



A new relay coordination application in adaptive protection network containing distributed generation facilities

Recep Akkan¹ , Hasan Çimen^{2*} , İsmail Yabanova³ , Veli Yenil⁴

¹Department of Electronics and Automation, Simav Vocational School, Kütahya Dumlupınar University, 43500, Kütahya, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Technology, Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

³Department of Electrical Engineering, Hasan Ferdi Turgutlu Faculty of Technology, Manisa Celal Bayar University, 45400, Manisa, Türkiye

⁴Department of Electronics and Automation, Cardak Organized Industrial Zone Vocational School, Pamukkale University, 20360, Denizli, Türkiye

Highlights:

- With the proposed algorithm, the opening times of the relays one behind have been reduced
- Further damage to electrical equipment has been prevented
- Relay coordination in networks with adaptive protection has been improved

Keywords:

- Adaptive protection
- Overcurrent relay coordination
- Distributed generation (DG)
- Network protection

Article Info:

Research Article

Received: 18.11.2024

Accepted: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1586823

Correspondence:

Author: Hasan Çimen
e-mail: hcimen@aku.edu.tr
phone: +90 532 601 4529

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the proposed protection coordination algorithm has been tested on an IEEE 4-node test system with 3 DG units integrated. The analysis of the system was made on a total of 24 situations, 8 of which are based on whether the DG units are active or not, and 3 different fault locations. In adaptive protection, relay R3 sends a trip signal in 0.1299 seconds while relay R1 sends a trip signal in 0.3796 seconds. In the proposed protection method, the R1 relay protects the electrical equipment from the damage of the growing short circuit current by sending an opening signal in 0.1899 seconds. This situation is shown in Figure A.

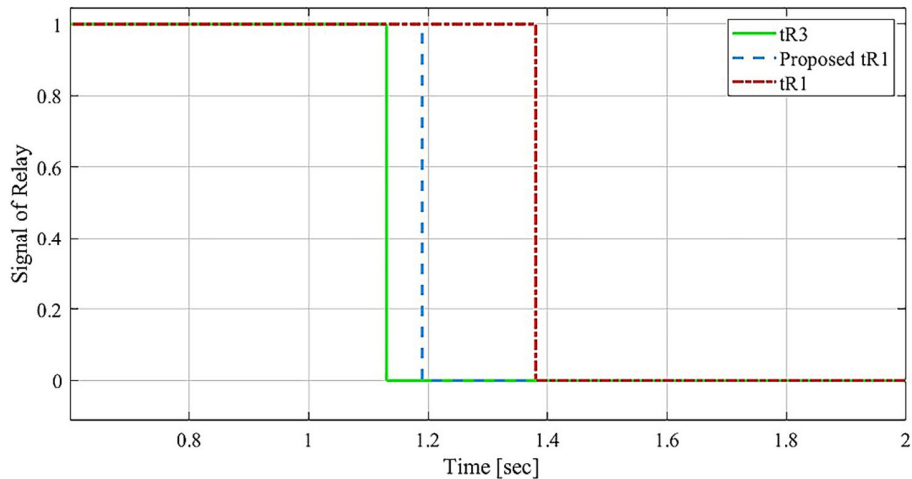


Figure A. Coordination of relay R1 in case of mode 5 and fault point F3

Purpose: To reduce the opening times of the lagging relays in the relay coordination made with the proposed algorithm in adaptive protection networks

Theory and Methods: The improved opening times of the relays one step behind were determined by the proposed algorithm.

Results: In the simulation, the 3-phase fault was applied to the system in the 1st second. In the adaptive protection, the relevant relay sends a trip signal in 0.1299 seconds, while the relay one behind sends a trip signal in 0.3796 seconds. In the proposed protection method, the relay one behind sends a trip signal in 0.1899 seconds, thus protecting the electrical equipment from the damage of the short circuit current that will grow. When the trip times of the relays one behind in adaptive protection and the trip times of the relays operating according to the proposed protection method are examined, it is understood that the difference is up to 0.5741 seconds in some modes. It is clear that an improvement of 75.95% is achieved with the proposed system. From the simulation results obtained, it is understood that relay coordination is improved in adaptive protection networks containing distributed generation facilities. The proposed protection method results in the system operating in 8 different modes quickly adapting to each mode and clearing the system from faults more quickly. Therefore, all electrical equipment in the network will be less affected.

Conclusion: When the study conducted on 24 cases with the proposed method is examined, it is seen that the opening time of a one behind relay decreases at a rate ranging from -5.45% to 75.95.



Dağıtık üretim tesisleri içeren adaptif korumadaki şebekelerde yeni bir röle koordinasyonu uygulaması

Recep Akkan¹, Hasan Çimen^{2*}, İsmail Yabanova³, Veli Yenil⁴

¹Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 43500, Kütahya, Türkiye

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

³Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 45400, Manisa, Türkiye

⁴Pamukkale Üniversitesi, Çardak Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 20360, Denizli, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Önerilen algoritma ile bir gerideki rölelerin açma süreleri azaltıldı
- Elektrikli teçhizatlar daha fazla zarar verilmesi önendi
- Adaptif korumaya sahip şebekelerde röle koordinasyonu iyileştirildi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 18.11.2024

Kabul: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1586823

Anahtar Kelimeler:

Adaptif koruma, aşırı akım röle (AAR) koordinasyonu, dağıtık üretim (DÜ), şebeke koruması, akıllı şebekeler

ÖZ

Elektrik dağıtım hatlarının korunması konusu günümüzde popüler olan akıllı şebekelerde olmazsa olmaz bir durumdur. Elektrik dağıtım hatlarının ise gelecekte yetersiz kalacak olması dağıtım hatlarına Dağıtık Üretimlerin (DÜ) bağlanmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Elektrik dağıtım hatlarına gün geçtikçe artan bir şekilde DÜ ünitelerinin bağlanması birçok fayda sağlarken bir o kadar da dağıtım hattını karmaşık bir yapıya büründürmektedir. Bu durum elektrik dağıtım hatlarının korunmasını bir derece daha zorlaştırmaktadır. Rüzgâr enerjisi vb. DÜ tesislerinde enerjinin üretimi atmosfer şartlarına bağımlı olduğundan bu durum şebekede oluşabilecek kısa devre akımlarını doğrudan etkilemektedir. Bu sorunlar belirli bir koordinasyonda çalışan rölelerin yanlış çalışmasına, iki rölenin aynı anda çalışmasına (selektivite sağlamadığından), gereksiz enerji kesintisi gibi durumlara yol açabilmektedir. Bu sorunların önüne geçmek için ise akıllı şebekelerde çift yönlü adaptif korumaya ve buna uygun şekilde çalışacak algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada bahsedilen korumaya uygun bir algoritma önerilmiştir. Günümüz koşullarına ve orijinaline uygun bir şekilde değiştirilen IEEE 4-baralı test sistemi üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları önerilen algoritma ile rölelerin daha doğru bir şekilde çalışmasına olanak sağlamıştır. Böylece önerilen algoritma ile çalışan adaptif korumadaki yedek rölelerin çalışması ile normal adaptif korumadaki yedek rölelerin çalışması karşılaştırılmış ve sonuçlar sunulmuştur.

A new relay coordination application in adaptive protection network containing distributed generation facilities

H I G H L I G H T S

- With the proposed algorithm, the opening times of the relays behind were reduced
- Further damage to electrical equipment was prevented
- Improved relay coordination in networks with adaptive protection

Article Info

Research Article

Received: 18.11.2024

Accepted: 08.02.2026

DOI:

10.17341/gazimmfd.1586823

Keywords:

Adaptive protection, overcurrent relay coordination, distributed generation (DG), network protection, smart grids

ABSTRACT

The protection of electricity distribution lines is an essential component of today's popular smart grids. The anticipated insufficiency of electricity distribution lines in the future makes it inevitable to integrate DGs (Distributed Generations) into distribution systems. While the increasing integration of DG units into electrical distribution lines offers numerous benefits, it also adds complexity to the distribution network. This increased complexity further complicates the protection of electrical distribution lines. In DG facilities such as those using wind energy, energy production depends on atmospheric conditions, which directly impact the short-circuit currents that may occur in the network. These issues can lead to problems such as the incorrect operation of relays designed to function in coordination, simultaneous activation of multiple relays (due to lack of selectivity), and unnecessary power outages. To address these challenges, smart grids require bidirectional adaptive protection systems and appropriately designed algorithms. This paper proposes an algorithm tailored to meet these protection requirements. Simulation studies conducted on the IEEE 4-node test system, modified to reflect modern conditions and the original design, demonstrated that the proposed algorithm enhances the accuracy of relay operations. The performance of backup relays in adaptive protection systems utilizing the proposed algorithm was compared with that of backup relays in conventional adaptive protection systems, and the results were presented.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde ve yakın geçmişte elektrik endüstrisindeki teknolojik gelişmelerin artışı ve DÜ tesislerinin şebekeye entegrasyonu sırasında karşılaşılan zorluklar elektrik dağıtım şebekelerinin daha verimli kullanılmasının yanında daha güvenli kullanılmasının da gerekliliğini bir kat daha artırmıştır. DÜ tesislerinin hızlı bir şekilde artışı ve buna paralel olarak değişken yüklerin hızlı artışı (elektrikli araçlar için batarya şarj istasyonları, ticari işyerleri vs.) elektrik dağıtım şebekelerinde yeni ve akıllı çözümlerin bulunmasını zorunlu kılmaktadır [1, 2]. Fosil yakıtlardan üretilen elektrik enerjisinin payı toplam üretilen elektrik enerjisindeki payına oranla gün geçtikçe azalmaktadır. Bunun nedeni fosil yakıtların bir gün tükenecek olmasındandır. Bu durum elektrik dağıtım şebekelerine gönderilen enerjide DÜ tesislerinden gelen enerjinin payını artırmaktadır. Bu artış günümüzde hükümetlerce de oldukça desteklenmektedir [3, 4].

DÜ'lerin birçok faydası bulunmasına karşın elektrik dağıtım şebekesinde karmaşıklığa yol açması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Elektrik dağıtım şebekelerindeki karmaşıklık, AAR koordinasyonunun bozulmasına, rölelerin çift yönlü çalışmalarına ve DÜ'lerin kısa devre akımının seviyesinde artışa neden olması gibi olumsuz durumlara yol açabilmektedir [5, 6]. DÜ'lerin elektrik dağıtım şebekelerine entegrasyonundan kaynaklı olumsuzlukların giderilmesine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [7-9]. Rezaei vd. tarafından yapılan çalışmada rüzgâr enerjisi tabanlı güç sisteminde bir arıza meydana geldiğinde ilgili röle yerine birkaç rölenin birlikte çalıştığını ve bu soruna çözüm olarak ise yeni bir genetik algoritma tabanlı optimizasyon tekniği önerilmiştir [10].

Yapılan çalışmalarda DÜ tesislerinin üretim tüketim dengesi gözetilerek yapılan şebeke entegrasyonları şebekedeki nominal işletme sınırlarına olumlu etkilerde bulunduğu saptanmıştır. Bu olumlu etkilere gerilim düşümü kaynaklı problemlerin azalması ile birlikte ilave yatırımların azalması ve enerjinin üretildiği yerde tüketilmesinden dolayı iletim kayıplarının azalması örnek olarak gösterilebilir. Yine çalışmalar üretim tüketim dengesi gözetilmeden yapılan şebeke entegrasyonlarının gerilim yükselmesi, kısa devre akımının artması, şebeke kararlılığının bozulması, harmonik bozunum, adalaşma riski, AAR koordinasyonunun bozulması gibi sorunlara yol açtığını göstermektedir [11-13]. Elektrik şebekelerinde kararlılığın korunması ise üretim ve tüketim değerlerinin gün önceden öngörülüp koordine edilmesine bağlıdır [14].

DÜ'lerin yukarıda bahsedilen birçok avantaj ve dezavantajının yanında yenilenebilir enerji temelli olan tüm DÜ'lerin meteorolojik koşullara bağlı olması da üzerinde durulması gereken diğer önemli bir konudur. Bu meteorolojik koşullara güneş ışınımı, rüzgârın varlığı, yokluğu, hızı, yağmuru az ya da çok yağması vb. örnek olarak gösterilebilir. Bahsedilen meteorolojik koşullara bağlılık elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin kesintili bir çalışma şekline sahip olmasına neden olur [15, 16]. Bahsedilen sorunların önüne geçebilmek, elektrik dağıtım ve iletim şebekelerinin daha kararlı bir şekilde çalışabilmesi için literatürde adaptif korumayı da içeren röle koordinasyonlarına ve bu konuda hazırlanmış veya hazırlanacak olan röle koordinasyonu algoritmalarına yüksek derecede ihtiyaç duyulmaktadır [17, 18].

Gelişmiş koruma mekanizmalarını da kapsayacak şekilde çalışan ve bir nevi akıllı adaptif korumadaki amaç, elektrik şebekelerindeki herhangi bir olumsuzlukta (dışsal arıza oluşumu, gerilim yükselmesi ya da çökmesi vb.) elektrik dağıtım ve iletim şebekesine en hızlı ve otomatik bir şekilde müdahale yapıldıktan sonra tekrar şebekenin kararlı halde çalışmasını sağlamaktır [19, 20]. Belirtilen şekilde çalışan adaptif korumadaki şebekeler, şebekeyi kararlı hale getirmekle

birlikte optimum çalışmanın gerçekleşmesine de olanak sağlar. Elektrik dağıtım ve iletim şebekelerine uygulanan AAR koordinasyonu ve adaptif koruma konusu ile ilgili literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır. Günümüzde güç talebinin artmasıyla birlikte güç üretiminin de arttığı belirtilmiştir [21-23]. Güç üretiminin artması arıza esnasındaki kısa devre akımlarını da artırmıştır. Kısa devre akımının yüksek seviyelere çıkmasını önlemek için ise süperiletken arıza akımı sınırlayıcı (SFCL) kullanılmıştır. Arıza esnasındaki kısa devre akımının azalması AAR koordinasyonunda ciddi bozulmalara neden olmuştur. Çözüm için AAR'nin etkin parametresi olan gerilim bileşeninin kullanıldığı yöntem önerilmiştir. Cho ve Lim çalışmalarında SFCL'nin AAR koordinasyonunu bozması sorununa simetrik olmayan toprak arızalarında aşırı akım koruma rölesi (OCR) indeksini önermişlerdir [24].

Elsayed ve Elattar ile Vasconcelos vd.'nin yaptıkları çalışmalarda DÜ dahil edilmiş adaptif korumadaki şebekelerde röle koordinasyonu üzerinde durulmuştur [25, 26]. Çalışmada yeni bir röle koordinasyonu uygulaması için çeşitli algoritmalar tartışılmıştır. Mikro şebekelerdeki şebeke bağlı ve ada çalışma modları da kısa devre akımının büyüklüğünü etkilediğinden AAR koordinasyonunun doğru bir şekilde çalışmamasına neden olur. Bu duruma ve her türlü faz arızasına (üç fazlı simetrik arıza, faz-faz arızası, iki faz-toprak arızası) Sharma ve Panigrahi yaptıkları çalışmada optimum ve tek bir koruma şeması önermişlerdir. Önerilen bu şemanın doğruluğunu ise IEEE 9-baralı ve 4 DÜ'lü bir mikro şebekede test etmişlerdir [27]. Kannaian vd. yaptıkları çalışmada kısa devre akımı büyüklüğünün AAR koordinasyonuna olan olumsuz etkisini önlemek için şebeke merkezi denetleyicisini kullanan algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmanın doğruluğu IEEE 33-baralı test sistemi ile MATLAB programında gerçekleştirilmiştir [28]. Kannupaiyan ve Chenniappan yaptıkları çalışma ile aşırı akım koruma rölelerinin arıza anında arızalı bölgeyi mümkün olan minimum sürede devre dışı bırakarak şebekedeki diğer tüketicilerin enerjisiz kalmasını önlemişlerdir. Çalışma, 800 MHz FPGA Xilinx Zynq tabanlı sayısal aşırı akım koruma rölesi ile MATLAB Simulink Simpower sistem araç kutusu ve Labview yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir [29]. Rojnic vd. tarafından yapılan çalışmada geleneksel optimizasyon problemi eleştirel bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Çalışma ile dağıtım şebekelerinde kullanılan yöntemler karşılaştırılmış ve kullanılan yöntemlere iyileştirmeler önerilmiştir [30].

Geleneksel AAR koordinasyonunda birincil ve yedek röleler aynı zaman eğrileriyle (genellikle ters zaman eğrisi) ve belirli zaman aralıklı olarak çalışırlar. Böylelikle birincil ve yedek rölelerinin çalışma eğrileri kesişmez. Yani birincil ve yedek röleler arasında işlevsel bir bağımlılık vardır. González ve Conde tarafından önerilen AAR koordinasyonunda ise röleler arasında işlevsel bağımsızlık sağlanarak geleneksel koordinasyon yöntemine kıyasla rölelerin çalışma süresi azaltılmıştır [31]. Rojnic vd. tarafından yapılan diğer çalışmada birincil rölelerin mümkün olan en kısa sürede devreye alınmasını sağlamak ve yedek rölelerin çalışması ile ilgili korunan elemanların termal stres eğrileri arasındaki zaman gecikmesini mümkün olan en üst seviyeye çıkarmak için değiştirilmiş bir genetik algoritma önerilmiştir [32]. Sampaio vd. tarafından yapılan çalışmada, yönlü aşırı akım koruma rölelerinde en iyi ayarların otomatik olarak hesaplanabilmesi için adaptif ve metasegisel bir algoritmaya dayalı akıllı koruma sistemi önerilmiştir. Burada adaptif bulanık yönlü yarasa algoritması (AFDBA) kullanılarak geleneksel koruma yöntemlerinin aksine algoritma ile ilişkili parametrelerin başlangıçta ayarlanmasına gerek olmamasıdır. Sonuç olarak sabit optimum ayarlara sahip bir koruma sistemine oranla AFDBA'nın kullanıldığı koruma sisteminin daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur [33]. Luo vd. tarafından yapılan çalışmada dağıtım güç sistemlerinin artan karmaşıklığına çözüm olabilmek için aşırı akım koruma rölelerinin

daha iyi bir optimizasyonu bağımsız faktör değerlendirmesi ve kuantum genetik optimizasyonu birleşimi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [34]. Çok ters (VI), normal ters (SI) gibi çeşitli zaman eğrileri kullanılan dağıtım sistemlerindeki AAR koordinasyonuna Chen vd. yaptıkları çalışmada transformatör korumasını da içeren ve genetik algoritmayı kullanan yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem tek halka güç dağıtım sistemi üzerinde log-log ölçekli bir plana çizilerek sunulmuştur [35]. Yönlü aşırı akım koruma rölelerinin toplam çalışma süresini en aza indirmek ve optimum ayarları sağlamak için bir başka yöntem ise Gokhale ve Kale tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Burada alma akımı ayarını değiştirilen, zaman çarpanı ayarını (TMS) ise en alt sınırdaki tutan Firefly algoritması kullanmanın daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir [36]. Shahzad ve Asgarpoor yaptıkları çalışmada DÜ içeren elektrik şebekeleri için tasarlanmış olan koruma planını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Aynı zamanda bu çalışmada potansiyel bir koruma şeması da önerilmektedir [37]. Yine aşırı akım koruma koordinasyonunun (OCPC) günümüzdeki dağıtım şebekelerinin artan karmaşıklığına çözüm olabilecek farklı çalışmalar Mahindara vd. tarafından yapılan çalışmada verilmiştir. Bu çalışmada ayrıca ters zamanlı (ANSI 51) ve kesin zamanlı (ANSI 50) fonksiyonların birleştirildiği firefly algoritması da OCPC'yi geliştirmek için önerilmiştir [38]. Prenc vd. tarafından yapılan diğer çalışmada örgülü ağ çalışması ve radyal çalışmanın gerçek uygulamasıyla karşılaştırıldığı araştırma bulunmaktadır [39]. Çoğu çalışmada DÜ tesislerinin şebekeye etkisi ya %0 ya da %100 alınarak adaptif koruma hesaplamaları yapılmaktadır. Fakat Hatata ve Lafi tarafından yapılan çalışmada farklı DÜ penetrasyon seviyelerinde (örneğin %30) bu adaptif koruma hesapları karınca aslan algoritması kullanılarak hesaplatılmaya çalışılmıştır. Algoritmanın doğruluğu IEEE 30-baralı test sistemine ve Mısır Batı Delta Dağıtım Şirketi'nden pratik 11 baralı test sistemine uygulanarak ispat edilmiştir [40].

Yukarıda bahsedilen çalışmaların ve literatürdeki çoğu çalışmanın adaptif korumaya ve AAR koordinasyonu optimizasyonuna verdiği faydalar ve iyileştirmeler açıktır. Fakat bu çalışmaların bazı dezavantajlarını da bir bütün olarak ele almak önemlidir. Bu dezavantajlar, DÜ tesislerinin şebekede sürekli olarak var ya da yok olmaması, DÜ tesislerinin şebekeye bağlı olduğu durumda ve arıza anında kısa devre akımının seviyesini önemli ölçüde değiştirmesi, DÜ tesislerinin şebekeye bağlandığında tek yönlü güç akışını çift yönlü güç akışına dönüştürmesi ve belki de en önemlisi aşırı akım koruma rölelerinin arızalanma ihtimalini ve gerisindeki aşırı akım koruma rölesinin çok kısa bir zaman içerisinde devreye girmesinin görmezden gelinmesidir.

Bu çalışmada, DÜ tesislerinin de bulunduğu adaptif korumaya dayalı şebekelerde röle koordinasyonunun düzeltilmesine dayalı bir koruma metodu önerilmiştir. Çoğu çalışmada, olağan şekilde herhangi bir optimizasyon yöntemiyle ayar değerleri (zaman çarpanı, alma akımı vb.) bulunan AAR koordinasyonunda herhangi bir röle arızalandığında ya da herhangi bir nedenle işlevini yerine getiremediğinde bir gerisindeki rölenin ayarlanan sürede açtığı belirtilmektedir. Bu durum ilgili rölenin arızalanması durumunda bir gerideki rölenin arızaya müdahalesini geciktirmektedir. Bahsedilen gecikme süresince de elektrik teçhizatlarının kısa devre akımına maruz kalma süresi o oranda artmaktadır. Bu uzun süre boyunca kısa devre akımı elektrik teçhizatlarına (kesici, ayırıcı, bara vb.) büyük

zararlar verebilmektedir. Bu çalışmanın literatüre katkısı burada ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki; önceki çalışmalarda olduğu gibi bir gerideki röle hesaplanan sürede değil ilgili röleden çok kısa bir süre sonra aktif edilerek arıza sonlandırılmaktadır. Böylece arızalanan rölenin yerine geçecek bir gerideki rölenin önerilen algoritma ile çok kısa bir sürede aktif olarak kısa devre akımının elektrik teçhizatlarına verdiği zarar azalmış olacaktır. Algoritma, DÜ tesisleri içeren IEEE 4-baralı şebeke sisteminde test edilmiştir. Farklı arıza konularına göre de durum çalışmaları izlenip değerlendirilmiştir.

Makalenin devamında IEEE 4-baralı test sistemi ve verileri ile önerilen algoritma verilmiştir. Elde edilen bulgular sunulmuş ve sonuç kısmında tartışılmıştır. Önerilen algoritma, formülasyonu ve simülasyon çıktıları MATLAB programında gerçekleştirilmiştir.

2. Teorik Metod (Theoretical Method)

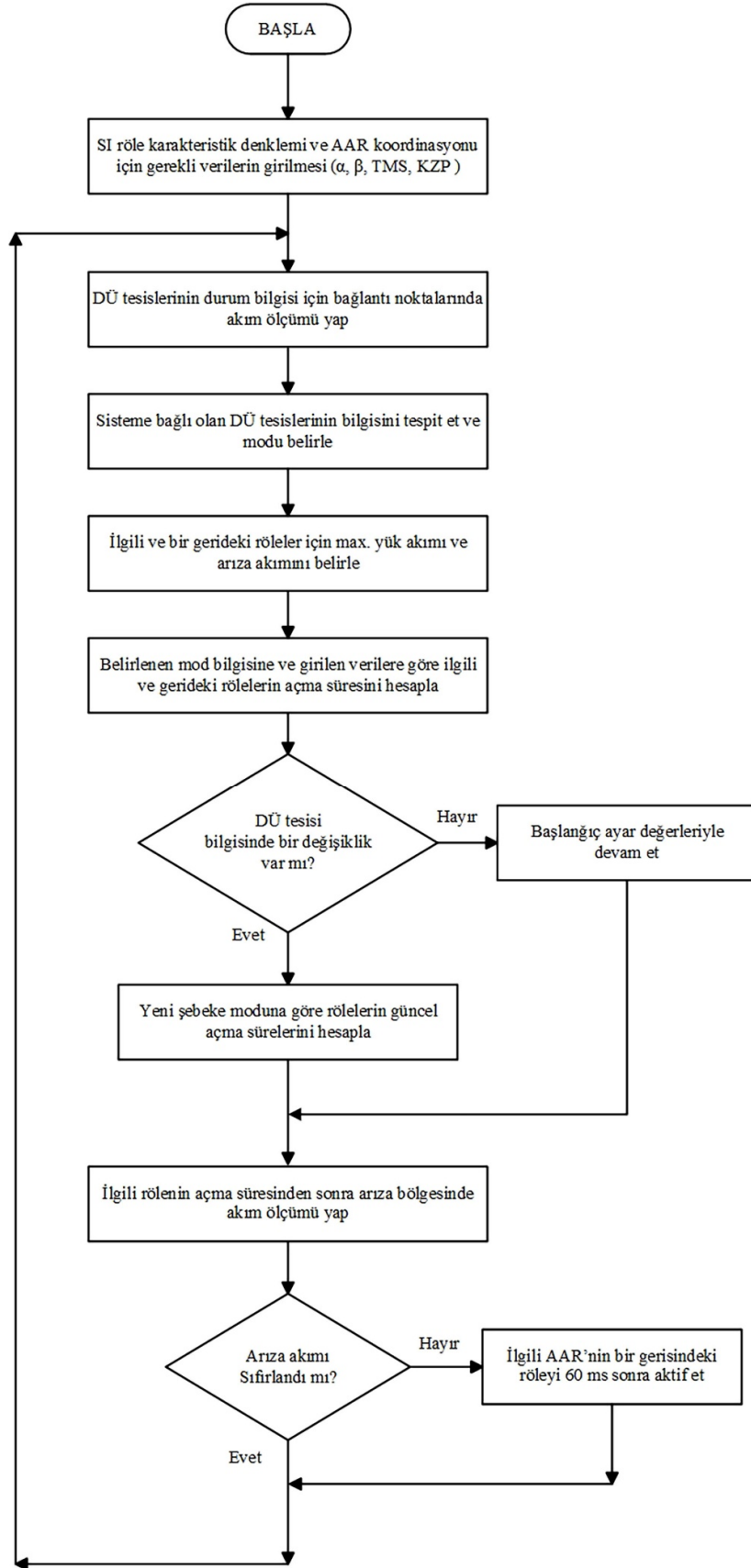
Aşırı akım koruma röleleri şebekede herhangi bir arıza olduğunda kendisine girilmiş olan röle karakteristiklerine göre belirli sürelerde kesicilere açma sinyali gönderirler [48]. Kaynağa en uzak röle ilk önce açacak şekilde çalışır. Gerisindeki röleler ise röle karakteristiklerine göre üzerinde ayarlı süreler sonrasında kesicilerine açma sinyali gönderirler. Bahsedilen rölelere ait IEC 60255 röle karakteristik eğrileri Tablo 1'de verilmiştir [49].

Burada t; röle karakteristiklerine göre rölenin aktif olma süresidir. G; arıza anında ölçülen akımdır. G_s; röle ayar akımıdır. TMS; zaman çarpanı ayarındır. 0,14, 13,5, 80 ve 120 ise röle eğri karakteristiklerinin katsayılarıdır. Röle ayar akımı (G_s) ayarlanırken devreden geçebilecek kısa süreli nominal akımın üzerinde olacak şekilde olmasına dikkat edilir. Literatürde G_s'nin, maksimum yük akımının %25 veya %30 fazlası olacak şekilde ayarlandığı görülmektedir [50, 51]. Bu çalışmada G_s, literatürdeki oranların ortalaması alınarak seçilmiş ve maksimum yük akımının %27,50 fazlası alınarak ayarlanmıştır. Buradaki amaç G_s'nin maksimum yük akımının %25 fazlası olarak seçildiği durumlarda rölenin çok hızlı devreye girmesinin önüne geçebilmektir. Aynı şekilde G_s'nin maksimum yük akımının %30 fazlası olarak seçildiği durumlarda ise rölenin çok geç devreye girmesinin önüne geçebilmektir. Son olarak literatürde arızaya müdahale edecek ilk röle için TMS'nin başlangıç değeri 0,05 olarak alınmaktadır [50-52]. AAR koordinasyonu hesabı yapılırken Koordinasyon Zaman Payı (KZP) bırakılması gerekmektedir. KZP literatürde 200 ms ya da 300 ms olarak alındığı görülmektedir [5, 52]. Bu çalışmada koordinasyon zaman payı, rölelerin hızlı ve gecikmeli açmalarını önlemek adına ortalama değer olan 250 ms olarak seçilmiştir. Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde adaptif koruma için önerilen algoritma Şekil 1'de bir akış şeması olarak verilmiştir.

Bu çalışmada adaptif koruma mekanizması yerel karar alma birimlerini kullanarak dağıtık bir şekilde uygulanmış olsa da adaptif yapı içerisinde kurulacak olan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemi ile uzaktan izlenebilir, kontrol edilebilir ve yönetilebilir bir yapı ile merkezi bir mimariye dönüştürülebilir. Şekil 1'deki önerilen algoritmada ilk olarak SI röle karakteristik eğri denklemi ve AAR koordinasyonu için gerekli veriler (α , β , TMS, KZP) algoritmaya girdi olarak verilmelidir.

Tablo 1. IEC 60255 standart röle karakteristikleri (IEC 60255 standard relay characteristics)

Röle Karakteristikleri	IEC 60255'e göre Açma Zamanı Hesabı
Normal ters (SI)	$t = [0,14 / ((G / G_s)^{0,02} - 1)] * TMS$
Fazla ters (VI)	$t = [13,5 / ((G / G_s) - 1)] * TMS$
Çok fazla ters (EI)	$t = [80 / ((G / G_s)^2 - 1)] * TMS$
Uzun gecikmeli ters	$t = [120 / ((G / G_s) - 1)] * TMS$



Şekil 1. Adaptif koruma için önerilen algoritma (Proposed algorithm for adaptive protection)

Daha sonra şebekeye DÜ bağlantısının olup olmadığı ve varsa kaçının bağlı olduğunu tespit edebilmek için her DÜ bağlantı noktasında akım ölçümü yapılmaktadır. Buradan gelen akım bilgisi ile herhangi bir nedenle (DÜ'nün arızalanması, rüzgârın azlığından ya da yokluğundan enerjinin üretilmemesi vb.) devrede olmayan DÜ bilgisi tespit edilir. Bu tespite göre de sistemin anlık modu belirlenmiş olur. Belirlenen mod bilgisine ve girilen verilere göre ilgili ve bir gerideki rölelerin açma süresi hesaplanır. Algoritma ilgili rölelerin bu hesabını yaparken SI röle karakteristik denkleminde G için, simülasyona 1. saniyede uygulanan üç fazlı arızadan sonra akım sensörlerinden ölçülen akım bilgisini, G_s için ise, akım sensörleri vasıtası ile ölçülen maksimum yük akımı bilgisinin 1,275 değeri ile çarpımı (%27,50 fazlası) bilgisini çekmektedir. Bir gerideki ve sıradaki rölelerin açma süresi hesabını yaparken ise ilgili rölenin açma süresine KZP'yi ekleyerek (makalede 250 ms seçilmiştir) bir gerideki rölenin geçici açma süresini hesaplamaktadır. Geçici açma süresinden, ilgili rölenin G 'sinden ve bir gerideki rölenin G_s değerinden yararlanılarak bir gerideki rölenin gerçek açma süresi hesabında kullanılacak olan TMS değerine ulaşılmaktadır. Ulaşılan TMS değeri, bir gerideki rölenin G 'si ve bir gerideki rölenin G_s 'si ile de bir gerideki rölenin gerçek açma süresi hesaplanmaktadır. Şebekenin mod bilgisi sistemde sürekli olarak denetlenmektedir. Mod değişikliği yoksa başlangıçta ayarlanan röle ayar değerleri ile devam edilir. Eğer mod durumunda bir değişiklik varsa yeni mod algılanıp tespit edildikten sonra yeni mod durumuna göre güncel röle ayar değerleri ve rölelerin açma süreleri hesaplanır. Algoritmanın bu adımından sonra adaptif korumadaki sistemde arıza olan yere en yakın rölenin açma süresinden sonra arıza noktasında tekrar akım ölçümü yapılır. Bunun nedeni arızaya en yakın rölenin arızayı temizleyip temizleyemediğinin kontrolü içindir. Eğer akım sıfırlanmışsa bahsi geçen röle görevini yerine getirmiş ve zamanında arızayı temizlemiştir. Burada algoritma tekrar başa döndürülür. Fakat akım sıfırlanmamış ise algoritma bahsi geçen rölenin bir gerisindeki röleyi 60 ms gecikmeyle çalıştırır ve arızayı kısa devre akımının etkisi çok büyümeden temizler. Bu durum olduğunda da algoritma tekrar başa döndürülür.

Buradaki amaç ise arıza muhatabı röle herhangi bir nedenle (rölenin arızalanması, redresör arızası, alternatif gerilim eksikliği vb.) çalışmazsa bir gerisindeki rölenin ayar edildiği sürede değil sadece 60 ms gecikme ile arızayı temizleyebilmesinin sağlanmasıdır. Bir gerisindeki rölenin bu şekilde çalışması arızanın çok kısa sürede temizlenebilmesi anlamına gelir. Eğer bir gerisindeki röle normal

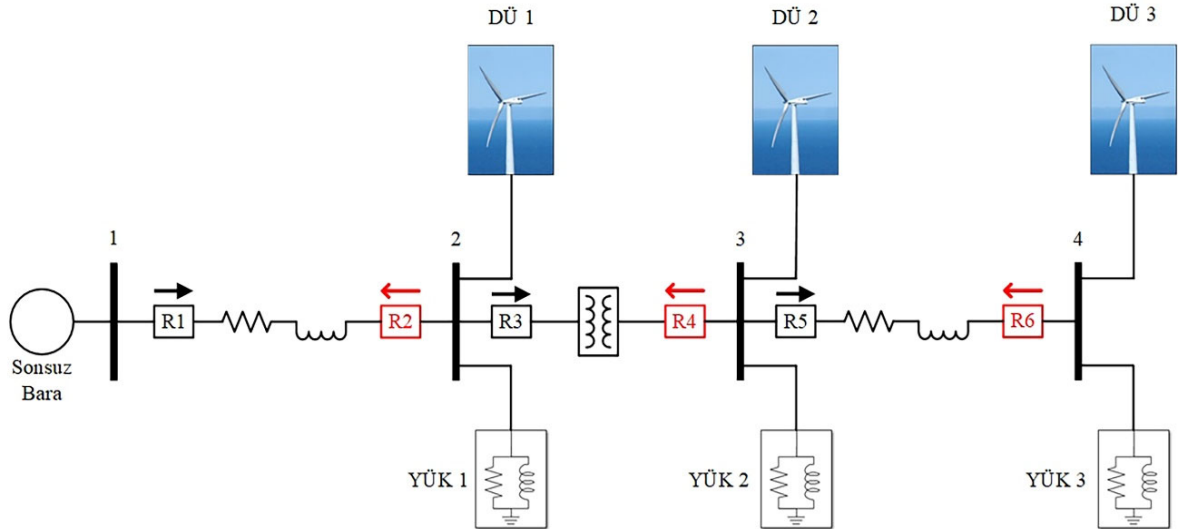
ayarlandığı sürede çalışırsa bu durum kısa devre akımının daha uzun süre şebekeden geçmesine neden olur. Uzun süre boyunca şebekeden akan kısa devre akımı elektrik teçhizatlarına (kesici, ayırıcı, iletken vb.) geri dönüşü mümkün olmayan ciddi hasarlar bırakabilmektedir.

Algoritmanın MATLAB kısmında yazılan .m file dosyasında, şebekedeki akım değerlerine bağlı olarak röle açma süreleri hesaplanmakta ve bu bilgiler Simulink modeline entegre edilmektedir. Sistemin çeşitli noktalarında akım ve gerilim ölçümleri yapmak için akım sensörü ve gerilim sensörü blokları kullanılmıştır. Arıza senaryolarını oluşturmak amacıyla ise Simulink'te yer alan arıza bloğu kullanılmış ve belirli noktalarda üç fazlı kısa devreler tanımlanmıştır. Algılanan maksimum akım değerleri, MATLAB tarafında geliştirilmiş olan algoritmaya aktarılmış; bu algoritma üzerinden ilgili rölenin açma süresi hesaplanmıştır. Simulink modelinde bu hesaplanan süreye göre devre kesici bloğu tetiklenmiş ve arıza bölgesi izole edilerek şebekenin geri kalanı korunmuştur. Ayrıca simülasyon ortamında şebekeden geçen maksimum akım değerlerinin skope görüntüsünden faydalanılarak, algoritma tarafından hesaplanan değerlerinin doğruluğu manuel hesaplama yapılarak yine aynı program üzerinde hesaplatılmış ve her iki sonuçta Simulink'te yer alan display uygulamasında karşılıklı olarak gösterilerek doğrulanmıştır. Aşırı akım koruma rölesi için adaptif koruma algoritması da içeren blok oluşturularak röle parametrelerinin ön tanımlamaları (TMS, temel frekans, akım transformatörü ayarı vb.) yine bu blok üzerinden yapılmıştır.

Uygulamada röleler, alma akımı değeri aşıldıktan sonra kesicilere 30 ms içinde açma sinyali göndermektedir [32]. Dolayısı ile bir gerideki rölenin açma sinyali göndermesi için zaman kısıtlaması (Eş. 1) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$t_s < t_i < t_{KZP} \quad (1)$$

Burada t_s ; bir gerideki rölenin, alma akımı aşıldıktan sonra açma sinyali gönderme süresinin minimum değerini göstermektedir ve bu nedenle 30 ms'ye eşittir. t_{KZP} ; koordinasyon zaman payını göstermektedir ve bu nedenle 250 ms'ye eşittir. [28]'de önerilen algoritmada röleler hattan geçen akımı 50 ms'lik aralıklarla kontrol ederek durum değişikliğine karar vermektedir. t_i ; bir gerideki rölenin ne kadarlık bir gecikme ile aktif olacağını göstermektedir. Ayrıca yine [28]'deki çalışmadan hareketle rölelerdeki iletişim gecikmeleri rölelerin çalışma hızını da etkileyebilmektedir. Çalışmada, sahadaki



Şekil 2. Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sistemi (Modified IEEE 4-node test system)

iletileşim hızının [28]'deki kadar hızlı olamayabileceği ve fiber optik hattın olamayacağı yerler düşünülerek ve yukarıdaki bilgilerden hareketle çalışmada t_i ihtiyatlı davranılarak 60 ms olarak seçilmiştir. Burada 60 ms alınırken dikkat edilen husus AAR koordinasyonunu bozmamak adına hesaplanan KZP'den küçük olması ve rölelerin kesicilere gönderdiği sinyal süresinden ve durum değişikliği için gerekli döngü süresinden de büyük olması durumudur.

2.1. IEEE 4-Baralı Test Sistemi ve Değiştirilmiş IEEE 4-Baralı Test Sistemi (IEEE 4-Bus Test System and Modified IEEE 4-Bus Test System)

AAR koordinasyonu, koruma yapılacak fiderdeki ilgili rölelerin birbirleri ile uyumlu çalışarak gereksiz enerji kesintilerinin önüne geçmeyi ifade etmektedir. Bu bağlamda birçok çalışmada temel olarak alınan üç fazlı IEEE 4-baralı dağıtım test sistemi adaptif koruma ve AAR koordinasyonu problemlerinde fazlaca tercih edilmiştir. Fakat üç fazlı IEEE 4-baralı şebeke sistemi çoğu çalışmada değiştirilerek kullanılmıştır [42-44]. Bunun sebebi ise üç fazlı IEEE 4-baralı test sisteminde güç akışının tek yönlü olması, bir tek kaynak olması, DÜ tesislerinin bağlı bulunmaması gibi çalışmaya dezavantaj oluşturacak özelliklere sahip olmasındandır. IEEE 4-baralı test sisteminin özgün hali [45]'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Yukarıda bahsedilen dezavantajların önüne geçebilmek ve adaptif korumadaki önerilen röle koordinasyonunu test edebilmek için IEEE 4-baralı test sistemi Şekil 2'deki gibi değiştirilmiştir [5].

IEEE 4-baralı test sisteminde yapılan değişiklikler ise şu şekildedir:

- Şekil 2'de DÜ üniteleri sırasıyla 2, 3 ve 4 numaralı baralara bağlanmıştır.
- Sistemin özgün yükü değiştirilmeden Yük 1, Yük 2 ve Yük 3 sırasıyla 2, 3 ve 4 nolu baralara Şekil 2'deki gibi dağıtılmıştır.

IEEE 4-baralı test sisteminde kullanılan üç fazlı transformatör bilgileri Tablo 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir [45]. Çalışmada Yg-Yg

bağlantılı, 6 MVA, 12,47 / 4,16 kV düşürücü tip transformatör kullanılmıştır. Yükseltici tip transformatörde ise [45]'te ki bilgilerden faydalanılarak Yıldız / Üçgen, Üçgen / Yıldız, Açık Yıldız / Üçgen bağlantıları olmak üzere 3 çeşit bağlantı şeklinin olduğu anlaşılmaktadır.

Yük 1, Yük 2 ve Yük 3'e ait detaylı bilgiler Tablo 3'te verilmiştir [5].

Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde YÜK-1, YÜK-2 ve YÜK-3'e ait görünür güçler 3889,269 kVA, 1111,407 kVA ve 999,178 kVA olarak hesaplanabilmektedir. Bu değerlerden YÜK-1, YÜK-2 ve YÜK-3'e ait $\cos\phi$ değerleri üç yük için de 0,9 yani orijinal test sistemine uygun çıkmıştır. YÜK-1, YÜK-2 ve YÜK-3 Şekil 2'deki noktalara 3 fazlı olarak bağlandığında ampermetrelerden geçen akım DÜ, hat, transformatör etkileri de dikkate alınarak MATLAB ortamında hesaplanmış ve Tablo 3'te verilen değerlere ulaşılmıştır.

Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde kaynak ve DÜ ünitesi veya üniteleri olduğundan test sisteminde güç akışı çift yönlüdür [47]. Bu yüzden yönlü aşırı akım koruması kullanılır. Güç akışının tek yönlü olduğu tek durum, sistemde herhangi bir DÜ bağlantısının bulunmadığı durumdur. MATLAB programında tasarlanmış değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde 2, 3 ve 4 numaralı baralara bağlanan DÜ üniteleri rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinden seçilmiştir. IEEE 4-baralı test sistemine yeni bağlanan DÜ ünitelerine ait veriler Tablo 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir [46].

2.2. Geleneksel ve Adaptif AAR koordinasyonu ve önerilen koordinasyon yöntemi (Conventional and Adaptive OCR coordination and proposed coordination method)

Geleneksel AAR koordinasyonunun temelinde, güç kaynağından başlayarak en uçtaki tüketiciye kadar uzanan hatta yer alan KÖK'lerdeki rölelerin belirli bir sıralama ve uyum içinde çalışması yer alır. Bu yapıda, kaynağa en uzak rölenin önce, daha yakın olanların ise ardından devreye girmesi hedeflenir. Bu koordinasyon

Tablo 2. Üç fazlı transformatör bilgileri (Three phase transformer information)

Bağlantı	kVA	kVLL yüksek	kVLL düşük	R - %	X - %
Düşürücü	6000	12,47	4,16	1,0	6,0
Yükseltici	6000	12,47	24,9	1,0	6,0

Tablo 3. Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sistemi yük bilgileri (Modified IEEE 4-node test system load information)

Dengeli	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)	Yük Akımları (A) Faz-1 / Faz-2 / Faz-3
YÜK-1	3500	1696	160,845 / 160,957 / 160,939
YÜK-2	1000	485	120,241 / 119,611 / 119,667
YÜK-3	900	434	88,552 / 88,503 / 88,476

Tablo 4. Eklenen DÜ (SCIG rüzgâr türbinleri) bilgileri (Added DG (SCIG wind turbines) information)

Parametreler	SCIG	Birim
Nominal rüzgâr türbini mekanik çıkış gücü	1,5	MW
Temel rüzgâr hızı	9	m/s
Temel rüzgâr hızında maksimum güç	1	pu
Temel dönüş hızı	1	pu
Eğim açısı kontrolörü kazancı (kp)	5	-
Eğim açısı kontrolörü kazancı (ki)	25	-
Maksimum eğim açısı (derece)	45	derece
Eğim açısının maksimum değişim oranı	2	derece/s

yaklaşımında kaynak tek olduğu için güç akışı da tek yönlüdür. Koruma koordinasyonu yapılırken, rölelerin hangi karakteristik eğrilerle çalışacağı, yeterli KZP'nin verilmesi ve uygun seçiciliğin sağlanmış olması büyük önem taşımaktadır. Rölelerin bu koordinasyonu sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için, hızlı tepki verebilmeleri, yapılarının mümkün olduğunca basit ve sağlam olması, kısa devre anında oluşabilecek en düşük akım ve gerilimlerde dahi güvenilir biçimde çalışabilecek duyarlılığa sahip olmaları, kesici açtırma işlemini tehlikeden uzak kontaklarla yaptırabilmesi, oldukça az tüketimi olması vb. özelliklere sahip olması çok önemlidir.

Adaptif koruma uygulanan bir şebekede yapılan AAR koordinasyonunda, DÜ birimlerinin şebekeye bağlanması nedeniyle birden fazla güç kaynağı bulunmaktadır. Bu durum, güç akışının çift yönlü hale gelmesine yol açar. Bu nedenle, adaptif koruma altındaki şebekelerde AAR koordinasyonu yönlü ve dinamik bir yapıda gerçekleştirilir. Rölelerin bu dinamik yapıya hızlı bir şekilde uyum sağlayabilmesi için, parametrelerinin de dinamik olarak hesaplanabileceği algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede röleler, arıza anında kesicilere mümkün olan en kısa sürede açma sinyali gönderebilmektedir. Eğer ilgili röle herhangi bir nedenle arızayı gideremezse, onun bir gerisinde bulunan röle önerilen algoritma doğrultusunda hesaplanan süre sonunda kesicisine açma komutu vererek arızayı ortadan kaldırır.

Önerilen koruma koordinasyonunda, adaptif koruma uygulanan bir şebekede ilgili AAR rölesi ile onun bir gerisindeki röle arasında kendi içinde bir koordinasyon sağlanmaktadır. Literatürde kullanılan uygulamalardan farklı olarak, röle alma akımı maksimum yük akımının %25 veya %30 fazlası yerine %27,50 fazlası olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, KZP, 200 ms ya da 300 ms değil 250 ms alınmıştır. Bu farklı parametrelerle rölelerin açma süresi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, önerilen yöntemde, ilgili rölenin arızayı herhangi bir nedenle giderememesi durumunda, bir gerisindeki röle önerilen algoritmaya göre hesaplanan sürede değil, ilgili röleden

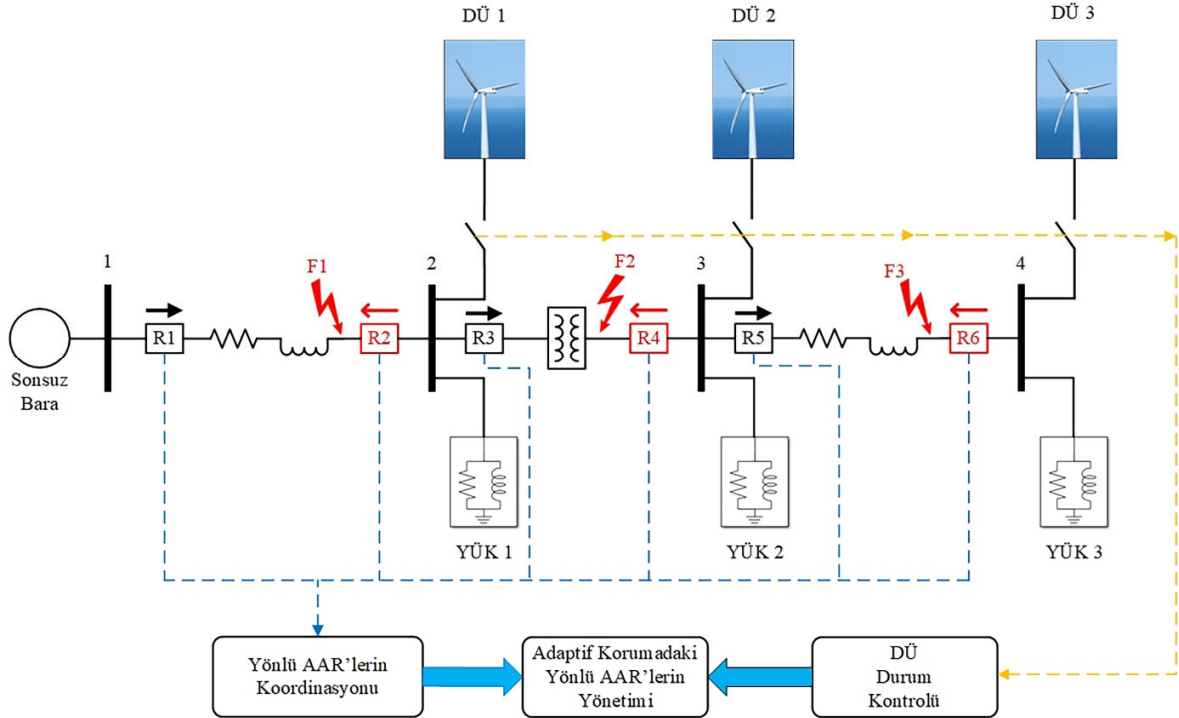
60 ms gecikmeyle devreye girerek arızayı temizlemektedir. Bu yaklaşım, adaptif koruma altındaki klasik AAR koordinasyonuna kıyasla kısa devre akımının daha hızlı bir şekilde sıfırlanmasına olanak tanımaktadır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Dağıtım ve iletim şebekelerinde yük, frekans, gerilim gibi büyüklükler sürekli değişim göstermektedir. Bu durum, şebekelerin dinamik yapısından kaynaklanır. Elektrik teçhizatlarının seçimi ve tüm koruma senaryolarının tasarımında bu dinamik yapı mutlaka dikkate alınmalıdır. Dinamik yapıya sahip şebekelerin korunmasındaki temel hedef, ani değişimlerin hızlı bir şekilde algılanması ve bu değişimlere uygun en ideal ayar değerlerinin en kısa sürede sisteme entegre edilebilmesidir. Bu hedefe ulaşılması, adaptif korumanın şebekelerde etkin biçimde uygulandığı anlamına gelir. Bu çalışmada önerilen yöntemle amaçlanan ise, adaptif koruma uygulanan şebekelerde dahi röle arızalarından kaynaklanan gecikmeli açmaların önüne geçerek daha güvenli ve hızlı bir koruma sağlamaktır.

Değiştirilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde DÜ ünitelerinin hangi baralara bağlandığını, arıza noktalarını ve adaptif korumadaki koordinasyonda rölelerin yönlerini gösteren şema Şekil 3'te verilmiştir. Önerilen adaptif koruma metodunda hangi DÜ ünitesinin bağlı olduğu ya da olmadığı, arıza noktasının yeri ve rölelerin yön bilgisi üzerinde durulması gereken en önemli noktalar. Şekil 3'teki şemada 3 adet DÜ ünitesi olduğundan DÜ ünitelerinin bağlı olup olmama durumlarının tamamını gösteren $2^3 = 8$ adet durum vardır. Bu durumlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5'te "AÇIK" ile belirtilen durum DÜ ünitesinin sisteme enerji verdiği, "KAPALI" ile belirtilen durum ise DÜ ünitesinin sisteme enerji vermediği anlamına gelmektedir. Örneğin Tablo 5'e göre Mod 7'de çalışan sistemde DÜ1 ve DÜ2 üniteleri şebekeye enerji sağlarken



Şekil 3. Adaptif yönlü aşırı akım koordinasyon sistemi (Adaptive directional overcurrent coordination system)

DÜ3 ünitesi enerji sağlamamaktadır. Çalışma modları değiştiğinde önerilen algoritma anlık olarak bu değişikliği algılar ve kendisini yeni moda göre güncelleyerek yeni ayar değerlerini rölelere sağlamış olur. Önerilen algoritma aynı zamanda rölelerin işlevini yapıp yapmadığını da denetlemektedir. Denetimin mantığı koordinasyon süresinde ilgili rölenin arıza akımını sıfırlayıp sıfırlamadığına dayanır. Bu da arıza noktalarındaki akım ölçümü ile mümkün olmaktadır.

Tablo 5. DÜ bağlantı durumlarını içeren çalışma modları
(Working modes including DG connection states)

Mod	DÜ1	DÜ2	DÜ3
1	KAPALI	KAPALI	KAPALI
2	KAPALI	KAPALI	AÇIK
3	KAPALI	AÇIK	KAPALI
4	KAPALI	AÇIK	AÇIK
5	AÇIK	KAPALI	KAPALI
6	AÇIK	KAPALI	AÇIK
7	AÇIK	AÇIK	KAPALI
8	AÇIK	AÇIK	AÇIK

Şekil 3'te adaptif yönlü aşırı akım koruması yapıldığı için R1, R3 ve R5 rölelerinin bir doğrultuda koruma koordinasyonunda olduğuna, R2, R4 ve R6 rölelerinin de tersi doğrultuda koruma koordinasyonunda olduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 3'te ve önerilen algoritmada DÜ üniteleri rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinden seçilmiştir. Fakat DÜ üniteleri her ne kadar rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinden seçilmiş ise de herhangi bir DÜ ünitesi (rüzgâr, hidroelektrik, güneş, biyokütle vs.) de şebekeye bağlanabilir. Bu durumda da önerilen algoritma çalışma modlarına uygun bir şekilde işleyecektir. Şebekeye bağlanacak olan DÜ'lerin etiket bilgileri (güç, cosφ vb.), arıza parametreleri gibi önerilen algoritma için gerekli

veriler önceden algoritmaya girdi olarak verilmelidir. Çünkü bu veriler önceden bilinebilen ve hesaplanabilen değerlerdir.

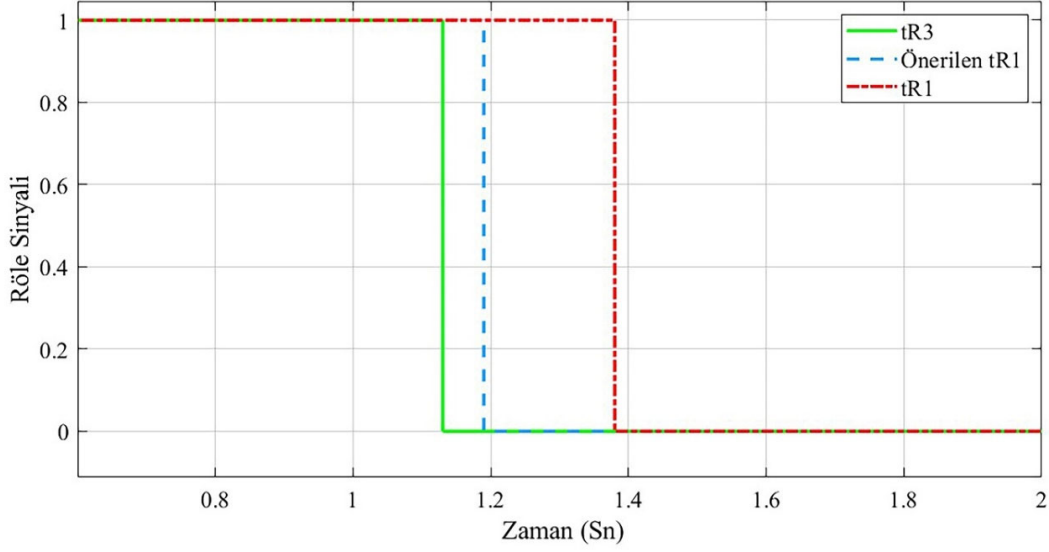
Önerilen algoritma sayesinde çalışma modunda herhangi bir değişiklik olduğunda o andaki çalışma modunun tüm TMS değerleri hızlı bir şekilde ayarlanıp önerilen algoritmaya uygun ayar değerleriyle adaptif koruma sağlanmaktadır. Adaptif yönlü aşırı akım koordinasyonu yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri çalışma modlarına uygun bir şekilde koordinasyon sıralamasının sağlanmasıdır. Örneğin Şekil 3'teki sistemde Mod 6 çalışma ve arıza noktasının F2 olması durumunda arızaya müdahale edecek ilgili rölelerin R3-R4 röleleri olduğu ve bu rölelerin arızalanmaları durumunda ise bir gerisindeki rölelerin sırasıyla R1-R6 röleleri olduğu unutulmamalıdır. Aynı şekilde Mod 3 çalışma ve arıza noktasının F3 olması durumunda arızaya müdahale edecek ilgili rölenin R5 rölesi olduğu ve bu rölenin arızalanması durumunda ise bir gerisindeki rölenin R3 rölesi olduğu unutulmamalıdır.

Önerilen koordinasyonun performansı 8 farklı mod ve 3 farklı arıza yeri olmak üzere toplam 24 durum üzerinden değerlendirilmiştir. 24 durum üzerinden yapılan çalışmanın sonuçları Tablo 6'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Röleler tarafından yönlü koruma sağlandığı için arızanın hangi yönde olduğu konusu büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden sadece arıza akımının yönüyle aynı olan röleler açma yapmakta diğer röleler ise pasif kalmaktadır. Bu olay 24 durum için ayrı ayrı değerlendirilip dinamik yapı içerisinde ona uygun ayar değerleri hesaplanmakta ve ilgili rölelerin açması sağlanmaktadır.

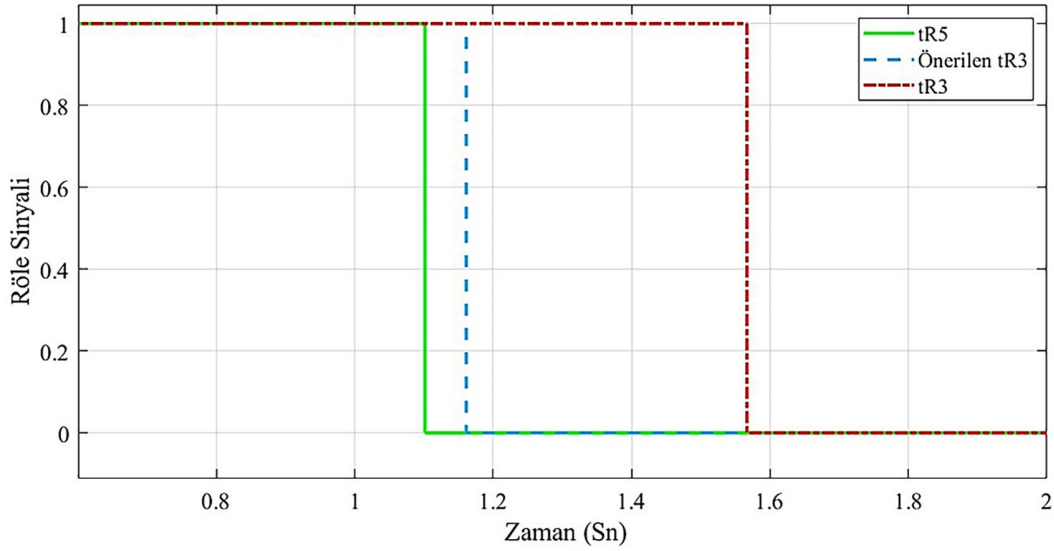
Bahsedilen 24 durumdan 2 tanesi önerilen algoritmanın performansını göstermek için Şekil 4 ve Şekil 5'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Örneğin Şekil 4, Mod 3 ve F2 noktasında oluşan arıza için ilgili rölelerin açma sürelerini göstermektedir. Mod 3 ve F2 noktasında

Tablo 6. Önerilen sistemde ilgili röle(lerin) ve bir gerisindeki röle(lerin) açma süreleri
(Opening times of the relevant relay(s) and the relay(s) behind them in the proposed system)

Çalışma Modları	Arıza Noktası	İlgili Röleler	Bir Gerisindeki Röleler	Adaptif korumada ilgili rölelerin açma süreleri (s)	Adaptif korumada bir gerisindeki rölelerin açma süreleri (s)	Önerilen adaptif korumada bir gerisindeki rölelerin açma süreleri (s)
1	F1	R1	X	0,1897	X	X
1	F2	R3	R1	0,1242	0,3740	0,1842
1	F3	R5	R3	0,1018	0,5657	0,1618
2	F1	R1-R2	X-R4	0,1936-0,2873	X-0,7218	X-0,3473
2	F2	R3-R4	R1-R6	0,1315-0,1471	0,3801-0,3967	0,1915-0,2071
2	F3	R5-R6	R3-X	0,1283-0,1142	0,6309-X	0,1883-X
3	F1	R1-R2	X-R4	0,1928-0,1971	X-0,2840	X-0,2571
3	F2	R3-R4	R1-X	0,1299-0,1152	0,3796-X	0,1899-X
3	F3	R5	R3	0,0975	0,6520	0,1575
4	F1	R1-R2	X-R4	0,2003-0,2051	X-0,2514	X-0,2651
4	F2	R3-R4	R1-R6	0,1429-0,1289	0,3921-0,5189	0,2029-0,1889
4	F3	R5-R6	R3-X	0,1277-0,1175	0,7605-X	0,1877-X
5	F1	R1-R2	X	0,1930-0,1776	X	X
5	F2	R3	R1	0,1204	0,4204	0,1804
5	F3	R5	R3	0,1009	0,5653	0,1609
6	F1	R1-R2	X-R4	0,1993-0,1798	X-0,3895	X-0,2398
6	F2	R3-R4	R1-R6	0,1292-0,1497	0,4282-0,4008	0,1892-0,2097
6	F3	R5-R6	R3-X	0,1280-0,1158	0,6368-X	0,1880-X
7	F1	R1-R2	X-R4	0,1989-0,1572	X-0,3391	X-0,2172
7	F2	R3-R4	R1-X	0,1271-0,1124	0,4273-X	0,1871-X
7	F3	R5	R3	0,0937	0,6392	0,1537
8	F1	R1-R2	X-R4	0,2088-0,1703	X-0,3210	X-0,2303
8	F2	R3-R4	R1-R6	0,1405-0,1336	0,4451-0,5280	0,2005-0,1936
8	F3	R5-R6	R3-X	0,1276-0,1186	0,7617-X	0,1876-X



Şekil 4. Mod 3 ve arıza noktası F2 olması durumunda R3 rölesinin koordinasyonu
(Coordination of relay R3 in case of mode 3 and fault point F2)



Şekil 5. Mod 5 ve arıza noktası F3 olması durumunda R5 rölesinin koordinasyonu
(Coordination of relay R5 in case of mode 5 and fault point F3)

oluşan arıza için ilgili rölelerin R3 ve R4 röleleri olduğu, bir gerisindeki rölelerin ise R3 rölesi için R1 rölesinin bulunduğu, R4 rölesi için bir gerideki rölenin bulunmadığı Tablo 6'daki bilgilerden anlaşılmaktadır. Bahsedilen rölelere ait açma süresi hesaplamaları örnek olması açısından aşağıda verilmiştir.

R3 rölesinin hesabı:

$$[Arıza Akımı (G)]_{rms} = 1596,53 \text{ A} / \sqrt{2} = 1128,92 \text{ A (R3)}$$

$$[Maksimum Yük Akımı (G_s)]_{rms} = 90,58 / \sqrt{2} = 64,05 \text{ A}$$

$$\text{Maksimum Yük Akımının \%27,50 fazlası} = 81,66 \text{ A (R3)}$$

$$t_{R3} = [0,14 / ((G / G_s)^{0,02} - 1)] * TMS = [0,14 / ((1128,92 / 81,66)^{0,02} - 1)] * 0,05 = 0,1299 \text{ s}$$

R4 rölesinin hesabı:

$$[Arıza Akımı (G)]_{rms} = 2208,73 \text{ A} / \sqrt{2} = 1561,81 \text{ A (R4)}$$

$$[Maksimum Yük Akımı (G_s)]_{rms} = 90,62 / \sqrt{2} = 64,08 \text{ A}$$

Maksimum Yük Akımının \%27,50 fazlası = 81,70 A (R4)

$$t_{R4} = [0,14 / ((G / G_s)^{0,02} - 1)] * TMS = [0,14 / ((1561,81 / 81,70)^{0,02} - 1)] * 0,05 = 0,1152 \text{ s}$$

R1 rölesinin hesabı:

R1 rölesinin geçici açma süresi hesabında G; R3 rölesinin arıza akımı, G_s; R1 rölesinin maksimum yük akımıdır.

$$[Maksimum Yük Akımı (G_s)]_{rms} = 309,80 / \sqrt{2} = 219,06 \text{ A}$$

Maksimum Yük Akımının \%27,50 fazlası = 279,30 A (R1)

$$t_{R1g} = t_{R3} + KZP = 0,1299 + 0,25 = 0,3799 \text{ s}$$

Bu aşamadan sonra TMS hesabına geçilmektedir.

$$t = [0,14 / ((G / G_s)^{0,02} - 1)] * TMS \text{ denkleminde;}$$

$$0,3799 = [0,14 / ((1128,92 / 279,30)^{0,02} - 1)] * TMS \text{ olarak veriler yerine yazıldığında}$$

TMS = 0,077 olarak bulunur.

Bulunan bu TMS değerine göre R1 rölesinin gerçek açma süresi bulunur.

$$[Arıza Akımı (G)]_{rms} = 1602,02 \text{ A} / \sqrt{2} = 1132,80 \text{ A (R1)}$$

$$t_{R1} = [0,14 / ((G / G_s)^{0,02} - 1)] * TMS = [0,14 / ((1132,80 / 279,30)^{0,02} - 1)] * 0,077 = 0,3796 \text{ s}$$

Simülasyonda üç fazlı arıza sisteme 1. saniyede uygulanmıştır. Adaptif korumada R3 rölesi 0,1299 saniyede açma sinyali gönderirken R1 rölesi 0,3796 saniyede açma sinyali gönderir. Önerilen koruma metodunda ise R1 rölesi 0,1899 saniyede açma sinyali göndererek arıza daha kısa bir sürede sonlandırılmıştır. Aynı şekilde Şekil 5, Mod 5 ve F3 noktasında oluşan arıza için ilgili rölelerin açma sürelerini göstermektedir. Adaptif korumada R5 rölesi 0,1009 saniyede açma sinyali gönderirken R3 rölesi 0,5653 saniyede açma sinyali gönderir. Önerilen koruma metodunda ise R3 rölesi 0,1609 saniyede açma sinyali göndererek arıza daha kısa bir sürede sonlandırılmıştır.

Tablo 6'dan da görüleceği gibi adaptif korumada bir gerideki rölelerin açma süreleri ile önerilen koruma metoduna göre çalışan rölelerin açma sürelerine bakıldığında bazı modlarda farkın 0,5741 saniyelere kadar çıktığı anlaşılmaktadır. Buradan önerilen sistemle %75,95'lik bir iyileştirme sağlandığı görülmektedir.

Elde edilen simülasyon sonuçlarından DÜ tesisleri içeren adaptif korumadaki şebekelerde röle koordinasyonun iyileştirildiği anlaşılmaktadır. Önerilen koruma metodu, 8 farklı modda çalışan sistemin her moda hızlı şekilde uyum sağlayarak sistemin daha hızlı bir şekilde arızadan temizlenmesi ile sonuçlanır.

Önerilen koruma metodunun gerçek hayatta ve şu anda güncel olarak kullanılan şebekede kullanılabilmesi için mikroişlemci tabanlı rölelerin kullanılması olmazsa olmazdır [5]. Aynı zamanda sistemde bulunan sensörler yardımıyla gelen verilerin ve önerilen algoritmaya uygun bir şekilde çalışmasını sağlayan bilgisayar alt yapısının varlığı da son derece önemlidir. Bu sayede sistemin hangi modda olduğunun bilgisi ve bu moda uygun röle parametrelerinin rölelere gönderilmesi hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Gerçek hayatta bilgisayar altyapısı ile rölelerin iletişimi sisteme operasyonel bir yapı kazandırmaktadır. Operasyonel yapı ile birlikte herhangi bir mod değişikliğine veya sistemde arıza noktasının değiştiği durumlara çok hızlı reaksiyon verilerek ayarlanan değerlerin mümkün olan en kısa sürede rölelere iletilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece insan kaynaklı hatalar veya sisteme olan müdahalesindeki gecikmeler azaltılabilir. Fakat bilgisayar altyapısı ile röleler arasındaki iletişim kopukluğu (enerji kesintisi vb. nedenlerden dolayı), bir gerisindeki rölenin arızalanması gibi buna benzer sebepler sistemin ve şebekenin korunmasını tehlikeye düşürebilmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

DÜ üniteleri dahil edilmiş şebekelerin emniyetli bir şekilde korunması ciddi dikkat isteyen ve özenle yapılması gereken bir iştir. Bu makalede DÜ üniteleri içeren adaptif korumadaki dağıtım şebekelerinde röle koordinasyonun düzeltilmesine dayalı ve dolaylı olarak da elektrik teçhizatlarının kısa devre akımının olumsuz etkisine daha az süre maruz kalması için bir koruma metodu ve şeması gerçekleştirilmiştir. Önerilen koruma koordinasyonu algoritması 3 DÜ ünitesi entegre edilmiş IEEE 4-baralı test sisteminde test edilmiştir. Sistemin analizi ise DÜ ünitelerinin devrede olup olmamasına göre 8 durum ve 3 farklı arıza yeri olmak üzere toplamda 24 durum üzerinden yapılmıştır.

Simülasyon sonuçlarından elde edilen bilgiler DÜ tesisi içeren adaptif korumadaki şebekelerde ilgili rölenin bir gerisindeki röle açma süresinde ciddi anlamda kısalmanın dolayısıyla röle

koordinasyonunda iyileşmenin sağlandığını göstermektedir. Her ne kadar bir gerideki rölenin açma süresi adaptif yapı içerisinde hesaplanırsa da önerilen metotla bu süre daha da kısaltılabilmekte ve elektrik teçhizatının daha fazla zarar görmesi engellenmektedir. Önerilen metotla bir gerideki rölenin açma süresi 24 durum üzerinden tekrar incelendiğinde -%5,45 ile %75,95 arasında değişen bir oranda bu sürenin azaldığı görülmektedir.

Görüldüğü üzere AAR koordinasyonu tek bir koruma eğrisi (SI) için yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bir sonraki çalışmada şebekenin tipine göre röle karakteristik eğrilerinin de değiştirilmesine dayalı bir koruma metodu ile en uygun röle ayar değerlerinin elde edilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Andersen A.N., Lund H., New CHP partnerships offering balancing of fluctuating renewable electricity productions, in J. Cleaner Prod., 15 (3), 288-293, 2007.
2. Üney M.Ş., Çetinkaya N., New Metaheuristic Algorithms for Reactive Power Optimization, Tehni Ki Vjesnik, 26 (5), 1427-1433, 2019.
3. Aboagye B., Gyamfi S., Ofosu E.A., Status of renewable energy resources for electricity supply in Ghana, Scientific African, 11, e00660, 2021.
4. Zahraoui Y., Khan M.R.B., AlHamrouni, I., Mekhilef S., Ahmed M., Current status, scenario, and prospective of renewable energy in Algeria: A review, Energies, 14 (9), 2354, 2021.
5. Ates Y., Uzunoglu M., Karakas A., Boynuegri A.R., Nadar A., Dag B., Implementation of adaptive relay coordination in distribution systems including distributed generation, J. Cleaner Prod., 112, 2697-2705, 2016.
6. El-Hamrawy A.H., Ebrahiem A.A.M., Megahed A.I., Improved Adaptive Protection Scheme Based Combined Centralized/Decentralized Communications for Power Systems Equipped With Distributed Generation, IEEE Access, 10, 97061-97074, 2022.
7. Zeineldin H.H., Sharaf H.M., Ibrahim D.K., El-Zahab E.E.D.A., Optimal Protection Coordination for Meshed Distribution Systems With DG Using Dual Setting Directional Over-Current Relays, IEEE Trans. Smart Grid, 6 (1), 115-123, 2014.
8. Muñoz-Arango G., Mora-Flórez J., Pérez-Londoño S., Optimal data-driven adaptive overcurrent relay coordination for active distribution networks, Electric Power Systems Research, 228, 110078, 2024.
9. Abdelhamid M., Kamel S., Ahmed E.M., Ageyem E.B., An adaptive protection scheme based on a modified heap-based optimizer for distance and directional overcurrent relays coordination in distribution systems, Mathematics, 10 (3), 419, 2022.
10. Rezaei N., Uddin M.N., Amin I.K., Othman M.L., Marsadek M., Genetic Algorithm-Based Optimization of Overcurrent Relay Coordination for Improved Protection of DFIG Operated Wind Farms, IEEE Trans. Ind. Appl., 55 (6), 5727-5736, 2019.
11. Aydın H., Dağıtık üretim tesislerinin şebekeye entegrasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2023.
12. Uzun S., Dağıtık üretim tesislerinin şebeke entegrasyon etkileri ve şebeke uyumluluğunun güç sistem analizleriyle uygulamalı değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
13. Kaygusuz A., Tuttokmağı Ö., Acar A., Investigation of the effects of distributed-uncertain production and consumption conditions on power system stability, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40 (2), 1049-1058, 2025.
14. Çevik Bektaş S., Altaş İ., Multi-objective day-ahead optimal energy scheduling of a grid connected distribution network consisting of renewable energy sources and storage units, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40 (2), 1335-1346, 2025.
15. Sarwat A.I., Amini M., Domijan A., Damjanovic A., Kaleem F., Weather-based interruption prediction in the smart grid utilizing chronological data, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 4 (2), 308-315, 2016.
16. Khazraj H., Yousefi Khanghab B., Ghimire P., Martin F., Ghomi M.,

- Faria da Silva F., Leth Bak C., Optimal operational scheduling and reconfiguration coordination in smart grids for extreme weather condition, *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, 13 (15), 3455-3463, 2019.
17. Yeroğlu C., Akdağ O., 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), 1751-1766, 2022.
 18. Uddin M.N., Rezaei N., Olufemi O.E., Adaptive and Optimal Overcurrent Protection of Wind Farms With Improved Reliability, *IEEE Trans. on Industry Appl.*, 58 (3), 3342-3352, 2022.
 19. Sampaio F.C., Tofoli F.L., Melo L.S., Barroso G.C., Sampaio R.F., Leão R.P.S., Adaptive fuzzy directional bat algorithm for the optimal coordination of protection system based on directional overcurrent relays, *Electric Power Syst. Res.*, 211, 108619, 2022.
 20. Saldarriaga-Zuluaga S.D, López-Lezama J.M., Muñoz-Galeano N., Adaptive protection coordination scheme in microgrids using directional over-current relays with non-standard characteristics, *Heliyon*, 7 (4), 2021.
 21. Lim S.H., Lim S.T., Analysis on Coordination of Over-Current Relay Using Voltage Component in a Power Distribution System With a SFCL, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 29 (5), 1-5, 2019.
 22. Lim S.T., Lim S.H., Analysis on Protective Coordination between Over-Current Relays with Voltage Component in a Power Distribution System with SFCL, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 30 (4), 1-6, 2020.
 23. Lim S.H., Park M.K., Analysis on Protection Coordination of OCRs Using Voltage Components for the Application of SFCL in a Power Distribution System with DG, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31 (5), 1-6, 2021.
 24. Cho Y.J., Lim S.H., Analysis on Protection Coordination of OCRs using Index for Impedance Compensation Considering Unsymmetrical Ground Fault in a Power Distribution System with SFCL, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 33 (5), 1-6, 2023.
 25. ElSayed S.K., Elattar E.E., Hybrid Harris hawks optimization with sequential quadratic programming for optimal coordination of directional overcurrent relays incorporating distributed generation, *Alexandria Eng. J.*, 60 (2), 2421-2433, 2021.
 26. Vasconcelos L.H.P., Almeida A.R., Dos Santos Jr B.F., Melo N.X., Carvalho J.G.S., de Oliveira Sobreira D., Hybrid optimization algorithm applied to adaptive protection in distribution systems with distributed generation, *Electric Power Systems Research*, 202, 107605, 2022.
 27. Sharma A., Panigrahi B.K., Phase Fault Protection Scheme for Reliable Operation of Microgrids, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 54 (3), 2646-2655, 2017.
 28. Kannaian R.B., Joseph B.B., Ramachandran R.P., An Adaptive Centralized Protection and Relay Coordination Algorithm for Microgrid, *Energies*, 16 (12), 4820, 2023.
 29. Kannuppaiyan S., Chenniappan V., Numerical Inverse Definite Minimum Time Overcurrent Relay for Microgrid Power System Protection, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 10 (1), 50-54, 2015.
 30. Rojnić M., Prenc R., Bulat H., Franković D., A Comprehensive Assessment of Fundamental Overcurrent Relay Operation Optimization Function and Its Constraints, *Energies*, 15 (4), 1271, 2022.
 31. González Y., Conde A., New Overcurrent Relay Coordination Method Through Time Intervals to Enhance Microgrid Protection, *IEEE Access*, 9, 166792-166803, 2021.
 32. Rojnić M., Prenc R., Topić D., Strnad I., A new methodology for optimization of overcurrent protection relays in active distribution networks regarding thermal stress curves, *International journal of electrical power & energy systems*, 152, 109216, 2023.
 33. Sampaio F.C., Tofoli F.L., Melo L.S., Barroso G.C., Sampaio R.F., Leão R.P.S., Smart Protection System for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities Based on an Adaptive Algorithm, *Energies*, 16 (5), 2273, 2023.
 34. Luo H., Sun C., Xu H., Su J., Wang Y., A Setting Optimization Ensemble for a Distributed Power Grid Protective Relay, *Applied Sciences*, 14 (6), 2278, 2024.
 35. Chen C.R., Lee C.H., Chang C.J., Optimal overcurrent relay coordination in power distribution system using a new approach, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 45 (1), 217-222, 2013.
 36. Gokhale S.S., Kale V.S., On the significance of the plug setting in optimal time coordination of directional overcurrent relays, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, 28 (11), e2615, 2018.
 37. Shahzad U., Asgarpoor S., A Comprehensive Review of Protection Schemes for Distributed Generation, *Energy Power Eng.*, 9 (8), 430-463, 2017.
 38. Mahindara V.R., Rodriguez D.F.C., Pujiantara M., Priyadi A., Purnomo M.H., Muljadi E., Practical Challenges of Inverse and Definite-Time Overcurrent Protection Coordination in Modern Industrial and Commercial Power Distribution System, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 57 (1), 187-197, 2020.
 39. Prenc R., Rojnić M., Franković D., Vlahinić S., On the Development of Overcurrent Relay Optimization Problem for Active Distribution Networks, *Energies*, 15 (18), 6528, 2022.
 40. Hatata A.Y., Lafi A., Ant Lion Optimizer for Optimal Coordination of DOC Relays in Distribution Systems Containing DGs, *IEEE Access*, 6, 72241-72252, 2018.
 41. Ates Y., Boynuegri A.R., Uzunoglu M., Nadar A., Yumurtacı R., Erdinc O., Paterakis N.G., Catalão J.P.S., Adaptive Protection Scheme for a Distribution System Considering Grid-Connected and Islanded Modes of Operation, *Energies*, 9 (5), 378, 2016.
 42. Momesso A.E.C., Bernardes W.M.S., Asada E.N., Fuzzy-based Non-communicating Adaptive Overcurrent Relay, *IFAC-PapersOnLine*, 51 (28), 315-320, 2018.
 43. Dindar A., Ardehali M.M., Vakilian M., Integration of wind turbines in distribution systems and development of an adaptive overcurrent relay coordination scheme with considerations for wind speed forecast uncertainty, *IET Renewable Power Generation*, 14 (15), 2983-2992, 2020.
 44. Paudyal S., Cañizares C.A., Bhattacharya K., Optimal Operation of Industrial Energy Hubs in Smart Grids, *IEEE Trans. Smart Grid*, 6 (2), 684-694, 2014.
 45. IEEE. 1991 Original Test Feeders. <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Yayın tarihi Eylül 19, 2006. Erişim tarihi Ağustos 17, 2024.
 46. Behabtu H.A., Coosemans T., Berecibar M., Fante K.A., Kebede A.A., Mierlo J.V., Messagie M., Performance Evaluation of Grid-Connected Wind Turbine Generators, *Energies*, 14 (20), 6807, 2021.
 47. Bakar A.H.A., Ooi B., Govindasamy P., Tan C., Illias H.A., Mokhlis H., Directional overcurrent and earth-fault protections for a biomass microgrid system in Malaysia, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 55, 581-591, 2014.
 48. Elmore W.A., Protective Relaying Theory and Applications, 2. edition, ABB Power T&D Company Inc., USA, 323-337, 2004.
 49. Shobole A., Baysal M., Wadi M., Tur M.R., Protection Coordination Practices for Industrial Ring Distribution Network Case Study of Organized Industrial Zone (GEBZE, Turkey), In 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris- Fransa, 1027-1031, 14-17 Ekim, 2018.
 50. Ferraz R.S.F., Ferraz R.S.F., Rueda-Medina A.C., Batista O.E., Genetic optimisation-based distributed energy resource allocation and recloser-fuse coordination, *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, 14 (20), 4501-4508, 2020.
 51. SCRIBD. Siemens Protection Coordination. <https://www.scribd.com/doc/126547666/Siemens-Protection-Coordination>. Yayın tarihi Şubat 21, 2013. Erişim tarihi Ağustos 17, 2024.
 52. Momesso A.E.C., Kume G.Y., Faria W.R., Pereira B.R., Asada E.N., Automatic Recloser Adjustment for Power Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37 (5), 3958-3967, 2022.