

Aktif Dağıtım Şebekelerinin Diferansiyel Röle İle Korunması

Protection of Active Distribution Systems Using Differential Relay

Berkin Kara¹, Fatih Özveren¹, Ömer Usta^{1,2}

Elektrik Mühendisliği

¹İstanbul Teknik Üniversitesi

²ENTES Elektronik

karaber@itu.edu.tr, ozverenf@itu.edu.tr, ustao@itu.edu.tr

Özet

Günümüzde, elektrik üretiminin tek bir merkezi kaynaktan ziyade birden çok yerel üretim noktasından gerçekleşmesi tercih edilmektedir. Böylece, dağıtık üretimin yaygın olarak uygulandığı dağıtım sistemlerinde aktif dağıtım şebekeleri kavramı ön plana çıkmıştır. Dağıtım şebekelerine yerel üretim ünitelerinin bağlanmaları çift yönlü güç akışına neden olmaktadır. Bu tip çift yönlü güç akışına sahip şebekelerin korunması daha karmaşık hale gelmiştir. Bu sebeple koruma için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Dağıtım şebekesindeki her hattın ayrı bir ünite olarak kabul edildiği ve hattın iki ucundan alınan akım verileri karşılaştırılarak arızanın tespit edildiği ünite koruma sistemi bu metotlardan biridir. Bu çalışmada, aktif dağıtım şebekeleri için oransal ünite koruma yöntemi aşırı akım korumasını baz alan diğer yöntemlerle kıyaslanarak incelenmiştir. Geliştirilen oransal ünite koruma sisteminin performansının tespit edilmesi için bu yöntem bir halka şebekeye uygulanmış ve çeşitli arıza durumlarında doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığı gözlemlenmiştir. Bilgisayar simülasyon çalışmaları, oransal ünite koruma sisteminin aktif dağıtım şebekelerini başarılı bir şekilde koruduğunu göstermiştir.

Abstract

Nowadays, generation of electricity from multiple local sources is preferred rather than generation from a single central source. Thus, active distribution network concept rises to prominence in distribution networks that distributed generation is widely applied. Protection of such networks using bidirectional power flow is more difficult, that's why, different approaches were developed for protection. Unit protection method, whereby lines of the distribution system are protected individually and faults are detected by comparing current data obtained from both end of the line is one of these methods. In this study, ratio unit protection for active distribution networks is analysed by comparing other methods based on over current protection method. To determine the performance of developed ratio unit protection system, the system is applied on a ring distribution system with sources on the both ends and observed if operates properly during various possible faults. Ratio unit protection system protects the active distribution system successfully in all cases.

1. Giriş

Değişen ekonomik ve çevresel faktörler ile gelişen teknolojiler, elektrik üretimini ve dağıtımını yeni bir yapılanmaya sokmuştur. Geleneksel ölçek ekonomisinin zayıflamasının etkisiyle, üretimden başlayıp yüklerle doğru radyal biçimde uzanan klasik şebekeler yerine üretimin her noktadan olabileceği aktif dağıtım şebekeleri, mikro şebekeler, tercih edilmeye başlanmıştır [1].

Aktif dağıtım şebekeleri, enerji yönetimi için dağıtık üretimin yaygın olarak kullanıldığı dağıtım sistemlerinde uygulanan bir kavramdır. İki yönlü güç akışı, istemli veya istemsiz olarak ada durumuna geçiş gibi olaylar bu tip şebekelerde sıklıkla görülebilir [2,3]. Bu şekilde çift yönlü güç akışına sahip sistemlerin kontrolü ve korunması tek yönlü güç akışına sahip geleneksel sistemlere göre daha karmaşıktır. Bu sebeple, böyle şebekelerin korunması için çeşitli metotlar geliştirilmiştir.

Aşırı akım koruması en temel koruma rölesi prensiplerinin başında gelir ve dağıtım sistemleri için genellikle koruma stratejilerinin belkemiğini oluşturur [4,5]. Aşırı akım röleleri özellikle radyal dağıtım sistemlerini, bu sistemlerde meydana gelebilecek kısa devre veya aşırı yüklenme sonucunda oluşan büyük genlikli akımların etkilerinden korurlar [6]. Bu röleler, kendi koruma bölgelerinden rölenin ayar değerinden (I_s) daha yüksek bir akım geçtiğini tespit ettiklerinde ani olarak veya bir zaman gecikmesiyle (t_d) kesiciye açma işareti gönderirler [7].

Beslemenin birden fazla noktada gerçekleştiği aktif şebekelerde korumanın seçiciliği yönlü aşırı akım röleleri tarafından sağlanır [8]. Yön elemanın kullanılmadığı bir aşırı akım rölesi bu tip şebekelerde görevini yerine getiremeyecektir. Eğer aşırı akım rölesinde yön fonksiyonu mevcut ise, ayar değeri I_s ve açtırma zamanı t_d parametrelerine ek olarak akımın yönü ($I_{yön}$) de koruma kriteri olarak kullanılabilir. Bu sayede, mikro şebekelerin korunması sağlanabilir ve hatalı açtırmaların önüne geçilmiş olur[8]. Bunun yanında, yönlü aşırı akım rölelerinden oluşan bir koruma sistemi, şebeke topolojisinin fazla değişiklik göstermediği dağıtım şebekelerini koruyabilir.

Ancak üretimin her noktadan gerçekleşebilmesi ve yenilenebilir kaynaklarından üretilen enerjinin hava koşulları

ve benzeri şartlara bağlı olması, dağıtım sistemindeki güç akışını oldukça değişken bir hale getirir. Ayrıca, sistemdeki anahtarlama ve benzeri olaylar topolojik değişikliklere sebebiyet verebilirler. Sabit ayar değerlerine sahip aşırı akım koruma röleleri, yön elemanına sahip olsalar dahi, bu değişikliklere zaman zaman ayak uyduramazlar[9]. Bu duruma karşılık adaptif koruma felsefesi geliştirilmiştir. Bu koruma felsefesinin temelini yük değişimi, anahtarlama olayları veya arızalar sonucunda güç sisteminde oluşan yapısal değişikliklere karşılık röle ayar değerlerinin değiştirilerek cevap verilmesi oluşturmaktadır [10].

Adaptif aşırı akım koruması şebekenin şartlarına uygun olarak I_s , t_d , $I_{yön}$ parametrelerini değiştirebildiği için geleneksel aşırı akım rölelerine göre daha güvenilirdir [9]. Ancak adaptif aşırı akım koruma sistemi tasarlanırken, her bir topolojik durumun ayrı ayrı ele alınması gerekir[10]. Bu sebeple, koruma tasarım süreci karmaşık bir hale gelebilmektedir. Bu karmaşık sürecin önüne geçebilmek için entegre koruma sistemleri önerilmiştir. Entegre koruma sistemlerinde herhangi bir baraya bağlı bütün hatlara ilişkin ölçüm noktalarından alınan veriler röleler tarafından değerlendirilir. Bir entegre koruma sistemindeki röleler kendileri arasında ve bir merkezle iletişim halindedir. Birden çok ölçüm değerini kullanarak karar verdikleri için daha etkin ve seçici bir koruma yaparlar[11].

Aşırı akım koruması prensibinin entegre koruma sistemlerinde uygulanmasıyla aktif dağıtım sistemlerinde oldukça güvenilir bir koruma sağlanabilir. Ancak haberleşmenin yoğun şekilde uygulandığı ve işlem yükünün fazla olduğu bu yöntem, bu noktaya kadar incelediğimiz diğer yöntemlere nazaran daha ileri bir teknoloji ve yüksek güvenilirliğe sahip bir haberleşme sistemi gerektirmektedir.

Bu çalışmada ise, dağıtım sisteminde kullanılan bu tip koruma yöntemlerine alternatif olarak hızlı çalışan, hat üzerinde gerçekleşecek arızalara karşı koruma yapan, yüksek empedanslı ve seri arızaları tespit edebilen bir ünite koruma yöntemi ele alınmıştır [16].

2. Ünite Koruma Sistemi

Aşırı akım korumasının zamana göre derecelendirilmiş bir koruma sistemi olması sebebiyle bazı arıza durumlarında bu sistem yeterince hızlı bir şekilde devreye girememektedir. Ayrıca korunacak şebeke kompleks hale geldikçe koruma sisteminin tasarlanması da zorlaşacaktır. Bu problemlerin her şebeke elemanının ayrı bir ünite kabul edildiği, koruma bölgesinin iki ucundan alınan veriler ile korumanın sağlandığı ünite koruma sistemi ile aşılması mümkün olmaktadır. Ünite korumanın uygulanmasında diferansiyel koruma, yön karşılaştırma, faz karşılaştırma ve benzeri metotlar kullanılabilir [12].

2.1 Akım Diferansiyel Koruma

Akım diferansiyel koruma sistemi, koruma bölgesinin iki ucundaki akımların karşılaştırılması esasına dayanır. Diferansiyel koruma ile arızanın tespiti için tutucu (I_{RT}) ve fark (I_{OP}) akımlarının birbirine oranlanması gerekmektedir. Fark akımı koruma bölgesine giren akımların fazörlerinin toplamına eşittir ve korunacak alanın içinde gerçekleşen arıza akımıyla orantılı olarak değişmektedir. Tutucu akım ve fark akımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir

$$I_{OP} = \left| \vec{I}_L + \vec{I}_R \right| \quad (1)$$

$$I_{RT} = k \left(\left| \vec{I}_L \right| + \left| \vec{I}_R \right| \right) \quad (2)$$

k genellikle 1 yada 0.5 olarak alınan kompanzasyon sabitidir. Diferansiyel rölenin çalışma koşulları aşağıdaki gibi tanımlanabilir [13].

$$I_{OP} \geq I_{RT} \quad (3)$$

Hat diferansiyel koruma yapılırken hattın başında ve sonundaki akım transformatörlerinden gelen akım bilgisi karşılaştırılır. Hattın iki ucu arasındaki mesafe uzun olduğu için bir haberleşme devresi kullanılarak akım bilgisi hattın diğer ucuna gönderilir. Diferansiyel koruma yöntemi şebekedeki her elemanın korunmasında kullanılabilir. Çok küçük arıza akımlarına bile duyarlı olmasından dolayı güvenilir bir koruma yöntemidir [14].

2.2 Oransal Ünite Koruma

Bu yöntem hattın iki ucu arasındaki akımların oranının ve aralarındaki faz farkının karşılaştırılması esasına dayanır. Bu yöntemde arızanın tespiti için aşağıdaki kriterler kullanılır.

$$Oran = \frac{\left| I_y \right|}{\left| I_u \right|} \quad (4)$$

$$\varphi = \angle \varphi_y - \angle \varphi_u \quad (5)$$

Normal koşullarda, hattın yakın ucundan alınan I_y (yerel ölçme) ile uzak ucundan alınan I_u (aktarılmış, iletilmiş ölçme) akımlarının genliğinin oranının 1, aralarındaki açının ise 180° olması beklenir. Bu büyüklüklerinden en az bir tanesi beklenen değerlerden farklı ise korunan alan içerisinde arıza var demektir. Ancak koruma bölgesinde bir arıza olmamasına rağmen bu değerler (180° , 1) eşit olmayabilir. Bu durum, iki terminal arasındaki haberleşme devresindeki senkronizasyon hataları, zaman gecikmeleri, devre modellenirken yapılan hatalar ve akım transformatörlerinin karakteristiklerinden kaynaklanır. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla rölenin çalışma koşulları için diferansiyel düzleminde uygun aralıklar belirlenir. Böylece hatalı açmaların önüne geçilmiş olur.

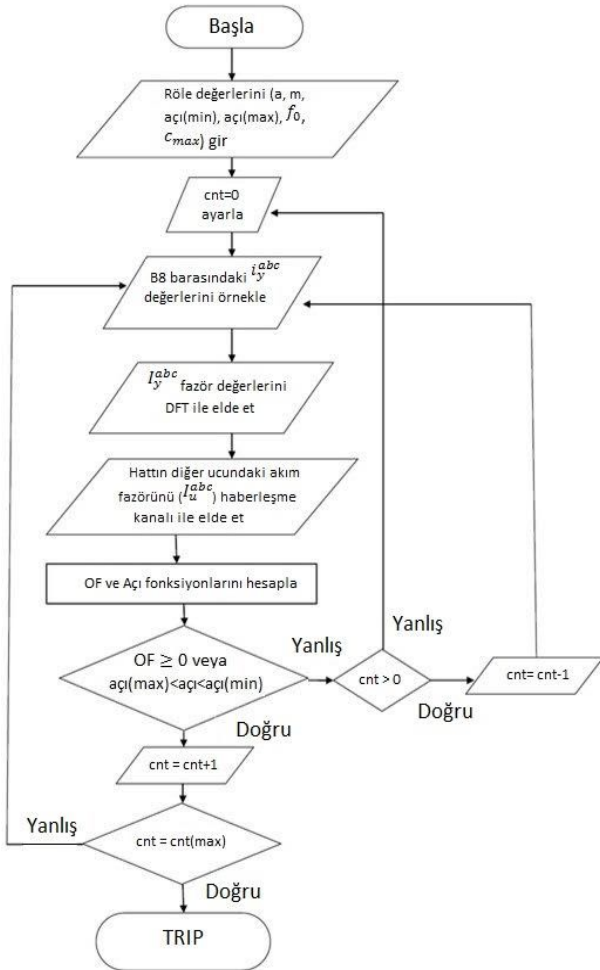
$$OF = \frac{\left| I_y \right|}{\left| I_u \right|} - \left(a + m \left(\left| I_y \right| + \left| I_u \right| \right) \right) \quad (6)$$

Hattın iki ucundaki akımın genlikleri kullanılarak Denklem 6'nın sonucu olan fonksiyon hesaplanabilir. Burada a ve m ayarlanabilen değişkenlerdir. Simülasyonlar sırasında $a = 1$ ve $m = 0,00015$ olarak alınacaktır. Bu durumda, OF fonksiyonunu negatif yapan akım değerleri için hattın içerisinde arıza yoktur. Eğer OF fonksiyonunun sonucu pozitif olursa veya iki akım arasındaki açı belirlenen kriterden farklı olursa hattın içerisindeki arıza tespit edilip açma sinyali verilir [15,16].

$$OF_i = \frac{|I_y| + k_1}{|I_u| + k_2} - (a + m(|I_y + I_u|)) \quad (7)$$

Mevcut fonksiyonun yerine seri arızaları da tespit edebilen geliştirilmiş oran fonksiyonu (OF_i) hesaplanabilir. k_1 ve k_2 katsayıları akımların sıfıra düştüğü seri arıza durumunda sonucun pozitif olması için denkleme eklenmiştir. Birbirleri arasında $k_1 = 2k_2 = 2m$ şeklinde bir ilişki vardır.

Oran fonksiyonunun arızayı her koşulda tespit edebilmesi için $(|I_y| + k_1) / (|I_u| + k_2)$ değerinin 1'den büyük olması gereklidir. Eğer böyle değil ise pay ve payda yer değiştirilerek 1'den büyük olan değer alınır. I_y ve I_u akımların genliklerinin hesaplanması için kullanılabilecek ayrık fourier dönüşümü (DFT), dalgacık dönüşümü ve benzeri yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada tam döngü ayrık fourier dönüşümü kullanılmıştır. Rölenin çalışma prensibi aşağıdaki akış diyagramında belirtilmiştir[16].

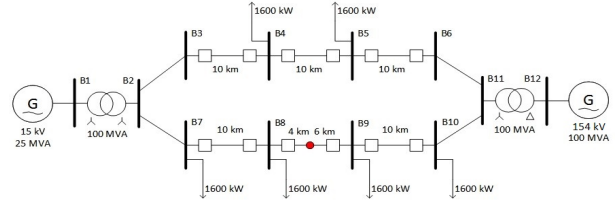


Şekil 1: Oransal ünite koruma akış diyagramı

3 Simülasyon Çalışmaları

Geliştirilen oransal ünite koruma rölesinin performansını analiz etmek amacıyla Şekil 2'de görülen 12 baralı dağıtım

sistemi kullanılmıştır. Simülasyonlar MATLAB ve Simulink aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

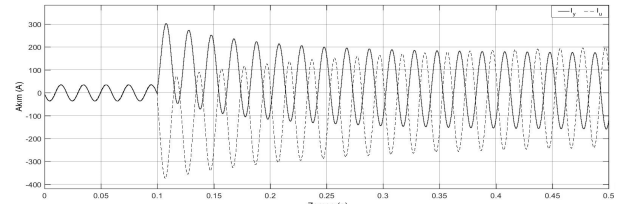


Şekil 2: Örnek aktif dağıtım sistemi

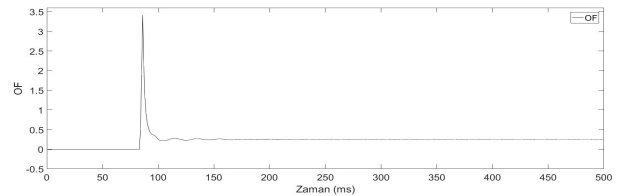
Bu sistemde bir uca dağıtık üretim tesisini temsilen 15 kV'luk bir kaynak ve bir yükseltici trafo konulmuştur. Diğer uca ise iletim sistemini temsilen 154 kV'luk bir kaynak ve bir alçaltıcı trafo yerleştirilmiştir. Halka yapıda tasarlanan dağıtım hattında 6 noktaya 1600 kW gücünde yükler bağlanmıştır. Dağıtım sisteminde her bara arasında 10 km uzunluğunda havai hat bulunmaktadır. Simülasyonlar sırasında harici arıza dışındaki arızalar B8 ve B9 baraları arasındaki hatta, Şekil 2'de belirtilen noktada gerçekleşmiştir. Performans analizi yapılırken bu hattı koruyan oransal ünite koruma rölesi baz alınmıştır. Bu analiz için 5 farklı durum incelenmiştir.

3.1 Durum 1: Faz-Faz Arızası

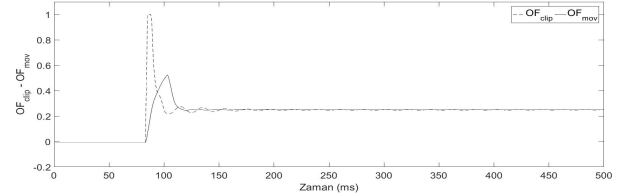
Bu durumun incelenmesi için Şekil 2'de belirtilen noktada, simülasyon başladıktan 100 ms sonra faz-faz arızası gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sırasında gözlemlenen ani akım ve röle oran fonksiyonu grafikleri Şekil 3'de detaylı olarak verilmiştir.



a) Arızanın gerçekleştiği fazdaki I_y ve I_u akımlarının değerleri



b) Oran fonksiyonunun zamana göre değişimi



c) Kırılmış ve yürüten ortalaması alınmış oran fonksiyonu

Şekil 3: Faz-faz arızası sonucunda elde edilen değerler

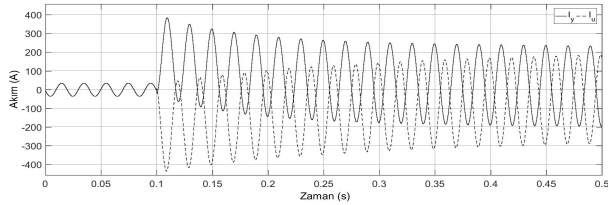
Şekil 3a'da görüldüğü üzere arızanın gerçekleştiği fazlardan biri olan A fazında hattın iki ucundan alınan akım değerleri arasında 100. milisaniyeden itibaren 180° civarında bir faz

farkı meydana gelmiştir. Bu grafikte I_y akımı düz çizgiyle belirtilirken I_u akımı kesikli çizgiyle gösterilmiştir.

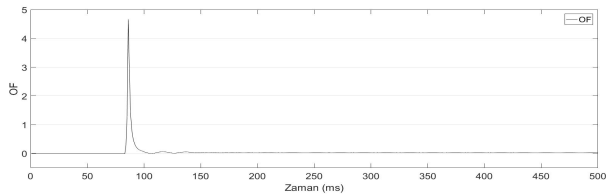
Şekil 3b'de görülebileceği gibi röle bu faz farkını tespit etmiş ve oran fonksiyonu pozitif bir değer almıştır. Ancak bu fonksiyondaki pikler yanıltıcı olabilmektedir. Bu sebeple fonksiyonun 1'den yukarı değerleri kırılmakta ve elde edilen yeni fonksiyonun yürüyen ortalaması alınmaktadır. Bu işlemlerin uygulandığı fonksiyonlar Şekil 3c'de görülebilir. Böylece tasarlanan oransal ünite koruma rölesi yaklaşık olarak bir çevrim gibi kısa bir sürenin ardından arızayı tam olarak tespit etmiştir.

3.2 Durum 2: Faz-Toprak Arızası

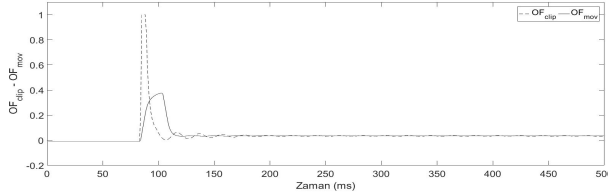
Bu durumun incelenebilmesi için bir önceki durum ile aynı noktada, simülasyon başladıktan 100 milisaniye sonra faz toprak arızası gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda esnasında belirlenen ani akım ve röle oran fonksiyonu grafikleri Şekil 4'te incelenebilir.



a) Arızanın gerçekleştiği fazdaki I_y ve I_u akımlarının değerleri



b) Oran fonksiyonunun zamana göre değişimi



c) Kırılmış ve yürüyen ortalaması alınmış oran fonksiyonu

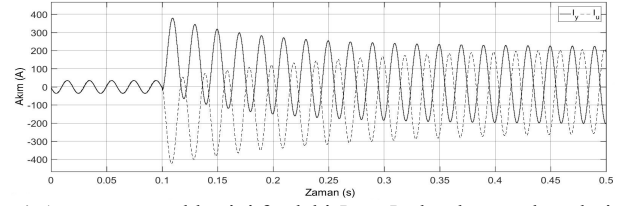
Şekil 4: Faz-toprak arızası sonucunda elde edilen değerler

A fazında meydana gelen faz-toprak arızası esnasında bir önceki durumla benzer bir şekilde I_y ve I_u akımları arasında yaklaşık 180 derecelik bir faz farkı oluşmuştur.

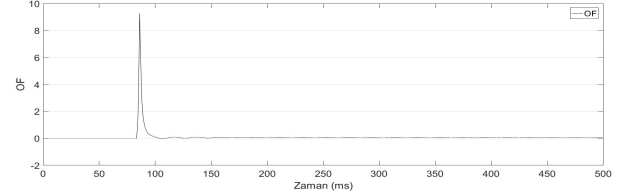
Bunun sonucunda çok ufak bir negatif değere sahip olan oran fonksiyonu pozitif duruma geçerek arızayı tespit etmiştir. Bu esnada oluşan pik, kırılma ve yürüyen ortalama metodları yardımıyla giderilmiştir.

3.3 Durum 3: Üç-Faz Arızası

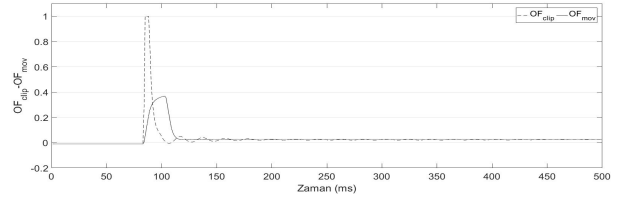
Bu simülasyon için tekrar aynı noktada olacak şekilde 3 faz arızası gerçekleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen ani akım ve röle oran fonksiyonu grafikleri Şekil 5'te gözlemlenebilir.



a) Arızanın gerçekleştiği fazdaki I_y ve I_u akımlarının değerleri



b) Oran fonksiyonunun zamana göre değişimi



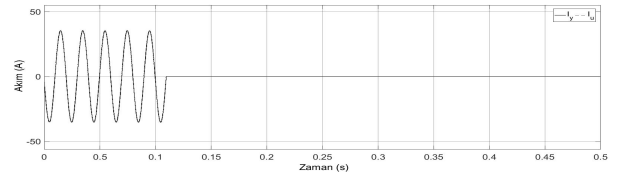
c) Kırılmış ve yürüyen ortalaması alınmış oran fonksiyonu

Şekil 5: Faz-toprak arızası sonucunda elde edilen değerler

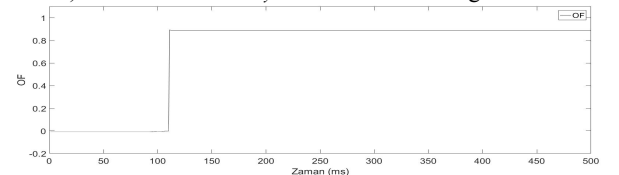
Tek fazını incelediğimiz 3 faz arızası esnasında I_y ve I_u akımları arasında yaklaşık 180° faz farkı oluşmuştur. Böylece oran fonksiyonu pozitif duruma geçerek arızayı tespit edebilmiştir.

3.4 Durum 4: Seri Arıza

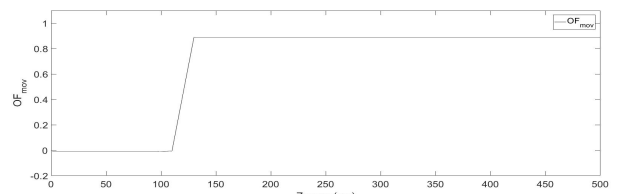
Seri arızalar hat üzerindeki bir fazın iletkeninin kopması ile meydana gelen arızalardır. Bu durum için yine aynı noktada 100 milisaniyenin sonunda seri arıza gerçekleştirilmiştir.



a) Arızalı fazdaki I_y ve I_u akımlarının değerleri



b) Oran fonksiyonunun zamana göre değişimi



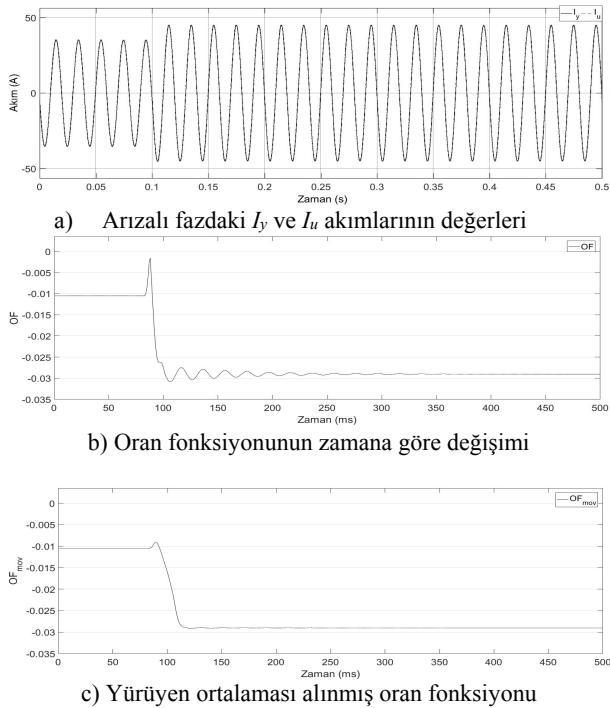
c) Yürüyen ortalaması alınmış oran fonksiyonu

Şekil 6: Seri arıza sonucunda elde edilen değerler

Koruma sisteminin arıza sonrası verdiği cevap Şekil 6'da görülmektedir. A fazında seri arıza meydana geldiğinde geliştirilmiş oran fonksiyonu yapısı gereği 1'e çok yakın bir değer almıştır. Bu sayede röle seri arızayı tespit edebilmiştir. Bu arızada oran fonksiyonu pik yapmadığı için kırılmış oran fonksiyonunun hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaz.

3.5 Durum 5: Harici Arıza

Bu noktaya kadar olan arızaların hepsi B8 ile B9 baraları arasında gerçekleşmişti. Sıradaki durum için uygulanan arıza ise B7 ile B8 baraları arasında 3 fazlı olarak meydana gelmiştir. Bu sebeple, performans analizini yaptığımız rölenin arızayı kendi bölgesinde algılamaması beklenmektedir. Öylede olmuştur. Harici arızaya ilişkin simülasyon sonuçlarını Şekil 7'de görebilirsiniz.



Şekil 7: Harici arıza sonucunda elde edilen değerler

Meydana gelen harici arıza sonrasında Şekil 7a'da görüldüğü üzere B8 ve B9 baraları arasında kalan hattın iki ucundan yapılan akım ölçümlerinde fark görülmemiştir. Buna rağmen arıza, rölenin oran fonksiyonunun sonucunda değişime sebep olmuştur. Ancak arıza rölenin koruma bölgesinde meydana gelmediği için oran fonksiyonunun sonucu hızlı bir şekilde tekrar negatif değerlere döner. Bu sayede rölede hatalı bir operasyona neden olmamıştır.

Böylece, tasarlanan oransal ünite koruma rölesi simülasyonlar sırasında gerçekleştirilen farklı tip arızaları hızlı bir şekilde tespit etmiş ve güvenilir bir performans sergilemiştir.

4 Sonuçlar

Oransal ünite koruma yöntemi, hattın iki ucundan ölçülen (ölçülmüş ve iletilmiş) akımların karşılaştırılması yöntemine dayanmaktadır. Aslında bu yöntem iletim hatlarının korunmasında kullanılmaktadır. Bu çalışma ile ilk kez, mikro

şebekeler gibi çift yönlü güç akışının ve yapısal değişikliklerin sık yaşandığı sistemlerin korunmasında kullanılmıştır.

Bilgisayar simülasyon çalışmaları, oransal ünite koruma yöntemini mikro şebekeler için hızlı, etkin ve güvenilir bir koruma sağladığını göstermektedir. Koruma yönteminin arızaları algılama süresi ve açma işareti üretme süresi, koruma algoritmasının çalışma ve uzak terminalde ölçülen akım değerinin lokal röleye aktarılma süresine bağlıdır. Bu sürelerin toplamı 30-40 ms arasında olmaktadır. Bu zaman aşırı akım rölelerinin cevap zamanları ile karşılaştırılınca çok az kalmaktadır.

5 Kaynaklar

- [1] Lasseter R., "Smart distribution: Coupled microgrids", *Proc. IEEE*, cilt 99, sayı 6, sf. 1074-1082, 2011.
- [2] Borghetti, A., Alberto, C., et al., "Synchronized phasors monitoring during the islanding maneuver of an active distribution network", *IEEE Transactions on Smart Grid*, cilt 2, sayı 1, sf. 82-91, 2011.
- [3] Lopes, J. A. P., Hatziargyriou, N., et al., "Integrating distributed generation into electric power systems: A of drivers, challenges and opportunities", *Elect. Power Syst. Res.*, cilt 77, sf. 1189-1203, 2007.
- [4] Keil, T. ve Jager, J., "Advanced coordination method for overcurrent protection relays using nonstandard tripping characteristics", *IEEE Transactions on Power Delivery*, cilt 23, sayı 1, sf. 52-57, 2008.
- [5] Vishwakarma D. N. ve Moravej Z., "ANN based directional overcurrent relay", *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, sf. 29-64, 2001.
- [6] Karthik P. ve Brearley, B. J., "Micro grid protection using digital relays", *IJAREEIE*, cilt 4, sayı 5, sf. 268-275, 2006.
- [7] Tan, J. C. ve McLaren P. G., "Software model for inverse time overcurrent relays incorporating IEC and IEEE standard curves", *CCECE*, sf. 37-41, 2002.
- [8] ABB, "Relay coordination and selective protection", *Distribution Automation Handbook*, bölüm 8.2, 2011.
- [9] Al-Harbawi, Y. Z., *An introduction to the digital protection of power systems*, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Polonya, 2013.
- [10] Özveren, F., "Mikroşebekelerin aşırı akım rölesi ile adaptif ve entegre korunması", *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü, 2015.
- [11] Bo, Z., Caunce, B., et al., "An integrated protection scheme for distribution systems based on overcurrent relay principle", *CIREN*, Mayıs 21-24, 2007.
- [12] Alstom, "Overcurrent protection for phase and earth faults", *Network Protection & Automation Guide*, 2011.
- [13] Blackburn, J. L., *Protective relaying principles and applications*, Bothell, Washington, sf. 181-183, 1987.
- [14] Horowitz, S. H. ve Phadke, A. G., *Power system relaying*, Oxford, John Wiley & Sons, sf. 28-29, 2013.
- [15] Dambhare, S., Soman, S., et al., "Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, cilt 24, 2009.
- [16] B. Kara, "Elektrik Dağıtım Hatlarının Uyarlamalı Diferansiyel Yöntemle Koruma". *Lisans Bitirme Tasarım Projesi*. İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü, 2016.