

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE TOPRAK ARIZASI İÇİN
KORUMA KARAR DESTEK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

MERT BEKİR ATSEVER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

ARALIK 2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE TOPRAK ARIZASI İÇİN
KORUMA KARAR DESTEK SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

MERT BEKİR ATSEVER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

ARALIK 2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**DEVELOPING PROTECTION DECISION SUPPORT
SYSTEM FOR EARTH FAULTS IN MEDIUM
VOLTAGE NETWORKS**

MERT BEKİR ATSEVER

**A THESIS OF DOCTORATE
ELECTRONICS T ENGINEERING DEPARTMENT**

ADVISOR: PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

DECEMBER 2023



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/11/2023 tarih ve 2023/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/12/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mert Bekir ATSEVER'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ: TUBA GÖZEL

ÜYE

: PROF. DR. ALPER KONUKMAN

ÜYE

: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI

ÜYE

: PROF. DR. BORA ALBOYACI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tek faz toprak arızaları sırasında, arızanın olmadığı bölgede bulunan toprak koruma röleleri kapasitif şarj akımlardan dolayı hatalı açma sinyali üretmektedir. Etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde yeraltı kablosu kullanımının agresif bir şekilde artması ile hatalı açma sayısı artmaktadır. Hatalı açma yük kayıplarına, maddi kayıplara sebep olmaktadır. Hatta, güvenilirlik endekslerinin olumsuz etkilenmesine de yol açmaktadır. Literatürde kapasitif akım temelli hatalı açma olarak bilinen bu problemin giderilmesi noktasında seçilen koruma türünün ve röle ayarlarının şebeke topolojisine uyumlu olarak optimize edilmesi gereklidir. Böylece seçici koruma koordinasyonu sağlanabilir.

Koruma rölelerinin ayarlarının optimize edilmesi çok sayıda kısıt içeren optimizasyon yaklaşımı ile gerçekleşmektedir. Etkin topraklanmış şebekelerde yüksek genlikli arıza akımı sadece arızalı bölgede görülmektedir. Bu sebeple, literatürde toprak arızaları için geliştirilen optimizasyon çalışmaları optimal röle ayarları yardımıyla röle çalışma süresinin minimize edilmesini hedeflenmektedir. Böylece yüksek genlikli arıza akımının şebeke elemanları üzerindeki ısı stresi minimize edilir. Etkin topraklanmamış şebekelerde ise daha düşük genlikli arıza akımları görülmektedir. Ayrıca faz toprak kapasiteleri üzerinden devresini tamamlayan kapasitif şarj akımları arıza bölgesi dışındaki rölelerin hatalı şekilde açma sinyali üretmesine de sebep olmaktadır. Etkin topraklanmamış şebekelerde toprak rölesinin çalışma süresi sabittir. Bu nedenle seçici koruma koordinasyonunun sağlanması için röle çalışma süresinin minimize edilmesinden ziyade çalışması gereken röle sayısının minimize edilmesi gerekmektedir.

Bu tezde etkin topraklanmamış şebekeler için çalışan röle sayısını minimize eden yeni optimizasyon yaklaşımları önerilmiştir. Önerilen yaklaşımlarda yönlü toprak koruma için genlik, yönsüz toprak koruma için genlik ve açı, ilave koruma yöntemi için ise negatif sıra genlik ayarları optimize edilmiştir. Bu üç koruma türü bir paket haline getirilerek Koruma Karar Destek Sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin etkinliği farklı iki radyal dağıtım şebekesi üzerinde çeşitli durum senaryoları için incelenmiştir. Koruma Karar Destek Sistemi kullanımı ile radyal dağıtım şebekelerinde kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etkin Topraklanmayan Şebeke, Tek Faz Toprak Arızası, Hatalı Açma, Optimizasyon, Röle Koordinasyonu.

ABSTRACT

During single-phase earth faults earth fault protection relays located in the area where there is no fault generate false tripping signals due to capacitive charging currents. Aggressive usage of underground cables in non-effectively earthed distribution networks causes an increasing number of false trips. False tripping causes additional loss of load and financial losses. Further, false tripping negatively impacts the reliability indices. To eliminate this problem, known in the literature as capacitive current-based false tripping, the selected protection type and earth fault relay settings must be optimized in accordance with the network topology. Thus, selective protection coordination can be achieved.

Optimizing the settings of protection relays is carried out with a highly constrained optimization approach. In effectively earthed networks, a high magnitude of fault current only appears in the faulted area. For this reason, optimization studies developed for earth faults in the literature aim to minimize relay total operating time with the help of optimal relay settings. Thus, the thermal stresses of high-magnitude fault current on the network are minimized. In non-effectively earthed networks, fault currents with lower magnitudes are observed. In addition, capacitive charging currents completing the circuit through phase-ground capacities cause fault currents to be seen outside the fault zone. Non-effectively earthed networks are protected by definite time relay characteristics. Therefore, rather than minimizing relay operating time, the number of relays that need to operate should be minimized to ensure selective protection coordination.

In this thesis, novel optimization formulations that minimize the number of operating relays for non-effectively earthed networks are proposed. With the optimization formulas, magnitude settings for non-directional earth fault protection, magnitude and angle for directional earth fault protection, and negative sequence magnitude settings for the additional earth protection method are optimized. These three types of protection stages form a package, obtaining the Protection Decision Support System. The effectiveness of the proposed optimization approach was examined for different case scenarios on two different radial distribution networks. With the usage of Protection Decision Support System, the problem of capacitive current-based false tripping in radial distribution networks has been resolved.

Keywords: Non-Effectively Earthed Network, Single Line to Earth Fault, False Trip, Optimization, Relay Coordination.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitiminin başlangıcından Doktora eğitiminin sonuna kadar bilgi ve tecrübelerini bana aktaran, engin hoşgörüsüyle beni yönlendiren, iyi bir mühendis, bilim adamı ve öğretim üyesi olma yolunda örnek aldığım çok değerli sayın hocam Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU'na,

Bilgi ve tecrübesini esirgemeyerek, çalışmalarına destek olan sayın hocam Dr. Özgür KARACASU'ya,

Benden madden ve manen hiçbir şeyi esirgemeyen, gösterdikleri destekle zorlarımı kolay eden sevgili aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar/ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Katkısı	4
1.2. Tezin Sınırları	5
1.3. Tezin Yapısı	5
2. OG DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE AŞIRI AKIM KORUMA FELSEFESİ	7
2.1. Geleneksel Optimizasyon Probleminin Kurgulanması	9
2.2. Faz Arızaları için Geliştirilen Diğer Optimizasyon Yaklaşımları	14
2.3. Faz Arızaları Sırasında Yaşanan Hatalı Açmalar ve Geliştirilen Optimizasyon Yaklaşımları	17
2.4. Sonuç ve Değerlendirme	24
3. OG DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE TOPRAK ARIZALARINA KARŞI KORUMA FELSEFESİ	25
3.1. OG Nötr Topraklama Yöntemlerinin İncelenmesi	27
3.2. Hat Yapısı	35
3.3. Paralel Fider Sayısı ve Fider Mesafesi	38
3.4. Sonuç ve Değerlendirme	39
4. TOPRAK KORUMASI SIRASINDA YAŞANAN HATALI AÇMALAR	40
4.1. TFT Arızası Sırasında Yaşanan Kapasitif Temelli Hatalı Açmalar	43
4.2. TFT Arızası Sırasında Yaşanan Kapasitif Temelli Hatalı Açmaları Engellemek İçin Geliştirilen Koruma Yöntemleri	48
4.2.1. Yönsüz Toprak Koruma (ANSI Kod 51/N)	49
4.2.2. Yönlü Toprak Koruma (ANSI Kod 67/N)	50
4.2.3. İlave Toprak Koruma Yöntemleri	55
4.3. Sonuç ve Değerlendirme	59
5. TOPRAK ARIZALARI İÇİN KORUMA KARAR DESTEK SİSTEMİ GEREKLİLİĞİ	60
5.1. Eşyüksekti Eğrilerinin Çıkarılması ve Yorumlanması	60
5.2. KKDS'nin Mimari Yapısı	70
5.3. Sonuç ve Değerlendirme	72
6. YÖNSÜZ TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI	74
6.1. Literatürdeki Optimizasyon Yaklaşımları	74

6.2. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı	79
6.3. 62 Baralı Radyal Dağıtım Şebekesinde Önerilen Optimizasyon Yaklaşımının Uygulanması	83
6.4. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımının Farklı Şebeke Parametrelerine Göre Seçici Toprak Koruma Performansının Değerlendirilmesi	86
6.5. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı Hakkında Tartışma	92
6.5.1. Dağıtım Şebekesinin Hibrit Hat Yapısına Sahip Olması	93
6.5.2. Koruma Röleleri Tarafından Gerçekleşen Ölçüm ve Hesaplama Hataları	95
6.5.3. Dağıtım Şebekesinde Yük Akımı ve Kapasitif Akım Dengesizliği	95
6.5.4. Dağıtım Şebekesinde Farklı Nötr Topraklama Türü Kullanılması	98
6.6. Sonuç ve Değerlendirme	99
7. YÖNLÜ TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI	101
7.1. Literatürdeki Optimizasyon Yaklaşımları	101
7.2. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı	102
7.3. Yönlü Toprak Koruma Yöntemi İçin Önerilen Yeni Optimizasyon Yaklaşımının 62 Baralı Etkin Topraklanmamış Radyal Dağıtım Şebekesine Uygulanması	105
7.4. Sonuç ve Değerlendirme	111
8. İLAVE TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI	112
8.1. 400/33 kV Topraklama Trafosu Üzerinden Topraklı Radyal Dağıtım Şebekelerinde Sıfır Sıra Davranışlarının Topoloji Bazlı İncelenmesi	115
8.2. 400/33 kV 151 Baralı Gerçek Bir Radyal Dağıtım Şebekesinde İlave Toprak Koruma Uygulaması	123
8.3. Sıfır Sıra Rezonans Problemi için Önerilen İlave Toprak Koruma Yöntemi ve Ayar Optimizasyonu	129
8.4. Sonuç ve Değerlendirme	136
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	137
KAYNAKLAR	141
ÖZGEÇMİŞ	152
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR	153

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

F	: Arıza Noktası
R_P	: Birincil Röle
R_B	: İkincil Röle
C_0	: Sıfır Sıra Kapasitesi
I_F	: Arıza Akımı
I_P	: Röle Eşik Akım Değeri
$T_{(i,k)_P}$	: I_F Arızası için Birincil Rölenin Çalışma Süresi
$T_{(i,j)_B}$	: I_F Arızası için İkincil Rölenin Çalışma Süresi
a	: Röle Karakteristik Katsayısı
β	: Röle Karakteristik Katsayısı
c	: Röle Karakteristik Katsayısı
OF_1	: Birinci Amaç Fonksiyonu
OF_2	: İkinci Amaç Fonksiyonu
OF_3	: Üçüncü Amaç Fonksiyonu
n	: Sistemdeki Toplam Röle Sayısı
W_i	: Ağırlık Katsayısı
$TDS_{i(min)}$	: Minimum Zaman Ayarı
$TDS_{i(max)}$	: Maksimum Zaman Ayarı
$IP_{i(min)}$	: Minimum Eşik Akım Ayarı
$IP_{i(max)}$	: Maksimum Eşik Akım Ayarı
$T_{i(min)}$	: Röle Minimum Çalışma Süresi
$T_{i(max)}$	: Röle Maksimum Çalışma Süresi
I_S	: F Noktasındaki Arızada Kaynaktan Akan Akım
$I_{DÜ}$	: F Noktasındaki Arızada DÜ'den Akan Akım
E_S	: Kaynak Gerilimi
$E_{DÜ}$	: DÜ Gerilimi
Z_S	: Kaynak Empedansı
$Z_{DÜ}$	: DÜ Empedansı
Z_{L1}	: Arızalı Fiderin Empedansı
Z_{L2}	: Sağlıklı Fiderin Empedansı
Z_{T1}	: Birinci Trafonun Empedansı
Z_{T2}	: İkinci Trafonun Empedansı
$I_{C,A}$	: A Fazının Kapasitif Akım Değeri
$I_{C,B}$	: B Fazının Kapasitif Akım Değeri
$I_{C,C}$	: C Fazının Kapasitif Akım Değeri
Z_1	: Pozitif Sıra Empedans
Z_2	: Negatif Sıra Empedans
Z_0	: Sıfır Sıra Empedans
R_0	: Sıfır Sıra Direnç
X_0	: Sıfır Sıra Reaktans
X_1	: Pozitif Sıra Reaktans
E	: Faz Toprak Gerilimi
R_N	: Nötr Topraklama Direnç Değeri

X_N	: Nötr Topraklama Reaktans Değeri
$C_{0,T}$	: Şebekenin Toplam Sıfır Sıra Kapasitesi
ε	: Dielektrik Katsayısı
t	: İletkene Ait Yalıtkanın Kalınlığı
d	: Yalıtkanın Çapı
$3I_{0,N}$	: Nötr Noktasında Görülen Homopolar Akım
$3I_{0,R2}$	: Arızalı Fiderde Görülen Homopolar Akım
$3I_{0,R1}$	: Sağlıklı Fiderde Görülen Homopolar Akım
Z_G	: Nötr Noktası Topraklama Empedansı
V_0	: Ortak Baranın Sıfır Sıra Gerilimi
m	: n. Fiderde Bulunan Toplam Röle Sayısı
$I_{P_{i,j}}$	: i.Fider j.Röleye Ait Toprak Eşik Akım Ayar Değeri
$I_{EF_{i,j,k}}$	: i. Fider j. Rölenin k Arızasında Gördüğü Sıfır Sıra Akım Genliği
W_{ij}	: i. Fider j. Röle k. Arızanın Gerçekleşme Olasılığı
$NSO_{i,j,k}$	: i. Fiderde Bulunan j. Rölenin k. Arızada Çalışıp Çalışmama Durumunu Kontrol Eden Binary Değişkeni
RCA_i	: i. Rölenin Açık Ayarını Temsil Eden Tam Sayı Karar Değişkeni
$\emptyset_{i,k}$	: i. Rölenin k. Noktadaki Tek Faz Toprak Arızası Sırasında Referans Vektöre Göre Sıfır Sıra Açısı
$ROZ_{i,k}$	: i. rölenin k. Noktadaki TFT arızası için çalışma bölgesi Kontrol Eden Binary Değişken
AAS	: Arıza Akım Sınırlayıcı
ACO	: Ant Colony Algorithm
AGF	: Açık Güvenlik Faktörü
ATA	: Azami Tork Açısı
ATP	: Alternative Transient Program
BEDAŞ	: Boğaziçi Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
BIP	: Binary Integer Programming
CFA	: Chaotic Firefly Algorithm
CGA	: Continuous Genetic Algorithm
CSA	: Crow Search Algorithm
DMS	: Distribution Management System
DŞİ	: Dağıtım Şebeke İşletmecisi
DÜ	: Dağıtık Üretim
EA	: Evolutionary Algorithm
EMTP	: Electro Magnetic Transient Program
ER-WCA	: Evaporation Rate Water Cycle Algorithm
FA	: Firefly Algorithm
GA	: Genetic Algorithm
GAMS	: General Algebraic Modeling System
GPYE	: Gerilim Polarizasyonlu Yönlü Eleman
HAE	: Hatalı Açma Eğrisi
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
KKDS	: Koruma Karar Destek Sistemi
KZA	: Koordinasyon Zaman Aralığı
LP	: Lineer Programming
MILP	: Mixed Integer Lineer Programming
MINLP	: Mixed Integer Non-Lineer Programming

NLP	: Non-Linear Programming
NNA	: Neural Network Algorithm
NSO	: Normally Should Operate
OG	: Orta Gerilim
OKSIKLI	: Ortalama Kesinti Sıklığı
K	
OKSÜRE	: Ortalama Kesinti Süresi
PFA	: Path Finder Algorithm
PSCAD	: Power Systems Computer Aided Design
PSO	: Particle Swarm Optimization
RKA	: Röle Kanat Açısı
RTA	: Root Tree Algorithm
RTDS	: Real Time Data System
SA	: Simulated Annealing
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SEM	: Satılmayan Enerji Miktarı
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TDS	: Time Dial Setting
TFT	: Tek Faz Toprak
XLPE	: Cross Linked Polyethylene
WCA	: Water Cycle Algorithm
QCQP	: Quadratically Constrained Quadratic Programming

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Aşırı akım faz koruma prensip şeması.	7
Şekil 2.2: Faz arızalarının şebekeden temizlenme süreci.	9
Şekil 2.3: Farklı röle karakteristiklerine ait röle çalışma süreleri.	11
Şekil 2.4: Radyal dağıtım şebekesinde koordinasyon.	13
Şekil 2.5: DÜ eklenmiş dağıtım şebekesi ve röle konumları.	18
Şekil 2.6: DÜ eklenmiş dağıtım şebekesine ait eşdeğer devre.	18
Şekil 2.7: Eğri çakışma problemi.	21
Şekil 2.8: Her iki uçtan sonlandırmalı paralel fiderlerde yaşanan hatalı açma.	22
Şekil 3.1: Toprak korumasına ait prensip şeması.	26
Şekil 3.2: TFT arızası için dengeli ve arızalı duruma ait vektör diyagramı.	27
Şekil 3.3: OG nötr noktası topraklama yöntemleri.	28
Şekil 3.4: OG nötr noktası topraklama yöntemlerinin haritalandırılması.	31
Şekil 3.5: Dağıtım şebekesine ait pozitif-negatif ve sıfır sıra eşdeğer devre.	31
Şekil 3.6: Hat yapılarına ait bilgiler.	36
Şekil 3.7: Farklı çalışmalara ait şebekelerin topolojik yapılarının karşılaştırılması	38
Şekil 4.1: DÜ olmayan dağıtım şebekesinde TFT arızasının temizlenme süreci.	43
Şekil 4.2: IEEE Standart 3003.1 2019'a göre çizilen iki fiderli dağıtım şebekesi için TFT arızası sırasında akım dağılımları.	45
Şekil 4.3: TFT arızası sırasında gerilim ve akım büyüklüklerinin zamana bağlı değişimi ($R_G=20 \Omega$).	47
Şekil 4.4: Yönsüz toprak koruma uygulaması.	49
Şekil 4.5: GPYE yönteminin açılı diyagramı.	52
Şekil 4.6: GPYE yöntemi ile yönlü toprak koruma uygulaması.	54
Şekil 4.7: Aktif enerji yöntemi ile hatalı açma engelleme.	57
Şekil 5.1: TFT arıza analizleri için kurulan test şebekesi.	61
Şekil 5.2: Direnç üzerinden topraklı şebeke için arızalı fidere ait $3I_0$ dağılımları.	62
Şekil 5.3: Reaktans üzerinden topraklı şebeke için arızalı fidere ait sıfır $3I_0$ dağılımları.	63
Şekil 5.4: Direnç üzerinden topraklı şebeke için sağlıklı fidere ait $3I_0$ dağılımları.	65
Şekil 5.5: Reaktans üzerinden topraklı şebeke için sağlıklı fidere ait $3I_0$ dağılımları.	66
Şekil 5.6: $HAE=100 A$ için oluşturulan koruma bölgeleri.	66
Şekil 5.7: Farklı kablo kesitleri için sağlıklı fiderde görülen $3I_0$ değişimi.	68
Şekil 5.8: Sıfır sıra polar diyagram [89].	69
Şekil 5.9: KKDS'ye ait mimari yapı.	71
Şekil 6.1: Röle optimizasyon sürecinin tarihsel gelişimi.	74
Şekil 6.2: Ters zaman ve sabit zaman karaktersileri.	77

Şekil 6.3:	Etkin topraklanmayan şebekelerde dengeli arıza ve toprak arızası.	78
Şekil 6.4:	Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının uygulama adımları.	82
Şekil 6.5:	62 baralı gerçek dağıtım şebekesi.	83
Şekil 6.6:	Birinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.	87
Şekil 6.7:	İkinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.	88
Şekil 6.8:	Üçüncü fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.	89
Şekil 6.9:	Dördüncü fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.	90
Şekil 6.10:	Farklı arıza dirençleri için röleler tarafından görülen sıfır sıra akım değişimi ve optimal I_p değerleri	91
Şekil 6.11:	20 Ω direnç üzerinde topraklı şebeke için hassasiyet analizi.	92
Şekil 6.12:	Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi.	93
Şekil 6.13:	Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerini değişimi ve optimal I_p değerleri.	95
Şekil 6.14:	62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde kapasitif akım dengesizliğinin oluşturulduğu baralar.	96
Şekil 6.15:	Kapasitif akım yönünden dengesiz 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde gerçekleşen TFT arızası genliklerini değişimi ve önerilen I_p değerleri.	97
Şekil 6.16:	Önerilen optimizasyon yaklaşımının topraklama trafosu kullanımında seçicilik performansı.	99
Şekil 7.1:	Yönlü toprak koruma rölesine ait referans, işletme ve ayar büyüklükleri.	103
Şekil 7.2:	62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının röle bazlı sonuçları (240 mm ² XLPE kablo).	106
Şekil 7.3:	Farklı şebeke senaryoları için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde elde edilen optimum RCA ayarları.	108
Şekil 7.4:	62 baralı radyal dağıtım şebekesi için tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının röle bazlı sonuçları (240 mm ² XLPE kablo-Topraklama trafosu üzerinden topraklı).	109
Şekil 7.5:	Röle $R_{1,1}$ 'e ait yakınlaştırılmış grafik.	110
Şekil 8.1:	Nötr noktası reaktans üzerinden topraklı iki fiderli şebeke için sıfır sıra eşdeğer devresi.	112
Şekil 8.2:	Altı fiderli dağıtım şebekesi için sıfır sıra akım genliğinin değişimi.	114
Şekil 8.3:	Nötr noktasının topraklama trafosu üzerinden topraklı sabit ve fider topolojisinin değişken kabul edildiği ikinci parametrik analize ait görsel özet.	116
Şekil 8.4:	70 mm ² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen $3I_0$ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.	118

Şekil 8.5:	95 mm ² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen $3I_0$ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.	119
Şekil 8.6:	120 mm ² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen $3I_0$ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.	120
Şekil 8.7:	240 mm ² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen $3I_0$ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.	122
Şekil 8.8:	400/33 kV 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi.	123
Şekil 8.9:	151 baralı radyal dağıtım şebekesinde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen $3I_0$ genliğinin değişimi (hava hat).	124
Şekil 8.10:	151 baralı radyal dağıtım şebekesinde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen $3I_0$ genliğinin değişimi (XLPE kablo).	125
Şekil 8.11:	Farklı iki arıza noktası için Bölüm 6'da önerilen yöntem ile elde edilen optimal I_p ayarlarının 151 baralı radyal dağıtım şebekesindeki seçicilik performansı.	127
Şekil 8.12:	151 baralı radyal dağıtım şebekesi için rölelerin arıza noktalarına göre açılma değişimleri.	128
Şekil 8.13:	Nötr noktası reaktans üzerinden topraklı iki fiderli şebeke için negatif sıra eşdeğer devresi.	130
Şekil 8.14:	151 baralı radyal dağıtım sisteminde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen negatif sıra akım genliğinin değişimi.	132
Şekil 8.15:	İlave toprak koruma yönteminin seçicilik performansı.	134

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Farklı ters zaman karakteristiklerine ait katsayılar [14].	10
Tablo 2.2: Aşırı akım röle koordinasyonu çalışmalarında kullanılan bazı meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları.	16
Tablo 2.3: Faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açmaları engellemek için geliştirilen optimizasyon yaklaşımlarına ait özet tablosu.	23
Tablo 3.1: Farklı topraklama türlerine ait arıza akım hesap formülasyonları.	32
Tablo 3.2: OG topraklama yöntemlerinin oranı (şebeke) [66].	34
Tablo 3.3: OG topraklama yöntemlerinin oranı (endüstri) [66].	34
Tablo 3.4: Havai hat ve kabloya ait R-L-C matrisleri [4].	36
Tablo 4.1: 2019 ve 2020 yılları arasında, kapasitif akım temelli hatalı açma problemine ilişkin olay sayıları ve kalite endeks bilgileri.	44
Tablo 4.2: Algoritmaların ayar parametrelerine göre sınıflandırılması.	48
Tablo 4.3: Arızalı fiderin tespiti ve hatalı açmaların engellenmesi için geliştirilen ilave toprak koruma yöntemlerine ait özet tablosu.	58
Tablo 6.1: TFT için önerilen optimizasyon yaklaşımları ve şebekelerin topraklama türleri.	76
Tablo 6.2: Röleler tarafından görülen $3I_0$ ve röle çalışma durumlarının havai hat ve kablo kullanım durumuna göre değişimi.	84
Tablo 6.3: 62 baralı radyal dağıtım şebekesi için optimal TDS ve I_p ayarları.	85
Tablo 6.4: Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_p ayarları.	94
Tablo 6.5: Kapasitif akım dengesizliği senaryosu için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_p ayarları.	97
Tablo 6.6: Topraklama trafosu üzerinden topraklı 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_p ayarları.	98
Tablo 7.1: Röle açma ayar optimizasyonu ile ilgili literatür çalışmaları.	102
Tablo 7.2: Farklı kablo kesitleri için 62 baralı radyal dağıtım şebekesinde optimum RCA ayarları.	105
Tablo 8.1: Test şebekesi için parametreler ve değerler.	117
Tablo 8.2: 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için Bölüm 6 ve Bölüm 7’de önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal I_p ayarları.	126
Tablo 8.3: 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için Bölüm 6 ve Bölüm 7’de önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal I_p ayarları ve ilave koruma yöntemi ayarları.	133
Tablo 8.4: Farklı şebeke parametreleri için optimal $I_{p,2}$ ayarları.	135
Tablo 8.5: Optimal $I_{p,2}$ ayarının seçici koruma performansı.	135

1. GİRİŞ

Orta Gerilim (OG) dağıtım sistemleri üretilen elektrik enerjisinin son kullanıcıya dağıtılmasından sorumludur. Bu sorumluluk Dağıtım Şebeke İşletmecileri (DŞİ) tarafından elektrik enerjisinin son kullanıcıya kesintisiz bir şekilde aktarılmasını gerekli kılmaktadır [1]. Elektrik enerjisine olan talebin artması, OG dağıtım sistemlerinin yapısının değişmesine yol açmaktadır. OG dağıtım sistemlerinde gerçekleşen yapısal değişiklikleri; radyal şebeke yerine döngü şebeke işletilmesi [2], havai hat yerine yeraltı kablosu kullanılması [3], farklı nötr topraklama türlerinin kullanılması [4] ve OG dağıtım fiderlerine Dağıtık Üretim (DÜ) eklenmesi şeklinde sıralamak mümkündür [5]. Topolojik yapının değişmesi kullanılan işletme ve koruma felsefesinin değişmesine sebep olmakta veya güncel koruma röle ayarlarının DŞİ'ler tarafından yenilenmesini gerekli kılmaktadır.

Elektrik enerjisi talebinin hızla artması ve şehirleşme özellikle metropol şehirlerde havai hat yerine yeraltı kablosu kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Ayrıca havai hatların fırtına, kasırga gibi doğa olaylardan etkilendiği bilinmektedir. Bu durum Norveç, İsveç ve Danimarka gibi bazı İskandinav ülkelerinin hızlı bir şekilde mesken bölgelerde dahi uzun kablo hattı kullanmasına sebep olmuştur [6]. Bu durum OG dağıtım şebekesinin sahip olduğu toplam faz toprak kapasite değerinin ve kapasitif şarj akımının genliğinin artmasına yol açmaktadır. OG dağıtım şebekesinde bulunan kapasitif şarj akımların gerilim düşümüne pozitif etkisi ve yeraltı kablo kullanımının doğa olaylarına karşı sistemin daha güvenilir işletilmesi yararları olmasına rağmen özellikle tek faz toprak (TFT) arızalarına karşı sistemin seçici korunmasını zorlaştırmaktadır.

TFT arızası sırasında sistemde dolaşan yeraltı kablolarının kapasitif şarj akımları, arızanın olmadığı bölgede bulunan toprak koruma rölesinin arıza algılamasına neden olmaktadır. Bu durum ilgili kesicinin hatalı açma yapmasına neden olmaktadır. Bu olgu literatürde hatalı açma probleminin sebeplerinden biri olarak gösterilmektedir [7]. Hatalı açma probleminin sahada kapasitif temelli hatalı açma şeklinde kullanıldığı da bilinmektedir. Kapasitif temelli hatalı açma ile arızanın olmadığı bölge sistemden izole edilmekte ve bazı durumlarda arıza sistemde kalabilmektedir. Böylece şebeke işletmecisinin Satılamayan Enerji Miktarı (SEM), Ortalama Kesinti Süresi (OKSÜRE)

ve Ortalama Kesinti Sıklığı (OKSIKLİK) gibi güvenilirlik endekslerini olumsuz etkilemektedir. Türkiye’de ve dünyanın pek çok bölgesinde OG dağıtım şebekelerinin koruma ve işletme kolaylığı sağladığından dolayı radyal olarak işletilmesi DŞİ’ler tarafından tercih edilmektedir. Radyal dağıtım şebekelerinde güç akışı kaynaktan yüke olmak üzere tek yönlüdür. Bu nedenle, radyal dağıtım şebekelerinin yönsüz koruma röleleri ile TFT arızasına karşı korunması pratiği oldukça yaygındır. Türk Dağıtım şebekesinde dağıtım bağlantısı için iki farklı gerilim seviyesinde iki farklı bağlantı grubuna sahip YG/OG trafo kullanılmaktadır. Birincisi ve geleneksel olan 154 kV ile OG şebeke arasında bağlantıyı sağlayan 154/33 kV yıldız/yıldız 20 Ω direnç üzerinden topraklı; ikincisi özellikle büyük şehirlerde 400 kV ile bağlantıyı sağlayan 400/33 kV yıldız/ Δ endüktif karakterli (yaklaşık 33 Ω) topraklama trafosu üzerinden topraklı transformatörlerdir. Her iki bağlantı transformatörü de OG tarafta direkt topraklı olmadığı için etkin topraklanmayan bir şebeke işletilmesine yol açmaktadır. Etkin topraklanmamış şebekeler yüksek oranda yeraltı kablosu kullanımına bağlı olarak kapasitif akım temelli hatalı açma problemlerine sıklıkla maruz kalmaktadır.

Hatalı açmaların engellenmesi noktasında OG dağıtım şebekesinde bulunan toprak koruma rölelerin ayar değerlerinin optimize edilmesi veya koruma röle tipinin/koruma türünün değiştirilmesi gerekmektedir. Hali hazırda işletmede olan bir şebeke için tüm röle tiplerinin değiştirilmesi zaman ve maliyet açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bundan dolayı mevcut rölelerinin ayarlarının güncellenmesi işletme maliyeti açısından optimum sonuç sunabilir. Genel olarak yönsüz toprak koruma röleleri zaman (TDS) ve genlik (I_p), yönlü toprak koruma röleleri ise TDS, I_p ve Azami Tork Açısı (ATA) ayar parametrelerine sahiptir. Ayrıca bu ayar değerleri dışında farklı ayar değerlerine sahip ilave toprak koruma türleri ve ayarlarının da mevcut olduğu bilinmektedir. Özellikle topraklama trafosu kullanılan kablo yoğun şebekelerde sıfır sıra akım genliğinde rezonans yaşandığı için negatif sıra bileşenin (I_2) bir gösterge olarak dikkate alınması gerektiği [8] numaralı çalışmada belirtilmiştir. Literatürde koruma rölesinin ayar parametrelerinin optimize edilmesi genelde üç faz dengeli arızalar için gerçekleştirilmektedir. Üç faz dengeli arızalarda yüksek genlikli arızalar görülmektedir. Bu sebeple aşırı akım koruma rölelerinin toplam çalışma süresi minimize edilerek, arızanın en kısa sürede şebekeden temizlenmesi hedeflenmektedir. Böylece üç faz dengeli arızalar sırasında ortaya çıkan yüksek genlikli arıza akımlarının şebeke elemanları üzerindeki ısı etkisi minimize edilmektedir. Toprak arızaları için

geliştirilen optimizasyon yaklaşımları ise koruma rölelerinin ayarları sadece etkin topraklı dağıtım şebekeleri için geliştirilmiştir. Etkin topraklı veya bir diğer deyişle direkt topraklı dağıtım şebekelerinde yüksek genlikli arıza akımları akmaktadır. Ters zaman karakteristiği kullanılarak yüksek genlikli arıza akımların daha kısa sürede temizlenmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle ters zaman karakteristiğinin ayarlanması için gereken I_p ve TDS ayarı dengeli üç faz arızalar için yapılan optimizasyon çalışmalarına benzer şekilde yürütülmektedir. Hem üç faz dengeli arızalar hem de etkin topraklı dağıtım şebekelerinde gerçekleşen toprak arızaları için optimal koruma rölesi ayarları ile rölelerin toplam çalışma süresi minimize edilmektedir.

Etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde ise, nötr noktası bir empedans üzerinden topraklı veya izole olduğundan dolayı arıza akım genliği düşüktür. Saha uygulamalarında gerek ülkemizde gerekse Kıta Avrupası'nda dağıtım şebekeleri yüksek oranda etkin topraklanmamış şebekelerdir. Nötr noktasının topraklama empedans değerine göre yük akımında daha düşük genlikte arıza akımları görülebilmektedir. Bu nedenle etkin topraklanmamış şebekelerde ters zaman karakteristiği kullanmak arıza temizleme süresini oldukça uzatacaktır. Arıza süresince şebeke aşırı gerilimlere maruz kalacağından dolayı şebekenin uzun süreli toprak arızası altında çalıştırılması otoriteler tarafından istenmemektedir. Bu nedenle etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde sabit zaman karakteristiği yaygın olarak kullanılmaktadır. Sabit zaman karakteristiği de I_p ve TDS ayar değerlerine sahiptir. TDS ayar değeri röle çalışma süresine tekabül etmektedir. Bu nedenle tek değişken rölelerin genlik ayarısıdır. Yönsüz toprak koruma pratiğinde koruma rölesinin çalışma durumu I_p değerine bağlı ve çalışma süresi sabit TDS değeri olduğundan dolayı kablo yoğun etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekelerinde I_p değerlerinin optimize edilerek çalışan röle sayısının minimum duruma getirilmesi gerekmektedir. Kapasitif akım temelli hatalı açma probleminde arıza yolunda bulunan rölelerin yanı sıra arıza ile ilgisi olmayan röleler de açma sinyali üretmektedir. Bu nedenle kurgulanan amaç fonksiyonu TFT arızası sırasında açma sinyali üreten röle sayısını minimize edecek en uygun I_p ayarını hedeflemektedir. Yönlü toprak koruma için ise I_p ve ATA ayarının optimize edilmesi gerekmektedir. Yönlü toprak koruma için önerilen optimizasyon yaklaşımında optimal I_p ve ATA ayarları ile çalışması gereken röle sayısı minimize edilmiştir. İlave toprak koruma için ise optimal I_2 ayarları ile çalışması gereken röle sayısını minimize eden amaç fonksiyonu geliştirilmiştir. Böylece, bu tez kapsamında

kapasitif akım temelli hatalı açmaları engellemek için kullanılan toprak koruma yöntemleri uygulama kolaylığı ve gerekli ayar parametrelerinin sayısına bağlı olarak üçe ayrılmıştır. Her bir toprak koruma yöntemi için gerekli olan rölelere ait optimal ayarlar geliştirilen yeni optimizasyon yaklaşımları ile elde edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon yaklaşımları ile yönlü, yönsüz ve ilave toprak korumaya ait koruma rölelerinin ayar değerleri optimize edilerek hatalı açma problemi TFT arızası için giderilmiştir. Böylece farklı toprak koruma yöntemlerine karşılık gelen ayar değerlerinin optimize edilmesi, DŞİ için Koruma Karar Destek Sisteminin (KKDS) geliştirilmesini sağlamıştır. Önerilen KKDS'ye ait optimizasyon yaklaşımlarının etkinliği gerçek bir OG dağıtım şebekenin modellenmesi ile çeşitli arıza durumları (arıza direnci, arıza lokasyonu, kapasitif akım dengesizliği, hibrit şebeke yapısı, ölçüm hataları, çeşitli gerilim seviyeleri ve farklı nötr topraklama yöntemleri) için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

1.1. Tezin Amacı ve Katkısı

Kablo kullanımının artmasına bağlı olarak kapasitif akım temelli hatalı açmaların sayısının ve sıklığının artması DŞİ açısından SEM'in artmasının yanı sıra güvenilirlik endekslerinin de olumsuz etkilenmesine yol açmaktadır. Bu nedenle kapasitif akım temelli hatalı açmaların giderilmesi için bu tez çalışmasında toprak koruma rölesinin ayarlarının şebeke topolojisinden bağımsız bir şekilde optimize edildiği yeni optimizasyon yaklaşımları önerilmiştir. Geliştirilen optimizasyon yaklaşımları ile farklı toprak koruma yöntemleri ve bu toprak koruma yöntemlerine karşı gelen koruma rölesi ayar değerlerinin optimize edildiği bir KKDS önerilmiştir. KKDS kullanımı ile birlikte belirlenen toprak koruma türüne göre en uygun röle ayar değerleri elde edilecektir. Örneğin direnç topraklı radyal dağıtım şebekesinde yönsüz koruma kullanılmak isteniyorsa yönsüz toprak koruma rölesine ait optimal I_p ve TDS ayarı elde edilecektir. Yönlü toprak koruma kullanılmak isteniyorsa optimal I_p , TDS ve ATA ayarı elde edilecektir. Sıfır sıra akım genliğinin rezonansa uğradığı bazı 400/33 kV topraklama trafosuna sahip şebekelerde ise optimal I_2 ayarı elde edilecektir. Böylece DŞİ'ler her bir koruma yöntemine uygun optimal ayarlar yardımıyla şebekelerinin Satılamayan Enerji miktarlarını düşürerek mali kayıplarını azaltabilecektir. Kapasitif akım temelli hatalı açmaların engellenmesi ile süreç içerisinde OKSIK ve OKSURE endeksleri düşecektir.

1.2. Tezin Sınırları

OG dağıtım şebekeleri işletme sürecinde farklı türde ve tipte arızaya maruz kalmaktadır. OG dağıtım şebekelerinde gerçekleşme oranı en yüksek arıza tipi TFT arızası olduğu için bu tez kapsamında TFT arızası incelenmiştir. Diğer iki-faz toprak, üç faz dengeli arızalar kapsam dışında tutulmuştur. TFT arızasını süresine göre kalıcı ve geçici arıza olarak iki sınıfa ayırmak mümkündür. Bu tez kapsamında kalıcı arızalar incelendiği için arıza akım büyüklükleri kararlı hal bölgesinde (steady-state) elde edilmiş olup, geçici hal (transient) bölgesi kapsam dışı tutulmuştur. Analizler 33 kV'luk radyal etkin topraklanmamış dağıtım şebekeleri ile sınırlı tutulmuş olup döngü (ring) şebekeler incelenmemiştir. Saha verileri yardımıyla iki farklı 33 kV'luk dağıtım şebekesinin gerçekçi modellemesi (topraklama türleri, trafo parametreleri, hat parametreleri ve hat mesafeleri) yapılmıştır. Modelleme ve arıza simülasyonları Electro Magnetic Transient Program-Alternative Transient Program (EMTP-ATP Draw) Programında gerçekleştirilmiştir. İncelenen birinci dağıtım şebekesi 62 baralı topolojiye sahip, ikinci dağıtım şebekesi ise 151 baralı topolojiye dağıtım şebekesidir. Radyal dağıtım şebekesinde yük akımı tek yönlü olarak incelenmiştir. Bu nedenle DÜ etkisi kapsam dışı tutulmuştur. Optimizasyon problemi kurgulandığında koruma rölesinin ayar değerleri (I_p , TDS, ATA, I_2) tam sayı değişken olarak tanımlanmıştır. Koruma rölesinin çalışıp çalışmama durumu ise binary kontrol değişkeni olarak tanımlanmıştır. Kurgulanan optimizasyon problemi birden fazla değişken ve tam sayı içerdiği için Karışık Tamsayılı Lineer Olmayan Programlama (MINLP) yöntemi kullanılmıştır. Problem General Algebraic Modeling System (GAMS) ortamında çözdürülmüştür. Yöntem etkinliğinin farklı parametrelere göre performansı incelenmiştir.

1.3. Tezin Yapısı

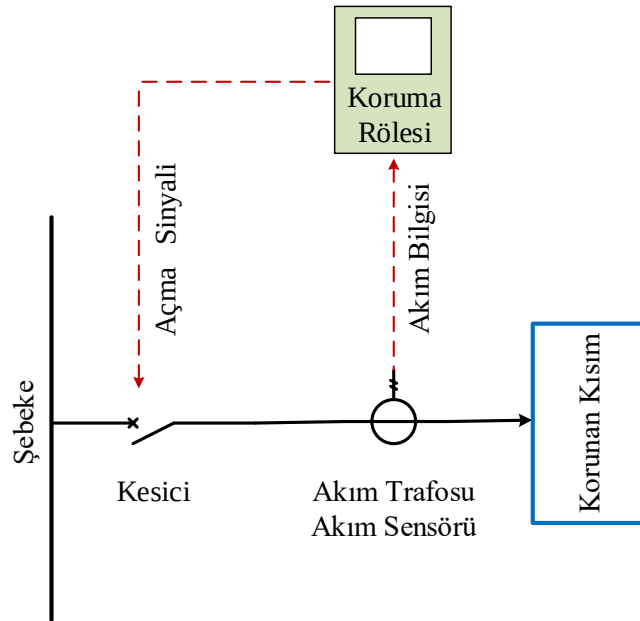
Tez akışı şu sıra ile devam etmektedir. Tezin ikinci bölümünde dağıtım şebekelerinde aşırı akım koruması hakkında bilgi verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde dağıtım şebekesinde toprak arızalarına karşı koruma felsefesi hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Tezin dördüncü kısmında toprak arızası sırasında yaşanan hatalı açmalar ve geliştirilen koruma yöntemleri anlatılmıştır. Kullanılan koruma yöntemleri uygulama basitliği ve gerekli ayar parametreleri göz önüne alınarak üçe ayrılmıştır. Bunlar yönsüz toprak koruma, yönlü toprak koruma ve ilave toprak koruma

yöntemleridir. Tezin beşinci bölümünde toprak arızaları için KKDS'nin gerekliliği gösterilmiştir. Altıncı bölümde KKDS'nin birinci adımı olan yönsüz toprak koruma için koruma röle ayarlarının optimize edildiği yeni optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Yaklaşımın etkinliği farklı parametreler dikkate alınarak incelenmiştir. Yedinci bölümde KKDS'nin ikinci adımı olan yönlü toprak koruma için gereken röle ayalarını optimize eden yeni optimizasyon yaklaşımı tanıtılmıştır. Benzer şekilde yaklaşımın etkinliği farklı parametreler dikkate alınarak incelenmiştir. KKDS'nin son adımı olan ilave toprak koruma yöntemi için negatif sıra temelli koruma algoritması önerilmiş ve röle ayar değerlerini optimize eden yeni optimizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Tezin dokuzuncu ve son kısımda sonuçlara ve tartışmalara yer verilmiştir.



2. OG DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE AŞIRI AKIM KORUMA FELSEFESİ

Güç sistemlerinin etkin ve sağlıklı bir şekilde işletilmesi için şebekenin sürekli izlenmesi gerekmektedir. Bu sayede şebekede yaşanan anormal olaylar tespit edilebilir ve önleyici tedbirler alınabilir. Kısa devreler şebekede yaşanan anormal olaylardan biridir. Şebekelerde farklı tipte kısa devreler yaşanmaktadır. Kısa devre tiplerini üç faz kısa devre, iki faz kısa devre, iki faz toprak kısa devre ve tek faz toprak kısa devresi olarak sıralamak mümkündür. Ayrıca iki faz kısa devrelerin özel bir durumu olan cross-country kısa devrelerine de şebekelerde karşılaşılmaktadır. Dengeli üç faz kısa devre arızalarında, arıza sırasında genellikle aşırı akımlar gözlemlenmektedir. Bu nedenle aşırı akım genliği şebekede yaşanan arıza tespiti için önemli bir göstergedir. Aşırı akım bilgisi her bir faza yerleştirilen akım ölçüm transformatörleri veya akım sensörlerinden elde edilmektedir. Akım ölçüm transformatörleri veya akım sensörlerinden alınan akım bilgisi koruma rölelerine aktarılmaktadır. Koruma rölesinden röle ayar parametrelerine göre açma sinyali üretilerek ilgili kesicinin açma yapması sağlanmaktadır.



Şekil 2.1: Aşırı akım faz koruma prensip şeması.

Aşırı akım faz korumanın prensip şeması **Şekil 2.1** ile gösterilmiştir. Dağıtım şebekesi özelinde korunan kısım genel olarak dağıtım fiderleri olmakla birlikte generatör, motor ve güç transformatörleri v.b sistem elemanları olabilir. Aşırı akım koruma rölesi olarak pek çok farklı tipte ve özellikte koruma rölesi kullanılmaktadır [1].

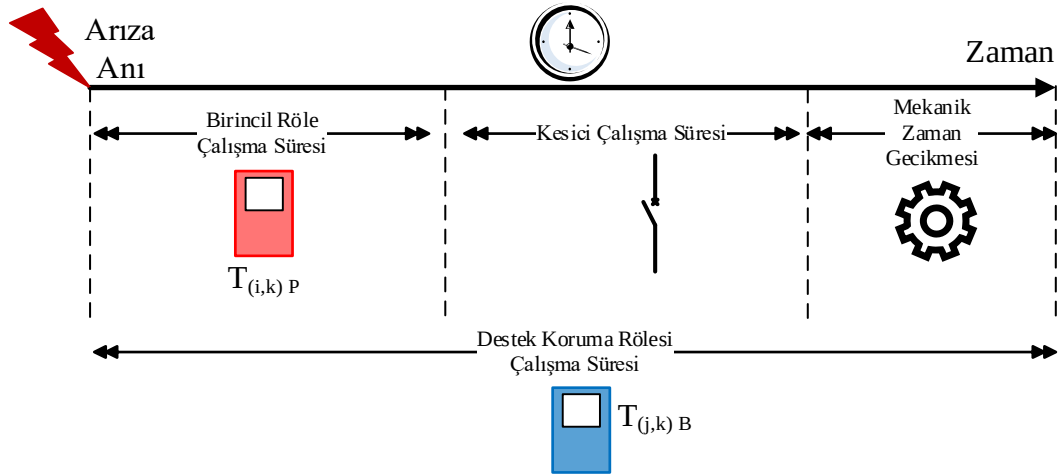
- **Elektromnyetik Röleler:** Eski tip indüksiyon diski bulunan rölelerdir. Röle üzerinden akım geçmesi ile röle çalışmaktadır. Röle çalışma süresi diskin dönme hızına göre değişmektedir. Akım genliğinin artması diskin dönme hızını arttırmak röle çalışma süresini azaltmaktadır. Mekanik yapıda olması bu tip rölelerin daha dayanıklı olmasını sağlasa da günümüz modern dağıtım şebekelerinde kullanım oranı oldukça düşüktür.
- **Statik Röleler:** Yarıiletken teknolojisi (transistör, tristör ve diyot) kullanılarak tasarlanan röle tipidir. Elektromanyetik rölenin mekanik dezavantajları bu röle tipinde görülmemektedir. Bununla birlikte röle içinde kullanılan elemanların bozulma riski daha fazladır.
- **Dijital Röleler:** Akım trafosundan alınan analog akım bilgisinin genelde alçak geçiren filtreden geçirilerek dijital sinyale dönüştürüldüğü modern röle tipidir. Modern dağıtım şebekelerinde en çok kullanılan röle tipidir. Dijital rölelerinin mevcut şebekelere kolayca uygulanabilir olması avantajlarını oluştururken; kullanım ömürleri diğer röle tiplerinden daha kısadır ve şebekede yaşanan geçici olaylardan etkilenmektedir.

Dağıtım şebekelerini aşırı akımlara karşı etkin bir şekilde korunması ve enerji arz güvenliğinin en üst seviyede tutulması için DŞİ'lerin bazı kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bu temel gereklilikleri seçicilik, kararlılık, hassasiyet ve hız şeklinde sıralamak mümkündür. Temelde, kriterlerin sağlanması koruma rölelerinin şebeke topolojisine uygun bir şekilde ayarlanmasını kapsamaktadır. Aşırı akım koruma yöntemi, mesafe koruma ve diferansiyel koruma yöntemleri ile kıyaslandığında ekonomik alternatif sunmaktadır [9]. Ayrıca aşırı akım koruma, röle konumundan uzakta gerçekleşen arızaların algılanması noktasında diğer iki koruma yaklaşımına kıyasla daha avantajlıdır. Aşırı akım koruma yönteminin uygulama kolaylığı sunması ve ekonomik olması hem iletim şebekelerinde hem de dağıtım şebekelerinde tercih edilen bir koruma yöntemi olmasını sağlamıştır [10]. Aşırı akım koruma rölelerin etkili

ve seçici bir şekilde koruma sağlaması için koruma röle parametrelerinin düzgün ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarlar optimum olmayan [11] ancak pratik bir şekilde belirlenen ve optimum ayarlar [12] şeklinde iki farklı yaklaşımla ele alınmaktadır. Optimum olmayan ayarlar basit şebekeler için kullanılırken, optimum ayarlar ise yüksek sayıda bara içeren karmaşık şebekeler için kullanılmaktadır. Aşırı akım koruma rölelerin ayarlarının optimize edilmesi ile birlikte seçici koruma koordinasyonu sağlanırken, toplam röle çalışma süresi minimize edilerek şebeke üzerindeki ısı etki azaltılmaktadır. Bu nedenle koruma rölesinin ayar optimizasyon süreci yüksek kısıt fonksiyonu içeren optimizasyon problemi şeklinde kurgulanabilir

2.1. Geleneksel Optimizasyon Probleminin Kurgulanması

Güç sistemleri özelinde OG dağıtım şebekeleri oldukça fazla sayıda arıza ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, seçicilik kistası ile arızaların sistemden olabildiğince hızlı bir şekilde temizlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle koruma röle ayarlarının bu hususlara uygun yapılması gerekmektedir. Faz arızalarının şebekeden temizlenme süreci **Şekil 2.2** ile gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Faz arızalarının şebekeden temizlenme süreci.

Şekil 2.2'de verilen şematiğe göre arızanın tespit edilmesinin ardından birincil koruma rölesi çalışmaktadır. Birincil koruma rölesinin çalışmasının ardından ikincil koruma rölesi çalışmaktadır. Birincil koruma rölesi ile destek koruma rölesi arasındaki zaman farkı ile seçici koruma koordinasyonu sağlanmaktadır. $T_{i,k}$ k noktasında gerçekleşen

faz arızası için i . rölenin çalışma süresini temsil etmektedir. Bu değer denklem (2.1) ile hesaplanmaktadır.

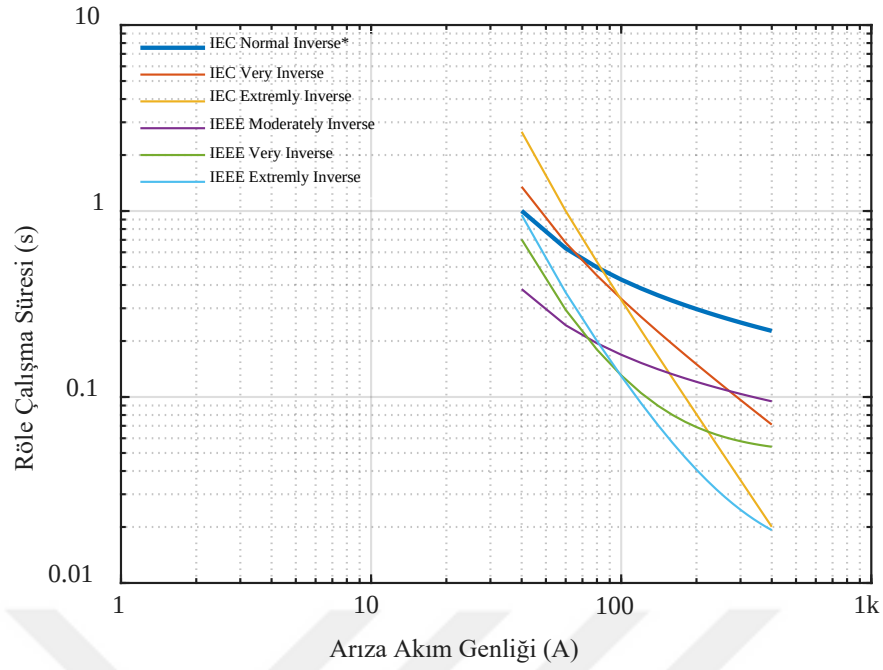
$$T_{i,k} = \frac{a \cdot TDS_i}{\left(\frac{I_F}{I_P}\right)^\beta - 1} + c \quad (2.1)$$

Burada; I_F : Aşırı akım rölesi üzerinden okunan arıza akımının genlik değeridir. I_P : Aşırı akım rölesinin ayarlanan eşik akım değeridir. Genelde yük akımının (I_L) nominal değerinin 1,25 ile 1,5 katına ayarlanması pratiği yaygındır. Toprak arızalarında ise genellikle şebeke dengesizliği göz önüne alınarak I_L 'nin 0,2 ile 0,3 katına set edilir [13]. TDS_i : i . rölenin zaman ayarını temsil etmektedir. a , β ve c aşırı akım röle karakteristiğine bağlı olarak değişen sabit katsayıları temsil etmektedir. Gerek optimizasyon çalışmalarında gerekse sahada farklı koruma rölesi karakteristikleri kullanılmaktadır. Röle karakteristiklerine ait katsayılar **Tablo 2.1**'de listelenmiştir. **Tablo 2.1**'de gösterilen IEC Standard Inverse karakteristiği hem dünya genelinde hem de Türk dağıtım şebekelerinde faz arızalarına karşı korumada en yaygın kullanılan faz koruma eğrisidir.

Tablo 2.1: Farklı ters zaman karakteristiklerine ait katsayılar [14].

Ters Zaman Karakteristiği	Standart	β	α	c
Standard Inverse*	IEC	0,14	0,02	0
Very Inverse	IEC	13,5	1	0
Extremely Inverse	IEC	80	2	0
Moderately Inverse	ANSI/IEEE	0,515	0,02	0,114
Very Inverse	ANSI/IEEE	19,61	2	0,491
Extremely Inverse	ANSI/IEEE	28,2	2	0,1217

Tablo 2.1 ile farklı röle karakteristiklerine ait röle çalışma süreleri gösterilmiştir. Açıkça görüldüğü üzere arıza akım genliğinin artması röle çalışma süresinin azalmasını sağlamaktadır. Böylece yüksek genlikli faz arızaları şebekeden hızlı bir şekilde temizlenebilir. Farklı röle karakteristiklerine ait röle çalışma süreleri **Şekil 2.3** ile gösterilmiştir. **Şekil 2.3** ile görüldüğü üzere aynı arıza akım genliği değeri için karşılık gelen röle çalışma süresi farklıdır.



Şekil 2.3: Farklı röle karakteristiklerine ait röle çalışma süreleri.

Güç sisteminin oldukça basit olduğu ilk zamanlarda aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyon çalışmasına ihtiyaç duyulmadan sağlanmıştır. Fakat bu durum zaman kaybına sebep olmasının yanı sıra iş gücünde gerektirmektedir. Bununla birlikte aşırı akım röle koordinasyon problemi ilk olarak Urdaneta'nın 1988 yılında yaptığı çalışma ile bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır [12]. Temelde aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu için iki ayar parametresinin optimize edilmesine dayanmaktadır. Birincisi TDS ayarı ikincisi ise I_p ayarındır. Faz arızaları için kurgulanan optimizasyon yaklaşımında optimal I_p ve TDS ayarları elde edilerek toplam röle çalışma süresi minimize edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca aşırı akım röle optimizasyonu çalışmalarında farklı amaç fonksiyonlarının kullanıldığı bilinmektedir [14].

Aşırı akım röle koordinasyonu için geliştirilen geleneksel optimizasyon yaklaşımında amaç fonksiyonunu üç kategoriye ayırmak mümkündür. Bu ayırım genel olarak şebekenin sahip olduğu aşırı akım röle tipine ve kabiliyetine göre değişmektedir. Şebekede hem yönlü aşırı akım hem de yönsüz aşırı akım röleleri varsa, arıza birincil röle, ikincil röle ve diğer aşırı akım röleleri tarafından görülebilir. Bu nedenle, şebekede bulunan tüm aşırı akım rölelerinin çalışma sürelerinin toplamı en aza indirilmelidir. Birinci amaç fonksiyonu (OF_1), tüm aşırı akım rölelerinin toplam

Çalışma süresini minimize etmeyi hedeflenmektedir. Denklem (2.2) ile OF_1 gösterilmiştir.

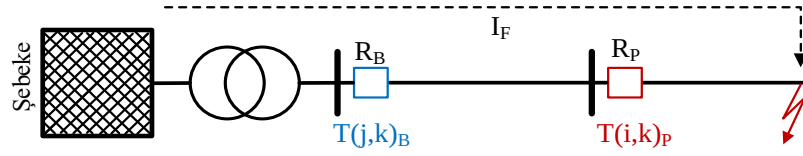
$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_{i,k} \quad (2.2)$$

Burada; n : sistemde yer alan toplam aşırı akım röle sayısını, W_i : ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Bu değer tüm çalışmalarda 1'e ayarlanmaktadır. OG Dağıtım şebekelerinde farklı fiderlerde arıza olma olasılığının eşit olması ve fider mesafelerinin genellikle birbirlerine yakın olması 1'e ayarlanma sebebi olarak sıralanabilir [15]. Dağıtım şebekesinde kullanılan koruma rölelerin tümünün yönlü aşırı akım rölesi olması durumunda faz arızaları için seçiciliğin bozulması aşırı akım rölesinin arızanın yönünü ve yerini tayin etmesi sayesinde engellenmektedir. Böylece, tamamen aşırı akım rölesine sahip şebeke için ikinci amaç (OF_2) fonksiyonu oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu denklem (2.3) ile gösterilmiştir.

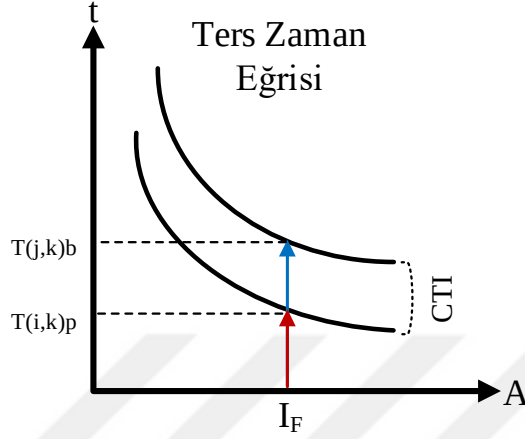
$$OF_2 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_{pr,i,k} \quad (2.3)$$

Denklem (2.2)'den farklı olarak denklem (2.3)'de amaç sadece birincil aşırı akım rölelerin toplam çalışma zamanını minimize etmektedir. Birincil rölelerin zamanlarının azaltılması birincil ve ikincil röleler arasındaki zaman aralığının artmasına sebep olmaktadır. Bu durum ikinci amaç fonksiyonun en büyük dezavantajıdır. Bununla birlikte hem birincil hem de ikincil rölelerin toplam çalışma süresinin optimize edildiği üçüncü amaç fonksiyonu (OF_3) geliştirilmiştir. Geliştirilen amaç fonksiyonu denklem (2.4) ile gösterilmiştir [16]. Birincil rölelerin toplam çalışma zamanının artması OF_3 'n en büyük dezavantajıdır [17].

$$OF_3 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot (T_{pr,i,k} + T_{b,i,k}) \quad (2.4)$$



a) Radyal dağıtım şebekesi için birincil ve destek koruma rölesi.



b) Ters zaman eğri karakteristiği

Şekil 2.4: Radyal dağıtım şebekesinde koordinasyon.

Üç faz arızanın şebekeden temizlenme sürecinde; seçici korumanın sağlanması için aşırı akım röleleri arasında koordinasyon kurulmalıdır. **Şekil 2.4** ile iki adet aşırı akım rölesine sahip basit bir radyal dağıtım sistemine ait röle koordinasyonu gösterilmiştir. **Şekil 2.4.a**'da birincil röle R_P , ikincil röle R_B olarak isimlendirilmiştir. F noktasında gerçekleşen arıza için hem R_B hem de R_P röleleri arızayı algılamalıdır. R_P rölesi F arızası için birincil röle olduğundan dolayı, seçici korumanın sağlanması için R_B rölesinden daha önce açma sinyali üretmeli ve arıza şebekeden hızlı bir şekilde temizlenmelidir. R_P rölesinin herhangi bir nedenden dolayı açma sinyali üretmemesi durumunda R_B rölesi ayarlanan zaman gecikmesinden sonra açma sinyali üretmelidir. I_F arıza akımı için R_P rölesini çalışma süresi $T_{(i,k)_p}$, destek koruma rölesi R_B rölesinin çalışma süresi $T_{(j,k)_b}$ olmak üzere **Şekil 2.4.b**'de gösterilen ters zaman karakteristiğinde belirlenebilir. İki çalışma süresi arasındaki zaman gecikmesi Koordinasyon Zaman Aralığı (KZA) olarak tanımlanmaktadır. KZA kısıt fonksiyonu olarak optimizasyon sürecine dahil edilmektedir. Denklem (2.5) ile koordinasyon kısıtı ifade edilmiştir.

$$T_{(j,k)_b} - T_{(i,k)_p} \geq KZA \quad (2.5)$$

Koordinasyon kısıtının yanı sıra aşırı akım koordinasyon optimizasyonu rölenin fiziksel kısıtlarına, işletme kısıtlarına bağlı olarak farklı kısıt fonksiyonları da sisteme dahil edilmektedir. TDS ayar kısıtları, I_P ayar kısıtları ve çalışma zaman aralığı kısıtları şeklinde sıralanabilir. Bu kısıtlar sırasıyla denklem (2.6)-denklem (2.8) ile ifade edilmektedir.

$$TDS_{(i)min} \leq TDS_{(i)} \leq TDS_{(i)max} \quad (2.6)$$

$$I_{P(i)min} \leq I_{P(i)} \leq I_{P(i)max} \quad (2.7)$$

$$T_{(i)min} \leq T_{(i)} \leq T_{(i)max} \quad (2.8)$$

TDS değerleri genellikle 0,025 ile 1,2 değerleri arasında değişmektedir. Genellikle optimizasyon denklemlerinde minimum çalışma zamanı olarak faz aşırı akım rölelerin 0,1 saniye sonra sinyal üretmesi istenmektedir. Maksimum çalışma süresinin ise 1,2 saniyeyi geçmemesi istenmektedir [15].

2.2. Faz Arızaları için Geliştirilen Diğer Optimizasyon Yaklaşımları

Aşırı akım röle koordinasyonu çalışmaları incelendiğinde farklı optimizasyon yaklaşımlarının kullanıldığı açıkça görülmektedir. [12] numaralı çalışmada üç baralı güç sisteminde üç fazlı dengeli arızalar için aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Röle I_P değeri sabit tutularak optimizasyon problemi Linear Programming (LP) formatına dönüştürülmüştür. LP basit ve hesaplama süresi hızlı çözüm yöntemidir. Aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonunda, kısıt fonksiyonlarının azaltılarak LP'nin daha hızlı sonuç vermesini sağlayan çalışmalar literatürde bulunmaktadır [18]. Bununla birlikte belirlenen I_P değerinin dışındaki değerlerde daha optimum sonuçların elde edildiği bilinmektedir [19]. Ayrıca I_P değerlerinin tek tek arttırılarak optimizasyonu [20] numaralı çalışmada gerçekleştirilmiştir. Böylece aşırı akım röle koordinasyon problemi yine LP formatında tutulup kolay ve daha hızlı çözüm sağlanmıştır.

Değişken eşik akımları hesaba katıldığı zaman problem Non-Linear Program (NLP) halini almaktadır. Fakat optimizasyon probleminin çıktı olarak verdiği I_p değerleri sahada kullanılan röleye uygun olmayabilir veya lokal en düşük bölgeye düşüp uygun olmayan sonuç verebilir. Bu durum aşırı akım rölesine uygun olan ayar değerleri arasında seçim yapmayı zorunlu hale getirmektedir. Belli I_p değerleri için yapılan optimizasyon problemi Mixed-Integer Non-Linear Programming (MINLP) [21] veya Mixed-Integer Linear Programing (MILP) formatına dönüştürülmüştür [22]. Optimizasyon probleminin daha basit hale getirebilmek ve daha hızlı çözüme ulaşmak için Quadratically Constrained Quadratic Programming (QCQP) model kullanılmıştır [23]. Binary Integer Program (BIP) ise [24] numaralı çalışmada önerilmiştir. Bununla birlikte, literatürde standart olmayan karakteristiklerin de kullanıldığı optimizasyon çalışmaları mevcuttur [25], [26]. Bu çalışmalarda TDS ve I_p değişkenlerinin yanı sıra a , β ve c değerleri sürekli değişken kabul edilerek amaç fonksiyonu ve kısıt denklemleri güncellenmektedir. Böylece daha düşük röle çalışma süresi elde edilmektedir [27]. Fakat, optimizasyon sonucu elde edilen a , β ve c değerleri sahada kullanılan ticari aşırı akım rölelerine uygulanamayabilir. Bu durumda mevcut röle karakteristikleri arasında seçimin yapıp toplam çalışma zamanı düşürülmüştür [28].

Geleneksel çözüm yöntemlerinin lokal minimumda kalması ve tek noktada çözüm başlatması meta-sezgisel algoritmaların kullanılmasını gerekli kılmıştır. Meta-sezgisel algoritmalar pek çok farklı noktada çözüme başlayabilir. Böylece lokal minimumda kalma sorunu ortadan kalkar [29]. Araştırmacılar tarafında pek çok meta-sezgisel algoritma geliştirilmiş ve farklı optimizasyon problemlerinde denenmiştir. Geliştirilen meta-sezgisel algoritmalar genel olarak hayvanların davranışları, evrenin davranışları, doğa olayları vb. öğelerden yararlanılarak matematiksel forma dönüştürülmüştür.

Tablo 2.2: Aşırı akım röle koordinasyonu çalışmalarında kullanılan bazı meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları.

Makale	Yöntem (Orişinal)	Yöntem (Türkçe)	Kısaltması	Yıl
[30]	Ant Colony Optimization	Karınca Kolonisi Optimizasyonu	ACO	2019
[31]	Simulated Annealing	Benzetilmiş Tavlama	SA	2020
[32]	Evolutionary Algorithm	Evrım Algoritması	EA	2000
[29]	Genetic Algorithm	Genetik Algoritma	GA	2010
[21]	Particle Swarm Optimization	Sürü Parçacık Optimizasyonu	PSO	2006
[33]	Water Cycle Algorithm	Su Döngüsü Algoritması	WCA	2019
[34]	Evaporation Rate Water Cycle Algorithm	Buharlaşıma Oranlı Su Döngüsü Algoritması	ER-WCA	2021
[35]	Continuous Genetic Algorithm	Sürekli Genetik Algoritma	CGA	2011
[36]	Chaotic Firefly Algorithm	Kaotik Ateşböceğı Algoritması	CFA	2016
[36]	Firefly Algorithm	Ateşböceğı Algoritması	FA	2016
[37]	Root Tree Algorithm	Ağaç Kökü Algoritması	RTA	2018
[38]	Crow Search Algorithm	Karga Arama Algoritması	CSA	2019
[39]	Path Finder Algorithm	Kâşif Algoritması	PFA	2021
[39]	Neural Network Algorithm	Sinir Ağı Algoritması	NNA	2021

Tablo 2.2 ile literatürde aşırı akım röle koordinasyonu için sıkça kullanılan meta-sezgisel algoritmaların sınıflandırılması gösterilmiştir. Yöntemlerin kısaltılmaları da ayrıca tabloda ifade edilerek tez boyunca bu kısaltmalara sadık kalınmıştır. Meta-sezgisel algoritmaların kıyaslanması ile alakalı derleme çalışmalar numaralı referanslarda bulunabilir [40], [41]. Aşırı akım röle koordinasyonunda, daha optimum amaç fonksiyonu elde etmek için geliştirilen hibrit algoritmalarda literatürde bulunmaktadır. Karar değişkenlerinin başlangıç değerlerinin GA ile çözümün ise NLP yöntemi ile çözüldüğü GA-NLP yöntemi [29] numaralı çalışmada önerilmiştir. Diğer hibrit algoritmalar şu şekilde sıralanabilir. Hibrit ACO [30], simulated annealing–linear programming (SA-LP) [31].

2.3. Faz Arızaları Sırasında Yaşanan Hatalı Açmalar ve Geliştirilen Optimizasyon Yaklaşımları

Arızanın temizlenme sürecinde kesicilere sinyaller koruma röleleri tarafından sağlanmaktadır. Arızanın hızlı şekilde temizlenmesinin yanı sıra sadece arıza ile ilgili bölgede bulunan rölelerin arıza sinyali üretmesi beklenmektedir. Arıza bölgesi dışında bulunan rölenin açma sinyali üretmesi ilave yük kayıplarına sebebiyet vermektedir. Bu durum DŞİ'nin SEM'ninin artmasına OKSÜRE ve OKSIK gibi kalite endekslerinin bozulmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca arıza süresince SEM'in artması DŞİ'nin maddi kayıplarının artmasına yol açmaktadır. Dağıtım şebekesinin arıza olmayan bölgesinin hatalı bir şekilde izole edilmesi literatürde hatalı açma problemi olarak bilinmektedir [42]. Faz arızaları sırasında hatalı açma problemi pek çok sebepten gerçekleşebilmektedir. Hatalı açmanın temel sebepleri röle ayarlarının düzgün yapılmaması, DÜ birimlerinin OG dağıtım sistemlerindeki sayısı ve gücünün artması, indüksiyon motorlarının etkisi, özellikle ilk istasyon şebekelerde eğri çakışması, her iki uçtan sonlandırmalı paralel fiderlerin kullanılması, kalkış akımlarının etkisi şeklinde sıralanabilir. Hatalı açma probleminin çeşitli sebeplere dayanması literatürde hatalı açma probleminin farklı tanımlarının mevcut olmasına sebebiyet vermektedir. Taranan literatürde bulunan hatalı açma tanımları aşağıda sıralanmıştır.

Tanım 1: İkincil koruma rölesinin birincil röleden önce açma sinyali üretmesi [43].

Tanım 2: Herhangi bir rölenin birincil ve ikincil koruma rölesinden önce açma sinyali üretmesi [43].

Tanım 3: Sağlıklı fiderde bulunan rölenin arızalı fiderde bulunan röle ile aynı anda veya daha önce açma sinyali üretmesi [7], [44]. Tanımlardan ilk ikisi faz arızalarını kapsarken üçüncü tanım tek faz toprak arızasını kapsamaktadır.

Artan enerji ihtiyacı karşılamak ve arz güvenliğini arttırmak amacıyla dağıtım seviyesinde DÜ'ler OG dağıtım şebekelerine entegre edilmektedir. Arz güvenliğinin artırılmasının yanı sıra iletim kayıplarının da azaltılması DÜ'leri popüler hale getirmektedir. DÜ'lerin sağladığı yararlar rağmen koruma felsefesi açısından pek çok problemi beraberinde getirmektedir. Bu problemlerden biri DÜ temelli hatalı açma problemidir [45]. Dağıtım şebekesine DÜ entegrasyonu şebekede bulunan rölelerin gördüğü akım genliğinin değişmesi ve nihai olarak röle koordinasyonunun bozulmasına neden olmaktadır.

sebebiyet vermektedir. Ayrıca şebekede DÜ bulunmasından dolayı arıza akımının tamamı kaynaktan değil DÜ'den de karşılanacaktır. Bu durum I_S akımının azalmasına dolayısıyla R_S rölesinin körleşmesine sebebiyet vermektedir. **Şekil 2.5** ile gösterilen şebekenin tek faz eşdeğer devresi **Şekil 2.6** ile gösterilmiştir. **Şekil 2.6**'da gösterilen eşdeğer devrede düğüm gerilimler yöntemi uygulanarak I_S , I_F ve $I_{DÜ}$ akımlarını denklem (2.9)- denklem (2.11) ile gösterilmiştir. Burada;

$$I_S = \frac{E_S - I_F Z_{L2}}{Z_S + Z_{T1}} \quad (2.9)$$

$$I_{DÜ} = \frac{E_{DÜ} - I_F Z_{L2}}{Z_{DÜ} + Z_{T2} + Z_{L1}} \quad (2.10)$$

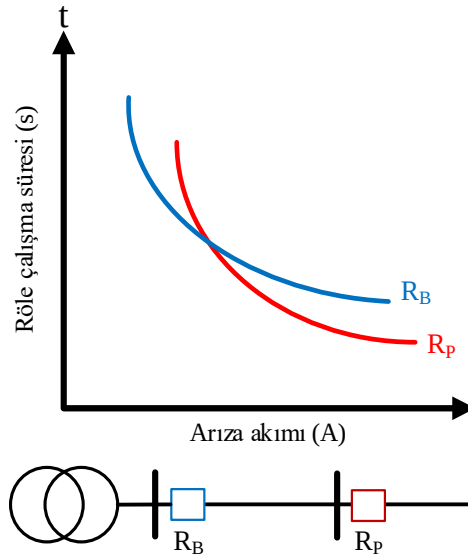
$$I_F = I_{DÜ} + I_S \quad (2.11)$$

I_F : arıza akım genliğini, I_S : F noktasındaki arıza için kaynaktan akan akım genliğini, $I_{DÜ}$: F noktasındaki arıza için DÜ'den akan akım genliğini, $E_{DÜ}$: DÜ'nün gerilimini, E_S : Kaynağın gerilimini, $Z_{DÜ}$: DÜ'nün empedansını, Z_S : kaynağın empedansını, Z_{L1} : arızalı fiderin empedansını, Z_{L2} : sağlıklı fiderin empedansını, Z_{T1} : birinci trafonun empedansını, Z_{T2} : ikinci trafonun empedansını temsil etmektedir. Denklemlerden anlaşılacağı üzere DÜ'nün gücü, konumu, hat mesafeleri ve arıza noktası önemli birer parametredir. Dolayısıyla röle ayarlarının güncellenmesi kaçınılmazdır. DÜ mevcut sistemler için [45] numaralı referansta röle ayarlarının güncellenmesi gerekliliği belirtilmiştir. DÜ'ye bağlı hatalı açma probleminin giderilmesi noktasında pek çok koruma yöntemi geliştirilmiştir. Referans [47] ile $I_S/I_{DÜ}$ oranından yararlanılarak bir K endeksi tanımlanmıştır. K endeks değerine göre arızanın DÜ olan fiderde olup olmadığı tespit edilmektedir. Eğer arıza DÜ'nün bağlı bulunduğu fiderde değilse, DÜ fiderinde bulunan koruma rölelerine blok sinyali gönderilir. Blok sinyali sayesinde DÜ'nün bağlı bulunduğu fiderdeki rölenin hatalı açma sinyali üretmesi engellenmektedir. Önerilen metot için ilave koruma ekipmanı kullanılması yöntemin dezavantajı olmasının yanı sıra, sahada kullanılan ticari rölelere K endeksinin tanıtılması zorluğu mevcuttur. Ayrıca yönlü aşırı akım rölesi kullanılarak R_1 rölesinin

hatalı açma sinyali üretmesi yön bilgisi yardımıyla engellenebilir. Fakat yönlü aşırı akım rölesi kullanımı maliyetli olmasının yanı sıra dağıtım seviyesinde kullanılması yaygın değildir.

Faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açma temel olarak röle çalışma sırasının bozulmasıdır. Bundan ötürü, röle çalışma sırası şebekeye uygun şekilde ve seçici olmalıdır. Aşırı akım röle koordinasyonu sağlanarak röle çalışma sırası istenilen düzene getirilebilir. Geleneksel optimizasyon yaklaşımı modifiye edilerek TDS ve I_p ayarları seçici forma gelecek şekilde optimize edilebilir. Faz arızaları için röle çalışma süresini kullanılan eğri karakteristiği belirlemektedir. Eğri karakteristiği için her bir TDS ve I_p ayar ikilisi farklı çalışma sürelerine karşılık gelmektedir. Böylece bu değerlerin en uygun hale gelmesi ile hatalı açma problemi giderilebilir. Bu noktada araştırmacılar, ilave kısıt fonksiyonları eklemekte, geleneksel amaç fonksiyonlarını güncellemekte veya yeni optimizasyon yaklaşımı önermektedir. Sistemdeki arıza akım seviyesinin değişmesi hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. Referans [43]'de öncelikli olarak hatalı açmaya sebebiyet veren röleler tespit edilmiştir. Ardından bu röleler için ilave kısıt fonksiyonu yazılmıştır. TDS ve I_p değerleri ilave kısıt fonksiyonu yardımıyla güncellenmiştir. Yöntem her bir hatalı çalışan röle için tekrar edilmiştir. Şebekede yaşanan hatalı açma sayısının azaldığı rapor edilmiştir. Önerilen TDS ve I_p değerlerinin etkinliği farklı arıza noktaları içinde kontrol edilmiştir. Önerilen yöntem ile incelenen arıza noktalarında hatalı açma yaşanmamıştır. DÜ içeren dağıtım şebekesinde optimal TDS ve I_p ayarları güncellenmiş amaç fonksiyonu kullanarak [48] numaralı çalışmada incelenmiştir. Farklı arıza seviyeleri gözeterak amaç fonksiyonu güncellenmiştir. İlave kısıt fonksiyonları da güncellenmiş amaç fonksiyonunun çözümünde kullanılmıştır. İlave kısıt fonksiyonları ceza fonksiyonu olarak eklenmiştir. Böylece ikincil destek korumanın birincil röleden önce açma sinyali üretmesi engellenmiştir. Önerilen TDS ve I_p ayarlarının etkinliği üç faz dengeli arızaların yanı sıra iki faz arızalar içinde kontrol edilmiştir. Şebekede normal durum ve arızalı durumda çalışan DG sayısını dikkate alan modifiye edilmiş amaç fonksiyonu [49] numaralı çalışmada önerilmiştir. Ayrıca ilgili çalışmada kısıt fonksiyonlarının azaltılması ile daha hızlı optimal çözüme ulaşılmıştır. Yukarıda DÜ ile ilgili çalışmalar genelde ağ yapıya sahip dağıtım şebekelerine veya IEEE test şebekelerine uygulanmıştır. Fakat, **Şekil 2.5** ile gösterildiği gibi saha uygulamalarında DÜ genel olarak radyal işletilen dağıtım şebekelerine yerleştirilmektedir. Bu durumda radyal

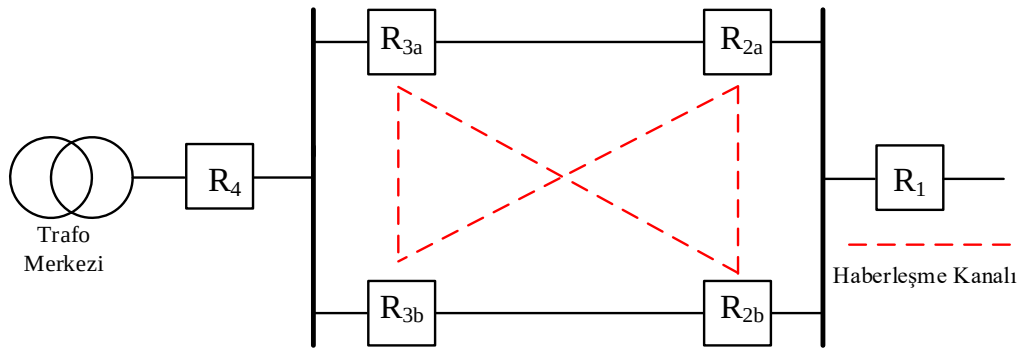
işletilen şebekelerde hatalı açma yaşanmaktadır. Radyal dağıtım şebekesine eklenen DÜ'nün yol açtığı hatalı açma problemi optimizasyon yaklaşımı ile engellenebilmektedir. Radyal dağıtım şebekesine eklene DÜ'nün neden olduğu hatalı açma problemi ilave kısıt fonksiyonları eklenerek optimize edilen TDS ve I_p ayarları ile çözülmektedir [50]. İlave kısıt fonksiyonlarının tek bir röle karakteristiği yerine farklı röle karakteristiğinin seçilmesi de ilgili çalışmanın önemli özelliklerindedir. Bir diğer nokta ise [50] numaralı çalışmada önerilen yöntem ile şebekede bulunan mevcut yönsüz aşırı akım röleleri yardımıyla koordinasyon gerçekleştirilmiştir. Böylece hem yönlü röle kullanılmaması hem de ilave koruma ekipmanına ihtiyaç duyulmaması yöntemin avantajları arasındadır. Faz arızalarında yaşanan bir diğer hatalı açma problemi röle eğrilerinin özellikle ilk transformatör merkezlerinde çakışmasıdır [51], [52]. İletim seviyesinden dağıtım seviyesine inilen bu tür şebekeler 'sub-transmission' olarak isimlendirilmiştir. **Şekil 2.7** ile eğri çakışma problemi şematize edilmiştir. Eğri çakışması probleminde destek koruma sağlaması gereken ikincil röle birincil röleden önce açma sinyali üreterek hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. Literatürde eğri çakışma probleminin giderilmesi noktasında araştırmacılar tarafından çeşitli yöntemler önerilmiştir.



Şekil 2.7: Eğri çakışma problemi.

Eğri uydurma yöntemi ile eğri çakışma problemi [51] numaralı çalışmada giderilmiştir. Yöntemin etkinliği verilerinin sahadan alındığı 69 kV'luk ring yapıya

sahip şebekede gösterilmiştir. [52] numaralı çalışmada ise öncelikli olarak eğrilerin çakıştığı arıza akım genliği belirlenmiştir. Ardından bu noktada birincil rölenin ayarları sabit tutularak destek koruma rölesine yeni bir TDS ve I_p değeri belirlenerek koordinasyon zaman aralığı kadar aralık verilmiştir. Önerilen yöntem altı baralı çok döngülü dağıtım sistemde denenmiştir. Yöntem ilgili şebekede başarılı sonuç vermesinin yanı sıra hesaplama süreci her bir şebeke ve röle için tekrar edilmesi gerektiğinden uyarlanabilir değildir. TDS ve I_p ayar hesapları her bir şebeke ve röle için tek tek manuel bir şekilde gerçekleştirildiği için bu yöntem uzun süren bir ayar prosedürüne sahiptir. Bu durum araştırmacıların eğri çakışma problemini bir optimizasyon problemi şeklinde kurgulanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır [53]. Referans [53] ile geleneksel amaç fonksiyonu probleme uygun olarak modifiye edilmiştir. Amaç fonksiyonu GA yöntemi ile çözdürülmüştür. Yöntemin etkinliği 11 kV'luk radyal sistemde ve IEEE-8 baralı test sisteminde denenmiştir. Her iki uçtan sonlandırmalı paralel yapıya sahip dağıtım şebekelerinde de faz arızaları sırasında hatalı açma meydana gelmektedir. **Şekil 2.8** ile her iki uçtan sonlandırmalı paralel fidere sahip örnek dağıtım şebekesi gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Her iki uçtan sonlandırmalı paralel fiderlerde yaşanan hatalı açma.

R_1 rölesinin koruma bölgesinde gerçekleşen faz arızası sırasında R_{3a} rölesi ve R_{3b} rölesi arıza akım genliğinin yarısını R_4 rölesi ise R_{3a} ve R_{3b} rölesinin gördüğü toplam akım değerini görmektedir. Böylece R_4 rölesi R_{3a} ve R_{3b} rölesinden önce açma sinyali üreterek her iki paralel fiderinde servis dışı kalmasına yol açabilir. [54] numaralı çalışmada amaç fonksiyonu modifiye edilmiş hatalı açmaya yol açan röleler için ayrı ceza fonksiyonları yazılmıştır. Önerilen TDS ve I_p ayarlarının etkinliği 11 kV'luk

kablo şebekesinde test edilmiştir. Hatalı açmaya sebebiyet veren diğer bir problem ise kabloların demeraj akımlarıdır. Demeraj akımları kablo erime eğrisini etkileyerek kablo yoğun şebekelerde hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. İlave kısıt fonksiyonları ve modifiye edilmiş amaç fonksiyonu kullanarak hatalı açma [55] numaralı çalışmada giderilmiştir.

Tablo 2.3 ile faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açmaları engellemek için geliştirilen yaklaşımlara ait özet tablosu sunulmuştur. Önerilen yöntemlerin etkinliği test şebekelerinde incelenmesinin yanı sıra gerçek şebekelerde de incelenmiştir. Böylece, **Tablo 2.3** incelendiğinde, pek çok farklı sebepten dolayı hatalı açma yaşandığı saha şebekeleri üzerinden görülmektedir. Problemin çözümü noktasında geleneksel amaç fonksiyonu modifiye edilmiş ve/veya ilave kısıt fonksiyonları probleme uygun olarak eklenmiştir. Önerilen yöntemlere ait amaç fonksiyonları incelendiğinde röle çalışma süresinin optimize edildiği açıkça görülmektedir. Röle çalışma süresi TDS ve I_p değerlerine bağlı olduğundan dolayı röle çalışma süresi ve röle koordinasyon zaman aralığı istenilen forma getirilebilir.

Tablo 2.3: Faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açmaları engellemek için geliştirilen optimizasyon yaklaşımlarına ait özet tablosu.

Makale	Amaç Fonksiyonu	Önerilen Metot	Hatalı Açma Sebebi
[43]	$\min \sum_{m=1}^N T_{p,nr}^m$	Hatalı açma yapan rölelere ilave kısıt fonksiyonu yazılması	Rölelerin hatalı ayarlanması. Sistemdeki arıza akım seviyesinin değişmesi
[48]	$\min \sum_{i=1}^n W_i * T_{i,k}$	İlave kısıt fonksiyonu yazılması	DÜ yerleştirilmesi
[49]	$OF = \sum_{FZ=1}^{N_{FZ}} \sum_{i=1}^{P_{FZ}} \left[\left(T_{i,FZ} + \sum_{j=1}^{B_{i,FZ}} T_{ij,FZ} \right) \right]$	İlave kısıt fonksiyonu yazılması	DÜ yerleştirilmesi
[50]	$\min \sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{nf} \sum_{h=1}^{ns} t_i^h(PZ_{i,j})$	Farklı Eğri Seçimi	DÜ yerleştirilmesi
[53]	$OF = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{l=l_{min}}^{l_{max}} t(n, l) \right] + w \cdot (tap - 1.0)^2$	Yeni Amaç Fonksiyonu	Alt istasyonda eğri çakışması
[54]	$\text{minimize } \sum_{i=1}^N t_i$	Yeni Kısıt Fonksiyonu	Paralel Fiderlerde yaşanan koordinasyon problemi
[55]	$\min_{WFM} = \sum_{i=1}^M t_{pri} + \sum_{i=1}^M \Delta t_{mi}$	Amaç Fonksiyonuna zaman gecikmesi eklenmesi	Kablo ve Trafonun demeraj akımları

2.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde dağıtım şebekesinde aşırı akım korumanın temel felsefesinden bahsedilmiştir. Dağıtım şebekesinde seçici korumanın ve röle koordinasyonunun sağlanması için optimizasyon yaklaşımının nasıl kurgulaması gerektiği kısıt fonksiyonları dahil olmak üzere gösterilmiştir. Tezin bu kısmında genel olarak faz arızalarına odaklanılmıştır. Bu nedenle faz arızaları için kurgulanan farklı amaç fonksiyonlarından ve çözümü için geliştirilen farklı meta sezgisel yöntemlerden bahsedilmiştir.

Genel olarak optimizasyon yaklaşımlarının çözümü için önerilen meta sezgisel algoritmaların etkinliğini test etmek için bazı temel test şebekelerine uygulanmaktadır. Fakat test şebekelerinde ihmal edilen yük akımları, dağıtık üretim, motorlar, paralel fideler gibi çeşitli şebeke parametreleri röle koordinasyonunu ve seçici korumayı etkilemektedir. Test şebekelerinde ihmal edilen bu parametreler dolayısıyla işletmede bulunan gerçek şebekelerde faz arızaları sırasında hatalı açma problemi meydana gelmektedir. Tezin bu bölümünde faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açma problemlerinin nedenleri ayrı ayrı detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Araştırmacılar tarafından geliştirilen muhtemel çözüm yöntemleri incelenmiştir. Faz arızaları sırasında yaşanan hatalı açma probleminin modifiye edilmiş amaç fonksiyonları ve/veya ilave kısıt fonksiyonları ile giderildiği açıkça görülmektedir. Faz koruma röleleri arasında bozulan röle çalışma sırası ve düzeni TDS ve Ip ayarlarının optimize edilerek yeniden ayarlanması ile düzeltilmektedir. Böylece seçici faz koruma optimizasyon yaklaşımı ile sağlanmaktadır.

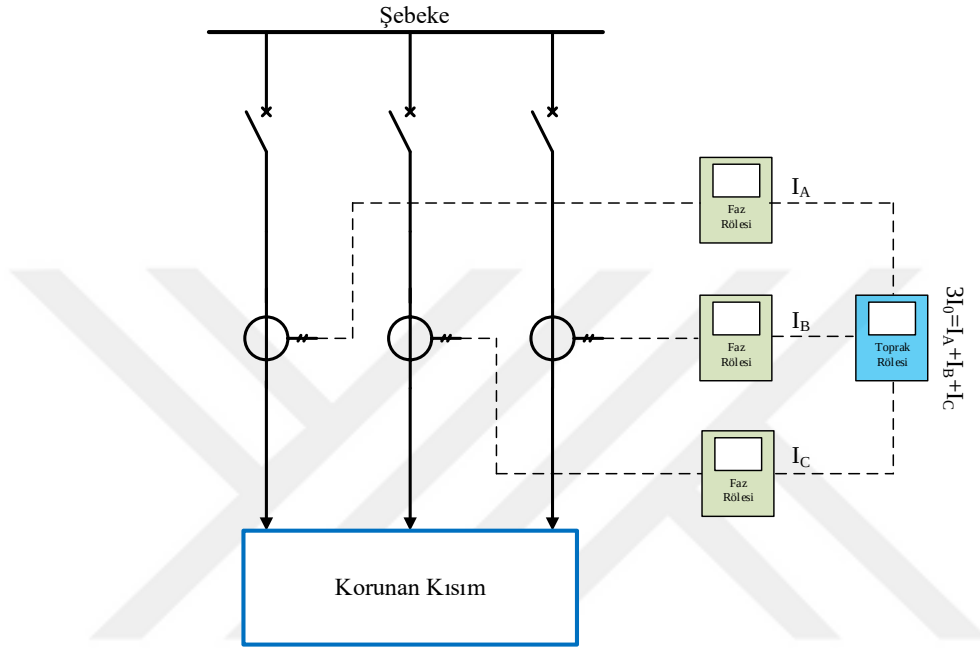
3. OG DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE TOPRAK ARIZALARINA KARŞI KORUMA FELSEFESİ

Dağıtım şebekeleri iletim sistemleri ile kıyaslandığında daha fazla kesintiye ve arızaya maruz kalmaktadır. Bu durum iletim sistemleri ile kıyaslandığında dağıtım sistemlerinin oldukça farklı bir işletme, bakım ve koruma felsefesine sahip olmasına neden olmaktadır [56]. Dağıtım şebekelerinin sahip olduğu farkları; dağıtım şebekelerinde farklı nötr topraklama tiplerinin bulunması, dağıtım şebekelerinde farklı bağlantı türüne sahip güç trafolarının kullanılması, dağıtım şebekelerinde yüksek oranda yeraltı kablosu kullanılması ve daha ucuz, basit koruma felsefesi ve koruma teçhizatının kullanılması şeklinde sıralanmak mümkündür. Ayrıca modern dağıtım sistemleri farklı ihtiyaçları karşılayacak şekilde evrimleşmektedir. Bu değişimin temel kaynakları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- i. Dağıtım üretimin dağıtım seviyesinde sayısının ve gücünün artması,
- ii. Farklı topolojilerin (radyal, mesh, loop) kullanılması,
- iii. Her bir topolojinin farklı mesafelerde ve farklı sayılarda paralel fiderlere sahip olması,
- iv. Dağıtım şebekesinde tek fazlı hatların bulunması,
- v. Müşteri memnuniyeti temelli artan kalite ihtiyacı,
- vi. Talep tarafı katılımını teşvik eden mekanizmaların sisteme dahil olması,
- vii. Değişen yük profilleri.

Dağıtım şebekesinin işletilmesi sırasında sıklıkla arızalar yaşanmaktadır. Bu arızalar dengeli ve dengesiz arızalar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Dengeli arızalar üç faz arızalar olmak ile birlikte koruma felsefeleri bir önceki bölümde detaylıca tartışılmıştır. Dengesiz arızalar ise TFT, iki faz toprak, iki faz arızalar şeklinde sıralanabilir. Dengesiz arızalar arasında TFT arızası dağıtım şebekesinde yaklaşık % 85 oranıyla en yaygın arıza tipidir [57]. Fakat bilinmelidir ki bu oran şebekeden şebekeye veya ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Arıza tiplerinin gerçekleşme

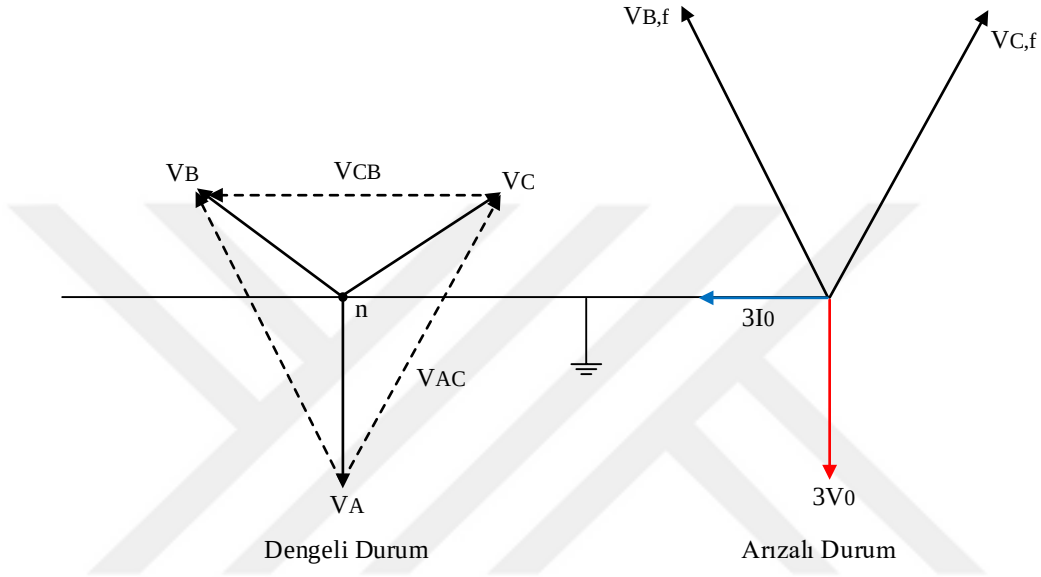
oranı ile ilgili literatürde çalışmaların bulunduğu bilinmektedir. [58] numaralı çalışmada 10 kV'luk örnek bir dağıtım şebekesinin 2004 ile 2010 yılları arasında arıza kayıtları tutulmuştur. Arıza kayıtlarına göre TFT arızası tüm arızaların yaklaşık % 76'sını oluşturmaktadır.



Şekil 3.1: Toprak korumasına ait prensip şeması.

Şekil 3.1 ile TFT arızasına karşı toprak korumasının prensip şeması gösterilmiştir. **Şekil 3.1**'de görüldüğü üzere her bir faza yerleştirilmiş akım trafolarından veya akım sensörlerinden akım bilgisi faz rölelerine aktarılmaktadır. Toprak rölesi üç faz akımının vektörel toplamını hesaplamaktadır. Bu değer $3I_0$ veya homopolar akım olarak da isimlendirilmektedir. Dengeli durumda homopolar akım değeri yaklaşık olarak sıfırdır. TFT arızası sırasında şebekede dengesizlik oluşmaktadır. TFT arızası sırasında arızalı fazın genliği düşmekte, diğer iki sağlıklı fazın genliği ise artmaktadır. Bu durumda şebekenin gerilim profilinde dengesizlik oluşmaktadır. Oluşan bu dengesizlik sıfır sıra gerilimi ($3V_0$) olarak tanımlanmaktadır [59]. Bununla birlikte faz akımlarında da dengesizlik oluşmaktadır. Bu durumda arızalı fiderde bulunan toprak rölesinde homopolar akım görülmektedir. $3V_0$ ve $3I_0$ büyüklüklerine ait vektör değişimleri **Şekil 3.2** ile gösterilmiştir. Dağıtım şebekelerinin fazlarından farklı genlikte yük akımı çekilmesi, pek çok alt dallanmanın olması gibi nedenlerden dolayı

yük akımını yönünden dengesiz sistemlerdir. Bu durumda şebekede bulunan toprak röleleri tarafından $3I_0$ ve $3V_0$ büyüklükleri görülecektir. Bu nedenle toprak koruma röleleri ayarlanırken belli bir eşik değeri ayarlanarak dengesizliğin toprak arızası şeklinde algılanması engellenebilir. Fakat yüksek genlikli eşik akım değerinin şebekenin körleşmesine ve arızayı algılayamamasına neden olacağı unutulmamalıdır.



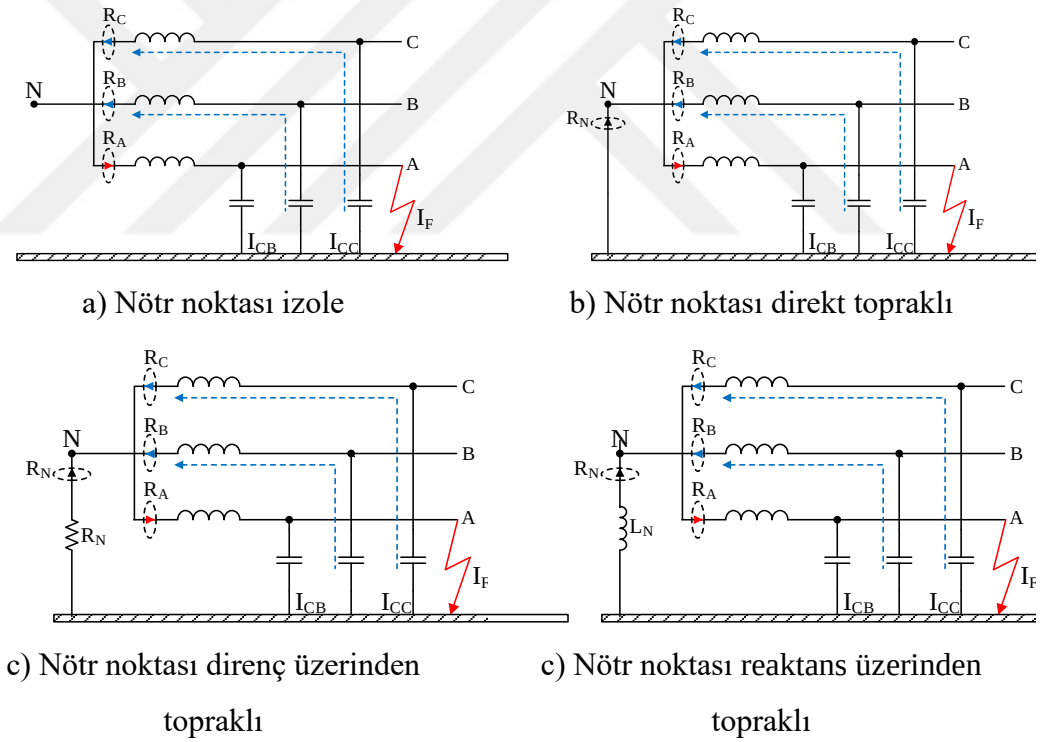
Şekil 3.2: TFT arızası için dengeli ve arızalı duruma ait vektör diyagramı.

OG Dağıtım şebekeleri TFT arızalarına karşı korunurken toprak rölelerinin $3I_0$ eşik akım değerine göre korunmaktadır. $3I_0$ büyüklüğü nötr noktasının topraklama türünden, hat yapısından, paralel fider sayısından, fider mesafesinden ve OG gerilim seviyesinden etkilenmektedir. Bu nedenle OG dağıtım şebekelerini tek bir $3I_0$ değerine göre korumak veya belli topolojiler için geçerli olan ayar değerleri ile tüm şebekede seçici koruma sağlamak mümkün değildir.

3.1. OG Nötr Topraklama Yöntemlerinin İncelenmesi

OG nötr topraklama yöntemleri ülkelerin ihtiyaçlarına, ekonomik durumlarına, coğrafi özelliklerine, otoritelerin yasalarına ve yerel düzenlemelere göre farklılık göstermektedir. Bu durum TFT arızasına karşı tek tip bir koruma yönteminin ve bu koruma yöntemine ait tek bir ayar değerinin elde edilmemesi noktasında probleme

sebeptir. Üniversal korumanın sağlanamaması geliştirilen yöntemlerin farklı topolojilerde çalışmamasına neden olabilir. Bu durum TFT arızalarına karşı şebekelerin korunması konusunu araştırmacıların ilgisini çeken bir çalışma alanı haline getirmiştir. OG dağıtım şebekelerinde nötr noktasının bağlantı türüne göre dört farklı tip nötr noktası topraklama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; nötr noktası izole şebekeler, nötr noktası direkt topraklı şebekeler, nötr noktası direnç üzerinden topraklı şebekeler, nötr noktası reaktans üzerinden topraklı şebekeler ve kompanze şebekeler şeklinde sıralanabilir. IEEE Standart 142-2007 [60] ve IEEE Standart 30031-2019 [61] standartlarında farklı nötr topraklama türlerinin özellikleri tanımlanmıştır. Farklı nötr topraklama türlerine ait basitleştirilmiş üç faz eşdeğer devreler **Şekil 3.3** ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3: OG nötr noktası topraklama yöntemleri.

Şekil 3.3.a ile nötr noktası izole şebeke gösterilmiştir. Bu tür topraklama pratiğinde nötr noktasının fiziksel toprak ile teması bulunmamaktadır. Fiziksel bağlantı bulunmamasına rağmen şebeke, hattın sahip olduğu faz-toprak kapasiteleri üzerinden

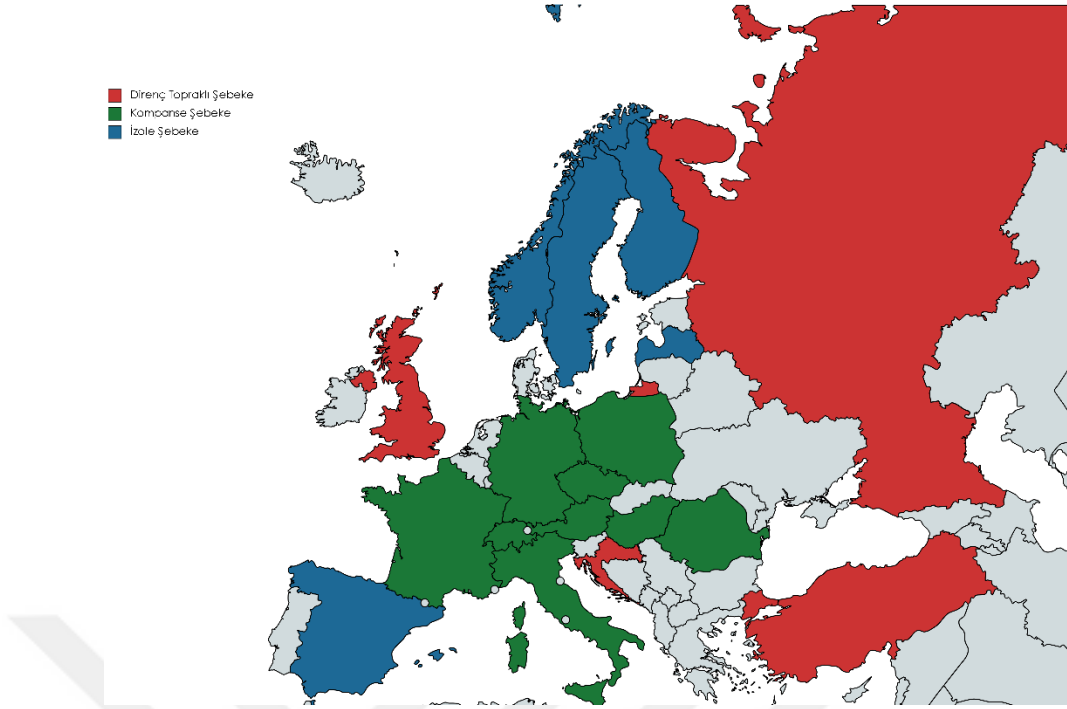
tabii olarak topraklıdır. Nötr noktası izole şebekeler en eski topraklama türü olarak bilinmektedir. Arıza akım genliği sağlıklı fazlardan dönen kapasitif akım genliklerinin toplamıdır. Bu nedenle sistemde meydana gelecek TFT arızası sonucu oluşan arıza akım genliği hattın sahip olduğu faz-toprak kapasitesi ile orantılıdır. Düşük genlikli kapasitif akım değerleri nötr noktası izole şebekelerin TFT arızası altında çalışmasına olanak sağlamaktadır. Fakat bu durumda, şebekenin aşırı gerilimlere karşı korunması gerekmektedir. Ayrıca şebekenin TFT arızası altında çalışması izolasyon seviyesinin düşük olduğu bir noktada ikinci bir TFT arızasını tetikleyebilir. Arıza altında çalışma süresi DŞİ'lere, yönetmeliklere, ülkelerin şartlarına göre değişmekle birlikte [62] numaralı çalışmada belirtildiği gibi bu süre ilgili şebeke için yaklaşık sekiz saattir. Kapasitif akım genliği düşük olduğundan dolayı havai hat yoğun şebekelerde genelde bu tarz topraklama yöntemi tercih edilmektedir. Fakat fider mesafelerin uzaması veya yeraltı kablo kullanımının artması arıza akım genliğinin artmasına ve nötr noktası izole şebekelerinin etkinliğini azalmasına yol açmaktadır. İskandinav ülkelerinde ve Japonya'da nötr noktası izole şebeke tercih edilmektedir.

Şekil 3.3.b ile nötr noktası direkt topraklı şebeke gösterilmiştir. Direkt topraklı şebeke transformatörün nötr noktası fiziksel toprağa direkt bağlıdır. Böylece direkt topraklı şebekede, TFT arızası sırasında yüksek genlikli arıza akımları akmaktadır. Direkt topraklı şebekede TFT arıza akımı üç-faz arızasının akım genliğinden yüksek olabilmektedir. Yüksek arıza akımların gözlemlenmesi arızanın varlığını tespit etme noktasında avantaj oluşturmaktadır. Fakat bu durumda şebeke elemanları ısıl strese maruz kalmaktadır. Bu nedenle şebekenin TFT arızası altında çalıştırılması tercih edilmemektedir. Böylece TFT arızasının hızlı bir şekilde şebekeden temizlenmesi gerekmektedir. Şebeke direkt topraklı olduğu için havai hattın veya kısa mesafeli kablo hatlarının faz-toprak kapasitesinin arıza akım genliğinde ve toprak röleleri tarafından görülen $3I_0$ arıza akımının genliğine etkisi ihmal edilecek seviyelerdedir. Yüksek genlikli akımların gözlemlenmesinin yanı sıra direkt topraklı şebekede genel olarak aşırı gerilimler ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle iletim sistemleri direkt topraklıdır. Nötr noktası direkt topraklı şebekeler Amerika, Kanada ve Meksika'da yaygın olarak kullanılmaktadır.

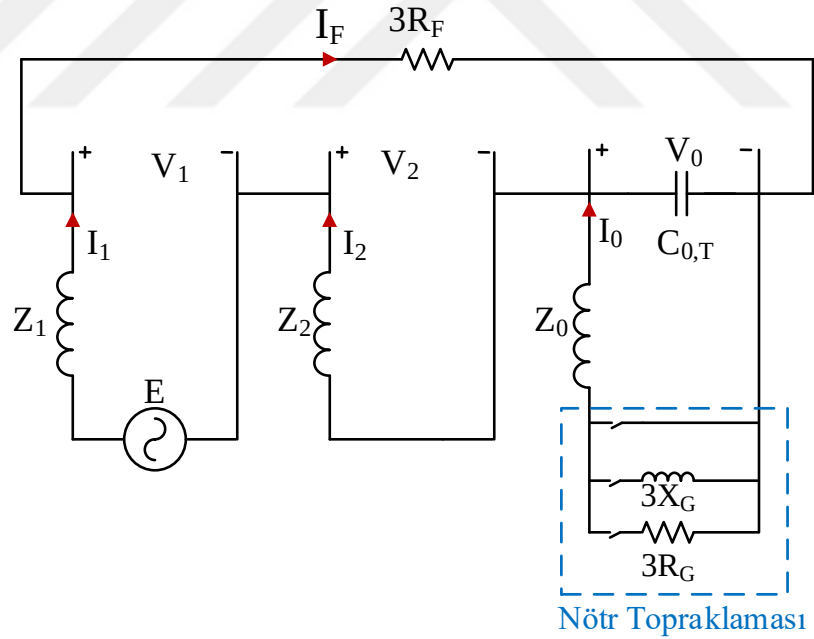
Nötr noktası direkt topraklı şebekede görülen yüksek akımları azaltmak veya nötr noktası izole şebekelerde görülen aşırı gerilimleri azaltmak için nötr noktası bir empedans üzerinden topraklanmaktadır. Empedans olarak direnç veya reaktans

kullanılmaktadır. **Şekil 3.3.d** ile nötr noktası reaktans üzerinden topraklı şebekeye ait üç faz eş değer devre gösterilmiştir. Nötr noktasında bulunan reaktans sayesinde arıza akım genliği sınırlandırılmaktadır. Akan arıza akımı endüktif karakterlidir. Bununla birlikte şebekelerde kapasitif akımların bulunduğu bilinmektedir. Kapasitif akımlar özel bir reaktans ile kompanse edilmektedir. Bu özel reaktans değeri Peterson bobini olarak isimlendirilmektedir. Topraklama türü ise kompanse şebeke olarak isimlendirilmektedir. Şebekeyi tam kompanse etmek için seçilen reaktans değeri sistemin toplam kapasitif reaktans değerine eşit olmalıdır. Böylece uzun mesafedeki havai hat yoğun şebekelerdeki kapasitif akımlar kompanse edilebilmektedir. Ark oluşumu engellenmektedir. Bu durum şebekenin arıza altında çalışmasına olanak sağlamaktadır. Peterson bobini sayesinde TFT arıza akım değeri 10 A seviyelerine düşürülmektedir. Fakat bu durum, arıza akımının kararlı durumunda tespitini ve arızalı fiderin bulunmasını zorlaştırmaktadır. Şebekenin fider topolojisinin sürekli değişmesi nötr noktasında kullanılan Peterson bobin değerinin de değiştirilmesini gerekli kılmaktadır. Arıza altında çalışma avantajının yanı sıra bu durum reaktans üzerinden topraklı şebekelerinin işletme maliyetini arttırmaktadır. Bu tip topraklama yöntemi Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 3.3.c ile nötr noktası direnç üzerinden topraklı şebekeye ait üç faz eşdeğer devresi gösterilmiştir. Nötr noktası direnç üzerinden topraklanarak arıza akım değeri sınırlandırılmaktadır. Arıza akım değerinin sınırlandırılmasının yanı sıra arıza anında oluşan arkın yakıcı, eritici etkisinin azaltılmaktadır. Arızanın ekipmanlar ve baralar üzerindeki mekanik stresi de arıza akım genliği azaldığı için azalmaktadır. Ayrıca direnç topraklı şebekenin topraklama yüzeyinde olabilecek bir temasta can kaybını önleme gibi avantajı bulunmaktadır. Özellikle son zamanlarda kablo yoğun şebekelerde aşırı gerilimleri düşürmek ve arızayı tespit edebilmek adına Peterson bobini yerine kablo şebekelerinin direnç üzerinden topraklanması gerektiği hususunda literatürde tartışmalar bulunmaktadır [63], [64]. Direnç topraklı şebekeler Türkiye, Rusya, Fransa ve İngiltere OG şebekelerinde kullanılmaktadır. **Şekil 3.4** ile Avrupa ülkelerinin nötr topraklama yöntemleri dört ana grup altında haritalandırılmıştır. Orta Avrupa’da kompanse şebeke kullanımı yaygınken Doğu Avrupa’da direnç üzerinden topraklı şebekeler yaygındır. Bununla birlikte yaygın olarak direkt topraklı şebeke kullanımı mevcut değildir. Nötr noktası izole şebekeler ise İskandinav ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.4: OG nötr noktası topraklama yöntemlerinin haritalandırılması.



Şekil 3.5: Dağıtım şebekesine ait pozitif-negatif ve sıfır sıra eşdeğer devre.

Arıza akımının hesaplanması için simetrik bileşenler kullanılmaktadır. 1917 yılında Fortescue tarafından geliştirilen yöntem sayesinde, üç fazlı dengesiz bir sistem üç farklı dengeli fazör formatına dönüştürülmektedir. Bu fazörler pozitif sıra, negatif sıra

ve sıfır sıra fazörlerdir. **Şekil 3.5** ile dağıtım şebekesinin simetrik bileşenler cinsinden basitleştirilmiş eş değer devresi gösterilmiştir. TFT arıza akımının hesaplanması için pozitif sıra, negatif sıra ve sıfır sıra bileşenlerin tümü kullanılmaktadır. TFT arıza akımının genliği simetrik bileşenler cinsinden denklem (3.1) ve denklem (3.2) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_F \quad (3.2)$$

Burada $a = 1 \angle 120^\circ$ birim vektördür. Farklı topraklama türlerine ait arıza akım hesap formülasyonları arıza direnç değerinin $R_F=0$ olduğu durum için **Tablo 3.1** ile özetlenmiştir.

Tablo 3.1: Farklı topraklama türlerine ait arıza akım hesap formülasyonları.

Sıra	Topraklama Türü	Arıza Akımı	Denklem No
1	İzole	$I_{F,1} = I_{C,B} + I_{C,C}$	(3.3)
2	Direkt topraklı	$I_{F,2} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	(3.4)
3	Direnç Topraklı	$I_{F,3} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_N}$	(3.5)
4	Reaktans Topraklı	$I_{F,4} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + ((Z_0 + 3X_N) // XC0, T)}$	(3.6)

Burada; $I_{C,B}$ B fazının kapasitif akım değeri, $I_{C,C}$ C fazının kapasitif akım değeri, Z_1, Z_2, Z_0 Sırasıyla, pozitif sıra, negatif sıra ve sıfır sıra empedans değerini, E Faz-

toprak gerilimin nominal değerini, R_N : Nötr topraklama direnç değerini, X_N : Nötr topraklama reaktans değerini, $C_{0,T}$: Şebekenin toplam sıfır sıra kapasite değerini temsil etmektedir. Nötr noktası izole şebekelerde arıza akım genliği şebekenin toplam kapasite değeri ile orantılıdır. Nötr noktası direkt topraklı şebekelerde ise arıza akım genliği hattın pozitif ve sıfır sıra empedans değerine bağlıdır. Bu nedenle şebekenin sıfır sıra empedans genliği pozitif sıra empedans genliğinden düşük ise, TFT arızası üç faz arızadan daha yüksek olabilir.

Güç sistemlerinde nötr topraklama yöntemleri nötr noktasının bağlantı türüne göre sınıflandırılabilirdiği gibi nötr topraklamasının etkin topraklı veya etkin topraklı olmama durumuna göre ayrılmaktadır. Bir şebekenin etkin topraklanıp topraklanmadığı simetrik bileşenler cinsinden ifade edilmektedir [65].

$$R_0 \leq X_1 \quad (3.7)$$

$$X_0 \leq 3X_1 \quad (3.8)$$

Denklem (3.7) ve denklem (3.8) ile ifade edildiği gibi sıfır sıra direncinin pozitif sıra reaktansından küçük olması, sıfır sıra reaktansının pozitif sıra reaktansından üç kat küçük olması gerekmektedir. Bu koşulların sağladığı durumda sistem etkin topraklanmıştır. Aksi takdirde sistem etkin topraklanmamıştır. Sistemde yer altı kablusunun kullanılması ortak empedans etkisinden dolayı X_0 değerinin çok daha büyük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, dağıtım şebekesinde yeraltı kablosu kullanıldığında sistem genel olarak etkin topraklanmamış olarak davranmaktadır. Simetrik bileşen ifadesinin yanı sıra arıza akımının genliği sistemin etkin topraklanması hakkında bilgi vermektedir. Sistemin etkin topraklandığı durumda TFT arızasının genliği üç faz kısa devresinin % 60'ından eşit veya % 125'ine kadardır. Ayrıca etkin topraklanmış şebeke kavramı IEEE Std C62.92.1TM-2016 [65]'de nötr noktasının direkt topraklanması şeklinde tanımlanmıştır.

Tablo 3.2'de farklı ülkelere ait OG şebekelerinin topraklama tiplerine ait kullanım oranı görülmektedir. Düşük direnç üzerinden topraklı dağıtım sistemleri dünya

genelinde düşük oranda kullanılmasının yanı sıra Türkiye’de oldukça yaygındır. Ülkemizde yaygın olarak 154/34.5 kV indirici transformatörlerin sekonder kısmı 20 Ω üzerinden topraklanmaktadır.

Tablo 3.2: OG topraklama yöntemlerinin oranı (şebeke) [66].

Ülke	Efektif	Düşük Direnç	Yüksek Direnç	Kompanze	İzole
ABD	% 85	% 10	-	-	% 5
Avustralya	% 95	% 5	-	-	-
Brezilya	% 97	% 2	-	-	% 1
Meksika	% 100	-	-	-	-
Çek Cumhuriyeti	% 0	% 20	-	% 75	% 5
Peru	% 20	-	-	-	% 80
Türkiye	% 5	% 95	-	-	-

Tablo 3.3 ile endüstriyel tesislerde kullanılan topraklama türlerinin oransal dağılımı farklı ülkeler için listelenmiştir. **Tablo 3.3**’de görüldüğü gibi endüstriyel tesislerde efektif topraklama yönteminin oranı azalmaktadır. OG endüstriyel tesislerde genel olarak en yüksek orana sahip topraklama yöntemi düşük direnç üzerinden topraklı sistemdir. OG şebekesi incelendiğinde nötr noktası izole sistem OG endüstriyel tesislerde daha yüksek oranda kullanılmaktadır. Bununla birlikte **Tablo 3.3**’de görüldüğü gibi Çek Cumhuriyeti nötr noktası izole sistemin en yaygın kullanıldığı ülkedir.

Tablo 3.3: OG topraklama yöntemlerinin oranı (endüstri) [66].

Ülke	Efektif	Düşük Direnç	Yüksek Direnç	Kompanze	İzole
ABD	% 35	% 53	-	-	% 2
Avustralya	% 100	-	-	-	-
Brezilya	% 15	% 55	% 20	-	% 10
Meksika	% 30	% 70	-	-	-
Çek Cumhuriyeti	% 0	% 20	-	% 35	% 45
Peru	% 20	%80	-	-	% 20
Türkiye	% 25	% 60	% 2	-	% 13

Türk OG dağıtım şebekelerinde yaygın olarak iki farklı bağlantı grubuna sahip YG/OG transformatörler bulunmaktadır. Birinci trafo grubu 154/33 kV Yıldız/Yıldız güç trafosunun primer tarafı direkt topraklı sekonder tarafı ise 20 Ω direnç üzerinden

topraklı olduğu şebekelerdir. Yönetmelik gereği nötr noktasındaki direnç değeri yardımıyla bu tip trafo grubunda TFT arıza akımının genliği 1000 A değerine sınırlandırılmaktadır. İkinci bağlantı grubu 400/33 kV Yıldız/ Δ güç trafosunun % 90 endüktif karakterli, % 10 rezistif karakterli toplam empedans değerinin 33 Ω olduğu topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu bağlantı türüdür. Topraklama trafosu yardımıyla üçgen bağlı sekonder kısımda TFT arızası sırasında nötr noktası oluşmaktadır. Böylece TFT arıza akım genliği sınırlandırılmaktadır. 400/33 kV Yıldız/ Δ güç trafosunun endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerde TFT arıza akımının 600 A değerine sınırlandırılması istenmektedir. Türk OG dağıtım şebekeleri incelendiğinde 33 kV'luk gerilimlerinin yanı sıra 15 kV, 10 kV ve 6,3 kV'luk trafo merkezlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Fakat bu gerilim seviyelerinin kullanımı yaygın değildir. Bu gerilim seviyelerinde genel olarak direkt topraklı şebeke pratiği tercih edilmektedir.

3.2. Hat Yapısı

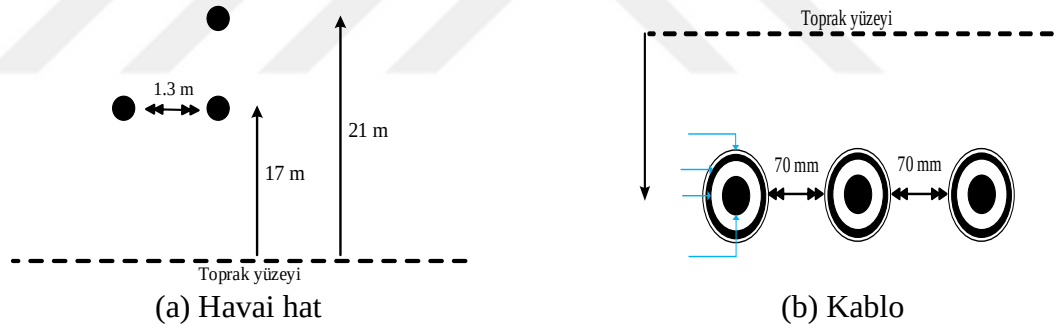
OG dağıtım sistemlerinde özellikle kırsal alanlarda uzun havai hat kullanılması pratiği oldukça yaygındır. Bununla birlikte ülkemizde büyükşehirler haricinde OG dağıtım sistemlerinde havai hatlar sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat havai hat yerine kablo kullanım eğilimi hem ülkemizde hem de Avrupa ülkelerinde mevcuttur. İki farklı kablo kullanımı mevcuttur. Birinci tür kablo kullanımı havai hatlarda kullanılan alpek kablolardır. İkinci tür ise yeraltı kablolarıdır. Havai hatlar ile kıyaslandığında yeraltı kabloları meteorolojik olaylardan daha az etkilenmektedir. 2005 yılında İsveç, Norveç ve Danimarka'yı vuran Guron kasırgası havai hatlara zarar verip, çeşitli TFT arızası yaşanmasına sebep olmuştur. Yaşanan bu arızalar ölüm ile sonuçlanmıştır. Yaşanan bu felaketten sonra hükümetler belli kanun düzenlemeleri çerçevesinde kısa sürede havai hatları kaldırıp yerine yeraltı kablosu kullanmaya başlamıştır [6]. Ayrıca şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde uzun havai hatların kullanılması tercih edilebilir değildir. Doğa olaylarına karşı daha korunaklı olması, görsel mimarisi ve arz güvenliğini artırıcı etkilerinden dolayı hem ülkemiz özelinde hem de dünya genelinde yeraltı kablosu kullanımına duyulan ihtiyaç dağıtım şebekelerinde kablo kullanım oranının artmasına neden olmuştur.

Şekil 3.6 ile Pigeon havai hat iletkenine ait ve 240 mm² XLPE tek damarlı yeraltı kablosuna ait geometrik veriler gösterilmiştir. Bu iki hatta ait empedans matrisleri

Tablo 3.4 ile özetlenmiştir. **Tablo 3.4**'te açıkça görüldüğü üzere yeraltı kablosunun kapasitans değeri havai hattın oldukça fazladır. Yaklaşık 40 kat fark olmak ile birlikte farklı şebekelerde bu oran değişmektedir. Örneğin Polonya şebekesinde havai hat ve yeraltı kablosunun kapasite değerleri yaklaşık 100 kattır [67].

Tablo 3.4: Havai hat ve kabloya ait R-L-C matrisleri [4].

Direnç Matrisi (3x3) Ω/km	Endüktans Matrisi (3x3) Ω/km	Kapasitans Matrisi (3x3) $\mu\text{F}/\text{km}$
$R_H = \begin{bmatrix} 0.384 & 0.047 & 0.047 \\ 0.047 & 0.383 & 0.047 \\ 0.047 & 0.047 & 0.384 \end{bmatrix}$	$L_H = \begin{bmatrix} 0.769 & 0.344 & 0.371 \\ 0.344 & 0.769 & 0.333 \\ 0.371 & 0.333 & 0.769 \end{bmatrix}$	$C_H = \begin{bmatrix} 7.322 & -1.42 & -1.82 \\ -1.42 & 6.905 & -1.22 \\ -1.82 & -1.22 & 7.246 \end{bmatrix}$
$R_K = \begin{bmatrix} 0.149 & 0.023 & 0.007 \\ 0.023 & 0.136 & 0.023 \\ 0.007 & 0.023 & 0.149 \end{bmatrix}$	$L_K = \begin{bmatrix} 0.330 & 0.047 & 0.048 \\ 0.047 & 0.325 & 0.047 \\ 0.048 & 0.047 & 0.330 \end{bmatrix}$	$C_K = \begin{bmatrix} 0.325 & 0 & 0 \\ 0 & 0.325 & 0 \\ 0 & 0 & 0.325 \end{bmatrix}$



c) Kullanım oranı

Şekil 3.6: Hat yapılarına ait bilgiler.

Şekil 3.6.c ile Mart 2023 itibariyle İstanbul-Avrupa yakasında kullanılan yeraltı kablosu ve havai hat oranları gösterilmiştir. İşletmede kullanılan hatların % 85'i yeraltı kablo hatlarıdır. İstanbul özelinde dağıtım şebekelerinde kullanılan yeraltı kablo hattı oranı diğer Avrupa şehirlerinden daha fazladır. Örneğin ülkemizde bu oran % 85'lerde iken Almanya'da % 70, Avusturya'da % 63 ve İsviçre'de % 60'dır [63]. Bu durum ülkemiz dağıtım şebekelerinin kapasitif akım değerinin ve hat sonu gerilimin artmasına neden olmaktadır. Kapasitif akımların gerilim düşümüne pozitif etkisi ve kablo kullanımının doğa olaylarına karşı sistemin daha güvenilir işletilmesi noktasında yararları olmasına rağmen özellikle toprak arızalarına karşı sistemin seçici korunmasını zorlaştırmaktadır. Kapasitif akımların arıza noktası algoritmalarına etkisi [68] numaralı çalışmada, aşırı akım röle koordinasyonu çalışmalarına etkisi [69] numaralı çalışmada, aşırı gerilimlere etkisi [70] numaralı çalışmalarda incelenmiştir.

Kapasitif akım değerinin canlı şebekede ölçülmesi oldukça maliyetli ve dağıtım şebeke işletmecisi açısından zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle geometrik verilerin ve elektriksel parametrelerin yardımıyla empedans matrislerinin hesaplanması paket programlar vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu programlar Matlab Simulink, DIGSLIENT, PSCAD ve EMTP ATP-Draw olarak sıralanabilir. EMTP ATP-Draw kablo modellemesi konusunda oldukça gelişmiş ve araştırmacılar tarafından sıkça kullanılan bir paket programdır. Bu tez kapsamında tüm kablo modellemeleri EMTP ATP-Draw programında gerçekleştirilmiştir. Yeraltı kablolarının kapasitif akımlarını canlı şebekelerde ölçülebileceği veya geometrik-elektriksel parametrelerinin girildiğinde paket programlar tarafından hesaplanacağı gibi basit formüller ile de hesaplamak mümkündür. Denklem (3.9) ile kapasite hesabı gösterilmiştir.

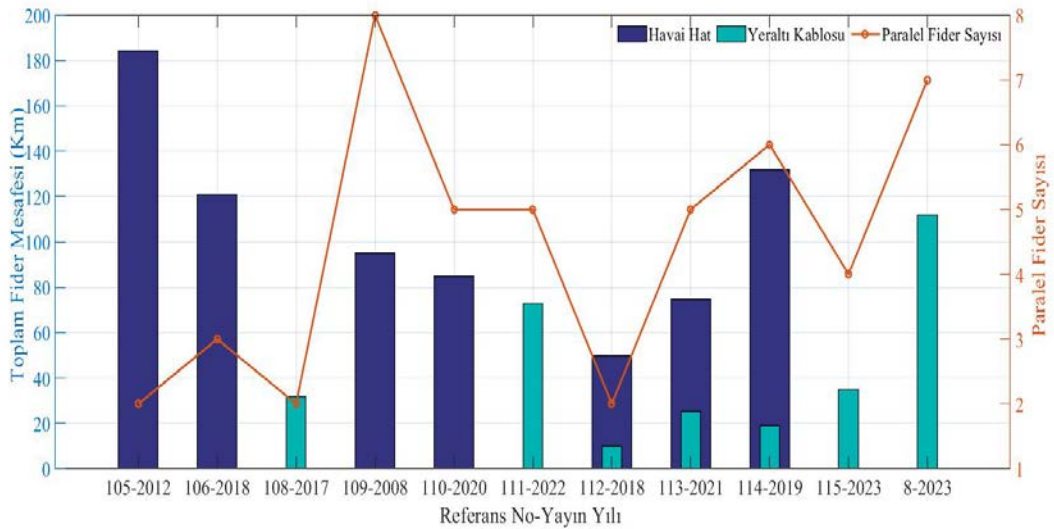
$$C = \frac{7.35\varepsilon}{\log_{10}(1 + \frac{2t}{D})} = \frac{7.35\varepsilon}{\log_{10}(1 + \frac{d}{D})} \quad (3.9)$$

Denklem 4.9'da; ε : dielektrik katsayısı, t : iletkenine ait yalıtkanın kalınlığı, d : yalıtkan kısıma kadar olan mesafe, D :yalıtkanın çapını temsil etmektedir. Fakat bu değer ile sadece faz kapasitesi hesaplanabilmektedir. Ayrıca kablonun gömülme geometrisinin değişmesi denklem (3.9)'un doğruluğunu etkileyecektir. TFT arızası sırasında

sistemde dolaşan sıfır sıra kapasitif akımlar, arızanın olmadığı bölgede bulunan toprak rölesinin arıza algılamasına ve ilgili kesicinin açma yapmasına neden olmaktadır. Bu olgu literatürde hatalı açma probleminin nedenlerinden biridir. Bu tez kapsamında bir sonraki bölümde bu problem ve önerilen çözüm yöntemleri detaylı olarak anlatılacaktır.

3.3. Paralel Fider Sayısı ve Fider Mesafesi

Fider mesafesi hem seri empedans değerini hem de şönt bağlı kapasite değerini artıracaktır. Bu nedenle fider mesafesi sıfır sıra akım genliğini etkileyen bir parametredir. Saha uygulamalarında her bir fiderin mesafeleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle toprak röle koruma röle ayarlarının da farklı olması gerekmektedir. OG dağıtım sistemlerinde talep edilen gücün artması ile birlikte bu gücü karşılamak için paralel fider sayıları da artmaktadır. Ayrıca arz güvenliğini artırma ve kesintiyi azalmak için her iki uçtan paralellenmiş fider kullanım saha uygulamaları da mevcuttur. Dağıtım sistemlerinde kullanılan paralel fider sayısının artması empedans değerini ve toplam kapasitif akım değerinin etkileyeceği için arıza hesabında ve toprak rölesinin ayarlanması noktasında dikkate alınması gereken kritik bir parametredir.



Şekil 3.7: Farklı çalışmalara ait şebekelerin topolojik yapılarının karşılaştırılması.

Şekil 3.7 ile farklı çalışmalara ait şebekelerin topolojik yapılarının havai hat/kablo miktarları ve paralel fider sayılarına ait karşılaştırma grafiği gösterilmiştir. Görüldüğü

üzere her bir topolojinin havai hat mesafesi ve kablo mesafesi farklıdır. Bununla birlikte genel olarak OG dağıtım şebekeleri havai hat ve kablonun birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerdir. Fakat tamamen havai hat ve tamamen kablo şebekelerinin de kullanıldığı **Şekil 3.7**'de görülmektedir. Her dağıtım şebekesi farklı sayıda paralel fidere sahiptir. Bu nedenle tek bir röle ayarı OG dağıtım şebekelerini TFT arızalarına karşı seçici koruyamayacaktır. TFT arızasına karşı toprak koruma rölelerinin şebeke topolojisine bağlı ayarlanması gerekmektedir.

3.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde TFT arızasına karşı uygulanan genel koruma prensibi anlatılmıştır. TFT arızasının simetrik bileşenler cinsinden hesaplanması gösterilmiştir. TFT arızasının genliğini etkileyen nötr noktası türü, hat yapısı, fider mesafesi ve paralel fider sayısını parametreleri incelenmiştir. Görüldüğü üzere her bir ülkenin kullandığı nötr noktası topraklama pratiği birbirinden farklıdır. Nötr topraklama pratiğinin farklılığı temelde TFT arızasının genliğini etkileyecektir. Bu nedenle seçilecek koruma ekipman boyutları ve röle ayarları farklılık gösterecektir. Ayrıca aynı nötr noktası topraklama pratiği için dağıtım şebekelerinin topolojileri birbirinden farklıdır. Bu durum TFT arızasının genliğini ve karakteristiğini etkilemektedir. Bu nedenle TFT arızalarına karşı tek tip bir koruma yöntemi uygulamak oldukça zordur.

Şebeke topolojileri incelendiğinde toprak arızasına karşı koruma alanında yayınlanan akademik çalışmaların büyük bir bölümünün havai hat yoğun şebekeler ile ilgili olduğu görülmektedir. Fakat özellikle son zamanlarda incelenen dağıtım şebekelerindeki kablo oranı artmaktadır. Bu değişim göz önüne alındığında bu tez kapsamında incelenen dağıtım şebeke topolojilerinin güncel literatür ile uyumlu olduğu açıkça görülmektedir.

4. TOPRAK KORUMASI SIRASINDA YAŞANAN HATALI AÇMALAR

Yük akışının kaynaktan yüke doğru olmak üzere tek yönlü olmasından dolayı Türkiye’de ve dünyanın pek çok ülkesinde dağıtım şebekelerinin mümkün mertebe radyal şekilde işletilmesi istenmektedir. Tek yönlülük sayesinde radyal dağıtım sistemleri uzun süre yönsüz aşırı akım röleleri ile faz arızalarına karşı yönsüz toprak akım röleleri ile toprak arızalarına karşı seçici bir şekilde korunabilmiştir [71]. Arz güvenliğini artırma noktasında, dağıtım sistemlerinde meydana gelen değişimler kullanılan koruma algoritmalarının, koruma röle tiplerinin ve/veya ayarlarının güncellenmesini zorunluluk haline getirmektedir. Faz arızaları sırasında yaşanan nedenlere benzer şekilde toprak arızası sırasında yaşanan hatalı açmaların nedenlerini Yüksek oranda DÜ’nün radyal OG fiderlere entegre edilmesi, özellikle endüstriyel tesislerde kullanılan yoğun indüksiyon motorlarının kalkış akımlarının etkisi, gerilimlerde veya yük akımlarında yaşanan dengesizlikler, her iki uçtan aynı baralardan paralellenmiş fiderlere sahip şebekelerin bulunması, özellikle aynı trenşadan giden yeraltı kablolarının kuplaj etkisi, yeraltı kablolarının toprak arızası sırasında faz-toprak kapasitelerinden dolayı şebekede dolaşan kapasitif akımları şeklinde sıralamak mümkündür.

Radyal OG fiderlere DÜ entegre edilmesi faz arızaları için şebekede bulunan rölelerin gördüğü arıza akım genliğini etkilediği gibi TFT arızası sırasında toprak koruma rölelerinin gördüğü sıfır sıra akım genliğini de etkilemektedir. Böylece, DÜ entegrasyonu faz arızalarında hatalı açmaya sebebiyet verdiği gibi TFT arızaları sırasında da hatalı açmaya neden olmaktadır. Bu nedenle radyal dağıtım şebekelerinde DÜ bulunan fiderlerde yönlü toprak koruma rölesi kullanılmaktadır. [72] numaralı çalışmada 33 kV’luk radyal dağıtım şebekesine DÜ bağlanması sonucu gerçekleşen hatalı açma problemi gösterilmiştir. TFT arızası kaynaklı hatalı açmayı gidermek için yönlü toprak koruma rölesinin yanı sıra DÜ’nün bağlı olduğu fiderde aşırı gerilim rölesi kullanılması önerilmiştir. Bu durum aşırı gerilim rölesi yardımıyla arızalı ve sağlıklı fider ayrımı yapılabilmeyi mümkün kılmaktadır. Böylece sağlıklı fiderin arızalı fider ile aynı anda veya daha önce hatalı açma yapması engellenmektedir. Benzer şekilde gerilim rölelerinin koordine edilmesi ile hatalı açma problemi [73]

numaralı çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmalarda toprak koruma rölelerinin ayarlar parametreleri optimizasyon yaklaşımı ile ele alınmamıştır. Toprak koruma rölelerini ayarları şebeke topolojisine bağlı olarak deneme ve yanılma yöntemi ile ayarlanmıştır. Arıza Akım Sınırlayıcı (AAS) kullanarak DÜ'nün arıza akımına etkisi sınırlandırıldığı bilinmektedir. AAS yardımıyla mevcut röle ayarlarını değiştirmeden hatalı açma problemi [74] numaralı çalışmada giderilmiştir. İlave gerilim trafoları, gerilim sensörleri, gerilim röleleri ve ASS kullanılması DŞİ'ler için ilave maliyeti beraberinde getirmektedir. Bu durum önerilen koruma yöntemlerinin sahaya uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar DÜ'nün TFT arızası sırasında sebep olduğu hatalı açma problemini ilave koruma ekipmanı olmadan giderme noktasında çalışmışlardır. DÜ'nün bulunduğu fiderin hatalı açma sinyali üretmesi sıfır sıra akım genliğinin negatif sıra akım genliğine oranı ile [75] numaralı çalışmada giderilmiştir. Önerilen yöntem farklı topraklama türleri, farklı direnç değerleri ve farklı arıza noktaları için incelenmiştir. Önerilen yöntem ile nötr noktasının empedans değerinin 40Ω 'dan düşük olduğu durumlar için hatalı açma giderilmiştir. DÜ'nün direkt topraklı şebekelerde TFT arızası sırasında sebep olduğu hatalı açma problemi geleneksel optimizasyon yaklaşımı ile giderilmektedir. İlgili çalışmalar detaylı bir şekilde Bölüm 7'de tartışılmıştır.

İndüksiyon motorları endüstriyel dağıtım şebekelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. İndüksiyon motorları TFT arızası sırasında, arıza akım genliğini değiştirmektedir. Böylece toprak rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genliğini etkilemektedir. DÜ'ye benzer TFT arızası sırasında yaşanan hatalı açma problemi indüksiyon motorlarının kullanımında da geçerlidir. [76] numaralı çalışmada geleneksel amaç fonksiyonuna ilave kısıt fonksiyonları ekleyerek dağıtım şebekesinde bulunan tüm rölelerin I_p ve TDS ayarları güncellenmiştir. Yeni toprak röle ayarları için seçici koruma sağlanmıştır. Yöntemin etkinliği gerçek bir endüstriyel tesiste (çimento fabrikası) gösterilmiştir. Üç fiderli 20 kV'luk radyal dağıtım şebekesinde yaşanan indüksiyon motorlarının sebep olduğu hatalı açma problemi, sağlıklı fiderlerin pozitif sıra akım ile negatif sıra akım oranına göre üretilen blok sinyali ile korunması ile giderilmiştir [77].

TFT arızası sırasında yük akımları etkisi ile gerçekleşen hatalı açma problemi [78] numaralı çalışmada incelenmiştir. Problemin çözümü noktasında üç kademeli üç farklı zaman ayarı bulunan Siemens 7SJ602 toprak rölesi kullanılmıştır. Önerilen yöntemin

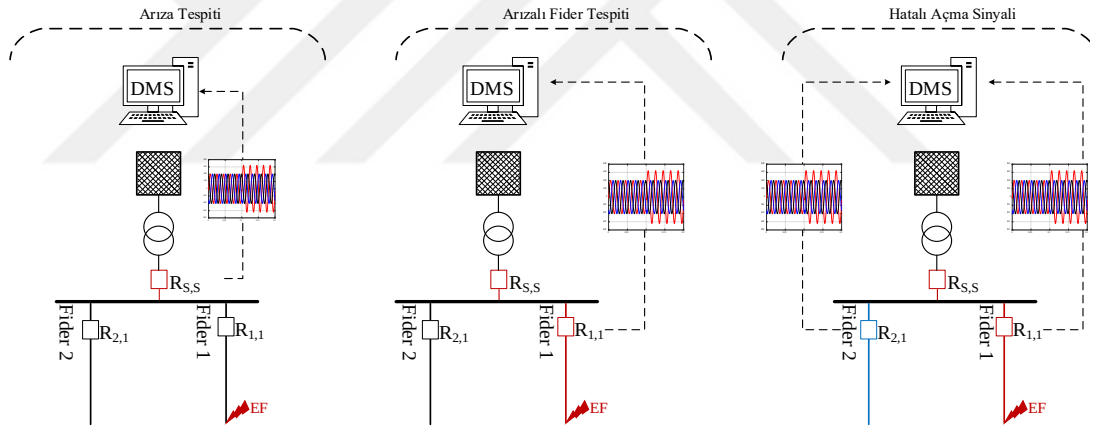
etkinliği on fiderli radyal dağıtım şebekesinde test edilmiştir. Üç kademeli zaman ayarı ile birlikte hatalı açma sinyalinin süresi geciktirilmiştir. Böylece hatalı açma problemi giderilmiştir. Fakat mevcut dağıtım şebekelerinde kullanılan farklı tipte rölelerinin üç farklı kademe özelliği bulunmayabilir. Bu nedenle geliştirilen bu yöntem tüm şebekelerde kullanılamayabilir. Ayrıca zaman gecikmesi eklenmesi şebekenin toprak arızası altında daha uzun süre çalışmasına yol açmaktadır. Bu durum zaman içinde şebekenin izolasyon seviyesinin düşmesine ve ikincil toprak arızasını gerçekteşmesine neden olabilir.

Gerilim dengesizliğinden dolayı yaşanan hatalı açma problemi arıza kayıtları ile birlikte [79] numaralı çalışmada gösterilmiştir. İlgili çalışmada belirtildiği üzere gerilim dengesizliği sonucu 11 kV'luk OG fiderlerde yaklaşık olarak 250 MW'dan büyük yük kayıpları yaşanmıştır. Problemin çözümlü noktasında hatalı açmanın gerçekteştiği fiderlerde hem faz ve hem de toprak rölesinin eşik akım değerleri artırılmıştır. Fakat yeni değerler içinde hatalı açma problemi devam etmiştir. Bu nedenle iki kademeli koruma şeması önerilmiştir. Birinci kademe olarak yönsüz sıfır sıra akım koruma seçilmiştir. İkinci kademe olarak negatif sıra yönlü koruma seçilmiştir.

Sıfır sıra devresinde yaşanan ortak kuplaj etkisi analitik olarak [80] numaralı çalışmada incelenmiştir. 33 kV'luk dağıtım şebekesinde, örnek bir arıza kaydı üzerinden yönlü toprak rölelerinin kuplaj etkisinden dolayı hatalı açma problemini gideremediği gösterilmiştir [81]. Fakat ilgili çalışma problemin giderilmesi noktasında herhangi bir metodoloji sunma noktasında eksiktir. [82] numaralı çalışmada da benzer şekilde ortak kuplaj etkisinden dolayı hatalı açmaların 20 kV'luk dağıtım şebekelerinde gerçekteştiği belirtilmiş fakat herhangi bir çözüm yöntemi sunulmamıştır. Her iki taraftan paralel beslenmeye sahip istasyonlarda yaşanan hatalı açma problemi, pozitif sıra bileşendeki değişimin takibi ile giderilmiştir [83]. Direkt topraklı şebekede kullanılan bu yöntemin seçicilik performansı pek çok parametreden etkilenmektedir. Bu parametreler örnekleme frekansı, harmonikler, yük akımı ve nötr topraklama türü olarak sıralanmaktadır [84].

4.1. TFT Arızası Sırasında Yaşanan Kapasitif Temelli Hatalı Açmalar

Dağıtım şebekesinde gerçekleşecek TFT arızasının seçici bir şekilde sistemden izole edilmesi için toprak arızasının tespit edilmesi, arızalı fiderin bulunması varsa alt istasyonlara kadar izlenmesi gerekmektedir. Ayrıca arıza sinyalinin sadece arızalı fider tarafından SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) veya DMS (Distribution Manangment System)'e iletilmesi gerekmektedir. **Şekil 4.1** ile DÜ bulunmayan radyal dağıtım şebekesinde TFT arızasının temizlenme süreci DMS açısından şematize edilmiştir. Şebekede gerçekleşen TFT arızası ana trafo merkezinde bulunan $R_{S,S}$ rölesi tarafından sıfır sıra akım genliği olarak veya ortak baradan $3V_0$ değişikliği olarak algılanmaktadır. Bu bilgi arıza tespit bilgisi olmakla birlikte arızanın hangi fiderde gerçekleştiğine dair seçici herhangi bir bilgi içermemektedir.



Şekil 4.1: DÜ olmayan dağıtım şebekesinde TFT arızasının temizlenme süreci.

TFT arızasının tespitinden sonra, arızanın hangi fiderde olduğunun tespiti için fider başlarında bulunan rölelerden sıfır sıra akım bilgisi DMS'e gönderilmektedir. Seçici korumanın sağlanması ve arızanın olmadığı bölgede herhangi bir kesinti olmaması için sadece arızalı fiderden arıza sinyalinin iletilmesi gerekmektedir. Fakat, radyal dağıtım sistemlerinde kablo kapasitif akımların dolayı arıza olmayan bölgede bulunan röleler de arıza sinyali üretmekte ve ilgili kesicinin açma yapmasına neden olmaktadır. Böylece kapasitif akım temelli hatalı açma problemi yaşanmaktadır. Taranan

literatürde hatalı açma probleminin üçüncü tanımı kapasitif akım temelli hatalı açma problemini tanımlamaktadır.

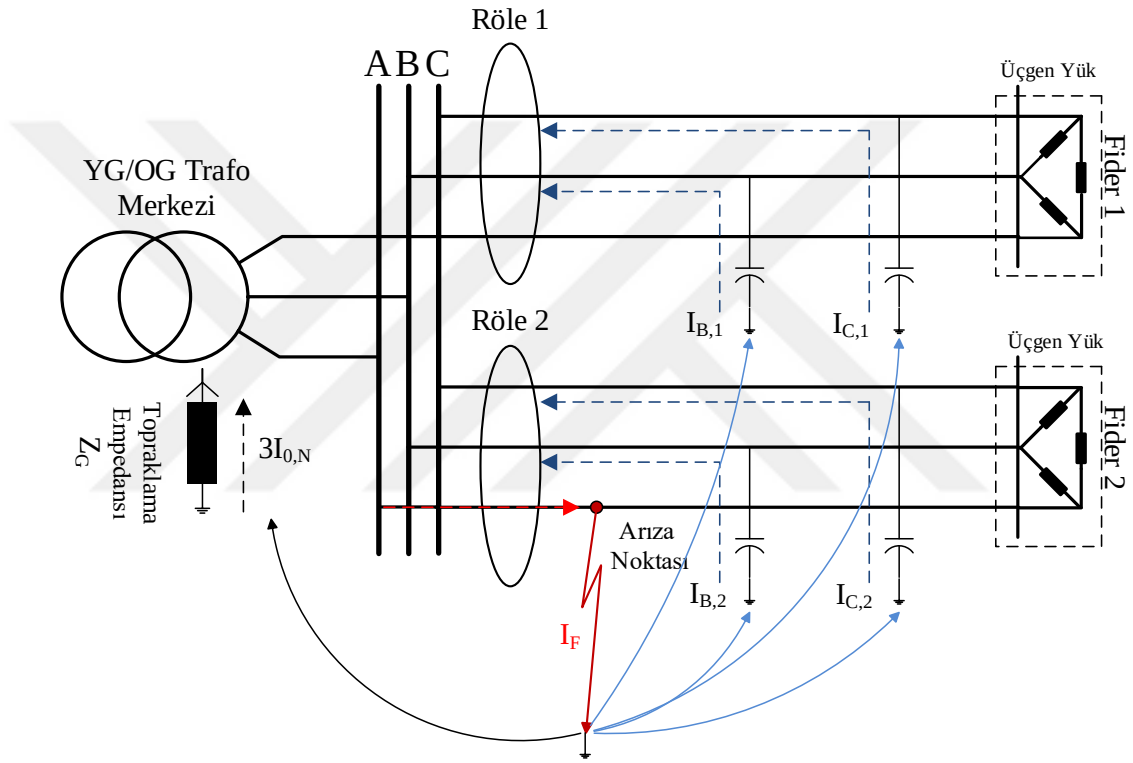
Tanım 3: Sağlıklı fiderde bulunan rölenin arızalı fiderde bulunan röle ile aynı anda veya daha önce açma sinyali üretmesi [7], [44]. Bu tez kapsamında yeraltı kablolarının kapasitif akımı kaynaklı gerçekleşen hatalı açma problemi üzerine odaklanılmış olup diğer nedenler kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir. **Şekil 4.1**'de gösterilen TFT arızası için her iki fiderde aynı anda açma sinyali üretmektedir. Bu durumda DŞİ'ler birden fazla fider kaybedeceğinden dolayı arıza temizleme süresi boyunca SEM artacaktır. Ayrıca aynı nedenden dolayı OKSÜRE ve OKSIK gibi güvenilirlik endeksleri de olumsuz etkilenecektir. Bu tespit Boğaziçi Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (BEDAŞ) tarafından bildirilen arıza kayıtlarında da açıkça doğrulanmaktadır.

Tablo 4.1: 2019 ve 2020 yılları arasında, kapasitif akım temelli hatalı açma problemine ilişkin olay sayıları ve kalite endeks bilgileri.

	2019			2020		
	Paralel Açma	Tüm OG	Yüzde	Paralel Açma	Tüm OG	Yüzde
Arıza Sayısı	1084	7089	15%	1205	4898	25%
Toplam Etkilenen Abone Sayısı	5.788.084	42.929.117	13%	4.912.559	23.495.516	21%
Toplam Kesinti Süresi	1.331,05	9.558,26	14%	922,53	4.818,45	19%
OKSÜRE	82,64	606,39	14%	36,75	167,35	22%
OKSIKLİK	0,84	7,45	11%	0,78	4,12	19%
SEM Bedeli (TL)	64.201.910	419.396.983	2%	37.766.525	943.432.803	4%

Tablo 4.1 ile 2019 ve 2020 yılları arasında, kapasitif akım temelli hatalı açma problemine ilişkin olay sayıları ve güvenilirlik endeks bilgileri verilmiştir. 2019 ve 2020 yıllarında kapasitif akım temelli paralel açma kaynaklı meydana gelen 2443 arızada, etkilenen müşteri sayısı 11.636.925'dir. Bu tez kapsamında geliştirilmiş olan KKDS birlikte kapasitif akım temelli hatalı açmaların sifıra indirilmesi hedeflenmektedir. Hatalı açmalar beraberinde oldukça fazla sayıda abonenin

etkilenmesine sebep olmuştur. 2019 yılında BEDAŞ sorumluluğunda bulunan 5.788.084 abone, 2020 yılında ise 4.912.559 abone hatalı açmadan etkilenmiştir. 2019 yılında OKSÜRE endeksi 7,45; 2020 yılında ise 4,12 olarak belirtilmiştir. 2019 yılında OKSÜRE endeksi 606,39 ; 2020 yılında ise 167,35 olarak belirtilmiştir. SEM ise 2019 yılında 419.396.983,39 TL; 2020 yılında ise 943.432.803,65 TL olarak verilmiştir. Hatalı açma sayıları ve etkilenen müşteri sayıları sistemin seçici koruma yönünde problem olduğu göstermektedir.



Şekil 4.2: IEEE Standart 3003.1 2019'a göre çizilen iki fiderli dağıtım şebekesi için TFT arızası sırasında akım dağılımları.

İki fiderli örnek bir radyal dağıtım şebekesinin eş değer devresi kabloların faz-toprak kapasiteleri ihmal edilmeden **Şekil 4.2'**de gösterilmiştir. Hat başında iki adet toprak rölesi kullanılan örnek sistemde seçici toprak korumanın sağlanması durumunda ikinci fiderde meydana gelecek herhangi bir TFT arızası durumunda sadece ikinci fiderde bulunan toprak aşırı akım rölesinin açma sinyali üretmesi beklenmektedir. Fakat faz-toprak kapasiteleri üzerinden akan şarj akımlardan dolayı ikinci fidere ek olarak birinci

fiderde bulunan toprak aşırı akım rölesi de arızayı algılayabilmekte ve hatalı olarak açma sinyali üretebilmektedir. Dengeli bir sistemde; faz akımlarının vektörel toplamı sıfır olduğu bilinmektedir. TFT arızası sırasında fazlarda dengesizlik oluştuğu için toprak röleleri tarafından $3I_0$ ölçülmektedir. Literatürde bu akıma homopolar akımda denilmektedir. Ölçülen $3I_0$ değeri rölenin eşik değerinden yüksek ise röle başlatma sinyalinin alır ve ayarlandığı zaman sonrasında açma sinyalinin üretir. Şekil 4.2’de ikinci fiderde gerçekleşen TFT arızası için sağlıklı fazların faz toprak kapasiteleri üzerinden dönen kapasitif akımlar sıfır sıra akımların görülmesine yol açmaktadır [85]. Sağlıklı fiderde görülen kapasitif akımlar arızadan öncesinde de akmakta birlikte vektörel toplamı yaklaşık olarak sıfırdır. Fakat TFT arızası sırasında toprak rölesini tetikleyici seviyelere yükselebilmektedir. Bu durum kapasitif akım temelli hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. Kapasitif akım temelli açma probleminin denklemleri denklem (5.1)-denklem (5.5) ile ifade edilebilir [86].

$$\bar{I}_F = 3\bar{I}_{0,N} + \bar{I}_{B,1} + \bar{I}_{B,2} + \bar{I}_{C,1} + \bar{I}_{C,2} \quad (5.1)$$

$$3\bar{I}_{0,R_2} = \bar{I}_F - \bar{I}_{B,2} - \bar{I}_{C,2} \quad (5.2)$$

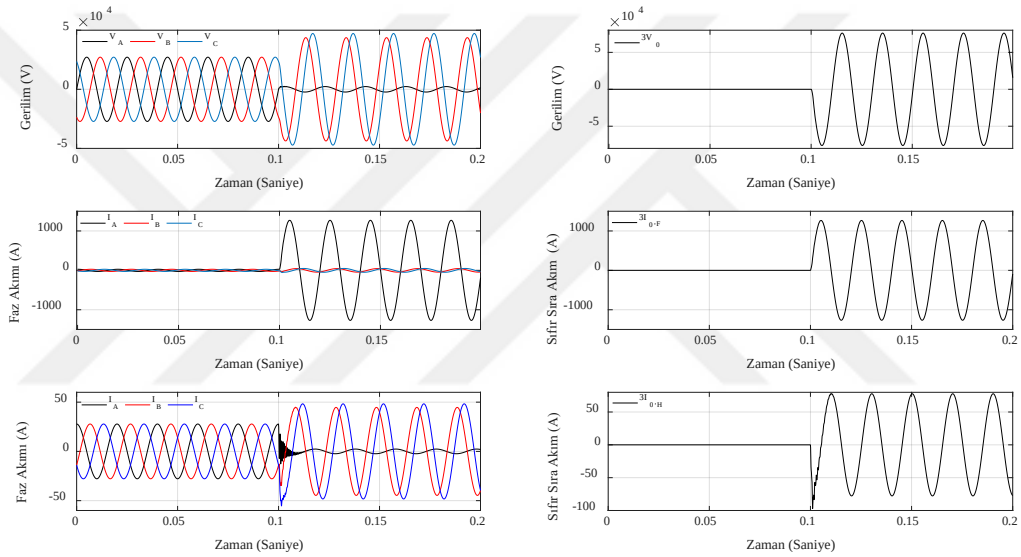
$$3\bar{I}_{0,R_1} = -(\bar{I}_{B,1} + \bar{I}_{C,1}) \quad (5.3)$$

$$3\bar{I}_{0,N} = 3\bar{I}_{0,R_1} + 3\bar{I}_{0,R_2} \quad (5.4)$$

$$3\bar{I}_{0,N} = V_0/Z_G \quad (5.5)$$

Şekil 4.2’de arıza akımının genliği $\bar{I}_F$; $3\bar{I}_{0,N}$ nötr akımı, $I_{B,i}$ ve $I_{C,i}$ i. fiderdeki kapasitif akımlar olmak üzere denklem (5.1) ile hesaplanabilmektedir. Arıza fider başında bulunan rölenin gördüğü akım genliği $3\bar{I}_{0,R_2}$ denklem (5.2) ile, sağlıklı fiderde görülen akımın genliği $3\bar{I}_{0,R_1}$, denklem (5.3) ile hesaplanmaktadır. Arızalı fider, sağlıklı fider ve nötr noktası ilişkisi denklem (5.4) ile gösterilmiştir. Nötr noktasından akan akım $3\bar{I}_{0,N}$ değeri, nötr noktasından veya ortak baradan okunan sıfır sıra gerilimi V_0 , Z_G nötr noktasının empedans değeri olmak üzere denklem (5.5) ile hesaplanmaktadır. İki fiderli radyal dağıtım şebekesi için A Fazında $t=0,1$ saniye anında gerçekleşen TFT

arızası sırasında, hat başında görülen gerilim ve akım değişimleri **Şekil 4.3** ile gösterilmiştir. Görüldüğü üzere arızalı fazın gerilimi düşmekte sağlıklı fazların gerilimi artmaktadır. Böylece ortak barada $3V_0$ gerilimi görülmektedir. Bu durumda fiderlerde arıza tespit edilebilir. Fakat hangi fider olduğu bilgisi sadece $3V_0$ gerilimi ile sağlanamaz. Faz akım grafiklerinden görüldüğü üzere arızadan önce şebekede her bir fazda yeraltı kablolarının faz toprak kapasiteleri üzerinden kapasitif şarj akımları akmaktadır. Bu akımların vektörel toplamının sıfır olduğu sıfır sıra akım grafiklerinde görülmektedir. Fakat TFT arızası anından itibaren her iki fiderde de sıfır sıra akımlar görülmeye başlanmıştır. Bu durumda her iki fiderde eş zamanlı açma sinyali üretebilir.



Şekil 4.3: TFT arızası sırasında gerilim ve akım büyüklüklerinin zamana bağlı değişimi ($R_G=20 \Omega$).

Hem sağlıklı fider görülen $3I_0$ genliği hem de arızalı fiderde görülen $3I_0$ genliği şebeke topolojisinden etkilenmektedir. Genliğin yanı sıra sıfır sıra açısı veya diğer simetrik bileşen vektörleri de şebeke topolojisinden etkilenmektedir. Dağıtım şebekelerinin topolojik yapılarının zorluğu farklı nötr topraklama uygulamalarının olması, farklı hat tiplerinin kullanılması, farklı sayıda paralel fiderlere sahip olması ve her bir fiderin farklı mesafede olması şeklinde sıralanabilir. Bu çeşitlilik pek çok koruma yönteminin geliştirilmesini sağlamıştır. Fakat geliştirilen koruma yöntemleri her topolojiye uyumlu olmayabilir veya koruma yöntemi için gereken koruma ekipmanları şebekede bulunmayabilir. Bir sonraki bölümde bu yöntemler incelenmiştir.

4.2. TFT Arızası Sırasında Yaşanan Kapasitif Temelli Hatalı Açmaları Engellemek İçin Geliştirilen Koruma Yöntemleri

TFT koruması sırasında yaşanan hatalı açmaları engellemek için geliştirilen yöntemlerini uygulama kolaylığından zorluğuna ve gerekli ayar parametrelerine göre üçe ayırmak mümkündür. Birinci basamak yöntem yönsüz toprak koruma rölesi kullanmaktır. Özellikle etkin topraklanmamış şebekelerde yönsüz toprak rölelerinin TDS ve I_p ayarlarının şebeke topolojisine uygun olarak güncellenmesi gerekmektedir. İkinci kademe yöntem ise yönlü toprak koruma rölesinin kullanılmasıdır. Yönlü toprak rölelerinin TDS ve I_p ayarlarının yanı sıra çalışma bölgesini belirlemek için Azami Tork Açısı (ATA) ayarlarının da yapılması gerekmektedir. Bu iki yöntem dışında kalan ilave koruma yöntemlerin ise geliştirilen algoritmaya uygun olarak ayar parametreleri bulunmaktadır. Örneğin aktif güç temelli geliştirilen bir algoritma P_0 ayarı gerekmektedir. Aktif enerji temelli algoritma için E_0 ayarı gerekmektedir. Negatif sıra temelli algoritmada ise I_2 ayarının bulunması gerekmektedir. **Tablo 4.2** ile TFT arızası sırasında yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açmaları engellemek için geliştirilen algoritmaların ayar parametrelerine göre sınıflandırılması listelenmiştir.

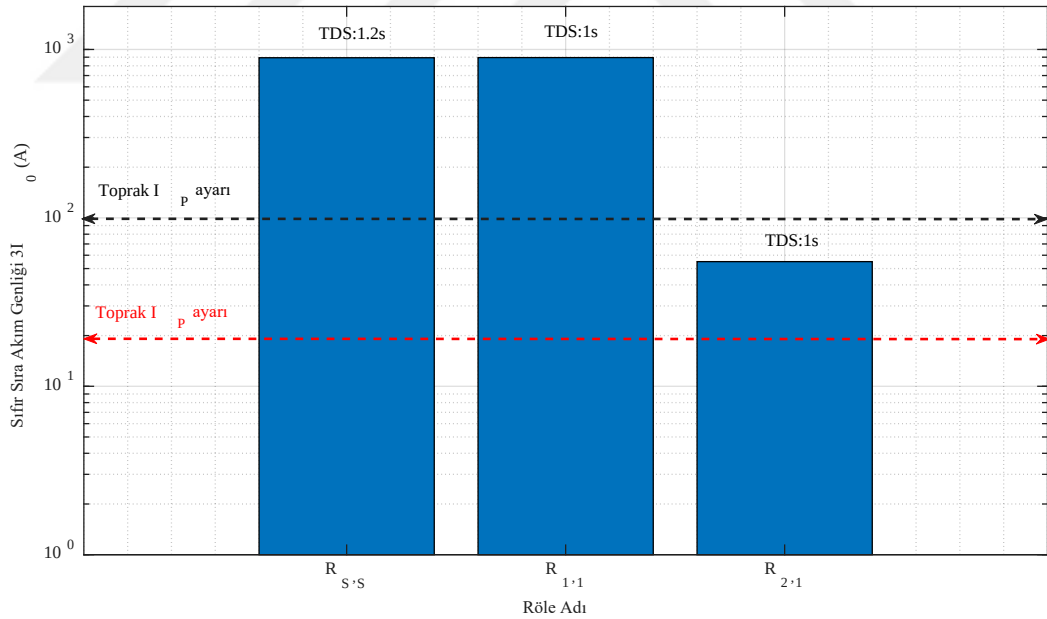
Tablo 4.2: Algoritmaların ayar parametrelerine göre sınıflandırılması.

Yöntem	Gerekli Ayar Parametreleri
Yönsüz Toprak Koruma	TDS ve I_p ($3I_0$)
Yönlü Toprak Koruma	TDS, I_p ($3I_0$), ATA ve Röle, Kanat Açısı (RKA)
İlave Koruma Yöntemi	Algoritmaya göre değişmektedir. Örneğin aktif güç, aktif enerji veya negatif sıra.

Tablo 4.2'den görüldüğü üzere her yöntem kendi içinde algoritma ile bağlantılı ayar değerine sahiptir. Seçici toprak koruması sağlamak ve kapasitif akım temelli hatalı açma problemini gidermek için kullanılan koruma yöntemine ait ayar parametreleri şebeke topolojisine uyumlu olarak ayarlanmalıdır. Aksi durumda seçici korunma sağlanmayabilir.

4.2.1. Yönsüz Toprak Koruma (ANSI Kod 51/N)

TFT arızası sırasında yaşanan kapasitif temelli hatalı açmaları engellemek için geliştirilen yöntemlerden birinci basamak yöntem yönsüz toprak koruma rölesi kullanmaktır. Yönsüz toprak rölelerinin TDS ve I_p ayarlarının güncellenmesi gerekmektedir. Buna göre, kapasitif temelli hatalı açmanın yaşandığı toprak koruma rölesi tespit edilerek ilgili rölenin I_p ayarı artırılabilir [82], [87]. Böylece toprak koruma rölesinin tekrardan hatalı bir açma sinyali üretmesi engellenebilir. Şekil 4.4 ile yönsüz toprak koruma rölesinin uygulaması gösterilmiştir. Şekil 4.4'te gösterilen TFT arızası için kararlı durumda RMS değerleri hesaplanmıştır. Birinci fiderde gerçekleşen TFT arızası için $R_{1,1}$ rölesi tarafın 895 A sıfır sıra akım genliği görülmüştür. Toprak I_p ayarının 20 A olduğu durumda arıza birinci fiderde tespit edilip 1 saniye sonra açma gerçekleşecektir. $R_{2,1}$ rölesi 54,98 A sıfır sıra akım gördüğü için 1 saniye sonra ikinci fider de açma gerçekleşecektir. Bu nedenle kapasitif akım temelli hatalı açma problemi sahada eş zamanlı açma veya paralel açma şeklinde de isimlendirildiği bilinmektedir.



Şekil 4.4: Yönsüz toprak koruma uygulaması.

Toprak I_p değerinin yükseltilerek örneğin 100 A değerine çıkarılmasıyla kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilebilir. Önerilen bu yöntem sahada bulunan elektromekanik ve dijital rölelere rahatça uygulanması açısından avantajlıdır. Fakat,

I_p değerinin yüksek değerde olması empedans üzerinden gerçekleşen arızaların tespit edilememesine ve nihai olarak toprak rölesinin körleşmesine sebep olabilir. Yönsüz toprak rölesinin körleşme problemini gidermek adına üç kademeli sabit zaman karakteristiğine sahip Siemens 7SJ602 toprak koruma rölesi [78] numaralı çalışmada kullanılmıştır. Fakat sahada kullanılan tüm röleler bu özelliğe sahip değildir. Gerilim trafosu veya gerilim sensörü bulunmayan dağıtım şebekelerinde ise TDS ve I_p uyarı ile koruma yapma zorunluluğu oluşacaktır. Ayrıca nötr noktası izole şebekelerde yönsüz toprak rölesi kullanarak hatalı açma giderilerek arızalı fider tespiti yapılabilmektedir. Şebekede dolaşan kapasitif akımlar arıza noktasını besleyeceği için en yüksek sıfır sıra akım değeri arızalı fiderde görülecektir [62]. Fakat bu yöntem sadece nötr noktası izole şebekeler için geçerlidir [88]. Diğer nötr noktası topraklama türlerinde etkili sonuçlar vermeyebilir. Özellikle nötr noktası reaktans üzerinden topraklı şebekelerde en yüksek genlikli sıfır sıra akımı arızalı fiderde görülmeyebilir. Bu problemin detaylı analizi ve önerilen çözüm yöntemi tezin ilerleyen kısımlarında detaylıca tartışılmıştır.

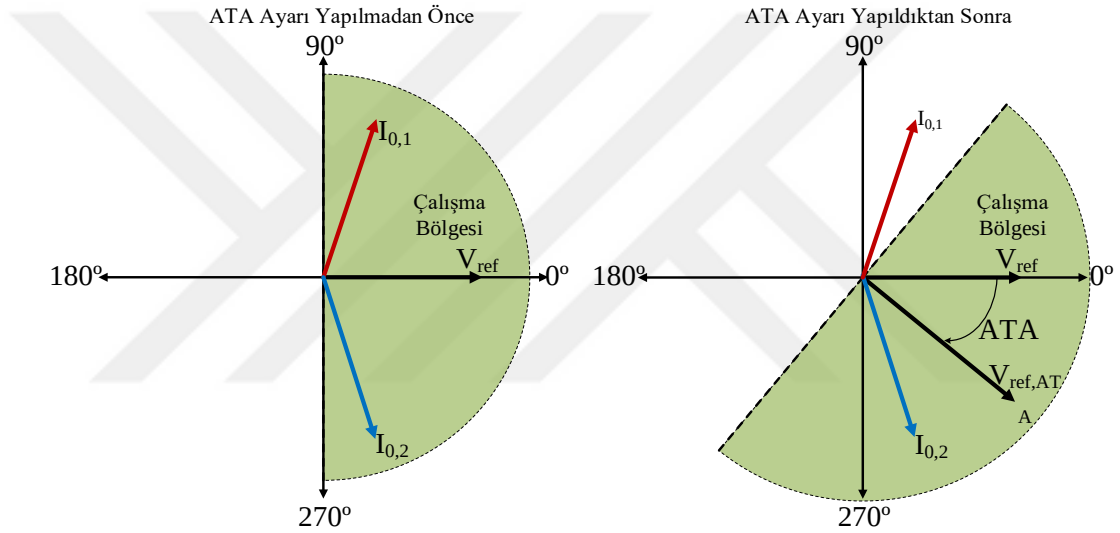
4.2.2. Yönlü Toprak Koruma (ANSI Kod 67/N)

Yönlü toprak koruma iletim sistemi temelli bir koruma yöntemidir. Fakat dağıtım şebekesinin karmaşık bir hal alması yönlü toprak koruma rölesinin dağıtım seviyesinde de kullanılmasına neden olmuştur. Dağıtım şebekesinin radyal yerine ring veya mesh yapıda işletilmesi, radyal fiderlere DÜ entegre edilmesi ve yeraltı kablolarının TFT arızası sırasında akan kapasitif şarj akımları yönlü toprak koruma rölesinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu süreçlerin tarihsel gelişimi [89] numaralı çalışmada sırasıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yönlü toprak koruma rölesinin kullanılabilmesi için işletme büyüklüğü ile referans büyüklüğe ihtiyaç vardır. İşletme büyüklüğü ve referans büyüklük arasındaki ilişki polarizasyon yöntemi olarak isimlendirilmektedir. Saha uygulamalarında farklı polarizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, akım polarizasyonlu yönlü eleman yöntemi (APYE), gerilim polarizasyonlu yönlü eleman (GPYE) yöntemi, karşı polarizasyonlu yönlü eleman yöntemi, çift polarizasyonlu yönlü eleman yöntemi ve kendine polarizasyonlu yönlü eleman yöntemi şeklinde sıralanabilir. Toprak koruması için APYE yöntemi ve GPYE yöntemi sahada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [66]. APYE’de referans sinyal nötr noktasından akan akım olmakla birlikte, işletme sinyali her bir fiderden

ölçülen $3I_0$ akım vektörleridir. APYE’de gerilim bilgisine ihtiyaç duyulmadığı için uygulama ve maliyet avantajı bulunmaktadır. Fakat referans büyüklük nötr noktasındaki akımdan elde edildiği için trafo bağlantı türü yöntemin seçicilik performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin, sekonder kısmının üçgen bağlı olduğu trafo merkezlerinde bu yöntem kullanılamamaktadır. Bununla birlikte yıldız noktası topraklı şebekelerde topraklama türüne bağlı olarak yöntemin uygulanabilirliği değişmektedir. Δ /yıldız bağlantı grubunda kullanılabilen APYE, iki tarafı direkt topraklı yıldız/yıldız bağlantı grubu ve primer yıldız noktası izole, sekonder yıldız noktası topraklı bağlantı gruplarında sıfır sıra eşdeğer devresinde nötr akımı görülmediği için kullanılamaz. Ayrıca APYE için trafo merkezindeki nötr akımı gerekli olduğundan dolayı sadece fider başlarında bulunan rölelere uygulanabilir. Alt merkezler için polarizasyon sinyali gerilim bilgisi ile elde edilebilir. Dağıtım şebekesinde gerilim trafosu veya gerilim sensörü mevcut ise GPYE yöntemi kullanılabilir [90]. Bu yöntem $3V_0$ gerilimi ile her bir fidere ait $3I_0$ akımlarının vektörel kıyaslanmasıdır [91]. Referans büyüklük olarak $3V_0$ geriliminin açısı, işletme büyüklüğü olarak röle lokasyonundan ölçülen $3I_0$ akımlarının açısı seçilmektedir. Ayar değerlerinin doğru hesaplanması durumunda GPYE başarılı olarak sahada uygulanmakla birlikte gerilim trafosuna ihtiyaç duyması hem fiziksel yerleşim hem de maliyet yönünden dezavantajdır. Bu dezavantaj dağıtım şebeke işletmecilerini mümkün oldukça yönsüz toprak koruma pratiğinde kalmaya zorlamaktadır. Dağıtım şebekeleri için belli kablo mesafesi ve nötr topraklama direnci için yönsüz toprak korumanın etkili bir şekilde kullanabileceği aralıklar mevcuttur [92].

GPYE yönteminin uygulanmasına ait polar diyagram **Şekil 4.5** ile gösterilmiştir. Ortak baradan okunan $3V_0$ referans açı olarak seçilmiştir [59]. Ayrıca iki adet işletme büyüklüğü ($3I_{0,1}$ ve $3I_{0,2}$) mevcuttur. Referans gerilimin açısı $+90^\circ$ ile -90° eklenerek rölenin minimum ve maksimum çalışma bölgesini oluşturmaktadır. Rölenin çalışma bölgesi $\angle -3V_0 + 90^\circ$ ile $\angle -3V_0 - 90^\circ$ arasındadır. Bu sınırlar ATA (Azami Tork Açısı) ayarı yapılmadan elde edilen sınırlardır. ATA tabiri mekanik rölelerden kalma isimlendirmedir. Dijital rölelerde ATA’ya Röle Karakteristik Açısı (RKA) da denilmektedir. ATA (RKA) ayarı yapılmadan elde edilen çalışma bölgesinde hem arızalı fiderin $3I_0$ vektörü hem de sağlıklı fiderin $3I_0$ vektörü bulunduğu **Şekil 4.5.a**’dan görülebilmektedir. Bu durumda yönlü toprak akım rölesinin yön ayırt ediciliği ortadan kalkmış ve yönsüz toprak akım rölesi gibi davranmıştır. Bu durumda

yönlü toprak akım rölesi kullanılsa dahi seçici koruma sağlanamamıştır. ATA ayarı sonrasında yeni çalışma bölgesinin $\angle -3V_0 + 90^\circ + \text{ATA}^\circ$ ile $\angle -3V_0 - 90^\circ + \text{ATA}^\circ$ arasında değiştiği ve bu durumda arızalı fiderin $3I_0$ vektörünün çalışma bölgesi içerisinde, sağlıklı fiderin $3I_0$ vektörünün ise çalışma bölgesi dışında kaldığı **Şekil 4.5.b**'den görülebilmektedir. Seçici koruma noktasında uygun ATA ayarının önemi **Şekil 4.5**'den net olarak görülebilmektedir. R_G topraklama direncinin değeri, X_{0T} transformatörün sıfır sıra reaktans değeri, AGF ise açılı güvenlik faktörü olmak üzere ATA değerinin set edilmesi için önerilen ve deneysel çalışmalara dayanan ampirik formül denklem (5.6) ile verilmiştir [93]



Şekil 4.5: GPYE yönteminin açılı diyagramı.

$$ATA_V = \left(\frac{3R_G}{X_{0T}} \right) - AGF + 90 \quad (5.6)$$

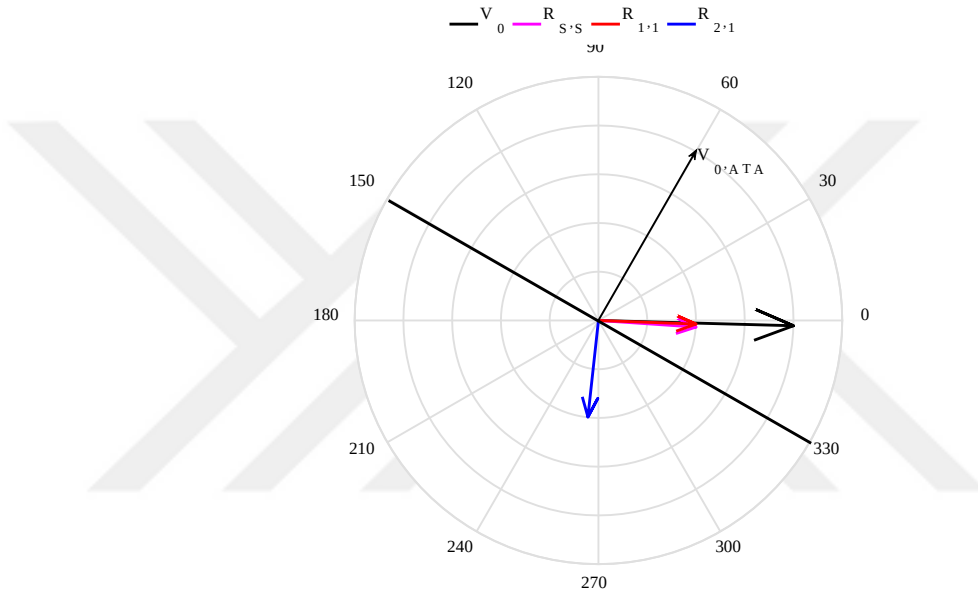
Fider çıkışlarının ortak transformatörden beslendiği sistemlerde denklem (5.6) ile verilen ATA ayarı her zaman seçiciliği sağlayamamaktadır. Uygulamalarda farklı ATA değerleri ile de karşılaşılabilir. Faz ve toprak arızası için optimum ATA değeri belirlenmesi konusunda çalışmalar açık literatürde bulunabilmektedir [59]. Direnç üzerinden topraklı sistemde ATA değerinin 0° , direkt topraklı sistemde ise dağıtım seviyesinde -45° , iletim seviyesinde -60° ayarlanması da alternatif bir öneri

olarak Alstom tarafından sunulmaktadır [94]. Açık ayarlarında topraklama direnç değerinin etkisi göz önüne alınmış olsa bile kablo kesiti ve kablo uzunluğunun etkisinin değerlendirilmediği görülmektedir. Örnek bir test şebekesi için eğri temelli açık ayar önerisi [86] numaralı çalışmada incelenmiştir. Literatürde sunulan açık ayarlarının farklı arıza senaryoları için performans analizi 33 kV'luk kablo yoğun dağıtım şebekesinde [59] numaralı çalışmada incelenmiştir. Ayrıca son zamanlarda ATA ayarının optimize edilerek minimum açık değerinin bulunması çalışmaları literatürde bulunmaktadır [95]. Bu tezin hedeflerinin arasında incelenecek dağıtım sistemlerinin yapılarına göre en optimum açık değeri ve ekipman durumuna göre kullanılacak yöntemin belirlenmesini de içermektedir. Optimum açık değeri ile alakalı yeni bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni optimizasyon yaklaşımı Bölüm 8'de verilmiştir.

Son zamanlarda gerilim transformatörünün maliyetinden kurtulmak amacıyla yük akımının açısı temelli koruma algoritmalarının da geliştirildiği bilinmektedir [96]. Araştırmacılar tarafından sıfır sıra bileşene ilave olarak pozitif sıra [83] ve negatif sıra [97] bileşene göre de yönlü koruma algoritmaları geliştirilmiştir. Literatürde negatif sıra bileşene göre bir optimizasyon çalışması da eksiktir. Oldukça fazla yönlü koruma algoritması geliştirilmesine rağmen hangi algoritma kullanılırsa kullanılsın uygun açık ayarının belirlenmesi ve röleye tanıtılması uzmanlık isteyen bir olgu olmakla birlikte mevcut ekipmanlar ile uygulanabilirliği kontrol edilmelidir. Direnç topraklı dağıtım şebekesinde kullanılan yönlü toprak koruma rölesinin etkinliği RTDS ile test edilerek [98] numaralı çalışmada raporlanmıştır. [99] ve [88] numaralı çalışmalarda nötr noktası izole şebekelerde yönlü toprak röle koruması gerilim trafosu olmadan havai hat şebekesinde gerçekleştirilmiştir. Fakat önerilen yöntemin çalışması için arama algoritmasının V_0 bilgisine ihtiyacı vardır. V_0 bilgisi için gerilim trafosuna ihtiyaç duyulması yöntemin maliyetli olmasına yol açmaktadır.

Şekil 4.6 ile yönlü toprak koruma rölesinin uygulaması gösterilmiştir. **Şekil 4.6**'te gösterilen TFT arızası için kararlı durumda sıfır sıra açık değerleri hesaplanmıştır. Arızalı fiderin sıfır sıra açısı $-4,23^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Sağlıklı fiderin açısı $-96,2^\circ$ olarak hesaplanmıştır. V_0 referans açısı ise $-6,2^\circ$ olarak, $V_0=0^\circ$ referansa göre ortak bara ile sağlıklı fider arasında 90° 'lik fark bulunmaktadır. Böylece kapasitif akım akışı teyit edilmiştir. Röle çalışma aralığının -30° ile 150° arasında olduğu bölgede $R_{2,1}$ rölesinin hatalı açma sinyali üretmesi engellenir. Ayrıca açma sinyali hem genlik hem

açı kontrolü ile sağlandığı için I_p değerleri düşürülebilir. Böylece daha seçici ve hassas koruma sağlanarak röle körleşmesi engellenebilir. Yönlü toprak korumanın seçicilik performansı arıza direnci, hat dengesizliği ve ölçüm hatalarından etkilenmektedir. [100] numaralı çalışmada bu parametrelerin etkisi ve muhtemel çözüm önerileri sunulmuştur. Hatların ortak kuplaj etkisi de yönlü toprak korumanın seçici çalışmasını etkilemektedir [101]. 33 kV'luk dağıtım şebekesinde paralel fiderler arasındaki ortak kuplaj etkisinin geleneksel sıfır sıra yönlü toprak korumasının seçiciliğini etkilediği saha kayıtları ile sunulmuştur [81].



Şekil 4.6: GPYE yöntemi ile yönlü toprak koruma uygulaması.

Yönlü toprak korumasının yukarıda sayılan zorluklarının yanı sıra yeraltı kablolarının kapasitif akım etkisi yönlü toprak korumanın performansı etkilemektedir [102]. Ayrıca yönlü toprak koruma rölesi, OG nötr noktasının topraklama türünden etkilenmektedir. Nötr noktası reaktans üzerinden topraklı şebekelerde yönlü toprak koruma arızalı sağlıklı fider ayrımı yapma noktasına probleme sebep olmaktadır [103]. Bu sebeple yönlü toprak koruma rölesi kullanılsa dahi hatalı açma engellenememektedir. Reaktans üzerinden topraklı şebekelerde yönlü toprak koruma rölesinin seçici koruma sağlayamadığı [89] numaralı çalışmada parametrik analizler ile teyit edilmiştir. Ayrıca kablo yoğun şebekelerde kullanılan yeraltı kablosunun izolasyon durumu yönlü toprak korumanın rölesinin seçicilik performansını etkilemektedir [104].

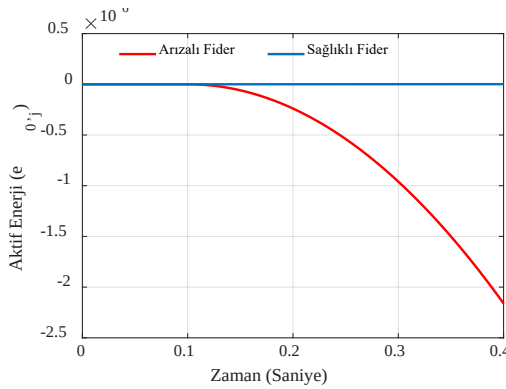
4.2.3. İlave Toprak Koruma Yöntemleri

Geleneksel yönsüz toprak ve yönlü toprak koruma yöntemlerin seçici koruma noktasında problem oluşturması araştırmacıları yeni toprak koruma yöntemleri önermeye veya ilave toprak koruma ekipmanı kullanmaya itmektedir. Literatür incelendiğinde pek çok ilave toprak koruma yöntemi önerildiği görülmektedir. Dağıtım şebekesinde faz-toprak kapasitesinin tahmin edilerek arızalı fiderin bulunduğu ve sağlıklı fiderlerde yaşanan kapasitif temelli hatalı açmaların engellendiği çalışmalar bulunmaktadır [105]. Referans [105] ile tahmin edilen kapasite değerine göre arızanın tahmin yapılan fiderde olup olmadığı tespit edilmektedir. Önerilen yöntem örnek bir dağıtım şebekesi üzerinden EMTP-ATP Draw simülasyonları ile test edilmiştir. Yöntemin etkinliği örnek bir arıza kaydı üzerinden gösterilmiştir. Gerilimin geçici rejim durumundaki davranışından faydalanılarak arızalı fider tespiti ve hatalı açmanın giderilmesi [106] numaralı çalışmada önerilmiştir. Akım veya gerilim bilgisinden farklı olarak aktif enerji sinyalinin kullanılması [107] numaralı çalışmada önerilmiştir. Yöntemin etkinliği TFT arıza simülasyonları ve saha verisi ile incelenmiştir. Önerilen yöntemin havai hat ile yeraltı kablolarının birlikte kullanıldığı hibrit şebekelerde seçici koruma sağlamadığı belirtilmiştir. Benzer şekilde aktif enerji sinyalinin Chebyshev Filtresi yardımıyla elde edilip hatalı açmaların giderildiği çalışma [108] numaralı referansta önerilmiştir. İlgili çalışmada 11 kV direnç üzerinden topraklı şebekede paralel fiderlerde yaşanan hatalı açma problemi öncelikli olarak saha verisi ile gösterilmiştir. Ardından problemin yaşandığı şebeke EMTP- ATP Draw programında modellenmiştir. Gerçek arıza lokasyonunda TFT arızası oluşturulmuştur. Ardından tüm toprak koruma rölesi lokasyonlarından akım ve gerilim bilgisi elde edilip, aktif enerji sinyali Chebyshev Filtresi yardımıyla hesaplanmıştır. Aktif enerji değeri ve işaretine göre arızalı sağlıklı fider ayrımı yapılmıştır. Yöntemin etkinliği farklı parametrelerin simüle edilmesi ile incelenmiştir. Bu parametreler arıza noktası, arıza direnci ve yük akımı olarak sıralanabilir. Ancak önerilen yöntemin etkinliği herhangi bir saha verisi ile teyit edilmemiştir. Ayrıca aktif enerji sinyali için her bir koruma rölesi noktasından gerilim bilgisi gerekmektedir. Dağıtım şebekelerinde bu durum fazla yaygın değildir. Ayrıca yöntemin etkinliği toprak arızasını incelemesine rağmen yıldız/yıldız trafo bağlantılı şebekelerde yük akımından etkilenmektedir. Yük akımı ve toprak akımının kıyasına dayanan karşılaştırma yöntemi [82] numaralı çalışmada önerilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliği 22 kV'luk direnç topraklı şebeke

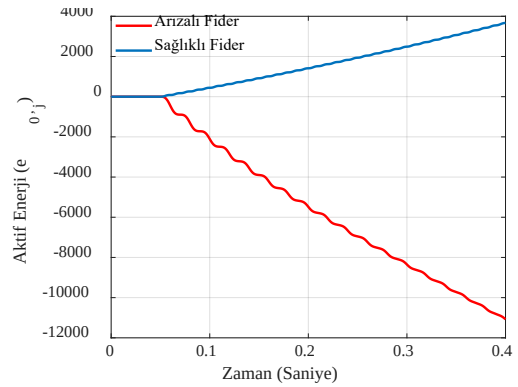
üzerinden gösterilmiştir. Ancak yük akımı ve toprak akımını kıyası nötr noktasının topraklama türü, hat yapısı ve yük akımının genliğinden etkilendiği için her topoloji uygun değildir. Dalgacık dönüşümü yöntemi [109] numaralı çalışmada önerilmiştir. Arızalı fider ve sağlıklı fiderlerin akım vektörlerinin birbirine zıt olması sayesinde her bir fiderden elde edilen dalgacık dönüşümleri için arızalı ve sağlıklı fiderler birbirine zıt polariteye sahiptir. Fakat fider enerjilendirmelerinde ve anahtarlamalar sırasında da yürüyen dalgalar gözlemlenebilir. Bu durumda dalgacık dönüşümü yaklaşımı arızalı fideri seçici bir şekilde tespit edemeyebilir. Böylece hatalı açma gerçekleşir. Bundan dolayı ilgili çalışmada başlatma sinyali olarak V_0 gerilimi referans alınmıştır. Dağıtım şebekelerinin dal-budak yapıda olması, kısa fiderlerin bulunması dalgacık dönüşümünün performansını etkilemektedir. Ayrıca çok yüksek örnekleme frekansı gerektirdiği için sahada uygulaması oldukça zordur. Taranan literatürde ve ülkemiz şebekelerinde Dalgacık dönüşümünün uygulandığı bir toprak koruma röle tipi veya saha uygulaması bulunmamaktadır. Sıfır sıra akım genliği geçici rejim bölgesinde kararlı bölgeden daha yüksektir. Bu nedenle araştırmacılar geçici rejim temelli algoritmalar geliştirmiştir. Sıfır sıra akım sinyalinin basıklık özelliği kullanılarak hatalı açmalar [103] numaralı çalışmada giderilmiştir. Arızalı ve sağlıklı fiderin kararlı durumdaki ve geçici rejim durumundaki genlikleri oranlanarak geçici rejim faktörü [110] numaralı çalışmada belirlenmiştir. Geçici rejim faktörü ile arızalı fider tespit edilerek hatalı açma problemi engellenmiştir. Geliştirilmiş K-Kümeleme yöntemi ile arızalı fider tespiti ve hatalı açmaların engellenme [111] numaralı çalışmada önerilmiştir. Fakat bu yöntem sadece geçmiş arıza kayıtları için uygulanabilmektedir. Yeraltı kablosunun kapasitif akım etkisi yönsüz toprak koruma ve yönlü toprak koruma yönteminin performansının etkilemesinin yanı sıra ilave koruma yöntemlerinin de performansını etkilemektedir. Bu koruma problemi [112] numaralı çalışmada farklı parametrik analizler ile gösterilmiştir. Havai hat yoğun bir şebekede etkili koruma sağlayan bir yöntem (örneğin aktif enerji) kablo yoğun şebekede etkili sonuç vermemektedir. Aynı yazarlar arızalı fideri tespit etmek ve hatalı açmaları engellemek için ilave koruma kriteri eklenmesi gerekliliğini [44] numaralı çalışmada önermiştir. Rölelerden alınan sinyal üçgensel integrale tabii tutularak arızalı fider tespit edilmektedir. Ayrıca hatalı fiderin açma sinyali üretmesi engellenmektedir. Arızalı fider ve sağlıklı fider arasındaki sıfır sıra akım genlik farkının oldukça az olduğu [113] numaralı çalışmada belirtilmiştir. Fiderler arasındaki sıfır sıra akım farkının az olması sağlıklı fiderlerde hatalı açma problemine ve arızalı fiderin tespit

edilememesine neden olmaktadır. Bu problemin giderilmesi için Hilbert-Huang dönüşümü önerilmiştir. Böylece arızalı fider ve sağlıklı fider arasındaki fark artmıştır. Yöntemin etkinliği simülasyon ortamında gösterilmiştir. Fakat modern ticari rölelerde veya saha uygulamalarında Hilbert-Huang dönüşümünün uygulaması bulunmamaktadır. S-Dönüşümü yardımıyla arızalı fiderin tespiti ve hatalı açma probleminin giderilmesi [114] numaralı çalışmada önerilmiştir. Her bir fiderde görülen sıfır sıra akım genliklerine yaklaşık 20kHz'lik örnekleme frekansında uygulanan S-Dönüşümü ile arızalı fider sağlıklı fider ayrımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin saha uygulaması bulunmamaktadır.

İki fiderli radyal dağıtım şebekesinin direnç topraklı ve tam kompanse topraklı olduğu durum için aktif enerji yöntemi uygulanmıştır. Aktif enerji yönteminin sonuçları **Şekil 4.7** ile gösterilmiştir. Aktif enerji yöntemi kullanarak arızalı fider tespiti yapılabilmektedir. Her iki durumda da arızalı fiderin aktif enerjisi negatif değerler almakta, sağlıklı fiderin aktif enerjisi pozitif değerler almaktadır. Böylece arızalı ve sağlıklı fider ayrımı aktif enerjinin işaretine göre belirlenebilir. Bununla birlikte dağıtım şebekelerinde kullanılan mevcut rölelerde henüz aktif enerji bileşeni kullanılmamaktadır. Dolayısıyla saha uygulaması bulunmamaktadır. Ayrıca aktif enerji yöntemi için eşik enerji değerinin ayarlanması gereken değerler henüz belli değildir. Bu hususlar yöntemi öneren yazarlar tarafından tartışılmıştır.



a) Direnç topraklı



b) Tam kompanse topraklı

Şekil 4.7: Aktif enerji yöntemi ile hatalı açma engelleme.

Tablo 4.3: Arızalı fiderin tespiti ve hatalı açmaların engellenmesi için geliştirilen ilave toprak koruma yöntemlerine ait özet tablosu.

Makale	Yöntem	Şebeke Yapısı	Hat Yapısı	Simülasyon Programı	Saha Verisi?
[105]	Faz toprak kapasite değerini tahmin etmek	20 kV Δ/Y iki fiderli kompanse ve izole şebeke	184 km havai hat	EMTP-ATP Draw	Evet
[106]	Şarj gerilimi	22 kV Y/Y üç fiderli kompanse şebeke	121 km havai hat	--	Evet
[107]	Aktif Enerji Sinyali	12 kV Δ/Y üç fiderli kompanse şebeke	Detaylı bilgi mevcut değildir.	EMTP-ATP Draw	Evet
[108]	Aktif Enerji Sinyali (Chebyshev Filtresi)	11 kV Δ /Y iki fiderli direnç topraklı şebeke	32 km yeraltı kablosu	EMTP-ATP Draw	Hayır
[109]	Dalgacık Dönüşümü	10 kV Y/Δ sekiz fiderli kompanse şebeke	95 km havai hat	EMTP	Hayır
[110]	Geçici Rejim Faktörü belirleme	10 kV Y/Δ beş fiderli kompanse şebeke	85 km havai hat	RTDS	Evet
[111]	Geliştirilmiş K-Kümeleme	10 kV Y/Y beş fiderli kompanse şebeke	73 km yeraltı kablosu	MATLAB	Hayır
[112]	Performans tespiti (Farklı yöntemlerin tek tek denenmesi)	22 kV Δ /Y iki fiderli kompanse şebeke	50 km havai hat 10 km yeraltı kablosu	PSCAD	Evet
[113]	Hilbert-Huang Dönüşümü	11 kV Δ /Y beş fiderli kompanse şebeke	57 km havai hat 25 km kablo	MATLAB	Hayır
[114]	S-Dönüşümü	11 kV Y/Δ altı fiderli kompanse şebeke	132 km havai hat ve 19 km kablo	EMTP-ATP Draw	Evet
[44]	İlave koruma kriteri (Üçgensel İntegral)	22 kV Δ /Y iki fiderli kompanse şebeke	50 km havai hat 10 km yeraltı kablosu	PSCAD	Evet

Tablo 4.3 ile arızalı fiderin tespiti ve hatalı açmaların engellenmesi için geliştirilen ilave koruma yöntemlerine ait özet tablosu verilmiştir. **Tablo 4.3**'den görüldüğü üzere her bir algoritmanın etkin sonuç verdiği şebeke topolojisi birbirinden farklıdır. Bir topolojide seçici sonuçlar veren ilave koruma yöntemi başka bir topolojide seçici koruma sağlamayabilir. Ayrıca çoğu yönteminde etkinliğini göstermek için kullanılan arıza kayıtları geçmiş kayıtlar olmakla birlikte enerji altındaki canlı şebeke kaydı değildir.

4.3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde kapasitif akım temelli hatalı açmaların giderilmesi için önerilen ve kullanılan koruma algoritmaları; yönsüz toprak koruma, yönlü toprak koruma ve ilave koruma şeklinde uygulama kolaylığı ve gerekli ayar parametrelerine göre üç sınıfa ayrılmıştır. Kompanse topraklı ve nötr noktası izole şebekelerde arıza akım genliği kararlı durumda oldukça düşüktür. Enerji sürekliliğini sağlamak adına arıza altında çalıştırılması DŞİ'ler tarafından istenmektedir. Bu seneple ilave koruma yöntemleri genel olarak bu tip şebekeler için geliştirilmiştir. Böylece arızanın temizlenmesi için gereken zaman ilave koruma yöntemlerinde birincil kıstas değildir. Fakat dağıtım şebekesinin arıza altında uzun süre çalıştırılması izolasyon zorlanmasını artıracığı unutulmamalıdır. Dolaylı olarak şebekede yaşanacak cross-country arızası ihtimali de artacaktır. Literatürde geliştirilen ilave toprak koruma yöntemleri şebeke yapısı, hat yapısı, simülasyon programı ve arıza kayıtlarına göre sınıflandırılarak faydalı bir özet tablosu sunulmuştur. Genel olarak ilave koruma yöntemleri yüksek frekanslı işaret işleme çalışmalarına dayanmaktadır. Ayrıca ilave ve pahalı koruma ekipmanları kullanılmaktadır. Arıza kayıtlarına önerilen algoritmalar uygulandığından dolayı off-line yöntemlerdir. Bu tarz yöntemlerin enerji altındaki canlı şebekeye uygulanması oldukça zordur. Bu nedenle genel olarak sahada uygulanan koruma yöntemleri değildir. Yöntemlerin etkinliği çoğunlukla arıza direncinden, kablo kapasitesinden, akım dengesizliğinden, havai hat kablonun birlikte kullanıldığı hibrit şebeke yapısından ve gürültülerden olumsuz etkilenmektedir. Yöntemler ayrıca herhangi bir ayar değeri önerilmesi noktasında genel bir çıkarıma sahip değildir. Bununla birlikte önerilen yöntemlerin DŞİ'ler tarafından kavranması ve uygulanabilir bir yöntem haline gelmesi zaman gerektirmektedir.

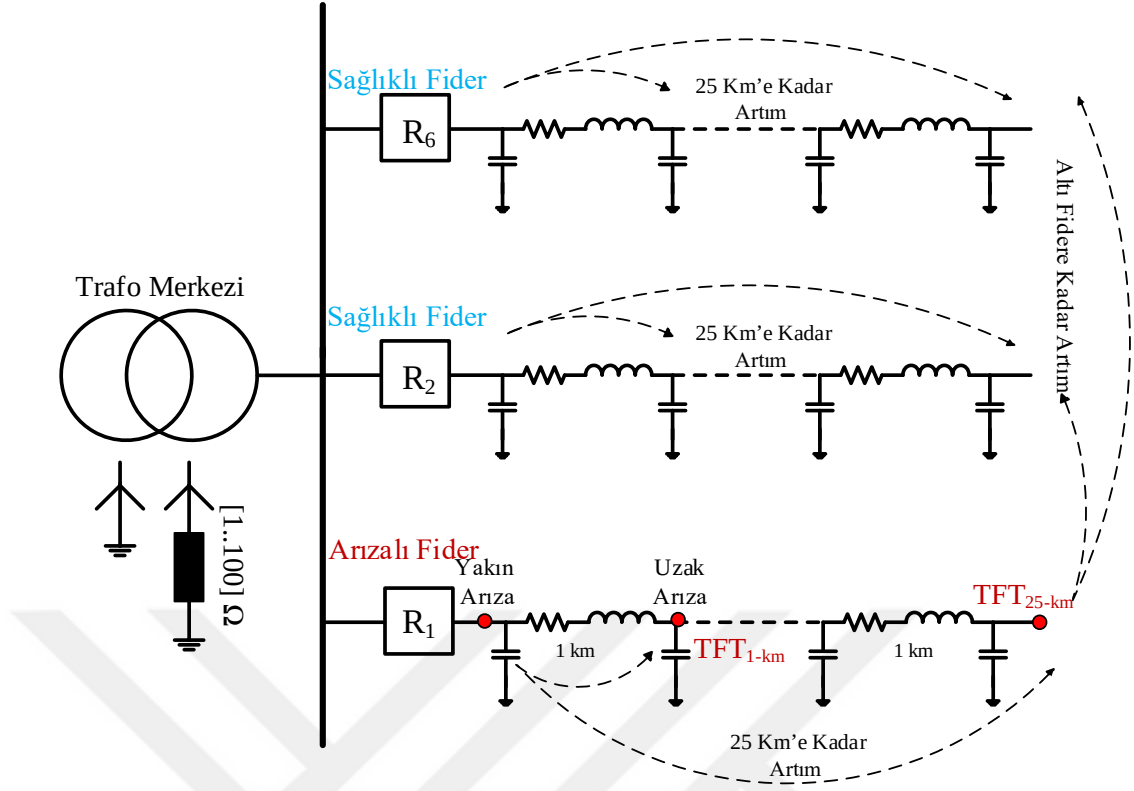
5. TOPRAK ARIZALARI İÇİN KORUMA KARAR DESTEK SİSTEMİ GEREKLİLİĞİ

Dağıtım şebekeleri tabiatları gereği karmaşık topolojik yapıya sahiptir. Bu karmaşık yapının oluşmasındaki sebepler farklı nötr topraklama yöntemlerinin kullanılması, farklı sayıda paralel fider içermesi, şebekedeki fiderlerin her birinin farklı mesafede olması, farklı kesitlerde kablo kullanılması şeklinde sıralanabilir. Bu durumda her bir fiderde bulunan toprak rölesinin topolojiye uygun olarak ayarlanması gerekmektedir. Ayarlanan bu değerler ile kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin giderilmesi gerekmektedir. Literatürde incelenen yöntemler arasında yönsüz toprak koruma ucuz olmasının yanı sıra şebekedeki hali hazırda bulunan rölelere uygulanabilmektedir. Röle ayarı için ise sadece I_p değerine ihtiyaç vardır. Bu sebeple mekanik röle, nümerik röle veya dijital röle gibi röle tipi farklılıklarından etkilenmemektedir. Fakat uygun ayar değeri için TFT arızası sırasında hem arızalı fiderin hem de sağlıklı fiderin davranışının kapsamlı şekilde topolojik parametreler göz önüne alınarak analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde kapsamlı parametrik analizler yapılarak arızalı ve sağlıklı fiderlerin sıfır sıra vektörleri çıkarılmıştır. Sıfır sıra akım genlikleri eşyükselti eğrileri ile gösterilmiştir. Böylece eş yükselti eğrileri yardımıyla arızalı fider ve sağlıklı fiderde görülen $3I_0$ genlikleri kapsamlı modelleme ve arıza analizleri yapılmadan yaklaşık olarak tahmin edilebilecektir. Ayrıca sıfır sıra akım vektörünün açısı incelenerek yönlü toprak korumada yaşanan seçici koruma zafiyeti gösterilmiştir.

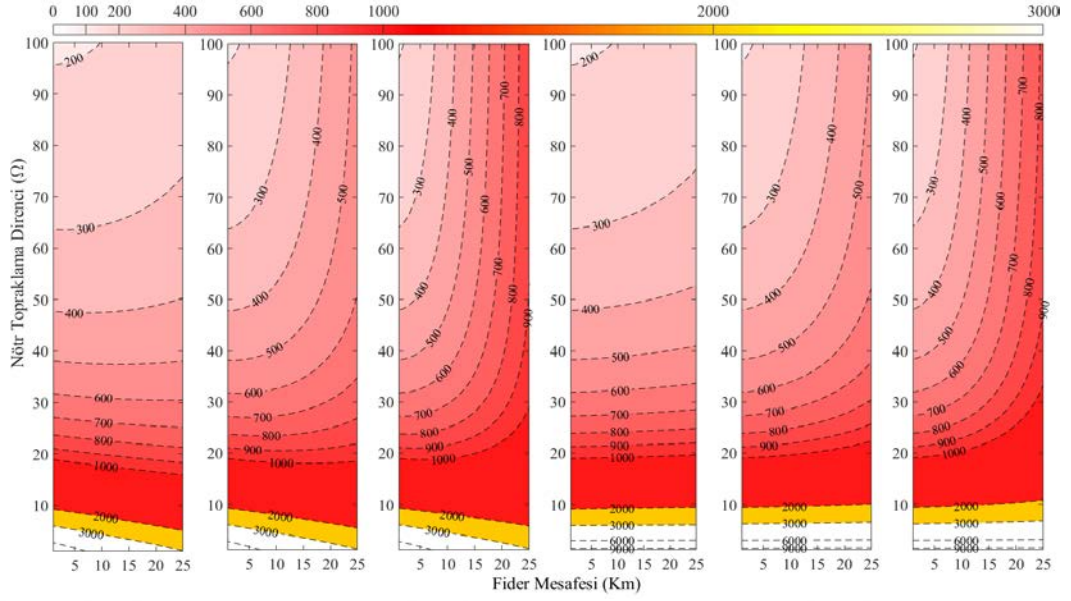
5.1. Eşyükselti Eğrilerinin Çıkarılması ve Yorumlanması

Şekil 5.1 ile ATP-Draw ortamında arızalı ve sağlıklı fiderin sıfır sıra akım davranışını analiz etmek için kurulan test şebekesi gösterilmiştir. Test şebekesinde topraklama empedans değeri, fider mesafesi, paralel fider sayısı ve arıza noktası değişken olarak tanımlanmıştır. Nötr noktasındaki empedans değeri hem saf direnç hem de saf reaktans olarak ayrı ayrı modellenmiştir.



Şekil 5.1: TFT arıza analizleri için kurulan test şebekesi.

Empedans değeri 1Ω değerinden 100Ω değerine kadar 1Ω 'luk adımlarla arttırılmıştır. Her bir fider mesafesi 1 km değerinden 25 km değerine kadar 0.5 km 'lik adımlarla arttırılmıştır. Paralel fider sayısı olarak iki, dört ve altı fiderli dağıtım şebekesi ayrı ayrı incelenmiştir. Arıza noktası olarak yakın arıza ve uzak arıza modellenmiştir. Yakın arıza röle konumundan 100 metre uzakta gerçekleştirilmiştir. Uzak arızalar ise arızalı fiderin sonunda gerçekleştirilmiştir. Toplam 60.000 adet TFT arıza senaryosu simüle edilmiştir. Gerçekleştirilen her bir arıza senaryosu için arızalı ve sağlıklı fidere ait sıfır sıra akım genliği kaydedilmiştir. Sonuçlar eş yükselti eğrisi olarak görselleştirilmiştir. **Şekil 5.2** ile direnç topraklı şebeke için arızalı fidere ait sıfır sıra akım genliğinin dağılımı eş yükselti eğrileri cinsinden gösterilmiştir. Elde edilen sıfır sıra akım genlik matrisi oldukça büyük boyutta olduğu için eş yükselti değerleri belli sıfır sıra akım genlik değerleri için çizilmiştir. Belirlenen genlik değerleri renk-barı olarak şekil üzerine eklenmiştir. Grafikler sırasıyla iki fiderli, dört fiderli ve altı fiderli durumları göstermektedir. İlk üç grafik yakın arızalar için son üç grafik ise uzak arızalar için elde edilmiştir.

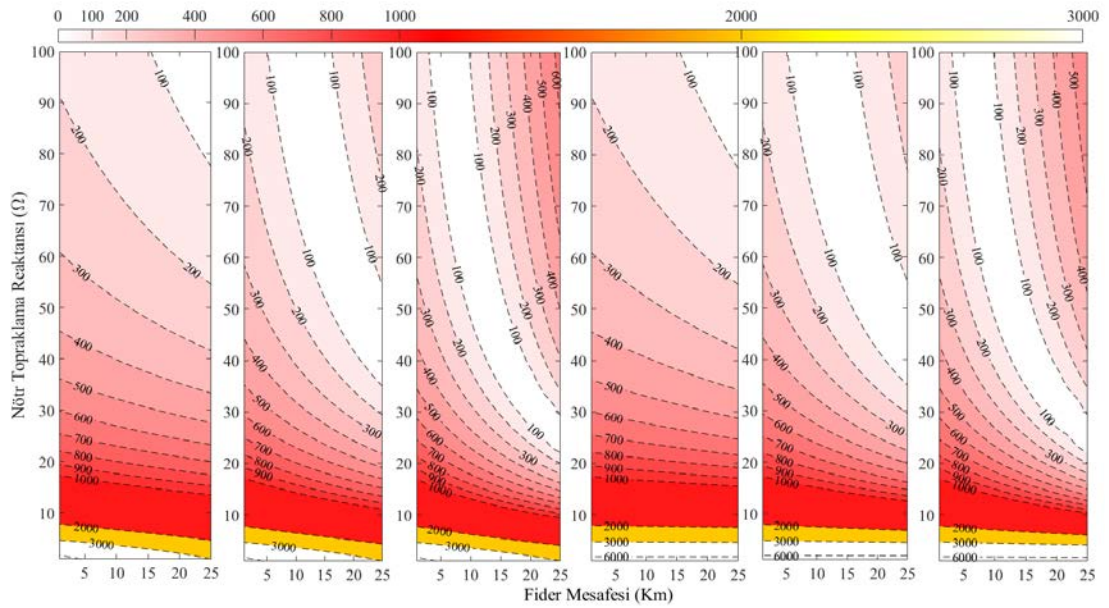


Şekil 5.2: Direnç üzerinden topraklı şebeke için arızalı fidere ait $3I_0$ dağılımları.

Arızalı fider için, fider mesafesinin artması sıfır sıra devresinde arıza yolunda bulunan seri empedans değerinin artmasına ve nihayetinde toprak akımının azalmasına sebep olmaktadır. Fakat bu fenomen havai hatlar için geçerli olup birden fazla fidere sahip kablo yoğun radyal şebekelerde geçerliliğini kaybetmektedir. TFT arızası sırasında, kabloların faz toprak kapasiteleri üzerinden akan kapasitif akımlar arıza noktasını arızalı fider üzerinden beslemektedir. Bu durumda fider mesafelerinin artması arıza noktasına akacak olan kapasitif akım değerinin artmasına neden olacaktır. Böylece, arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği de artacaktır. İki fiderli uzak arıza senaryosu için sıfır sıra akımının genliği 700 A seviyesindeki eş yükselti eğrisine kadar azalmaktadır. Fakat 600 A eşyükselti eğrisinden itibaren eşyükselti eğrisi azalma trendinden ziyade artış trendi göstermektedir. Bu noktada, kapasitif akım değerinin arıza akımına olan artış etkisi, seri empedans değerinin arıza akımı üzerindeki azalış etkisinden daha büyüktür çıkarımı yapılabilir. Benzer çıkarım 600 A'den küçük eşyükselti eğrileri içinde yapılabilir. Röle noktasına yakın arızalarda ise sıfır sıra akımının genlik dağılımı, arıza noktasının sabit 100 metre olduğu ve fider mesafesinden dolayı kablo kapasitif akım değeri arttığından dolayı sürekli artış trendine sahiptir. Paralel fider sayısının artması şebekede arıza noktasına doğru akan kapasitif akım değerini arttıracaktır. Dört fiderli ve altı fiderli dağıtım şebekesine ait sıfır sıra akım dağılımı incelendiğinde bu husus açıkça görülmektedir. Örneğin dağıtım şebekesinin nötr noktasının 100 Ω direnç üzerinden topraklı olduğu ve her bir fiderin

25 km olduğu durumda iki fiderli sistemde arızalı fiderde 200 A ile 300 A arasında sıfır sıra akım genliği, dört fiderli olduğu durumda 500 A ile 600 A arasında sıfır sıra akım genliği ve altı fiderli olduğu durumda 800 A ile 900 A arasındadır. Böylece direnç topraklı şebekelerde paralel fider sayısının artması arızanın tespit edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, tüm fider mesafesi-arıza direnci seçimleri için en düşük 200 A değerleri görülmektedir. Bu nedenle 200 A altındaki toprak eşik akım değerleri için empedans üzerinden gerçekleşmeyen toprak arızaları tespit edilebilir.

Bilindiği üzere tam kompanse, aşırı kompanse, düşük kompanse veya topraklama trafosu üzerinden topraklı sistemler yaygın olarak özellikle Kıta Avrupası ve İskandinav dağıtım şebekelerinde kullanılmaktadır. Kablo kullanım oranının artması ile birlikte reaktans üzerinde topraklı dağıtım şebekelerinde TFT arıza analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. **Şekil 5.3** ile reaktans üzerinden topraklı şebeke için arızalı fidere ait sıfır sıra akım genlik dağılımlarını eş yükselti eğrileri cinsinden gösterilmiştir



Şekil 5.3: Reaktans üzerinden topraklı şebeke için arızalı fidere ait $3I_0$ dağılımları.

Şekil 5.3 ile görüldüğü üzere nötr noktasının türü ve değeri arızalı fiderin davranışını etkilemektedir. İlk olarak reaktans topraklı şebeke direnç topraklı şebekeden farklı sıfır sıra genlik dağılımına sahiptir. Örneğin iki fiderli reaktans topraklı dağıtım

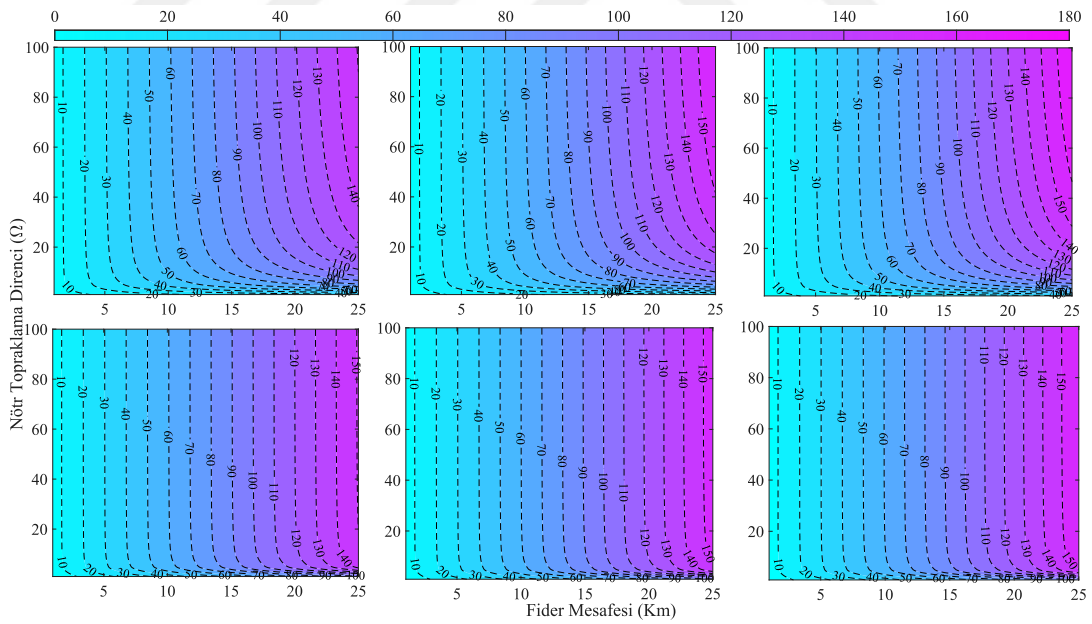
şebekesinde tüm eş yükselti değerleri için sıfır sıra akım genliği azaltma eğilimde iken direnç topraklı şebekelerde sürekli azalma eğilimi bulunmamaktadır. Reaktans üzerinde topraklı şebekelerde yaşanan sürekli azalış eğilimi iki sebeple açıklanabilir. Birinci sebep, seri empedans değerinin artması ile birlikte arıza yolunun empedansının artması. İkinci sebep ise TFT arızası sırasında, nötr noktasındaki reaktanstan dolayı arızalı fiderden endüktif karakterli arıza akımı akması, kabloların faz toprak kapasiteleri üzerinden de arıza noktasının kapasitif akım ile beslenmesi arıza yolunda sıfır sıra akım genliğinin rezonansa girmesine neden olmaktadır.

Şekil 5.3 ile görüldüğü üzere, 100 A değerinin altında kalan fazlaca fider mesafesi-nötr reaktans senaryosu bulunmaktadır. Örneğin nötr noktasının 100 Ω ve fider mesafesinin 6 km olduğu durumda arızalı fiderde 100 A altında sıfır (86 A) sıra akım genliği görülmektedir. Bir başka senaryoda nötr noktasının 40 Ω ve fider mesafesinin 25 km olduğu durumda da benzer şekilde 100 A altında sıfır (32 A) sıra akım genliği görülmektedir. Nötr topraklama reaktans değeri düşmesine rağmen sıfır sıra akım genliği kapasitif akım etkisinden dolayı artması gerekirken azalmıştır. Her iki senaryoda da gözlemlenen düşük genlikli sıfır sıra akımı şebekedeki toprak arızasının tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum toprak rölelerin körleşmesine neden olacaktır. Paralel fider sayısının artması kapasitif akım değerinin artmasına dolayısıyla 100 A değerinin altında kalan alanın artmasına neden olmaktadır. Bunun yansıya, paralel fider sayısının artmasıyla daha düşük reaktans değerlerinde veya daha kısa mesafeli fiderlerde dahi toprak arızasını tespit edilemeyebilir. Kapasitif akım, arızalı fiderin sıfır sıra akım genliğini düşürmesinin şebeke üzerinde aşırı-rezonans durumuna sebebiyet verebilir. Bu durumda arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği tekrar artmaya başlayabilir. Eşyükselti eğrileri incelendiğinde 100 A bölgesinin üzerinde bulunan eş yükselti eğrilerinin değerinin arttığı açıkça görülmektedir. O halde, reaktans üzerinden topraklı kablo yoğun radyal dağıtım şebekelerinde TFT arızası için, arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinin davranışı üç bölgeye ayrılabilir.

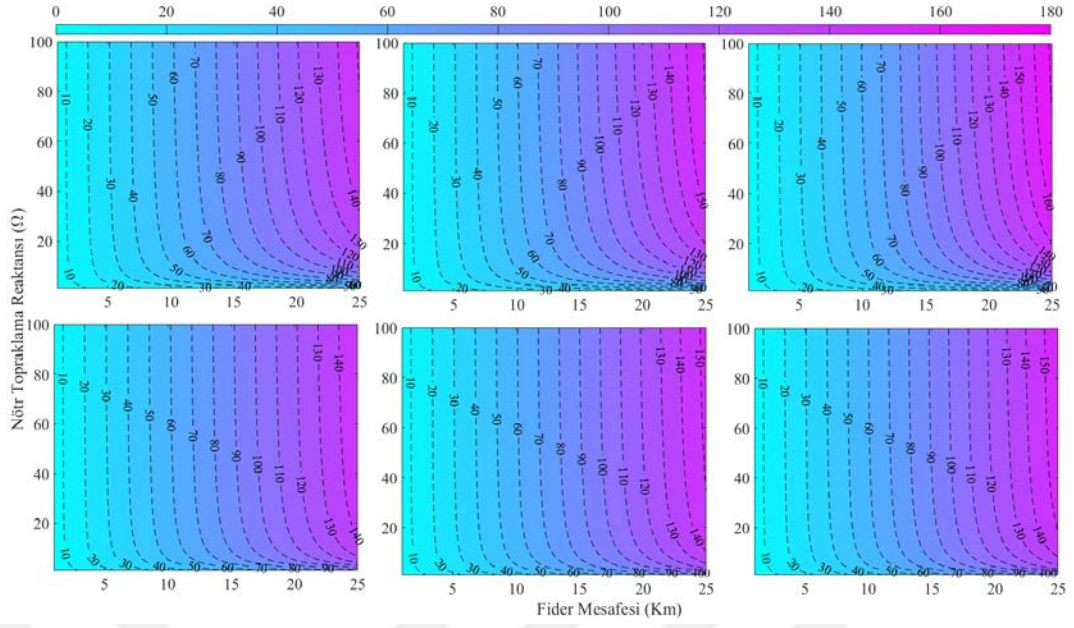
- i. Seri empedans etkisinden dolayı sıfır sıra akım genliği azalmaktadır. Bu azalış genellikle doğrusaldır.
- ii. Kapasitif akım etkisinden dolayı arızalı fiderde sıfır sıra akım genliği rezonansa girmektedir. Bu nedenle yük akımından daha düşük arıza akımı görülmektedir.

- iii. Şebekede kablo kullanım oranının artması şebekenin aşırı kompanse davranmasına neden olmaktadır. Bu durumda direnç topraklı şebekeye benzer olarak arıza yolunda sıfır sıra akım genliği artmaktadır.

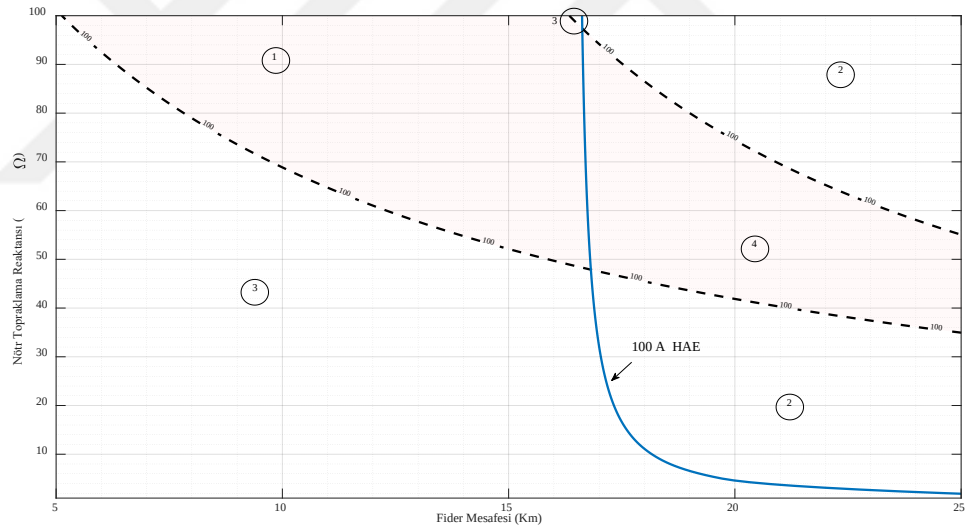
TFT arızası sırasında arızalı fiderin tespiti için arızalı fiderde eşik akım değerinin üzerinde sıfır sıra akım genliği görülmesi gerekirken, arızanın olmadığı sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği ayarlanan eşik akım genliğinden yüksek olmamalıdır. Nötr topraklama direnç değeri ve fider mesafelerine göre direnç üzerinden topraklı dağıtım şebekesi için sağlıklı fiderde görülen sıfır akım dağılımı **Şekil 5.4** ile, reaktans üzerinden topraklı şebeke için sıfır sıra akım genliğinin dağılımı **Şekil 5.5** ile gösterilmiştir. Sağlıklı fidere ait eşyükselti eğrilerinden açıkça görüldüğü üzere fider mesafesinin artması, nötr empedans değerinin artması veya paralel fider sayısının artması sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinin artmasına neden olmaktadır. Arıza noktası açısından bakıldığında hem uzak arızalarda hem de yakın arızalarda sıfır sıra akım genliği benzer dağılım göstermiştir



Şekil 5.4: Direnç üzerinden topraklı şebeke için sağlıklı fidere ait $3I_0$ dağılımları.



Şekil 5.5: Reaktans üzerinden topraklı şebeke için sağlıklı fidere ait $3I_0$ dağılımları.



Şekil 5.6: HAE=100 A için oluşturulan koruma bölgeleri.

Sağlıklı fiderlere ait eşyükselti eğrilerinde, tek bir eşyükselti eğrisi tipik bir toprak eşik akım değeri için mantıksal sınır değeri oluşturmaktadır. Eğer dağıtım şebeke işletmecisi tarafından yapılan nötr noktası empedans değeri-fider mesafesi seçimi eş yükselti eğrisinin altında kalıyorsa, Eş yükselti eğrisi toprak eşik akım ayarı olarak kullanılabilir. Böylece şebekede yaşanacak kapasitif akım temelli hatalı açma problemi yönsüz toprak koruma ile mevcut röleler yardımıyla giderilebilir. Aksi

durumda, hatalı açma gerçekleşecektir. Eşik akım değerinin bir üst eşyükselti değerine ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle tek bir eş yükselti eğrisi Hatalı Açma Eğrisi (HAE) olarak isimlendirilmiştir.

Şekil 5.6 ile dört fiderli reaktans üzerinden topraklı dağıtım şebekesi için 100 A'lık HAE gösterilmiştir. Reaktans üzerinden topraklı radyal dağıtım şebekelerinde kablo kapasitif akımları arızanın tespiti noktasında seçicilik problemine sebep olacağı için aynı senaryo için arızalı fidere ait sıfır sıra akım eğrisi 100 A için çizilmiştir. **Şekil 5.6'**da kırmızı bölge arızalı fiderin sıfır sıra akım genliğinin 100 A'den düşük olduğu bölgeyi temsil etmektedir. Arızalı fider ve sağlıklı fiderlerde görülen sıfır sıra akım genliğine göre dört farklı koruma bölgesi oluşturulabilir.

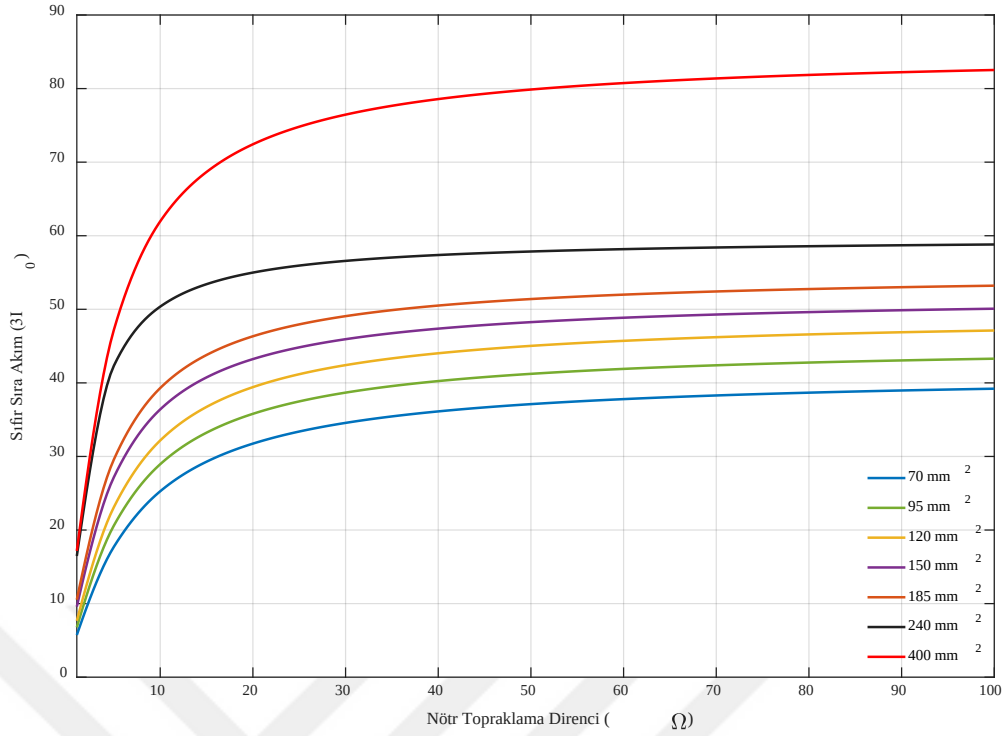
Bölge 1: Bu bölgede sağlıklı fiderde ve arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 100 A'den düşük. HAE 100 A için kapasitif akım temelli hatalı açma giderilmesine rağmen arızalı fiderde arıza tespit edilemez.

Bölge 2: Bu bölgede hem sağlıklı fiderde hem de arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım değeri 100 A değerinden yüksektir. Arıza tespit edilmesine rağmen hatalı açma gözlemlenir.

Bölge 3: Bu bölgede sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 100 A'den düşüktür. Arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 100 A'den yüksektir. Böylece, hem arızalı fider tespit edilebilir hem de sağlıklı fiderdeki hatalı açma engellenir.

Bölge 4: Bu bölgede sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 100 A değerinden yüksek, arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 100 A değerinden düşüktür. Dağıtım işletmecisi tarafından karşılaşılan en kötü senaryo bu bölgededir. Bu bölgede mevcut toprak eşik akım değer ayarı ile arıza tespiti ve kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderme mümkün değildir.

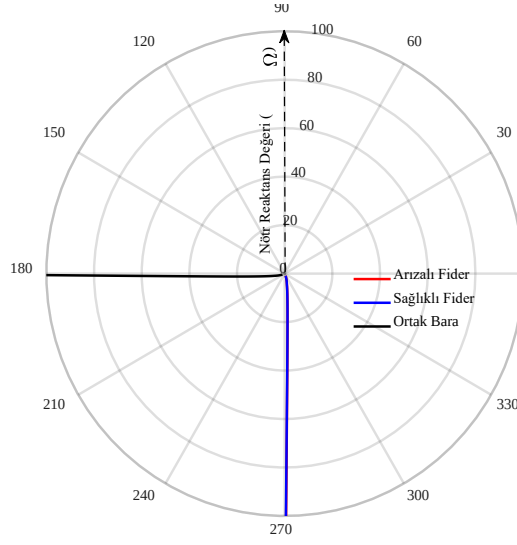
Dağıtım şebeke işletmecisi, kendi şebekesine ait nötr topraklama türü ve bu türe ait empedans değerini, paralel fider sayısını, fider mesafesi bilgisini kolaylıkla sağlayabilir. Bu nedenle HAE her bir şebekeye uygulanabilir. Ayrıca HAE için yapılan TFT arıza analizleri tamamen kablo senaryoları için gerçekleştirilmiştir. Bu durum kapasitif akım genliğinin yüksek olmasına ve en kötü senaryo olmasına neden olmaktadır. Böylece HAE hibrit şebekelerde de başarılı bir şekilde kullanılabilir.



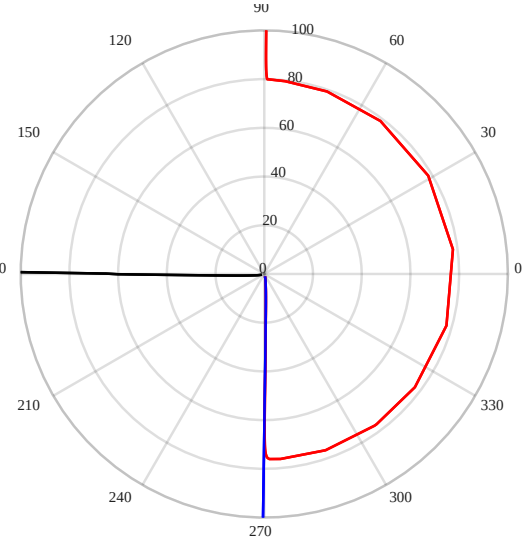
Şekil 5.7: Farklı kablo kesitleri için sağlıklı fiderde görülen $3I_0$ değişimi.

Elde edilen eş yükselti eğrileri 240 mm^2 kablo kesitine sahip XLPE yeraltı kabloları için geçerlidir. Bunun yanı sıra dağıtım şebekesinde farklı kesitlerde yeraltı kabloları kullanılmaktadır. Bu nedenle kablo kesitinin etkisi incelenmiştir. İki fiderli ve her bir fiderin kablo mesafesinin 10 km olduğu test şebekesi için farklı kablo kesitlerinin TFT arıza simülasyonları yapılmıştır. **Şekil 5.7** ile farklı kablo kesitleri için sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinin nötr topraklama direncine göre değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kablo kesitinin artması kapasitif akım genliğini ve dolayısıyla sağlıklı fiderde görülen akım genliğini arttırmıştır. Fakat sağlıklı fiderde görülen akım genliğinin artışı doğrusal olmamak ile birlikte nötr topraklama empedans değerine göre değişmektedir. Fider mesafesi nötr topraklama empedansının yanı sıra kablo kesiti de ilgilenilmesi gereken bir değişkendir.

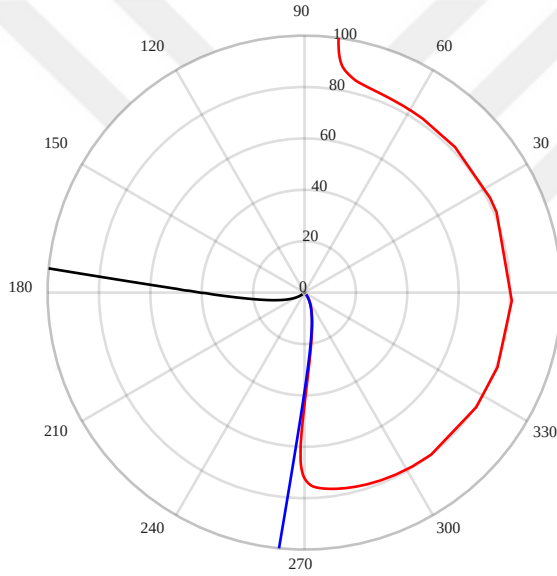
Reaktans topraklı sistemler yönsüz toprak korumada probleme neden olmakla birlikte yönlü toprak koruma içinde seçicilik problemi oluşturmaktadır. Reaktans topraklı şebekelerde arızalı fider ve sağlıklı fider arasındaki sıfır sıra aç farkı ayırt edilebilecek büyüklükte olmayabilir. **Şekil 5.8** ile farklı paralel fider ve kablo mesafesi için reaktans topraklı şebekenin yönlü toprak koruma performansı incelenmiştir.



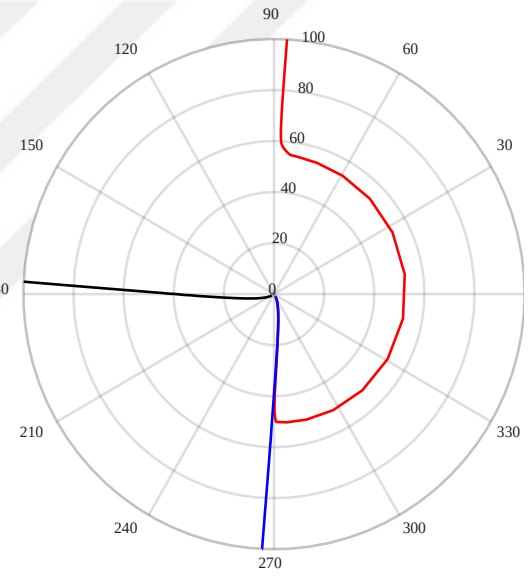
a) İki fiderli her fider 10 km



b) İki fiderli her fider 40 km



c) Sekiz fiderli her fider 5 km



d) Dört fiderli her fider 20 km

Şekil 5.8: Sıfır sıra polar diyagram [89].

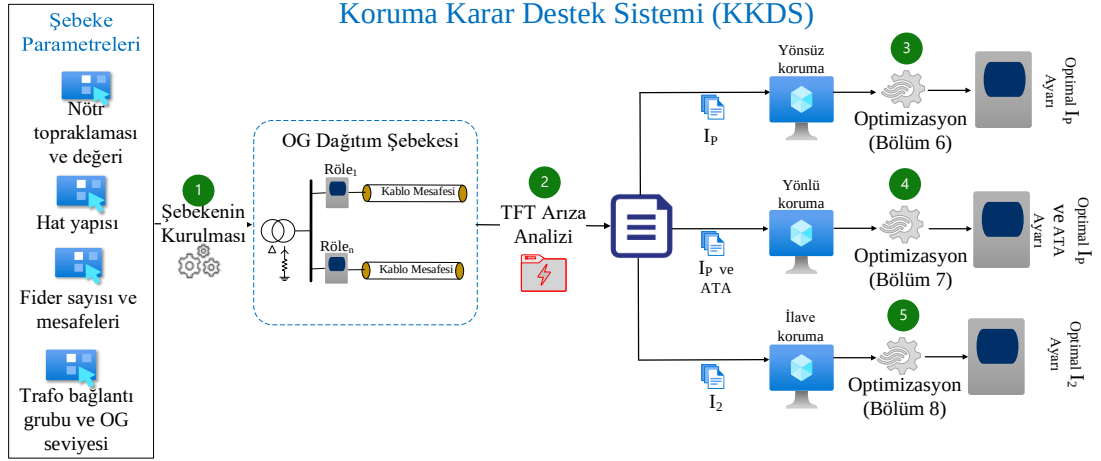
Dört farklı paralel fider ve kablo mesafesi belirlenmiştir. Her bir paralel fider ve kablo mesafesi ikilisi için nötr noktasının reaktans değeri 1Ω 'dan 100Ω 'a kadar arttırılmıştır. **Şekil 5.8** ile görüldüğü üzere her bir senaryoda şebekenin sıfır sıra polar diyagramı farklılık göstermektedir. **Şekil 5.8.a**'da görüldüğü üzere hem arızalı hem de sağlıklı fiderin toprak rölesi tarafından görülen sıfır sıra akım açıları tüm nötr noktası ve reaktans değerleri için birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle herhangi bir ATA ayarı ile arızalı ve sağlık fider ayrımı yapmak oldukça zordur. Bu durumda yönlü toprak koruma ile seçici koruma mümkün değildir. **Şekil 5.8.a**'daki senaryoda kablo

mesafesi 40 km yapılarak **Şekil 5.8.b**'deki sıfır sıra polar diyagram elde edilmiştir. **Şekil 5.8.b**'de görüldüğü üzere rezonans etkisinden dolayı nötr noktasının 80Ω 'dan yüksek olduğu durumlarda yönlü toprak koruma yardımıyla arızalı ve sağlıklı fider ayrımı yapılabilir. Fakat nötr noktasının 80Ω 'dan düşük değerleri için yönsüz toprak koruma yönlü toprak koruma yerine tercih edilebilir. **Şekil 5.8.a**'daki senaryoda paralel fider sayısı sekize çıkarılarak **Şekil 5.8.c** elde edilmiştir. Paralel fider sayısının artması ile birlikte şebekenin sahip olduğu toplam kapasitif akım değeri artmıştır. Böylece iki fiderli şebeke nötr noktasının 80Ω 'dan yüksek değerler için rezonansa girmiştir. Arızalı ve sağlıklı fider arasında açılma farkı oluşmuştur. Yönlü toprak rölesi ile seçici korumak mümkündür. **Şekil 5.8.d** ile dört fiderli şebeke için her bir fiderin 20 km olduğu durumda rölelerin gördüğü sıfır sıra açısının değişimi gösterilmiştir. Bu senaryoda daha düşük nötr reaktans değeri için arızalı ve sağlıklı fider arasındaki açılma farkı artmıştır.

Simülasyon sonuçlarından açıkça görüldüğü üzere yönsüz ve yönlü toprak koruma röleleri dağıtım şebekesinin farklı topolojik senaryolarında seçici koruma sağlayamamaktadır. Bu nedenle ilave koruma yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. İlave koruma yöntemlerinin ise uygulanması için ilave ekipmanlara veya yüksek örneklem frekansına sahip rölelere ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca literatürde önerilen ilave koruma yöntemlerinin pek çoğu saha uygulaması açısından oldukça zor algoritmalar.

5.2. KKDS'nin Mimari Yapısı

Beklendiği gibi dağıtım şebeke topolojisinin zaman içerisinde geleneksel yapıdan uzaklaşması ve karmaşık hale gelmesi koruma algoritmaların da geleneksel yapıdan uzaklaşmasını gerekli kılmıştır. Bir topoloji için seçici koruma sağlayan röle ayarı veya koruma felsefesi başka bir topoloji için seçici koruma sağlayamayabilir. Bu nedenle seçilen koruma yöntemi ve bu yöntem için seçici korumanın sağlanacağı röle ayarları şebeke topolojisine uyumlu olmalıdır. Tezde kapasitif akım temelli hatalı açılma problemini gidermek için optimum röle ayarlarının ve koruma metodlarının seçileceği KKDS geliştirilmiştir.



Şekil 5.9: KKDSye ait mimari yapı

OG şebekeler için kapasitif akım temelli hatalı açmaları engellemek için önerilen KKDS'e ait mimari yapı Şekil 5.9 ile gösterilmiştir. Birincil olarak şebeke parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. Şebekenin kurulabilmesi için gerekli parametreler aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- i. OG seviyesi (genelde 33 kV) ve trafo bağlantı grubu (Üçgen/Yıldız veya Yıldız Yıldız)
- ii. Nötr noktasının topraklama türü ve empedans değeri.
- iii. Hat yapısı
- iv. Paralel fider sayısı ve her bir fiderin mesafesi.

Parametrelerin girilmesi ile OG dağıtım şebekesi oluşturulur. Oluşturulan OG dağıtım şebekesinde TFT arıza analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. TFT arıza analizleri herhangi bir ticari paket program yardımıyla yapılabilir. Bu tez kapsamında EMTP-ATP Draw ortamında TFT arıza analizleri gerçekleştirilmiştir.

Toprak arıza analizleri sonucu rölelerin bulunduğu konumlardan faz akımları ve faz gerilimleri kayıt altına alınmaktadır. Böylece faz büyüklüklerinden pozitif sıra, negatif sıra ve sıfır sıra gibi simetrik bileşen büyüklüklerine kolayca geçilebilir. Elde edilen akım ve gerilim bilgisine göre üç farklı kategoride koruma seçeneği sunulacaktır. Birinci seçenek yönsüz toprak korumadır. Yönsüz toprak koruma seçildiğinde

rölelerin TDS ve I_p değerleri optimize edilecektir. Sabit zamanlı röle karakteristiği kullanıldığı durumda TDS değeri sabit, I_p değeri değişkendir. Böylece, şebekeye uygun şekilde optimize edilen I_p değerleri yardımıyla kapasitif akım temelli hatalı açma problemi herhangi bir yön bilgisi veya ilave koruma ekipmanı olmadan giderilecektir. Bölüm 6’da KKDS’nin birinci aşaması olan yönsüz toprak koruma için etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekelerinde röle ayaları önerilen optimizasyon yaklaşımı ile set edilmiştir.

İkinci seçenek koruma ise yönlü toprak korumadır. Toprak rölelerinin TDS ve I_p ayalarının yanı sıra ATA ve RKA ayarlarının da etkin topraklanmayan kablo yoğun şebekeler göz önüne alınarak optimize edilmesi gerekmektedir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar sınırlıdır. Önerilen aı ayarları genel olarak basit topolojiler için geçerlidir. Bu tez kapsamında geliştirilen KKDS ile yönlü koruma için gerekli olan ayarlarda optimize edilmiştir. Böylece optimize edilmiş ayarlar ile etkin topraklanmayan radyal dağıtım şebekesinde yönlü toprak rölesi seçici koruma sağlayabilir. KKDS’nin ikinci aşaması olan yönlü toprak koruma için önerilen optimal ATA ve RKA ayarları Bölüm 7’de anlatılmıştır.

  nc  seçenek ise ilave toprak koruma yöntemidir. Yönsüz ve yönlü toprak rölesi kullanımının seçicilik problemine neden olduğu durumlarda kullanılması önerilmektedir. Bu durum genel olarak topraklama trafosu kullanılan dağıtım şebekelerinde arızalı fiderde görülen sıfır sıra akımın genliğinin rezonansa girmesidir. Bu tez kapsamında ilave koruma yöntemi olarak negatif sıra bileşen temelli koruma algoritması önerilmiştir. Bölüm 8’de önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı ile röleler optimal negatif sıra bileşen değerleri ile ayarlanmıştır. Böylece yönsüz ve yönlü toprak rölesinin seçici koruma sağlamadığı durumlarda kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmiştir.

5.3. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde etkin topraklanmamış kablo yoğun radyal dağıtım şebekelerinde gerçekleşen TFT arızası sonucu arızalı ve sağlıklı fiderin sıfır sıra davranışı hem genlik hem de aı bilgisi göz önüne alınarak detaylı incelenmiştir. Nötr noktası empedans değeri, paralel fider sayısı ve fider mesafesine göre her bir yöntemin seçici koruma performansının etkilendiği TFT arıza analizler sonucunda görülmektedir. Bu nedenle kurulan şebeke topolojisine uygun olarak koruma yöntemlerinin seçildiği ve seçilen

yöntemin gerektirdiği ayaların optimize edildiği KDDS'nin gerekliliği ve mimarisi tartışılmıştır. KDDS ile birlikte kapasitif akım temelli hatalı açmaların tamamen giderilmesi hedeflenmektedir.

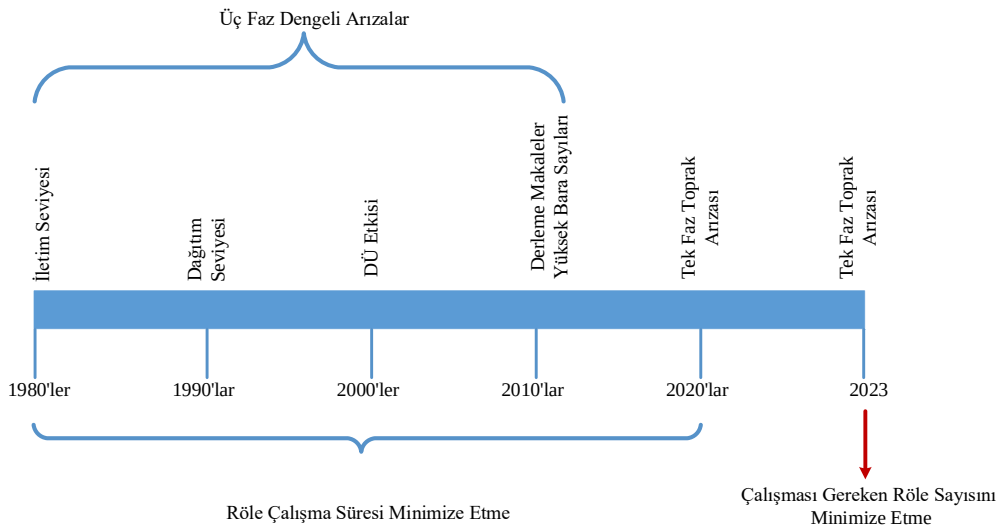


6. YÖNSÜZ TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Bu bölümde KKDS'nin birinci seçenek olarak sunduğu yönsüz toprak koruma röleleri için gerekli olan TDS ve I_p ayar değerlerinin optimize edildiği yeni bir optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Optimizasyon yaklaşımında hem amaç fonksiyonu hem de kısıt fonksiyonları kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin yapısına göre yenilenmiş ve literatüre kazandırılmıştır [115]. Önerilen optimizasyon yaklaşımının etkinliği gerçek bir dağıtım şebekesinde farklı parametreler (arıza noktası, kablo kesiti ve tipi, şebekenin hibrit yapısı, farklı nötr topraklama türleri, kapasitif akım dengesizliği) göz önüne alınarak incelenmiştir.

6.1. Literatürdeki Optimizasyon Yaklaşımları

Röle optimizasyon sürecinin tarihsel gelişimi Şekil 6.1 ile gösterilmiştir. Şekil 6.1 ile görüldüğü üzere yaklaşık otuz yıllık röle koordinasyon optimizasyon süreci incelendiğinde son on yıl içerisinde dağıtım seviyesinde optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği görülmektedir. 2010'lar ve sonrası için derleme makale sayıları artmış ve yüksek bara içeren dağıtım şebekeleri incelenmiştir.



Şekil 6.1: Röle optimizasyon sürecinin tarihsel gelişimi.

Fakat tüm çalışmalarda röle ayarları dengeli üç faz arızalar için gerçekleştirilmiştir. Toprak arızasının ise 2020 yılı itibariyle araştırmacıların ilgisini çektiği görülmektedir. 2020'den itibaren toprak arızası ile ilgili optimizasyon çalışmaları yayınlanmaya başlanmıştır. Fakat bu çalışmaların tümü etkin topraklı şebekeler için incelenmiştir. Etkin topraklı dağıtım şebekelerinde yüksek genlikli arıza akımları görüldüğü için optimizasyon yaklaşımı toplam röle çalışma süresini minimize etmeyi hedeflenmektedir. Bu çalışmalar genel olarak DÜ'nün neden olduğu hatalı açmaları engellemeyi hedeflenmiştir. Fakat toprak arızası sırasında radyal dağıtım şebekelerinde DÜ olmadan dahi hatalı açmaların gerçekleştiği bilinmektedir. Etkin topraklanmamış şebekelerde nötr noktasının topraklama türü ve kablo kapasitif akım genliğine bağlı olarak radyal dağıtım şebekelerinde hatalı açma yaşanmaktadır. Genel olarak literatürde kullanılan test şebekelerin nötr topraklama türü ve kabloların kapasitif akım etkisi ihmal edilmektedir. Ayrıca tüm çalışmalarda röle çalışma süresi minimize edilmektedir. Fakat bu bölümde önerilen optimizasyon yaklaşımı toplam çalışan röle sayısını minimize etmektedir. Böylece optimal I_p ayarları ile hatalı açma engellenmektedir.

Açık literatürde TFT arızaları sırasında hatalı açmaların engellenmesi için araştırmacılar tarafından geliştirilen optimizasyon çalışmalarının bulunduğu bilinmektedir. Faz arızaları için önerilen TDS ve I_p ayarlarının toprak koruma rölesine direkt uygulaması numaralı [116] çalışmada incelenmiştir. İlgili çalışmada kullanılan dağıtım şebekesi etkin topraklı şebeke olduğu için faz arızası için önerilen TDS ve I_p ayarları toprak koruma rölesi için de kullanılabilir. TFT arızası sırasında ring şebekelerde dolaşan sıfır sıra akımlar hatalı açmaya vermektedir. Bu problem amaç fonksiyonuna hatalı açmaya sebebiyet veren rölelerin kısıt fonksiyonunu ekleyerek [69] numaralı çalışmada çözülmüştür. İlgili çalışmada hatalı açmaya sebebiyet veren rölelere ilave gecikme zamanı eklenerek KZA ihlali engellenmiştir. Her iki uçtan paralellenmiş çıkış fiderlerine sahip dağıtım şebekelerinde yaşanan hatalı açma problemi TDS ve I_p ayarlarının toprak koruma rölesi için ayrı bir şekilde optimize edilmesi ile engellendiği çalışmalar mevcuttur. [54] numaralı çalışmada 11 kV'luk dağıtım şebekesinde toprak koruma rölelerinin TDS ve I_p ayarları geleneksel amaç fonksiyonu yardımıyla optimize edilmiştir. Hatalı açmaya sebebiyet veren röleler için ceza fonksiyonları yazılmıştır. Benzer şekilde [57] ve [117] numaralı çalışmalarda

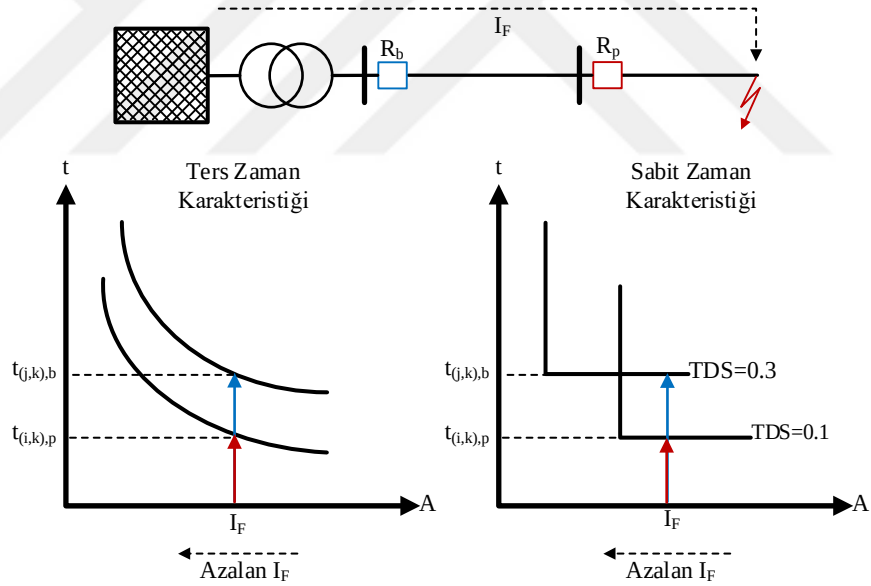
toprak koruma rölelerinin TDS ve I_p değerleri geleneksel yöntem ile ayarlanmıştır. İlgili çalışmalar iki fiderli IEC test şebekesinde test edilmiştir.

Tablo 6.1 ile TFT arızaları için literatürde önerilen optimizasyon yaklaşımları ve şebekelerin nötr topraklama türleri listelenmiştir. **Tablo 6.1** ile gösterilen amaç fonksiyonlarının tümünde röle çalışma süresi standart ters zaman eğrisi ile belirlenmiştir. Böylece hem TDS hem I_p değerleri sürekli değişken kabul edilmiştir. **Tablo 6.1**'deki şebekelerin nötr topraklama türü incelendiğinde, tüm şebekelerin direkt topraklı bir diğer deyişle etkin topraklı olduğu görülmektedir. Etkin topraklı şebekelerde arızalı fiderde yüksek genlikli sıfır sıra akım görülmektedir. Bu nedenle faz rölesi ayarı toprak rölesi ayarı şeklinde de kurgulanabilir. **Tablo 6.1** ile listelenen çalışmalarda hat modeli olarak yeraltı kablosu kullanılmıştır. Fakat her ne kadar yeraltı kablosu kullanılsa da genelde kısa mesafeli yeraltı kabloları kullanılmıştır. Daha da önemlisi, ilgili çalışmaların tümü etkin topraklı olduğu için kabloların kapasitif akım değerleri sağlıklı bölgede bulunan toprak koruma rölesinin hatalı açma sinyali üretmesine neden olmayacaktır. Etkin topraklanmış şebekelerde arızanın gerçekleşmediği fiderlerde veya bölgede kapasitif akım değeri ihmal edilebilir seviyelerdedir.

Tablo 6.1: TFT için önerilen optimizasyon yaklaşımları ve şebekelerin topraklama türleri.

Makale	Amaç Fonksiyonu	Nötr Topraklaması	Yılı
[54]	$\min = \sum_{i=1}^n t_i$	Etkin topraklı	2021
[57]	$\min = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (t_{i,j}^{earth} + t_{i,j}^{phase})$	Etkin topraklı	2020
[69]	$\min = \sum_{i=1}^n W_i * T_{i,k}$	Etkin topraklı	2020
[116]	$\min = \sum_{i=1}^n T_{pri-nr}^i + \sum_{i=1}^n T_{pri-far}^j$	Etkin topraklı	2018
[117]	$\min = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (t_{i,j}^{earth} + t_{i,j}^{phase})$	Etkin topraklı	2022

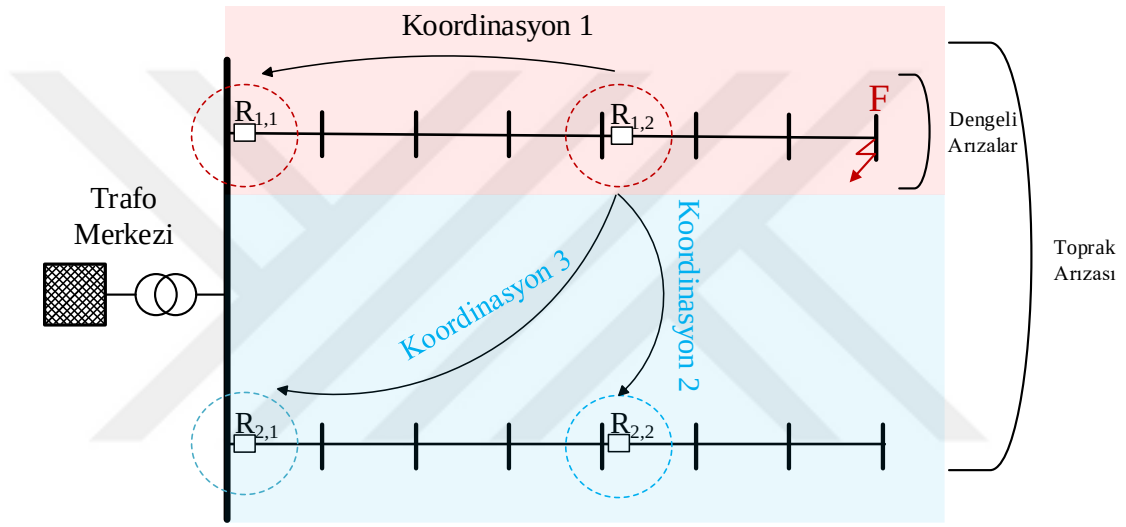
Yüksek genlikli arıza akımları gözlemlendiği için etkin topraklı dağıtım şebekelerinde toprak rölesinin çalışma karakteristiği olarak ters zaman karakteristiği kullanılabilir. Ters zaman karakteristiğinde röle çalışma süresi akımın genliği ile ters orantılıdır. Böylece yüksek genlikli arıza akımları dağıtım şebekesinden kısa sürede temizlenmektedir. Bu avantajına rağmen ters zaman karakteristiğinin iki dezavantajı bulunmaktadır. Birincisi kaynaktan uzakta gerçekleşen arızalar dağıtım şebekesinden göreceli olarak uzun sürede temizlenecektir. Ayrıca bir empedans üzerinden gerçekleşecek TFT arızası için de benzer şekilde arıza temizleme süresi uzayacaktır. **Şekil 6.2** ile ters zaman karakteristiği ve sabit zaman karakteristiği kullanarak örnek bir radyal fiderde röleler arasındaki zaman koordinasyonu gösterilmiştir. **Şekil 6.2**'de görüldüğü üzere ters zaman karakteristiğinde arıza akım genliği röle çalışma süresini belirlemektedir. Sabit zaman karakteristiğinde ise arıza akım genliği röle çalışma süresinde etkili değildir.



Şekil 6.2: Ters zaman ve sabit zaman karakteristileri.

Etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde arıza akım genliği düşüktür. Saha uygulamalarında gerek ülkemizde gerekse Kıta Avrupası'nda dağıtım şebekeleri yüksek oranda etkin topraklanmamış şebekelerdir. Nötr noktasının topraklama türüne göre yük akımından daha düşük genlikte arıza akımları görülebilmektedir. Bu nedenle etkin topraklanmamış şebekelerde ters zaman karakteristiği kullanmak arıza

temizleme süresini oldukça uzatacaktır. Arıza süresince şebeke aşırı gerilimlere maruz kalacağından dolayı şebekenin uzun süreli toprak arızası altında çalıştırılması otoriteler tarafından istenmemektedir. Bu nedenle etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde sabit zaman karakteristiği yaygın olarak kullanılmaktadır. Sabit zaman karakteristiği de TDS ve I_p ayar değerlerine sahiptir. TDS ayar değeri röle çalışma süresine tekabül etmektedir. Örneğin 0,1 ve 0,3 saniyelik TDS değerleri **Şekil 6.2** üzerinde gösterilmiştir. Rölenin çalışması için ise ayarlanan I_p değerinden daha yüksek toprak arıza akımının röle tarafından görülmesi gerekmektedir.



Şekil 6.3: Etkin topraklanmayan şebekelerde dengeli arıza ve toprak arızası.

Şekil 6.3 ile örnek iki fiderli etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde dengeli üç faz arıza ve TFT arızası sırasında arızaların hangi röleler tarafından görüldüğü belirtilmiştir. F noktasında gerçekleşen dengeli arızalar için arıza $R_{1,1}$ ve $R_{1,2}$ tarafından görülmekte ve birincil röle olarak $R_{1,2}$ tarafından temizlenmektedir. İkincil destek koruma ise $R_{1,1}$ tarafından sağlanmaktadır. Seçici koruma $R_{1,1}$ ve $R_{1,2}$ arasındaki *Koordinasyon 1* zaman farkıyla sağlanmaktadır. Etkin topraklanmayan dağıtım şebekelerinde arıza akımının azalmasının yanı sıra, yeraltı kablolarının faz toprak kapasitelerinden dolayı arıza bölgesi dışında bulunan rölelerde sıfır sıra akımlar görülmektedir. Arıza yolunda görülen $R_{1,1}$ ve $R_{1,2}$ arasındaki *Koordinasyon 1* ilişkisine ilaveten, arıza bölgesi dışında $R_{1,2}$ ve $R_{2,2}$ arasındaki *Koordinasyon 2*, $R_{1,2}$ ve $R_{2,1}$ arasındaki ve *Koordinasyon 3* ilişkisi bulunmaktadır. Sabit zaman karakteristiğinde

koordinasyon zaman aralığı sabittir. Bu nedenle röleler tarafından görülen sıfır sıra akımlar eşik akım değerinden yüksek olduğu durumda arıza bölgesi ile aynı anda veya daha önce açma gerçekleştirebilir. Bu durumda toprak arızası sırasında $R_{1,2}$ rölesinin yanı sıra $R_{2,1}$, $R_{2,2}$ ve $R_{1,1}$ rölesi açma sinyali üreterek arıza bölgesi dışında bulunan yüklerin gereksiz yere devre dışı kalmasına sebebiyet verecektir.

Röle çalışma durumu I_p değerine bağlı ve çalışma süresi sabit TDS değeri olduğundan dolayı kablo yoğun etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekelerinde I_p değerlerinin optimize edilerek çalışan röle sayısının minimum duruma getirilmesi gerekmektedir.

6.2. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı

Kapasitif akım temelli hatalı açma probleminde arıza yolunda bulunan rölelerin yanı sıra arıza ile ilgisi olmayan röleler de açma sinyali üretmektedir. Bu nedenle kurgulanan amaç fonksiyonu TFT arızası sırasında açma sinyali üreten röle sayısını minimize edecek en uygun I_p ayarını hedeflemektedir. Önerilen amaç fonksiyonu denklem (6.1) ile gösterilmiştir.

$$OF = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^f |I_{P_{i,j}} - I_{EF_{i,j,k}}| (1 - NSO_{i,j,k}) W_{i,j} \quad (6.1)$$

Burada; n : toplam fider sayısını temsil etmektedir. m : n . fiderde bulunan toplam röle sayısını temsil etmektedir. f : yaşanan TFT arıza sayısını temsil etmektedir. $I_{P_{i,j}}$: i .fider j .röleye ait toprak eşik akım ayar değerini temsil eden tamsayı değişkendir. $I_{EF_{i,j,k}}$: i . fiderde j . rölenin k arızasında gördüğü sıfır sıra akım genliğinin temsil etmektedir. $W_{i,j}$: i . fider j . röle k . arızanın gerçekleşme olasılığını temsil eden ağırlık katsayısıdır. Kabloların izolasyon seviyeleri eşit kabul edilerek 1'e set edilmiştir. Fakat ileriki çalışmalarda bu değişken olarak analiz edilecektir. $NSO_{i,j,k}$: i . fiderde bulunan j . rölenin k . arızada çalışıp çalışmama durumunu kontrol eden binary değişkeni temsil etmektedir. Binary kontrol denklem (6.2) ve denklem (6.4) ile gösterilmiştir.

$$NSO_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (6.2)$$

$$NSO_{i,j,k} = \begin{cases} 0, & \text{eğer } I_{P_{i,j}} > I_{EF_{i,j,k}} \text{ (} k = 1, 2, \dots, f \text{)} \\ 1, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (6.3)$$

$$I_{P_{i,j}} \text{ tamsayı (} i = 1, 2, \dots, n; \ j = 1, 2, \dots, m \text{)} \quad (6.4)$$

İlgili rölenin kendi eşik akım değeri, arıza sırasında gördüğü sıfır sıra akımdan büyükse bu durumda röle çalışmayacaktır. Aksi durumda röle çalışacaktır. Amaç fonksiyonu röle çalışma sayısını eşik akım ayarlarını optimize ederek minimumda tutmaktır. Bununla birlikte herhangi bir k arızasında; arızanın temizlenmesi için en az bir rölenin arızayı algılaması ve çalışması gerekmektedir. Bu koruma felsefesi denklem (6.5) ile kısıt fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Bu kısıt fonksiyonu TFT arıza tespit kısıtı olarak isimlendirilmiştir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m NSO_{i,j,k} \geq 1 \rightarrow (k = 1, 2, \dots, f) \quad (6.5)$$

Ayrıca koruma bölgesinde birincil sorumlu rölenin arızayı algılamasının yanı sıra destek koruma rölesinin de arızayı algılaması gerekmektedir. Bu koruma felsefesi denklem (6.6) ile ifade edilmiştir ve TFT arızası koordinasyon kısıtı olarak isimlendirilmiştir. Bahsetmekte fayda vardır ki bu kısıt radyal dağıtım şebeke topolojisine göre kurgulanmıştır. Döngü şebekelerde şebeke topolojisine göre revize edilmesi gerekmektedir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f NSO_{i,1,k} = j \rightarrow (j = 1, 2, \dots, f) \quad (6.6)$$

Diğer kısıtlar denklem (6.7)-denklem (6.10) ile ifade edilmiştir. Denklem (6.7) ile gösterilen koordinasyon kısıtı sabit zaman karakteristiğinde röle çalışma zamanı belli

olduğundan dolayı ardışık iki röle arasında koordinasyon zaman aralığı sabittir. Röle I_P ve TDS ayar aralığı sırasıyla denklem (6.8) ve denklem (6.9) ile gösterilmiştir. Ayar değerlerinin minimum ve maksimum değerleri sahada kullanılan ticari rölelerin yeteneklerine ve kapasitelerine göre değişmektedir.

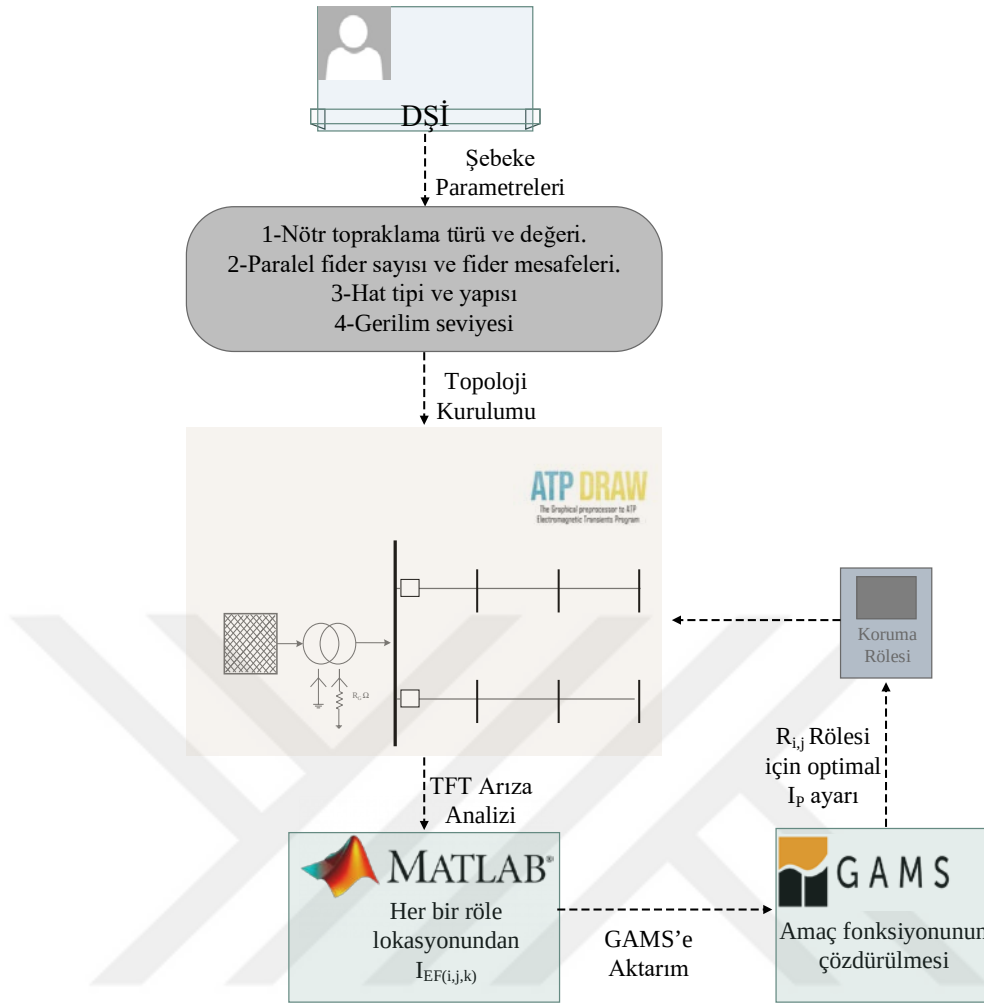
$$T_{(i,j+1,k)} - T_{(i,j,k)} \geq KZA \quad (6.7)$$

$$TDS_{(i,j)min} \leq TDS_{(i,j)} \leq TDS_{(i,j)max} \quad (6.8)$$

$$I_{P(i,j)min} \leq I_{P(i,j)} \leq I_{P(i,j)max} \quad (6.9)$$

$$T_{(i,j)min} \leq T_{(i,j)} \leq T_{(i,j)max} \quad (6.10)$$

Röle çalışma süresine ait kısıt fonksiyonu denklem (6.10) ile ifade edilmiştir. TFT arızası sırasında minimum çalışma süresi ($T_{(i,j)min}$) ve maksimum çalışma süresi ($T_{(i,j)max}$) ülkelerin yönetmeliklerine veya saha pratiklerine göre değişmektedir. Örneğin Türkiye’de toprak arızası için $T_{(i,j)min}$ 0,1 saniye, $T_{(i,j)max}$ ise 1,2 saniyedir. Eğer toprak arızası 1,2 saniye içerisinde temizlenmez ise TEİAŞ tarafından tüm OG fiderler devre dışı bırakılmaktadır.



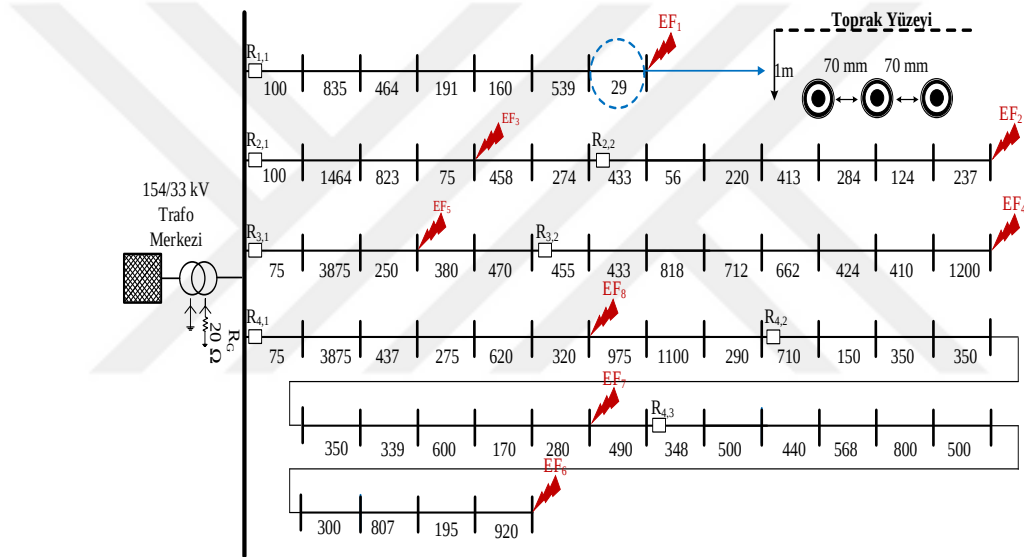
Şekil 6.4: Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının uygulama adımları.

Önerilen optimizasyon yaklaşımının uygulama adımları **Şekil 6.4** ile gösterilmiştir. İlk olarak dağıtım şebeke işletmecisi tarafından parametrelerin sağlanması gerekmektedir. Dağıtım şebekesinin kurulması için gerekli parametreleri nötr topraklama türü ve değeri, paralel fider sayısı ve fider mesafeleri, hat tipi ve yapısı, gerilim seviyesi ve değeri şeklinde sıralamak mümkündür. Verilere uygun olarak dağıtım şebekesi EMTP-ATP Draw programında modellenir. Her rölenin yakınında TFT arızası oluşturularak $I_{EF_{i,j,k}}$ genlikleri tüm röle lokasyonlarından elde edilir. Elde edilen $I_{EF_{i,j,k}}$ genlik değerleri için GAMS programında Denklem (6.1) ile ifade edilen amaç fonksiyonu denklem (6.2)-denklem (6.10) ile gösterilen kısıtlara uygun olarak çözülür. GAMS programının çıktısı olarak her bir röleye ait I_p ayarları elde edilir. I_p ayarlarının etkinliği farklı şebeke parametrelerine göre kontrol edilebilir. Örneğin farklı arıza noktası veya farklı arıza direnç değeri. **Şekil 6.4** ile gösterilen yönsüz

toprak koruma için geliştirilen yeni optimizasyon yaklaşımının uygulama adımları parametrelerin sağlandığı tüm radyal dağıtım şebekelerinde uygulanabilir. Bir sonraki bölümde 62 baralı dağıtım şebekesinde önerilen optimizasyon yaklaşımının uygulaması gösterilmiştir.

6.3. 62 Baralı Radyal Dağıtım Şebekesinde Önerilen Optimizasyon Yaklaşımının Uygulanması

Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının etkinliği Şekil 6.5 ile gösterilen radyal dağıtım şebekesi üzerinde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



Şekil 6.5: 62 baralı gerçek dağıtım şebekesi.

Şekil 6.5 ile 62 baralı dağıtım şebekesi gösterilmiştir. 62 baralı dağıtım şebekesi EMPT-ATP Draw ortamında gerçek saha verileri kullanarak modellenmiştir. 62 baralı radyal dağıtım şebekesi 154/33 kV'lık güç trafosuna sahiptir. Güç trafosu Y_n/Y_n bağlantı grubuna sahiptir. Güç trafosunun primer tarafı direkt topraklı olmak ile birlikte sekonder tarafı ise 20Ω direnç üzerinden topraklıdır. Şebeke etkin topraklanmamıştır. TFT arıza analizleri kararlı durumda incelenmiş olup geçici rejim bölgesi analizlere dahil edilmemiştir. Kararlı durumda gerçekleştirilen TFT arıza analizleri için bazı kabuller ile yapılmıştır. Toprak koruma röleleri tarafından görülen sıfır sıra akım genliği üç faz akımının vektörel toplamı olduğu için yük akımı ihmal edilmiştir.

Yüklerin üçgen bağlanması yük akımlarından dolayı oluşacak bir dengesizliğin sıfır sıra olarak gözükmesini engelleyecektir. 62 baralı radyal dağıtım şebekesinde kullanılan yük transformatörleri 33/0.4 kV gerilim seviyesinde ve üçgen/yıldız bağlıdır. Üçgen yıldız bağlantının sıfır sıra eşdeğer devresi göz önüne alındığında, 0.4 kV'luk alçak gerilim tarafında görülen yük akımı dengesizliği üçgen tarafa herhangi bir sıfır sıra akım genliği yansımayacaktır. 62 baralı radyal dağıtım şebekesi dört farklı çıkış fiderine ve sekiz farklı toprak koruma rölesine sahiptir. Birinci fiderde bir adet, ikinci fiderde iki adet, üçüncü fiderde iki adet ve son fiderde üç adet toprak koruma rölesi mevcuttur. Toprak koruma rölelerinin isimlendirilmesi ($R_{i,j}$) paralel fider sayısı ve röle konumu şeklindedir. Şebekede kullanılan yeraltı kabloları her iki uçtan topraklıdır. Yeraltı kablusunun gömülme geometrisi şekil üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca her bir bara arasındaki kablo mesafeleri şekil üzerinde metre cinsinden gösterilmiştir. Şebekede yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin daha net anlaşılması adına, üçüncü fiderin sonunda gerçekleşen TFT arızası (EF_4) hem havai hat senaryosu hem de yeraltı kablosu senaryosu için incelenmiştir. Her bir koruma rölesinin gördüğü sıfır sıra akım genliği Tablo 6.2 ile listelenmiştir. Rölelerin toprak eşik akım değerinin 5 A'e ayarlandığını durumda üçüncü fiderde bulunan $R_{3,1}$ ve $R_{3,2}$ röleleri beklendiği gibi açma sinyali üretecektir. Seçici koruma için toplam çalışan röle sayısının iki olması beklenmektedir.

Tablo 6.2: Röleler tarafından görülen $3I_0$ ve röle çalışma durumlarının havai hat ve kablo kullanım durumuna göre değişimi.

Röle Adı	Havai Hat		240 mm ² XLPE Kablo	
	Genlik (A)	Röle (1/0)	Genlik (A)	Röle (1/0)
$R_{1,1}$	0,14	0	12,87	1
$R_{2,1}$	0,29	0	27,54	1
$R_{2,2}$	0,08	0	7,40	1
$R_{3,1}$	743,75	1	910,33	1
$R_{3,2}$	743,72	1	914,48	1
$R_{4,1}$	1,02	0	95,31	1
$R_{4,2}$	0,54	0	50,93	1
$R_{4,3}$	0,32	0	29,88	1

Fakat, **Tablo 6.2** incelendiğinde TFT arızasında yeraltı kablosunun kapasitif akımından dolayı arıza bölgesi dışında bulunan röleler tarafından sıfır sıra akım genliği görülmektedir. Bu durumda diğer rölelerin de açma sinyali üretmesi kaçınılmazdır. Böylece toplam çalışan röle sayısı iki yerine sekize yükselecektir. Bu durum ilave yük kayıplarının artmasına, SEM'in artmasına, OKSURE ve OKSIKLİK endekslerinin yükselmesine neden olmaktadır. Optimum eşik akım ayarı yardımıyla açma sinyali üretmesi gereken röle sayısı seçicilik kıstasları göz önüne alınarak minimize edilecektir. TFT arızaları için önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının farklı kablo tiplerinde performansını incelemek için yedi farklı kablo kesiti (70 mm^2 , 95 mm^2 , 120 mm^2 , 150 mm^2 , 185 mm^2 , 240 mm^2 , 400 mm^2) kullanılmıştır. 62 baralı dağıtım şebekesi her bir kablo tipi için yeniden modellenmiş TFT arıza analizleri yapılmıştır. Kabloların kesitleri farklı olsa bile şekil üzerinde gösterilen geometrik yapıya göre modellenmiştir. x

Tablo 6.3: 62 baralı radyal dağıtım şebekesi için optimal TDS ve I_p ayarları.

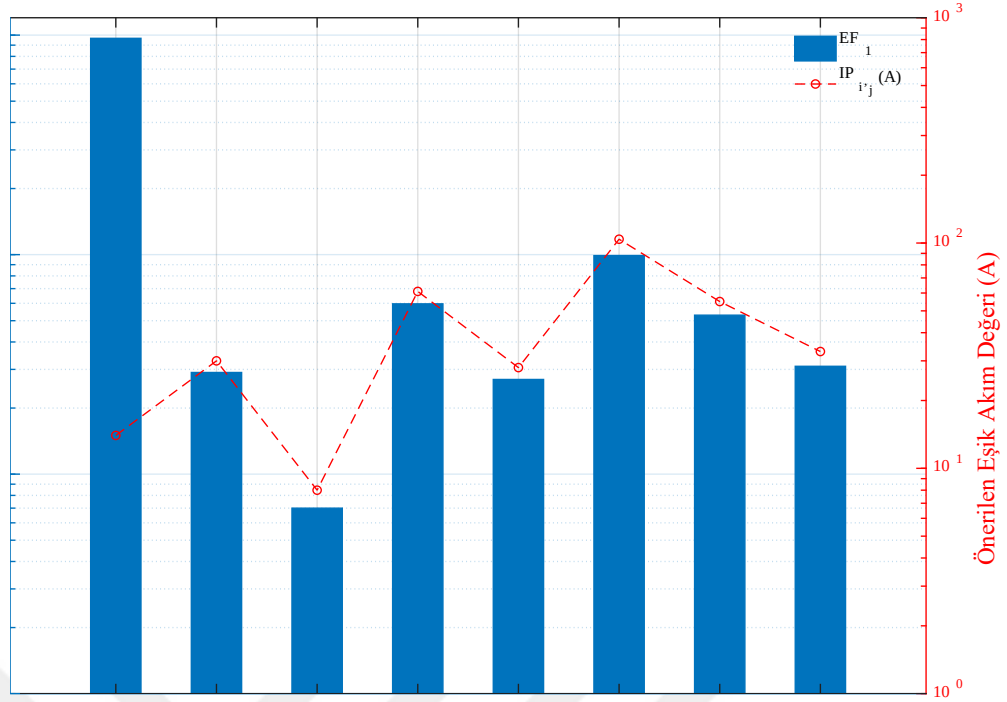
Kablo	Röle	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$
70 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	10	21	6	42	20	71	38	23
95 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	11	23	6	46	21	78	42	25
120 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	12	25	7	50	23	84	45	27
150 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	12	26	7	53	24	89	48	28
185 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	12	27	8	56	26	94	51	30
240 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	14	30	8	61	28	104	55	33
400 mm^2	TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
	I_p (A)	20	42	12	86	40	145	78	46

Rölelerin sorumlu olduğu her bir koruma bölgesinde yakın TFT arızaları oluşturularak amaç fonksiyonu kurgulanmıştır. Amaç fonksiyonu MINLP yöntemi ile kurgulanmıştır. Önerilen optimizasyon yaklaşımı kısıt fonksiyonları ile GAMS programında COUENNE paketi kullanarak çözülmüştür. GAMS programının çıktısı olan optimal I_p ayarlarının seçiciliği gerçek şebeke üzerinde farklı arıza noktası ve farklı arıza dirençleri için incelenmiştir.

Tablo 6.3 ile 62 baralı dağıtım şebekesinde farklı kablo kesitleri için optimum I_p ayarları listelenmiştir. Kablo kesitinin artması şebekede dolaşan kapasitif akım değerinin artmasına neden olacaktır. Bununla birlikte önerilen I_p değerinin de arttığı **Tablo 6.3**'de açıkça görülmektedir. Benzer şekilde fider mesafesinin uzaması da I_p değerinin artmasına neden olur. **Tablo 6.3**'de görüldüğü üzere en yüksek I_p değeri her kablo kesiti senaryosunda en uzun fider mesafesinden sorumlu olan $R_{4,1}$ toprak rölesinde elde edilmiştir. **Tablo 6.3** ile gösterilen I_p değerleri ile 62 baralı radyal dağıtım şebekesinde yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmektedir. Arıza bölgesi dışında yükler şebekeden gereksiz yere izole edilmediği için bu süreçte SEM miktarı azalacaktır. Bu durum maddi açıdan dağıtım şebeke işletmecisine pozitif yansıyacaktır. TFT arızası daha az toprak rölesi tarafından tespit edileceği için OKSIKLİK endeksi olumlu etkilenecektir. TFT arızası sonrası en az bölge restore edileceği için OKSURE endeksin de olumlu etkilenmesi beklenmektedir.

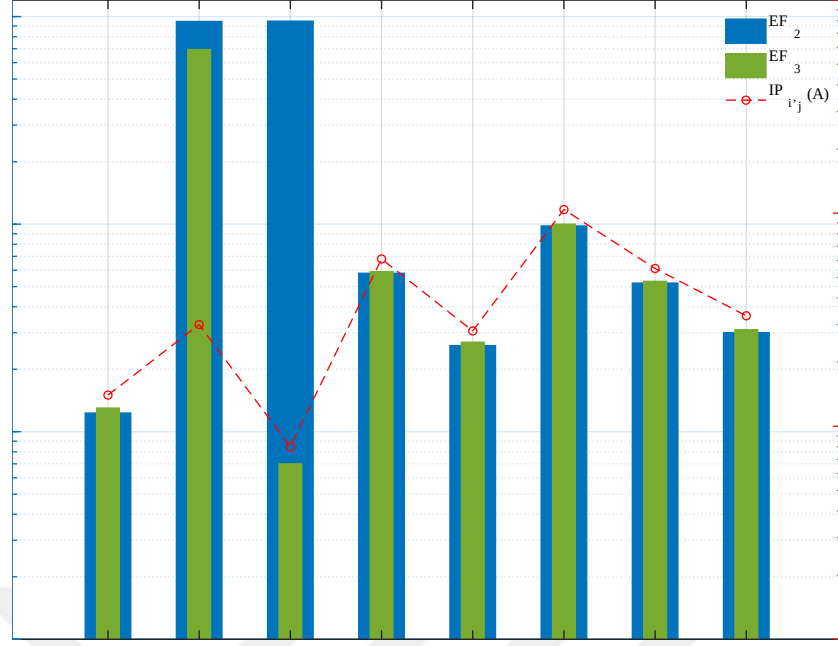
6.4. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımının Farklı Şebeke Parametrelerine Göre Seçici Toprak Koruma Performansının Değerlendirilmesi

Önerilen optimizasyon yaklaşımının etkinliğini analiz etmek için 62 baralı radyal dağıtım şebekesinde arıza yeri, arıza direnci, hibrit şebeke yapısı, kapasitif akım dengesizliği, ölçüm hataları ve farklı nötr topraklama pratikleri gibi parametreler sırasıyla incelenmiştir. Dağıtım şebekesinin işletilmesi sırasında TFT arızası fiderin herhangi bir noktasında gerçekleşebileceği için arıza noktası parametresinin incelenmesi elzemdir. Önerilen I_p ayar değerlerinin her bir arıza noktası için seçici toprak koruma sağlaması gerekmektedir.



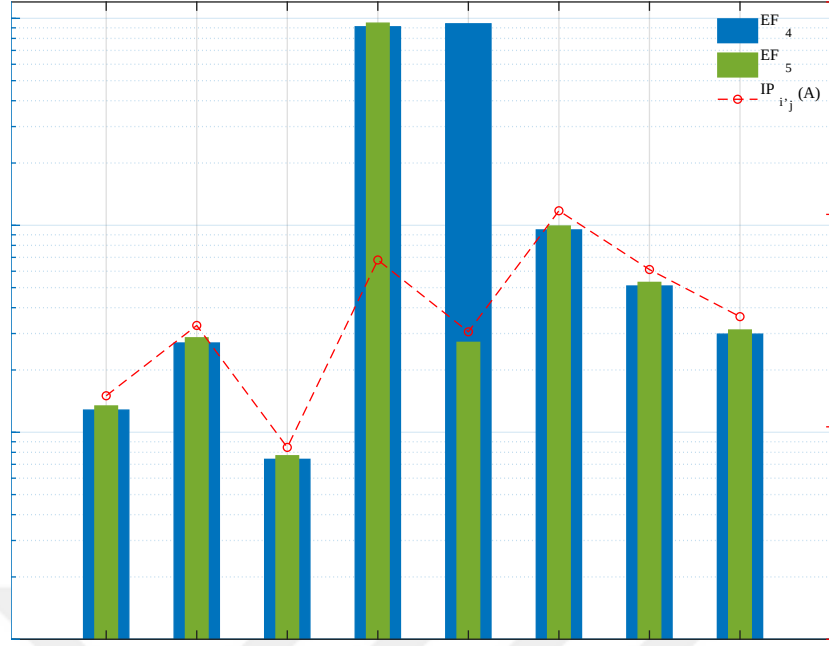
Şekil 6.6: Birinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.

Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının farklı arıza noktalarındaki seçici toprak koruma performansını değerlendirmek için şebekede her bir fiderde ayrı ayrı arıza noktaları detaylı olarak incelenmiştir. **Şekil 6.6** ile birinci fiderde hat sonunda gerçekleşen TFT arızası (EF_1) sırasında toprak rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlikleri gösterilmiştir. İlgili arıza için NSO değeri bir olmalı ve bu değer sadece $R_{1,1}$ rölesi tarafından üretilmelidir. **Şekil 6.6**'da açıkça görüldüğü üzere sadece $R_{1,1}$ rölesi eşik akım değerinin üzerinde sıfır sıra akım görmüştür. Böylece, optimum I_p değerleri kullanarak EF_1 arızası sırasında herhangi bir hatalı açmanın gerçekleşmesi engellenmiştir. **Şekil 6.7** ile ikinci fiderde gerçekleşen iki farklı TFT arızası için, toprak rölesi konumlarından görülen sıfır sıra akım genliğinin değişimi gösterilmiştir. Birinci arıza ikinci fiderin sonunda gerçekleşmiştir (EF_2). $R_{2,1}$ rölesi ve $R_{2,2}$ rölesi EF_2 arızasından sorumlu olan rölelerdir. Bu durumda, seçici koruma NSO değerinin iki olması ile sağlanabilir. Diğer röleler tarafından hiçbir şekilde NSO değeri üretilmemelidir.



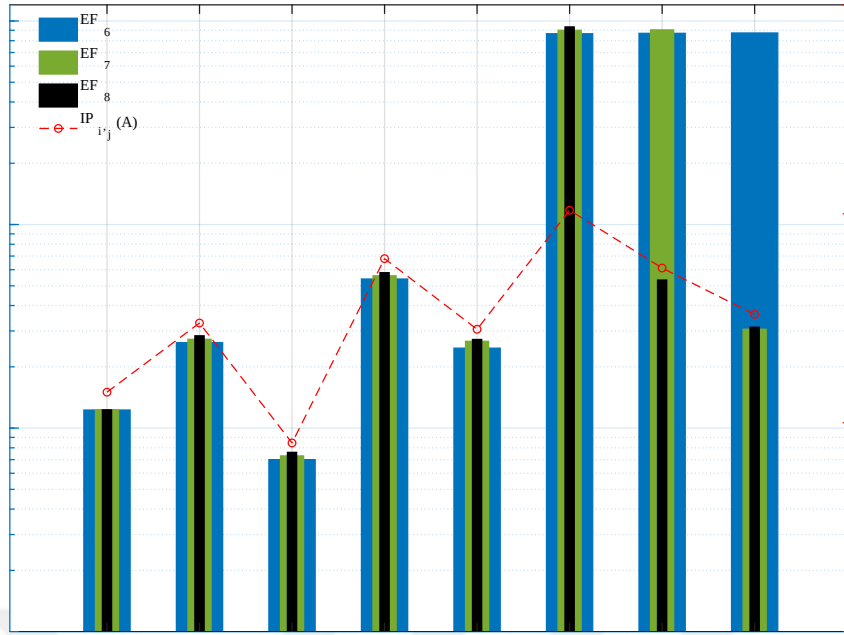
Şekil 6.7: İkinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.

Şekil 6.7’deki grafik değerleri incelendiğinde diğer rölelerin hiçbiri eşik akımının üstünde değer görmemiştir. İkinci fiderde gerçekleşen ikinci arıza $R_{2,1}$ rölesinde 2462 metre uzakta ve $R_{2,2}$ rölesinin gerisinde gerçekleşmiştir (EF₃). Bu durumda, seçici korumanın sağlanması için NSO değeri bir olmalıdır. Şekil 6.7’de ikinci arıza incelendiğinde sadece $R_{2,1}$ rölesinin NSO değeri ürettiği açıkça görülmektedir. Şekil 6.8 ile üçüncü fiderde gerçekleşen iki farklı TFT arızası için, röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genliğinin değişimi gösterilmiştir. Birinci arıza üçüncü fiderin sonunda gerçekleşmiştir (EF₄). $R_{3,1}$ rölesi ve $R_{3,2}$ rölesi arızadan sorumlu olan rölelerdir. Bu durumda NSO sayısı ikidir. Diğer röleler tarafından hiçbir şekilde NSO değeri üretilmemesi gerekmektedir. Şekil 6.8 ile görüldüğü gibi diğer rölelerin hiçbiri eşik akımının üstünde değer görmemiştir. İkinci fiderde gerçekleşen ikinci arıza $R_{3,1}$ rölesinde 4225 metre uzakta ve $R_{3,2}$ rölesinin gerisinde gerçekleşmiştir. (EF₅). Bu durumda NSO değeri bir olmalıdır. Şekil 6.8’da ikinci arıza incelendiğinde sadece $R_{3,1}$ rölesinin NSO değeri ürettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 6.8: Üçüncü fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.

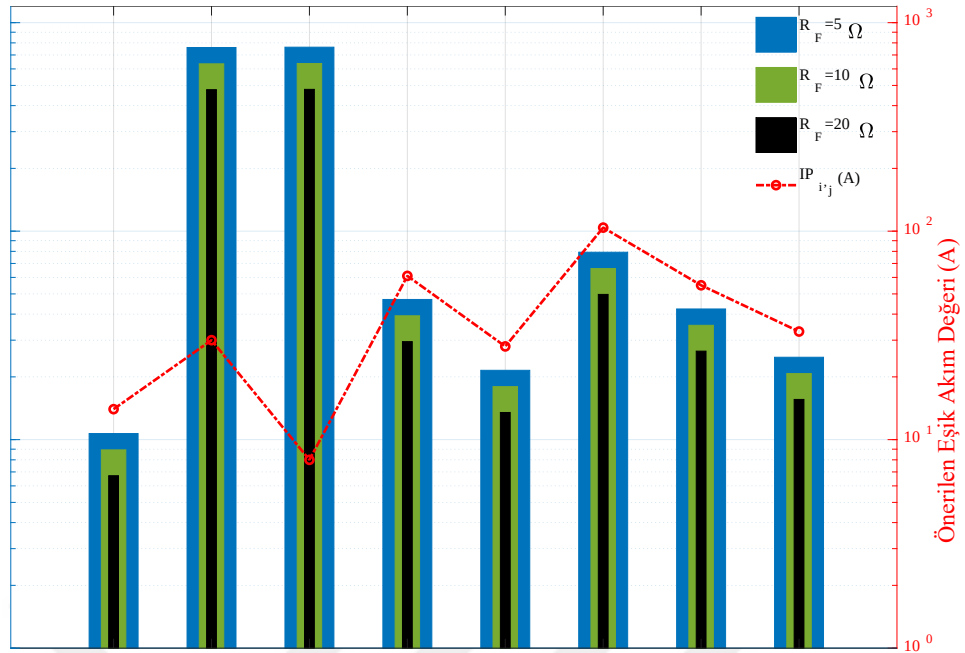
Şekil 6.9 ile dördüncü fiderde gerçekleşen üç farklı TFT arızası için, röle konumlarından görülen sıfır sıra akım değişimi gösterilmiştir. Dördüncü fiderde üç adet röle olduğu için üç farklı TFT arızası analiz edilmiştir. Birinci arıza dördüncü fiderin sonunda gerçekleşmiştir (EF₆). Beklendiği gibi sadece R_{4,1} rölesi, R_{4,2} rölesi ve R_{4,3} rölesi tarafından görülmüştür. Böylece üretilen NSO değeri üçtür. Dördüncü fiderde analiz edilen ikinci arıza R_{4,1} rölesinden 11266 metre, R_{4,2} rölesinden 3299 metre uzaklıkta olmakla beraber R_{4,3} rölesinin gerisindedir (EF₇). Bu senaryo için sadece R_{4,1} rölesi ve R_{4,2} rölesinden açma sinyali üretmesi beklenmektedir. Şekil 6.9'dan görüldüğü üzere seçici koruma sağlanmıştır. Dördüncü fiderde analiz edilen üçüncü arıza R_{4,1} rölesinden 5620 metre uzaklıkta olmakla beraber R_{4,2} rölesi ve R_{4,3} rölesinin gerisindedir (EF₈). Bu senaryo için sadece R_{4,1} rölesi rölesinden açma sinyali üretmesi beklenmektedir. NSO değeri sadece R_{4,1} rölesinden elde edilmiştir.



Şekil 6.9: Dördüncü fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerinin değişimi ve optimal I_p değerleri.

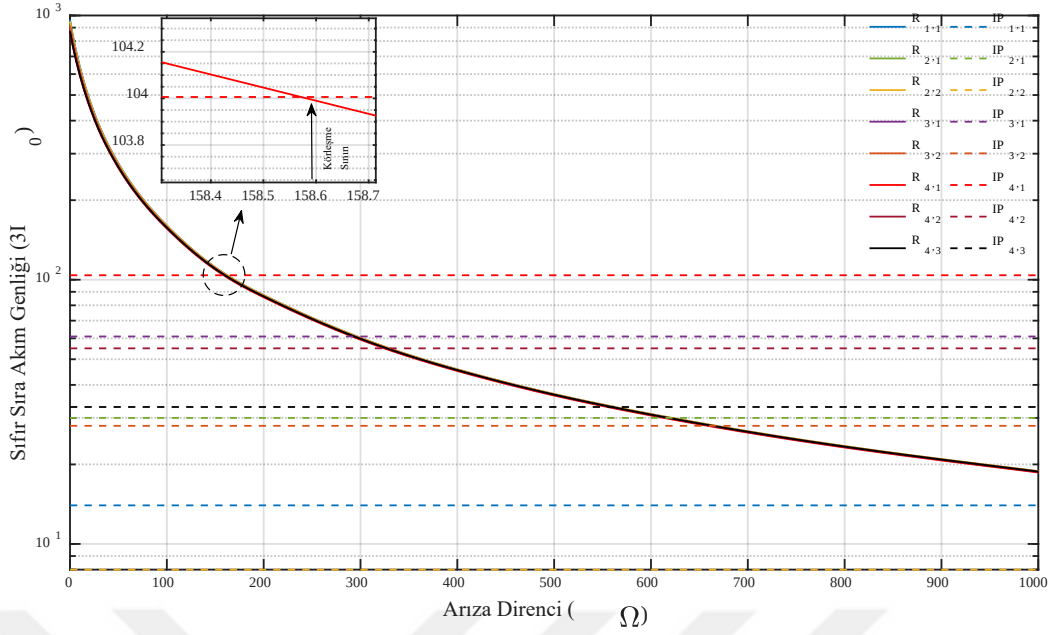
Farklı arıza noktalarında gerçekleştirilen TFT arızası analizleri sonucunda, kablo yoğun nötr noktası etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açma problemi geliştirilen yeni optimizasyon yaklaşımı yardımıyla elde edilen I_p ayarları ile giderilmiştir. Seçici koruma ilave koruma elemanı veya yönlü toprak rölesine ihtiyaç olmadan sağlanmıştır.

Önerilen I_p değerlerinin seçici koruma etkinliğini göstermek için incelenen diğer parametre arıza direncidir. Toprak arızası devresini bir arıza direnci üzerinde tamamlayabilir. Arıza direncinin artması ile arıza akım genliği azalmaktadır. Ters zaman karakteristiğinin kullanıldığı durumunda TFT arızasının temizleme süresi oldukça yükselecektir. Bu durum sabit zamanlı röle karakteristiğinin diğer bir avantajıdır. Arıza akım genliği azalmasına rağmen röle çalışma süresi değişmeyecektir.



Şekil 6.10: Farklı arıza dirençleri için röleler tarafından görülen sıfır sıra akım değişimi ve optimal I_p değerleri.

Şekil 6.10 ile ikinci fiderde yaşanan TFT arızası sırasında rölelerin gördüğü sıfır sıra akım değerlerinin arıza direncine göre değişimi gösterilmiştir. TFT arızası ikinci fiderin sonunda $R_{2,1}$ rölesinden 4941 metre, $R_{2,2}$ rölesinden 1767 metre uzakta gerçekleşmiştir. İncelenen arıza için NSO değeri iki olmalıdır. Önerilen eşik akımları dikkate alındığında tüm arıza direnç değerleri için NSO sayısının iki olduğu görülmektedir. Diğer rölelerin sıfır sıra akım genlikleri incelendiğinde hatalı açma yeni amaç fonksiyonu ile elde edilen eşik akım değeri ayarı ile engellenmiştir. Üç farklı arıza direnci sonucunda görüldüğü üzere, arıza direncinin artması arızalı fiderin gördüğü sıfır sıra akım genliğinin azalmasına neden olmaktadır. Kapasitif akım temelli hatalı açma problemi açısından bakıldığında, sağlıklı fiderlerde görülen sıfır sıra akım genliği de azalmaktadır. Böylece $R_F=0 \Omega$ için önerilen I_p değerlerinin tüm arıza direnç değerleri için kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin engellenmesi için yeterlidir. Fakat arıza direncinin artması ile birlikte arızadan sorumlu olan röleler arızayı algılama noktasında körleşebilirler.



Şekil 6.11: 20 Ω direnç üzerinde topraklı şebeke için hassasiyet analizi.

Şekil 6.11 ile sekiz röleye ve bu röleler için önerilen I_P değerlerine göre 154/33 kV 20 Ω üzerinde topraklı şebeke için hassasiyet analizi gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere bir önceki bölümde önerilen eşik akım değerleri belli bir arıza direncine kadar sistemi seçici koruyabilmektedir. Örneğin; dördüncü fiderin başında bulunan $R_{4,1}$ rölesi için optimizasyon yaklaşımı ile optimal 104 A değerine ayarlanmıştır. 104 A değeri dördüncü fideri kapasitif akım temelli hatalı açmalar için korusa dahi arıza direncinin 158.6 Ω değerinden yüksek değerlerinde arızanın tespit edilememesine neden olacaktır. Bu durumda şebeke arıza altında çalışacak ve arızayı beslemeye devam edecektir. Arıza altında çalışma gerilim yükselmesine yol açacağı için izolasyon zayıflamasına neden olup, ikinci arızayı tetikleyebilir.

6.5. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı Hakkında Tartışma

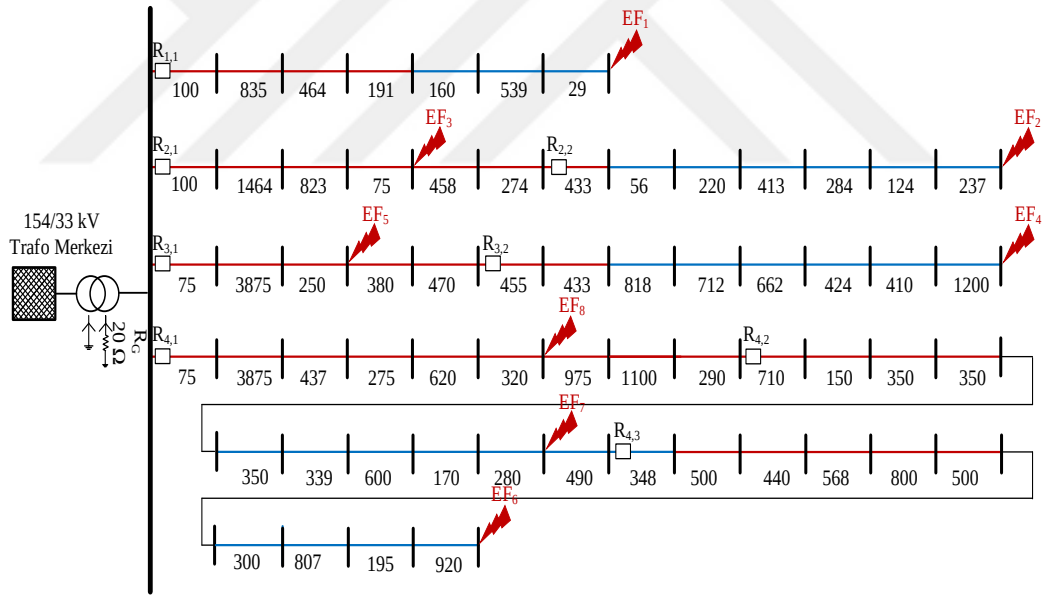
Bu bölümde önerilen optimizasyon yaklaşımının farklı saha zorluklarına karşı muhtemel handikapları ve çözüm yöntemleri tartışılmıştır. Saha uygulamalarında yaşanan zorluklar şu şekilde sıralanabilir.

- Dağıtım şebekesinin hem havai hat hem yeraltı kablosu içeren hibrit yapıda olması.

- ii) Dağıtım şebekesinde yük akımı dengesizliği ve kapasitif akım dengesizliği olması.
- iii) Sahada kullanılan rölelerde ölçüm hatası gerçekleşmesi.
- iv) Dağıtım şebekesinde farklı nötr topraklama türlerinin kullanılması

6.5.1. Dağıtım Şebekesinin Hibrit Hat Yapısına Sahip Olması

Etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekelerinde yaşanan hatalı açmaların sebebi arızalı fideri sağlıklı fiderler üzerinden besleyen ve yük akımlarına ters yönde akan kapasitif akımlar olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu tezin odaklandığı nokta kablo şebekeleri ve farklı kesitlerdeki yeraltı kablolarıdır. Bununla birlikte dağıtım şebekelerinin pek çoğu havai hat ile yeraltı kablolarının birlikte olarak kullanıldığı hibrit şebekelerdir.



Şekil 6.12: Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi.

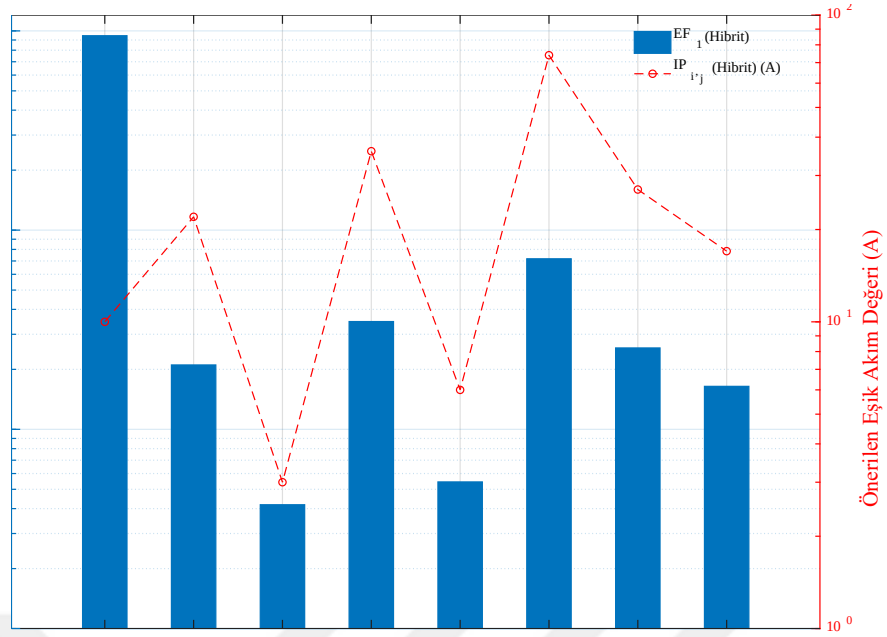
Bu tez kapsamında önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı hibrit şebekelere de uygulanabilmektedir. Şekil 6.4 ile gösterilen yöntem uygulama adımları yeni şebeke için tekrar edilir. Yeni şebeke için yeni $I_{EF_{i,j,k}}$ sıfır sıra akım genliği ve yeni $I_{P_{i,j}}$ ayar değeri önerilir. Önerilen optimizasyon yaklaşımının hibrit şebekede test edilmesi için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi hibritleştirilmiştir. Şekil 6.12

ile gösterilen şebekede kırmızı ile gösterilen yerler yeraltı kablosunu mavi ile gösterilen yerler havai hattı temsil etmektedir. Yeraltı kablosu olarak 240 mm² XLPE kablo kullanılmıştır. Havai hat için ise *Pigeon* iletken kullanılmıştır. Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı **Şekil 6.12**'de gösterilen hibrit şebekeye uygulanmıştır. Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için kapasitif akım temelli hatalı açmaları engellemek için elde edilen optimal I_p ayarları **Tablo 6.4** ile listelenmiştir. Beklendiği gibi tamamen kablo ile donatılmış şebekeden daha düşük I_p ayarları hibrit şebeke senaryosu için elde edilmiştir. Sistemin toplam kapasitif akım değeri azaldığı için I_p değerinin azalması da beklenen bir sonuçtur.

Tablo 6.4: Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_p ayarları.

Röle Ayar	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$
TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
I_p (A)	10	22	3	36	6	74	27	17

Şekil 6.13 ile hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde hat sonunda gerçekleşen TFT arızası (EF_1) sırasında rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlikleri gösterilmiştir. İlgili arıza için NSO değeri bir olmalı ve bu değer sadece $R_{1,1}$ rölesi tarafından üretilmelidir. **Şekil 6.13**'de açıkça görüldüğü üzere sadece $R_{1,1}$ rölesi eşik akım değerinin üzerinde sıfır sıra akım görmüştür. Böylece, optimum I_p değerleri kullanarak herhangi bir hatalı açma probleminin gerçekleşmesinin önüne geçilmiştir. Tamamen kablo senaryosu ile kıyaslandığında sağlıklı fiderlerde bulunan röleler tarafından görülen daha düşük sıfır sıra akımı görülmüştür. Böylece önerilen yöntem ile görülen sıfır sıra akım değeri arasında marjin fazladır. Bu durumda hibrit şebekeler tamamen kablo yoğun şebekelerden daha fazla ölçüm hatasına dayanıklıdır yorumu yapılabilir.



Şekil 6.13: Hibrit 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde farklı noktalarda gerçekleşen TFT arızası genliklerini değişimi ve optimal I_p değerleri.

6.5.2. Koruma Röleleri Tarafından Gerçekleşen Ölçüm ve Hesaplama Hataları

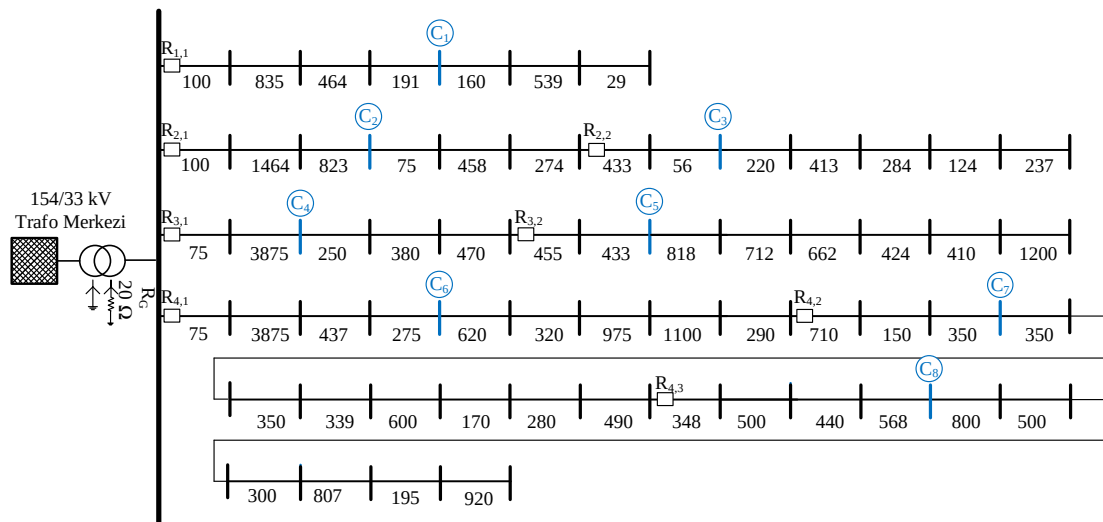
OG fiderlerine yerleştirilen her bir akım trafosu veya akım sensörünün vektörel toplamı sıfır sıra akım veya homopolar akım değerini vermektedir. Homopolar akım değerinin elde edilmesi için Holmgren filtre kullanılmaktadır. Bu tip filtrelerde homopolar akım değerinde 0.5 A'lık bir ölçüm hatası olacağı [60] numaralı çalışmada ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra sahada pek çok farklı tip ve yetenekte ticari toprak rölesi kullanılmaktadır. Her bir toprak rölesini ölçüm kabiliyeti farklıdır. Bu nedenle saha uygulamalarında yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği I_p değerine belirli bir marjin güvenlik faktörü olarak eklenmesi dağıtım şebeke işletmecesi tarafından istenilebilir.

6.5.3. Dağıtım Şebekesinde Yük Akımı ve Kapasitif Akım Dengesizliği

Dağıtım şebekeleri iletim şebekeleri ile kıyaslandığında daha fazla akım dengesizliğine sahiptir. Havai hat yoğun şebekelerde toprak rölelerinin I_p değerleri genellikle yük akımının dengesizliğine göre % 30 ile % 40 arasında ayarlanmaktadır.

Alçak gerilim tarafında yaşanacak yük akımı dengesizliği nötr noktasından sıfır sıra akım akmasına neden olacaktır. Fakat Δ /yıldız bağlantının sıfır sıra eşdeğer devresi göz önüne alındığında Δ taraf ile yıldız taraf birbirinden izoledir. Bu nedenle yıldız tarafta yaşanan bir yük akım dengesizliği veya arıza Δ tarafa sirayet etmemektedir. Bu nedenle yıldız tarafında yaşanılacak herhangi bir akım dengesizliği önerilen yöntemin performansını ve önerilen I_p değerlerini olumsuz etkilemeyecektir. Yük akımının dengesizliğini yanı sıra şebekede kablo yerleşiminden dolayı kapasitif akım dengesizliği görülebilir. Kapasitif akım dengesizliğini incelemek için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde her bir toprak koruma rölesinin koruma bölgesinde en az bir kapasitif dengesizlik görülecek şekilde yeniden kurgulanmıştır.

Şekil 6.14 ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde kapasitif akım dengesizliğinin oluşturulduğu baralar mavi ile işaretlenmiştir. Toplam sekiz farklı barada kapasitif akım dengesizliği oluşturulmuştur. Kapasitif akım dengesizliği sadece bir faza faz-toprak kapasitesi eklenerek oluşturulmuştur. Yeni şebeke topolojisi için önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı yöntem adımlarına uyumlu olarak uygulanmıştır. Yeni şebeke topolojisi ATP-Draw'da modellenmiştir. Yeni şebeke için TFT arıza analizleri yenilenerek güncel $I_{EF_{i,j,k}}$ sıfır sıra akım genlikleri elde edilip amaç fonksiyonu çözdürülmüştür. Amaç fonksiyonu sonucu elde edilen optimal $I_{P_{i,j}}$ ayar değerleri **Tablo 6.5** ile listelenmiştir.

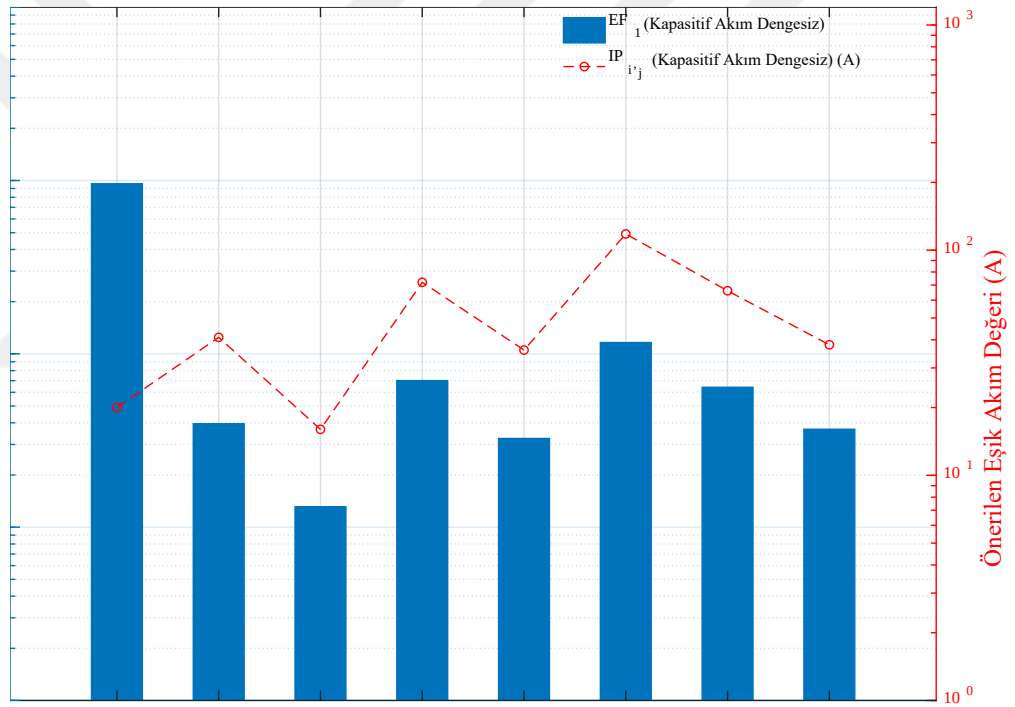


Şekil 6.14: 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde kapasitif akım dengesizliğinin oluşturulduğu baralar.

Tablo 6.5: Kapasitif akım dengesizliği senaryosu için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_P ayarları.

Röle Ayar	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$
TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
I_P (A)	20	41	16	72	36	118	66	38

Tablo 6.5 ile görüldüğü üzere şebekede yaşanan kapasitif akım dengesizliği önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı sonucu bulunan I_P değerleri dengeli durumda bulunan I_P değerlerinden daha yüksektir.



Şekil 6.15: Kapasitif akım yönünden dengesiz 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde gerçekleşen TFT arızası genliklerini değişimi ve önerilen I_P değerleri.

Şekil 6.15 ile kapasitif akım yönünden dengesiz 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde hat sonunda gerçekleşen TFT arızası (EF_1) sırasında rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlikleri gösterilmiştir. İlgili arıza için NSO değeri bir olmalı ve bu değer sadece $R_{1,1}$ rölesi tarafından üretilmelidir. **Şekil 6.15'**de

açıkça görüldüğü üzere sadece $R_{1,1}$ rölesi eşik akım değerinin üzerinde sıfır sıra akım görmüştür. Böylece, optimum I_p değerleri kullanarak herhangi bir hatalı açma probleminin önüne kapasitif akım yönünden dengesiz radyal dağıtım şebekeleri için de geçilmiştir.

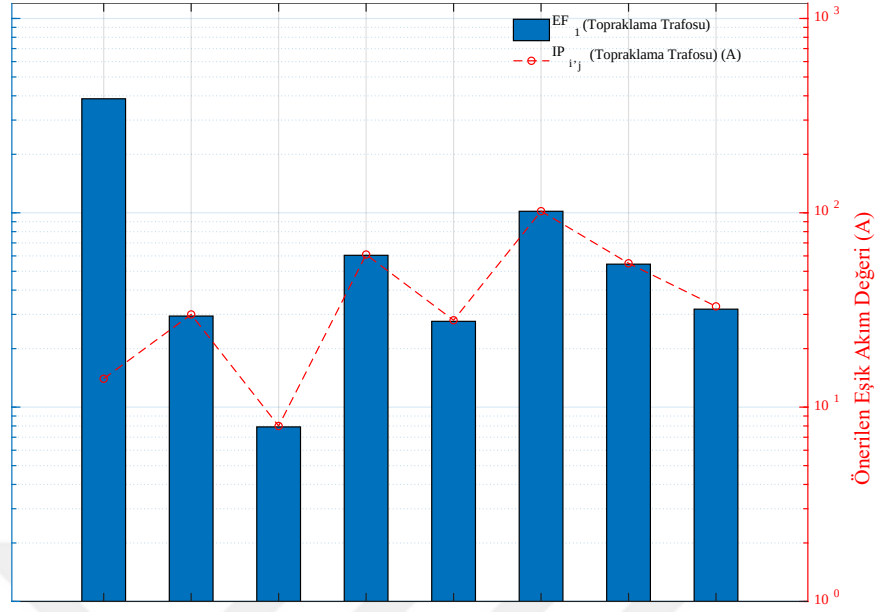
6.5.4. Dağıtım Şebekesinde Farklı Nötr Topraklama Türü Kullanılması

Bu bölümde önerilen MINLP optimizasyon yaklaşımının performansı farklı nötr topraklama türü için incelenmiştir. 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin nötr topraklama türü direnç topraklı yerine endüktif karakterli 33Ω 'luk topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durum için TFT arıza analizler gerçekleştirilmiştir. Yeni senaryo için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde her bir röle konumundan TFT arızası oluşturularak **Şekil 6.4**'de önerilen adımlar uygulanmıştır. Güncel $I_{EF_{i,j,k}}$ sıfır sıra akım genlikleri elde edilip amaç fonksiyonu çözdürülmüştür. Amaç fonksiyonu sonucu elde edilen optimal $I_{p_{i,j}}$ ayar değerleri **Tablo 6.6** ile listelenmiştir. Direnç topraklı şebeke ile benzer şekilde en uzun fiderde bulunan $R_{4,1}$ rölesi en yüksek sıfır sıra akım değerine sahiptir.

Tablo 6.6: Topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durumda 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için optimal I_p ayarları.

Röle Ayar	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$
TDS (s)	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1
I_p (A)	14	30	8	61	28	102	55	32

Şekil 6.16 ile nötr noktası topraklama trafosu üzerinden topraklı 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için birinci fiderde hat sonunda gerçekleşen TFT arızası (EF_1) sırasında rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlikleri ve optimal I_p ayarları gösterilmiştir. İlgili arıza için NSO değeri bir olmalı ve bu değer sadece $R_{1,1}$ rölesi tarafından üretilmelidir. **Şekil 6.16**'de açıkça görüldüğü üzere sadece $R_{1,1}$ rölesi eşik akım değerinin üzerinde sıfır sıra akım görmüştür. Optimal I_p ayarları yardımıyla 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin topraklama trafosu üzerinde topraklı olduğu durumda hatalı açma problemi giderilmiştir.



Şekil 6.16: Önerilen optimizasyon yaklaşımının topraklama trafosu kullanımında seçicilik performansı.

Topraklama trafosu üzerinden topraklı 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde hatalı açma problemi engellenmesinin yanı sıra arızalı fiderden ölçülen sıfır sıra akım genliği direnç topraklı şebeke ile kıyaslandığında oldukça düşüktür.

6.6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde yönsüz toprak koruma için literatürde var olan optimizasyon yaklaşımları incelenmiştir. Bu optimizasyon yaklaşımlarının tümünün etkin topraklı dağıtım şebekeleri için geliştirildiği gösterilmiştir. Etkin topraklı şebekelerde yüksek genlikli arıza akımı arızalı fiderde görülmektedir. Düşük genlikli sıfır sıra akımı ise sağlıklı fiderlerde görülmektedir. Böylece ters zaman eğrisi kullanılarak TDS ve I_p değişkenlerine göre röle ayarları optimize edilebilmektedir.

Fakat dağıtım şebekeleri, özellikle Avrupa ve Türkiye’de etkin topraklanmamış şebekelerdir. Arıza akım genliği etkin topraklı şebekeden daha düşük olmasının yanı sıra sağlıklı fiderlerde yüksek genlikli sıfır sıra akım görülmektedir. Sabit zamanlı röle karakteristiği kullanıldığı için TDS değeri sabittir. Etkin topraklanmamış şebekelerde, kapasitif akım temelli hatalı açmaları engellemek için I_p değişkenini optimize eden

yeni bir amaç fonksiyonu MINLP problemi olarak kurgulanmıştır. Kurgulanan amaç fonksiyonu GAMS ile çözdürülmüştür. Yeni optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen toprak rölelerinin I_p değerleri ile 62 baralı gerçek etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açmalar giderilmiştir.

Yöntemin etkinliğini incelemek için çeşitli senaryolar incelenmiştir. İncelenen senaryolar şebekenin hibrit yapıda olması, şebekede kapasitif akım dengesizliği olması, arızanın bir direnç üzerinden gerçekleşmesi ve nötr noktasının topraklama trafosu üzerinden topraklanması şeklinde sıralanmaktadır. Her bir senaryoda yöntem başarı ile uygulanmıştır. Yöntemin önerdiği optimal I_p değerleri ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi seçici bir şekilde korunmuştur. Önerilen optimizasyon yaklaşımı için gerekli olan bilgi koruma rölesi konumlarından görülen sıfır sıra akım genliğidir. Bu nedenle yönsüz toprak koruma için önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı tüm radyal topolojilere başarı ile uygulanabilir.

7. YÖNLÜ TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Yönlü toprak koruma yöntemi temel olarak iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan korum yöntemlerinden biridir. Fakat, dağıtım şebekelerinin TFT arızasına karşı korunmasında yönlü toprak koruma rölesi kullanımı artmaktadır. Dağıtım şebekesinin radyal yerine döngü yapıda işletilmesi, radyal fiderlere DÜ eklenmesi ve yeraltı kablolarının kapasitif akımları yönlü toprak rölesinin kullanılması gibi sebeplerden dolayı yönlü toprak koruma rölesi kullanım ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Yönlü toprak korum rölesinin kullanılması için işletme büyüklüğü ile referans büyüklüğe ihtiyaç vardır. Genel olarak referans büyüklüğün şebeke parametrelerine göre fazla etkilenmemesi istenmektedir. Bu nedenle TFT arızaları için referans büyüklük V_0 değeridir. İşletme büyüklüğü ise her bir fiderden ölçülen sıfır sıra akım vektörünün açısıdır. Arızalı ve sağlıklı fider ayrımı sıfır sıra akım açılarına göre yapılmaktadır. Arızanın gerçekleştiği fiderin sıfır sıra akım açısı röle çalışma bölgesi içinde bulunması gerekmektedir. Sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım açısı ise çalışma bölgesi dışında bulunmalıdır. Diğer bir deyişle toprak akım vektörü arızalı fider için çalışma bölgesi içinde, sağlıklı fiderler için ise çalışma bölgesi dışında bulunmalıdır.

7.1. Literatürdeki Optimizasyon Yaklaşımları

Literatürde faz ile toprak açısı ayarının optimize edildiği çalışmalar genel olarak son zamanlarda yayınlanmaya başlamıştır. [118] numaralı çalışmada RCA değeri farklı arıza noktaları ve arıza tipleri için optimize edilmiştir. Amaç fonksiyonu **Tablo 7.1** ile gösterilmiştir. Kurgulanan amaç fonksiyonu sadece tek bir karar değişkeni içermektedir. k_i katsayısı arıza olasılığını göstermektedir. Önerilen optimizasyon yöntemi direkt topraklı 220 kV'luk çift devre iletim şebekesinde uygulanmıştır. TFT ve iki faz toprak arızası incelenmiştir.

Tablo 7.1: Röle aç ı ayar optimizasyonu ile ilgili literatür çalışmaları.

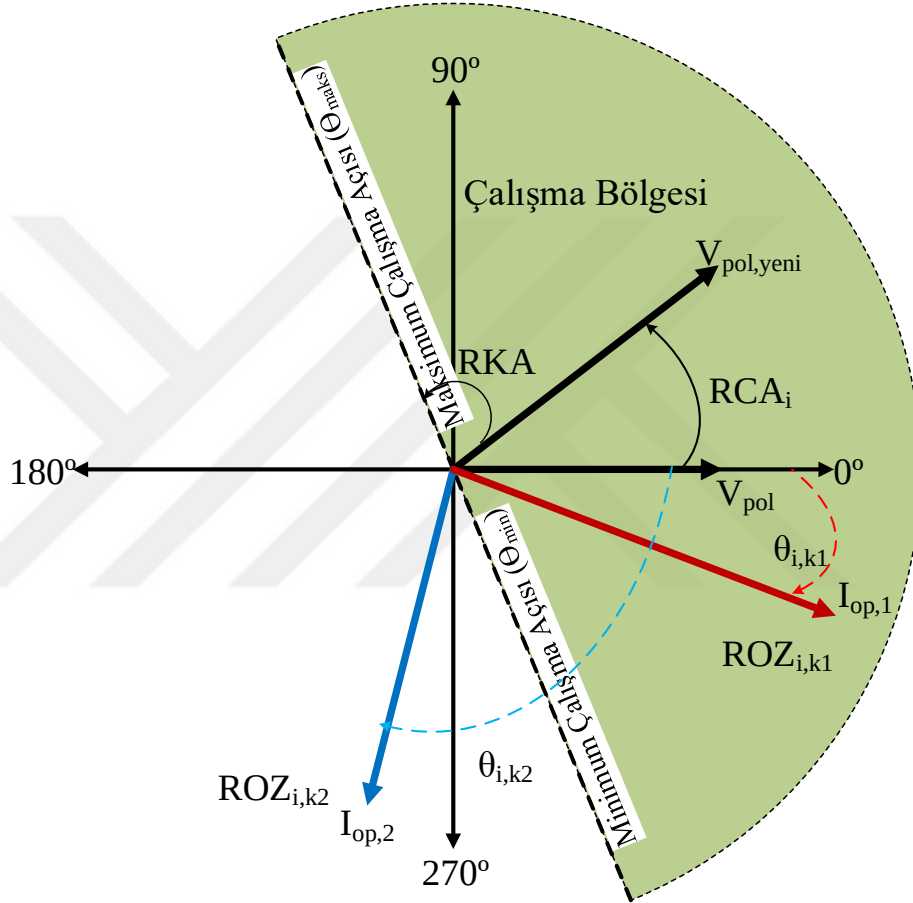
Makale	Amaç Fonksiyonu	Özellikleri
[118]	$\min \sum_{i=1}^n k_i \phi_i - RCA $	Farklı arıza tipleri için ve farklı arıza noktalarına uygulanması
[119]	$\min \sum_{i=1}^n s_i k_i \phi_i - RCA $	Arızanın tespit edilip edilemediğinin kontrol edilmesi
[95]	$\min \sum_{i=1}^n c_i \phi_i - \Delta RCA $	Farklı arıza tipleri olmasına rağmen tek bir ATA ayarı önerilmiştir.

Önerilen yöntemin etkinliğı farklı arıza dirençleri için test edilmiştir. Aynı yazarlar tarafından [119] numaralı çalışmada diğ er amaç fonksiyonu önerilmiştir. Bir önceki amaç fonksiyonuna ek olarak s_i binary kontrol değışkeni ilave edilmiştir. Böylece sadece incelenen arıza simölasyonlarından başlatma sinyali oluşturan arızalar amaç fonksiyonu katılmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu hem sıfır sıra bileşen hem de negatif sıra bileşen için ayrı ayrı kurgulanmıştır. Düşük değ ere sahip amaç fonksiyonunun önerdiği RCA değ eri rölelere set edilmiştir. Yöntemin etkinliğı aynı şebekede üzerinde test edilmiştir. Farklı iki ticari koruma rölesinin (ABB REL 670 ve SIEMENS 7SA87) ayar performansı karşılaştırılmıştır. Hem [118] hem de [119] numaralı çalışmalarda şebekede bulunan tüm koruma rölelerinin ayarı kolaylık olması açısından tek bir RCA değ eri ile belirlenmiştir. [95] numaralı çalışmada toprak arızasının yanı sıra diğ er arıza türleri de amaç fonksiyonu iç erisine dahil edilmiştir. Amaç fonksiyonu yardımıyla her bir koruma rölesi için aynı ve tek bir RCA değ eri önerilmiştir. Literatürdeki kısıtlı sayıda çalışma incelendiğ inde toprak arızasının sadece etkin topraklı şebekeler için analiz edildiğı açıkça görölmektedir. Fakat dağıtım şebekelerinin büyük bir çoğ unluğ unun etkin topraklanmadığı göz önüne alındığında amaç fonksiyonun yenilenmesi gerekliliğı elzemdir.

7.2. Önerilen Optimizasyon Yaklaşımı

Şekil 7.1 ile yönlü toprak koruma rölesine ait referans, iş letme ve ayar büyüklükleri gösterilmiştir. Şekil 7.1’de göröldüğü üzere referans vektör olan V_{pol} vektörü RCA_i derece kadar döndürölmektedir. Yeni referans vektör RCA_i ’dir. Yeni referans vektör için arızalı fider sağılıklı fider ayrımı yapılmalıdır. Ayrıca yeni RCA_i değ eri için sadece

arızalı fiderin sıfır sıra akım açısı çalışma bölgesine girmelidir. Diğer fiderlerin sıfır sıra akım açısı çalışma bölgesine girmemelidir. Bu nedenle en optimum RCA_i ile çalışma bölgesine giren röle sayısını minimize etmek için yeni bir amaç fonksiyonu ve optimizasyon yaklaşımı bu tez kapsamında önerilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonu denklem (7.1) ile gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Yönlü toprak koruma rölesine ait referans, işletme ve ayar büyüklükleri.

$$OF = \min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f |RCA_i - \phi_{i,k}| ROZ_{i,k} \quad (7.1)$$

Burada; n : şebekede bulunan toplam yönlü toprak röle sayısını temsil etmektedir. f : şebekede gerçekleşen TFT arıza sayısını temsil etmektedir. RCA_i : i . rölenin aç ayarını (ATA) temsil eden tam sayı karar değişkenidir. $\phi_{i,k}$: i . rölenin k . noktadaki TFT arızası

sırasında referans vektöre göre sıfır sıra açısını temsil etmektedir. $ROZ_{i,k}$: i. rölenin k. Noktadaki TFT arızası için çalışma bölgesinde bulunup bulunmadığını ifade eden ve denklem (7.2) ile verilen binary (0/1) kontrol değişkenidir. $ROZ_{i,k}$ ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (7.3) ile gösterilmiştir.

$$ROZ_{i,k} \in \{0,1\} \quad (7.2)$$

$$ROZ_{i,k} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } \emptyset_{min} < \emptyset_{i,k} < \emptyset_{max} \text{ (k = 1, 2, \dots, f)} \\ 0, & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (7.3)$$

$$\emptyset_{max} = RCA_i + ROA^\circ; \emptyset_{min} = RCA_i - ROA^\circ \quad (7.4)$$

$$RCA_{min} < RCA_i < RCA_{max}$$

$\emptyset_{i,k}$ değeri eğer röle çalışma bölgesi içerisinde düşüyor ise $ROZ_{i,k}$ değeri 1, aksi takdirde 0 değerini alacaktır. Röle çalışma bölgesinin maksimum ve minimum sınırları denklem (7.4) ile ifade edilmektedir. Denklem (7.4)'da $\emptyset_{max}$ maksimum çalışma bölgesi sınırını, $\emptyset_{min}$ minimum çalışma sınırını ifade etmektedir. ROA değeri röle çalışma açısı olmakla birlikte genel olarak 90° kabul edilmektedir. Bununla birlikte herhangi bir k arızasında; arızanın temizlenmesi için en az bir rölenin arızayı algılaması ve çalışması gerekmektedir. Bu koruma felsefesi denklem (7.5) ile kısıt fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Bu kısıt fonksiyonu toprak arıza tespit kısıt fonksiyonu olarak isimlendirilmiştir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f ROZ_{i,k} \geq 1 \quad (7.5)$$

Önerilen amaç fonksiyonu optimal RCA ayarı ile TFT arızası sırasında çalışan koruma rölesi sayısını minimize etmek hedeflediği için sıfır değeri üretebilir. Arıza tespit kısıt fonksiyonu yardımıyla amaç fonksiyonun sıfır değeri üretmesi engellenmektedir. Herhangi bir k arızasının seçici şekilde dağıtım şebekesinden izole edilmesi için

arızadan sorumlu birincil toprak koruma rölesinin açma sinyali göndermesi gerekmektedir. Bu seçicilik kısıtı denklem (7.6) ile optimizasyon sürecine eklenmiştir.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^f ROZ_{i,k} = n \quad (7.6)$$

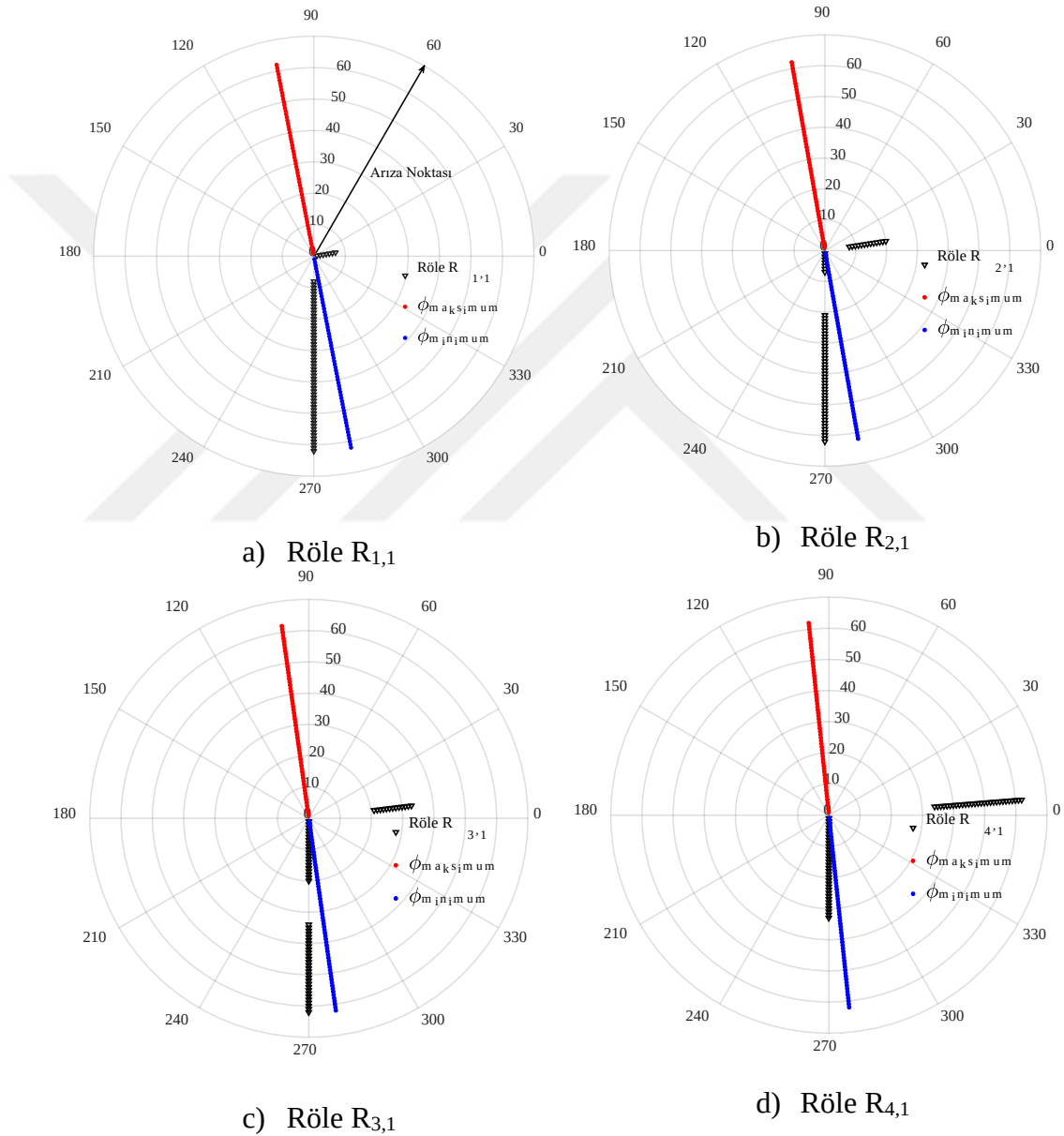
7.3. Yönlü Toprak Koruma Yöntemi İçin Önerilen Yeni Optimizasyon Yaklaşımının 62 Baralı Etkin Topraklanmamış Radyal Dağıtım Şebekesine Uygulanması

Yönlü toprak koruma yöntemi için önerilen yeni optimizasyon yaklaşımının etkinliği 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesine uygulanmıştır. **Şekil 6.5** ile gösterilen topolojide yönlü toprak koruma rölesi için gerekli olan referans gerilim değeri ortak baradan elde edilmektedir. Genel olarak saha uygulamalarında alt merkezlerde gerilim trafosu kullanımı hem ekonomik hem de tercih edilebilir bir uygulama değildir. Bu nedenle saha gerçekliği ile uyumlu olması açısından sadece hat başlarında yer alan koruma rölelerin açma ayarları optimize edilmiştir. Önerilen optimizasyon yaklaşımı kullanılarak farklı kablo kesitleri için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde optimum RCA ayarları **Tablo 7.2** ile listelenmiştir. Tabloda görüldüğü üzere kablo kesit değerinin değişmesi önerilen RCA değerinin de değişmesine neden olmaktadır.

Tablo 7.2: Farklı kablo kesitleri için optimum RCA ayarları.

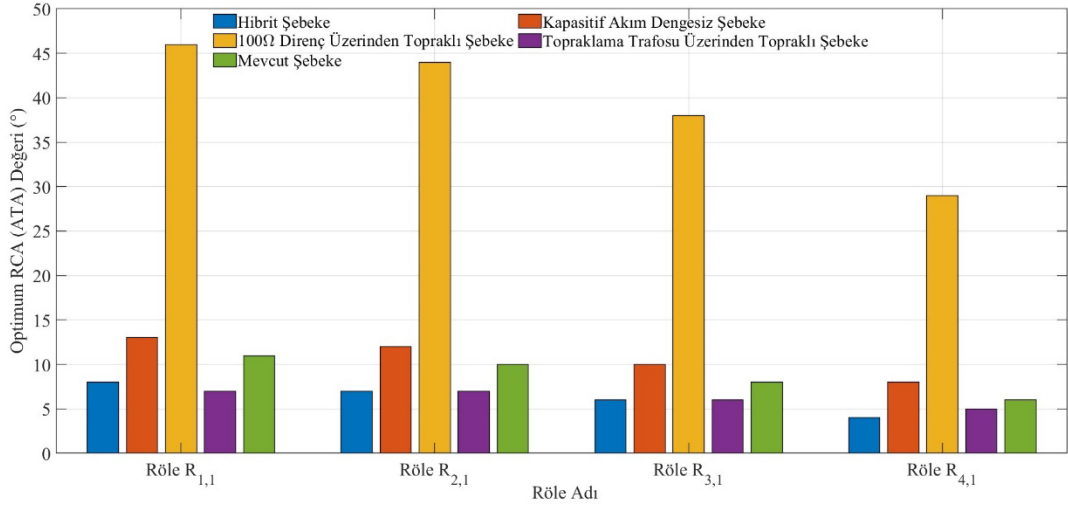
Kablo /Röle	70 mm ²	95 mm ²	120 mm ²	150 mm ²	185 mm ²	240 mm ²	400 mm ²
RCA ₁	8°	8°	9°	10°	10	11°	15°
RCA ₂	7°	8°	8°	9°	9°	10°	14°
RCA ₃	6°	6°	7°	7°	8°	8°	12°
RCA ₄	4°	5°	5°	5	6°	6°	11°

Ayrıca her bir yönlü toprak koruma rölesinin optimum RCA değeri birbirinden farklıdır. En yüksek RCA değeri en kısa fiderde en düşük RCA değeri ise en uzun fiderde elde edilmiştir. En kısa fiderde gerçekleşen arızada kısa fiderin mesafesi kadar kapasitif akım arızalı fiderden döneceği için en kısa fiderin sıfır sıra açısı daha yüksek olacaktır. Benzer şekilde en uzun fiderde gerçekleşen arızada sıfır sıra açısı daha düşük olacaktır.



Şekil 7.2: 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının röle bazlı sonuçları (240 mm² XLPE kablo).

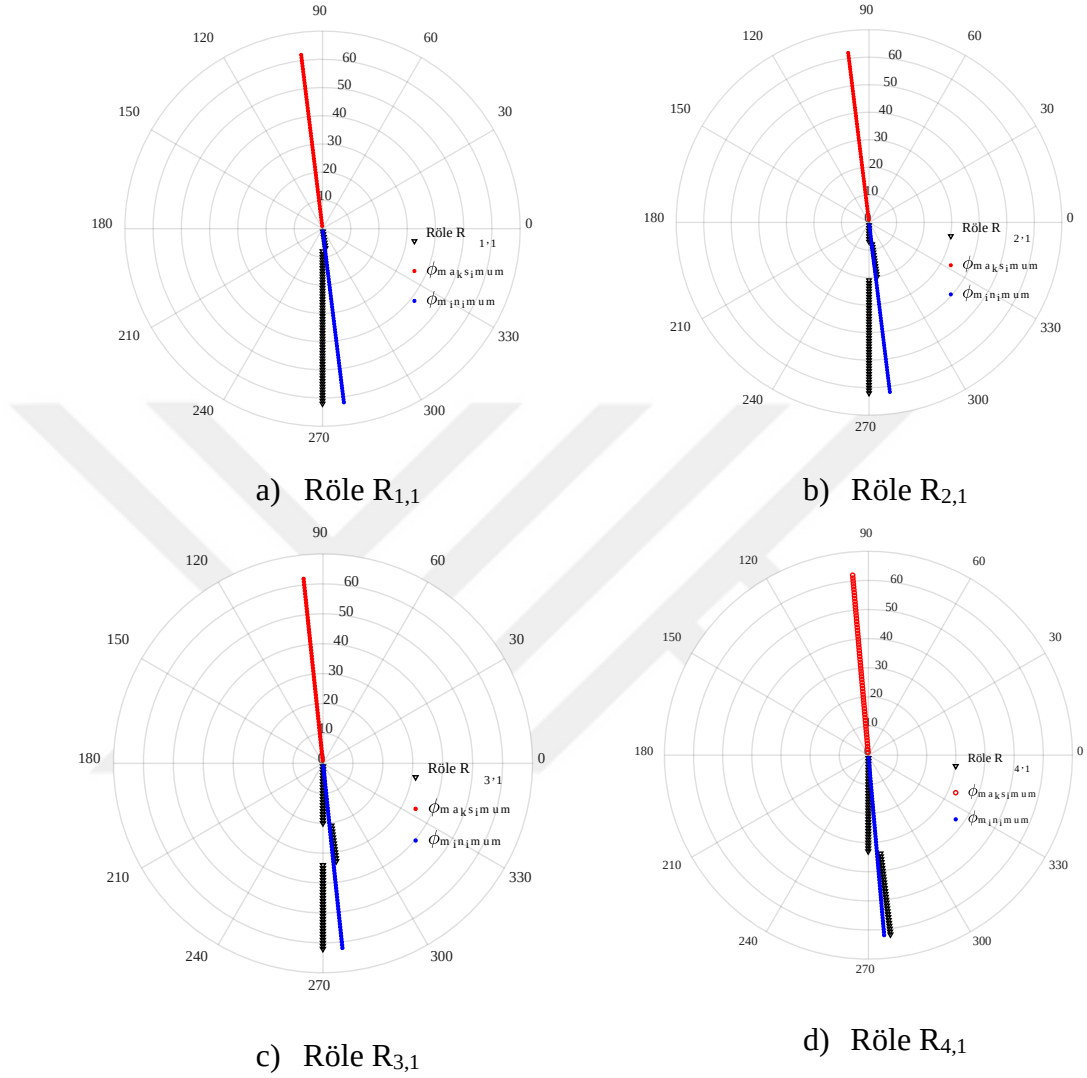
Şekil 7.2 ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının koruma rölesi bazlı sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar 240 mm² kesitli XLPE kablo için elde edilmiştir. **Şekil 7.2**'den açıkça görüldüğü üzere yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği optimum RCA değerleri ile tüm yönlü toprak koruma rölelerinde seçici koruma sağlanmıştır. Örneğin R_{1,1} rölesi için RCA değeri 11° hesaplanmıştır. Bu durumda $\phi_{maksimum}=101^\circ$ ve $\phi_{minimum}=-79^\circ$ olarak hesaplanmaktadır. R_{1,1} rölesinin sıfır sıra açısı değerleri arızadan sorumlu olduğu arıza noktaları için çalışma bölgesi içerisinde bulunmaktadır. R_{1,1} koruma rölesinin koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalar için ise R_{1,1} rölesi tarafından görülen sıfır sıra açısı değeri çalışma bölgesi dışında bulunmaktadır. Böylece R_{1,1} koruma rölesi kendi fiderinde veya komşu fiderlerde gerçekleşen TFT arızalarını ayırt edilmiştir. Benzer çıkarımları diğer fiderlerde bulunan yönlü toprak röleleri içinde gerçekleştirmek mümkündür. Böylece yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği optimal RCA değerleri ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmiştir. 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde bulunan yönlü toprak koruma rölelerine tipik RCA değerlerinin uygulanması seçici korumanın sağlanmamasına neden olacaktır. Örneğin RCA=-45° değeri için yönlü toprak koruma rölelerinin çalışma bölgesine ait maksimum ve minimum açı değerleri $\phi_{maksimum}=45^\circ$ ve $\phi_{minimum}=-135^\circ$ şeklinde olacaktır. Bu durumda hem arızalı fiderin hem de sağlıklı fiderin sıfır sıra açısı vektörü çalışma bölgesi içerisinde bulunacaktır. Böylece tipik RCA ayarı ile yönlü toprak koruma rölesi kullanımı kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin çözümü noktasında seçici koruma sağlayamayacaktır. Önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı ile optimum açı ayarının seçicilik performansı 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde farklı senaryolar için incelenmiştir. Birinci senaryo şebekenin hibrit olması durumudur. İkinci senaryoda şebekede kapasitif akım dengesizliğini mevcuttur. Üçüncü senaryoda nötr noktası R_G=100 Ω direnç üzerinden topraklıdır. Dördüncü senaryoda ise 62 baralı radyal dağıtım şebekesi topraklama trafosu üzerinden topraklıdır.



Şekil 7.3: Farklı şebeke senaryoları için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde elde edilen optimum RCA ayarları.

Şekil 7.3 ile farklı şebeke senaryoları için 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde elde edilen optimum RCA ayarları gösterilmiştir. Şekil 7.3'te görüldüğü üzere her bir senaryoda farklı RCA ayar değerleri elde edilmiştir. 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin hibrit olduğu durumda toplam kablo mesafesi azalmıştır. Bu nedenle önerilen RCA değerleri mevcut şebekeden daha düşük ayar değerleridir. Tam tersi durum ise 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde kapasitif akım dengesizliği olduğu senaryoda gözlemlenmektedir. Kapasitif akım dengesizliğinin olması koruma röleleri tarafından görülen toplam kapasitif akım değerinin artmasına böylece RCA değerinin artmasına neden olmaktadır. Mevcut şebeke senaryosu ile kıyaslandığında her bir rölenin RCA değerinin kapasitif akım dengesiz olduğu durumda daha yüksek ayar değerine sahip olduğu Şekil 7.3'te görülmektedir. Nötr noktasının direnç değerinin artması önerilen RCA değerinin artmasına neden olmaktadır. İncelenen senaryolar arasında en yüksek RCA değeri nötr noktasının 100 Ω direnç üzerinden topraklı olduğu senaryoda elde edilmiştir. Nötr noktasının direnç üzerinden topraklı olduğu durumda arızalı ve sağlıklı fider sıfır sıra açıları arasında Şekil 7.2 ile görüldüğü üzere ayırt edilebilir seviyelerde açı farkları bulunmaktadır. Böylece yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği RCA değerleri yardımıyla direnç topraklı dağıtım şebekeleri farklı şebeke parametrelerinde (hibrit, kapasitif akım yönünden dengesiz, farklı değere sahip nötr direnci) dahi seçici koruma sağlamaktadır. Nötr noktasının endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklandığı durumda yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği RCA

değerleri **Şekil 7.3** ile gösterilmiştir. **Şekil 7.3**'te görüldüğü üzere mevcut şebekeye kıyasla her bir yönlü toprak rölesi için daha düşük RCA değerleri elde edilmiştir.

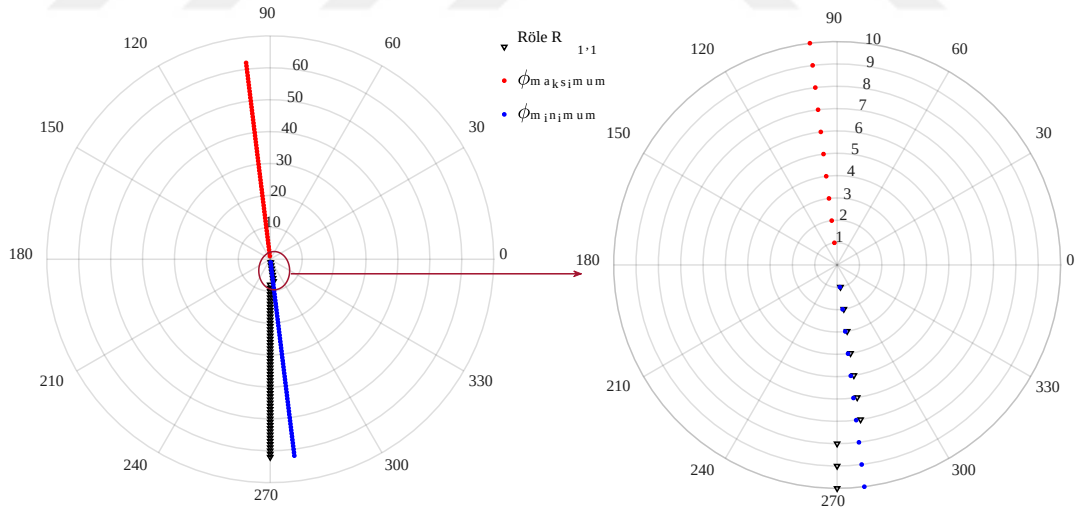


Şekil 7.4: 62 baralı radyal dağıtım şebekesi için tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının röle bazlı sonuçları (240 mm² XLPE kablo-Topraklama trafosu üzerinden topraklı).

Bunun sebebi olarak kullanılan yeraltı kablusunun kapasitif akım etkisi ile topraklama trafosunun endüktif akım etkisi birbiri azaltacak etkiye sahip olmasıdır. **Şekil 7.4** ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durum için tüm arıza noktalarında önerilen optimum RCA ayarının seçicilik performansının koruma rölesi bazlı sonuçları gösterilmiştir. **Şekil 7.4** ile görüldüğü üzere nötr noktasının direnç üzerinden topraklı veya topraklama trafosu üzerinden topraklı olması yönlü toprak rölelerinin sıfır sıra aç davranışını

etkilemektedir. Her iki durumda da sağlıklı fiderler -90° bölgesinde kümelenmektedir. Fakat, topraklama trafosu ile topraklı şebeke senaryosunda arızalı fider ile sağlıklı fider arasındaki açı farklı oldukça düşüktür. Her ne kadar optimal RCA ayarı ile yönlü toprak rölelerinin çalışma bölgeleri seçici bir şekilde belirlenmiş olsa bile, arızalı fiderlere ait sıfır sıra açıları çalışma bölgesine oldukça yakındır. Saha uygulamalarındaki açı ölçüm hataları dikkate alındığında açı farkının düşük değerde olması uygulama zorluğuna neden olmaktadır.

Şekil 7.5 ile Röle $R_{1,1}$ 'e ait yakınlaştırılmış grafik ilk on arıza noktası için gösterilmiştir. $RCA=7^\circ$ değeri yönlü toprak koruma rölelerinin çalışma bölgesine ait maksimum ve minimum açı değerleri $\phi_{maksimum}=97^\circ$ ve $\phi_{minimum}=-83^\circ$ şeklinde olacaktır. İlk yedi arıza noktası için beklendiği gibi $R_{1,1}$ rölesi çalışma bölgesi içerisinde bulunmaktadır. İlk yedi arıza noktası için $R_{1,1}$ rölesinin sıfır sıra açı değeri yaklaşık olarak -81° 'dir. Fakat bu açı değeri minimum çalışma açısı olan -83° 'ye oldukça yakındır. Bu nedenle yeni optimizasyon yaklaşımının önerdiği RCA değeri topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerin saha uygulamalarında kapasitif akım temelli hatalı açmayı engelleme noktasında seçici koruma sağlamayabilir.



Şekil 7.5: Röle $R_{1,1}$ 'e ait yakınlaştırılmış grafik.

Bununla birlikte 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durumda yönlü toprak koruma seçici koruma noktasında probleme neden olmasına rağmen yönsüz toprak koruma ile 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinde kapasitif akım temelli

hatalı açma probleminin bu tez kapsamında önerilen optimal I_p değerleri ile giderildiği bir önceki bölümde gösterilmiştir. Kablo yoğun dağıtım şebekesinde nötr topraklama türü olarak topraklama trafosunun kullanılması endüktif karakterleri arıza akımı ve kapasitif akım karakterleri kablo şarj akımlarının birbirini arıza yolunda etkilemesine neden olmaktadır. Bu nedenle topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerin kapsamlı incelenmesi gerekmektedir. Bir sonraki bölümde bu hususlar detaylıca incelenmiş ve ilave koruma yöntemi önerilmiştir.

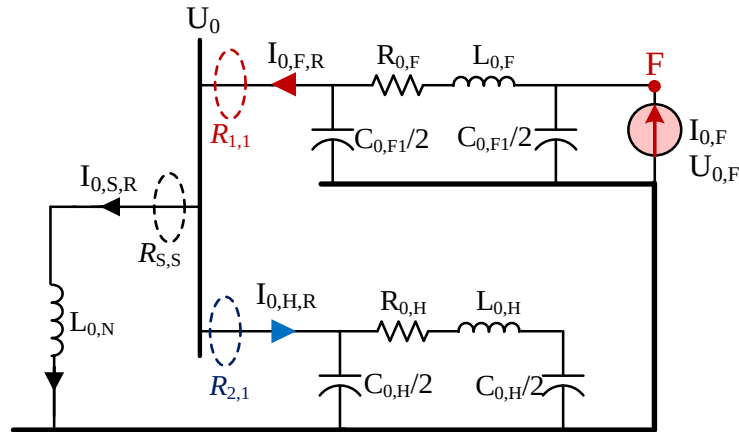
7.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde literatürde önerilen optimal RCA ile ilgili çalışmaların amaç fonksiyonları, ilgilenilen arıza türleri ve dikkate alınan şebeke topraklama türleri incelenmiştir. Literatür özeti tablo olarak sunulmuştur. Literatürde kablo yoğun etkin topraklanmayan dağıtım şebekelerin incelenmediği görülmüştür. Bu eksiği gidermek için bu tez kapsamında etkin topraklanmayan kablo yoğun radyal dağıtım şebekesinde her bir toprak rölesi için optimal RCA değerinin elde edildiği yeni bir optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir.

Önerilen optimizasyon yaklaşımının etkinliği 62 etkin topraklanmamış baralı radyal dağıtım şebekesinde çeşitli durum senaryoları dikkate alarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu önerilen yöntemin şebekenin hibrit olması durumunda, şebekede kapasitif akım dengesizliği bulunması durumunda, farklı topraklama direnci kullanılması durumunda seçici koruma sağladığı görülmüştür. Ayrıca 62 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durumda önerilen RCA değerlerinin çalışma bölgesine ait sınırlara çok yakın olduğu bu nedenle ilave bir koruma yönteminin kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

8. İLAVE TOPRAK KORUMA YÖNTEMİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YENİ OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Sıfır sıra akım genliği faz toprak arızalarının tespitinde, arızalı fiderin seçiminde ve hatalı açmaların engellenmesi için yapılan koruma rölesi ayarlarında kullanılan simetrik bileşen türlerinden biridir. Kolay hesaplanması ve ölçülmesi sıfır sıra bileşenin diğer simetrik bileşenlerden daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. Bununla birlikte, literatürde yapılan arızalı fider seçimi ve hatalı açma probleminin engellenmesi çalışmalarında arızalı fiderin sıfır sıra akım genliği sağlıklı fiderindekinden genellikle büyüktür. Fakat yeraltı kablusunun kullanımının artması ile nötr noktası reaktans üzerinden topraklı veya endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı dağıtım şebekelerinde arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği azalmaktadır. Şebeke topolojisine bağlı olarak sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği arızalı fiderden daha yüksek olabilir. Bu durum literatürde önerilen pek çok toprak koruma algoritmasının seçici sonuçlar vermemesine yol açabilir. Bu koruma problemi [104] numaralı çalışmada saha verisi ile de teyit edilmiştir. İlgili çalışmada nötr noktası reaktans üzerinden topraklanmıştır. Nötr noktasından 45,3 A ölçülmüştür. Böylece arıza tespit edilebilmiştir. Fakat arızalı fiderde 7,8 A sağlıklı fiderde ise 21,1 A sıfır sıra akım genliği ölçülmüştür. Toprak arızası tespit edilebilmesine rağmen sağlıklı fider arızalı fider olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.1: Nötr noktası reaktans üzerinden topraklı iki fiderli şebeke için sıfır sıra eşdeğer devresi.

Problemin detaylı analizi için **Şekil 8.1** ile nötr noktası reaktans üzerinden topraklı iki fiderli dağıtım şebekesinin sıfır sıra eşdeğer devresi gösterilmiştir. Sıfır sıra eşdeğer devresi göz önüne alınarak kararlı durumda arıza noktasındaki TFT akım genliği denklem (8.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\overrightarrow{I_{0,F}} = \frac{U_0}{R_{0,F} + j\omega L_{0,F} + \left(\frac{1}{j\omega 3L_{0,N}} + j\omega 3C_{0,T} \right)^{-1}} \quad (8.1)$$

Burada; U_0 : ortak barada görülen sıfır sıra gerilimi, $\overrightarrow{I_{0,F}}$ arıza noktasındaki TFT akım vektörünü, $R_{0,F}$: arızalı fiderin sıfır sıra direncini, $L_{0,F}$: arızalı fiderin sıfır sıra endüktans değerini, $L_{0,N}$: nötr noktasının sıra endüktans değerini, $C_{0,T}$: toplam sıfır sıra kapasite değerini temsil etmektedir. Şebekenin toplam sıfır sıra kapasite değeri $C_{0,H}$ sağlıklı fiderinde sıfır sıra kapasite değeri, $C_{0,F}$ arızalı fiderin sıfır sıra kapasite değeri olmak üzere denklem (8.2) ile hesaplanmaktadır.

$$C_{0,T} = C_{0,H} + C_{0,F} \quad (8.2)$$

$\overrightarrow{I_{0,CF}}$ arızalı fiderin sıfır sıra akım vektörü olmak üzere, arıza noktası ile hat başı arasındaki sıfır sıra akım ilişkisi denklem (8.3) ile ifade edilebilir.

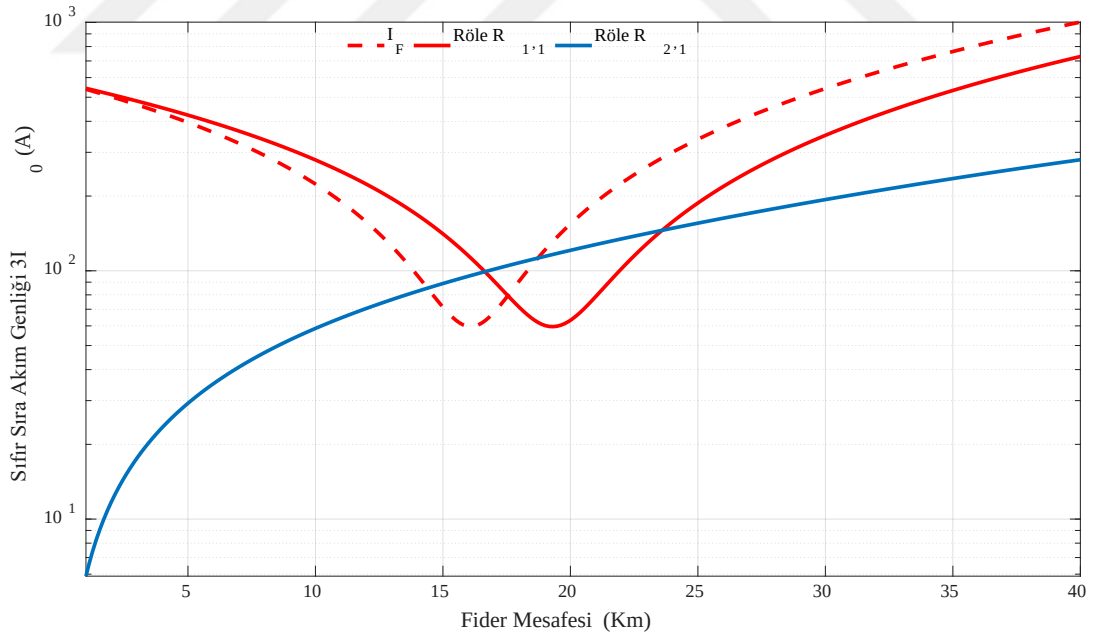
$$\overrightarrow{I_{0,F,R}} = \overrightarrow{I_{0,F}} + \overrightarrow{I_{0,CF}} \quad (8.3)$$

U_0 TFT arızası sırasında ortak baradan okunan sıfır sıra gerilim değeri olmak üzere, sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım vektörü $I_{0,\vec{H},R}$, seri empedansların ihmal edilmesi ile denklem (8.4) ile hesaplanmaktadır. Ortak baraya Kirchhoff'un Akımlar Kanununu uygularsak denklem (8.5) elde edilmektedir.

$$\overrightarrow{I_{0,H,R}} \approx \frac{U_0}{XC_{0,H}} \quad (8.4)$$

$$\overrightarrow{I_{0,S,R}} = \overrightarrow{I_{0,F,R}} + \overrightarrow{I_{0,H,R}} \quad (8.5)$$

Dağıtım şebekesinin topolojisine bağlı olarak $\overrightarrow{I_{0,H,R}}$ akım genliği $\overrightarrow{I_{0,F,R}}$ akım genliğinden büyük olabilir. Bu durum iki koruma problemini beraberinde getirmektedir. Toprak koruma rölelerini I_P ayarları düzgün yapılmamış ise arızalı fider tespit edilemez. Bu durum şebekenin arıza altında çalışmaya devam etmesine sebep olmaktadır. Ayrıca en yüksek sıfır sıra akım genliği arızalı fiderde görülmediğinden dolayı arızanın olmadığı fider devre dışı bırakılabilir. Nötr noktası reaktans üzerinden topraklı şebekelerde şebeke topolojisi oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle hem sağlıklı fider sıfır sıra akım genliğinin hem de arızalı fider sıfır sıra akım genliğinin davranışının incelenmesi gerekmektedir.



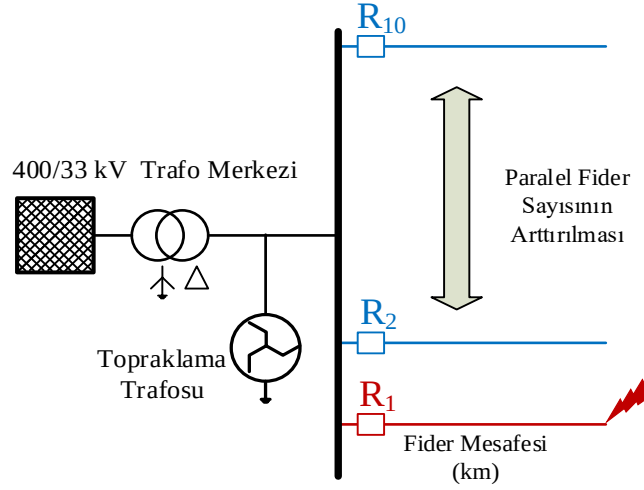
Şekil 8.2: Altı fiderli dağıtım şebekesi için sıfır sıra akım genliğinin değişimi.

240 mm² XLPE yeraltı kablosu için denklem (8.1) ile denklem (8.5) denklemleri çözdürülmüştür. Altı fiderli radyal dağıtım şebekesi için $\overrightarrow{I_{0,F}}$, $\overrightarrow{I_{0,F,R}}$ ve $\overrightarrow{I_{0,H,R}}$

değerlerinin kablo mesafesine göre değişimi **Şekil 8.2** ile gösterilmiştir. **Şekil 8.2**'te görüldüğü üzere Röle R_{2,1} tarafından görülen $\overrightarrow{I_{0,H,R}}$ akımının değeri kablo mesafesinin artması ile sürekli olarak artmaktadır. Aksine arızalı fiderin davranışı ise farklılık göstermektedir. Kablo mesafesinin artması ile hem seri empedans değeri hem de kapasitif akım değeri arttığından dolayı arıza noktasındaki $\overrightarrow{I_{0,F}}$ akım genliği ve Röle R_{1,1} tarafından görülen $\overrightarrow{I_{0,F,R}}$ akımının genlik değeri keskin bir şekilde azalmaktadır. Arızalı fiderinde gördüğü akım değeri 500 A seviyelerinde 60 A seviyesine kadar düşmektedir. Kablo mesafesinin belli bir değerinden sonra ise şebekede aşırı kompanzasyon yaşandığı için $\overrightarrow{I_{0,F}}$ akım genliği ve $\overrightarrow{I_{0,F,R}}$ akım genlik değeri artmaya başlamaktadır. Bu artış sonucu 40 km kablo mesafesi için $\overrightarrow{I_{0,F}}$ akım genliğinin 1000 A seviyelerine $\overrightarrow{I_{0,F,R}}$ akımının genliği ise 600 A seviyelerine kadar çıkmaktadır. Fider mesafesinin 80 km ile 120 km arasında olduğu durumda ise arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinden daha düşüktür. Bir sonraki bölümde bu koruma probleminin detaylı parametrik analizleri farklı fider mesafeleri, farklı fider uzunlukları ve farklı kablo kesitleri için gerçekleştirilmiştir.

8.1. 400/33 kV Topraklama Trafosu Üzerinden Topraklı Radyal Dağıtım Şebekelerinde Sıfır Sıra Davranışlarının Topoloji Bazlı İncelenmesi

Türkiye’de 400/33 kV’luk trafo merkezleri yıldız/ Δ bağlantıya sahiptir. Δ tarafta nötr noktası yaratmak ve arıza akım genliğini azaltmak için Δ taraf topraklama trafosu üzerinden topraklanmaktadır. Topraklama trafosu ile TFT arıza akımının genliğinin 600 A değerine sınırlandırılması istenmektedir. Fakat kullanılan topraklama trafosu yaklaşık % 90 oranında endüktif karakterli 33 Ω değerinde empedansa sahiptir.



Şekil 8.3: Nötr noktasının topraklama trafosu üzerinden topraklı sabit ve fider topolojisinin değişken kabul edildiği ikinci parametrik analize ait görsel özet.

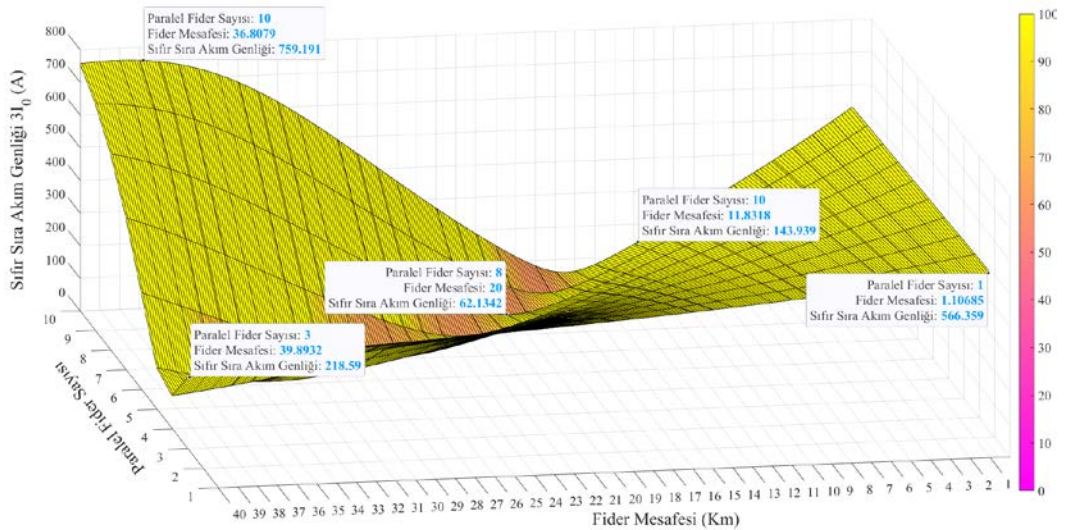
Bu durumda 400/33 kV’luk trafo merkezlerinin TFT arızasına karşı korunmasında ve seçilen yöntemle ait optimum ayarların belirlenmesinde fider topolojisi etkilidir. Bu nedenle 400/33 kV’luk trafo merkezinin sabit nötr topraklaması değişken fider yapısına uygun olarak parametrik analizleri gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Şekil 8.3 ile nötr noktasının topraklama trafosu üzerinden topraklı sabit ve fider topolojisinin değişken kabul edildiği ikinci parametriklerin test şeması gösterilmiştir. Nötr noktasının yaklaşık 33Ω empedans değerinde topraklanması ve kablo hatlarının yoğun olması nedeniyle şebeke etkin topraklanmamış şebeke olarak sınıflandırılabilir. Bu nedenle bir önceki parametrik analizlerde incelenen arıza noktası ikinci parametrik analizlerde incelenmemiştir. Kablo modellemesi ATP-Draw ortamında π model kullanılarak elde edilmiştir. Dağıtım şebekesinde yükler genel olarak üçgen bağlı olmaktadır. Böylece yük tarafında meydana gelen bir dengesizlik hat başlarında sıfır sıra akım görülmesine neden olmamaktadır. Bu nedenle TFT arızası için yükler modellenmemiştir. Fider mesafesi 1 km’den 40 km’ye kadar arttırılmıştır. Paralel fider sayısı ikiden ona kadar birer birer arttırılmıştır. Her bir durum için TFT arızası sırasında arızalı ve sağlıklı fiderlerde görülen homopolar akım vektörü elde edilmiştir. Arıza modeli olarak arıza direnci olmayan TFT arızası hat sonlarında oluşturulmuştur. **Tablo 8.1** ile test şebekesine ait parametreler, değerler ve yapılan kabuller özetlenmiştir.

Tablo 8.1: Test şebekesi için parametreler ve değerler.

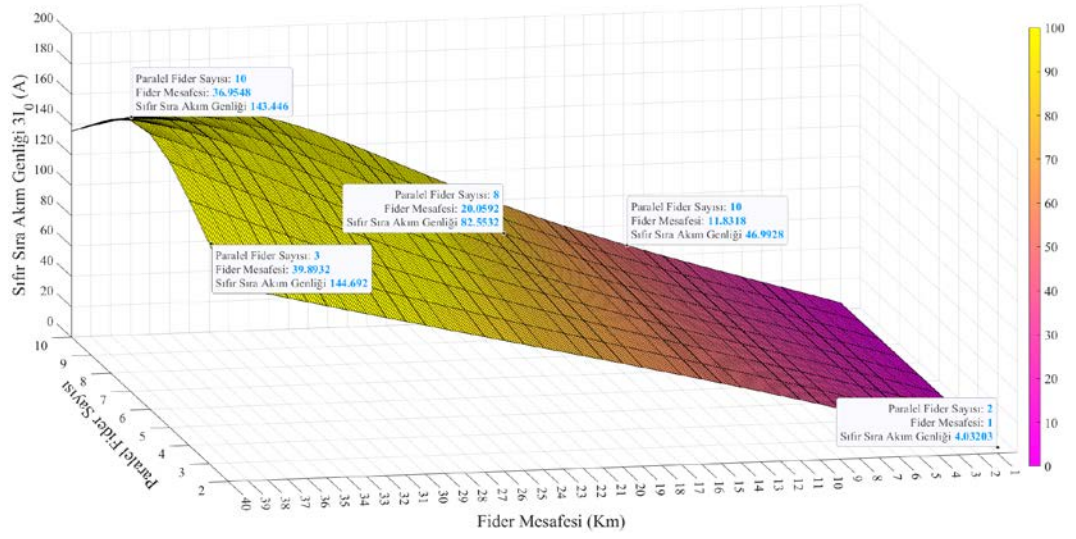
Parametre	Tanım / Değer
Kaynak Empedansı	0,619 Ω direnç, 19,057 mH endüktans
Transformatör Modeli	0,296 Ω direnç, 45,551 mH endüktans
Kablo Modeli	240 mm ² , PI Model ,100 Ω m iletkenlik
Yük Modeli	Üçgen bağlantıdan dolayı ihmal edilmiştir.
Arıza Modeli	Empedans üzerinden gerçekleşmeyen TFT

Dağıtım şebekelerinde paralel fider sayıları şebekeden şebekeye farklılık göstermektedir. Paralel fider sayısının artması arızalı fider seçimi probleminin daha düşük kablo mesafelerinde gerçekleşmesine yol açacaktır. Ayrıca sağlıklı fiderlerde görülen sıfır sıra akım genliği de etkilenecektir. Gelişen bilgisayar teknolojisi ile benzetim programları kullanarak şebekede kullanılan kabloların empedans değerleri yaklaşık fakat karar vermek için yeterli güvenilirlikte hesaplanabilmektedir. İlgili tez kapsamında simülasyonlar ATP-EMTP programı kullanarak gerçekleştirilmiştir. ATP-EMTP özellikle geometrik verilerin mevcut olduğu kablo ve havai hatların modellenmesi konusunda oldukça kabiliyetli bir programdır [120]. **Şekil 8.3**'te kurulan test şebekesinin 70 mm²'lik XLPE yeraltı kablosu için sonuçları **Şekil 8.4** ile gösterilmiştir.



a) Arızalı fider

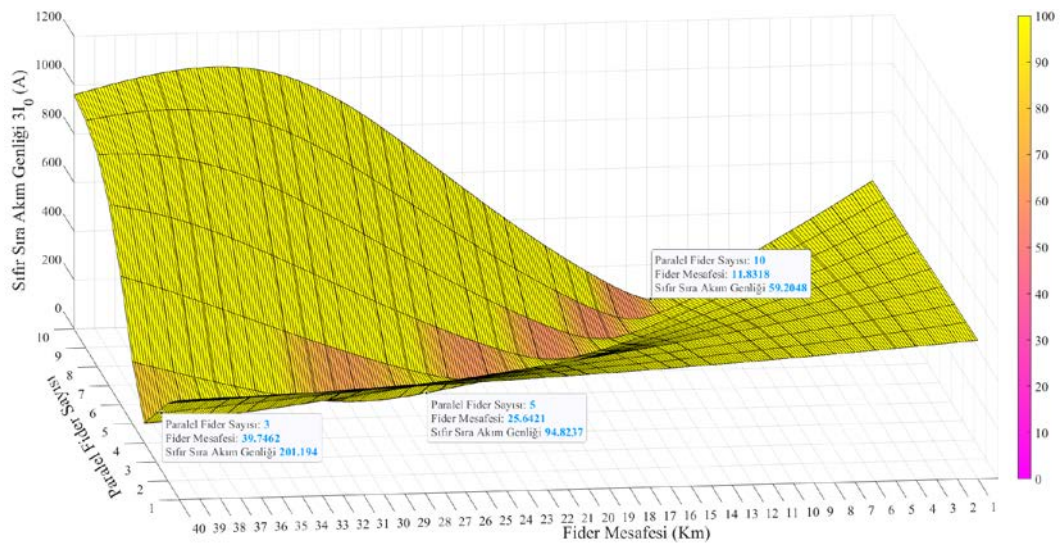
Şekil 8,4 Devam



b) Sağlıklı fider

Şekil 8.4: 70 mm² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen 3I₀ genliğinin fider mesafesi-parallel fider sayısına göre değişimi.

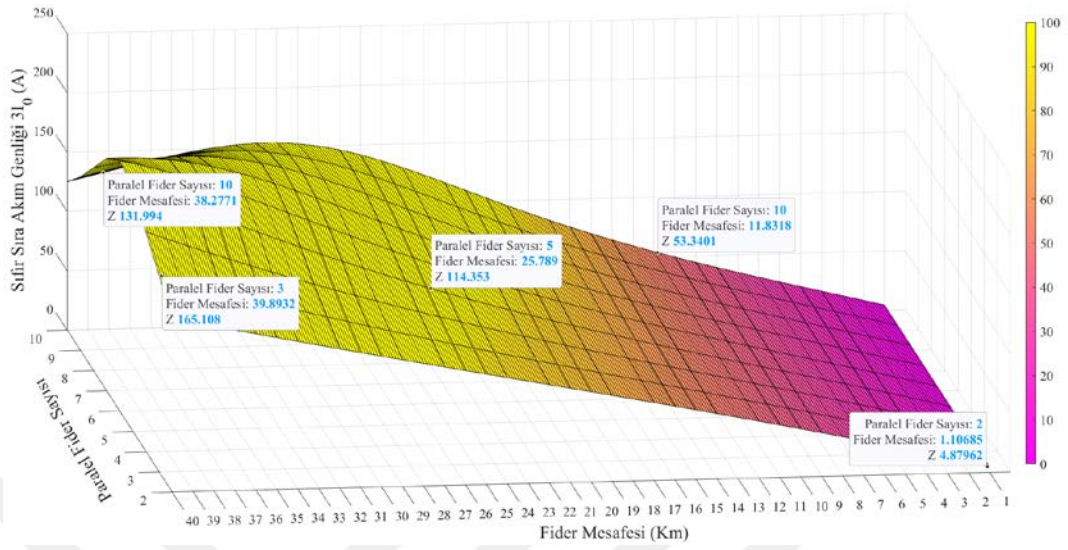
Şekil 8.4'te görüldüğü üzere arızalı fiderin gördüğü sıfır sıra akım genliğinin düştüğü senaryolar mevcuttur. Farklı paralel fider sayısı ve fider mesafeleri için görülen sıfır sıra akım genlikleri şekil üzerinde işaretlenmiştir. Örneğin tek fiderli 1 km'lik kablo hattında arızalı fiderin sıfır sıra akım genliği yaklaşık 566 A'dir. Paralel fider sayısının sekiz ve her bir fider mesafesinin 20 km olduğu durumda arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği yaklaşık olarak 62 A'dir. Aynı senaryoya karşılık gelen sağlıklı fiderin gördüğü sıfır sıra akım genliği ise 82 A'dir.



a) Arızalı fider

Şekil 8,5 Devam

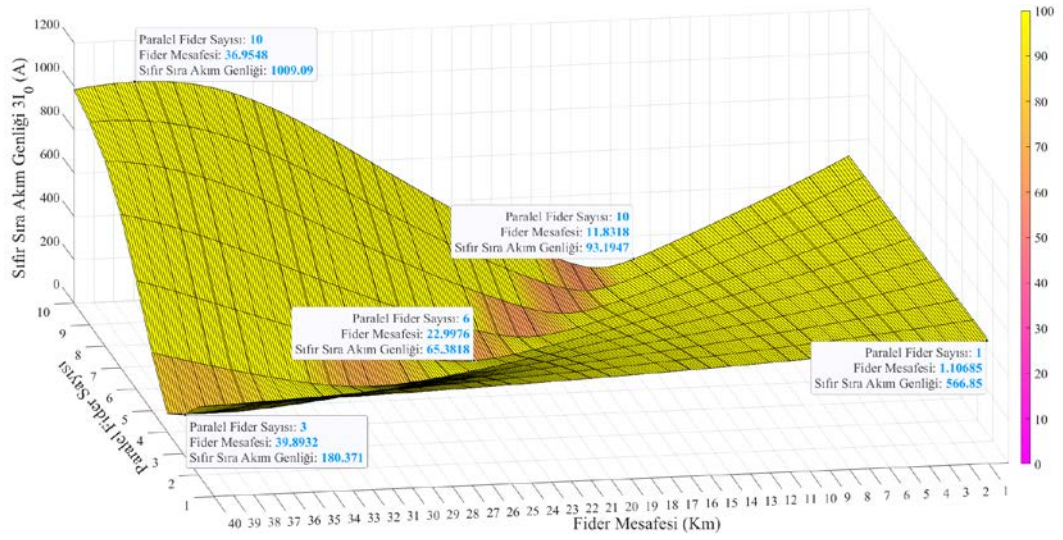
b)



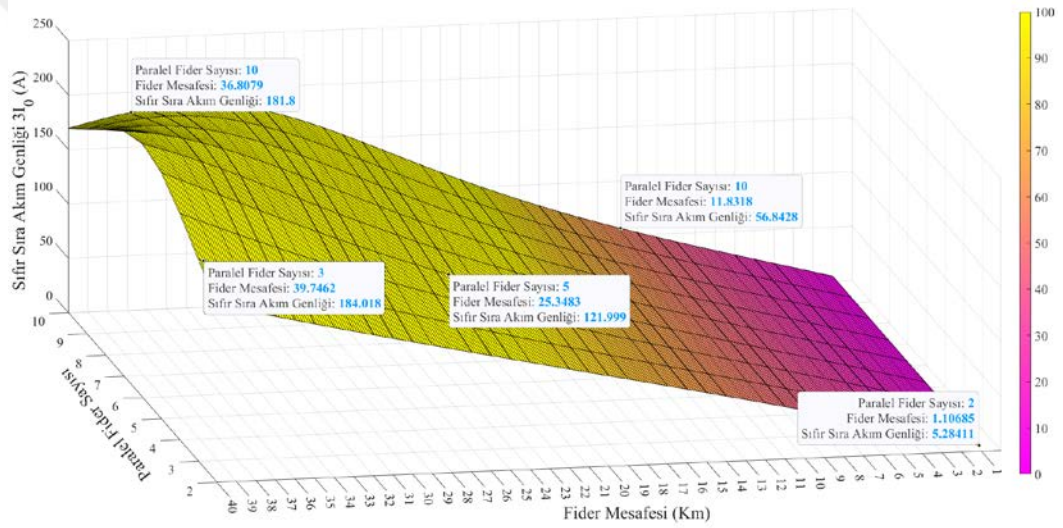
c) Sağlıklı fider

Şekil 8.5: 95 mm² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen 3I₀ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.

Bu senaryo için genlik temelli koruma yöntemi uygulamak seçici sonuç vermeyecektir. Ayrıca yönlü toprak koruma ise arızalı ve sağlıklı fider arasındaki aç farkının az olmasından dolayı seçici koruma noktasında probleme sebep olabilir. Paralel fider sayısının üç ve her bir fider mesafesinin yaklaşık 39 km olduğu durumda arızalı fiderde görülen sıfır sıra akımının genlik değeri yaklaşık olarak 219 A'dir. Aynı paralel fider sayısı ve fider mesafesi seçimi için sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği yaklaşık 145 A'dir.



a) Arızalı fider



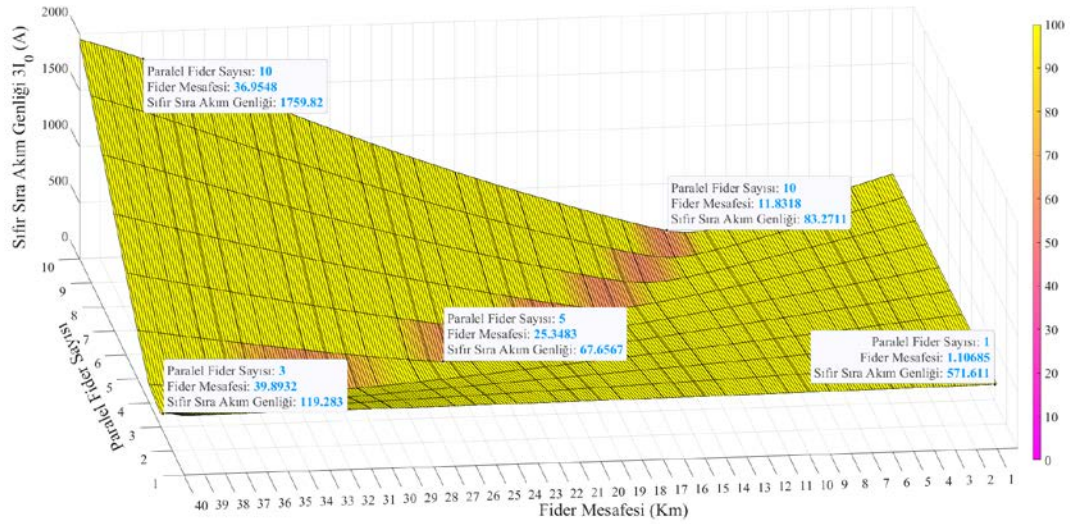
b) Sağlıklı fider

Şekil 8.6: 120 mm² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen $3I_0$ genliğinin fider mesafesi-parallel fider sayısına göre değişimi.

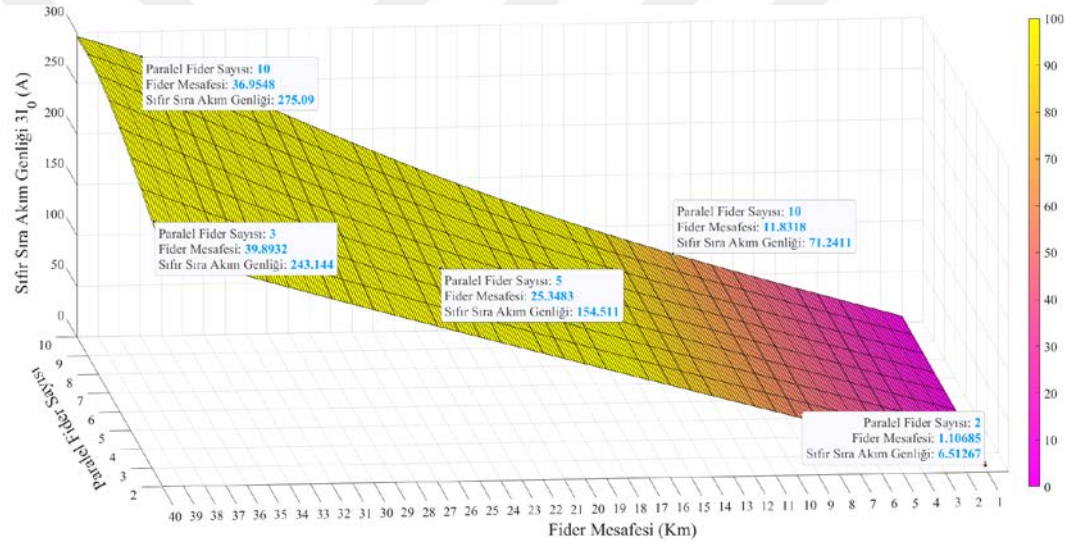
Bu durumda uygun I_p ayar değerleri ile seçici korumak ve şebekede yaşanan kapasitif akım temelli hatalı açma problemini gidermek mümkündür. Paralel fider sayısının ve fider mesafesinin oldukça fazla artması ile birlikte 600 A seviyelerinden daha yüksek arıza akım genliği arızalı fider tarafından görülebilir. **Şekil 8.4**'te görüldüğü üzere paralel fider sayısının 10 ve fider mesafesinin yaklaşık 37 km olduğu durumda yaklaşık 760 A değerinde sıfır sıra akım görülmektedir. Bu senaryoda şebeke aşırı kompanse şebeke şeklinde davranmaktadır. **Şekil 8.3**'te kurulan test şebekesinin 95 mm²'lik XLPE yeraltı kablosu için sonuçları **Şekil 8.5** ile gösterilmiştir. **Şekil**

8.5'te görüldüğü üzere arızalı fiderin gördüğü sıfır sıra akım genliğinin düştüğü senaryolar mevcuttur. Farklı paralel fider sayısı ve fider mesafeleri için görülen sıfır sıra akım genlikleri şekil üzerinde işaretlenmiştir. Paralel fider sayısının on ve her bir fiderin mesafesinin yaklaşık on iki olduğu durumda arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği 59 A'dir. Bu durumda sağlıklı fiderin kontrol edilmesi gerekmektedir. Aynı senaryo için sağlıklı fiderde görülen akım genliği 53 A'dir. Bu nedenle arızalı fiderin sıfır sıra akım genliği oldukça düşük olmasına rağmen hala sağlıklı fiderden yüksek olduğu için uygun I_p ayar değeri ile kapasitif akım temelli hatalı açma problemini gidermek mümkündür. Fakat paralel fider sayısının beş ve kablo mesafesinin yaklaşık 26 km olduğu durum için arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği yaklaşık 96 A'dir. Sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği ise yaklaşık 115 A'dir. Bu durumda Bölüm 6'da önerilen optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen I_p değerleri kapasitif akım temelli hatalı açmaların giderilmesi noktasında çözüm sunmayacaktır. **Şekil 8.3**'te kurulan test şebekesinin 120 mm²'lik XLPE yeraltı kablosu için sonuçları **Şekil 8.6** ile gösterilmiştir. **Şekil 8.6**'ile görüldüğü üzere arızalı fiderin gördüğü sıfır sıra akım genliğinin düştüğü senaryolar mevcuttur. Farklı paralel fider sayısı ve fider mesafeleri için görülen sıfır sıra akım genlikleri şekil üzerinde işaretlenmiştir.

Bir önceki kablo senaryolarında yapılan çıkarımlar farklı paralel fider sayısı ve kablo mesafesi için 120 mm²'lik XLPE yeraltı kablosu içinde yapılabilir. Muhtelif senaryolar grafik üzerinde paralel fider sayısı, fider mesafesi ve sıfır sıra akım genliği şeklinde görülmektedir. **Şekil 8.3**'te kurulan test şebekesinin 240 mm²'lik XLPE yeraltı kablosu için sonuçları **Şekil 8.7** ile gösterilmiştir. Paralel fider sayısının beş ve kablo mesafesinin yaklaşık 26 km olduğu durum için arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği yaklaşık 67 A'dir. Sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği ise yaklaşık 154 A'dir.



a) Arızalı fider



b) Sağlıklı fider

Şekil 8.7: 240 mm² XLPE yeraltı kablosu için fiderlerde görülen 3I₀ genliğinin fider mesafesi-paralel fider sayısına göre değişimi.

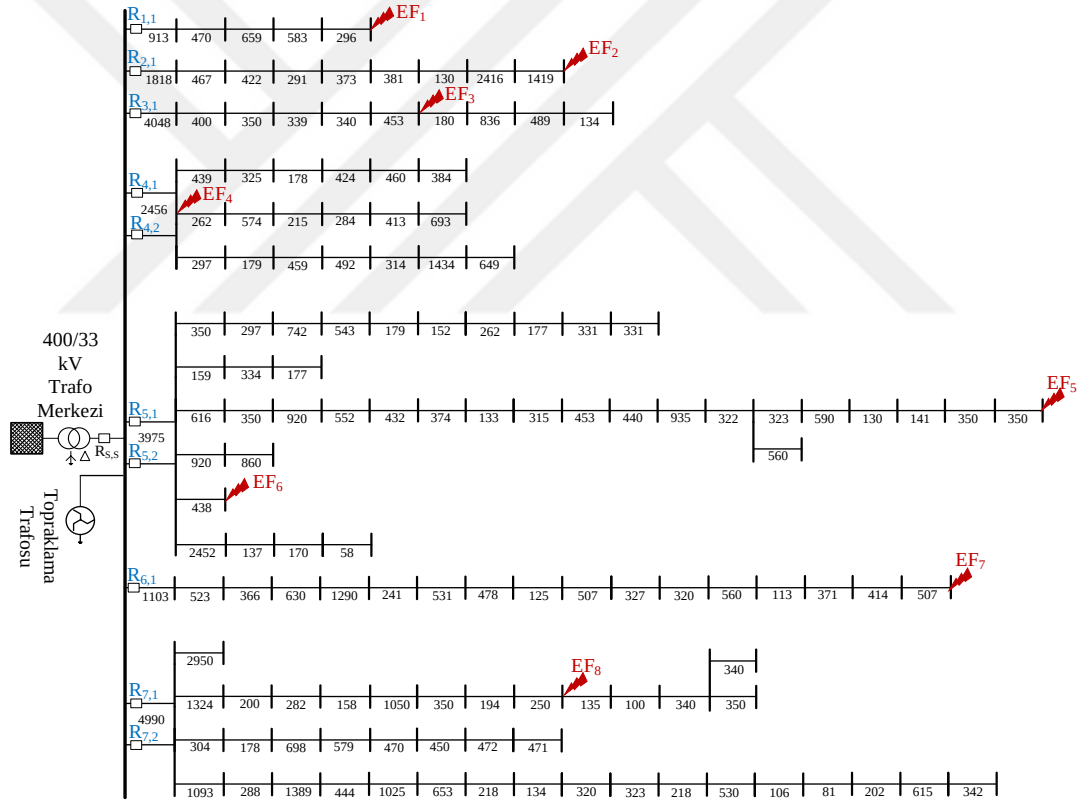
Bu durumda Bölüm 6’da önerilen optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen I_p değerleri kapasitif akım temelli hatalı açmaların giderilmesi noktasında çözüm sunmayacaktır.

Kablo mesafesinin artması ile birlikte arızanın tespit edilememe problemi daha düşük kablo mesafelerinde gerçekleşmiştir. Ayrıca aynı fider sayısı (beş) ve aynı kablo mesafesi için (26 km) kablo kesitinin artması kapasitif akım genliğini arttırdığı için daha düşük genlikli sıfır sıra akım arızalı fiderde bulunan toprak rölesi tarafından görülmektedir. Tüm kablo senaryolarında sağlıklı fiderin akım genliğinin değişimi

incelendiğinde kablo kesitinin artması ile birlikte sağlıklı fiderde görülen akım genliği artmaktadır. Bir sonraki bölümde sıfır sıra yönlü ve yönsüz toprak korumanın gerçek bir şebeke üzerinde sebep olduğu koruma zafiyeti tartışılmıştır.

8.2. 400/33 kV 151 Baralı Gerçek Bir Radyal Dağıtım Şebekesinde İlave Toprak Koruma Uygulaması

Sıfır sıra akım bileşeni kullanıldığı durumda yaşanan toprak koruma problemini gerçek saha şebekesi üzerinden analiz etmek için Şekil 8.8 ile gösterilen 400/33 kV'luk 151 baralı radyal etkin topraklanmamış dağıtım şebekesi EMTP-ATP Draw programında modellenmiştir.

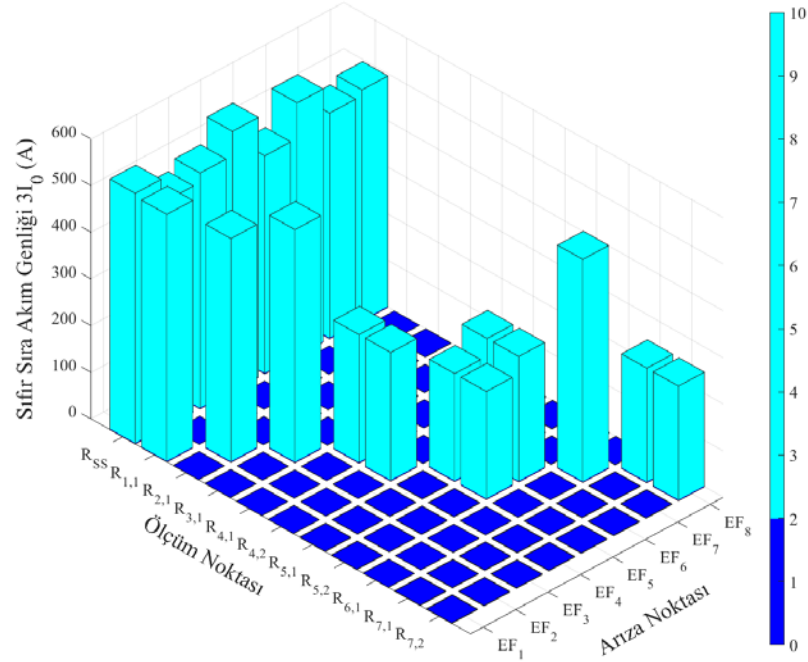


Şekil 8.8: 400/33 kV 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi.

400/33 kV 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi yedi adet çıkış fiderine sahiptir. Bu fiderlerde üçü her iki uçtan paralellenmiş fiderler olmakla birlikte diğer dört fider ise tek çıkış fiderlerdir. Baralar arasındaki mesafeler ve röle konumları ise şekil üzerinden gösterilmiştir. Parametrik analizler sonucu dağıtım şebekesinin

80 km ile 120 km toplam kablo uzunluğuna sahip olduğu durumda sıfır sıra akım genliğinde rezonans problemi yaşandığı tespit edilmiştir [121]. İncelenen 400/33 kV 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi 111,682 km kablo uzunluğuna sahiptir. Bu nedenle sıfır sıra akım genliğinde rezonans probleminin yaşanması öngörülmektedir.

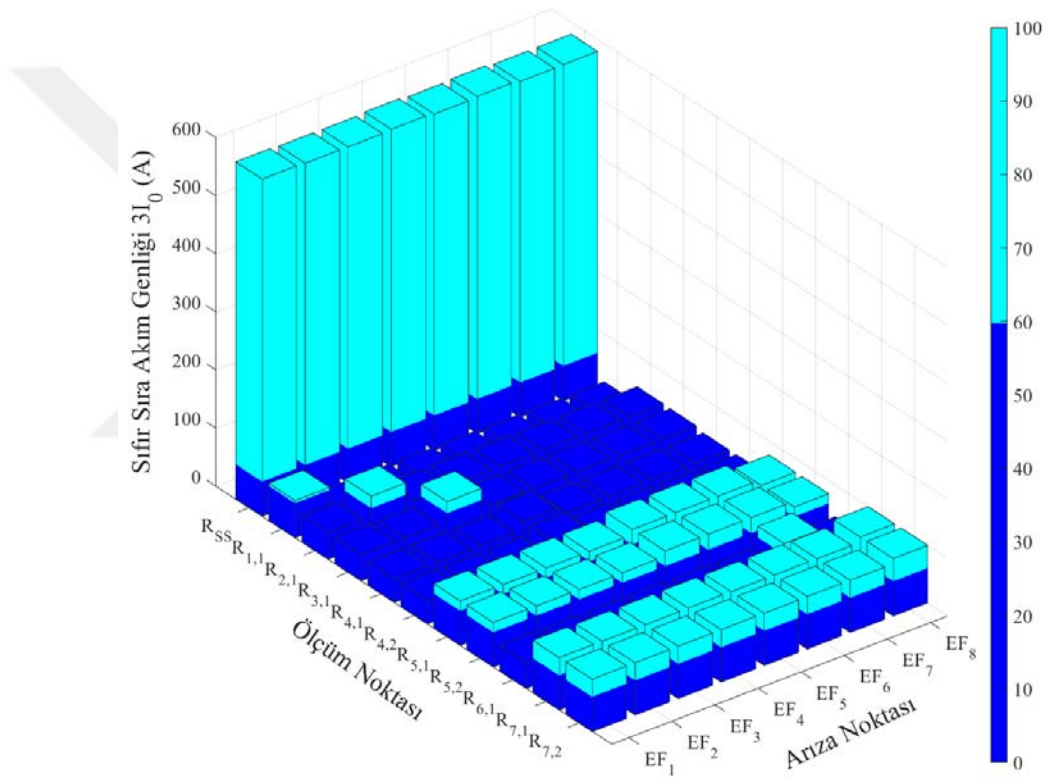
Şebekede kullanılan topraklama trafosu TFT arızasının genliğini 600 A değerine sınırlandırmak için dizayn edilmiştir. Havai hat kullanımında bu amaca erişilebilmektedir. Topraklama trafosunun empedans değeri TFT arıza akımının genliğinin azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 8.9: 151 baralı radyal dağıtım şebekesinde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen $3I_0$ genliğinin değişimi (havai hat).

Şekil 8.9 ile 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım sisteminde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen sıfır sıra akım genliğinin değişiminin havai hat senaryosu için sonuçları gösterilmiştir. Şekil 8.9 ile açıkça görüldüğü üzere her bir arıza noktasında arızalı fiderde en yüksek sıfır sıra genlik elde edilmiştir. Ayrıca arızanın olmadığı fiderlerde 2 A değerinin altında sıfır sıra akım genlikleri görülmüştür. Örneğin EF_1 TFT arızası için arızadan sorumlu $R_{1,1}$ rölesi kararlı

durumda 530,32 A sıfır sıra akım genliği görmektedir. En uzun fider olan yedinci fiderlere ait $R_{7,1}$ ve $R_{7,2}$ rölesi 1,10 A genliğinde sıfır sıra akım görmektedir. Trafo çıkışında bulunan $R_{S,S}$ rölesi 537 A görmektedir. EF_2 TFT arızası için sorumlu $R_{2,1}$ rölesi kararlı durumda 479,47 A sıfır sıra akımı yedin fider röleleri ise 1 A genlikli sıfır sıra akım, $R_{S,S}$ rölesi 505,40 A görmektedir . Diğer arıza noktaları da benzer duruma sahiptir. Böylece 151baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesinin havai hat senaryosunda hem arızalı fider kolaylıkla tespit edilebilir hem de sağlıklı fiderlerde herhangi bir hatalı açma problemi yaşanmaz.



Şekil 8.10: 151 baralı radyal dağıtım şebekesinde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen $3I_0$ genliğinin değişimi (XLPE kablo).

Şekil 8.10 ile 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım sisteminde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen sıfır sıra akım genliğinin değişiminin 240 mm² XLPE yeraltı kablosu senaryosu için sonuçları gösterilmiştir. **Şekil 8.10'**de görüldüğü üzere TFT arızası, $R_{S,S}$ rölesi tarafından tespit edilebilmiştir. Fakat arızalı fider seçiminde seçicilik problemi mevcuttur. Hem arızalı fiderde hem de sağlıklı fiderlerde 60 A değerinden yüksek sıfır sıra akım görülmektedir. Örneğin EF_1 TFT

arızası için arızadan sorumlu $R_{1,1}$ rölesi kararlı durumda 64,30 A sıfır sıra akım genliği görmektedir. En uzun fider olan yedinci fiderlere ait $R_{7,1}$ ve $R_{7,2}$ röleleri 90,30 A genliğinde sıfır sıra akı, ayrıca beşinci fiderlere ait $R_{5,1}$ ve $R_{5,2}$ röleleri 76,84 A genlikli sıfır sıra akım görmektedir. Beşinci ve yedinci sağlıklı fiderler arızalı fiderden daha yüksek sıfır sıra akım genliği görmüştür. Akım genliğine göre arızalı fider tespiti sadece en uzun fiderde tespit edilebilir. EF_8 arızası için arızadan sorumlu $R_{7,1}$ ve $R_{7,2}$ röleleri 98,91 A genliğinden sıfır sıra akım görmektedir. Diğer röleler tarafından görülen sıfır sıra akım genlikleri 98,91 A değerinden daha düşüktür.

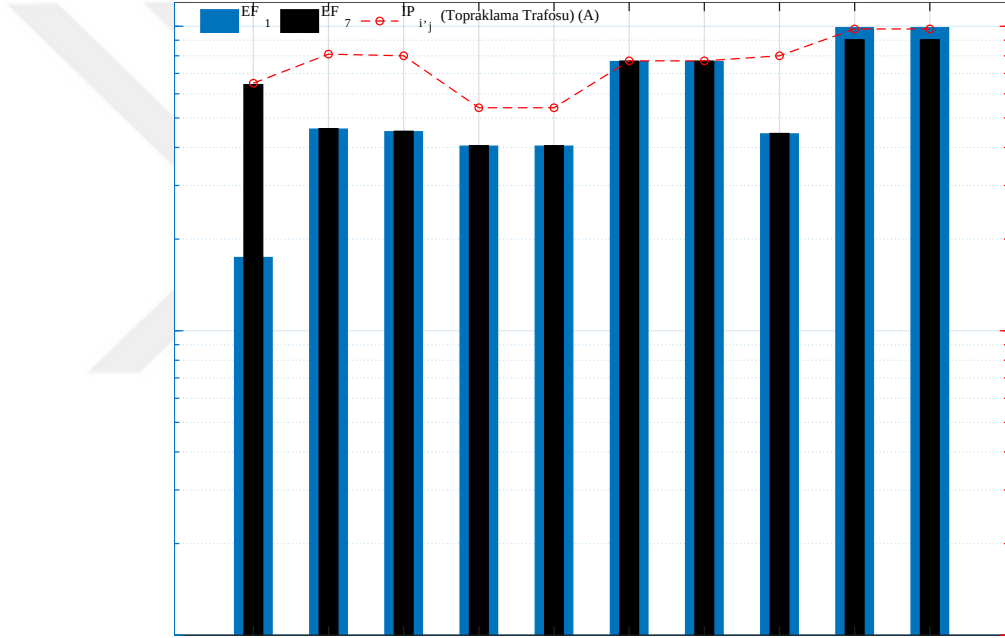
Sıfır sıra akım genliğinden yaşanan rezonans problemi ile arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği sağlıklı fiderden daha düşük olduğu için bu tez kapsamında önerilen yönsüz toprak koruma optimizasyon yaklaşımı, topraklama trafosu üzerinden topraklı ve hat mesafesinin yaklaşık 80 km ile 120 km arasında olduğu şebekeler için önerilmez. Bu tarz şebekeler için yönlü toprak koruma veya ilave koruma yöntemleri gerekmektedir. Bölüm 6'da yönsüz toprak koruma için önerilen yeni optimizasyon şebekesi sıfır sıra akım genliğinde rezonans probleminin yaşandığı 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesine uygulanmıştır.

Tablo 8.2: 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için Bölüm 6 ve Bölüm 7'de önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal I_p ve RCA ayarları.

Röle Adı	TDS (saniye)	I_p (A)	RCA (°)
$R_{1,1}$	1	65	64
$R_{2,1}$	1	81	45
$R_{3,1}$	1	80	46
$R_{4,1}$	1	54	31
$R_{4,2}$	1	54	31
$R_{5,1}$	1	77	19
$R_{5,2}$	1	77	19
$R_{6,1}$	1	80	47
$R_{7,1}$	1	98	17
$R_{7,2}$	1	98	17

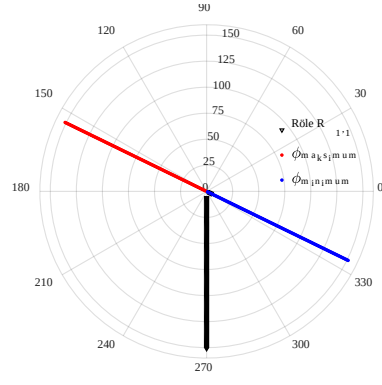
Tablo 8.2 ile 151 baralı etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekesi için Bölüm 6'da önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal I_p ayarları listelenmiştir. Bölüm 7'de önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal RCA ayarları listelenmiştir. Beklendiği gibi fider mesafesinin uzaması önerilen I_p değerlerinin artmasına RCA değerinin azalmasına

neden olmuştur. Önerilen I_p değerlerinin etkinliği farklı iki arıza noktası için incelenmiştir. EF_1 arızası ve EF_7 arızası seçilmiştir. Her iki arıza noktası için tüm röleler tarafından görülen sıfır sıra akım genlikleri ve rölelere karşılık gelen I_p değerleri **Şekil 8.11** ile gösterilmiştir. EF_1 arızası sonucu arızanın tespit edilebilmesi için $R_{1,1}$ rölesi tarafından açma sinyali üretilmelidir. Fakat **Şekil 8.11**'de görüldüğü üzere EF_1 arızası sırasında görülen sıfır sıra akım genliği önerilen I_p değerinden daha düşüktür. Bu nedenle EF_1 arızası $R_{1,1}$ rölesi tarafından tespit edilememiştir. Kapasitif akım temelli hatalı açmanın yaşanmaması için diğer röleler tarafından açma sinyali üretilmemelidir.

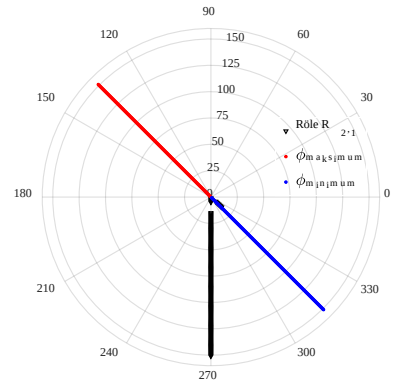


Şekil 8.11: Farklı iki arıza noktası için Bölüm 6’da önerilen yöntem ile elde edilen optimal I_p ayarlarının 151 baralı radyal dağıtım şebekesindeki seçicilik performansı.

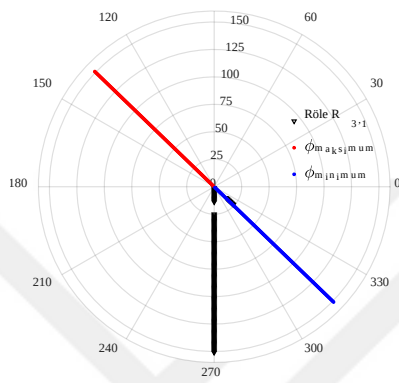
Şekil 8.11 incelendiğinde diğer röleler tarafından görülen sıfır sıra akım genlikleri karşılık gelen I_p değerlerinden daha düşüktür. Bu nedenle röleler tarafından herhangi bir açma sinyalinin üretilmediği görülmektedir. Önerilen optimal I_p değerleri ile kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilse dahi arızalı fider tespit edilememektedir.



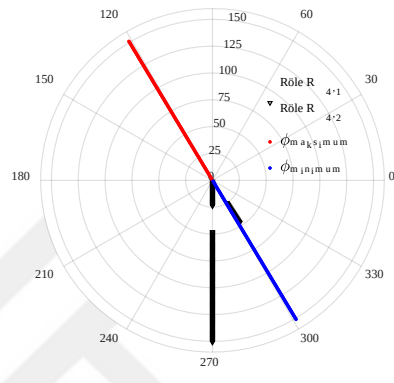
a) Birinci fider



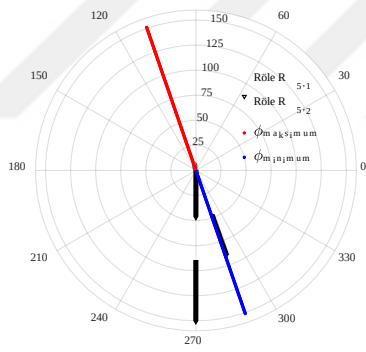
b) İkinci fider



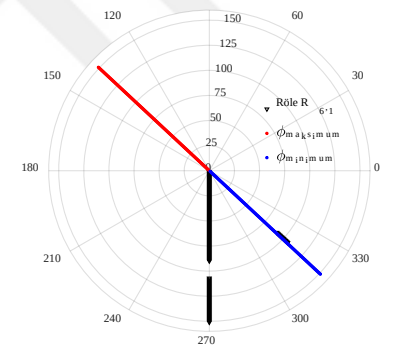
a) Üçüncü fider



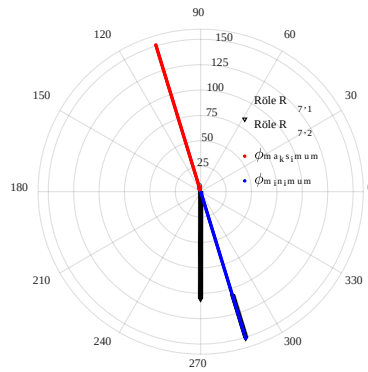
b) Dördüncü fider



c) Beşinci fider



d) Altıncı fider



e) Yedinci fider

Şekil 8.12: 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için rölelerin arıza noktalarına göre açılış değişimleri.

EF₇ arızası yedinci ve en uzun fiderde gerçekleşen arızadır. Bu nedenle en yüksek sıfır sıra akım genliği yedinci fiderde görülmekte olup diğer fiderlerde görülen sıfır sıra akım genliklerinden daha yüksektir. Bu nedenle önerilen optimal I_p ayarları ile sadece en uzun fiderde arıza tespit edilebilmekte ve bu arıza için kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmektedir. Topraklama trafosu üzerinde topraklı dağıtım şebekelerinde sıfır sıra akım genliğinde rezonans yaşanması Bölüm 6'da önerilen optimizasyon yaklaşımı sonucu önerilen I_p değerlerinin seçici koruma sağlayamamasına neden olmaktadır. Bu nedenle yeni bir koruma yöntemi ve ayar optimizasyonu geliştirilmelidir. Bir sonraki bölümde sıfır sıra akım genliğinde yaşanan rezonans problemi için geliştirilen ilave koruma yöntemi ve ayar optimizasyonu için geliştirilen optimizasyon yaklaşımı detaylı bir şekilde tartışılacaktır. **Şekil 8.12** ile 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için rölelerin arıza noktalarına göre açışimleri gösterilmiştir. **Şekil 8.12**'de görüldüğü üzere açış farkı çok az olduğu için yönlü toprak koruma seçici koruma sağlayamamıştır.

8.3. Sıfır Sıra Rezonans Problemi İçin Önerilen İlave Toprak Koruma Yöntemi ve Ayar Optimizasyonu

Topraklama trafosu üzerinden topraklı dağıtım şebekelerinin sıfır sıra akım genliğinde rezonans problemi yaşamasının temel nedeni yeraltı kabloların faz toprak kapasiteleridir. **Şekil 8.13** ile nötr noktası reaktans üzerinden topraklı iki fiderli şebeke için negatif sıra eşdeğer devresi gösterilmiştir. Genel olarak pozitif ve negatif sıra kapasite değeri hattın pozitif ve negatif empedansı ile kıyaslandığında oldukça yüksek empedans değerine sahiptir. Bu nedenle toprak arızaları analizlerinde ihmal edilmektedir. Böylece, **Şekil 8.13**'te negatif sıra kapasite gösterilmemiştir.

U_2 TFT arızası sırasında ortak baradan okunan negatif sıra gerilim değeri olmak üzere, sağlıklı fiderde görülen negatif sıra akım vektörü $I_{2,\vec{H},R}$, seri empedansların ihmal edilmesi ile eşitlik (8.8) ile hesaplanmaktadır. Ortak baraya Kirchhoff'un Akımlar Kanununu uygularsak eşitlik (8.9) elde edilmektedir.

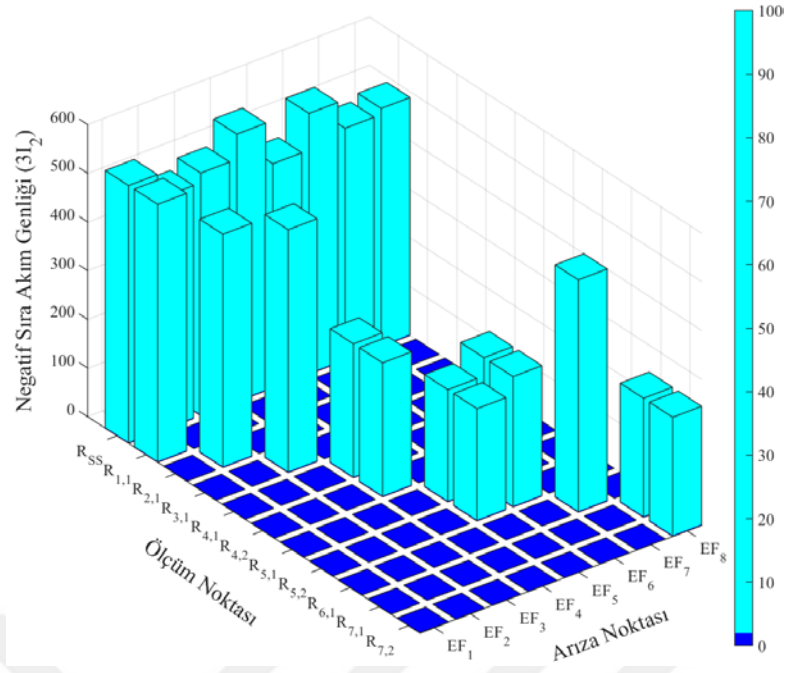
$$\overrightarrow{I_{0,H,R}} \simeq U_2 \cdot Y_{2,H} \quad (8.8)$$

$$I_{2,S,R} = I_{2,F,R} + I_{2,H,R} \quad (8.9)$$

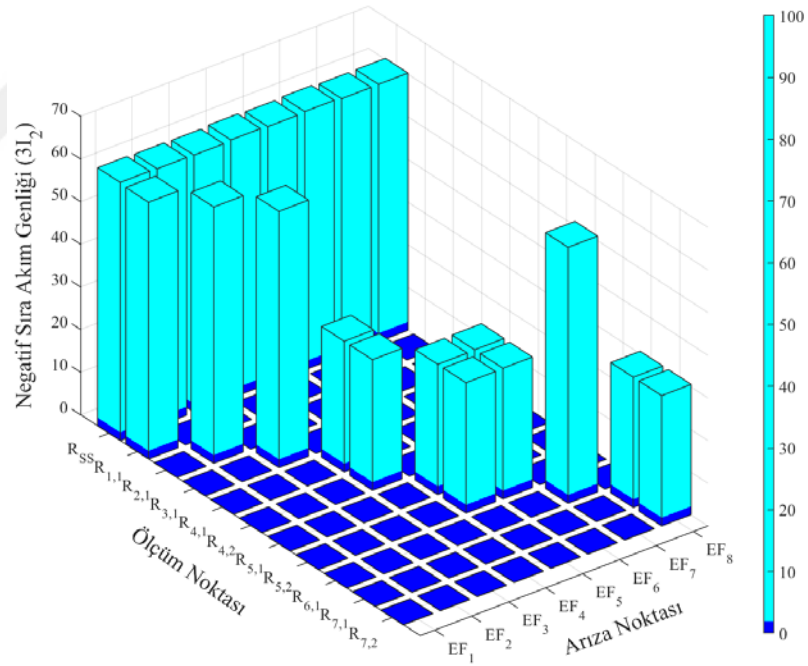
Negatif sıra akım değerlerinin yukarıdaki hesaplamalarına ek olarak güç frekansında dijital rölelerden eşitlik (8.10) ile hesaplanmaktadır. Burada f güç frekansını F_s ise örnekleme frekansını temsil etmektedir.

$$I_2(n) = \frac{1}{3} \left(I_A(n) + I_B \left(n - \frac{F_s}{3f} \right) + I_C \left(n - \frac{2F_s}{3f} \right) \right) \quad (8.10)$$

Şekil 8.14 ile 151 baralı radyal dağıtım sisteminde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen negatif sıra akım genliğinin değişimi havai hat ve kablo senaryosu için gösterilmiştir. Sıfır sıra akım genliği değişimi ile kıyaslandığında havai hat senaryosunda negatif sıra akım genlik değişimi benzer sonuçlar vermektedir.



a) Havai hat



b) Kablo

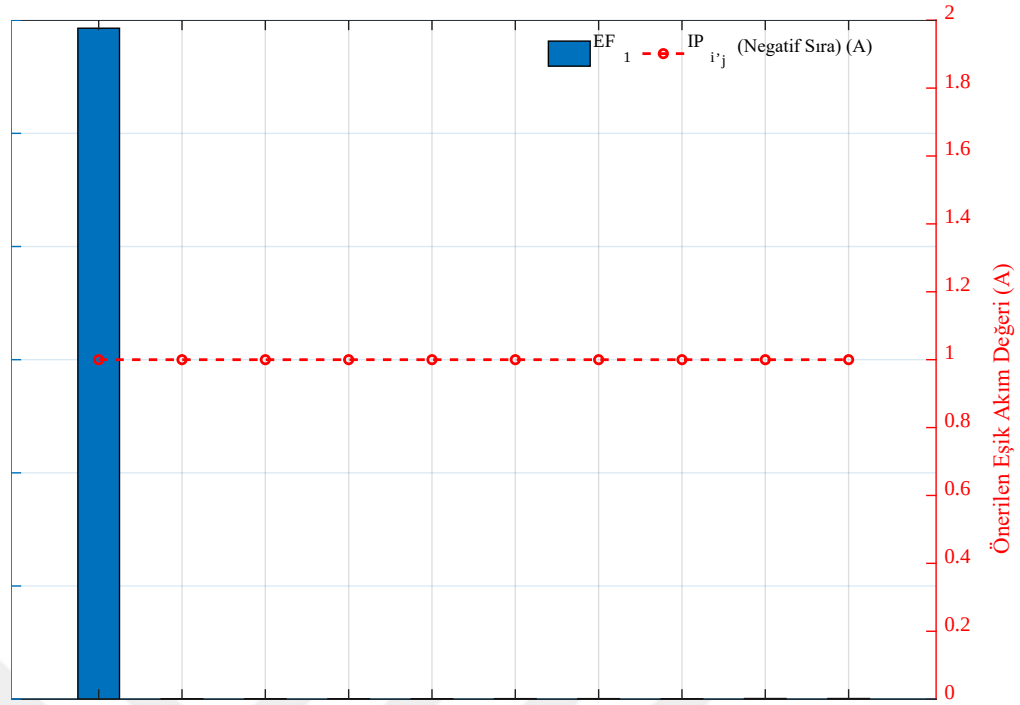
Şekil 8.14: 151 baralı radyal dağıtım sisteminde farklı arıza noktaları için ölçüm noktalarında görülen negatif sıra akım genliğinin değişimi.

Kablo senaryosu incelendiğinde ise sıfır sıra akım değişiminin ve negatif sıra akım değişiminin birbirinden farklı olduğu açıkça görülmektedir. **Şekil 8.14.b'**de görüldüğü

üzere sadece arızalı fiderde yüksek genlikli negatif sıra akım genliği gözlemlenirken sağlıklı fiderlerde ise oldukça düşük genlikli negatif sıra akım genliği gözlemlenmektedir. Arızalı fiderde görülen negatif sıra akım genliği ile sağlıklı fiderde görülen negatif sıra akım genliği arasında fark mevcuttur. Bu nedenle Bölüm 6'da önerilen yeni optimizasyon yaklaşımı negatif sıra bileşene göre sıfır sıra akım genliğinde rezonans yaşanan şebekelere uygulanmak üzere güncellenmiştir. **Tablo 8.3** ile 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için farklı koruma yöntemlerine ait bu tez kapsamında geliştirilen optimizasyon yaklaşımları ile elde edilmiş optimal röle ayarları listelenmiştir. İlave koruma yönteminde sıfır sıra akım genliği yerine negatif sıra akım kullanılmasının yanı sıra röle karakteristiğinin sabit zamanlı röle olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle röle çalışma süreleri her koruma yöntemi için 1 saniye seçilmiştir. İlave koruma yöntemi için her bir röleye ait $I_{P,2}$ ayar değerleri incelendiğinde oldukça düşük akım genliği önerildiği görülmektedir. Bunun nedeni olarak şebekedeki kabloların dengeli bir şekilde modellenmesi ve yük akımında herhangi bir dengesizlik olmadığı kabul edilmesidir.

Tablo 8.3: 151 baralı radyal dağıtım şebekesi için Bölüm 6 ve Bölüm 7'de önerilen yaklaşım ile elde edilen optimal I_P ayarları ve ilave koruma yöntemi ayarları.

Koruma Türü	Yönsüz Koruma		Yönlü Koruma		İlave Koruma	
Röle Adı	TDS (saniye)	$I_{P,0}$ (A)	TDS (saniye)	RCA (°)	TDS (saniye)	$I_{P,2}$ (A)
R _{1,1}	1	65	1	64	1	1
R _{2,1}	1	81	1	45	1	1
R _{3,1}	1	80	1	46	1	1
R _{4,1}	1	54	1	31	1	1
R _{4,2}	1	54	1	31	1	1
R _{5,1}	1	77	1	19	1	1
R _{5,2}	1	77	1	19	1	1
R _{6,1}	1	80	1	47	1	1
R _{7,1}	1	98	1	17	1	1
R _{7,2}	1	98	1	17	1	1



Şekil 8.15: İlave toprak koruma yönteminin seçicilik performansı.

Şekil 8.15 ile ilave koruma yöntemi için önerilen optimal $I_{p,2}$ ayarları için seçicilik performansı gösterilmiştir. EF_1 arızası için her bir röle tarafından görülen negatif sıra akım genlikleri ve her bir rölenin karşılık gelen $I_{p,2}$ ayarları **Şekil 8.15**'de görülmektedir. **Şekil 8.15**'de açıkça görüldüğü üzere EF_1 arızası için sadece arızadan sorumlu olan $R_{1,1}$ rölesi tarafından görülmektedir. Diğer röleler tarafında görülen negatif sıra akım genlikleri oldukça düşüktür. $R_{1,1}$ rölesi dışında her bir rölenin önerilen $I_{p,2}$ değeri karşılık gelen negatif sıra akım genliğinden büyüktür. Böylece arızadan sorumlu olan $R_{1,1}$ rölesi dışında diğer röleler tarafından herhangi bir açma sinyali üretilmemiştir. Bu nedenle sıfır sıra akım genliğinde rezonans yaşanan durumlarda ilave koruma yöntemi ile önerilen optimal $I_{p,2}$ değeriyle arızalı fider tespit edilebilir. Kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilebilir. İlave koruma yöntemi negatif sıra bileşen içerdiği için negatif sıra bileşenin performansını etkileyen kapasitif akım dengesizliği, dengesiz yük akımları ve hibrit şebeke parametreleri incelenmiştir.

Tablo 8.4 ile farklı şebeke parametreleri için optimal $I_{p,2}$ ayarlarının rölelere göre değişimi listelenmiştir. **Tablo 8.4**'de açıkça görüldüğü üzere hibrit şebeke

senaryosunda rölelerin negatif sıra ayar değeri değişmemiştir. Üçgen bağlı yüklerde yaşanan dengesizlik durumunda ise negatif sıra ayar değeri değişmiştir. Dengesiz yük akımlarının bulunduğu üçüncü ve altıncı fiderde bulunan $R_{3,1}$ ve $R_{6,1}$ rölelerin $I_{p,2}$ ayarları diğer rölelerden farklıdır. Şebekenin kapasitif akım yönünden dengesiz olduğu durumda dengesizliğin olduğu fiderde bulunan rölenin $I_{p,2}$ ayarı diğer rölelerden farklıdır. Böylece negatif sıra temelli ilave toprak koruma yöntemi için önerilen optimizasyon yaklaşımı şebekenin yük akımı ve kapasitif akım dengesizliğini dikkate almaktadır.

Tablo 8.4: Farklı şebeke parametreleri için optimal $I_{p,2}$ ayarlarının değişimi.

Parametre	Hibrit Şebeke		Dengesiz Yük Akımı		Dengesiz Kapasitif Akım	
Röle Adı	TDS (saniye)	$I_{p,2}$ (A)	TDS (saniye)	$I_{p,2}$ (A)	TDS (saniye)	$I_{p,2}$ (A)
$R_{1,1}$	1	1	1	1	1	1
$R_{2,1}$	1	1	1	1	1	1
$R_{3,1}$	1	1	1	30	1	5
$R_{4,1}$	1	1	1	1	1	1
$R_{4,2}$	1	1	1	1	1	1
$R_{5,1}$	1	1	1	1	1	1
$R_{5,2}$	1	1	1	1	1	1
$R_{6,1}$	1	1	1	44	1	1
$R_{7,1}$	1	1	1	1	1	1
$R_{7,2}$	1	1	1	1	1	1

Tablo 8.5: Optimal $I_{p,2}$ ayarının seçici koruma performansı.

Parametre	Hibrit Şebeke		Dengesiz Yük Akımı		Dengesiz Kapasitif Akım	
Röle Adı	$3I_2$ (A)	$I_{p,2}$ (A)	$3I_2$ (A)	$I_{p,2}$ (A)	$3I_2$ (A)	$I_{p,2}$ (A)
$R_{1,1}$	128,66	1	58,79	1	55,62	1
$R_{2,1}$	0,03	1	0,01	1	0,01	1
$R_{3,1}$	0,04	1	28,79	30	3,48	5
$R_{4,1}$	0,02	1	0,01	1	0,01	1
$R_{4,2}$	0,02	1	0,01	1	0,01	1
$R_{5,1}$	0,05	1	0,03	1	0,03	1
$R_{5,2}$	0,05	1	0,03	1	0,03	1
$R_{6,1}$	0,04	1	42,18	44	0,01	1
$R_{7,1}$	0,07	1	0,04	1	0,04	1
$R_{7,2}$	0,07	1	0,04	1	0,04	1

Tablo 8.5 ile optimal $I_{p,2}$ ayarının seçici koruma performansı listelenmiştir. Birinci fiderin sonunda TFT arızaları oluşturularak her bir röle konumundan negatif sıra akım genlikleri elde edilmiştir. Her üç senaryoda da TFT arızası için önerilen $I_{p,2}$ eşik akım ayarı sadece arızalı fiderde bulunan $R_{1,1}$ rölesi tarafından aşılmıştır. Böylece açma sinyali sadece $R_{1,1}$ rölesinden üretilmiştir.

8.4. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerde yaşanan sıfır sıra akım genliğindeki rezonans problemi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kabloların kapasitif akım genliğinden dolayı yaşanan sıfır sıra akım genliğindeki rezonans problemi sıfır sıra akım genliğine bağlı koruma yöntemlerinin etkili sonuç vermemesine neden olmaktadır. Topraklama empedans değeri 33Ω olan topraklama trafosu için 240 mm^2 tek damarlı XLPE kablo kullanıldığı durumda şebekedeki toplam kablo mesafesinin 80 km ile 120 km arasında olması sıfır sıra akım genliğinde rezonans problemine neden olmaktadır. Bu durumda sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinden daha yüksektir.

Bu tez kapsamında Bölüm 6'da geliştirilen optimizasyon yaklaşımı en yüksek sıfır sıra akım genliği her zaman arızalı fiderde görülmediği için topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerde seçici koruma sağlayamamaktadır. Sıfır sıra akım genliğinde yaşanan rezonans problemi sıfır sıra akım genliğine bağlı koruma yöntemlerinin olumsuz etkilenmesinin yanı sıra sıfır sıra akım açısına bağlı yönlü toprak korumanın da etkili sonuç vermemesine neden olmaktadır. Hem yönsüz hem de yönlü toprak korumanın etkinliğini sıfır sıra eşdeğer devresinde bulunan faz-toprak kapasiteleri etkilemektedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dağıtım şebekelerinde artan enerji ihtiyacını karşılamak ve arz güvenliğini arttırmak için topolojik değişiklikler meydana gelmektedir. Topolojik değişiklikler sonucu sağlıklı ve arızalı fiderlerde bulunan koruma rölelerinin gördüğü akım genliğini değiştirmektedir. Böylece mevcut röle ayarları ile seçici koruma koordinasyonu sağlamak mümkün olmayabilir. Röle koordinasyonunun bozulması beraberinde hatalı açma problemine sebebiyet vermektedir.

Dağıtım şebekesinde pek çok arıza tipi görülmekle birlikte gerçekleşme sıklığı en yüksek arıza TFT arızaları olduğu için bu tezde TFT arızası incelenmiştir. TFT arızası sırasında yaşanan hatalı açmalar DÜ'nün kullanılması, indüksiyon motorların kalkış akımları, akım ve gerilimde yaşanan dengesizlikler, her iki uçtan paralellenmiş fider yapısına sahip dağıtım şebekelerinin bulunması ve yeraltı kablolarının kapasitif akım etkisi şeklinde sıralanabilir.

Etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde kablo kullanımının artması beraberinde sıklıkla kapasitif akım temelli hatalı açma problemini meydana getirmektedir. Faz-toprak kapasiteleri üzerinden yük akımına ters yönde akan ve arıza noktası besleyen kapasitif akımlar arızalı ve sağlıklı fiderlerde $3I_0$ akımlarının akmasına sebep olmaktadır. Toprak arızalarına karşı sabit zamanlı röle karakteristiği kullanıldığı göz önüne alındığında, düzgün ayarı yapılmayan toprak koruma röleleri sağlıklı fiderlerin gereksiz yere açma yapmasına sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla geleneksel toprak koruma yöntemleri ve toprak röle ayarları problemi giderme noktasında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle kapasitif akım temelli hatalı açma problemini gidermek amacıyla TFT arızasına karşı koruma yöntemleri ve bu koruma yöntemlerinin ayarlarını optimize eden bir KKDS geliştirilmiştir.

Literatürde faz arızaları için rölelerin TDS ve I_P ayarları optimize edilerek rölelerin toplam çalışma süresi minimize edilmektedir. Böylece yüksek arıza akımının dağıtım şebekesi üzerindeki zararının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Oysaki, etkin topraklanmamış dağıtım şebekelerinde tek faz toprak arızaları için kullanılan röle zaman karakteristiği sabit zamanlı röle karakteristiğidir. Bu sebeple röle çalışma

süresini minimize etmek yerine, I_p değerine bağlı olarak kapasitif akım temelli hatalı açmayı engelleyerek çalışan röle sayısının minimize edilmesi hedeflenmiştir.

TFT arızasına karşı kullanılan koruma yöntemleri basitlikten karmaşıklığa doğru üç ana başlığa ayrılmıştır. Bu nedenle geliştirilen KKDS üç alt toprak koruma türüne sahiptir. Bu toprak koruma yöntemleri sırasıyla yönsüz toprak koruma, yönlü toprak koruma ve ilave koruma yöntemidir. Yönsüz toprak koruma uygulamasında gerilim trafosuna ihtiyaç duyulmadığı için toprak rölesi konumlarından elde edilen sıfır sıra akım bilgisi yeterlidir. Sıfır sıra akım bilgisini elde etmek için 62 baralı radyal dağıtım şebekesinin gerçekçi modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme süresince şebekenin topolojik yapısına bağlı kalınmıştır. Modellenen şebeke üzerinde TFT arızaları oluşturularak her bir arıza noktası için şebekede bulunan rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlikleri kaydedilmiştir. Elde edilen sıfır sıra akım bilgisi ve ilgili arıza noktası ile toprak rölesinin çalışıp çalışmadığını kontrol eden binary değişken tanımlanarak optimizasyon problemi MINLP formatında kurgulanmıştır. Böylece I_p değişkeni optimize edilerek, çalışması gereken röle sayısı minimize edilmiştir. Sağlıklı bölgede bulunan toprak rölelerinin çalışması engellenerek kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmiştir. Yöntemin etkinliğini incelemek için farklı durum senaryoları analiz edilmiştir. Analiz edilen durum senaryoları şebekenin hibrit yapıda olması, şebekede kapasitif akım dengesizliği olması, arızanın bir direnç üzerinden gerçekleşmesi ve nötr noktasının topraklama trafosu üzerinden topraklanması şeklinde sıralanmaktadır. Her bir durum senaryosunda önerilen yöntem ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yöntemin önerdiği optimal I_p değerleri ile 62 baralı radyal dağıtım şebekesi seçici bir şekilde korunmuştur. Bu tez kapsamında geliştirilen yeni optimizasyon yaklaşımı tüm radyal dağıtım şebekelerinde uygulanabilir. Böylece DŞİ'ler isterlerse yönlü toprak koruma rölesi kullanmadan optimal I_p ayarları ile şebekelerini yönsüz olarak koruyabilirler. Fakat yüksek I_p değerlerini röleyi körleştireceği unutulmamalıdır.

KKDS'nin ikinci koruma türü yönlü toprak korumasıdır. Yönlü toprak koruma rölesi kullanarak kapasitif akım temelli hatalı açmaları gidermek için I_p ve RCA ayar değerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Literatürde genel olarak kablo kapasitesinin ihmal edildiği görülmüştür. Bu eksiklik I_p ve RCA değerlerinin optimize edildiği yeni optimizasyon yaklaşımı ile giderilmiştir. Geliştirilen optimizasyon formülasyonu ile sıfır sıra akım açısının çalışma bölgesi içinde olup olmadığını kontrol

edilerek çalışması gereken röle sayısını minimize edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon yaklaşımının etkinliği 62 baralı radyal dağıtım şebekesinde çeşitli parametreleri dikkate alarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu önerilen yöntemin şebekenin hibrit olmasının durumunda, şebekede kapasitif akım dengesizliği bulunması durumunda, farklı topraklama direnci kullanılması durumunda seçici koruma sağladığı görülmüştür. Hassas koruma gereken bölgelerde bu tez kapsamında geliştirilen optimizasyon yaklaşımı sonucu elde edilen optimal I_P ve RCA ayarları ile seçici koruma sağlamak mümkündür. Fakat, 62 baralı radyal dağıtım şebekesinin direnç topraklı şebeke yerine topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durumda önerilen RCA değerlerinin çalışma bölgesine ait sınırlara çok yakın olduğu dolayısıyla ilave bir toprak koruma yönteminin kullanılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Bu sonuç ilave toprak koruma yöntemi olarak KKDS'nin üçüncü toprak koruma türünü oluşturmuştur.

KKDS'de kullanılan ilave toprak koruma yöntemi özellikle endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekeler için geliştirilmiştir. TFT arızası sırasında kabloların kapasitif akımları ve nötr noktasının endüktif karakterli akımı, arıza yolunda sıfır sıra devresinin rezonansa girmesine sebep olmaktadır. Sıfır sıra devresinde yaşanan bu rezonans, sıfır sıra bileşen temelli toprak koruma yöntemlerinin etkin sonuç vermemesine yol açmaktadır. Bu tezde sıfır sıra bileşende yaşanan rezonans problemi detaylı parametrik analizlerle incelenmiştir. Her bir kablo tipi için sıfır sıra bileşende yaşanması muhtemel rezonans problemi hat uzunluğuna bağlı olarak elde edilmiştir. Örneğin, topraklama empedans değeri 33Ω olan topraklama trafosu için 240 mm^2 tek damarlı XLPE kablo kullanıldığı durumda şebekedeki toplam kablo mesafesinin 80 km ile 120 km arasında olması sıfır sıra akım genliğinde rezonans problemine yol açmaktadır. Bu durumda sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinden daha yüksektir. Yönsüz ve yönlü toprak koruma için geliştirilen optimizasyon yaklaşımının direkt olarak topraklama trafosu üzerinden topraklı radyal dağıtım şebekelerine uygulanması seçici toprak korumayı sağlayamamakta, kapasitif akım temelli hatalı açma problemi devam etmektedir.

Topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekelerde sıfır sıra akım genliğinde rezonans yaşanmasının temel nedeni yeraltı kablolarının faz toprak kapasiteleridir. Bu nedenle sıfır sıra bileşen yerine negatif sıra bileşen kullanılarak faz-toprak kapasitesinin etkisi

giderilmiştir. Toprak rölelerinden sıfır sıra akım büyüklükleri yerine negatif sıra akım büyüklükleri elde edilmiştir. Rölelerin çalışma durumları negatif sıra akım genliğine göre belirlenmiştir. I_p değeri negatif sıra bileşen kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon formülasyonu olarak MINLP mimarisi kullanılmıştır. Önerilen optimizasyon yaklaşımının etkinliği 151 baralı radyal dağıtım şebekesinde incelenmiştir. Önerilen optimal I_p değerleri ile rezonans problemi yaşanan topraklama trafosu üzerinden topraklı radyal dağıtım şebekelerinde kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderilmiştir.

Bu tez kapsamında önerilen KKDS ile birlikte topolojiden bağımsız olarak etkin topraklanmamış radyal dağıtım şebekelerinde kapasitif akım temelli hatalı açma problemi giderileceği koruma yöntemi ve koruma yöntemine ait optimal röle ayarları belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda KKDS'nin tüm DŞİ'ler tarafından kullanılması ve kullanıcı dostu bir arayüz haline getirilerek ticari bir paket program haline getirilmesi hedeflenmektedir. Mevcut KKDS lokasyonları belli olan koruma rölelerinin ayarlarını optimize etmektedir. Gelecek çalışmalarda ise koruma rölelerinin optimal yerleştirilmesi problemi de incelenerek amaç fonksiyonlarının kapsamı genişletilecektir. Ayrıca kablo kapasitif akımları dışında TFT arızası sırasında hatalı açmaya sebebiyet veren parametrelerin KKDS'ye eklenmesi gelecek çalışmaların kapsamında olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Das J. C., (2018), “Power System Protective Relaying”, 1st Edition., CRC Press.
- [2] Kennedy J., Ciufo P., Agalgaonkar A., (2019), “Protection Analysis Tool for Distribution Networks with A High Embedded Generation Penetration”, International Journal of Electrical Power Energy Systems, 107 (1), 605–614.
- [3] A. Guldbrand A., O. Samuelsson O., (2007), “Central or Local Compensation of Earth-Fault Currents in Non-Effectively Earthed Distribution Systems”, IEEE Lausanne Power Tech, 1129–1134, Lausanne, Switzerland, 01-05 July.
- [4] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2024), “Kablo Yoğun Türk Dağıtım Şebekelerinde Kapasitif Akım Temelli Hatalı Açmaların Engellenmesi için Yöntem-Hibritasyonu”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39 (2), 883-897.
- [5] Dadfar S., Gandomkar G., (2021), “Augmenting Protection Coordination Index in Interconnected Distribution Electrical Grids: Optimal Dual Characteristic Using Numerical Relays”, International Journal of Electrical Power Energy Systems, 131 (1), 1-14.
- [6] Guldbrand A., (2009), “Earth Faults in Extensive Cable Networks”, Doktora Tezi, Lund Üniversitesi.
- [7] Roberts J., Stulo T.L., Reyes A, (2002), “Sympathetic Tripping Problem Analysis and Solutions,” SEL Technical Report, 1-22.
- [8] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2023), “A Faulty Feeder Selection Method for Distribution Network with Unintentional Resonance in Zero Sequence Circuit”, Electric Power Systems Research, 223 (1), 1-13.
- [9] IEEE Std C37.113-2015, (2016), “IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines”.
- [10] Suliman M.Y., Ghazal M., (2020), “Design and Implementation of Overcurrent Protection Relay”, Journal of Electrical Engineering and Technology, 15 (4), 1595-1605.
- [11] IEEE Power System Relaying Committee, (1991), “Computer Aided Coordination of Line Protection Schemes”, IEEE Transactions on Power Delivery, 6 (2), 575-583.
- [12] Urdenata A.J., Nadira R., Jimenez L.G.P., (1988), “Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, 3 (3), 903-911.

- [13] Leslie H., Brown M., Balakrishnan R., (2004), "Practical Power System Protection", 1st Edition, Newnes Press
- [14] Godwal S.D., Pandya K.S., Rajput V.N., Vora S.C., (2020), "A Review on Approaches Employed for Solving Directional Overcurrent Relays' Coordination Problem", *Advances in Electric Power and Energy Infrastructure*, 608 (1), 35-51.
- [15] Bedekar P.P., Bhide S.R., Kale V.S., (2010), "Optimum Coordination of Overcurrent Relay Timing Using Simplex Method", *Electric Power Components and Systems*, 38 (10), 1175-1193.
- [16] Shah J., Khristi N., Rajput V.N., Pandya K.S., (2020), "A New Objective Function for Optimal Coordination of Directional Over-current Relays", *Advances in Electric Power and Energy Infrastructure*, 608 (1), 1-11.
- [17] Akdag O., Yeroglu C., (2021), "Optimal Directional Overcurrent Relay Coordination Using MRFO Algorithm: A Case Study of Adaptive Protection of The Distribution Network of The Hatay Province of Turkey", *Electric Power Systems Research*, 192 (1), 1-11.
- [18] Karegar H.K., Abyaneh H.A., Ohis V., Meshkin M., (2005), "Pre-Processing of The Optimal Coordination Of Overcurrent Relays", *Electric Power Systems Research*, 75 (2), 134-141.
- [19] Zeineldin H., El-Saadany E.F., Salama M.A., (2005), "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relay Coordination", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-6, San Francisco, CA, USA, 16 June.
- [20] Abyaneh H.A., Al-Dabbagh M., Karegar H.K, Sadeghi S.H.H., Khan R.A.J., (2003), "A New Optimal Approach For Coordination Of Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (2), 430–435.
- [21] Zeineldin H., El-Saadany E.F., Salama M.A., (2006), "Optimal Coordination Of Overcurrent Relays Using A Modified Particle Swarm Optimization", *Electric Power Systems Research*, 76 (11), 988–995.
- [22] Damchi Y., Dolatabadi M., Mashhadi H.R., Sadeh J., (2018), "MILP Approach For Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems", *Electric Power Systems Research*, 158 (1), 267–274.
- [23] Papaspiliotopoulos V.A., Korres G.N., Maratos N.G., (2017), "A Novel Quadratically Constrained Quadratic Programming Method for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32 (1), 3–10.

- [24] Corrêa R., Cardoso G., Araújo O.C.B., Mariotto L., (2015), “Online Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Binary Integer Programming”, *Electric Power Systems Research*, 127 (1), 118–125.
- [25] Hemmati R., Mehrjerdi H., (2019), “Non-Standard Characteristic of Overcurrent Relay for Minimum Operating Time and Maximum Protection Level”, *Simulation Model Practice Theory*, 97 (1), 1-11.
- [26] Kiliçkiran H.C., Şengör İ., Akdemir H., Kekezoğlu B., Erdinç O., Paterakis N.G, (2018), “Power System Protection with Digital Overcurrent Relays: A Review of Non-Standard Characteristics”, *Electric Power Systems Research*, 164 (1), 89–102.
- [27] Arreola Soria O., Conde Enríquez A., Trujillo Guajardo L.A, (2013), “Overcurrent Relay with Unconventional Curves and Its Application in Industrial Power Systems”, *Electric Power Systems Research*, 110 (1), 113–12.
- [28] Shrivastava A., Sharma A., Pandit M., Jatily V., Azzopardi B., (2021), “Hybrid Protection Scheme Based Optimal Overcurrent Relay Coordination Strategy for RE Integrated Power Distribution Grid”, *Energies (Basel)*, 14 (21), 71-92.
- [29] Bedekar P.P., Bhide R.B., (2011), “Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using The Hybrid GA-NLP Approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (1), 109–119.
- [30] Labrador Rivas A.E., Gallego Pareja L.A., Abrão T., (2019), “Coordination of Distance and Directional Overcurrent Relays Using An Extended Continuous Domain ACO Algorithm and An Hybrid ACO Algorithm”, *Electric Power Systems Research*, 170 (1), 259–272.
- [31] Kida A.A., Labrador Rivas A.E., Gallego L.A., (2020), “An Improved Simulated Annealing–Linear Programming Hybrid Algorithm Applied To The Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays”, *Electric Power Systems Research*, 181 (1), 1-11.
- [32] So C.W., Li K.K., (2000), “Overcurrent Relay Coordination By Evolutionary Programming”, *Electric Power Systems Research*, 53 (2), 83–90.
- [33] Korashy A., Kamel S., Youssef A.R., Jurado F., (2019), “Modified Water Cycle Algorithm for Optimal Direction Overcurrent Relays Coordination”, *Applied Soft Computing*, 74 (1), 10–25.
- [34] Korashy A., Kamel S., Houssein E.H., Jurado F., Hashim F.A., (2021), “Development And Application of Evaporation Rate Water Cycle Algorithm for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays”, *Expert System With Application*, 185 (1), 1-11.

- [35] Bedekar P.P., Bhide S.R., (2011), "Optimum Coordination of Overcurrent Relay Timing Using Continuous Genetic Algorithm", *Expert System With Applications*, 38 (9), 11286–11292.
- [36] Gokhale S.S., Kale V.S. (2016), "An Application of A Tent Map Initiated Chaotic Firefly Algorithm for Optimal Overcurrent Relay Coordination", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78 (1), 336–342.
- [37] Wadood A, (2018), "An Optimized Protection Coordination Scheme for The Optimal Coordination of Overcurrent Relays Using a Nature-Inspired Root Tree Algorithm", *Applied Sciences*, 8 (9), 1-22.
- [38] Sarkar D., Kudkelwar S., Saha D., (2019), "Optimal Coordination of Overcurrent Relay Using Crow Search Algorithm", *Smart Science*, 7 (4), 282–297.
- [39] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), "Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems", 11th Smart Grid Conference (SGC), 1–6, Tabriz, Iran, 7-9 December.
- [40] Alam M.N., Das B., Pant V., (2015), "A Comparative Study of Metaheuristic Optimization Approaches for Directional Overcurrent Relays Coordination", *Electric Power Systems Research*, 128 (1), 39–52.
- [41] Atsever, M. B., Hocaoglu, M. H. (2022), "Aşırı Akım Röle Koordinasyonu için Bozkurt Algoritmasının Kapsamlı Performans Analizi", *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, 1 (1), 52-61.
- [42] IEEE Working Group, (1998) "Distribution Line Protection Practices-Industry Survey Results", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (2), 514–524.
- [43] Birla D., Maheshwari R.P., Gupta H.O., (2007) "An Approach to Tackle the Threat of Symmetry Trips in Directional Overcurrent Relay Coordination", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (2), 851–858.
- [44] Pandakov K., Hoidalen H.K., Traetteberg S., (2018), "An Additional Criterion for Faulty Feeder Selection During Ground Faults in Compensated Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (6), 2930–2937.
- [45] Kauhaniemi K., Kumpulainen L., (2004), "Impact of Distributed Generation on The Protection of Distribution Networks", Eighth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection, 1-6, Amsterdam, Netherlands, 05-08 April.
- [46] Gnana Swathika O.V., Hemamalini S., (2016), "Prims-Aided Dijkstra Algorithm for Adaptive Protection in Microgrids", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topic in Power Electronics*, 4 (4), 1279–1286.

- [47] Firouzabadi T.D., Zarchi D.A., Mazid M., Safdarkhani H., Nafisi H., (2022), "Overarching Preventive Sympathetic Tripping Approach in Active Distribution Networks without Telecommunication Platforms and Additional Protective Devices", *IEEE Access*, 10 (1), 28411–28421.
- [48] Sharma A. Panigrahi B.K., (2019), "Interphase Fault Relaying Scheme to Mitigate Sympathetic Tripping in Meshed Distribution System", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 55 (1), 850–857.
- [49] Purwar E., Vishwakarma D.N., Singh S.P., (2019) "A Novel Constraints Reduction-Based Optimal Relay Coordination Method Considering Variable Operational Status of Distribution System with DGs", *IEEE Trans Smart Grid*, 10 (1), 889–898.
- [50] Maleki M.G., Chabanloo R.M., Javadi H., (2019) "Method To Resolve False Trip of Non-Directional Overcurrent Relays in Radial Networks Equipped With Distributed Generators", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13 (4), 485–494.
- [51] Chung J.L., Lu Y., Kao W.S., Chou C.J., (2008), "Study of Solving The Coordination Curve Intersection of Inverse-Time Overcurrent Relays in Subtransmission Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (4), 1780–1788.
- [52] Lu Y., Chung J.L., (2012), "Detecting and Solving The Coordination Curve Intersection Problem of Overcurrent Relays in Subtransmission Systems With A New Method", *Electric Power Systems Research*, 95 (1) 19–27.
- [53] Chen C.R., Lee C.H., Chang C.J., (2011), "Overcurrent Relay Coordination Optimization With Partial Differentiation Approach for The Validation Of Coordination Violation", *Electric Power Components and Systems*, 39 (10), 933–947.
- [54] Elsadd M.A., Kawady T.A., Taalab A.M.I, Elkalashy N.I., (2021), "Adaptive Optimum Coordination Of Overcurrent Relays for Deregulated Distribution System Considering Parallel Feeders", *Electrical Engineering*, 103 (3), 1849–1867.
- [55] Draz A., Elkholy M.M., El-Fergany A., (2022) "Over-Current Relays Coordination including Practical Constraints and DGs: Damage Curves, Inrush, and Starting Currents", *Sustainability (Switzerland)*, 14 (5), 1-11.
- [56] Hayes S., Hou D., Fischer F., (2021), "Understanding Ground Fault Detection Sensitivity and Ways to Mitigate Safety Hazards in Power Distribution Systems", *SEL Technical Report*, 1-13.

- [57] El-Naily N., Saad S.M., Mohamed F.A., (2020), “Novel Approach For Optimum Coordination of Overcurrent Relays To Enhance Microgrid Earth Fault Protection Scheme”, *Sustainable Cities and Society*, 54 (1), 1-13.
- [58] Siirto O., Loukkalahti M., Hyvarinen M., Heine P., Lehtonen M., (2012), “Neutral Point Treatment and Earth Fault Suppression”, 8th International Conference- Electric Power Quality and Supply Reliability, 193–198, Tartu, Estonia, 11-13 June.
- [59] Bakar A.H.A, Mokhlis H., Illias H.A., Chong P.L., (2012) “The Study of Directional Overcurrent Relay and Directional Earth-Fault Protection Application for 33kv Underground Cable System in Malaysia”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 40 (1), 113–119.
- [60] IEEE Std. 142, (2007), “Recommended Practice for System Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”.
- [61] IEEE Std. 3003.1, (2019), “Recommended Practice for System Grounding of Industrial and Commercial Power Systems”.
- [62] Granizo R., Blázquez F., Rebollo E., Platero C., (2015), “A Novel Ground Fault Non-Directional Selective Protection Method for Ungrounded Distribution Networks”, *Energies (Basel)*, 8 (2), 1291–1316.
- [63] Hartmann B., Vokony I., Táci I., Kiss J., (2019), “Effect of Extensive Cabling on Efficiency of Resonant Earthing Applied in Medium-Voltage Distribution Networks: a Hungarian Case Study”, *IEEE PowerTech*, 1-6, Milan, Italy, 23-27 June.
- [64] Olejnik B., (2021), “Adaptive Zero-Sequence Overcurrent Criterion for Earth Fault Detection for Fault Current Passage Indicators in Resistor Grounded Medium Voltage Networks”, *IEEE Access*, 9 (1), 63952–63965.
- [65] IEEE Std C62.92.1, (2017), “Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems--Part I: Introduction”.
- [66] Atsever M.B., (2019), “Etkin Topraklanmayan Şebekelerde Koruma ve Koordinasyon,” *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [67] M. Lukowicz M., W. Rebizant W., and M. Kereit M., (2020), “New Approach To Intermittent Earth Fault Detection With Admittance Criteria”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123 (1), 1-12.
- [68] Li J., Gao M., Liu B., Gao F., Chen J., (2021), “Fault Location Algorithm in Distribution Networks Considering Distributed Capacitive Current”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36 (5), 2785–2793.
- [69] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021) “Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks,” 56th International Universities

Power Engineering Conference (UPEC), 1-6, Middlesbrough, United Kingdom, 31 August-3 September.

- [70] Gatta F.M., Geri A., Lauria S., Maccioni M., (2007), “Analytical Prediction of Abnormal Temporary Overvoltages Due To Ground Faults in MV Networks”, *Electric Power Systems Research*, 77 (10), 1305–1313.
- [71] Elmore W.A, (2004), “Protective Relaying Theory And Applications”, 2nd Edition. Marcel Dekker.
- [72] Bakar A.H.A, Ooi B., Govindasamy P., Tan C., Illias H.A., Mokhlis H., (2014), “Directional Overcurrent and Earth-Fault Protections for A Biomass Microgrid System in Malaysia”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55 (1), 581–591.
- [73] Jennett K.I., Booth C.D., Coffele F., Roscoe A.J., (2015), “Investigation of The Sympathetic Tripping Problem in Power Systems With Large Penetrations Of Distributed Generation”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9 (4), 379–385.
- [74] El-Khattam W., Sidhu T.S., (2008), “Restoration Of Directional Overcurrent Relay Coordination in Distributed Generation Systems Utilizing Fault Current Limiter”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (2), 576–585.
- [75] Petit M., Le Pivert X., Garcia-Santander L., (2010), “Directional Relays Without Voltage Sensors for Distribution Networks With Distributed Generation: Use Of Symmetrical Components”, *Electric Power Systems Research*, 80 (10), 1222–1228.
- [76] Maleki M.G, Chabanloo R.M., Farrokhifar M., (2020), “Accurate Coordination Method Based on The Dynamic Model of Overcurrent Relay for Industrial Power Networks Taking Contribution of Induction Motors Into Account”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 14 (4), 645–655.
- [77] Bekhradian R., Davarpanah M., Sanaye-Pasand M., (2021), “Current-Based Blocking Scheme To Stabilize Distribution Network Relays Against FIDVR”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 132 (1), 1-13.
- [78] Reda A., Abdelgawad A.F., Ibrahim M., (2022), “Effect of Non Standard Characteristics of Overcurrent Relay on Protection Coordination And Maximizing Overcurrent Protection Level in Distribution Network”, *Alexandria Engineering Journal*, 61 (9), 6851-6867.
- [79] Al Thehli B.N., Mariappan V., Ahamed M.R., (2013), “A Comprehensive Analysis and Solution for Sympathetic Tripping in Distribution Network”, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 1-4, Stockholm, Sweden, 10-13 June.

- [80] Karnik N., Sahni M., York J., Cook T., (2013), “Analytical Approach To Study Effect of Mutual Coupling on Ground Over-Current Relays”, North American Power Symposium (NAPS), 1–6, Manhattan, KS, USA, 22-24 September.
- [81] Perera L.B., (2010), “Directional Earth Fault Relay Operation in Mutually Coupled Multiple Circuit Distribution Lines”, 20th Australasian Universities Power Engineering Conference, 1-6, Christchurch, New Zealand, 05-08 December.
- [82] Sabra H., Ibrahim D.K., Gilany M., (2018), “Field Experience With Sympathetic Tripping in Distribution Networks: Problems And Solutions”, The Journal of Engineering, 2018 (15), 1181–1185.
- [83] Pradhan A.K., Routray A., Madhan Gudipalli S., (2007) “Fault Direction Estimation in Radial Distribution System Using Phase Change in Sequence Current”, IEEE Transactions on Power Delivery, 22 (4), 2065-2071.
- [84] Ukil A., Deck B., Shah V.H., (2012), “Current-Only Directional Overcurrent Protection for Distribution Automation: Challenges and Solutions”, IEEE Trans Smart Grid, 3 (4), 1687–1694.
- [85] Paul D., (2020), “Phase-Ground Fault Current Analysis and Protection of a High-Resistance Grounded Power System”, IEEE Transactions on Industry Applications, 2020 (1), 3306–3314.
- [86] Atsever M.B, Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), “Determination of Proper Angle Settings in Resistance Grounded Distribution Systems for Directional Earth Fault Relays”, Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1 (1), 26–32.
- [87] Sottile J., Gnappagasam S.J., Novak T., Kohler J.L., (2006), “Detrimental Effects of Capacitance on High-Resistance-Grounded Mine Distribution Systems”, IEEE Transactions on Industrial Applications, 42 (5), 1333–1339.
- [88] Stojanović Z.N., Djurić M.B., (2013), “An Algorithm for Directional Earth-Fault Relay With No Voltage Inputs”, Electric Power Systems Research, 96 (1), 144–149.
- [89] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), “Earth Fault Protection Selectivity Issues on Reactance Earthed Distribution System”, 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 257–262, Bursa, Turkey, 25-27 November.
- [90] IEEE Working Group D-3, (2017), “Considerations in Choosing Directional Polarizing Methods for Ground Overcurrent Elements in Line Protection Applications ‘Considerations in Choosing Directional Polarizing Methods for Ground Overcurrent Elements in Line Protection Applications’”, 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 1-67, College Station, TX, USA, 03-06 April.

- [91] Horak J., (2006), "Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts," Annual Conference for Protective Relay Engineers, 164–176, Albuquerque, NM, USA, 09-11 April.
- [92] Atsever M.B, Karacasu Ö., Hocaoglu M.H., (2020), "Determination Of Proper Angle Settings For Resistance Grounded Distribution Systems For Directional Earth Fault Relays", 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-6, Bursa, Turkey, 26-28 November.
- [93] Lavorin R., Hou D., Altuve H.J., Fischer N., Calero F., (2007), "Selecting Directional Elements for Impedance-Grounded Distribution Systems", 34th Annual Western Protective Relay Conference, 1-17, Spokane, Washington, USA, 16-18 October.
- [94] Alstom, (2001), "Network Protection and Automation", First Edition, Alstom Press.
- [95] Vaca S., Fonseca A., Chapi F., Pérez-Yauli F., (2021), "A New Methodology for The Analysis and Optimal Setting of Directional Polarisation Methods for Overcurrent Elements in Line Protection Applications", IET Generation, Transmission & Distribution, 16 (5), 882-896.
- [96] Jalilian A., Hagh M.T., Hashemi S.M., (2014), "An Innovative Directional Relaying Scheme Based on Postfault Current", IEEE Transactions on Power Delivery, 29 (6), 2640-2647.
- [97] Topolanek D., Lehtonen M., Toman P., Orsagova J., Drapela J., (2020), "An Earth Fault Location Method Based on Negative Sequence Voltage Changes at Low Voltage Side Of Distribution Transformers", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 118 (1), 1-8.
- [98] Gutierrez G., Celeita D., Ramos G., (2019), "Ground-Directional Solution To Improve Selectivity in Underground Mining Power Systems Protection," Computers and Electrical Engineering, 80 (1), 1-12.
- [99] Granizo Arrabe R., Guerrero Granados J.M., Alvarez Gomez F., Platero Gaona C.A., (2022), "New Selective Directional Ground Fault Protection Method for Ungrounded Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 37 (6), 5234–5243.
- [100] Zimmerman K., Costello D., (2010), "Fundamentals and Improvements for Directional Relays", 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 29 March-1 April.
- [101] Holt C., Thompson M.J., (2017), "Practical Considerations When Protecting Mutually Coupled Lines", 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 1-16, College Station, TX, USA, 04-07 April.

- [102] Huang W.Y., Kaczmarek R., (2007), "SLG Fault Detection in Presence of Strong Capacitive Currents in Compensated Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (8), 2132-2135.
- [103] P. Liu P. and C. Huang C., (2018), "Detecting Single-Phase-To-Ground Fault Event and Identifying Faulty Feeder in Neutral Ineffectively Grounded Distribution System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33 (5), 2265–2273.
- [104] Toader D., Greconici M., Vesa D., Vintan M., Solea C., (2021), "Analysis of The Influence of The Insulation Parameters of Medium Voltage Electrical Networks and of The Petersen Coil on The Single-Phase-To-Ground Fault Current," *Energies (Basel)*, 14 (5), 1-13.
- [105] Abdel-Fattah M.F., Lehtonen M., (2012), "Transient Algorithm Based on Earth Capacitance Estimation for Earth-Fault Detection in Medium-Voltage Networks", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6 (2), 161-166.
- [106] Henriksen T., (2011), "Faulty Feeder Identification in High Impedance Grounded Network Using Charge–Voltage Relationship", *Electric Power Systems Research*, 81 (9), 1832–1839.
- [107] Loos M., Werben S., Kereit M., Maun J.C., (2013), "Fault Direction Method in Compensated Network Using the Zero Sequence Active Energy Signal," *Eurocon 2013*, 717–723, Zagreb, Croatia, 01-04 July.
- [108] Eissa M.M., Hasan S., Saleh S.S., (2017), "A New Digital Filter Directional Relay Technique Using Active/Reactive Power Portrait", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 86 (1), 33–52.
- [109] Dong X., Shi S., (2008), "Identifying Single-Phase-to-Ground Fault Feeder in Neutral Noneffectively Grounded Distribution System Using Wavelet Transform", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (4), 1829–1837.
- [110] Tang T., Zeng X., Huang C., Li Z., (2020), "Faulty Feeder Detection Based on the Composite Factors in Resonant Grounding Distribution System", *Electric Power Systems Research*, 189 (1), 1-13.
- [111] Wan Q., Zheng S., Shi C., (2022), "Feeder Selection Method for Full Cable Networks Earth Faults Based on Improved K-Means", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 16 (19), 3837–3848.
- [112] Pandakov K., Høidalen H.K., Marvik J.I., (2018), "Misoperation Analysis of Steady-State and Transient Methods On Earth Fault Locating in Compensated Distribution Networks," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 15 (1), 34–42.

- [113] Song J., Li Y., Zhang Y., (2021), “Faulty Line Detection Method Based on Improved Hilbert-Huang Transform for Resonant Grounding Systems”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (3), 1-13.
- [114] N. Peng N., Liang R., Hou T., Wang G., Chen X., Teng S., (2019), “Single-Phase-to-Earth Faulty Feeder Detection in Power Distribution Network Based on Amplitude Ratio of Zero-Mode Transients”, *IEEE Access*, 7 (1), 117678–117691.
- [115] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2023), “Mitigation of Sympathy Trips in Highly Cabled Non-Effectively Earthed Radial Distribution Systems Via MINLP”, *Electric Power Systems Research*, 220 (1), 1-13.
- [116] Hatata A.Y., A. Lafi A., (2018), “Ant Lion Optimizer for Optimal Coordination of DOC Relays in Distribution Systems Containing Dgs”, *IEEE Access*, 6 (1), 72241–72252.
- [117] El-Naily N., Saad S.M., Elhaffar A., Zarour E., Alasali F., (2022), “Innovative Adaptive Protection Approach to Maximize the Security and Performance of Phase/Earth Overcurrent Relay for Microgrid Considering Earth Fault Scenarios”, *Electric Power Systems Research*, 206 (1), 1-12.
- [118] Serna J.J., Lopez-Lezama J.M., (2018), “An Alternative Method for Obtaining The Optimal Directional Characteristic Angle of Directional Overcurrent Relays in Transmission Networks”, *Contemporary Engineering Sciences*, 11 (4), 149–164.
- [119] Serna J.J., Lopez-Lezama J.M., (2019), “Alternative Methodology To Calculate The Directional Characteristic Settings of Directional Overcurrent Relays in Transmission and Distribution Networks”, *Energies (Basel)*, 12 (19), 1-13.
- [120] Can/Am EMTP User Group, (1997), “Alternative Transient Program Rule Book”, 1st Edition, Can/Am EMTP Press.
- [121] Atsever M.B., Devenci U., Yilmaz S.C. Hocaoglu M.H., (2023), “Zero-Sequence Based Fault Location in Non-Effectively Earthed Distribution Systems”, 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-6, Istanbul, Turkey, 30 August-2 September.

ÖZGEÇMİŞ

Mert Bekir Atsever ilk ve orta öğrenimini Pendik’te tamamlayıp, lisans eğitimini 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinde üçüncülük derecesi ile aldı. 2019 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitime başladı. Halen Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak güç sistemlerinde topraklama ve koruma alanında araştırmalarına devam etmektedir.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

- [1] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2024), “Kablo Yoğun Türk Dağıtım Şebekelerinde Kapasitif Akım Temelli Hatalı Açmaların Engellenmesi için Yöntem-Hibritasyonu”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39 (2), 883-897.
- [2] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2023), “Mitigation Of Sympathy Trips in Highly Cabled Non-Effectively Earthed Radial Distribution Systems Via MINLP”, Electric Power Systems Research, 220 (1), 1-13.
- [3] Atsever M.B., Hocaoglu M.H., (2023), “A Faulty Feeder Selection Method For Distribution Network With Unintentional Resonance in Zero Sequence Circuit”, Electric Power Systems Research, 223 (1), 1-13.
- [4] Atsever, M. B., Hocaoglu, M. H. (2022), “Aşırı Akım Röle Koordinasyonu için Bozkurt Algoritmasının Kapsamlı Performans Analizi”, Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, 1 (1), 52-61.
- [5] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), “Determination of Proper Angle Settings in Resistance Grounded Distribution Systems for Directional Earth Fault Relays”, Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1 (1), 26–32.
- [6] Atsever M.B., Devci U., Yılmaz S.C. Hocaoglu M.H., (2023), “Zero-Sequence Based Fault Location in Non-Effectively Earthed Distribution Systems”, 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-6, Istanbul, Turkey, 30 August-2 September.
- [7] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), “Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems”, 11th Smart Grid Conference (SGC), 1–6, Tabriz, Iran, 7-9 December.
- [8] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021) “Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks,” 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-6, Middlesbrough, United Kingdom, 31 August-3 September.
- [9] Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., (2021), “Earth Fault Protection Selectivity Issues on Reactance Earthed Distribution System”, 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 257–262, Bursa, Turkey, 25-27 November.

[10] Atsever M.B, Karacasu Ö., Hocaoglu M.H., (2020), “Determination Of Proper Angle Settings For Resistance Grounded Distribution Systems For Directional Earth Fault Relays”, 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-6, Bursa, Turkey, 26-28 November.

