

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MESAFE KORUMA RÖLELERİ İÇİN ARIZA NOKTASI
TESPİTİNDE OLUŞAN HATALARIN İNCELENEREK ÇÖZÜM
ÖNERİLERİN OLUŞTURULMASI**

ERSİN GÖKTEUÇAR

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MESAFE KORUMA RÖLELERİ İÇİN ARIZA NOKTASI
TESPİTİNDE OLUŞAN HATALARIN İNCELENEREK ÇÖZÜM
ÖNERİLERİN OLUŞTURULMASI

ERSİN GÖKTEUÇAR

Prof. Dr. Bora ALBOYACI
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR
Jüri Üyesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Gül KURT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

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

beyan ederim.

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

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

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

Ersin GÖKTEUÇAR

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

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

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

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

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

Ersin GÖKTEUÇAR

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında mesafe koruma rölelerinin yanlış arıza noktası tespitlerinin nedenleri incelenmiş ve bu duruma çözüm önerileri geliştirilmiştir.

Yüksek lisans çalışmasına değerli destekleri için saygıdeğer hocam Prof. Dr. Bora ALBOYACI'ya, kıymetli çalışma arkadaşım Yaşar Beyazıt YOLDAŞ'a teşekkür ederim. Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca manevi desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Ayşe ÇAKAL GÖKTEUÇAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran – 2023

Ersin GÖKTEUÇAR



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KORUMA SİSTEMLERİ	4
2.1. Elektrik Üretim, İletim ve Dağıtım Sistem Teçhizatlarının Korunması.....	4
2.1.1. Generatör Koruma	4
2.1.2. Havai İletim Hatları Koruma	5
2.1.3. Transformatör Koruma	5
2.1.4. Motor Koruma	5
2.2. Koruma Sistemi Unsurları	6
2.3. Koruma Sistemi Özellikleri.....	6
2.4. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Kullanılan Koruma Sistemleri ve Seçim Kriterleri	7
2.4.1. Kesici Seçimi	8
2.4.2. Akım Transformatörü Seçimi	8
2.4.3. Gerilim Transformatörü Seçimi.....	12
3. KORUMA RÖLELERİ	14
3.1. Yapılarına Göre Koruma Röleleri	14
3.1.1. Elektromekanik Koruma Röleleri.....	14
3.1.2. Statik Koruma Röleleri	14
3.1.3. Sayısal Koruma Röleleri.....	15
3.2. Fonksiyonlarına Göre Koruma Röleleri	15
3.2.1. Aşırı Akım Koruma Rölesi	16
3.2.2. Diferansiyel Koruma Rölesi	23
3.2.3. Bara Koruma Rölesi	30
3.2.4. Mesafe Koruma Rölesi	33
4. MESAFE KORUMA RÖLESİNDE KULLANILAN FONKSİYONLAR VE MESAFE KORUMA RÖLESİ TESTİ	43
4.1. Güç Salınımı Fonksiyonu	43
4.2. Yük Körleştirme Fonksiyonu	45
4.3. Arıza Üzerine Kapama Fonksiyonu (SOTF)	46
4.4. Koruma Haberleşmesi Fonksiyonu	47
4.5. Aşırı ve Düşük Gerilim Koruma Fonksiyonu.....	48
4.6. Frekans Koruma Fonksiyonu.....	48
4.7. Osilografik Arıza ve Olay Kayıtları Alma Fonksiyonu.....	48
4.8. Otomatik Tekrar Kapama Fonksiyonu	52
4.9. Mesafe Koruma Rölesi Testi	57
5. MESAFE KORUMA RÖLELERİNDE ARIZA NOKTASI TESPİTİNİ ETKİLEYEN DURUMLARIN İNCELENMESİ	61

5.1. Arıza Noktası Tespitini Etkileyen Faktörler.....	61
5.1.1. Arıza Direnci	61
5.1.2. Topraklanmış Transformatör	63
5.1.3. İletim Hattının Simetri Durumu.....	64
5.1.4. Hat Parametreleri ve Aynı Direkte Paralel Hat Olması Durumu	64
5.2. Aynı Direkteki Paralel İletim Hatlarında Karşılıklı Ortak Empedans Etkisinin İncelenmesi	66
5.2.1. Paralel İki İletim Hattı Arasındaki Karşılıklı Ortak Empedans Etkisinin Mesafe Koruma Rölesi Arıza Noktası Üzerindeki Etkisi	72
5.3. Örnek Seçilen Paralel İletim Hattında Ortak Empedans Etkisinin İncelenmesi ve Analizi	74
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	90
KAYNAKLAR.....	93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Akım transformatörü yapısı	9
Şekil 2.2.	İki kutuplu akım transformatörü	10
Şekil 2.3.	Akım transformatörü doyma eğrisi	11
Şekil 2.4.	Gerilim transformatörü prensip şeması	12
Şekil 3.1.	Ters zaman karakteristik eğrisi	17
Şekil 3.2.	Örnek aşırı akım koordinasyonu	17
Şekil 3.3.	Paralel iletim hattında yönlü koruma	18
Şekil 3.4.	İki taraftan beslenen iletim hattında yönlü koruma şeması.....	19
Şekil 3.5.	Diferansiyel koruma rölesi çalışma prensibi diyagramı.....	24
Şekil 3.6.	Diferansiyel koruma rölesi çalışma prensibi eğrisi	25
Şekil 3.7.	Diferansiyel koruma rölesi karakteristik tutuculuk eğrisi	25
Şekil 3.8.	Diferansiyel koruma rölesi koruma şeması	26
Şekil 3.9.	Bara koruma rölesi temel çalışma prensip şeması	30
Şekil 3.10.	Çift baralı sistem yapısı.....	31
Şekil 3.11.	İletim hattı eşdeğer devresi	33
Şekil 3.12.	Mesafe koruma rölesi arıza empedansı diyagramı	34
Şekil 3.13.	Korunan iletim hattı arıza türleri	34
Şekil 3.14.	Mesafe koruma rölesi koruma kademe bölgeleri	36
Şekil 3.15.	İletim hattı empedans grafiği.....	37
Şekil 3.16.	Mho empedans karakteristiği	38
Şekil 3.17.	Quadrilateral (dörtgen) empedans karakteristiği.....	39
Şekil 3.18.	Mesafe koruma rölesi transformatör merkezi yerleşimi	39
Şekil 3.19.	1. Kademe bölgesi dışında gerçekleşen arıza.....	40
Şekil 3.20.	Mesafe koruma rölesi koruma kademe ayarları	42
Şekil 3.21.	Mesafe koruma rölesi açma zaman gecikme grafiği.....	42
Şekil 4.1.	Güç salınımı tespit yöntemi.....	44
Şekil 4.2.	Mesafe koruma rölesinde yük körleştirme fonksiyonu	45
Şekil 4.3.	Osilografik arıza kaydı akım sinyalleri örneği	49
Şekil 4.4.	Osilografik arıza kaydı gerilim sinyalleri örneği	50
Şekil 4.5.	Osilografik arıza kaydı dijital bilgi sinyalleri örneği	51
Şekil 4.6.	Mesafe koruma rölesi olay kayıtları örneği.....	51
Şekil 4.7.	Otomatik tekrar kapama süreci lojik şeması	53
Şekil 4.8.	Otomatik tekrar kapama blokaj sinyalleri blok diyagramı.....	55
Şekil 4.9.	Röle test cihazı akım ve gerilim bağlantıları.....	58
Şekil 4.10.	Mesafe koruma rölesi açma ucu bağlantıları.....	59
Şekil 4.11.	Röle test cihazı empedans karakteristiği	60
Şekil 5.1.	Tek taraftan beslenen toprak arızası empedans şeması.....	62
Şekil 5.2.	Çift taraftan beslenen toprak arızası empedans şeması.....	63
Şekil 5.3.	Topraklanmış transformatörün arıza empedansına etkisi.....	64
Şekil 5.4.	Üç fazlı iletim sisteminde GMD	65
Şekil 5.5.	Aynı baralardaki paralel iletim hattı şeması.....	66
Şekil 5.6.	Topraklama iletkeninin ortak empedansa etkisi.....	67
Şekil 5.7.	İki iletken arasında oluşan karşılıklı ve öz empedans şeması	68
Şekil 5.8.	Üç fazlı bir iletim hattında oluşan karşılıklı ve öz empedans şeması	69
Şekil 5.9.	Aynı direktte üç faz iki farklı iletim hattı gösterimi.....	70
Şekil 5.10.	Paralel iletim hatlarından ikisinin de enerjili olması durumu	72

Şekil 5.11.	Paralel iletim hattının enerjisiz ve topraklanmış olması durumu.....	73
Şekil 5.12.	Modellenen paralel hatların tek hat şeması gösterimi.....	75
Şekil 5.13.	Hat parametrelerinin mesafe koruma rölesine aktarılması.....	76
Şekil 5.14.	İletim hattı tipindeki modele ait hattın %100'ündeki arıza empedansı	76
Şekil 5.15.	Direk tipi modeldeki koordinat verilerinin gösterimi	77
Şekil 5.16.	İletim hattının direk geometrik verilerinin girilmesi.....	78
Şekil 5.17.	Topraklama iletkeni karakteristik verilerinin girilmesi.....	78
Şekil 5.18.	İletim hattı tipi ile modellenen arızada rölenin ölçtüğü arıza empedansı	80
Şekil 5.19.	Direk tipi ile modellenen arızada rölenin ölçtüğü arıza empedansı	80
Şekil 5.20.	Aynı direkte modellenen paralel iletim hatlarının geometrik verilerinin girilmesi	81
Şekil 5.21.	Aynı direkte modellenen iletim hatlarının karşılıklı kuplajı	82
Şekil 5.22.	Aynı direkte modellenen iletim hatlarının topraklama iletkeni içermeyen durumdaki karşılıklı kuplajı.....	83
Şekil 5.23.	Paralel hat akımlarının mesafe koruma rölesine taşınma şeması.....	85
Şekil 5.24.	Çalışma yapılan elektrik iletim hattının fiziksel görüntüsü	86
Şekil 5.25.	Modellenen mesafe koruma rölesine paralel hattın toprak akımının tanımlanması	87
Şekil 5.26.	Karşılıklı ortak empedans düzeltme katsayılarının mesafe koruma rölesine girilmesi.....	88

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	400 ve 154 kV kablo fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları	27
Tablo 3.2.	380 / 154 kV ototransformatör fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları.....	28
Tablo 3.3.	380 / 33 kV güç transformatörü fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları.....	28
Tablo 3.4.	380 / 33 kV güç transformatörü fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları.....	29
Tablo 3.5.	380 kV reaktör fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları.....	29
Tablo 5.1.	Hesaplamalarda kullanılan hat parametreleri	74
Tablo 5.2.	İletim hattı tipindeki modele ait hat parametrelerinin değerleri.....	75
Tablo 5.3.	Topraklama iletkeni parametrelerinin değerleri	77
Tablo 5.4.	Direk tipindeki modele ait hat parametrelerinin değerleri	79
Tablo 5.5.	Karşılıklı ortak empedans etkisi içermeyen direk tipi modelde ölçülen arıza empedansları	81
Tablo 5.6.	Karşılıklı ortak empedans etkisi içeren modelde ölçülen arıza empedansları.....	82
Tablo 5.7.	Karşılıklı ortak empedans etkisinin ölçülen arıza noktasında neden olduğu hata oranları	83
Tablo 5.8.	Topraklama iletkeni içermeyen direk tipi modele ait hat parametreleri.....	84
Tablo 5.9.	Karşılıklı ortak empedans etkisi içeren, topraklama iletkeni içermeyen modelde ölçülen arıza empedansları.....	84
Tablo 5.10.	Faz iletkenine ait karşılıklı ortak empedans değerleri.....	87
Tablo 5.11.	Karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu öncesi ve sonrası arıza empedans değerlerinin karşılaştırılması	89
Tablo 5.12.	Kompanzasyon öncesi ve sonrası gerçek arıza noktasına göre hata oranlarının karşılaştırılması	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A.	: Akım (A)
AT_1	: 1. Akım transformatörü
AT_2	: 2. Akım transformatörü
AT_3	: 3. Akım transformatörü
AT_4	: 4. Akım transformatörü
d_1	: R ve S iletkenleri arasındaki mesafe
d_2	: R ve T iletkenleri arasındaki mesafe
d_3	: S ve T iletkenleri arasındaki mesafe
E_k	: Emniyet katsayısı
f	: Şebeke frekansı, (Hz)
F1	: Aşırı akım koruma rölesi
F2	: Aşırı akım koruma rölesi
F3	: Aşırı akım koruma rölesi
F4	: Aşırı akım koruma rölesi
F5	: Aşırı akım koruma rölesi
Hz.	: Hertz
I_A	: A hattının akımı, (A)
I_B	: B hattının akımı, (A)
I_C	: C hattının akımı, (A)
I_d	: Diferansiyel akımı, (A)
I_E	: Toprak arıza akımı, (A)
I_{ea}	: A hattının toprak akımı, (A)
I_{eb}	: B hattının toprak akımı, (A)
I_F	: Arıza akımı, (A)
I_{hat}	: Hat akımı, (A)
IN_{Trafo}	: Transformatör nominal akımı, (A)
I_{max}	: Akım transformatörü nominal akımı, (A)
I_P	: Primer akımı, (A)
I_{P_1}	: Röleye primer taraftan gelen akım, (A)
I_S	: Sekonder akımı, (A)
I_{S_1}	: Röleye sekonder taraftan gelen akım, (A)
I_T	: Tutuculuk akımı, (A)
$I >$	: Aşırı akım rölesi 1. kademe bölgesi
$I >>$	: Aşırı akım rölesi 2. kademe bölgesi
$I >>>$	: Aşırı akım rölesi 3. kademe bölgesi
K	: Tutuculuk eğimi
K_i	: İletkenlik katsayısı
Km.	: Kilometre
kV.	: Kilovolt
K_{ZN}	: Toprak düzeltme katsayısı
l	: İletken uzunluğu, (km)
L	: Bobin endüktansı, (H)
Ms.	: Milisaniye
MVA.	: Mega Volt Amper
N_p	: Primer sarım sayısı

N_S	: Sekonder sarım sayısı
pu	: Per unit (birim başına)
P_1	: Primer sargı ucu
P_2	: Primer sargı ucu
R	: Omik direnç, (Ω)
R_{ark}	: Ark direnci, (Ω)
R_E	: Toprak arıza direnci, (Ω)
R_{hat}	: Hat direnci, (Ω)
R_T	: Toprak direnci, (Ω)
$R_{yük}$	: Yük direnci, (Ω)
R_{OM}	: Karşılıklı ortak rezistans, (Ω)
R_1	: Pozitif bileşen rezistansı, (Ω)
r_1	: R iletkeni yarıçapı, (cm)
r_2	: S iletkeni yarıçapı, (cm)
r_3	: T iletkeni yarıçapı, (cm)
S	: İletken kesiti, (cm)
S_1	: Sekonder sargı ucu
S_2	: Sekonder sargı ucu
V	: Gerilim, (V)
V_F	: Arıza gerilimi, (V)
V_{hat}	: Hat gerilimi, (V)
V_P	: Primer gerilimi, (V)
V_S	: Sekonder gerilimi, (V)
T_a	: Zaman çarpanı
t_s	: Röle açma süresi
T_1	: Arıza noktası
V_{A-B}	: Faz – faz arası gerilim, (V)
V_{C-N}	: Faz – toprak arası gerilim, (V)
V_A	: A şebekesinin gerilimi, (V)
V_B	: B şebekesinin gerilimi, (V)
Z_A	: A fazın empedansı, (Ω)
Z_{AA}	: A hattının öz empedansı, (Ω)
Z_{AB}	: A ile B hatlarının karşılıklı ortak empedansı, (Ω)
Z_{BB}	: B hattının öz empedansı, (Ω)
Z_B	: B fazın empedansı, (Ω)
Z_C	: C fazın empedansı, (Ω)
Z_{CC}	: C hattının öz empedansı, (Ω)
Z_E	: Toprak arıza empedansı, (Ω)
Z_F	: Arıza empedansı, (Ω)
Z_G	: Mesafe koruma rölesi geri kademe bölgesi, (Ω)
Z_R	: Tek kaynaktaki arıza anında okunan empedans, (Ω)
Z'_R	: Çift kaynaktaki arıza anında okunan empedans, (Ω)
$Z_{yük}$	: Yük empedansı, (Ω)
Z_{OM}	: Karşılıklı ortak empedans, (Ω)
Z_1	: Mesafe koruma 1. kademe bölgesi
Z_2	: Mesafe koruma 2. kademe bölgesi
Z_3	: Mesafe koruma 3. kademe bölgesi

Z_4	: Mesafe koruma 4. kademe bölgesi
Z_{0L}	: Sıfır bileşen empedansı, (Ω)
Z_{1L}	: Pozitif bileşen empedansı, (Ω)
Ω .	: Direnç
ω	: Açısal frekans
Q_1	: 1. Fider kesicisi
Q_2	: 2. Fider kesicisi
$X - R$	: Reaktans direnç
X_E	: Toprak arıza reaktansı
X_L	: Endüktif hat empedansı
X_{0M}	: Karşılıklı ortak reaktans
X_1	: Pozitif bileşen reaktansı
$\%U_k$	: Transformator kısa devre gerilimi
$^\circ$.	: Derece
21	: Mesafe koruma rölesi
67	: Yönlü aşırı akım koruma rölesi
87B	: Bara koruma rölesi
87L	: Hat diferansiyel koruma rölesi
π	: pi sayısı
δ	: Giriş derinliği
ρ	: Toprak özgül direnci

Kısaltmalar

DC	: Direct Current (Doğru Akım)
GMD	: Geometrical Mean Distance (Geometrik Ortalama Mesafe)
GMR	: Geometrical Mean Radius (Geometrik Ortalama Yarıçap)
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
SOTF	: Switch On To Fault (Arıza Üzerine Anahtarlama)
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TK	: Tekrar Kapama

MESAFE KORUMA RÖLELERİ İÇİN ARIZA NOKTASI TESPİTİNDE OLUŞAN HATALARIN İNCELENEREK ÇÖZÜM ÖNERİLERİN OLUŞTURULMASI

ÖZET

Elektrik iletim hatlarının korunmasında kullanılan mesafe koruma röleleri; aynı zamanda kullanıcıya arıza noktasını tespit edebilmesi için bulundukları yere göre mesafe bilgisini de vermektedir. Kullanıcıya verilen bu mesafe bilgisinin doğruluğu elektrik iletim sisteminde varolan bazı parametrelerden olumsuz olarak etkilenebilmekte ve bu etki neticesinde elektrik iletiminin sürekliliğini tehlikeye düşürebilmektedir. Bu parametrelerden biri aynı direklerde paralel olarak giden iletim hatlarında oluşan karşılıklı ortak empedans etkisidir. Korunan hatta meydana gelen arıza esnasında, paralel iletim hattından akan toprak akımının miktarına göre değişen karşılıklı ortak empedans etkisi, mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen arıza empedansını doğrudan değiştirebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında literatürdeki bu soruna sunulan bazı çözüm yolları araştırılmış ve gerçekte aynı sorunun yaşandığı Türkiye elektrik iletim sistemine ait Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattı ele alınmıştır. Bu çalışmada sorunun çözümü için öncelikle ele alınan iletim hatları DigSILENT Power Factory analiz programında hem iletim hattı tipinde hem de hat empedansına etki eden birçok faktör göz önünde bulundurularak direk tipinde modellenmiştir. Simülasyon programında yapılan çeşitli analizler sonucu karşılıklı ortak empedans etkisi hesaplanmış ve mesafe koruma rölesi arıza noktası tespitine olan olumsuz etkisi ortaya konmuştur. Yapılan analizler sonucu karşılıklı ortak empedans etkisinin; iletim hattının uzunluğu arttıkça ve paralel iletim hatları arasındaki mesafe kısaldıkça arttığı, topraklama iletkeni kullanıldıkça da azaldığı gözlemlenmiştir. Sonrasında arıza noktasının doğru tespiti için olumsuz etkiye neden olan paralel iletim hattının toprak akımı ve korunan iletim hattında kullanılan mesafe koruma rölesi DigSILENT Power Factory programında modellenerek arıza noktası tespitinde ortaya çıkan bu hata karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu yapılarak giderilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıza Yeri Tespiti, Karşılıklı Empedans Etkisi, Karşılıklı Empedans Kompanzasyonu, Mesafe Koruma Rölesi, Paralel İletim Hatları.

EXAMINING THE ERRORS IN THE FAULT LOCATION DETECTION FOR DISTANCE PROTECTION RELAYS AND CREATING SOLUTION SUGGESTIONS

ABSTRACT

Distance protection relays used in the protection of electrical transmission lines; at the same time, it also gives the user the distance information according to their location in order to detect the fault location. The accuracy of this distance information given to the user may be adversely affected by some existing parameters in the electrical transmission system, and as a result of this effect, the continuity of the electrical transmission may be endangered. One of these parameters is the mutual impedance effect that occurs in parallel transmission lines on the same poles. During the fault on the protected line, the mutual common impedance effect, which varies according to the amount of earth current flowing through the parallel transmission line, can directly change the fault impedance measured by the distance protection relay. Within the scope of this thesis, some solutions presented to this problem in the literature have been researched and Dudullu – Tepeören 2 electric transmission lines of the Turkish electricity transmission system, where the same problem is actually experienced, are discussed. In this study, for the solution of the problem, the transmission lines were first modeled in the DigSILENT Power Factory analysis program, considering both the transmission line type and the pole type, taking into account many factors affecting the line impedance. As a result of various analyzes made in the simulation program, the mutual common impedance effect was calculated and it is negative effect on the distance protection relay fault location detection was revealed. As a result of the analyzes made, the mutual impedance effect; it has been observed that as the length of the transmission line increases and the distance between parallel transmission lines becomes shorter, it increases and decreases as the grounding conductor is used. Afterwards, the ground current of the parallel transmission line and the distance protection relay used in the protected transmission line, which cause negative effects for the correct determination of the fault location, were modeled in the DigSILENT Power Factory program and this error that occurred in the fault location detection was eliminated by mutual impedance compensation.

Keywords: Fault Location Detection, Mutual Impedance Effect, Mutual Impedance Compensation, Distance Protection Relay, Parallel Transmission Lines

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin son kullanıcılar tarafından sürekli ve verimli olarak kullanılabilmesi için elektrik enerjisinin; üretim, iletim ve dağıtım safhalarının tümünü kapsayacak şekilde koruma röleleri ile korunması gerekmektedir. Bu safhalardan elektrik iletim kısmı incelendiğinde; elektrik iletiminin büyük çoğunluğunun havai iletim hatları vasıtasıyla gerçekleştirildiği görülmektedir. Havai iletim hatları konumu gereği arıza nedeni oluşturabilecek birçok dış etkene açıktır. Havai iletim hatlarında oluşabilecek bir arızayı kısa sürede bertaraf etmek, kesintisiz ve verimli elektrik enerjisi için oldukça önem taşımaktadır. Bu maksatla havai iletim hatlarında gelişmiş sayısal koruma rölesi sınıfına giren mesafe koruma röleleri kullanılmaktadır. Mesafe koruma rölesi, koruduğu havai iletim hattını, oluşabilecek arızalara karşı korumasının yanında kullanılan iletkenlerin empedans bilgileri ile oluşan arızanın empedans bilgisini karşılaştırarak arıza yeri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu sayede oluşan arızanın giderilmesi için doğru arıza noktasına intikal edilmesini sağlamakta, kesintisiz ve verimli elektrik enerjisine büyük katkı sunmaktadır.

Havai iletim hatlarının empedanslarının belirlenmesinde birçok parametre bulunmaktadır. Direk tipi, havai iletim hattının geometrisi, akım ve gerilim transformatörlerinin hata oranı, iletkenler arasındaki mesafe, paralel iletkenlerin birbirine olan ortak empedans etkisi gibi birçok değişken havai iletim hatlarının empedans hesaplamalarında önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla bu hesaplamalardaki doğruluk miktarını arttırıcı tüm faaliyetler, mesafe koruma rölelerinin arıza noktası tespitindeki doğruluk oranını yükseltmektedir. Bu yüksek lisans çalışmasında da bu parametrelerden; paralel iletkenlerin birbirlerine olan ortak empedans etkisi ele alındı.

Bu çalışma kapsamında İstanbul Anadolu Yakasında meydana gelen elektrik iletim hattı arızaları incelendi. İnceleme esnasında yük bakımından önemli iletim hatlarından olan Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattında meydana gelen arızadaki, arıza konumunun yanlış tespit edilmesinin nedenleri üzerinde duruldu. Arıza konumuna etki eden birçok etken açıklandı. Bu etkenlerden biri olan aynı direkte paralel olarak ilerleyen iletim hatlarının birbirlerine olan karşılıklı ortak empedans etkileri incelendi. Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan gerçek iletim hatları DIgSILENT Power Factory programında hem iletim hattı tipinde hem de literatürdeki diğer çalışmalardan farklı

olarak direk tipinde modellenerek hatların geometrilerinin hat empedansına olan etkisi gözlemlendi. Direk tipindeki modellemelerde yapılan analizlerle karşılıklı ortak empedans etkisinin arıza konumuna olan etkisi ortaya koyuldu. Ardından karşılıklı ortak empedans etkisinin gerçek arıza konumuna göre ortaya çıkan hata oranları, DigSILENT Power Factory programında karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu yapılarak oldukça düşürülebileceği gösterildi.

Literatürde bu konu ile ilgili birtakım çalışmalar bulunmaktadır. O'Donovan ve diğ. (2021), paralel olarak tesis edilen havai iletim hatlarında karşılıklı kuplaj etkisini incelemiş, mesafe koruma rölesi performansına etkisini gözlemleyebilmek için aynı baraya bağlı iki paralel havai iletim hattını DigSilent Power Factory programında simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Teimourzadeh ve diğ. (2021), paralel iletim hatlarında meydana gelen karşılıklı kuplaj etkisini incelemek için PSCAD/EMTDC analiz programında paralel iletim hatlarını simüle etmiş ve geleneksel mesafe koruma rölelerinin kullandığı algoritmanın dışında farklı bir algoritma geliştirmiştir. MATLAB programı ile PSCAD/EMTDC programları arasında kurulan bir bağlantı ile geliştirdiği algoritmanın kodlarını analiz programına aktararak karşılıklı kuplaj etkisini hesaplayarak mesafe koruma rölesinin çalışma performansını ortaya koymuştur. Feiyang ve diğ. (2020), aynı direk üzerindeki paralel iletim hatlarında bulunan mesafe koruma röleleri için geleneksel arıza yeri tespiti dışında bir mesafe koruma optimizasyonu önermişler ve bu yöntemin etkinliğini PSCAD/EMTDC programında simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sorrentino ve Garcia (2017), paralel havai iletim hatlarının empedans hesabı için farklı arıza öncesi yük akışı durumlarında, havai iletim hattının ortak empedans kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumlarını karşılaştırmışlardır. Mesafe koruma rölesi tarafından görülen arıza direnci, paralel iletim hattının etkisinden orta derecede etkilendiği sonucuna varmışlardır. Srivani ve diğ. (2009), paralel iletim hatlarında meydana gelen karşılıklı kuplaj etkisine çözüm bulabilmek için korunan hattın paralelindeki havai iletim hattının sıfır bileşen akımını korunan havai iletim hattına fiziksel olarak taşımışlar ve ortak empedans hesaplamalarında fiziksel olarak taşıdıkları bu sıfır bileşen akımını kullanmışlardır. Ardından EMTDC/PSCAD programında paralel iletim hattını simüle ederek performansını değerlendirmişlerdir. Kmec ve diğ. (2014), paralel iletim hatlarını MATLAB/Simulink ortamında simüle ederek paralel iletim hatlarından ikisinin de devrede olması, paralel iletim hattının devre dışı ancak

topraklanmamış olması ve paralel iletim hattının devre dışı ve topraklanmış olması durumlarını incelemiştir. Yapılan incelemenin ardından sonuçları kıyaslayarak paralel iletim hatlarında ortak empedans etkisini hesaba katmanın ne kadar önemli olduğunu vurgulamışlardır. Elhaffar ve diğ. (2013), paralel iletim hatlarını ATP/EMTP aracılığıyla modellemiş ve simüle etmişlerdir. Ortak empedansı kompanze edebilmek için ortak empedans kompanzasyon faktörünü hesaplamış ve bu faktörü dinamik tutabilmek için bir takım algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu algoritmaları çeşitli arıza senaryoları ile test etmişlerdir.



2. KORUMA SİSTEMLERİ

Elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması için harcanan maliyetler ve enerjinin kullanımına olan bağlılık bu enerjinin sürekli ve belli bir kalitede bulundurulması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Koruma sistemleri de aslında elektrik enerjisinin bu doğrultuda en büyük ihtiyaçlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrik enerjisi son kullanıcıya gelene kadar birçok safhadan geçer. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı olarak kategorileştirilen bu safhaların her birinde birçok teçhizat kullanılmakta ve bu safhalar birbirinden farklı süreç ve prosedürler gerektirmektedir. Tüm bu süreçte kullanılan türbin, jeneratör, motor, transformatör, iletim hattı, kablo, direk gibi teçhizatların korunmasının yanında işletme ve bakım güvenliği, sistem kararlılığı gibi konuların tümü koruma sistemleri ile kontrol edilmektedir.

Son kullanıcıların elektrik enerjisini verimli ve sağlıklı bir şekilde kullanabilmesi için elektrik enerjisinin bileşenleri olan akım, gerilim, frekans gibi parametreler belli sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir. Bu bileşenleri belli sınırlar içerisinde tutmamızı sağlayan, aynı zamanda sistemde oluşacak bir kısa devre akımında teçhizatı korumayı sağlayan koruma sistemleri, bu korumayı sistemin bir kısmını servis harici ederek sağlamaktadır. Koruma sistemleri, gerek teçhizatı korumak gerekse elektrik enerjisinin verimli ve sağlıklı bir şekilde kullanılmasını sağlamak için mümkün olan en kısa sürede bu işlemi gerçekleştirmek zorundadır.

2.1. Elektrik Üretim, İletim ve Dağıtım Sistem Teçhizatlarının Korunması

Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri için sistem koruması sahadan alınan akım ve gerilim bilgilerine göre yapılmakta iken, elektrik üretim sistemleri için sistem koruması sahadan alınan akım, gerilim, sıcaklık, basınç, hız, titreşim gibi birçok değişken bilgilere göre yapılmaktadır. Verilen koruma tertiplerinin temeldeki amaçları; arıza durumunda oluşan hasarı sınırlandırmak ve arızalı kısmın bir an önce servis harici kalmasını sağlayarak çalışan diğer sistemin arızadan etkilenmesini önlemektir.

2.1.1. Generatör Koruma

Generatörlerde oluşabilecek arızalarda generatörü ve sargılarını korumak büyük önem arz

etmektedir. Aniden güç düşümü meydana gelen generatörlerde; generatör ile yük arasında güç uyumsuzlukları meydana gelmektedir. Ayrıca generatördeki ikaz sisteminin aşırı uyarmasına bağlı çeşitli arızalar da oluşabilmektedir. Bu tür arızaların meydana getireceği zararlardan generatörü korumak için generatör koruma röleleri vasıtasıyla generatörler korunmaktadır.

2.1.2. Havai İletim Hatları Koruma

Havai iletim hatları açık mahallerde bulunduklarından birçok arızaya maruz kalmaktadır. Havai iletim hatları genellikle iletim hattının başından ve sonundan olmak suretiyle karşılıklı olarak koruma röleleri vasıtasıyla korunurlar. Genellikle ağaç dalı teması, yıldırım teması gibi iletim sisteminde sürekli olmayan bu faz- toprak arıza durumlarında oluşan arızadan sadece tek faz etkilenmekte ve bu arıza kısa süre sonra ortadan kalkmaktadır. Bu yüzden havai iletim hatlarında kullanılan mesafe koruma rölelerinin bir koruma fonksiyonu olan tek faz tekrar kapama fonksiyonu kullanılmaktadır.

2.1.3. Transformatör Koruma

Elektrik enerjisinin kolay ve güvenilir taşınmasına yarayan transformatörler hem iç hem de dış arızalardan korunması gerekmektedir. İç arıza diye nitelendirebileceğimiz; sargı ile tank arasında oluşabilecek bir kısa devre arızasında tank koruma, izolasyon yağının ısınarak genişmesi ile ortaya çıkan gazın etkisiyle çalışan buchholz koruma ve transformatör yağ sıcaklığının yüksek sıcaklıklarda izolasyon özelliğinin değişmeye başlamasından ötürü belli sıcaklık eşiklerinde koruma sağlayan termik korumadır.

Transformatör dış arızaları ise transformatöre giren ve çıkan akım miktarlarını sürekli olarak karşılaştıran bir diferansiyel koruma rölesi ile koruması sağlanmaktadır. Ayrıca bir transformatör merkezi için sistemi aşırı gerilime karşı koruyan koruma teli, ark boynuzu ve parafudr gibi teçhizatlar da bulunmaktadır.

2.1.4. Motor Koruma

Elektrik üretim süreçlerinde yoğun bir şekilde kullanılan elektrik motorları birçok yönden korunması gerekmektedir. Ani aşırı yüklenmelere, gerilim dalgalanmalarına maruz kalabilen elektrik motorları motor koruma röleleri vasıtasıyla korunmaktadır.

2.2. Koruma Sistemi Unsurları

Koruma sistemlerini oluşturan unsurlar birbirleri ile ilgili birçok teçhizattan oluşmaktadır. Bu teçhizatların bir kısmı bu bölümde açıklanmaktadır.

Koruma röleleri; sahadan alınan bilgileri kendinde toplayan, alınan bu bilgileri korunacak teçhizatın doğasına göre işleyip belirli komut sinyalleri üreterek kesiciye kumanda eden teçhizatlardır.

Akım ve gerilim transformatörleri; akım ve gerilimi belli oranlarda düşürerek koruma rölelerinin okuyabileceği düzeye indiren teçhizatlardır. Koruma röleleri; akım ve gerilim transformatörlerinin yaptıkları bu ölçüm sayesinde sistemde oluşan arızaları algılayabilmektedir.

Kesici ve ayırıcı; teçhizatı, sistemde oluşan arızalardan korumak ve arızayı belli bölgelerde sınırlandırabilmek için arızalı bölgenin enerjisini keserek sistemden ayıran teçhizattır.

Haberleşme sistemleri; teçhizatların birbirleri ile olan iletişimini sağlayan, bilgi sinyalleri dahil olmak tüm komut sinyallerini belli protokoller kullanarak bir noktadan başka bir noktaya taşıyan sistemlerdir.

Yukarıda açıklanan teçhizatlar koruma sistemlerinin ana omurgasını oluşturmaktadır. Teçhizatın korunması, işletme ve bakım güvenliği, sistem kararlılığı gibi hususlarda etkin bir koruma yapılabilmesi için koruma sistemlerinin belli özellikleri sağlaması gerekmektedir.

2.3. Koruma Sistemi Özellikleri

Güvenilirlik; sistemde gerçek bir arıza durumunda koruma sisteminin çalışması, sistemde arıza olmaması durumunda ise koruma sisteminin çalışmaması durumudur. Güvenilir bir koruma sisteminden sadece istenilen kriterler olduğu zaman açma yaparak ilgili sistemi ayırması beklenir. Bir koruma sisteminin sağlaması gereken güvenilirlik ilkesini etkileyen birçok teçhizat bulunmakta ve bu sistemi tasarlayan kişilerin de doğru ayarlamalar yapmaları güvenilirlik açısından büyük önem arz etmektedir.

Sseçicilik; koruma sisteminden beklenen arızalı, istenmeyen bölgeyi sistemden ayırarak teçhizatları korumasıdır. Ancak aynı zamanda elektrik enerjisi sürekliliğinin ve sistem kararlılığının sağlanması için arızalı, istenmeyen bölge dışındaki tüm noktaların sistem içerisinde devrede kalması gerekmektedir. Bu noktada koruma sistemi seçici özellikte olup hangi bölgenin sistemden ayrılacağını doğru belirleyip sadece o bölgeyi sistemden ayırması gerekmektedir. Aksi halde gereksiz elektrik kesintilerine ve hatta sistem kararlılığını tehlikeye düşürecek boyutlarda dalgalanmalara sebebiyet verebilirler.

Gecikme veya hızlı çalışma; elektrik üretim, iletim ve dağıtım sisteminde kullanılan gerek iletim hatları olsun gerek transformatörler olsun her teçhizatın belirli miktar akıma, belirli bir süre kadar dayanımı söz konusudur. Sistemde oluşacak bir arızada herhangi bir hasara meydan vermemek için koruma sistemlerinin en kısa sürede çalışması beklenir. Aynı zamanda seçicilik özelliğini sağlamak için koruma sistem ekipmanları arasında gecikme koordinasyonu yapılması da elzemdir.

Basitlik; koruma sistemlerini oluşturan unsurlar da birer teçhizatlardan meydana geldiği için bu teçhizatlarda oluşabilecek bakım ve arıza durumlarına da kolay bir şekilde müdahale edilebilir olması gerekmektedir.

2.4. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Kullanılan Koruma Sistemleri ve Seçim Kriterleri

Ülkemizde elektrik üretim santrallerinde üretilen elektriğin son kullanıcıya ulaşması iletim sistemleri ile sağlanmaktadır. Türkiye’de 2021 yılı itibari ile 123 tanesi 400 kV, 641 tanesi 154 kV olmak üzere toplam 764 transformatör merkezi, 2051 adet transformatör, 23917,18 km 400 kV, 46795,44 km 154 kV olmak üzere toplam 70712,62 km havai iletim hattı, 583,67 km yeraltı, 15,96 km denizaltı olmak üzere kablo hattı bulunmaktadır. (TEİAŞ, 2021) Tüm bu teçhizatları korumak için birbirinden farklı koruma röleleri kullanılmaktadır.

380 kV iletim sisteminin korunması için; mesafe koruma rölesi, yönlü toprak koruma rölesi, aşırı gerilim koruma rölesi, diferansiyel koruma rölesi, aşırı akım koruma rölesi, termal aşırı yük koruma rölesi, bara koruma rölesi, kesici arıza koruma rölesi kullanılmaktadır.

154 kV iletim sisteminin korunması için; mesafe koruma rölesi, aşırı akım rölesi, diferansiyel koruma rölesi, bara koruma rölesi, kesici arıza koruma rölesi kullanılmaktadır.

380/154 kV transformatörlerin korunması için; aşırı yük koruma rölesi, aşırı akım koruma rölesi, yönlü toprak koruma rölesi, diferansiyel koruma rölesi, nötr toprak koruma rölesi, yönlü toprak koruma rölesi, nötr direnç gerilim rölesi, nötr direnç akım rölesi kullanılmaktadır.

2.4.1. Kesici Seçimi

Bağlantısı yapıldığı iletim hattı yüklü iken açma ve kapama yapabilen kesiciler aynı zamanda arıza durumundaki oluşacak arkı da söndürmektedir. Kesici tercihi yapılırken öncelikle kesicinin bağlantısının yapılacağı teçhizatın gerilim ve akım değerlerine göre seçilmesi gerekir. Dayanma gerilimleri, anma akımları, kısa devre akımları gibi değerler koruduğu teçhizata uygun olmalıdır. Kesici kontaklarının arıza halinde açma yapmaya dayanıklılığının yanında bu açma süresinin çok kısa olması ve açma-kapama ömrünün yeterli miktarda olması gerekmektedir. Bu seçim kriterleri kesicinin etiketinde yazmaktadır. Kesici etiketindeki bu değerler titizlikle incelenmeden montajı yapılan kesicilerde patlama yaşanabilmektedir. Bu kriterlerin dışında kesici seçiminde ortam sıcaklığı, rüzgar, yükselti gibi birçok çevresel etmen de göz önünde bulundurulmalıdır.

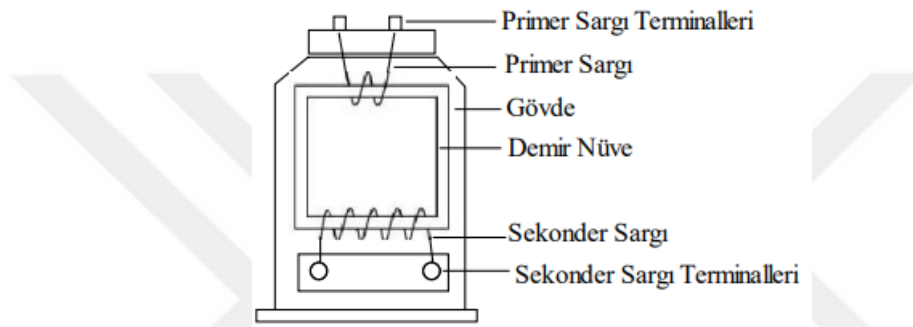
Günümüzde en fazla kullanılan kesici türlerinden biri SF_6 gazlı kesicilerdir. Bu tip kesiciler kısa devre anında oluşan arkı SF_6 gazı sayesinde söndürmektedir. SF_6 gazında zehir bulunmasa da akımı kesme anında oluşan metal florid zehirli bir maddedir ve bakımının dikkatli bir şekilde gazı boşaltıldıktan sonra yapılması gerekmektedir. SF_6 gazlı kesici dışında yağlı, havalı, vakumlu kesici türleri de bulunmaktadır. Yukarıda dile getirilen seçim kriterlerinin yanında teçhizat maliyeti, bakım maliyetleri de göz önünde bulundurularak kurulacak sisteme en uygun kesici seçimi yapılmalıdır.

2.4.2. Akım Transformatörü Seçimi

Akım transformatörleri, akım miktarını istenilen düzeyde düşürerek koruma röleleri ve ölçü aletleri tarafından okunabilmesine olanak sağlayan ölçü transformatörleridir. Akım transformatörleri izolasyon yönünden yağlı, epoksili ve SF_6 gazlı olmak üzere üç çeşit

üretilmektedir. Kapalı mekanda kullanılan akım transformatörlerinin izolasyon çeşidi epoksidir. Dış mekanda yani açık tip şalt sahalarında kullanılan akım transformatörlerinin izolasyon çeşidi yağdır. Gaz izoleli şalt sahalarında ise SF_6 gazlı akım transformatörleri kullanılmaktadır. Ülkemizdeki transformatör merkezleri genellikle açık tip olduğu için bu akım transformatörlerinden en fazla yağ izoleli akım transformatörleri kullanılmaktadır.

Akım transformatörlerinin yapısı Şekil 2.1’de gösterildiği gibi 5 ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Akım transformatörü yapısı (Büyükdora, 2006)

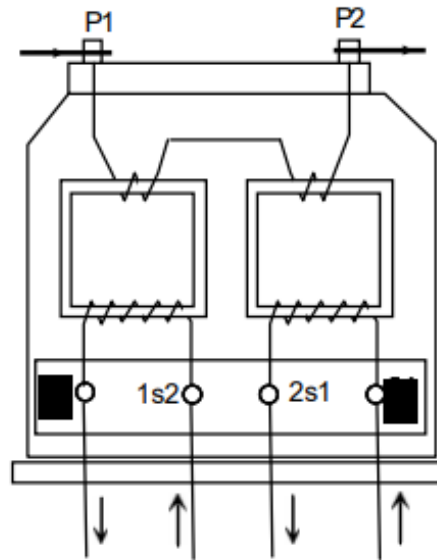
Primer sargı, demir bir nüveye birkaç sipir sarılmış istenilen akım miktarına uygun kalın telli sargı çeşididir. Sekonder sargı, demir bir nüveye primer tarafındaki sarımdan daha fazla miktarda ve zıt yönde sarılmış ince telli sargılardır. Primer sargı terminalleri, ölçülmek istenilen teçhizata bağlantı yapmak için kullanılırken sekonder sargı terminalleri ise ölçülen akım miktarını koruma röleleri veya ölçü aletlerine iletmek için kullanılmaktadır. Akım transformatörlerinde gövde ismiyle nitelendirilen yapı, nüve ile dış ortam arasında izolasyonu sağlamaktadır. Demir nüve ise bu dönüştürme işlemlerinin gerçekleşeceği manyetik ortamı oluşturmaktadır. Aynı zamanda demir nüvenin yapılış amacına göre akım transformatörünün bazı kendine özgü değerleri oluşmaktadır.

I_P primer sargı tarafından geçen akım, N_P primer sarım sayısı, I_S sekonder sargı tarafından geçen akım, N_S sekonder sarım sayısı olmak üzere; bunlar arasındaki bağıntı Denklem (2.1)’de verilmektedir.

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)' de verilen eşitlik aynı zamanda akım transformatörünün çevrim oranı olarak adlandırılmaktadır.

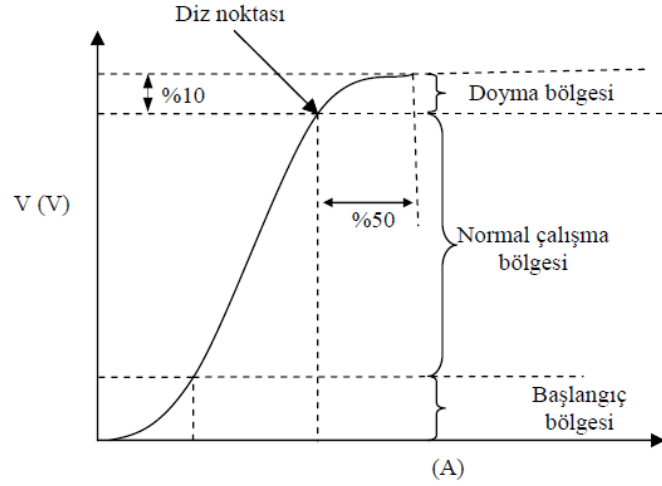
Akım transformatörleri kullanım amacına göre üretilmektedir. Ölçü veya koruma olmak üzere iki farklı amaç için üretilmekte olan akım transformatörlerinin karakteristik özellikleri birbirinden farklıdır. Doyum katsayısı ve hata sınıfı gibi iki türde de farklılık gösteren bu özellikler birlikte kullanılmak istenildiğinde farklı özelliklerdeki akım transformatörlerinin aynı gövdede birleştirilmesi ile elde edilen akım transformatörleri kullanılmaktadır. Şekil 2.2' de bu şekilde bir akım transformatörünün şeması verilmektedir.



Şekil 2.2. İki kutuplu akım transformatörü (Büyükdora, 2006)

Şekil 2.2'de görülen şemadaki her akım transformatörü nüvesi bir kutup olarak isimlendirilmekte ve yapım amacına göre biri ölçü aletlerinde kullanılırken diğeri ise koruma sistemlerinde kullanılmaktadır.

Akım transformatörleri, demir nüvenin doyuma gitmesi, kaçak akı kaynaklı kayıplar gibi ölçümü etkileyecek nedenlerden dolayı hatalı ölçüm yapabilmektedir. Sahada bu hatalı ölçüme akım transformatörlerinin hata sınıfı denilmekte ve belli bir değere kadar olması normal bir durum olarak karşılanmaktadır. Şekil 2.3' de akım transformatörünün doyma eğrisi görülmektedir.



Şekil 2.3. Akım transformatörü doyma eğrisi (Toruş, 2009)

Akım transformatörlerinde primer sargılarından akım akarken belli oranda sekonder sargılardan da akım akmaktadır. Belirli bir düzeye kadar primer sargılarından akan akım miktarı arttığında sekonder sargılardaki akan akım miktarı da lineer bir şekilde artmaktadır. Belli bir düzeyden sonra primer sargılarından akan akım miktarı ne kadar arttırılırsa arttırılsın sekonder sargılardan akan akım önce aynı oranda artmamaya sonrasında ise değişmeyerek sabit kalmaktadır. Bu şekilde primer sargılardaki akım miktarının artmasına karşı sekonder sargılardaki akım miktarının önce aynı oranda artmadığı ilk noktaya diz noktası, diz noktasından sekonder akımın değişme göstermemeye başladığı bölgeye ise doyma bölgesi denilmektedir. Genellikle koruma amacıyla kullanılan akım transformatörleri nominal akım miktarının 20 katına kadar doyum noktasına ulaşmadan akımı ölçmektedir.

Ölçme amaçlı kullanılan akım transformatörlerinin ölçüm yapan cihazın yüksek akımlardan etkilenmemesi için doyum noktası daha düşüktür. Aynı zamanda bu akım transformatörlerinin hata oranı da daha düşüktür. Koruma amaçlı kullanılan akım transformatörlerinin ise doyum noktaları yüksektir. Çünkü yüksek akımlı arızalarda da ölçme faaliyetini gerçekleştirmesi ve bunu koruma rölesine iletmesi beklenmektedir.

Akım transformatörlerinde primer sargılardan geçen akım belli bir oranda indirilerek sekonder sargılara aktarılırken belirli bir hata payı ile aktarılmaktadır. Bu hata hem akımın genliğinde hem de faz açısında meydana gelmektedir. Meydana gelen bu hata payları akım transformatörlerinin doğruluk sınıfı olarak isimlendirilmektedir. Bir başka ifadeyle doğruluk sınıfı; primer sargılardan anma akımı geçtiğinde sekonder sargılardan

geçen akımın ($\pm$) yönde ve yüzde cinsinden ne kadar fark edeceğini göstermektedir. Uluslararası literatürde ölçü cihazlarında kullanılacak akım transformatörlerinin doğruluk sınıflarından 0,5 ve 1 doğruluk sınıfı, koruma amaçlı kullanılacak akım transformatörlerinde ise 1 ve 3 doğruluk sınıfı kullanılmaktadır. Ancak bu hata oranları yükün %120 seviyelerine çıktığında daha da artacaktır. Nihayetinde koruma amacıyla kullanılacak akım transformatörleri için 5P ve 10P hata sınıfları karşımıza çıkmaktadır.

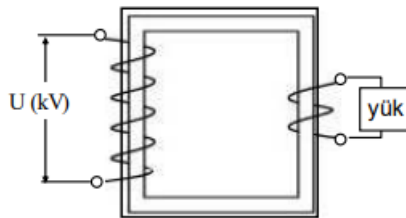
2.4.3. Gerilim Transformatörü Seçimi

Gerilim transformatörleri gerilim miktarını istenilen düzeyde düşürerek koruma röleleri ve ölçü aletleri tarafından okunabilmesine olanak sağlayan ölçü transformatörleridir. Tıpkı akım transformatörlerinde olduğu gibi kapalı mekanlarda kullanılan gerilim transformatörlerinin izolasyon malzemesi genellikle epoksidir. Dış mekanda yani açık tip şalt sahalarında kullanılan gerilim transformatörlerinin izolasyon çeşidi yağdır. Ülkemizde de genellikle yağ izoleli gerilim transformatörleri kullanılmaktadır.

V_P primer sargı tarafındaki gerilim, N_P primer sarım sayısı, V_S sekonder sargı tarafındaki gerilim, N_S sekonder sarım sayısı olmak üzere; bunlar arasındaki bağıntı Denklem (2.2)' de verilmiştir,

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)' de verilen eşitlik aynı zamanda gerilim transformatörünün çevrim oranı olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.4'de gerilim transformatörünün bir prensip şeması verilmektedir.



Şekil 2.4. Gerilim transformatörü prensip şeması (Büyükdora, 2006)

Gerilim transformatörlerinin yapısı, akım transformatörlerindeki yapıya benzerlik göstermektedir. Demir nüve, gövde vb. gibi bölümler bulunmaktadır. Aralarındaki fark

ise akım transformatöründe primer sargılarda birkaç sarım bulunmakta iken gerilim transformatörlerinde tam aksine primer sargılarda sarım sayısı daha fazladır.

Ölçme amacıyla kullanılan gerilim transformatörlerinin doğruluk sınıfları 0,1-0,2-0,5-1-3 iken koruma amacıyla kullanılan gerilim transformatörlerinin doğruluk sınıfı 3P ve 6P olarak belirlenmektedir. (Toruş, 2009)

Gerilim transformatörlerindeki anahtarlama esnasında gerilim transformatörüne bağlı kapasitif teçhizatlar manyetik nüve ile etkileşime girerek rezonans oluşturabilmektedir. Teçhizatın bu ferrezonans durumundan etkilenmemesi için bu durumu sönümleyici filtreler kullanılmaktadır.

Bir gerilim transformatörü seçilirken; anma gerilimi, anma gücü, doğruluk sınıfı ve dayanma katsayısı gibi karakteristik parametrelere göre temin edilmesi gerekmektedir. Bu değerlerin, gerilim transformatörünü kullanacağımız sistem için uygun olduğuna titizlikle dikkat edilmesi gerekmektedir.

3. KORUMA RÖLELERİ

Sahadan alınan verileri kendinde toplayan, alınan bu verileri korunacak teçhizata göre analog veya sayısal olarak işleyip belirli sinyaller üreterek kesiciye komut eden teçhizatlardır. Koruma sistemlerinin vazgeçilmez unsurları arasındadır.

3.1. Yapılarına Göre Koruma Röleleri

Geçmişten günümüze kadar birçok farklı türde koruma rölesi bulunmaktadır. Koruma röleleri yapısına göre ve içerdiği koruma fonksiyonlarına göre isimlendirilirler.

3.1.1. Elektromekanik Koruma Röleleri

İmal edildiği elemanların arasında hem mekanik hem de elektronik elemanlar olduğu için bu isimlendirme kullanılmaktadır. Koruma sistemi ilk defa bu türdeki koruma röleleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Dış etkenlere karşı dayanıklıdır ve ucuzdur. Bu tür koruma rölelerinde kesiciye verilen açma veya kapama komutu genellikle mekanik bir yay vasıtasıyla olmaktadır. Anahtarlamamanın meydana gelmesinde mekanik işlemler olduğu için ölçü transformatörlerinden gelen bilgiye göre anahtarlama süresi diğer statik ve sayısal rölelerle kıyaslandığında fazladır.

İlgili alanı korumak için birden fazla koruma fonksiyonu öngörülmüş ise bu koruma fonksiyonları, birden fazla elektromekanik röle gereksinimi oluşturmaktadır. Kapladığı alan fazladır. Mekanik eleman içerdiği için arızalanma olasılığı yüksek ve bakım sıklığı fazladır.

3.1.2. Statik Koruma Röleleri

Statik koruma rölelerinde mekanik elemanlar bulunmayıp tüm elemanları elektronik elemanlardan oluşmaktadır. Dolayısıyla mekanik eleman bulunmadığı için anahtarlama süresi daha kısadır. Elektromekanik rölelere kıyasla hafif ve bakımı daha kolaydır. Tüm elemanları elektronik elemanlardan oluştuğu için istenilen koruma fonksiyonunu elektronik devrelerle oluşturmak mümkündür. Böylelikle her koruma fonksiyonu için ayrı ayrı koruma rölesi kullanmaya gerek kalmamaktadır.

3.1.3. Sayısal Koruma Röleleri

Sayısal koruma rölelerini eski nesil koruma rölelerinden ayıran en önemli faktör mikroişlemci teknolojisinin kullanılmasıdır. Elektronik devrelerden ziyade kendi hafızası bulunan mikroişlemci teknolojisi ile birlikte geliştirilen sayısal koruma röleleri birçok koruma fonksiyonunu kendi bünyesinde bulundurmaktadır. Çalışma prensibi olarak gelen analog veriyi sayısal veriye dönüştürmekte, dönüştürdüğü sayısal veriyi ise programlandığı şekilde işleyip komutlar üretmektedir. Sayısal koruma rölelerinin birçok avantajı vardır. Bu avantajlardan bazıları aşağıda sıralanmaktadır:

- İçerisinde barındırdıkları haberleşme kanalları sayesinde diğer sayısal koruma röleleri, scada sistemleri gibi birçok farklı teçhizat ile haberleşebilmekte ve veri alışverişi yapabilmektedir,
- İhtiyaç edinilen koruma fonksiyonlarına ayrı ayrı elektromekanik koruma rölesi kullanmak yerine tek bir sayısal koruma rölesi içerisinde erişim sağlanabilmektedir,
- Diğer koruma rölesi türlerinden farklı olarak sayısal koruma röleleri veriyi mikroişlemci teknolojisi vasıtasıyla çok hızlı bir şekilde işlerken buna göre komut verme hızı oldukça yüksektir,
- Birçok koruma fonksiyonu tek bir sayısal koruma rölesi bünyesinde bulunduğundan buna bağlı kapladığı alan miktarı düşüktür,
- Sayısal koruma rölelerinin haberleşme teknolojileri sayesinde, kullanıcı bilgisayar ile bağlanarak birçok fonksiyona kısa sürede müdahale edebilmekte, oluşan arızaları arıza kaydı sayesinde yorumlayabilmektedir,
- Üzerinde bulunan ekranlar sayesinde anlık birçok bilgiyi kullanıcıya sunabilmektedir.

3.2. Fonksiyonlarına Göre Koruma Röleleri

Kullanılan fonksiyonlarına göre koruma röleleri farklılıklar göstermektedir. Örneğin 154 ve 380 kV iletim hatlarında mesafe koruma rölesi kullanılırken bir transformatör koruması için diferansiyel röle kullanılmaktadır. Buradaki farklılık hangi teçhizatı koruduğumuzla yakından ilgilidir. Zamanla korunan teçhizata göre farklı koruma fonksiyonları ihtiyaçları ortaya çıkmıştır. Sahada genel anlamda aşağıdaki koruma röleleri kullanılmaktadır:

- Aşırı akım koruma rölesi,
- Diferansiyel koruma rölesi,
- Bara koruma rölesi,
- Aşırı gerilim koruma rölesi,
- Toprak koruma rölesi,
- Aşırı yük koruma rölesi,
- Yönlü aşırı akım koruma rölesi,
- Yönlü toprak koruma rölesi,
- Düşük frekans koruma rölesi,
- Kesici arıza koruma rölesi,
- Nötr direnç koruma rölesi,
- Mesafe koruma rölesi.

Yukarıda maddeler halinde sıralanan koruma rölelerinden bazıları bu çalışma kapsamında anlatılmaktadır.

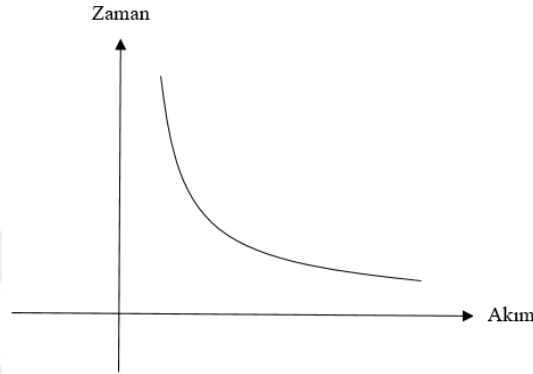
3.2.1. Aşırı Akım Koruma Rölesi

Elektrik sisteminde meydana gelen bir arızadan dolayı oluşan arıza akımını temizlemek için aşırı akım röleleri kullanılmaktadır. Hem faz-faz hem de faz-toprak arızalarında çalışabilmektedir. Korunan bölgenin bağlı olduğu akım transformatörlerinden alınan akım bilgisi aşırı akım koruma rölesine sekonder kablay olarak getirilmekte ve önceden belirlenerek röleye girilen akım miktarının üzerine çıktığında ise kesiciye açma komutu göndermektedir. İletim hatlarında kullanıldığı gibi; transformatörlerdeki nötr direnç koruması, toprak korumaları da bu röle vasıtasıyla yapılmaktadır.

Akım kademesi olarak birden fazla açma eşiğine ayarlanabilmektedir. $I>$, $I>>$, $I>>>$ sembolleri aşırı akım koruma rölesinin birinci, ikinci ve üçüncü kademelerini ifade etmektedir. Bu kademelerden genellikle 1. kademe açma eşik değeri hattın akım taşıma kapasitesi ile akım transformatörü oranı da dikkate alınarak ayarlanır. Aşırı akım rölesinin 1. kademe ayarı korunan hat için kullanılan tüm teçhizatın minimum akım taşıma kapasitesinden yüksek olmalıdır. 2. kademe ve 3. kademe açma eşik değerleri ani açma diye nitelendirilen açma sınıfına girmektedir. Bu kademeler ise ihtiyaca göre kısa devre

hesabı yapılarak kullanılır.

Aşırı akım röleleri açma gecikmesi bakımından da iki türlü üretilmektedir. Bunlardan ilki sabit zamanlı açma gecikmesinde; belirlenen sabit bir zaman gecikmesi kadar sonra, ayarlanan eşik değerin üzerinde bir akım aktığında aşırı akım rölesi kesiciye açma komutu göndermektedir. Bir diğer açma gecikmesi türü ise ters zamanlı açma gecikmesidir. Şekil 3.1’ de prensip karakteristik eğrisi verilmektedir.

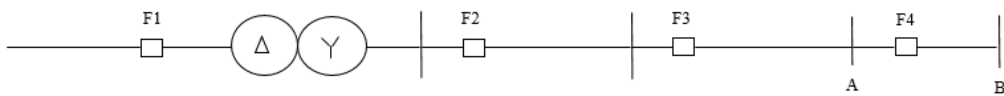


Şekil 3.1. Ters zaman karakteristik eğrisi

Ters zamanlı açma gecikmesinde arıza akımının miktarına göre açma süresi kısaltılmaktadır. Sahada kullanılan aşırı akım koruma rölelerinde birbirinden farklı birçok ters zamanlı açma eğrisi bulunmaktadır. Denklem 3.1’ de t_s ters zaman eğrili açma süresi, T_a zaman çarpanı, I_F açma anındaki arıza akımı, I_s aşırı akım rölesinin ayarlandığı sekonder açma eşik değeri ve a, b ve c ise seçilen ters zaman eğri türüne göre değişen sabitler olmak üzere tüm bu eğriler için sahada kullanılan ortak formül verilmektedir;

$$t_s = T_a \left(\frac{a}{\left(\frac{I_F}{I_s} \right)^b - 1} \right) + c \quad (3.1)$$

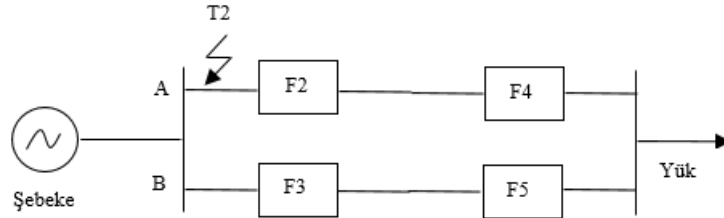
Aşırı akım koruma röleleri sistemde kullanılırken akım – zaman koordinasyonu yapılması gerekmektedir. Şekil 3.2’ de örnek bir iletim sisteminde aşırı akım rölelerinin konumları gösterilmiştir. Şekil 3.2’de transformatörü ve bir baradan diğer bara arasını korumak üzere yerleştirilen aşırı akım koruma röleleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Örnek aşırı akım koordinasyonu

Şekil 3.2’deki gibi bir iletim sisteminde baraların arasında kalan aşırı akım koruma röleleri hangi baralar arasında kalıyorsa öncelikle o bölgeyi koruması üzerine koordinasyon yapılmaktadır. Örneğin A ve B baraları arasında oluşacak bir arızada öncelikle F4 aşırı akım koruma rölesinin çalışması beklenir. Böylece sadece A ve B baraları arasında enerji kesintisi meydana gelecek ve diğer bölgeler bu arızadan etkilenmeyecektir. A ve B baraları arasındaki aşırı akım koruma rölesinin herhangi bir nedenden ötürü çalışmaması halinde diğer koruma röleleri artçı nitelikte olup bu durum gerçekleşirse çalışacak ve arızayı sönmüleyecektir. Bunu sağlayabilmek için zaman koordinasyonunu çok iyi yapmak gerekmektedir. Genellikle bir biri ardına sıralanmış aşırı akım koruma röleleri en ideal koordinasyonu sağlayabilmek için aynı üretici firmadan tedarik edilebilirler.

Bazı elektrik iletim sistemlerinde sadece yönsüz aşırı akım koruma rölesi kullanmak ideal koruma koordinasyonu oluşturulmasında yeterli gelmemektedir. Bu yüzden aşırı akım koruma rölelerinde yön kavramı önemli bir yer tutmaktadır. Yön fonksiyonu kullanılan aşırı akım koruma rölelerine gerilim transformatörlerinden gerilim bilgisi getirilmesi gerekmektedir. Gelen gerilim bilgisine göre akım yönünü tayin edebilmektedir. Şekil 3.3’de aynı kaynaktan beslenen paralel bir iletim hattı örneği verilmektedir.

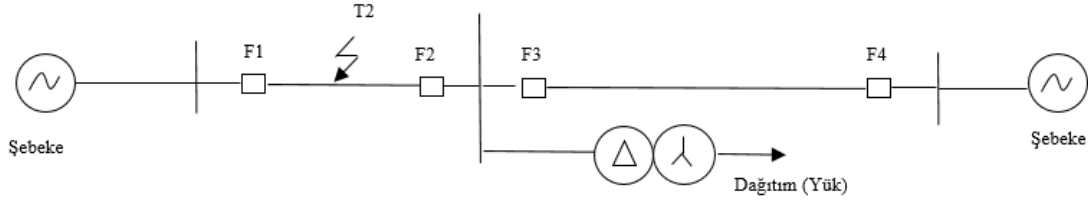


Şekil 3.3. Paralel iletim hattında yönlü koruma

Şekil 3.3’de verilen paralel iletim hattında; tüm kullanılan aşırı akım koruma röleleri yönsüz olarak kullanılsaydı A isimli fiderde gösterilen arıza noktasında meydana gelecek bir kısa devre arızasında, arıza B isimli fiderden de besleneceği için hem F2 hem F3 aşırı akım koruma röleleri arıza akımını görerek kesicileri açmaya götürecektir. Oysaki A ve B fiderlerinde bulunan F2 ve F3 röleleri yönlü aşırı akım olarak kullanıldığı zaman A fiderinde T2 noktasında oluşacak arıza akımını A fiderindeki F2 rölesi kendi yönünde görerek kesiciye açma komutu gönderecek ancak B fiderinde F3 rölesi arızayı geri yönde

görerek kesiciye herhangi bir açma komutu göndermeyecektir. Sonuç olarak bu arızadan B fideri etkilenmemiş olacaktır.

Bu şekilde yön fonksiyonunu kullanma ihtiyacı aynı zamanda elektrik iletim sisteminin iki tarafından da besleme olması durumunda da gerekmektedir. Şekil 3.4’de iki taraftan da beslenen bir elektrik iletim sistemi verilmektedir.



Şekil 3.4. İki taraftan beslenen iletim hattında yönlü koruma şeması

Şekil 3.4’ de verilen iki taraftan da beslenen iletim hattında; tüm kullanılan aşırı akım koruma röleleri yönsüz olarak kullanılsaydı gösterilen noktada oluşacak bir arıza durumunda F1, F2 ve F3 isimli aşırı akım koruma röleleri arıza akımını görerek kesicilerine açma komutu gönderecek ve dağıtım yük isimli fider iki taraftan da beslenemeyerek enerjisiz kalacaktır. Oysa ki F2 ve F3 isimli aşırı akım koruma rölelerinde, korudukları baraya doğru olacak şekilde bir yön fonksiyonu kullanıldığı zaman F2 aşırı akım koruma rölesi T2 noktasında oluşan arızayı kendi yönünde görerek kesiciye açma komutu gönderecek arızayı temizleyecek, F3 aşırı akım koruma rölesi ise T2 noktasında oluşan arızayı geri yönünde gördüğü için herhangi bir açma komutu göndermeyecektir. Dolayısıyla dağıtım fideri diğer taraftan beslenmeye devam ederek bu arızadan etkilenmemiş olacaktır.

Aşağıda Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan aşırı akım koruma rölelerinin kademe eşik değerlerinin bir kısmı TEİAŞ koruma sistemleri felsefesine göre verilmektedir:

- 400 kV yönlü toprak aşırı akım koruma rölesi için; $I >$ değeri 300-320 A, açma zamanı ise ters zaman eğrisi türlerinden IEC standart inverse 0,3 eğrisidir. Transpozisyon olmayan iletim hatlarında % 5’e kadar dengesizlik akımı bulunabilmektedir. O yüzden toprak akımı eşik değeri % 5’den yüksek ayarlanmaktadır. Yük akışına göre ardışık bir şekilde tesis edilmiş transformatör

merkezleri arasındaki yönlü toprak koordinasyonunda seçiciliğin sağlanabilmesi için ters zaman eğrisi kademeli olarak farklı değerlere ayarlanabilmektedir.

- 400 ve 154 kV kablo fiderinde bulunan aşırı akım koruma rölesi için; $I >$ değeri kablonun akım taşıma kapasitesine göre ayarlanmaktadır. İlk kademe değeri olan $I >$ kablonun akım taşıma kapasitesinin 0,9 – 1 katları arasına ayarlanmakta alarm zamanı ise sabit zamanlı 10 saniye olarak belirlenmektedir. $I >>$ değeri kablonun akım taşıma kapasitesinin 3 katına ayarlanmakta açma zamanı ise sabit zamanlı olacak şekilde 1 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 / 154 kV ototransformatörlerin 380 kV tarafında bulunan aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$ transformatörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 1,5 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,3 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise 250 MVA transformatörler için 4000 A, 150 MVA transformatörler için 2400 A olacak şekilde ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,6 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 / 154 kV ototransformatörlerin 380 kV tarafında bulunan yönlü toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 250 MVA transformatörler için 100 A, 150 MVA transformatörler için 60 A olacak şekilde ayarlanmaktadır. İlk kademe açma zamanı ise IEC standart inverse 0,35 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise 250 MVA transformatörler için 5000 A, 150 MVA transformatörler için 3000 A olacak şekilde ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,25 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 / 154 kV ototransformatörlerin 154 kV tarafında bulunan yönlü toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 250 MVA transformatörler için 240 A, 150 MVA transformatörler için 150 A olacak şekilde ayarlanmaktadır. İlk kademe açma zamanı ise IEC standart inverse 0,4 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise 250 MVA transformatörler için 12000 A, 150 MVA transformatörler için 7200 A olacak şekilde ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,25 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 / 154 kV ototransformatörlerin nötr – toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 250 MVA transformatörler için 240 A, 150 MVA transformatörler için 150 A olacak şekilde ayarlanmaktadır. İlk kademe açma zamanı ise IEC standart inverse 0,5 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise 250 MVA

transformatörler için 12000 A, 150 MVA transformatörler için 7200 A olacak şekilde ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,35 saniye olarak belirlenmektedir.

- 380 / 33 kV güç transformatörlerinin 380 kV tarafında bulunan aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$ transformatörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 1,1 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,5 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$, Denklem (3.1)' de verilmekte, açma zamanı ise 0,6 saniyeden küçük seçilmelidir. Üçüncü kademe değeri $I >>>$ ise Denklem (3.2)' de verilmekte, üçüncü kademenin açma zamanı sabit zamanlı 0,1 saniye belirlenmektedir;

$$I >> = \left(\frac{I_{N_{Trafo}}}{\%U_k} \right) (0,9) \quad (3.2)$$

$$I >>> = \left(\frac{I_{N_{Trafo}}}{\%U_k} \right) (1,25) \quad (3.3)$$

- 380 / 33 kV güç transformatörlerinin 33 kV tarafında bulunan aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$ transformatörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 1,1 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,4 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$, Denklem (3.3)' de verilmekte, açma zamanı ise 0,45 saniyeden küçük seçilmemek üzere kullanıcı dağıtım firması ile görüşülerek seçilmektedir;

$$I >> = \left(\frac{I_{N_{Trafo}}}{\%U_k} \right) (0,9) \quad (3.4)$$

- 380 / 33 kV güç transformatörlerinin 33 kV tarafında bulunan toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 120 ile 300 A arasına ayarlanmakta, bu kademenin açma zamanı ise sabit zamanlı 2,6 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 / 33 kV güç transformatörlerinde bulunan topraklama transformatörlerindeki aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, topraklama transformatörünün anma gücündeki çektiği akım miktarının 0,9 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise sabit zamanlı 3 saniyedir. İkinci kademe değeri $I >>$, topraklama transformatörünün anma gücündeki çektiği akım miktarının 5 katına ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı ise sabit zamanlı 0,150 saniye olarak belirlenmektedir.

- 380 / 33 kV güç transformatörlerinde bulunan topraklama transformatörlerindeki toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 30 ile 60 A arasında ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise sabit zamanlı 10 saniyedir. İkinci kademe değeri $I >>$, 120 ile 300 A arasında ayarlanmaktadır. İkinci kademenin açma zamanı ise sabit zamanlı 3 saniyedir. Üçüncü kademe değeri $I >>>$, 960 A olacak şekilde ayarlanmakta, açma zamanı ise 0,150 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 kV reaktör fideri aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$ reaktörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 1,1 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,2 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise reaktörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 5 katına ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,2 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 kV reaktör fideri toprak aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$ reaktörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 0,25 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,2 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise reaktörün nominal yükteki çektiği akım miktarının 3,5 katına ayarlanmakta, ikinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı olarak 0,2 saniye olarak belirlenmektedir.
- 380 kV kuplaj fideri aşırı akım koruma rölesi için; 380 kV kuplaj fiderinde aşırı akım koruma rölesi ile kesiciye açma komutu gönderilmemekte, sadece alarm sinyali oluşturulmaktadır. İlk kademe değeri $I >$ kuplaj fiderinde kullanılan akım transformatörünün 1 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin alarm zamanı ise IEC standart inverse 0,5 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise kuplaj fiderinde kullanılan akım transformatörünün 8 katına ayarlanmakta, ikinci kademenin alarm zamanı sabit zamanlı olarak 0,3 saniye olarak belirlenmektedir.
- 154 kV kuplaj fideri aşırı akım koruma rölesi için; 154 kV kuplaj fiderinde aşırı akım koruma rölesi ile kesiciye açma komutu gönderilmemekte, sadece alarm sinyali oluşturulmaktadır. İlk kademe değeri $I >$, kuplaj fiderinde kullanılan akım transformatörünün 1,2 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin alarm zamanı ise IEC standart inverse 0,6 eğrisidir. İkinci kademe değeri $I >>$ ise kuplaj fiderinde kullanılan akım transformatörünün 10 katına ayarlanmakta, ikinci kademenin alarm zamanı sabit zamanlı olarak 0,3 saniye olarak belirlenmektedir.

- 154 kV hat fideri aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, değeri, hattın ve hatta kullanılan akım transformatörünün akım taşıma kapasitelerine göre ayarlanmaktadır. İlk kademe değeri olan $I >$, hattın akım taşıma kapasitesinin 1 katına ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,5 eğrisidir. $I >>$ ve $I >>>$ değerleri ihtiyaca göre kısa devre hesabı yapılarak kullanılmaktadır.
- Orta gerilim çıkış fideri aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, hatta kullanılan akım transformatörünün akım taşıma kapasitesine göre ayarlanmaktadır. İlk kademe değeri olan $I >$, hatta kullanılan akım transformatörünün 1 katına olacak şekilde ayarlanmaktadır. İlk kademenin açma zamanı ise IEC standart inverse 0,3 eğrisidir. $I >>$ ve $I >>>$ değerleri kullanıcı dağıtım firmasının sırasıyla ikinci ve üçüncü kabinlerindeki kısa devre akım değerine göre ayarlanmaktadır. Hem ikinci hem üçüncü kademe değerleri sırasıyla ikinci ve üçüncü dağıtım kabinlerindeki kısa devre akım değerlerinin 1,1 katına ayarlanmaktadır. İkinci kademenin açma zamanı sabit zamanlı 0,3 saniye, üçüncü kademenin açma zamanı sabit zamanlı 0,15 saniye olarak belirlenmektedir.
- Nötr direnç aşırı akım koruma rölesi için; ilk kademe değeri $I >$, 20 A olacak şekilde ayarlanmakta alarm zamanı ise sabit zamanlı 10 saniyedir. İkinci kademe değeri $I >$, 120 ile 300 A arasında ayarlanmakta, açma zamanı ise sabit zamanlı 3 saniyedir. Üçüncü kademe değeri $I >>>$ ise nötr direnç anma akımının 1,6 katına ayarlanmakta, açma zamanı sabit 0,150 saniye olarak belirlenmektedir.

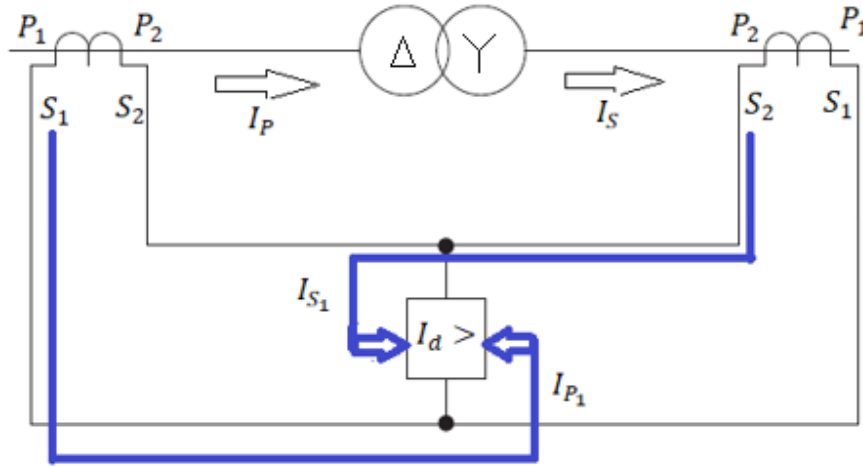
3.2.2. Diferansiyel Koruma Rölesi

Elektrik iletim sisteminde çok çeşitli arızalar meydana gelmektedir. Arıza öncesinden bu arızaların karakteristiğini kestirmek bazen çok zor olmaktadır. Bazı gerçekleşen arıza karakteristiklerine göre aşırı akım koruma rölesinin ve mesafe koruma rölesinin açma zamanı gerekenden fazla gecikebilmektedir. Bu tip durumların önüne geçebilmek için havai iletim hatlarında, yer altı kablolarında ve güç transformatörlerinde diferansiyel koruma röleleri kullanılmaktadır.

Temel çalışma prensibi herhangi bir noktaya giren ve çıkan akımların vektörel olarak toplamı sıfır olması gerekliliğinden gelmektedir. Korunan teçhizat olarak havai iletim hattı veya yer altı kablosu ele alınırsa; hattın başına ve sonuna yerleştirilen akım

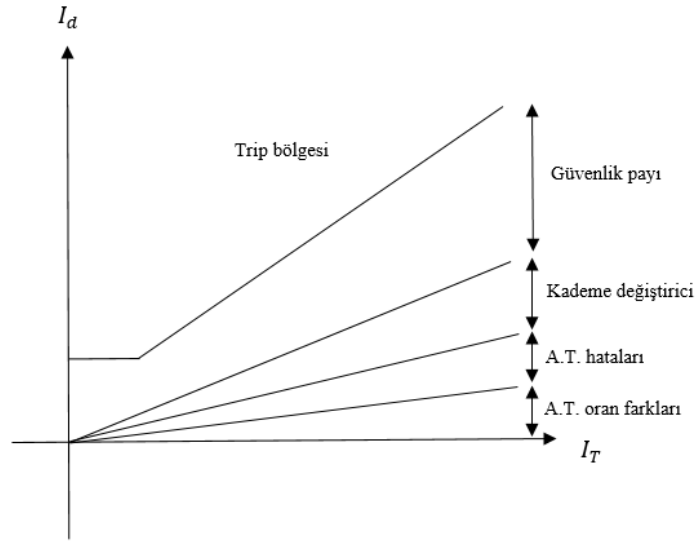
transformatörü vasıtasıyla her an, baştaki ve sondaki akım değerleri diferansiyel koruma rölesine getirilmektedir. Diferansiyel koruma rölesi bu iki akım bilgisini birbirinden vektörel olarak çıkartır. Eğer önceden ayarlanan fark akım eşik açma değerinden yüksek ise kesiciye açma komutu göndermektedir. Bu noktada baştaki ve sondaki akımların arasında 180° olduğu (güç transformatörü bağlantı grubundan dolayı) ve bu çıkarma işleminin vektörel olarak gerçekleştiği unutulmamalıdır.

Bir güç transformatöründe diferansiyel koruma yaparken güç transformatörünün primer ve sekonder sargılarına birer adet akım transformatörü yerleştirilir. Yerleştirilen akım transformatörlerinden 3 faz primer sargılardan 3 faz da sekonder sargılardan diferansiyel koruma rölesine taşınır. Şekil 3.5’de güç transformatörlerinde kullanılan diferansiyel koruma rölesinin çalışma mantığına ait blok diyagram verilmektedir.



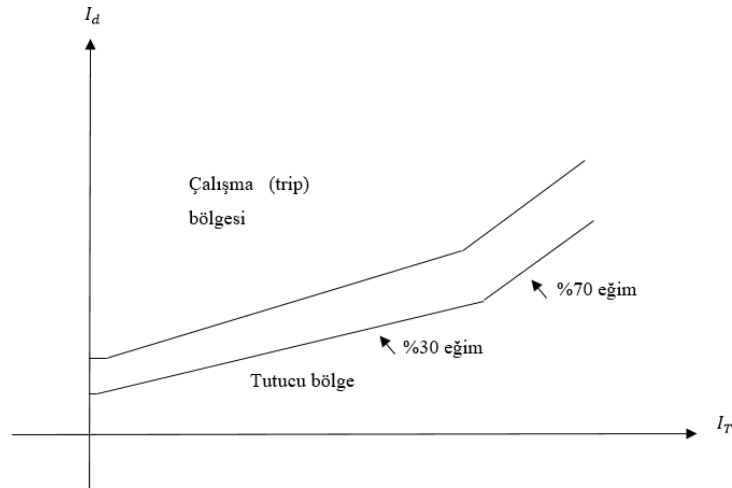
Şekil 3.5. Diferansiyel koruma rölesi çalışma prensibi diyagramı

Şekil 3.5’de ifade edilen P_1 ve P_2 akım transformatörlerinin primer sargı uçları, S_1 ve S_2 akım transformatörlerinin sekonder sargı uçları, I_p güç transformatörünün primer sargılarından akan akım, I_s güç transformatörünün sekonder sargılarından akan akım, I_{s1} ve I_{p1} güç transformatörünün iki tarafında bulunan akım transformatörlerinin diferansiyel koruma rölesine gelen sekonder akımları ve I_d diferansiyel fark akımı olmak üzere; teoride diferansiyel koruma rölesine gelen I_{s1} ve I_{p1} sekonder akımları birbirine skaler olarak eşit ve yönleri ters olduğu (güç transformatörü bağlantı grubundan dolayı) bilinmektedir. Dolayısıyla bu durumda diferansiyel koruma rölesinin açma bobininden geçen akım değeri sıfır olmakta ve diferansiyel koruma rölesi çalışmamaktadır.



Şekil 3.6. Diferansiyel koruma rölesi çalışma prensibi eğrisi

Ancak Şekil 3.6’da görüleceği üzere; gerek kayıplardan gerek akım transformatörü hatalarından kaynaklı I_{S_1} ve I_{P_1} akımları hiçbir zaman eşit olamayacaktır. Koruma sınıfında kullanılan bir akım transformatörünün % 10 gibi bir hata oranı olduğu düşünüldüğünde diferansiyel koruma rölesinin açma ayarını doğrudan I_{S_1} ve I_{P_1} akımlarının vektörel olarak toplamına bağlamamak gerekmektedir. Dolayısıyla bu tip nedenlerden dolayı yanlış açmalara neden olmaktadır. Bu durum Şekil 3.7’de verilen eğri ile de ifade edilmektedir.



Şekil 3.7. Diferansiyel koruma rölesi karakteristik tutuculuk eğrisi

Bunu önlemek için diferansiyel koruma rölesinin I_{S_1} ve I_{P_1} akımlarının vektörel olarak toplamı ile skaler olarak toplamından elde edilen tutucu akımını kıyaslayarak diferansiyel

Sistemde bulunan doğru akım kaynakları ve lineer olmayan teçhizatlar, sürekli korunması gereken sinüs dalga şeklini bozmaktadır. Bazen ana sinüs frekansının yanında farklı büyüklüklerde sinüs dalgaları da üretmektedir. Sistem frekansında oluşan bu dengesiz sinüs dalga şekillerine harmonik denilmektedir. Güç transformatörleri enerjisiz halden enerjili hale geçerken ilk başta ani bir akım çekerler. Bu akıma sahada genel olarak demeraj akımı denilmektedir. Güç transformatörü ilk kalkınırken oluşan bu demeraj akımları sürekli korunması gereken sinüs dalga şeklini bozabilmektedir. Bozulan dalga şekli neticesinde transformatör üzerinde harmonikler oluşmaktadır. Transformatör ilk defa enerjilenmesi esnasında sadece enerjili tarafta bu durum oluşacağı için diferansiyel koruma rölesi bu demeraj akımını bir fark akımı olarak algılayabilmekte ayrıca elektrik iletim sistemi üzerinde meydana gelen güç kayıplarını da arttırabilmektedir. Bu gibi nedenlerden dolayı transformatör üzerinde harmonikler oluştuğunda, transformatörü koruyan diferansiyel koruma rölesi içerisinde harmonik blokaj sinyali üreten fonksiyonlar bulunmaktadır. Bu blokaj sinyalleri sayesinde diferansiyel koruma rölesinin hatalı açmaları engellenmektedir.

Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan diferansiyel koruma rölelerinin kademe eşik değerlerinin bir kısmı aşağıdaki gibidir.

400 ve 154 kV kablo fiderinde kullanılan diferansiyel koruma rölesi için eşik değerler Tablo 3.1.'de verilmektedir.

Tablo 3.1. 400 ve 154 kV kablo fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları

	Kademe Değeri	Tutucu Akım Türü	Eğim
$I_d >$	0,2 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%15 – %25
$I_d >$	0,2 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%30 – %50
$I_d >>$	8 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%35 – %50
$I_d >>$	8 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%60 – %90

Tablo 3.1.'de dikkat edilmesi gereken diferansiyel koruma rölelerinin markalara göre

tutucu akım türünü hesaplaması değişkenlik gösterebilmektedir. Bu yüzden iki hesaplama türüne de ait eğim değerlerine yer verilmiştir.

380 / 154 kV otoransformatör fiderinde kullanılan diferansiyel koruma rölesi için eşik değerler Tablo 3.2’ de verilmektedir.

Tablo 3.2. 380 / 154 kV ototransformatör fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları

	Kademe Değeri	Tutucu Akım Türü	Eğim
$I_d >$	0,3 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%15 – %25
$I_d >$	0,3 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%30 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%35 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%60 – %90

380 / 33 kV güç transformatörü fiderinde kullanılan diferansiyel koruma rölesi için eşik değerler Tablo 3.3’ de verilmektedir.

Tablo 3.3. 380 / 33 kV güç transformatörü fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları

	Kademe Değeri	Tutucu Akım Türü	Eğim
$I_d >$	0,2 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%15 – %25
$I_d >$	0,2 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%30 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%35 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%60 – %90

154 / 33 kV güç transformatörü fiderinde kullanılan diferansiyel koruma rölesi için eşik değerler Tablo 3.4.’ de verilmektedir.

Tablo 3.4. 380 / 33 kV güç transformatörü fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları

	Kademe Değeri	Tutucu Akım Türü	Eğim
$I_d >$	0,2 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%15 – %25
$I_d >$	0,2 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%30 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%35 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%60 – %90

Elektrik iletim hatlarında reaktif güç dengesinin sağlanması için reaktörler kullanılmaktadır. Sistemin yük durumuna göre artan veya azalan reaktif güç sistemde sabit tutulmak istenen sistem gerilimini doğrudan etkilemektedir. Örneğin tüketilen reaktif gücün üretilenden az olması durumunda sistem gerilimi bir yükselme meydana gelmektedir. Bu şekilde değişebilen reaktif gücü dengeleyebilmek adına elektrik iletim sisteminde reaktörler kullanılmaktadır. Bu reaktörler elektrik iletim hatlarına bir kesici ile bağlanmakta ve istenildiğinde devreye alınıp devre dışı bırakılmaktadır. Bu maksatla kullanılan reaktörlerde de diferansiyel koruma rölesi kullanılmaktadır.

380 kV reaktör fiderinde kullanılan diferansiyel koruma rölesi için eşik değerler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5. 380 kV reaktör fideri diferansiyel koruma rölesi ayarları

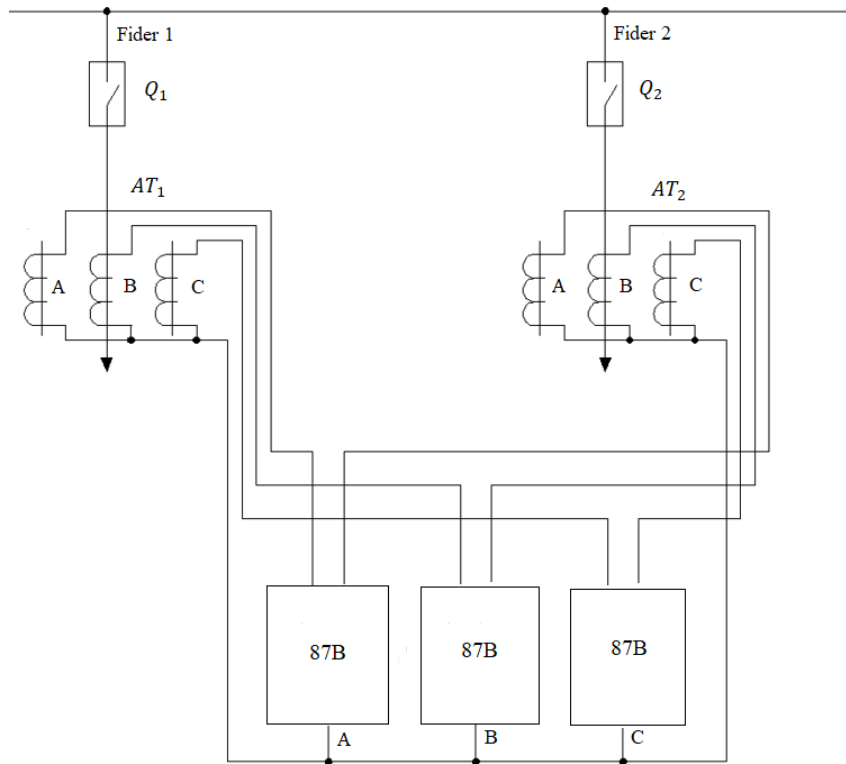
	Kademe Değeri	Tutucu Akım Türü	Eğim
$I_d >$	0,3 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%15 – %25
$I_d >$	0,3 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%30 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$I_{S_1} + I_{P_1}$	%35 – %50
$I_d >>$	6 – 8 pu	$\frac{I_{S_1} + I_{P_1}}{2}$	%60 – %90

3.2.3. Bara Koruma Rölesi

Transformatör merkezlerinde bulunan baralar, tüm fiderlerin birleşim noktasıdır. Bu durum baralarda meydana gelebilecek arızalardaki arıza akımlarının çok yüksek olmasını da beraberinde getirmektedir. Olası bir bara arızasında transformatör merkezinde ciddi hasarlar ve yangınlar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden barayı koruyabilmek için sistemde kullanılan diğer koruma rölelerinin çalışmama ihtimaline karşı bara koruma röleleri kullanılmaktadır.

Bara koruma rölelerinin çalışma prensibi diferansiyel koruma röleleri ile aynıdır. Belli bir noktaya giren akımlarla çıkan akımların vektörel toplamının sıfır olması kuralına dayanır. Fakat buradaki akım bilgileri baraya bağlı olan farklı fiderlerin akım transformatörlerinden gelmektedir. Arızasız bir transformatör merkezinde baraya giren akımlarla çıkan akımların vektörel toplamının sıfır olması gerekmektedir.

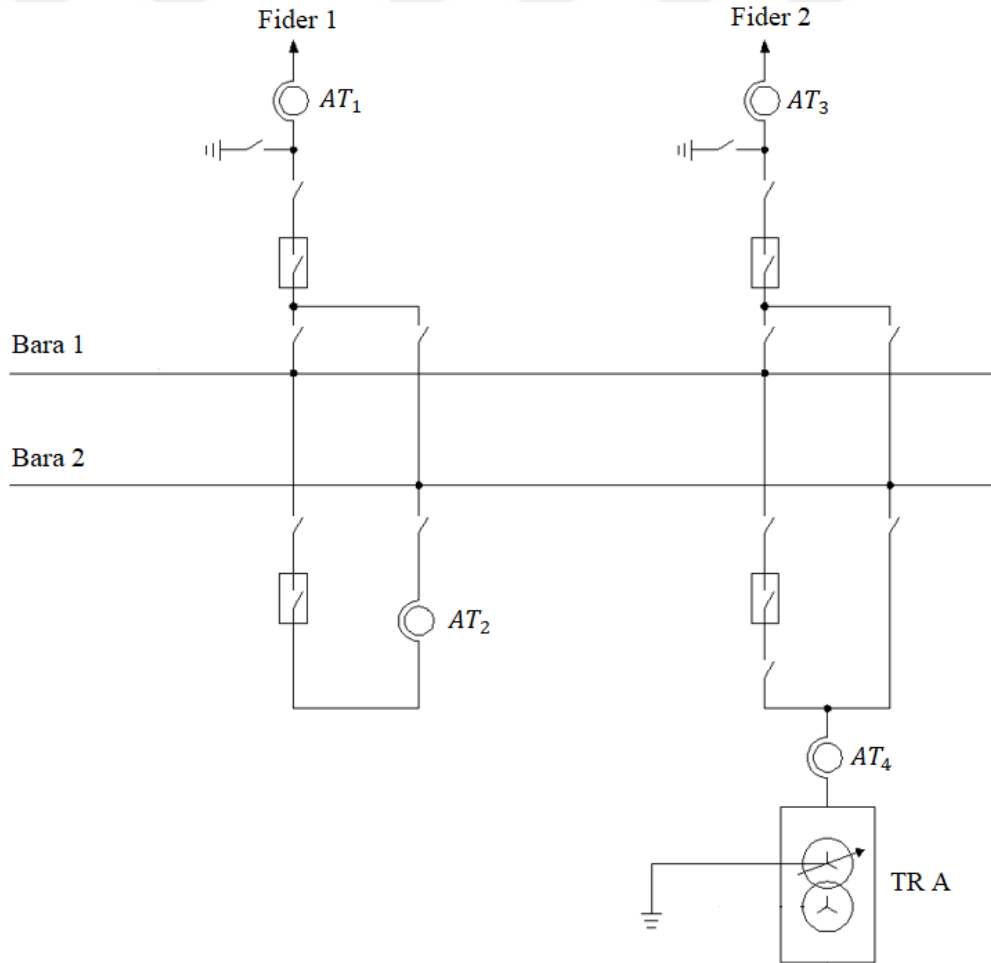
Şekil 3.9.'da Q_1 fider 1 kesicisi, Q_2 fider 2 kesicisi, 87B, bara koruma rölesinin uluslararası kodu, AT_1 ve AT_2 sırasıyla fiderlerin akım transformatörleri olmak üzere bara koruma rölesinin temel çalışma prensibi verilmektedir.



Şekil 3.9. Bara koruma rölesi temel çalışma prensip şeması

Her fazın kendine ait bir bara koruma rölesi bulunmaktadır. Baraya bağlı olan fiderlerin A faz akım bilgisi A faza ait bara koruma rölesine, B faz akım bilgisi B faza ait bara koruma rölesine, C faz akım bilgisi ise C faza ait bara koruma rölesine getirilmektedir. Bu şekilde tasarlanan bir sistemde bara koruma rölelerine tüm bilgiler getirilmediği için bara koruma röleleri arasında haberleşme tertibatı bulunmaktadır. IEC 61850 haberleşme protokolü ile fiber optik kablolar vasıtasıyla bara koruma röleleri kendi aralarında haberleşebilmektedir.

Transformatör merkezlerindeki bara yapısının tertibatına göre bara koruma rölesinin koruma mantığı değişkenlik göstermektedir. AT_1 , AT_2 , AT_3 , AT_4 akım transformatörleri ve TR A güç transformatörü olmak üzere Şekil 3.10.'da iki baralı bir sistem verilmektedir.



Şekil 3.10. Çift baralı sistem yapısı

Şekil 3.10.'da verilen sistem yapısında bara koruma düzeni iki bölgeden oluşmaktadır. 1. baraya bağlı olan fiderler için bir koruma bölgesi, 2. baraya bağlı olan fiderler için ayrı

bir koruma bölgesi bulunmaktadır. Herhangi bir fiderin bir koruma bölgesine dahil edilebilmesi için o koruma bölgesine ait bara ayırıcısının kapalı olması gerekmektedir. Şekil 3.10.'daki gibi kuplaj kullanılan yerlerde bu iki koruma bölgesi kuplaj ayırıcısı ve kesicisinin kapatılması ile birleştirilebilir. Bu tür yapılarda kuplaj kesicisi açık iken birinci baraya bağlı olan fiderlerin birinde bir arıza meydana gelmesi durumunda bara koruma rölesi sadece birinci baraya bağlı olan fiderlerin kesicileri için çalışacaktır, ikinci bara enerjili kalarak kendisine bağlı olan fiderlerin enerjili kalmasını sağlayacaktır. Benzer durum ikinci barada meydana geldiğinde birinci baradaki fiderler enerjili kalacaktır. Bara koruma rölesi, kuplaj fiderinin akım transformatöründen akan akımın yönüne bakarak arızanın hangi barada olduğuna karar vermektedir. Bara koruma rölesi; eğer kuplaj kesicisi kapalı ise hangi baradaki fiderde arıza meydana gelirse gelsin o baradaki fiderlerin kesicileri ile birlikte kuplaj kesicisine de açma komutu göndermektedir. Bu sayede yine baralardan biri enerjili kalarak bağlı olan fiderleri besleyebilmektedir.

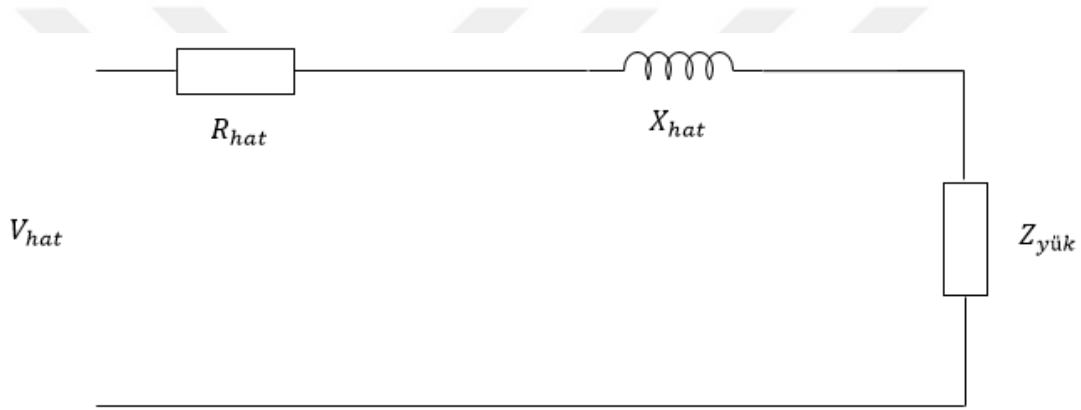
Bara koruma rölesi, diferansiyel fark akım durumunu gözetken fonksiyon dışında kesici arıza koruma fonksiyonunu da kendinde barındırmaktadır. Baraya bağlı bulunan fiderlerden birinde arıza meydana gelmesi durumunda herhangi bir nedenden ötürü fiderdeki koruma röleleri o fiderin kesicisini açtıramayabilir. Bu durumda bara koruma rölesinde bulunan kesici arıza koruma fonksiyonu devreye girmektedir. Arıza meydana gelen fiderden bara koruma rölesine başlatma sinyali geldikten belli bir süre sonra arıza meydana gelen fiderin kesicisi açmazsa bara koruma rölesi o fiderin kesicisine tekrar açma komutu gönderir. Halen arıza akımı akmaya devam ediyorsa kesici arıza koruma fonksiyonu baraya bağlı bulunan tüm fiderlerin kesicisine açma komutu göndermektedir. Bu sayede, barada oluşan fark akım hatalarında çalışmanın yanında fiderlerde kullanılan diğer koruma rölelerinin de yedek korumasını sağlamaktadır.

Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan bara koruma röleleri eşik değeri, 0,2 ile 1 pu %60 eğrisine ayarlanmakta açma süresi ise 0 saniye olarak belirlenmektedir. Kesici arıza koruma fonksiyonu birinci kademesi 120 ms, ikinci kademesi ise 240 ms zaman gecikmesine ayarlanmaktadır.

3.2.4. Mesafe Koruma Rölesi

Mesafe koruma rölesi kullanımı oldukça yaygın koruma röleleri içerisinde. Gerek diferansiyel koruma rölesindeki haberleşme maliyetleri gerekse aşırı akım koruma rölelerinin arıza üzerinde yeteri kadar hassas ve seçicilikte olamamasından dolayı özellikle havai iletim hatlarında mesafe koruma rölesi kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Her iletim hattının bir empedansı ve eşdeğer devresi bulunmaktadır. Şekil 3.11.'de V_{hat} hat gerilimi, R_{hat} hattın rezistif empedansı, X_{hat} hattın endüktif empedansı ve $Z_{yük}$ yük empedansı olmak üzere admitansı ihmal edilen bir iletim hattının eşdeğer devresi görülmektedir.

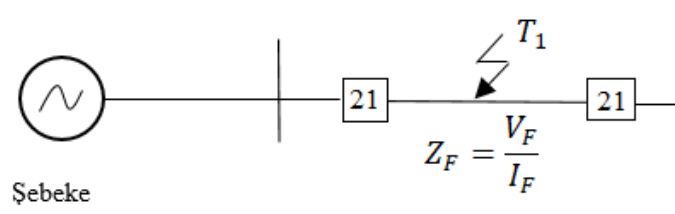


Şekil 3.11. İletim hattı eşdeğer devresi

Her iletim hattının empedansı önceden hesaplanabilir. Bu empedans hesabı; kullanılan iletkenin karakteristik özellikleri, hattın geometrisi, direk tipi gibi birçok parametre gözetilerek yapılmalıdır.

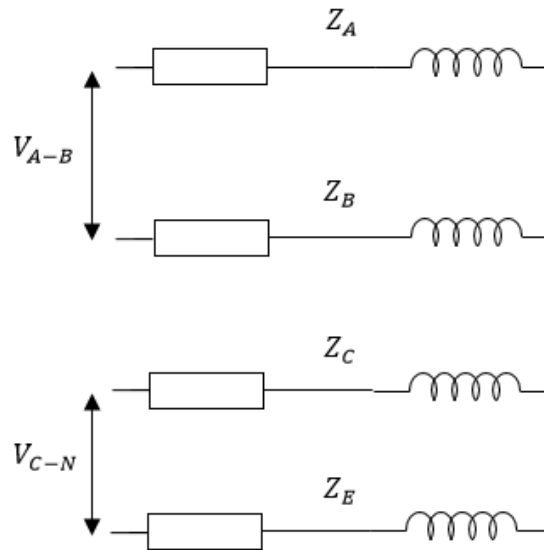
Mesafe koruma rölesi çalışma prensibi olarak empedans üzerinden bir koruma sağlamaktadır. Bu sayede arıza lokasyonunu da belirleyebilmektedir. Mesafe koruma rölesine akım ve gerilim transformatörlerinden korunan hatta ait akım ve gerilim bilgileri taşınır. Mesafe koruma rölesi taşınan bu bilgileri her an işleyebilmektedir. Korunan hatta meydana gelen bir arıza durumunda mesafe koruma rölesi arızanın meydana geldiği noktanın gerilimini ve akımını ölçer. Ölçtüğü gerilimi ölçtüğü akıma bölerek o noktanın empedansını bulur. Bulunan bu empedans arıza empedansıdır. Mesafe koruma rölesine önceden girilen hattın toplam empedansı ile belli kriterlere göre arıza empedansını karşılaştırır. Bir arıza anında iletim hattının gerilimi azalır, akımı ise artacağından arıza

empedansı diye nitelendirilen değer, mesafe koruma rölesine önceden girilen empedans değerinden küçük ise mesafe koruma rölesi kesiciye açma komutu gönderir. 21 mesafe koruma rölesinin ANSI kodu, T_1 arıza noktası, V_F arıza gerilimi, I_F arıza akımı, Z_F arıza empedansı olmak üzere bu durum Şekil 3.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Mesafe koruma rölesi arıza empedansı diyagramı

Mesafe koruma rölesinin koruduğu iletim hattında gerçekleşen bir faz – faz arızasında arıza empedansını hesaplamak mesafe koruma rölesi için kolaydır. Çünkü önceden hesaplanarak mesafe koruma rölesine girilen korunan hattın empedans bilgileri belirlidir. Arıza akımının akacağı diğer fazın da empedansı belirli olduğu için mesafe koruma rölesi bu noktada arıza empedansını kolay bir şekilde hesaplayarak hem kesiciye açma komutu gönderir hem de arıza lokasyonu hakkında kullanıcıya bilgi verir. Z_A , Z_B , Z_C sırasıyla A, B, C fazlarının empedansları, Z_E toprak empedansı, V_{A-B} A ile B fazları arasındaki faz – faz gerilimi, V_{C-N} ise C fazı ile toprak arasındaki faz – toprak gerilimi olmak üzere arıza türleri Şekil 3.13.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Korunan iletim hattı arıza türleri

Faz – faz arızasında gerçekleşen durum, faz – toprak arızaları için geçerli değildir. Çünkü faz – toprak arızalarında arıza akımının akacağı akım yolunun empedans bilgisi önceden bilinmemektedir. Örneğin iletim hattına insan teması, direk teması, iş makinesi teması gibi öncesinden empedansı sabit olmayan birçok unsur faz – toprak arızasına neden olabilmektedir. Bu noktada arızayı ve arıza lokasyonunu doğru tespit edebilmek için; faz empedansına göre farklı değerlerde olabilen toprak empedansının ölçme üzerindeki etkisini düzeltmek için toprak düzeltme katsayısı kullanılmaktadır. Toprak düzeltme katsayısının değeri, korunan hattın empedans bilgilerine dayanmaktadır. K_{ZN} toprak düzeltme katsayısı, Z_0 korunan hattın sıfır bileşen empedansı, Z_1 korunan hattın pozitif bileşen empedansı olmak üzere bunlar arasındaki ilişki Denklem (3.6)'da verilmektedir.

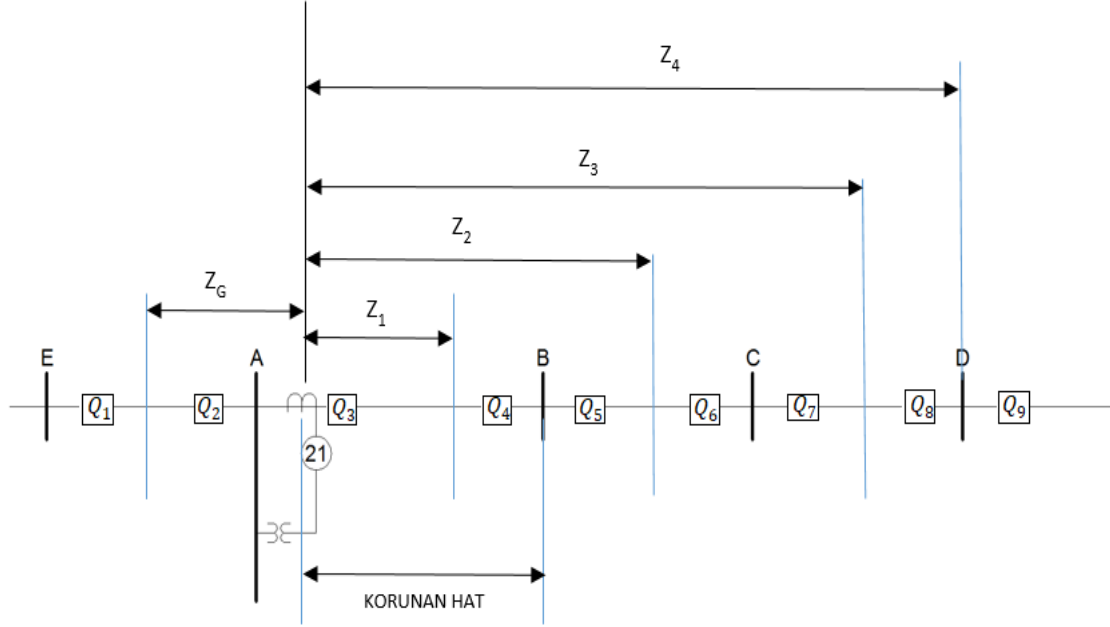
$$K_{ZN} = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \quad (3.7)$$

Denklem (3.6)'da verilen toprak düzeltme katsayısı sayesinde toprak empedansı, arızaya neden olan durumlardan bağımsız bir şekilde hesaplanabilmektedir.

Mesafe koruma rölesine bilgi olarak gelen akım ve gerilim transformatörlerinin hata payları, korunan hattaki oluşabilecek kayıplar, güvenilirlik payı gibi durumlardan dolayı mesafe koruma rölesinin koruduğu iletim hattının tamamını koruması istenmemektedir. Dolayısıyla bu durumdan dolayı mesafe koruma rölesi doğrudan seçiciliği sağlayamamaktadır. Bu durum mesafe koruma rölesi için bir dezavantaj olsa da seçiciliği sağlayabilmek için literatürde kabul gören bir takım çözümler bulunmaktadır.

Gerekli seçiciliği sağlayabilmek için mesafe koruma rölesinde kademe bölgesi olarak nitelendirilen bir takım koruma bölgeleri oluşturulmaktadır. Seçicilik, kademe bölgeleri arasında empedans ve açma zaman farkı oluşturularak sağlanmaktadır. Aynı zamanda bu durum korunan iletim hattına komşu iletim hatlarının da yedek koruması anlamına gelmektedir. Karşılıklı transformatör merkezleri arasında tesis edilmiş birer mesafe koruma rölesini aralarında belli empedans ve zaman farkı bırakılarak ayarlanan koruma kademe bölgeleri ile mesafe koruma rölelerinde tam anlamıyla güvenilir ve seçici koruma sağlanılmaktadır. $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, Q_9$ ilgili hatların kesicileri, 21 mesafe koruma rölesinin ANSI kodu, Z_1 1. kademe koruma bölgesi, Z_2 2. kademe koruma bölgesi, Z_3 3. kademe koruma bölgesi, Z_4 4. kademe koruma bölgesi ve Z_G geri kademe

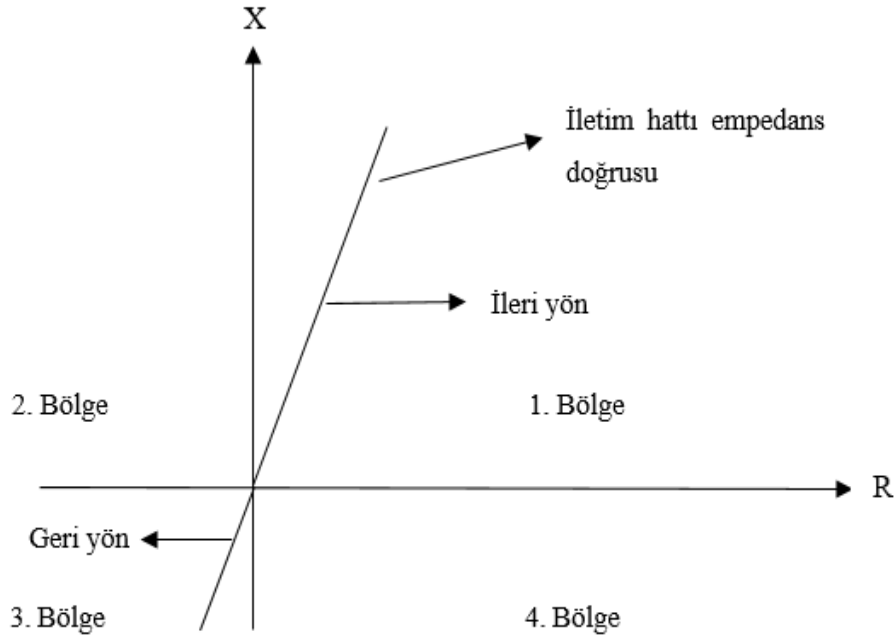
koruma bölgesi olmak üzere Şekil 3.14.'de mesafe koruma rölesinin koruma kademe bölgeleri verilmektedir.



Şekil 3.14. Mesafe koruma rölesi koruma kademe bölgeleri

Şekil 3.14.'de gösterilen tüm baralar birbirinden farklı transformatör merkezlerinde bulunmaktadır. Şekil 3.14.'de verilen koruma kademe bölgelerine göre A barası tarafında tesis edilmiş bir mesafe koruma rölesi seçicilik özelliğini sağlayabilmek adına A ile B baraları arasındaki iletim hattının tamamını korumamakta ve diğer koruma kademe bölgeleri arasında açma zaman farkı olacak şekilde tesis edilmektedir. Geri yönde koruma sağlanmasının nedeni ise bara koruma rölesi bulunan transformatör merkezlerinde baranın yedek korumasını sağlamak, bara koruma rölesi bulunmayan transformatör merkezlerinde ise barayı korumaktır.

Mesafe koruma rölesinin çalışma prensibinin dayandığı grafik R – X empedans grafiği olarak isimlendirilmektedir. Bu empedans grafiği Şekil 3.15.'de verilmektedir. Empedans grafiğinin X eksen, iletim hattının rezistif empedansı yani direnç bileşenini, Y eksen ise iletim hattının endüktif empedansını yani endüktans bileşenini göstermektedir. İletim hattının empedans doğrusu kullanılan iletkenin karakteristik özelliğine göre rezistif ya da endüktif eksene yaklaşabilir. Ülkemizde kullanılan iletken türleri göz önünde bulundurulduğunda iletim hattının empedans doğrusu endüktif eksene daha yakın olmaktadır. Bu durum Şekil 3.15.'de gösterilmektedir.

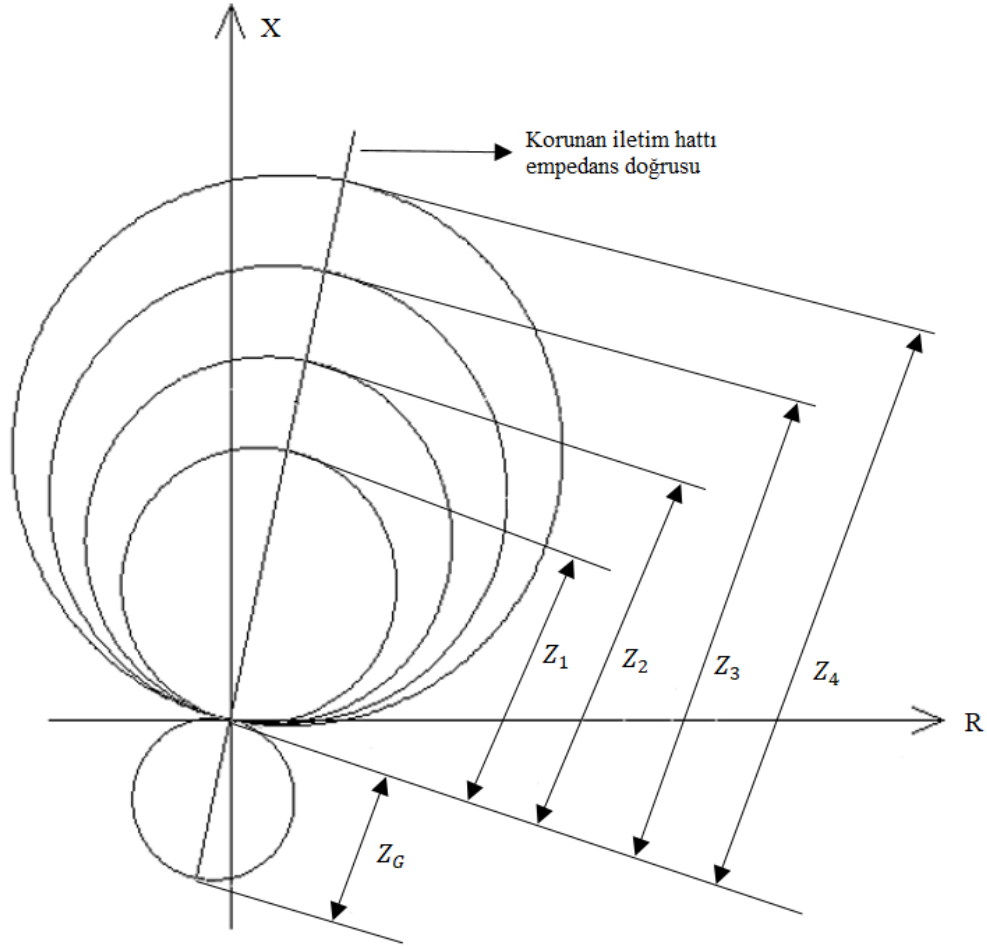


Şekil 3.15. İletim hattı empedans grafiği

Kullanılan iletken türünün karakteristiğine göre değişmekle birlikte arıza akımları genellikle gerilimin açısı olarak belli bir miktar gerisinde bulunmaktadır. Bu nedenle genellikle 1. bölgeye düşmektedir. (Özevin,2015) Şekil 3.15.'de verilen iletim hattı empedans grafiğinde orijin noktası, iletim hattının başlangıç noktası olarak kabul edilebilir. Bu noktadan ileri yönde ilerledikçe iletim hattının uzunluğu ve empedans miktarı doğru orantılı olarak artmaktadır. Geri yön diye nitelendirilen ve Şekil 3.15.'de 3. bölgeye düşen doğru ise aslında iletim hattının gerisindeki korunan iletim hattından farklı bir iletim hattını göstermektedir.

Literatürde mesafe koruma rölesinin birçok empedans karakteristiği bulunmaktadır. Bu empedans karakteristikleri arasında ülkemizde en yaygın kullanılan empedans karakteristiği mho empedans karakteristiği ile Quadrilateral (dörtgen) empedans karakteristikleridir. Bu karakteristikler kendi içinde arıza bölgelerine ayrılmaktadır. Karakteristikleri oluşturan dairesel ve dörtgen şekiller bulunmaktadır. Oluşturulan şekillerin içerisine düşen bir arıza gerçekleştiği zaman mesafe koruma rölesi, kesiciye açma komutu göndermektedir. Z_1 1. kademe koruma bölgesi, Z_2 2. kademe koruma bölgesi, Z_3 3. kademe koruma bölgesi, Z_4 4. kademe koruma bölgesi ve Z_G geri kademe

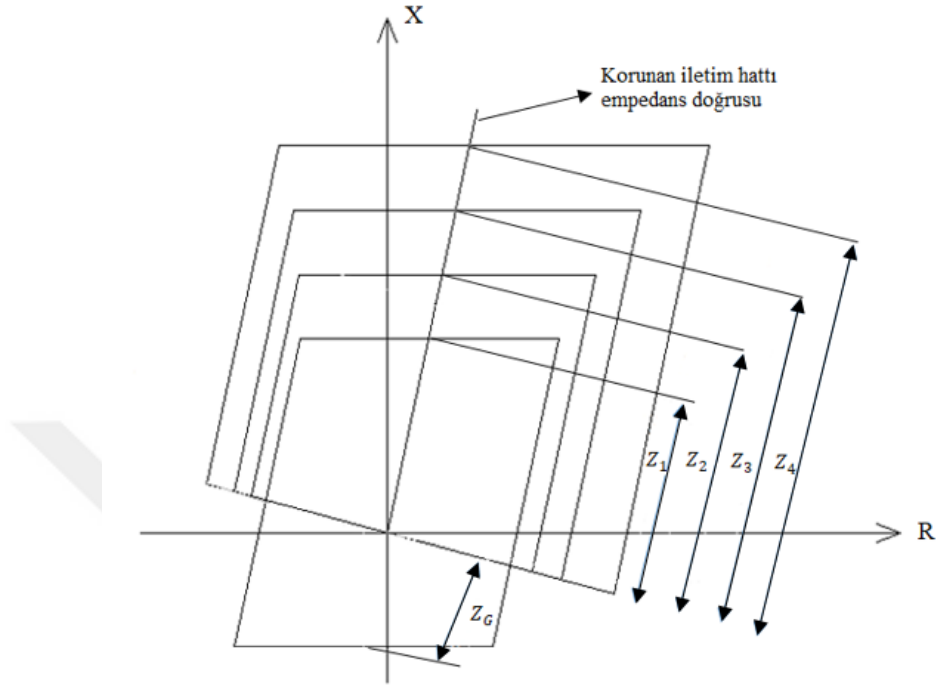
koruma bölgesi olmak üzere Şekil 3.16.'da bu karakteristiklerden biri olan mho empedans karakteristiği verilmektedir.



Şekil 3.16. Mho empedans karakteristiği

Şekil 3.16.'da gösterilen dairelerin her biri aslında mesafe koruma rölesinin birer kademe koruma bölgesini oluşturur. Arıza anında, mesafe koruma rölesinin hesapladığı empedans değeri bu dairelerden birine girerse rölenin çalışması gerekmektedir. Şekil 3.16.'daki X – R empedans koordinat düzlemindeki daireler incelendiğinde 1. ve 2. bölgelerde hemen hemen eşit alan bulunmaktadır. Aslında iletken türünün karakteristiği gereği genellikle oluşan arızalar 1. bölgede oluşacağı için bu bölgeye daha geniş alan ayrılması, arızanın tespiti için daha doğrudur. İletim hatlarında oluşan arızaların genelinin faz – toprak arızaları olduğunu ve bu faz – toprak arızalarının da arıza empedanslarının rezistif olduğu düşünüldüğünde mho empedans karakteristiğinin ülkemizde kullanımı quadrilateral empedans karakteristiğine göre daha sınırlı kalmaktadır. Z_1 1. kademe koruma bölgesi, Z_2 2. kademe koruma bölgesi, Z_3 3. kademe koruma bölgesi, Z_4 4. kademe koruma

bölgesi ve Z_G geri kademe koruma bölgesi olmak üzere Şekil 3.17.'de quadrilateral (dörtgen) empedans karakteristiği verilmektedir.



Şekil 3.17. Quadrilateral (dörtgen) empedans karakteristiği

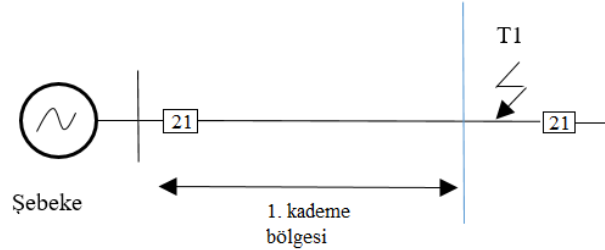
Quadrilateral empedans karakteristiğinde koruma bölgelerinin rezistif kısmı daha geniş tutulmaktadır. Dolayısıyla içerisinde baskın olarak rezistif karakter barındıran faz – toprak arızalarında daha doğru tespitler yapılabilmektedir.

Bir transformatör merkezinden diğer transformatör merkezine tesis edilen bir iletim hattı mesafe koruma rölesi ile güvenilir bir şekilde korunabilmesi için mesafe koruma rölelerinin korunacak fiderin bağlı bulunduğu transformatör merkezlerine birer adet karşılıklı olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. 21 mesafe koruma rölesi ANSI kodu A ve B ise transformatör merkezlerini temsil etmek üzere bu durum Şekil 3.18.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Mesafe koruma rölesi transformatör merkezi yerleşimi

Mesafe koruma rölelerinin Şekil 3.18.'deki gibi karşılıklı yerleştirilmelerinin nedeni; belli güvenilirlik durumlarından ve hata paylarından dolayı mesafe koruma rölesinin hatalı çalışmasının önüne geçebilmek için mesafe koruma rölesi koruduğu iletim hattının tamamını öncelikli korumak yerine korunan iletim hattının belirli bir bölümünü öncelikli olarak korumaktadır. Bu durumda A transformatör merkezindeki bir mesafe koruma rölesi için B transformatör merkezine çok yakın bir noktada arıza olması durumunda bu arızayı öncelikli olarak görmeyip belli bir gecikme sonrasında kesiciye açma komutu göndermektedir. Ancak B tarafına da mesafe koruma rölesi yerleştirildiğinde A tarafındaki mesafe koruma rölesinin öncelikli olarak değerlendirmedeği arızayı B tarafındaki mesafe koruma rölesi öncelikli olarak değerlendirerek kesiciye açma komutu göndermektedir. T1 arıza noktası olmak üzere bu durum Şekil 3.19.'da gösterilmektedir.



Şekil 3.19. 1. Kademe bölgesi dışında gerçekleşen arıza

Ancak bu durumda korunan iletim hattının bir tarafındaki kesici açık iken diğer tarafındaki kesici kapalı olduğu için arıza halen beslenmeye devam etmektedir. Aynı zamanda bu durum; korunan hattaki mesafe koruma rölesinde otomatik tekrar kapama fonksiyonu kullanılması halinde bu fonksiyonda kullanılan ölü zaman sürelerinin karşılıklı mesafe koruma rölelerinde senkron olmamasına neden olmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için mesafe koruma röleleri karşılıklı olarak haberleştirilmektedir. Bu haberleşme kuranportör cihazları ile sağlanmaktadır. Bu cihazlar, mesafe koruma rölelerinin ürettiği dijital sinyalleri radyo frekanslı işaret üzerine bindirerek koruma iletkeni üzerinden taşımaktadır. Bu haberleşme protokolü üzerinden mesafe koruma röleleri birbirleri arasında sahada transfer trip ismi ile nitelendirilen bir müsaade sinyali göndermektedir. Oluşan arızayı temizlemek için kesiciye öncelikli olarak açma komutu gönderen mesafe koruma rölesi, aynı anda karşı transformatör merkezinde bulunan mesafe koruma rölesine de transfer trip göndererek karşı merkezde bulunan mesafe koruma rölesinin de öncelikli olarak açmasını sağlamaktadır. Burada dikkat edilmesi

gereken bu haberleşme düzeni ile sadece evet veya hayır, var veya yok gibi dijital sinyaller gönderilmektedir.

Aşağıda Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan mesafe koruma rölelerinin kademe eşik değerlerinin bir kısmı verilmektedir:

- Kademe 1 (Z_1) eşik değeri, korunan iletim hattı uzunluğu 5 km'den kısa olanlarda korunan hat empedansının %70'ine, korunan iletim hattı uzunluğu 5 km ile 20 km arasında olan iletim hatlarında korunan hat empedansının %80'ine, korunan iletim hattı uzunluğu 20 km'den fazla olan iletim hatlarında korunan hat empedansının %85'ine ayarlanmaktadır. Açma zamanı süresi ise herhangi bir gecikme olmaksızın öncelikli olarak 0 milisaniyede açması istenmektedir,
- Kademe 2 (Z_2) eşik değeri, korunan iletim hattının empedansı ile karşı baradaki en kısa iletim hattının empedansının %50'sinin toplamına ayarlanmaktadır. Karşı baradaki en kısa hat uzunluğu 5 km'den kısa ise; kademe 2 (Z_2) eşik değeri, korunan iletim hattının empedansı ile karşı baradaki en kısa iletim hattının empedansının %50'sinden daha küçük bir değer toplamına ayarlanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, kademe 2 (Z_2) eşik değeri karşı baradaki en kısa hattın mesafe koruma rölesinin ikinci kademe empedans değeri ile örtüşmemesi gerekmektedir. Eğer karşı transformatör merkezindeki en kısa hat, diferansiyel hat koruma rölesi veya kablo diferansiyel koruma rölesi ile korunuyor ise bu hat, kademe 2 (Z_2) eşik değeri hesabında dikkate alınmayabilir. Açma süresi ise 400 ms gecikme ile açması istenmektedir,
- Kademe 3 (Z_3) eşik değeri, korunan iletim hattının empedansı ile karşı transformatör merkezindeki en uzun iletim hattının empedansının %100' ünün toplamına ayarlanmaktadır. Karşı transformatör merkezindeki en uzun iletim hattı uzunluğu 5 km'den kısa ise en uzun iletim hattının empedansının %120'sinin toplamına ayarlanmaktadır. Açma süresi ise 800 ms gecikme ile açması istenmektedir,
- Kademe 4 (Z_4) eşik değeri, kademe 3 (Z_3) eşik değerinin 1,2 katı olacak şekilde ayarlanmaktadır. Açma süresi ise 1200 ms gecikme ile açması istenmektedir,
- Geri kademe (Z_G) eşik değeri, korunan hattın bağlı bulunduğu baradaki kendisi de dahil olmak üzere en kısa iletim hattının empedans değerinin %5 ile %10'u arasına ayarlanmaktadır. Bu koruma kademe bölgesinin ayarlanma amacı bağlı bulunan

Ülkemizdeki elektrik iletim hatlarında kullanılan mesafe koruma rölelerinin koruma kademe ayarları Şekil 3.20.'de verilmektedir.



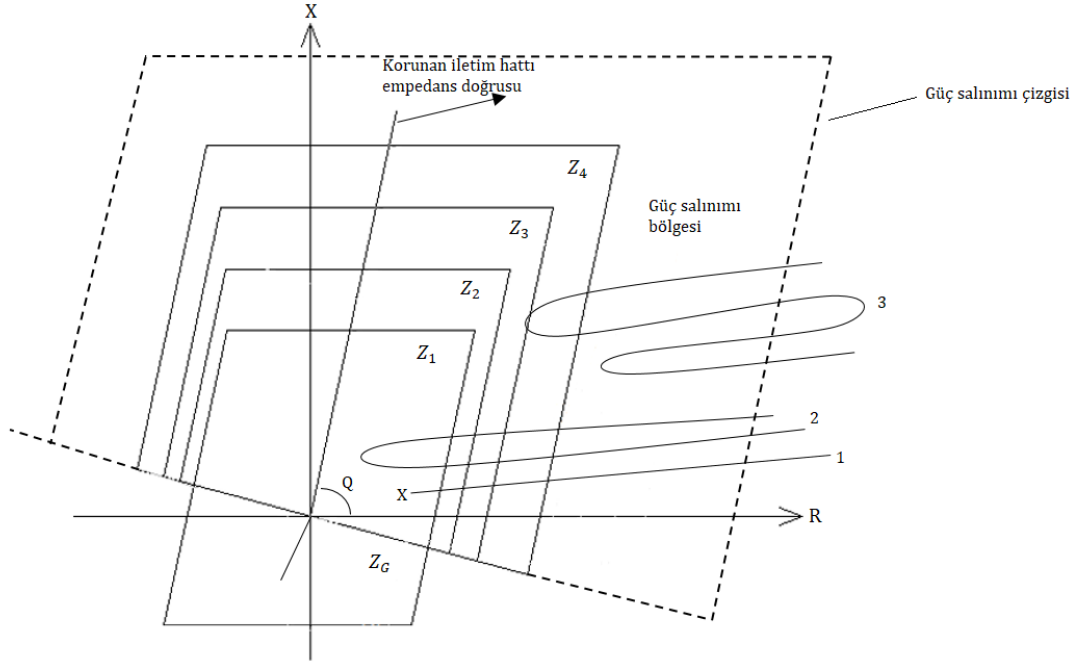
Şekil 3.21. Mesafe koruma rölesi açma zaman gecikme grafiği

4. MESAFE KORUMA RÖLESİNDE KULLANILAN FONKSİYONLAR VE MESAFE KORUMA RÖLESİ TESTİ

Mesafe koruma rölelerine; günümüz teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kullanıldığı sistemdeki sorunlara çözüm olabilecek bir takım yenilikçi fonksiyonlar eklenmiştir. Bu fonksiyonlardan bazıları: yük körleştirme, güç salınımı, otomatik tekrar kapama, kopuk iletken tespiti, arıza üzerine kapama (SOTF), arıza kaydı, olay kaydı gibi fonksiyonlar bulunmaktadır. Elektrik iletim sistemindeki mesafe koruma rölelerinde güncel olarak kullanılan bu fonksiyonlar hatalı açmaların giderilmesi, geçici arızalardaki enerji kaybının önüne geçilmesi gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu fonksiyonlar mesafe koruma rölesinin asıl kullanım amacının yanında kullanıcının ihtiyacına göre opsiyonel olarak röle arayüzünde ayrı ayrı seçilebilmektedir.

4.1. Güç Salınımı Fonksiyonu

Elektrik iletim sisteminde akım miktarı her zaman arızadan dolayı artmaz. Bazen elektrik şebekesinden kaynaklı durumlardan dolayı akım miktarı artabilir. Örneğin büyük güçte bir elektrik üretim santralının aniden plansız bir şekilde devreden çıkması veya bir anda bir bölgede planlanandan çok daha fazla yük ihtiyacının oluşması gibi durumlar gerilimde düzensizliğe ve dengesizliğe yol açmaktadır. Ancak bu durumlar geçici olmakla birlikte sistem frekansı kısa sürede kendini toparlayabilmektedir. Ancak toparlayana kadar geçen sürede geçici sistem dalgalanmalarındaki durumları dengelemek için ortaya çıkan akım artışları, iletim hatlarındaki ölçülen empedansları küçültmekte ve bazen bu geçici durumlar mesafe koruma rölesinde ayarlanan koruma kademe bölgelerine girerek arıza olarak algılanabilmektedir. Bu tip durumlarda mesafe koruma rölesi açmalarının engellenmesi gerekmektedir. Mesafe koruma rölesinin açmasını engelleyen bir blokaj sinyali üretilerek mesafe koruma rölesinin başlatma almaması sağlanır. Fakat mesafe koruma röleleri, gerçek arıza ile güç salınımı ayrımını çok kısa sürede doğru bir şekilde yapması gerekmektedir. Zira güç salınımı esnasında bile gerçek bir arıza gelebilmekte ve mesafe koruma rölesinin bu durumu tespit edip kademe koruma bölgesine göre açma sinyali üretmesi beklenmektedir. Mesafe koruma rölesinin güç salınımı ya da gerçek arıza olup olmadığına karar verebilmesini sağlayan birçok iç algoritması bulunmaktadır. Bu algoritma türlerinden biri açıklanmak üzere Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Güç salınımı tespit yöntemi

Güç salınımı empedans bandı, mesafe koruma rölesinin tüm koruma kademe bölgelerinin dışında ve minimum yük empedansından da küçük olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Mesafe koruma rölesi gerçek arıza ya da güç salınımı hususunda karar verebilmesi için kullanıcı tarafından oluşturulan bu güç salınımı empedans bölgesi ile koruma kademe bölgelerini sürekli olarak taramaktadır. Güç salınımı fonksiyonu bu tarama esnasında vektörlerin empedans bölgelerindeki geçiş hızına göre karar vermektedir. Şekil 4.1.'de verilen 1 numaralı durumdaki gibi, empedans vektörü çok kısa sürede (birkaç döngü) koruma kademe bölgesine giriş yapıyorsa bu empedans vektörünün gerçek bir arıza olduğuna karar vererek mesafe koruma rölesi kesiciye açma komutu göndermektedir. Ancak Şekil 4.1.'deki 2 ve 3 numaralı empedans vektörleri ilk önce güç salınımı empedans bölgesine girmekte ve birkaç döngü kadar süre geçtikten sonra mesafe koruma kademe bölgelerinin içerisine girmektedir. Mesafe koruma rölesinin güç salınımı blokaj fonksiyonu bu durumda bir güç salınımı olduğunu tespit edip mesafe koruma rölesi açma devresine blokaj sinyali göndermektedir.

Mesafe koruma rölelerinde her koruma kademesi için güç salınımı blokaj fonksiyonu ayrı ayrı kullanılabilir. Kullanıcı hangi koruma kademe bölgesinde bu fonksiyonu kullanmak isterse kullanabilir. Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan

verilen yük empedansı Denklem (4.1) ve (4.2)'deki gibi hesaplanmaktadır. Yük empedansının açısı ise arıza açıları, saha tecrübelerine istinaden 40° olarak belirlenmektedir.

$$R_{yük} = 0,9 \frac{V_{AB}}{E_k I_{max} \sqrt{3}} \quad (4.1)$$

$$Z_{yük} = 0,9 \frac{V_{AB}}{E_k I_{max} \sqrt{3}} \quad (4.2)$$

Şekil 4.2.'de gösterilen koruma kademe bölgelerine girecek bir empedans vektörü olması durumunda; eğer bu empedans vektörü, yük empedansı bölgesi ismi ile nitelendirilen bölgenin içerisinde kalırsa mesafe koruma rölesi bu durumu bir arıza olarak değerlendirmeyecek ve açma komutu göndermeyecektir.

Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan mesafe koruma rölelerindeki yük körleştirme fonksiyonu için yük empedans ve açıları:

Korunan iletim hattının, faz – faz sekonder gerilimi 100 V ve sekonder akımı 5A olan sistemler için $R_{yük}$ ve $Z_{yük}$ değerleri 7 ohm, faz – faz sekonder gerilimi 100 V ve sekonder akımı 1A olan sistemler için ise $R_{yük}$ ve $Z_{yük}$ değerleri 35 ohm ayarlanmakta, yük açısı tüm durumlarda 40° olarak belirlenmektedir.

4.3. Arıza Üzerine Kapama Fonksiyonu (SOTF)

Arıza üzerine kapama fonksiyonu bir arıza halinde kapatılan fider kesicilerinin gecikme süresi uygulanmadan açtırılması için kullanılmaktadır. Bir fiderde çalışma olduğu zaman karşılıklı iki transformatör merkezinde fider kesicileri açılır ve toprak bıçakları veya toprak ayırıcıları kapatılır. Bu sayede hat topraklanarak can ve mal güvenliği sağlanmış olur. Karşılıklı transformatör merkezlerinin herhangi birinde toprak bıçağı veya toprak ayırıcısı kapalı iken çalışma yapılan fider kesicisine elle kapama komutu verilmesi gibi yanlış bir manevra yapılabilmektedir. Bu yanlış manevra sonucunda oluşacak arıza akımında karşı transformatör merkezindeki mesafe koruma rölesi bu arızayı 2. kademe olarak görüp gecikmeli olarak kesiciye açma komutu gönderecektir. Bu tip durumda arıza üzerine kapama fonksiyonu herhangi bir gecikme olmaksızın kesiciye açma komutu gönderecek ve arızayı ani bir şekilde temizleyecektir.

Arıza üzerine kapama fonksiyonu hem kesicinin elle kapatılması ile hem de otomatik tekrar kapama fonksiyonu sonucu tetiklenebilir. Bu fonksiyon genelde kesicinin elle kapama komütatöründen gelen açık veya kapalı bilgisi mesafe koruma rölesine taşınarak aktif edilmektedir. Arıza üzerine kapama fonksiyonu tek faz için ayrı ayrı aktif edilebildiği gibi 3 faz için de aktif olabilmektedir. Ancak arıza üzerine kapama fonksiyonu nedeniyle kesici her zaman 3 faz açmaktadır. Ayrıca fonksiyonun ne kadar süre aktif olarak kalacağı, hangi koruma kademe bölgelerinde çalışacağı gibi hususlar da kullanıcı tarafından belirlenmektedir.

4.4. Koruma Haberleşmesi Fonksiyonu

Mesafe koruma rölesinin koruduğu bir iletim hattında, 1. koruma kademe bölgesi dışında gerçekleşen bir arızada belli bir gecikme süresi sonrasında kesiciye açma komutu göndermektedir. Korunan iletim hattının tümünde gecikmesiz ani açmayı sağlayabilmek için mesafe koruma rölelerinde koruma haberleşmesi fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon sayesinde korunan taraftaki mesafe koruma rölesi ile karşı transformatör merkezindeki mesafe koruma rölesi arasında bilgi sinyali alışverişi yapılabilmektedir. Bu vasıta ile alınan ve gönderilen bilgi sinyalleri mesafe koruma rölesinde işlenebilir ve bunlara dayalı kesiciye açma sinyalleri üretilebilir. Karşı transformatör merkezindeki kesicinin gecikmesiz açmasını sağlayan bu açma sinyallerine transfer trip sinyali denilmektedir.

Düşük menzil ve aşırı menzil olmak üzere iki türlü açtırma gerçekleştirilebilir. Bu ifadeler aslında arızanın, korunan iletim hattının hangi noktasında gerçekleştiği ile ilgilidir. Korunan iletim hattının iki tarafındaki mesafe koruma rölelerinin, ikisinin de arızayı görebileceği bir noktada gerçekleştiyse düşük menzil, birinin arızayı görüp diğerinin kademe koruma bölgesinden dolayı görmeyeceği bir noktada gerçekleştiyse aşırı menzil olarak isimlendirilmektedir. Bilgi sinyali iletimi için fiber optik iletişim, kuranportör cihazı ya da mikrodalga radyo bağlantıları kullanılabilir. Havai iletim hatlarının genelinde otomatik tekrar kapama fonksiyonu da kullanıldığı için bilgi sinyali iletimi her zaman faz ayrımlı yapılmaktadır.

Ülkemizdeki elektrik iletim sisteminde kullanılan mesafe koruma rölelerinin koruma haberleşmesi fonksiyonlarında müsaadeli aşırı menzil transfer trip haberleşme tertibi

kullanılmaktadır. Bu koruma tertibinde 1. ve 2. kademe koruma bölgelerinde bir başlatma sinyali alındığında karşı transformatör merkezine açma sinyali olan transfer trip sinyali gönderilmektedir. Karşı transformatör merkezindeki mesafe koruma rölesi arızayı 2. kademe koruma bölgesinde görüp aynı zamanda transfer trip sinyali aldığı anda 2. kademe koruma bölgesi gecikme süresini beklemeden ani bir şekilde kesicisine açma komutu göndermektedir.

4.5. Aşırı ve Düşük Gerilim Koruma Fonksiyonu

Elektrik iletim sisteminde aşırı gerilim izolasyon problemlerinden dolayı, düşük gerilim ise sistem kararlılığında ortaya çıkabilecek sorunlardan dolayı istenmeyen durumlar arasında bulunmaktadır. Mesafe koruma rölesine her fazın gerilimi ve nötr gerilimleri taşınmaktadır. Taşınan bu gerilimler ile mesafe koruma rölesinde ayarlanan gerilim eşik değerleri sürekli olarak kıyaslanır. Gerilim seviyeleri, ayarlanan eşik değerlerin aşırı gerilim koruma için üstüne çıkar, düşük gerilim koruma için altına inerse mesafe koruma rölesi önce alarm ihbar sinyali oluşturmakta ardından azalma veya artma devam ederse kesiciye açma komutu göndermektedir. Sistemde aşırı gerilimler; düşük yüklü ve uzun havai iletim hatlarında, yüksek güçlü bir generatörün sistemden ani bir şekilde çıkmasıyla ortaya çıkabilir. Aşırı ve düşük gerilim koruma fonksiyonu hem faz – toprak hem de faz – faz gerilim seviyeleri için koruma sağlamaktadır.

4.6. Frekans Koruma Fonksiyonu

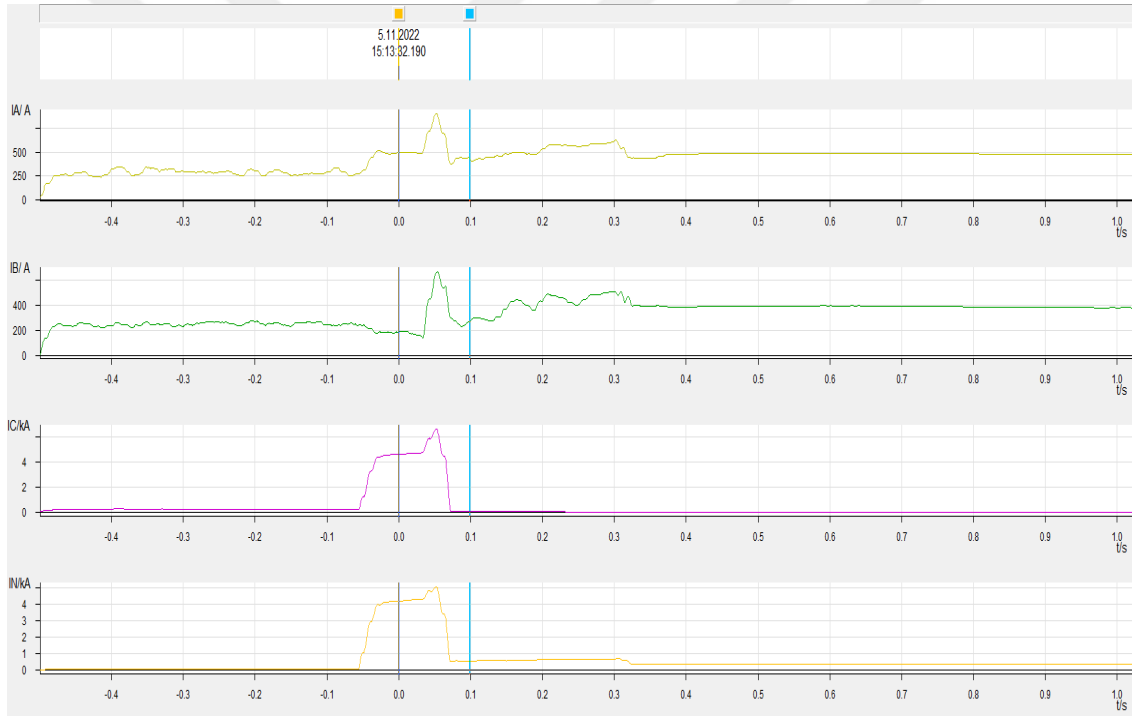
Ülkemizdeki elektrik ile çalışan tüm teçhizatlar 50 Hz şebeke frekansı ile çalışmaktadır. Dolayısıyla üretilen ve iletilen elektriğin frekansı 50 Hz’ de tutulması gerekmektedir. Sistemden çekilen güç miktarında meydana gelen artış sistem frekansını düşürücü etki yaparken sistemden beslenen büyük miktarda yükün bir anda devre dışı kalması sistem frekansını yükseltici etki yapmaktadır. Frekans koruma fonksiyonu, sistem frekansı değerinde kabul edilebilir değerlerin üzerine çıktığında veya altına indiğinde sistem frekansını 50 Hz’ de tutabilmek için uygun anahtarlama işlemleri için komut üretmektedir.

4.7. Osilografik Arıza ve Olay Kayıtları Alma Fonksiyonu

Mesafe koruma röleleri arıza anında ölçülen büyüklüklerin anlık değerlerini belirli

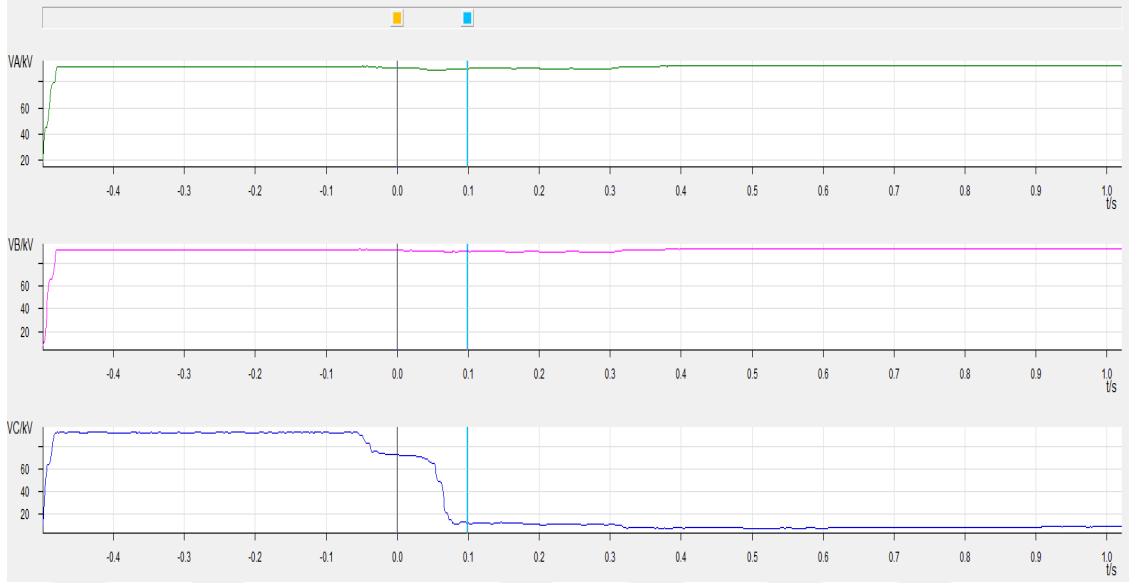
aralıklarla örnekleyerek kendi hafızasında tutmaktadır. Hafızasında tuttuğu arıza kayıtları belli bir depolama alanına ulaştıktan sonra hafızasındaki en eski arıza kaydını silerek yeni arıza kaydını hafızasında tutmaya devam etmektedir. Trip, başlatma gibi sinyallerin oluşması ile tetiklenebilmekte ve tetikleme öncesi ve sonrası kayıt süresi kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.

Farklı bağlantı protokolleri ve röle arayüzü programları ile bağlantı sağlanan mesafe koruma rölelerinden bu osilografik arıza ve olay kayıtlarına erişilebilir. Erişilen osilografik arıza ve olay kayıtları çeşitli programlarda açılıp incelenebilmektedir. Şekil 4.3.'de bu şekilde elde edilen örnek bir osilografik arıza kaydına ilişkin akım sinyalleri gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Osilografik arıza kaydı akım sinyalleri örneği

Şekil 4.3.'de 154 kV bir havai iletim hattında meydana gelen arıza sonrası sistemden çekilen arıza kaydının bir kesiti verilmektedir. Bu arıza kaydı örneğinde yatay eksen saniye cinsinden zamanı, dikey eksen ise amper cinsinden akımın değerini göstermektedir. Şekil 4.3. incelendiğinde bu arızanın hangi fazda gerçekleştiği ve ne kadar sürede temizlendiği belirlenebilmektedir. Şekil 4.4.'de aynı osilografik arıza kaydının gerilim sinyalleri gösterilmektedir.



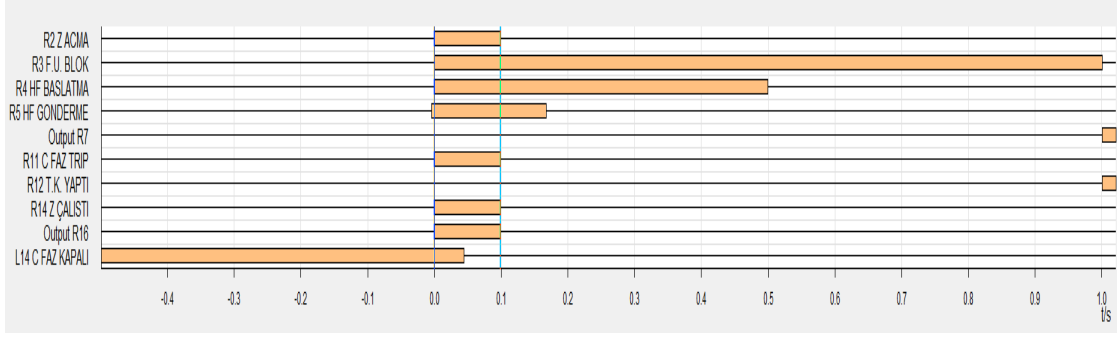
Şekil 4.4. Osilografik arıza kaydı gerilim sinyalleri örneği

Şekil 4.4.'deki arıza kaydı örneğinde yatay eksen saniye cinsinden zamanı, düşey eksen ise kV cinsinden gerilim değerini göstermektedir. Gerçek bir kısa devre arızasında gerilim düşerken, akım miktarının artması beklenmektedir. Şekil 4.4. incelendiğinde C faz – toprak arızası olduğu görülmekte ve C faz geriliminin aniden düşmeye başladığı an mesafe koruma rölesi için arıza anı olarak değerlendirilmektedir.

Osilografik arıza kaydı fonksiyonu içerisine bir takım dijital bilgi veya komut sinyallerinin ataması yapılabilir. Ataması yapılan bu dijital sinyaller osilografik arıza kaydını yorumlarken kullanıcıya kolaylık sağlar. Bu dijital bilgilerin ne zaman ve ne kadar süre geldiğini görmek mümkündür. Bu dijital sinyallerin bir kısmı aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Dijital karşılıklarına göre işlevini tarif edecek şekilde isimlendirilmiş mesafe koruma rölesine fiziksel olarak getirilen giriş sinyalleri,
- Tüm kademe koruma bölgelerinin başlatma ve açma sinyalleri,
- Haberleşme sinyalleri,
- Otomatik tekrar kapama ve otomatik tekrar kapama blokaj sinyalleri,
- Transfer trip alındı ve gönderildi bilgi sinyalleri.

Şekil 4.5.'de bu dijital sinyallerin bazılarını içeren osilografik arıza kaydı kesiti gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Osilografik arıza kaydı dijital bilgi sinyalleri örneği

Havai iletim hattında gerçekleşen bir arıza kaydını yorumlarken bazı durumlarda sadece osilografik arıza kaydı yeterli olmayabilir. Çünkü genellikle osilografik arıza kaydında, kullanıcının seçtiği belli başlı bilgiler bulunmaktadır. Mesafe koruma rölesindeki olay kaydedici fonksiyonu sayesinde kullanıcının seçiminden bağımsız olarak mili saniyeler mertebesinde gerçekleşen olayların kayıtları tutulmaktadır. Olay kayıtlarında mesafe koruma rölesinin içerisindeki algoritmalarla kullanılan iç lojikler de yer almaktadır. Olay kaydında bulunan sinyaller aralarında zaman bakımından sıralanmakta ve bu sayede gerçekleşen arızayı daha iyi analiz etme fırsatı doğmaktadır. Şekil 4.6.'da sahada karşılaşılan bir kısa devre arızasındaki olay kaydı gösterilmektedir.

Parameter	Value
Saturday 05 November 2022 15:13:32.356	IM64 Ch1 Output7 OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.288	Output Contacts1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.287	Trip Output C OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.287	Any Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.287	Any Trip OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.281	Any Pole Dead ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.281	Pole Dead C ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.274	Force 3 pole ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Output Contacts1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Started Phase N OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 3 N Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Started Phase C OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 3 C Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 2 N Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 2 C Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 1 N Trip OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 1 C Trip OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.254	Zone 1 Trip OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.253	Zone 1 N Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.253	Zone 1 C Start OFF
Saturday 05 November 2022 15:13:32.234	Logic Inputs 1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.189	Output Contacts1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.189	AR Blocked ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.189	AR 1pole in prog ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.188	Seq Counter = 1 ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Output Contacts1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Trip Output C ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Any Trip ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Zone 1 N Trip ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Zone 1 C Trip ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Zone 1 Trip ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Zone 1 N Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.187	Zone 1 C Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.184	Output Contacts1
Saturday 05 November 2022 15:13:32.184	IM64 Ch1 Output7 ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.184	Zone 3 N Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Zone 3 C Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Started Phase N ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Zone 2 N Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Any Start ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Started Phase C ON
Saturday 05 November 2022 15:13:32.183	Zone 2 C Start ON
Sunday 27 March 2022 14:04:27.679	Logic Inputs 1

Şekil 4.6. Mesafe koruma rölesi olay kayıtları örneği

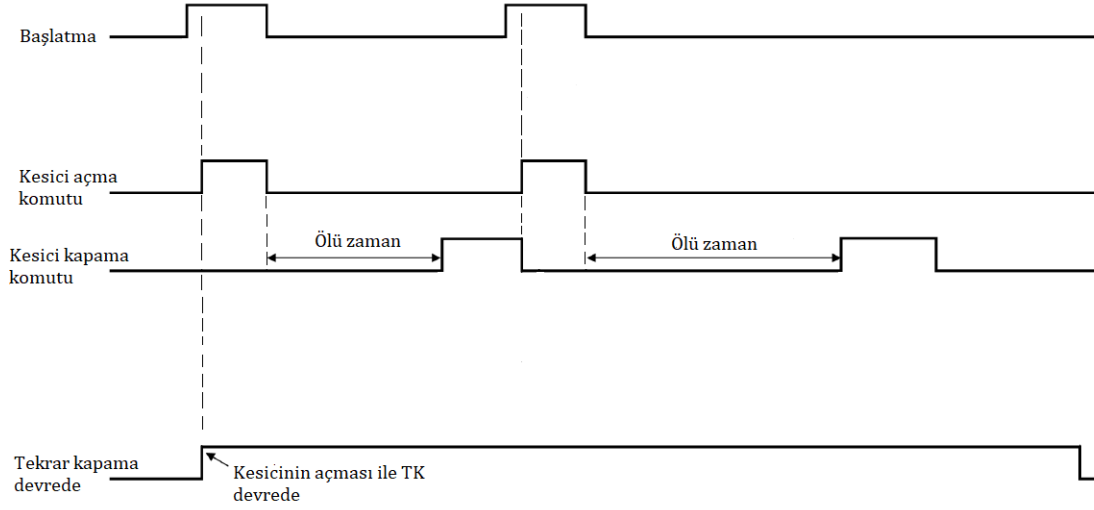
4.8. Otomatik Tekrar Kapama Fonksiyonu

Havai iletim hatlarında meydana gelen arızaların büyük çoğunluğu geçici arızalardan oluşmaktadır. Geçmişten günümüze arıza kayıtları incelendiğinde oluşan arızaların yaklaşık % 90'ında arıza anında ortaya çıkan arkın arıza temizlendikten sonra kendiliğinden ortadan kalktığı görülmektedir. Örneğin; yıldırım, anlık hayvan veya canlı teması gibi kısa devreye sebebiyet veren olaylarda kesici üzerinde bir veya birkaç açma – kapama işlemi, oluşan kısa devre arızasını sönmölemekle yeterli olmaktadır. Bu yüzden sistem kararlılığının devamı, enerjisiz sürenin en aza indirilmesi gibi nedenlerden dolayı havai iletim hatlarında mesafe koruma rölesi içerisindeki otomatik tekrar kapama fonksiyonu kullanılmaktadır.

Sistemde kullanılan kablo hatları, transformatörler ve reaktör gibi teçhizatlarda oluşan kısa devre arızalarında otomatik tekrar kapama fonksiyonu kullanılmamaktadır. Bu teçhizatlar üzerinde oluşacak bir kısa devre arızasında kesicinin ilk açması sonrasında kesici tekrar kapatılmak istendiğinde eğer kısa devre arızası devam ediyorsa öncelikle bu teçhizatlar üzerinde yanma, patlama gibi kalıcı etkiler doğurabilmektedir. Ancak havai iletim hatlarının açık hava şartlarında olması; bu hatların cisim temasına, yıldırıma, buz yüküne ve daha birçok geçici kısa devre oluşturabilecek duruma açık olması anlamına gelmektedir. Havai iletim hatlarının konumu itibari ile maruz kaldığı arızalara bakıldığında aslında çoğunun geçici arıza olduğu görülmektedir. O yüzden otomatik tekrar kapama fonksiyonu sadece havai iletim hatlarında kullanılmaktadır. Ancak çok uzun havai iletim hatlarında, seri kapasitörlü ve radyal hatlarda otomatik tekrar kapama kullanılması tavsiye edilmemektedir. Çünkü havai iletim hatlarının uzunluğu arttıkça kapasitif kayıplar arttığı için kısa devre sonrası oluşan arkın sönmölenmesi çok güç hale gelebilmektedir.

Otomatik tekrar kapama fonksiyonu, hem tek faz tekrar kapama hem de 3 faz tekrar kapama şeklinde çalışabilmektedir. Bu noktada havai iletim hattı tesis edilirken tek faz açma ve kapama yapabilen uygun kesicilerin seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Çünkü yukarıda geçici arızalar olarak nitelendirilen arızalar faz – toprak arızalarıdır. Yani otomatik tekrar kapama fonksiyonu çoğunlukla tek faz tekrar kapama olacak şekilde çalışmaktadır. Aynı zamanda otomatik tekrar kapama fonksiyonu dahilinde kesicinin kaç

kez otomatik tekrar kapama yapacağı da seçilebilmektedir. Şekil 4.7.'de bir havai iletim hattında otomatik tekrar kapama fonksiyonunun gerçekleşme süreci yer almaktadır.



Şekil 4.7. Otomatik tekrar kapama süreci lojik şeması

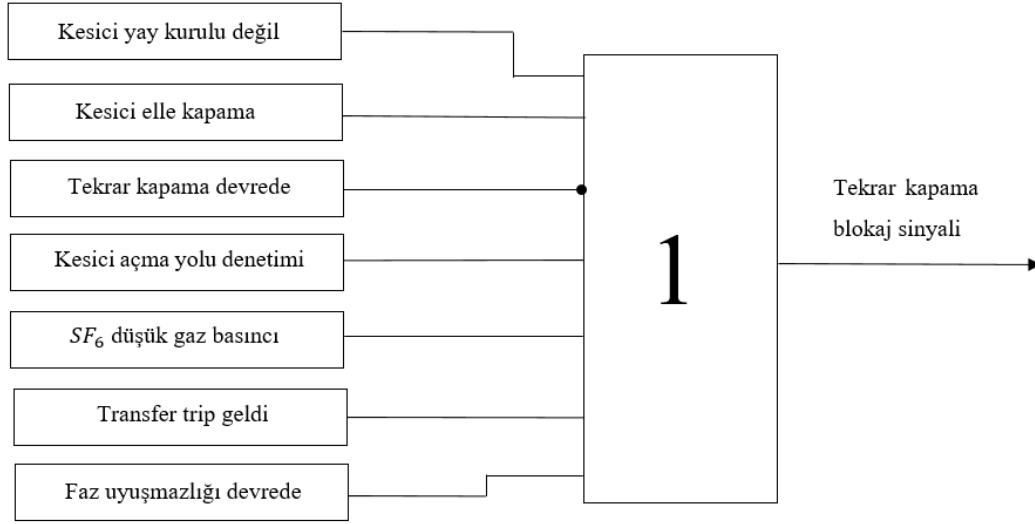
Şekil 4.7.'de gösterilen sinyaller incelendiğinde; mesafe koruma rölesinde ayarlanan otomatik tekrar kapama fonksiyonu art arda 2 kez kapama komutu gönderdiği görülmektedir. Mesafe koruma rölesi oluşan arızayı gördüğünde ilk önce başlatma sinyalini oluşturmaktadır. Hemen ardından arızanın devam etmesi ile birlikte kesiciye açma komutu göndermektedir. Mesafe koruma rölesinin kesiciye açma komutu gönderdiği anda otomatik tekrar kapama süreci başlamaktadır. Kesici açma işlemi tamamlandıktan sonra ölü zaman ismi ile nitelendirilen otomatik tekrar kapama fonksiyonunun kesiciye kapama komutu göndereceği süreye kadar geçen süreç başlamaktadır. Ölü zaman sonunda otomatik tekrar kapama fonksiyonu kesiciye ilk kapama komutunu göndermektedir. Bu sürece kadar geçen zamanda eğer arıza temizlenmiş ise kesici kapalı bir şekilde kalmakta ve otomatik tekrar kapama süreci başarılı bir şekilde sonlanmaktadır. Ancak ilk TK sonrasında arıza devam eder ve kesiciye yine açma komutu giderse tekrar bir ölü zaman süresi sonunda otomatik tekrar kapama fonksiyonu kesiciye kapama komutu göndermekte ve arıza genellikle temizlenmiş olduğu için kesici kapalı kalarak otomatik tekrar kapama süreci yine başarılı bir şekilde sonlanmaktadır. Eğer arıza ikinci otomatik tekrar kapama yapılması sonunda da devam ediyorsa mesafe koruma rölesi bu arızanın artık kalıcı arıza olduğunu değerlendirerek kesiciye 3 faz açma komutu göndermektedir.

Aslında ölü zaman ismi ile nitelendirilen zaman; oluşan arızada kesiciye gönderilen ilk açma komutu ile kesicilerin açma işlemini gerçekleştirdikten sonra açma bilgisini kesicinin yardımcı kontakları üzerinden iletilmesi ile otomatik tekrar kapama komutunun başlatılmasına kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Bu süre kullanıcı tarafından belli parametreler gözetilerek belirlenmektedir. Otomatik tekrar kapama fonksiyonunun ard arda kaç kez kullanılacağı, bu fonksiyonun kullanıldığı havai iletim hattının gerilim seviyesi, kullanılan otomatik tekrar kapamanın kaç faza uygulandığı gibi parametreler bu sürenin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Ölü zaman süresi asgari olarak, kısa devre sırasında oluşan arkın sönme süresinden yüksek olmalıdır ki otomatik tekrar kapama esnasında hatta oluşan ark sönmülenebilsin ve sonrasında hat kapatılabilsin. Bu sürenin azami sınırı ise hattaki fazların kendi aralarında senkronizasyonunu yitirmeyecek, şebeke kararlılığını tehlikeye düşürmeyecek miktarda olmalıdır. Ölü zaman süresinin belirlenmesinde bir diğer dikkat edilmesi gereken husus ise kesicilerin üzerinde bulunan faz uyuşmazlığı rölesidir. Faz uyuşmazlığı rölesinin açma zamanı, otomatik tekrar kapamanın sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için ölü zaman süresinden bir miktar fazla olması gerekmektedir. Ölü zaman süreleri her bir otomatik tekrar kapama çevrimi için ayrı ayrı ayarlanabilmektedir.

Otomatik tekrar kapama fonksiyonunun ne tür arızalarda çalışacağı kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Örneğin karşı transformatör merkezinden koruma haberleşmesi üzerinden gelen açma sinyallerinde de otomatik tekrar kapama fonksiyonu aktif veya pasif edilebilmektedir. Arızanın, mesafe koruma rölesinin hangi koruma kademe bölgesinde gerçekleştiğine göre de otomatik tekrar kapama fonksiyonu aktif veya pasif edilebilmektedir. Örneğin otomatik tekrar kapama fonksiyonu sadece kademe 1 (Z_1) bölgesinde aktif edilebilir. Otomatik tekrar kapamanın hangi fazlarda yapılacağı komütatöre getirilen sekonder kablay ile kullanıcı tarafından seçilebilmektedir.

Otomatik tekrar kapama fonksiyonunun havai iletim hatları için her durumda kullanılması uygun değildir. İletim sisteminde meydana gelen farklı durumlar tekrar kapama fonksiyonunun çalışmamasını gerektirebilmektedir. Bu durumların önceden tespit edilip otomatik tekrar kapama fonksiyonuna blokaj oluşturacak şekilde düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Bu düzenleme işlemi yine mesafe koruma rölesindeki otomatik tekrar kapama fonksiyonu sayesinde yapılabilmektedir. Otomatik tekrar kapama

fonksiyonunun bloklanması için bir takım sinyaller Şekil 4.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Otomatik tekrar kapama blokaj sinyalleri blok diyagramı

Otomatik tekrar kapamayı gerçekleştirecek olan kesicinin çok kısa sürede açma işlemini gerçekleştiren yay mekanizması kurulu değilse bu kesicinin kapatılması istenmemektedir. Çünkü olası bir kısa devre arızasında kesicinin açması gerektiğinde yay mekanizmasındaki bir arızadan dolayı açma işlemini gerçekleştirememeye ihtimaline karşın yay kurulu değil sinyali geldiğinde otomatik tekrar kapama fonksiyonu bloklanmaktadır. Aynı durum kesici yolu denetimi için de düşünülmelidir. Elektrik iletim sisteminde bu yol kesici açma yolu denetim röleleri vasıtasıyla her an denetlenmektedir. Bu yolda oluşacak bir iletilimsizlik veya arıza durumunda kesici açılmak istendiğinde açılması mümkün olmayacaktır. Kesiciyi açmanın mümkün olmadığı her durumda otomatik tekrar kapama fonksiyonunun bloklanması gerekmektedir. Kesicinin, komütatör anahtarı üzerinden tek faz olarak açma veya kapama yapılması istenmemektedir. Kesici komütatör anahtarı üzerinden 3 faz açılır ve kapatılır. Bu işlem de bir arıza sonrası gerçekleşmemektedir. Genellikle bu işlem bir bakım çalışması için veya emniyet amaçlı hattı enerjisiz bırakılmasının gerektiği zamanlarda yapılmaktadır. Bu yüzden mesafe koruma rölesine kesici elle kapama sinyali geldiğinde otomatik tekrar kapama yapılması istenmemektedir. Dolayısıyla otomatik tekrar kapama fonksiyonu bloklanmaktadır. Meydana gelen kısa devre arızasından sonra kesicinin açması ile bir otomatik tekrar kapama süreci başlatılmaktadır. Otomatik tekrar kapama fonksiyonunun devrede olup olmamasına kullanıcı tarafından karar verilmektedir. Bu karar, mesafe koruma röle

panosuna yerleştirilen otomatik tekrar kapama komütatör anahtarı yoluyla yapılmaktadır. Eğer kullanıcı otomatik tekrar kapama komütatör anahtarında devrede değil olarak seçmiş ise mesafe koruma rölesinin otomatik tekrar kapama yapması istenmemektedir. Bunu da otomatik tekrar kapama fonksiyonunu bloklayarak yapmaktadır.

Bazı kesiciler kısa devre anında oluşan arkı SF_6 gazı sayesinde söndürmektedir. Bu tür kesiciler ise gaz izoleli şalt sahalarında kullanılmaktadır. Bu kesici türlerinde bulunan SF_6 gazının seviyesi sürekli olarak ölçü aletleri vasıtasıyla ölçülmektedir. Genellikle düşük basınç, normal basınç ve yüksek basınç olmak üzere 3 adet kademesi bulunmaktadır. SF_6 gazlı kesiciler düşük basınç durumunda iken oluşan kısa devre arkını yeterli miktarda söndürememektedir. Kısa devre sonrası ortaya çıkan arkın sağlıklı bir şekilde söndürülebilmesi için SF_6 gaz basıncı düşük olduğu durumlarda otomatik tekrar kapama yapılması istenmemektedir. O yüzden SF_6 gaz basıncı düşük sinyali ile otomatik tekrar kapama fonksiyonu bloklanmaktadır.

Karşı merkezdeki bara koruma rölesinin açma yapması sonucu diğer merkeze transfer trip gönderilebilir. Bu tip durumlarda karşı merkezde arıza giderilemediği için çalışan bara koruma rölesi olduğu için otomatik tekrar kapama fonksiyonunun çalışması istenmemektedir. Dolayısıyla transfer trip sinyali ile otomatik tekrar kapama fonksiyonu bloklanmaktadır.

Mesafe koruma rölesinde istenilen otomatik tekrar kapama fonksiyonu sonrasında fonksiyonun tekrar aktif olabilmesi için geçen süreye toparlanma süresi denilmektedir. Toparlanma süresi sonunda otomatik tekrar kapama fonksiyonunun tüm elemanları kendi normal pozisyonlarına geri dönmektedir. Toparlanma süresi sonunda ortaya çıkan bir kısa devre arızasını fonksiyon yeni bir arıza olarak düşünmektedir. Kullanıcının ard arda birden fazla otomatik tekrar kapama istemediği durumlarda sistem parametrelerine göre istenilen süreye ayarlanabilen toparlanma süresi geçene kadar otomatik tekrar kapama fonksiyonu çalışmamaktadır.

Türkiye elektrik iletim sisteminde otomatik tekrar kapama fonksiyonunun ne şekilde kullanıldığı aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Otomatik tekrar kapama fonksiyonu sadece faz – toprak arızalarında kullanılmaktadır,

- Arızadan sonra sadece 1 kez otomatik tekrar kapama denemesi yapılmaktadır,
- Toparlanma süresi kesici karakteristiği baz alınarak 60 ile 180 saniye aralığında ayarlanmaktadır,
- 200 km'den uzun, seri kapasitörlü ve radyal hatlarda otomatik tekrar kapama fonksiyonu devreye alınmamaktadır,
- Yer altı kablo fiderleri ve uzunluğunun %25'inden fazlası yer altı kablosu olan havai iletim hatlarında otomatik tekrar kapama fonksiyonu devreye alınmamaktadır,
- 154 kV havai iletim hatlarında otomatik tekrar kapama fonksiyonu ölü zaman süresi 1 saniye, 380 kV havai iletim hatlarında ise otomatik tekrar kapama süresi 1,5 saniye olarak belirlenmektedir.

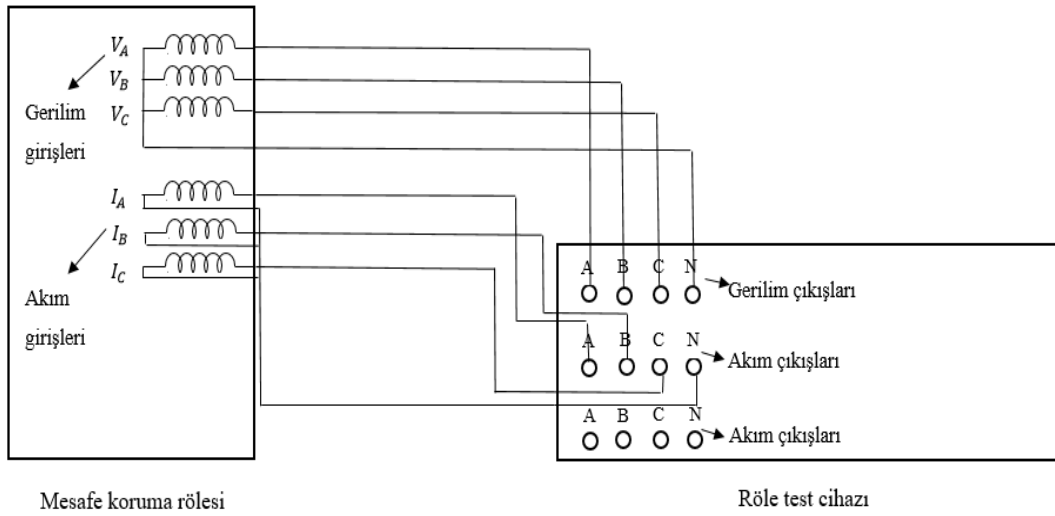
4.9. Mesafe Koruma Rölesi Testi

Mesafe koruma röleleri kullanılacakları havai iletim hattının parametrelerine göre programlanmaktadır. Programlandıktan sonra sahada devreye alınmadan önce bir dizi testlere tabi tutulmaktadır. Bu testlerde mesafe koruma rölesinde arıza oluşturulabilmesi için belli miktarda akım ve gerilim üretebilen röle test cihazları kullanılmaktadır. Testlerde her koruma kademe bölgesinin hem içinde hem de dışında arızalar oluşturulmaktadır. Bu arızalar, test cihazından üretilebilen akım ve gerilim değerlerindeki düzenlemelerle sağlanmaktadır. Bu sayede gerçek arıza durumunda oluşabilecek arıza empedansı değerleri elde edilebilmektedir. Bir röle test cihazı genellikle aşağıda verilen unsurlardan oluşmaktadır:

- Gerilim çıkışları,
- Akım çıkışları,
- İkili ve analog girişler,
- İkili çıkışlar,
- DC gerilim çıkışı,
- Ethernet portu.

Mesafe koruma rölelerinin arıza durumu olup olmadığına karar vermesini sağlayan sahadan akım ve gerilim transformatörleri vasıtasıyla aldığı akım ve gerilim bilgileridir. Dolayısıyla bu bilgiler mesafe koruma rölelerinin içeriğinde bulunan akım ve gerilim girişlerine girmektedir. Mesafe koruma röleleri test edilirken sahadaki akım ve gerilim

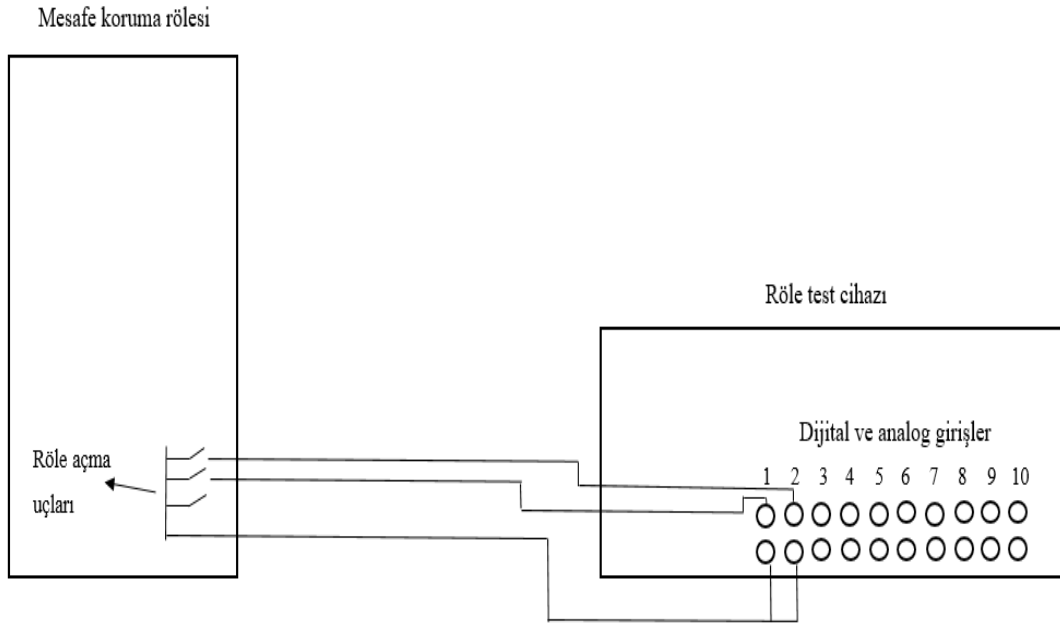
transformatörlerinden gelen bu akım ve gerilim girişleri sökülerek ayrılır. Sökülen akım ve gerilim girişleri yerine röle test cihazının çıkış uçlarındaki akım ve gerilim girişleri bağlanmaktadır. Bu durum Şekil 4.9.'da gösterilmektedir. Bu gösterilen bağlantılar yapıldıktan sonra dolayısıyla istenilen seviyede arıza empedansı oluşturulmaktadır. Aynı zamanda istenilen fazlardan akım ve gerilim uygulanabildiği için arıza türü de belirlenebilmekte, kullanıcının isteğine göre faz – faz veya faz – toprak arızalar oluşturulabilmektedir.



Şekil 4.9. Röle test cihazı akım ve gerilim bağlantıları

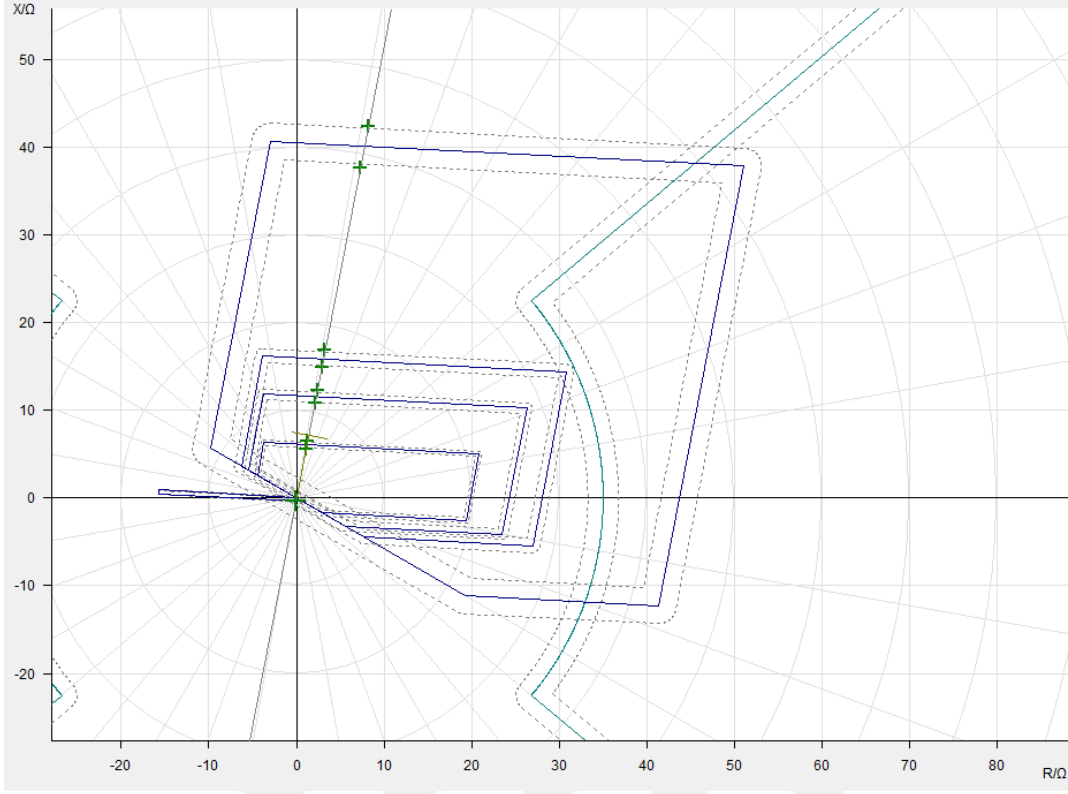
Röle test cihazlarında kullanıcı bilgisayarlarıyla bağlantı kurabilmesi için genellikle ethernet portu bulunmaktadır. Bu ethernet portu sayesinde kullanıcı, test cihazı arayüz programına bilgisayar ortamında erişebilmektedir. Bu arayüz programında ise mesafe koruma rölesine uygulanmak istenen akım ve gerilimlerin yönü ve miktarları belirlenmektedir. Örneğin 1. kademe koruma bölgesi (Z_1) test edilmek istendiğinde; bu kademe empedans değerinin altında bir empedans değeri ve hat empedansına uygun yönü test cihazına girilmektedir. Test cihazı, bu empedans değerini oluşturabilecek akım ve gerilim değerlerini kendisi hesaplayarak mesafe koruma rölesinin akım ve gerilim girişlerine Şekil 4.9.'daki gibi bağlanarak akım ve gerilim uygulamaktadır. Bu sayede mesafe koruma rölesi devreye alındığında gerçekten bu kademeden empedans bölgesine girebilecek bir kısa devre akımı oluştuğunda mesafe koruma rölesinin ne tepki vereceği test edilmektedir. Bu yöntem diğer kademe koruma bölgeleri için de aynı şekilde uygulanmaktadır.

Mesafe koruma rölesi test esnasında test cihazından verilen arıza akımlarına göre açma komutları üretmektedir. Bu açma komutları üretildiği anda test cihazından verilen arıza akımlarının kesilmesi gerekmektedir. Çünkü arıza akımı uygulandıktan ve mesafe koruma rölesi açma komutu ürettikten sonra kesicide fiziksel bir sorun olmadığı müddetçe arızanın temizlenerek arıza akımının devam etmemesi gerekmektedir. Bu senaryoyu koruyabilmek için mesafe koruma rölesi açma kontaklarından röle test cihazına bağlantı yapılmaktadır. Mesafe koruma rölesi açma sinyali ürettiğinde kontak değiştiren açma uçlarını röle test cihazından dijital girişlere bağlanmaktadır. Bu sayede mesafe koruma rölesi açma ürettiğinde röle test cihazından mesafe koruma rölesine akıtılan akım kesilmektedir. Bu durumu ifade eden bağlantılar Şekil 4.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Mesafe koruma rölesi açma ucu bağlantıları

Mesafe koruma rölesi test aşamasına getirildikten sonra içerisinde röle ayarları belli usüllerle istenilen dosya formatında alınabilmektedir. Alınan bu mesafe koruma rölesi ayarları, bazı röle test cihazlarına belli dosya formatlarında aktarılabilir. Bu sayede test edilecek mesafe koruma rölesinin empedans karakteristiği (X – R grafiği) test cihazı aracılığı ile istenilen empedans karakteristiği türünde elde edilmektedir. Bu usulle elde edilebilen empedans grafiği örneği Şekil 4.11.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Röle test cihazı empedans karakteristiği

Şekil 4.11.'de gösterilen empedans karakteristiği üzerinden istenilen noktada arıza empedansı oluşturularak mesafe koruma rölesi test edilebilmektedir.

Mesafe koruma rölesinin kademe koruma bölgeleri dışında mesafe koruma rölesi fonksiyonlarının da test edilmesi gerekmektedir. Test cihazında oluşturulmak istenilen arızanın arıza öncesi ve sonrası süreleri ile arıza süresi gibi parametreler belirlenebilmektedir. Arıza öncesi ve sonrası süreleri ile arıza süresinin uygun belirlenip art arda oluşturulacak bir arızada otomatik tekrar kapama fonksiyonu ile ölü zaman süresi içerisinde ikinci bir arızadaki davranışları kolaylıkla görülebilmektedir. Bu yolla röle test cihazı vasıtasıyla; güç salınımı, yük körleştirme, arıza üzerine kapama, otomatik tekrar kapama, kopuk iletken gibi mesafe koruma rölesi fonksiyonlarının da devreye almadan önce test edilmesi gerekmektedir.

5. MESAFE KORUMA RÖLELERİNDE ARIZA NOKTASI TESPİTİNİ ETKİLEYEN DURUMLARIN İNCELENMESİ

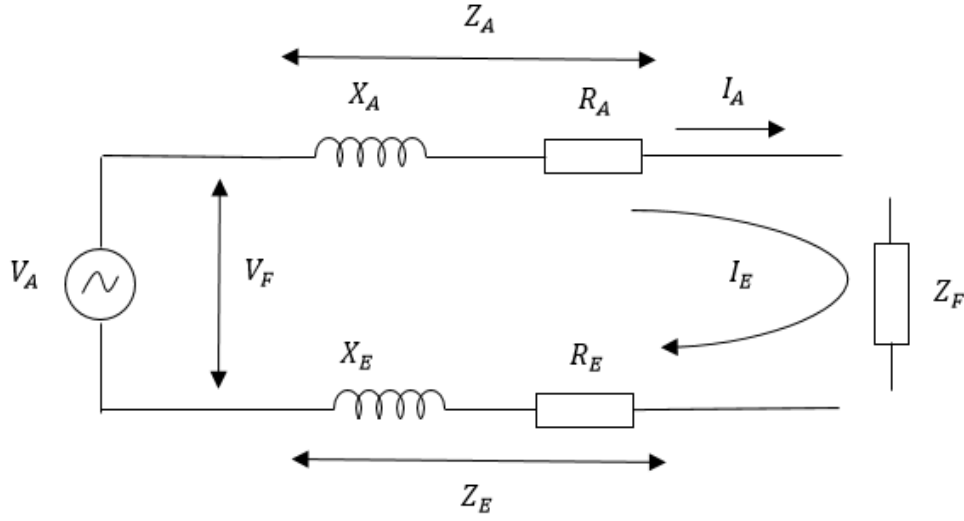
Mesafe koruma rölesi akım ve gerilim transformatörlerinden gelen akım ve gerilim bilgilerini işleyebilmektedir. Analog girişlerden alınarak örneklenen akım gerilim bilgileri bir arıza durumu tespit edilene kadar döngüsel bir bellekte tutulur. Arıza tespit edildiğinde arıza yerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Mesafe koruma röleleri arıza tespitini empedans hesabı ile yapmaktadır. Dolayısıyla empedans hesabını iyi bir şekilde yapmak ve empedans ölçümüne etki eden parametreleri incelemek doğru arıza noktası tespiti için büyük önem arz etmektedir.

5.1. Arıza Noktası Tespitini Etkileyen Faktörler

Mesafe koruma rölesi arıza noktası tespitinin doğruluğunu etkileyen birtakım parametreler bulunmaktadır. Arıza direnci, çift taraflı beslemeler, iletim hattının simetrisi, direk tipi, hattın geometrisi, hattın çift veya tek devre olma durumu, paralel hat tesisi, topraklama iletkeni, transformatör topraklaması gibi parametreler ölçülen arıza empedansını dolayısıyla tespit edilecek arıza noktasının mesafe menzilini artırıcı veya azaltıcı yönde etkileyebilmektedir.

5.1.1. Arıza Direnci

Havai iletim hatlarında arızasız normal çalışma koşullarında endüktif ve rezistif iletim hattına ait dirençler bulunmaktadır. Arıza anında bu dirençlere ek olarak eğer arıza faz – faz arızası ise R_{ark} , eğer arıza faz – toprak arızası ise R_E sembolleri ile nitelendirilen seri dirençler oluşmaktadır. Oluşan bu dirençlere genel olarak Z_F sembolü ile nitelendirilen arıza empedansı denilmektedir. Faz – faz arızalarında meydana gelen ark direnci daha önceden belli hesaplama yöntemleriyle yaklaşık bir değer olarak hesaplanıp mesafe koruma rölesine girilebilmektedir. Arızanın meydana geldiği fazların empedans değerleri sabittir ve değişmemektedir. Dolayısıyla ark direnci, arıza noktası tespiti üzerinde çok fazla belirsiz bir etki bırakmamaktadır. Ancak faz – toprak arızalarında meydana gelen arıza direnci arızayı meydana getiren teçhizata göre farklılık gösterebilir. Şekil 5.1.’de tek kaynaktan beslenen faz – toprak arızası için ilgili empedanslar gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Tek taraftan beslenen toprak arızası empedans şeması

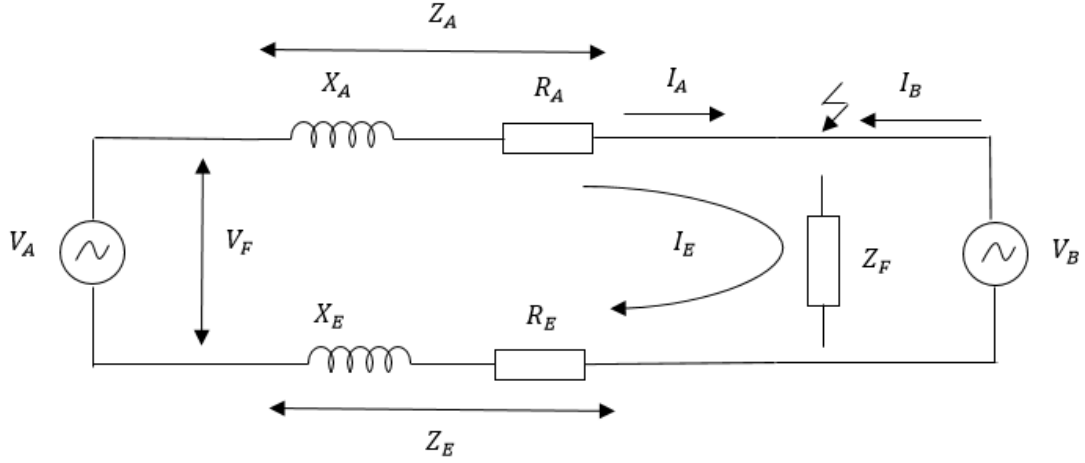
Bu tür arızalarda hat empedansı ile toprak empedansı arasındaki ilişki olan K_{ZN} toprak düzeltme faktörü kullanılması gerekmektedir. Aslında bu düzeltme faktörünün kullanılması Şekil 5.1.'de gösterilen, arıza öncesinde değeri bilinmeyen X_E ve R_E empedanslarını, hat empedanslarının bileşenleri cinsinden ifade etmemize olanak tanımaktadır. Z_{0L} korunan hattın sıfır bileşen empedansı, Z_{1L} korunan hattın pozitif bileşen empedansı olmak üzere toprak düzeltme katsayısı Denklem (5.1)'de verilmektedir.

$$K_{ZN} = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \quad (5.1)$$

Dolayısıyla Z_R arıza anında röle tarafından okunan empedans değeri, V_F arıza gerilimi, I_{hat} fazdan akan kısa devre akımı, I_E toprak arıza akımı olmak üzere arıza anında röle tarafından okunacak empedans Denklem (5.2)'de verilmektedir.

$$Z_R = \frac{V_F}{I_{hat} + K_{ZN} I_E} \quad (5.2)$$

Çift kaynaktan beslenen havai iletim hatları için durum daha farklıdır. Bu durumda diğer taraftaki kaynaktan da arıza beslenmekte ve karşı kaynaktan akan arıza akımı da gerilim düşümüne neden olmakta ve bu gerilim düşümü de arıza anında mesafe koruma rölesi tarafından okunan arıza empedansını ciddi miktarda değiştirmektedir. Bu durum Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Çift taraftan beslenen toprak arızası empedans şeması

Tek taraftan beslenen toprak arızası durumuna göre bu kez arıza direnci üzerinden hem I_A akımı hem de I_B akımı akmaktadır. Dolayısıyla mesafe koruma rölesi tarafından okunacak empedans artmaktadır. Z_R' çift taraftan beslenen toprak arızasında mesafe koruma rölesi tarafından okunacak empedans olmak üzere bu artışa ilişkin ifade Denklem (5.3)'de verilmektedir.

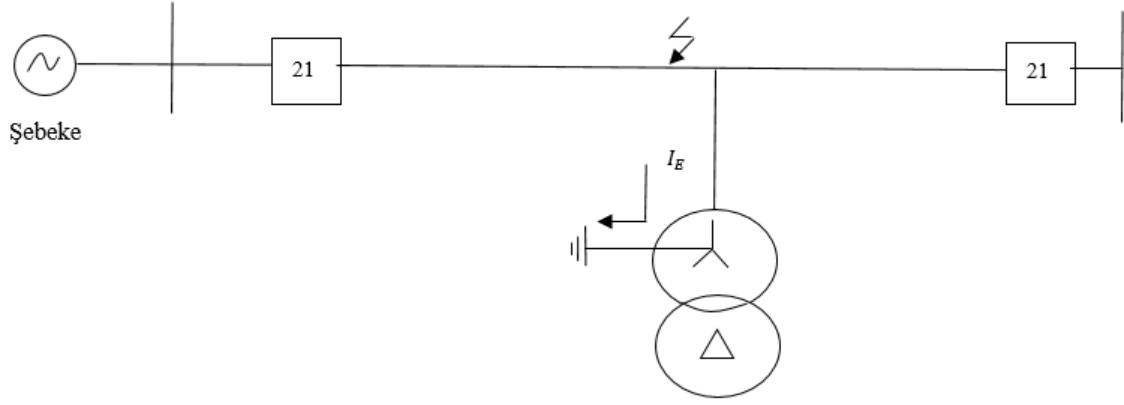
$$Z_R' = Z_R + Z_F \frac{I_B}{I_A} \quad (5.3)$$

Buradaki artış rezistif karakteristikli arıza direncinde meydana gelmektedir. Endüktans üzerinde çok küçük bir etkisi vardır. Bu nedenden dolayı mesafe koruma rölelerindeki X – R empedans karakteristiklerinden quadrilateral (dörtgen) empedans karakteristiği kullanılmaktadır.

Mesafe koruma rölesinin arıza noktası tespitinde bir ölçüt olan arıza direnci, özellikle karşı taraftan yüksek güçlerle beslenen uzun havai iletim hatları için etkilidir. Bu etki durumu, arıza noktası hattın karşı tarafındaki besleme noktasına yaklaştıkça artmaktadır.

5.1.2. Topraklanmış Transformatör

Havai iletim hattında bulunan transformatörlerin topraklanması sıfır bileşen akımı için bir şebeke haline gelmektedir. Transformatörde akacak bir toprak akımı havai iletim hattında bir gerilim düşümü meydana getirmektedir. Dolayısıyla mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen arıza empedansını etkilemektedir. Bu durum Şekil 5.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Topraklanmış transformatörün arıza empedansına etkisi

5.1.3. İletim Hattının Simetri Durumu

Mesafe koruma rölesi ve arıza yeri tespit fonksiyonu iletim sisteminin simetrik bir biçimde tasarlandığını ve çalıştığını varsayarak çalışmaktadır. Ancak sahada, iletim hatlarının simetrisini bozan birtakım durumlar bulunmaktadır. Bunlar; topraklama iletkeninin kullanılma durumu kullanılması halinde sayısı, havai iletim hatlarındaki fazlar arasındaki mesafe, topraklama iletkeni ile fazlar arasındaki mesafe, dengesiz yüklenmeler gibi durumlar olarak gösterilmektedir.

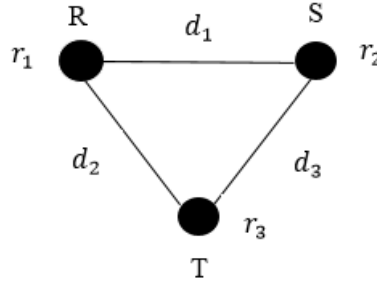
5.1.4. Hat Parametreleri ve Aynı Direkte Paralel Hat Olması Durumu

İletim hatlarının karakteristik özelliklerine göre değişen hat parametreleri bulunmaktadır. Bunlar; iletkenin kendisi nedeniyle oluşan omik direnç, faz – toprak arasındaki kaçak akımlardan dolayı meydana gelen kondüktans, iletkenlerin çevresinde oluşan değişken manyetik alan etkisi nedeniyle endüktans ve iletkenler arası meydana gelen elektrik alan etkisi sebebiyle kapasitans olarak isimlendirilebilir. Kondüktans ve kapasitansın iletim hattının empedans miktarına etkisi az olduğu için genellikle hesaplamalarda ihmal edilebilir.

İletken direnci, sıcaklıkla ters orantılı olarak azalmaktadır. R omik direnç, l iletken uzunluğu, K_i iletkenlik katsayısı, S iletkenin kesiti olmak üzere Denklem (5.4)'teki bağıntı ile bulunabilir.

$$R = \frac{l}{K_i S} \quad (5.4)$$

İletken endüktansı havai iletim hattında değişken bir şekilde akan akımın ürettiği manyetik alan nedeniyle oluştuğu için öncelikle GMD (geometrical mean distance) ve GMR (geometrical mean radius) olarak isimlendirilen geometrik olarak iletkenler arası uzaklık ile iletkenlerin geometrik ortalama yarıçaplarının hesaplanması gerekmektedir. Şekil 5.4.'de aralarında d_1 , d_2 , d_3 kadar mesafe olan ve yarıçapları sırasıyla r_1 , r_2 , r_3 olan 3 fazlı bir iletim hattı gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Üç fazlı iletim sisteminde GMD

İletkenler arası geometrik uzaklık olan GMD Denklem (5.5)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$GMD = \sqrt[3]{d_{RS}d_{ST}d_{RT}} = \sqrt[3]{d_1d_2d_3} \quad (5.5)$$

İletkenler arası geometrik ortalama yarıçap olan GMR ise Denklem (5.6)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$GMR = \sqrt[3]{r_1r_2r_3} \quad (5.6)$$

Dolayısıyla kullanılan iletim hattının bobin endüktansı Denklem (5.7)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad (5.7)$$

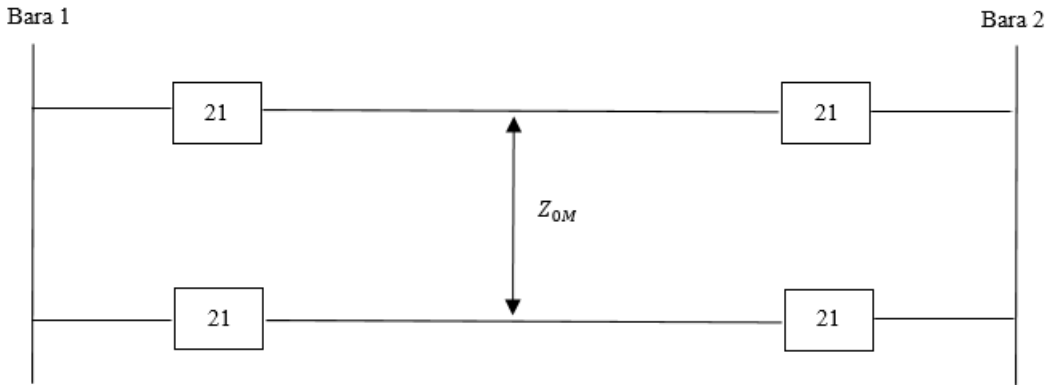
X_L iletim hattının endüktif hat empedansı ve f şebeke frekansı olmak üzere Denklem (5.8)'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$X_L = 2\pi fL \quad (5.8)$$

5.2. Aynı Direkteki Paralel İletim Hatlarında Karşılıklı Ortak Empedans Etkisinin İncelenmesi

Üç faz havai iletim hatları, tüm uzunlukları boyunca veya uzunluklarının belli bir kısmı paralel olacak biçimde tesis edilmektedir. Ülkemizde olduğu gibi diğer ülkelerin elektrik iletim sisteminde de paralel hatlar kullanılmaktadır. Bu durum hem işçilik kolaylığı hem de ekonomik olarak ciddi oranda tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Ancak paralel olarak tesis edilen havai iletim hatlarının birbirleri arasında birtakım karşılıklı ortak empedans etkileri görülmektedir. Pozitif bileşen empedansında, bu etki ihmal edilebilecek kadar az olsa da sıfır bileşen empedansında bu etki daha fazla görülür. Bu durum göz ardı edildiğinde mesafe koruma rölesinin arıza noktası tespitinde ciddi hatalar meydana gelmektedir.

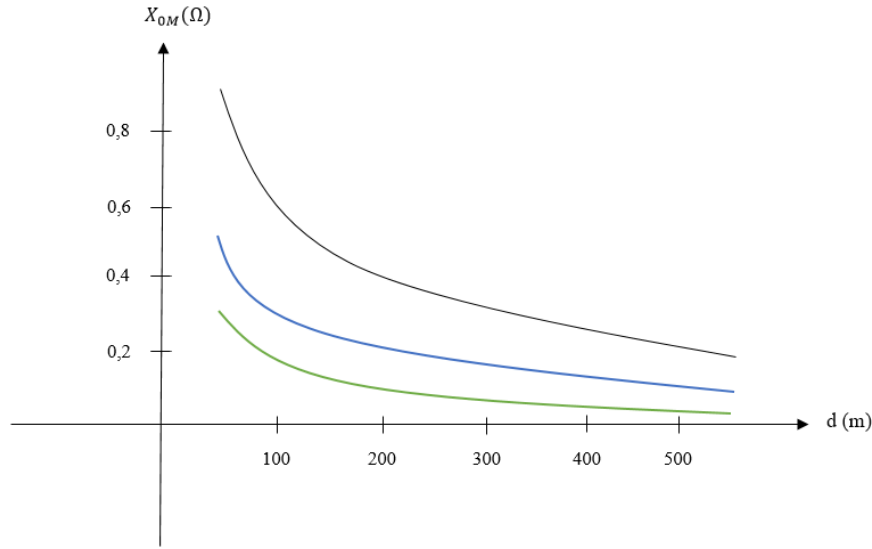
Paralel iletim hatlarının; aynı baradan çıkıp aynı baraya girmesi, paralelindeki hattın enerjili olup olmaması, aralarındaki mesafe, tesis edildikleri direk tipi, paralel iletim hattını taşıyan direklerde topraklama iletkeninin varlığı gibi birçok faktör paralel iletim hatlarında meydana gelen ortak empedans etkisini farklı oranlarda etkilemektedir. Z_{0M} paralel iletim hatlarında oluşan karşılıklı ortak empedans olmak üzere Şekil 5.5.'de ülkemizde sıkça kullanılan aynı baradan çıkıp aynı baraya giren paralel iletim hattının şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Aynı baralardaki paralel iletim hattı şeması

Elektrik iletim sistemlerinde topraklama iletkenlerinin; haberleşme, yıldırım etkilerinden koruma gibi görevleri olsa da aynı zamanda meydana gelen kısa devre akımlarının bir kısmı bu topraklama iletkeni üzerinden toprağa akmaktadır. Dolayısıyla topraklama iletkeni varlığı, paralel iletim hatlarında ortaya çıkan ve arıza noktası belirlenmesini

olumsuz yönde etkileyen karşılıklı ortak empedans etkisini azaltmaktadır. Siyah eğri direklerde topraklama iletkeninin hiç olmadığı, mavi eğri topraklama iletkeninin 1 adet olduğu, yeşil eğri topraklama iletkeninin 2 adet olduğu durumları temsil etmek üzere Şekil 5.6.'da paralel iletim hatları arasındaki mesafeye bağlı olarak topraklama iletkeninin ortak empedans miktarına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Topraklama iletkeninin ortak empedansa etkisi

Paralel iki iletim hattında oluşan ortak empedans etkisinin hesaplanabilmesi için toprak direnci, toprak özgül direnci, açısal frekans, iki iletim hattı arasındaki geometrik uzaklık gibi parametrelerin hesaplanması gerekmektedir.

ω açısal frekans, f şebeke frekansı olmak üzere açısal frekans formülü Denklem (5.9)'da verilmektedir.

$$\omega = 2\pi f \quad (5.9)$$

R_T toprak direnci olmak üzere Denklem (5.10)'daki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$R_T = \frac{\pi}{2} \omega 10^{-4} \quad (5.10)$$

δ giriş derinliği, ρ toprak özgül direnci olmak üzere Denklem (5.11)'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

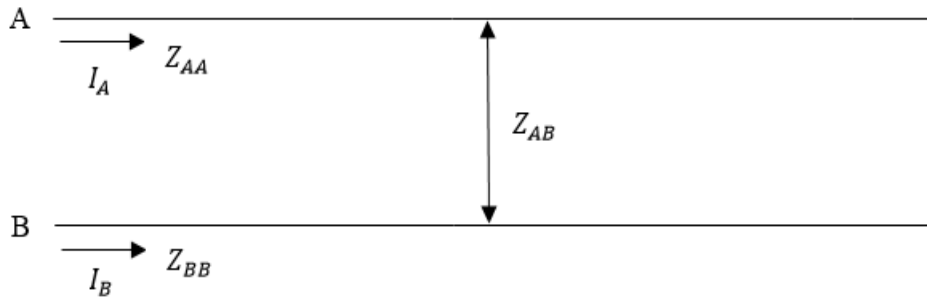
$$\delta = \sqrt[2]{\frac{\rho}{\omega}} 1650 \quad (5.11)$$

Topraklama iletkeni bulunmayan iki iletim hattının birbirlerine olan karşılıklı ortak empedans etkisi Denklem (5.12)'deki bağıntı ile hesaplanabilir. (Ziegler, 2011)

$$Z_{0M} = (3R_T + 6j\omega \ln \frac{\delta}{GMD}) 10^{-4} \quad (5.12)$$

Denklem (5.12)'deki ilişkiden paralel iletim hatları arasındaki mesafe arttıkça havai iletim hatlarının ortak empedans etkisi logaritmik olarak azaldığı görülmektedir.

Havai iletim hatlarını taşıyan direklerde topraklama iletkeni kullanılması durumunda karşılıklı ortak empedans hesabında topraklama iletkeni etkisinin de hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir. Literatüre Carson formülü olarak geçen ve bu formüle dayalı türetilen denklem ve matris sistemleri bulunmaktadır. Buna göre uzay boşluğunda aralarında belli bir mesafe bulunan iki iletken için oluşan empedanslar Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. İki iletken arasında oluşan karşılıklı ve öz empedans şeması

Şekil 5.7.'de gösterilen Z_{AA} ve Z_{BB} empedansları iletkenlerin kendi öz empedanslarıdır. Z_{AB} empedansı ise iki iletkenin etkileşiminden dolayı oluşan ortak empedansı ifade etmektedir. $R_{öz}$ iletkenlerin rezistif öz empedansları, f şebeke frekansı, GMR iletkenler arası geometrik ortalama yarıçap olmak üzere; iletkenlerin kendi öz empedansları Denklem (5.13)'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır. (Carson, 1926)

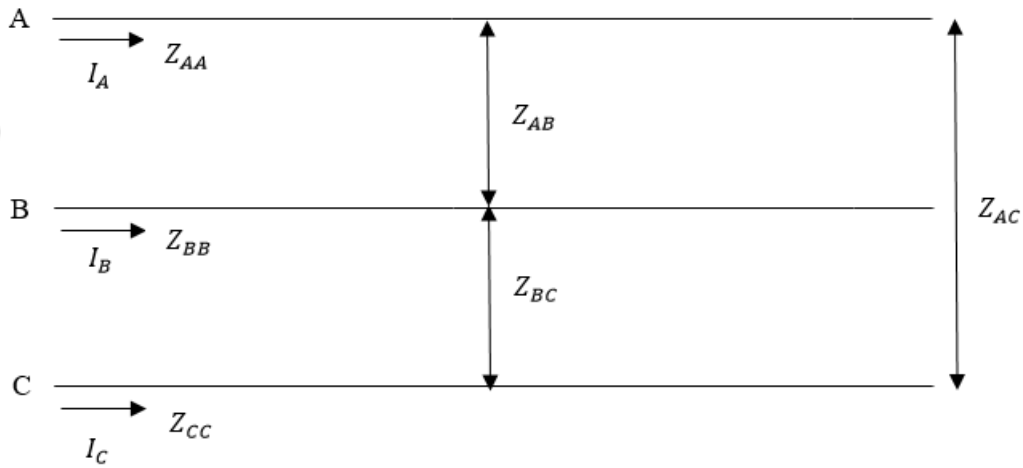
$$Z_{AA}, Z_{BB} = R_{öz} + 0,000988f + j0,0029f \log_{10} \frac{\delta}{GMR} \quad (5.13)$$

GMD iletkenler arası geometrik ortalama mesafe olmak üzere; iki iletkenin etkileşiminden dolayı oluşan ortak empedans ise Denklem (5.14)'deki bağıntı ile

hesaplanmaktadır. (1926 Carson)

$$Z_{AB} = 0,000988f + j0,0029f \log_{10} \frac{\delta}{GMD} \quad (5.14)$$

I_A , I_B ve I_C üç faz iletim hattının fazlarından akan faz akımları, Z_{AA} , Z_{BB} ve Z_{CC} faz iletkenlerinin öz empedansları, Z_{AB} , Z_{BC} ve Z_{AC} faz iletkenlerinin birbirleri arasında oluşan karşılıklı ortak empedanslar olmak üzere Şekil 5.8.'de üç fazlı tek devre bir elektrik iletim hattının empedans şeması gösterilmektedir.

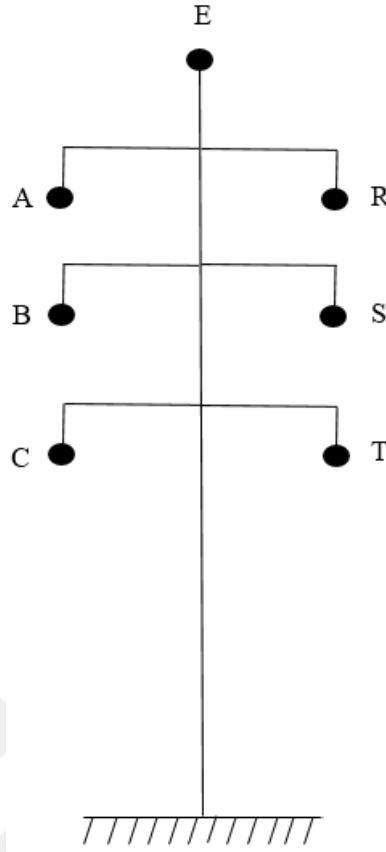


Şekil 5.8. Üç fazlı bir iletim hattında oluşan karşılıklı ve öz empedans şeması

Şekil 5.8.'de gösterilen üç fazlı tek devre iletim hattı için eşdeğer empedans matrisi Denklem (5.15)'de gösterilmektedir.

$$[Z_{ABC}] = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Şekil 5.9.'da ülkemizde tipik olarak kullanılan aynı direkte bulunan üç faz iki iletim hattı gösterilmektedir. Şekil 5.9.'da gösterilen aynı direkteki üç fazlı iletim hatları bazen aynı fidere ait çift devre hatlar olabilirken bazen ise farklı fiderlerin tek devre hatları olarak da tesis edilebilmektedir. İki durumda da karşılıklı ortak empedans etkisinden söz etmek mümkündür. Aynı zamanda Şekil 5.9.'da gösterilen ve karşılıklı ortak empedans etkisine etki eden tüm havai iletim süreci boyunca bu iletim hatlarına eşlik eden topraklama iletkeni de bulunmaktadır. Topraklama iletkeni, paralel iletim hatları arasında oluşan karşılıklı ortak empedans etkisini azaltmaktadır.



Şekil 5.9. Aynı direkte üç faz iki farklı iletim hattı gösterimi

Şekil 5.9.'daki gibi tesis edilen bir havai iletim hattı için eşdeğer empedans matrisi Denklem (5.16)'da verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AR} & Z_{AS} & Z_{AT} & Z_{AE} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BR} & Z_{BS} & Z_{BT} & Z_{BE} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CS} & Z_{CT} & Z_{CE} \\ Z_{RA} & Z_{RB} & Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} & Z_{RE} \\ Z_{SA} & Z_{SB} & Z_{SC} & Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} & Z_{SE} \\ Z_{TA} & Z_{TB} & Z_{TC} & Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} & Z_{TE} \\ Z_{EA} & Z_{EB} & Z_{EC} & Z_{ER} & Z_{ES} & Z_{ET} & Z_{EE} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Eşdeğer empedans matrisi için aynı direkte tesis edilen iletim hatlarının çift devre ya da farklı iletim hatları olması durumu eşdeğer empedans matrisi formunu değiştirmez. Her iki durumda da Denklem (5.16)'de verilen eşdeğer empedans matrisi kullanılabilir. Topraklama iletkeni bulunmayan direklerdeki çift devre ya da üç faz farklı iki iletim hatları için Denklem (5.17)'deki eşdeğer empedans matrisi kullanılabilir;

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AR} & Z_{AS} & Z_{AT} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BR} & Z_{BS} & Z_{BT} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CS} & Z_{CT} \\ Z_{RA} & Z_{RB} & Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} \\ Z_{SA} & Z_{SB} & Z_{SC} & Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} \\ Z_{TA} & Z_{TB} & Z_{TC} & Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Fazlar arasında meydana gelen gerilim düşümleri ve faz akımları kullanılarak eşdeğer empedans matrisi ile ilgili Denklem (5.18)'deki eşitlik yazılabilir;

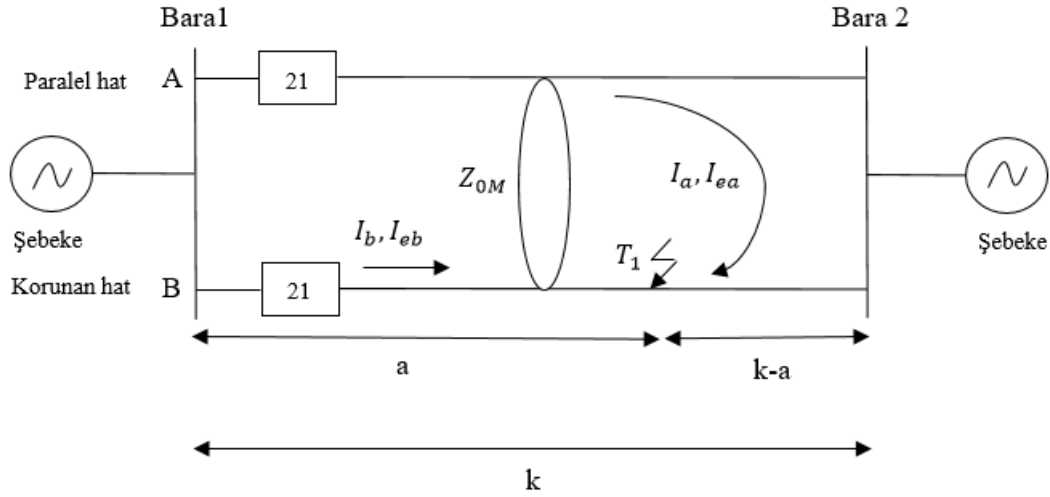
$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_R \\ \Delta V_S \\ \Delta V_T \\ \Delta V_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AR} & Z_{AS} & Z_{AT} & Z_{AE} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BR} & Z_{BS} & Z_{BT} & Z_{BE} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CS} & Z_{CT} & Z_{CE} \\ Z_{RA} & Z_{RB} & Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RS} & Z_{RT} & Z_{RE} \\ Z_{SA} & Z_{SB} & Z_{SC} & Z_{SR} & Z_{SS} & Z_{ST} & Z_{SE} \\ Z_{TA} & Z_{TB} & Z_{TC} & Z_{TR} & Z_{TS} & Z_{TT} & Z_{TE} \\ Z_{EA} & Z_{EB} & Z_{EC} & Z_{ER} & Z_{ES} & Z_{ET} & Z_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_R \\ I_S \\ I_T \\ I_E \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Birbirinden farklı şekillerde tesis edilen havai iletim hatlarındaki empedans matrislerini temsil eden Denklem (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18)'deki denklemler incelendiğinde empedans matrislerinin çapraz elemanları hattın kendi öz empedansını temsil etmektedir. Empedans matrisinde geriye kalan elemanlar ise fazların birbiriyle ve topraklama iletkeni ile olan ortak empedans etkisini içermektedir. İfade edilen bu öz ve ortak empedans değerleri daha önce bahsedilen Denklem (5.13) ve (5.14)'deki bağıntılarla hesaplanabilmektedir.

Havai iletim hatlarında gerilim düşümlerinin önüne geçilmesi için uygulanan transpozisyon uygulamasının, yukarıda ifade edilen matris formlarını değiştireceği ve bazı karşılıklı ortak empedans etkilerini ortadan kaldıracığının unutulmaması gerekmektedir. Çoğu karşılıklı ortak empedans etkisi ortadan kalksa da sıfır bileşen akımından kaynaklı bazı karşılıklı ortak empedans etkileri matris formunda kalmaya devam etmektedir. Yani havai iletim hatlarında yapılan transpozisyon uygulaması ne kadar sık mesafelerde ve çok iyi uygulansa da ortak empedans etkisinin varlığı devam etmekle birlikte arıza yerinin doğru tespit edilebilmesi için bu etkinin hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmadaki ilgili paralel iletim hatlarında, hat boyunca transpozisyon uygulanmadığı için havai iletim hatları transpozisyon içermeyecek şekilde modellendi.

5.2.1. Paralel İki İletim Hattı Arasındaki Karşılıklı Ortak Empedans Etkisinin Mesafe Koruma Rölesi Arıza Noktası Üzerindeki Etkisi

Aynı direkte birlikte devam eden paralel iletim hatlarının karşılıklı ortak empedans etkisinin miktarını birçok farklı durum etkilemektedir. Bunlardan arıza yeri üzerinde önemli etkiye sahip olan, korunan hattın paralelindeki hattın enerjili olup olmaması durumudur. Korunan hattın paralelindeki hat enerjili ve çift taraftan beslenmekte ise paralel hattaki toprak akımı korunan hat ile aynı yönde gerilim indükler. Bu durum korunan hattaki mesafe koruma rölesinin arıza anında okuduğu gerilimi dolayısıyla arıza empedansını etkiler. Aynı yönde indüklenen gerilim mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen arıza empedansını arttırmakta ve dolayısıyla mesafe koruma rölesi tarafından tespit edilen arıza empedansı gerçek değere göre daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu yaparak bu yüksek ölçülen empedans değerini gerçek değerine yakınlaştırmak gerekmektedir. Bu sayede ortak empedans etkisinden dolayı ortaya çıkan ilave pozitif empedans bertaraf edilebilmektedir. Şekil 5.10'da paralel iletim hatlarından ikisinin de enerjili olduğu durum gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Paralel iletim hatlarından ikisinin de enerjili olması durumu

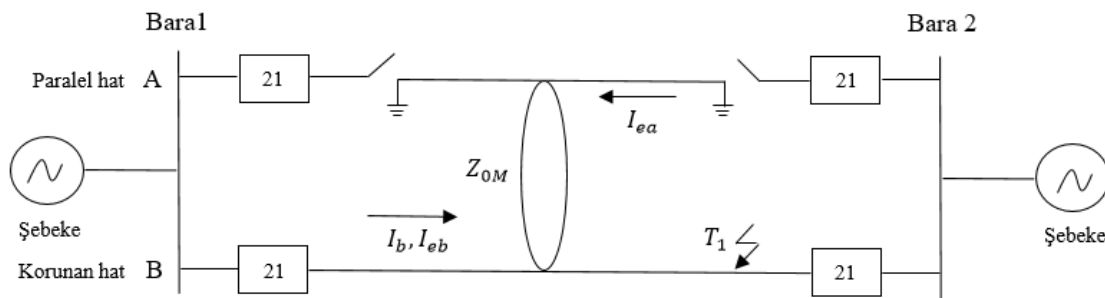
Şekil 5.10.'daki gibi bir elektrik iletim sisteminde paralel iletim hatlarının karşılıklı ortak empedans etkisi gözlemlenmediği takdirde korunan hattaki mesafe koruma rölesi arıza lokasyonunu gerçek arıza lokasyonuna göre daha ileride görmektedir. Bu durumda ölçülen empedans olması gereken empedanstan daha büyük değerde olduğu görülmektedir. Şekil 5.10.'daki; k paralel iletim hatlarının uzunluğu, T_1 arıza noktasını

I_{ea} ve I_{eb} arıza anında fazlardan akan toprak akımları, I_a ve I_b arıza anında fazlardan akan akımlar, Z_1 korunan hattın pozitif bileşen empedansı, Z_b ise T_1 noktasında meydana gelen faz – toprak arızasında karşılıklı ortak empedans etkisini de içeren mesafe koruma rölesinin okuduğu empedans olmak üzere; buna ilişkin ifade Denklem (5.19)' da verilmektedir.

$$Z_b = \frac{a}{k} Z_1 + \frac{a}{k} Z_1 \frac{\frac{Z_{0M}}{3Z_1} \frac{a}{2k-a}}{1+K_{ZN}} \quad (5.19)$$

Ortak empedans etkisi paralel hattın toprak akımı olan I_{ea} ile oluştuğu için bu akımın artması ile bu etki de artmaktadır. Dolayısıyla korunan iletim hattındaki röle tarafından okunan empedans miktarı da artacak ve mesafe koruma rölesi arıza lokasyonu fonksiyonu düşük menzil durumunda olacaktır.

Paralel iletim hatlarından korunan hattın devrede, paralelindeki iletim hattının kesicileri açık ve hattın topraklı olması durumunda korunan hattaki toprak arıza akımı paralel iletim hattında ters yönde gerilim indüklemektedir. Ters yönde indüklenen gerilim mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen arıza empedansını azaltmakta ve dolayısıyla mesafe koruma rölesi tarafından tespit edilen arıza empedansı gerçek değere göre daha düşük olmaktadır. Dolayısıyla karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu yaparak bu düşük ölçülen empedans değerini gerçek değerine yakınlaştırmak gerekmektedir. Bu sayede ortak empedans etkisinden dolayı ortaya çıkan ilave negatif empedans bertaraf edilebilmektedir. Şekil 5.11.'de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Paralel iletim hattının enerjisiz ve topraklanmış olması durumu

Şekil 5.11.'de gösterilen durum havai iletim hatlarındaki bakım çalışmalarında sıklıkla karşılaşılabilen bir durumdur. Z_1 korunan hattın pozitif bileşen empedansı, Z_0 korunan

hattın sıfır bileşen empedansı, K_{ZN} toprak düzeltme katsayısı olmak üzere T_1 noktasında meydana gelen bir arıza durumunda mesafe koruma rölesi tarafından okunacak empedans Denklem (5.20)'de verilmektedir.

$$Z'_R = Z_1 - \left(\frac{(Z_{0M})^2}{3Z_0(1+K_{ZN})} \right) \quad (5.20)$$

5.3. Örnek Seçilen Paralel İletim Hattında Ortak Empedans Etkisinin İncelenmesi ve Analizi

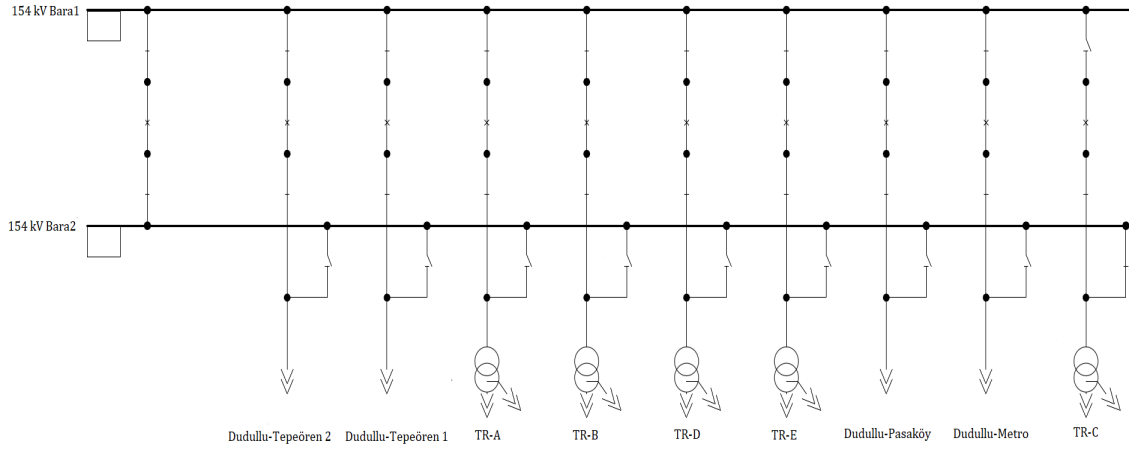
Yüksek lisans çalışmasının bu bölümünde İstanbul Anadolu Yakası'nda önemli iletim hatları arasında bulunan Dudullu – Tepeören 1 ve Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hatları ele alındı. Bu elektrik iletim hatlarının empedansları halihazırda iletken üreticilerinden temin edilen ve aşağıdaki Tablo 5.1.'deki değerlere göre hesaplanmaktadır.

Tablo 5.1. Hesaplamalarda kullanılan hat parametreleri

İletim hattı parametreleri	Değer
Pozitif bileşen rezistansı (Ω/km)	0,0741
Pozitif bileşen reaktansı (Ω/km)	0,3862
Sıfır bileşen rezistansı (Ω/km)	0,2702
Sıfır bileşen reaktansı (Ω/km)	1,3121
Karşılıklı ortak rezistans (Ω/km)	0,0472
Karşılıklı ortak reaktans (Ω/km)	0,2609
İletken çapı (mm)	28,11
Geometrik ortalama yarıçap (mm)	10,94
Hat gerilimi (kV)	154
Hat uzunluğu (km)	27,911
20°C'deki direnci (Ω)	0,07

Aynı baradan çıkıp aynı baraya girene kadar aynı direklerde paralel olarak ilerleyen Dudullu – Tepeören 1 ve Dudullu – Tepeören 2 isimli elektrik iletim hatlarının Dudullu transformatör merkezindeki bağlı olduğu bara ve bu baraya bağlı diğer fiderler

DigSILENT Power Factory programında sadece pozitif ve sıfır bileşen empedanslarının hesaba katıldığı direk tipi vb. gibi bilgilerin hesaba katılmadığı iletim hattı tipinde Şekil 5.12.'de gösterilen tek hat şeması olarak modellendi.



Şekil 5.12. Modellenen paralel hatların tek hat şeması gösterimi

Şekil 5.12.'deki gibi bir modelleme ile simülasyon programından elde edilen hat parametrelerine ilişkin veriler Tablo 5.2.'de verilmektedir.

Tablo 5.2. İletim hattı tipindeki modele ait hat parametrelerinin değerleri

İletim hattı parametreleri	Değer
Pozitif bileşen empedansı (Ω)	10,9781
Pozitif bileşen empedansı açısı ($^{\circ}$)	79,1343
Sıfır bileşen rezistansı (Ω/km)	7,5435
Sıfır bileşen reaktansı (Ω/km)	36,6239
Pozitif bileşen rezistansı (Ω/km)	2,0694
Pozitif bileşen reaktansı (Ω/km)	10,7813
Toprak düzeltme katsayısı	0,8020
Toprak düzeltme katsayısı açısı	-1,0941

Modellenen elektrik iletim hattını Dudullu transformatör merkezi tarafında koruyacak bir mesafe koruma rölesi DigSILENT Power Factory programının kütüphanesi kullanılarak modele eklendi ve Tablo 5.2.'deki hat parametreleri, Şekil 5.13.'deki gibi simülasyon programına aktarıldı.

Relay Model - ...durlugu\DUDULLU\154kV Standart\154kV TEPEOREN - II EIİ FIDER\ALSTOM ALSTOM_P443.ElmRelay

Basic Data

Current/Voltage Transformer
Max./Min. Fault Currents
Description

Category: Distance

Name: ALSTOM ALSTOM_P443

Relay Type: ...S_Role_Kutuphanesi\Areva P44x_5A

Application: Main Protection Device Number: 1

Location

Reference: [v] [a]

Busbar: ...UDULLU\154kV Standart\154 B-1

Branch: ... Mudurlugu\154kV TEPEOREN-DUDULLU-II

☐ Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel*,Elm*,Sta*,IntRef
Ct	✓ 154kV TEPEOREN - II EIİ FIDER...
Vt	✓ 154kV TEPEOREN - II EIİ FIDER...
Measurement	✓ Measurement
Measure Seq	✓ Measure Seq
Delta Measure	✓ Delta Measure
Polarizing Z1	✓ Polarizing Z1
Polarizing Z2	✓ Polarizing Z2
Polarizing Z3	✓ Polarizing Z3
Polarizing ZP	✓ Polarizing ZP

Slot Update

Şekil 5.13. Hat parametrelerinin mesafe koruma rölesine aktarılması

Mesafe koruma rölesinin 1. koruma kademe bölgesi empedans değeri hattın %85'ini korumak suretiyle hat empedans değerine göre Denklem (5.21)'deki gibi belirlendi.

$$Z_1 = 10,9781 \frac{85}{100} = 9,3313 \Omega \quad (5.21)$$

Bu şekilde modellenen Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattının %100'ünde faz – toprak arızası oluşturuldu. Oluşturulan arızaya yönelik mesafe koruma rölesi okuduğu empedans değerleri Şekil 5.14.'de verilmektedir.

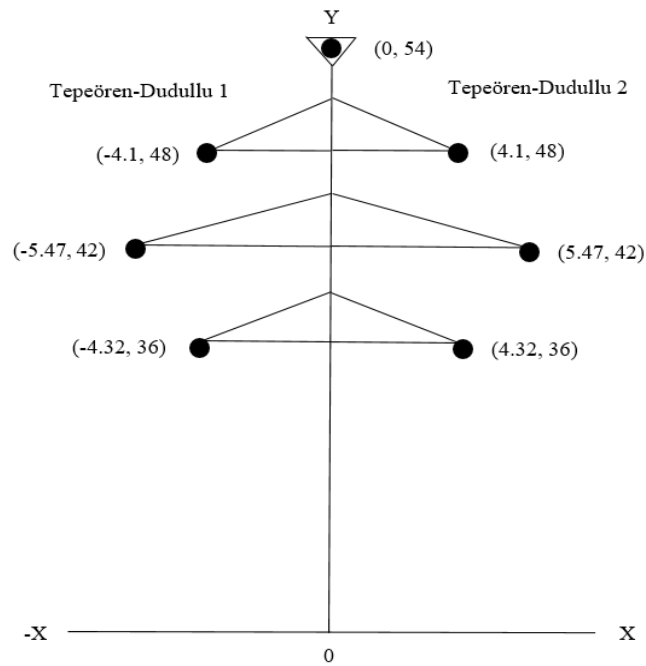
ALSTOM ALSTOM_P443
Zone (1): Polarizing Z1
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Zone (2): Polarizing Z2
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Zone (3): Polarizing Z3
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Zone (4): Polarizing Z4
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Zone (5): Polarizing ZP
Z A 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z B 10,966 pri. Ohm 79,89°
Z C 10,966 pri. Ohm 79,89°
Fault Type: ABC (Starting)
Tripping Time: 0,41 s

Şekil 5.14. İletim hattı tipindeki modele ait hattın %100'ündeki arıza empedansı

Sahada halihazırda devrede olan şekliyle iletim hattı tipinde modellenen Dudullu – Tepeören 2 fiderinin %100’ünde oluşturulan bir faz – toprak arızasında hat empedansı ile arıza empedansına bakıldığında aslında hatalı bir durum yok gibi görünse de hat empedansını etkileyen direk tipi, topraklama iletkeninin varlığı veya varsa adedi gibi parametrelerin hat empedansını hesaplarken dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden ilgili elektrik iletim hattı DigSILENT Power Factory programında iletim hatlarının bu tip parametrelerini de hesaba katarak modellenenebildiği direk tipi modelinde tekrar modellendi. Bu modellemeye ilişkin sahada kullanılan topraklama iletkeni parametrelerinin değerleri Tablo 5.3.’de, direk tipine ilişkin metre cinsinden koordinat verilerini içeren proje verileri ise Şekil 5.15.’de verilmektedir.

Tablo 5.3. Topraklama iletkeni parametrelerinin değerleri

Topraklama iletkeni parametreleri	Değer
İletken çapı (mm)	11,05
Geometrik ortalama yarıçap (mm)	4,302
İletken gerilimi (kV)	154
İletken uzunluğu (km)	27,911
20°C’deki direnci (Ω)	0,05



Şekil 5.15. Direk tipi modeldeki koordinat verilerinin gösterimi

Tesis edilen elektrik iletim hattı projelerinden elde edilen ve Şekil 5.15.'de gösterilen koordinat verilerine göre; faz ve topraklama iletkeni parametrelerini de içerecek bir biçimde DigSILENT Power Factory programı direk tipi modeline Şekil 5.16 ve Şekil 5.17.'de gösterildiği gibi girildi. İletim hattı tipinde modelleme yapılırken kullanılan faz karakteristik parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmayıp buna ilave olarak direk geometrisi ve topraklama iletkeninin karakteristik verileri kullanıldı.

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Circuit 1	4,32	5,47	4,1	36,	42,	48,

	X	Y
Earth Conductor 1	0,	54,

Şekil 5.16. İletim hattının direk geometrik verilerinin girilmesi

Name: Topraklama iletkeni

Nominal Voltage: 154, kV

Nominal Current: 1, kA

Number of Subconductors: 1

Conductor Model: ☒ Solid Conductor ☐ Tubular Conductor

(Sub-)Conductor:

DC-Resistance (20°C): 0,05 Ohm/km

GMR (Equivalent Radius): 4,302 mm

Outer Diameter: 11,05 mm

☒ Skin effect

Şekil 5.17. Topraklama iletkeni karakteristik verilerinin girilmesi

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17.’de gösterildiği gibi direk tipinde modellenen Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattının modelleme sonrası simülasyon programından elde edilen hat parametrelerine ilişkin veriler Tablo 5.4.’de verilmektedir.

Tablo 5.4. Direk tipindeki modele ait hat parametrelerinin değerleri

İletim hattı parametreleri	Değer
Pozitif bileşen empedansı (Ω)	11,6275
Pozitif bileşen empedansı açısı ($^{\circ}$)	80,1412
Sıfır bileşen rezistansı (Ω/km)	4,1162
Sıfır bileşen reaktansı (Ω/km)	28,8105
Pozitif bileşen rezistansı (Ω/km)	1,9908
Pozitif bileşen reaktansı (Ω/km)	11,4558
Toprak düzeltme katsayısı	0,5012
Toprak düzeltme katsayısı açısı	2,8766

Simülasyon programından elde edilen sonuçlar incelendi, iletim hattı tipi modellemeye ait hat parametreleri ile direk tipi modellemeye ait hat parametreleri karşılaştırıldı ve henüz paralel iletim hatlarının birbirine olan karşılıklı ortak empedans etkisi hesaba katılmasa dahi direk geometrisi ve topraklama iletken türünün iletim hattının pozitif bileşen empedansında artışa neden olduğu gözlemlendi. Bu durum özellikle korunan hattın sonuna doğru gerçekleşen faz – toprak arızalarında mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen arıza empedansını dolayısıyla mesafe koruma rölesinin kullanıcıya gösterdiği arıza konumunu etkilemektedir. Bu durumu gözlemleyebilmek için DigSILENT Power Factory programında, ortak parametrelerin tümü aynı olmak suretiyle iletim hattı tipinde ve direk tipinde modellenen Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattının %85’inde bir

faz – toprak arızası oluşturuldu ve mesafe koruma rölesinin okuduğu empedans gözlemlendi. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19.’da bu değerler görülmektedir.

```
ALSTOM ALSTOM_P443
Zone (1): Polarizing Z1
Z I A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z I B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z I C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Zone (2): Polarizing Z2
Z A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Zone (3): Polarizing Z3
Z A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Zone (4): Polarizing Z4
Z A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Zone (5): Polarizing ZP
Z A 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z B 9,313 pri.Ohm 80,37°
Z C 9,313 pri.Ohm 80,37°
Fault Type: ABC (Starting)
Tripping Time: 0,02 s
```

Şekil 5.18. İletim hattı tipi ile modellenen arızada rölenin ölçtüğü arıza empedansı

```
Zone (1): Pol_Z1
Z I A 32,187 pri.Ohm 121,16°
Z I B 6883,105 pri.Ohm 81,4°
Z I C 32,914 pri.Ohm 44,69°
Z A 9,905 pri.Ohm 80,99°
Z B 64,779 pri.Ohm -28,19°
Z C 70,615 pri.Ohm -165,83°
Zone (1): ZPol15
Z A #INF pri.Ohm 45,°
Z B #INF pri.Ohm 45,°
Z C #INF pri.Ohm 45,°
Zone (> 1): Pol_Z1b-Z2-Z5
Z A 8,927 pri.Ohm 80,36°
Z B 47,369 pri.Ohm -29,°
Z C 51,909 pri.Ohm -166,13°
Faulttype: A (Starting)
Tripping Time: 0,02 s
```

Şekil 5.19. Direk tipi ile modellenen arızada rölenin ölçtüğü arıza empedansı

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19.’da hattın % 85’inde oluşturulan faz – toprak arızası anında ölçülen empedansların 9,313 Ω ile 9,905 Ω olduğu görüldü. Direk tipinde modellendiğinde ortaya çıkan gerçek hat empedansı 11,627 Ω olan bir elektrik iletim hattı için hata oranı Denklem (5.22)’de verilmektedir.

$$\frac{9,905-9,313}{11,627 \cdot \frac{85}{100}} 100 = \% 5,9906 \quad (5.22)$$

DigSILENT Power Factory programında Dudullu – Tepeören 1 ve Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hatları önce ayrı ayrı direk tipinde modellendi. Bu ayrık direk tipi modellere ait hat parametreleri Tablo 5.4.’de gösterildiği gibi olmak üzere bu ayrık direk tipi modeller üzerinden hattın belirli noktalarında simülasyon programı aracılığı ile faz –

toprak arızalar oluşturuldu ve Tablo 5.4.'de verilen hat parametrelerine göre bu şekilde ölçülen empedans değerlerinin gerçek değerler olduğu gözlemlendi. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 5.5.'de verilmektedir.

Tablo 5.5. Karşılıklı ortak empedans etkisi içermeyen direk tipi modelde ölçülen arıza empedansları

Arıza Lokasyonu	Ölçülen empedans
Hattın %50'si (km)	5,809 Ω
Hattın %70'i (km)	8,133 Ω
Hattın %90'ı (km)	10,459 Ω
Hattın %100'ü (km)	11,624 Ω

Aynı baradan çıkıp aynı baraya giren ve aynı direkte paralel ilerleyen iletim hatlarının birbirine olan karşılıklı ortak empedans etkisini inceleyebilmek için ayrı modellenen iki iletim hattı kuplaj edilerek aynı direkte olacak ve karşılıklı ortak empedans etkisini gözetecek biçimde tekrar modellendi. Modellemeye ilişkin veriler Şekil 5.20 ve Şekil 5.21.'de gösterilmektedir.

Şekil 5.20. Aynı direkte modellenen paralel iletim hatlarının geometrik verilerinin girilmesi

Şekil 5.21. Aynı direkte modellenen iletim hatlarının karşılıklı kuplajı

Karşılıklı kuplaj edilen paralel iletim hatlarının kuplaj sonrası, hatların ayrı ayrı direk tipinde modellendiği duruma göre hat parametrelerinde herhangi bir değişiklik olmadığı gözlemlendi. Çünkü ortak empedans etkisi arıza anında paralel iletim hattından akacak toprak akımına bağlı olarak ortaya çıkacağı için arıza öncesi durumdaki herhangi bir parametreye etkisi olmaması gerekmektedir. Bu durum da modellemenin bu safhasında teyit edildi. Kuplaj edilen paralel iletim hatlarının belirli noktalarında simülasyon programı aracılığı ile faz – toprak arızaları oluşturuldu. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 5.6.’da verilmektedir.

Tablo 5.6. Karşılıklı ortak empedans etkisi içeren modelde ölçülen arıza empedansları

Arıza Lokasyonu	Ölçülen empedans
Hattın %50’si (km)	5,852 Ω
Hattın %70’i (km)	8,403 Ω
Hattın %90’ı (km)	11,519 Ω
Hattın %100’ü (km)	14,027 Ω

Modellenen iletim hattının Tablo 5.4.’de verilen hat parametreleri referans alındığında karşılıklı kuplaj etkisiyle ölçülen empedans miktarının daha fazla olduğu gözlemlendi. İletim hatlarının her iki tarafında da şebeke olması durumunda kuplajın etkisinin pozitif

yönde olduğu görüldü. Mesafe koruma rölesi; paralel iletim hatlarında oluşan karşılıklı kuplajın etkisiyle arıza noktası belirlemedeki hata oranları Tablo 5.7.'de verilmektedir.

Tablo 5.7. Karşılıklı ortak empedans etkisinin ölçülen arıza noktasında neden olduğu hata oranları

Gerçek değer (Ω)	Ölçülen empedans (Ω)	Hata oranı (%)
5,809	5,852	0,7
8,133	8,403	3,2
10,459	11,519	9,2
11,624	14,027	17,1

Tablo 5.7.'de gösterilen analiz sonuçları neticesinde; gerçekleşen arıza, korunan iletim hattının sonlarına doğru yaklaştıkça karşılıklı kuplaj etkisinin arttığı, dolayısıyla ölçülen arıza empedansındaki hata oranının da arttığı gözlemlendi.

Elektrik iletim hatlarında hem koruma hem de haberleşme için kullanılan topraklama iletkeni de paralel iletim hatlarında oluşan karşılıklı empedans miktarına etki etmektedir. Bu etkiyi gözlemleyebilmek için Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattı diğer senaryolardaki tüm parametreleri aynı kalacak şekilde topraklama iletkeni ihtiva etmeden tekrar modellendi. Bu modele ait veri girişlerini içeren DigSILENT Power Factory çıktısı Şekil 5.22.'de gösterilmektedir.

The screenshot shows the 'Line Coupling (Topraklama İletkensisiz)' dialog box in DigSILENT Power Factory. The 'Basic Data' tab is active. The 'Name' field is 'Line Coupling (Topraklama İletkensisiz)'. The 'Route' field is empty. The 'Out of Service' checkbox is unchecked. The 'Line Model' section has 'Lumped Parameter (PI)' selected. The 'Number of Overhead Line Systems' is set to 1. The 'Earth Resistivity' is 100 Ohm*m. The 'Transposition' is set to 'none'. The 'Geometries' table has one row: 'G1 Tower Geometry Type toprak...' with a distance of 0. The 'Earth Wires' table is empty. The 'Line Names' table has two rows: '1 ~ 154kV TEPEOREN-DUD...' with polarity 'Terminal i' and type 'Faz iletkeni 1', and '2 ~ 154kV TEPEOREN-DUD...' with polarity 'Terminal i' and type 'Faz iletkeni 2'. The 'Max.S...' column has values 0 and 0. The 'Transposition' column has checkboxes. The 'Phasing' column has values 'A-B-C' and 'C-B-A'.

Şekil 5.22. Aynı direktte modellenen iletim hatlarının topraklama iletkeni içermeyen durumdaki karşılıklı kuplajı

Şekil 5.22.'de, önceki modellemelerden farklı olarak topraklama iletkeni içermediği görülmektedir. Bu şekilde modellenen Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattının, topraklama iletkeni bulunan direk tipi modele göre hat parametrelerinde az da olsa birtakım değişimler gözlemlendi. Bu değişimlere ilişkin değerler Tablo 5.8.'de verilmektedir.

Tablo 5.8. Topraklama iletkeni içermeyen direk tipi modele ait hat parametreleri

İletim hattı parametreleri	Değer
Pozitif bileşen empedansı (Ω)	11,6615
Pozitif bileşen empedansı açısı ($^{\circ}$)	80,1898
Sıfır bileşen rezistansı (Ω/km)	5,7648
Sıfır bileşen reaktansı (Ω/km)	37,1505
Pozitif bileşen rezistansı (Ω/km)	1,9869
Pozitif bileşen reaktansı (Ω/km)	11,4910
Toprak düzeltme katsayısı	0,741
Toprak düzeltme katsayısı açısı	1,4

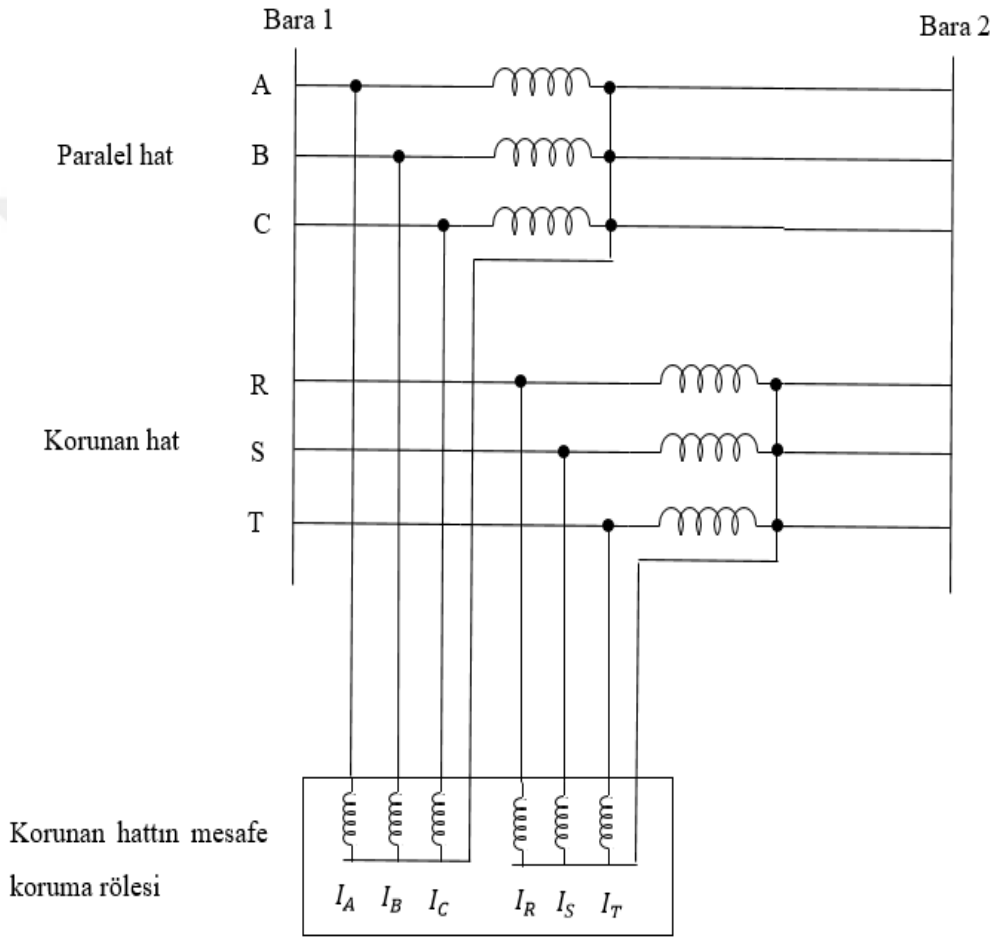
Karşılıklı ortak empedans etkisi içeren ancak topraklama iletkeni içermeyen paralel iletim hattının belirli noktalarında simülasyon programı aracılığı ile faz – toprak arızaları oluşturuldu. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 5.9.'da verilmektedir.

Tablo 5.9. Karşılıklı ortak empedans etkisi içeren, topraklama iletkeni içermeyen modelde ölçülen arıza empedansları

Arıza Lokasyonu (%)	Ölçülen empedans (Ω)
Hattın %50'si	5,870 Ω
Hattın %70'i	8,447 Ω
Hattın %90'ı	11,692 Ω
Hattın %100'ü	14,605 Ω

Tablo 5.9.'da, iletim hatlarında topraklama iletkeninin kopuk olması veya kullanılmaması gibi durumlarda karşılıklı ortak empedans etkisinin ölçülen arıza empedansını arttırdığı dolayısıyla gerçek değere göre hata oranının arttırdığı gözlemlendi.

Aslında korunan hattaki bu empedans hatasını oluşturan ana unsur paralel hattın arıza noktasına doğru akan paralel hattın toprak akımıdır. Bu akım, korunan hattın mesafe koruma rölesine Şekil 5.22’de gösterildiği biçimde girildiği takdirde, paralel hattın toprak akımından gelen empedans katkısı hesaplanabilir ve ölçülen arıza empedans değerinden çıkarılarak karşılıklı empedans etkisinden kaynaklanan yanlış arıza noktası tespitinin önüne geçmek mümkün hale gelebilmektedir.



Şekil 5.23. Paralel hat akımlarının mesafe koruma rölesine taşınma şeması

Paralel hattın toprak akımı yerine Şekil 5.23.’de gösterildiği gibi paralel hattın üç faz akımlarının da taşınması aynı anlama gelmektedir. Mesafe koruma rölesine taşınan bu akımlar vasıtasıyla paralel hattın toprak akımı mesafe koruma rölesi tarafından hesaplanabilmektedir. Yapılan analizler sonucu gözlemlenen bu hata oranlarını azaltarak gerçek arıza noktasına yaklaşmak için bu minvalde birtakım çalışmalar yapıldı. Bu çalışmaların yapıldığı elektrik iletim hattına ait görüntü Şekil 5.24.’de verilmektedir



Şekil 5.24. Çalışma yapılan elektrik iletim hattının fiziksel görüntüsü

DigSILENT Power Factory programında paralel iletim hattının toprak akımının girilebildiği işlem bloklarını barındıran Siemens 7SA522 marka model bir mesafe koruma rölesi tüm hat parametreleri önceki analizler ile aynı olacak şekilde yeniden modellendi. Model içerisindeki karşılıklı akım bloğuna, paralelindeki iletim hattının toprak akımını ölçebileceği yeni bir akım transformatörü tanımlandı. Bu duruma ilişkin simülasyon programı verileri Şekil 5.24.'de gösterilmektedir.

Relay Model - ...UDULLU\DUDULLU 154kV Standart\154kV TEPEOREN - II EIH FIDER\ortak empedans kompanzasyonu.ElmRelay*

Basic Data

Category: Distance

Name: ortak empedans kompanzasyonu

Relay Type: ...le_Kutuphanesi\Siemens 7SA522_5A

Application: Main Protection Device Number: 1

Location:

Reference: ...UDULLU\DUDULLU 154kV Standart\154 B-1

Busbar: ... Mudurlugu\154kV TEPEOREN-DUDULLU-II

Branch: ... Mudurlugu\154kV TEPEOREN-DUDULLU-II

☐ Out of Service

Slot Definition:

	Net Elements Rel*,Elm*,Sta*,IntRef
Ct	✓ 154kV TEPEOREN - II EIH FIDER...
Vt	✓ 154kV TEPEOREN - II EIH FIDER...
► Ct-Mutual	✓ paralel hat toprak akımı
Measure	✓ Measure
Meas_Delta	✓ Meas_Delta
Meas_I0mut	✓ Meas_I0mut
Pol_Z1	✓ Pol_Z1
Pol_Z1b-Z2-Z5	✓ Pol_Z1b-Z2-Z5
ZPol15	✓ ZPol15

Slot Update

OK Cancel Contents

Şekil 5.25. Modellenen mesafe koruma rölesine paralel hattın toprak akımının tanımlanması

Paralel iletim hatlarında kullanılan iletkenine ait karşılıklı ortak empedans değerleri DigSILENT Power Factory programı hat parametreleri hesaplama bloğu kullanılarak hesaplandı. Bu hesaplama ile ilgili kilometre başına karşılıklı ortak empedans değerlerini içeren veriler Tablo 5.10.'da verilmektedir.

Tablo 5.10. Faz iletkenine ait karşılıklı ortak empedans değerleri

İletim hattı parametreleri	Değer
Karşılıklı ortak rezistans (Ω/km)	0,0762
Karşılıklı ortak reaktans (Ω/km)	0,5490

Tablo 5.10.'da verilen hattın karakteristik verileri karşılıklı ortak empedans etkisini mesafe koruma rölesinde kompanse edebilecek katsayıları hesaplamak için kullanıldı. R_1 korunan iletim hattının kilometre başına düşen pozitif bileşen rezistansı, X_1 korunan iletim hattının kilometre başına düşen pozitif bileşen reaktansı, R_{0M} korunan iletim hattının kilometre başına hesaplanan karşılıklı ortak rezistansı, X_{0M} ise korunan iletim

hattının kilometre başına hesaplanan karşılıklı ortak reaktansı olmak üzere Siemens 7SA522 mesafe koruma rölesine girilecek kompanzasyon faktörlerine ilişkin bağıntılar Denklem (5.23) ve Denklem (5.24)'de verilmektedir.

$$\frac{R_M}{R_L} = \frac{1}{3} \frac{R_{0M}}{R_1} \quad (5.23)$$

$$\frac{X_M}{X_L} = \frac{1}{3} \frac{X_{0M}}{X_1} \quad (5.24)$$

Verilen bu denklemler kullanılarak karşılıklı ortak empedans düzeltme katsayıları hesaplandı. Karşılıklı ortak empedans düzeltme katsayılarına ilişkin değerler Denklem (5.25) ve Denklem (5.26)'da verilmektedir.

$$\frac{R_M}{R_L} = \frac{1}{3} \frac{0,0762}{0,0741} = 0,34 \quad (5.25)$$

$$\frac{X_M}{X_L} = \frac{1}{3} \frac{0,5490}{0,3862} = 0,47 \quad (5.26)$$

Denklem (5.25) ve (5.26)'da verilen değerler Şekil 5.25.'deki mesafe koruma rölesinin kutuplaşma ünitesine girildi.

Distance Polarising Unit - ...rt\154kV TEPEOREN - II EIH FIDERI\ortak empedans kompanzasyonu\Pol_Z1.RelZpol*

Basic Data

Voltage memory

RMD

Description

Polarisation Method: Cross(Quad L - L)

Polarisation Unit: Phase-Phase/Phase-Earth

Earth factor representation: Complex Number or Decoupled

Name: Pol_Z1

Type: ..._Role_Kutuphanesi\Siemens 7SA522_5A\Pol_Z1

Earth Factor

☐ Show as complex number

Re / RI: 0,36

Xe / XI: 0,50

Line Re/RI: 0,3558564

Line Xe/XI: 0,5049731

Line angle: 80,10 deg

Mutual Earth Factor

Rm / RI: 0,34

Xm / XI: 0,47

Earth Current Ratio: 0,00

OK

Cancel

Relay

Şekil 5.26. Karşılıklı ortak empedans düzeltme katsayılarının mesafe koruma rölesine girilmesi

Karşılıklı ortak empedans düzeltme katsayıları girildikten sonra kompanzasyon yapılan Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattının belirli noktalarında simülasyon programı aracılığı ile faz – toprak arızaları oluşturuldu. Simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler gerçek arıza empedansları ile mukayese edildi. Bu analizlere ilişkin değerler Tablo 5.11.’de verilmektedir.

Tablo 5.11. Karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu öncesi ve sonrası arıza empedans değerlerinin karşılaştırılması

Gerçek değer (Ω)	Kompanzasyon öncesi ölçülen empedans (Ω)	Kompanzasyon sonrası ölçülen empedans (Ω)
5,809	5,852	5,823
8,133	8,403	8,121
10,459	11,519	10,341
11,624	14,027	11,345

Tablo 5.11.’de verilen analiz sonuçlarına göre karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu; Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattında yapılan analiz sonuçlarına göre paralel iletim hatlarında meydana gelen karşılıklı ortak empedans etkisini telafi ettiği görüldü. Gerçek arıza noktasına göre karşılıklı ortak empedans kompanzasyonu öncesi ve sonrası hata paylarına ilişkin veriler Tablo 5.12.’de verilmektedir.

Tablo 5.12. Kompanzasyon öncesi ve sonrası gerçek arıza noktasına göre hata oranlarının karşılaştırılması

Gerçek değer (Ω)	Kompanzasyon öncesi hata oranı (%)	Kompanzasyon sonrası hata oranı (Ω)
5,809	0,7	0,24
8,133	3,2	0,14
10,459	9,2	1,12
11,624	17,1	2,40

Tablo 5.12.’de görüldüğü üzere bu çalışma kapsamında yapılan karşılıklı ortak empedans kompanzasyonunun, arıza lokasyonunun yanlış tespit edilmesindeki hata oranlarını ciddi miktarda azalttığı görüldü.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikle elektrik iletim hatlarında kullanılan mesafe koruma röleleri genel olarak ele alınmıştır. Sonrasında koruma sistemlerinin sahadaki bir problemi olan; mesafe koruma rölelerinin arıza konumunu yanlış tespit etmesi üzerinde durulmuştur. Arıza konumunun yanlış tespit edilmesinin nedenleri açıklanmış ve bu nedenlerden biri olan aynı direkte birlikte ilerleyen paralel iletim hatlarının birbirlerine olan karşılıklı ortak empedans etkisinin tespiti ve giderilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Çalışma kapsamında İstanbul Anadolu Yakası'nda daha önceki faz – toprak arızaları irdelenmiş ve sahadan gelen geri dönüşler ile arıza noktasının yanlış tespit edildiği düşünülen bir elektrik iletim hattı belirlenmiştir. Belirlenen Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hattındaki empedans hesaplamaları ve mesafe koruma rölesi ayarları incelenmiştir. İnceleme sonrasında ilgili elektrik iletim hattında kullanılan hat parametreleri kullanılarak çift taraftan beslenir vaziyette halihazırda sahada kullanılan modeli ile DigSILENT Power Factory programında modellenmiş ve çeşitli senaryolarda arızalar oluşturularak analiz edilmiştir. Aynı elektrik iletim hattı bu kez normalden farklı olarak hattın geometrisini, topraklama iletkeni vb. gibi parametreleri de göz önüne alarak direk tipinde modellenmiştir. Sahada kullanılan modeldeki hat empedansı ile direk tipinde modellendiğinde ortaya çıkan hat empedansının birbirinden farklı olduğu ortaya koyulmuştur.

Sonrasında Dudullu – Tepeören 1 ve Dudullu – Tepeören 2 elektrik iletim hatları aynı direkte paralel iki iletim hattı olacak şekilde çift taraftan beslenir vaziyette tekrar modellenmiş ve bu iki iletim hattı arasında karşılıklı ortak empedans etkisi oluşturulmuştur. Modellenen iletim hatlarında karşılıklı ortak empedans etkisi altında hattın belirli noktalarında faz – toprak arızalar oluşturulmuş ve bu arızalar modellenen mesafe koruma röleleri sayesinde analiz edilmiştir. Mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen empedansın ciddi miktarda arttığı ve bu artışa bağlı olarak da arıza lokasyonunun önemli derecede değiştiği, gerçek arıza noktasına göre karşılıklı ortak empedans etkisi altında ölçülen arıza lokasyonunun hata oranının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Ortaya koyulan arıza noktası tespitindeki hataların giderilebilmesi için paralel iletim hattının toprak akımı simülasyon programında modellenmiş ve korunan hattın mesafe

koruma rölesinin bu akımı hesaplamalarına dahil etmesi sağlanmıştır. Hatlarda kullanılan iletkenlerin hat parametreleri DigSILENT Power Factory programında hesaplanarak karşılıklı ortak empedans değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler kullanılarak karşılıklı ortak empedans düzeltme faktörü hesaplanmış ve modellenen mesafe koruma rölesine bu değerler girilmiştir. Karşılıklı ortak empedans etkisi altında hattın belirli noktalarında faz – toprak arızalar oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde gerçek arıza lokasyonuna göre hata oranı oldukça düşmüş, mesafe koruma rölesi tarafından ölçülen empedans değeri gerçek değere çok yaklaşmıştır.

Havai iletim hatları tesis edilme biçimi gereği faz – toprak arızalarına oldukça açıktır. Bu hatlarda meydana gelen faz – toprak arızalarına müdahale etmek ise mesafe koruma rölesinin işletmeciye verdiği arıza noktası bilgisinden geçmektedir. Bu çalışmada, arızalara geç müdahaleye ve enerji kesintilerinin uzamasına yol açabilen arıza noktasının yanlış tespitine bir çözüm önerisi sunulmuştur. Elde edilen bu sonuçlar ışığında aynı direkte paralel olarak uzun mesafeler ilerleyen elektrik iletim hatlarında empedans hesabı yapılırken hattın geometrisi, direk tipi, topraklama iletkeni vb. gibi parametreler de hesaplamalara dahil edilmeli, hat empedansı ve koruma kademe bölgeleri bu hesaplamalara göre yapılmalıdır. Karşılıklı ortak empedans etkisini bertaraf etmek için yapılacak kompanzasyon sayesinde ekipler doğru arıza noktasına intikal ederek arızaya kısa ve doğru bir şekilde müdahale etme imkanı kazanacaktır. Aynı zamanda literatürdeki ismi ile aşırı menzil ve düşük menzil durumları ortadan kaldırılabilir, böylece yanlış açmaların önüne de geçilebilir.

Bu çalışmada önerilen yöntemin uygulama alanı oldukça geniştir. Kullanılan simülasyon programı birçok modelleme ve analiz imkanı sunmakta ve piyasada kullanılan mesafe koruma rölelerinde paralel iletim hattının toprak akımının ve karşılıklı ortak empedans katsayılarının girilebileceği bloklar bulunmaktadır.

Verilen yöntemin sahada uygulanabilirliği oldukça yüksek olsa da özünde paralel iletim hattının üç faz veya toprak akımına ihtiyaç duyulduğu için bu konu bazen zahmetli ve maliyetli olabilmektedir. İleride yapılacak araştırmalarda; paralel iletim hatlarının bulunduğu bölgenin yük durumu ve geçmiş faz – toprak arızalarındaki veriler gözetilerek paralel iletim hattının arıza anındaki toprak akımını tahmin edebilen bir yapay zeka

uygulamasının geliştirilmesi bu çalışmanın uygulanmasındaki zahmet ve maliyetleri de ortadan kaldırabilmesi yönünden oldukça faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

- Akdağ, O., Peköz, D., Yeroğlu, C. (2018). 154 / 34,5 kV Güç Transformatörleri için Diferansiyel Koruma Rölesi Koordinasyonu Benzetimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 1070-1077. 10.19113/sdufbed.04605
- Akkan, R. (2019). Röle Koordinasyonu ve Kesici Seçimi İhsaniye Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 546452.
- Altun, İ. (2018). Elektrik Şebekelerinde Telekoruma Olarak IEC 61850 Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 537576.
- Bi, T., Li, W., Xu, Z. (2012). First-Zone Distance Relaying Algorithm of Parallel Transmission Lines for Cross-Country Grounded Faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 2185-2192.
- Borăscu, I., Iliescu, S. (2015). Influence of the Zero Sequence Mutual Impedance to the Distance Protection. *UPB Scientific Bulletin*, 77(4), 69-80. 2286-3540
- Brahman, A. (2017). Analytical Technique to Evaluate Impact of Mutual Coupling On Transmission Line Protection Schemes. Yüksek Lisans Tezi, Arlington Teksas Üniversitesi, Arlington Enstitüsü, Teksas.
- Budak, S. (2020). Karma İletim Hatlarında Mesafe Koruma Rölesi Çalışmasının İncelenmesi ve Çalışma Başarımlarının Yükseltilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 245179.
- Büyükdora, H. (2006). *Og Şebekelerinde Ölçü Trafoları ve Sekonder Koruma* (1). İzmir: TMMOB.
- Carson, J.R. (1926). Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell Labs Technical Journal*, 5(4), 539-554. 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x
- Chaiwan, P. (2011). New Accurate Fault Location Algorithm for Parallel Transmission Lines. Doktora Tezi, Kentucky Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Lexington.
- Çınar, H. (2016). Ölçme Esaslı Akım Transformatörlerinde Çalışma Bölgesi ve Kararlılık Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 424297.
- Değerli, G. (2017). Enerji İletim Sistemlerinde Hatların Nümerik Diferansiyel Röleler ile Korunması ve T-Bağlantılı Hatlarda Diferansiyel Korumanın Mesafe Koruma ile Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 478515.

- DIgSILENT Gmbh, *DIgSILENT Power Factory Version 2020 Manual*, Gomaringen, Germany, 2020.
- Donovan, M., Barry, N., Connell, J., Cowhey, E. (2021). Mutual Coupling Compensation Techniques Used for Distance Protection of Parallel Lines. *Energies*, 14(7), 1-15. 10.3390/en14071982
- Elhaffar, A., Agory, E., El-Faituri, A. (2013). Parallel Lines Compensation Using ATP/EMTP Distance Relay Modelling, *The International Conference on Electrical and Computer Engineering 2013*, Benghazi, Libya, 26-28 Mart 2013.
- Feiyang, D., Zexin, Z., Xingguo, W., Xuanwei, Q. (2020). An Optimization Method of Distance Protection for Parallel Lines on the Same Tower, *2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation*, Hefei, Çin, 25-27 Eylül 2020.
- Gençaydın, E. (2006). Enerji İletim Hatlarının Nümerik Mesafe Röleleri ile Korunması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Haçemanayvalyan, Ş. (2007). Enerji İletim Hatlarında Arıza Yerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 223466.
- Havelka, J., Malaric, R., Frlan, K. (2012). Staged-Fault Testing of Distance Protection Relay Settings. *Measurement Science Review*, 12(3), 111-120.
- Idoniboyeobu, D., Wokama, B. (2017). Fault Calculation in Double-Circuit Transmission Lines Based on the Hierarchical Temporal Memory. *American Journal of Engineering Research*, 6(11), 301-306.
- Izykowski, J., Bozek, M. (2008). Distance Relaying Algorithm for Double-Circuit Transmission Line with Compensation for Reactance Effect under Standard Availability of Measurements. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 16(3), 217-227.
- Jongepier, A., Sluis, L. (1994). Adaptive Distance Protection of a Double-Circuit Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(3), 1289-1297.
- Kmec, M., Beña, L., Lisoń, L. (2014). Influence of Parallel Line Mutual Coupling on Distance Relay Operation. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 14(4), 35-41. 10.15546/aeci-2014-0039
- Muhayimana, O. (2016). Distance Protection for Parallel and Double-Circuit Hv Lines. Yüksek Lisans Tezi, Brno Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği ve Haberleşme Fakültesi, Brno.

- Özevin, E. (2015). Elektrik Güç Sistemlerinde Hatların Kısa Devre ve Güç Salınımına Karşı Nümerik Mesafe Röleleri ile Korunmasının İncelenmesi ve Dinamik Simülasyonunun Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 406314.
- Pillay, K. (2013). Enhancing the Performance of Distance Protection Relays Under Practical Operating Conditions. Yüksek Lisans Tezi, KwaZulu-Natal Üniversitesi, Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği, Durban.
- Samuk, D., Nuroğlu, F. (2019). Kararlı Durumda Seri Kapasitörlerin İletim Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(5), 577-585. 10.5505/pajes.2019.76009
- Schneider Electric SE, *Easergy Micom P443&P446 Fast Multifunction Distance Protection Technical Manual*, Rueil-Malmaison, Fransa, 2021.
- Seyedi, H., Teimourzadeh, S., Nezhad, P. (2014). Adaptive Zero Sequence Compensation Algorithm for Double-Circuit Transmission Line Protection. *IET Generation Transmission & Distribution*, 8(6), 1107-1116. 10.1049/iet-gtd.2013.0538
- Siemens AG, *Siemens Siprotec Distance Protection 7SA522 V4.70.01 Manual*, Berlin, Germany, 2011.
- Sorrentino, E., Garcia, A. (2017). Detailed Analysis of the Effect of Parallel Lines on the Impedance Seen by The Traditional Ground Distance Function. *IET Generation Transmission & Distribution*, 11(11), 2921-2929. 10.1049/iet-gtd.2016.2066
- Srivani, S.G., Panduranga, V.K., Atla, C.R. (2009). Development of Three Zone Quadrilateral Adaptive Distance Relay for the Protection of Parallel Transmission Line, *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Victoria, Avustralya, 10-13 Şubat 2009.
- Teimourzadeh, H., Iyatloo, M., Shahidehpour, M. (2021). Adaptive Protection of Partially Coupled Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(1), 429-440. 10.1109/TPWRD.2020.2983138
- Toruş, A. (2009). Enerji Sistemlerinde Geçici Olayların Korumaya Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 245179.
- URL-1 : <https://www.teias.gov.tr/faaliyet-raporlari>, (Ziyaret tarihi: 15 Şubat 2023)
- Ziegler, G. (2011). *Numerical Distance Protection* (4th). Erlangen: Publicis.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Gökteuçar, E., Alboyacı B. (2022). Mesafe Koruma Röleleri için Ayar ve Test Verilerinin Değerlendirilmesi, *CIGRE Güç Sistemleri Konferansı III*, Ankara, Türkiye, 18-19 Ekim 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kilis'te tamamladı. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2016-2021 yılları arasında Elektrik Üretim Anonim Şirketine ait farklı elektrik üretim santrallerinde görev yaptı. 2021 yılından itibaren Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketinde Koruma Sistemleri Mühendisi olarak çalışma hayatına devam etmektedir.

