



ELEKTRİK TESİSLERİNDE KISA DEVRE AKIM HESAPLARI

IEC 60909-0

Prof. Dr. İsmail Kaşıkçı

Özet

Elektrik tesislerinin planlanması, boyutlandırılması, hesaplanması ve değerlendirilmesi için tasarımcının geniş çapta elektrik temel bilgisinin yanısıra her projede geçerli olan Norm ve Standartlara, yönetmeliklere, bilgisayar destekli programlara ihtiyacı vardır. Elektrik tesislerinin sağlıklı kurulması, işletilmesi can ve mal güvenliği açısından çok önemlidir. Bu yazıda elektrik tesislerinde kısa devre hesaplama standardı IEC 60909-0 anlatılacaktır. Per unit metot standart değildir. Kullanılması tavsiye edilmez.

Anahtar kelimeler:

Empedans, kısa devre, üç ve tek faz kısa devre akımı, gerilim faktörü, eşdeğer gerilim kaynağı, simetrik bileşenler metodu, termik ve dinamik etkiler.

1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinde ortaya çıkan kısa devre akımları istenmeyen olaylardır. İşletme cihazlarını canı ve malı önemli derecede etkiler, zarar ve ziyan verir. Elektrik tesislerinin kısa devre sırasında termik ve dinamik zorlanmalara karşı dayanabilecek biçimde tasarlanmasında üç fazlı başlangıç kısa devre akımı I_{k3}'' oldukça önemlidir. Sistemin güvenli ve ekonomik olması için gerekli olan hata akımları, projeyi yapan mühendis ve fen adamları tarafından hesaplanmalıdır.

Elektrik şebekelerinde kısa devre akımlarının hesabı için IEC 60 909 dünyada tek geçerli Standarttır. Bu Standart kısa devre noktasındaki devrenin eş değer gerilim kaynağı yöntemine göre temel bilgiler bulunmaktadır.

Bu yöntem, aktüel işletme konumundan ve gelecekteki yük akışından bağımsız olduğundan, hesabı kolaylaştırır.

Elektrik işletme cihazlarının büyüklüğü hesaplarda kullanılır ve tüm şebeke beslemeleri, jeneratörler ve motorlar iç reaktanslarından sonra kısa devre edilmiş kabul edilir. Bu nedenle

eşdeğer gerilim kaynağı $\frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}}$ şebekedeki tek

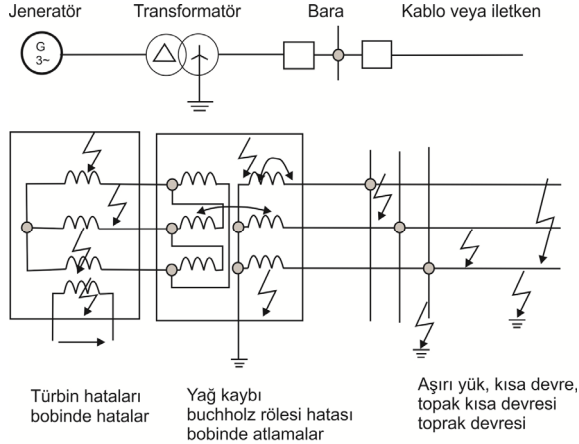
gerilimdir. Olası en büyük kısa devre akımı I_{k3}'' işletme cihazlarının seçimi için ve en küçük kısa devre akımı I_{k1}'' canı ve malı koruma önlemleri "Otomatik açma ile koruma" ve devre kesicilerde şebeke korumasının ayarı için temel alınır. Üç kutuplu kısa devre akımından başka tüm diğer kısa devre akımları simetrik bileşenler yardımı ile hesaplanır.

2. TARİFLER, TANIMLAR

Bu standardın amacı için IEC 60050 (131)'de verilen tarifler ve aşağıdaki tarifler uygulanır [1].

İlk önce elektrik tesislerinde ortaya çıkan hata akımlarını tanımlayalım [2,3].

Normal işletme şartlarında potansiyelleri farklı olan gerilim altındaki iletkenler arasında ihmal edilebilir empedanslı bir hata sonucu meydana gelen akımlara hata akımı denir. Ancak hata akımının cinsini tanımlamak gerekir. Çeşitli hata akımları **Şekil 1**'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Hataların tanımı

TN sistemde hata akımı devresini şebeke üzerinden (çevrim empedansı), TT sistemde ise toprak üzerinden (toprak çevrim empedansı) tamamlar.

TN sistemde gövdede oluşan hata PE ve PEN iletkeni üzerinden devresini tamamladığı için tek kutuplu kısa devre akımı gibi hesaplanır. Bazı hesap programları L-N ve L-PE arasındaki akımları ayrı olarak hesaplar.

Hata akımı:

Normal olmayan veya istenmeyen bir yol oluşması sonucunda akım akan bir devre durumudur. Genellikle bir yalıtım hatası veya yalıtımın köprülenmesi sonucu oluşur. Hata durumunda, gerilim altındaki iletkenler arasında veya gerilim altındaki iletkenler ile açıktaki veya yabancı iletken bölümler arasında empedansın ihmal edilecek kadar çok küçük olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Aşırı akım:

Beyan değerinden büyük bütün akımlardır. İletkenler için beyan değeri, akım taşıma kapasitesidir. Aşırı akım, aşırı yük akımı ve kısa devre olmak üzere ikiye ayrılır.

Aşırı yük akımı:

Bir devrede hata yok iken, oluşan aşırı akımdır.

Kısa devre akımı:

Normal işletme şartlarında potansiyelleri farklı olan gerilim altındaki iletkenler arasında ihmal edilebilir empedanslı bir hata sonucu meydana gelen akımdır. Kısa devre akımı sadece ana dış iletken (L1-L2-L3) veya ana dış iletken ve nötr (N) arasında ortaya çıkar. Projelerde bir ve üç fazlı kısa devre akımlarının hesabı yapılmalıdır.

Parazit (kaçak) akımlar:

İşletme araçlarının gerilim altındaki bölümlerinin yalıtımları içinden veya üzerinden, normal şartlarda toprağa akan akımdır. Bu akımlar bilgisayar sistemleri için tehlikelidir.

Kısa devre:

İki veya daha çok iletken bölümü arasında elektriksel potansiyel farkını eşitlemek veya sifira yaklaştırmak için zorlayan bu iletken bölümler arasındaki maksatlı veya maksatlı olmayan iletken yol.

Faz – Toprak kısa devresi:

Nötrü doğrudan veya empedans üzerinden topraklı sistemde, faz ile yerel toprak arasındaki maksatlı veya maksatlı olmayan iletken yol.

Kısa devre akımı:

Elektrik sisteminde kısa devreden kaynaklanan aşırı akım.

Simetrik kısa devre akımı:

Varsa periyodik olmayan bileşeni ihmal edilen, beklenen (oluşabilen) kısa devre akımının a.a. simetrik bileşeninin etken değeri

Tepe kısa devre akımı i_p :

Beklenen (oluşabilen) kısa devre akımının en büyük olası anî değeri

Eş değer elektrik devresi:

İdeal elemanların oluşturduğu bir şebeke vasıtasıyla devrenin davranışını tanımlayan model

Gerilim faktörü c:

Eş değer gerilim kaynağı ile $\sqrt{3}$ 'e bölünen anma gerilim U_n arasındaki oran. Bu değerler, Çizelge 1'de verilmiştir.

Başlangıç simetrik kısa devre akımı I''_k :

Empedansın, zamanın sıfır zaman değerinde kaldığı durumdaki kısa devre anında uygulanabilen (Şekil 2), beklenen (oluşabilen) kısa devre akımının a.a. simetrik bileşeninin etken değeri.

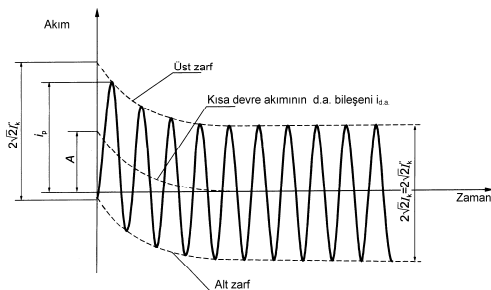
3. KISA DEVRE AKIMLARININ KARAKTERİSTİKLERİ

Kısa devre akımlarının tam hesaplaması, kısa devrenin başlangıcındaki gerilimin anî değerine tekabül eden, kısa devrenin başlamasından sona ermesine kadar kısa devre yerindeki akımları zamanın bir fonksiyonu olarak vermelidir (Şekil 2).

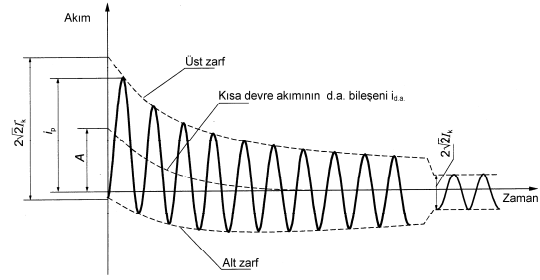
Çoğu uygulamalı durumda, bu tip belirleme gerekli değildir. Sonuçların uygulanmasına bağlı olarak, simetrik a.a. bileşenin etken değeri ile kısa devrenin oluşmasına müteakip kısa devre akımının tepe değerini i_p bilmek yeterlidir.

En yüksek i_p değeri, azalan periyodik olmayan zaman bileşenine ve f frekansına bağlıdır, bir başka deyişle Z_k kısa devre empedansının R/X

ve X/R oranlarına bağlıdır ve kısa devrenin gerilimin sıfır anında başlaması hâlinde bu değere erişilir. i_p , kısa devre akımının simetrik a.a. bileşeninin azalmasına da bağlıdır [1]. Gözli şebekelerde, birkaç doğru akım zaman sabiti vardır. Bu nedenle, i_p ve $i_{d.a}$ 'nin hesaplanmasıyla ilgili kolay bir metot vermek mümkün değildir. Yeterli doğrulukta i_p 'yi hesaplamak için özel metotlar verilmiştir.



a) Jeneratörden uzak bir kısa devre



b) Jeneratöre yakın bir kısa devre
Şekil 2: Kısa devre akımı (şematik diyagramı)
 I''_k Başlangıç simetrik kısa devre akımı
 i_p Tepe kısa devre akımı
 I_k Kararlı durum kısa devre akımı
 $i_{d.a}$ Kısa devre akımının d.a. bileşeni
 A $i_{d.a}$ d.a. bileşeninin başlangıç değeri

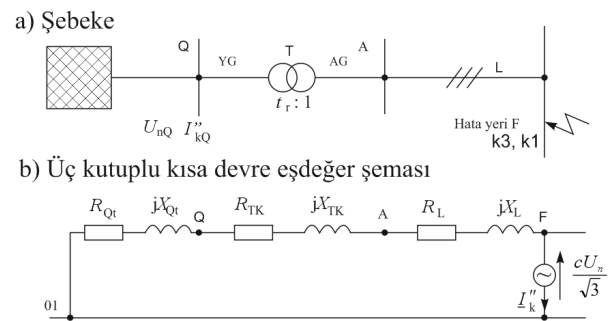
4. HESAPLAMA METOTLARI

Hesaplama için kullanılan metot, kısa devre yerindeki eş değer gerilim kaynağının uygulanmasını esas alır (Şekil 3).

Eş değer gerilim kaynağı yalnızca, sistemin aktif gerilimidir. Bütün şebeke fiderleri, senkron ve asenkron makinaları yerine, iç empedansları konur. Her durumda, eş değer gerilim kaynağı yardımıyla, F kısa devre yerindeki kısa devre akımlarını belirlemek mümkündür.

İşletme verileri ile müşteri yükleri, transformatörlerin kademe değıştiricisinin konumu, jeneratörlerin ikazlaması

ve benzerlerinden vazgeçilebilir, kısa devre anındaki bütün farklı olası yük akışlarıyla ilgili ilâve hesaplamalar gereksizdir [1].



Şekil 3: Elektrik dağıtım şebekesi ve eş değer gerilim kaynağının uygulanması

Gerilimlerin ve akımların, hatanın ortaya çıktığı yerde beyan dönüştürme oranı t_r ile dönüştürülmesi gerekir.

Tablo 1'de gerilim faktörü verilmiştir.

Tablo 1: Gerilim faktörü

Anma gerilimi	En fazla ve en az kısa devre akım hesaplamaları için gerilim faktörü c	
	En fazla kısa devre akımları C _{en fazla} ^{a)}	En az kısa devre akımları C _{en az}
Alçak gerilim 100 V ilâ 1000 V (IEC 60038, Çizelge 1)	1,05 ^{c)} 1,10 ^{d)}	0,95 0,9 ^{d)}
Yüksek gerilim ^{e)} > 1 kV ilâ 230 kV (IEC 60038:2009, Çizelge 3.4)	1,10	1,00
Yüksek gerilim ^{e)} > 230 kV (IEC 60038:2009, Çizelge 5)	1,10	1,00

^{a)} C_{en fazla} U_n, güç sistemlerindeki cihazın en yüksek gerilim U_m değerini aşmamalıdır.
^{b)} Anma gerilimi tanımlanmadığında, C_{en fazla} U_m = U_n veya C_{en az} U_n = 0,90 x U_m olarak uygulanmalıdır.
^{c)} ± % 6 toleranslı alçak gerilim sistemlerine için örnek olarak 380 V'tan 400 V'a kadar yeniden adlandırılan sistemler.
^{d)} ± % 10 toleranslı alçak gerilim sistemleri için.
^{e)} Anma gerilimi U_m > 420 kV olan gerilimler IEC 60909-0'da tanımlanmamıştır.

5. EN BÜYÜK KISA DEVRE AKIM HESABI

En büyük kısa devre akımları hesaplanırken, aşağıdaki koşulların uygulanması gerekir;

- En büyük gerilim faktörü C_{enbüyük}, ulusal standardın olmaması durumunda en büyük kısa devre akımlarının hesaplaması için uygulanmalıdır,
- Sistem konfigürasyonu ile kısa devre yerindeki kısa devre akımlarının en büyük değerine sebep olan güç santrallerinden ve şebeke fiderlerinden en büyük beslemeyi seçme veya kısa devre akımının kontrolü için şebekenin bölümlere ayrılmasını kabul etme,
- Eş değer empedans Z₀, dış şebekelerin temsil edilmesi için kullanıldığında, en küçük eş değer kısa devre empedansı, şebeke fiderlerinden beslenen en büyük kısa devre akımına tekabül etmesi için kullanılmalıdır,
- Motorlar dahil edilmelidir,
- Hatların (havaî hatlarının veya kabloların) rezistansı R_L, 20°C sıcaklıkta hesaplanması gerekir.

6. SİMETRİK BİLEŞENLER TEORİSİ

Bu yöntem kullanılarak her bir hat iletkenindeki akım, üç simetrik bileşenli sisteme ait akımlar toplanarak bulunur [1, 2]:

- Pozitif bileşen akımı $\underline{I}_{(1)}$,
- Negatif bileşen akımı $\underline{I}_{(2)}$,
- Sıfır bileşen akımı $\underline{I}_{(0)}$,

L1 hat iletkeni referans alınarak, $\underline{I}_{(L1)}$, $\underline{I}_{(L2)}$ ve $\underline{I}_{(L3)}$, aşağıda belirtilen eşitliklerle verilir:

$$\underline{I}_{L1} = I_{(1)} + I_{(2)} + I_{(0)}$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 I_{(1)} + a I_{(2)} + I_{(0)} \quad (1)$$

$$\underline{I}_{L1} = a I_{(1)} + \underline{a}^2 I_{(2)} + I_{(0)}$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}, \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (2)$$

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \quad (3)$$

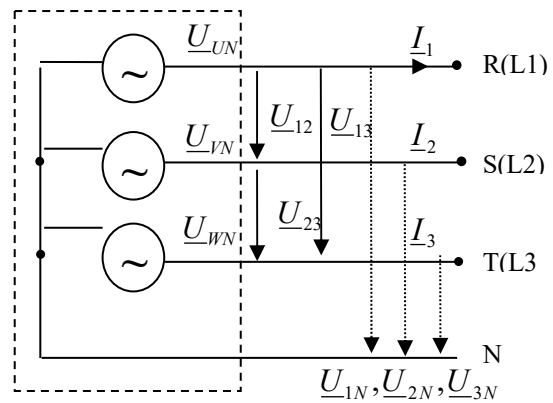
Üç simetrik bileşen sistemlerinin her birinin kendi empedansı vardır. Üç fazlı sistemlerde dengeli ve dengesiz kısa devrelerin sebep olduğu akımın değerini hesaplanması,, simetrik bileşenler kullanılarak basitleştirilir.

Bu husus, transpoze edilmiş hatlar gibi elektrikli teçhizatın dengeli bir yapıya sahip olmasını gerektirir.

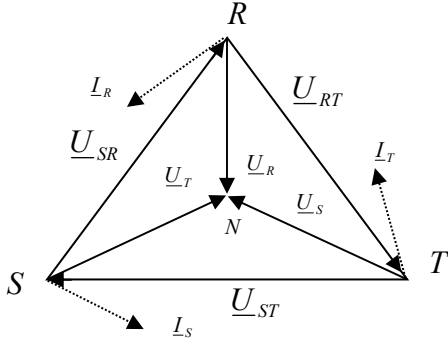
Kısa devre hesaplamalarının sonuçları, transpoze edilmemiş hatlarda bile kabul edilebilir doğrulukta olmalıdır.

Simetrik olmayan sistem durumları (kısa devre akımları), simetrik bileşenler cinsine dönüştürerek analiz edilmesini sağlar.

Simetrik (dengeli) bir şebekenin eşdeğer şeması akım ve gerilim diyagramları Şekil 4 ve 5'de verilmiştir. RST sadece simetrik bileşenleri incelemek için kullanılmıştır [2].



Şekil 4: Üç fazlı sistemlerde gerilim

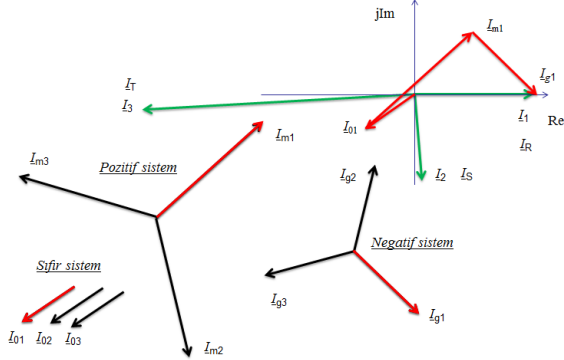


Şekil 5: Üç fazlı sistemlerde akımların vektörel gösterimi

$$\begin{aligned} u_u(t) &= \hat{u} \cdot \cos \omega t \\ u_v(t) &= \hat{u} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_w(t) &= \hat{u} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

Simetrik sistem analizi üç fazlı alternatif bir sistemde jeneratörün ürettiği simetrik sistemde gerilimler, eşit frekans ve amplitüde (genliğe) sahiptir ve aralarında $120^\circ (2\pi/3)$ faz farkı vardır.

Simetrik olmayan üç fazlı bir sistemin kendi içinde simetrik olan üç fazlı bileşen bileşenlere ayrılması ile simetrik bileşenler metodu açıklanır.



Şekil 6: Dengesiz üç fazlı sistemlerde simetrik bileşenlerin gösterimi

Simetrik bileşenler metodunda RST sembolleri basit olması nedeniyle alınmıştır. Akım komponentlerini Şekil 6 ile açıklayalım. Bileşenlerin akımları:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{I}_{1R} + \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R}, \\ \underline{I}_S &= \underline{I}_{1S} + \underline{I}_{2S} + \underline{I}_{0S}, \\ \underline{I}_T &= \underline{I}_{1T} + \underline{I}_{2T} + \underline{I}_{0T}, \\ \underline{I}_{0R} &= \underline{I}_{0S} = \underline{I}_{0T} = \underline{I}_0. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1S} &= \underline{I}_{1R} \cdot \underline{a}^2, \\ \underline{I}_{1T} &= \underline{I}_{1R} \cdot \underline{a}, \\ \underline{I}_{2S} &= \underline{I}_{2R} \cdot \underline{a}, \\ \underline{I}_{2T} &= \underline{I}_{2R} \cdot \underline{a}^2, \\ \underline{I}_{0R} &= \underline{I}_{0S} = \underline{I}_{0T}. \end{aligned} \quad (6)$$

Transfer edilmiş simetrik akım komponentleri ile hata akımların orijinal alanda toplamsal karışımı ile simetrik olmayan (dengesiz) akımlar elde edilir.

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{I}_{1R} + \underline{I}_{2R} + \underline{I}_{0R}, \\ \underline{I}_S &= \underline{I}_{1R} \cdot \underline{a}^2 + \underline{I}_{2R} \cdot \underline{a} + \underline{I}_{0R}, \\ \underline{I}_T &= \underline{I}_{1R} \cdot \underline{a} + \underline{I}_{2R} \cdot \underline{a}^2 + \underline{I}_{0R}. \end{aligned} \quad (7)$$

Matris denklemden akımlar çözülür.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{1R} \\ \underline{I}_{2R} \\ \underline{I}_{0R} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1R} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + \underline{I}_S \cdot \underline{a} + \underline{I}_T \cdot \underline{a}^2), \\ \underline{I}_{2R} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + \underline{I}_S \cdot \underline{a}^2 + \underline{I}_T \cdot \underline{a}), \\ \underline{I}_{0R} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{1R} \\ \underline{I}_{2R} \\ \underline{I}_{0R} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_S \\ \underline{I}_T \end{bmatrix}$$

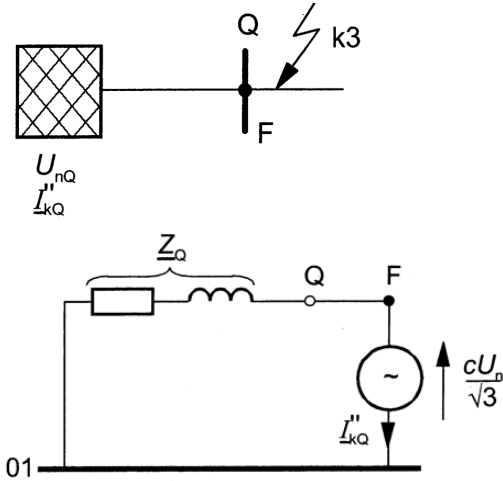
$$I_{120} = S \cdot I_{RST}.$$

$$(10)$$

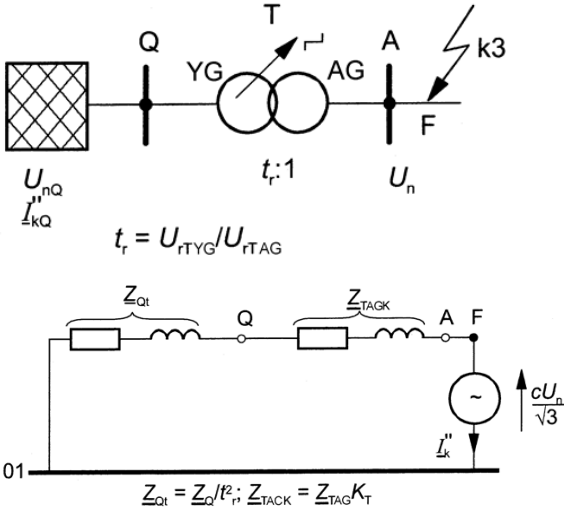
7. ELEKTRİK Lİ DONANIMIN KISA DEVRE EMPEDANSLARI

5.1 Şebeke fiderleri

Şekil 7'e göre üç faz kısa devre; Q fider bağlantı noktasında yalnızca başlangıç simetrik kısa devre akımı I''_{kQ} bilindiği şebekeden beslenirse, bu durumda Q fider bağlantı noktasında şebekenin eş değer empedansı Z_Q (pozitif bileşen kısa devre empedansı), aşağıdaki gibi belirlenmelidir [1]:



$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} \quad X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/Z_Q)^2}} \quad (11)$$



Şekil 7: Şebeke fiderleri için sistem diyagramı ile eş değer devre diyagramı

5.2 Transformatörler

Yükte kademe değıştiricili olan veya olmayan iki sargılı transformatörün pozitif bileşen kısa devre empedansları

$Z_T = R_T + jX_T$, aşağıdaki gibi beyan transformatör verilerinden hesaplanabilir [1]:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{\%100} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (12)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{\%100} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (13)$$

Burada:

U_{rT} Yüksek gerilim veya alçak gerilim tarafındaki transformatörün beyan gerilimi,

I_{rT} Yüksek gerilim veya alçak gerilim tarafındaki transformatörün beyan akımı,

S_{rT} Transformatörün beyan görünen gücü,

P_{krT} Beyan akımda sargılarda transformatörün toplam kaybı,

u_{kr} Beyan akımda yüzde kısa devre gerilimi,

u_{Rr} Kısa devre geriliminin yüzde beyan rezistif bileşeni.

YG tesislerinde iki ve üç sargılı şebeke transformatörleri için empedans düzeltme faktörleri yapılmalıdır.

$$Z_{TK} = K_T Z_T$$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{en \text{ büyük}}}{1 + 0,6X_T} \quad (14)$$

5.3 Havaî hatlar ve kablolar

Pozitif bileşen kısa devre empedansı

$Z_L = R_L + jX_L$, iletkenlerin kesitleri ve merkez uzaklık gibi iletken verilerinden hesaplanabilir [1].

Pozitif bileşen empedansı $Z_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}$ ile sıfır bileşen empedansının $Z_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$ değerleri IEC 60909-4'de verilmiştir.

20°C iletken sıcaklığında havaî hatlarının birim

uzunluğundaki etkin direnç R'_L , anma kesici q_n ile özdirenç ρ' dan hesaplanabilir:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} = \frac{1}{\kappa \cdot q_n} \quad (15)$$

Bakır özdirenç değeri için:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{m} \quad (16)$$

Havaî hatlar için birim uzunluğundaki reaktansı X'_L , transpozisyon farz edilerek aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (17)$$

Burada:

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} d_{L2L3} d_{L3L1}}$ iletkenler veya bandılların merkezleri arası geometrik ortalama uzaklık,
 r Tek iletkenin yarı çapı. İletkenin bandıl olması durumunda, r 'nin yerine $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ 'nin geçmesi gerekir. Burada, R bandılın yarı çapıdır (IEC 60909-2),
 n Bandıldaki iletken sayısı, tek iletken için $n=1$,
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

5.4 Senkron jeneratörler

Transformatörsüz doğrudan jeneratörden beslenen endüstri veya alçak gerilim şebekeleri gibi sistemlerde, başlangıç simetrik kısa devre akımları hesaplanırken, aşağıda belirtilen empedansın, pozitif bileşen sisteminde kullanılması gerekir [1]

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + j X_d'')$$

aşağıdaki düzeltme faktörü ile:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{en \text{ büyük}}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (18)$$

Burada:

$c_{en \text{ büyük}}$ Gerilim faktörü,
 U_n Sistemin anma gerilimi,
 U_{rG} Jeneratörün beyan gerilimi,
 \underline{Z}_{GK} Jeneratörün düzeltilmiş başlangıç geçici empedansı,
 \underline{Z}_G Pozitif bileşen sisteminde jeneratörün başlangıç geçici empedansı: $\underline{Z}_{GK} = (R_G + j X_d'')$
 φ_{rG} \underline{I}_{rG} ile $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$ arasındaki faz açısı,
 x_d'' Beyan empedansla ilgili jeneratörün nispi başlangıç geçici reaktansı: $x_d'' = X_d''/Z_{rG}$, burada, $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$.

5.5 Asenkron motorlar

Orta gerilim ve alçak gerilim motorları, başlangıç simetrik kısa devre akımını I_k'' , tepe kısa devre akımını i_p , simetrik kısa devre kesme akımını I_b ve dengesiz kısa devreler için kararlı durum kısa devre akımını I_k de besler [1].

Alçak gerilim motorları, santral şalt merkezindeki yardımcı tesislerde, endüstride ve benzeri tesislerde, örneğin kimyasal tesislerde, çelik sanayisinde ve pompa istasyonlarında, dikkate alınması gerekir.

Alçak gerilim güç besleme sistemlerinde asenkron motorların kısa devre akımına I_k'' katkısı; bu katkı, motor olmaksızın hesaplanan başlangıç kısa devre akımının I_{kM}'' % 5'inden daha büyük değil ise ihmal edilebilir.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 \cdot I_{kM}'' \quad (19)$$

Burada:

U_{rM} Motorun beyan gerilimi,
 I_{rM} Motorun beyan akımı,
 S_{rM} Motorun beyan görünen gücü ($S_{rM} = P_{rM}/\eta_{rM} \cos \varphi_{rM}$),
 $\underline{I}_{LR}/I_{rM}$ Bloke edilmiş rotor akımının, motorun beyan akımına oranı.
 R_M/X_M 'nin bilinmesi durumunda X_M , aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M / X_M)^2}} \quad (21)$$

Kısa devrenin oluştuğu şebekeye iki sargılı transformatör vasıtasıyla bağlı orta ve alçak gerilim motorları, fiderin bağlı olduğu Q noktasında kısa devreyle ilgili kısa devre akımlarının hesaplanmasında ihmal edilebilir (Şekil 8).

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} = \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3}U_{nQ} I''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (22)$$

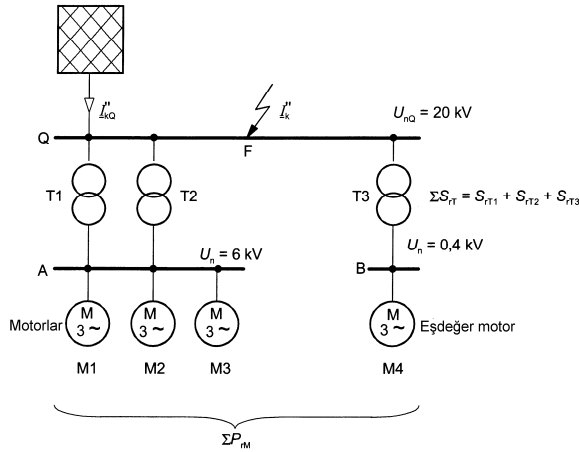
Burada:

$\sum P_{rM}$ Göz önüne alınması gereken orta ve alçak gerilim motorlarının toplam beyan aktif gücü,

$\sum S_{rT}$ Motorların doğrudan beslendiği bütün transformatörlerin toplam beyan görünen gücü,

I''_{kQ} Motorlar ilâve edilmeksizin fiderin bağlı olduğu Q noktasında başlangıç simetrik kısa devre akımı,

U_{nQ} Fiderin bağlı olduğu Q noktasında sistemin anma gerilimi.



Şekil 8: Toplam kısa devre akımına asenkron motorların katkısına örnek

5.6 Çift beslemeli asenkron jeneratör rüzgar enerji santralleri

Çift beslemeli asenkron jeneratörlerde (WD) kısa devre pozitif bileşen tüm empedansı

$$Z_{WD} = \frac{\sqrt{2} \cdot \kappa_{WD} \cdot U_{rTHV}}{\sqrt{3} \cdot i_{WD \text{Denfazla}}} \quad (23)$$

Burada:

U_{rTHV} Transformatörün YG tarafında anma beyan gerilimi,

κ_{WD} Kısa devre tepe noktasının hesaplanması için üretici tarafından verilen faktör,

$i_{WD \text{Denfazla}}$ Üç faz kısa devre akımının en yüksek tepe değer.

6. KISA DEVRE AKIMLARININ HESAPLANMASI

6.1 Üç faz kısa devre

Genelde başlangıç simetrik kısa devre akımı I''_k , kısa devre yerindeki eş değer gerilim kaynağı $cU_n/\sqrt{3}$ ve kısa devre empedansı $Z_k = R_k + jX_k$ ile hesaplanmalıdır [1,2].

$$I''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (24)$$

6.2 Faz - faz kısa devre

Faz-faz kısa devre durumunda, başlangıç kısa devre akımı aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır [1,2]:

$$I''_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_k \quad (25)$$

6.3 Faz-toprak kısa devresi

Başlangıç faz-toprak kısa devre akımı I''_{k1} , aşağıdaki biçimde hesaplanmalıdır [1,2]:

$$I''_{k1} = \frac{3}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Eğer $Z_{(0)}, Z_{(2)} = Z_{(1)}$ küçük ise faz-toprak kısa devre akımı üç faz kısa devre akımından büyük olur.

$Z_{(2)} = Z_{(1)}$ ile jeneratörden uzak kısa devre için mutlak değeri alınan bu eşitlikler:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 |Z_{(1)} + Z_{(0)}|} \quad (27)$$

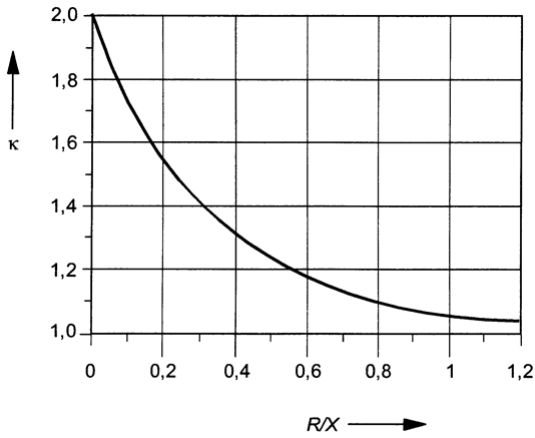
6.4 Tepe kısa devre akımı i_p

Gözlü olmayan şebekelerden beslenen üç faz kısa devreler için her bir koldan kısa devre akımına katkı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [1,2]:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (28)$$

R/X veya X/R oranları için κ faktörü, Şekil 9'dan veya aşağıdaki ifadeden elde edilmelidir:

$$\kappa = 1,02 + 0,9 e^{-3R/X} \quad (29)$$



Şekil 9: R/X veya X/R oranının bir fonksiyonu olarak seri devreler için κ faktörü

6.5 Enerji (Joule integral) ve termik eş değer kısa devre akımı

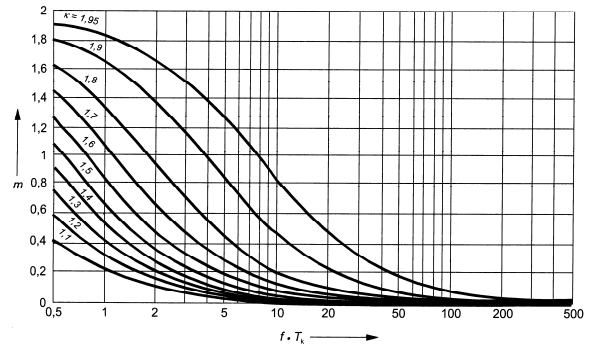
Joule integral $\int i^2 dt$, kısa devre akımı ile sistemin rezistif elemanında tüketilen enerjinin ölçülmesidir. Bu standardda söz konusu enerji; kısa devre akımının d.a. bileşeninin zamana göre sıcaklık etkisi için m faktörü ve kısa devre akımının a.a. bileşeninin zamana göre etkisi için n faktörü kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 10).

Termik eş değer kısa devre akımı [1,2]:

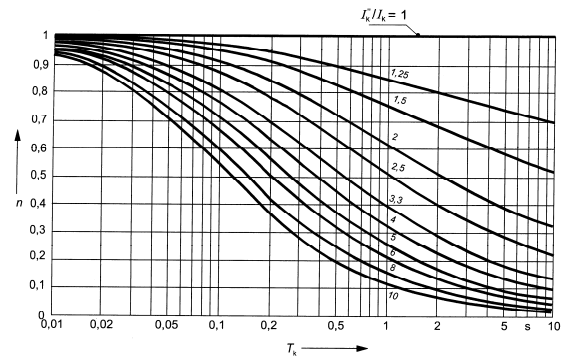
$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (30)$$

Dağıtım şebekeleri (jeneratörden uzak kısa devreler) için genellikle $n = 1$ kullanılabilir.

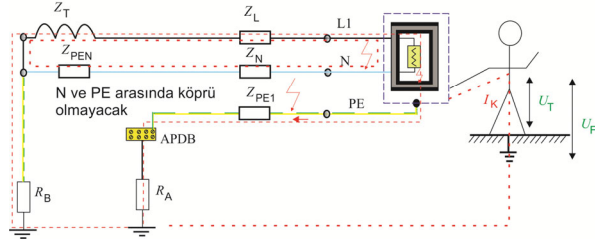
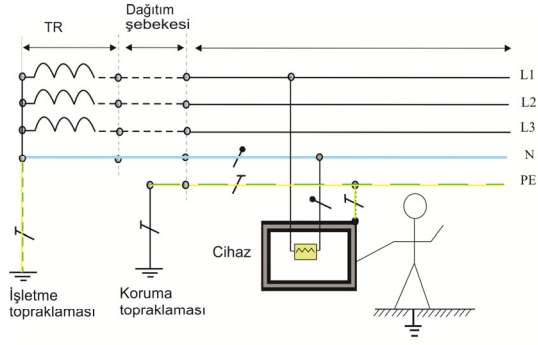
Şekil 11'de kısa devre akımının a.a. bileşeninin ısı etkisi için n faktörü gösterilmiştir. İşletme cihazları üç fazlı kısa devreye göre seçilecek ve akımın tepe noktası dikkate alınacaktır.



Şekil 10: Kısa devre akımının d.a. bileşeninin ısı etkisi için m faktörü



Şekil 11: Kısa devre akımının a.a. bileşeninin ısı etkisi için n faktörü



Şekil 13: TT sistemde kısa devre ve gövde hata akımının gösterilmesi

TT sistemde hata akımı:

$$I_F = \frac{U_0}{R_A + R_B} \quad (33)$$

Burada

R_B işletme direnci
 R_A Koruma direncidir.

TT sistemde gövde hata akımları çok düşüktür. Dolayısıyla RCD kullanımı zorunludur.

Kısa devre akımları TN sistem de olduğu gibi hesaplanır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yazıda IEC 60909-0 genel hatları ile açıklanmıştır. Standartın kapsamı ve tarifler üzerinde durulmuştur. Kısa devre akımlarının karakteristikleri ve hesaplama metotları anlatılmıştır.

Elektrik donanımın kısa devre empedansları ve empedans düzeltme faktörleri verilmiş ve en önemli kısa devre akımları sunulmuştur.

Her bağlantı noktasında gerekli olan en fazla I''_{k3} ve en küçük kısa devre akımı I''_{k1} hesaplanmalı, hata akımının dinamik etkileri, otomatik açma ve kesicilerin kesme kapasiteleri ve açma koşulları dikkate alınmalıdır.

Kablo ve letkenlerin termik dayanımı için termik eşdeğer akım I_{th} hesaplanmalı ve kesit kontrol edilmelidir.

Tesisatın ve projeyi yapan mühendisin güvenliği açısından Simaris ve Neplan, PowerFactory gibi programların kullanılması gereklidir.

KAYNAKLAR:

1. IEC 60909-0:2016-01: Short-circuit current calculation in three-phase ac-systems
2. İsmail Kaşıkçı, IEC 60909: Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesapları, 2007, Birsen Yayınevi
3. İsmail Kaşıkçı, Elektrik Mühendisliği, Üretim, İletim ve Dağıtım, Birsen Yayınevi, 2013
4. İsmail Kaşıkçı, Elektrik Tesisleri Proje Uygulama ve Yönetmelikler, Birsen 2014
5. Alçak gerilim elektrik tesisleri IEC 60364

Ek bilgiler:

Alternatif akım ve gerilimler zaman alanında sinüs veya kosinüs fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$\begin{aligned} u(t) &= \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \varphi_u^*) \\ i(t) &= \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i^*) \end{aligned} \quad \text{burada } \varphi^* - \varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ ve } +\frac{3}{2}\pi \text{ alınır.} \quad (1)$$

Akım ve gerilim fonksiyonları diferensiyel veya integral ortamda yazılırsa

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad \text{veya} \quad u_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t) \quad (2)$$

Bu denklemlerin hesaplanması zor olduğundan akım ve gerilimler fazörler kullanılarak hesaplanır.

Frekans ortamında:

$$\frac{d}{dt} \Rightarrow j\omega \quad \text{ve} \quad \int dt \Rightarrow \frac{1}{j\omega} \quad (3)$$

İki nolu formüle üç nolu formül uygulandığında

$$\underline{U}_L = (R + j\omega L) \cdot \underline{I} = \underline{Z}_L \cdot \underline{I}, \quad \underline{U}_C = \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \cdot \underline{I} = \underline{Z}_L \cdot \underline{I} \quad \text{elde edilir.} \quad (6)$$

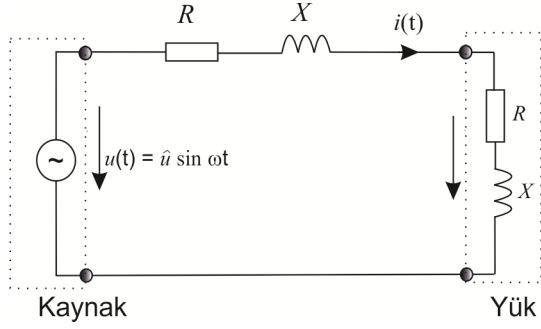
Bir nolu formül kompleks ortamda yazılırsa

$$\underline{u}(t) = \hat{u} \cdot \left[\cos(\omega t + \varphi_u) + j \sin(\omega t + \varphi_u) \right] \quad (7)$$

Yedi nolu formülü Euler'e uyguladığımızda $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$

$$\underline{u}(t) = \hat{u} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_u)} = \underline{U} \cdot e^{j\omega t} \quad \text{akım içinde durum aynıdır.} \quad (8)$$

Elektrik güç sistemlerinde kompleks empedans hesabı çok önemlidir. Örnek transformatörler, kablo ve iletkenler ve motorlar iki kollü empedans ile hesaplanır.



$$\underline{Z} = R + jX = Z \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = Z \cdot e^{j\varphi} = Z \cdot \angle \varphi_z \quad (9)$$

Buradan empedans değerini ve açısını hesaplayabiliriz.

$$|\underline{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \varphi_z = \arctan \frac{X}{R} \quad (10)$$

Bu formülde: Resistans (etkin direnç) $R = Z \cdot \cos \varphi_z$ ve Reaktans (indüktif direnç)

$X = Z \cdot \sin \varphi_z$ değerleri bulunur.

Bu yöntem tüm kısa devre hesaplarında uygulanır.