

# Elektrik Sistemlerinin Planlanması

## Elektrik tesislerinde kısa devre akımlarının hesaplanması (IEC 60909-0)

Prof.Dr. İsmail Kaşıkçı

Bu makalede karakteristik kısa devre akımları ve bunların hesaplanması açıklanacaktır. Bu özellikle kısa devre dayanımına ilişkin gerekli kanıtlarla ve dikkate alınması gereken özelliklerle ilgilidir.

IEC 60909-0 dünyada ve bilimsel camiada kabul görmüş tek standarttır [1]. Bunlar şu karakteristik kısa devre akımlarını içerir.

- Başlangıç kısa devre alternatif akımı,
- Darbe tepe kısa devre akımı,
- Termik eşdeğer kısa devre akımı ve
- Alternatif kapatma akımı.

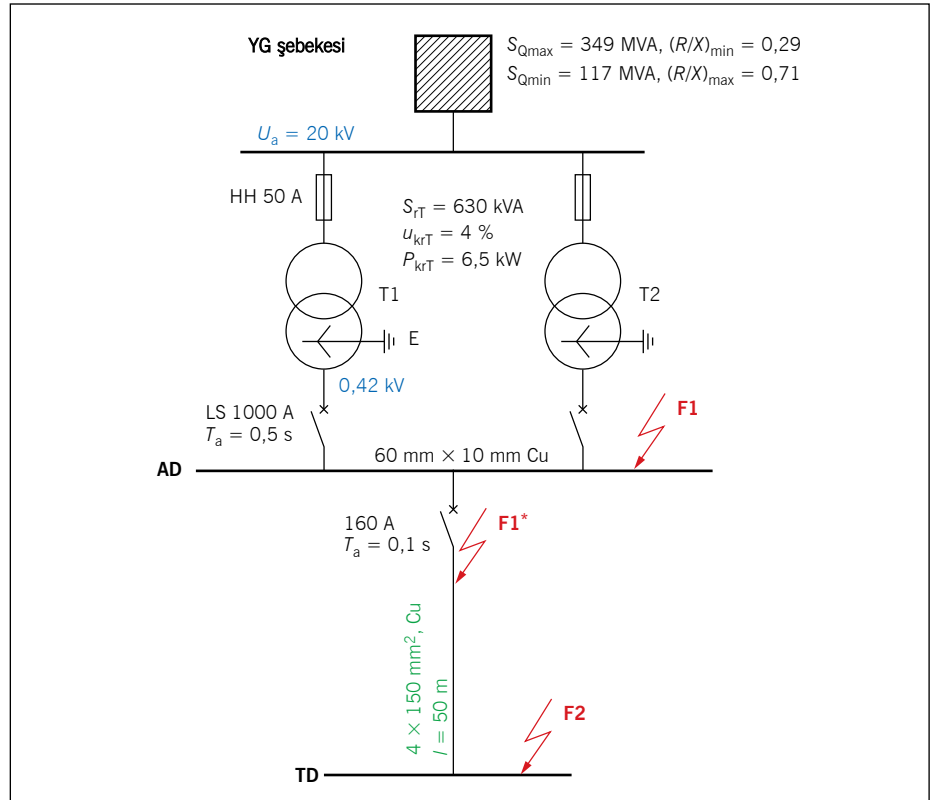
Standart, elektrik sistemleri planlanırken gerekli doğrulamalar veya kontroller için bu akımların nasıl kullanılması gerektiğini belirtmez. Şekil 1'de gösterilen şebeke ile hesaplar yapılacaktır.

### 1. Başlangıç kısa devre akımı

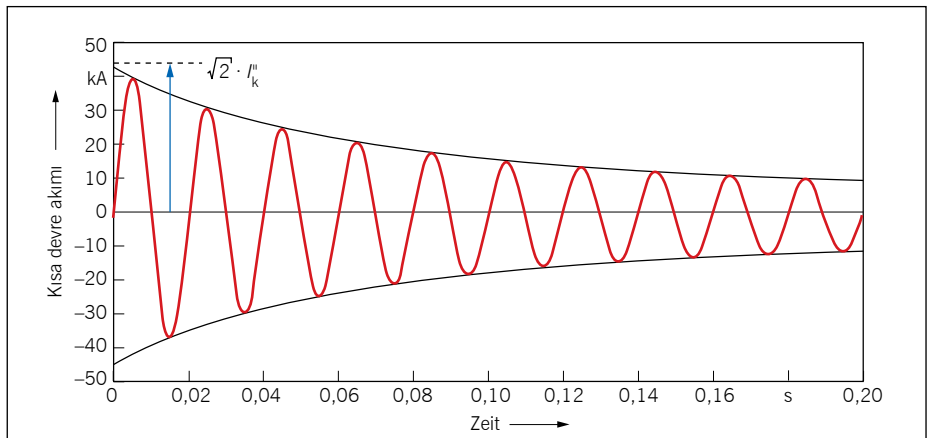
Başlangıç kısa devre alternatif akımı, kısa devrenin meydana geldiği anda tanımlanan akımın etkin değeridir. Generatör yakınında kısa devre olması durumunda bu akım, kısa devre olduğu anda elektrik makinelerinde manyetik yer değiştirme etkilerinin geçici olarak neden olduğu ek alt geçici ve geçici alternatif akım bileşenlerini de içerir. Generatörün yakınındaki kısa devre akımının seyri Şekil 2'de gösterilmektedir. Kısa devrenin bulunduğu yerin yakınında besleme yapan generatörler ve asenkron motorlar yoksa veya yalnızca şebekeye besleme varsa, generatörden uzakta kısa devre adı verilen bir durum meydana gelir. Kısa devre akımının seyri bu durumda sabit bir sinüs eğrisine karşılık gelir. Simetrik, üç kutuplu başlangıç kısa devre alternatif akımının (1)

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma 1}} \quad (1)$$

hesaplanması, ohmik yasa kullanılarak gerçekleştirilir.  $U_n/\sqrt{3}$  ağının hat gerilimi uygulanabilir kısa devre empedansına  $Z_k$  (generatöre yakın kısa devre) veya (generatörden uzakta kısa devre) bölünür: Değiştirilen gerilim kaynağından kısa devre noktasına kadar olan empedansın tamamı kaydedilmeli ve kısa devre empedansı olarak kullanılmalıdır. Gerilim faktörü  $c$ , özellikle en büyük ve en küçük kısa devre akımlarını ayırt etmek için kısa devre akımı seviyesi üzerindeki diğer etkileri dikkate alır. Başlangıçtaki kısa devre alternatif akımlarının hesaplanması [2]'de ayrıntılı olarak açıklanmış ve sonuçlar, karakteristik kısa devre akımlarının belirlenmesi için başlangıç değişkenleri olarak Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1: Hesaplama örneği için genel devre şeması



Şekil 2: Tüm alternatif akım bileşenleriyle birlikte kısa devre akım eğrisi (generatörün yakınında kısa devre)

**Tablo 1: Kısa devre türüne ve arıza konumuna bağlı olarak kA cinsinden kısa devre akımları (harici iletkenlerdeki en büyük ve en küçük kısa devre akımlarını vurgulayarak) [2]**

Hata yeri Tipi	En büyük kısa devre akımı		En küçük kısa devre akımı	
	F1/F1*	F2	F1/F1*	F2
$I_{k3}$	41,3	20,1	–	–
$I_{k2}$	–	–	15	9,6
$I_{k1}$	43,2	13,5	18,3	8,4
$I_{kE2E}$	45,3	10,2	19,3	6,7
$I_{kEL2E}$	42,4	18,6	17,7	10,6
$I_{kEL3E}$	42,2	17,6	18	9,7

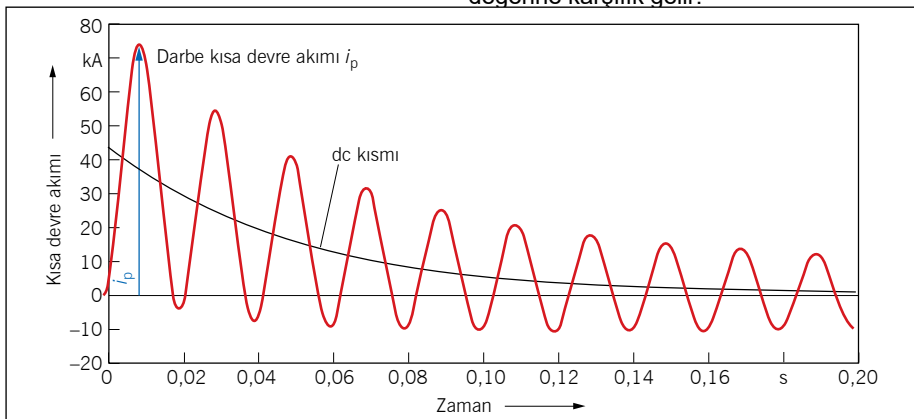
## 2. Darbe tepe kısa devre akımı

Ani kısa devre akımı, başlangıçtaki kısa devre alternatif akımının ilk tepe değeridir; bu, üstel olarak azalan bir doğru akım tarafından artırılır ve böylece geçici kısa devre akımının tepe değeri haline gelir (Şekil 3). Etkilenmeyen kısa devre akımının mümkün olan maksimum tepe değeri olarak kabul edilmelidir. Doğru akım elemanı aracılığıyla kısa devre akımını artırma işlemi, omik endüktif devrenin fiziksel olarak açılması işlemine karşılık gelir ve bu nedenle hem generatöre yakın bir kısa devre hem de generatörden uzakta bir kısa devre durumunda meydana gelir. Doğru akım elemanının yüksekliği, tüm kısa devre akım yolunun empedans oranına (R/X) ve kısa devre meydana geldiğinde şebeke geriliminin rastgele, anlık değerine bağlıdır. Bilindiği gibi, ohmik-endüktif bir yük olduğunda sinüzoidal akım, gerilimin gerisinde kalır. Yük durumu kısa devresi, şebeke geriliminin sıfır geçişinde meydana gelir.

Kısa devre akımının pratik olarak belirlenmesi ve kısa devrenin oluşması için en elverişsiz sürenin, yani gerilimin sıfır geçiş süresinin olduğu varsayılır. Mekanik kısa devre dayanımı kanıtının uygulanması ile güvenli bir sistem kurulur. Akımdaki artış teorik olarak neredeyse iki kat daha yüksek olabilir ve **darbe katsayısı**  $\kappa$  olarak ifade edilir. Arıza konumuna kadar olan kısa devre akım yolunun R/X oranına bağlıdır. Dalgalanma kısa devre akımı  $i_p$ , başlangıçtaki kısa devre alternatif akımının tepe değeri ve dalgalanma faktörü  $\kappa$  kullanılarak hesaplanır:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} \quad (2)$$

R/X oranı çok küçükse; Kısa devre empedansı neredeyse tamamen endüktiftir (generatöre yakın kısa devre), dalgalanma faktörü büyüktür ( $\kappa \approx 1,8$ ) ve dalgalanma kısa devre akımı 10 ms'den kısa bir süre önce meydana gelir. Kısa devre empedansı omik ise; alçak gerilim aralığında uzun bir hattın sonunda kısa devre olması durumunda, doğru akım bileşeni ihmal edilebilecek kadar küçüktür ( $\kappa \rightarrow 1,02$ ) ve tepe değeri yaklaşık olarak kısa devrenin tepe değerine karşılık gelir.



Şekil 3: Doğru akım bileşenini içeren kısa devre akım eğrisi

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot \kappa \quad (3)$$

## 3. Termik eşdeğer kısa devre akımı

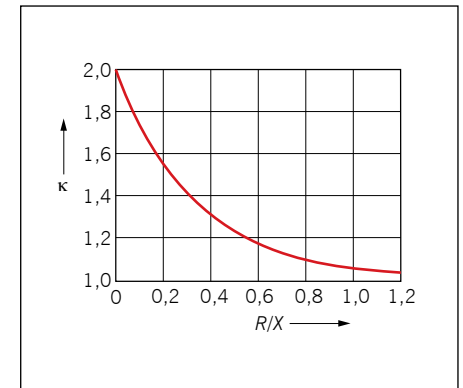
Alt geçici ve geçici bileşenlerden, sabit kısa devre akımından ve üst üste gelen doğru akımdan oluşan kısa devre akımının zaman süreci, herhangi bir akım gibi termal bir etkiye sahiptir. Akım eğrisinin doğru akım elemanı boyunca kaydırılmasıyla, alternatif akım bileşenlerinin veya başlangıçtaki kısa devre alternatif akımının termal etkisi artar. Bu etki  $n$  faktörü tarafından dikkate alınır. Doğru akım bileşeninden kaynaklanan ek ısı gelişimi  $m$  faktörüyle dikkate alınır:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \quad (4)$$

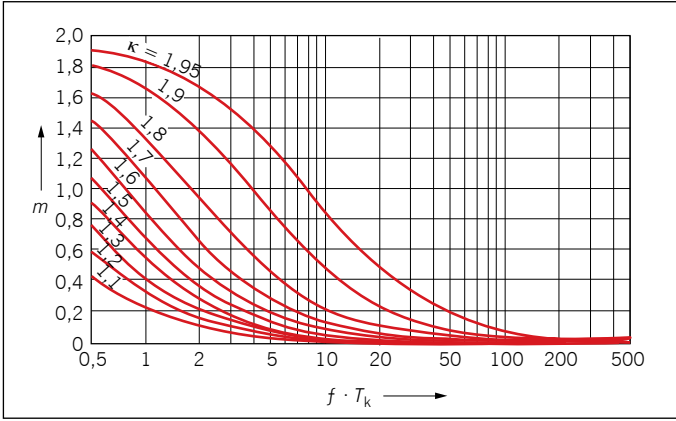
$m$  ve  $n$  faktörlerinin belirlenmesi için hesaplama formülleri IEC 60909-0'da verilmiştir. Değerler genellikle Şekil 5 ve 6'dan yeterli doğrulukla alınabilir.

## 4. Alternatif akımın kapatılması

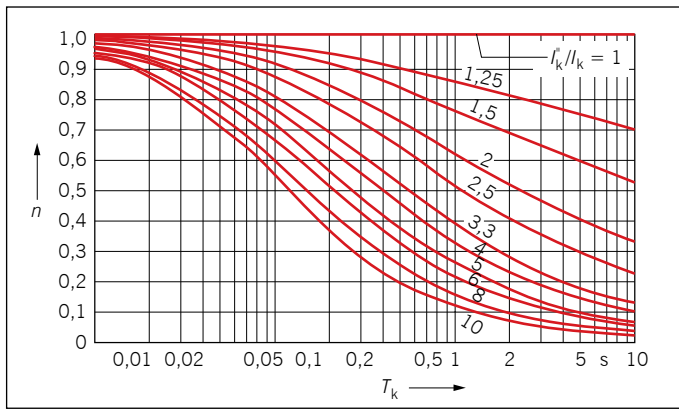
Kısa devre akımının anahtarlama cihazları aracılığıyla kesilmesi biraz zaman alır. Ancak kısa sürede generatör yakınında kısa devre olması durumunda kısa devre akımının genlik değerleri üstel bir ilerlemeden sonra hızla azalır (Şekil 7).



Şekil 4: Ani kısa devre akımını hesaplamak için  $\kappa$  faktörü [1, Şekil 15]



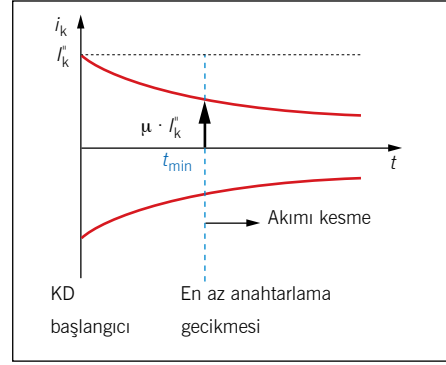
Şekil 5: Doğru akım bileşenini dikkate almak için m faktörü [1, Şekil 21]



Şekil 6: Doğru akım bileşenini dikkate almak için m faktörü [1, Şekil 21]

Generatör yakınında kısa devre olması durumunda akım kesilene kadar genlik değerleri azaldığından, anahtarlama cihazının başlangıçtaki kısa devre alternatif akımını kesmesi gerekmez, bunun yerine daha düşük bir akımı kesmesi gerekir. Bu nedenle anahtarlama cihazı muhtemelen daha küçük bir nominal akımla seçilebilir.

Kısa devre akımının azalması,  $\mu$  faktörü ile kapatma alternatif akımı  $I_b$ 'nin hesaplanmasına dahil edilir (Şekil 8). Devre kesicinin minimum anahtarlama gecikmesi  $t_{min}$  ne kadar büyük olursa, kısa devre akımı da o kadar uzun süre zayıflayabilir; kesilmesi gereken akım:



Şekil 7: Devre kesici tarafından gecikmeli kapatma (Kısa devre akımı zarf eğrisiyle gösterilmiştir)

$$I_b = \mu \cdot I_k^n \quad (5)$$

Generatörden uzakta kısa devre olması durumunda, yalnızca zamanla sabit bir kısa devre alternatif akımı vardır, böylece kapatma alternatif akımı  $I_b$ , başlangıçtaki kısa devre alternatif akımına  $I_k$  veya kısa devre değerine eşit olur.

$$I_b = I_k \quad (6)$$

## 5. Kısa devre gücü

Kısa devre dayanımının kanıtlanması için temel kural, imalatçı tarafından ekipman, şalt donanımı, kablolar ve hatlar için belirtilen nominal kısa devre değerinin, belirlenen veya hesaplanan kısa devre gerilimi tarafından aşılmamasıdır:

**Nominal kısa devre kapasitesi  
(üretici bilgisi)  $\geq$  kısa devre**

## 6. Mekanik kısa devre dayanımı

Şalt kombinasyonları için nominal kısa devre değeri, nominal darbe akımı direnci  $I_{pk}$ , üretici tarafından bir akım değeri olarak belirtilir. Tepe kısa devre akımı (ilk tepe kısa devre akımı)  $i_p$  tarafından aşılmamalıdır:

$$I_{pk} \geq i_p \quad (7)$$

Mekanik kısa devre dayanımı şalt kombinasyonları için nominal kısa devre değeri, nominal darbe akımı direnci  $I_{pk}$ , üretici tarafından bir akım değeri olarak belirtilir. Tepe kısa devre akımı (ilk tepe kısa devre akımı)  $i_p$  tarafından aşılmamalıdır:

## Gerekli aşırı kısa devre akımlarının hesaplanması

Ana dağıtım AD (hata noktası F1) Üç kutuplu darbe kısa devre akımı, başlangıçtaki kısa devre alternatif akımı  $I''_{k3}$  ve darbe faktörü  $\kappa$  kullanılarak belirlenir:

$$\kappa_{F1} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_{sF1}}{X_{sF1}}} \quad (8)$$

$$= 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{1,599 \text{ m}\Omega}{5,94 \text{ m}\Omega}} = 1,46$$

$$i_{p3} = \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \cdot \kappa_{F1} \quad (9)$$

$$= \sqrt{2} \cdot 41,3 \text{ kA} \cdot 1,46 = 85,3 \text{ kA}$$

Ani kısa devre akımın daha kesin bir şekilde hesaplanması için, diğer kısa devre türlerinde darbe faktörü  $\kappa$  belirlenebilir. Ancak basit hesap yapmak amacıyla, standartta belirtildiği gibi, üç kutuplu kısa devre akımının  $\kappa$  değeri daha sonraki hesaplamalarda da kullanılır. Harici iletkenlerde toprak kontağı bulunan iki kutuplu bir kısa devrenin neden olduğu kısa devre akımı:

$$i_{p2ELE} = \sqrt{2} \cdot I''_{k2ELE} \cdot \kappa_{F1}$$

$$= \sqrt{2} \cdot 42,4 \text{ kA} \cdot 1,46 = 87,55 \text{ kA} \quad (10)$$

Bara harici iletkeni ile nötr iletkeni arasında tek kutuplu bir kısa devre olması durumunda, tepe kısa devre akımı,

$$i_{p1LN} = \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \cdot \kappa_{F1}$$

$$= \sqrt{2} \cdot 43,2 \text{ kA} \cdot 1,46 = 89,2 \text{ kA} \quad (11)$$

Bu nedenle şalt cihazı kombinasyonunun nominal darbe akım gücü  $I_{pk}$ , olası kısa devre türlerine karşı mekanik dayanıklılığın garanti edilebilmesi için en az 90 kA olmalıdır!

## Şalttaki baralara kuvvet etkisi

Baraların mekanik kısa devre dayanımı bilinmiyorsa, VDE 0103 [3]'e uygun olarak baralar ve destek elemanları üzerindeki kuvvet etkileri kullanılarak belirlenmelidir. Genel olarak aşağıdakiler, destek noktası uzunluğu  $l$  ve iletken aralığı  $a$  ile paralel olarak düzenlenmiş iletkenler arasındaki kuvvet etkisinin yanı sıra  $i_1$  ve  $i_2$

iletkenlerindeki akımlar için de geçerlidir:

$$F = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{\ell}{a} \quad (12)$$

Akımlar için aynı anda meydana gelen ve en büyük kuvvet etkisine neden olan kısa devre akımları kullanılır. Bu amaçla hesaplanabilen darbe kısa devre akımlarının en büyük tepe değerleri kullanılır. Üç fazlı ağdaki akımların  $120^\circ$  kaydırılmasıyla tepe değerleri aynı anda oluşmaz. Düzeltme, 0,93 faktörüyle kesir olarak ve aşağıdaki formülde 0,866 kare değeriyle ifade edilir. İki kutuplu kısa devrede en büyük kuvvetin belirlenmesi, tepe değeri aynı anda olduğundan akımlarda herhangi bir düzeltme gerektirmez.

Baralar arasındaki (elektriksel olarak etkili) mesafe  $a$ , cilt etkisinin (bir iletkenin kendi üzerindeki manyetik etkisi) ve yakınlık etkisinin (yakındaki paralel iletkenlerin manyetik etkisi) etkisiyle düzeltilmelidir [3]. Yukarıda belirtilen koşullar dikkate alınarak düz iletkenlerin kuvvet etkisinin hesaplanmasına yönelik formüller VDE 0103'te verilmiştir [3]: Üç kutuplu kısa devre için:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{p3}^2 \cdot \frac{\ell}{a_m} \quad (13)$$

İki kutuplu kısa devre için:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot i_{p2}^2 \cdot \frac{\ell}{a_m} \quad (14)$$

### Kuvvet etkilerinin karşılaştırılması:

Her iki denklem bölünmüştür ve iki kutuplu darbe kısa devre akımı, üç kutuplu darbe kısa devre akımıyla ifade edilmiştir.

$$i_{p2} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot i_{p3} \quad (15)$$

Buradan

$$F_{m3} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot F_{m2} \quad (16)$$

Üç kutuplu bir kısa devrede kuvvet etkisi, toprak teması olmayan iki kutuplu bir kısa devreden daha büyüktür, ancak iki kutuplu bir kısa devrede etkili akımların tepe değerleri aynı anda meydana gelir.

Pratik hesaplamalar için, yalnızca karşılık gelen sayısal değerlerin kullanıldığı aşağıdaki özel boyut denklemleri de yaygındır:

$$F_{m3/N} = 0,1731 \cdot i_{p3/kA}^2 \cdot \frac{\ell/m}{a_{m/m}} \quad (17)$$

$$F_{m2/N} = 0,2 \cdot i_{p2/kA}^2 \cdot \frac{\ell/m}{a_{m/m}} \quad (18)$$

### Örnek hesaplamalar

Daha ileri incelemeler için, a mesafeleri aynı olan yatay düzende dört adet 60 mm x 10 mm raydan oluşan bir bara sistemi varsayılmıştır.

Destek noktası mesafesi  $l = 1$  m ve ortalama mesafe  $a_m = 0,2$  m alınmıştır.

### Üç kutuplu kısa devre sırasında kuvvet etkisi

$$F_{m3} = 0,1731 \cdot 85,3^2 \cdot \frac{1}{0,2} \text{N} = 6298 \text{ N} \quad (19)$$

### İki kutuplu kısa devrede kuvvet etkisi:

Kuvvetlerin üç kutuplu kısa devreden daha küçük olduğu kanıtlandığı için hesaplanmamıştır!

### Tek kutuplu kısa devrede kuvvet etkisi

Nötr iletken ile yanına yerleştirilen dış iletken arasındaki tek kutuplu kısa devrede durum farklıdır. İki kutuplu kısa devrede olduğu gibi aynı koşullar burada da geçerlidir; ileri ve geri iletkenlerdeki tepe değerleri aynı anda meydana gelir. Tek kutuplu kısa devre akımı üç kutuplu kısa devre akımından büyükse ve geometri (iletken malzemesi ve aralığı) aynıysa, tek kutuplu kısa devre durumunda daha büyük kuvvetler etki eder.

### Topraklama kontağı ile iki kutuplu kısa devre sırasında kuvvet etkisi.

Söz konusu örnekte, üç kutuplu bir kısa devreye kıyasla topraklamalı iki kutuplu bir kısa devrede biraz daha büyük kuvvetler meydana gelir, çünkü  $I_{kEL2E}$  ve  $I_{kEL3E}$  kısa devre iletken akımları  $I_{k3max}$ 'tan daha büyüktür ve tepe değerleri  $115^\circ$  kaydırılmıştır ( $120^\circ$ 'den az!). Toprakla temas eden iki kutuplu bir kısa devrede daha yüksek kuvvet etkilerinin meydana gelip gelmediği, üç akımın faz açıları dikkate alınarak, her bir durumda mühendislik perspektifinden incelenmelidir. Bu yalnızca kısa devre yolunun sıfır empedansının pozitif empedanstan daha küçük olması durumunda geçerlidir. VDE 0103'te bunun için (anlaşılır şekilde) pratik bir formül yoktur [3].

İki kutuplu kısa devre formülü kullanılarak hesap yapılırsa her zaman güvenli sistem kurulur. Bunun sonucunda aşağıdaki kuvvet etkileri ortaya çıkar:

a) Toprak kontağı ile iki kutuplu kısa devre durumunda bitişik harici iletken baralar arasında

$$F_{m2ELE} = 0,2 \cdot 87,55^2 \cdot \frac{1}{0,2} \text{N} = 7661 \text{ N} \quad (20)$$

b) Toprak kontağı ile iki kutuplu kısa devre durumunda yan yana düzenlenmiş harici iletken baralar arasında:

$$F_{m1LN} = 0,2 \cdot 89,2^2 \cdot \frac{1}{0,2} \text{N} = 7957 \text{ N} \quad (21)$$

En büyük kuvvet etkisi bilgisi ile hem baraların mekanik mukavemetinin VDE 0103 [3] uyarınca doğrulanması hem de desteklerin kopma kuvvetinin kontrolü gerçekleştirilebilir.

### Dağıtım TP (hata konumu F2)

Pozitif empedansla karşılaştırıldığında F2 arıza noktasına kadar daha büyük bir sıfır empedansı belirlendiğinden [2, Tablo 5], üç kutuplu kısa devrenin en büyük kuvvete neden olduğu ve F1 arıza konumlarına uygulanan özel hususların olduğu varsayılabilir. Darbe faktörü  $\kappa$ ,  $i_{p3}$  dalgalanma kısa devre akımını belirlemek için kullanılır:

$$\kappa_{F2} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{7,799 \text{ m}\Omega}{9,965 \text{ m}\Omega}} = 1,11 \quad (22)$$

$$i_{p3} = \sqrt{2} \cdot I_{k3}^m \cdot \kappa_{F2} = \sqrt{2} \cdot 20,1 \text{ kA} \cdot 1,11 = 31,55 \text{ kA} \quad (23)$$

## 7. Termik kısa devre akımı

Kısa devre durumunda, kısa devre akımının aktığı kablolar ve hatlar ile tüm ekipmanlar, akım düzeyine ve kısa devre süresine bağlı olarak az ya da çok ısınır.

İletken malzeme, özellikle kablo ve iletkenlerdeki yalıtım malzemesi yüksek gerilime maruz kalır. Belirtilen kısa devre uç sıcaklıklarını aşmamak suretiyle (örn. 300 mm<sup>2</sup>'ye kadar PVC yalıtımlı kablolar,  $\theta_e = 160$  °C [4, Tablo 28]), hasarın izin verilen sınırlar içinde tutulması gerekir.

Termal kısa devre dayanımını değerlendirmek için, şalt sistemi kombinasyonlarının yanı sıra kablo ve iletken üreticileri, izin verilen maksimum sıcaklığı değil, akım değeri olarak nominal kısa süreli akım gücünü belirtir. Termal olarak eşdeğer kısa devre akımı  $I_{th}$ , nominal kısa süreli akım  $I_{thr}$ 'den büyük değilse ve nominal kısa süreli  $T_{kr}$  aşılırsa, termal kısa devre gücü garanti edilir:

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad \text{und} \quad T_k \leq T_{kr} \quad (24)$$

Koruma cihazında zaman gecikmesinin ayarlanmasıyla, gerçek kısa devre süresi  $T_k$  veya kapatma süresi  $T_a$ , termik kısa devre direncini veya seçici kapatmayı etkinleştirecek şekilde ayarlanır. Amaçlanan kapatma süresi veya kısa devre süresi dikkate alınarak, termal kısa devre mukavemetinin düzeltilmiş termal kısa devre mukavemeti  $I_{thz}$  ile durumu necerli olur

$$I_{th} \leq I_{thz} = I_{thr} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (25)$$

Dönüşüm genellikle 5 saniyeye kadar bir süre için geçerlidir; Kısa devre akımının asimetric seyri nedeniyle 0,1 s'den kısa süreler için kullanılmaz.

## Şalt sistemi kombinasyonları

Anahtarlama cihazı kombinasyonları için, nominal kısa süreli akım  $I_{cw}$ , termal kısa devre kuvvetine göre belirlenir. Belirtilen nominal kısa süreye (toplam kapalı kalma süresi) bağlı olan etkili kısa devre akımıdır. Anahtarlama donanımı kombinasyonlarında olduğu gibi, nominal kısa süre  $T_{kr} = 1$  s, daha nadiren  $T_{kr} = 3$  s'dir [4]. Bu nedenle bu kuraldan sapmalar mümkündür. Nominal kısa süreli akım  $I_{cw}$  en azından termal olarak eşdeğer kısa devre akımı  $I_{th}$  kadar büyükse ve kısa devre süresi  $T_k$  ilgili nominal kısa süreli  $T_{kr}$ 'den büyük değilse termal kısa devre dayanımı

$$I_{cw} \geq I_{th} \quad \text{wenn} \quad T_{kr} \geq T_k \quad (26)$$

Koruyucu cihazda zaman gecikmesinin ayarlanmasıyla, gerçek kısa devre süresi  $T_k$  veya kapatma süresi  $T_a$ , termik kısa devre direncini veya seçici kapatmayı etkinleştirecek şekilde ayarlanır. Amaçlanan kapatma süresi veya kısa devre süresi dikkate alındığında, termal kısa devre dayanımı durumu için aşağıdakiler geçerlidir:

$$I_{cw} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \geq I_{th} \quad (27)$$

F1 arıza konumunda termik kısa devre dayanımını kontrol etmek için en büyük kısa devre akımı, tek kutuplu kısa devre akımı  $I''_{k1}$  kullanılmalıdır! Şebeke frekansı  $f_N$ 'ye ek olarak kısa devre süresi  $T_k$  ve darbe faktörünün  $\kappa$  kullanıldığı  $m$  faktörünün hesaplanması için [1]' de verilen formül kullanılarak aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$m = \frac{e^{4 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1}{2 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \quad (28)$$

$$= \frac{e^{4 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,5 \text{ s} \cdot \ln(1,46 - 1)} - 1}{2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,5 \text{ s} \cdot \ln(1,46 - 1)} = 0,0258$$

ve generatörden uzakta bir kısa devre için genel olarak geçerli faktör  $n = 1$  ile termal olarak eşdeğer kısa devre akımı  $I_{th1}$  elde edilir:

$$I_{th1} = I_{k1} \cdot \sqrt{m+n}$$

$$= 43,2 \text{ kA} \cdot \sqrt{0,0258+1} = 43,75 \text{ kA} \quad (29)$$

Kanıt,  $T_k$  kısa devre süresine dönüştürülen termal olarak eşdeğer kısa devre akımı kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Seçilecek  $I_{cw}$  anahtarlama cihazı kombinasyonunun kısa devre gücü daha küçük olmamalıdır:

$$I_{cw} \geq I_{th1} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{T_{kr}}} \quad (30)$$

$$I_{cw} \geq 43,75 \text{ kA} \cdot \sqrt{\frac{0,5 \text{ s}}{1 \text{ s}}} = 30,94 \text{ kA} \quad (31)$$

Anahtarlama cihazı kombinasyonunun  $I_{cw}$  nominal kısa süreli akımı 30,94 kA'dan büyük olmalıdır! (F2) noktası için doğrulama aynı şekilde gerçekleştirilir, ancak üç kutuplu kısa devre akımı  $I_{k3} = 20,55$  kA ile yapılır, çünkü dağıtımda kısa devre durumunda en büyüğüdür, ve kısa devre süresi  $T_k = 0,1$  s olduğunda:

$$m = \frac{e^{4 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \text{ s} \cdot \ln(1,11 - 1)} - 1}{2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \text{ s} \cdot \ln(1,11 - 1)} = 0,045 \quad (32)$$

$$I_{th3} = 20,1 \text{ kA} \cdot \sqrt{0,045+1} = 20,55 \text{ kA} \quad (33)$$

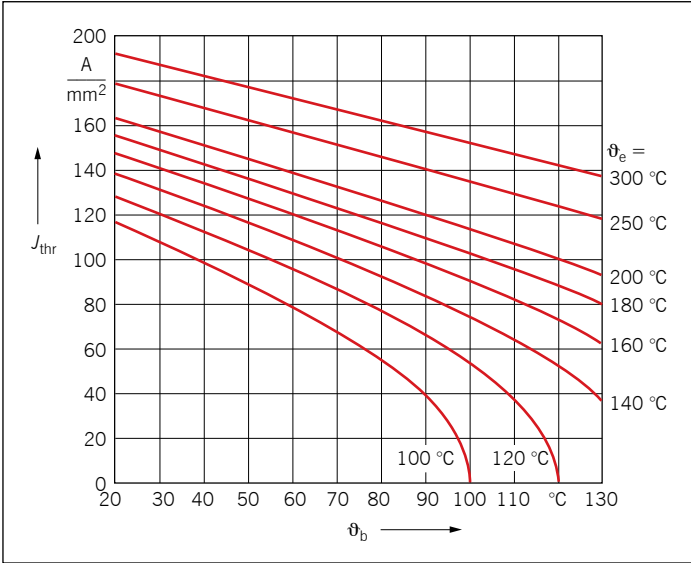
$$I_{cw} \geq 20,55 \text{ kA} \cdot \sqrt{\frac{0,1 \text{ s}}{1 \text{ s}}} = 6,5 \text{ kA} \quad (34)$$

## Baralar (çıplak iletkenler)

Baraların termal kısa devre dayanımının ayrı olarak gerekli bir kanıtı için, nominal kısa vadeli akım yoğunluğu  $J_{thr}$ , VDE 0103'te [3] diyagramlar biçiminde mevcuttur. Kullanılacak karşılaştırma, düzeltilmiş nominal kısa süreli akım yoğunluğu olarak görülebilen kısa devre kapasitesi  $J_{thz}$  ile termal olarak eşdeğer kısa süreli akım yoğunluğu  $J_{th}$  arasındadır:

$$J_{thz} = J_{thr} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \geq J_{th} \quad (35)$$

İncelenen örnek için genel devre şemasında 60 mm x 10 mm boyutlarında bakır bara verilmiştir (Şekil 1). Şekil 8'de, varsayılan iletken sıcaklığı  $\theta_b = 70$  °C ve kısa devre sonu sıcaklığı 200 °C olduğunda, nominal kısa süreli akım yoğunluğu yaklaşık olarak şöyledir:



Şekil 8: Bakır çubuklar için nominal kısa vadeli akım yoğunluğu yılı [3, Şekil 13a)

$$J_{thr} = 133 \frac{A}{mm^2} \quad (36)$$

Düzeltilmiş nominal kısa süreli akım yoğunluğu  $J_{thz}$ , şemadan belirlenen nominal kısa süreli akım yoğunluğu  $J_{th}$  ve ayarlanan açma süresi  $T_a = T_k$  kullanılarak hesaplanır:

$$J_{thz} = 133 \frac{A}{mm^2} \cdot \sqrt{\frac{1 s}{0,5 s}} = 188 \frac{A}{mm^2} \quad (37)$$

Bara (F1) üzerinde tek kutuplu bir kısa devre durumunda meydana gelen en büyük kısa devre akımı ile termal olarak eşdeğer kısa süreli akım yoğunluğu  $J_{th1}$  elde edilir:

$$J_{th1} = \frac{I_{th1}}{q_n} = \frac{43,62 \text{ kA}}{600 \text{ mm}^2} = 72,6 \frac{A}{mm^2} \quad (38)$$

Karşılaştırma :

$$J_{thz} = 188 \frac{A}{mm^2} > J_{th} = 72,6 \frac{A}{mm^2} \quad (39)$$

Topraklama kablosunu boyutlandırırken veya yıldız noktasının alçak gerilim tarafındaki bağlantısını ayarlarken, toprakla iki kutuplu bir kısa devre durumunda daha yüksek arıza akımı tek kutuplu kısa devre akımıyla karşılaştırıldığında kontak dikkate alınmalıdır.

Bu durumda da termal olarak eşdeğer kısa devre akımı  $I_{thEZE} = 45,75 \text{ kA}$ ,  $m$  faktörünün etkisinden dolayı başlangıçtaki kısa devre alternatif akımı  $I_{KEZE} = 45,3 \text{ kA}$ 'nın biraz üzerindedir. Ancak ortak bir YG/AG topraklama sisteminde yüksek gerilim tarafındaki arızalardan

kaynaklanan kısa devre akımlarının dikkate alınması gerektiğinden, topraklama sisteminin termal kısa devre dayanımına ilişkin özel dikkat gösterilmelidir.

#### Kablolar ve hatlar (yalıtımlı iletkenler) Arıza konumu F1\*

400 V ana dağıtım YG'den çıkan NYY-J 4 x 150 mm<sup>2</sup> plastik kablo için termal kısa devre dayanımı, kablunun başlangıcındaki F1\* hatası kullanılarak hesaplanır. Doğrulama için gereken termal olarak eşdeğer kısa devre akımı  $m$  faktörü kullanılarak hesaplanır:

$$m = \frac{e^{4 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1}{2 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} = \frac{e^{4 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \text{ s} \cdot \ln(1,46 - 1)} - 1}{2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,1 \text{ s} \cdot \ln(1,46 - 1)} = 0,129 \quad (40)$$

ve  $n = 1$ 'in yanı sıra oluşan maksimum kısa devre akımı. Bu, Tablo 1'de 43,2 kA'lık tek kutuplu kısa devre akımı olarak gösterilmektedir:

$$I_{th1} = I_{k1} \cdot \sqrt{m + n} = 43,2 \text{ kA} \cdot \sqrt{0,129 + 1} = 45,9 \text{ kA} \quad (41)$$

Kablunun termal kısa devre dayanımı üretici tarafından belirlenir. Bununla birlikte, termal kısa vadeli akım yoğunluğu  $J_{thr}$  kullanılarak da belirlenebilir. VDE 0298-4'e [4] göre, PVC yalıtımlı iletkenler için kısa süreli termal akım yoğunluğu, kısa süreli nominal  $T_{kr} = 1 \text{ s}$  ve kısa devre başlangıcındaki iletken sıcaklığı için aşağıdaki değerler geçerlidir. 70 °C'de:  $J_{thr} = 115 \text{ A/mm}^2$  Cu ve  $J_{thr} = 76 \text{ A/mm}^2$  Al. Bu, nominal kısa akım gücünün şu şekilde olduğu anlamına gelir:

**Tablo 3 Koruma cihazlarının kısa devre dayanımını ve tepki güvenilirliğini doğrulamak için ilgili kısa devre büyüklükleri ve kuvvetleri**

1	2	3	4	5	6	7
Kısa devre akımlarının/ kuvvetlerinin uygulanması	Elektrik tesisi	İlgili kısa devre akımları veya kuvvetleri				
		Üç kutuplu	İki kutuplu	İki kutup-toprak	Bir kutuplu	Bir kutup-toprak
		En büyük akım				
Mekanik	İşletim cihazı, sistemler	31,55 kA (F2)			89,2 kA	
	Baralar, destekler				7957 N	
Termik	İşletim cihazı, tesis	20,55 kA (F2)			43,75 kA	
	Baralar				72,6 A/mm <sup>2</sup>	
	Kablo ve iletkenler	20,55 kA (F2)			45,9 kA	
	Topraklama iletkeni			45,74 kA		
Açmada	Anahtarlama cihazları				89,2 kA	
Kapamada	Anahtarlama cihazları	20,1 kA (F2)			43,2 kA	
Tehlike	Topraklama sistemleri			45,3 kA		8,4 kA (F2)
Açma güvenliği		En küçük akım				
MCCB	1000A		15,0 kA			
	160 A				8,4 kA (F2)	

**Notlar:**

- Kısa devre boyutları ve formül sembolleri Tablo 2'ye karşılık gelir
- Hata konumu atanmayan değerler F1 hata konumu için geçerlidir!

$$I_{thr} = J_{thr} \cdot q_n = 115 \frac{A}{mm^2} \cdot 150 mm^2$$

$$= 17,25 kA \quad (42)$$

NYJ-J kablusunun düzeltilmiş termal kısa devre mukavemeti – 4 x 150 mm<sup>2</sup>, kapanma süresi Tk = 0,5 s'ye dönüştürülür:

$$I_{thz} = I_{thr} \cdot \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} = 17,25 kA \sqrt{\frac{1 s}{0,5 s}} \quad (43)$$

$$= 24,39 kA$$

Termal kısa devre dayanımı için gereken koşul karşılanmadı çünkü  $I_{thr} = 45,9 kA > I_{thz} = 24,39 kA$ ! Devre kesicinin arkasındaki kabloda kısa devre olsaydı, kablo arıza noktasına kadar geri dönülemez şekilde zarar görürdü. Kablodaki olası tüm arıza konumları için termal kısa devre direnci garanti edilecekse, kablunun kesitinin artırılması gerekecektir.

$$m = \frac{e^{4 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa-1)} - 1}{2 \cdot f_N \cdot T_k \cdot \ln(\kappa-1)} \quad (44)$$

$$= \frac{e^{4 \cdot 50 Hz \cdot 0,1 s \cdot \ln(1,11-1)} - 1}{2 \cdot 50 Hz \cdot 0,1 s \cdot \ln(1,11-1)} = 0,045$$

$$I_{th3} = I_{k3} \cdot \sqrt{m+n} = 20,1 kA \cdot \sqrt{0,045+1}$$

$$= 20,55 kA \quad (45)$$

$$I_{th3} = 20,55 kA < I_{thz} = 24,39 kA \quad (46)$$

Kablo ucunda kısa devre olması durumunda termal kısa devre direnci garanti edilir! Kısa devre süreleri 0,1 saniyeden az olduğunda etkin kısa devre akımları, kısa devre gücünü doğrulamak için uygun değildir. Bu nedenle termal kısa devre dayanımını değerlendirmek için mevcut ısı değerleri veya "Joule integralleri" kullanılır.

SCPD kısa devre koruma cihazının geçişine izin verdiği enerji, yalıtımlı hattın izin verilen mevcut ısı değerinden büyük olmamalıdır:

$$(I^2 T)_{SCPD} \leq (J_{thr} \cdot q)^2 1 s \quad (47)$$

Not:  $(J_{thr} \cdot q)^2 1 s$ , k: (k·q) malzeme katsayısı ile standartlarda ve literatürde kullanılan ifadeye karşılık gelmektedir. SCPD üreticileri bu enerji değerlerini, kapatma veya geçiş değerleri olarak adlandırır. 0,1 saniyeden daha kısa kısa devre süreleri için kısa devrelere karşı korumanın kanıtı [6]'da ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

**Anahtarlama cihazlarının açma ve kapama gücü**

Anahtarlama cihazları açıldığında kısa devre gücü açısından kontrol edilir. Bu amaçla imalatçı, mekanik kısa devre direncini koruyacak şekilde bir anahtarlama cihazı açıldığında meydana gelebilecek maksimum olan, akım değeri olarak (tepe kısa devre akımına dayalı olarak) nominal kapasitesi  $I_{cm}$ 'yi sağlar. Bu, nominal kapama kapasitesi  $I_{cm}$ 'nin kurulum yerindeki en büyük kısa devre akımı  $i_p$ 'ye eşit/daha büyük olması anlamına gelir:

$$I_{cm} \geq i_{pmax} \quad (48)$$

Söz konusu ağda, F1\* arıza konumunda bir kısa devre durumunda en büyük dalgalanma kısa devre akımı,  $i_{p1LN} = 89,2$  kA ile tek kutuplu olmaktadır. Bu, devre kesici seçiminde 160 A'nın geçerli olduğu anlamına gelir:

$$I_{cm} \geq 89,2 \text{ kA} \quad (49)$$

Kısa devre akımları açıldığında, anahtarlama elemanları üzerindeki kuvvet etkilerine ek olarak, kontaklar ayrıca ani kısa devre akımının dikliği nedeniyle termal olarak zorlanır. Kontakların kaynaklanma riski vardır. Bu nedenle seçim yapılırken bu tek kutuplu ani kısa devre akımının da dikkate alınması gerekir. Kısa devre akımları kapatıldığında, anahtarlama cihazlarının kontakları, akım geçiş alanının ani daralması veya akım yoğunluğunun artması nedeniyle yüksek termal gerilime maruz kalır. Bunun sonucunda genellikle kontakların kullanılamaz hale gelmesi sonucu ark meydana gelir. Belirtilen koşullar altında anahtarlama cihazlarının güvenli bir şekilde kapatıldığını ve sürekli kullanıldığını gösterebilmek için, nominal kısa devre kesme kapasitesi  $I_{cn}$  imalatçılar tarafından belirlenir. Bu akım, bir anahtarlama cihazı tarafından kontrol edilmesi gereken maksimum kısa devre akımından büyük/eşit olmalıdır:

$$I_{cn} \geq I_{kmax} \quad (50)$$

Söz konusu ağda, F1\* arıza noktasında kısa devre olması durumunda en büyük kısa devre akımı,  $I_{k1max} = 43,2$  kA ile tek kutupludur. 160 A devre kesicinin seçimi için aşağıdakiler geçerlidir:

$$I_{cn} \geq 43,2 \text{ kA} \quad (51)$$

F2 arıza noktasının arkasına yerleştirilen anahtarlama cihazları,  $I_{k3max} = 20,1$  kA üç kutuplu kısa devre akımını güvenli bir şekilde anahtarlatabilmelidir. Sigortalar için bu bir sorun değildir çünkü minimum kısa devre kesme kapasitesi 50 kA'dır. Ancak 6 ve 10 kA kesme kapasiteli devre kesiciler, sigortalar aracılığıyla ek kısa devre koruması olmadan kullanılamaz.

### Tehlikeli gerilimlerin oluşması

Toprakla temas eden kısa devrelerde tehlikeli derecede yüksek dokunma ve adım gerilimleri meydana gelebilir. Bu, istasyondaki ve alçak gerilim şebekesindeki hatalar için geçerlidir. İstasyonda oluşan toprak gerilimine göre risk değerlendirilir. Alçak gerilim şebekesinde kontak gerilimi, potansiyel dengeleme sayesinde çeşitli noktalarda izin verilen aralığa itilir.

İstasyon ve çevresindeki bu hususlar ve değerlendirmeler için, toprak kontaklı iki kutuplu bir kısa devre için maksimum kısa devre akımı  $I_{kE2E} = 45,3$  kA ve daha uzaktaki kısa devreler (F2) için en büyük tek kutuplu kısa devredir.  $I_{k1max} = 8,4$  kA **belirleyicidir**.

### Koruma cihazlarının yanıt güvenilirliği

Koruma cihazlarının seçimi ve mevcut tetikleme değerinin belirlenmesi için genel olarak aşağıdakiler geçerlidir:

- Yanıt değeri beklenen maksimum açma akımından büyük olmalıdır
- En küçük kısa devre akımı, koruma cihazın açma veya ayar değerinden önemli ölçüde büyük olmalıdır.

Bir arıza durumunda iki devre kesiciyi açtırmak için gereken kısa devre akımları, yani en küçük kısa devre akımları da kısa devrenin türüne göre farklılık gösterir.

Söz konusu örnekte, 1000 A devre kesicinin ayar değerini belirlemek için en küçük iki kutuplu kısa devre akımı  $I_{k2min} = 15$  kA kullanılmalı ve minimum tek kutuplu kısa devre akımı  $I_{k1min} = 8,4$  kA kullanılmalıdır. 160 A devre kesici için (Şekil 10).

### Sonuç:

Yapılan incelemeler sonucunda Tablo 2'de listelenen karakteristik kısa devre büyüklükleri ve kuvvetlerine karşılık gelen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Üç kutuplu kısa devre akımının her zaman en büyük, tek kutuplu kısa devre akımının ise en küçük olduğunun kabul edilemeyeceği bulunmuştur. Bu aynı zamanda kısa devre durumunda korumayı kontrol etmek için üreticinin nominal değerleriyle karşılaştırılan karakteristik kısa devre akımları için de geçerlidir.

Burada ayrıca aşağıdakiler geçerlidir: Arıza konumuna kadar kısa devre empedansının sıfır empedansı pozitif empedanstan küçükse, tek kutuplu kısa devre büyüklüğünün en büyük olması ve iki kutuplu kısa devre büyüklüğünün olması beklenir.

[1] DIN EN 60 909-0 (VDE 0102-0):2002-07

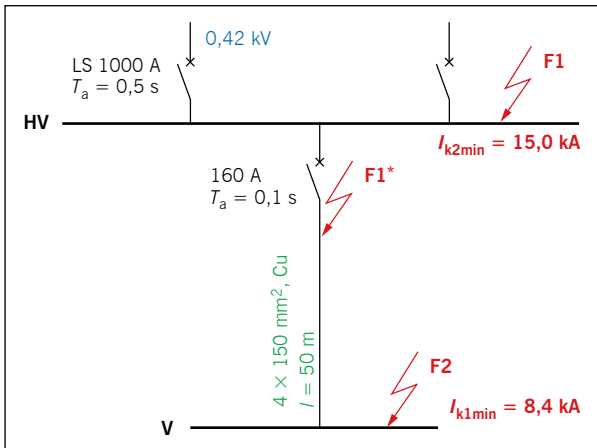
[2] Kny, K.-H.: Elektrik sistemlerinin planlanması. En büyük ve en küçük kısa devre akımları (1). Elektropraktiker, Berlin 70 (2016) 3, s. 202-211.

[3] DIN EN 60 865-1 (VDE 0103):2012-09 Kısa devre akımları - Etkinin hesaplanması - Bölüm 1: Terimler ve hesaplama yöntemleri.

[4] DIN VDE 0298-4 (VDE 0298-4):2013-06 Güç sistemleri için kabloların ve yalıtımlı hatların kullanımı - Bölüm 4: Sabit kurulum için kabloların ve hatların akım taşıma kapasitesi için önerilen değerler binalar ve esnek kablolar.

[5] DIN EN 60 947-2 (VDE

0660-101):2014-01 Alçak gerilim anahtarlama cihazları - Bölüm 2: Devre kesiciler.[6] Kny, K.-H.: Elektrik sistemlerinde kısa devrelere karşı koruma. 2. gözden geçirilmiş ve genişletilmiş baskı. Berlin: Huss Medya 2010.



1 Devre kesicileri tetikleyecek en küçük kısa devre akımları