

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİNDE KORUMA VE HARMONİK YÜK AKIŞI

Editör
MUSTAFA ŞEN YILDIZ



BİDGE Yayınları

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİNDE KORUMA VE HARMONİK
YÜK AKIŞI**

Editör: MUSTAFA ŞEN YILDIZ

ISBN: 978-625-372-840-3

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 15.11.2025

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÜÇ FAZLI HARMONİK YÜK AKIŞI ANALİZİ.....	4
RECEP YUMURTACI.....	4
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATLARIN MESAFE RÖLELERİ İLE KORUNMASI VE MESAFE RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU.....	56
RECEP YUMURTACI.....	56
ERDİN GÖKALP	56
ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATLARIN AŞIRI AKIM RÖLELERİ İLE KORUNMASI VE AŞIRI AKIM RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU.....	80
RECEP YUMURTACI.....	80

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÜÇ FAZLI HARMONİK YÜK AKIŞI ANALİZİ

RECEP YUMURTACI¹

Giriş

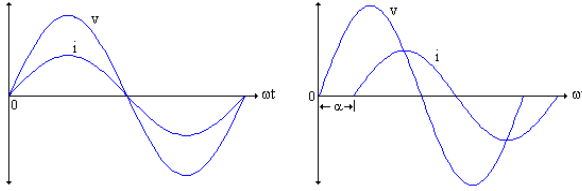
Bir elektrik güç sisteminde tüketiciye verilecek gerilimin dalga şekli tam sinüs formunda olmalı ve bu gerilim belirli bir seviyede, tek ve sabit frekansta olmalıdır. Üretim, iletim, dağıtım ve tüketim tesislerinden oluşan güç sisteminde gerilimin dalga şeklinin sinüs formunda olması ancak güç sistemindeki tüm elemanların gerilim-akım (V-I) karakteristiklerinin doğrusal (lineer) olması ile mümkündür. Ancak sistemdeki bazı elemanların akım-gerilim karakteristikleri lineer olmadığı için bu elemanlar nonlinear (lineer olmayan) elemanlar olarak adlandırılır. Transformatör, doğru akımla enerji iletim (HVDC) sistemi, statik VAR sistemi, doğrultucu, evirici, direkt frekans çeviricisi, ark fırını, alternatif akım kıyıcısı, anahtarlama güç kaynağı ve ark prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları güç sistemlerindeki nonlinear elemanlara örnek olarak

¹ Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3993-405X, ryumur@yildiz.edu.tr

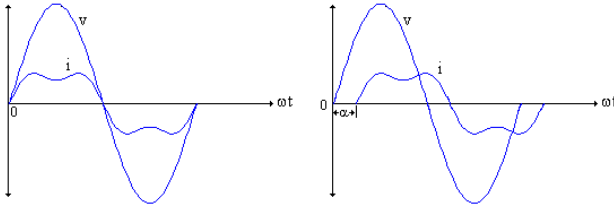
¹ Bu çalışma yazarın “Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu” başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.

verilebilir. Bu elemanların karakteristiklerinin lineer olmamasının sebepleri, demir çekirdekli elektrik makinalarının magnetik çekirdeklerinin doymaya girmesi, ark prensibi ile çalışan cihaz ve tesislerde ark olayının negatif direnç özelliği göstermesi, tristör, triyak, GTO gibi yarı-iletken güç elektroniği elemanlarının kullanıldığı devrelerde ise bu elemanların doğrultma ve anahtarlama özelliğinden yararlanılarak sinüsoidal dalganın bazı kısımlarının kırılması olarak açıklanabilir. Güç sistemindeki nonlineer elemanlar akım ve gerilimin dalga şeklinin bozulmasına, tam sinüs formundan sapmasına neden olurlar. Harmonikler sinüsoidal dalga biçiminin bozulması ile ortaya çıkar. Aşağıda Şekil 1’de lineer yükün, Şekil 2’de lineer olmayan yükün akım-gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir.

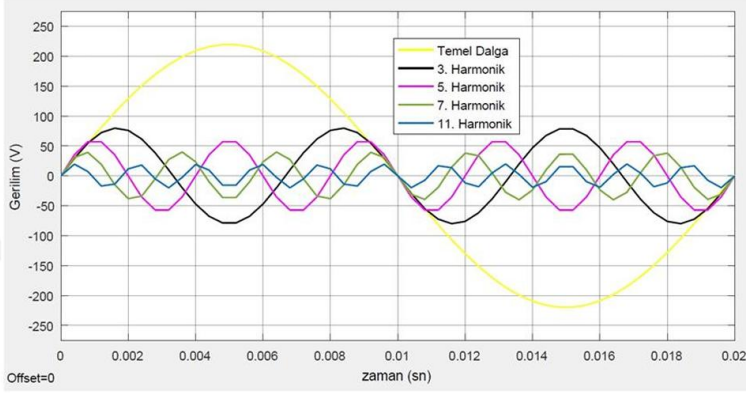
Şekil 1. Lineer yükün akım-gerilim dalga şekli.



Şekil 2. Nonlineer yük akım gerilim dalga şekli



Şekil 3. Temel bileşen ve çeşitli mertebelerdeki harmonik bileşenler



Lineer olmayan yükler sebebiyle akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasıyla ortaya çıkan güç sistemi harmoniklerinin frekansı, temel bileşen frekansının (50 Hz) tam katlarıdır. (3. harmonik bileşenin frekansı 150 Hz, 5.harmonik bileşenin frekansı 250 Hz vb.) Yukarıda Şekil 3’de 50 Hz frekanslı emel bileşen gerilimi ile harmonik bileşen gerilimlerinin dalga şekilleri gösterilmiştir(Gök, 2023).

Harmonik distorsiyonunun enerji sistemleri üzerindeki etkileri; ek kayıplar, rezonans olayları, dielektrik zorlanması, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması vb. şeklinde özetlenebilir. Bu etkileri araştırmak ve harmonikleri süzmek için gerekli filtre sistemlerinin tasarımını gerçekleştirmek için kullanılacak veriler harmonik yük akışı analizi ile elde edilebilir. (Yumurtacı, 2000).

Son yıllarda artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere iletim sistemlerinde çok yüksek gerilimli (EHV) transpoze edilmemiş hatların kullanımının artması, yüklerin bir fazlı havai hat üzerinden beslendiği elektrikli demiryolu ulaşımının yaygınlaşması ve şebekeden dengesiz akım çeken büyük güçlü ark fırınlarının

sayısının gittikçe artması gibi nedenlerle şebeke asimetrik ve sistem dengesiz yüklü hale gelmektedir. Bu durum sistemin tek faz eşdeğerinin esas alınması ile gerçekleştirilen yük akışı analizinin yerine güç sistemi elemanlarının üç fazlı olarak modellendiği “üç fazlı yük akışı analizi”nin yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca elektrikli ulaşım sistemlerinde kullanılan büyük güçlü bir fazlı doğrultucuların, sanayi tesislerinde kullanılan ark fırınlarının ve bunun gibi diğer dengesiz nonlineer yüklerin güç sistemine dengesiz harmonik bileşenleri enjekte etmeleri sebebiyle böyle bir sistemde harmoniklerin dengesiz olduğu göz önüne alınarak, harmonik yük akışının da üç fazlı olarak yapılması daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi bakımından uygun olacaktır.

Bu çalışmada üç fazlı güç sistemi elemanları faz koordinatları ile harmonik bağımlı olarak modellenmiş ve “üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizi” gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, Newton-Raphson yöntemine dayalı, dengesiz sistemler için üç fazlı yük akışı analizi ile dengeli sistemler için yine Newton-Raphson yöntemine dayalı harmonik yük akışı tekniğinin sentezinden yararlanılmıştır. (Yumurtacı, 2000).

1. Harmonikler ile İlgili Temel Kavramlar

Nonsinüsoidal akım ve gerilim dalgasının ani değeri,

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \gamma_h) \\ v(t) &= V_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t + \delta_h) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Akım ve gerilimin efektif değeri,

$$\left. \begin{aligned} I &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots)^{1/2} \\ V &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

olarak tanımlanabilir (Dugan vd., 2012; Arrillaga ve Watson, 2003; IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, 1996). Bu eşitliklerde I_0 ve V_0 sırasıyla akım ve gerilimin doğru bileşeni, h harmonik mertebesi, I_h ve γ_h h. harmonik akımının efektif değeri ve faz açısı, V_h ve δ_h h. harmonik geriliminin efektif değeri ve faz açısıdır.

Harmoniklerle ilgili tanımlar arasında en yaygın olarak kullanılan, hem akım ve hem de gerilim için verilen “ Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) ” kavramıdır. IEEE ve ülkeler kabul ettikleri harmonik standartlarında harmonikleri sınırlandırmak için gerilim ve/veya akım için izin verilen en yüksek THD değerlerini vermektedirler. N göz önüne alınan en yüksek harmonik derecesi olmak üzere, akım ve gerilim için toplam harmonik distorsiyonu sırasıyla,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (4)$$

olarak tanımlanır. (Dugan vd., 2012; Arrillaga ve Watson, 2003; Das, 2015)

Ayrıca akım ve gerilimin dalga şeklindeki bozulmanın toplam harmonik distorsiyonundan başka diğer bir göstergesi olarak “Distorsiyon faktörü (DF)” tanımlanmıştır. Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü ,

$$\left. \begin{aligned} DF_I &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I} \\ DF_V &= \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

olarak ifade edilir.

Periyodik olarak değişen nonsinüsoidal dalgalar için tepe faktörü (Crest Factor, CF),

$$CF = \frac{\text{Dalga'nın tepe değeri}}{\text{Dalga'nın efektif değeri}} \quad (6)$$

olarak tanımlanır (Dugan vd., 2012; Arrillaga ve Watson, 2003)

Bir fazlı sistemde bir nonlinear yükün akım ve geriliminin yukarıdaki (1) eşitliğindeki gibi ifade edilmesi halinde aktif güç,

$$P = V_0 I_0 + \sum_{h=1}^N V_h I_h \cos(\delta_h - \gamma_h) \quad (7)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda reaktif güç,

$$Q = \sum_{h=1}^N V_h I_h \sin(\delta_h - \gamma_h) \quad (8)$$

olarak tanımlanır. Görünen güç ise,

$$S = VI = \left(\sum_{n=0}^N V_n^2 \right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{h=0}^N I_h^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu güç ifadelerinden görüleceği gibi akımın ve gerilimin sinüsoidal olduğu durumdan farklı olarak burada $S^2 \neq P^2 + Q^2$ olmaktadır. Bu nedenle aktif ve reaktif güçten farklı olarak “distorsiyon gücü” tanımlanmıştır. Distorsiyon gücü,

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (10)$$

olarak ifade edilir (Dugan vd., 2012; Arrillaga ve Watson, 2003; Das, 2015)

Literatürde gözönüne alınan bir yükün lineer ya da nonlinear olmasına ve yük uçlarındaki gerilimin sinüsoidal veya nonsinüsoidal olmasına göre güç faktörü ayrı ayrı tanımlanmış ve bunlara ait bağıntılar verilmiştir (Shepherd ve Zand, 1979). En genel halde gerilimin nonsinüsoidal ve yükün nonlinear olması halinde, yük

uçlarındaki gerilim ve yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Bu durumda gerilim ve akım,

$$\left. \begin{aligned} v &= \sum_1^n \sqrt{2}V_n \sin(n\omega t + \delta_n) + \sum^m \sqrt{2}V_m \sin(m\omega t + \delta_m) \\ i &= \sum_1^n \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \delta_n + \psi_n) + \sum^p \sqrt{2}I_p \sin(p\omega t + \delta_p) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

olarak ifade edilebilir (Arrillaga ve Watson, 2003). Bu durumda T akım ve gerilimin periyodu olmak üzere güç faktörü,

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{VI} = \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \psi_n}{\{(\sum_1^n V_n^2 + \sum^m V_m^2) \cdot (\sum_1^n I_n^2 + \sum^p I_p^2)\}^{1/2}} \quad (12)$$

olarak ifade edilir (Arrillaga ve Watson, 2003). Pratikte en çok karşılaşılan durum olan gerilimin sinüsoidal olması yani sadece temel bileşenden ibaret olması ($V=V_1$) halinde yukarıdaki güç faktörü ifadesi,

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \psi_1}{V_1 I} = \frac{I_1}{I} \cos \psi_1 = \mu \cos \psi_1 \quad (13)$$

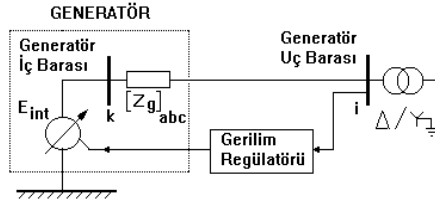
biçiminde daha basit olarak ifade edilebilir. Burada, μ akım distorsiyon faktörü ve $\cos \psi_1$ deplasman güç faktörü olarak tanımlanır (Shepherd ve Zand, 1979; Arrillaga vd., 2003). $I_1 < I$ olması nedeniyle güç faktörü daima birden küçüktür, sadece gerilimin ve akımın sinüsoidal olması (devrede harmonik olmaması) halinde güç faktörünü bir yapmak mümkündür.

2. Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı İçin Güç Sistemi Elemanlarının Modellenmesi

Geleneksel yük akış çalışmalarında, yük akışı analizi üç fazlı dengeli sistemlerin tek faz eşdeğeri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu çalışmalarda, generatörler değeri önceden bilinen ve çalışma süresince sabit kaldığı kabul edilen fazlararası uç gerilimleri ve sisteme enjekte ettikleri aktif güç ile tanımlanır. Ancak sistem

büyükliklerinde dengesizlik söz konusu ise generatörler için çok daha detaylı bir model gerekir. Şekil 4’de dengesiz yük akışı için geliştirilmiş bir senkron generatör modeli gösterilmiştir (Yumurtacı, 2000). Bu generatör modelinde “Generatör iç barası” ve “Generatör uç barası” olmak üzere iki farklı üç fazlı bara tanımlanmıştır. Ayrıca geleneksel generatör modelinden farklı olarak faz koordinatları ile verilmiş generatör empedansı da bu modelde yer almıştır. İdeal bir generatörde stator sargıları simetrik üç fazlı gerilim üretecek şekilde tasarlandığı için generatörün dengeli veya dengesiz yüklenmesinden bağımsız olarak generatör iç barası gerilimleri daima dengelidir. Generatör yükü dengeli ise generatör uç barası gerilimleri dengeli, yük dengesiz ise generatör uç barası gerilimleri de dengesizdir.

Şekil 4. Yük akış çalışmaları için geliştirilen generatör modeli



Şekil 4’de verilen generatör modelindeki gerilim regülatörü senkron generatörün uç barası gerilimleri için önceden tanımlanmış bir fonksiyona uygun olarak generatör ikaz gerilimini kontrol etmekte ve her türlü yüklenme durumu için generatör uç barasına ait i. bara pozitif sequence geriliminin (V_i^1) veya i. bara a fazı geriliminin (V_i^a) sabit bir değerde tutulmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada ele alınan modelde, generatör uç barası a fazı geriliminin sabit tutulması öngörülmüştür.

Şekil 5 ve Şekil 6’da sırasıyla temel bileşen ve harmonik bileşenleri için faz koordinatları ile generatör modelleri verilmiştir. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6’da k barası generatör iç barasını, i barası da generatör uç barasını temsil etmektedir. E_k^a , E_k^b ve E_k^c generatör

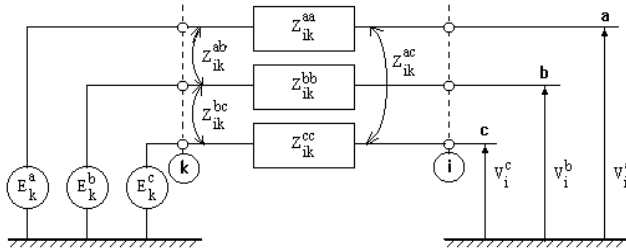
iç barası faz-nötr gerilimlerinin temel bileşen değerlerini ve δ_k^a, δ_k^b ve δ_k^c ise bu gerilimlerin faz açılarını göstermek üzere generatör iç bara gerilimleri ve faz açıları arasında aşağıdaki ilişkiler mevcuttur.

$$E_k^a = E_k^b = E_k^c \quad (14)$$

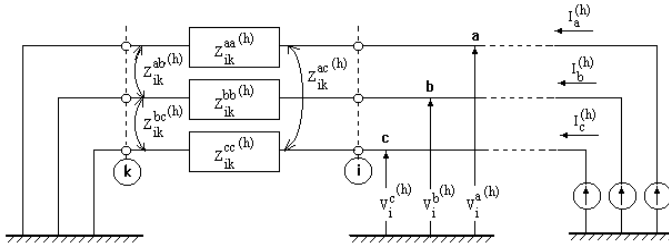
$$\delta_k^a = \delta_k^b + \frac{2\pi}{3} = \delta_k^c - \frac{2\pi}{3} \quad (15)$$

Generatör iç barası gerilimleri dengeli olduğu için bu çalışmada önerilen dengesiz yük akış algoritmasında sadece E_k^a ve δ_k^a büyüklüklerinin değişken olarak alınması yeterli olmaktadır. Algoritmada salınım barasına bağlı generatörün iç barasına ait δ_k^a faz açısı referans alınmaktadır.

Şekil 5. Senkron generatörün faz koordinatları ile modellenmesi
(Temel bileşen için) (Yumurtacı,2000)

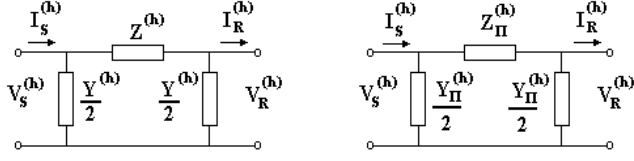


Şekil 6. Senkron generatörün faz koordinatları ile modellenmesi
(h. harmonik için) (Yumurtacı vd.,2025; Yumurtacı,2000)



Şekil 7a'da bir iletim hattının h. harmonik bileşeni için $Z^{(h)}$ ve $Y^{(h)}$ elemanları ile oluşturulan nominal π modeli gösterilmiştir.

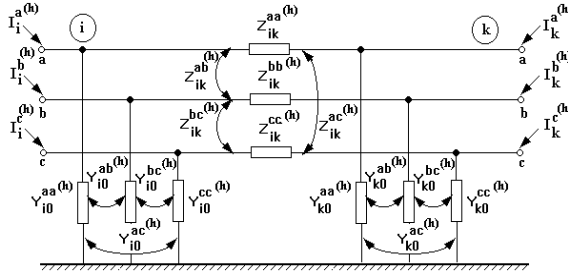
Şekil 7. h . harmonik için iletim hattı modeli



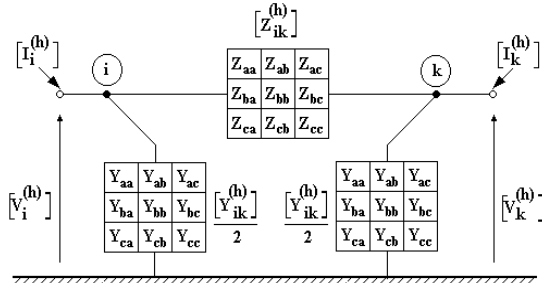
○ Nominal- π modeli
modeli

(b) Eşdeğer- π

Şekil 8. Üç fazlı iletim hattının h . harmonik bileşeni için toplu parametrelili π modeli (Yumurtacı vd.,2025; Yumurtacı,2000)



Şekil 9. Üç fazlı iletim hattının Şekil 8 'de verilen modelinin matris eşdeğeri (Yumurtacı,2000)



Üç fazlı dengesiz harmonik yük akış analizindeki bilinen ve bilinmeyen parametreler ile ilgili bunlara ait eşitliklerin verilebilmesi için sistemdeki tüm baraların incelenmesi ve sınıflandırılması gerekir.

3. Bara Tipleri ve Baraların Numaralandırılması

Geleneksel lineer yükler için tanımlanan üç fazlı dengesiz yük akışında tariflenen bara tiplerinden (lineer yük, generatör (generatör uç barası, generatör iç barası) ve salınım barası) bu çalışmada gerçekleştirilen üç fazlı dengesiz harmonik yük akışında da yararlanılmıştır. Üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı için de yukarıda bahsi geçen lineer bara tiplerine ek olarak dengeli harmonik yük akışında olduğu gibi akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan yüklerin bağlandığı “nonlinear yük barası” tanımlanmıştır. Nonlinear yük baraları gerilim kontrollü olmayıp, baraların her üç fazından (a, b, c) temel frekansta çekilen aktif ve reaktif güç değerleri ($P^{a(1)}$, $P^{b(1)}$, $P^{c(1)}$ ve $Q^{a(1)}$, $Q^{b(1)}$, $Q^{c(1)}$) ile bu baralara bağlı nonlinear yüklerin bara gerilimlerinin ve faz açılarının fonksiyonu olan akım karakteristikleri bilinmelidir (Xia and Heydt, 1982). Nonlinear yük baralarına ait temel bileşen gerilimi ile ($V^{a(1)}$, $V^{b(1)}$, $V^{c(1)}$) $h=3, 5, \dots, L$ olmak üzere harmonik gerilimleri ($V^{a(h)}$, $V^{b(h)}$, $V^{c(h)}$) ve bunlara ait faz açıları ($\delta^{a(1)}$, $\delta^{b(1)}$, $\delta^{c(1)}$) ve ($\delta^{a(h)}$, $\delta^{b(h)}$, $\delta^{c(h)}$) değişken olup üç fazlı harmonik yük akış analizi sonunda elde edilir.

Tablo 1. Üç Fazlı Dengesiz Harmonik Yük Akışı Analizinde Bara Tipleri ve Baraların Numaralandırılması

Bara Tipi	Bara No
Lineer yük barası	1,, n_y
Generatör uç (terminal) barası	(n_y+1) ,, (n_y+n_g-1)
Salınım generatörü uç barası	$(n_y+n_g) = (m-1)$
Nonlinear yük barası	m ,, $(m+n_n) = n_b$
Generatör iç (internal) barası	(n_b+1) ,, $(n_b+n_g-1) = n-1$
Salınım generatörü iç barası	$n_b+n_g = n$

Tablo 2. Üç Fazlı Dengesiz Harmonik Yük Akışındaki Bilinenler

Bilinenler (eşitlikler)	Adet
Bara aktif güçleri	$3n_b$
Bara reaktif güçleri	$3n_b$
Nonlineer bara yük akımları (Temel bileşen) eşitlikleri	$6(n_b-m+1)$
Nonlineer bara yük akımları (Harmonik bileşenleri) eşitlikleri	$6(N_h-1)n$
Generatörlerin toplam aktif güçleri (Salınım generatörü hariç)	(n_g-1)
Generatör uç baralarının a-fazı terminal gerilimleri (Salınım generatörü dahil)	n_g
TOPLAM	$12n_b + 6(N_h-1)n + 2n_g - 6m + 5$

Üç fazlı dengesiz harmonik yük akışında baraların tiplerine göre numaralandırılması Tablo 1’de gösterilmiştir. Bu tabloda n_y lineer yük bara sayısı, n_g generatör sayısı, n_n nonlineer yük sayısı, n toplam bara sayısı, n_b generatör iç baraları hariç toplam bara sayısı, m birinci nonlineer yükün bağlı olduğu baranın numarasını göstermektedir. N_h temel bileşen dahil analizi gerçekleştirilecek olan harmoniklerin toplam sayısı olmak üzere üç fazlı dengesiz harmonik yük akışındaki bilinenler aşağıda Tablo 2’de ve bilinmeyenler Tablo 3’de topluca listelenmiştir.

Tablo 3. Üç Fazlı Dengesiz Harmonik Yük Akışındaki Bilinmeyenler

Bilinmeyenler	Adet
Bara gerilimlerinin faz açıları (Temel bileşen)	$3n_b$
Bara gerilimleri (Temel bileşen)	$3n_b$
Bara gerilimlerinin faz açıları (Harmonik bileşenleri)	$3(N_h-1)n$
Bara gerilimleri (Harmonik bileşenleri)	$3(N_h-1)n$
Nonlineer yüklere ait α ve β değerleri	$6(n_b-m+1)$
Generatör iç baralarının a-fazı gerilimlerinin faz açısı (Salınım generatörü hariç)	$(n_g - 1)$
Generatörlerin iç bara gerilimleri (Salınım generatörü dahil)	n_g
TOPLAM	$12n_b + 6(N_h-1)n + 2n_g - 6m + 5$

Tablo 1.'de gösterildiği gibi, lineer yük baraları, generatör uç baraları ve salınım generatörü uç barasından oluşan lineer baralar 1'den itibaren numaralandırıldığında (m-1). bara son lineer bara olup m. bara ilk nonliner baradır. Son nonlineer yük barası n_b . bara olup bundan sonraki baralar yine birer lineer bara olarak ele alınan generatör iç baralarıdır.

4. Üç Fazlı Dengesiz Harmonik Yük Akışı Algoritması

Üç fazlı dengesiz yük akışında faz bileşenleri ile bara gerilim vektörü şöyle tanımlanır (Yumurtacı, 2000):

$$[U] = [[\delta], [V], [\delta_{int}], [V_{int}]]^T \quad (16)$$

Bu matrisler sadece temel frekans bileşeni ($h=1$) için oluşturulmuştur. $[V]$ ve $[\delta]$ matrisleri, generatör iç baraları hariç diğer tüm baraların a,b,c fazlarının gerilimlerinin efektif değerleri ve faz açılarından oluşmaktadır. $[V_{int}]$ ve $[\delta_{int}]$ matrisleri, dengeli olduğu varsayılan generatör iç bara gerilimlerinin efektif değer ve a fazının faz açısından oluşan matrislerdir. $[\delta_{int}]$ matrisi salınım generatörü hariç diğer tüm generatör iç baraları için, $[V_{int}]$ matrisi ise sistemdeki tüm generatör iç baraları için oluşturulmuştur.

Dengeli sistemler için gerçekleştirilen harmonik yük akışında ise şebeke gerilimleri ve akımları Fourier bileşenleri ile temsil edilir ve bara gerilim vektörü salınım barası hariç aşağıdaki gibi tanımlanır (Xia and Heydt, 1982; Grady, 1983; Kocatepe, 1995).

$$[U] = [[\delta], [V], [\Phi]]^T \quad (17)$$

Buradaki $[\delta]$ ve $[V]$ matrisleri temel frekans bileşeni için salınım barası hariç diğer tüm baralara, harmonik bileşenleri için ise salınım barası dahil bütün baralara ait elemanları içermektedir. Sadece nonlinear yüklerin bulunduğu baralar için tanımlanan $[\Phi]$ matrisi nonlinear elemanların değişken matrisidir.(Xia and Heydt, 1982).

Üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı, lineer yükler için tanımlanmış üç fazlı dengesiz yük akışı ile dengeli nonlinear yükler için tanımlanmış harmonik yük akışının birleştirilmesinden meydana geleceği için bu durumda gerilim vektörü;

$$[U] = [[\delta], [V], [\Phi], [\delta_{int}], [V_{int}]]^T \quad (18)$$

olarak ifade edilir. (18) eşitliğinde $[U]$ matrisini oluşturan alt matrisler elemanlarıyla birlikte aşağıda tanımlanmıştır.

L incelenen en yüksek harmonik mertebesi olmak üzere bara gerilimleri değişken matrisleri olan $[V]$ ve $[\delta]$ matrislerinin temel

frekans bileşeni ve harmonik bileşenleri için tanımlanmış alt matrislerden oluşumu sırasıyla (19) ve (20) eşitliklerinde verilmiştir.

$$[V] = [[V^{(1)}], [V^{(3)}], \dots, [V^{(L)}]]^T \quad (19)$$

$$[\delta] = [[\delta^{(1)}], [\delta^{(3)}], \dots, [\delta^{(L)}]]^T \quad (20)$$

n_b , generatör iç baraları hariç sistemde incelenen bara sayısı olmak üzere; baraların temel bileşen gerilimlerinin efektif değerleri matrisi ($[V^{(1)}]$) ve faz açıları matrisi ($[\delta^{(1)}]$) aşağıdaki (21) ve (22) eşitliklerinde verilmiştir. Bu eşitliklerdeki matrisleri oluşturan elemanlarda alt indis 1,..., n_b elemanın ait olduğu bara numarasını, 1, 2, 3 indisleri ise a,b,c fazları ile bire bir eşlenmek suretiyle elemanın temsil ettiği fazı göstermektedir.

$$[V^{(1)}] = [[V_1^{(1)}, V_1^{(2)}, V_1^{(3)}], [V_2^{(1)}, V_2^{(2)}, V_2^{(3)}], \dots, [V_{n_b}^{(1)}, V_{n_b}^{(2)}, V_{n_b}^{(3)}]]^T \quad (21)$$

$$[\delta^{(1)}] = [[\delta_1^{(1)}, \delta_1^{(2)}, \delta_1^{(3)}], [\delta_2^{(1)}, \delta_2^{(2)}, \delta_2^{(3)}], \dots, [\delta_{n_b}^{(1)}, \delta_{n_b}^{(2)}, \delta_{n_b}^{(3)}]]^T \quad (22)$$

$$[V^{(h)}] = [[V_1^{(h)}, V_1^{(2)}, V_1^{(3)}], [V_2^{(h)}, V_2^{(2)}, V_2^{(3)}], \dots, [V_n^{(h)}, V_n^{(2)}, V_n^{(3)}]]^T \quad (23)$$

$$[\delta^{(h)}] = [[\delta_1^{(h)}, \delta_1^{(2)}, \delta_1^{(3)}], [\delta_2^{(h)}, \delta_2^{(2)}, \delta_2^{(3)}], \dots, [\delta_n^{(h)}, \delta_n^{(2)}, \delta_n^{(3)}]]^T \quad (24)$$

Nonlinear yüklerin bulunduğu baralar ($m, m+1, \dots, n_b$) için tanımlanan, nonlinear elemanların değişken matrisi ($[\Phi]$), $[\alpha]$, $[\beta]$ matrisleri her bir nonlinear yük barasının a,b,c fazlarına ait nonlinear eleman parametrelerinden oluşan alt matrisler olmak üzere bunların içerdiği elemanlar (25), (26) ve (27) eşitliklerinde gösterilmiştir.

$$[\Phi] = [[\alpha], [\beta]]^T \quad (25)$$

$$[\alpha] = [[\alpha_m^1, \alpha_m^2, \alpha_m^3], [\alpha_{m+1}^1, \alpha_{m+1}^2, \alpha_{m+1}^3], \dots, [\alpha_{n_b}^1, \alpha_{n_b}^2, \alpha_{n_b}^3]]^T \quad (26)$$

$$[\beta] = [[\beta_m^1, \beta_m^2, \beta_m^3], [\beta_{m+1}^1, \beta_{m+1}^2, \beta_{m+1}^3], \dots, [\beta_{n_b}^1, \beta_{n_b}^2, \beta_{n_b}^3]]^T \quad (27)$$

n_g sistemdeki toplam generatör sayısı olmak üzere generatör iç baralarına ait gerilim (Efektif değer ve faz açısı) matrislerine ait elemanlar (28) ve (29) eşitliklerinde gösterilmiştir. Salınım generatörü olan n_g generatörün iç bara gerilimi referans alındığı için $[\delta_{int}]$ matrisi salınım generatörü haricindeki generatörlerin iç baralarına ait elemanları içermektedir.

$$[V_{int}] = [V_{int_1}, V_{int_1}, \dots, V_{int_{n_g}}]^T \quad (28)$$

$$[\delta_{int}] = [\delta_{int_1}, \delta_{int_1}, \dots, \delta_{int_{(n_g-1)}}]^T \quad (29)$$

Harmonik bara geriliminin genliği, faz açısı ve nonlinear eleman parametreleri (α, β) bilinmediğinden hata güçleri eşitliklerine ilaveten Kirchhoff'un akımlar yasası ve görünen güç denklemi de kullanılarak çözüme gidilebilir (Kocatepe, 1995). Aşağıdaki eşitliklerde nonlinear yük baraları için akım ve güç denklemlerinin adım adım elde edilmesi verilmiştir.

k barasına bağlı üç fazlı nonlinear yükün p faz akımının temel frekans bileşeni $\dot{g}_k^{p(1)}$, k barasına bağlı hatların p faz akımları toplamının temel frekans bileşeni $\dot{I}_k^{p(1)}$ olmak üzere $k \in \{m, (m+1), \dots, (m+n_b=n_b)\}$ aralığı için bu akımlar fazör olarak (30) eşitliğinde tanımlanmıştır. Bu eşitlikte Y_{ki}^{pq} , k barasının p fazı ile i barasının q fazı arasındaki bara admitans matrisi elemanının mutlak değerini, θ_{ki}^{pq} ise bu elemanın açısını temsil etmektedir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi nonlinear yük akımı bara gerilimlerinin ve nonlinear eleman parametrelerinin bir fonksiyonudur.

$$\left. \begin{aligned} \dot{g}_k^{p(1)} &= f(\dot{V}_k^{1(1)}, \dot{V}_k^{2(1)}, \dot{V}_k^{3(1)}, \dots, \dot{V}_k^{1(L)}, \dot{V}_k^{2(L)}, \dot{V}_k^{3(L)}, \alpha_k^1, \beta_k^1, \alpha_k^2, \beta_k^2, \alpha_k^3, \beta_k^3) \\ k &\in \{m, m+1, \dots, n_b\} \\ \dot{I}_k^{p(1)} &= \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^3 V_i^{q(1)} Y_{ki}^{pq(1)} \angle (\delta_i^{q(1)} + \theta_{ki}^{pq(1)}) \quad k \in \{m, m+1, \dots, n_b\} \end{aligned} \right\} (30)$$

Buradaki temel frekans bileşeni için tanımlanan, nonlinear yükün bulunduğu k barasının p fazına ait $\dot{g}_k^{p(1)}$ ve $\dot{i}_k^{p(1)}$ akımları (31) ve (32) eşitliklerinde birer fazör büyüklük olarak h. harmonik bileşeni için tanımlanmıştır (Xia and Heydt, 1982; Grady, 1983). Bu eşitliklerde $\dot{g}_k^{p(h)}$ k barasına bağlı nonlinear yükün p fazından sisteme enjekte ettiği h. harmonik akımı, $\dot{i}_k^{p(h)}$ ise k barasına bağlı hatların p fazı akımlarının h. harmonik bileşenleri toplamıdır. Görüldüğü gibi nonlinear yükler sadece $\{m, (m+1), \dots, (m+n_b=n_b)\}$ baralarına bağlı olduğu için sadece bu baralardan sisteme harmonik akımı enjekte edilmekte, yalnızca $k \in \{m, (m+1), \dots, (m+n_b=n_b)\}$ için $\dot{g}_k^{p(1)}$ ve $\dot{i}_k^{p(1)}$ akımları sıfırdan farklı değer almaktadır.

$$\left. \begin{aligned} \dot{g}_k^{p(h)} &= 0 & k &\in \{1, 2, \dots, (m-1)\} \\ \dot{g}_k^{p(h)} &= f(\dot{V}_k^{1(1)}, \dot{V}_k^{2(1)}, \dot{V}_k^{3(1)}, \dots, \dot{V}_k^{1(L)}, \dot{V}_k^{2(L)}, \dot{V}_k^{3(L)}, \alpha_k^1, \beta_k^1, \alpha_k^2, \beta_k^2, \alpha_k^3, \beta_k^3) & k &\in \{m, (m+1), \dots, n_b\} \\ \dot{g}_k^{p(h)} &= 0 & k &\in \{(n_b+1), (n_b+2), \dots, n\} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_k^{p(h)} &= 0 & k &\in \{1, 2, \dots, (m-1)\} \\ \dot{i}_k^{p(h)} &= \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^3 V_i^{q(h)} \cdot Y_{ki}^{pq(h)} \angle (\delta_i^{q(h)} + \theta_{ki}^{pq(h)}) & k &\in \{m, (m+1), \dots, n_b\} \\ \dot{i}_k^{p(h)} &= 0 & k &\in \{(n_b+1), (n_b+2), \dots, n_b + n_g = n\} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$h=1,3,5,7,\dots,L$ olarak harmonik mertebesini göstermek üzere, $\dot{i}_k^{p(h)}$ ve $\dot{g}_k^{p(h)}$ akımları (33) eşitliğinde gösterildiği gibi reel ve imajiner bileşenlere ayrılabilir. İndis olarak r reel bileşeni, i imajiner bileşeni belirtmek üzere k barasının p fazına ve h. harmonik mertebesine ait akımlar,

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k^{p(h)} &= I_{k,r}^{p(h)} + j I_{k,i}^{p(h)} \\ \dot{g}_k^{p(h)} &= g_{k,r}^{p(h)} + j g_{k,i}^{p(h)} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

şeklinde verilir. Bu eşitlikteki akımların reel ve imajiner bileşenleri yardımıyla her bir nonlineer yük barası için (21) eşitliği ile verilen akım denklemlerini yazmak mümkündür.

$$\left. \begin{aligned} I_{k,r}^{p(h)} + g_{k,r}^{p(h)} &= 0 \\ I_{k,i}^{p(h)} + g_{k,i}^{p(h)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

(34) eşitliği esas alınarak incelenen sistemdeki tüm nonlineer yük baraları için bu akım eşitlikleri harmonik yük akışında kullanılmak üzere temel frekans bileşeni için ve harmonik bileşenleri için (35) eşitliğinde matris formunda ifade edilmiştir. Burada $[\Delta I]$ matrisi akım hata matrisidir. (36), (37) ve (38) eşitliklerinde ise bu matrisi oluşturan alt matrisler tanımlanmıştır.

$$[\Delta I] = \left[[\Delta I^{(1)}], [\Delta I^{(3)}], [\Delta I^{(5)}], \dots, [\Delta I^{(L)}] \right]^T \quad (35)$$

$$[\Delta I^{(1)}] = \left[[\Delta I^{(1)}]_{reel}, [\Delta I^{(1)}]_{imag} \right]^T \quad (36)$$

$$[\Delta I^{(1)}]_{reel} = \left[\left[\left(I_{m,r}^{1(1)} + g_{m,r}^{1(1)} \right), \left(I_{m,r}^{2(1)} + g_{m,r}^{2(1)} \right), \left(I_{m,r}^{3(1)} + g_{m,r}^{3(1)} \right) \right], \dots, \left[\left(I_{n_b,r}^{1(1)} + g_{n_b,r}^{1(1)} \right), \left(I_{n_b,r}^{2(1)} + g_{n_b,r}^{2(1)} \right), \left(I_{n_b,r}^{3(1)} + g_{n_b,r}^{3(1)} \right) \right] \right]^T \quad (37)$$

$$[\Delta I^{(1)}]_{imag} = \left[\left[\left(I_{m,i}^{1(1)} + g_{m,i}^{1(1)} \right), \left(I_{m,i}^{2(1)} + g_{m,i}^{2(1)} \right), \left(I_{m,i}^{3(1)} + g_{m,i}^{3(1)} \right) \right], \dots, \left[\left(I_{n_b,i}^{1(1)} + g_{n_b,i}^{1(1)} \right), \left(I_{n_b,i}^{2(1)} + g_{n_b,i}^{2(1)} \right), \left(I_{n_b,i}^{3(1)} + g_{n_b,i}^{3(1)} \right) \right] \right]^T \quad (38)$$

$h=3,5,7,...,L$ olmak üzere yukarıda temel bileşen için tanımlanan akım hata matrisi aşağıdaki eşitliklerde harmonik frekansları için aynı şekilde oluşturulabilir,

$$[\Delta I^{(h)}] = \left[[\Delta I^{(h)}]_{reel}, [\Delta I^{(h)}]_{imag} \right]^T \quad (39)$$

$$[\Delta I^{(h)}]_{reel} = \left[\left[I_{1,r}^{(h)}, I_{1,r}^{2(h)}, I_{1,r}^{3(h)} \right], \left[I_{2,r}^{(h)}, I_{2,r}^{2(h)}, I_{2,r}^{3(h)} \right], \dots, \left[I_{m-1,r}^{(h)}, I_{m-1,r}^{2(h)}, I_{m-1,r}^{3(h)} \right], \left[(I_{m,r}^{(h)} + g_{m,r}^{1(h)}), (I_{m,r}^{2(h)} + g_{m,r}^{2(h)}), (I_{m,r}^{3(h)} + g_{m,r}^{3(h)}) \right], \dots, \left[(I_{n_b,r}^{(h)} + g_{n_b,r}^{1(h)}), (I_{n_b,r}^{2(h)} + g_{n_b,r}^{2(h)}), (I_{n_b,r}^{3(h)} + g_{n_b,r}^{3(h)}) \right], \left[I_{n_b+1,r}^{(h)}, I_{n_b+1,r}^{2(h)}, I_{n_b+1,r}^{3(h)} \right], \left[I_{n_b+2,r}^{(h)}, I_{n_b+2,r}^{2(h)}, I_{n_b+2,r}^{3(h)} \right], \dots, \left[I_{n,r}^{(h)}, I_{n,r}^{2(h)}, I_{n,r}^{3(h)} \right] \right]^T \quad (40)$$

$$[\Delta I^{(h)}]_{imag} = \left[\left[I_{1,i}^{(h)}, I_{1,i}^{2(h)}, I_{1,i}^{3(h)} \right], \left[I_{2,i}^{(h)}, I_{2,i}^{2(h)}, I_{2,i}^{3(h)} \right], \dots, \left[I_{m-1,i}^{(h)}, I_{m-1,i}^{2(h)}, I_{m-1,i}^{3(h)} \right], \left[(I_{m,i}^{(h)} + g_{m,i}^{1(h)}), (I_{m,i}^{2(h)} + g_{m,i}^{2(h)}), (I_{m,i}^{3(h)} + g_{m,i}^{3(h)}) \right], \dots, \left[(I_{n_b,i}^{(h)} + g_{n_b,i}^{1(h)}), (I_{n_b,i}^{2(h)} + g_{n_b,i}^{2(h)}), (I_{n_b,i}^{3(h)} + g_{n_b,i}^{3(h)}) \right], \left[I_{n_b+1,i}^{(h)}, I_{n_b+1,i}^{2(h)}, I_{n_b+1,i}^{3(h)} \right], \left[I_{n_b+2,i}^{(h)}, I_{n_b+2,i}^{2(h)}, I_{n_b+2,i}^{3(h)} \right], \dots, \left[I_{n,i}^{(h)}, I_{n,i}^{2(h)}, I_{n,i}^{3(h)} \right] \right]^T \quad (41)$$

i bir lineer yük veya generatör uç barası olmak üzere ($i=1,2,...,(m-1)$) bu baranın p fazına ($p=1,2,3$) ait aktif ve reaktif güç hata denklemleri (3.29) ile verilmiştir. Bu eşitliklerde $(P_i^p)_{SP}$ ve $(Q_i^p)_{SP}$ i .baranın p fazına bağlı yükün çektiği, değeri önceden bilinen ve sabit kaldığı kabul edilen aktif ve reaktif güç değerleridir. Y_{ik}^{pq} , sisteme ait bara admitans matrisinin i barasının p fazı ile k barasının q fazı arasındaki elemanın değeri, üstteki parantez içindeki rakam ise bu elemanın hesaplandığı harmonik mertebesini göstermektedir.

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i^p &= (P_i^p)_{SP} + V_i^{p(1)} \sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^3 V_k^{q(1)} \cdot Y_{ik}^{pq(1)} \cdot (\cos \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \cos \theta_{ik}^{pq(h)} + \sin \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \sin \theta_{ik}^{pq(h)}) \\ \Delta Q_i^p &= (Q_i^p)_{SP} + V_i^{p(1)} \sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^3 V_k^{q(1)} \cdot Y_{ik}^{pq(1)} \cdot (\sin \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \cos \theta_{ik}^{pq(h)} - \cos \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \sin \theta_{ik}^{pq(h)}) \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

(42) ile verilen eşitliklerdeki sinüs ve cosinus terimlerinin açık ifadesi aşağıdaki (43) ve (44) eşitliklerinde verilmiştir.

$$\cos x_{ik}^{pq} = \cos x_i^p \cdot \cos x_k^q + \sin x_i^p \cdot \sin x_k^q \quad (43)$$

$$\sin x_{ik}^{pq} = \sin x_i^p \cdot \cos x_k^q - \cos x_i^p \cdot \sin x_k^q \quad (44)$$

h=1,3,5,7,...,L olarak h harmonik mertebesi ve L gözönüne alınan en yüksek harmonik mertebesi olmak üzere, nonlinear yük baralarına ait aktif ve reaktif güç hata denklemleri sırasıyla,

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)_{SP} + \sum_{h=1}^L V_i^{p(h)} \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^3 V_k^{q(h)} \cdot Y_{ik}^{pq(h)} \cdot (\cos \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \cos \theta_{ik}^{pq(h)} + \sin \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \sin \theta_{ik}^{pq(h)}) \quad (45)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)_{SP} + \sum_{h=1}^L V_i^{p(h)} \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^3 V_k^{q(h)} \cdot Y_{ik}^{pq(h)} \cdot (\sin \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \cos \theta_{ik}^{pq(h)} - \cos \delta_{ik}^{pq(h)} \cdot \sin \theta_{ik}^{pq(h)}) \quad (46)$$

şeklini alır. (45) ve (46) eşitliklerinde bara numarası (i=m, m+1, m+2,...,n_b) sınırları arasındadır.

Generatör iç barasından sisteme verilen toplam aktif güç hata denklemi (47) eşitliği ile tanımlanmıştır (Arrillaga and Arnold, 1990). Bu denklemde j. generatörün sisteme verdiği üç faz aktif güç toplamı (P_{genj})_{SP} değeri önceden bilinmekte ve her iterasyonda sabit kalmaktadır. Bu denklem salınım generatörü hariç diğer tüm generatörler için tanımlanmıştır (j=1,2,..., (n_g-1)). Denklemde i, j. generatörün iç bara numarasını göstermektedir (i=j+n_b).

$$\Delta P_{gen_j} = (P_{gen_j})_{SP} + \sum_{p=1}^3 V_{int_j} \cdot \sum_{k=1}^n \sum_{q=1}^3 V_k^{q(1)} \cdot Y_{ik}^{pq(1)} \cdot (\cos \delta_{ik}^{pq(1)} \cdot \cos \theta_{ik}^{pq(1)} + \sin \delta_{ik}^{pq(1)} \cdot \sin \theta_{ik}^{pq(1)}) \quad (47)$$

Generatör terminal barası geriliminin sabit tutulmasına ilişkin gerilim hata denklemi (48) eşitliği ile verilebilir.

$$\Delta V_{reg_j} = V_{term_j}^{SP} - V_{term_i}^{(1)} \quad (48)$$

Bu eşitlikte $V_{\text{termj}}^{\text{SP}}$, j. generatöre ait, bir gerilim regülatörü yardımıyla her türlü yüklenme koşulunda değeri sabit tutulan generatör uç barası a fazı geriliminin efektif değeridir. $V_i^{(1)}$ ise j. generatörün uç barasının a fazı geriliminin temel frekans bileşeninin efektif değeridir. ($i=j+n_y$ olup n_y sistemdeki lineer yük barası sayısıdır.)

Buraya kadar tanımlanan $[\Delta P]$, $[\Delta Q]$, $[\Delta I]$, $[\Delta P_{\text{gen}}]$, $[\Delta V_{\text{reg}}]$ hata alt matrisleri yardımıyla $[\Delta M]$ hata matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$[\Delta M] = [[\Delta P] , [\Delta Q] , [\Delta I] , [\Delta P_{\text{gen}}] , [\Delta V_{\text{reg}}]]^T \quad (49)$$

Yukarıda (18) eşitliği ile tanımlanan bara gerilim matrisi (vektörü) yardımıyla bara değişken matrisi tanımlanabilir. Bara değişken matrisi,

$$[\Delta X] = [[\Delta \delta] , [\Delta V] , [\Delta \Phi] , [[\Delta \delta_{\text{int}}] , [\Delta V_{\text{int}}]]^T] \quad (50)$$

şeklinde tanımlanır. Geleneksel yük akışında da bilindiği gibi,

$$[\Delta M] = [J].[\Delta X] \quad (51)$$

eşitliği mevcuttur. (51) eşitliğindeki J jakobyen matrisi olup ΔM sütün matrisindeki elemanların ΔM sütün matrisindeki elemanların kısmi türevlerinden oluşmaktadır. (Yumurtacı, 2000) doktora tezinden oluşan kaynakta tüm jakobyen matrisi elemanlarının hesaplanmasına ilişkin matematiksel bağıntılar detaylı olarak verilmiştir. ΔM sütün matrisi ve J jakobyen matrisi hesaplandıktan sonra $[\Delta X]$ matrisi,

$$[\Delta X] = [J]^{-1}.[\Delta M] \quad (52)$$

olarak elde edilir. ℓ iterasyon sayısı olmak üzere, $(\ell+1)$. iterasyondaki $[\Delta X]$ matrisinin elemanlarının değerleri;

$$[X]^{\ell+1} = [X]^{\ell} - [\Delta X]^{\ell} \quad (53)$$

eşitliği ile bulunur.

Çözüm için bir önceki iterasyonda hesaplanan $[X]$ matrisi eleman değerleri (51) denkleminde yerine konularak $[\Delta M]$ hata matrisi ve $[J]$ jakobyen matrisi tekrar hesaplanır. (52) denklemi ile $[\Delta X]$ matrisindeki değişken değerleri bulunur. $[\Delta M]$ hata matrisindeki tüm elemanların değeri önceden belirlenen bir tolerans değerinin (örneğin 1.10^{-6} p.u.) altına ininceye kadar iterasyonlara devam edilir. Bu döngü tamamlandığında bulunan $[X]$ matrisi eleman değerleri üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizi sonucu elde edilen değerler olup, bu değerler yardımıyla sistemdeki işletim büyüklükleri hesaplanır (Yumurtacı, 2000):.

Yukarıda verilen bilgilerden yararlanarak, üç fazlı dengesiz sistemlerde harmonik yük akışı analizi çözüm algoritması şu adımlar ile gerçekleştirilebilir (Yumurtacı, 2000):

1.Adım: Sistemdeki verilerin okunması.

2.Adım: Bara admitans matrisinin oluşturulması.

3.Adım: Bara gerilimi temel bileşen ve harmonik bileşenlerinin genlik ve faz açıları için tahmini başlangıç değerlerinin belirlenmesi. (Genellikle tüm baraların temel bileşen gerilimleri için $V^{(1)} = 1$ p.u. ve $\delta^{(1)} = 0^0$, harmonik gerilimleri için $V^{(h)} = 0.1$ p.u. ve $\delta^{(h)} = 0^0$ kabul edilir.).

4.Adım: İterasyona başlanması (iterasyon no=1 alınarak).

5.Adım: Nonlinear yük akımlarının hesaplanması.

6.Adım: (35) – (50) denklemleri ile ΔM matrisi elemanlarının hesaplanması. Eğer tüm matris elemanlarının mutlak değeri önceden belirlenen bir tolerans değerinden büyük ise 7. Adıma geçilmesi,

daha küçük ise iterasyonlara son verilerek, hatlardaki akım ve güç dağılımları ile güç kayıplarının hesaplanması ve sonuçların yazdırılması.

7.Adım: Jakobyen matrisinin (J) ve (51)- (53) denklemlerine göre düzeltme matrisinin hesaplanması.

8.Adım: (53) denklemi ile bara değişken matrisi değerlerinin güncelleştirilmesi. (ℓ iterasyon numarası olmak üzere, $[X]^{\ell+1} = [X]^{\ell} - [\Delta X]^{\ell}$ işlemi yapılır.)

9.Adım: İterasyon numarasının $\ell = \ell + 1$ olarak arttırılması.

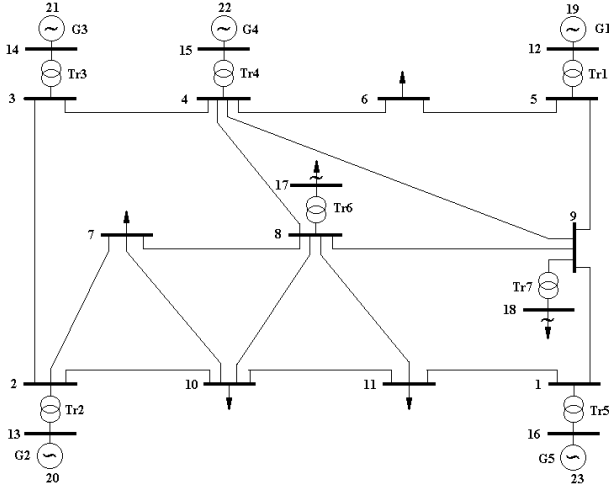
10.Adım: 5. adıma geri dönülmesi.

Bu çalışmada geliştirilen üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizi kullanılarak aşağıda bir sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir.

5. Sayısal Uygulama

Bu çalışmada geliştirilen üç fazlı dengeli ve dengesiz elektrik güç sistemlerinde harmonik yük akış analizi ile ilgili yaklaşımın sayısal uygulama sonuçlarını göstermek üzere göz önüne alınan üç fazlı örnek sistemin tek hat şeması Şekil 10'da gösterilmiştir. (Yumurtacı, 2000).

Şekil 10. Örnek Sistem



Bu çalışmada geliştirilen üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizine uygun olarak generatörlerin çıkış baralarının (12, 13, 14, 15 ve 16 nolu baralar) yanı sıra kutup baraları (iç baraları) da (19, 20, 21, 22 ve 23 nolu baralar) göz önüne alınmıştır. (Üç fazlı dengeli sistemlere ilişkin yük akışı ve harmonik yük akışı analizleri dengeli sistemin bir faz eşdeğer devresine göre yapılmakta olup modellemeye generatör iç baralarına ihtiyaç duyulmaz)

Analizde tüm işlemler bir faza ait baz güç $S_{BAZ}=(100/3)$ MVA ve faz-nötr baz gerilimi $V_{BAZ}=(154/\sqrt{3})$ kV alınarak p.u. değerler ile gerçekleştirilmiştir. Yük akış analizi yapılan örnek sistemdeki hatların simetrik bileşenler cinsinden empedans ve suseptans değerleri p.u. değer olarak aşağıda Tablo 4’de verilmiştir. (Yumurtacı, 2000).

Tablo 4. Hatların karakteristik değ erleri

Hat No	Bara No	Bara No	$Z_1 = Z_2$ (p.u.)	$B_1=B_2$ (p.u.)	Z_0 (p.u.)	B_0 (p.u.)
1	1	- 9	0.15 + j0.50	j0.030	0.375 + j1.250	j0.0210
2	1	- 11	0.05 + j0.16	j0.010	0.125 + j0.400	j0.0070
3	2	- 3	0.15 + j0.50	j0.030	0.375 + j1.250	j0.0210
4	2	- 7	0.10 + j0.28	j0.020	0.250 + j0.700	j0.0140
5	2	- 10	0.05 + j0.16	j0.010	0.125 + j0.400	j0.0070
6	3	- 4	0.08 + j0.24	j0.015	0.200 + j0.600	j0.0105
7	4	- 6	0.10 + j0.28	j0.020	0.250 + j0.700	j0.0140
8	4	- 8	0.10 + j0.28	j0.020	0.250 + j0.700	j0.0140
9	4	- 9	0.15 + j0.50	j0.030	0.375 + j1.250	j0.0210
10	5	- 6	0.12 + j0.36	j0.025	0.300 + j0.900	j0.0175
11	5	- 9	0.05 + j0.16	j0.010	0.125 + j0.400	j0.0070
12	7	- 8	0.05 + j0.16	j0.010	0.125 + j0.400	j0.0070
13	7	- 10	0.08 + j0.24	j0.015	0.200 + j0.600	j0.0105
14	8	- 9	0.12 + j0.36	j0.025	0.300 + j0.900	j0.0175
15	8	- 10	0.08 + j0.24	j0.015	0.200 + j0.600	j0.0105
16	8	- 11	0.10 + j0.28	j0.020	0.250 + j0.700	j0.0140
17	10	- 11	0.12 + j0.36	j0.025	0.300 + j0.900	j0.0175

 rnek sistemde anma gücü 50 MVA olan Tr1, Tr2, Tr3, Tr4 ve Tr5 transformatörleri yükseltici transformatörler olup anma gerilimleri 13.8 kV/154 kV ve bağıl kısa devre gerilimleri $u_k= \%6$ 'dır.  rnek sistemdeki tüm transformatörler yıldız-yıldız bağlıdır ve yıldız noktaları topraklanmıştır. Sistemde nonlineer yüklere ait Tr6 ve Tr7 indirici transformatörlerinin anma gerilimleri 154 kV/34.5 kV ve anma güçleri sırasıyla 10 MVA ve 3 MVA'dır. Her iki transformatörün bağıl kısa devre gerilimleri $u_k= \%4$ 'tür. Sistemdeki tüm transformatörlerin anma değerleri aşağıda Tablo 5'de verilmiştir (Yumurtacı, 2000).

Tablo 5. Transformatörlerin karakteristik değerleri

Tr.. No	S_N (MVA)	$X_{tr} (u_k)$ (%)	U_{1N} / U_{2N} (kV)
Tr1	50	6.0	13.8 / 154
Tr2	50	6.0	13.8 / 154
Tr3	50	6.0	13.8 / 154
Tr4	50	6.0	13.8 / 154
Tr5	50	6.0	13.8 / 154
Tr6	10	4.0	154 / 34.5
Tr7	3	4.0	154 / 34.5

Sistemdeki her bir generatörün anma gücü 50 MVA ve anma gerilimi 13.8 kV'tur. Generatörlerin gerilim değerleri ile pozitif, negatif ve sıfır bileşen reaktans değerleri aşağıda Tablo 6'da verilmiştir (Yumurtacı, 2000).

Tablo 6. Generatörlerin karakteristik değerleri

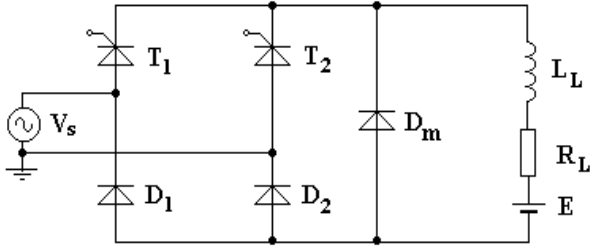
Generatör No	S_N (MVA)	U_N (kV)	X_1, X_2 (%)	X_0 (%)
G1	50	13.8	10.0	5.0
G2	50	13.8	10.0	5.0
G3	50	13.8	10.0	5.0
G4	50	13.8	10.0	5.0
G5	50	13.8	10.0	5.0

Tablo 7. Baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri

Bara No	P _{yük} (p.u .)			Q _{yük} (p.u .)		
	a	b	c	a	b	c
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.3000	0.3000	0.3000	0.1800	0.1800	0.1800
7	0.3500	0.3500	0.3500	0.2500	0.2500	0.2500
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.1800	0.1800	0.1800	0.1200	0.1200	0.1200
11	0.3600	0.3600	0.3600	0.3000	0.3000	0.3000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0490	0.0490	0.0491	0.0065	0.0065	0.0065
18	0.0295	0.0295	0.0295	0.0039	0.0039	0.0039

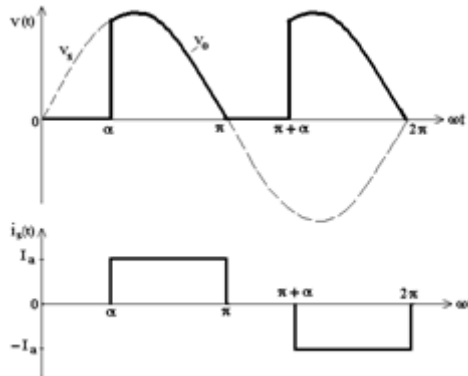
Örnek sistemde toplam 23 adet bara bulunmaktadır. Bu baraların türü ve yükleri şu şekildedir: 1 - 11 nolu baralar lineer yük baraları, 12 - 16 nolu baralar generatör uç baralarıdır. 17 ve 18 nolu baralar nonlinear yüklerin bağlı olduğu nonlinear yük baralarıdır. 19 - 23 nolu baralar ise, generatör iç baralarıdır. (Generatör uç ve iç baraları ile ilgili açıklamalar üçüncü bölümde yapılmıştır.) Bütün çalışma modlarında salınım barası olan 16 nolu baradaki G5 generatörü dışındaki her bir generatörün sisteme verdiği toplam aktif gücün 0.75 p.u. olduğu kabul edilmiştir. Her bir generatörün a fazına ait uç gerilimi 1.0 p.u. olarak alınmıştır. Sistemdeki baralardaki yüklerin aktif ve reaktif güç değerleri yukarıda Tablo 7’de verilmiştir (Yumurtacı, 2000).

Şekil 11. Bir fazlı yarı kontrollü doğrultucu



Sistemde 17 ve 18 nolu baraların her bir fazında yarı kontrollü doğrultucu üzerinden beslenen yükler, nonlinear yük olarak alınmıştır. Buna ait devre aşağıda Şekil 3.7.'d verilmiştir (Rashid, 2013; Yumurtacı 2000). Sisteme bağlanan bu nonlinear yükler için devredeki direnç (R_L) değerleri 17 nolu bara için 15 p.u., 18 nolu bara için 25 p.u. olarak alınmıştır. (Özel bir hal olarak modelde $E=0$ alınmıştır.) 17 ve 18 nolu baralardaki nonlinear yük akımları, temel bileşen dışında 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonikleri içermektedir. Nonlinear yük akımı ile ilgili bağıntılar aşağıda verilmiştir. (Rashid, 2013; Yumurtacı 2000).

Şekil 12. Bir fazlı yarı kontrollü doğrultucunun gerilim ve akım dalga şekilleri



Şekil 11’de devre şeması, Şekil 12’de akım-gerilim dalga şekilleri verilen bir fazlı yarı kontrollu doğrultucunun besleme geriliminin temel bileşeninin maksimum değeri $V_m^{(1)}$ olmak üzere, AC kaynak geriliminin temel bileşeninin ani değeri v_s aşağıda (54) eşitliğinde verilmiştir.

Nonlinear yük uçlarındaki geriliminin temel bileşeninin faz açısının değeri $\phi^{(1)}$ ise $v_s(\omega t)$ gerilimi ,

$$v_s(\omega t) = V_m^{(1)} \sin(\omega t + \phi^{(1)}) \quad (54)$$

olarak ifade edilir. Nonlinear yükün AC kaynaktan çektiği n.harmonik akımı fazör biçimde ($I_s^{(n)}$),

$$I_s^{(n)} = \left(\frac{4(1+\cos \alpha)}{\pi^2 R} \cos \frac{n\alpha}{2} \right) \frac{V^{(1)}}{n} \angle n \left(\phi^{(1)} - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (55)$$

olarak bulunur. Nonlinear yük akımının reel ve imajiner bileşenleri,

$$g_{k,r}^{m(n)} = \left(\frac{4(1+\cos \alpha_k^m)}{\pi^2 R} \cos \frac{n\alpha_k^m}{2} \right) \frac{V_k^{m(1)}}{n} \cos \left(n\phi_k^{m(1)} - n\frac{\alpha_k^m}{2} \right) \quad (56)$$

$$g_{k,i}^{m(n)} = \left(\frac{4(1+\cos \alpha_k^m)}{\pi^2 R} \cos \frac{n\alpha_k^m}{2} \right) \frac{V_k^{m(1)}}{n} \sin \left(n\phi_k^{m(1)} - n\frac{\alpha_k^m}{2} \right) \quad (57)$$

olarak ifade edilir. (Yumurtacı, 2000). Bu eşitliklerde, $\phi_k^{m(1)}$ k. baranın m fazının temel bileşen geriliminin sıfır referansa göre faz açısını göstermektedir.

Tablo 8. Örnek sistemde üç fazlı harmonik yük akış analizlerinin gerçekleştirildiği çeşitli çalışma durumları

İşletme Durumu	ŞEBEKE		LINEER YÜKLER		NONLINEER YÜKLER		AÇIKLAMA
	Dengeli	Dengesiz	Dengeli	Dengesiz	Dengeli	Dengesiz	
Mod1	*		*		*		
Mod2	*		*		*		(1)
Mod3	*		*			*	(2)
Mod4		*	*		*		(3)
Mod5	*			*	*		(4)

Bu çalışmada, hem kaynak hem yük bakımından dengeli ve dengesiz sistemde harmoniklerin etkinliğini incelemek için Tablo 8’de verilen beş değişik çalışma modu göz önüne alınmış ve her biri için üç fazlı harmonik yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki dengeli ve dengesiz durumların incelenebilmesi bakımından, hem şebekenin hem de lineer ve nonlineer yüklerin dengeli/dengesiz durumları ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Her bir çalışma modunda, yıldız bağlı transformatör ve generatör sargıları ile yüklerin yıldız noktaları direkt topraklıdır. Nonlineer yük olarak kullanılan yarı kontrollü doğrultuculara ait tristör tetikleme açıları bütün çalışma modlarında 15^0 alınmıştır.

Tablo 8’deki işletme modları ile ilgili açıklamalar:

- (1) 7 nolu barada üç fazlı, yıldız bağlı ve dengeli bir kapasite grubu bağlanmıştır. (Her bir fazdaki kapasitenin reaktansı $X_C = 4$ p.u. dir.)
- (2) 17 nolu baranın (nonlineer yük barası) c fazı, a ve b fazlarına göre %20 daha az yüklüdür.
- (3) 7 nolu barada üç fazlı, yıldız bağlı ve dengesiz bir kapasite grubu bağlanmıştır. (a, b ve c fazlarına bağlı kapasitelerin reaktansları,
 $X_{Ca} = 4$ p.u., $X_{Cb} = 3.4$ p.u. ve $X_{Cc} = 4$ p.u.’ dir.)
- (4) 7 nolu baranın (lineer yük barası) b fazı a ve c fazlarına göre %15 daha az yüklüdür.

Sayısal uygulamada tüm baralara ait gerilim harmoniklerinin (Temel bileşen ve 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonik) değerleri, hatlardaki güç kayıpları vb. yük akışı analiz değerlerinin tümü ve doktora tez çalışmasında geliştirilen üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizi algortimasına ilişkin hazırlanan MATLAB kodları (Yumurtacı, 2000) olarak verilen kaynak doktora tezinde verilmiştir. Bu bölümün

sonunda Ek 1’de örnek olarak Mod1 ve Mod2 için üç fazlı harmonik yük akışı analizi sonucunda elde edilen sistemdeki tüm baraların üç fazına ait temel bileşen ve 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonik gerilimlerinin efektif değerleri ve faz açıları ile tüm bara gerilimlerine ait toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) değerleri verilmiştir. Ek1’de Mod1 ve Mod2 için verilen analiz sonuçları incelendiğinde; 5. ve 11. harmonik bileşenlerinde faz sırasının değiştiği, sistemin tamamen dengeli olduğu Mod1’de 3. ve 9. harmonik bileşenlerde her üç faz harmonik gerilimlerinin faz açılarının aynı olduğu, nonlinear yüklerin dengesiz olduğu Mod2’de 3. ve 9. harmonik bileşenlerde her üç faz harmonik gerilimlerinin faz açılarında dengesizlikten dolayı küçük farkların olduğu görülmektedir.

Aşağıda üç fazlı harmonik yük akışı analizi sonuçları ile ilgili değerlendirme yapılması için incelenmek üzere şu baralar seçilmiştir: Nonlinear yükler için 17. ve 18. baralar, linear yükler için 7 nolu bara ve generatör uç barası için 13 nolu bara. Her bir mod için yapılan harmonik yük akış analizi sonunda örnek güç sisteminin 7, 13, 17 ve 18 nolu baralarına ait temel frekans ve harmonik bileşen gerilim değerlerinin efektif değerleri ve faz açıları, üç faz için birlikte verilmiştir. Bunlara ilave olarak, her bir işletme modu için bu bara gerilimlerine ait toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) değerleri her üç faz için aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Sayısal uygulamanın gerçekleştirildiği farklı beş çalışma modu için elde edilen analiz sonuçlarına göre aşağıdaki saptamalar yapılabilir:

Çeşitli çalışma modları için kıyaslama yapılırken örnek sistemdeki şebekenin simetrik olduğu, tüm linear ve nonlinear yüklerin dengeli olduğu çalışma modundaki (Çalışma Modu 1) toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) ve temel bileşen gerilimi ($V^{(1)}$) değerleri referans değer (%100) olarak alınmıştır.

Şebekenin dengeli (Simetrik), lineer ve nonlinear yüklerin dengeli olması halinde (MOD1), tüm baralarda göz önüne alınan bütün harmonik gerilimlerinin (3., 5., 7., 9. ve 11. harmonikler) mevcut olduğu, en yüksek genlikli harmonik gerilimlerinin ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) değerlerinin sistemdeki harmonik kaynaklarının bulunduğu nonlinear yük baralarında olduğu görülmektedir. Ayrıca, nonlinear yük baralarından uzaklaştıkça (nonlinear yük ile incelenen bara arasındaki hattın empedansı arttıkça) harmonik gerilimleri ve dolayısı ile THD_v değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 9. $V^{(1)}$ ve THD_v değerlerinin MOD1 sonuçları ile karşılaştırılması (MOD2)

Bara No	$(\%) \frac{(V^{(1)})_{MOD2}}{(V^{(1)})_{MOD1}}$			$(\%) \frac{(THD_v)_{MOD2}}{(THD_v)_{MOD1}}$		
	a	b	c	a	b	c
7	103.96	103.96	103.96	105.41	105.41	105.41
13	100.00	100.00	100.00	106.59	106.59	106.59
17	102.12	102.12	102.12	101.09	101.09	101.09
18	100.79	100.79	100.79	100.41	100.41	100.41

Şebekenin dengeli, lineer ve nonlinear yüklerin dengeli, 7 nolu lineer yük barasına yıldız bağlı dengeli kondansatör grubu bağlanması durumunda (MOD2), sisteme kondansatör ilave edilmesi nedeniyle incelenen 7., 13., 17. ve 18. baraların temel frekans gerilimleri yükselmiş ve beklendiği gibi en yüksek gerilim artışı kondansatörlerin bağlandığı 7 nolu lineer yük barasında olmuştur. Kondansatörlerin bağlandığı 7 nolu baraya yakın olan baralarda 7 nolu baraya kondansatör bağlanmasının etkisi daha fazla olmakta ve THD_v değerleri diğerlerine göre daha büyük değişimler göstermektedir. 7 nolu baraya paralel kondansatör bağlanması bu barada güç faktörü düzeltilmesi bakımından yararlı olurken bu barada THD_v değerinin yükselmesine dolayısıyla bara geriliminin

dalga şeklinin sinüs formundan daha da uzaklaşmasına neden olmaktadır(Tablo 9).

Tablo 10. $V^{(1)}$ ve THD_v değerlerinin MOD1 sonuçları ile karşılaştırılması (MOD3)

Bara No	$(\%) \frac{(V^{(1)})_{MOD3}}{(V^{(1)})_{MOD1}}$			$(\%) \frac{(THD_v)_{MOD3}}{(THD_v)_{MOD1}}$		
	a	b	c	a	b	c
7	99.97	100.00	100.08	99.41	99.41	85.46
13	100.00	100.00	100.02	100.00	100.00	85.15
17	99.96	100.02	100.17	99.71	99.69	82.19
18	99.99	99.99	100.04	99.99	99.99	98.44

Şebekenin dengeli, lineer yüklerin dengeli, 17 nolu nonlineer yük barasının c-fazının a ve b fazlarına oranla %20 daha az yüklenmesi durumunda (MOD3), 17 nolu baradaki nonlineer yükün c-faz yükünün %20 oranında azaltılması sistemi dengesiz çalışma durumuna getirmiş, incelenen baraların c-faz temel frekans gerilimlerinin yükselmesine neden olmuştur.

17 nolu baranın c fazındaki nonlineer yükün akımının azalmasına bağlı olarak yük akımının harmonik bileşenleri de azalmış bu durum ise incelenen baraların c fazının harmonik gerilimlerinin ve THD_v değerlerinin baz olarak alınan Mod1'deki değerlere oranla azalmasına neden olmuştur. Beklendiği gibi THD_v değerindeki en büyük azalma ve temel frekans gerilimindeki en büyük artış %20 daha az yüklenmiş olan 17 nolu baranın c-fazında gerçekleşmiştir (Tablo 10)

Tablo 11. $V^{(1)}$ ve THD_v değerlerinin MOD1 sonuçları ile karşılaştırılması (MOD4)

Bara No	$(\%) \frac{(V^{(1)})_{MOD4}}{(V^{(1)})_{MOD1}}$			$(\%) \frac{(THD_v)_{MOD4}}{(THD_v)_{MOD1}}$		
	a	b	c	a	b	c
7	103.81	105.31	103.79	105.64	105.91	105.68
13	100.00	100.31	100.01	106.49	107.93	106.51
17	102.04	102.90	102.04	101.11	101.23	101.12
18	100.77	101.15	100.79	100.40	100.50	100.40

Lineer ve nonlinear yüklerin dengeli, 7 nolu lineer yük barasına üç fazlı yıldız bağlı, dengesiz kondansatör grubu ($X_{Ca}=-j0.4$ p.u., $X_{Cb}=-j0.34$ p.u. ve $X_{Cc}=-j0.4$ p.u.) bağlanması durumunda (MOD4), 7 nolu baradaki dengesiz kondansatör grubu sebebiyle sistemdeki gerilimler de dengesiz hale gelmiş, 7 nolu baranın b-fazına bağlı kondansatör değerinin daha yüksek olması sebebiyle şebekeden çekilen reaktif gücün ve yük akımının azalması nedeniyle incelenen baraların b-faz temel frekans gerilimleri yükselmiştir.

Nonlinear yük baralarının da b-faz gerilimlerinin artması sonucunda harmonik akım ve gerilimleri de yükselmiş, bu durum incelenen baraların b-faz THD_v değerlerinin baz alınan Mod1 değerlerine oranla artmasına neden olmuştur. Mod1'deki temel frekans gerilimlerine göre en büyük artış beklendiği gibi dengesiz kapasite grubunun bulunduğu 7 nolu barada meydana gelmiştir (Tablo 11).

Tablo 12. $V^{(1)}$ ve THD_v değerlerinin MOD1 sonuçları ile karşılaştırılması (MOD5)

Bara No	$(\%) \frac{(V^{(1)})_{MOD5}}{(V^{(1)})_{MOD1}}$			$(\%) \frac{(THD_v)_{MOD5}}{(THD_v)_{MOD1}}$		
	a	b	c	a	b	c
7	100.16	101.66	99.58	99.87	99.20	100.36
13	100.00	100.40	100.05	100.08	100.51	99.78
17	100.06	101.00	99.84	100.00	99.93	100.05
18	100.00	100.46	100.02	100.00	100.05	100.00

Şebekenin dengeli, nonlinear yüklerin dengeli, 7 nolu lineer yük barasının b-fazının a ve c fazlarına oranla %15 daha az yüklenmesi durumunda (MOD5), 7 nolu baradaki lineer yük dengesizliği sebebiyle sistemdeki gerilimler de dengesiz hale gelmiş, 7 nolu baranın b-fazının yük akımının azalması nedeniyle incelenen baraların b-faz temel frekans gerilimleri yükselmiştir. Nonlinear yük baralarının da b-faz gerilimlerinin artması sonucunda harmonik akım ve gerilimleri de yükselmiş, her baranın temel frekans gerilimi ve harmonik gerilimlerinin Mod1' de elde edilen gerilimlere göre bağıl değişimlerine bağlı olarak incelenen baraların THDv değerlerinde azalış veya artış şeklinde küçük değişimler gözlenmiştir. Mod1 değerlerine oranla mutlak değer olarak, incelenen baraların THDv değerlerindeki en büyük değişimlerin b-fazında olduğu görülmektedir. Mod1'deki temel frekans gerilimlerine göre en büyük artış ise beklendiği gibi lineer yükün %15 azaltıldığı 7 nolu barada meydana gelmiştir (Tablo 12).

Sonuç

Bu çalışmada literatürde daha önce verilmiş olan harmonik bileşenler içermeyen sistemlerdeki lineer yükler için üç fazlı dengesiz yük akışı analizi algoritması ile harmonik bileşenler içeren dengeli sistemlerdeki dengeli nonlinear yükler için sistemin bir faz eşdeğeri yardımıyla gerçekleştirilen harmonik yük akışı analizi

algoritmaları birleştirilerek üç fazlı dengesiz nonlinear yükler içeren sistemler için yeni bir üç fazlı dengesiz harmonik yük akışı analizi algoritması geliştirilmiştir.

Geliştirilen üç fazlı harmonik yük akışı analizi algoritması bir örnek sistem üzerinde uygulanmış, dengeli ve dengesiz yüklenmelerin göz önüne alındığı beş farklı çalışma durumu için örnek sistemde üç fazlı harmonik yük akışı analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

Bu çalışmadaki sayısal uygulamada harmonik kaynağı, nonlinear yük olarak yarı kontrollü doğrultucu modellenmiştir. Bundan sonraki çalışmalar için öneri olarak; geliştirilen üç fazlı harmonik yük akışı analizinde kullanılacak nonlinear yük olarak diğer güç elektroniği devreleri (inverter, kesintisiz güç kaynakları vb.) incelenebilir. Bu farklı nonlinear yüklerin akımlarının matematiksel ifadeleri geliştirilen algoritmaya uygun olarak düzenlenerek, üç fazlı harmonik yük akışı analizi algoritmasının farklı nonlinear yükler için de kullanılması hedeflenebilir.

Kaynakça

Arrillaga, J. Watson, N. R. (2003). *Power System Harmonics*, John Wiley and Sons Ltd.

Arrillaga, J. ve Arnold, C.P., (1990), *Computer Analysis of Power Systems*, John Wiley & Sons.

Das, J.C. (2015). *Power System Harmonics and Passive Filter Design*, IEEE Press, WILEY.

Gök, Ü., (2023). *Elektrik Sistemlerinde Harmonik Olayların Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Grady, W.M., (1983). *Harmonic Power Flow Studies*, Ph. D. Thesis, Purdue University (U.S.A.)

Kocatepe, C., (1995). *Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu*, Doktora Tezi, (1995), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Masoum, M.A.S. Fuchs, E.F. (2015). *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, ELSEVIER Academic Press.

R. C. Dugan, R.C., McGranaghan, M.F. Santoso, S. Beaty, H.W., (2012). *Electrical Power System Quality*, McGraw Hill,.

Rashid, M., (2013). *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications*, Pearson.

Shepherd, W. ve Zand, P., (1978). *Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits*, Cambridge University Press.

Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982). *Harmonic Power Flow Studies Part I – Formulation and Solution*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 101 (6): 1257-1265.

Yumurtacı, R., (2000). *Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yumurtacı, R., Terkeş, M., Demirci, A., Tercan, S.M., (2025). A Detailed Framework for Modeling Three-Phase Power System Components in Phase Coordinates at Harmonic Frequencies, *12th International Artemis Scientific Research Congress* , vol.1, no.1, Bucuresti, Romania, pp.1-10.

Zobaa, A.F., Shaddy, H.E.A.A., (2017). *Power Quality in Future Electrical Power Systems*, The Institution of Engineering and Technology (IET).

Ek-1

Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi Sonuçlarına Örnek Olarak Mod1 ve Mod3'ün Bara Harmonik Gerilim Değerleri ve THDv Değerleri (Yumurtacı, 2000).

Çalışma Durumu : MOD1

BARA GERİLİMLERİNE AİT TOPLAM HARMONİK DİSTORSİYONU DEĞERLERİ

Bara No	THDv-a (%)	THDv-b (%)	THDv-c (%)
1	0.7127380	0.7127380	0.7127380
2	0.7312046	0.7312046	0.7312046
3	0.4018066	0.4018066	0.4018066
4	0.7024415	0.7024415	0.7024415
5	0.7650697	0.7650697	0.7650697
6	0.7681288	0.7681288	0.7681288
7	1.4628276	1.4628276	1.4628276
8	1.9398958	1.9398958	1.9398958
9	1.6009318	1.6009318	1.6009318
10	1.2711892	1.2711892	1.2711892
11	1.2064275	1.2064275	1.2064275
12	0.4320667	0.4320667	0.4320667
13	0.4054596	0.4054596	0.4054596
14	0.2427055	0.2427055	0.2427055
15	0.3946893	0.3946893	0.3946893
16	0.4001803	0.4001803	0.4001803
17	4.9405141	4.9405141	4.9405141
18	7.6306245	7.6306245	7.6306245
19	0.0002722	0.0002722	0.0002722
20	0.0002491	0.0002491	0.0002491
21	0.0001334	0.0001334	0.0001334
22	0.0002477	0.0002477	0.0002477
23	0.0002420	0.0002420	0.0002420

Çalışma Durumu : MOD1

BARA GERİLİMLERİ VE FAZ AÇILARI

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
1	1	0.9747238	0.9747238	0.9747238
1	2	0.9709009	0.9709009	0.9709009
1	3	0.9977992	0.9977992	0.9977992
1	4	0.9840062	0.9840062	0.9840062
1	5	0.9879490	0.9879490	0.9879490
1	6	0.9406727	0.9406727	0.9406727
1	7	0.9205053	0.9205053	0.9205053
1	8	0.9431206	0.9431206	0.9431206
1	9	0.9781393	0.9781393	0.9781393
1	10	0.9352301	0.9352301	0.9352301
1	11	0.9229398	0.9229398	0.9229398
1	12	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	13	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	14	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	15	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	16	1.0000000	1.0000000	1.0000000
1	17	0.9397964	0.9397964	0.9397964
1	18	0.9708976	0.9708976	0.9708976
1	19	1.0220680	1.0220680	1.0220680
1	20	1.0504618	1.0504618	1.0504618
1	21	1.0056636	1.0056636	1.0056636
1	22	1.0286346	1.0286346	1.0286346
1	23	1.0450440	1.0450440	1.0450440

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
1	1	-5.4883938	-125.4883938	114.5116062
1	2	-6.3070586	-126.3070586	113.6929414
1	3	-2.9189073	-122.9189073	117.0810927
1	4	-4.6539722	-124.6539722	115.3460278
1	5	-4.4834048	-124.4834048	115.5165952
1	6	-6.9603243	-126.9603243	113.0396757
1	7	-8.4963562	-128.4963562	111.5036438
1	8	-7.3158239	-127.3158239	112.6841761
1	9	-5.4461788	-125.4461788	114.5538212
1	10	-7.8810395	-127.8810395	112.1189605
1	11	-7.9087575	-127.9087575	112.0912425
1	12	-2.7432972	-122.7432972	117.2567028
1	13	-4.5363866	-124.5363866	115.4636134
1	14	-1.1959830	-121.1959830	118.8040170
1	15	-2.9068899	-122.9068899	117.0931101
1	16	-3.3403236	-123.3403236	116.6596764
1	17	-8.5862407	-128.5862407	111.4137593
1	18	-7.8183148	-127.8183148	112.1816852
1	19	0.0607558	-119.9392442	120.0607558
1	20	-1.8081848	-121.8081848	118.1918152
1	21	1.6538473	-118.3461527	121.6538473
1	22	-0.1207516	-120.1207516	119.8792484
1	23	0.0000000	-120.0000000	120.0000000

Çalışma Durumu : MOD1

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
3	1	0.0036348	0.0036348	0.0036348
3	2	0.0038871	0.0038871	0.0038871
3	3	0.0013465	0.0013465	0.0013465
3	4	0.0037887	0.0037887	0.0037887
3	5	0.0041204	0.0041204	0.0041204
3	6	0.0039559	0.0039559	0.0039559
3	7	0.0097862	0.0097862	0.0097862
3	8	0.0140473	0.0140473	0.0140473
3	9	0.0116675	0.0116675	0.0116675
3	10	0.0083683	0.0083683	0.0083683
3	11	0.0076550	0.0076550	0.0076550
3	12	0.0018739	0.0018739	0.0018739
3	13	0.0017678	0.0017678	0.0017678
3	14	0.0006124	0.0006124	0.0006124
3	15	0.0017231	0.0017231	0.0017231
3	16	0.0016531	0.0016531	0.0016531
3	17	0.0324922	0.0324922	0.0324922
3	18	0.0497752	0.0497752	0.0497752
3	19	0.0000019	0.0000019	0.0000019
3	20	0.0000018	0.0000018	0.0000018
3	21	0.0000006	0.0000006	0.0000006
3	22	0.0000017	0.0000017	0.0000017
3	23	0.0000017	0.0000017	0.0000017

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
3	1	-137.4685423	-137.4685423	-137.4685423
3	2	-138.0519617	-138.0519617	-138.0519617
3	3	-136.1830433	-136.1830433	-136.1830433
3	4	-137.6499232	-137.6499232	-137.6499232
3	5	-136.9173114	-136.9173114	-136.9173114
3	6	-137.3328816	-137.3328816	-137.3328816
3	7	-139.5583756	-139.5583756	-139.5583756
3	8	-139.7954304	-139.7954304	-139.7954304
3	9	-138.3883519	-138.3883519	-138.3883519
3	10	-139.3036680	-139.3036680	-139.3036680
3	11	-139.0504251	-139.0504251	-139.0504251
3	12	-136.9173117	-136.9173117	-136.9173117
3	13	-138.0519620	-138.0519620	-138.0519620
3	14	-136.1830440	-136.1830440	-136.1830440
3	15	-137.6499235	-137.6499235	-137.6499235
3	16	-137.4685426	-137.4685426	-137.4685426
3	17	-138.9230179	-138.9230179	-138.9230179
3	18	-136.5251849	-136.5251849	-136.5251849
3	19	-136.9173121	-136.9173121	-136.9173121
3	20	-138.0519624	-138.0519624	-138.0519624
3	21	-136.1830454	-136.1830454	-136.1830454
3	22	-137.6499239	-137.6499239	-137.6499239
3	23	-137.4685430	-137.4685430	-137.4685430

Çalışma Durumu : MOD1

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
5	1	0.0045060	0.0045060	0.0045060
5	2	0.0044996	0.0044996	0.0044996
5	3	0.0029387	0.0029387	0.0029387
5	4	0.0043787	0.0043787	0.0043787
5	5	0.0048025	0.0048025	0.0048025
5	6	0.0045804	0.0045804	0.0045804
5	7	0.0065438	0.0065438	0.0065438
5	8	0.0080110	0.0080110	0.0080110
5	9	0.0072896	0.0072896	0.0072896
5	10	0.0060606	0.0060606	0.0060606
5	11	0.0058542	0.0058542	0.0058542
5	12	0.0030021	0.0030021	0.0030021
5	13	0.0028128	0.0028128	0.0028128
5	14	0.0018371	0.0018371	0.0018371
5	15	0.0027372	0.0027372	0.0027372
5	16	0.0028168	0.0028168	0.0028168
5	17	0.0238519	0.0238519	0.0238519
5	18	0.0400111	0.0400111	0.0400111
5	19	0.0000015	0.0000015	0.0000015
5	20	0.0000014	0.0000014	0.0000014
5	21	0.0000009	0.0000009	0.0000009
5	22	0.0000014	0.0000014	0.0000014
5	23	0.0000014	0.0000014	0.0000014

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
5	1	-169.1460933	-49.1460934	70.8539066
5	2	-169.6330540	-49.6330540	70.3669459
5	3	-168.0656157	-48.0656157	71.9343842
5	4	-169.1555133	-49.1555133	70.8444867
5	5	-168.6651748	-48.6651748	71.3348251
5	6	-168.9502999	-48.9503000	71.0496999
5	7	-170.8569071	-50.8569072	69.1430928
5	8	-171.3021812	-51.3021813	68.6978186
5	9	-169.7677469	-49.7677470	70.2322530
5	10	-170.5631785	-50.5631786	69.4368213
5	11	-170.2602171	-50.2602172	69.7397828
5	12	-168.6651748	-48.6651748	71.3348251
5	13	-169.6330540	-49.6330540	70.3669459
5	14	-168.0656157	-48.0656157	71.9343842
5	15	-169.1555133	-49.1555133	70.8444867
5	16	-169.1460934	-49.1460934	70.8539066
5	17	-170.7237245	-50.7237246	69.2762754
5	18	-167.1699509	-47.1699509	72.8300491
5	19	-168.6651747	-48.6651748	71.3348251
5	20	-169.6330539	-49.6330540	70.3669459
5	21	-168.0656156	-48.0656157	71.9343841
5	22	-169.1555132	-49.1555133	70.8444866
5	23	-169.1460933	-49.1460934	70.8539065

Çalışma Durumu : MOD1

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
7	1	0.0034556	0.0034556	0.0034556
7	2	0.0034511	0.0034511	0.0034511
7	3	0.0022541	0.0022541	0.0022541
7	4	0.0033582	0.0033582	0.0033582
7	5	0.0036829	0.0036829	0.0036829
7	6	0.0035127	0.0035127	0.0035127
7	7	0.0050183	0.0050183	0.0050183
7	8	0.0061430	0.0061430	0.0061430
7	9	0.0055895	0.0055895	0.0055895
7	10	0.0046480	0.0046480	0.0046480
7	11	0.0044896	0.0044896	0.0044896
7	12	0.0023022	0.0023022	0.0023022
7	13	0.0021574	0.0021574	0.0021574
7	14	0.0014091	0.0014091	0.0014091
7	15	0.0020993	0.0020993	0.0020993
7	16	0.0021602	0.0021602	0.0021602
7	17	0.0182986	0.0182986	0.0182986
7	18	0.0306964	0.0306964	0.0306964
7	19	0.0000012	0.0000012	0.0000012
7	20	0.0000011	0.0000011	0.0000011
7	21	0.0000007	0.0000007	0.0000007
7	22	0.0000010	0.0000010	0.0000010
7	23	0.0000011	0.0000011	0.0000011

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
7	1	159.2963179	39.2963177	-80.7036819
7	2	158.6700071	38.6700069	-81.3299927
7	3	159.9821368	39.9821366	-80.0178631
7	4	159.2850735	39.2850734	-80.7149263
7	5	160.0592445	40.0592444	-79.9407553
7	6	159.6266417	39.6266415	-80.3733581
7	7	157.7575531	37.7575529	-82.2424467
7	8	157.4170120	37.4170118	-82.5829878
7	9	159.3270580	39.3270578	-80.6729418
7	10	157.9888456	37.9888454	-82.0111542
7	11	158.3015178	38.3015176	-81.6984820
7	12	160.0592445	40.0592444	-79.9407553
7	13	158.6700071	38.6700070	-81.3299928
7	14	159.9821368	39.9821366	-80.0178631
7	15	159.2850735	39.2850734	-80.7149263
7	16	159.2963179	39.2963178	-80.7036820
7	17	157.4032633	37.4032632	-82.5967366
7	18	162.1449090	42.1449089	-77.8550907
7	19	160.0592446	40.0592442	-79.9407552
7	20	158.6700072	38.6700068	-81.3299926
7	21	159.9821369	39.9821364	-80.0178630
7	22	159.2850736	39.2850732	-80.7149262
7	23	159.2963180	39.2963176	-80.7036818

Çalışma Durumu : MOD1

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
9	1	0.0015033	0.0015033	0.0015033
9	2	0.0016084	0.0016084	0.0016084
9	3	0.0005572	0.0005572	0.0005572
9	4	0.0015669	0.0015669	0.0015669
9	5	0.0017041	0.0017041	0.0017041
9	6	0.0016358	0.0016358	0.0016358
9	7	0.0040481	0.0040481	0.0040481
9	8	0.0058102	0.0058102	0.0058102
9	9	0.0048240	0.0048240	0.0048240
9	10	0.0034618	0.0034618	0.0034618
9	11	0.0031665	0.0031665	0.0031665
9	12	0.0007750	0.0007750	0.0007750
9	13	0.0007315	0.0007315	0.0007315
9	14	0.0002534	0.0002534	0.0002534
9	15	0.0007126	0.0007126	0.0007126
9	16	0.0006837	0.0006837	0.0006837
9	17	0.0134514	0.0134514	0.0134514
9	18	0.0206074	0.0206074	0.0206074
9	19	0.0000008	0.0000008	0.0000008
9	20	0.0000007	0.0000007	0.0000007
9	21	0.0000003	0.0000003	0.0000003
9	22	0.0000007	0.0000007	0.0000007
9	23	0.0000007	0.0000007	0.0000007

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
9	1	127.7346342	127.7346342	127.7346342
9	2	126.4239179	126.4239179	126.4239179
9	3	127.7444290	127.7444290	127.7444290
9	4	127.5748603	127.5748603	127.5748603
9	5	129.5929102	129.5929102	129.5929102
9	6	128.4931944	128.4931944	128.4931944
9	7	125.8626407	125.8626407	125.8626407
9	8	125.7591059	125.7591059	125.7591059
9	9	129.2318387	129.2318387	129.2318387
9	10	125.9882780	125.9882780	125.9882780
9	11	126.3075125	126.3075125	126.3075125
9	12	129.5929095	129.5929095	129.5929095
9	13	126.4239172	126.4239172	126.4239172
9	14	127.7444267	127.7444267	127.7444267
9	15	127.5748595	127.5748595	127.5748595
9	16	127.7346334	127.7346334	127.7346334
9	17	125.4550361	125.4550361	125.4550361
9	18	131.4557902	131.4557902	131.4557902
9	19	129.5929082	129.5929082	129.5929082
9	20	126.4239158	126.4239158	126.4239158
9	21	127.7444226	127.7444226	127.7444226
9	22	127.5748580	127.5748580	127.5748580
9	23	127.7346319	127.7346319	127.7346319

Çalışma Durumu : MOD1

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
11	1	0.0007398	0.0007398	0.0007398
11	2	0.0007390	0.0007390	0.0007390
11	3	0.0004826	0.0004826	0.0004826
11	4	0.0007190	0.0007190	0.0007190
11	5	0.0007884	0.0007884	0.0007884
11	6	0.0007519	0.0007519	0.0007519
11	7	0.0010746	0.0010746	0.0010746
11	8	0.0013153	0.0013153	0.0013153
11	9	0.0011964	0.0011964	0.0011964
11	10	0.0009953	0.0009953	0.0009953
11	11	0.0009613	0.0009613	0.0009613
11	12	0.0004928	0.0004928	0.0004928
11	13	0.0004620	0.0004620	0.0004620
11	14	0.0003017	0.0003017	0.0003017
11	15	0.0004494	0.0004494	0.0004494
11	16	0.0004625	0.0004625	0.0004625
11	17	0.0039214	0.0039214	0.0039214
11	18	0.0065785	0.0065785	0.0065785
11	19	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	20	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	21	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	22	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	23	0.0000002	0.0000002	0.0000002

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
11	1	96.1346242	-143.8653750	-23.8653761
11	2	95.2038875	-144.7961114	-24.7961126
11	3	96.4059066	-143.5940924	-23.5940937
11	4	96.1186955	-143.8813037	-23.8813047
11	5	97.4220133	-142.5779863	-22.5779873
11	6	96.7089118	-143.2910869	-23.2910885
11	7	94.5509164	-145.4490824	-25.4490835
11	8	94.2916511	-145.7083482	-25.7083489
11	9	97.0626774	-142.9373226	-22.9373233
11	10	94.7389397	-145.2610591	-25.2610603
11	11	95.1217429	-144.8782560	-24.8782572
11	12	97.4220133	-142.5779863	-22.5779873
11	13	95.2038876	-144.7961115	-24.7961126
11	14	96.4059066	-143.5940924	-23.5940937
11	15	96.1186956	-143.8813037	-23.8813047
11	16	96.1346242	-143.8653750	-23.8653761
11	17	93.4673441	-146.5326558	-26.5326560
11	18	100.6925716	-139.3074295	-19.3074295
11	19	97.4220128	-142.5779856	-22.5779876
11	20	95.2038869	-144.7961105	-24.7961128
11	21	96.4059058	-143.5940912	-23.5940941
11	22	96.1186950	-143.8813028	-23.8813050
11	23	96.1346237	-143.8653742	-23.8653764

Çalışma Durumu : MOD3

BARA GERİLİMLERİ VE FAZ AÇILARI

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
1	1	0.9746621	0.9745526	0.9749211
1	2	0.9708767	0.9708135	0.9712332
1	3	0.9978368	0.9976720	0.9979052
1	4	0.9839980	0.9839117	0.9842413
1	5	0.9879667	0.9878270	0.9881006
1	6	0.9406661	0.9405453	0.9409058
1	7	0.9202051	0.9205486	0.9212047
1	8	0.9426714	0.9432947	0.9439772
1	9	0.9780360	0.9780723	0.9784695
1	10	0.9349963	0.9352367	0.9358244
1	11	0.9227108	0.9228869	0.9234598
1	12	1.0000000	0.9998822	1.0000638
1	13	1.0000000	0.9998944	1.0001753
1	14	1.0000000	0.9998780	1.0000323
1	15	1.0000000	0.9998948	1.0001171
1	16	1.0000000	0.9998850	1.0001301
1	17	0.9393471	0.9399725	0.9414067
1	18	0.9707937	0.9708302	0.9712470
1	19	1.0219939	1.0219939	1.0219939
1	20	1.0504011	1.0504011	1.0504011
1	21	1.0055750	1.0055750	1.0055750
1	22	1.0285717	1.0285717	1.0285717
1	23	1.0450129	1.0450129	1.0450129

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
1	1	-5.4416936	-125.4368442	114.5958334
1	2	-6.2180848	-126.2132728	113.8287600
1	3	-2.8217064	-122.8171498	117.2009026
1	4	-4.5626272	-124.5588292	115.4751008
1	5	-4.3954947	-124.3915125	115.6325610
1	6	-6.8693265	-126.8682616	113.1639454
1	7	-8.4162968	-128.4206040	111.6717041
1	8	-7.2419471	-127.2489256	112.8752472
1	9	-5.3667178	-125.3653943	114.6823082
1	10	-7.8016406	-127.8037374	112.2753612
1	11	-7.8465967	-127.8489364	112.2219048
1	12	-2.6512041	-122.6477251	117.3648193
1	13	-4.4405375	-124.4356388	115.5850777
1	14	-1.0952732	-121.0917568	118.9179768
1	15	-2.8100651	-122.8062475	117.2109532
1	16	-3.3117822	-123.3072147	116.7090475
1	17	-8.5135440	-128.5188905	111.8615995
1	18	-7.7393564	-127.7378626	112.3119884
1	19	0.1596042	-119.8403958	120.1596042
1	20	-1.7020688	-121.7020688	118.2979312
1	21	1.7604827	-118.2395173	121.7604827
1	22	-0.0154878	-120.0154878	119.9845122
1	23	0.0000000	-120.0000000	120.0000000

Çalışma Durumu : MOD3

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
3	1	0.0036982	0.0037004	0.0030484
3	2	0.0039293	0.0039319	0.0031705
3	3	0.0014328	0.0014344	0.0009845
3	4	0.0038361	0.0038383	0.0032027
3	5	0.0041932	0.0041950	0.0036778
3	6	0.0040143	0.0040163	0.0034305
3	7	0.0096250	0.0096288	0.0085046
3	8	0.0137381	0.0137428	0.0123536
3	9	0.0116529	0.0116556	0.0109120
3	10	0.0082570	0.0082605	0.0072295
3	11	0.0075738	0.0075770	0.0066301
3	12	0.0019362	0.0019374	0.0016141
3	13	0.0018300	0.0018316	0.0013558
3	14	0.0006771	0.0006780	0.0003969
3	15	0.0017805	0.0017819	0.0013847
3	16	0.0017187	0.0017201	0.0013126
3	17	0.0321745	0.0321915	0.0271338
3	18	0.0497566	0.0497606	0.0490356
3	19	0.0000019	0.0000019	0.0000017
3	20	0.0000017	0.0000018	0.0000015
3	21	0.0000006	0.0000006	0.0000005
3	22	0.0000017	0.0000017	0.0000015
3	23	0.0000016	0.0000017	0.0000014

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
3	1	-137.3595724	-137.3720054	-136.0777346
3	2	-137.9343641	-137.9490896	-136.5126953
3	3	-136.2872319	-136.3091963	-133.9002712
3	4	-137.5051731	-137.5168022	-136.3395463
3	5	-136.7763973	-136.7834645	-135.9216413
3	6	-137.1883735	-137.1979040	-136.1657517
3	7	-139.2972184	-139.3063934	-138.4377118
3	8	-139.5137771	-139.5219141	-138.7318569
3	9	-138.1388063	-138.1424168	-137.6827170
3	10	-139.0532383	-139.0629162	-138.1544623
3	11	-138.8020208	-138.8114543	-137.9137131
3	12	-136.8677042	-136.8772159	-135.6684120
3	13	-138.0723901	-138.0920287	-136.0423070
3	14	-136.4815865	-136.5103561	-132.9171211
3	15	-137.6227831	-137.6383520	-135.9709586
3	16	-137.4871191	-137.5037349	-135.6655679
3	17	-138.6695895	-138.6821384	-137.7421885
3	18	-136.2848434	-136.2823392	-136.0354067
3	19	-136.6980679	-136.7030147	-136.1196964
3	20	-137.8140436	-137.8244336	-136.8641128
3	21	-136.1131224	-136.1288710	-134.5643572
3	22	-137.4033035	-137.4114811	-136.6202600
3	23	-137.2488278	-137.2575843	-136.3894087

Çalışma Durumu : MOD3

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
5	1	0.0044682	0.0044872	0.0040029
5	2	0.0044722	0.0044881	0.0038849
5	3	0.0028899	0.0029132	0.0026280
5	4	0.0043498	0.0043646	0.0038762
5	5	0.0047608	0.0047799	0.0044227
5	6	0.0045460	0.0045625	0.0041297
5	7	0.0066235	0.0066004	0.0054449
5	8	0.0081676	0.0081213	0.0065582
5	9	0.0072974	0.0072904	0.0066416
5	10	0.0061144	0.0060995	0.0050843
5	11	0.0058929	0.0058821	0.0049757
5	12	0.0029666	0.0029835	0.0027790
5	13	0.0027765	0.0027947	0.0024591
5	14	0.0018008	0.0018181	0.0016520
5	15	0.0027040	0.0027202	0.0024468
5	16	0.0027790	0.0027974	0.0025245
5	17	0.0240012	0.0239604	0.0192527
5	18	0.0400156	0.0400089	0.0393793
5	19	0.0000015	0.0000015	0.0000014
5	20	0.0000014	0.0000014	0.0000012
5	21	0.0000009	0.0000009	0.0000008
5	22	0.0000014	0.0000014	0.0000012
5	23	0.0000014	0.0000014	0.0000012

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
5	1	-169.3275114	-48.1048427	72.4638394
5	2	-169.6300452	-48.8106672	72.2138192
5	3	-168.8537721	-46.3066589	73.4643838
5	4	-169.2117167	-48.2670313	72.4948418
5	5	-168.8884031	-47.5719165	72.6370816
5	6	-169.0812659	-47.9707297	72.5395335
5	7	-169.5322298	-51.5932665	71.3412850
5	8	-169.4378728	-52.6591214	71.0263173
5	9	-169.3373145	-49.4859275	71.6855692
5	10	-169.4822211	-51.0178979	71.5673327
5	11	-169.3554371	-50.5132812	71.7699149
5	12	-169.1031813	-47.3045980	72.5737174
5	13	-170.1328234	-48.2152493	72.0855784
5	14	-169.0859109	-46.0295147	73.4045320
5	15	-169.6089480	-47.7888924	72.3889258
5	16	-169.6901869	-47.6694200	72.3686037
5	17	-169.8533865	-50.9634824	71.5417359
5	18	-166.7692212	-46.7896962	73.6595986
5	19	-168.5333057	-48.0158592	72.7442138
5	20	-168.8069475	-49.7931079	72.4349969
5	21	-168.4699683	-46.7667367	73.5656824
5	22	-168.5591551	-49.0578991	72.6761457
5	23	-168.7308943	-48.8256048	72.6264616

Çalışma Durumu : MOD3

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
7	1	0.0034426	0.0034254	0.0030704
7	2	0.0034423	0.0034302	0.0029803
7	3	0.0022374	0.0022141	0.0020159
7	4	0.0033481	0.0033354	0.0029735
7	5	0.0036679	0.0036488	0.0033922
7	6	0.0035004	0.0034850	0.0031678
7	7	0.0050524	0.0050882	0.0041777
7	8	0.0062111	0.0062786	0.0050322
7	9	0.0055868	0.0055988	0.0050942
7	10	0.0046708	0.0046958	0.0039010
7	11	0.0045055	0.0045244	0.0038176
7	12	0.0022903	0.0022727	0.0021314
7	13	0.0021450	0.0021282	0.0018863
7	14	0.0013968	0.0013792	0.0012671
7	15	0.0020879	0.0020722	0.0018768
7	16	0.0021474	0.0021294	0.0019363
7	17	0.0183590	0.0184351	0.0147733
7	18	0.0306905	0.0307039	0.0302151
7	19	0.0000011	0.0000011	0.0000011
7	20	0.0000011	0.0000011	0.0000009
7	21	0.0000007	0.0000007	0.0000006
7	22	0.0000011	0.0000011	0.0000009
7	23	0.0000011	0.0000011	0.0000009

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
7	1	160.5253698	39.2735457	-78.4545105
7	2	159.6740971	38.8135409	-78.7757345
7	3	161.9533085	39.3797424	-77.9027818
7	4	160.3570927	39.3812837	-78.4115517
7	5	161.3395777	40.0106879	-78.0866210
7	6	160.7912794	39.6580073	-78.2743276
7	7	157.1471594	39.1558197	-79.1685148
7	8	156.1589565	39.3249052	-79.2981620
7	9	159.7581840	39.8910487	-78.5887514
7	10	157.6715644	39.1567982	-79.0412519
7	11	158.1934052	39.3045529	-78.8685682
7	12	161.6181709	39.8093174	-78.1793550
7	13	160.2879842	38.3342374	-78.9596262
7	14	162.2386612	39.1585639	-77.9874681
7	15	160.8511270	39.0043199	-78.5635337
7	16	160.9753972	38.9294200	-78.5919069
7	17	157.3144985	38.3639861	-79.4106784
7	18	162.6757025	42.7073382	-76.6991537
7	19	160.8764176	40.3432794	-77.9298494
7	20	158.6593509	39.5969063	-78.4586718
7	21	161.4791864	39.7451244	-77.7594686
7	22	159.5386532	39.9996553	-78.1514557
7	23	159.7793543	39.8388873	-78.2199449

Çalışma Durumu : MOD3

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
9	1	0.0015294	0.0015303	0.0012629
9	2	0.0016259	0.0016270	0.0013132
9	3	0.0005930	0.0005936	0.0004093
9	4	0.0015865	0.0015874	0.0013265
9	5	0.0017338	0.0017345	0.0015239
9	6	0.0016599	0.0016606	0.0014210
9	7	0.0039812	0.0039827	0.0035189
9	8	0.0056818	0.0056837	0.0051106
9	9	0.0048178	0.0048188	0.0045159
9	10	0.0034156	0.0034170	0.0029917
9	11	0.0031328	0.0031341	0.0027438
9	12	0.0008005	0.0008010	0.0006695
9	13	0.0007573	0.0007580	0.0005622
9	14	0.0002803	0.0002807	0.0001660
9	15	0.0007364	0.0007369	0.0005741
9	16	0.0007108	0.0007114	0.0005445
9	17	0.0133191	0.0133260	0.0112340
9	18	0.0205996	0.0206011	0.0203078
9	19	0.0000008	0.0000008	0.0000007
9	20	0.0000007	0.0000007	0.0000006
9	21	0.0000003	0.0000003	0.0000002
9	22	0.0000007	0.0000007	0.0000006
9	23	0.0000007	0.0000007	0.0000006

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
9	1	128.0975461	128.0605723	131.8116317
9	2	126.8822716	126.8392556	130.6864749
9	3	127.3950380	127.3287647	134.6248831
9	4	128.0213651	127.9866135	131.4520364
9	5	129.9617764	129.9398579	132.8004986
9	6	128.9083137	128.8794491	132.0758129
9	7	126.7497498	126.7234349	128.9097925
9	8	126.7317724	126.7088170	128.5907513
9	9	129.9834297	129.9724561	131.4247939
9	10	126.8277147	126.7997370	129.1510062
9	11	127.1140765	127.0865960	129.4862007
9	12	129.6577917	129.6282845	133.6383237
9	13	126.5132900	126.4558882	131.9423806
9	14	126.8051333	126.7183285	137.5654290
9	15	127.6749751	127.6284331	132.5336520
9	16	127.7276817	127.6782462	133.0016250
9	17	126.2422587	126.2048013	128.9524925
9	18	132.1766064	132.1842575	132.8892130
9	19	130.2225080	130.2071695	132.1440900
9	20	127.2039791	127.1736450	129.7465994
9	21	127.9237097	127.8761980	132.6217471
9	22	128.3214081	128.2969796	130.6268595
9	23	128.4186961	128.3926678	130.9098864

Çalışma Durumu : MOD3

harm.No	Bara No	Va (p.u.)	Vb (p.u.)	Vc (p.u.)
11	1	0.0007319	0.0007383	0.0006579
11	2	0.0007334	0.0007381	0.0006387
11	3	0.0004724	0.0004806	0.0004320
11	4	0.0007129	0.0007178	0.0006372
11	5	0.0007795	0.0007866	0.0007268
11	6	0.0007447	0.0007505	0.0006787
11	7	0.0010914	0.0010801	0.0008954
11	8	0.0013484	0.0013262	0.0010786
11	9	0.0011987	0.0011955	0.0010916
11	10	0.0010066	0.0009991	0.0008361
11	11	0.0009694	0.0009640	0.0008181
11	12	0.0004852	0.0004915	0.0004566
11	13	0.0004545	0.0004604	0.0004042
11	14	0.0002941	0.0003002	0.0002715
11	15	0.0004425	0.0004481	0.0004021
11	16	0.0004545	0.0004609	0.0004149
11	17	0.0039526	0.0039330	0.0031670
11	18	0.0065801	0.0065770	0.0064777
11	19	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	20	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	21	0.0000001	0.0000002	0.0000001
11	22	0.0000002	0.0000002	0.0000002
11	23	0.0000002	0.0000002	0.0000002

harm.No	Bara No	TETA-a (deg.)	TETA-b (deg.)	TETA-c (deg.)
11	1	96.4758508	-142.3191825	-20.3237832
11	2	95.6970225	-143.5009729	-20.8041110
11	3	96.2102483	-141.2598453	-20.2732284
11	4	96.5699942	-142.5021729	-20.2592280
11	5	97.7433351	-140.9612483	-19.6227543
11	6	97.1015385	-141.8060411	-19.9693395
11	7	96.2078568	-145.8843189	-20.6404933
11	8	96.4187012	-146.8435770	-20.5525900
11	9	97.9256727	-142.2366655	-19.6162672
11	10	96.1827899	-145.3799882	-20.6197464
11	11	96.4114152	-144.7687024	-20.4526703
11	12	97.5641729	-140.6612562	-19.7680820
11	13	95.2501814	-142.8472342	-21.0877173
11	14	96.0049042	-140.9566398	-20.4029550
11	15	96.2229501	-141.9747803	-20.4940636
11	16	96.1591296	-141.8387426	-20.5367617
11	17	94.7267159	-146.4221787	-21.5218740
11	18	101.5588071	-138.4554332	-17.4974028
11	19	98.0386929	-141.4609039	-19.3771096
11	20	96.4250011	-144.5847524	-20.3152074
11	21	96.5489330	-141.7643686	-20.0537100
11	22	97.1377165	-143.3781503	-19.8574173
11	23	96.9948461	-143.1175266	-19.9602438

Çalışma Durumu : MOD3

BARA GERİLİMLERİNE AİT TOPLAM HARMONİK DİSTORSİYONU DEĞERLERİ

Bara No	THDv-a (%)	THDv-b (%)	THDv-c (%)
1	0.7135463	0.7142243	0.6219851
2	0.7317444	0.7324378	0.6191318
3	0.4006818	0.4013082	0.3513588
4	0.7031429	0.7037182	0.6120572
5	0.7662909	0.7668727	0.6970892
6	0.7691169	0.7697346	0.6833280
7	1.4542456	1.4541833	1.2500766
8	1.9215820	1.9208338	1.6690225
9	1.6000821	1.6003350	1.4835561
10	1.2657474	1.2658873	1.0843971
11	1.2026490	1.2028544	1.0357737
12	0.4321028	0.4325207	0.3940287
13	0.4054498	0.4060108	0.3452344
14	0.2411882	0.2416145	0.2143160
15	0.3947049	0.3951687	0.3451857
16	0.3999980	0.4005092	0.3508613
17	4.9262452	4.9252255	4.0607475
18	7.6299409	7.6301514	7.5115535
19	0.0002725	0.0002726	0.0002494
20	0.0002484	0.0002485	0.0002120
21	0.0001335	0.0001336	0.0001155
22	0.0002473	0.0002474	0.0002170
23	0.0002418	0.0002419	0.0002119

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATLARIN MESAFE RÖLELERİ İLE KORUNMASI VE MESAFE RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU

**RECEP YUMURTACI¹
ERDİN GÖKALP²**

Giriş

Elektrik güç sistemlerinde hatlar, nominal gerilimi 66 kV, 154 kV veya 380 kV olan iletim sistemindeki enerji iletim hatları, nominal gerilimi 10 kV, 31.5 kV, 34.5 kV gibi değerler alan orta gerilim (OG) seviyesindeki OG enerji dağıtım hatları ve nominal gerilimi 0.4 kV olan alçak gerilim (AG) seviyesindeki AG enerji dağıtım hatları olmak üzere başlıca üç gruba ayrılır.

İletim sistemindeki enerji iletim hatlarının korunmasında esas koruma rölesi olarak mesafe röleleri, yedek koruma rölesi olarak aşırı akım röleleri kullanılır. Enerji iletim hatlarının uzunluğu, mesafe rölelerinin çalışamayacağı kadar kısa ise esas koruma rölesi olarak diferansiyel röle kullanılır.

¹ Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3993-405X, ryumur@yildiz.edu.tr

² Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-1518-432X, gokalp@yildiz.edu.tr

OG dağıtım hatlarının korunmasında genellikle aşırı akım röleleri kullanılır. Eğer OG kabloları ile birlikte fiber optik haberleşme kabloları da tesis edilmişse, hatların haberleşme imkanı var ise OG dağıtım hatlarının korunmasında diferansiyel röleler de kullanılmaktadır. AG hatlarının korunmasında sigortalar kullanılmaktadır.

Bu bölümde iletim sistemindeki enerji iletim hatlarının mesafe röleleri ile korunması ele alınmıştır. Mesafe rölelerinin çalışma prensipleri, mesafe rölesi çeşitleri, mesafe rölelerinin karakteristik eğrileri bölüm içinde açıklanmış ve mesafe rölelerinin sistemde seçiciliği sağlayacak şekilde koordinasyonunun yapılması sayısal örnekler ile açıklanmıştır.

1. Mesafe Rölelerinin Çalışma Prensibi ve Başlıca Mesafe Rölesi Çeşitleri

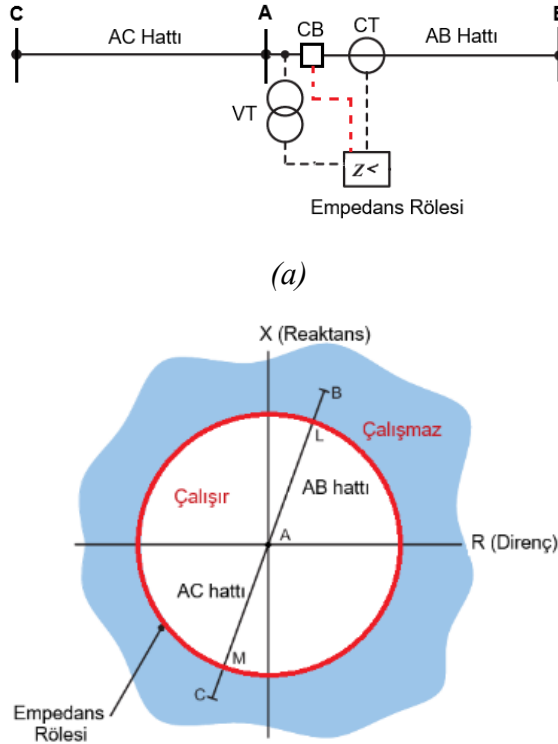
Mesafe röleleri, iletim hatlarının korunmasında yaygın olarak kullanılan ve röle girişlerine gelen gerilim ve akım sinyalleri yardımıyla sürekli olarak fazör biçimde gerilim/akım oranından empedans ölçen rölelerdir. Mesafe röleleri, ayarlandığı zaman gecikmesi boyunca rölenin ölçtüğü empedans değerinin rölenin ayarlandığı empedans değerine eşit veya daha küçük olması halinde zaman gecikmesinin sonunda bağlı olduğu kesiciye (CB) açma (trip) kumandası göndererek kesiciyi açtıran koruma röleleridir.

Şekil 1a'da görüldüğü üzere mesafe rölesinin gerilim girişlerine gerilim transformatörlerinin (VT) sekonderlerinden gelen üç gerilimi (V_a , V_b ve V_c) ve akım girişlerine ise akım transformatörlerinin (CT) sekonderlerinden gelen üç faz akımı (I_a , I_b ve I_c) uygulanır.

Mesafe rölelerinin empedans rölesi, reaktans rölesi, MHO rölesi (admitans rölesi) çeşitleri vardır. Bunlardan yönlü empedans rölesi ve MHO rölesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1b'de

empedans rölesinin R-X düzlemindeki karakteristik eğrisi verilmiştir. Bu şekildeki dairenin yarıçapı empedans rölesinin ayarlandığı empedans değerine eşittir. Empedans rölesinin $Z=V/I$ değerinden ölçtüğü empedans değeri, rölenin ayarlandığı empedans değerinden küçük veya eşit ise başka bir ifade ile rölenin ölçtüğü değeri dairenin içinde kalıyor ise röle çalışır. Eğer rölenin ölçtüğü empedans değeri, rölenin ayarlandığı empedans değerinden büyük ise (ölçülen empedans değeri dairenin dışında kalıyor ise) röle çalışmaz.

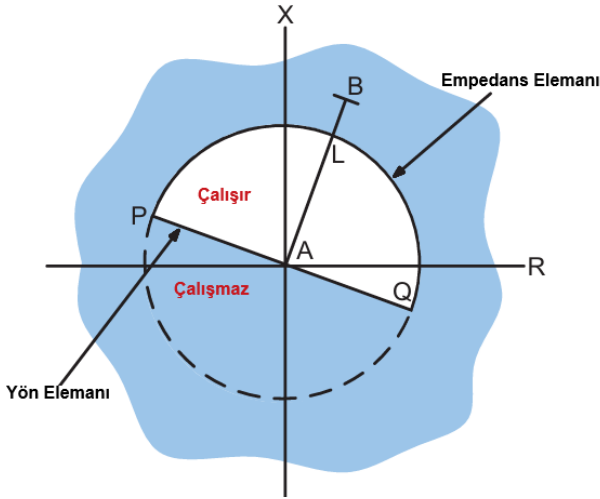
Şekil 1. Mesafe rölesinin sisteme bağlanması (a) ve empedans rölesinin (R-X) karakteristiği (Alstom, 2011)



Şekil 1’de gösterilen empedans rölesi AB hattının empedansının %85’inde çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 1b’de görüldüğü L, A’dan itibaren hattın %85 uzunluğundaki bir nokta olmak üzere bu empedans rölesi A-L arasındaki arızalarda çalışır, daha uzaktaki arızalarda çalışmaz.

Şekil 1b’de gösterilen empedans karakteristiği yönsüz olup her iki yöndeki arızalarda çalışır. Ring sistemde, hattın her iki ucundan beslendiği durumlarda seçiciliği sağlayabilmek için empedans rölelerinin yönlü olmaları istenir.

Şekil 2. Yönlü empedans rölesinin (R-X) karakteristiği (Alstom, 2011)



Şekil 1b’de gösterilen empedans rölesine akım yönünü seçen bir yön elemanı eklenirse oluşan yönlü empedans rölesinin R-X karakteristiği Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’deki beyaz yarım daire, arıza akımının ayarlanan ileri yönde olduğu ve ölçülen empedansın ayarlanan empedans değerine eşit veya daha küçük olduğu noktalardan oluşmaktadır. Bu durumda yönlü empedans rölesi PAQL ile gösterilen beyaz yarım daire içindeki tüm noktalarda

çalışır. Beyaz yarım daire dışındaki tüm noktalarda ise arıza akımının geri yönde olması ve/veya ölçülen empedansın rölenin ayarlandığı empedans değerinden büyük olması sebebiyle empedans rölesi çalışmaz. (Alstom, 2011).

Şekil 3’de çok yaygın olarak kullanılan bir mesafe rölesi olan MHO rölesinin R-X düzlemindeki karakteristiği gösterilmiştir. MHO rölesi karakteristiği sebebiyle doğrudan yönlü bir röle olup ayrıca yön elemanına gerek kalmaz. Şekil 3’de PQ ark direncini göstermektedir. (Alstom, 2011). Hat arızaları esnasında oluşan ark direncinin değerini hesaplanması için literatürde verilmiş ampirik formüller bulunmaktadır. Aşağıda A.R. van C. Warrington tarafından verilmiş ark direncinin hesaplanmasında kullanılan iki farklı ampirik formül verilmiştir:

$$R_{arc} = \frac{28,710}{I^{1,4}} * L \quad (1)$$

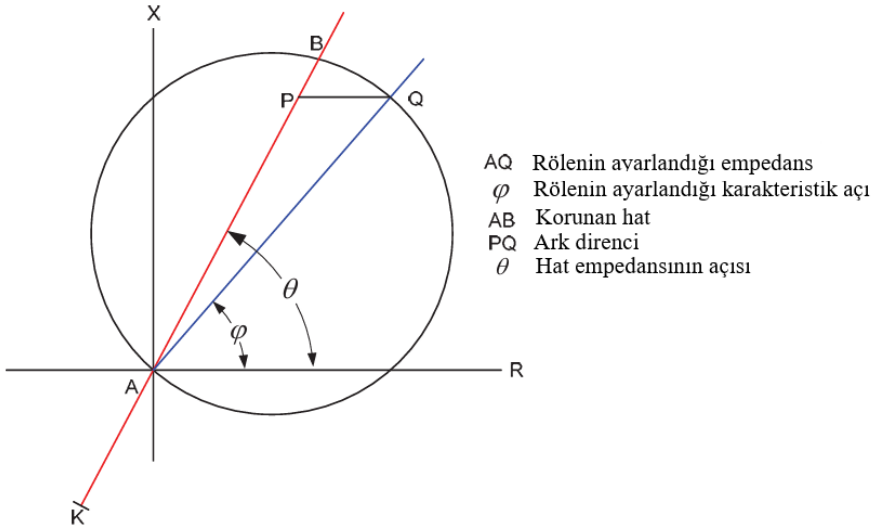
Bu eşitlikte; R_{arc} Ohm olarak ark direnci, I Amper olarak ark akımı ve L, metre olarak ark boyudur (Alstom, 2011). Ark direncinin hesaplanmasını sağlayan ve yine Warrington tarafından verilen diğer bir ampirik formül;

$$R_{arc} = \frac{8750*(d+3*v*t)}{I^{1,4}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte; R_{arc} Ohm olarak ark direnci, I Amper olarak ark akımı ve d, feet olarak iletkenler arası açıklık, v (mil/saat) olarak rüzgar hızı ve t saniye olarak süredir. (Yumurtacı, 1995).

En üstte koruma iletkeni bulunan ve demir direkli uzun havai hatlarda ark direnci ihmal edilecek kadar küçüktür. Ancak üzerinde koruma iletkeni olmayan kısa havai hatlarda ve arıza akımının 2000 A’ın altında olduğu havai hatlarda ark direnci dikkate alınmalıdır (Alstom, 2011).

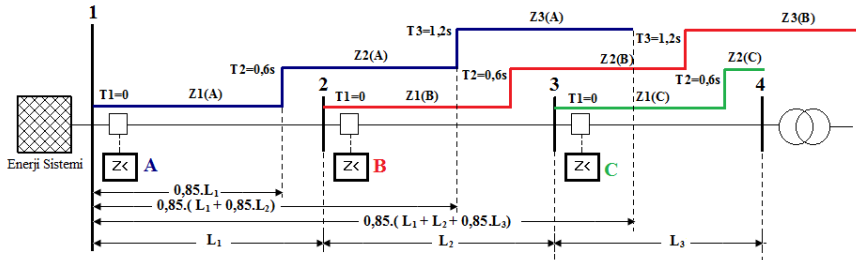
Şekil 3. MHO rölesi (Admitans Rölesi) (Alstom, 2011; Yumurtacı, 1995)



2. Mesafe Rölelerinde Kademe (Zone) Uygulaması

Enerji iletim hatlarının mesafe röleleri ile korunmasında kademeli koruma yapılır. Genellikle mesafe röleleri üç kademeli, bazı uygulamalarda üç ileri yöndeki kademe ve bir de geri yöndeki kademe olmak üzere dört kademeli mesafe koruması yapılmaktadır.

Şekil 4. Radyal şebekede 3 kademeli mesafe rölesi ile koruma



Şekil 4'de radyal şebekede 3 kademeli mesafe rölesi ile koruma gösterilmiştir (Ziegler, 2006), (Yumurtacı, 1995). Şekil 4'deki tüm hatların sadece uzunlukları farklı olup karakteristik

değerleri (km başına direnç (r), reaktans (x) ve empedans ($z=r+jx$) değerleri aynıdır. Şekilde görüldüğü üzere, 1-2 baraları arasındaki hattı koruyan A mesafe rölesinin 1.kademesi korunan hattın uzunluğunun %85'ine ayarlanmıştır. Akım ve gerilim transformatörlerinin dönüştürme hataları vb ölçme hatalarını tolere edebilmek amacıyla mesafe rölesinin 1.kademesi hattın tümünün uzunluğuna (tümünün empedansına) ayarlanmaz, %85'ine ayarlanır. 1.kademe zaman gecikmesiz olarak çalışır, arıza olduğunda hemen kesici açtırılır. 2.kademe ve 3.kademe zaman gecikmeli çalıştırılır. 2. Kademenin ve 3.kademenin ayarlanacağı hat uzunluğu (empedansı) konusunda ülkelerin iletim kuruluşlarına göre farklı yaklaşımlar olabilmektedir. 2. kademe ve 3.kademe zaman gecikmeleri kullanılan mesafe rölelerinin elektromekanik röle, statik röle veya nümerik röle olmasına göre farklılık göstermektedir. 2.kademe elektromekanik veya statik mesafe röleleri için 0.5s-0.7s ve nümerik mesafe röleleri için 0.4s, 3.kademe elektromekanik veya statik mesafe röleleri için 1s-1.2s, nümerik mesafe röleleri için 0.8s seçilebilmektedir.

Şekil 4'deki sistemde;

1 nolu baradaki A mesafe rölesinin koruduğu hattın empedansı Z_{12}

2 nolu baradaki B mesafe rölesinin koruduğu hattın empedansı Z_{23}

3 nolu baradaki C mesafe rölesinin koruduğu hattın empedansı Z_{23}

olmak üzere;

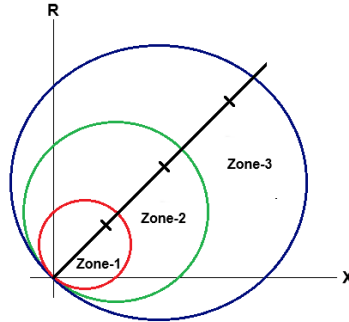
A rölesinin 1. Kademesi $Z_{A1} = 0,85 * Z_{12}$ empedansına ayarlanır.

A rölesinin 2. Kademesi $Z_{A2} = 0,85 * (Z_{12} + 0,85 * Z_{23})$ empedansına ayarlanır.

A rölesinin 3. Kademesi $Z_{A3} = 0,85 * (Z_{12} + Z_{23} + 0,85 * Z_{34})$ empedansına ayarlanır (Ziegler, 2006), (Yumurtacı, 1995).

Şekil 4'deki sistemde 3 nolu baradaki C mesafe rölesinin bağlı olduğu kesicinin hemen çıkışında bir arıza (kısa devre) meydana geldiğinde, C rölesi bu arızayı 1.kademede görüp zaman gecikmesiz olarak kesicisini açtırır. Eğer herhangi bir sebeple C rölesi çalışmaz veya kesici açmaz, arıza akımı kesilmezse aynı arızayı C rölesine artçı koruma yapan bir öndeki baradaki B rölesi 2.kademede görüp $T2=0,6s$ zaman gecikmesi ile kesicisini açtırarak temizler. Eğer bu arızayı B rölesi de temizlemezse arıza akımı devam ederse B rölesinin önündeki A rölesi 3.kademede görüp $T3=1,2 s$ gecikme ile temizler. Görüldüğü gibi mesafe röleleri ile hat korumasında bir rölenin birden fazla röle tarafından artçı (yedek) koruması yapılabilir.

Şekil 5. MHO rölesi ile 3 kademeli koruma

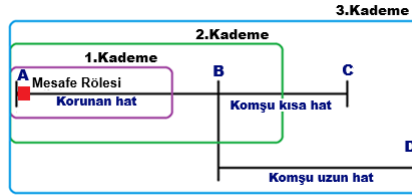


Şekil 5'de MHO tipi mesafe rölesi ile üç kademeli (3-zone) koruma gösterilmiştir (Alstom, 2011).

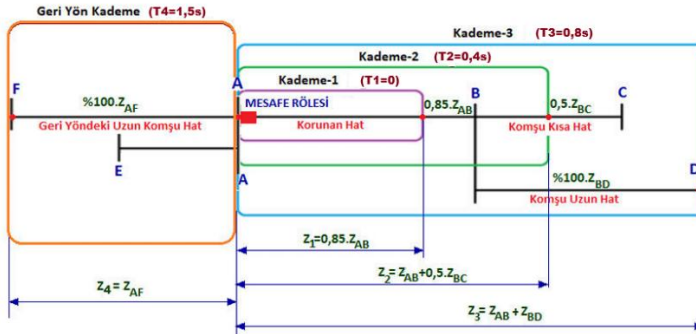
açması gerekir. Q rölesi F2 arızasını 1.kademede görüp zaman gecikmesiz olarak kesicisini açtırır. Eğer Q rölesi çalışmaz veya Q kesicisi açılmazsa Q'nun artçı korumasını yapan daha öndeki P rölesi F2 arızasını 2.kademede görüp T2 zaman gecikmesi ile P kesicisini açtırarak F2 arızasını temizler. F2 arızasını diğer yönde Y rölesi 2.kademede görüp T2 zaman gecikmesi ile Y kesicisini açtırarak temizler. Eğer F2 arızasında Y rölesi çalışmaz veya Y kesicisi açılmaz ise Y'nin artçı korumasını yapan bir öndeki X rölesi F2 arızasını 3.kademede görüp T3 zaman gecikmesi ile X kesicisini açtırarak temizler.

Yukarıda Şekil 7'de, Şekil 6'daki sistemdeki Q ve Y mesafe rölelerinin (MHO rölelerinin) kademeleri gösterilmiştir.

3. Ülkemizde TEİAŞ Tarafından Uygulanan 4 Kademeli Mesafe Rölesi ile İletim Hattı Koruması



(a)

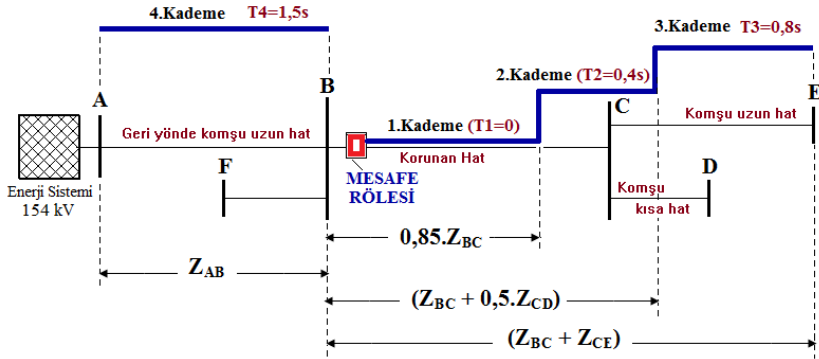


(b)

Şekil 8. 4 kademeli mesafe röleleri ile iletim hattı koruması

Şekil 8a'da ülkemizde TEİAŞ tarafından uygulanan 3 kademeli mesafe korumasının prensip şekli verilmiştir. (Arıkan vd. 2016a, Arıkan vd. 2016b) Bahsi geçen referansta açıklanan geri yöndeki 4.kademe eklendikten sonra kademelerin ayarlanacağı empedans değerleri ve kademe zaman gecikmelerinin de gösterildiği daha detaylı bir şema bu kitap bölümü çalışması kapsamında hazırlanmış ve yukarıda Şekil 8b'de verilmiştir. Şekil 8b'deki sistemin daha farklı bir gösterimi olarak ülkemizde TEİAŞ tarafından iletim hatlarının korunmasında kullanılan 4 kademeli mesafe koruması aşağıda Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9. Ülkemizde TEİAŞ tarafından uygulanan 4 kademeli mesafe koruması



Şekil 8b ve Şekil 9'da gösterilen 4 kademeli mesafe korumasında; ilk üç kademe ileri yönde, dördüncü kademe geri yöndedir. Kademelerin ayarlandığı empedans değerleri ve kademelerin zaman gecikmeleri aşağıda açıklanmıştır (Arıkan vd. 2016a, Arıkan vd. 2016b). Z_L korunan hattın empedansı, Z_{kk} komşu kısa hattın empedansı, Z_{ku} komşu uzun hattın empedansı ve Z_g geri yöndeki komşu uzun hattın empedansı olmak üzere;

- **Kademe-1:** $Z_1 = 0,85 \cdot Z_L$ Korunan hattın empedansının %85'i olarak hesaplanır. Kademe-1'de zaman gecikmesi yoktur. ($T_1 = 0$)
- **Kademe-2:** $Z_2 = (Z_1 + 0,5 \cdot Z_{kk})$ Korunan hattın empedansının tamamı ile komşu kısa hattın empedansının %50'si toplanarak hesaplanır, açma 400 ms zaman gecikmeli olarak yapılmaktadır ($T_2 = 0,4$ s).
- **Kademe-3:** $Z_3 = (Z_1 + Z_{ku})$ Korunan hattın empedansının tamamı ile komşu uzun hattın empedansının tamamı toplanarak hesaplanır, açma 800 ms zaman gecikmeli olarak yapılmaktadır ($T_3 = 0,8$ s).
- **Kademe-4 (Geri kademe):** $Z_4 = Z_g$ Geri yöndeki komşu hatlardan en uzun olanın empedansının tamamı alınarak hesaplanır, açma 1,5 s zaman gecikmeli olarak yapılmaktadır ($T_4 = 1,5$ s).

4. Mesafe Rölelerinin Ayarları ve Koordinasyonu ile İlgili Sayısal Uygulamalar

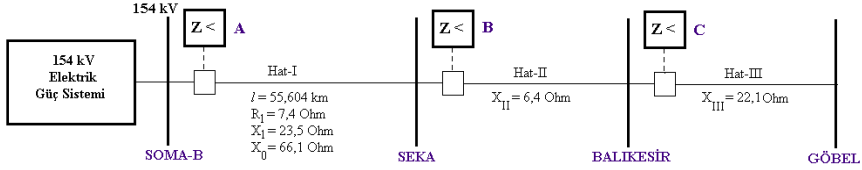
Sayısal Uygulama-1

Bu örnekte 154 kV iletim sisteminde kullanılan LZ-3 tipi elektromekanik mesafe rölelerinin ayar hesapları yapılmıştır. (Yumurtacı, 1995). LZ-3 tipi mesafe röleleri TEİAŞ (öncesinde Türkiye Elektrik Kurumu, T.E.K) 154 kV iletim sisteminde nümerik (dijital) mesafe rölelerinden önce yaygın olarak kullanılan elektromekanik rölelerdi. Günümüzde TEİAŞ'ın 154 kV ve 380 kV enerji iletim hatlarının korumasında yaygın olarak kullanılan nümerik mesafe rölelerinin ayar hesapları Örnek-2'de verilmiştir.

Mesafe koruma röleleri; başlatma, ölçme, yön ve zaman birimleri gibi ana ünitelerden oluşur. Bu örnekte ana ünitelerin ayarlarının yapılmasındaki genel prensipler anlatılmış ve 154 kV

sistemde kullanılmış olan LZ-3 elektromekanik mesafe rölelerinin ayarı için aşağıda bir sayısal örnek verilmiştir.

Şekil 10. Mesafe rölesi ayar hesapları yapılacak sistemin tek hat şeması (Yumurtacı, 1995).



Şekil 10'da görülen Soma-B barasına bağlı SEKA hattının (fiderinin) başındaki LZ-3 mesafe koruma rölesinin (Röle-A) ayar hesapları aşağıda yapılmıştır.

Çözüm:

Mesafe Rölesinin Başlatma Elemanlarının Ayarı

Başlatma elemanlarının ayarı ile mesafe rölelerinin başlatma (çalışmaya başlama) anı belirlenmiş olur. Bu alanın üst sınırını aşağıdaki kriterler belirler:

1. Arızalı hatlar açıldıktan sonra komşu hatlardaki mesafe rölelerinin uyardmaları kesilmelidir.
2. Paralel hatlarda bir hattın devreden çıkması ile diğer hattın aşırı yüklenebileceği unutulmamalıdır.
3. Toprak arızalarında sağlam fazlardaki mesafe röleleri faaliyete geçmemelidir.

Başlatma rölelerinin ayarlanacağı empedansın üst sınırı aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir (Yumurtacı, 1995):

Yıldız noktası izole sistemde veya empedans üzerinden topraklı sistemde,

$$Z = \frac{V_{F-F}}{2*1,25*I_B} \quad (\Omega/\text{faz}) \quad (3)$$

Yıldız noktası doğrudan topraklı sistemde;

$$Z = \frac{(V_{F-F})*0,85}{2*\sqrt{3}*(I_B+I_A)} \quad (\Omega/\text{faz}) \quad (4)$$

Bu eşitliklerde;

V_{F-F} : Minimum fazlar arası işletme gerilimi

$\frac{(V_{F-F})*0,85}{\sqrt{3}}$: Toprak arızası esnasında sağlam fazlardaki minimum faz-nötr gerilimi

I_B : Maksimum yük akımı

I_A : Toprak arızası esnasında sağlam fazlardaki maksimum dengeleme akımı

1,25 : Düzeltme faktörü

Türkiye’de 154 kV iletim sistemi doğrudan topraklı olduğundan, başlatma elemanlarının ayarı için T.E.K. tarafından 1980 yılı için sistem etüdü için belirlenmiş olan gerilim değeri $V = 1,028$ p.u. olup gerilimin kV olarak gerçek değeri;

$$V_{F-F} = 1,028 * 154 \text{ kV}$$

T.E.K. tarafından 1980 yılı için sistem etüdü için belirlenmiş olan (2) eşitliğindeki (I_A+I_B) değeri; $(I_A+I_B) = 1,196$ p.u. ve 154 kV, 100 MVA baz değerleri için akımın baz değeri;

$$I = \frac{100*10^6}{\sqrt{3}*V_{F-F}} = 375 \text{ A'dir.}$$

(2) eşitliğine göre başlatma ünitesinin ayarlanacağı empedans değeri (akım ve gerilim transformatörlerinin primer taraflarına göre);

$$Z_p = \frac{154 \cdot 10^3 \cdot 1,028 \cdot 0,85}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,196 \cdot 375} = 86,7 \quad \Omega/\text{faz}$$

Mesafe koruma rölesi akım ve gerilim transformatörlerinin (ölçü transformatörlerinin) sekonder tarafına bağlı olduğu için yukarıda hesaplanan primer empedans değerini, rölenin ölçü transformatörlerinin sekonder tarafta ölçtüğü sekonder empedans değerine (Z_s) çevirmek gerekir.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \text{ ve } Z_s = \frac{V_s}{I_s} \text{ olduğu için } \frac{Z_p}{Z_s} = \frac{\left(\frac{V_p}{I_p}\right)}{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)} = \left(\frac{V_p}{V_s}\right) * \left(\frac{I_s}{I_p}\right)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = GTO \text{ ve } \frac{I_p}{I_s} = ATO$$

$GTO = n_{VT}$ Gerilim transformatörünün dönüştürme oranı

$ATO = n_{CT}$ Akım transformatörünün dönüştürme oranı

olduğu için buna göre

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \frac{GTO}{ATO} \text{ olduğu için } Z_s = \left(\frac{ATO}{GTO}\right) * Z_p \text{ olur. Bu eşitlikte}$$

$K = \left(\frac{ATO}{GTO}\right)$ olarak hesaplanırsa; Z_s sekonder empedans değeri aşağıdaki eşitlikten kolayca hesaplanabilir:

$$Z_s = K * Z_p$$

A mesafe koruma rölesinin bağlı olduğu fiderde, A rölesi 400/5 A'lık akım transformatörleri ve 154/0,1 kV'luk gerilim transformatörlerinin sekonderlerine bağlı olduğu için;

$$ATO = 400/5 = 80 \text{ ve } GTO = 154/0,1 = 1540 \text{ olup } K \text{ çarpanı;}$$

$K = ATO/GTO = 80/1540 = 0,052$ olur ve empedansın sekonder değeri;

$$Z_s = K * Z_p = 0,052 * 86,7 = 4,5 \quad \Omega$$

Sonuç olarak A mesafe koruma rölesinin R, S ve T fazlarındaki başlatma elemanları;

$Z_R = Z_S = Z_T = 4,5 \Omega$ sekonder empedans değerine ayarlanacaktır (Yumurtacı, 1995).

Mesafe Rölesinin Kademe Reaktanslarının Ayarı

Mesafe koruma rölesinde kaç kademe (zone) varsa o kadar kademe reaktansı hesaplamak gerekir. A mesafe rölesi 1.kademede Soma-B hattının tamamını korumalıdır. Ancak ölçme hatası nedeniyle 1.kademe reaktansını hesaplarken hattın tamamı yerine %85'ini almak daha uygun olmaktadır. A rölesinin 1.kademe koruyacağı hat Soma-B ile SEKA baraları arasındaki hat-I olup hattın reaktansının pozitif bileşen değeri $X_I = 23,5 \text{ Ohm}$ olduğu için A rölesinin 1.kademesinin ayarlanacağı reaktansın primer değeri;

$X_{Ip} = 23,5 * 0,85 \text{ Ohm}$ olur. Bu primer reaktans değerinin A rölesinin bağlı olduğu ölçü transformatörlerinin sekonder tarafındaki sekonder reaktans değeri (A rölesinin 1.kademesinin ayarlanacağı değer);

$X_{Is} = X_{Ip} * K = 23,5 * 0,85 * 0,052 = 1,0387 \text{ Ohm}$ olur (Yumurtacı, 1995).

Mesafe rölesinin ikinci kademesi, komşu hattın mesafe rölesinin birinci kademesine artçılık (yedek koruma) yapar. Soma-B'nin SEKA çıkışındaki A mesafe rölesi, SEKA'nın Balıkesir çıkışındaki B mesafe rölesine artçılık yapacaktır. Yani, SEKA-Balıkesir arasındaki arızalarda B mesafe rölesi çalışmazsa A mesafe rölesi arızayı 2.kademede (0.7 saniye civarında) temizleyecektir. Buna göre A mesafe rölesinin ikinci kademe reaktansı (akım ve gerilim transformatörlerinin primer taraflarına göre);

$$X_{IIp} = 0,85 * (X_I + X_{II} * 0,85)$$

bağıntısı ile hesaplanır. (Yumurtacı, 1995.) Bu bağıntıda, parantez içindeki $X_{II} \cdot 0,85$ ifadesi, B mesafe rölesinin birinci kademe ayar reaktansı, parantez dışındaki 0,85 çarpanı ise A mesafe rölesinin ikinci kademe ayarındaki emniyet katsayısıdır. Bu bağıntıdaki X_I birinci hattın toplam reaktansıdır. X_{IIp} primer reaktans değeri sekondere indirgenirse, bu rölenin ayarlanacağı ikinci kademe (sekonder) reaktans değeri;

$X_{II_s} = X_{IIp} \cdot K = 0,85 \cdot (23,5 + 6,4 \cdot 0,85) \cdot 0,052 = 1,28 \text{ Ohm}$ olur. (Yumurtacı, 1995.)

Mesafe rölelerinin ikinci kademesi hesaplanırken, komşu baradan çıkan en kısa hat dikkate alınmalıdır. Eğer uzun hatta göre hesap yapılırsa ikinci kademe menzili, kısa hattan sonra gelen baradan beslenen fiderden gelen arızaları içine alır ve bu da koordinasyonu bozabilir.

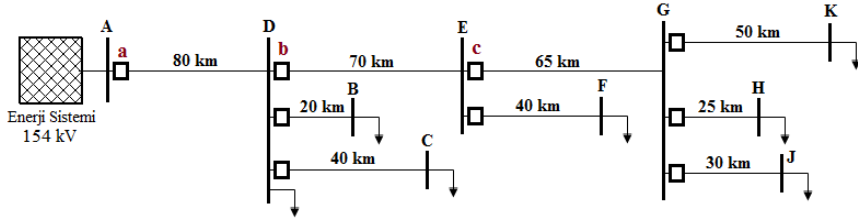
A mesafe rölesi üçüncü kademede B rölesinin ikinci kademesine artçılık yapacaktır. Yani Balıkesir-Göbel arasındaki arızada, C mesafe rölesi bu arızayı birinci kademe içinde, B mesafe rölesi ikinci kademede çalışmazsa, arıza A mesafe rölesi tarafından üçüncü kademede temizlenecektir. Elektromekanik mesafe röleleri ile korunan hatlarda üçüncü kademenin zaman ayarı genellikle 1 ile 1,5 saniye arasında seçilir. Buna göre A mesafe rölesinin üçüncü kademe (sekonder) reaktans değeri;

$X_{III_s} = X_{IIIp} \cdot K = 0,85 \cdot (23,5 + 6,4 + 0,85 \cdot 22,1) \cdot 0,052 = 2,15 \text{ Ohm}$ olur. (Yumurtacı, 1995.)

Sayısal Uygulama -2

Bu örnekte günümüzde TEİAŞ'ın 154 kV iletim sisteminde de kullanılan MHO karakteristik eğrisine sahip nümerik mesafe rölelerinin kademe (zone) ayar hesapları yapılmıştır.

Şekil 11. Mesafe rölelerinin koordinasyonunun yapılacağı örnek sistem



Yukarıda Şekil 11'deki sistemde hat uzunlukları şekil üzerinde verilmiştir. Tüm hatların karakteristik özellikleri aynı olup, tüm hatlar için $r = 0,135 \Omega/\text{km}$ ve $x = 0,4 \Omega/\text{km}$ 'dir. Sistemdeki tüm mesafe röleleri 600/5 A'lık akım transformatörleri ve 154/0,1 kV'luk gerilim transformatörleri üzerinden bağlanmıştır. Verilen bilgiler yardımıyla;

- a, b ve c mesafe rölelerinin koordinasyonunu yapınız. (a, b ve c mesafe rölelerinin 1., 2., 3. ve 4.(geri) kademelerinin ayarlanacağı empedans değerlerini ve zaman gecikmelerini hesaplayınız.)
- A barasından 30 km ilerideki F1 arızasında ve E barasından 60 km ilerideki F2 arızasında hangi mesafe rölelerinin arızayı kaçınıcı kademelerinde göreceğini ve kaç saniye gecikme ile bağlı oldukları kesicilerine açma (trip) kumandası vereceklerini belirleyiniz.

Çözüm:

a) Mesafe rölesi-a için ayar hesapları :

a rölesinin 1.kademe ayarı:

Akım transformatörü dönüştürme oranı: $ATO=600/5=120$

Gerilim transformatörü dönüştürme oranı:
 $GTO=154/0,1=1540$

Korunan hat: 80 km uzunluğundaki AD hattı

$$l_{a1} = 0,85 * l_{AD} = 0,85 * 80 = 68 \text{ km}$$

$$Z_{a1} = \frac{0,85 * l_{AD} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)} = \frac{0,85 * 80 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$Z_{a1} = 2,237 \angle 71,35^0 \Omega$ ve **$T1_a = 0$** (1.kademede zaman gecikmesi yok, röle kesiciye ani açma kumandası verecek)

a rölesinin 2.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-a için komşu en kısa hat: 20 km uzunluğundaki DB hattı

$$l_{a2} = (l_{AD} + 0,5 * l_{BD}) = (80 + 0,5 * 20) = 90 \text{ km}$$

$$Z_{a2} = \frac{(l_{AD} + 0,5 * l_{BD}) * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{a2} = \frac{90 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$**$Z_{a2} = 2,96 \angle 71,35^0 \Omega$** ve **$T2_a = 0,4s$**$$

a rölesinin 3.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-a için komşu en uzun hat: 70 km uzunluğundaki DE hattı

$$l_{a3} = (l_{AD} + l_{DE}) = (80 + 70) = 150 \text{ km}$$

$$Z_{a3} = \frac{l_{a3} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{a3} = \frac{150 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$Z_{a3} = 4,934 \angle 71,35^0 \Omega \text{ ve } T3_a = 0,8s$$

Mesafe rölesi-a için geri yönde hat yok. Bu nedenle 4.kademe devre dışı olacak, ayarlanmayacak.

Mesafe rölesi-b için ayar hesapları:

b rölesinin 1.kademe ayarı:

Korunan hat: 70 km uzunluğundaki DE hattı

$$l_{b1} = 0,85 * l_{DE} = 0,85 * 70 = 59,5 \text{ km}$$

$$Z_{b1} = \frac{0,85 * l_{DE} * (r + j \cdot x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)} = \frac{0,85 * 70 * (0,135 + j \cdot 0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$Z_{b1} = 1,957 \angle 71,35^0 \Omega$ ve $T1_b = 0$ (1.kademede zaman gecikmesi yok, röle kesiciye ani açma kumandası verecek)

b rölesinin 2.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-b için komşu en kısa hat: 40 km uzunluğundaki EF hattı

$$l_{b2} = (l_{DE} + 0,5 * l_{EF}) = (70 + 0,5 * 40) = 90 \text{ km}$$

$$Z_{b2} = \frac{(l_{DE} + 0,5 * l_{EF}) * (r + j \cdot x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{b2} = \frac{90 * (0,135 + j \cdot 0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$Z_{b2} = 2,96 \angle 71,35^0 \Omega \text{ ve } T2_b = 0,4s$$

b rölesinin 3.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-b için komşu en uzun hat: 65 km uzunluğundaki EG hattı

$$l_{b3} = (l_{DE} + l_{EG}) = (70 + 65) = 135 \text{ km}$$

$$Z_{b3} = \frac{l_{b3} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{b3} = \frac{135 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$Z_{b3} = 4,441 \angle 71,35^0 \Omega \text{ ve } T3_b = 0,8s$$

b rölesinin 4.kademe (geri yön) ayarı:

Mesafe rölesi-b için geri yöndeki komşu en uzun hat: 80 km uzunluğundaki AD hattı

$$l_{b4} = l_{AD} = 80 \text{ km}$$

$$Z_{b4} = \frac{l_{b4} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{b4} = \frac{80 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$Z_{b4} = 2,631 \angle 71,35^0 \Omega \text{ ve } T4_b = 1,5s$$

(Geri yönde bir kademe olan 4.kademenin aktif edilebilmesi için b rölesinin ters yönden de (şekildeki sistemde sağ taraftan da) beslenebilmesi gerekir. Şekildeki sistemde b rölesi tek yönden sadece soldaki enerji sisteminden beslendiği için 4.kademenin aktif edilmemesi, devreye alınmaması uygundur. Eğer ilerleyen zamanlarda b rölesinin bulunduğu hat çift yönden beslenirse burada yapılan 4.kademe ayar değerlerine göre 4.kademe devreye alınabilir.)

Mesafe rölesi-c için ayar hesapları:

c rölesinin 1.kademe ayarı:

Korunan hat: 65 km uzunluğundaki EG hattı

$$l_{c1} = 0,85 * l_{EG} = 0,85 * 65 = 55,25 \text{ km}$$

$$Z_{b1} = \frac{0,85 * l_{DE} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)} = \frac{0,85 * 65 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$Z_{b1} = 1,817 \angle 71,35^0 \Omega$ ve $T1_b = 0$ (1.kademe zaman gecikmesi yok, röle kesiciye ani açma kumandası verecek)

c rölesinin 2.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-c için komşu en kısa hat: 25 km uzunluğundaki GH hattı

$$l_{c2} = (l_{EG} + 0,5 * l_{GH}) = (65 + 0,5 * 25) = 77,5 \text{ km}$$

$$Z_{c2} = \frac{(l_{EG} + 0,5 * l_{GH}) * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{c2} = \frac{77,5 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$**$Z_{c2} = 2,549 \angle 71,35^0 \Omega$ ve $T2_c = 0,4s$**$$

c rölesinin 3.kademe ayarı:

Mesafe rölesi-c için komşu en uzun hat: 50 km uzunluğundaki GK hattı

$$l_{c3} = (l_{EG} + l_{GK}) = (65 + 50) = 115 \text{ km}$$

$$Z_{c3} = \frac{l_{c3} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{c3} = \frac{115 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$**$Z_{c3} = 3,783 \angle 71,35^0 \Omega$ ve $T3_c = 0,8s$**$$

c rölesinin 4.kademe (geri yön) ayarı:

Mesafe rölesi-c için geri yöndeki komşu en uzun hat: 70 km uzunluğundaki DE hattı

$$l_{c4} = l_{DE} = 70 \text{ km}$$

$$Z_{c4} = \frac{l_{c4} * (r + j.x)}{\left(\frac{GTO}{ATO}\right)}$$

$$Z_{c4} = \frac{70 * (0,135 + j.0,4)}{\left(\frac{1540}{120}\right)}$$

$$Z_{c4} = 2,303 \angle 71,35^0 \Omega \text{ ve } T_{4c} = 1,5s$$

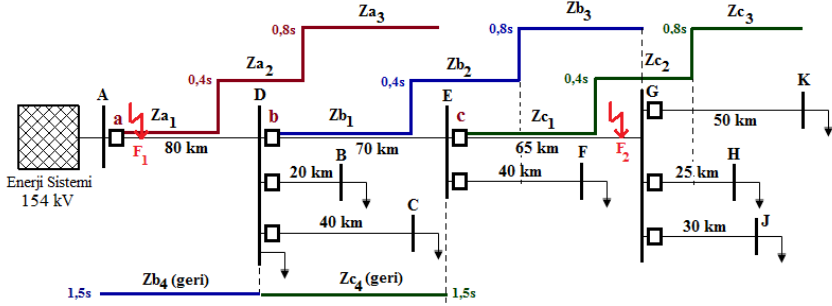
(Geri yönde bir kademe olan 4.kademenin aktif edilebilmesi için c rölesinin ters yönden de (şekildeki sistemde sağ taraftan da) beslenebilmesi gerekir. Şekildeki sistemde c rölesi tek yönden sadece soldaki enerji sisteminden beslendiği için 4.kademenin aktif edilmemesi, devreye alınmaması uygundur. Eğer ilerleyen zamanlarda c rölesinin bulunduğu hat çift yönden beslenirse burada yapılan 4.kademe ayar değerlerine göre 4.kademe devreye alınabilir.)

Sonuçlar:

Röle	Kademe (Zone)							
	1	2	3	4 (Geri)	T1	T2	T3	T4
a	68 km	90 km	150 km	-	0	0,4 s	0,8 s	-
b	59,5 km	90 km	135 km	80 km	0	0,4 s	0,8 s	1,5 s
c	55,25 km	77,5 km	115 km	70 km	0	0,4 s	0,8 s	1,5 s

Yukarıda hesaplanan a, b ve c mesafe rölelerinin kademe ayar değerleri ve zaman gecikmeleri aşağıda Şekil 12’de gösterilmiştir.

Şekil 12. Mesafe rölelerinin koordinasyonunun yapıldığı örnek sistem



- b) A barasından 30 km ilerideki F1 arızasında ve E barasından 60 km ilerideki F2 arızasında hangi mesafe rölelerinin arızayı kaçınıcı kademelerinde göreceğinin ve kaç saniye gecikme ile bağlı oldukları kesicilerine açma (trip) kumandası vereceklerinin belirlenmesi:

Yukarıda Şekil 12’de görüldüğü üzere, A barasından 30 km ilerideki F1 arızasında (kısa devresinde) A barasına bağlı a mesafe rölesi F1 arızasını 1.kademede görüp zaman gecikmesiz ($T_1 = 0$), ani olarak kesicisini açtırarak F1 arızasını temizler. Eğer DE hattı sağ taraftan da besleniyor ise D barasındaki b mesafe rölesinin 4.kademesi devrede olacağı için b mesafe rölesi F1 arızasını geri yönde 4.kademede görüp $T_4 = 1,5$ saniye gecikme ile bağlı olduğu kesiciyi açtırır.

E barasından 60 km ilerideki F2 arızasında (kısa devresinde) E barasına bağlı c mesafe rölesi F2 arızasını 1.kademede ($L_{c1} = 0,85 \cdot 65 = 51$ km) göremeyeceği için 2.kademe görüp $T_2 = 0,4$ saniye gecikme ile kesicisini açtırarak F2 arızasını temizler. Eğer herhangi bir sebeple c rölesi çalışmaz ve kesicisini açtıramaz ise o taktirde aynı F2 arızası gören bir öndeki b rölesi bu arızayı

3.kademesinde görüp $T_3=0,8$ saniye gecikme ile kesicisini açtırarak arızayı temizler.

Kaynakça

Alstom (2011), Network Protection & Automation Guide Protective Relays, Measurements & Control. Alstom Grid Worldwide Contact Centre.

Anderson P. M., Henville C., Rifaat R., Johnson B., Meliopoulos S.,(2022). Power System Protection, Second Edition, IEEE Press WILEY (IEEE Press Series on Power Energy Systems).

Arıkan O., Gürsanlı Ö., Aydın H., A. (2016a). Yüksek Gerilim Enerji İletim Hatlarını Koruma Uygulaması, *CIGRE Türkiye 2016 Güç Sistemleri Konferansı*, 15-16 Kasım 2016.

Arıkan O., Gürsanlı Ö., Aydın H., Yağmur E. A. (2016b). *An Algorithm for Transmission Distance Relay Setting Calculation Under Network Topology Change*, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering (IJIREEICE) , cilt.4, sa.5, ss.508-513.

Yumurtacı, R., (1995). Elektrik Güç Sistemlerinde Hatların Mesafe Röleleri ile Korunması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ziegler, G., (2006). Numerical Distance Protection Principles and Applications, SIEMENS.

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HATLARIN AŞIRI AKIM RÖLELERİ İLE KORUNMASI VE AŞIRI AKIM RÖLELERİNİN KOORDİNASYONU

RECEP YUMURTACI¹

Giriş

Mesafe röleleri ile iletim hatlarının korunmasının incelendiği önceki bölümde, elektrik güç sistemlerinde hatların; nominal gerilimi 66 kV, 154 kV veya 380 kV olan iletim sistemindeki enerji iletim hatları, nominal gerilimi 10 kV, 31.5 kV, 34.5 kV gibi değerler alan orta gerilim (OG) seviyesindeki OG enerji dağıtım hatları ve nominal gerilimi 0.4 kV olan alçak gerilim (AG) seviyesindeki AG enerji dağıtım hatları olmak üzere başlıca üç gruba ayrıldığı ve iletim sistemindeki enerji iletim hatlarının korunmasında esas koruma rölesi olarak mesafe rölelerinin, yedek koruma rölesi olarak aşırı akım rölelerinin kullanıldığı, enerji iletim hatlarının uzunluğu, mesafe rölelerinin çalışamayacağı kadar kısa ise esas koruma rölesi olarak diferansiyel rölelerin kullanıldığı belirtilmiştir.

¹ Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-3993-405X, ryumur@yildiz.edu.tr

OG dağıtım hatlarının korunmasında genellikle aşırı akım röleleri kullanılır. Eğer OG kablolarıyla birlikte fiber optik haberleşme kabloları da tesis edilmişse, hatların haberleşme imkanı var ise OG dağıtım hatlarının korunmasında diferansiyel röleler de kullanılmaktadır. Bu bölümde iletim sisteminde ve OG dağıtım sisteminde hatların aşırı akım röleleri ile korunması incelenmiştir. Öncelikle 34,5/0,4 kV gerilimli bir dağıtım transformatörünün 34,5 kV gerilimli OG tarafındaki aşırı akım koruması örneği üzerinde koruma sistemini oluşturan elemanlar ve bir koruma sisteminde olması gereken özellikler açıklanmıştır. Konunun devamında, aşırı akım rölelerinin akım-zaman eğrileri, IEC, ANSI/IEEE standartlarına göre ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım-zaman eğrilerinin matematiksel bağıntıları, eğri şekilleri verilmiştir. Aşırı akım rölelerinin tarihsel gelişim sırasına göre elektromekanik aşırı akım röleleri, statik aşırı akım röleleri ve günümüzde kullanılan nümerik aşırı akım röleleri kısaca incelenerek, sistemde seçiciliği sağlayacak şekilde aşırı akım rölelerinin koordinasyonu açıklanmıştır. Bölümün sonunda bir OG radyal dağıtım şebekesinde nümerik ters zamanlı aşırı akım rölelerinin koordinasyonu ile ilgili bir sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir.

1. Koruma Sistemini Oluşturan Elemanlar

Elektrik tesislerinde koruma tekniği; elektrik güç sistemini sürekli olarak kontrol ederek, bir hatanın (arızanın) varlığını saptama ve arıza noktasına en yakın kesici veya kesicilerin açılmasını sağlama tekniğidir. Böylece arıza sebebiyle güç sistem elemanlarının zarar görmesi önlenmiş olur. Ayrıca koruma sisteminde seçicilik (selektivite) sağlanmış ise sadece arızalı eleman veya elemanlar devre dışı kalacağı için arızalı bölge dışında kalan sistemin diğer bölümlerinde işletme devam edecektir.

Elektrik güç sistemleri, generatör, transformatör, iletim ve dağıtım hatları, şalt tesisleri vb. kısımlardan meydana gelir. Güç

sistemlerindeki bu elemanlar nominal akım ve nominal gerilim değerinde sürekli olarak çalışacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ancak aşırı akım, kısa devre, düşük gerilim, aşırı gerilim gibi güç sistem elemanlarının akım veya geriliminin olağanşt değerler aldığı arıza durumlarında bu elemanların devre dışı edilmesi, korunması gerekmektedir. Aksi halde arızanın devam etmesine izin verilirse, arıza güç sistem elemanlarında kalıcı hasarlar oluşmasına hatta bu elemanların kullanılmaz hale gelmesine neden olabilir. Bu nedenle koruma düzenlerinin uygun tasarlanmış olması ve her zaman çalışır durumda olması son derece önemlidir.

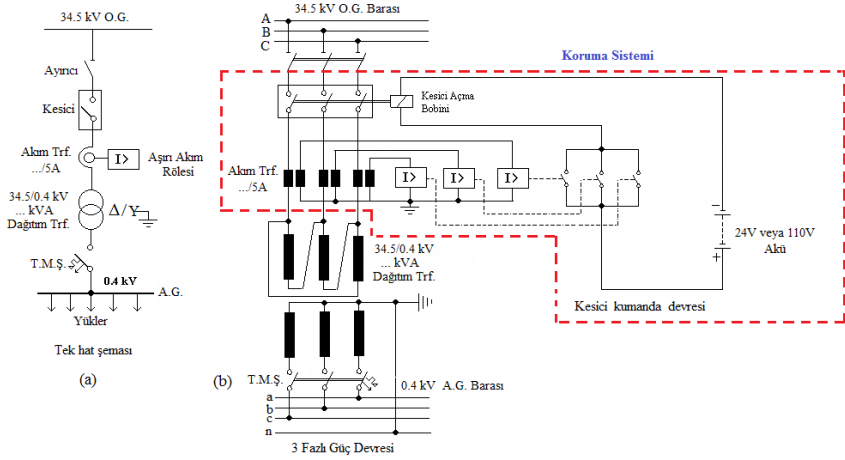
Bir orta gerilim ya da yüksek gerilim tesisinde başlıca açma–kapama elemanı kesicidir. (Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği’ne göre nominal gücü 1600 kVA ve altında ($S_n \leq 1600$ kVA) olan dağıtım transformatörleri kesici yerine yk ayırıcısı üzerinden bağlanabilir.) Kesici tek başına herhangi bir koruma fonksiyonu gerçekleştiremez. Bir arıza anında arızanın varlığını saptayacak ve kesiciye açma komutu verecek elemanlar koruma röleleridir.

Koruma rölelerinin sistemdeki görevi, arızayı ve arızalı elemanı tespit etmek ve sistemde korunan elemanların arıza sebebiyle hasar göremeyeceği kadar kısa bir sürede kesiciye açma (trip) kumandası vererek kesicinin arıza akımını kesmesini sağlamaktır. Böylece koruma rölesi ve kesicinin birlikte çalışması ile arızalı eleman veya bölge sistemden ayrılır, sistemin geriye kalan kısmı enerji kesintisi olmadan çalışmasına devam eder.

şekil 1’de Bir dağıtım transformatörünün aşırı akım korumasına ait üç fazlı güç devresi (primer devresi), sekonder aşırı akım rölesi ve kesici kumanda devresi gösterilmiştir. Devrede herhangi bir fazdan geçen akımın aşırı akım rölelerinin ayarlandığı başlatma akımından (alışma eşik değerinden) daha yüksek değerde olması ve rölenin akım-zaman karakteristiğine göre bu arıza

akımının izin verilen süreden daha fazla devam etmesi halinde, o faza ait aşırı akım rölesi normalde açık (N.A.) kontağını kapatır. Devrede en az bir aşırı akım rölesinin kontağının kapanması halinde 24V veya 110V akü gerilimi kesici açma bobinine uygulanır. Kesici açma bobini enerjilenir ve kesici açılarak 34.5 kV primer devrenin enerjisini keser. Böylece arıza akımı kesilmiş, arızalı eleman sistemden ayrılmış olur.

Şekil 1. Örnek koruma sistemi ve elemanları



(Bir dağıtım transformatörünün aşırı akım koruması)

a) Tek hat şeması b) Üç fazlı güç devresi ve kesici kumanda devresi

Koruma sistemi; koruma röleleri, kesiciler, ölçü transformatörleri (akım transformatörleri ve gerilim transformatörleri) ve yardımcı elemanlardan (Akü bataryaları, yardımcı röleler, sesli ve ışıklı ikaz elemanları vb.) oluşur. Aşağıda koruma sistemini oluşturan elemanların görevleri kısaca açıklanmıştır.

Koruma röleleri: Arızayı tespit edip kesiciye açma kumandası vermek için kullanılır.

Kesiciler: Arızalı bölgenin akımını kesip, bu bölgeyi şebekenin geri kalan kısmından ayırmak için kullanılır.

Ölçü transformatorleri: Koruma rölelerinin ve ölçü cihazlarının düşük gerilim ve akımlarda çalışmasını sağlamak, koruma ve ölçü teçhizatını yüksek gerilimlerden izole etmek, böylece personelin can güvenliğini sağlamak için kullanılır.

Yardımcı elemanlar: Kesicilerin kumanda, sinyal ve alarm devrelerini besleyen bataryalar, yardımcı röleler, sesli alarm cihazları yardımcı eleman olarak koruma sistemlerinde görev alır.

2. Koruma Sisteminden Beklenen Özellikler

Koruma sisteminin görevi daha önce de belirttiğimiz gibi işletme elemanları ile elektrik tesislerinde ortaya çıkan arızaları ve bunların çeşitlerini gözlenen elektriksel büyüklükler yardımıyla hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit etmek ve gerektiğinde arızalı işletme elemanını (trafo, generatör, bara, hat vb.) devre dışı bırakarak enerjide mümkün olabildiğince kesinti olmayacak şekilde sistemin çalışmasını sağlamaktır.

Koruma sisteminin sahip olması gereken özellikler aşağıda açıklanmıştır (Ballıpınar, 2009):

Güvenilirlik: Bütün arıza tiplerinde koruma sisteminin emniyetle çalışması

Seçicilik (Selektivite): Sistemde bir arıza meydana geldiğinde sadece arızalı elemanın veya şebeke bölümünün devreden çıkartılması, diğer kısımların gereksiz yere enerjisinin kesilmemesi, işletmeye devam edilmesinin sağlanmasıdır. Elektrik güç sistemlerinde, elemanlar anma güçleri seviyesinde yüklendikleri için, seçici olmayan bir koruma sisteminin yaptığı hatalı açmalar, geriye kalan elemanlarda aşırı yüklenmelere ve şebekelerin çökmesine neden olabilmektedir. Seçiciliği sağlamak amacıyla

sistemdeki rölelerin çalışma değerlerinin (çalışma eşik değerlerinin ve çalışma karakteristiklerinin, zaman gecikmelerinin) ayarlanması işlemine “röle koordinasyonu” denir.

Hız: Koruma sisteminin korunan elemanlarda hasar oluşmayacak kadar kısa sürede kesiciyi/kesicileri açtırması, arıza süresinin minimum tutulması.

Basitlik: Minimum cihaz ve devre ile sistemi tesis etmek

Ekonomiklik: Minimum maliyette maksimum koruma sağlamak.

Bu özelliklerden en çok üzerinde durulması gereken seçicilik özelliğidir. Hatların korunmasında seçiciliğin nasıl sağlandığı bu bölümde aşırı akım rölelerinin koordinasyonu kısmında açıklanmıştır.

3. Aşırı Akım Röleleri

Aşırı akım röleleri; elektromekanik, analog elektronik (statik) veya dijital (nümerik) röle yapısında olup ayarlandıkları akım değerinden daha yüksek akım geçtiğinde, akım-zaman karakteristiklerine göre belirlenen bir zaman gecikmesi sonunda kesiciye açma (trip) kumandası vererek kesicinin sistemin enerjisini kesmesini sağlayan koruma röleleridir.

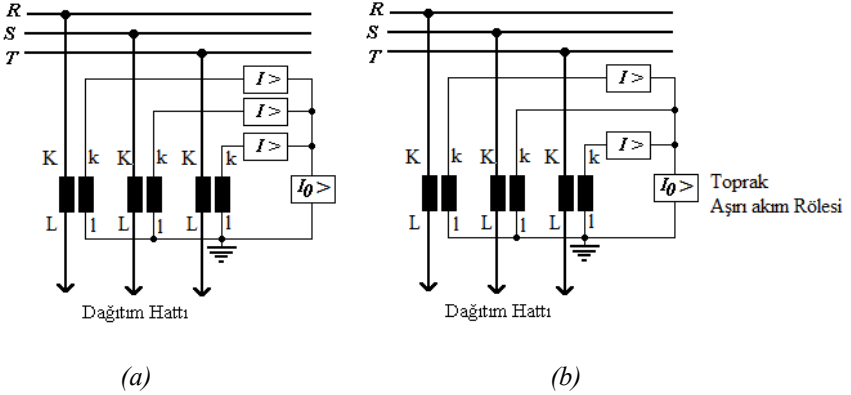
Aşırı akım rölesinin ayarlandığı çalışma akımına başlatma akımı da denir. Çalışma akımı veya ayar akımı (“Pickup current” veya “Set current”) röle kataloglarında I_p veya I_s ile gösterilir. Röleden geçen akımın değeri rölenin ayarlandığı I_p (veya I_s) çalışma akımının değerini aştığında röle çalışır. Eğer röleden geçen arıza akımı I_f ve rölenin ayarlandığı çalışma (set) (pick-up) akım değeri I_p ise;

$I_f \geq I_p$ ise röle çalışarak ilgili kesiciyi açtırır

$$I_f < I_p \text{ ise röle çalışmaz}$$

OG ve YG tesislerinde aşırı akım röleleri akım transformatörleri üzerinden sisteme bağlanırlar. Bu nedenle akım transformatörünün sekonderlerine bağlı olan bu rölelere “sekonder aşırı akım röleleri” denir. Alçak Gerilim (AG) tesislerinde eğer akım değeri düşük ise aşırı akım röleleri devreye akım transformatörü kullanılmadan, korudukları elemana seri olacak şekilde direkt olarak bağlanır. Eğer AG tesislerinde akım değeri yüksek ise aşırı akım röleleri akım transformatörü üzerinden devreye bağlanır.

Şekil 2. Aşırı akım rölelerinin devreye bağlanması



a) 3 adet faz aşırı akım rölesi ile bir adet toprak aşırı akım rölesi ile koruma

b) 2 adet faz aşırı akım rölesi ile ve bir adet toprak aşırı akım rölesi ile koruma

Yukarıda Şekil 2’de aşırı akım rölelerinin devreye bağlanması gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi faz aşırı akım röleleri, fazları aşırı akıma karşı korurlar. Toprak aşırı akım röleleri üzerinden 3 faz akımının fazör toplamı geçer ve bu röleler faz-toprak, faz-faz toprak kısa devresi gibi dengesiz arızalarda çalışırlar. Üç fazlı dengeli kısa devre arızalarında sadece faz aşırı akım röleleri

çalışır, akımlar dengeli olduğu için toprak aşırı akım röleleri çalışmaz. Statik aşırı akım rölelerin ve nümerik rölelerin kullanımına geçilmeden önce 1990'lı yıllara kadar iki adet indüksiyon diskli ters zamanlı faz aşırı akım rölesi ve bir adet sabit zamanlı toprak aşırı akım rölesinden oluşan Şekil 2b'deki bağlantı uzun yıllar OG dağıtım hatlarının korunmasında kullanılmıştır. Günümüzde bu korumalar tamamen birbiriyle haberleşme özellikleri olan, yazılımları üzerinden ayar değerleri online olarak değiştirilebilen gelişmiş nümerik aşırı akım röleleri ile yapılmaktadır.

Aşırı akım rölelerinin akım-zaman karakteristikleri ($t=f(I)$ karakteristikleri), röleden geçen akım değerine göre rölenin oluşturduğu zaman gecikmesini gösteren eğrilerdir. Bu karakteristik eğriler IEC, ANSI, IEEE gibi kuruluşlarca matematiksel olarak tanımlanmıştır.

Aşırı akım röleleri iki farklı akım-zaman karakteristiğine göre çalışırlar:

1. Sabit zamanlı (definite time) karakteristik
2. Ters zamanlı (inverse time) karakteristik

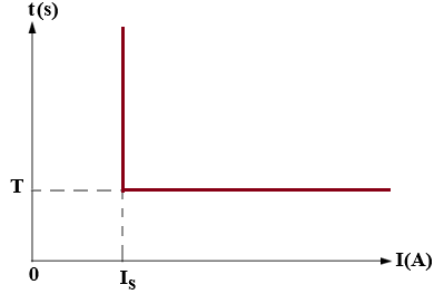
Aşağıda sabit zamanlı ve ters zamanlı aşırı akım röleleri açıklanmıştır.

3.1. Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölesi

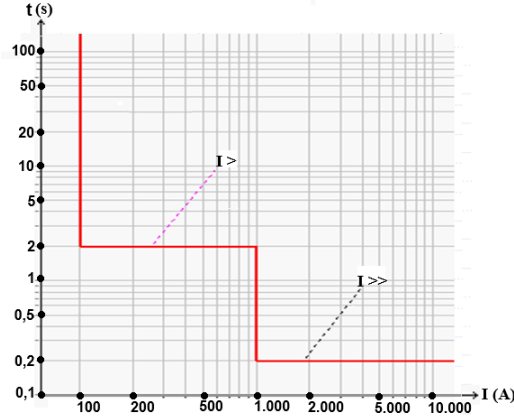
Şekil 3'de gösterilen sabit zamanlı aşırı akım rölesinin akım-zaman karakteristiğinden görüldüğü üzere, röleden geçen akım I ve rölenin ayarlandığı çalışma akımı I_s olmak üzere $I \geq I_s$ ise rölenin zaman gecikmesi (T) sabittir. $I \geq I_s$ için zaman gecikmesinin akım değerinden bağımsız olarak sabit olması sebebiyle bu röleye “bağımsız aşırı akım rölesi” de denir. Çok yüksek akımlarda bile zaman gecikmesinin sabit olması sebebiyle bu karakteristik aşırı akım (birinci eşik, $I >$) koruması için genellikle tercih edilmez. Sabit zamanlı karakteristik, uygulamada iki eşikli aşırı akım rölelerinde,

zaman gecikmesi milisaniye (ms) mertebesinde sabit olarak ayarlanarak kısa devre korumasında birkaç milisaniye içinde kesiciyi açtıracak şekilde ikinci eşik ($I >>$) için tercih edilir.

Şekil 3. Sabit zamanlı (definite time) aşırı akım rölesinin $t=f(I)$ karakteristiği



Şekil 4. İki eşikli ($I >$ ve $I >>$) sabit zamanlı aşırı akım rölesinin $t=f(I)$ karakteristiği (Ballıpınar, 2009)

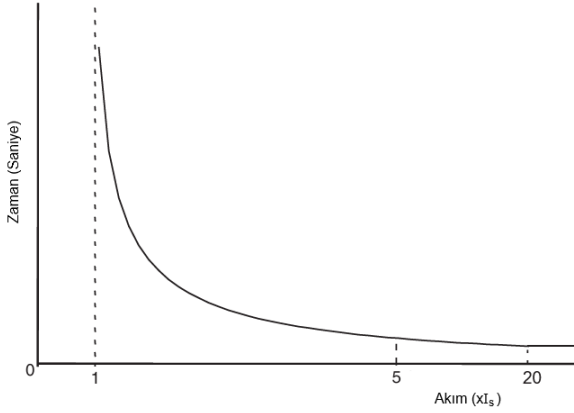


Şekil 4'de iki eşikli sabit zamanlı aşırı akım rölesinin karakteristiği verilmiştir. Bu aşırı akım rölesi 100/5 A'lık bir akım transformatörünün sekonderine bağlı olup şekilde yatay eksenle verilen akım değerleri akım transformatörünün primer tarafındaki akım değerleridir. Röle birinci eşikte ($I >$) 100 A'de çalışacak şekilde ayarlanmıştır. 100A-1000A arasında aşırı akım koruması yapan ve

zaman gecikmesi 2 saniyeye ayarlanan bu aşırı akım rölesinin zaman gecikmesi sabittir. Kısa devre durumunda ani açma için ikinci eşik ($I \gg$) 1000A'e ayarlanmıştır. 1000 A ve üzerindeki akımlarda röle 200 ms gibi çok kısa bir sürede kesiciye ani açma yaptırır. Literatürde bu akım-zaman eğrisi, DMT (Definite Minimum Time: Sabit minimum zamanlı) eğri olarak tanımlanır.

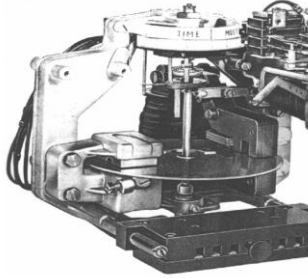
3.2. Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölesi

Şekil 5. Ters zamanlı (inverse time) aşırı akım rölesinin $t=f(I)$ karakteristiği (Horowitz ve Phadke ,2008)



Şekil 5’de gösterilen ters zamanlı aşırı akım rölesinin akım-zaman karakteristiğinden görüldüğü üzere, röleden geçen akım I ve rölenin ayarlandığı çalışma akımı I_s olmak üzere $I \geq I_s$ ise rölenin zaman gecikmesi sabit olmayıp, akım değeri ile ters orantılı olarak değişir. Akım değeri arttıkça zaman gecikmesi azalır. Bu eğri aşırı akım koruması için sabit zamanlı eğriye göre daha güvenlidir. IEC 60255 standardına göre ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım-zaman eğrisinde çalışma akımının 20 katından daha büyük akımlar ($I \geq 20 \cdot I_s$) için rölenin zaman gecikmesi sabittir.

Şekil 6. Ters zamanlı aşırı akım rölesi



(a)



(b)

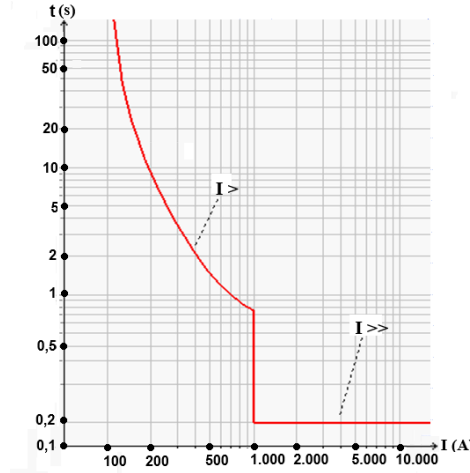
a)İndüksiyon diskli ters zamanlı elektromekanik aşırı akım rölesi (Hewitson vd., 2005)

b)Günümüzde kullanılan çok fonksiyonlu nümerik aşırı akım rölesi (ABB, 2019)

Aşırı akım rölelerinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, ilk ters zamanlı aşırı akım röleleri indüksiyon diskli aşırı akım röleleridir. Bu rölelerde dönüş hızı rölenin akım bobininden geçen akım değerinin karesine (I^2) bağlı olarak değişen bir alüminyum disk bulunur ve rölenin kesiciye kumanda edecek hareketli kontağı bu disk üzerine monte edilmiştir. Akım değeri ne kadar yüksek ise disk o kadar hızlı dönerek çok kısa sürede disk üzerindeki hareketli kontağın kenardaki sabit kontağa temas etmesi sağlanır. Akım değeri azaldıkça disk yavaş döner ve kontakların temas etme (kapanma) süresi uzar. Böylece şekil 5’de gösterilen ters zamanlı akım-zaman eğrisi elde edilir. Şekil 6a’da bir indüksiyon diskli elektromekanik ters zamanlı aşırı akım rölesi gösterilmiştir (Hewitson vd., 2005). Şekil 6b’de günümüzde kullanılan çok koruma fonksiyonlu (faz aşırı akım, toprak aşırı akım, düşük/aşırı gerilim vb.), haberleşme özelliği olan nümerik aşırı akım rölesi gösterilmiştir (ABB, 2019). Şekil 7’de iki eşikli ters zamanlı aşırı akım rölesinin karakteristiği verilmiştir. Bu aşırı akım rölesi 100/5 A’lık bir akım

transformatörünün sekonderine bağlı olup şekilde yatay eksen de verilen akım değerleri akım transformatörünün primer tarafındaki akım değerleridir. Röle birinci eşikte ($I >$) 100 A’de çalışacak şekilde ayarlanmıştır. 100A-1000A arasında bu röle ters zamanlı aşırı akım koruması yapar ve zaman gecikmesi akım değeriyle ters orantılı olarak değişir. Kısa devre durumunda ani açma için ikinci eşik ($I >>$) 1000A’e ayarlanmıştır. İkinci eşik 200 ms sabit zaman gecikmesine ayarlanmıştır. 1000 A ve üzerindeki akımlarda röle 200 ms gibi çok kısa bir sürede kesiciye ani açma yaptırır. Literatürde bu akım-zaman eğrisi IDMT (Inverse Definite Minimum Time: Ters minimum zamanlı) eğri olarak tanımlanır.

Şekil 7. İki eşikli ($I >$ ve $I >>$) ters zamanlı aşırı akım rölesinin $t=f(I)$ karakteristiği (Ballıpınar, 2009)



3.3. Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Akım-Zaman Eğrileri

Ters zamanlı aşırı akım rölelerinin, röleden geçen akım değerine göre oluşturduğu zaman gecikmesini gösteren akım-zaman eğrileri ($t=f(I)$ eğrileri) matematiksel olarak aşağıdaki (1) eşitliği ile ifade edilir (Carlos vd., 2023):

$$t = \left(\frac{\beta}{\left(\left(\frac{I}{I_s} \right)^\alpha - 1 \right)} + L \right) * TMS \quad (1)$$

Bu eşitlikte;

t : Akım zaman eğrisine göre aşırı akım rölesinin zaman gecikmesi,

I : Ölçülen (aşırı akım rölesinden geçen) arıza (kısa devre) akımı,

I_s : Aşırı akım rölesinin ayarlandığı çalışma akımı (başlatma akımı),

TMS : Aşırı akım rölesinin ayarlandığı zaman çarpanı (Time Multiplier Setting),

α, β, L : Eğri tipine göre değişen ve aşağıdaki Tablo 1’de verilen sabitler,

olmaktadır.

Aşağıdaki tabloda farklı standartlara göre ters zamanlı aşırı akım rölesi eğrilerine ait α, β ve L sabitleri verilmiştir (IEEE Power and Energy Society, Revision of IEEE Std C37.112, 2018.), (Valenzuela vd., 2021).

Tablo 1. Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Eğrilerine İlişkin Sabitler

Ters Zamanlı Eğri Tipi	Standart	α	β	L
Orta Ters Zamanlı (Moderately Inverse)	IEEE	0,02	0,0515	0,114
Çok Ters Zamanlı (Very Inverse (VI))	IEEE	2	19,61	0,491
Aşırı Ters Zamanlı (Extremely Inverse (EI))	IEEE	2	28,2	0,1217
Ters Zamanlı (Inverse)	CO8	2	5,95	0,18
Kısa Ters Zamanlı (Short-Time Inverse)	CO2	0,02	0,0239	0,0169
Standart Ters Zamanlı (Standard Inverse (SI))	IEC	0,02	0,14	0
Çok Ters Zamanlı (Very Inverse (VI))	IEC	1	0,0515	0
Aşırı Ters Zamanlı (Extremely Inverse (EI))	IEC	2	80	0
Uzun Ters Zamanlı (Long-Time Inverse)	UK	1	120	0

Yukarıdaki tabloda verilen α , β ve L sabitleri, yukarıda (1) eşitliği ile verilen ters zamanlı aşırı akım rölesi akım-zaman eğrisinin matematiksel ifadesinde her eğri için ayrı ayrı yazılarak, aşağıda Tablo 2’de IEC ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım zaman-eğrileri için ve Tablo 3’de Kuzey Amerika (ANSI/IEEE) ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım zaman-eğrileri için matematiksel bağıntılar ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 2 . IEC Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Akım-Zaman Eğrilerine İlişkin Matematiksel Bağıntılar

Aşırı Akım Rölesinin Karakteristiği	Denklem (IEC)
Standart Ters Zamanlı (Standard Inverse (SI))	$t = \frac{0,14}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right)} * TMS$
Çok Ters Zamanlı (Very Inverse (VI))	$t = \frac{13,5}{\left(\frac{I}{I_s} - 1\right)} * TMS$
Aşırı Ters Zamanlı (Extremely Inverse (EI))	$t = \frac{80}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1\right)} * TMS$

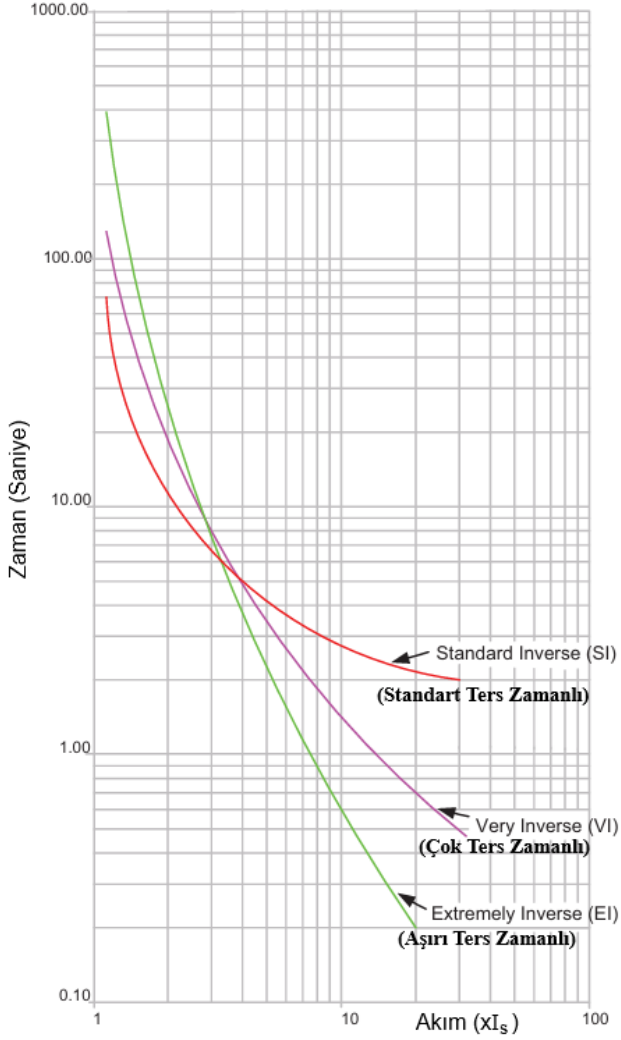
Yukarıdaki tabloda matematiksel bağıntıları verilen IEC ters zamanlı aşırı akım rölelerine ait akım-zaman eğrileri aşağıda Şekil 8’de verilmiştir.

Tablo 3’de verilen ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım-zaman ($t=f(I)$) eğrilerine ilişkin matematiksel eşitliklerde;

TD : Aşırı akım rölesinin ayarlandığı zaman çarpanı (Time Dial Setting),

olarak alınmaktadır. (ANSI/IEEE eğrilerindeki TD/7, IEC eğrilerindeki TMS yerine kullanılmaktadır.)

Şekil 8. IEC 60255'e göre ters zamanlı aşırı akım rölesinin (IDMT) TMS=1.0 için karakteristik eğrileri (Alstom, 2011).

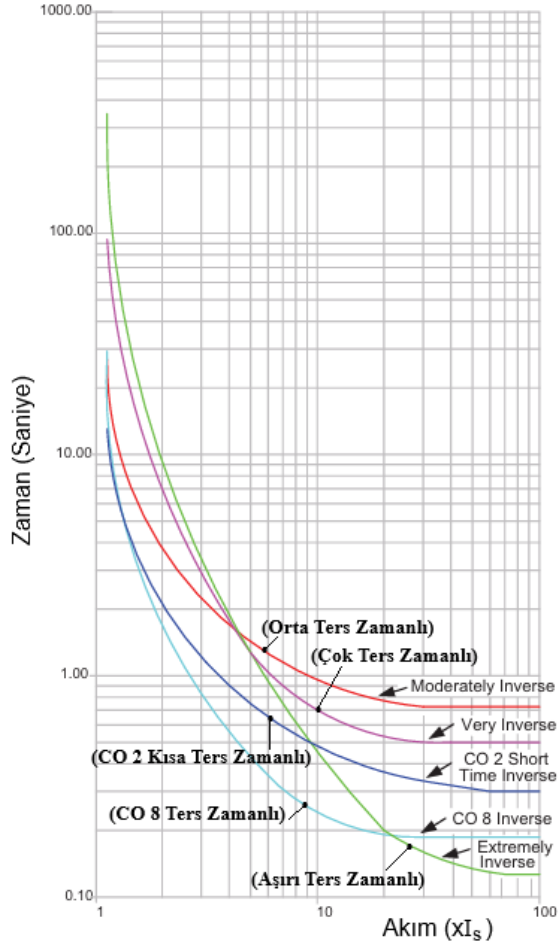


Tablo 3 . Kuzey Amerika (ANSI/IEEE) için Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Akım-Zaman Eğrilerine İlişkin Matematiksel Bağlıntılar

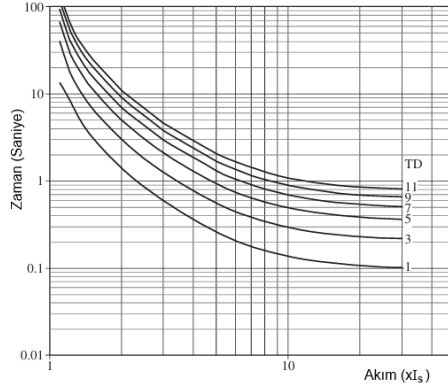
Aşırı Akım Rölesinin Karakteristiği	Denklem (Kuzey Amerika)
IEEE Orta Ters Zamanlı (IEEE Moderately Inverse)	$t = \left(\frac{TD}{7}\right) * \left[\left(\frac{0,0515}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right)} \right) + 0,114 \right]$
IEEE Çok Ters Zamanlı (IEEE Very Inverse)	$t = \left(\frac{TD}{7}\right) * \left[\left(\frac{19,61}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1\right)} \right) + 0,491 \right]$
IEEE Aşırı Ters Zamanlı (IEEE Extremely Inverse)	$t = \left(\frac{TD}{7}\right) * \left[\left(\frac{28,2}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1\right)} \right) + 0,1217 \right]$
US CO8 Ters Zamanlı (US CO8 Inverse)	$t = \left(\frac{TD}{7}\right) * \left[\left(\frac{5,95}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 - 1\right)} \right) + 0,18 \right]$
US CO2 Kısa Ters Zamanlı (US CO2 Short Time Inverse)	$t = \left(\frac{TD}{7}\right) * \left[\left(\frac{0,02394}{\left(\left(\frac{I}{I_s}\right)^{0,02} - 1\right)} \right) + 0,01694 \right]$

Yukarıdaki tabloda matematiksel bağıntıları verilen Kuzey Amerika (ANSI/IEEE) ters zamanlı aşırı akım rölelerine ait akım-zaman eğrileri aşağıda Şekil 9’da verilmiştir.

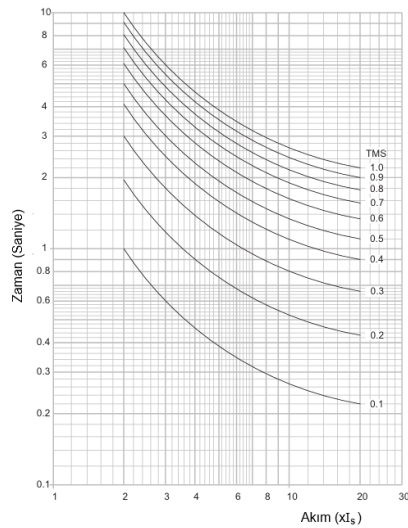
Şekil 9. IEEE ve Kuzey Amerikan US Standartları'na göre ters zamanlı aşırı akım rölesinin (IDMT) TD=7 için karakteristik eğrileri (Alstom, 2011).



Şekil 10. IEEE ve Kuzey Amerikan ANSI Standartları'na göre çok ters zamanlı aşırı akım rölesinin farklı TD değerleri için karakteristik eğrileri (Anderson vd., 2022).



Şekil 11. IEC 60255'e göre ters zamanlı aşırı akım rölesinin standart ters (SI) akım-zaman karakteristik eğrileri (Alstom, 2011).



Yukarıda Şekil 10'da IEEE/ANSI standartlarına göre ve Şekil 11'de IEC 60255 standardına göre farklı zaman ayar çarpan

değerleri için ters zamanlı aşırı akım rölelerinin akım-zaman eğrileri verilmiştir.

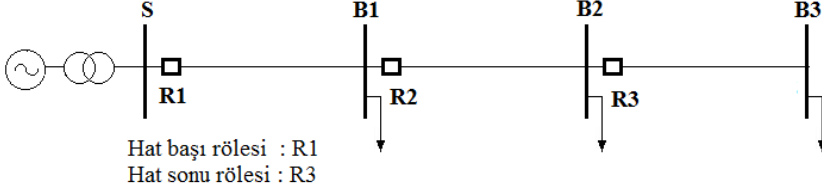
4. Aşırı Akım Rölelerinin Koordinasyonu

Seçiciliği sağlamak amacıyla sistemdeki koruma rölelerinin çalışma değerlerinin (çalışma eşik değerlerinin ve çalışma karakteristiklerinin) ayarlanması işlemine “röle koordinasyonu” denir. Aşırı akım rölelerinin koordinasyonunda ise önce aşırı akım rölelerinin çalışma akımı değerleri (I_s veya I_p) belirlenir ve daha sonra seçiciliği sağlayacak şekilde aşırı akım rölelerinin zaman ayar çarpanları (TMS veya T_p) hesaplanarak belirlenir.

4.1. Sabit Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Koordinasyonu

Aşırı akım rölelerinin koordinasyonu bakımından en basit ve koordinasyonu en kolay olan sistem Şekil 12’de gösterilen tek taraftan beslenen radyal sistemdir. Radyal sistemde aşırı akım rölelerinin koordinasyonu, aşırı akım rölelerinin zaman gecikmelerinin hat sonundan hat başına doğru arttırılması ile sağlanır. Seçiciliği sağlamak için ardışık iki röle arasında koordinasyon zaman payı (KZP) adı verilen ve 0.3s-0.5s aralığında değişen zaman gecikmesi oluşturulur. KZP değeri olarak statik (elektronik) veya nümerik aşırı akım röleleri için 0,3s ve elektromekanik aşırı akım röleleri için 0,5s seçilebilir. (Son yıllardaki nümerik koruma rölesi uygulamalarında koordinasyon zaman payı, sistemdeki kesicilerin açma süresine bağlı olarak 0.25s değerinde de alınabilmektedir.)

Şekil 12. Tek taraftan beslenen radyal sistem



Aşırı akım rölelerinin koordinasyonuna hat sonundaki aşırı akım rölesinden başlanır. Hat sonundaki aşırı akım rölesinin (R3) zaman gecikmesi, bu rölenin koruduğu hattan beslenen yüklerin koruma elemanlarının zaman gecikmesinden düşük olmamak şartıyla minimum değerde seçilir. Şekil 12’deki radyal sistemde koruma, sabit zamanlı aşırı akım röleleri ile yapılmış ise koordinasyonunun sağlanması için aşırı akım rölelerinin zaman gecikmeleri, $t_{R2}=t_{R3}+KZP$ ve $t_{R1}=t_{R2}+KZP$ olmalıdır. Böylece sistemde seçiciliği sağlamak için gerekli olan aşırı akım rölelerinin zaman gecikmeleri arasındaki $t_{R1}>t_{R2}>t_{R3}$ ilişkisi sağlanmış olur.

4.2. Ters Zamanlı Aşırı Akım Rölelerinin Koordinasyonu

Yukarıda da belirtildiği gibi koruma rölelerinin koordinasyonunun yapılması; seçiciliği sağlayacak şekilde koruma rölelerinin çalışma akımlarının (başlatma akımlarının) ve zaman gecikmelerinin veya akım-zaman eğrilerinin ayarlanmasıdır. Sistemde seçiciliği sağlamak ve yanlış kesici açmalarını önlemek için radyal şebekede ardışık iki rölenin zaman gecikmeleri arasında $\Delta T=0,30s-0,5s$ saniye kadar zaman gecikmesi eklemek gerekir. Bu süre literatürde CTI (Coordination Time Interval) ve Türkçe’de KZP (Koordinasyon Zaman Payı) olarak adlandırılır. (Koruma röleleri ile ilgili bazı kitaplarda koordinasyon zaman payı (KZP), ΔT ile gösterilmektedir.) $KZP=\Delta T=(0,30-0,5)$ saniye aralığında seçilir. Önce koruma rölelerinin çalışma akımları (I_p (pickup current) veya I_s (set current) değerleri ayarlanır. Çalışma akımları rölenin

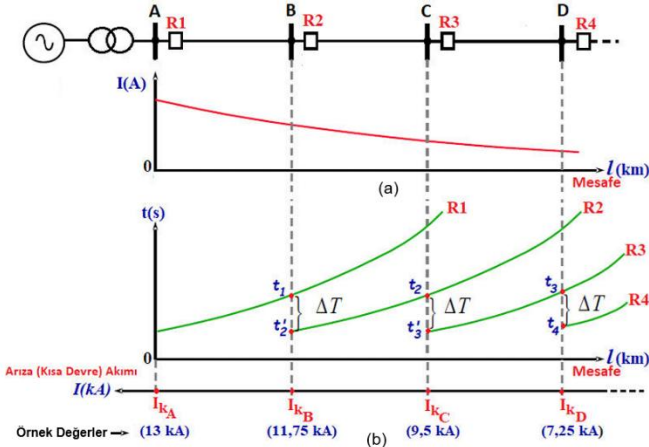
bulunduğu noktadan geçen nominal yük akım değerine veya havai hat iletkeninin veya yeraltı kablusunun sürekli olarak taşıyabileceği akım değerine ayarlanır.

Aşağıda Şekil 13’de arıza (kısa devre) meydana gelen hat ve hattı koruyan ters zamanlı aşırı akım rölesinin akım-zaman eğrisi gösterilmiştir. Şekilde arıza noktası kaynağa doğru yaklaştıkça kısa devre empedansının azalması sebebiyle kısa devre akımı artmakta ve bunun sonucu olarak kaynağa yaklaştıkça akımın artması sebebiyle akım-zaman eğrisinde zaman gecikmesi azalmaktadır. Şekil 13’de ters zamanlı aşırı akım rölesinin akım zaman eğrisi bu gerçeğe uygun olarak çizilmiş ve aşağıdaki Şekil 14’de de ters zamanlı aşırı akım rölelerinin eğrileri bu durum göz önüne alınarak çizilmiştir.

Şekil 13. Arıza meydana gelen hat ve ters zamanlı aşırı akım rölesinin akım-zaman eğrisi



Şekil 14. Radyal şebekede ters zamanlı aşırı akım rölelerinin koordinasyonu



Ters zamanlı aşırı akım rölelerinin koordinasyonunun yapılması Şekil 14’de gösterilmiştir. Şekil 14a’da dört baralı radyal sistem ve bu sistemde kaynaktan uzaklaştıkça arıza (kısa devre) akımının mesafeye göre değişimi gösterilmiştir. Şekil 14b’de A, B, C ve D baraları için örnek kısa devre akım değerleri ve kısa devre akım değerlerine göre ters zamanlı aşırı akım rölelerinin zaman gecikmeleri temsili olarak gösterilmiştir.

Ters zamanlı aşırı akım rölelerinin koordinasyonunda, rölelerin zaman gecikmesi ayarlarına (akım-zaman eğrisi ayarlarına) hat sonundaki röleden (yukarıda Şekil 14a’da verilen sistemde R4 rölesinden) başlanır. Hat sonundaki rölenin eğrisi, röle kataloğunda en düşük zaman gecikmesini veren eğriye (genellikle en alttaki eğriye) ayarlanır. Aşağıda Şekil 15’de kullanılacak nümerik aşırı akım rölesinin IEC Normal ters akım-zaman eğrileri gösterilmiştir. Hat sonundaki R4 rölesinin eğrisi en alttaki eğri olarak seçilebilir, böylece R4 rölesi için zaman ayar çarpanı $T_p=0,05s$ seçilebilir. (R4 rölesi için seçilecek T_p değerinin R4 rölesinin koruduğu hattın sonuna bağlı yükün koruma elemanı ile seçiciliği sağlaması gerekir.) Sistemde kullanılan rölelerin nümerik aşırı akım röleleri olması sebebiyle koordinasyon zaman payı $KZP=\Delta T=0,3$ saniye alınabilir.

Röle koordinasyonu hat sonundan başlanarak ardışık ikişerli röle grupları halinde hat başına kadar yapılır. Şekil 14’deki radyal sistemde hat sonundan başlanarak önce R3-R4 koordinasyonu yapılarak R3 rölesi için T_{p3} belirlenir. Sonra, R2-R3 koordinasyonu yapılarak R2 rölesi için T_{p2} belirlenir. Daha sonra R1-R2 koordinasyonu yapılarak R1 rölesi için T_{p1} belirlenir ve röle koordinasyonu tamamlanır.

Şekil 14’deki radyal sistemde R3-R4 rölelerinin koordinasyonu için esas alınacak arıza akımı, R4 rölesinin bulunduğu D barasındaki $I_{kD}=7,25$ kA’dır. Önce $T_{p4}=0,05s$ değerine ayarlanan R4 rölesinin D barasındaki $I_{kD}=7,25$ kA kısa devre için

zaman gecikmesi (t_4) aşağıdaki IEC Standart Ters (SI) (veya IEC Normal Ters (NI) eğri formülünden hesaplanır.

$$t = \frac{0,14}{\left(\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1\right)} * T_p \quad (2)$$

Yukarıda verilen (2) eşitliğinde t , rölenin zaman gecikmesi, I röleden geçen arıza akımı, I_p rölenin ayarlandığı çalışma akımı ve T_p rölenin ayarlandığı zaman ayar çarpanıdır.

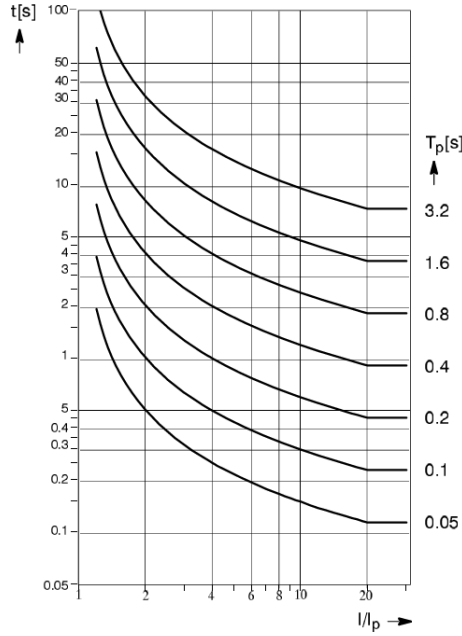
Röleden geçen arıza akımı I , rölenin bağlı olduğu akım trafosunun dönüştürme oranı yardımıyla hesaplanır. Şekil 14b’de koordinasyon zaman payı (KZP), ΔT ile gösterilmiştir. Yukarıda verilen (2) eşitliğinden R4 rölesinin D barasındaki 2,75 kA için zaman gecikmesi t_4 hesaplandıktan sonra seçiciliğin sağlanması için D barasındaki $I_{kD}=7,25$ kA arıza akımı için R3 rölesinin zaman gecikmesi; $t_3 = t_4 + \Delta T = (t_4 + 0,3)$ saniye olur. D barasındaki 7,25 kA arıza akımı için R3 rölesinin t_3 saniye gecikme yapmasını sağlayacak zaman ayar çarpanı T_{p3} değeri (2) rölenin akım-zaman eğrisine ait (2) eşitliğinden yararlanılarak,

$$T_{p3} = \frac{t_3 * \left(\left(\frac{I}{I_{p3}}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} \quad (3)$$

eşitliğinden bulunur. Böylece R3 rölesinin eğrisi belirlenmiş olur.

R2-R3 rölelerinin koordinasyonu için R3 rölesinin bulunduğu C barasındaki $I_{kC}=9,5$ kA arıza akımı için R3 rölesinin zaman gecikmesi t_3' hesaplanır. R2 rölesinin bu arıza akımı için zaman gecikmesi, $t_2 = t_3' + \Delta T = (t_3' + 0,3)$ saniye olur. C barasındaki 9,5 kA arıza akımı için R2 rölesinin t_2 saniye gecikme yapmasını sağlayacak zaman ayar çarpanı T_{p2} değeri hesaplanır. Koordinasyon hesapları bu prensip ve yaklaşım ile hat başı rölesine kadar devam ettirilir.

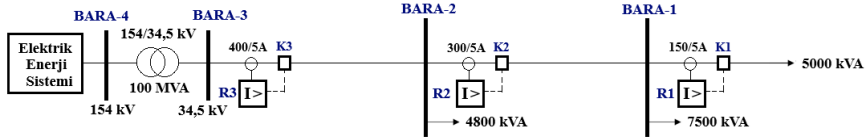
Şekil 15. Aşırı akım koruması için kullanılan nümerik ters zamanlı aşırı akım rölesinin IEC normal ters akım-zaman eğrileri (Siemens, 2015)



Normal inverse:
$$t = \frac{0.14}{(I/I_p)^{0.02} - 1} \cdot T_p \text{ [s]}$$

4.3. Aşırı Akım Rölelerinin Ayarları ve Koordinasyonu ile İlgili Sayısal Örnek

Şekil 16. Örnek sistem



Aşağıda verilen bilgiler yardımıyla, yukarıda Şekil 16’da tek hat şeması verilen üç fazlı 34,5 kV gerilimli radyal şebekede 1, 2 ve 3 baralarındaki R1, R2 ve R3 nümerik (dijital) ters zamanlı aşırı akım rölelerinin koordinasyonu yapılacaktır. Sistemde aşırı akım

koruması için Siemens'in 7SJ62 nümerik aşırı akım röleleri kullanılacaktır. Kullanılan Siemens 7SJ62 nümerik ters zamanlı aşırı akım röleleri IEC'nin standart ters (normal ters) eğrisine göre çalışmakta olup, zaman gecikmesi,

$$t = \frac{0,14}{\left(\left(\frac{I}{I_p} \right)^{0,02} - 1 \right)} \cdot T_p$$

eşitliğinden hesaplanacaktır. Kullanılan Rölelerin I_p çalışma akımları $(0,1-4) \cdot I_n$ arasında $0,01 \cdot I_n$ adımlarla ayarlanabilir. (I_n rölenin bağlı olduğu akım transformatörünün nominal sekonder akımı olup 1A veya 5A'dır. Verilen sistemde akım transformatörlerinin nominal sekonder akımı 5A'dır.) T_p zaman çarpanları 0.1s-3.2s arasında 0.05s adımlarla ayarlanabilir.

Sistemde hat sonunda bulunan en son röle olan R1 rölesi için zaman ayar çarpanı $T_{p1} = 0,05$ saniye ve sistemde koordinasyon zaman payı (KZP) 0.3 saniye olarak alınacaktır. Rölelerin bulunduğu baralara ait kısa devre akımları aşağıdaki tabloda verilmiştir. (Tüm yüklerin güç katsayısı ($\cos\phi$) aynıdır)

	BARA-1	BARA-2	BARA-2
Kısa Devre Akımı	2,75 kA	5,80 kA	10 kA

İstenenler:

- R1, R2 ve R3 rölelerinin ayarlanacağı çalışma akımı (I_p) değerlerini hesaplayınız.
- R2 ve R3 rölelerinin ayarlanacağı zaman çarpanı (T_p) değerlerini hesaplayınız.
- R1 rölesinin koruduğu hat üzerinde 2 kA'lık bir kısa devre meydana geldiğinde R1, R2 ve R3 rölelerinin kaç saniye gecikme ile bağlı oldukları kesicilerine açma kumandası vereceğini hesaplayınız. ($t_1=?$, $t_2=?$, $t_3=?$)

Çözüm:

a) Koruma rölelerinin I_p çalışma akımlarının hesaplanması

Şekil 16'daki 34,5 kV nominal gerilimli OG radyal hatların aşırı akım korumasını yapmak üzere kullanılacak Siemens 7SJ62 nümerik aşırı akım rölesinin aşırı akım değerleri (I_n akım transformatörünün nominal sekonder akımı olmak üzere) $(0,1-4) \cdot I_n$ arasında $0,01 \cdot I_n$ adımlarla ayarlanabilir. Sistemde kullanılan akım transformatörlerinin nominal sekonder akımları $I_n = 5A$ 'dır. Bu nedenle aşırı akım rölesinin I_p çalışma akımı değerleri 0,05A-5,00A arasında $0,01 \cdot I_n = 0,02 \cdot 5 = 0,05A$ adımlarla ayarlanacaktır. (Kullanılan Siemens 7SJ62 aşırı akım rölesi I_p değerinin 5A'in üzerinde seçilmesine izin vermekle birlikte akım transformatörlerinin primer sargılarından nominal primer akımının üzerinde akım geçmesi güvenlik için uygun olmadığından röle ayarında I_p akım değeri 5A'in üzerinde seçilmeyecektir.)

R1 rölesi için I_p çalışma akımının belirlenmesi:

$$I_{p1} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \left(\frac{1}{ATO} \right) = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 34,5} \cdot \left(\frac{5}{150} \right) = 2,789 A$$

olup, rölenin çalışma akımları 0,05A adımlarla ayarlandığı ($I_p = \dots 2,65A-2,70A-2,75A-2,80A-2,85A-\dots$) için R1 rölesinin çalışma akımı $I_{p1} = 2,80 A$ 'e ayarlanır.

R2 rölesi için I_p çalışma akımının belirlenmesi:

$$I_{p2} = \frac{(7500 + 5000)}{\sqrt{3} \cdot 34,5} \cdot \left(\frac{5}{300} \right) = 3,486 A$$

olup, rölenin çalışma akımları 0,05A adımlarla ayarlandığı için R2 rölesinin çalışma akımı $I_{p2} = 3,50 A$ 'e ayarlanır.

R3 rölesi için I_p çalışma akımının belirlenmesi:

$$I_{p3} = \frac{(7500 + 5000 + 4800)}{\sqrt{3} * 34,5} * \left(\frac{5}{400}\right) = 3,619 \text{ A}$$

olup, rölenin çalışma akımları 0,05A adımlarla ayarlandığı için R3 rölesinin çalışma akımı $I_{p3}=3,65 \text{ A}$ 'e ayarlanır.

b) Koruma rölelerinin koordinasyonu (T_p zaman ayar çarpanlarının hesaplanması)

Hat sonundaki R1 rölesinin T_p zaman ayar çarpanı $T_{p1}=0,05$ saniye olarak önceden belirlendi.

Rölelerin çalışma akımları $I_{p1}=2,80 \text{ A}$, $I_{p2}=3,50 \text{ A}$ ve $I_{p3}=3,65 \text{ A}$ değerine ayarlandı.

R1-R2 Koordinasyonu

Esas alınacak kısa devre akımı: R1'in bulunduğu Bara-1'deki kısa devre akımı $I_{k1}=2,75 \text{ kA}$

R1 rölesinin Bara-1'deki $I_{k1}=2,75 \text{ kA}$ kısa devre akımı için zaman gecikmesi $t_1=?$

R1 için:

$I = 2750 * \left(\frac{5}{150}\right) = 91,67 \text{ A}$, $T_{p1}=0,05\text{s}$ ve $I_{p1}=2,80 \text{ A}$ olup bu değerler için R1'in zaman gecikmesi t_1 ,

$$t_1 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p1}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p1} = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{91,67}{2,80}\right)^{0,02} - 1\right]} * 0,05 = 0,097 \text{ s}$$

R2'nin Bara-1'deki $I_{k1}=2,75 \text{ kA}$ kısa devre akımı için zaman gecikmesi $t_2= ?$

$$t_2 = t_1 + KZP = 0,097 + 0,3 = 0,397 \text{ s}$$

olur. R2'nin Bara-1'deki $I_{k1}=2,75 \text{ kA}$ kısa devre akımı için $t_2=0,397 \text{ s}$ zaman gecikmesi yapması için eğrisinin zaman ayar çarpanı $T_{p2}=?$

Bara-1'deki $I_{k1}=2,75$ kA kısa devre için R2'den geçen arıza akımı $I=?$

$$I = 2750 * \left(\frac{5}{300}\right) = 45,833 \text{ A} \quad \text{ve} \quad I_{p2} = 3,50 \text{ A} \quad \text{ise} \quad T_{p2}=?$$

$$T_2 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p2}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p2} \rightarrow 0,397 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{45,833}{3,50}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p2}$$

olup buradan $T_{p2} = 0,1497 \text{ s}$ bulunur.

$T_{p2} = 0,1497 \text{ s}$ ise 0,01 s adımlarla;

$T_{p2} = 0,15 \text{ s}$ değerine ayarlanır.

R2-R3 Koordinasyonu

Esas alınacak kısa devre akımı: R2'nin bulunduğu Bara-2'deki kısa devre akımı $I_{k2}=5,80$ kA

R2 rölesinin Bara-2'deki $I_{k2}=5,80$ kA kısa devre akımı için zaman gecikmesi $t_2'=?$

R2 için:

$$I = 5800 * \left(\frac{5}{300}\right) = 96,67 \text{ A} \quad T_{p2} = 0,15 \text{ s} \quad \text{ve} \quad I_{p2} = 3,50 \text{ A}$$

$$t_2 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p2}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p2} = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{96,67}{3,50}\right)^{0,02} - 1\right]} * 0,15 = 0,306 \text{ s}$$

R3'ün Bara-2'deki $I_{k2}=5,8$ kA kısa devre akımı için zaman gecikmesi $t_3=?$

$$t_3 = t_2' + KZP = 0,306 + 0,3 = 0,606 \text{ s}$$

R3'ün Bara-2'deki $I_{k2}=5,8$ kA kısa devre akımı için $t_3=0,606 \text{ s}$ zaman gecikmesi yapması için $T_{p3}=?$

Bara-2'deki $I_{k2}=5,8$ kA kısa devre için R3'den geçen arıza akımı $I=?$

$$I = 5800 * \left(\frac{5}{400}\right) = 72,5 \text{ A} \quad \text{ve} \quad I_{p3} = 3,65 \text{ A} \quad \text{ise} \quad T_{p3}=?$$

$$T_3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p3}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p3} \rightarrow 0,606 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{72,50}{3,65}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p3}$$

olup buradan $T_{p3} = 0,267 \text{ s}$ bulunur.

$T_{p3} = 0,267 \text{ s}$ ise 0,01 s adımlarla;

$T_{p3} = 0,27 \text{ s}$ değerine ayarlanır.

Röle Koordinasyon Sonuçları:

Röle	I_p	T_p
R1	2,80 A	0,05 s
R2	3,50 A	0,15 s
R3	3,65 A	0,27 s

- c) R1 rölesinin koruduğu hat üzerinde 2 kA'lık bir kısa devre meydana geldiğinde R1, R2 ve R3 rölelerinin kaç saniye gecikme ile bağlı oldukları kesicilerine açma kumandası vereceğini hesaplayınız. ($t_1=?$, $t_2=?$, $t_3=?$)

R1 için:

$$I = 2000 * \left(\frac{5}{150}\right) = 66,67 \text{ A} \quad T_{p1} = 0,05 \text{ s} \quad \text{ve} \quad I_{p1} = 2,80 \text{ A}$$

$$t_1 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p1}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p1} = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{66,67}{2,80}\right)^{0,02} - 1\right]} * 0,05 = 0,107 \text{ s}$$

$$t_1 = 0,107 \text{ s}$$

R2 için:

$$I = 2000 * \left(\frac{5}{300}\right) = 33,33 \text{ A} \quad T_{p2} = 0,15 \text{ s} \quad \text{ve} \quad I_{p2} = 3,50 \text{ A}$$

$$t_2 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p2}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p2} = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{33,33}{3,50}\right)^{0,02} - 1\right]} * 0,15 = 0,455 \text{ s}$$

$$t_2 = 0,455 \text{ s}$$

R3 için:

$$I = 2000 * \left(\frac{5}{400}\right) = 25 \text{ A} \quad T_{p3} = 0,27 \text{ s} \quad \text{ve} \quad I_{p3} = 3,65 \text{ A}$$

$$t_3 = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{p3}}\right)^{0,02} - 1\right]} * T_{p3} = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{25}{3,65}\right)^{0,02} - 1\right]} * 0,27 = 0,963 \text{ s}$$

$$t_3 = 0,963 \text{ s}$$

Kaynakça

ABB, (2019). Feeder Protection and Control REF615 Application Manual, Document ID: 1MRS756814, ABB.

Alstom (2011), Network Protection & Automation Guide Protective Relays, Measurements & Control. Alstom Grid Worldwide Contact Centre.

Anderson P. M., Henville C., Rifaat R., Johnson B., Meliopoulos S.,(2022). Power System Protection, Second Edition, IEEE Press WILEY (IEEE Press Series on Power Energy Systems).

Ballıpınar F., (2009). Elektrik Tesislerinde Koruma Tekniği ve Soma RES Tesisi 31.5 kV Orta Gerilim Projesinin İncelenmesi, Lisans Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Carlos, A. B., Henao C. O., Quintero M., Florez J. M., Orozco, A. H., (2023). Adaptive Protection for Active Distribution Networks: An Approach Based on Fuses and Relays with Multiple Setting Groups, IEEE Access, Vol.4, pp. 1-17.

Hewitson L. G., Brown M., Balakrishnan, R., (2005). Practical Power Systems Protection, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6397-7.X5000-8>.

Horowitz H., Phadke A. G. (2008). Power System Relaying, Third Edition, John Wiley and Sons Ltd.

IEEE Power and Energy Society, (2018.), IEEE Standard for Inverse Time Characteristics Equations for Overcurrent Relays, Revision of IEEE Std C37.112, USA.

Siemens, (2015). SIPROTEC Multi Functional Protective Relay with Local Control, Siemens 7SJ62/63/64 v4.6 Manual, Berlin.

Toruş A., (2014). TEİAŞ Aşırı Akım ve Toprak Rölesi Eğitimi Notları, TEİAŞ, İstanbul.

Valenzeula A., Simani S., Ortega I. E., (2021). Automatic Overcurrent Protection Coordination after Distribution Network Reconfiguration Based on Peer-To-Peer Communication, Energies, 2021, Vol.14 (11):3253.

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİNDE KORUMA VE HARMONİK YÜK AKIŞI

