çıkmaktadır. Mikroşebekeler, sabit yükler ve generatörler, depolama cihazları ve kontrol edilebilir yükler gibi dağıtık enerji kaynaklarını içeren, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız çalışabilen yapılardır [30], [31].



Şekil 3.1 Örnek bir mikroşebeke yapısı

Mikroşebekeler, güç sisteminde farklı işletme modlarıyla birlikte enerji sürekliliğini saylayarak güç kalitesini ve enerji verimliliğini artırmaktadır [33].

Mikroşebekelerin en önemli özelliklerinden birisi farklı işletme modlarında çalışabilmesidir. Mikroşebekeler bir ortak bağlantı noktası üzerinden ana şebekeyle bağlantılı ve paralel çalışabileceği gibi ana şebekeden ayrılıp kendi başına ada modunda da çalışabilmesidir.

Şebeke bağlantılı işletme modunda mikroşebeke, ortak bağlantı noktası üzerinden ana şebekeye bağlıdır. Bu işletme modunda gerilim ve frekansın referansı, sonsuz güçlü bara olarak kabul edilen ana şebeke üzerinden sağlanır. Burada ana şebekenin bağlandığı bara salınım barası olarak kabul edilirken mikroşebeke içerisinde bulunan dağıtık üretim kaynakları yük barası (PQ) olarak davranmaktadır [34].

Ada modu çalışmada ise ana şebekede bir arıza olma durumunda veya bir bakım olma durumunda, ortak bağlantı noktasındaki transfer anahtarı veya kesici açılır ve mikroşebeke ana şebekeden izole edilir. Ada modunda mikroşebeke, üretim barası (PV) olarak davranıp sabit frekans ve gerilimi sağlamakla sorumludur [34].

Mikroşebekeler, enerji sürekliliğini sağlama noktasında çok büyük avantajlar sağlasa da koruma sistem tasarımının oluşturulması konusunda zorluklar yaşamaktadır. Özellikle tek yönlü güç akışının olduğu radyal işletme sistemine göre tasarlanmış geleneksel koruma sistemleri işletme modunun değişebildiği, çift yönlü güç akışının olduğu yapılarda başarısız olmaktadır.

Mikroşebekelerde işletme modlarının arasındaki geçişle birlikte kısa devre akım seviyelerindeki değişiklikler ve inverter temelli üretim kaynaklarının sınırlı kısa devre katkısı klasik aşırı akım korumalarıyla koruma yapmayı zorlaştırmaktadır [35]. Benzer şekilde dağıtık üretim kaynaklarının arıza katkısıyla birlikte komşu fiderde meydana gelen arızada sağlıklı fiderdeki röle yanlış çalışıp hatalı açma yapabilir.

3.2 Koruma Tekniği ve Röleler

Elektrik sistemlerinde, özellikle orta ve yüksek gerilim seviyelerinde, meydana gelebilecek arızalar oldukça yıkıcı sonuçlara yol açabilir. Bu arızaların sistemin diğer bölümlerine yayılmadan, insanlara veya ekipmanlara zarar vermeden izole edilmesi gerekir. Bu noktada koruma tekniği devreye girer. Koruma tekniği,

yalnızca koruma röleleri veya kesicilerden oluşmaz; aynı zamanda sistemin tasarımı, ayarlanması ve işletilmesi için gerekli bilgi birikimi ve deneyimi de kapsar. Dolayısıyla bir arızanın tespiti, analizi, izlenmesi ve müdahalesini sağlayan tüm sistemin bütünüdür [36].

Güç sistemlerinde ortaya çıkabilecek anormal durumların ve arızaların hızlı bir şekilde temizlenebilmesi için, güç sistemi koruma rölelerinin seçimi ve koordinasyonları büyük önem arz etmektedir.

Koruma koordinasyon çalışmalarında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Arızadan etkilenen bölümün sistemin sağlıklı bölümünden hızlı bir şekilde izole edilebilmesi
- Gereksiz ve hatalı açmalara sebebiyet verilmemesi
- Ekipman ömürlerinin kısa devre olaylarından minimum derecede etkilenmesi
- Alternatif çalışma senaryolarının dikkate alınması
- Kısa devre akımları kısa sürede temizlenemiyorsa ve/veya zarar verici etki büyük ise, tahribatı azaltmak için kısa devre akımlarının sınırlandırılması

Koruma koordinasyonu, aşırı akım, kısa devre gibi istenmeyen durumlarda sadece arızalı bölümlerin temizlenmesi için koruma röleleri arasındaki koordinasyonun kurulmasıdır. Bu koordinasyonun kurulabilmesi için de gerekli kısa devre analizlerinin yapılması, bunlara göre gerekli koruma ekipmanlarının seçimi ve koruma röle set değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Elektrik şebekelerinde ve endüstriyel güç sistemlerinde, sistemin devamlılığı, güvenilirliği ve insan güvenliği için koruma ve koordinasyonu büyük önem taşımaktadır.

Koruma koordinasyonunda, sistemdeki her eleman için koruma alanları oluşturulur. Böylece generatörler, kablolar, transformatörler, motorlar ve baralar için sistem içinde koruma bölgeleri oluşturulur. Bu koruma bölgelerinde bir arıza olduğunda, bu bölgeyi koruyan röleler, ilgili kesicilere açma sinyali göndererek, arızalı bölümü sistemin geri kalan kısmından ayırırlar. Koruma bölgeleri, öncelikli bölgeler (arıza oluştuğunda ilk açma yapılması gereken) ve ardışık bölgeler (ilk bölgede arızanın temizlenememesi durumunda ilk bölgeyi de içine alan daha geniş bölge) olacak

şeklinde sınıflandırılır. Arıza oluşan bölgedeki koruma rölesinin ve/veya açma ekipmanın cevap vermediği durumlarda, yedek röleler veya ardışık bölgelerdeki röleler ve açma ekipmanları ile arıza temizlenmeye çalışılır [37].

Koruma koordinasyon çalışmasında, minimum ve maksimum 3 faz, 2 faz ve 1 faz toprak kısa devre akımları değerlendirilir. Rölelerin koruma fonksiyonları, minimum kısa devre akımlarına uygun olarak ayarlanır ve etkinleştirilir. Bu sayede röleler, sorunu kolaylıkla tespit edebilir ve yanıt verebilirler.

Aynı koruma bölgesinde ve aynı hat üzerinde yer alan koruma ekipmanları arasında;

- Açma sinyali için gerekli akım değeri ve
- Açma komutunun oluşumu için gerekli sürelerin belirlenmesi ile maksimum koruma ve minimum enerji kesintisini gözeterek koordinasyon sağlanmaya çalışılır.

Her arıza/hata durumunda, ilk olarak arızaya en yakın röle çalışmalıdır. Eğer bu koruma rölesi, ilgili anahtarlama ekipmanına açma sinyali gönderemezse, hat üzerindeki ikinci koruma rölesi devreye girerek ilgili kendi devre kesicisine açma sinyali göndermelidir. Buna yedek (back-up) koruma adı verilir. Sonuç olarak, amaç arızanın dar bir alanda kalması ve tüketicilerin enerji kesintisinden etkilenmemesi ya da minimum seviyede etkilenmesini mümkün kılmaktır.

Bir sistemde kullanılacak olan koruma röleleri ve fonksiyonları sistem konfigürasyonuna, korunan ekipmanın türüne ve değerine göre belirlenir. En çok kullanılan koruma rölesi ise aşırı akım rölesidir.

3.2.1 Aşırı Akım Koruması

Aşırı akım röleleri elektromekanik, statik ve nümerik (dijital) yapıda olup üstünden geçen akım rölenin ayar değerinden fazla olduğu zaman çalışan koruma cihazlarıdır. Aşırı akım rölelerinin ayarlandığı akım değerine pick up akımı (çalışma akımı) denir. Faz ve toprak aşırı akımlarına karşı koruma yapan bu röleler en düşük arıza akımında ilgili kesiciye açma sinyali gönderecek şekilde ayarlanır. Aşırı akım röleleri, hat, transformatör, generatör ve motor korumada kullanılan en basit ve ucuz koruma röleleridir.



Şekil 3.2 Aşırı akım rölesi [38]

Çalışma karakteristiklerine göre röleler:

- Ani (Instantaneous)
- Sabit zamanlı (Definite time)
- Ters zamanlı (Inverse time)
- Karışık zamanlı (Definite time + Inverse time)

olmak üzere sınıflandırılabilir.

Güç sisteminde aşırı akım röleleri genel olarak faz-faz arızalarına karşı ters ve sabit zamanlı, faz-toprak arızalarına ise sabit zamanlı olarak ayarlanır. Aşırı akım röleleri gücün akışına göre ileri ya da geri yönde koruma yapabilir. Radyal şebekelerde yönsüz aşırı akım röleleri kullanılırken ring şebekelerde, üretim birimlerinin olduğu yani iki yönlü güç akışının olduğu sistemlerde yönlü aşırı akım röleleri kullanılır. Güç sistemlerinde ileri yön, güç akışının baradan hatta doğru olduğunu ifade ederken, geri yön ise güç akışının baraya doğru olduğunu ifade eder. Yönlü aşırı akım röleleri diğer yönsüz aşırı akım rölelerinden farklı olarak gerilim bilgisini de alırlar. Daha sonra gerilim ve akım arasındaki açıyı ölçerek yön tayini yaparlar.

Koruma röleleri ve cihazları projelerde, tek hatlarda daha iyi okunabilmesi ve anlaşılabilmesi için ANSI kodları ve IEC sembolleriyle ifade edilir. Bu çerçevede aşırı akım röleleri için belirlenen ANSI kodları ve IEC sembolleri aşağıdaki tablodaki gibidir:

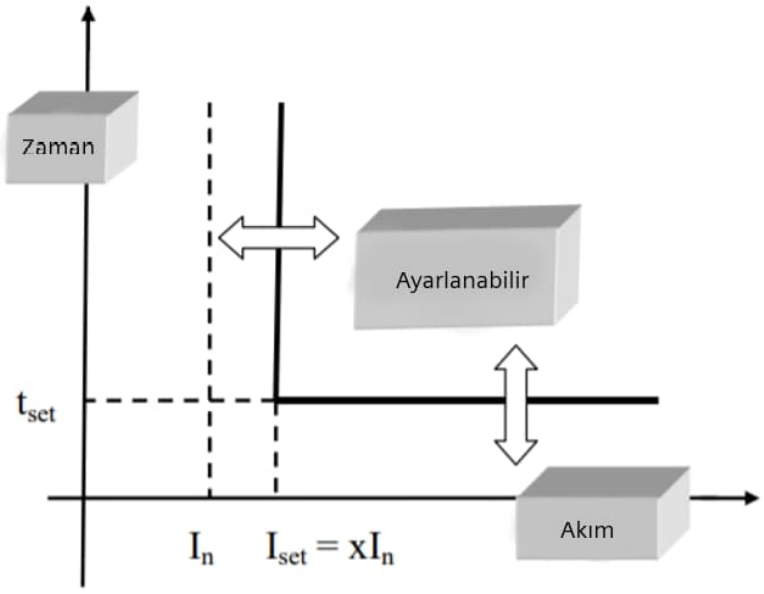
Tablo 3.1 Aşırı akım koruma ANSI kodu ve IEC sembolu [39]

Koruma Fonksiyonu	ANSI Kodu	IEC Sembolu
Ani Aşırı Akım Rölesi ve Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölesi	50	I>>
Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi	51	I>
Ters Zamanlı Toprak Aşırı Akım Rölesi	51N, 51G	
Sabit Zamanlı Toprak Aşırı Akım Rölesi	50N, 51G	
Yönlü Aşırı Akım Rölesi	67	
Yönlü Toprak Aşırı Akım Rölesi	67N	

Bazı kaynaklarda ANSI kodu 51 olan ters zamanlı koruma fonksiyonu Ip olarak adlandırılırken, sabit zamanlı koruma fonksiyonu (ANSI 50) birinci kademe için I>, ikinci kademe için I>> olarak sembolize edilmektedir.

3.2.1.1 Sabit Zamanlı Aşırı Akım Röleleri

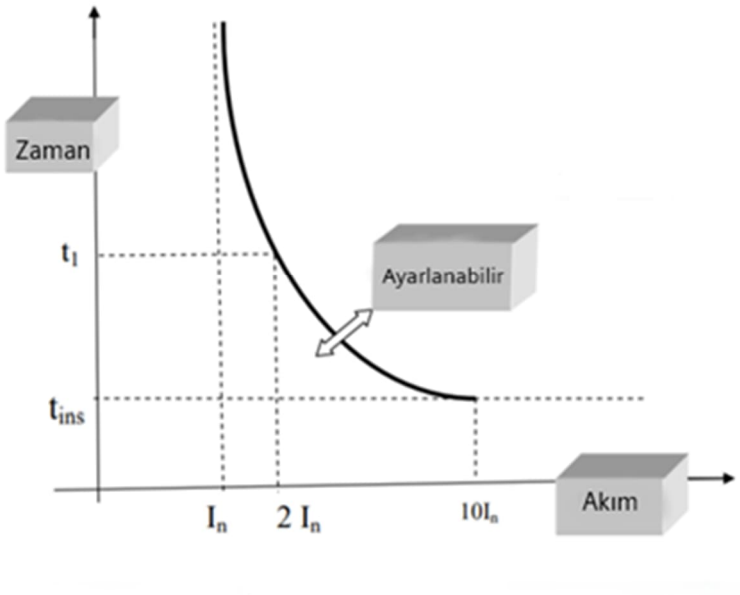
Ani aşırı akım röleleri, sistemde bir arıza durumunda zaman gecikmesi olmadan kesiciye açma komutu gönderen rölelerdir. Bu rölelerde sadece pick up (çalışma) akımı ayarlanabilir. Sabit zamanlı aşırı akım rölesi ise bir arıza durumunda belirli bir zaman gecikmesi sonrasında çalışır. Rölenin kesiciye açma komutu verme süresi rölenin gördüğü arıza akımından ve arızanın konumundan bağımsızdır. Sabit zamanlı aşırı akım rölelerinde pick up akımı ile birlikte zaman değeri de ayarlanabilir. Bu rölelerin en önemli özelliği arıza akım değeri röle ayar değerinden büyük olduğu anda kesiciye açma komutu göndermesidir. Faz-faz ve faz-toprak arıza akımlarına karşı koruma sağlar.



Şekil 3.3 Sabit zamanlı aşırı akım röle karakteristiği

3.2.1.2 Ters Zamanlı Aşırı Akım Röleleri

Ters zamanlı aşırı akım rölelerinde zaman gecikmesi sabit değildir. Burada verilen ayarlar (I/Ip) akım değerine ve tp(TMS) zaman çarpanına bağlıdır. Çalışma akımı Ip veya Is ile gösterilir. Ters zamanlı eğrisi olan bu rölelerde arıza akımı arttıkça rölenin kesiciye açma komutu gönderme süresi kısalmaktadır.



Şekil 3.4 Ters zamanlı aşırı akım röle karakteristiği

Aşırı akım röleleri için en çok kullanılan karakteristik ters zamanlı aşırı akım eğrisidir. Bu karakteristikte zaman gecikmesi ayarlanan akım değeri belli bir değere ulaştıktan sonra sabit kalır ve değişmez. Bu akım değeri için rölenin oluşturduğu zaman gecikmesi rölenin verebileceği minimum akım gecikmesidir.

IEC 60255 standardında ters zamanlı aşırı akım rölelerinin çalışma karakteristikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir [40].

$$t = TMS * \frac{k}{(\frac{I}{Ip})^{\alpha}-1} \tag{3.1}$$

Burada:

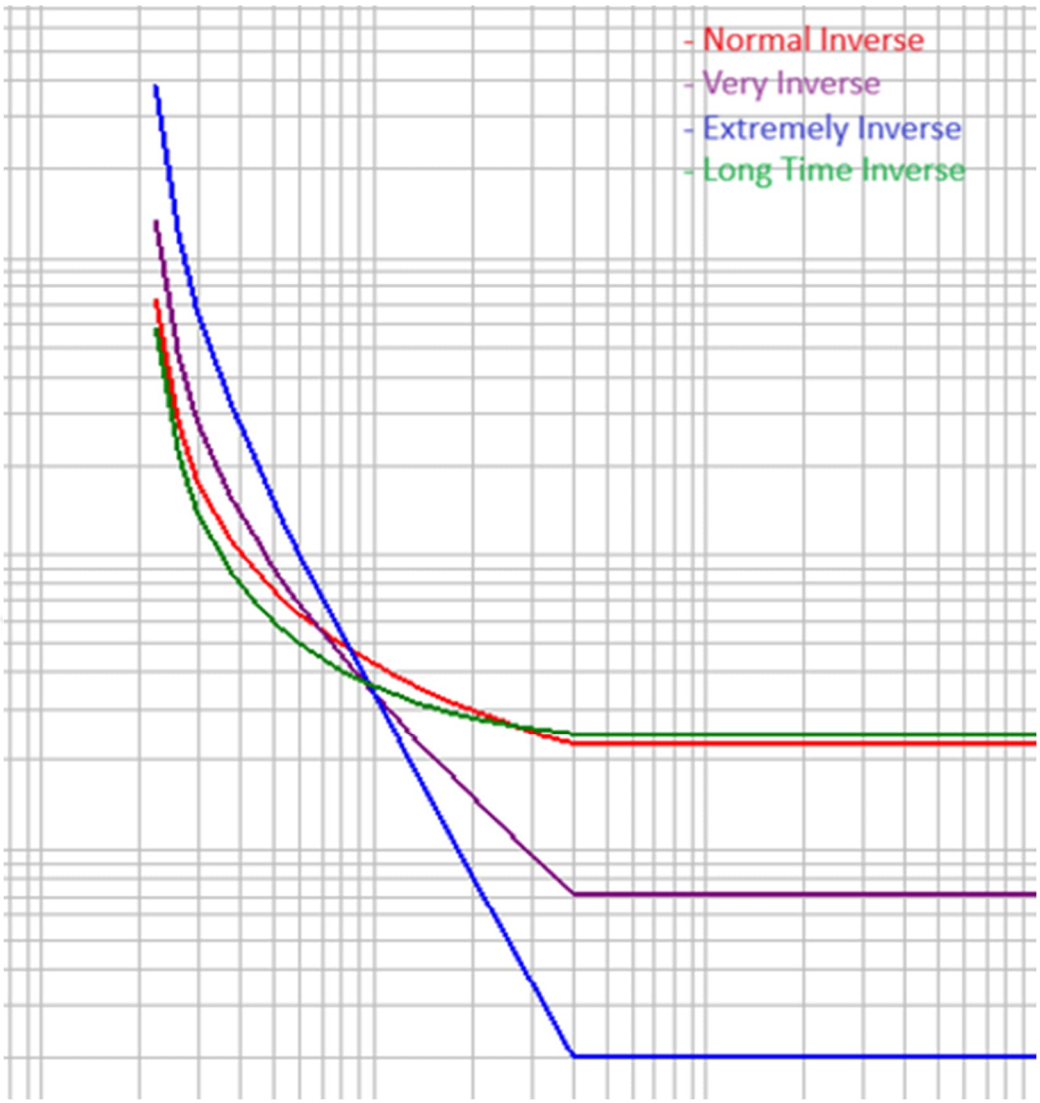
- t: Rölenin çalışma süresi (saniye)
- TMS: Zaman çarpanı ayarı (Time Multiplier Setting / Time Dial)
- I: Rölenin ölçtüğü arıza akımı
- I_p: Rölenin pickup (başlama) akım ayarı
- k, α: Karakteristik eğrinin eğimini belirleyen sabitler

Ters zamanlı karakteristik eğirinin eğimine göre faydalınılan sabitler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Ters zamanlı röle karakteristikleri [37]

Karakteristik	**α**	**β**
Normal Ters Zamanlı	0.02	0.14
Çok Ters Zamanlı	1	13.5
Aşırı Ters Zamanlı	2	80
Uzun Ters Zamanlı	1	120

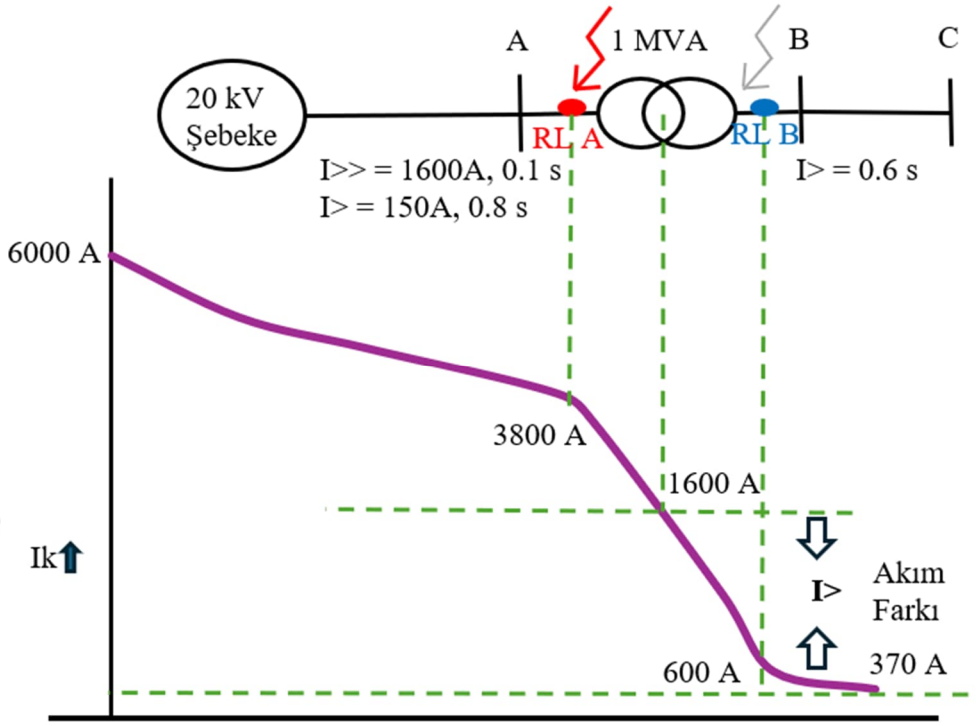
Bu denklem, "Normal Ters Zamanlı", "Çok Ters Zamanlı", "Aşırı Ters Zamanlı" ve "Uzun Ters Zamanlı" gibi farklı zaman karakteristik eğrilerinin matematiksel temelini oluşturmakta ve rölelerin sistemdeki arıza akım seviyelerine göre seçici ve koordineli şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Ters zamanlı aşırı akım karakteristiklerine ait eğriler Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Ters zamanlı aşırı akım karakteristikleri

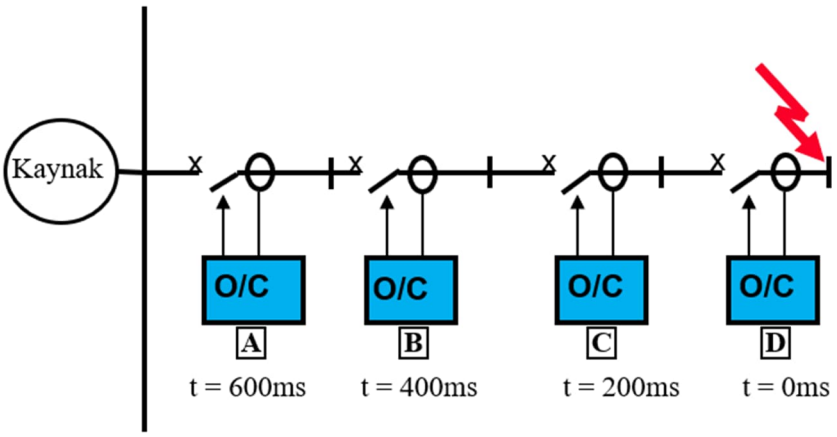
Yönsüz aşırı akım korumasıyla seçici bir koruma koordinasyon, akım selektivitesi, zaman selektivitesi ve röle haberleşmesiyle selektivite yöntemleriyle gerçekleştirilebilmektedir.

Akım selektivitesi, güç kaynağından uzaktaki arızalarda arıza akımının görece düşük olması ve farklı noktalarda bulunan şebeke ekipmanlarının empedanslarından kaynaklı kısa devre akımının farklı noktalarda bulunan koruma cihazları tarafından farklı algılanması durumuna dayanır. Akım selektivitesinde röleler sadece kendi bölgelerinde basit ve hızlı koruma yapar. Koruma bölgesi dışındaki arızalara duyarlı değildir. Şekil 3.6'da B barasına yakın noktada gerçekleşen bir arızada A rölesinin minimum çalışma akımından daha küçük bir kısa devre akımı olduğunda RL A arızayı algılayamayacaktır ve çalışmayacaktır.



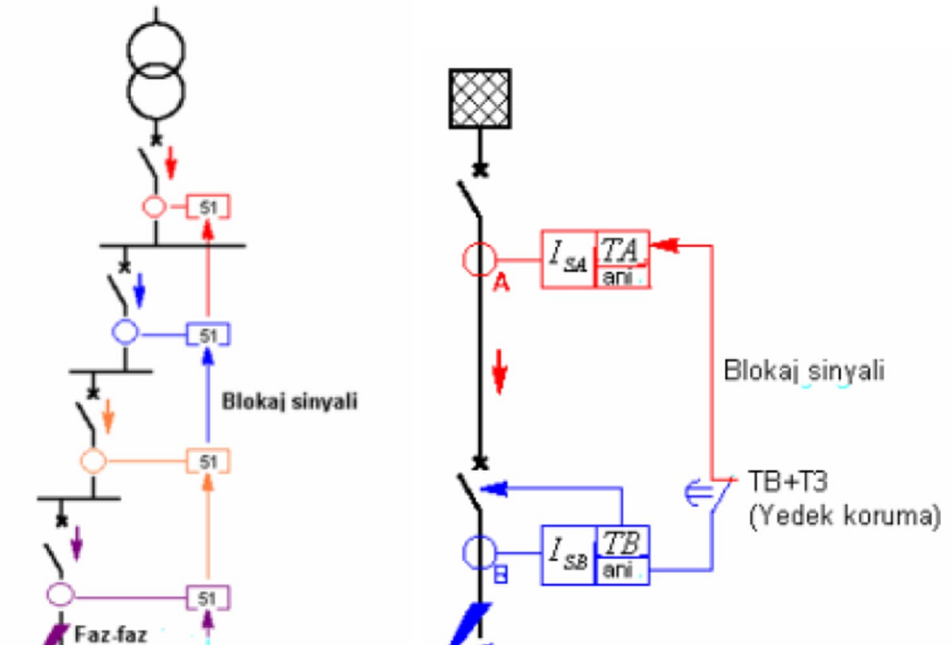
Şekil 3.6 Akım selektivitesi

Güç sisteminde iki koruma cihazı arasında seçici bir koruma sağlanabilmesi için güvenli zaman aralığına ihtiyaç vardır. Bu şekilde iki ardışık röle birbirini yedekler. Zaman selektivitesinin sağlanabilmesi için aynı koruma güzergahında bulunan ardışık röleler arasındaki güvenli zaman aralığı rölenin tipine ve kesici açma süresine göre değişiklik gösterir. Nümerik aşırı akım rölelerinde iki ardışık röle arasındaki güvenli zaman aralığı 150-200 ms olarak değerlendirilirken statik ve elektromekanik rölelerde güvenli zaman aralığı 250-300 ms olarak pratik uygulamalarda kullanılmaktadır [41]. Şekil 3.7'de örnek bir zaman selektivitesi görülmektedir.



Şekil 3.7 Zaman selektivitesi

Bir diğer selektivite yöntemi olan lojik selektivite, açma süresinin sınırlı olduğu ve zamanla selektivitenin yapılamadığı yapılarda tercih edilmektedir. Lojik selektivitede genel prensip seri iki veya daha fazla koruma rölesi bulunan bir yapıda, arıza olduğu anda alt koruma rölesinin üst koruma rölesini bloke etmesidir. Blokaj sinyali almayan röle ayarlanmış gecikme süresi sonunda açma emri verir. Blokaj süresi sınırlandırılmış ise; üst koruma alt korumanın açma süresi ve blokaj süresi kadar bekler. Bu sayede, alt ve üst koruma röleleri için eşit sürelerde açma zamanı ayarlanabilir ve ring boyunca herhangi bir zaman gecikmesine ihtiyaç duyulmaz (Şekil 3.8). Lojik selektivite için röleler arası haberleşme alt yapısının bulunması gerekmektedir.



Şekil 3.8 Lojik selektivite [42]

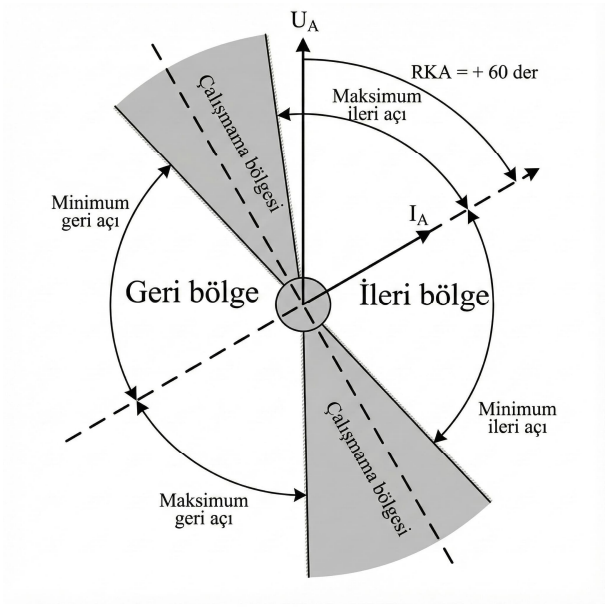
Genel olarak lojik selektivite, koruma cihazları arasındaki iletişim yoluyla yapılır; ayar eşiğinin aşıldığı tespit edildiğinde arıza bölgesinin doğru bir şekilde tanımlanmasını ve hataya giden arıza akımının kesilmesini sağlarlar. Kendi ayarlarından yüksek akım değerleri olduğunda, her bir koruma doğrudan bağlantı veya haberleşme aracılığı ile hiyerarşik olarak daha üst seviyede olan korumaya bir kilit (blokaj) sinyali yollar (güç akış yönüne göre kaynak tarafında) ve müdahale etmeden önce, yük tarafındaki korumadan benzer kilit sinyalinin gelmediğini kontrol eder. Bu şekilde, sadece arızanın kaynak tarafına yakın olan koruma müdahale eder.

Bu selektivite yönteminde önemli olan rölelerin sürekli olarak birbirleriyle haberleşebiliyor olmasıdır. Haberleşmenin kesilmesi durumunda olası arızalarda röleler birbirlerine blokaj sinyallerini gönderemeyecekleri için tüm röleler aynı anda açacaktır. Bu durumda birden fazla istasyon devre dışı kalacaktır.

3.2.2 Yönlü Aşırı Akım Koruması

Yönlü aşırı akım koruması birden fazla üretim kaynağının bulunduğu veya ring yapısına sahip şebekelerde koruma koordinasyon yapabilmek için kullanılır. Bu şebekelerde arıza akımı farklı yollardan akabildiği için yönsüz aşırı akım röleleri ters yönden gelen bir arıza akımında yön tespiti yapamadığından hatalı açmalara neden olabilir. Bu nedenle yönlü aşırı akım koruması, ring şebekelerde kritik bir öneme sahiptir [43].

Yönlü aşırı akım rölelerinin polaritesi yapılacak korumada yönü belirler. Koruma baraya doğru veya baradan ekipmana doğru ileri veya geri yönlü seçilebilir. Röle, ölçülen akım ile gerilimi arasındaki faz açısını karşılaştırıp arızanın konumunu belirler. Burada ölçülen akım, referans gerilime göre tanımlanan bölgede ise arıza ileri yönlü olarak değerlendirilir. Tersi durumda ise arıza geri yöndedir ve röle ileri yönlü olarak ayarlandıysa yönlü aşırı akım fonksiyonu bu arızada çalışmaz. Şekil 3.9'da yönlü aşırı akım rölesinin yön tayiniyle birlikte çalışma karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.9 Yönlü aşırı akım röle çalışma bölgeleri [44]

Fazlar arası ve toprak arızalarında faydalanılan polarizasyon metotları değişiklik gösterir. Faz arızaları için kullanılan yönlü aşırı akım parametrelerinde (ANSI67) genellikle ölçülen faz akımı ve fazlar arası veya faz toprak gerilimlerinden birisi kullanılır. Modern dijital rölelerde sıklıkla pozitif bileşen gerilim veya ilgili faza ait fazlar arası gerilim polarizasyon için referans olarak kullanılır. Pozitif bileşen geriliminin kullanılması özellikle simetrik olmayan arızalarda ve dengesiz yük koşullarında çok daha isabetli yön tayini yapılmasını sağlar.

Rölelerin faz arızalarında yön tayini için faydalandığı kriter aşağıdaki gibidir:

$$T = I_L \, x \, V_{pol} \, x \cos(\varphi_I - \varphi_V - \varphi_{MTA}) \tag{3.2}$$

Burada;

T: Tork

I_L: Ölçülen akımın genliği

V_{pol}: Polarizasyon geriliminin genliği

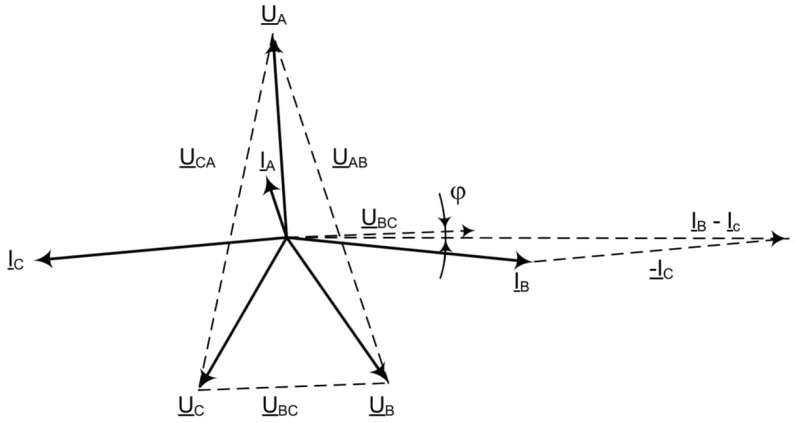
φ_I: Akımın faz açısı

φ_V: Polarizasyon geriliminin faz açısı

φ_{MTA}: Maksimum tork açısı

Hesaplanan T değeri 0'dan büyük olduğunda arıza ileri yönlü, küçük olduğunda ise arızanın geri yönlü olduğu değerlendirilir.

Şekil 3.10'da örnek bir sistemde B ve C fazları arasında gerçekleşen fazlar arası bir arızada açı değerinin polarize edilen U_{BC} gerilimi ile I_B-I_c arasında ölçüldüğü gösterilmektedir.



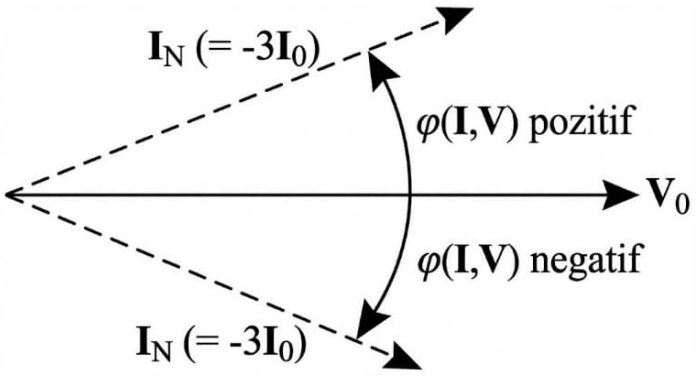
Şekil 3.10 Polarizasyon gerilimi ve akımlar

Toprak arızalarında, arıza akım seviyesi sistemin topraklama şekline (direkt topraklı, izole, direnç veya empedans üzerinden vb.) göre değişiklik gösterir ve genelde faz akımlarına göre daha küçüktür. Toprak arızaları için yön tayininde daha hassas bir yön tayini gerçekleştirebilmek için sıfır bileşen gerilimi veya negatif bileşen gerilimi referans gerilim olarak kullanılır. Bu polarizasyon gerilim değeri toprak akımıyla karşılaştırılarak toprak arızasının ileri yönde mi yoksa geri yönde mi olduğunun kararı verilir.

Rölelerin toprak arızalarında yön tayini için faydalandığı kriter aşağıdaki gibidir:

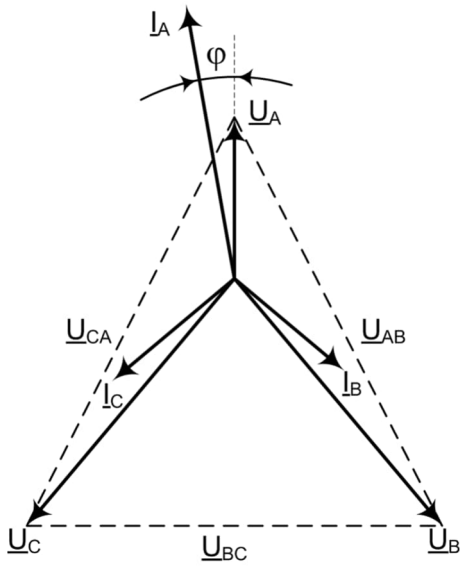
$$T = I_0 \; x \; V_0 \; x \cos\left(\varphi_{I0} - \varphi_{V0} - \varphi_{MTA,0}\right) \tag{3.3}$$

Burada, I_0 ve V_0 sırasıyla sıfır bileşen akımı ve gerilimini ifade eder.



Şekil 3.11 Yönlü toprak korumada ölçülen I0 ve V0 değerleri [38]

Şekil 3.12'de örnek A fazında gerçekleşen bir faz-toprak arızasında polarizasyon gerilimi U_A ve arıza akımı I_A arasındaki açı φ değeri görülmektedir.

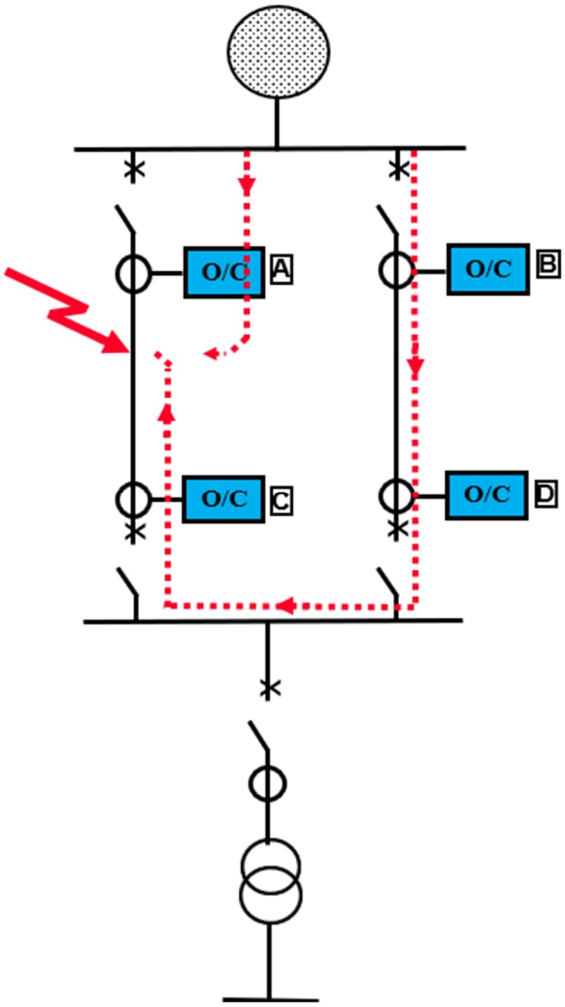


Şekil 3.12 Yönlü toprak korumada ölçülen akım ve gerilim değerleri [38]

Yönlü aşırı akım koruma için modern dijital rölelerde en çok kullanılan özelliklerden birisi de hafıza gerilimi yöntemidir. Arıza anında gerilim değeri anında çökebilir veya ölçülemeyecek kadar düşebilir. Bu durumda yön tayini için röle gerilimi bellir bir süre boyunca hafızada tutar ve arıza durumunda bu gerilim değerini referans olarak kullanır [45].

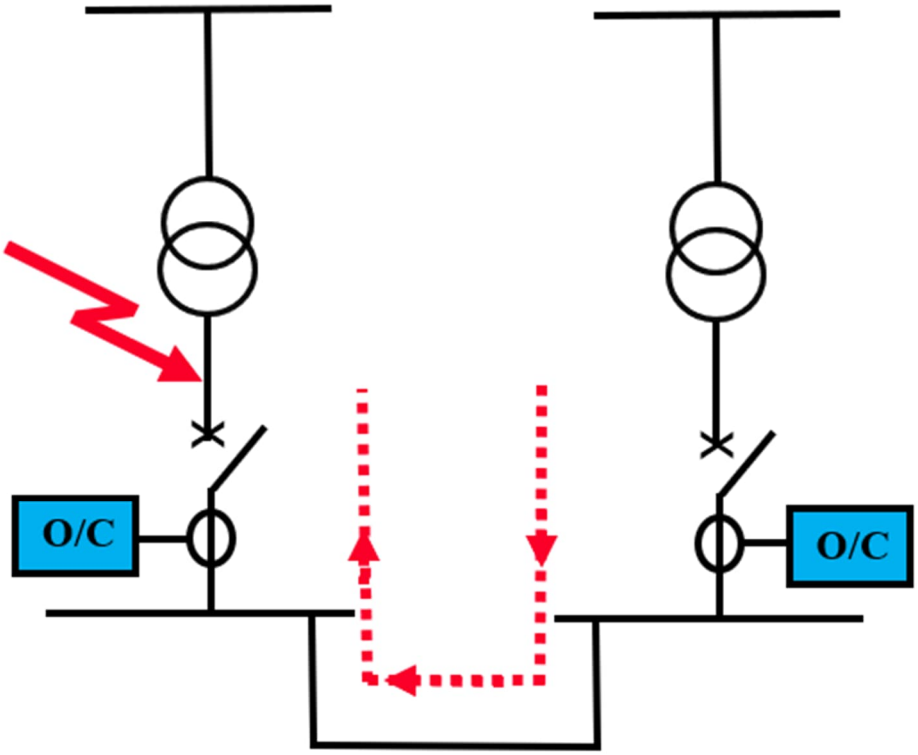
Bu özellik, baranın hemen yakınında olan veya kaynağa çok yakın noktalarda olan arızalarda koruma güvenilirliğini sağlar.

Aşağıda yönlü aşırı akım korumasının hatlarda kullanımına dair bir örnek verilmiştir. Hatların paralel bağlandığı bir durumda gerçekleşen bir arızada arızayı ileri yönlü olarak gören yönlü A ve C isimli aşırı akım rölelerinin arızayı tespit edip temizlenmesi beklenmektedir. Bu sayede paralel devre üzerinden enerji akışının sürmesi hedeflenmektedir. Arızanın A ve C isimli rölelerle temizlenmediği durumda paralel hat ve şebekenin diğer kısımları enerjisiz kalabilir.



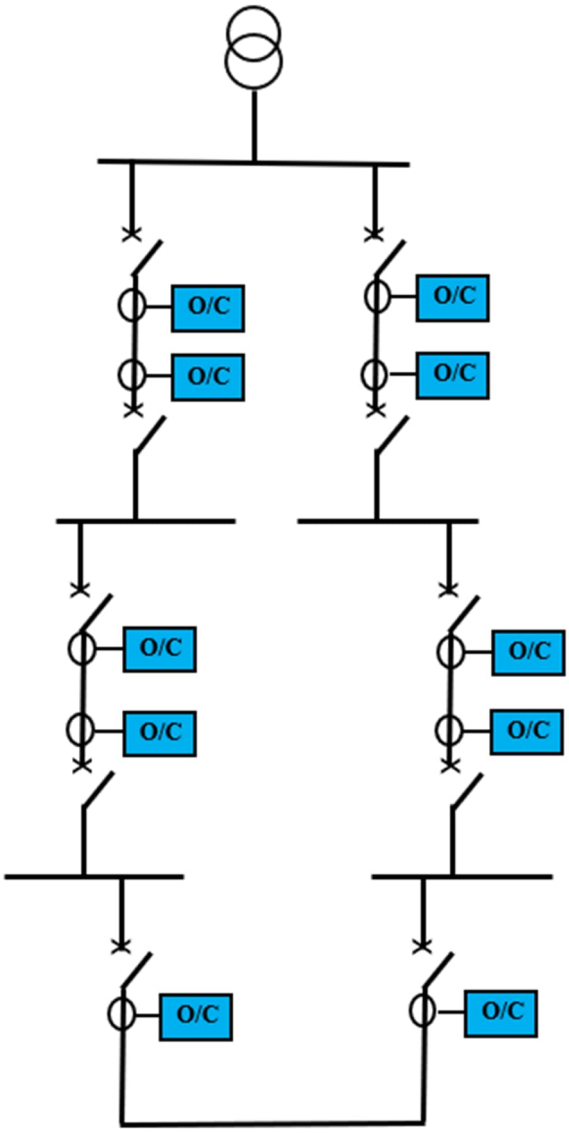
Şekil 3.13 Paralel çalışan hatlarda yönlü aşırı akım koruma

Yönlü aşırı akım rölelerinin paralel transformatör işletmesine kullanımına dair bir örnek Şekil 3.14'te verilmiştir. Paralel işletmede transformatörlerin sekonder taraflarında yönlü aşırı akım koruma cihazları temin edilmesi gerekmektedir. Transformatörün sekonder terminallerinde oluşabilecek bir arızada öncelikle sekonder tarafında bulunan yönlü aşırı akım rölesi arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermesi gerekmektedir. Bu kesici açtıktan sonra kalan arıza akımı, transformatörün primer tarafında bulunan koruma rölesi sayesinde tespit edilip primer taraftaki kesicinin açılmasıyla tamamen temizlenebilmektedir.



Şekil 3.14 Paralel çalışan trafolarda yönlü aşırı akım koruma

Yönlü aşırı akım rölelerinin kullanıldığı bir diğer topoloji de kapalı ring yapısında işletilen tesisler ve şebekelerdir. Bu şebekelerde enerji farklı noktalardan sağlanır ve güç akışının yönü işletme koşullarına göre değişebilir. Bu durumda şebekenin farklı kademeleri arasında bulunan yönlü aşırı akım koruma röleleri arasında koordinasyon sağlanmalıdır.



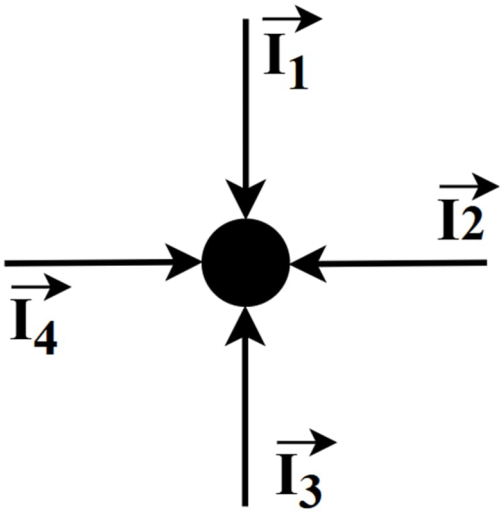
Şekil 3.15 Kapalı ring yapısında yönlü aşırı akım koruma

3.2.3 Diferansiyel Koruma

Diferansiyel koruma bir koruma bölgesinde oluşan fark akımına göre çalışan hızlı, seçici ve güvenilir bir koruma yöntemidir.

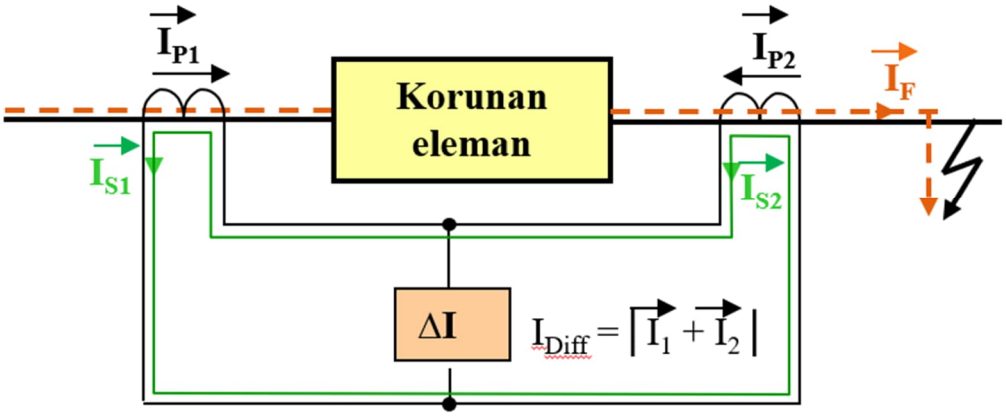
Diferansiyel koruma röleleri Kirchhoff'un Akım Yasası'na göre bir koruma bölgesine giren ve koruma bölgesinden çıkan akımları karşılaştırır ve bir iç arıza durumunda çalışır [37].

Arızasız durumda veya bir dış arıza durumunda koruma bölgesine giren akımların toplamı, bölgeden çıkan akımların toplamına eşittir.



Şekil 3.16 Bir düğüm noktasına giren ve çıkan akımlar

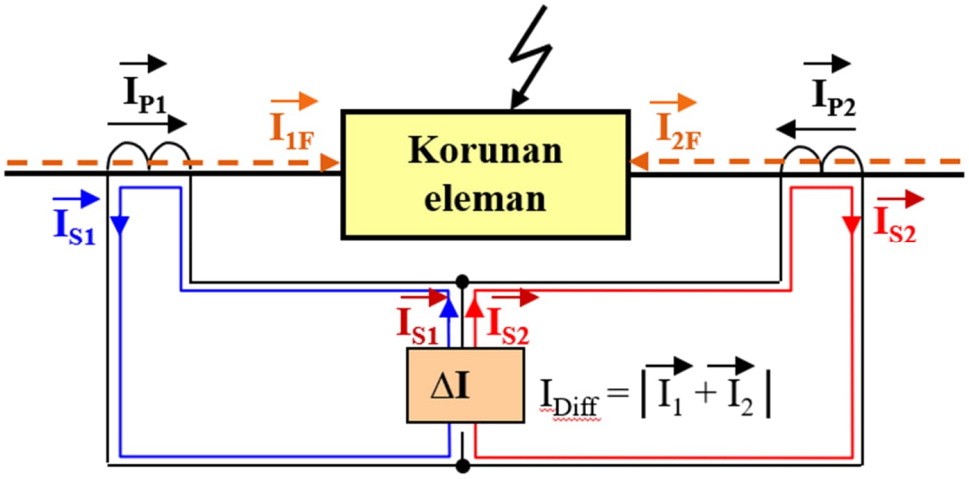
$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_4 = 0 \rightarrow \sum \vec{I} = 0 \tag{3.5}$$



Şekil 3.17 Dış arıza durumunda diferansiyel rölenin davranışı

$$\begin{aligned} \overrightarrow{I_{P1}} &= \overrightarrow{I_F} \\ \overrightarrow{I_{P2}} &= \overrightarrow{-I_F} \\ I_{Diff} = \left|\overrightarrow{I_{P1}} = \overrightarrow{I_F}\right| &= \overrightarrow{I_F} = \overrightarrow{-I_F} = 0 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Koruma bölgesinin içinde bir arıza olduğunda ise her iki uçtan arıza noktasına akım akar ve bir fark akımı oluşur. Şekil 3.18'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 3.18 İç arıza durumunda diferansiyel rölenin davranışı

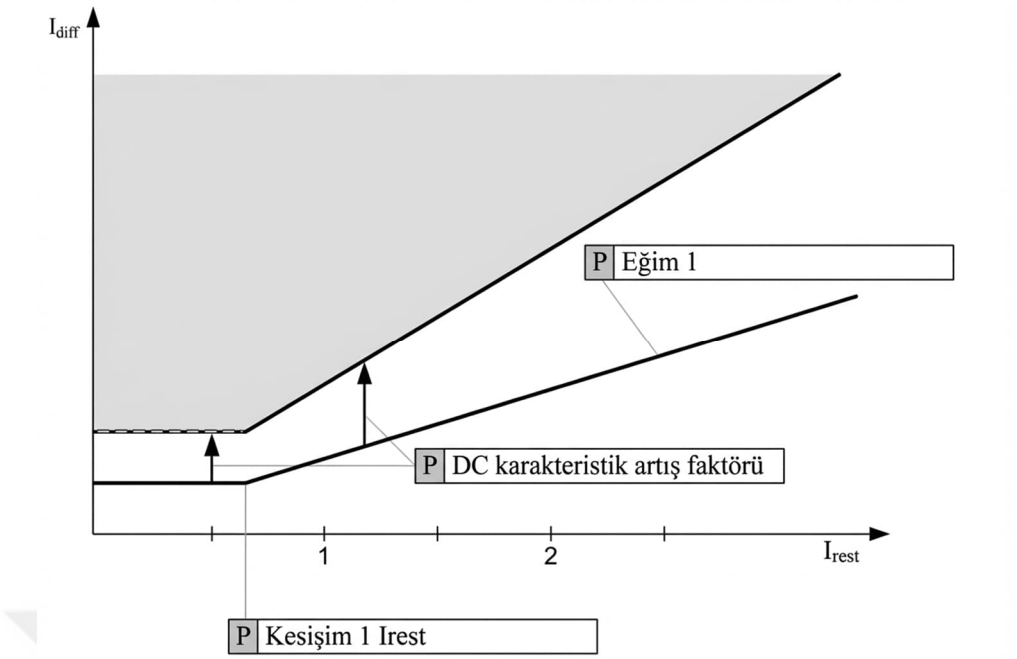
$$\overrightarrow{I_{P1}} = \overrightarrow{I_{1F}}$$
$$\overrightarrow{I_{P2}} = \overrightarrow{I_{2F}} \tag{3.7}$$
$$I_{Diff} = |\overrightarrow{I_{P1}} = \overrightarrow{I_{P2}}| = |\overrightarrow{I_{1F}} + \overrightarrow{I_{2F}}|$$

Güç sistemlerinde akım transformatörleri ideal durumda davranmaz ve akım transformatörü doyumu, kademe değiştirici farklılıkları veya kablo kapasitif akımların varlığı, dış arızalarda rölenin fark akımı algılamasına sebep olabilir. Arıza durumu olmayan bu durumda rölenin çalışması istenmez. Bu nedenle diferansiyel rölelerde bir kısıtlama (restraint) akımı ve karakteristik eğrisi kullanılır.

Bazı rölelerde kısıtlama akımı, denklem 3.8'de berlitildiği gibi koruma bölgesine giren ve çıkan akımlarının ortalaması olarak alınırken bazı röle modellerinde, denklem 3.9'da verildiği gibi koruma böglesine giren ve çıkan akımlardan büyük olan değer kısıtlama akımı olarak değerlendirilir.

$$I_{kısıtlama} = \frac{|\vec{I}_{giren}| + |\vec{I}_{çıkan}|}{2} \tag{3.8}$$

$$I_{kısıtlama} = \text{Maks}\,(|\vec{I}_{giren}|, |\vec{I}_{çıkan}|) \tag{3.9}$$



Şekil 3.19 Diferansiyel röle eğim karakteristiği [46]

Bu eğimli karakteristik, dış arızalarda yüksek geçiş akımı oluştuğunda rölenin çalışmasını engeller ve iç arızalarda ise diferansiyel akım yüksek olacağından hızlı bir şekilde açmasını sağlar. Nümerik rölelerde genelde çift eğimli bir karakteristik kullanılır. İlk bölgede dış arızalarda akım transformatörü hatalarına karşı önlem alınırken ikinci bölgede akım transformatörü doyumunda rölenin yanlış ölçüm yapıp çalışmasının önüne geçilmiş olur [46].

Diferansiyel rölelerde eğimli karakteristiğin yanı sıra bir de sabit kademe bulunmaktadır. Sabit kademede çok yüksek akımlı kısa devreler mümkün olan en kısa sürede temizlenir. Bu ayar kademesinde koruma bölgesindeki arızalar, akım büyüklüğüne bakılarak tutma akımları dikkate alınmadan her zaman anında açtırılır. Sadece sabit karakteristikli ayar parametresinin kullanılmamasının nedeni, eğimli açma karakteristiğinde düşük akımların varlığında daha hassas koruma yapıp akım transformatörü ölçüm hataları ve akım transformatörü doyumlarında yanlış çalışmanın önüne geçilmesidir.

3.2.3.1 Diferansiyel Koruma ve Haberleşme Altyapısı Gereksinimleri

Diferansiyel koruma hızlı, seçici ve güvenilirdir ancak yüksek kalitede haberleşme kanallarına ihtiyaç duyar ve görece yüksek maliyete sahiptir. Korumanın elemanın (transformatör, hat, generatör vb.) iki ucunda ölçülen akım değerleri karşılaştırılırken, ölçüm işleminin senkronize olması ve verilerin güvenli şekilde

iletilmesi gerekir. Bunun gerçekleşmediği durumda röle yanlış çalışabilir ve seçicilik bozulabilir.

Diferansiyel korumada en sık kullanılan haberleşme standardı IEC 61850'dir. Bu standartta yüksek hızlı veri aktarımı, veri modelleri ve senkronizasyon sağlanmaktadır. Diferansiyel korumada hızlı ve seçici bir koruma yapılabilmesi için haberleşmenin sağlıklı olması çok önemlidir. IEC 61850 standardı kapsamında en sık kullanılan haberleşme servisleri ise Sampled Values (SV) ve GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) mesajlarıdır [47].

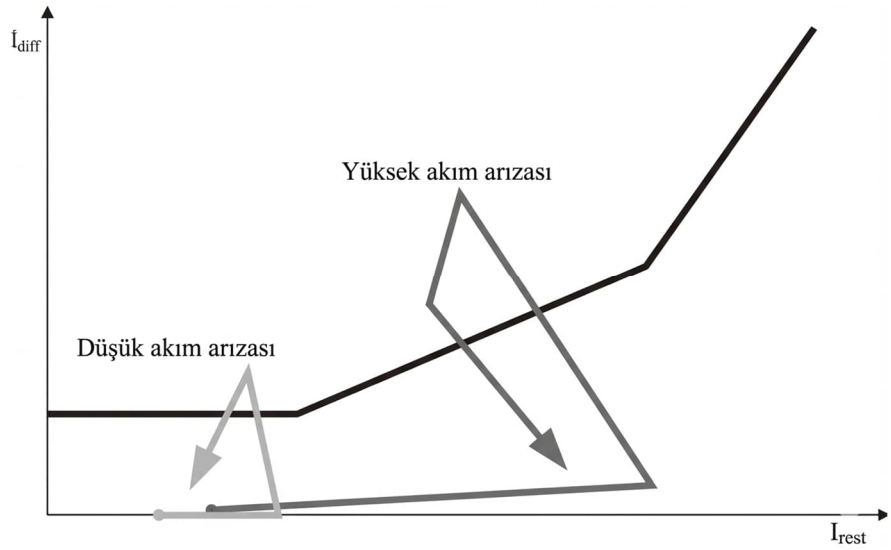
Sampled Values mesajları akım ve gerilim transformatörlerinden alınan değerleri sayısal olarak ethernet ağları üzerinden çok yüksek hızlarda yayınlarlar. Veriler saniyede binlerce örnek hızıyla iletilir ve karşılaştırılır. GOOSE ile haberleşmede ise ikili durum değişiklikleri ve koruma komutları düşük gecikmeli olarak iletilir. GOOSE mesajları çoklu yayın yapıda yayınlanır ve herhangi bir röle tarafından çok hızlı tepki ile alınabilir [47].

Bu iki mesajlaşma protokolleriyle birlikte hızlı veri iletimi sağlanır ve diferansiyel koruma daha dayanıklı hale gelir. Akım ve gerilim ölçümleri, açma komutları ve bir trafo merkezinde veya işletmede yapılacak olan işlemler yüksek hızda ve senkron bir şekilde yapılabilir.

3.2.3.2 Diferansiyel Korumanın Pratik Uygulama Zorlukları

Kirchoff akımlar yasasına göre çalışan diferansiyel koruma teoride çok mükemmel bir uygulama olsa da pratik uygulamada bazı zorlukları içermektedir.

Bir dış arıza durumunda, üzerinden geçen yüksek seviyedeki arıza akımları özellikle doğru boyutlandırılmayan akım transformatörlerinin doyuma girmesine sebep olabilir. Bu doyum, iki uçta farklı seviyelerde olabilir ve bunun sonunca röle koruma bölgesinde bir fark akımı görebilir. Bu fark akımı, belli bir süre boyunca diferansiyel röle karakteristik eğrisinin açma bölgesinde kalabilir ve sonucunda yanlış açmaya sebep olabilir.



Şekil 3.20 Diferansiyel röle akım trafosu doyumunda akım davranışı

Yüksek akımlı bir dış arızada büyük bir tutma akımı oluşur. Sonrasında akım transformatörlerinden birisi doyuma girer ve röle bir fark akımı okur. Rölenin fark akımını okuduğu sırada tutma akımı azalır. Akım transformatörü doyumdan çıktığında da diferansiyel akımı tekrar karakteristik eğrinin altına iner [46].

Transformatör ya da motor devreye alındığı sıra ortaya çıkan kısa süreli doğru akım sebebiyle akım transformatörü doyuma girebilir. Bunun sonucunda röle bir fark akımı okuyabilir ve yanlış açmalar meydana gelebilir.

Modern dijital rölelerde akım transformatörlerinin doyuma girme durumu çeşitli yöntemlerle tespit edilebilir ve bu durum gerçekleştiğinde diferansiyel koruma fonksiyonu ek stabilizasyon parametreleriyle bloklanır [48]. Böylece yanlış çalışmaların önüne geçilebilir.

Güç sisteminde paralel bir transformatörün devreye alınması veya sistemde oluşan bir arızadan sonra gerilimin geri gelmesiyle ortaya çıkan demaraj (inrush) akımları bir diferansiyel akım oluşturabilir. Modern dijital rölelerde bu durumlarda diferansiyel rölelerin yanlış çalışmasını engellemek için demeraj akımı algılama ve bloklama fonksiyonu bulunur. Bu fonksiyon, röle arızayı algılayıp açma yapacağı zaman aktif hale gelir. Bunun için iki yöntem kullanılır:

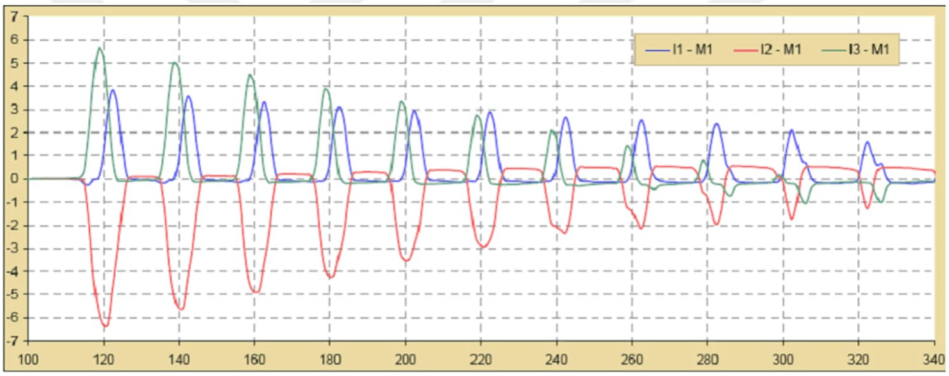
- **Diferansiyel akımda temel bileşene göre 2. harmonik bileşenin oranı**

$$(I_{2.\,harm}/I_{1.\,harm}) \tag{3.10}$$

Demaraj akımda 2. harmonik bileşen belirgin olarak ortaya çıkar. Eğer bu 2.harmonik değeri ayarlanan 2.harmonik değerini geçerse diferansiyel koruma fonksiyonu bloklanır [46].

- **Akım dalga şekli analizi-CWA**

Devreye alma sırasında akımın zamanla değişiminde akım zaman grafiğinde düz alanlar oluşmaktadır. Bu düz alanlar üç fazda da aynı anda olursa devreye alma işleminin yapıldığı kabul edilir. 2. Harmonik yöntemiyle kontrol edilemeyen durumlarda bu yöntemden faydalanılır. Bu yöntemle arızanın başlangıcından tam bir periyot sonra herhangi bir düz bölge tespit edilemezse bu bir iç arıza olduğunun göstergesidir. Bu durumda bloklama fonksiyonları bloklanır ve rölenin açma yapması engellenmiş olunur. Demeraj akımlarının dalga şekli analizine ait düz bölgelerin de sunulduğu grafik Şekil 3.21'dedir.



Şekil 3.21 Akım dalga şekli analizi [46]

4
SİSTEM MODELİ VE METODOLOJİ

4.1 Simulasyon Ortamı

Bu bölümde, gerçekleştirilen koruma koordinasyon analizlerinde kullanılan mikroşebeke modeli ve uygulanan metodoloji sunulmuştur. Modellemede, şebeke yapısını oluşturup verileri işleyebilmek için öncelikle PSS®Sincal yazılımından faydalanılmıştır. Daha sonra model, kısa devre analizlerini gerçekleştirip detaylı koruma şemaları modellemeleriyle birlikte rölelerin davranışlarını inceleyebilmek ve koruma koordinasyon çalışmasını gerçekleştirebilmek adına GridScale X APA yazılımına dönüştürülmüştür. Bu güç sistem yazılımları, gerçekçi dağıtık üretim kaynakları, transformatörler, dağıtım hatları ve yüklerle birlikte koruma şemalarının modellenip farklı işletme koşullarında sistem davranışını inceleme imkanı sunmaktadır.

Simulasyon ortamı, gerçekçi röle davranışını simule edebilecek şekilde belirlenmiştir. Koruma cihazları için örnekleme ortamı 2 kHz olarak modellenmiştir. Diferansiyel koruma şemaları için gerekli olan haberleşme gecikme süresinin 2 ms'nin altında olduğu varsayılmıştır.

Simulasyonlarda kullanılan kısa devre hesaplamaları IEC 60909 standardına göre gerçekleştirilmiştir [49]. Hesaplama parametreleri aşağıdaki gibidir:

- Maksimum kısa devre için gerilim katsayısı (c): 1.1
- Minimum kısa devre için gerilim katsayısı (c): 1.0
- Transformatör düzeltme katsayısı: Standartta verilen uygulama prensibine göre uygulanmıştır.

4.2 Mikroşebeke Test Sistemi Topolojisi

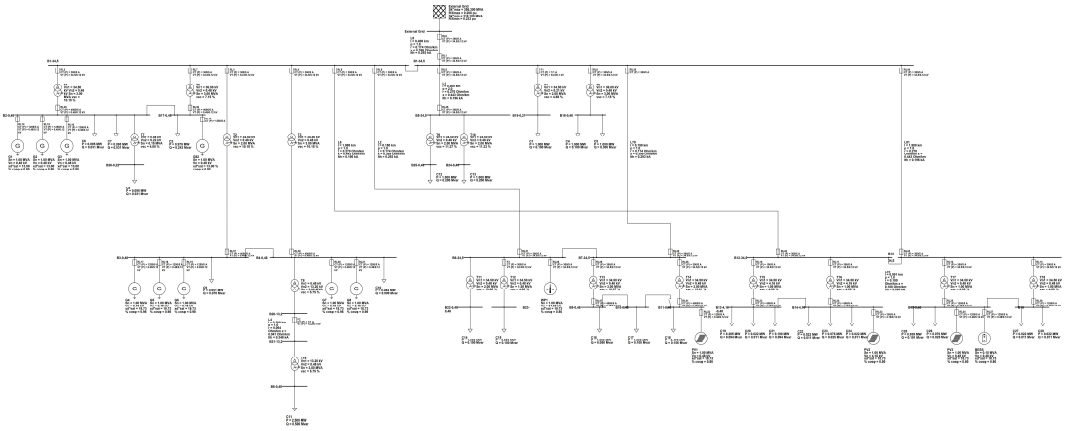
Mikroşebeke test sistem modelinin temelini daha önce Santos-Ramos ve ark. [50] tarafından oluşturulan mikroşebe modeli oluşturmaktadır. Modelde, koruma şemaları için daha zor ve gerçekçi sonuçlar yansıtabilmek adına bazı değişiklikler ve eklemeler yapılmıştır. Orjinal modelde temel koruma çalışmaları yapılmışken bu tez çalışmasında modele paralel dağıtım hatları ve transformatörler eklenip ring yapıları oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan mikroşebeke test sistem modeli, orta gerilim ve alçak gerilim seviyelerinde bulunan dağıtık üretim kaynakları, transformatörler, kablolar ve çeşitli güçlerde yüklerden oluşmaktadır. Şebeke 34.5 kV, 4.16 kV, 0.48 kV ve 0.214 kV gerilim seviyelerinde işletilmektedir.

Sistem; 29 bara, 19 transformatör, 5 dağıtım hattından oluşup ortak bağlantı noktası üzerinden harici eşdeğer şebekeye bağlıdır. 34.5 kV seviyesindeki eşdeğer şebekenin kısa devre gücü aşağıdaki gibidir:

- Makismum Kısa Devre Gücü (Sk"maks): 356.3 MVA.
- Minimum Kısa Devre Gücü (Sk"min): 318.1 MVA.

Dağıtım şebekesi, uzunlukları 300 m ile 1900 m arasında değişen beş ana dağıtım hattından oluşmaktadır. Şebekedeki transformatörlerin güçleri 0.15 MVA ile 3.0 MVA arasında değişmekte olup yüklerin beslenmesini sağlamaktadır. Mikroşebekeye ait tek hat diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir. Daha detaylı model görünümü Ek A'da mevcuttur.



Şekil 4.1 Mikroşebeke tek hat diyagramı

4.3 Primer Sistem Bileşenleri

4.3.1 Diferansiyel Koruma

Modelde faydalanılan dağıtık üretim kaynakları hem konvansiyonel hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır.

Konvansiyonel üretim kaynakları, her biri 1.0 MVA gücünde olan dokuz senkron generatörden oluşmaktadır. Bu generatörler şu şekilde sınıflandırılmıştır:

- Dizel generatörler: 3 adet
- Hidro ve Biyokütle Santralleri: 6 adet

Generatör parametreleri, döner makinelerin kısa devre akımı katkılarını ve arıza akımı azalma karakteristiklerini gerçekçi şekilde yansıtacak şekilde ayarlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, modern güç elektroniği arayüzlü üretim kaynaklarının davranışlarını yansıtacak şekilde modellenmiştir. İnverter tabanlı dağıtık üretim kaynakları şu şekildedir:

- Fotovoltaik (PV) Üniteleri: 4 adet (her biri 1.0 MVA)
- Rüzgar Türbini: 1 adet (1.0 MVA)
- Enerji Depolama Sistemi (ESS): 1 adet (0.15 MVA)

Önemli olarak, bu inverter (evirici) tabanlı kaynakların arıza katkıları akım sınırlama özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Senkron makinelerden farklı olarak, bu kaynaklar arıza durumunda yalnızca nominal akımlarının 2 ila 3 katı (2-3 p.u.) kadar akım sağlayabilirler.

4.3.2 Transformatörler

Farklı gerilim seviyeleri ve dağıtık üretim kaynaklarına bağlı on dokuz tane transformatör şebekede mevcuttur. Bu transformatörlerin güçleri 0.15 MVA'dan 3.0 MVA'ya değişmekte olup 34.5/0.48 kV, 34.5/4.16 kV, ve 34.5/0.214 kV dönüştürme oranlarına sahiptir. Transformatörlerin bazıları paralel çalıştırılıp bir ring yapısı oluşturulması sağlanmıştır.

Tablo 4.1 Mikroşebeke test sistemi transformatör verileri

Transformatör İsmi	Bağlantı Tipi	Gücü [MVA]	Dönüştürme Oranı	Kısa Devre Empedansı Z [%]
T1	Dyn5	3	34.5/0.48	10.15
T2	Dyn5	2	34.5/0.48	10.18
T3	Dyn5	3	34.5/0.48	10.15
T4	Dyn5	2	34.5/0.21	4.88
T5	Dyn5	3	36/0.48	7.15
T6	Dyn5	3	36/0.48	7.15
T7	Dyn5	0.15	0.48/0.22	4
T8	Dyn5	3	13.2/0.48	5.75
T9	Dyn5	2	34.5/0.48	11.27
T10	Dyn5	2	34.5/0.48	11.23
T11	Dyn5	2	34.5/0.48	13.08
T12	Dyn5	1.5	34.5/0.48	4
T13	Dyn5	3	34.5/0.48	10.97
T14	Dyn5	3	34.5/0.48	13.01
T15	Dyn5	1	34.5/4.16	7.83
T16	Dyn5	1	34.5/4.16	7.83
T17	Dyn5	1	34.5/0.48	7.25
T18	Dyn5	1	34.5/0.48	7.25
T19	Dyn5	3	13.2/0.48	5.75

4.3.3 Dağıtım Hatları

Şebekede uzunlukları 300 m ile 1900 m arasında değişen orta gerilim dağıtım hatları mevcuttur. Kabloların parametreleri standart orta gerilim iletken karakteristiklerinden alınmıştır. Çalışmada, mevcut sisteme yeni iletkenler de eklenerek ring yapıları oluşturulmuştur ve yönlü ve diferansiyel rölelerin farklı işletme koşullarındaki davranışları incelenmiştir.

Tablo 4.2 Mikroşebeke test sistemi hat verileri

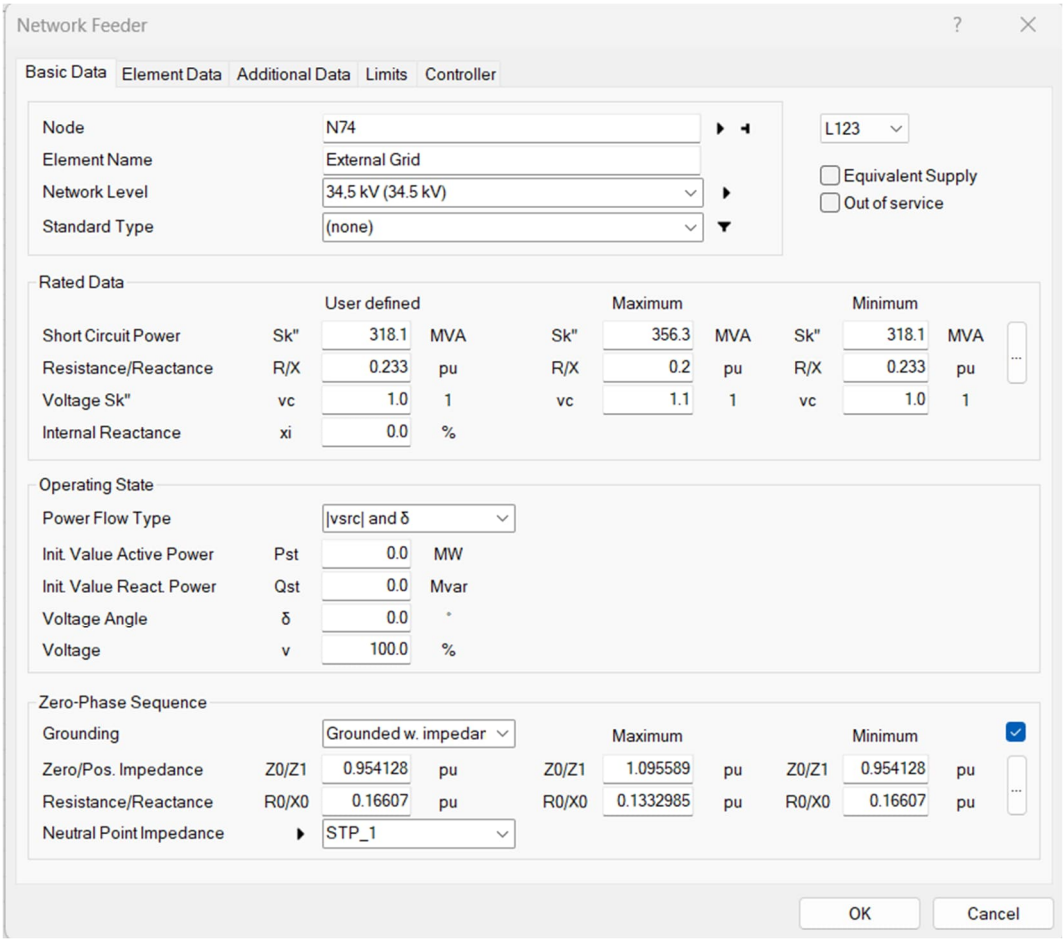
Hat İsmi	Gerilim [kV]	Uzunluk [km]	Nominal Akım [kA]	R1 [Ohm/km]	R0 [Ohm/km]	X1 [Ohm/km]	X0 [Ohm/km]
L0	34.5	0.4	0.2929	0.1744	0.5613	0.3978	1.3754
L1	34.5	0.5	0.1961	0.2697	0.4422	0.4425	1.8600
L2	34.5	0.15	0.2929	0.1738	0.3461	0.3985	1.8422
L3	34.5	1.9	0.1961	0.2697	0.4422	0.4425	1.8600
L4	15	0.3	0.3479	0.0640	0.2400	0.0410	1.8054

Tablo 4.2 Mikroşebeke test sistemi hat verileri (devamı)

L5	34.5	0.3	0.2929	0.1738	0.3461	0.3985	1.8422
L6	34.5	1.9	0.1961	0.2697	0.4422	0.4425	1.8600
L7	34.5	1.9	0.1961	0.2697	0.4422	0.4425	1.8600
L8	34.5	0.15	0.2929	0.1738	0.3461	0.3985	1.8422

4.3.4 Eşdeğer Şebeke

Eşdeğer şebeke, mikroşebekeyi ortak bağlantı noktası üzerinden besleyen güçlü bir ana şebekeyi temsil etmektedir. Güçlü ve zayıf sistem koşullarını yansıtabilmek adına maksimum ve minimum kısa devre kapasite değerlerinden faydalanılmıştır. Eşdeğer şebekeye ait girdi verileri Şekil 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.2 Eşdeğer şebeke girdi verileri

4.4 Koruma Sistem Modeli

Çalışmada farklı koruma felsefelerinin performansı karşılaştırabilmek adına yönlü aşırı akım ve diferansiyel olmak üzere iki ayrı koruma şeması modellenmiştir.

4.4.1 Ölçü Transformatörleri

Tüm koruma bölgeleri için Akım Transformatörleri (CT'ler) ve Gerilim Transformatörleri (VT'ler) modellenmiştir. Dönüşüm oranları, ilgili fiderlerin nominal akımlarına göre belirlenmiştir. Akım ve gerilim transformatörleri dönüştürme oranları Tablo 4.3' te verilmiştir.

Tablo 4.3 Mikroşebeke modeli akım ve gerilim transformatörleri

Röle İsmi	CT [A/A]	VT [V/V]
F3, RL0–RL9, RL11–13, RL42–RL45	300/5	34500/115
RL23, RL28–RL32	300/5	4160/115
RL10, RL26	100/5	34500/115
RL14–22, RL24, RL27, RL35, RL36, RL46	1250/5	480/115
RL33, RL34	600/5	4160/115
RL37–RL41, RL47	4000/5	480/115

4.4.2 Yönlü Aşırı Akım Koruması

Yönlü aşırı akım röleleri mikroşebekede hat fiderlerinde ve transformatör terminallerinde faz ve toprak arızalarına karşı koruma sağlamak için modellenmiştir.

- Transformatörlerin primer taraflarında yönsüz aşırı akım rölelerinden faydalanılmıştıtr.
- Ring yapısı içerisindeki paralel işletilen transformatörlerin sekonder taraflarında ise yönlü aşırı akım röleleri mevcuttur.

Her rölede, birer tane ters zamanlı ve sabit zaman karakteristikli ayar parametresi oluşturulmuştur.

- Ters zamanlı aşırı akım ayarıyla aşırı yüklenme durumlarına karşı koruma yapılabilmesi hedeflenmiştir.
- Transformatör fiderlerinin orta gerilim taraflarında iki sabit zamanlı aşırı akım ayarı mevcuttur. Bu ayarlardan bir tanesi transformatörün primer terminallerinde oluşabilecek arızalarda hızlı temizleme yapmak için diğeri ise alçak gerilim arızalarında yedekleme yapması için kullanılmıştır.
- Dağıtım hatları fiderlerinin iki tarafında da yönlü aşırı akım ayarları alt ve üst kademe arasında uygun bir koruma koordinasyon sağlanabilmesi adına verilmiştir.

Koruma rölelerinin koordinasyonu, sistemin kısa devre analiz sonuçlarına dayanarak gerçekleştirilmiştir. Selektivitenin sağlanabilmesi için her rölenin aşırı akım ayarları ayrı ayrı belirlenmiş, ardından akım zaman koordinasyon karakteristiklerinden de faydalanılarak PSS Sincal ve GridScale X APA yazılımlarında yapılan simülasyonlar sonucunda çalışma performansları doğrulanmıştır. Aşırı akım rölelerine faz ayarları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Aşırı akım röleleri faz ayarları

Röle İsmi	Röle Modeli ve Eğri Karakteri	Ip Yönü	Ip [A]	Ip TMS	I> Yönü	I> [A]	tI> [s]	I>> Yönü	I>> [A]	tI>> [s]
F3	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	0.53	0.4	Yönsüz	2.09	0.4	Yönsüz	12.55	0.1
RL0	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	5.5	0.5	-	-	-	-	-	-
RL1	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	5.5	0.5	-	-	-	Yönsüz	2	0.82
RL10	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	1.05	0.6	Yönsüz	12	0.4	Yönsüz	25.11	0.05
RL11	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	0.35	0.6	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	8.37	0.05
RL12	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	0.35	0.4	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	8.37	0.05
RL13	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	0.35	0.4	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	8.37	0.05
RL14	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.3	İleri	48	0.05	-	-	-
RL15	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.3	İleri	48	0.05	-	-	-

Tablo 4.4 Aşırı akım röleleri faz ayarları (devamı)

RL16	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.3	İleri	48	0.05	-	-	-
RL17	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.05	-	-	-
RL18	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.05	-	-	-
RL19	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.05	-	-	-
RL2	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	1.05	0.4	Yönsüz	4.18	0.4	Yönsüz	9.89	0.1
RL20	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.05	-	-	-
RL21	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.05	-	-	-
RL22	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.3	İleri	40	0.05	-	-	-
RL23	7SJ85_5A.EXT	İleri	2.54	0.3	İleri	42	0.05	-	-	-
RL24	7SJ85_5A.EXT	İleri	5.29	0.2	İleri	110	0.03	-	-	-
RL26	7SJ85_5A.VER	İleri	0.3	0.4	-	-	-	-	-	-
RL27	7SJ85_5A.EXT	İleri	5.29	0.25	İleri	110	0.05	-	-	-
RL28	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	1.05	0.3	Yönsüz	4.18	0.4	Yönsüz	7.72	0.1
RL29	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	1.05	0.4	Yönsüz	4.18	0.4	Yönsüz	9.15	0.1
RL3	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	0.7	0.4	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	6.58	0.1
RL30	7SJ85_5A.NOR	İleri	4.88	0.3	İleri	100	0.3	-	-	-
RL31	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	2.3	0.3	-	-	-
RL32	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	2.3	0.3	-	-	-
RL33	7SJ85_5A.NOR	İleri	0.7	0.3	İleri	15	0.05	Yönsüz	15	0.2
RL34	7SJ85_5A.NOR	İleri	0.7	0.3	İleri	15	0.05	Yönsüz	15	0.2
RL35	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.88	0.3	İleri	50	0.05	Yönsüz	50	0.2

Tablo 4.4 Aşırı akım röleleri faz ayarları (devamı)

RL36	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.88	0.3	İleri	50	0.05	Yönsüz	50	0.2
RL37	7SJ85_5A.NOR	İleri	1.8	0.3	İleri	20	0.05	Yönsüz	20	0.25
RL38	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.7	0.3	İleri	20	0.05	Yönsüz	20	0.25
RL39	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.7	0.3	İleri	19.6	0.05	Yönsüz	19.6	0.25
RL4	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	1.05	0.4	Yönsüz	4.18	0.4	Yönsüz	9.89	0.1
RL40	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.7	0.3	İleri	19.6	0.05	Yönsüz	19.6	0.25
RL41	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.7	0.1	İleri	20	0.05	Yönsüz	20	0.25
RL42	7SJ85_5A.NOR	İleri	3.27	0.2	İleri	19.5	0.3	-	-	-
RL43	7SJ85_5A.NOR	İleri	3.27	0.2	İleri	19.5	0.3	-	-	-
RL44	7SJ85_5A.NOR	İleri	3.27	0.4	İleri	71	0.3	-	-	-
RL45	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	2.75	0.3	-	-	-
RL46	7SJ85_5A.VER	İleri	5.29	0.3	İleri	48	0.05	-	-	-
RL47	7SJ85_5A.NOR	İleri	2.7	0.3	İleri	20	0.05	Yönsüz	20	0.25
RL5	7SJ85_5A.VER	İleri	3.27	0.42	-	-	-	-	-	-
RL6	7SJ85_5A.NOR	İleri	4.88	0.3	İleri	100	0.3	-	-	-
RL7	7SJ85_5A.NOR	Yönsüz	1	0.4	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	13.45	0.1
RL8	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	1	0.4	Yönsüz	4	0.4	Yönsüz	13.46	0.1
RL9	7SJ85_5A.NOR	İleri	3.27	0.4	İleri	71	0.3	-	-	-

Mikroşebeke modelinde bulunan aşırı akım rölelerine ait toprak aşırı akım ayarları Tablo 4.5'te verilmektedir.

Tablo 4.5 Aşırı akım röleleri toprak ayarları

Röle İsmi	Röle Modeli ve Eğri Karakteri	Iep Yönü	Iep [A]	Iep 1 TMS	Ie> Yönü	Ie> [A]	tIe> [s]	Ie>> Yönü	Ie>> [A]	tIe>> [s]
F3	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	Yönsüz	0.1	0.1	-	-	-
RL0	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	0.39	0.7	-	-	-	-	-	-
RL1	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	0.39	0.7	-	-	-	-	-	-
RL10	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL11	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL12	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL13	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL14	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL15	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL16	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL17	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL18	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL19	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL2	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	Yönsüz	0.5	0.1	-	-	-
RL20	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL21	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	İleri	24	0.05	Yönsüz	24	1
RL22	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	5	0.05	Yönsüz	5	1
RL23	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	73	0.05	Yönsüz	73	1
RL24	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	5	0.05	Yönsüz	5	1

Tablo 4.5 Aşırı akım röleleri toprak ayarları (devamı)

RL26	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	1	0.1	Yönsüz	5	1
RL27	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	1	0.1	Yönsüz	5	1
RL28	7SJ85_5A.NOR	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL29	7SJ85_5A.NOR	İleri	0.1	0.14	-	-	-	-	-	-
RL3	7SJ85_5A.NOR	İleri	0.05	0.42	-	-	-	-	-	-
RL30	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	8.33	0.3	-	-	-
RL31	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	3.15	0.3	-	-	-
RL32	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	3.15	0.3	-	-	-
RL33	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	10	0.05	Yönsüz	10	0.2
RL34	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	10	0.05	Yönsüz	10	0.2
RL35	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	Yönsüz	25	0.05	Yönsüz	25	0.25
RL36	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	25	0.05	Yönsüz	25	0.25
RL37	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	0.25	0.05	Yönsüz	4.63	0.25
RL38	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	4.63	0.05	Yönsüz	4.63	0.25
RL39	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	15	0.05	Yönsüz	15	0.25
RL4	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.42	-	-	-	-	-	-
RL40	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	15	0.05	Yönsüz	15	0.25
RL41	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	5.5	0.05	Yönsüz	5.5	0.25
RL42	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	3.75	0.1	-	-	-
RL43	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	3.75	0.1	-	-	-
RL44	7SJ85_5A.VER	İleri	0.09	0.42	İleri	11.67	0.3	-	-	-

Tablo 4.5 Aşırı akım röleleri toprak ayarları (devamı)

RL45	7SJ85_5A.VER	Yönsüz	0.11	0.42	-	-	-	-	-	-
RL46	7SJ85_5A.VER	İleri	0.6	0.14	-	-	-	-	-	-
RL47	7SJ85_5A.NOR	-	-	-	İleri	5.5	0.05	Yönsüz	5.5	0.25
RL5	7SJ85_5A.VER	İleri	0.11	0.42	-	-	-	-	-	-
RL6	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	8.33	0.3	-	-	-
RL7	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.42	Yönsüz	32.5	0.1	-	-	-
RL8	7SJ85_5A.VER	İleri	0.1	0.42	-	-	-	-	-	-
RL9	7SJ85_5A.VER	-	-	-	İleri	11.67	0.3	-	-	-

4.4.3 Diferansiyel Koruma

Diferansiyel koruma röleleri, dağıtım hatları ve transformatörlerde modellenmiştir. Bu rölelerin ayarları standart röle üretici önerilerine göre verilmiştir.

Nominal akımının 20%'si değerinde açma akımı ayarlanmış olup, koruma bölgesine giren ve çıkan akımların vektörel farkı karşılaştırılarak çalışma kriteri belirlenmiştir. Ayrıca, akım transformatörleri ölçüm hatalarını elemine edebilmek adına 30% oranında yüzde kısıtlama eğimi uygulanmıştır. Bu sayede diferansiyel koruma röleleri, iç arızalar için anında açma sağlamış; dış arızalar ve yük koşullarında ise kararlı kalacak şekilde tasarlanmıştır.

4.5 Kısa Devre Analizi ve Model Değerlendirmesi

Koruma koordinasyon çalışmalarına başlamadan önce, sistemde bulunan tüm baralardaki arıza akımı büyüklüklerini belirlemek amacıyla her iki işletme senaryosu için kapsamlı bir kısa devre analizi gerçekleştirilmiştir:

- Senaryo A: Şebekeye bağlı ve DG'lerin devrede olduğu durum
- Senaryo B: Mikroşebeke sadece şebekeden beslenmekte ve dağıtık üretim kaynaklarının devre dışı olduğu durum

Kısa devre analizi sonuçlarıyla bara, transformatör, kablo gibi sistem ekipmanlarının kısa devre dayanımları incelenmiştir. Ayrıca bu sonuçlar, röle ayarlarının belirlenmesinde ve farklı işletme koşullarıyla birlikte değişen arıza akımı seviyelerinde röle koordinasyonunun analiz edilmesinde temel veri kaynağını oluşturmuştur.

Seçili orta gerilim baralarına ait kısa devre analiz sonuçları Bölüm 5'te sunulmuştur. Alçak gerilim sistem davranışı da bu çalışmayla analiz edilmiş olup, benzer eğilimleri göstermektedir.

4.6 Metodolojik Yaklaşım

Çalışmada kullanılan metodoloji adımları aşağıdaki gibidir.

1. **Sistem Modellemesi:**

Geliştirilmiş ve daha karmaşık hale getirilmiş mikroşebeke test modeline uygun şekilde tüm üretim kaynakları, transformatörler, hatlar ve yükler PSS®Sincal yazılımında modellenerek şebeke yapısı oluşturulmuştur.

2. **Veri Transferi ve Koruma Modellerinin Oluşturulması:**

Daha kapsamlı ve detaylı koruma simulasyonlarının yapılabilmesi için sistem modeli GridScale X APA (PSS CAPE) yazılımına aktarılmış; tüm koruma elemanları modellenmiş ve ilgili CT/VT bağlantıları yapılmıştır.

3. **Kısa Devre Hesaplamaları:**

Üç faz, faz-faz, tek faz-toprak ve iki faz-toprak arızaları, dağıtım hatlarının her iki ucunda ve 50%'sinde ve transformatörlerin hem YG hem de AG taraflarında olacak şekilde çeşitli noktalarda simüle edilmiştir.

4. **Röle Ayarı ve Koordinasyonu:**

Yönlü aşırı akım röleleri ve diferansiyel röleler, sistem koşullarına uygun biçimde parametrelenmiştir. Koordinasyon, akım zaman karakteristikleri ve doğrudan simülasyon makroları ile test edilmiştir.

5. **Performans Değerlendirmesi:**

Her rölenin çalışma süresi, arıza tespit doğruluğu ve selektivitesi her iki işletme senaryosunda analiz edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı değerlendirme için kayıt altına alınmıştır.

Bu sistematik yaklaşım sayesinde her iki koruma şeması da aynı şebeke ve arıza koşulları altında değerlendirilmiş, böylece koruma rölelerinin karşılaştırılması sağlanmıştır.

5
SİMULASYON SENARYOLARI VE SONUÇLARI

5.1 Giriş

Bu bölümde, ring yapısına sahip mikroşebeke modeli için gerçekleştirilen koruma koordinasyon analizlerine ait arıza simülasyon senaryoları ve sonuçları sunulmaktadır. Simülasyonların temel amacı, yönlü aşırı akım ve diferansiyel koruma şemalarının farklı işletme koşulları ve arıza noktaları altındaki performansını değerlendirmektir.

Tüm simülasyonlar, Bölüm 4'te açıklanan sistem modelleme ve röle konfigürasyon adımları izlenerek GridScale X APA ortamında gerçekleştirilmiştir. Arıza senaryoları, mikroşebekenin gerçekçi işletme modlarını temsil edecek şekilde tasarlanmış olup, değişen kısa devre seviyeleri altında koruma sistemlerinin duyarlılığını, selektivitesini ve koordinasyonunu değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

5.2 Simulasyon Senaryoları

Çalışmada iki temel işletme senaryosu ele alınmıştır. Çalışmada ele alınan senaryolar, mikroşebekelerde mrvcut olan en önemli işletme şartlarıdır.

- **Senaryo A: Şebeke + Dağıtık Üretim Kaynakları Devrede**

Mikroşebeke, ortak bağlantı noktası üzerinden ana şebekeye bağlıdır ve aynı zamanda tüm dağıtık üretim kaynakları devrededir. Ana şebeke ve mikroşebekede bulunan dağıtık üretim kaynakları sistemdeki toplam arıza akımına katkıda bulunduğundan, daha yüksek kısa devre seviyeleri oluşmaktadır. Bu senaryo, özellikle yönlü aşırı akım röleleri tarafından genellikle koruma koordinasyonunun sağlandığı normal işletme koşullarını temsil etmektedir.

- **Senaryo B: Sadece Şebekeden Beslenme**

Bu senaryoda tüm dağıtık üretim kaynakları devre dışıdır ve mikroşebeke yalnızca ortak bağlantı noktası (PCC) üzerinden ana şebeke üzerinden beslenmektedir. Bu durumda arıza akımı büyüklükleri azalmaktadır. Bu senaryo aynı zamanda zayıf şebeke durumu olarak adlandırılabilir. Bu işletme koşulunda, koruma rölelerinin görece düşük arıza akımı seviyelerindeki performansı test edilmektedir.

Her iki senaryoda da üç fazlı, faz-faz, tek-faz-toprak ve iki faz toprak arıza tipleri mikroşebekenin çeşitli noktalarında simüle edilmiştir.

Tablo 5.1'de işletme senaryoları tablo halinde verilmiştir.

Tablo 5.1 Çalışma senaryoları

Senaryo	Şebeke Durumu	DG Sayısı	Güç Akışı	Beklenen Koruma Davranışı
Senaryo-A	Ana Şebeke + DG	14	Çift Yönlü	Yönlü aşırı akım ve diferansiyel rölelerin doğru bir şekilde arıza tespiti yapıp arızaları temizlemesi
Senaryo-B	Ana Şebeke (DG devre dışı)	0	Çift Yönlü	Yönlü aşırı akım rölelerinin kör kalması veya yanlış çalışması. Diferansiyel rölelerin ise doğru bir şekilde arıza tespiti yapıp arızaları temizlemesi

5.3 Arıza Koşulları

Arıza simulasyonu iki temel çalışma bölümüne ayrılmıştır.

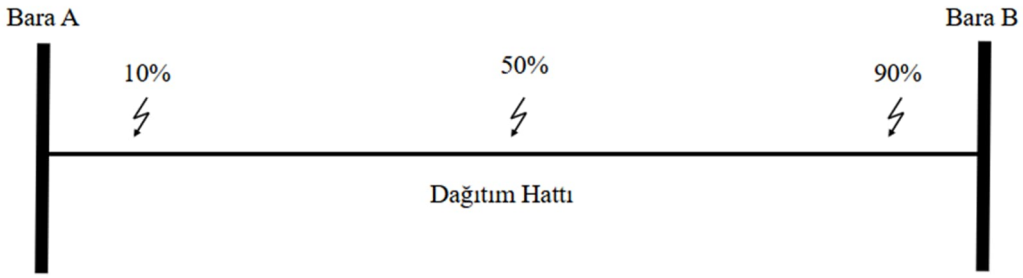
1. Transformatör Çıkış Fiderleri
2. Dağıtım Hattı Fiderleri

Uygulanan arızalarda aşağıdaki adımlar dikkate alınmıştır.

- Güç sistemlerinde en çok karşılaşılan arıza tipi olan tek faz-toprak arızası karşısında mikroşebekede bulunan rölelerin davranışları inclenmiştir. Bu noktada şebekenin topraklama yapısı büyük önem arz etmektedir.
- Minimum faz-faz ve maksimum üç faz arızaları simule edilerek yönlü aşırı akım rölelerinin ve diferansiyel rölelerin mikroşebede oluşabilecek minimum kısa devre akımı koşullarında dahi çalışabilmesi

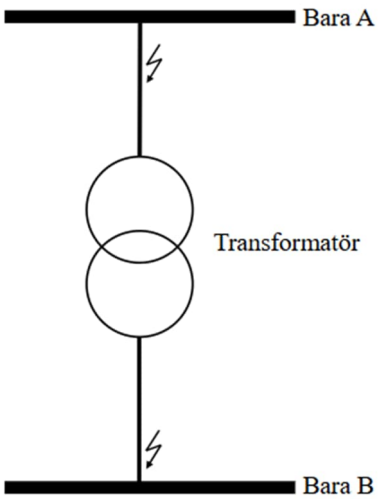
hedeflenmektedir. Ayrıca maksimum üç faz arılarında da rölelerin seçici bir koruma yapması hedeflenmektedir.

- Arıza akımı seviyesindeki ve röle çalışma ve açma sürelerindeki değişimleri analiz edebilmek için orta gerilim dağıtım hattı fiderleri boyunca arızalar, hat uzunluğunun %10'luk, %50'lik ve %90'lık bölümlerinde uygulanmıştır.



Şekil 5.1 Dağıtım hattı arıza noktaları

- Transformatör fiderlerinde primer ve yedek koruma performansını değerlendirmek amacıyla, arızalar transformatörün hem yüksek gerilim (YG) hem de alçak gerilim (AG) terminallerine uygulanmıştır.



Şekil 5.2 Transformatör arıza noktaları

- Gerçekleştirilen simulasyonlarda arıza dirençleri ihmail edilmiştir.
- Her arıza tipi her iki işletme senaryosunda (A ve B) simüle edilmiştir.
- Toplam 352 arıza simülasyonu gerçekleştirilerek koruma sisteminin davranışı kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

Her bir analizde rölelerin çalışma süreleri ve arıza tespit durumları kaydedilmiştir. Sonuçlar; hız, seçicilik ve birincil yedek röle koordinasyonu açısından değerlendirilmiştir.

5.4 Kısa Devre Analizleri

Koruma simülasyonlarına geçilmeden önce, her iki işletme modu altında oluşabilecek arıza akımı aralıklarını belirlemek amacıyla kısa devre çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Kısa devre analizlerinde kısa devre akımları VDE 0102/2016-IEC 909/0216 standardına uyumlu olarak PSS SINCAL yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çerçevede aşağıdaki arıza tipleri oluşturulmuş ve kısa devre akımları minimum ve maksimum senaryolar için hesaplanmıştır.

- Maksimum 3 Faz (TPH)
- Minimum 2 Faz (LTL)
- Maksimum 1 Faz Toprak (SLG)

Sonuçlar, Senaryo A'ya kıyasla Senaryo B'de arıza akımı büyüklüklerinde belirgin bir düşüş olduğunu açıkça göstermektedir. Bu düşüşün temel nedeni dağıtık üretim kaynaklarının devre dışı olmasıyla birlikte bu kaynaklardan gelen kısa devre katkısının azalmasıdır.

Alçak gerilim baraları için de kısa devre analizleri yapılmış olup, DG'lerin devre dışı olduğu durumda benzer şekilde önemli ölçüde düşük akım seviyeleri gözlemlenmiştir. Çalışmada yalnızca orta gerilim kısa devre analiz sonuçları sunulmuştur.

Belirlenen orta gerilim baralarına ait tek faz toprak, üç faz ve faz-faz kısa devre sonuçları Tablo 5.2'de özetlenmiştir.

Tablo 5.2 Kısa devre analiz sonuçları

		SLG		TPH		LTL	
		3IF0 (A)		IFA (A)		IFB (A)	
Arızalı Bara Adı	**Gerilim [kV]**	**Min**	**Maks**	**Min**	**Maks**	**Min**	**Maks**
Eşdeğer Şebeke	34.5	1040	1049.2	5860.1	6884.4	5075	5962
B1-34_5_A	34.5	1031.6	1042	5602.5	6633.3	4851.9	5744.6
B1-34_5_B	34.5	1031.6	1042.1	5603.9	6634.8	4853.2	5745.9
B5-34_5	34.5	1025.7	1036.2	5432.3	6397.4	4704.5	5540.3
B6-34_5	34.5	1028.9	1039.4	5517.4	6518.4	4778.2	5645.1
B7-34_5	34.5	1028.9	1039.5	5518.7	6519.1	4779.3	5645.7
B12-34_5_A	34.5	1008.8	1020.1	5000.5	5852.2	4330.6	5068.1
B12-34_5_B	34.5	1008.8	1020.1	5000.5	5852.2	4330.6	5068.1
B20-13_2	13.2	1677.8	2126.2	1119.8	1419.6	969.8	1229.4
B21-13_2	13.2	1616.5	2028.6	1117.9	1416.5	968.1	1226.7

5.5 Koruma Ayar Stratejileri ve Simulasyon Sonuçları

Kısa devre analizine dayanarak, simülasyon modeline uygulanmak üzere belirli röle ayarları hesaplanmış ve yapılandırılmıştır. Koruma stratejisi iki ana kategori altında ele alınmıştır:

1. Transformatör Fideri Koruması
2. Hat Fideri Koruması

5.5.1 Transformatör Çıkış Fideri Ayarları

Transformatör çıkışlarının korunması, hem dahili arızaların önlenmesi hem de alçak gerilim (AG) tarafına yedek koruma sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Aşırı Akım Ayarları (50/51): Transformatörlerin orta gerilim (OG) tarafında faz ve toprak arızaları için yönsüz aşırı akım fonksiyonları aktif edilmiştir. Hiyerarşik olarak daha alt ve üst kademedeki koruma cihazlarıyla koordinasyonu sağlamak için aşağıdaki ayarlar uygulanmıştır:

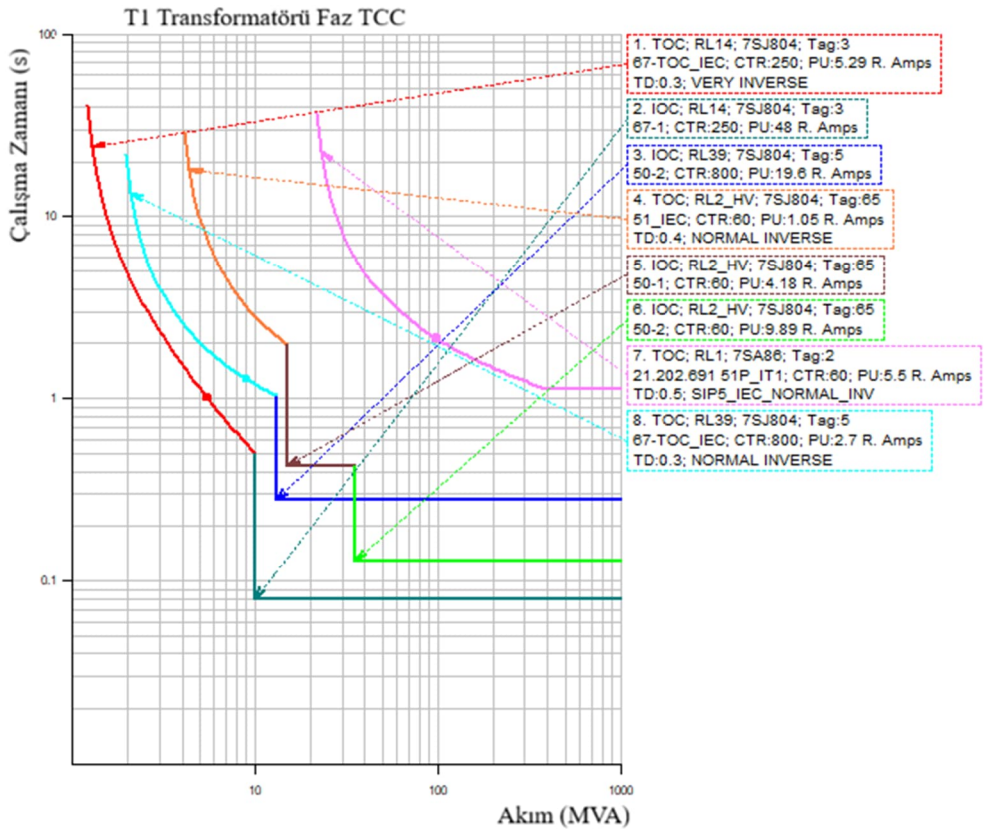
- Ters Zamanlı Ayar (ANSI 51): Transformatörü aşırı yüklenmelere karşı korumak adına nominal akımının 1.2 katı olacak şekilde açma akım ayarı verilmiştir.
- Açma Eğrisi: IEC Normal Inverse ve IEC Very Inverse eğrileri kullanılmıştır.
- Zaman Ayarı (TMS): Alt ve üst kademedeki rölelerle seçiciliği sağlayabilmek adına TMS değerleri 0.3 - 0.5 aralığında belirlenmiştir.
- Sabit zamanlı (ANSI50) kademe: Transformatörlerin primer taraflarında gerçekleşebilecek arızalarda 50 ms'de arızaların temizlenmesi hedeflenmektedir. Röle çalışma akım değeri transformatörün geçirebileceği maksimum kısa devre akımının 1.1 katı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, transformatörün sekonder tarafında oluşabilecek arızalarda yedeklilik sağlanabilmesi için bir kademe daha sabit zamanlı ayar verilmiştir. Açma akımı, transformatör nominal akımının 4 katı olacak şekilde ve 600 ms'de açma yapacak şekilde ayarlanmıştır.

Yönlü Aşırı Akım Ayarları: Paralel işletilen transformatörlerin alçak gerilim tarafında faz ve toprak arızaları için yönlü aşırı akım fonksiyonları devreye alınmıştır. Bu yönlü ayar parametreleri, dış arızalar sırasında diğer paralel transformatörlerden veya daha alt kademelerdeki dağıtık üretim kaynaklarından gelebilecek ters güç akımının neden olacağı hatalı açmaları önlemek için gereklidir.

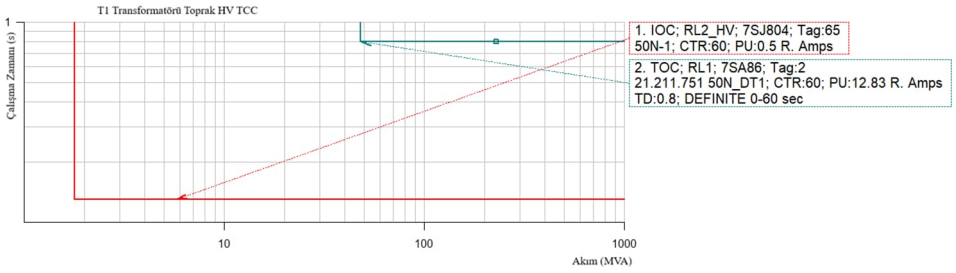
Diferansiyel Ayarlar (87T) :Transformatör diferansiyel koruması birincil ünite koruması olarak yapılandırılmıştır.

- Açma Akımı: 0.2 p.u.
- Eğim (Slope): %30 oranında çift eğimli (dual-slope) karakteristik uygulanmıştır.
- Harmonik Kısıtlama: Transformatör demeraj akımlarında yanlış açmayı önlemek için etkinleştirilmiştir.

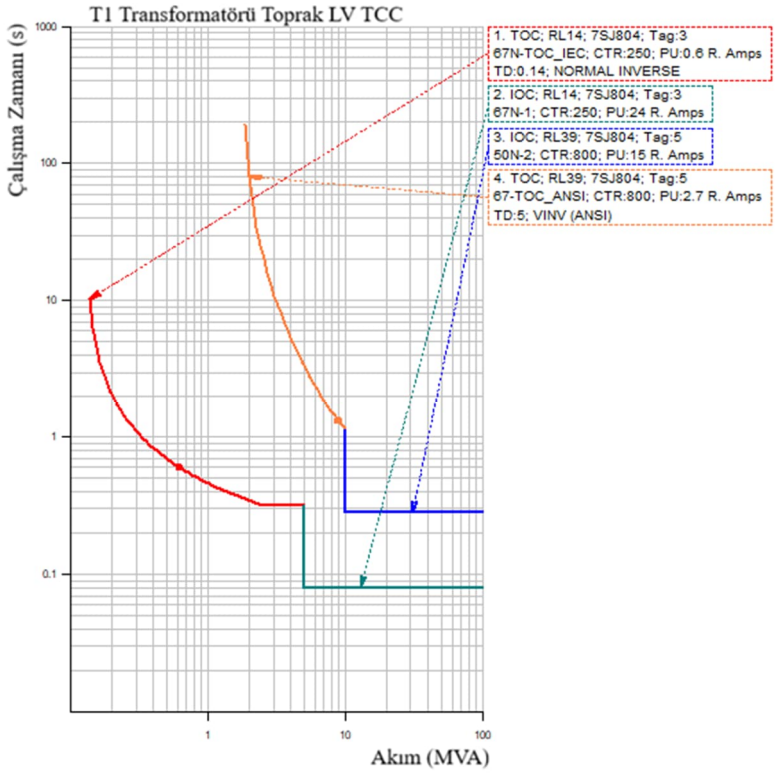
Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5, örnek bir transformatör çıkışına ait akım-zaman karakteristik (TCC) eğrilerini göstermekte olup birincil ve yedek röleler arasındaki koordinasyonu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3 Transformatör çıkışı faz akım-zaman eğrisi



Şekil 5.4 Transformatör çıkışı toprak HV akım-zaman eğrisi



Şekil 5.5 Transformatör çıkışı toprak LV akım-zaman eğrisi

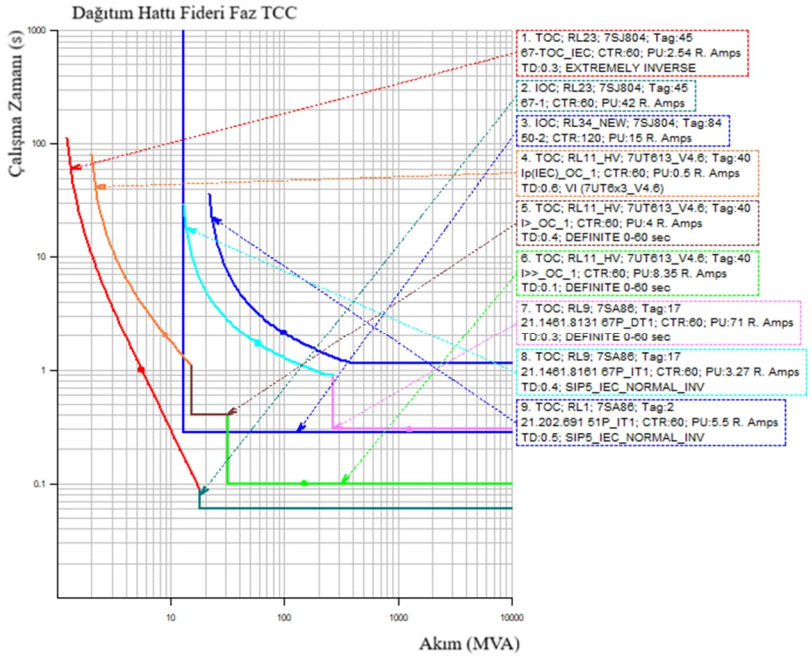
5.5.2 Dağıtım Hattı Fideri Koruma Ayarları

Mikroşebekenin ring yapısı, hat fiderlerinde seçiciliğin sağlanabilmesi adına yönsüz aşırı akım fonksiyonlarından daha gelişmiş bir koruma yapısını zorunlu kılmaktadır.

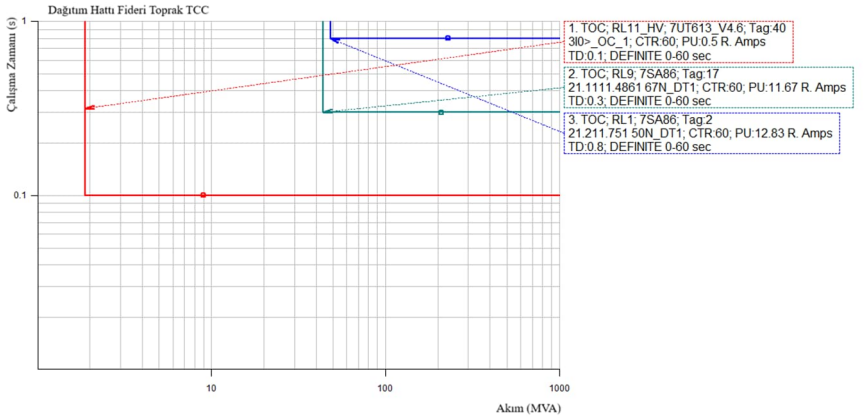
Yönlü Aşırı Akım Koruması (ANSI 67/67N): Standart yönsüz röleler, hat akımının iki uçtan da beslenebilme ihtimali nedeniyle ring topolojilerinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle hat fiderlerinin tamamında ANSI 67 (Yönlü Faz) ve ANSI 67N (Yönlü Toprak) ayar parametreleri uygulanmıştır. Her rölede, bir yönlü sabit zamanlı kademe ve bir yönlü ters zamanlı kademe ayarı verilmiştir.

Hat Diferansiyel Koruması (ANSI 87L): Karşılaştırmalı bir referans olarak hat diferansiyel koruması da uygulanmıştır. Diferansiyel korumada, IEC 61850 haberleşme protokolüyle, korunan hat bölgesine giren ve çıkan akımlar karşılaştırılmaktadır. Kirchhoff akım yasasına göre koruma bölgesine giren ve çıkan akımlar normal yük durumu altında eşittir. Bir iç arıza durumunda fark akımı oluşur ve diferansiyel röle çalışır. Dış arıza durumunda ise bir fark akımı ölçülmeyeceği için diferansiyel röle çalışmayacaktır.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7, bir dağıtım hat fideri için aşırı akım koruma koordinasyon eğrilerini göstermektedir.



Şekil 5.6 Dağıtım hattı faz akım-zaman eğrisi



Şekil 5.7 Dağıtım hattı toprak akım-zaman eğrisi

5.5.3 Transformatör Çıkış Fideri Sonuçları

5.5.3.1 Yönlü Aşırı Akım Koruma Performansı

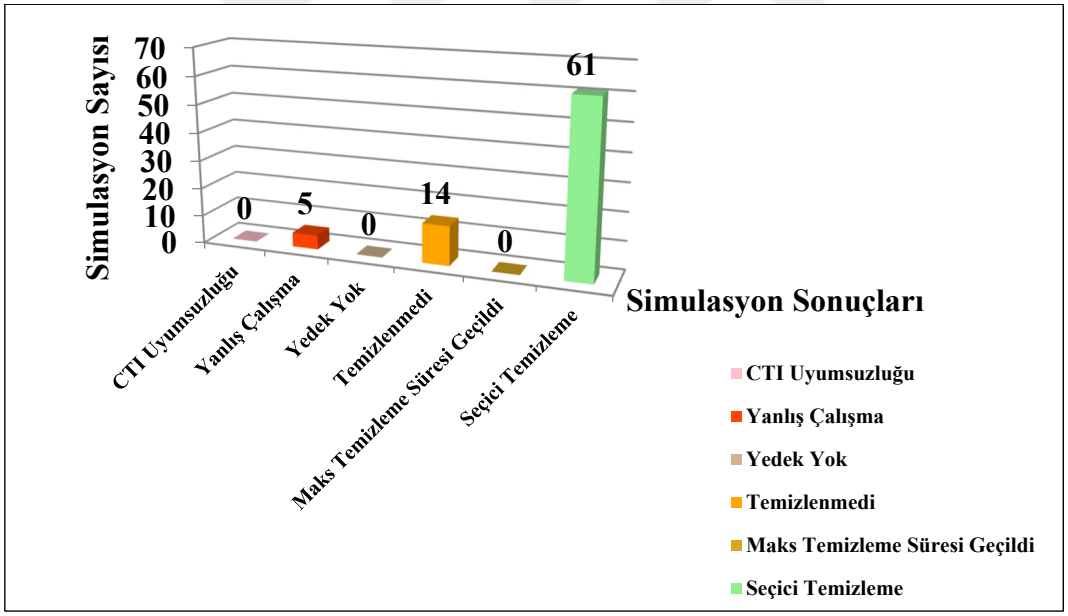
Yönlü Aşırı Akım Rölelerinin (ANSI 67/67N) performansı, özellikle dağıtık üretim (DG) kaynaklarının devrede olup olmamasına bağlı olarak belirgin şekilde değişiklik göstermiştir.

Senaryo A'da, maksimum arıza seviyesinin geçerli olduğu bu senaryoda, yönlü aşırı akım röleleri tatmin edici bir performans sergilemiştir. Şebeke ve dağıtık

üretim kaynaklarının sağladığı yeterli seviyedeki arıza akımı katkıları sayesinde röleler arıza tespiti yapabilmiştir. Tüm transformatör iç arızaları 0.3 - 0.5 saniye aralığında selektif bir şekilde temizlenmiştir.

Senaryo B'de ise sistem arıza seviyelerindeki düşüş yönlü aşırı akım rölelerinin performansını olumsuz etkilemiştir. Birçok rölede çalışma sürelerinin geciktiği veya özellikle alçak gerilim (AG) tarafındaki arızaların röle açma akım seviyesinin altında kalması nedeniyle hiç algılanamadığı durumlar gözlemlenmiştir. Ayrıca primer ve yedek koruma röleleri arasında bazı koordinasyon bozulmaları meydana gelmiş ve çalışma sürelerinin örtüştüğü senaryolar oluşmuştur. Bununla birlikte, şebekeden yeterli arıza akımı katkısının sağlandığı durumlarda bazı röleler doğru şekilde çalışmaya devam etmiştir.

Şekil 5.8, trafo çıkış fiderlerine ait simülasyon sonuçlarını çubuk grafik formatında özetlemekte olup Tablo 5.3'te rölelerin çalışma durumları açma zamanlarıyla birlikte sunulmuştur.



Şekil 5.8 Transformatör çıkışları arıza simulasyon sonuçları (aşırı akım) [51]

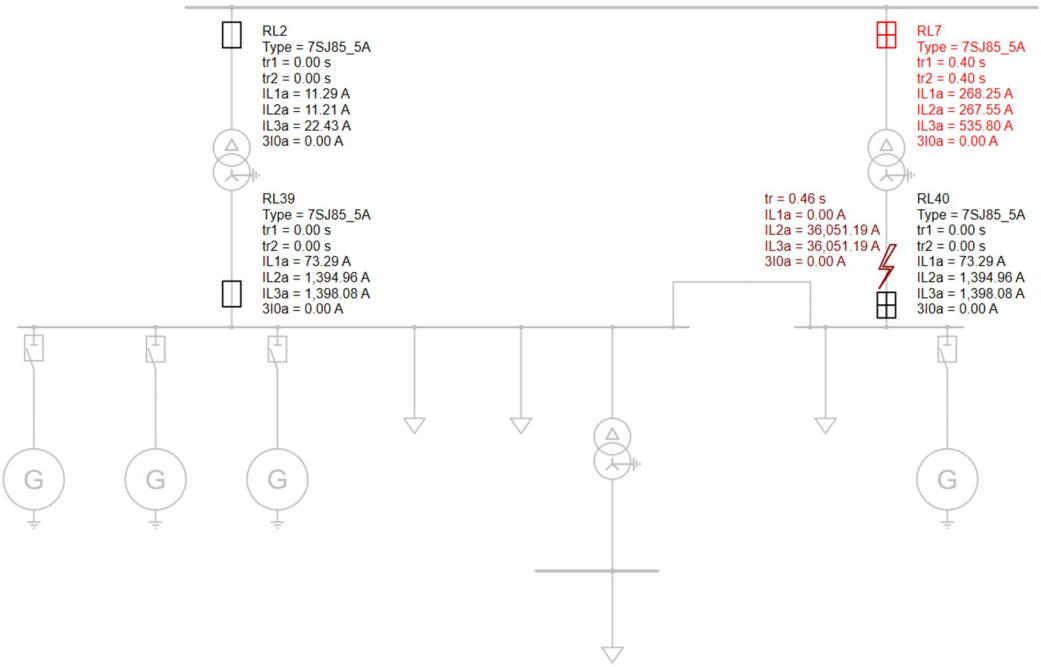
Tablo 5.3 Transformatör çıkış fiderleri aşırı akım simulasyon sonuçları

Arıza Yapılan Ekipman	İşletme Senaryosu	Arıza Tipi	Yakın Arızada [s]	Uzak Arızada [s]
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.49	0.19
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.49	0.35
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.49	0.35
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.49	0.35
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	Temizlen-medi	0.19
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	Temizlen-medi	Temizlen-medi
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	Temizlen-medi	Temizlen-medi
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	Temizlen-medi	Temizlen-medi
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	1.506	0.19
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	1.506	1.749
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	1.616	1.749
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	1.505	1.749
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	Temizlen-medi	0.19
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	Temizlen-medi	Temizlen-medi
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	Temizlen-medi	Temizlen-medi
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	Temizlen-medi	Temizlen-medi
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.49	0.19
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.49	0.35
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.49	0.35
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.49	0.35
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.49	0.19
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.49	0.53

Tablo 5.3 Transformatör çıkış fiderleri aşırı akım simulasyon sonuçları (devamı)

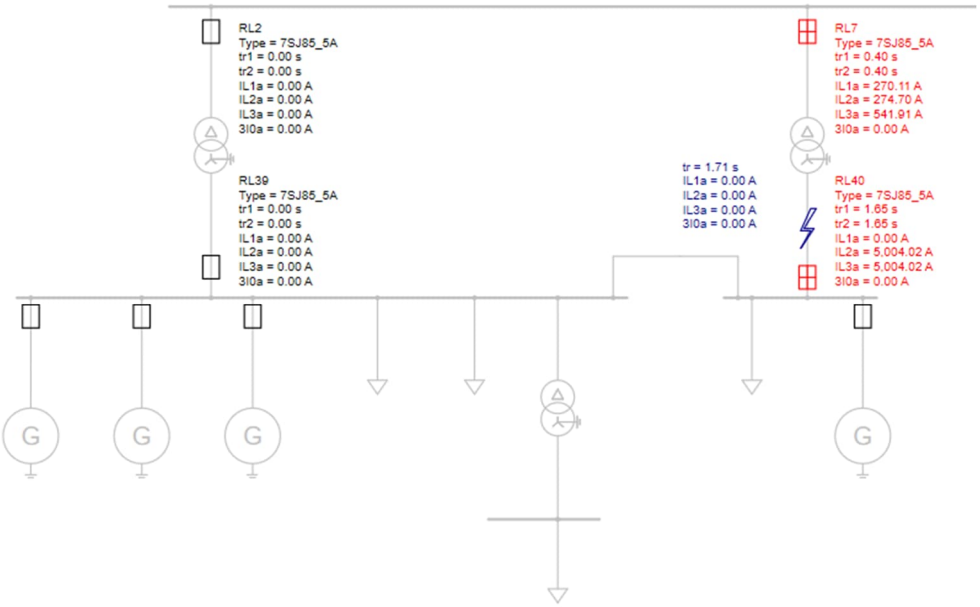
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.49	0.53
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.49	0.53
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.49	0.19
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.49	0.35
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.49	0.35
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.49	0.35
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.49	0.19
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.49	1.42
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.49	1.123
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.49	1.123
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.19	0.49

Senaryo B'de generatörler devre dışındayken T5 transformatörünün sekonderinde gerçekleştirilen bir faz-faz arızasında öncelikle primer taraftaki RL7 arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermiştir. Primer taraftaki kesici açtıktan sonra sekonder taraftaki RL40 rölesinin kalan arızayı tespit edip kendi kesicisine açma komutu göndermesi ve arızayı tamamen temizlemesi gerekmektedir fakat üretim kaynakları devre dışı olduğu için generatörlerden arıza akımına yeterli bir katkı gelmemektedir. Bunun sonucunda sekonder taraftaki röle arızayı tespit edememiştir ve arıza temizlenememiştir.



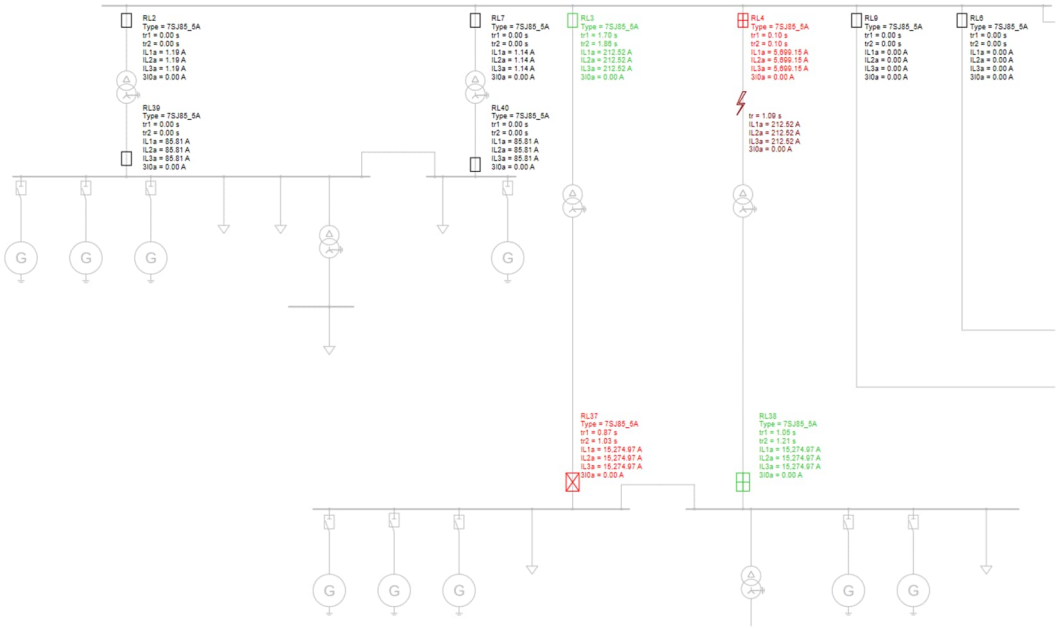
Şekil 5.9 T5 transformatör çıkışı sekonder taraf arıza (Senaryo-B/aşırı akım)

Senaryo A'da generatörler devredeyken T5 transformatörünün sekonderinde gerçekleştirilen bir faz-faz arızasında öncelikle primer taraftaki RL7 arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermiştir. Primer taraftaki kesici açtıktan sonra sekonder taraftaki RL40 rölesinin kalan arızayı tespit edip kendi kesicisine açma komutu göndermiş ve arızayı aşırı akım fonksiyonlarıyla tamamen temizlemiştir.



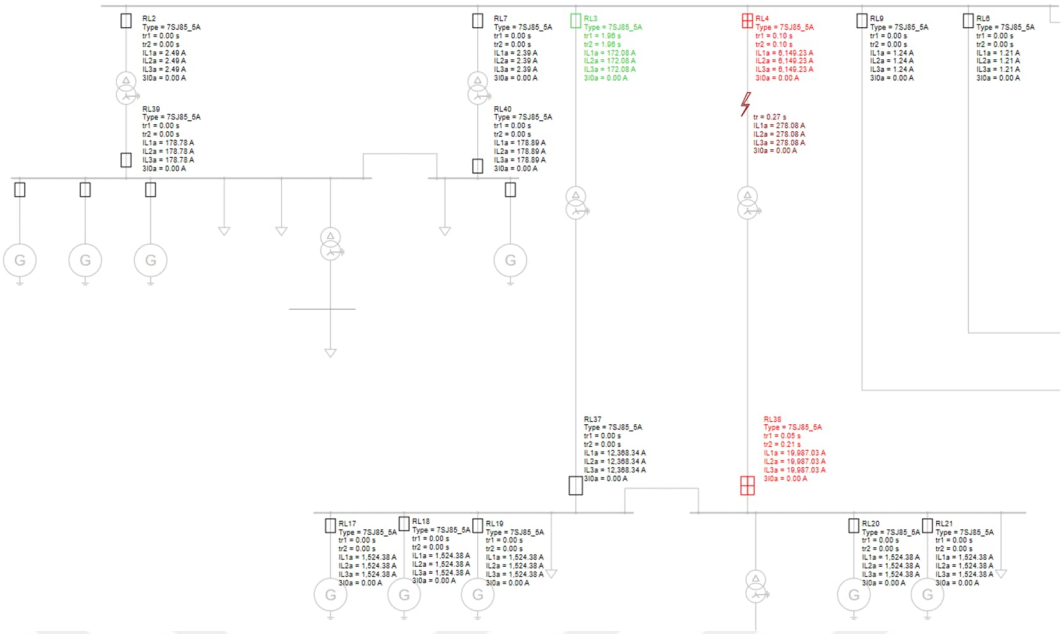
Şekil 5.10 T5 transformatör çıkışı sekonder taraf arıza (Senaryo-A/aşırı akım)

Senaryo B'de generatörler devre dışındayken T3 transformatörünün sekonderinde gerçekleştirilen bir faz-faz arızasında öncelikle primer taraftaki RL4 arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermiştir. Primer taraftaki kesici açtıktan sonra sekonder taraftaki RL38 rölesinin kalan arızayı tespit edip kendi kesicisine açma komutu göndermesi ve arızayı tamamen temizlemesi gerekmektedir fakat paralel transformatörün alçak gerilim tarafında bulunan RL37 rölesi daha hızlı çalışıp ters zamanlı karakteristiğiyle açma yapmıştır. Bunun durumda iki transformatör birden enerjisi kalmış ve alçak gerilimde bulunan yükler beslenememiştir.



Şekil 5.11 T3 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-B/aşırı akım)

Senaryo A'da generatörler devredeyken T3 transformatörünün sekonderinde gerçekleştirilen bir faz-faz arızasında öncelikle primer taraftaki RL4 arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermiştir. Primer taraftaki kesici açtıktan sonra sekonder taraftaki RL38 rölesinin kalan arızayı tespit edip kendi kesicisine açma komutu gönderip arızayı sadece T3 transformatörü bölgesinde temizlemiştir. Alçak gerilim barası paralel transformatör tarafından sağlıklı bir şekilde beslenmeye devam etmiştir.



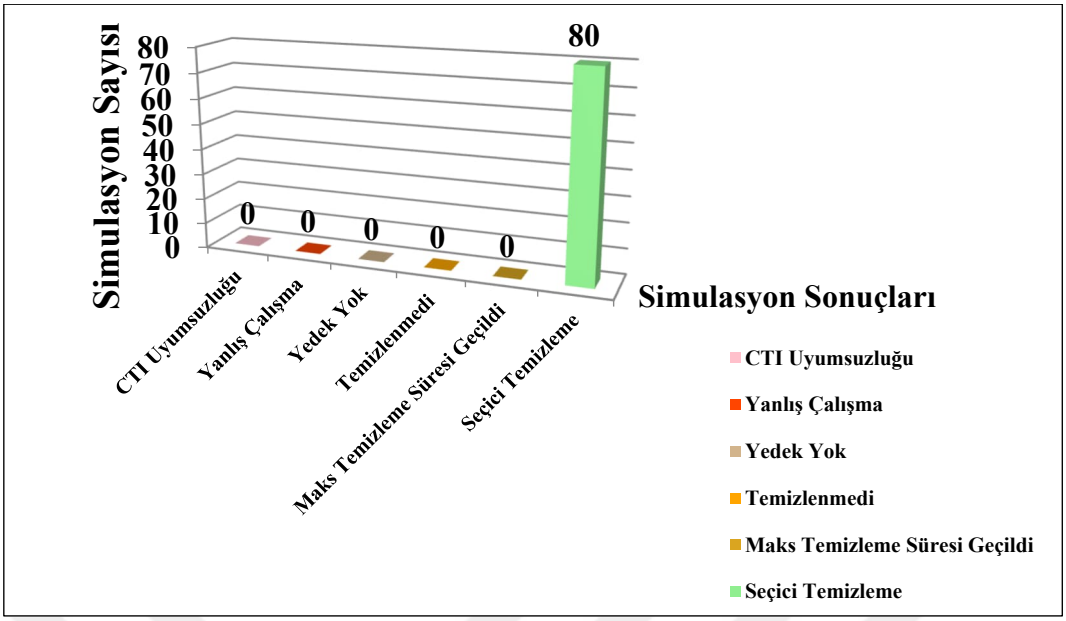
Şekil 5.12 T3 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-A/aşırı akım)

5.5.3.2 Diferansiyel Koruma Performansı

Diferansiyel koruma, tüm işletme koşullarında üstün performans sergilemiştir. Her iki senaryoda da diferansiyel röleler, tüm dahili arızaları doğru şekilde tespit etmiş ve 100 ms'nin altında temizlemiştir. Bu çalışma sürelerinin, sistemin kısa devre seviyesinden bağımsız olması, diferansiyel korumanın mikroşebeke yapıları için önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, gerçekleştirilen tüm dış arıza testlerinde yanlış çalışma gözlenmemiştir. Bu durum, diferansiyel koruma algoritmasının hem düşük kısa devre seviyelerine hem de DG'lerin devre dışı kaldığı zayıf şebeke koşullarına karşı yüksek bağışıklığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, özellikle trafo çıkışları gibi kritik noktalarda, diferansiyel korumanın değişen şebeke sağlamlık seviyelerinde dahi en güvenilir birincil koruma yöntemi olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Şekil 5.13, trafo çıkış fiderlerine ait simülasyon sonuçlarını çubuk grafik formatında özetlemekte olup Tablo 5.4'de rölelerin çalışma durumları açma zamanlarıyla birlikte sunulmuştur.



Şekil 5.13 Transformatör çıkışları arıza simulasyon sonuçları (diferansiyel)[51]

Tablo 5.4 Transformatör çıkış fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları

Arıza Yapılan Ekipman	İşletme Senaryosu	Arıza Tipi	Yakın Arızada [s]	Uzak Arızada [s]
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.09	0.09
2 B2-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T1]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.09	0.09

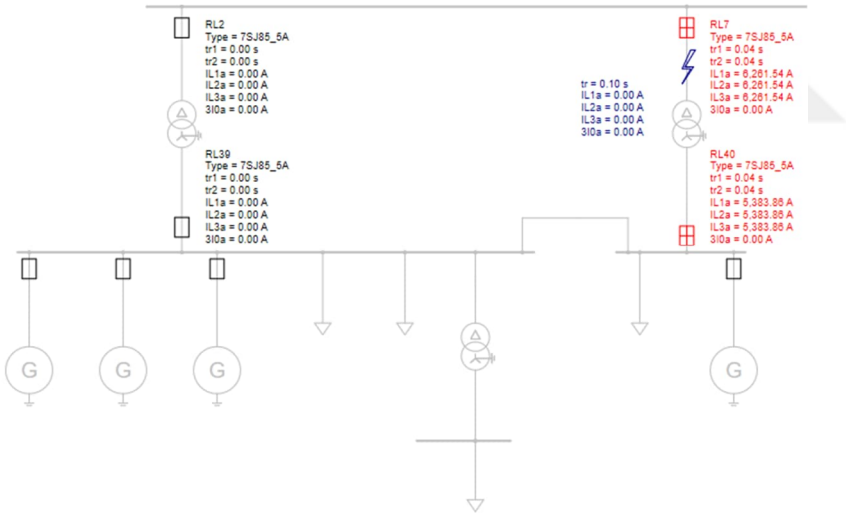
Tablo 5.4 Transformatör çıkış fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları (devamı)

4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.09	0.09
4 B17-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T5]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.09	0.09
5 B3-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T2]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.09	0.09
6 B4-0_48 to 28 B1-34_5_A Ckt 1 [T3]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.09	0.09
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.19	0.49

Tablo 5.4 Transformatör çıkış fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları (devamı)

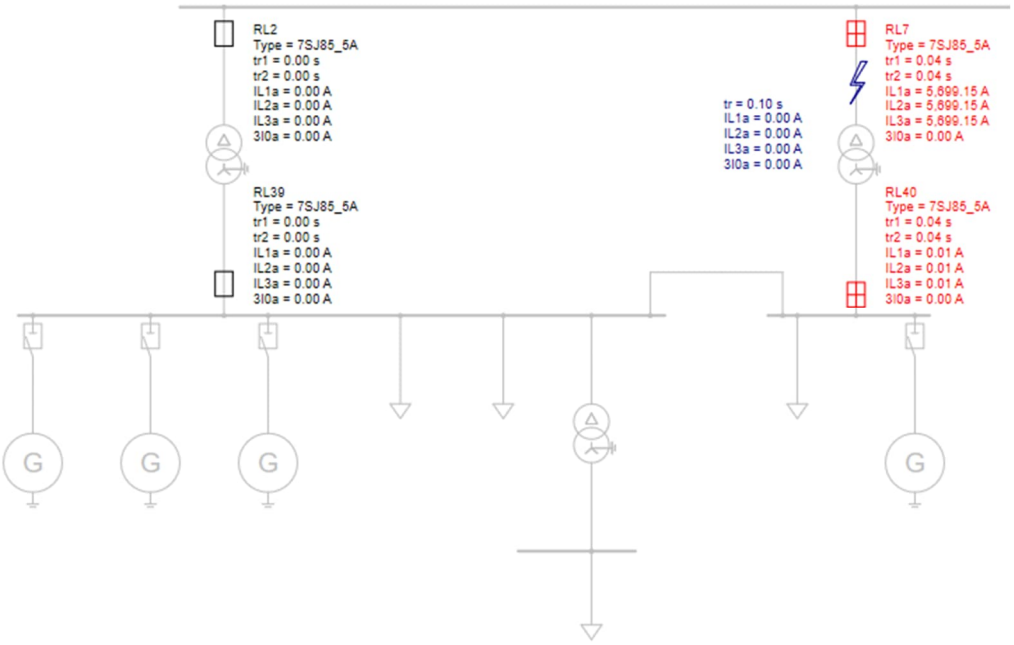
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.19	0.49
1 B1-34_5_B to 21 B18-0_48 Ckt 1 [T6]	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.19	0.49

Senaryo A'da generatörler devredeyken diferansiyel koruma röleleriyle gerçekleştirilen üç faz arıza simulasyonuna bakıldığında transformatörün her iki terminalinde bulunan rölelerin arızayı çok hızlı bir şekilde tespit edip kesicilerine açma komutu gönderdiğini ve böylece arızanın seçici ve hızlı bir şekilde izole edildiği görülmüştür.



Şekil 5.14 T5 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-A/diferansiyel)

Senaryo B'de generatörler devre dışındayken diferansiyel koruma röleleriyle gerçekleştirilen üç faz arıza simulasyonu incelendiğinde transformatörün her iki terminalinde bulunan rölelerin arızayı çok hızlı bir şekilde tespit edip kesicilerine açma komutu gönderdiğini ve böylece arızanın seçici ve hızlı bir şekilde izole edildiği görülmüştür. Bunun sonucunda diferansiyel rölelerin çalışmasının işletme senaryolarının ve sistem gücünden bağımsız olduğu sonucu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 5.15 T5 transformatör çıkışı primer taraf arıza (Senaryo-B/diferansiyel)

5.5.4 Dağıtım Hattı Fideri Sonuçları

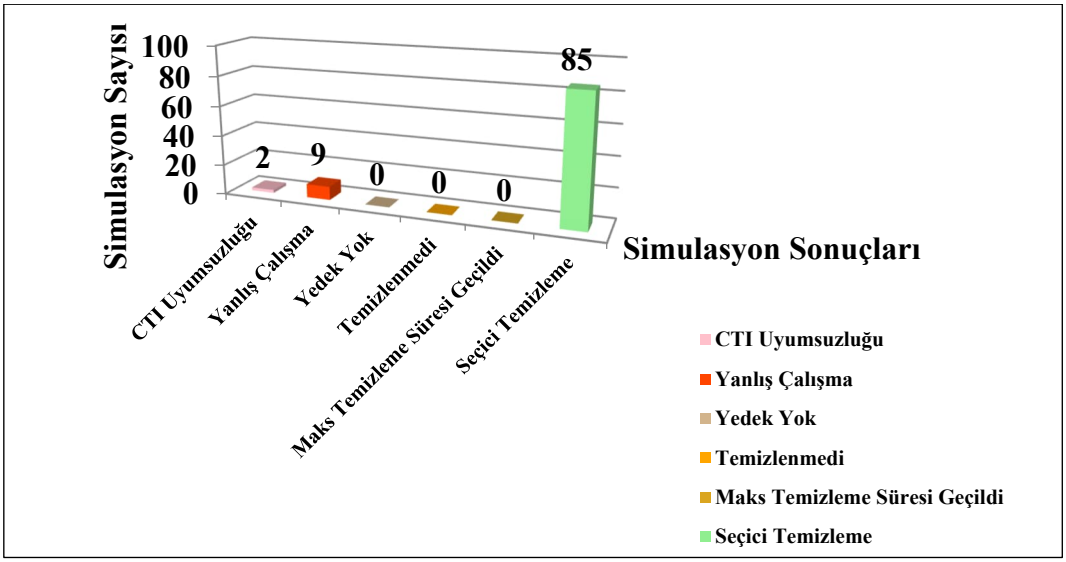
5.5.4.1 Yönlü Aşırı Akım Koruma Performansı

Ring yapısına sahip mikroşebekelerde dağıtım hatlarında çift yönlü enerji akışı ve değişen hat empedanslarından dolayı koruma koordinasyonda zorluklar yaşanabilmektedir.

Senaryo A'da, yönlü aşırı akım röleleri fiderlerde gerçekleşen tüm arızalar tespit ve seçici bir şekilde temizlemiştir. Alt ve üst kademede bulunan diğer koruma bölgeleriyle koordinasyon sağlanmış fakat arıza temizleme süreleri uzak arızalarda 0.8 saniyeye kadar çıkmıştır.

Senaryo B'de ise dağıtık üretim kaynakları devre dışı kaldığı için sistemdeki kısa devre seviyesinde azalma olmuştur. Buna bağlı olarak yönlü aşırı akım rölelerinin performansı zayıflamıştır. Bazı röleler düşük arıza akımlarını algılayamamış, bazıları ise 1 saniyenin üzerinden gecikmeyle çalışmıştır. Sistemde bazı durumlarda primer ve yedek röle arasındaki koordinasyon bozulmuş olup yedek röle daha hızlı çalışmıştır.

Şekil 5.16, dağıtım hattı fiderlerine ait simülasyon sonuçlarını çubuk grafik formatında özetlemekte olup Tablo 5.5'te aşırı akım rölelerinin çalışma durumları açma zamanlarıyla birlikte sunulmuştur.



Şekil 5.16 Dağıtım hattı çıkışları arıza simulasyon sonuçları (aşırı akım) [51]

Tablo 5.5 Dağıtım hattı fiderleri aşırı akım koruma simulasyon sonuçları

Arıza Yapılan Ekipman	İşletme Senaryosu	Arıza Tipi	Yakın Arızada [s]	50 % [s]	Uzak Arızada [s]
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.52	0.36	0.52
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.72	0.72	0.72
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.72	0.72	1.02
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.52	0.72	0.52
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.52	0.36	0.52
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.72	0.72	0.72
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.72	1.01	1.04
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.52	0.86	0.86
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.52	0.52	0.52
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.36	0.72	0.72
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.72	0.72	0.72

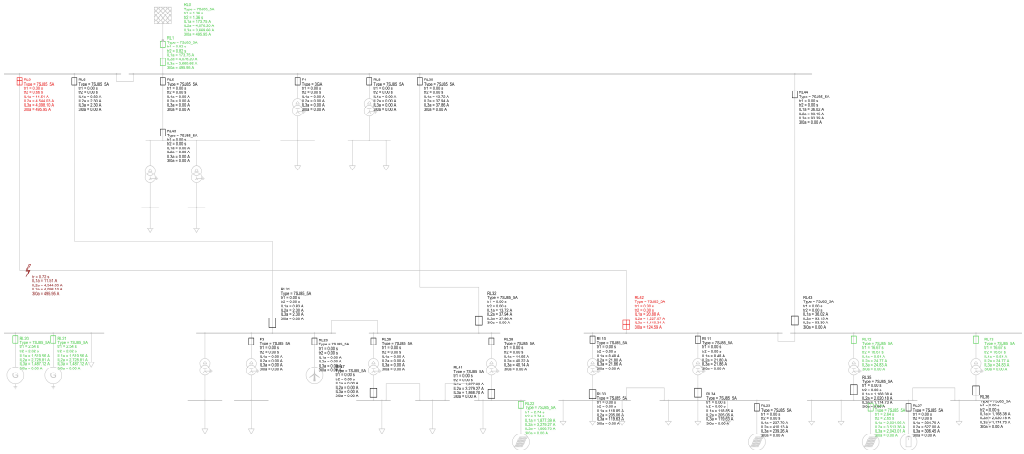
Tablo 5.5 Dağıtım hattı fiderleri aşırı akım koruma simulasyon sonuçları (devamı)

10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.36	0.52	0.52
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.52	0.52	0.52
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.72	0.72	0.72
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	1.16	1.15	1.14
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.86	0.86	0.86
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.52	0.52	0.52
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.72	0.72	0.36
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.72	0.72	0.72
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.52	0.52	0.36
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.52	0.52	0.52
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.72	0.72	0.72
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	1.14	1.15	1.16
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.52	0.86	0.52
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.52	0.36	0.52
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.72	0.72	0.72
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.72	0.72	1.02
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.52	0.72	0.52
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.52	0.36	0.52

Tablo 5.5 Dağıtım hattı fiderleri aşırı akım koruma simulasyon sonuçları (devamı)

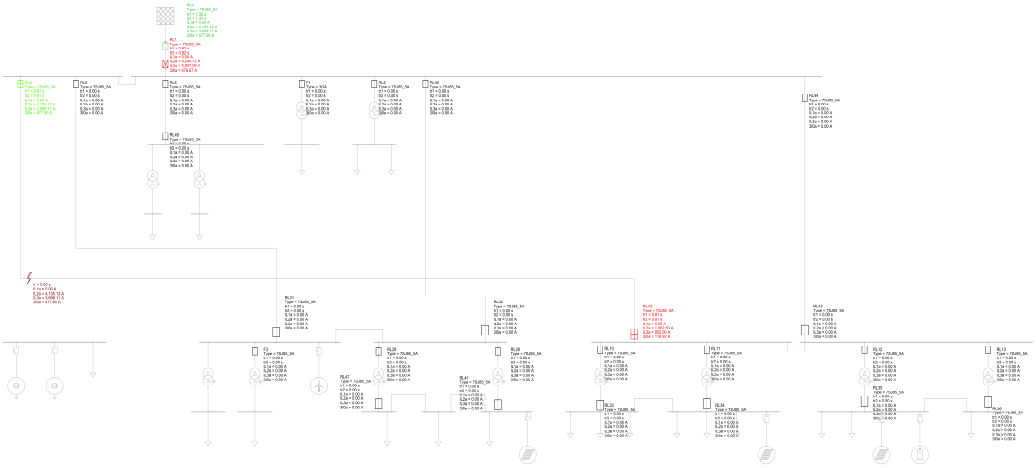
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.72	0.72	0.72
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.72	1.01	1.04
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.52	0.86	0.86

Senaryo A'da generatörler devredeyken yönlü aşırı akım koruma röleleriyle gerçekleştirilen iki faz toprak arıza simulasyonu incelendiğinde orta gerilim dağıtım hattının her iki terminalinde bulunan rölelerin arızayı tespit edip ilgili kesicilerine açma komutu gönderdiğini ve böylece arızanın seçici ve hızlı bir şekilde izole edildiği görülmüştür.



Şekil 5.17 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-A/aşırı akım)

Senaryo B'de generatörler devre dışındayken orta gerilim dağıtım hattının 50%'sinde gerçekleştirilen iki faz-toprak arızasında öncelikle hattın bir ucundaki röle arızayı tespit edip ilgili kesicisine açma komutu göndermiştir. İlgili kesici açtıktan sonra hattın karşı tarafındaki rölesinin kalan arızayı tespit edip kendi kesicisine açma komutu göndermesi ve arızayı tamamen temizlemesi gerekmektedir fakat sistemdeki kısa devre akımı seviyesi azaldığından orta gerilim giriş rölesi daha hızlı çalışmış ve seçicilik bozulmuştur.

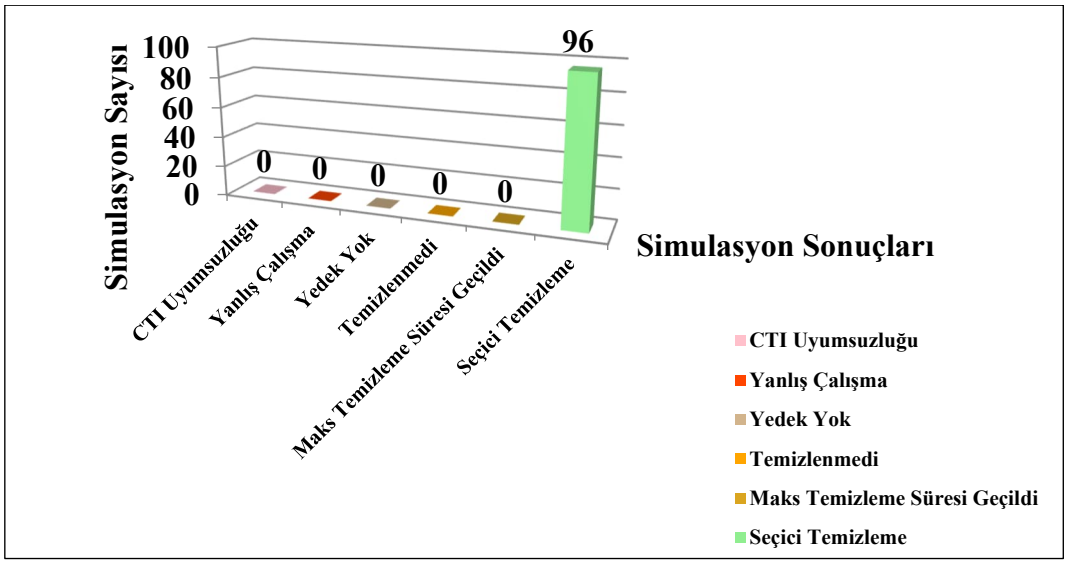


Şekil 5.18 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-B/aşırı akım)

5.5.4.2 Diferansiyel Koruma Performansı

Diferansiyel koruma röleleri, tüm arıza koşullarında kararlı, seçici ve güvenilir bir performans sergilemiştir. Her iki senaryoda da arızalar ani olarak (<100 ms) sürede temizlenmiş olup, bu sonuç diferansiyel korumanın sistemdeki kısa devre seviyesinden bağımsız olduğunu açıkça göstermektedir.

Şekil 5.19, dağıtım hattı fiderlerine ait simülasyon sonuçlarını çubuk grafik formatında özetlemekte olup Tablo 5.6'da aşırı akım rölelerinin çalışma durumları açma zamanlarıyla birlikte sunulmuştur.



Şekil 5.19 Dağıtım hattı çıkışları arıza simulasyon sonuçları (diferansiyel) [51]

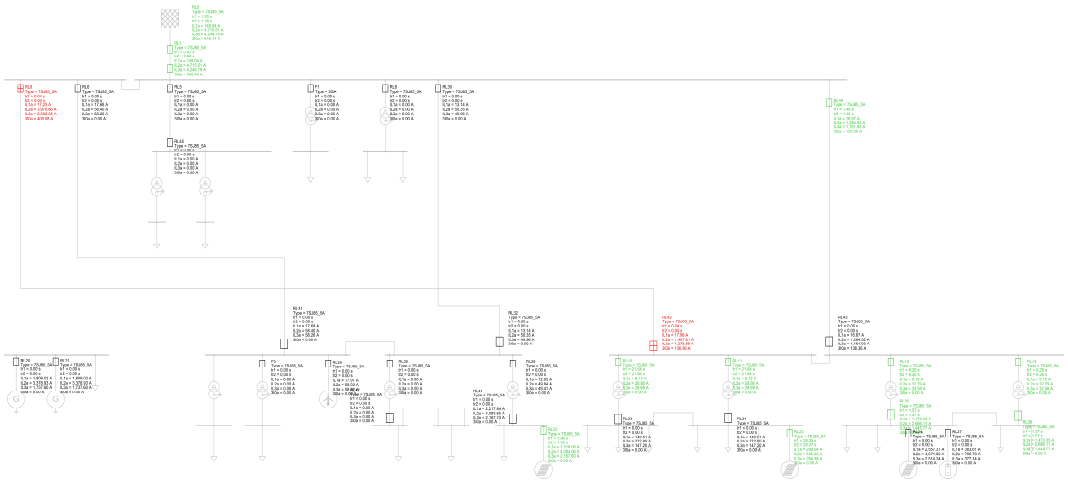
Tablo 5.6 Dağıtım hattı fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları

Arıza Yapılan Ekipman	İşletme Senaryosu	Arıza Tipi	Yakın Arızada [s]	50 % [s]	Uzak Arızada [s]
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.10	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.06	0.06	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.10	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.06	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.10	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.10	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.10	0.10	0.10
28 B1-34_5_A to 29 B12-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.06	0.06	0.06
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.10	0.10	0.06
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.10	0.10	0.10
10 B6-34_5 to 28 B1-34_5_A Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.06	0.06	0.06

Tablo 5.6 Dağıtım hattı fiderleri diferansiyel koruma simulasyon sonuçları (devamı)

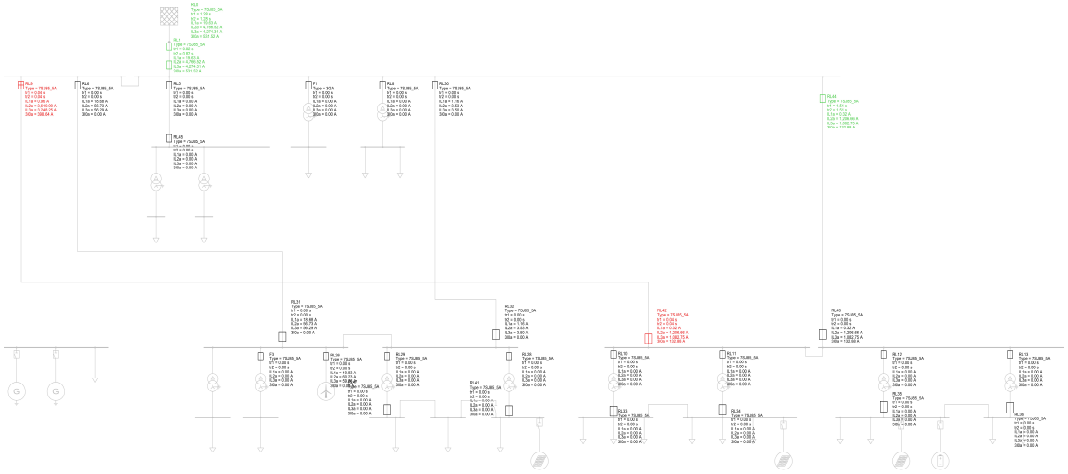
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.06	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 13 B7-34_5 Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	SLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	TPH	0.06	0.06	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	LTL	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-A (DG Devrede)	DLG	0.06	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	SLG	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	TPH	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	LTL	0.10	0.10	0.10
1 B1-34_5_B to 22 B12-34_5_B Ckt 1	Senaryo-B (DG Devre Dışı)	DLG	0.10	0.10	0.10

Senaryo A'da generatörler devredeyken diferansiyel koruma röleleriyle gerçekleştirilen iki faz-toprak arıza simulasyonuna bakıldığında orta gerilim dağıtım hattının her iki terminalinde bulunan rölelerin arızayı çok hızlı bir şekilde tespit edip kesicilerine açma komutu gönderdiğini ve böylece arızanın seçici ve hızlı bir şekilde izole edildiği görülmüştür.



Şekil 5.20 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-A/diferansiyel)

Senaryo B'de generatörler devredeyken diferansiyel koruma röleleriyle gerçekleştirilen iki faz-toprak arıza simulasyonuna bakıldığında orta gerilim dağıtım hattının her iki terminalinde bulunan rölelerin arızayı çok hızlı bir şekilde tespit edip kesicilerine açma komutu gönderdiğini ve böylece arızanın seçici ve hızlı bir şekilde izole edildiği görülmüştür. Bununla birlikte diferansiyel rölelerin çalışmasının işletme senaryolarının ve sistem gücünden bağımsız olduğu sonucu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 5.21 Dağıtım hattı fideri DLG arıza (Senaryo-B/diferansiyel)

5.6 Karşılaştırmalı Tartışma

Diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma şemalarıyla gerçekleştirilen analizler sonucunda gözlemlenen çıktılar aşağıdaki gibidir:

Çalışmadaki en önemli bulgulardan biri yönlü aşırı akım rölelerinin şebekenin işletme durumuna yeterli kısa devre seviyesi olmadığında kör kalıp arızayı tespit edememe durumunda kalmasıdır. Senaryo A'da tüm arızalar yönlü aşırı akım röleleriyle temizlenebilirken Senaryo B'de dağıtık üretim kaynaklarının devreden çıkarılmasıyla birlikte sistemdeki arıza akımının azalması yönlü aşırı akım rölelerinin mevcut ayarlarıyla bazı noktalarda arıza tespiti yapamamasına, bazı noktalarda ise primer ve yedek rölelerin seçici bir şekilde çalışmamasına sebep olmuştur. Bu senaryoda 14 transformatör arızası tespit edilememiş, 5 arızada ise çalışmaması gereken yedek röle primer röleden önce çalışıp seçiciliği bozmultur. Yine hat fideri çıkışlarında gerçekleştirilen simulasyonlarda arıza akımının görece küçük olduğu Senaryo B'de 9 arızada yedek röle öncelikle çalışması gereken primer röleden hızlı çalışmış ve 2 arızada CTI (Current Time Interval) olarak ifade edilen primer ve yedek röle arasında güvenli zaman aralığı sağlanamamıştır. Öte yandan, diferansiyel koruma röleleri, şebekenin işletme koşullarından ve arıza akımından bağımsız olarak tüm senaryolarda seçici, hızlı ve güvenli bir şekilde koruma sağlamıştır.

Koruma şemaları arıza temizleme hızları açısından karşılaştırıldığında, diferansiyel koruma rölelerinin hız açısından büyük bir avantaj sağladığı görülmüştür. Yönlü aşırı akım röleleri alt ve üst kademe röleleriyle koordinasyonu sağlayabilmek adına 0.3-0.8 saniye aralarında arızaları temizlerken diferansiyel röleler varsayılan haberleşme gecikmelerini ve kesici açma sürelerini de düşünerek 100 ms civarında koruma bölgeleri içerisindeki arızaları temizlemiştir.

Karmaşıklık ve maliyet açısından iki koruma şemasına bakıldığında, diferansiyel röleler teknik açıdan büyük avantajlar sağlamasına rağmen uygulaması daha karmaşık bir yapıdadır. Diferansiyel rölelerin seçici ve hızlı bir şekilde koruma yapması güvenilir bir haberleşme altyapsına ve çeşitli noktalardaki senkronizasyona bağlıdır. Bu durum aynı zamanda yönlü aşırı akım rölelerine göre çok daha fazla maliyet anlamına gelmektedir. Yönlü aşırı akım röleleri ise özellikle yeterli kısa devre akımının olduğu güçlü şebeke durumlarında basit uygulamasıyla ve görece az maliyetiyle birlikte iyi bir seçenek olurken yeterli arıza akımının olmadığı durumlarda teknik açıdan yetersizlik göstermiştir.

6
SONUÇ

6.1 Genel Özet

Bu tez çalışmasında, ring yapısına sahip örnek bir test mikroşebekede diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma şemalarının farklı işletme koşullarındaki koruma koordinasyon performanslarının bir analizi sunulmaktadır. Mikroşebeke sistemi, PSS®Sincal yazılımı kullanılarak modellenmiş ve sonrasında daha detaylı koruma koordinasyon çalışmaları yapabilmek adına GridScale X APA yazılımına aktarılmıştır. Çalışmada, farklı iki operasyon senaryosu için farklı kısa devre akımı seviyelerinde koruma yöntemlerinin davranışları simulasyonlarla değerlendirilmiştir:

I. Senaryo A: Mikroşebekenin ana şebekeye bağlı olduğu ve tüm dağıtık üretim kaynaklarının devrede olduğu işletme.
II. Senaryo B: Mikroşebekenin sadece ana şebekeden beslendiği ve dağıtık üretim kaynaklarının devre dışı olduğu işletme.

Simulasyon makroları ve akım zaman eğrilerinden faydalanıp kısa devre ve koruma koordinasyon analizleri gerçekleştirilip her iki işletme koşulu altında koruma rölelerinin duyarlılığı, seçiciliği ve koordinasyonu analiz edilmiştir. Diferansiyel koruma ve yönlü aşırı akım koruma cihazları hem transformatör terminallerinde hem de dağıtım hattı fiderlerinde modellenmiş, şebekenin farklı noktalarında farklı arıza tipleri uygulanmış ve röle davranışları değerlendirilmiştir.

6.2 Temel Bulgular

Tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen temel bulgular ve gözlemler bir kaç başlık altında toplanmıştır.

Kısa devre seviyesi ve sistem dayanımı açısından çıktılar, gerçekleştirilen kısa devre analizlerinde iki işletme senaryosu arasında koruma rölelerinin performanslarını etkileyebilecek kadar önemli seviyede fark olduğu göstermiştir.

Dağıtık üretim kaynaklarının devrede olduğu ve böylece görece yüksek arıza akımlarının olduğu Senaryo A'da aşırı akım röleleri doğru şekilde arıza tespiti yapıp seçici koruma yapabilmiştir. Dağıtık üretim kaynaklarının devre dışı olduğu Senaryo B'de ise bu kaynaklardan arıza akımı katkısı gelmediği için arıza akım seviyesi azalmıştır.

Senaryo A'da, yönlü aşırı akım röleleri tüm arıza durumlarında doğru ve seçici bir şekilde çalışmış ve primer ve yedek röleler arasında koordinasyon sağlanmıştır.

Senaryo B'de, kısa devre akım seviyelerinin düşmesiyle yönlü aşırı akım rölelerinin performansları önemli ölçüde zayıflamıştır. Bazı rölelerde yanlış çalışmalar gözlemlenmiştir ve bazı röleler ise kör kalıp arıza tespiti dahi yapılamamıştır.

Yönlü aşırı akım rölelerinin, maliyeti uygun ve uygulama pratiği yüksek olmakla birlikte performanslarının sistemdeki kısa devre akım seviyesine önemli derece bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Diferansiyel koruma rölelerinin performansı incelendiğinde, diferansiyel koruma her iki işletme senaryosunda da hızlı, seçici ve güvenilir bir koruma sağlamıştır.

Koruma bölgelerinin içindeki tüm arızalar sistem koşullarından bağımsız olarak haberleşme gecikmeleri ve kesici açma sürelerini de dikkate alarak 100 ms civarında temizlenmiştir. Verilen ek ayar parametreleri ve akım transformatörlerinin doğru bir şekilde çalışmasıyla dış arızalarda herhangi bir yanlış çalışma olmamıştır. Mikroşebekelerde kritik ve önemli olduğu değerlendirilen fiderlerde diferansiyel korumanın güvenilir bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmada elde edilen çıktılarla birlikte, diferansiyel koruma ve yönlü aşırı akım koruma fonksiyonlarının mikroşebeke korumasında farklılıklar içerdiği sonucuna varılmıştır.

Yönlü aşırı akım röleleri maliyet açısından avantajlı olup radyal ve yeterli kısa devre akımının bulunduğu güçlü şebekelerde makul bir koruma yöntemidir fakat zayıf şebeke koşullarında veya inverter tabanlı üretim kaynaklarının sayıca çok olduğu ve kısa devre akım seviyelerinin görece az olduğu şebekelerde performans

olarak eksiklik göstermektedir. Diferansiyel koruma röleleri ise dağıtık üretim kaynaklarının devrede olmadığı zayıf şebeke koşullarında da güvenilir ve seçici bir koruma sağlamaktadır.

Mikroşebekelerde işletme konfigurasyonuna ve ekipmanın kritik olup olmamasına göre hibrit veya adaptif koruma stratejilerinin uygulanması değerlendirilebilir.

6.3 Pratik Değerlendirmeler

Çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, mikroşebekelerde diferansiyel korumanın teknik anlamda aşırı akım korumaya göre daha yüksek seçici çalışıp tüm koşullarda arıza temizleme gerçekleştirebildiği görülmektedir. Koruma koordinasyon açısından seçici bir koruma yapılabilir olmasına rağmen sahada diferansiyel korumanın pratik uygulamalarının sıklığı bazı sınırlamalarla karşı karşıyadır. Diferansiyel koruma haberleşme altyapısına sahip bir koruma yöntemi olduğu için farklı ölçüm noktaları arasında senkronizasyona ihtiyaç duymaktadır. İdeal bir diferansiyel korumada haberleşme gecikmelerinin en düşük seviyede olması gerekmektedir. Bundan dolayı, fiber optik ya da benzer haberleşme altyapı yatırımları, güvenilir bir diferansiyel koruma için bir zorunluluktur. Bununla birlikte, diferansiyel korumanın güvenilir bir şekilde uygulanabilmesi için en temel gereksinimlerden biri de korunan ekipmanın uç taraflarında bulunan akım transformatörlerinin doğru bir şekilde ölçüm yapmasıdır. Akım transformatörlerinin doyuma girme durumunda veya akım transformatörleri arasında oluşabilecek ölçme uyumsuzlukları durumunda bir dış arıza gerçekleştiğinde veya devreye alma durumlarında oluşabilecek demeraj akımları nedeniyle diferansiyel koruma yanlış çalışabilir. Bu yanlış çalışmaların önüne geçebilmek için ise harmonik kısıtlama ve akım dalga şekli analizi gibi ek parametrelerden faydalanılır. Bu nedenlerden dolayı direfansiyel koruma yöntemi geleneksel aşırı akım korumaya göre daha maliyetli bir korumadır ve geniş çaplı mikroşebekelerde daha sınırlı bir kullanıma sahiptir.

Öte yandan, geleneksel aşırı akım ve yönlü aşırı koruması pratik uygulamadaki kolaylık ve tecrübenin varlığı, düşük maliyeti, bakım kolaylığı ve haberleşme altyapısına ihtiyaç duymaması gibi avantajları sayesinde mikroşebekelerde çokça tercih edilmektedir. Yönlü aşırı akım korumalar, arıza yönüne göre ayarlanan eşik akım değeri aşıldığında belirlenen zaman gecikmesi sonunda çalışıp arıza temizler.

Bu korumada yön tayininin yapılabilmesi için gerilim bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Yönlü aşırı akım koruma cihazları, görece yüksek arıza akım seviyelerine ve sabit sistem empedansına göre ayarlandığında verimli bir çalışma sağlar. Mikroşebekelerde ise dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye bağlanması, inverter temelli üretim kaynaklarının sayısının artması ve işletme koşullarının sıkça değişmesi, rölenin farklı kısa devre akımları algılamasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda düşük arıza akımlarının varlığında aşırı akım röleleri körleşebilir, primer ve yedek röle arasında koordinasyon bozulabilir veya ardışık iki röle arasında güvenli zaman aralığı sağlanamayabilir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için yönlü aşırı akım rölelerini bir haberleşme altyapısına sahip adaptif koruma şemasının altında kullanmak seçici bir koruma koordinasyonu sağlayabilmek için gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, modern mikroşebekelerde tek bir koruma yönteminin tüm teknik ve işletmesel ihtiyaçları karşılaması mümkün görünmemektedir. Bu çalışma, hibrit bir koruma mimarisinin en uygun çözüm olduğunu göstermektedir. Şebekede kritik olarak değerlendirilen bölgelerde primer koruma olarak diferansiyel koruma ve yedek olarak aşırı akım koruma şemaları tercih edilebilir. Koruma felsefesi oluştururken teknik gereksinimlerle birlikte ekonomik ve işletmesel koşullar da dikkate alınmalıdır.

6.4 Çalışmanın Katkıları

Bu tez çalışmasının katkıları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

- Mevcut bir test sistem modeli temel alınarak, gerçekçi röle konfigurasyonları ve ring yapıları eklenerek daha karmaşık hale getirilmiş ring yapısına sahip bir mikroşebeke test sistemi geliştirilmiştir.
- Hem yüksek hem de düşük kısa devre akımına sahip işletme koşullarını kapsayan kapsamlı kısa devre ve koruma koordinasyon simulasyonları PSS®Sincal ve GridScale X APA yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.
- Farklı arıza türleri sistemin farklı noktalarında uygulanıp diferansiyel ve yönlü aşırı akım koruma fonksiyonlarının karşılaştırmalı analizi yapılmış;

bu koruma yöntemlerinin davranışları hakkında önemli teknik bulgulara ulaşılmıştır.

- Çalışma, diferansiyel korumanın yüksek güvenilirliğini ve farklı işletme koşullarında yönlü aşırı akım korumanın sınırlamalarını ortaya koyarak, mikroşebekelerde koruma stratejilerinin iyileştirilmesi için temel bir referans oluşturmuştur.

6.5 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışma, mikroşebelerde koruma sistemlerinin daha iyi anlaşılması ve geliştirilebilmesi amacıyla aşağıdaki konularla genişletilebilir:

A. Adaptif Koruma

İşletme senaryosu ve dağıtık üretim kaynaklarının durumuna göre röle ayarlarının otomatik olarak güncellendiği algoritmaların geliştirilmesi.

B. Haberleşme Gecikmesi Analizi

Diferansiyel koruma gibi haberleşme temelli koruma fonksiyonlarından, iletişim gecikmesinin ve veri alışverişi sürelerinin koruma sistemi üzerindeki etkilerinin araştırılması.

KAYNAKÇA

[1] N. Rezaei and M. N. Uddin, “An Analytical Review on State-of-the-Art Microgrid Protective Relaying and Coordination Techniques,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 3, pp. 2258-2273, May-Jun. 2021.

[2] S. S. Rath, G. Panda, P. K. Ray, and A. Mohanty, “A Comprehensive Review on Microgrid Protection: Issues and Challenges,” in Proc. 3rd Int. Conf. Energy, Power and Environment (ICEPE), 2020.

[3] A. Ayvaz, “An Investigation of the Impact of Distributed Generation Penetration on Directional Overcurrent Relay Coordination in a Distribution Network,” Gazi University Journal of Science, Part A: Engineering and Innovation, vol. 10, no. 3, pp. 301-309, 2023.

[4] A. Srivastava et al., "A Review on Challenges and Solutions in Microgrid Protection," in 2021 IEEE Madrid PowerTech, 2021.

[5] R. Karimi, A. Ketabi, and S. M. Nobakhti, "A New Protection Strategy for Microgrid based on Integration of Active Power Index and Fault Current Differential Energy," International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization (IECO), vol. 8, no. 3, pp. 317-332, 2025.

[6] M. Beikbabaei, M. Lindemann, M. H. Kapourchali, and A. Mehrizi-Sani, "Machine Learning-Based Protection and Fault Identification of 100% Inverter-Based Microgrids," arXiv preprint arXiv:2405.07310, 2024.

[7] S. Sanati, I. Kamwa, C. Bo, S. Bo, and M. Xu, “A Comprehensive Review on Differential Protection Schemes in IBR-Dominated Microgrids,” IEEE Access, vol. 12, pp. 170250–170272, 2024.

[8] M. W. Altaf, M. T. Arif, S. N. Islam, and M. E. Haque, “Microgrid Protection Challenges and Mitigation Approaches-A comprehensive review,” IEEE Access, vol. 10, pp. 38895–38922, 2022.

[9] P. R. Satpathy, V. K. Ramachandaramurthy, and S. Padmanaban, “Advanced Protection Technologies for Microgrids: Evolution, Challenges, and Future Trends,” Energy Strategy Reviews, vol. 58, p. 101670, 2025.

[10] A. N. Sheta, G. M. Abdulsalam, B. E. Sedhom, and A. A. Eladl, “Comparative Framework for AC Microgrid Protection Schemes: Challenges, Solutions, Real Applications, and Future Trends,” Singapore: Springer Nature, 2023.

[11] R. Kumari and B. K. Naick, “Adaptive Protection Coordination Scheme for Distribution Networks with Distributed Generation,” in Proc. 1st Int. Conf. Innovative and Sustainable Technologies in Energy, Mechatronics and Smart Systems (ISTEMS), 2024, pp. 1-6.

[12] A. S. Mohamed, D. Kundur, and M. Khalaf, "A Probabilistic Approach to Adaptive Protection in the Smart Grid," arXiv preprint arXiv:2302.14126, 2023.

[13] H. Shad, H. A. Khanavandi, S. A. Foroushan Asl, A. Aranizadeh, B. Vahidi, and M. Mirmozaffari, "Optimal Protection Coordination for Grid-Connected and Islanded Microgrids Assisted by the Crow Search Algorithm: Application of Dual-Setting Overcurrent Relays and Fault Current Limiters," Energies, vol. 18, no. 7, 2025.

[14] H. C. Kılıçkıran, İ. Şengör, H. Akdemir, B. Kekezoğlu, O. Erdinç, and N. G. Paterakis, "Power System Protection with Digital Overcurrent Relays: A Review of Non-Standard Characteristics," Electric Power Systems Research, vol. 164, pp. 89-102, 2018.

[15] H. Yildirim and O. Usta, "Performance Analysis of Directional Overcurrent Protection in Multi Source Microgrid," in 2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2023.

[16] S. Biswal, N. K. Sharma, and S. R. Samantaray, "Optimal Overcurrent Relay Coordination Scheme for Microgrid," in Proc. 21st National Power Systems Conference (NPSC), Gandhinagar, India, Dec. 2020, pp. 1-6.

[17] M. N. Alam, S. Chakrabarti, and A. K. Pradhan, "Protection of Networked Microgrids Using Relays with Multiple Setting Groups," IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 18, no. 5, pp. 3713-3723, May 2021.

[18] M. Baba, N. B. Mohd Nor, M. Aman Shiekh, Y. Z. Alharthi, H. Shutari, and M. F. Majeed, "A Review on Microgrid Protection Challenges and Approaches to Address Protection Issues," IEEE Access, vol. 12, pp. 175278–175303, 2024.

[19] N. K. Sharma and S. R. Samantaray, "Validation of Differential Phase-Angle Based Microgrid Protection Scheme on RTDS Platform," in 2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON), 2018.

[20] J. De La Cruz, Y. Wu, J. E. Candelo-Becerra, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Review of Networked Microgrid Protection: Architectures, Challenges, Solutions, and Future Trends," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 10, no. 2, pp. 448-467, 2024.

[21] N. Chothani, "Dynamic Differential Protection for Power Transformer in the Presence of CT Saturation," in 2025 3rd International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES), 2025.

[22] A. Ghoor, "Design of Adaptive Overcurrent Protection Scheme for a Grid-Integrated Solar PV Microgrid," in 2020 IEEE PES/IAS Power Africa, 2020, pp. 1-5.

[23] S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama, and N. Muñoz-Galeano, "Adaptive Protection Coordination Scheme in Microgrids Using Directional Over-Current Relays with Non-Standard Characteristics," Heliyon, vol. 7, no. 4, Art. no. e06665, Apr. 2021.

[24] W. Chae, J.-H. Lee, W.-H. Kim, S. Hwang, J.-O. Kim, and J.-E. Kim, "Adaptive Protection Coordination Method Design of Remote Microgrid for

Three-Phase Short Circuit Fault," Energies, vol. 14, no. 22, Art. no. 7754, Nov. 2021.

[25] G. Banerjee, C. Hachmann, J. Lipphardt, N. Wiese, and M. Braun, "Adaptive Hybrid Overcurrent Protection Scheme with High Shares of Distributed Energy Resources," Energies, vol. 17, no. 24, Art. no. 6422, Dec. 2024.

[26] S. F. Zarei and M. Parniani, "A Comprehensive Digital Protection Scheme for Low-Voltage Microgrids with Inverter-Based and Conventional Distributed Generations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 441-450, Feb. 2017.

[27] M. Bakkar, S. Bogarra, F. Córcoles, A. Aboelhassan, S. Wang, and J. Iglesias, “Artificial Intelligence-Based Protection for Smart Grids,” Energies, vol. 15, no. 4933, pp. 1-15, 2022.

[28] B. J. Brearley and R. R. Prabu, "A Review on Issues and Approaches for Microgrid Protection," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 988-997, Jan. 2017.

[29] A. Hirsch, Y. Parag, and J. Guerrero, "Microgrids: A Review of Technologies, Key Drivers, and Outstanding Issues," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 90, pp. 402-411, 2018.

[30] CIGRE Working Group C6.22, Microgrids 1: Engineering, Economics, & Experience, Technical Brochure 635, Paris: CIGRE, 2015.

[31] R. H. Lasseter, "MicroGrids," in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, NY, USA, 2002.

[32] A. Latif, A. Saim, A. Houari, and A. Djerioui, "State-of-the-Art of Hierarchical Microgrid Technological Framework: Operational Strategies with Manifold Barriers and Future Trajectories," Renewable Energy Focus, vol. 55, Art. no. 100743, 2025.

[33] IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers, IEEE Std 2030.7-2017, New York, NY, USA: IEEE, 2017.

[34] B. Imtiaz, I. Zafar and C. Yuanhui, "Modelling of an Optimized Microgrid Model by Integrating DG Distributed Generation Sources to IEEE 13 Bus System," European Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 5, no. 2, pp. 18-25, Mar. 2021.

[35] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Modeling of a Centralized Microgrid Protection System and Distributed Energy Resources According to IEC 61850-7-420," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1560-1567, 2012.

[36] J. C. Das, Power System Protective Relaying: Basic Concepts, Industrial-Grade Alternatives, and Less-Known Aspects. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.

[37] P. M. Anderson, Power System Protection. New York, NY, USA: IEEE Press, 1999.

[38] Siemens AG, SIPROTEC 5: Overcurrent Protection 7SJ85 Device Manual, V9.80 Edition. Nuremberg, Germany: Siemens AG, 2023.

[39] IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations, IEEE Std C37.2-2022 (Revision of IEEE Std C37.2-2008), New York, NY, USA: IEEE, Feb. 2023.

[40] Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements, IEC Standard 60255-1:2022, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2022.

[41] J. L. Blackburn and T. J. Domin, Protective Relaying: Principles and Applications, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.

[42] M. T. Odabaşı, Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Tasarımı, İstanbul, Türkiye: Bileşim Yayıncılık, 2008.

[43] B. H. Abdullah and M. T. Alkhayyat, "Optimal Coordination for Directional Overcurrent Relays Incorporating Distribution Generators: A Comparative Study," Diagnostyka, vol. 26, no. 1, Art. no. 2025111, 2025.

[44] ABB, Feeder Protection and Control REF615 Technical Manual, Revision K. Helsinki, Finland: ABB Oy, Distribution Solutions, 2019.

[45] A. Haddadi, E. Farantatos, M. Zhao, I. Kocar, and F. Martinez, "Impact of Inverter-Based Resources on Memory-Polarized Distance and Directional Protective Relay Elements," in 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), 2021.

[46] Siemens AG, SIPROTEC 5: Transformer Differential Protection 7UT82, 7UT85, 7UT86, 7UT87 Device Manual, V9.80 Edition. Nuremberg, Germany: Siemens AG, 2023.

[47] A. Apostolov, IEC 61850: Digitizing the Electric Power Grid. Norwood, MA, USA: Artech House, 2022.

[48] M. Stanbury and Z. Djekic, "The Impact of Current-Transformer Saturation on Transformer Differential Protection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 3, Jun. 2015.

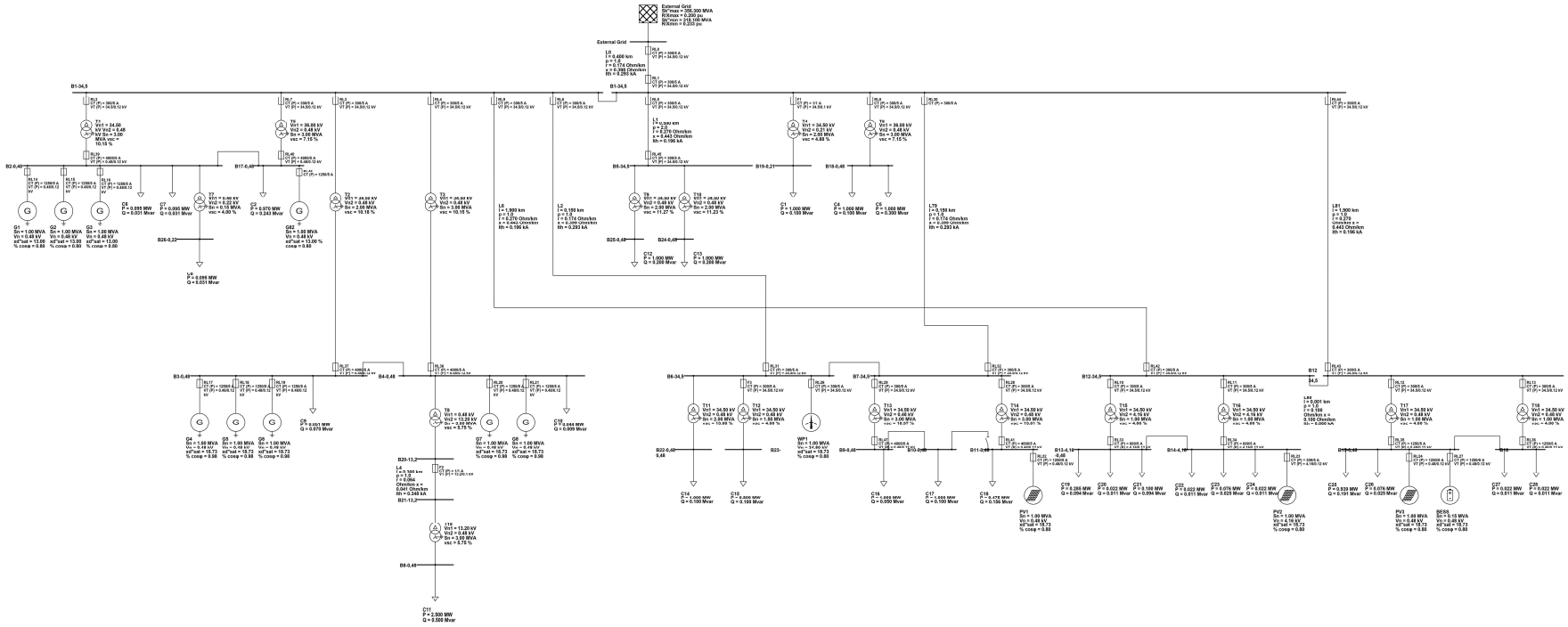
[49] Short-circuit currents in three-phase a.c. systems-Part 0: Calculation of currents, IEC Standard 60909-0:2016, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2016.

[50] J. E. Santos-Ramos, S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama, N. Muñoz-Galeano, and J. R. Ortiz-Castrillón, “A Microgrid Test System for Protection Coordination Studies,” Electronics, vol. 12, no. 23, pp. 1–25, 2023.

[51] A. Ertaş and R.Yumurtacı, “Comparative Analysis of Differential and Directional Overcurrent Protection Schemes in a Ring-Structured Microgrid,” in Proc. ELECO 2025 Int. Conf. Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, 2025.

A

MİKROŞEBEKE TEK HAT DİYAGRAM



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. A. Ertaş and R.Yumurtacı, “Comparative Analysis of Differential and Directional Overcurrent Protection Schemes in a Ring-Structured Microgrid,” in Proc. ELECO 2025 Int. Conf. Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, 2025.