



Method-hybridization for preventing capacitive current based false trips in Turkish cable dense distribution networks

Mert Bekir Atsever^{1*}, Mehmet Hakan Hocaoglu²

¹Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gebze Technical University, 41400 Kocaeli, Türkiye

²Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Istanbul Ticaret University, 34400, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- The capacitive current-based false tripping problem is investigated.
- A one-type relay setting and protection method are not appropriate.
- Hybrid protection method is proposed for two different types of earthing.

Keywords:

- Earth fault
- False trip
- Capacitive current
- Neutral Earthing
- EMTP Modelling

Article Info:

Research Article

Received: 09.12.2022

Accepted: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1216742

Correspondence:

Author: Mert Bekir Atsever

e-mail:

mbatsever@gtu.edu.tr

phone: +90 262 605 32 49

Graphical/Tabular Abstract

Extensive cable usage may have been necessary, especially in urban areas due to the placement problem of overhead lines. However, cable usage brings protection problems. Capacitive current of underground cables circulating during earth faults affects fault current magnitudes seen by the relays. Therefore, traditional earth fault relay settings may not provide selectivity. Hybridization of the protection methods and relay settings is inevitable. Figure A shows current circulation in the case of the single line-to-earth fault that occurred on Feeder 1, phase A. If the distribution system consists of overhead lines, the capacitive current of the system can be neglected. Therefore, Relay 1 sees only fault current (I_F), and Relay 2 does not generate a false trip signal. However, cable usage may cause both relays to see the fault current. Hence, both feeders are isolated from the system due to the improper relay settings. Directional earth fault protection is used to provide selectivity. However, directional earth protection is costly. More importantly, directional earth fault relays performance is influenced by neutral earthing types of distribution networks. Therefore, this article proposes a hybridization method and settings depending on network topology for selective protection.

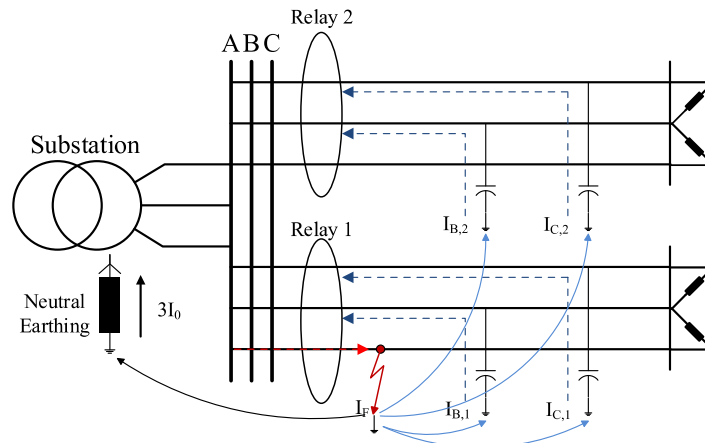


Figure A. Current circulating during SLG

Purpose: Hybridization of different earth fault protection methods to be used to solve capacitive current based false tripping problem in cable-dense Turkish distribution networks.

Theory and Methods: Neutral earthing types directly affect both faulty and healthy feeders current characteristics. Thus, 62-busbar real distribution network is modeled. Comprehensive earth fault simulations are carried out in EMTP by using field data. Zero sequence current magnitudes and zero sequence current angles are recorded from the relay locations.

Results: Earth fault simulation results clearly show that neutral earthing practices effect selectivity of the protection system. Unproper relay settings and protection methods may cause false trip in healthy section. Directional earth fault protection which is used as a remedy for false tripping, may fail especially in 33Ω inductive type grounding transformers. However, with the help of the proposed hybridization method selective protection is ensured for all cases.

Conclusion: It is impossible to provide selective earth fault protection with one type relay setting or protection method in modern distribution networks. Proposed hybridization of protection method and relay settings solves the capacitive current based false trip problem.



Kablo yoğun Türk dağıtım şebekelerinde kapasitif akım temelli hatalı açmaların engellenmesi için yöntem-hibritasyonu

Mert Bekir Atsever^{1*}, Mehmet Hakan Hocaoglu²

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 41000, Gebze, Kocaeli, Türkiye

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34000, Maltepe, İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Kapasitif akım temelli hatalı açma problemi farklı nötr topraklaması türlerine göre incelenmiştir
- Tek tip röle ayarının ve koruma yönteminin uygun olmadığı gösterilmiştir
- İki farklı topraklama türü için hibrit koruma yöntemi önerilmiştir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.12.2022

Kabul: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1216742

Anahtar Kelimeler:

Kapasitif akım,
hatalı açma,
kablo,
nötr topraklaması,
toprak koruma

ÖZ

Modern dağıtım şebekeleri farklı ihtiyaçları karşılayacak şekilde evrimleşmektedir. Temelde bu değişimin kaynağı artan enerji talebi ve arz güvenliğidir. Artan enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla dağıtım şebekelerinde pek çok paralel fider çıkışı, arz güvenliğinin artırılması noktasında ise yoğun yeraltı kablosu kullanımı mevcuttur. Tek faz toprak arızası sırasında arızanın yaşanmadığı fiderlerde yeraltı kablolarının kapasitif akımlarından dolayı görülen sıfır sıra akımlar hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. Büyükşehirlerde kullanılan dağıtım şebekeleri uzun mesafeli yeraltı kablosuna ve yüksek miktarda paralel fider çıkışlarına sahip olması ile dikkat çekmektedir. Ayrıca farklı tip nötr topraklama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu durum hatalı açma probleminin giderilmesi noktasında tek tip koruma yönteminin ve röle ayarının uygulanabilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle dağıtım topolojisine özgü fider bazlı toprak koruma hibritasyonu gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada, yöntem hibritasyonu geliştirilmiş ve 62-baralılı dağıtım şebekesinde farklı hat topolojileri ve farklı nötr topraklama yöntemleri için tek faz toprak arızası sonucu yaşanan hatalı açmaları gidermek amacıyla uygulanmıştır. Yapılan uygulama ile fider bazlı hibrit koruma yöntemleri ve bu yöntemlere ait röle ayar değerleri önerilerek yöntemin geçerliliği gösterilmiştir.

Method-hybridization for preventing capacitive current based false trips in Turkish cable dense distribution networks

HIGHLIGHTS

- The capacitive current-based false tripping problem is investigated
- A one-type relay setting and protection method are not appropriate
- Hybrid protection method is proposed for two different types of earthing

Article Info

Research Article

Received: 09.12.2022

Accepted: 25.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1216742

Keywords:

Capacitive current,
false trip,
kablo,
neutral earthing,
earth protection

ABSTRACT

Modern distribution networks have constantly evolved to meet different requirements. Basically, increasing energy demand and supply security are the main motivation for these changes. In order to meet the increasing energy need, there are many parallel outgoing feeders in the distribution substations, and there is an intense use of underground cables to increase supply security. During single line to earth fault, zero sequence currents circulate in the system due to cable capacitive currents of underground cables. These capacitive charging currents may cause false trips in healthy sections of the network. Metropolitan distribution networks draw particular attention with distinguishing topological features which are; the usage of long-length underground cables and high number of parallel outgoing feeders. In addition, different types of earthing methods are applied. This situation eliminates the applicability of simple, unique and universal relay settings for all types of networks. As a result, the requirement of feeder-based protection hybridization, specifically tailored to the distribution network topology is inevitable. In this study, feeder-based hybrid protection methods and optimum setting values of these methods are proposed for different network topologies and different neutral earthing methods. The method-hybridization is applied to the 62-busbar distribution network to demonstrate the applicability of the proposed method.

1. Giriş (Introduction)

Radyal dağıtım şebeke topolojisi; işletme, bakım ve koruma açısından kapalı ring şebeke yapılarına göre daha avantajlıdır. Bu nedenle dağıtım şebekelerinin mümkün mertebe radyal veya açık ring olarak işletilmesi tercih edilmektedir [1]. Dağıtım şebekelerinin etkin bir şekilde korunması, işletilmesi ve arz güvenliğinin en üst seviyede tutulması için dağıtım şebeke işletmecilerinin (DŞİ) bazı kriterleri sağlaması elzemdir. Bu kriterler; seçicilik, güvenlik, güvenilirlik ve hız şeklinde sıralanabilir. Kriterlerin sağlanması noktasında DŞİ'leri zorlayıcı bazı özellikler mevcuttur. Bu özellikler; dağıtım şebekelerinde farklı topraklama türleri kullanılması [2], özellikle metropol şehirlerde yoğun yer altı kablosu döşenmesi [3] bir trafo merkezinden pek çok paralel fider çıkışı bulunması [4], dağıtım üretiminin dağıtım seviyesinde gücünün ve sayısının artması [5], yenilenebilir enerji kaynaklarının güç elektroniği elemanları üzerinden dağıtım fiderlerine entegrasyonu [6] şeklinde sıralanabilir. Tüm bu zorlukların yanı sıra, dağıtım şebekesinin işletilmesi sırasında tahmin edilemeyen ve oluşumu önlenemeyen arızalar gerçekleşmektedir. Tek Faz Toprak (TFT) arızası diğer arıza tipleri ile kıyaslandığında en çok gerçekleşen arıza tipidir [7]. TFT arızası toprakla temaslı olduğundan dolayı; nötr topraklama tipi TFT arızasına karşı korumada önem arz etmektedir. Dünya genelinde pek çok farklı nötr topraklama uygulaması bulunmaktadır [8]. Bu durum, TFT arızalarına karşı tek tip bir koruma yönteminin geliştirilmesini ve bu koruma yöntemine ait röle ayarlarının tüm durumlarda koruma yapabildiğini imkânsız kılmaktadır [9]. Yaygın olarak kullanılan nötr topraklama tipleri; nötr noktası izole sistemler, kompanse topraklı sistemler, nötr noktası direnç veya reaktör üzerinde topraklı sistemler ve nötr noktası direkt topraklı sistemler olarak sıralanabilir [10].

Direkt topraklı sistemlerde nötr noktası doğrudan toprak ile irtibatlandırılmıştır. Herhangi bir akım sınırlayıcı eleman olmadığı için bu sistemlerde yüksek genlikli arıza akımları gözlemlenmektedir. Bu nedenle arıza tespiti diğer nötr topraklama türlerine göre daha kolaydır. Yüksek genlikli arıza akımlarının tespitinin kolay olmasına rağmen, bu akımlar şebeke üzerindeki ekipmanlara veya çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle transformatörün nötr noktası direnç veya reaktör üzerinden topraklanarak arıza akımının sınırlandırılması bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Nötr noktası izole sistemler ve kompanse topraklı sistemler TFT arızası sırasında oldukça düşük arıza akımına neden olmaktadır. Bu nedenle uzun süre arıza altında çalışabilmektedir [11]. Bununla birlikte arıza esnasında sağlıklı fazlarda aşırı gerilimler görülmektedir. Bu durum sistemin izolasyon seviyesinin zayıf olduğu bir noktada ikinci bir TFT arızasını tetikleyebilir. Bu sebeple arıza sistemden hızlı ve seçici bir şekilde temizlenmesi ihtiyaç haline gelmektedir. Kompanse topraklı ve nötr noktası izole şebekelerde kararlı durumda TFT akımı oldukça düşük genlikli olduğundan dolayı bu topraklama tipleri için geçici rejim temelli algoritmalar geliştirilmiştir [12]. Geçici rejim temelli algoritmaların haberleşmeye ihtiyaç duyması, yüksek örneklem gerektirmesi, arıza oluşu açısından etkilenmesi ve gerçek şebekede uygulama zorluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır [13].

Kablo kullanım oranının artması sistemin sahip olduğu toplam kapasitif akım seviyesinin artmasına neden olmaktadır. Kapasitif akımların gerilim düşümüne pozitif etkisi ve kablo kullanımının doğa olaylarına karşı sistemin daha güvenilir işletilmesi yararları olmasına rağmen özellikle TFT arızalarına karşı sistemin seçici korunmasını zorlaştırmaktadır. TFT arızası sırasında sistemde dolaşan 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 [14]. Hatalı açma ile arızanın olmadığı bölge sistemden izole edilmekte hatta bazı durumlarda arıza sistemde kalabilmektedir. Bu durum

DŞİ'nin satılmayan enerji miktarının artması ile finansal kayıplara sebep olmaktadır. Ayrıca DŞİ'nin OKSİK (Ortalama Kesinti Sıklığı) ve OKSÜRE (Ortalama Kesinti Süresi) gibi kalite endekslerini olumsuz etkilemektedir. Dağıtım şebekelerinin özelinde sistemin seçici şekilde korunabilmesi noktasında, havai hatların yoğun kullanıldığı dönemlerden gelen bir alışkanlık olarak, yönsüz aşırı akım röleleri kullanılması seçici koruma sağlayamamaktadır. Sağlıklı fiderlerde yaşanan hatalı açma probleminin ana sebebi kaynağa doğru akmakta olan kapasitif akımlar olması yönlü toprak aşırı akım koruma rölesi kullanımının bir çözüm önerisi olarak yaygınlaşmasını sağlamıştır. Konvansiyonel yönlü toprak aşırı akım koruma röleleri arızanın yönünü tayin edebilmek için gerilimin açısına, dolayısıyla gerilim trafosuna ihtiyaç duymaktadırlar [15]. Bu durum yönlü koruma pratiğini dağıtım şebekelerinde uygulanmasını maliyetli hale getirmektedir. Ayrıca yönlü aşırı akım ve toprak rölelerinin ayarları temel olarak basit topolojileri dikkate almaktadır. Bu durumda tipik röle ayarlarının gerçek saha uygulamasında kullanılması seçici koruma problemi yaşanmasına neden olabilir. Kullanılan koruma algoritmalarının ve röle açma ayarlarının dağıtım şebekesinin topolojisine uygunluğu senaryo bazlı değerlendirilmelidir [16]. Ayrıca tek bir röle tipinin ve tek bir röle ayarının tüm sistemde seçici koruma sağlaması mümkün değildir [17]. Bu durumda her bir topoloji için rölelerin yerleştirildiği noktalar analiz edilmeli ve hibrit koruma yöntemi ve bu koruma yöntemine uygun hibrit röle ayarlarının önerilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada 62-baralı dağıtım şebekesinin EMTP (Electro Magnetic Transient Program) yardımıyla saha parametrelerine uygun olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Şebekenin modellenmesi sürecinde Türk dağıtım şebekelerinde yaygın olarak kullanılan iki farklı topraklama yöntemi incelenmiştir. Birinci topraklama yöntemi 154/33 kV Yn/Yn güç trafosunun orta gerilim tarafının nötr noktasının 20 Ω direnç üzerinden topraklı olduğu şebeke senaryosudur. İkinci topraklama yöntemi 400/33 kV Yn/ Δ güç trafosunun orta gerilim tarafının endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu senaryodur. Her bir şebeke senaryosu için her bir düğüm noktasında TFT arızası gerçekleştirilmiştir. Röle konumlarından sıfır sıra genlik bilgisi ve sıfır sıra açma bilgisi ölçülmüştür. Kablo yoğun dağıtım şebekesinde her iki şebeke yapısı içinde geçerli tek bir genlik ve açma ayarının yeterli olmadığı fider bazlı yöntem hibritasyonu gerektiği simülasyon sonuçlarında açıkça görülmektedir. Her bir koruma yöntemi için seçici korumanın sağlanacağı röle ayarları fider bazlı önerilmiştir. Böylece şebeke işletmecisinin şebeke şartları (öncelikli yük olup olmaması), işletmecinin aşmaması gereken OKSÜRE ve OKSİK değerleri, şebekede gerilim trafosunun olup olmaması durumlarına göre seçebileceği koruma hibritasyonu tablosu sunulmuştur. Makale şu sıra ile kurgulanmıştır. İkinci kısımda kapasitif akım temelli hatalı açmalar detaylı olarak incelenmiştir. Üçüncü kısımda 62-baralı örnek dağıtım sisteminin TFT arıza durumu incelenmiştir. Sonuçlar ise en son kısımda tartışılmıştır.

2. Kapasitif Akım Temelli Hatalı Açma Problemi (Capacitive Current Based False Trip Problem)

Arz güvenliğini artırma noktasında, dağıtım sistemlerinde meydana gelen değişimler kullanılan koruma rölelerinin tiplerinin ve/veya ayarlarının güncellenmesini zorunluluk haline getirmektedir. Radyal dağıtım sistemlerinde arıza olmayan bölgede bulunan rölelerin de arıza sinyali üretmesi ilgili kesicinin hatalı açma yapmasına neden olmaktadır. Taranan literatürde hatalı açma probleminin üç farklı tanımı bulunmaktadır.

Tanım 1: İkincil koruma rölesinin birincil röleden önce açma sinyali üretmesi [18].

Tanım 2: Herhangi bir rölenin birincil ve ikincil koruma rölesinden önce açma sinyali üretmesi [13].

Tanım 3: Sağlıklı fiderde bulunan rölenin arızalı fiderde bulunan röle ile aynı anda veya daha önce açma sinyali üretmesi [14]. Tanımlardan ilk ikisi faz arızalarını kapsarken üçüncü tanım TFT arızasını kapsamaktadır.

Bu çalışmada üçüncü tanım detaylı bir şekilde incelenmiştir. İki fiderli örnek bir radyal dağıtım sisteminin faz toprak kapasiteleri ile birlikte üç faz eşdeğer devresi Şekil 1 ile gösterilmiştir. Hat başında iki adet toprak aşırı akım rölesi kullanılan örnek sistemde seçici 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 bazı durumlarda ikinci fidere ek olarak birinci fiderde bulunan toprak aşırı akım rölesi de arızayı algılayabilmekte ve hatalı bir şekilde açma sinyali üretebilmektedir. Dağıtım şebekesinde Tanım 3 özelinde gerçekleşen hatalı açmaların sebepleri; kesici anahtarlama, gerilim yükselmeleri, yüksek oranda dağıtık üretim kullanılması, motorların başlatma akımları, aynı kablo yolundan giden kabloların ortak kuplaj etkisi ve kabloların kapasitif akımları şeklinde sıralamak mümkündür. Bu sebeplerin ayrı ayrı analiz edildiği çalışmalar literatürde bulunabilmektedir [19]. Bu çalışma kapsamında yeraltı kablolarının kapasitif akımı kaynaklı hatalı açmalar üzerine odaklanılmış olup diğer parametrelerin detaylı analizleri gelecek çalışmalarda incelenecektir.

Dengeli üç fazlı bir sistemde; faz akımlarının vektörel toplamı yaklaşık olarak sıfırdır. TFT arızası sırasında fazlarda dengesizlik oluştuğu için toprak röleleri tarafından sıfır bileşen akım ($3I_0$) bir değer değişle homopolar akım ölçülür. Ölçülen $3I_0$ değeri rölenin eşik değerinden yüksek ise röle başlatma sinyali alır. Röle başlatma sinyalinin ardından röle çalışma süresini kullanılan röle zaman karakteristiği belirler. Direkt (etkin) topraklı şebekede ölçülen $3I_0$ değeri oldukça yüksek olduğu için ters zaman eğrisi yardımıyla sistemi korumak mümkündür [20]. Röle çalışma süresi akım genliği ile ters orantılıdır. Yüksek arıza akımları sayesinde toprak arızası hızlı bir şekilde sistemden izole edilmektedir. Etkin topraklanmamış şebekelerde ise sabit zaman karakteristiği kullanılmaktadır [21]. Böylece röle çalışma süresi akım genliğinden bağımsız olarak

ayarlanan değer sonrasında açma sinyali üretir. Şekil 1'de ikinci fiderde gerçekleşen tek faz toprak arızası için sağlıklı fazlardan dönen kapasitif akımlar sağlıklı fiderde bulunan toprak aşırı akım rölesinin sıfır sıra akım genliği algılamasına neden olmaktadır [22]. Sağlıklı fiderde görülen kapasitif akımlar arıza öncesinde de akmakta birlikte vektörel toplamları sıfırdır. Fakat tek faz toprak arızası sırasında toprak aşırı akım rölesini tetikleyici seviyelere yükselbilmektedir. [23], [24] numaralı çalışmalarda 20 kV'luk İtalyan dağıtım şebekesinde yaklaşık 300 A değerinde kapasitif akım görüldüğü belirtilmektedir. İlgili yayınların tarihleri ve gerilim seviyesi dikkate alındığında Türk dağıtım şebekelerinden daha yüksek genlikli kapasitif akımlar görmek mümkündür. Etkin topraklanmamış şebekelerde sabit zaman karakteristiği dikkate alındığında, fider başlarında bulunan röleler eş zamanlı olarak açma sinyali üretecektir. Bu durum kapasitif akım temelli hatalı açmaya sebebiyet vermektedir. Kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin eşitlikleri Eş. 1-Eş. 5 ile ifade edilebilir [25].

$$\bar{I}_F = 3\bar{I}_0 + \bar{I}_{B,1} + \bar{I}_{B,2} + \bar{I}_{C,1} + \bar{I}_{C,2} \quad (1)$$

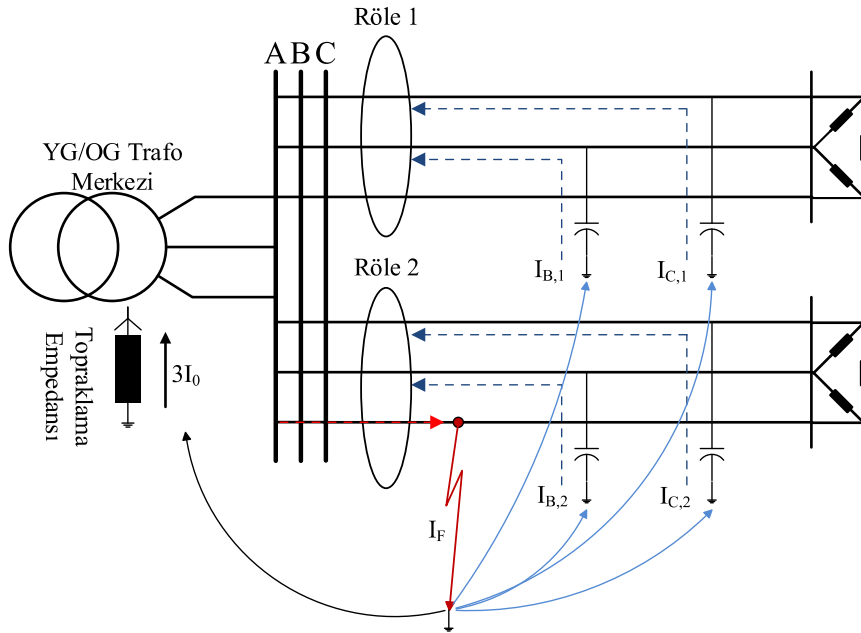
$$3\bar{I}_{0,R_2} = \bar{I}_F - \bar{I}_{B,2} - \bar{I}_{C,2} \quad (2)$$

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

$$3\bar{I}_0 = 3\bar{I}_{0,R_1} + 3\bar{I}_{0,R_2} \quad (4)$$

$$3\bar{I}_0 = V_0/Z_G \quad (5)$$

Şekil 1'de arıza akımının genliği \bar{I}_F ; $3\bar{I}_0$ nötr akımı, $I_{B,n}$ ve $I_{C,n}$ n. fiderdeki kapasitif akımlar olmak üzere Eş.1 ile hesaplanabilmektedir. Arıza fider başında bulunan rölenin gördüğü akım genliği $3\bar{I}_{0,R_2}$ Eş. 2 ile, sağlıklı fiderde görülen akımın genliği $3\bar{I}_{0,R_1}$, Eş. 3 ile hesaplanmaktadır. Arızalı fider, sağlıklı fider ve nötr noktası ilişkisi Eş. 4 ile gösterilmiştir. Nötr noktasından akan akım ise V_0 nötr noktasından veya ortak baradan okunan sıfır sıra gerilimi, Z_G nötr noktasının empedans değeri olmak üzere Eş. 5 ile hesaplanmaktadır. Sistemin nötr topraklama direnci, kullanılan kablonun tipi ve uzunluğu ikinci fiderde görülen $3\bar{I}_{0,R_1}$ akımının genliğinin artmasına, buna bağlı olarak toprak aşırı akım rölesinin eşik değerinin aşılmasına



Şekil 1. Faz toprak arızası sırasında akım dağılımları (Current circulating during single line to ground fault)

ve R_1 rölesinin açma sinyali üretmesine sebep olabilir. Problemin giderilmesi için uygulanan ilk yöntemlerden birisi hatalı açmaya sebebiyet veren rölelerin eşik değerlerinin artırılmasıdır. Bu yöntem basitliğine rağmen empedans üzerinden gerçekleşen arızalarda arıza akım genliği eşik akım değerinin altına düşebilir. Bu durumda empedans üzerinden gerçekleşen arızalar tespit edilemez. Zira röleler körleşmekte ve sistem arıza altında çalışmaya devam etmektedir. Diğer koruma yöntemi ise yönlü toprak aşırı akım rölesi kullanılmasıdır [26]. Bu yöntem ile akım genlik bilgisinin yanı sıra açma bilgisi de kontrol edilerek hatalı açmalar engellenmektedir. Geleneksel yöntem, V_0 ile her bir fidere ait I_0 akımlarının vektörel kıyaslanmasıdır [27]. Referans büyüklük olarak V_0 geriliminin açısı, işletme büyüklüğü olarak röle lokasyonundan ölçülen I_0 akımlarının açısı seçilmektedir. Bu yöntem literatürde Gerilim Polarizasyonlu Yönlü Eleman (GPYE) yöntemi olarak bilinmektedir [28]. Faz arızaları için ayar değerlerinin optimizasyonu [29] ile başarılı bir şekilde sahada uygulanan yönlü koruma yöntemi toprak arızaları için de ayar değerlerinin doğru hesaplanması durumunda GPYE başarılı olarak sahada uygulanmakla birlikte gerilim trafosuna ihtiyaç duyması hem fiziksel yerleşim hem de maliyet yönünden dezavantajlıdır. Bu dezavantaj dağıtım şebeke işletmecilerinin mümkün oldukça yönsüz koruma pratiğinde kalmaya zorlamaktadır. [30] Numaralı çalışmada yönsüz toprak koruma rölelerini ayarları yeni bir optimizasyon yaklaşımı ile ele alınmıştır. Ayrıca dağıtım şebekeleri için belli kablo mesafesi ve nötr topraklama direnci için yönsüz korumanın etkili bir şekilde kullanılabileceği aralıklar mevcuttur [4].

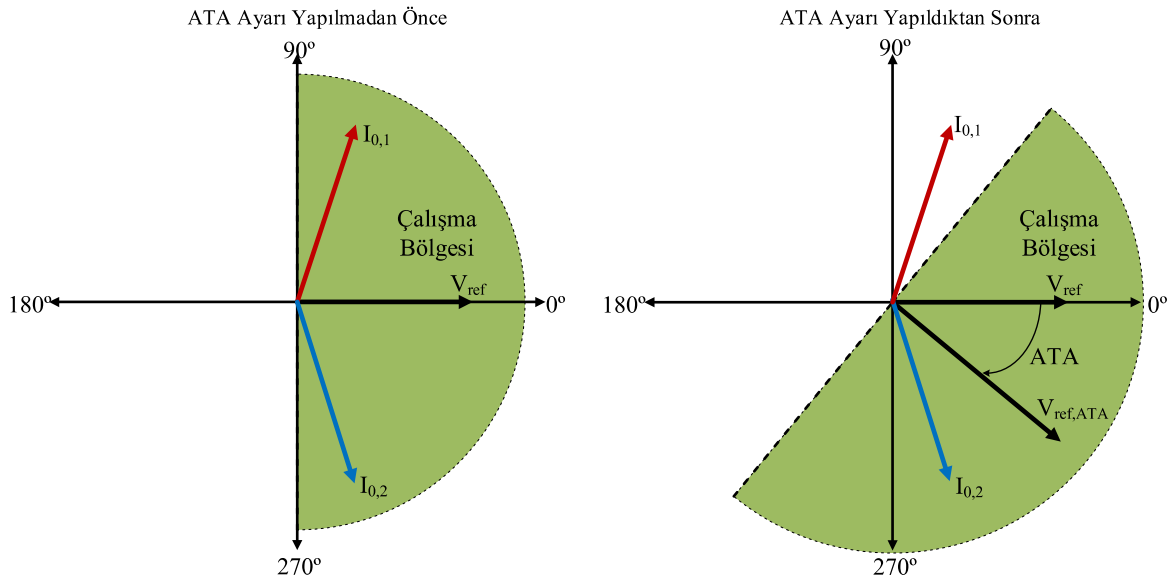
GPYE yönteminin uygulanması Şekil 2 ile gösterilmiştir. Ortak baradan okunan V_0 referans açısı olarak seçilmiştir [31]. Ayrıca iki adet işletme büyüklüğü ($I_{0,1}$ ve $I_{0,2}$) mevcuttur. Referans gerilimin açısı $+90^\circ$ ile -90° eklenerek rölenin minimum ve maksimum çalışma bölgesini oluşturmaktadır. Rölenin çalışma bölgesi $\angle -V_0 + 90^\circ$ ile $\angle -V_0 - 90^\circ$ 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 veya RKA ayarı yapılmadan elde edilen çalışma bölgesinin içerisinde hem arızalı fiderin I_0 vektörü hem de sağlıklı fiderin I_0 vektörü bulunduğu Şekil 2'de görülmektedir. Bu durumda yönlü toprak aşırı akım rölesinin yön ayırt ediciliği ortadan kalkmakta ve yönsüz toprak aşırı akım rölesi gibi davranmaktadır. Bu durumda yönlü toprak aşırı akım rölesi kullanılsa dahi seçici koruma sağlanamamaktadır. ATA ayarı sonrasında yeni çalışma bölgesinin $\angle -$

$V_0 + 90^\circ + \text{ATA}^\circ$ ile $\angle -V_0 - 90^\circ + \text{ATA}^\circ$ arasında değiştiği ve bu durumda arızalı fiderin I_0 vektörünün çalışma bölgesi içerisinde, sağlıklı fiderin I_0 vektörünün ise çalışma bölgesi dışında kaldığı Şekil 2'den görülebilmektedir. Seçici korumanın sağlanması noktasında uygun ATA ayarının önemi Şekil 2'den net olarak görülebilmektedir. Örnek bir test şebekesi için eğri temelli açma ayarı önerisi [25] numaralı çalışmada incelenmiştir. Ayrıca son zamanlarda ATA ayarının optimize edilerek minimum açma değerinin bulunması çalışmaları literatürde bulunmaktadır [32].

3. Trafo Merkezi Uygulaması (Case Study)

Dağıtım şebekelerinin arızalara karşı korunması noktasında yönlü toprak ve yönsüz toprak koruma olmak üzere iki farklı koruma yöntemi dikkat çekmektedir. Bununla birlikte her bir koruma yönteminin kendi içinde ayar parametreleri mevcuttur. Bu ayar parametreleri şebeke topolojisine göre değişmektedir. Bu nedenle şebeke üzerinde konumu belli olan her bir röle için koruma tipi ve ayarı şebeke topolojisine uygun olarak belirlenip hibrit bir koruma sağlanmalıdır. Bu bölümde 62-baralı örnek bir trafo merkezinin TFT arızası sırasında seçici koruma sağlamak için yöntem ve ayar parametreleri şebeke topolojisine göre değişmektedir. Bu nedenle şebeke üzerinde konumu belli olan her bir röle için koruma tipi ve ayarı şebeke topolojisine uygun olarak belirlenip hibrit bir koruma sağlanmalıdır. Bu bölümde 62-baralı örnek bir trafo merkezinin TFT arızası sırasında seçici koruma sağlamak için yöntem ve ayar parametreleri şebeke topolojisine göre değişmektedir. Trafo merkezi 62 baradan oluşmaktadır. Şebeke topolojisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Baralar arasında mesafeler metre cinsinden şekil üzerinde belirtilmiştir. Trafo merkezinde dört adet fider çıkışı bulunmaktadır. Sekiz adet toprak rölesi mevcuttur ve toprak rölelerinin konumları şekil üzerinden gösterilmiştir. Fider çıkışlarında 240 mm^2 tek damarlı XLPE yeraltı kablosu kullanılmıştır. Şebekede kullanılan yer altı kablosunun geometrik verisi Şekil 4b ile gösterilmiştir. Şekil 4b'de görüldüğü gibi kablolar yerden bir metre derine aralarında 70 mm mesafe olacak şekilde gömülmüştür. Birinci senaryoda trafo merkezi $154/33 \text{ kV}$ gerilim seviyesinde Y_n/Y_n bağlantı grubuna sahip, yüksek gerilim tarafı direkt topraklı orta gerilim tarafı ise 20Ω direnç üzerinden topraklı güç trafosuna sahiptir. İkinci senaryoda trafo merkezi $400/33 \text{ kV}$ gerilim seviyesinde Y_n/Δ bağlantı grubuna sahip, yüksek gerilim tarafı direkt topraklı orta gerilim tarafı ise endüktif karakterli topraklama trafosu üzerinden topraklı güç trafosuna sahiptir. Topraklama trafosunun empedans değeri 33Ω olup $\% 90$ oranında endüktif karaktere sahiptir [33].

Kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin daha da anlaşılır olması adına trafo merkezi öncelikli olarak tamamen havai hat

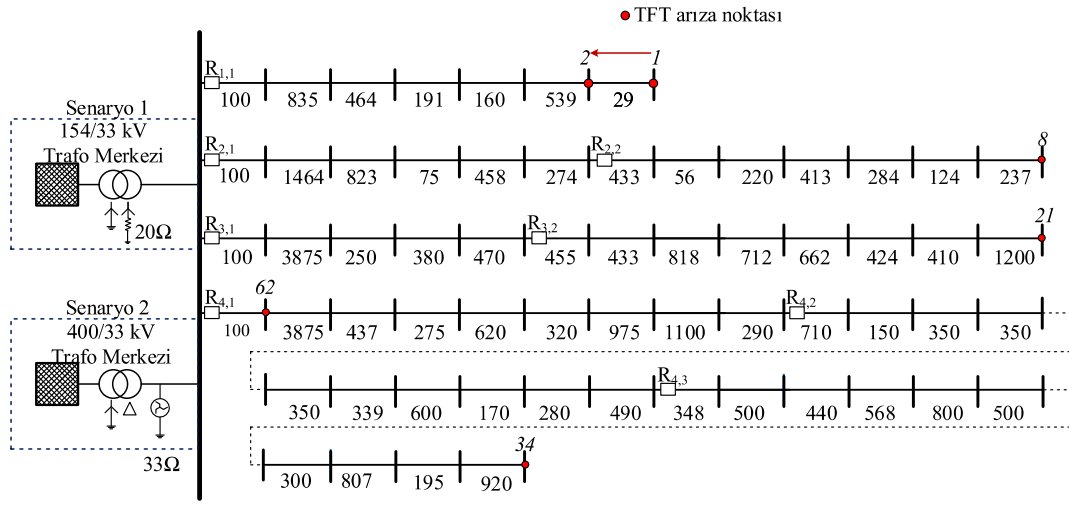


Şekil 2. Gerilim Polarizasyonlu Yönlü Eleman yönteminin açı diyagramı (Polar diagram of Voltage Polarized Directional Element)

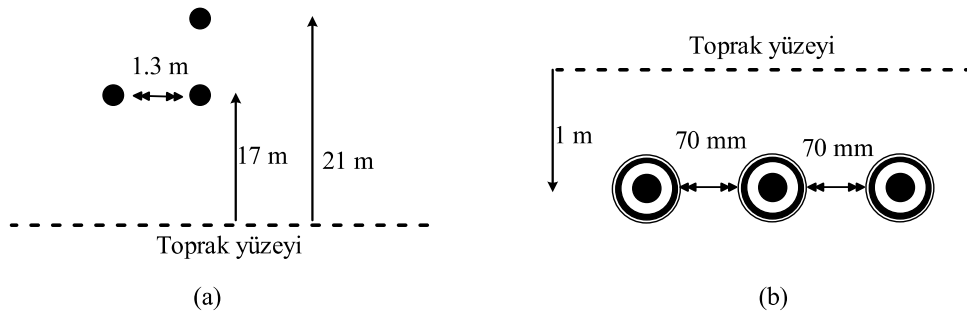
şeklinde modellenmiştir. Kullanılan hat yapısının geometrik verisi Şekil 4a ile gösterilmiştir. Fazlar arasında 1,3 metre aralık mevcuttur. A ve B fazı yerden 17 metre, C fazı ise 21 metre yüksektedir. Her bir barada oluşturulan TFT arızaları sonucu koruma rölelerinin bulunduğu noktalardan görülen sıfır sıra akım ve sıfır sıra gerilim vektörleri kararlı durumda elde edilmiştir. Sıfır sıra akım ve gerilim vektörleri yardımıyla her bir koruma yöntemi detaylı incelenmiş böylece kapasitif akım temelli hatalı açma problemini giderecek metod ve ayar hibritasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4 ile verilen havai hat ve yeraltı kablosuna ait R-L-C matrisi ATP-Draw programından çekilmiştir. Tablo 1 ile Havai hat ve kabloya ait R-L-C matrisleri listelenmiştir. Tablo 1'de açıkça görüldüğü üzere yeraltı kablosunun kapasitans değeri havai hattan 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 [34].

3.1. 62 Baralı Şebekenin Yönsüz Toprak Koruma Performansı (Non-Directional Earth Fault Protection Performance for 62-busbar Distribution Network)

Şekil 3'de görüldüğü üzere her bir röle farklı baralara yerleştirilmiştir. Böylece farklı arıza noktaları için rölelerin gördüğü sıfır sıra akım genlik ve açıları değişecektir. Bu nedenle her bir barada toprak arızası oluşturarak rölelerin gördüğü sıfır sıra akımların değişimi incelenmelidir. Şekil 5 ile 62-baralı şebekenin topolojik yapısının tamamen havai hat olduğu ve Yn/Yn bağlantı grubuna sahip transformatorün nötr noktasının 20Ω direnç üzerinden topraklandığı durumda sıfır sıra akım genliğinin değişimi gösterilmiştir. Elektrik şebeke yönetmeliğine göre nötr noktasının 20Ω direnç üzerinde topraklanması ile tek faz toprak arıza akımının 1000A değerinde sınırlandırılması istenmektedir. Rölelerin arızalı olduğu arıza noktası



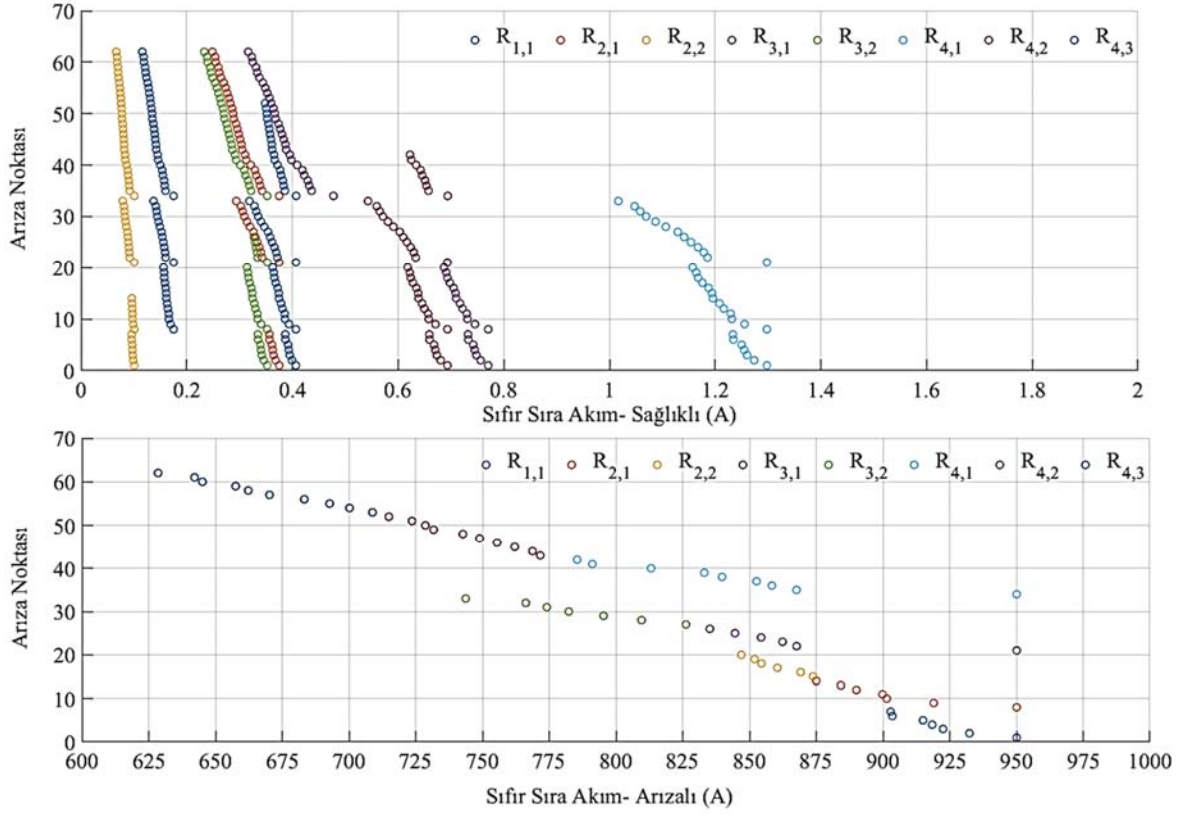
Şekil 3. Farklı iki trafo merkezi için 62 baralı radyal dağıtım şebeke topolojisi (62-busbar distribution network topology with two different substations mode)



Şekil 4. Hat yapısının geometrik verisi a) havai hat b) yeraltı kablosu (Geometric structure of the line type a) overhead line b) underground cable)

Tablo 1. Havai hat ve kabloya ait R-L-C matrisleri (R-L-C Matrix for overhead line and cable).

Direnç Matrisi (3x3) Ω/km	Endüktans Matrisi (3x3) Ω/km	Kapasitans Matrisi (3x3)
$R_H = \begin{bmatrix} 0,384 & 0,047 & 0,047 \\ 0,047 & 0,383 & 0,047 \\ 0,047 & 0,047 & 0,384 \end{bmatrix}$	$L_H = \begin{bmatrix} 0,769 & 0,344 & 0,371 \\ 0,344 & 0,769 & 0,333 \\ 0,371 & 0,333 & 0,769 \end{bmatrix}$	$C_H = \begin{bmatrix} 7,322 & -1,42 & -1,82 \\ -1,42 & 6,905 & -1,22 \\ -1,82 & -1,22 & 7,246 \end{bmatrix} \mu\text{F}/\text{km}$
$R_K = \begin{bmatrix} 0,149 & 0,023 & 0,007 \\ 0,023 & 0,136 & 0,023 \\ 0,007 & 0,023 & 0,149 \end{bmatrix}$	$L_K = \begin{bmatrix} 0,330 & 0,047 & 0,048 \\ 0,047 & 0,325 & 0,047 \\ 0,048 & 0,047 & 0,330 \end{bmatrix}$	$C_K = \begin{bmatrix} 0,325 & 0 & 0 \\ 0 & 0,325 & 0 \\ 0 & 0 & 0,325 \end{bmatrix} \mu\text{F}/\text{km}$



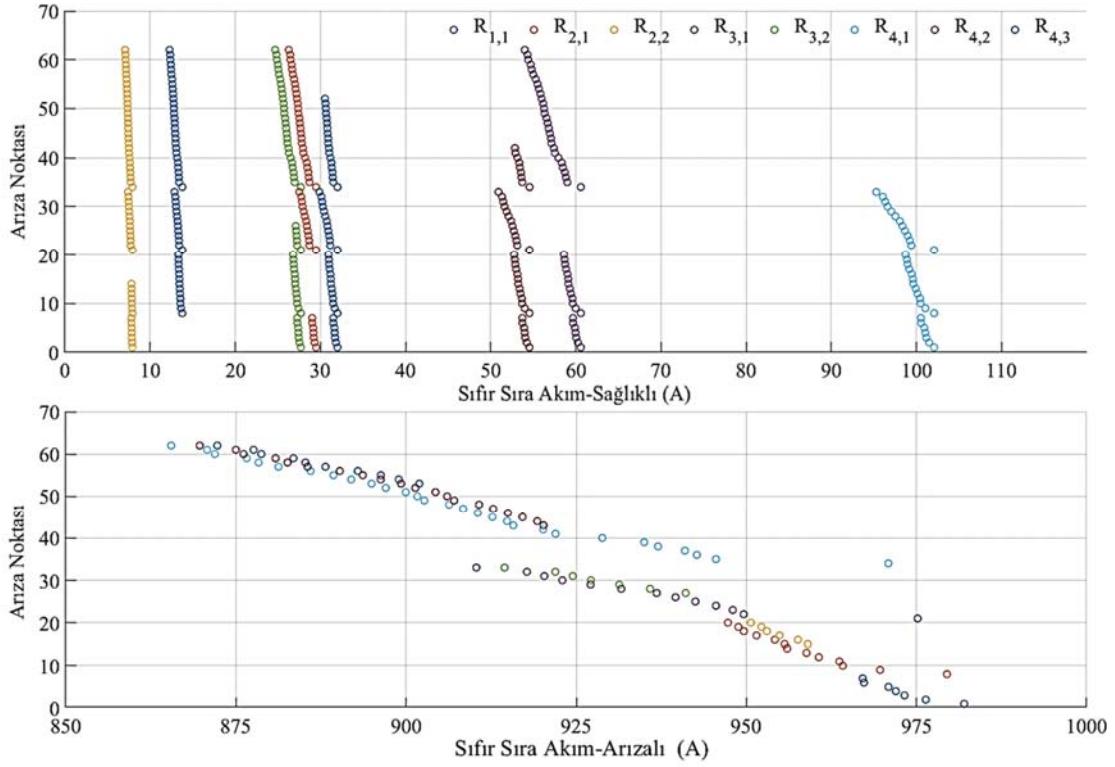
Şekil 5. Direnç topraklı şebekede havai hat senaryosu için röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genliklerinin değişimi (Variation of zero sequence current magnitudes seen from the relay locations for the overhead line scenario in resistance-earthed distribution network)

senaryoları için arıza akım değerleri incelendiğinde arıza akımının sınırlandırıldığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte havai hattın seri empedans değerinden dolayı şebekede gerçekleşen arızalarda arıza akım değerinin 625 A ile 950 A arasında değiştiği görülmektedir. En uzun fiderin seri empedans değeri en yüksek olacağından dolayı en düşük arıza akım genliği dördüncü fiderde görülmektedir. Bu durum yüksek empedanslı arızalar dışında arıza tespitinde bir probleme neden olmayacaktır. Rölelerin sağlıklı olduğu durumda ise 1,5 A değerinin altında sıfır sıra akım genlikleri sağlıklı fiderlerde görülecektir. Yük akımına göre yapılacak bir yönsüz röle ayarı şebekenin seçici şekilde korunmasını sağlayacaktır.

Şekil 6 ile direnç topraklı şebekede kablo senaryosu için röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genliğinin değişimi gösterilmiştir. Havai hat senaryosundan farklı olarak rölelerin arızalı durumda gördüğü sıfır sıra akım genliği artmaktadır. Paralel fiderlere sahip dağıtım şebekelerinde kapasitif akımlar arıza noktasını beslediğinden dolayı arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım artmaktadır. Bu durum arızalı fider seçimi, arıza noktası seçimi çalışmalarında kullanılmaktadır [33], [35]. Fakat kapasitif akımların bu davranışı sağlıklı fiderlerde yüksek genlikli sıfır sıra akım görülmesine sebep olmaktadır. Şebekeye uygun olarak ayarlanmamış röleler kullanıldığı durumda hatalı açma yaşanması kaçınılmazdır.

Şekil 6 ile gösterildiği gibi $R_{1,1}$ rölesi kendi koruma bölgesinde yedi adet arıza noktasından sorumludur. Şekil 6 incelendiğinde $R_{1,1}$ rölesi, arıza kendi bölgesinde ise arızayı seçebilmiştir. Arıza noktası $R_{1,1}$ rölesinin koruma bölgesinin dışında olduğu durumda havai hat ve kablo sonuçlarının farklı olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Havai hat kullanılması durumunda $R_{1,1}$ rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 1 A'ın altında sıfır sıra akımları

görmektedir. Bu akım değeri hatalı açmaya sebep olacak kadar yüksek genlikte değildir. Yük akımının dengesizliğine göre (%20In) yönsüz toprak röleleri ayarlanabilir. Bununla birlikte kablo kullanımını sonucu sağlıklı bölgeden arıza noktasına akan kapasitif şarj akımlarının etkisi Şekil 6'da görülmektedir. $R_{1,1}$ rölesinin sağlıklı olduğu durumda 10 A'ın üstünde sıfır sıra akım değerleri görülmektedir. Bu durum eşik akım ayar değerine bağlı olarak $R_{1,1}$ rölesinin hatalı açma sinyali üretmesine sebep olabilir. Bu durumda $R_{1,1}$ rölesi 20 A değerine ayarlanarak hatalı açma problemi giderilebilir. Şebekenin ikinci fiderinde iki adet röle bulunmaktadır. Havai hat senaryosunda ikinci fiderde bulunan röleler kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızada 1 A'ın altında sıfır sıra akım görülmektedir. Bununla birlikte kablo senaryosunda 20 A'ın üstünde 30 A değerinin altında sıfır sıra akım görülmektedir. Bu nedenle hatalı açma probleminin yönsüz toprak aşırı akım rölesi ile giderilmesi noktasında $R_{2,1}$ rölesi 30 A veya üstüne set edilmelidir. Ayrıca $R_{2,2}$ rölesinin farklı arıza noktalarında gördüğü sıfır sıra akım incelendiğinde kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 10 A değerinin altında sıfır sıra akım görülmektedir. Böylece $R_{2,2}$ rölesi 10 A set edilebilir. Üçüncü fiderde iki adet toprak koruma rölesi bulunmaktadır. Bir önceki fider rölelerinde gözlenen duruma benzer olarak havai hat senaryosunda koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 1 A'ın altında sıfır sıra akımları gözlemlenmiştir. Fakat kablo senaryosunda gözlemlenen sıfır sıra akım değeri fider uzunluğunun artması ile artmıştır. Üçüncü fiderin hat başında bulunan $R_{3,1}$ rölesinin koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda yaklaşık 60 A'lık sıfır sıra akım görülmektedir. Bu nedenle $R_{3,1}$ rölesi 60 A'den daha yüksek bir değere set edilmelidir. Benzer şekilde $R_{3,1}$ rölesi 30 A'den daha yüksek bir değere set edilmelidir. Dördüncü fider şebekenin en uzun fideri olmakla birlikte fider boyunca üç farklı toprak koruma rölesi ile korunmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü gibi hat başında bulunan $R_{4,1}$



Şekil 6. Direnç topraklı şebekede kablo senaryosu için röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genliklerinin değişimi (Variation of zero sequence current magnitudes seen from the relay locations for the cable scenario in resistance-earthed distribution network)

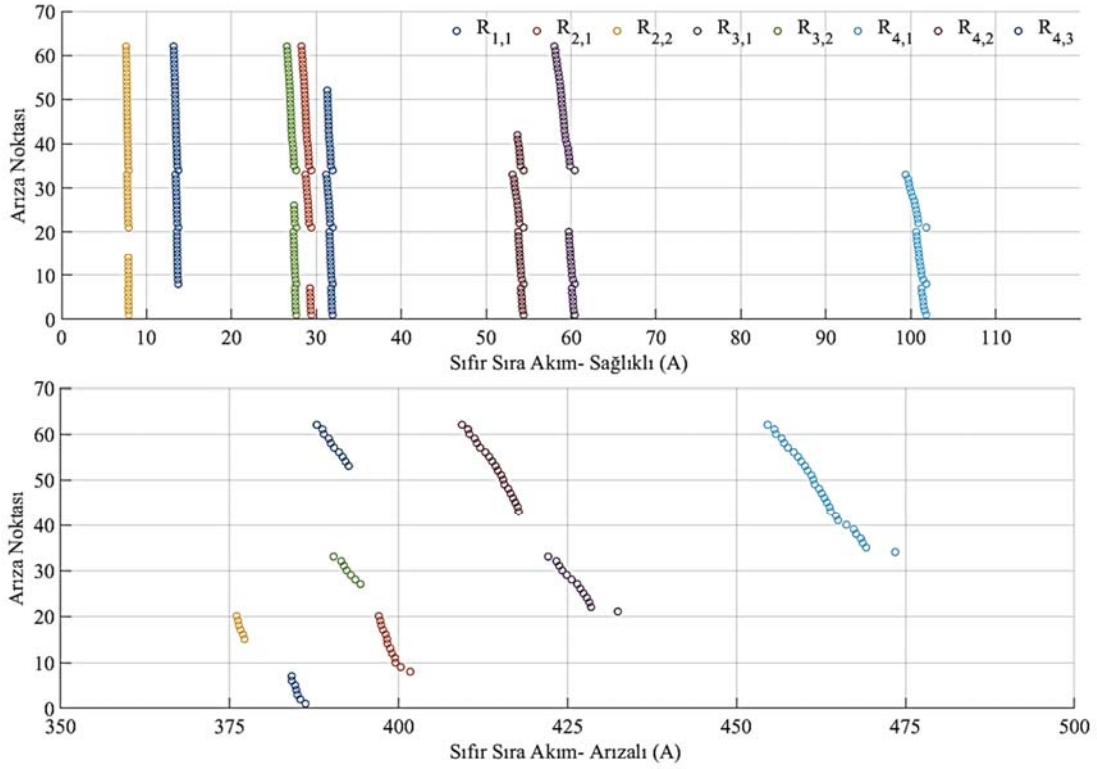
rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda en yüksek sıfır sıra akımının görüldüğü röledir. Yaklaşık 100 A değerinin üzerinde sıfır sıra akım değerleri görülmektedir. Dördüncü fiderde yaşanacak kapasitif akım temelli hatalı açma problemi R_{4,1} rölesinin 100 A değerinden daha yüksek bir değere ayarlanması ile giderebilir. Benzer şekilde alt bölgede bulunan R_{4,2} rölesi 60 A değerinden daha yüksek bir değere; R_{4,3} rölesi 40 A değerinden daha yüksek bir değere ayarlanarak kapasitif akım temelli hatalı açma problemi yönsüz toprak koruma röleleri ile giderebilir.

Şekil 7 ile 62 baralı şebeke için topraklama trafosu kullanıldığı durumda röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genlikleri gösterilmiştir. 154/33 kV 20 Ω direnç üzerinden topraklı sistem ile kıyaslandığında, 400/33 kV topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekede arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bir önceki senaryoda arızalı fiderlerde görülen sıfır sıra akım genlikleri 850 A ile 1000 A seviyelerinde iken bu senaryoda 375 A ile 475 A seviyelerine düşmüştür. Topraklama trafosunun endüktif akım karakteri ve şebekede kullanılan yeraltı kablolarının kapasitif akım karakteri arıza yolunda muhtemel rezonansa sebebiyet vermektedir. Bu durumda arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği daha da düşmektedir. Şebeke topolojisine (paralel fider sayısı, kablo uzunluğu, kablo kesiti) bağlı olarak sağlıklı fiderde görülen sıfır sıra akım genliği, arızalı fiderde görülen sıfır sıra akım genliğinden büyük olabilmektedir. Bu durum yönsüz korumanın seçici çalışmasına sebebiyet verebilir. Bu koruma problemi [36] numaralı çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. 240 mm² tek damarlı XLPE kablo için topolojide kullanılan kablo mesafelerinin toplamının yaklaşık 80 ile 120 km olduğu durumda şebeke rezonansa girmektedir. İncelenen 62 baralı şebekede toplam kablo mesafesi yaklaşık 35 km'dir. 62 baralı şebekenin sıfır sıra akım genliği sonuçları incelendiğinde bu problemin yaşanmadığı açıkça görülmektedir. Arızalı fider sıfır sıra akım genliğinden faydalanarak tespit edilebilir. Sağlıklı fiderlerde

yaşanacak olan hatalı açma problemi uygun toprak eşik akım değeri ayarı ile engellenebilmektedir. R_{1,1} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 15 A değerini geçmemektedir. R_{1,1} rölesinin toprak eşik akım değeri 15 A değerine ayarlanabilir. R_{2,1} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 30 A değerini geçmemektedir. R_{2,1} rölesinin toprak eşik akım değeri 30 A değerine ayarlanabilir. R_{2,2} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 10 A değerini geçmemektedir. R_{2,2} rölesinin toprak eşik akım değeri 10 A değerine ayarlanabilir. R_{3,1} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 70 A değerini geçmemektedir. R_{3,1} rölesinin toprak eşik akım değeri 70 A değerine ayarlanabilir. R_{3,2} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 30 A değerini geçmemektedir. R_{3,2} rölesinin toprak eşik akım değeri 30 A değerine ayarlanabilir. R_{4,1} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 120 A değerini geçmemektedir. R_{3,1} rölesinin toprak eşik akım değeri 120 A değerine ayarlanabilir. R_{3,2} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 60 A değerini geçmemektedir. R_{3,2} rölesinin toprak eşik akım değeri 60 A değerine ayarlanabilir. R_{3,3} rölesi kendi koruma bölgesi dışında gerçekleşen arızalarda 40 A değerini geçmemektedir. R_{3,3} rölesinin toprak eşik akım değeri 40 A değerine ayarlanabilir.

3.2. Yönsüz Toprak Koruma için Hassasiyet Analizi (Sensitivity Analysis for Non-Directional Earth Fault Protection)

Yönsüz toprak koruma yöntemi sayesinde fiderde görülen sıfır sıra akımın genlik bilgisi arızanın olup olmadığı konusunda yeterlidir. Bu nedenle vektör ölçümü yapılmasına gerek yoktur. Fakat bu koruma yönteminin en büyük dezavantajı, hatalı açma problemini gidermek için rölelerin toprak eşik akımının artırılmasıyla rölelerin körleştirilmesidir. Sistemin işletilmesi sırasında gerçekleşen toprak arızaları bir empedans üzerinden gerçekleşebilir. Toprak arızası devresini bir arıza direnci üzerinde tamamlayabilir. Böylece arızalı



Şekil 7. Topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekede kablo senaryosu için röle konumlarından görülen sıfır sıra akım genliklerinin değişimi (Variation of zero sequence current magnitudes seen from the relay locations for the cable scenario in earthing trough grounding transformer)

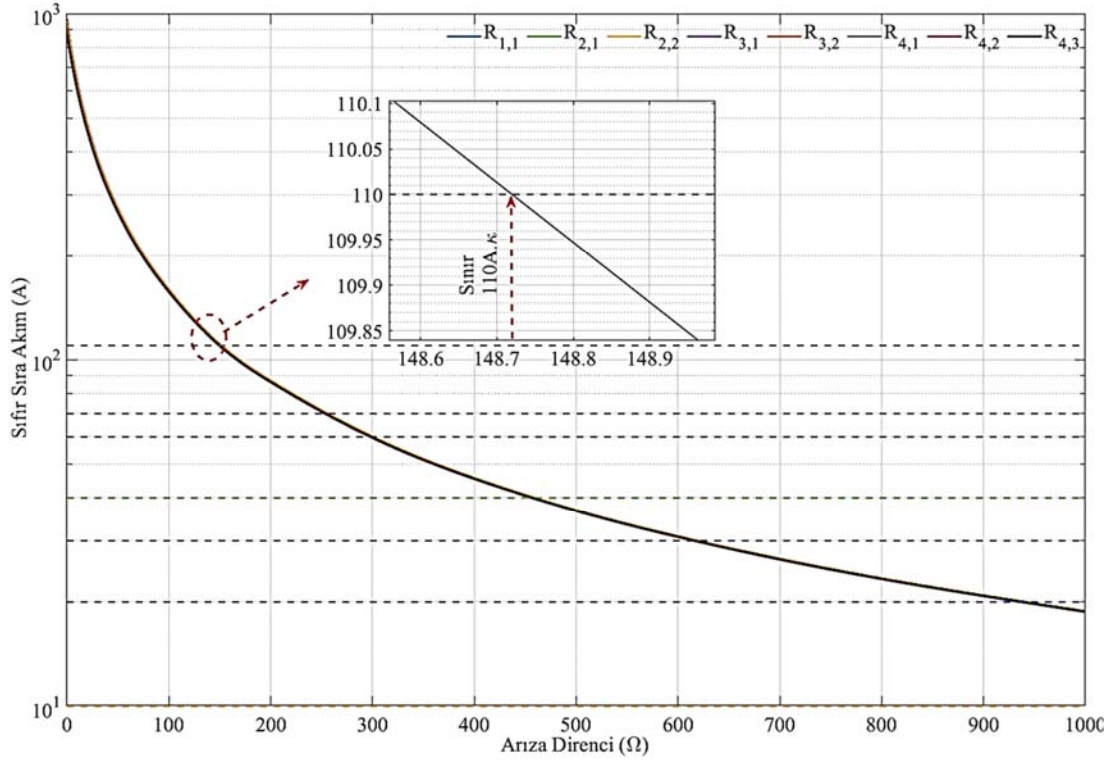
fiderde görülen sıfır sıra akım genliği azalır. Nihai olarak arızalı fiderde arıza tespit edilemeyebilir. Bu nedenle sistemin mümkün mertebe hassas ayar yapılması gerekmektedir.

Şekil 8 ile sekiz röleye ve bu röleler için önerilen toprak eşik akım değerlerine göre 154/33 kV 20Ω 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 110 A değerine ayarlanmıştır. 110 A değeri dördüncü fideri kapasitif akım temelli hatalı açmalar için korusa dahi arıza direncinin 148.71 Ω değerinden yüksek değerlerinde arızanın tespit edilememesine neden olacaktır. Bu durumda R_{4,1} rölesinde 110 A toprak eşik akımında 148.71 Ω değerine kadar hatalı açma problemi giderilir ve arıza tespit edilir. R_{4,1} rölesinin yönüz toprak ayarı, $\kappa_{R4,1}$ rölenin 110 A için arızayı tespit edeceği sınır olmakla birlikte 110A. $\kappa_{R4,1}$ şeklinde ifade edilebilir. Şekil 9 ile 62 baralı şebekenin 400/33 kV topraklama trafosu üzerinden topraklı olduğu durumda elde edilen hassasiyet analizi gösterilmiştir. Bir önceki örnekte kullanılan R_{4,1} rölesi burada yaklaşık 208.1 Ω değerine kadar arızayı tespit etmektedir. Bu durumda, R_{4,1} rölesinin yönüz toprak ayarı, $\kappa_{R4,1,TT}$ rölenin 110 A için arızayı tespit edeceği sınır olmakla birlikte 110A. $\kappa_{R4,1,TT}$ şeklinde ifade edilebilir.

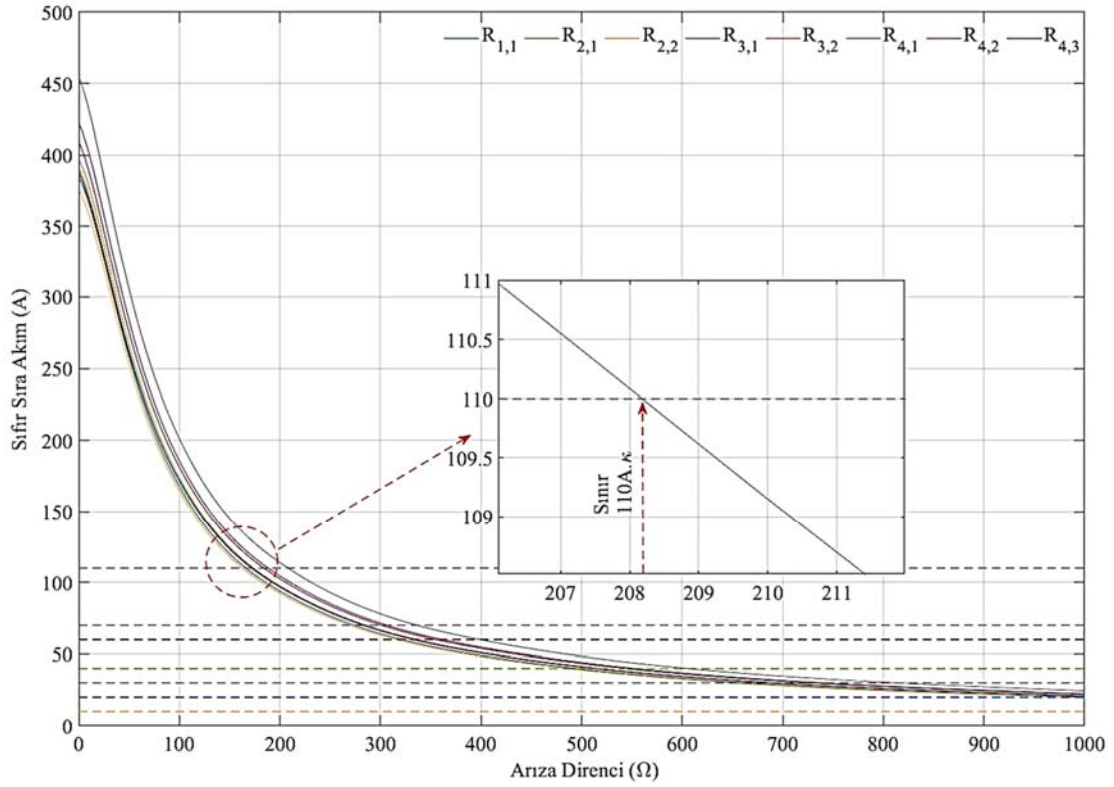
3.3. Direnç Topraklı Şebekenin Yönlü Toprak Koruma Performansı (Directional Earth Fault Protection Performance for Resistance Earthed Distribution Network)

Bu bölümde 62 baralı dağıtım şebekesinin nötr noktasının 20Ω üzerinden topraklı olduğu durum için yönlü toprak koruma performansı incelenmiştir. Yönlü toprak koruması için referans sinyal GPYE yöntemi ile elde edilmiştir. Gerilim bilgisi ortak baradan alınmıştır. Ortak baradan okunan V₀ vektör açısı sürekli olarak 0°

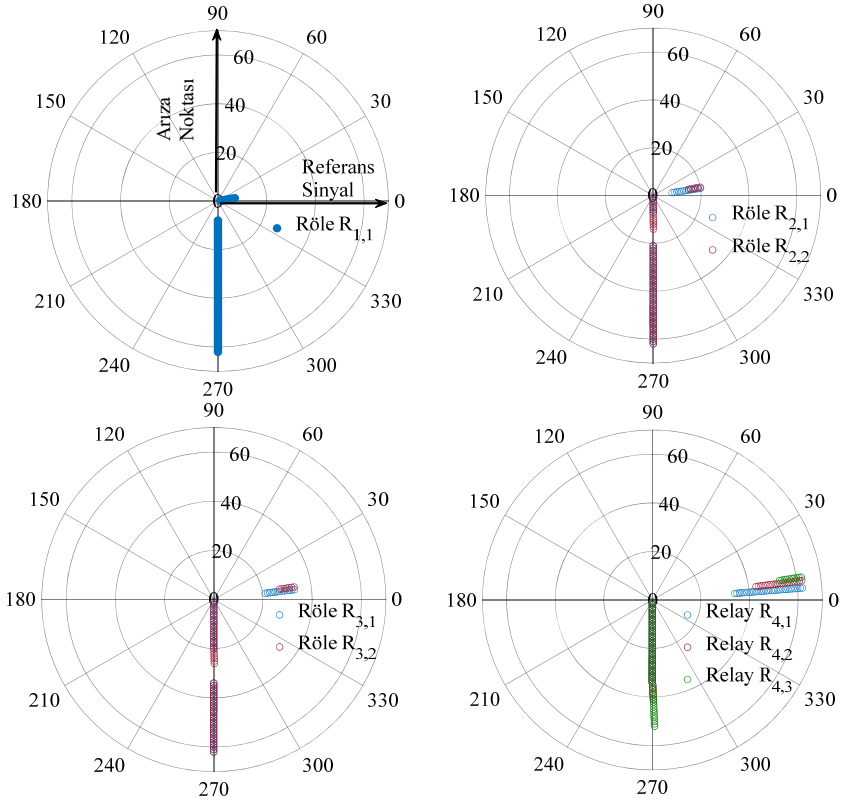
değerinde sabit tutulmuştur. Röle konumlarından sıfır sıra akım genliği ve sıfır sıra akım açısı okunmuştur. Havai hat senaryosunda kapasitif akım temelli hatalı açma problemi yaşanmadığından dolayı polar diyagramlar sadece kablo senaryosu için verilmiştir. Şekil 10 ile dört fidere ait sıfır sıra vektör açısının arıza noktasına göre değişimi gösterilmiştir. Referans vektör 0°noktasına döndürülmüş ve tüm vektörler referans vektöre göre çizilmiştir. Birinci fiderde bulunan R_{1,1} rölesi ilk yedi arıza noktasından sorumludur. Şekil 10 incelendiğinde ilk yedi arıza noktası için sıfır sıra açısı 0° ile 30° arasındadır. Bununla birlikte, diğer arıza noktalarında -90° değerinde kümelenildiği görülmektedir. Yönlü toprak rölesinin seçici koruma sağlayabilmesi için -90° değeri çalışma bölgesi dışında, 0° ile 30° aralığı ise çalışma bölgesi içinde bulunmalıdır. Benzer şekilde, diğer rölelerin arıza noktalarına göre sıfır sıra açısı değişimleri incelendiğinde rölelerin sorumlu olduğu arızalarda 0° ile 30° arasında kümelenildiği; sorumlu olmadığı arıza noktalarında ise -90° değerinde kümelenildiği görülmektedir. Kablo yoğun radyal dağıtım şebekelerinde optimum çalışma bölgesini belirlemek için kapasitif akım etkisi göz ardı edilmemelidir. Bununla birlikte hiçbir arıza noktası ve tüm fiderlerde arızalı fiderin sıfır sıra açısı 30° değerini aşmamaktadır. Bu durum uygun çalışma bölgesi belirlemede kullanılabilir. Şekil 11 ile topraklama trafosu kullanıldığı durumda R_{1,1} rölesine ait polar diyagram gösterilmiştir. Yönlü toprak rölesi kullanılmasıyla ilk yedi arıza noktası için açısı değerinin çalışma bölgesi içinde, diğer arıza noktaları için sıfır sıra açısı değerinin çalışma bölgesi dışında olması beklenmektedir. Bir önceki senaryodan farklı olarak sıfır sıra vektör açıları incelendiğinde arızalı ve sağlıklı arasında çok az açı farkı vardır. Bu durum iki farklı probleme sebep olabilir. Birinci ve genel problem tipik ATA ayarlarının seçici koruma sağlayamaması. İkinci problem ise uygun ATA ayarlarında sağlıklı ve arızalı vektörleri birbirine yakın olduğundan dolayı açı ölçüm süresinde kullanılacak donanımın oldukça hassas ve yüksek örneklem frekansına sahip olması gerekmektedir. Bu durumda oldukça yüksek maliyete sebebiyet verebilir.



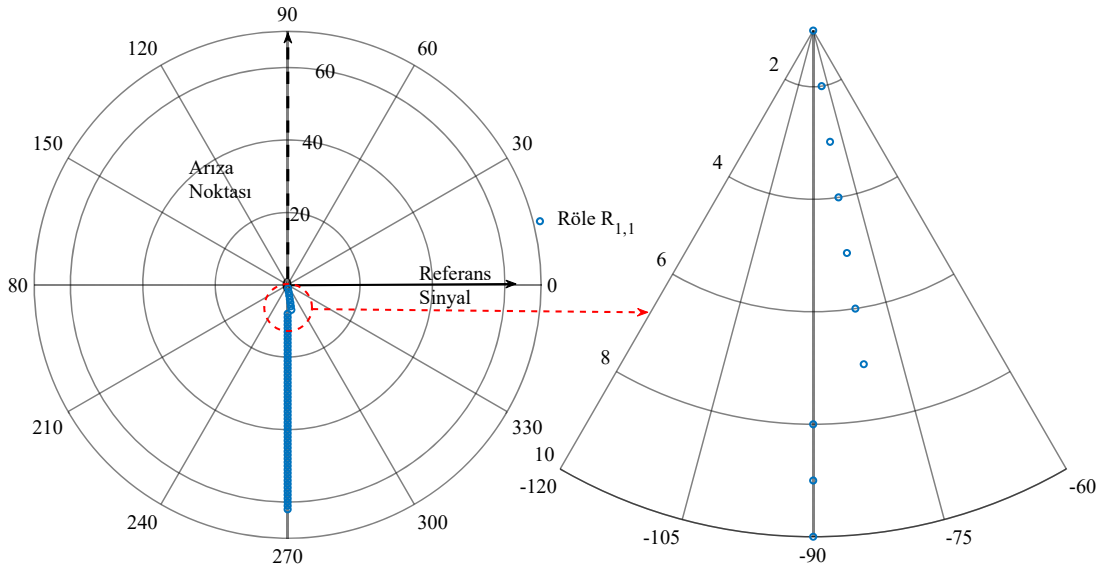
Şekil 8. 20 Ω direnç üzerinde topraklı şebeke için hassasiyet analizi
(Sensitivity Analysis for 20Ω resistance earthed distribution network)



Şekil 9. Topraklama trafosu üzerinde topraklı şebeke için hassasiyet analizi
(Sensitivity Analysis for earthed through grounding transformer)



Şekil 10. Direnç topraklı şebeke için yönlü toprak rölelerin gördüğü sıfır sıra akım açı değişimleri (Zero sequence current angle distribution for resistance earthed distribution network)



Şekil 11. Topraklama trafosu kullanıldığı durumda $R_{1,1}$ rölesine ait polar diyagram (Polar diagram for relay $R_{1,1}$ in the case of grounding transformer usage)

Diğer üç fidere ait sıfır sıra açı vektörlerinin değişimi Şekil 12 ile gösterilmiştir. Şekil 12a'da ikinci fidere bulunan $R_{2,1}$ rölesine ve $R_{2,2}$ rölesine ait farklı arıza noktaları için sıfır sıra akım vektörü değişimi verilmiştir. Şekil 12a'da görüldüğü gibi 8.ve 20. arıza noktalarına kadar $R_{2,1}$ rölesi, 15. ve 20. arıza noktalarına $R_{2,2}$ rölesi arızayı ileri

yön olarak teyit etmelidir. Fakat arızalı vektör ile sağlıklı vektör arasında açı farkı yaklaşık 10° 'dir. Bu açı farkının röle tarafından tespit edilebilmesi için oldukça yetenekli ve yüksek frekans örneklemeli röleler kullanılmalı veya tasarlanmalıdır. Üçüncü fiderde bulunan $R_{3,1}$ rölesine ve $R_{3,2}$ rölesine ait farklı arıza noktaları için sıfır

sıra akım vektörü değişimi Şekil 12b ile gösterilmiştir. Üçüncü fider içinde benzer çıkarım yapmak mümkündür. Yönlü toprak rölesi ile korunmak istenirse düşük açı farklarının röle tarafında tespit edilmesi gerekmektedir. Dördüncü fiderde bulunan $R_{4,1}$ rölesine, $R_{4,2}$ rölesine ve $R_{4,3}$ rölesine ait farklı arıza noktaları için sıfır sıra akım vektörü değişimi Şekil 12c ile gösterilmiştir. Dördüncü fider en uzun fider olmasının yanı sıra diğer üç fiderden daha fazla açı farkına sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte tipik ATA değerleri ile dördüncü fideri seçici korumakta mümkündür. Bunun yanı sıra pek çok şebeke işletmecisi röle kataloglarının önerdiği tipik ayarları kullandığı veya şebekenin nötr topraklama tipine dikkat etmediği görülmektedir. Toprak arıza analizleri sonucunda topolojiye bağlı olarak açı ayarının yapılması gerekliliği gösterilmiştir. Yönsüz toprak koruma için gerçekleştirilen hassasiyet analizi yönlü toprak koruma içinde gerçekleştirilmiştir. Dördüncü fider sonunda gerçekleşen TFT arızası için R_F değeri 1Ω 'dan $1 k\Omega$ değerine kadar arttırılmıştır. Arızalı fider ve sağlıklı fiderlerden biri olan üçüncü fider başın sıfır sıra açı bilgisi ölçülmüştür. Referans değer olarak V_0 değeri de $1 k\Omega$ 'a kadar elde edilmiştir.

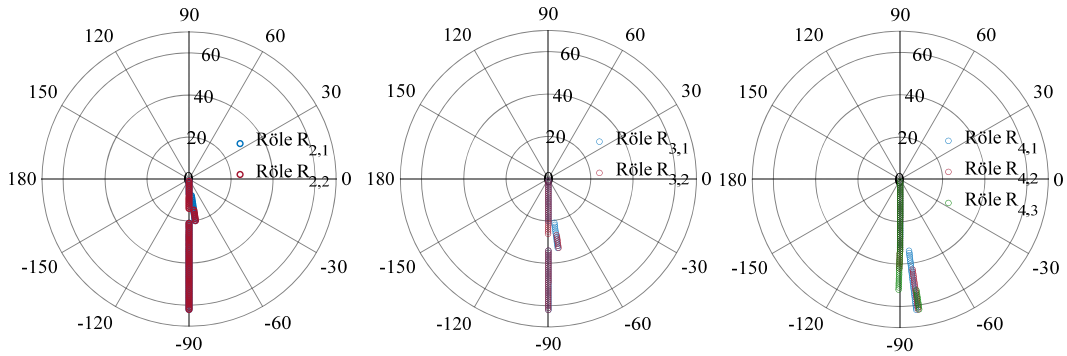
Şekil 13 ile her iki topraklama türü için yönlü toprak korumaya ait hassasiyet analizinin polar diyagramı gösterilmiştir. Şekil 13'de görüldüğü üzere arıza direncinin artması sıfır sıra bara geriliminin

açısını, arızalı fiderin sıfır sıra açısını ve sağlıklı fiderin sıfır sıra açısının değişmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte arızalı fider ve sağlıklı fider arasındaki sıfır sıra açı farkı röle seçiciliğini etkileyecek seviyede etkilememiştir. Direnç topraklı şebekede arızalı fiderin ayırt edilmesini sağlayacak kadar fark bulunmaya devam etmektedir. Topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekede ise arızalı fider ve sağlıklı fider sıfır sıra açısı arasında oldukça düşük miktarda fark bulunmaktadır. Bu durumda topraklama trafosu üzerinden topraklı şebekede ATA ayarı belirleyerek seçici koruma mümkün olmayabilir.

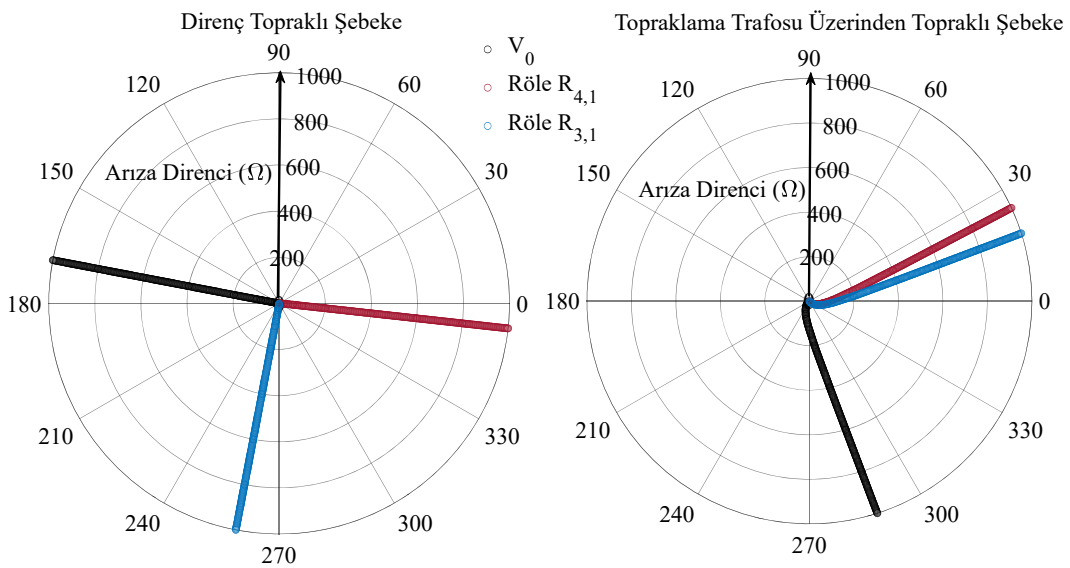
4. Önerilen Yöntem Hibritasyonu (Proposed Method Hybridization)

Şekil 14 ile önerilen hibrit koruma yöntemine ait akış diyagramı gösterilmiştir. Önerilen hibrit koruma yöntemi ile arıza tespit edildikten sonra şebekenin hat yapısı kontrol edilmektedir. Şebeke yoğun havai hatlardan oluşuyorsa hatalı açma problemi beklenmemektedir. Bu nedenle arızalı fider yönsüz toprak akım rölesi ile tespit edilebilir. Bu durumda yük akımının dengesizliğine göre bir eşik akım değeri önerilebilir.

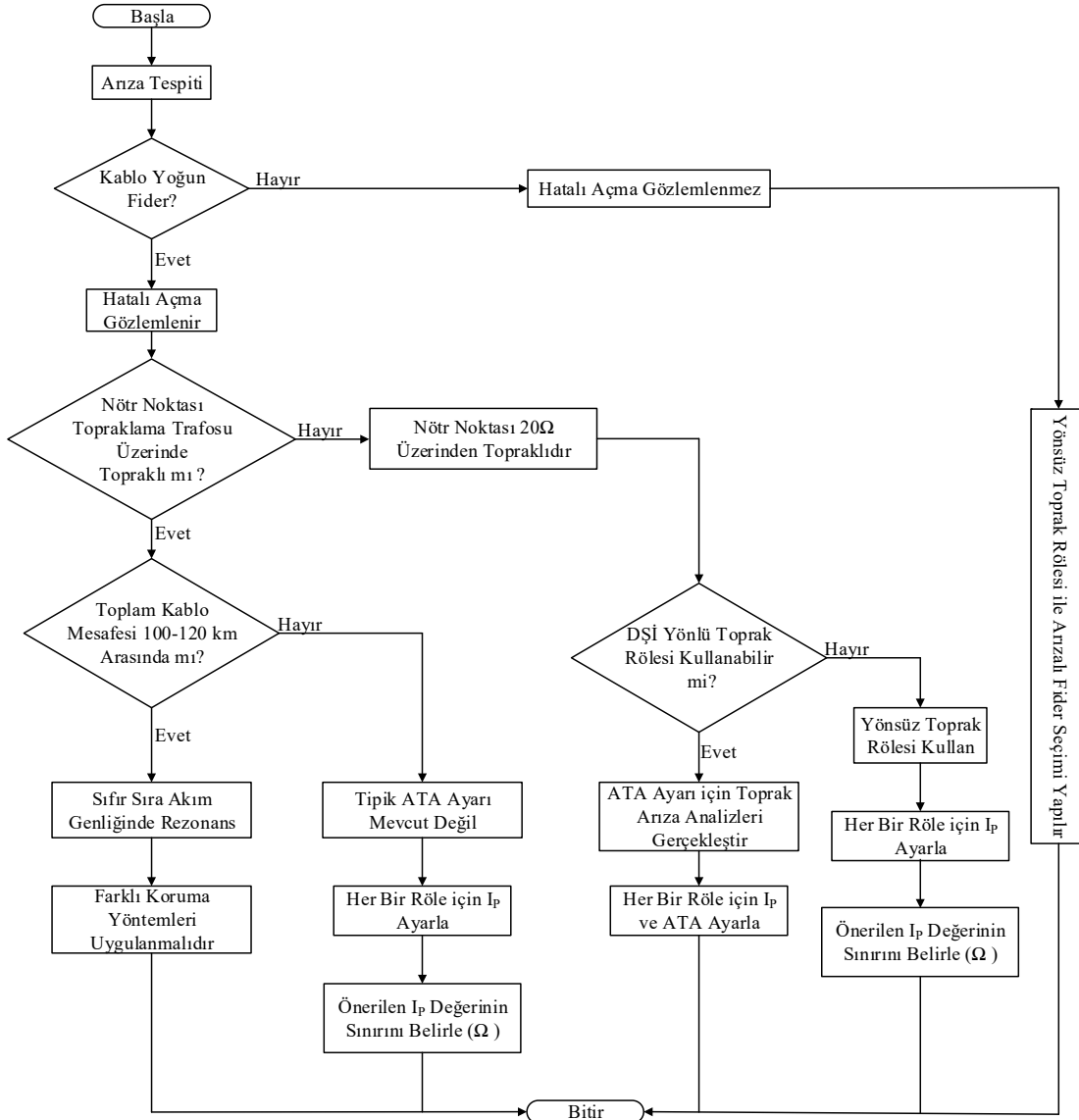
Şebekenin kablo yoğun durumda olması hatalı açma problemi beraberinde getirecektir. Kablo yoğun şebekede arızalı fider ve



Şekil 12. Topraklama trafosu kullanıldığı durumda arıza noktasına göre sıfır sıra açı değişimleri (Zero sequence current angle distribution depending on fault location in earthed through grounding transformer).



Şekil 13. Yönlü toprak korumaya ait hassasiyet analizi (Sensitivity analysis for directional earth fault protection)



Şekil 14. Önerilen hibrit-koruma yöntemine ait akış diyagramı (Proposed flow chart for hybrid-protection)

sağlıklı fider davranışlarının topraklama türü ile farklılık gösterdiği toprak arıza analizlerinde gösterilmiştir. Bu noktada şebekenin topraklama tipinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Şebeke eğer topraklama trafosu üzerinden topraklı ise, sıfır sıra akım genliğinden kabloların kapasitif akım etkisi ve topraklama trafosunun endüktif akım etkisinden dolayı rezonans problemi gözlemlenebilir. Sıfır sıra rezonans gözlemlendiğinde 400/33 kV topraklama trafosuna özgü yeni ve efektif bir koruma algoritması geliştirilmelidir. Şebeke rezonans bölgesinde değilse hatalı açmayı engellemek için yönsüz toprak akım rölesi kullanılması ve eşik akım değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Sıfır sıra temelli yönlü toprak rölesi kullanarak 154/33 kV 20 Ω direnç üzerinden topraklı şebeke için tipik ATA ayarları ile yönlü korumanın mümkün olmasına rağmen 400/33 kV topraklama trafosu kullanımında bu avantaj ortadan kalkmaktadır.

İki tip topraklama türü incelendiği için, şebekenin topraklama trafosu üzerinden topraklı olmadığı durumda nötr noktası 20 Ω üzerinden topraklanmıştır. Bu durumda koruma yöntemi DŞİ ve DŞİ'nin sahip olduğu özelliklere göre değişecektir. Şebekede yönlü toprak koruma için gerekli olan röleler ve gerilim trafoları mevcut ise daha hassas

koruma sağladığı için yönlü toprak koruma kullanılmak istenebilir. Düşük eşik akım değerleri ve uygun ATA değerleri ile direnç topraklı şebekenin yönlü toprak koruması gerçekleştirilebilir. 400/33 kV topraklama trafosu kullanıldığı durumda rezonans bölgesinde bulunmayan şebekelerde arızalı ve sağlıklı fider sıfır sıra aç farkı oldukça düşük olduğundan dolayı tipik ATA ayarı ile seçici korumak mümkün olmayabilir. Yönsüz koruma tercih edildiğinde, hem topraklama trafosu üzerinden topraklı şebeke hem de direnç üzerinden topraklı şebeke için gerçekleştirilen yönsüz toprak korumanın körleştiği noktalar arıza direnci cinsinden verilerek, önerilen ayar değerinin sınırları belirlenmelidir.

Tablo 2 ile nötr topraklama tipine göre önerilen hibrit koruma yönteminin uygulanması her bir röle için gösterilmiştir. 154/33 kV, 20 Ω direnç üzerinden topraklı şebeke için fiderler yönsüz toprak rölelerinin tabloda verilen eşik akım değerlerine ayarlanması ile korunabilir. Eşik akımı değeri daha fazla artırılabilir fakat bu durumda röleler körleşir ve arızayı tespit edebileceği aralık κ_{Rij} azalır. Fakat, DŞİ'ler OKSİK endeksini düşürmek veya daha hassas toprak koruma uygulamak isteyebilir. Bu nedenlerle yönlü toprak

Tablo 2. 62 baralı dağıtım şebekesi için koruma hibritasyon tablosu (Hybridization table for 62-busbar distribution network).

Nötr Topraklama Yöntemi	154/33 kV 20Ω Resistif		400/33 kV Topraklama Trafosu	
	Yönsüz	Yönlü	Yönsüz	Yönlü
R _{1,1}	20A. κ _{R1,1}	$I_p < 20A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	20A. κ _{R1,1,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{2,1}	40A. κ _{R2,1}	$I_p < 40A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	40A. κ _{R2,1,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{2,2}	10A. κ _{R2,2}	$I_p < 10A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	10A. κ _{R2,2,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{3,1}	70A. κ _{R3,1}	$I_p < 70A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	70A. κ _{R3,1,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{3,2}	30A. κ _{R3,2}	$I_p < 30A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	30A. κ _{R3,2,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{4,1}	110A. κ _{R4,1}	$I_p < 110A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	110A. κ _{R4,1,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{4,2}	60A. κ _{R4,2}	$I_p < 60A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	60A. κ _{R4,2,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$
R _{4,3}	30A. κ _{R4,3}	$I_p < 30A$ $\emptyset_{\text{çalışma}} \rightarrow ATA$	30A. κ _{R4,3,TT}	$\emptyset_{\text{çalışma}} \neq ATA$

koruma kullanmayı tercih edebilir. Bu durumda eşik akım değerini düşürebilir. 154/33 kV, 20 Ω direnç üzerinden topraklı şebekelerde arızalı ve sağlıklı fider arasındaki sıfır sıra aç farkının yardımıyla ATA ayarlayarak seçici koruma sağlanabilir. Tam tersi durumda, DŞİ yönlü toprak koruma uygulamak için gerekli ekipmanlara sahip olmayabilir. Bu durumda yönsüz toprak koruma uygulaması kaçınılmazdır. Hibritasyon tablosu incelendiğinde 400/33 kV topraklama trafosu kullanımında yönsüz toprak koruma için rölelerin eşik akım değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Rölelerin körleşme riski bu senaryo içinde geçerlidir. 400/33 kV topraklama trafosu kullanımında geleneksel sıfır sıra bileşen temelli yön algoritmaları kullanılarak tipik ATA ayarı belirlenmemektedir. Bu durumda DŞİ’ler farklı tip koruma algoritması uygulanmalı veya geliştirmelidirler.

5. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada kabloların yoğun olarak kullanıldığı etkin topraklanmamış radyal dağıtım sistemlerinde kapasitif akım temelli hatalı açma problemi topoloji bazlı incelenmiştir. İki farklı topraklama türü için 62-baralı radyal dağıtım sistemi detaylı olarak modellenmiş ve toprak arızası simülasyonları EMTP-ATP Draw ortamında kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Problemin daha iyi kavranabilmesi adına tamamen kablolu sistem ve tamamen havai hatlı sistem olarak iki ayrı senaryoda şebeke modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Havai hat senaryosunda oldukça düşük şarj akımları ortaya çıktığı için herhangi bir hatalı açma problemi gözlenmemiştir. Ancak, TFT arızası sonucunda, açık bir şekilde kablo yoğun şebekede hatalı açma problemi yaşanmıştır.

TFT arızası için kapasitif akım temelli hatalı açma probleminin giderilmesi noktasında önerilen iki farklı koruma türü incelenmiştir. Birinci koruma yöntemi sadece akım genliğinin kullanıldığı yönsüz toprak koruma, ikincisi uygun ATA ayarı ile kullanılan yönlü toprak koruma yöntemidir. Tek bir röle ayarı ve koruma algoritmasının kablo yoğun Türk dağıtım şebekelerinde seçici koruma sağlamadığı görülmüştür. Bu nedenle hibrit koruma yöntemi önerilmesi gerekmektedir. DŞİ’nin şebeke şartları (öncelikli yük olup olmaması), işletmecinin aşmaması gereken SAIDI ve SAIFI değerleri, şebekede gerilim trafosunun olup olmaması durumlarına göre seçebileceği koruma yöntemi ve ayar değerleri hibrit koruma yöntemi olarak sunulmuştur. Dört fiderli radyal dağıtım sisteminde TFT arızası altında arızalı ve sağlıklı fiderlerin vektörel davranışları iki farklı topraklama türü için incelenmiştir. Önerilen hibrit koruma yöntemi

uygulanmış ve her bir röleye ait koruma yöntemi ve ayar değeri hibritasyon tablosunda sunulmuştur. 154/33 kV 20 Ω direnç topraklı şebekenin hem yönlü hem de yönsüz koruma ile seçici bir şekilde korunması için röle ayarlarının güncellenmesi gerekmektedir. Her iki koruma yöntemine ait güncel ayarlar hibritasyon tablosunda verilmiştir. Bununla birlikte 400/33 kV topraklama trafosu kullanımında 62 baralı dağıtım şebekesinin yönsüz korunabildiği, yönlü koruma için tipik ATA ayarının gerçekleştirilmediği görülmektedir. Ayrıca, sağlıklı fider ve arızalı fiderler arasında görülen sıfır sıra aç farkının düşük olmasından dolayı optimum ATA ayarının için, çok yüksek doğruluk ve frekans örnekleme röle kullanılması gerekmektedir. 400/33 kV topraklama trafosu kullanımında rölelere ait ayar ve koruma yöntemi benzer şekilde hibritasyon tablosunda verilmiştir.

Unutulmamalıdır ki yönsüz koruma kullanımının sistemi körleştirme tehlikesi bulunmaktadır. Bu nedenle önerilen ayarlar için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece şebekenin körleştiği aralıklar arıza dirençleri cinsinden her iki topraklama türü için tüm rölelerde belirlenmiştir. 154/33 kV 20 Ω direnç topraklı dağıtım şebekesinde uygun ATA ayarı ile sistem seçici bir şekilde korunabilmektedir. Bu nedenle yönsüz toprak koruma için önerilen eşik akım değerleri düşürülerek daha yüksek hassasiyette toprak koruması sağlamak mümkündür. Gelecek çalışmada hibritasyon tablosu optimizasyon denklemi olarak kurgulanıp her bir röleye ait optimum koruma yöntemi ve seçilen koruma yöntemine ait optimum ayarlar elde edilecektir.

Kaynaklar (References)

1. Maza-Ortega J.M., Zarco-Soto F.J., Gkavanoudis S., Tampakis D., Demoulias C., A short communication to define the overcurrent protection system of the CIGRE European benchmark distribution networks for RES penetration studies, *Electra*, 104 (3), 1331–1336, 2022.
2. Pandakov K., Hoidalén H.K., Traetteberg S., An Additional Criterion for Faulty Feeder Selection during Ground Faults in Compensated Distribution Networks, *IEEE Trans Power Delivery*, 33 (6), 2930–2937, 2018.
3. Wan Q., Zheng S., Shi C., Feeder selection method for full cable networks earth faults based on improved K-means, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 16 (9), 3837–3848, 2022.
4. M. B. Atsever M.B., Ö. Karacasu Ö., Hocoğlu M.H., Determination of proper angle settings for resistance grounded distribution systems for directional earth fault relays, 2020 12th International Conference on

- Electrical and Electronics Engineering, Bursa-Türkiye, 113-118, 26-28 Kasım 2020.
5. Kennedy J., Ciufu P., Agalgaonkar A., Protection analysis tool for distribution networks with a high embedded generation penetration, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 107 (1), 605–614, 2019.
 6. Kou G., Jordan J., Cockerham B., Patterson R., P. Vansant P., Negative-Sequence Current Injection of Transmission Solar Farms, *IEEE Trans Power Delivery*, 35 (6), 2740–2743, 2020.
 7. Wang X., Gao J., Wei X., Zeng Z., Wei Y., Kheshti M., Single Line to Ground Fault Detection in a Non-Effectively Grounded Distribution Network, *IEEE Trans Power Delivery*, 33 (6), 3173–3186, 2018.
 8. Roberts J., Altuve H.J., Hou D., Review of Ground Fault Protection Methods for Grounded, Ungrounded, and Compensated Distribution Systems, SEL: Pullman, WA, USA, 2005.
 9. Li Z.J., Lin S., Guo M.F., Tang J., A Decentralized Fault Section Location Method Using Autoencoder and Feature Fusion in Resonant Grounding Distribution Systems, *IEEE Syst. J.*, 16 (4), 5698-5707, 2022.
 10. IEEE, C62.92.1-2016 - IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems--Part I: Introduction, 2017.
 11. Hänninen S., Lehtonen M., Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing, *Electr. Power Syst. Res.*, 44 (3), 155-161, 1998.
 12. Wang X. Zhang H., Wu Q., Terzija V., Xie W., Fang C., Location of Single Phase to Ground Faults in Distribution Networks Based on Synchronous Transients Energy Analysis, *IEEE Trans Smart Grid*, 11 (1), 774–785, 2020.
 13. Pandakov K., Høidalen H.K., Marvik J.I., Misoperation analysis of steady-state and transient methods on earth fault locating in compensated distribution networks, *Sustainable Energy Grids Networks*, 15 (1), 34–42, 2018,
 14. Roberts J., Stulo T.L., Reyes A., Sympathetic tripping problem analysis and solutions, SEL: Pullman, WA, USA, 2002.
 15. Bakar A.H.A., B. Ooi B., Govindasamy P., Tan C., Ilias H.A., Mokhlis H., Directional overcurrent and earth-fault protections for a biomass microgrid system in Malaysia, *Int. J. of Electra. Power Energy System.*, 55 (1), 581–591, 2014.
 16. Jaramillo Serna J.J., López-Lezama J.M, Alternative methodology to calculate the directional characteristic settings of directional overcurrent relays in transmission and distribution networks, *Energies*, 12 (9), 1-25, 2019.
 17. Vaca S., Fonseca A., Chapi F., Pérez-Yauli F., “A new methodology for the analysis and optimal setting of directional polarisation methods for overcurrent elements in line protection applications,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, 16 (5), 882–896, 2022.
 18. Birla D., Maheshwari R.P., Gupta H.O., An Approach to Tackle the Threat of Sympathy Trips in Directional Overcurrent Relay Coordination, *IEEE Trans Power Delivery*, 22 (2), 851–858, 2007.
 19. Sabra H., Ibrahim D.K., Gilany M., Field experience with sympathetic tripping in distribution networks: problems and solutions, *The Journal of Engineering*, 2018 (15), 1181–1185, 2018.
 20. Atsever M.B., Hocaoglu M.H, Time Characteristic Curve Based Earth Fault Relay Selectivity Assessment for Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks, 57th International Universities Power Engineering Conference, İstanbul, Türkiye, 1-6, 30 August 2 Eylül 2022.
 21. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., Weychan A., Zięba B., Overcurrent protection against multi-phase faults in MV networks based on negative and zero sequence criteria, *Int. J. of Electra. Power Energy System*, 134 (1), 107449, 2022.
 22. Paul D., Phase-Ground Fault Current Analysis and Protection of a High-Resistance Grounded Power System, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 56 (4), 3306–3314, 2020
 23. Gatta F.M., Geri A., Lauria S., M. Maccioni M., Analytical prediction of abnormal temporary overvoltages due to ground faults in MV networks, *Electr. Power Syst. Res.*, 77 (10), 1305–1313, 2007.
 24. Cerretti A., Gatta F.M., Geri A., Lauria S., MacCioni M, Valtorta G., Ground fault temporary overvoltages in MV networks: Evaluation and experimental tests, *IEEE Trans Power Delivery*, 27 (3), 1592–1600, 2012.
 25. Atsever M.B., O. Karacasu O., Hocaoglu M.H., Determination of Proper Angle Settings in Resistance Grounded Distribution Systems for Directional Earth Fault Relays, *Turkish J of Electra. Power and Energy Syst.*, 1 (1), 26–32, 2021.
 26. Paul D., High-resistance grounded power system, *IEEE Trans Ind Appl.*, 51 (6), 5261–5269, 2015.
 27. Horak J., Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts, 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, TX-USA, 164–176, 4-6 Nisan 2006.
 28. IEEE Working Group D-3, Considerations in Choosing Directional Polarizing Methods for Ground Overcurrent Elements in Line Protection Applications, *IEEE*, 1-67, 2014.
 29. Akdağ O., Yeroğlu C., Adaptive protection method with fault current limiting mechanism for directional over current relays coordination problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (4), 1751-1765, 2022.
 30. Atsever M.B., Hocaoglu M.H., Mitigation of sympathy trips in highly cabled non-effectively earthed radial distribution systems via MINLP, *Electr. Power Syst. Res.*, 220 (1), 109377, 2023.
 31. Bakar A.H.A., Mokhlis H., Ilias H.A., Chong P.L., The study of directional overcurrent relay and directional earth-fault protection application for 33kV underground cable system in Malaysia, *Int. J. of Electra. Power Energy System*, 40 (1), 113–119, 2012.
 32. Vaca S., Fonseca A., Chapi F., Pérez-Yauli F., A new methodology for the analysis and optimal setting of directional polarisation methods for overcurrent elements in line protection applications, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 16 (5), 882-896, 2021.
 33. Atsever M.B., U. Deveci U., Yılmaz S.C, Hocaoglu M.H., Zero-Sequence Based Fault Location in Non-Effectively Earthed Distribution Systems; Zero-Sequence Based Fault Location in Non-Effectively Earthed Distribution Systems, 57th International Universities Power Engineering Conference, İstanbul, Türkiye, 1-6, 30 August 2 Eylül 2022.
 34. Lukowicz M., Rebizant W., Kereit M., New approach to intermittent earth fault detection with admittance criteria, *Int. J. of Electra. Power Energy System*, 134 (1), 107449, 2022.
 35. Farughian A., Kumpulainen L., Kauhaniemi K., Pettissalo S., Sallinen V., Technical requirements for practical implementation of fault passage indication, in *Proceedings of 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Espo-Finlandiya*, 1-6, 18-21 Ekim 2021.
 36. Atsever M.B., Karacasu O., Hocaoglu M.H., Earth Fault Protection Selectivity Issues on Reactance Earthed Distribution System, 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa-Türkiye, 257-262, 25-27 Kasım 2021.

