

OPTIMAL OVERCURRENT RELAY COORDINATION IN DISTRIBUTION NETWORKS USING PATH FINDER ALGORITHM

KÂŞIF ALGORİTMASI YARDIMIYLA DAĞITIM ŞEBEKESİNDE OPTİMUM AŞIRI AKIM RÖLE KOORDİNASYONU

Mert Bekir Atsever^a, Mehmet Hakan Hocaoglu^b

^aGebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE, mbatsever@gtu.edu.tr

^bİstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE, : mhhocaoglu@ticaret.edu.tr

Özet

Dağıtım şebekeleri üretilen enerjinin son kullanıcıya ulaştırılması noktasında önemli rol oynamaktadır. Enerji arzının kesintisiz sağlanması istenmektedir. Dağıtım şebekelerinin işletilmesi sırasında pek çok istenmeyen olay yaşanmaktadır. Bu olayların bir kısmı arızalardır. Dağıtım şebekesinde yaşanan arızalar sırasında yüksek genlikli akımlar ve/veya gerilimler gözlemlenmektedir. Her iki durumda dağıtım şebekesinin sağlıklı işletilmesi noktasında probleme neden olmaktadır. Özellikle üç fazlı arızalar sırasında yüksek genlikli arıza akımları sistem elemanlarına ve çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle, arıza şebekeden seçici ve olabildiğinde hızlı bir şekilde izole edilmelidir. Hızlı izolasyon ve seçici koruma için optimum aşırı akım röle koordinasyon elzemdir. Aşırı akım röleleri üç faz arızaların tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşırı akım rölelerinin temelde iki ayar parametresi mevcuttur. Birincisi ayar parametresi genlik, ikinci ayar parametresi ise zamandır. Aşırı akım rölelerinin ayar değerlerinin optimize edilmesi ile röle çalışma süreleri iyileştirilmektedir. Bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu araştırmacılar tarafından yüksek kısıt fonksiyonları içeren optimizasyon problemi şeklinde kurgulanmaktadır. Bu çalışmada gerçek bir dağıtım şebekesi üzerinde optimum aşırı akım röle koordinasyonu gerçekleştirilmiştir. Sahadan alınan verilerle 154/33 kV'luk trafo merkezinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Üç faz arıza simülasyonları EMTP-ATP Draw programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Arıza akım bilgileri ve röle katalog bilgileri ile amaç fonksiyonu kurgulanmıştır. Şebeke yönetmeliğine göre kısıt fonksiyonları eklenmiştir. Hem lineer programa yöntemi hem de lineer olmayan programlama yöntemi ile amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Her iki programa yönteminin çözümü için literatüre yeni kazandırılan kaşif algoritması kullanılmıştır. Kaşif algoritmasının hızlı ve optimum çözüm sunduğu sonuçlarda açıkça görülmektedir. Bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu için kaşif algoritmasının kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: optimizasyon, aşırı akım koruma, dağıtım şebekesi, kaşif algoritması

Abstract

Distribution networks play an important role in delivering the generated energy to the end user. It is designed to ensure an uninterrupted energy supply. Many undesirable events occur during the operation of distribution networks. Some of these events are faults. High amplitude currents and/or voltages are observed during faults in the distribution network. In both cases, it causes problems in the healthy operation of the distribution network. Especially during three-phase faults, high amplitude fault currents create dangerous stresses in the system elements and surrounding environment. Therefore, the fault must be isolated from the mains selectively and as quickly as possible. Optimum overcurrent relay coordination is essential for fast isolation and selective protection. Overcurrent relays are widely used in the detection of three-phase faults. Overcurrent relays basically have two setting parameters. The first tuning parameter is amplitude, and the second is time. Total relay operating times may be improved by optimizing the setting values of the overcurrent relays. For this reason, overcurrent relay coordination is designed by researchers as an optimization problem with high constraint functions. In this study, optimum overcurrent relay coordination is realized on a real distribution network. Modeling of the 154/33 kV substation was carried out with the data taken from the field. Three-phase fault simulations were performed using the EMTP-ATP Draw program. The objective function is constructed with fault current information and relay catalog information. Constraint functions have been added according

to the network regulation. The objective function was created with both linear and non-linear programming methods. For the solution of both programming methods, the Pathfinder algorithm, which was newly introduced to the literature, was used. It is clearly seen in the results that the Pathfinder algorithm offers a fast and optimum solution. Therefore, it has been shown that the Pathfinder algorithm can be used for overcurrent relay coordination.

Keywords: optimization, overcurrent protection, distribution network, Path Finder Algorithm

1. Giriş

Güç sistemlerinin etkin bir şekilde işletilmesi için enerji arz ve güvenliğinin sağlanması gerekmektedir. Enerji arzının sağlanması noktasında güç sistemlerinin gerçekleşen arızalara karşı korunması elzemdir. Güç sisteminde yaşanan arızaları türlerine göre faz arızaları ve toprak arızaları olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Toprak arızaları oran olarak dağıtım şebekesinde en fazla gerçekleşen arızalar olmakla birlikte üç faz arızalar sonucu ortaya çıkan yüksek genlikli arıza akımları sistem ekipmanları üzerine ısıl zararları daha fazladır [1]. Dağıtım şebekelerinde meydana gelen herhangi bir arızanın algılanması ve ilgili kesiciye açtırma sinyali gönderilmesinde koruma röleleri kullanılmaktadır. Mesafe koruma röleleri ile kıyaslandığında dağıtım şebekesini üç faz arızalara karşı korumak için aşırı akım röleleri daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşırı akım röle koordinasyonu iki ayar parametresine sahiptir. Birinci ayar parametresi genlik (I_p) ayarındır. İkinci ayar parametresi ise zamandır.

Dağıtım şebekesinin hızlı ve seçici korunması için aşırı akım röle koordinasyonu düzgün ayarlanmalıdır. Dağıtım şebekesinin basit olduğu dönemlerde aşırı akım röle koordinasyonu kolay bir şekilde gerçekleştirilmiştir [2]. Dağıtım şebekesinin genişlemesi ile aşırı akım röle koordinasyonu karmaşık bir hal almıştır. Bu durum aşırı akım röle koordinasyonun fazla sayıda kısıt fonksiyonu içeren bir optimizasyon problemi şeklinde kurgulanmasını gerekli kılmıştır. Optimizasyon problemi kurgulanırken farklı programlama yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler; hem TDS hem de IP değerinin sabit olduğu Lineer Programlama (LP) [3], Değişkenlerden herhangi birisinin sabit olduğu Lineer Olmayan Programlama (LOP) [4], tam sayılar içeren Tamsayı Karışık Doğrusal Programlama (TKDP) [5], Tamsayı Karışık Doğrusal Olmayan Programlama (TKDOP)[6] şeklinde sıralanabilir. Bu yöntemlerin (LP, LOP, TKDP ve TKDOP) çözümü sırasında yerel minimumda kalma ve tek bir noktadan çözüme başlama gibi dezavantajları bulunmaktadır [7]. Aksine, meta-sezgisel algoritmalar pek çok farklı noktada çözüme başlayama yeteneğine sahiptir. Meta-sezgisel algoritmalar sayesinde yerel minimumda kalma problemleri giderilmektedir. Bu durum programlama yöntemlerinin çözümünde meta-sezgisel algoritmaların kullanılmasını yaygınlaştırmıştır.

Literatürde pek çok meta-sezgisel algoritma geliştirilmiş ve geliştirilen bu meta-sezgisel algoritmalar aşırı akım röle koordinasyonu probleminde kullanılmıştır. Aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonunda kullanılan meta-sezgisel yöntemler Bozkurt Optimizasyon Algoritması (BOA) [8], Su Döngüsü Algoritması [9], Yapay Sinir Ağı Algoritması [10] ve Kâşif Algoritması [10] şeklinde sıralanabilir. [10] numaralı çalışmada Kâşif Algoritması IEEE 8 baralı test şebekesinde diğer iyi bilinen yöntemlerden daha optimal sonuçlar vermiştir. Bu durum Kâşif Algoritmasının gerçek bir dağıtım şebekesinde aşırı akım röle koordinasyonunu optimize etme noktasında motivasyonu arttırmıştır.

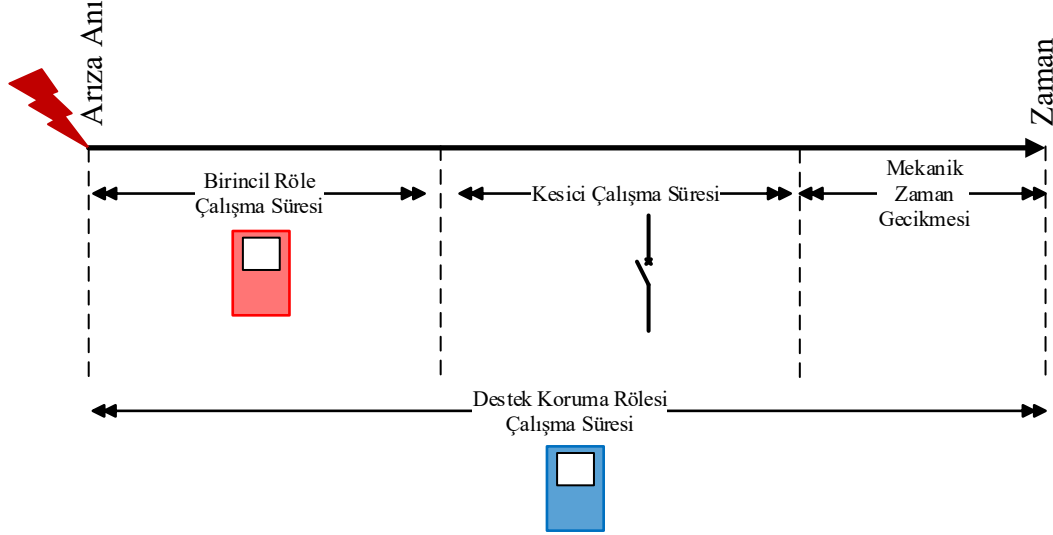
Bu çalışmada gerçek bir dağıtım şebekesi üzerinde aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sahadan alınan verilerle 154/33 kV'luk trafo merkezinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Üç faz arıza simülasyonları EMTP-ATP Draw programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Arıza akım bilgileri ve röle katalog bilgileri ile amaç fonksiyonu kurgulanmıştır. Şebeke yönetmeliğine göre kısıt fonksiyonları eklenmiştir. LOP yöntemi ile amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. LOP yönteminin çözümünde kaşif algoritması kullanılmıştır. Kaşif algoritmasının hızlı ve optimum çözüm sunduğu sonuçlarda açıkça görülmektedir. Bu nedenle aşırı akım röle koordinasyonu için kaşif algoritmasının kullanılabilir olduğu gösterilmiştir.

Çalışma şu sırada kurgulanmıştır. İkinci kısımda optimizasyon probleminin nasıl kurgulanacağı ve amaç fonksiyonu anlatılmıştır. Üçüncü kısımda Kaşif Algoritmasının matematiksel denklemleri çıkarılmıştır.

Dördüncü kısımda Kaşif Algoritması gerçek bir dağıtım şebekesine uygulanarak röleler arasında aşırı akım röle koordinasyonu optimize edilmiştir. Sonuçlar son kısımda tartışılmıştır.

2. Optimizasyon Probleminin Kurgulanması

Faz arızalarının şebekeden temizlenme süreci Şekil 1 ile gösterilmiştir. Arızanın tespit edilmesinin ardından birincil koruma rölesi çalışmaktadır. Birincil koruma rölesi ile destek koruma rölesi arasındaki zaman farkı ile aşırı akım röle koordinasyonu sağlanmaktadır.



Şekil 1. Faz arızalarının şebekeden temizlenme süreci

$T_{i,k}$: k noktasında gerçekleşen faz arızası için i . rölenin çalışma süresini temsil etmektedir. Bu değer Denklem (1) ile hesaplanmaktadır.

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

Burada;

I_F : Aşırı akım rölesi üzerinden okunan arıza akımının genlik değeridir.

I_P : Aşırı akım rölesini ayarlanan eşik akım değeridir. Genelde yük akımının nominal değerinin 1.25-1.5 katına set edilmesi pratiği yaygındır. Toprak arızalarında ise genellikle şebeke dengesizliği göz önüne alınarak yük akımının 0.2-0.3 katına set edilir [11].

TDS_i : i .rölenin zaman ayarını temsil etmektedir.

a , β ve c aşırı akım röle karakteristiğine bağlı olarak değişen sabit katsayıları temsil etmektedir. Gerek optimizasyon çalışmalarında gerekse sahada farklı röle karakteristikleri kullanılmaktadır. Röle karakteristiklerine ait katsayılar **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de listelenmiştir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilen IEC Standard Inverse karakteristiği hem dünya genelinde hem de Türk dağıtım şebekelerinde faz arızalarına karşı korumada en yaygın kullanılan faz koruma eğrisidir.

Çizelge 1. Farklı ters zaman karakteristiklerine ait katsayılar [12].

Ters Zaman Karakteristiği	Standart	β	a	c
Short Time Inverse	AREVA	0.05	0.04	0
Long Time Inverse	AREVA	120	1	0
Standard Inverse*	IEC	0.14	0.02	0
Very Inverse	IEC	13.5	1	0
Extremely Inverse	IEC	80	2	0
Moderately Inverse	ANSI/IEEE	0.515	0.02	0.114
Very Inverse	ANSI/IEEE	19.61	2	0.491
Extremely Inverse	ANSI/IEEE	28.2	2	0.1217

Güç sisteminin oldukça basit olduğu ilk zamanlarda aşırı akım röle koordinasyonu optimal olmayan şekilde sağlanmıştır. Fakat bu durum zaman kaybına sebep olmasının yanı sıra iş gücünde gerektirmektedir. Bununla birlikte aşırı akım röle koordinasyon problemi Urdaneta'nın 1988 yılında yaptığı çalışma ile bir optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır [13]. Temelde aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonu için iki ayar parametresinin optimize edilmesine dayanmaktadır. Faz arızaları için kurgulanan optimizasyon yaklaşımında optimal IP ve TDS ayarları elde edilerek röle çalışma süresi minimize edilmektedir [14]. Aşırı akım röle optimizasyonu çalışmalarında farklı amaç fonksiyonlarının kullanıldığı bilinmektedir. Aşırı akım röle koordinasyonu için geliştirilen geleneksel optimizasyon yaklaşımında amaç fonksiyonunu üç kategoriye ayırmak mümkündür. Bu ayırım genel olarak şebekenin sahip olduğu aşırı akım röle tipine ve kabiliyetine göre değişmektedir. Şebekede hem yönlü aşırı akım (67) hem de yönsüz aşırı akım (51) röleleri varsa, arıza birincil röle, ikincil röle (destek rölesi) ve diğer aşırı akım röleleri tarafından görülebilir. Bu nedenle, şebekede bulunan tüm aşırı akım rölelerinin çalışma sürelerinin toplamı en aza indirilmelidir. Birinci amaç fonksiyonu (OF_1), tüm aşırı akım rölelerinin toplam çalışma süresini minimize etmeyi amaçlar. Denklem (2) ile OF_1 gösterilmiştir. Bu çalışmada sadece OF_1 ile ilgilenilmiştir.

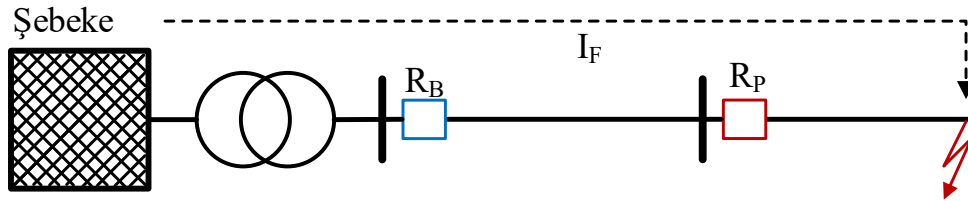
$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^n W_i \cdot T_{i,k} \quad (2)$$

Burada;

n : sistemde yer alan toplam aşırı akım röle sayısını,

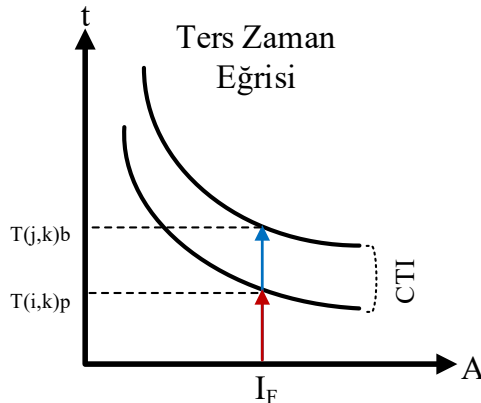
W_i : ağırlık katsayısını temsil etmektedir. Bu değer tüm çalışmalarda 1'e set edilmektedir. Dağıtım şebekelerinde farklı fiderlerde arıza olma olasılığının eşit olması ve fider mesafelerinin genellikle birbirlerine yakın olması 1'e set edilme nedeni olarak sıralanabilir [15].

Üç faz arızanın şebekeden temizlenme sürecinde; seçici korumanın sağlanması için aşırı akım röleleri arasında koordinasyon kurulmalıdır. Şekil 2 ile iki adet aşırı akım rölesine sahip basit bir radyal dağıtım sistemi gösterilmiştir. Şekil 2'de birincil röle R_P , ikincil röle R_B olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2. Radyal dağıtım şebekesi için röle koordinasyonu.

F noktasında gerçekleşen arıza için hem R_B hem de R_P röleleri arızayı algılamalıdır. R_P rölesi F arızası için birincil röle olduğundan dolayı R_B rölesinden daha önce açma sinyali üretmeli ve arıza şebekeden temizlenmelidir. R_P rölesinin herhangi bir nedenden dolayı açmaması durumunda R_B rölesi ayarlanan zaman gecikmesinden sonra açma sinyali üretmelidir. I_F arıza akımı için R_P rölesini çalışma süresi $T_{(i,k)_p}$, destek koruma rölesi R_B rölesinin çalışma süresi $T_{(j,k)_b}$ olmak üzere Şekil 3'de gösterilen ters zaman karakteristiğinde belirlenebilir.



Şekil 3. Ters zaman karakteristiği.

i çalışma süresi arasındaki zaman gecikmesi koordinasyon zaman aralığı (Eng:CTI) olarak tanımlanmaktadır. Koordinasyon zaman aralığı kısıt fonksiyonu olarak optimizasyon sürecine dahil edilmektedir. Denklem (3) ile koordinasyon kısıdı ifade edilmiştir.

$$T_{(j,k)_b} - T_{(i,k)_p} \geq CTI \quad (3)$$

Koordinasyon kısıdının yanı sıra aşırı akım koordinasyon optimizasyonu rölenin fiziksel kısıtlarına, işletme kısıtlarına bağlı olarak farklı kısıt fonksiyonları da sisteme dahil edilmektedir. TDS ayar kısıtları, I_p ayar kısıtları ve çalışma zaman aralığı kısıtları şeklinde sıralanabilir. Bu kısıtlar sırasıyla Denklem (4)-Denklem (6) ile ifade edilmektedir.

$$TDS_{(i)min} \leq TDS_{(i)} \leq TDS_{(i)max} \quad (4)$$

$$I_{P(i)min} \leq I_{P(i)} \leq I_{P(i)max} \quad (5)$$

$$T_{(i)min} \leq T_{(i)} \leq T_{(i)max} \quad (6)$$

TDS değerleri genellikle 0.025 ile 1.2 değerleri arasında değişmektedir. Minimum çalışma zamanı olarak faz aşırı akım rölelerin minimum 0.1 saniye sonra sinyal üretmesi istenmektedir. Maksimum çalışma süresinin 1.2 saniyeyi geçmemesi istenmektedir [15].

3. Kâşif (PathFinder) Algoritması

Hayvanların sürü halinde yiyecek araması, avlanması, avcıdan kaçması gibi sezgisel davranışları bilim insanlarının her daim ilgisini çekmiştir. Bir sürüdeki tüm davranışlar ortak ilkeler temelinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte bazı sürülerde lider bulunmaktadır. Bu lider sürünün eylemlerini yönetmektedir. Ek olarak lider sürüyü mera, su ve av gibi hedeflere götürmektedir. Hedefe ulaşma sürecinde yeteneklerine bağlı olarak sürü içerisindeki lider değişebilir.

Grup halinde yaşayan hayvanlar genelde sürü üyeleri arasındaki sosyal hiyerarşiye göre hareket ederler. Bununla birlikte sürü içerisindeki liderlik geçicidir ve çok az kişi hedefin (yiyecek, avlanma alanı, göç rotası, avcı) hakkında bilgi sahibidir.

Sürünün üyelerinden herhangi birisi herhangi bir zaman aralığında en iyi bölgede bulunuyorsa lider olarak seçilir. Problemin tüm çözüm adımları vektörel büyüklük olduğu için sürü iki boyutlu ve üç boyutlu hareket etme yeteneğine sahiptir. Sürü liderine Kaşif ismi verilmiştir [16].

Kaşifi takip eden sürü için önerilen model Denklem (7) ile ifade edilmiştir.

$$x(t + \Delta t) = x^0(t).n + f_i + f_p + \varepsilon \quad (7)$$

Burada;

t : zaman,

x : pozisyon vektörünü,

n : ünite faktörünü

f_i : iki komşu sürü üyesi arasında etkileşim faktörünü,

f_p : global en iyi çözüme bağlı olarak değişen global güç faktörünü,

ε : titreşim katsayısını temsil etmektedir.

Kaşif lider Δt zaman kadar sonra sürü içerisindeki konumu; x_p Yolbulucunun konumu, Δx yolbulucu tarafından hareket sonucu elde edilen konum farkı ve A dalgalanma oranı olmak üzere Denklem (8)'ye göre güncellenmektedir.

$$x_p(t + \Delta t) = x_p(t) + \Delta x + A \quad (8)$$

Esasen, yukarıda bahsedilen toplu sürü hareketi modeli, optimizasyon problemlerini çözmek için doğrudan uygulanamaz. Ayrıca, uygulanabilir hale getirmek için bazı değişiklikler gereklidir. Optimizasyon probleminin temel amacı, en iyilemektir. Bu nedenle Denklem (8) ve Denklem (9); Denklem (10)'e çevrilmiştir.

$$x_i^{K+1} = x_i^K + R_1 (x_j^K - x_i^K) + R_2 (x_p^K - x_i^K) + \varepsilon \quad (9)$$

Burada;

K : güncel iterasyonu,

x_i : i . üyenin pozisyon vektörünü,

x_j : j . üyenin pozisyon vektörünü,

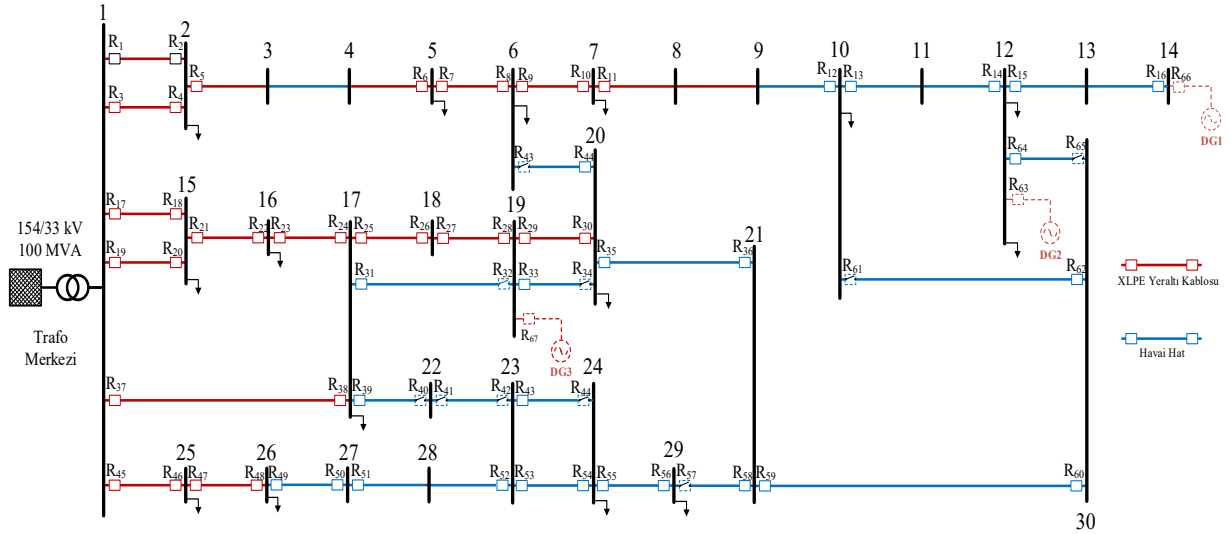
R_1 ve R_2 : 0 ile 1 arasında değişen ve rastgele üretilen sayıları temsil etmektedir.

Kaşif lider için pozisyon değişimi Denklem (13) ile elde edilmektedir.

$$x_p^{K+1} = x_p^K + 2R_3 (x_p^K - x_p^{K-1}) + A \quad (10)$$

4. Kâşif (PathFinder) Algoritması'nın Aşırı Akım Röle Koordinasyonu Problemine Uygulanması

Bu bölümde 154/33 kV 100 MVA Çatalca Trafo Merkezinin aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu gerçekleştirilecektir. Modellenen şebekeye ait veriler saha verisi olmakla birlikte trafo merkezi hali hazırda işletilmektedir. Şekil 4 ile Çatalca Trafo Merkezinin tek hat diyagramı gösterilmiştir. Çatalca Trafo Merkezi'nde kullanılan ana güç transformatörü yıldız/yıldız bağlantıya sahiptir. Trafo merkezi hem havai hat hem de yeraltı kablolarının birlikte kullanıldığı hibrit bir şebeke topolojisine sahiptir. Kullanılan yeraltı kabloları kırmızı renk ile, havai hatlar ise mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 4. 154/33 kV Çatalca Trafo Merkezi.

Çatalca Trafo Merkezi toplam 30 adet baradan oluşmaktadır. Toplam 40 adet hat ve 66 adet aşırı akım rölesi bulunmaktadır. Şebekenin radyal işletilmesi için açık anahtarlar (tie switch) mevcuttur. Örneğin 6 ile 20 numaralı baralar arasında 4.5 km'lik hava hattın bir ucu açıktır (Röle R_{43}). Böylece döngü oluşması engellenmiştir. Benzer şekilde 12 ile 30 numaralı baralar arasında bulunan 12 km'lik havai hattın bir ucu açıktır (Röle R_{61}). Şebekede bulunan tüm açık anahtarlar ayrıca şebeke topolojisi üzerinde gösterilmiştir. Her ne kadar bir ucu açık hatlar ile şebekenin radyal işletilmesi sağlansa bile her iki uçtan birleştirilmiş baralar döngü yapısı oluşturmaktadır. Örneğin 1 ile 2 numaralı baralar, 1 ile 15 numaralı baralar ve 1 ve 17 numaralı baralar. Bu nedenle birincil ikincil röle koordinasyonları belirlenirken bu hususa dikkat edilmiştir. Üç adet dağıtık üretim planlanmış olmakla birlikte henüz devrede değildir. Çatalca Trafo Merkezine ait detaylı hat bilgisi Çizelge 2 ile listelenmiştir. Çizelge 9 ile görüldüğü üzere yeraltı kablosu olarak 400 mm², 240 mm² ve 150 mm² XLPE tek damarlı yeraltı kablosu kullanılmıştır. Havai hat olarak ise Hawk ve Pigeon iletken kullanılmıştır. Havai

hat ve yeraltı kablosu tiplerine ait geometrik veriler, parametreler ve empedans matrisleri [17] numaralı çalışmada bulunmaktadır.

Çizelge 2. Çatalca Trafo Merkezine ait detaylı hat, yük ve mesafe bilgileri.

Bara Çifti	Hat Tipi	Mesafe (Km)	Yük (KVA)	Bara Çifti	Hat Tipi	Mesafe (Km)	Yük (KVA)
1-2	400 mm ²	1.60	630	17-19	Pigeon	5.50	--
1-2	400 mm ²	1.60		18-19	240 mm ²	1.15	--
2-3	400 mm ²	0.30	--	19-20	400 mm ²	2.50	400
3-4	Hawk	5.00	--	19-20	Pigeon	2.50	--
4-5	400 mm ²	2.35	400	20-21	Pigeon	5.70	250
5-6	400 mm ²	5.28	630	1-17	150 mm ²	6.50	630
6-7	400 mm ²	1.90	630	17-22	Pigeon	3.50	--
6-20	Pigeon	4.50	--	22-23	Pigeon	1.85	--
7-8	400 mm ²	3.00	400	23-24	Pigeon	5.00	--
8-9	400 mm ²	1.50	--	1-25	400 mm ²	5.60	630
9-10	Pigeon	11.0	400	25-26	400 mm ²	2.50	400
10-11	Pigeon	2.50	--	26-27	Pigeon	2.80	630
11-12	Pigeon	7.30	1000	27-28	Pigeon	6.80	--
12-13	Pigeon	3.00	--	28-23	Pigeon	1.85	--
13-14	Pigeon	6.80	--	23-24	Pigeon	5.00	400
1-15	400 mm ²	2.50	630	24-29	Pigeon	6.00	250
1-15	400 mm ²	2.50		29-21	Pigeon	5.65	250
15-16	400 mm ²	3.40	630	21-30	Pigeon	11.5	--
16-17	400 mm ²	2.00	630	10-30	Pigeon	5.00	--
17-18	240 mm ²	4.63	--	12-30	Pigeon	12.0	--

Çizelge 2’de görüldüğü üzere uzun mesafeleri kablolar ve havai hatlar kullanılmaktadır. Bu durum Türk Dağıtım şebekelerinin Avrupa dağıtım şebekelerinden daha karmaşık yapıda olmasına neden olmaktadır. Şekil 4 ile gösterilen Çatalca Trafo Merkezi, EMTP-ATP Draw programında modellenmiştir. Üç faz dengeli arızalar kararlı durumda (steady-state) incelendiği için yeraltı kabloları pi-model olarak modellenmiştir. Çatalca Trafo Merkezinde bulunan yükler ise sabit empedans modeli kullanarak modellenmiştir. Her bir rölenin yakınında (100 metre) dengeli üç faz arızalar oluşturulmuştur. Oluşturulan faz arızalarının genlikleri ve röle koordinasyon ilişkileri Çizelge 3 ile listelenmiştir. Çizelge 3’deki arıza akımları kullanarak Çatalca trafo merkezinde bulunan faz rölelerinin ayarları NLP metodu ve PFA çözümü ile optimize edilmiştir. 60 adet karar değişkeni mevcuttur. TDS değerlerinin minimum ve maksimum değer aralığı sırasıyla 0.05 ile 1.2’dir. Minimum I_p değeri 60 A, maksimum I_p değeri 300 A olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. Çatalca Trafo Merkezine ait dengeli üç faz arıza akım genliği ve röle koordinasyon çiftleri.

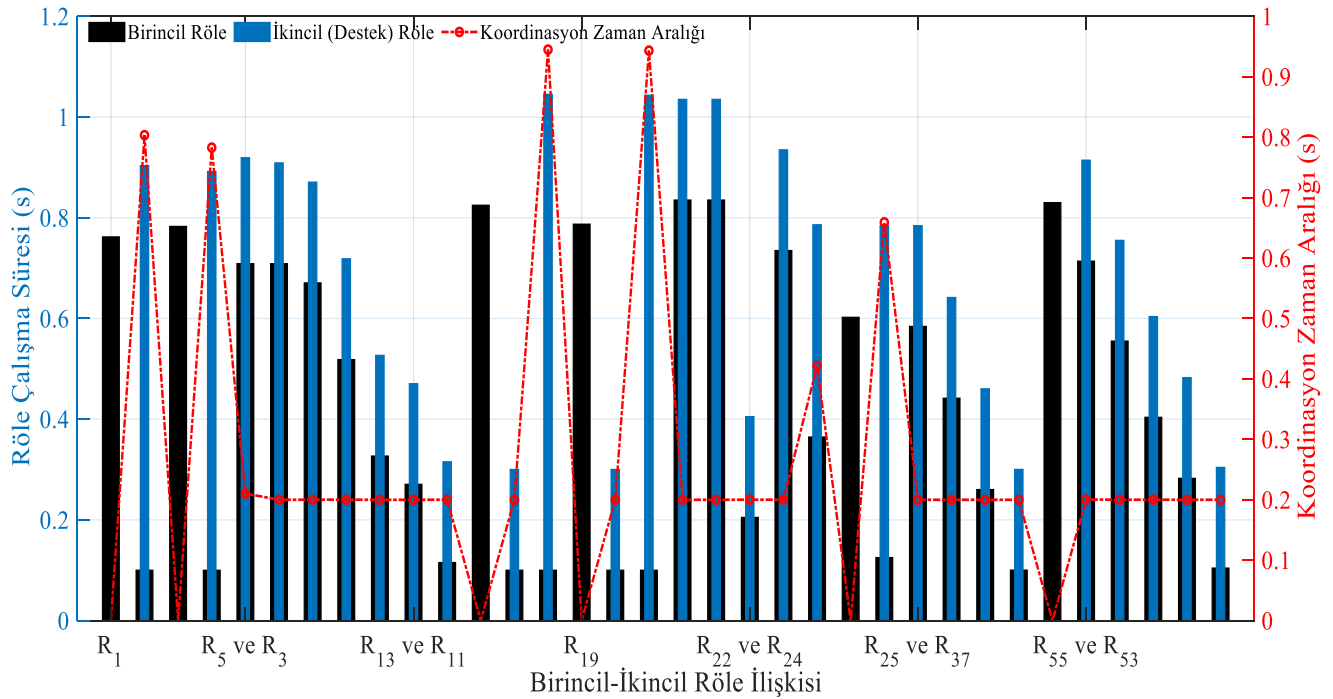
R _P	I _F (R _P) (A)	R _B	I _F (R _B) (A)	R _P	I _F (R _P) (A)	R _B	I _F (R _B) (A)
1	11000	--	----	20	5393	17	4552
2	5028	3	5699	20	5393	22	841
3	11000	--	----	21	9349	17	4674
4	5028	1	5699	21	9349	19	4674
5	10578	3	5289	22	2688	24	2688
5	10578	1	5289	23	5901	21	5901
7	3454	6	3453	24	3727	37	3726
9	3454	7	3454	25	8365	37	3759
11	3245	9	3245	25	8365	23	4610
13	1591	11	1586	37	11336	--	----
15	1143	13	1143	38	4562	23	4610
17	11205	--	----	29	6171	25	6169
18	5393	19	4552	35	5307	29	5307
18	5393	22	841	59	2987	35	2987
19	11205	--	----	45	11451	--	----
47	7220	45	7218	49	6100	47	6099

51	4264	49	6464	53	2192	51	2192
55	1709	53	1907				

Rölelerin ve kesicilerin mekanik limitlerinin saha ile uyumlu olmasının adına minimum röle çalışma süresi 0.1 saniye olarak seçilmiştir. Maksimum çalışma süresi ise 1.2 saniye olarak belirlenmiştir. Faz arızalarında aşırı akım röleleri arasında seçiciliği sağlayan koordinasyon zaman aralığı ise 0.2 saniye seçilmiştir. Optimizasyon probleminin 60 adet çalışma süresi kısıtı, 88 adet koordinasyon kısıtı mevcuttur. NLP sonucu elde edilen optimal TDS ve I_p değerleri Çizelge 4 ile listelenmiştir. Çizelge 4'deki değerler kullanılarak röle çalışma süreleri ve koordinasyon zaman aralıkları kontrol edilmelidir.

Çizelge 4. Çatalca Trafo Merkezine ait optimal TDS ve I_p ayarları.

Röle No	TDS	I_p (A)	Röle No	TDS	I_p (A)
1	0.4756	170.12	17	0.3452	120.85
2	0.0632	72.29	18	0.0672	60.00
3	0.4762	175.50	19	0.2570	299.80
4	0.0661	60.00	20	0.0500	183.22
5	0.4951	117.32	21	0.2236	300.00
7	0.3478	169.52	22	0.0500	265.78
9	0.3520	60.00	23	0.2108	60.00
11	0.2332	60.00	24	0.1907	66.47
13	0.1367	60.00	25	0.4405	60.00
15	0.0500	60.00	29	0.2553	119.20
37	0.3904	134.86	38	0.0500	300.00
35	0.1356	142.68	59	0.0500	110.97
45	0.4397	265.17	47	0.5036	60.00
49	0.2672	197.63	51	0.2389	70.12
53	0.0950	196.49	55	0.0500	60.00
OF(s)			15.054		



Şekil 5. Çatalca Trafo Merkezi için, optimal TDS ve I_p ayarları kullanarak elde edilen röle çalışma süreleri ve koordinasyon zaman aralığı kontrolü.

Şekil 5 ile Optimal TDS ve I_p ayarları kullanarak elde edilen aşırı akım röle çalışma süreleri ve koordinasyon zaman aralığı kontrolü gösterilmiştir. Her bir arıza noktası için birincil ve ikincil rölelerin çalışma süreleri hesaplanmıştır. Koordinasyon zaman aralıkları ikincil y-ekseni olarak grafik üzerinden gösterilmiştir. Optimal TDS ve I_p ayarları ile toplam çalışma süresi 15.054 saniye elde edilmiştir. Hiçbir birincil röle arızayı 1.2 saniyeden daha sürede temizlememiştir. Birincil ve ikincil ilişkisi olan rölelerde koordinasyon zaman aralığı 0.2 saniyenin altına düşmemiştir. Böylece koordinasyon ihlali yaşanmamıştır. Önerilen TDS ve I_p ayarları ile üç faz arızalar daha hızlı temizlenebilir. Bu durumda şebeke elemanlarının maruz kalacağı ısı stres süresi de azalmış olacaktır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Aşırı akım röle koordinasyonu çalışmalarında meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak röle ayarları optimize edilmektedir. Böylece yüksek genlikli arıza akımı altında arızanın temizlenme süreci iyileştirilmektedir. Bu çalışma kapsamında pek çok optimizasyon probleminin çözümünde ve test şebekelerinde başarılı sonuçlar veren Kaşif Algoritması gerçek bir şebeke üzerinde test edilmiştir.

Bu çalışmada verileri sahadan alınan örnek bir dağıtım şebekesi için aşırı akım röle koordinasyon optimizasyonu problemi Kaşif Algoritması kullanılarak başarılı bir şekilde çözülmüştür. Herhangi bir yakınsama veya yerel minimumda kalma problemi yaşanmamıştır. Böylece Kaşif Algoritmasının aşırı akım röle koordinasyonu optimizasyonunda gerçek dağıtım şebekesinde bile etkin ve başarılı sonuçlar veren bir meta-sezgisel algoritma olduğu gösterilmiştir. Bu durum Kaşif Algoritmasının diğer koruma problemlerinin optimize edilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

6. Kaynaklar

1. T. H. Ortmeier, T. Hiyama ve H. Salehfar, "Power quality effects of distribution", Electrical Power & Energy Systems, cilt 18, no. 5, pp. 323-329, 1996.
2. IEEE, "Computer aided coordination of line protection schemes", IEEE Transactions on Power Delivery, cilt 6, no. 2, pp. 575-583, 1991.
3. H. K. Karegar, Hossein Askarian Abyaneh, Vivian Ohis ve Matin Meshkin, "Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays", Electric Power Systems Research, cilt 75, no. 2, pp. 134-141, 2005.
4. H. Zeineldin, E. El-Saadany ve M. A. Salama, "Optimal coordination of directional overcurrent relay coordination", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
5. Y. Damchi, M. Dolatabadi, H.R. Mashhadi ve J. Sadeh, "MILP approach for optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems", Electric Power System Research, cilt 158, pp. 267-274, 2018.
6. M.B. Atsever ve M.H. Hocaoglu, "Mitigation of sympathy trips in highly cabled non-effectively earthed radial distribution systems via MINLP", Electric Power System Research, cilt 220, pp. 1-10, 2023.
7. P. Bedekar ve S. Bhide, "Optimum Coordination of Directional Overcurrent Relays Using the Hybrid GA-NLP Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, cilt 26, no. 1, pp. 109-119, 2011.
8. M. B. Atsever ve M. H. Hocaoglu, "Aşırı Akım Röle Koordinasyonu için Bozkurt Algoritmasının Kapsamlı Performans Analizi", *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, c. 1, sayı. 2, pp. 52-61, Kas. 2022
9. M. B. Atsever, Ö. Karacasu ve M. H. Hocaoglu, "Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution Networks", 2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Middlesbrough, United Kingdom, 2021.
10. M. B. Atsever, Ö. Karacasu ve M. H. Hocaoglu, "Performance Analysis of Different Optimization Algorithms on Overcurrent Relay Coordination Problem in Distribution Systems, " 11th Smart Grid Conference (SGC), Tebriz, 2021.

11. N. El-Naily, S. M. Saad, ve F. A. Mohamed, "Novel approach for optimum coordination of overcurrent relays to enhance microgrid earth fault protection scheme", *Sustain Cities Soc*, cilt. 54, p. 102006, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.102006.
12. V. N. Rajput ve K. S. Pandya, "On 8-bus test system for solving challenges in relay coordination", *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, Mar. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPES.2016.7584009.
13. A. J. Urdaneta, R. Nadira, ve L. G. Perez Jimenez, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, cilt 3, no. 3, pp. 903–911, Jul. 1988, doi: 10.1109/61.193867.
14. S. D. Godwal, K. S. Pandya, V. N. Rajput, ve S. C. Vora, "A Review on Approaches Employed for Solving Directional Overcurrent Relays' Coordination Problem", 2020, pp. 35–51. doi: 10.1007/978-981-15-0206-4_4.
15. P. P. Bedekar, S. R. Bhide, ve V. S. Kale, "Optimum Coordination of Overcurrent Relay Timing Using Simplex Method", *Electric Power Components and Systems*, cilt 38, no. 10, pp. 1175–1193, Jul. 2010, doi: 10.1080/15325001003652900.
16. H. Yapıcı ve N. Çetinkaya, " A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm", *Applied Soft Computing* , cilt 78, pp. 545–568, 2019.
17. M.B. Atsever ve M.H. Hocaoglu, " Kablo Yoğun Türk Dağıtım Şebekelerinde Kapasitif Akım Temelli Hatalı Açmaların Engellenmesi için Yöntem-Hibritasyonu", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, (Kabul Edildi 25.04.2023)