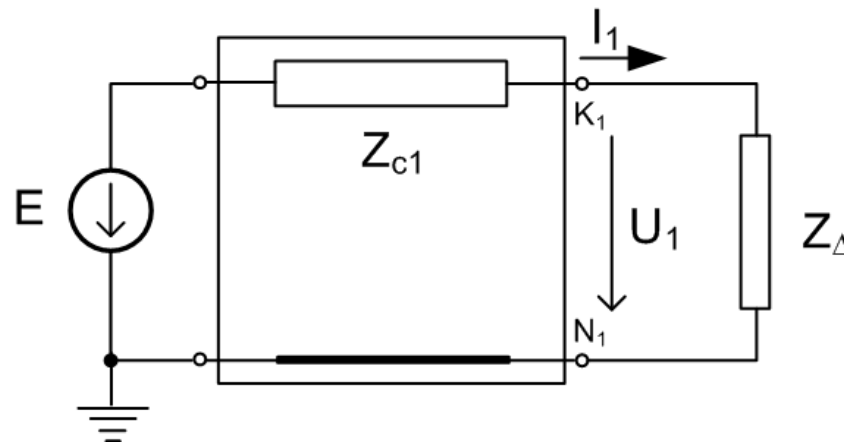


Zkraty v ES (2. část)

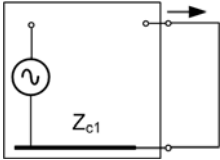
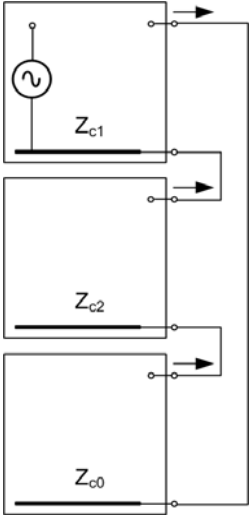
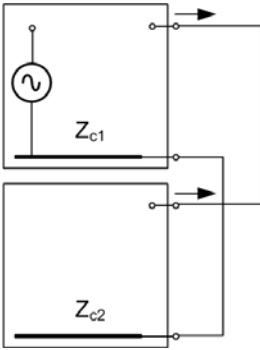
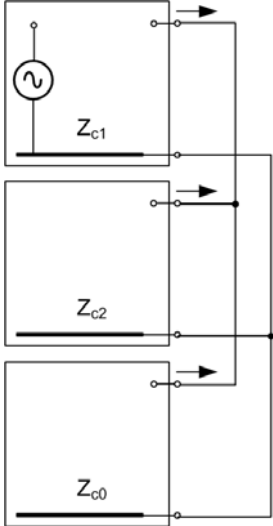
Ekvivalence nesymetrických zkratů s trojfázovým zkratem

Výpočet sousledné složky proudu pomocí přídavné impedance (v místě zkratu podle typu zkratu)



Zobecněný vzorec

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_{\Delta}}$$

Druh zkratu	3f	1f	2f	2fz
\hat{Z}_{Δ}	0	$\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0$	\hat{Z}_2	$\frac{\hat{Z}_2 \cdot \hat{Z}_0}{\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0}$
Složky proudu	\hat{I}_1	$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0$	$\hat{I}_2 = -\hat{I}_1$	$\hat{I}_1 = -(\hat{I}_2 + \hat{I}_0)$
$m (I_k = m \cdot I_1)$	1	3	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_2 \cdot X_0}{(X_2 + X_0)^2}}$
Náhradní schéma				

Porovnání jednotlivých druhů zkratů

Pro: $t = 0$ (I''), $R = 0$, $X_1 = X_2$
poměr X_0/X_1 se může měnit od 0 do ∞
reference 3f zkrat

Trojfázový zkrat

$$I_k^{(3)} = I_1 = \frac{E''}{X_1}$$

Jednofázový zkrat

$$I_k^{(1)} = 3I_1 = \frac{3E''}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{3X_1}{2X_1 + X_0} I_k^{(3)} = \frac{3}{2 + \frac{X_0}{X_1}} I_k^{(3)}$$

$$I_k^{(1)} = (0 \div 1,5) I_k^{(3)}$$

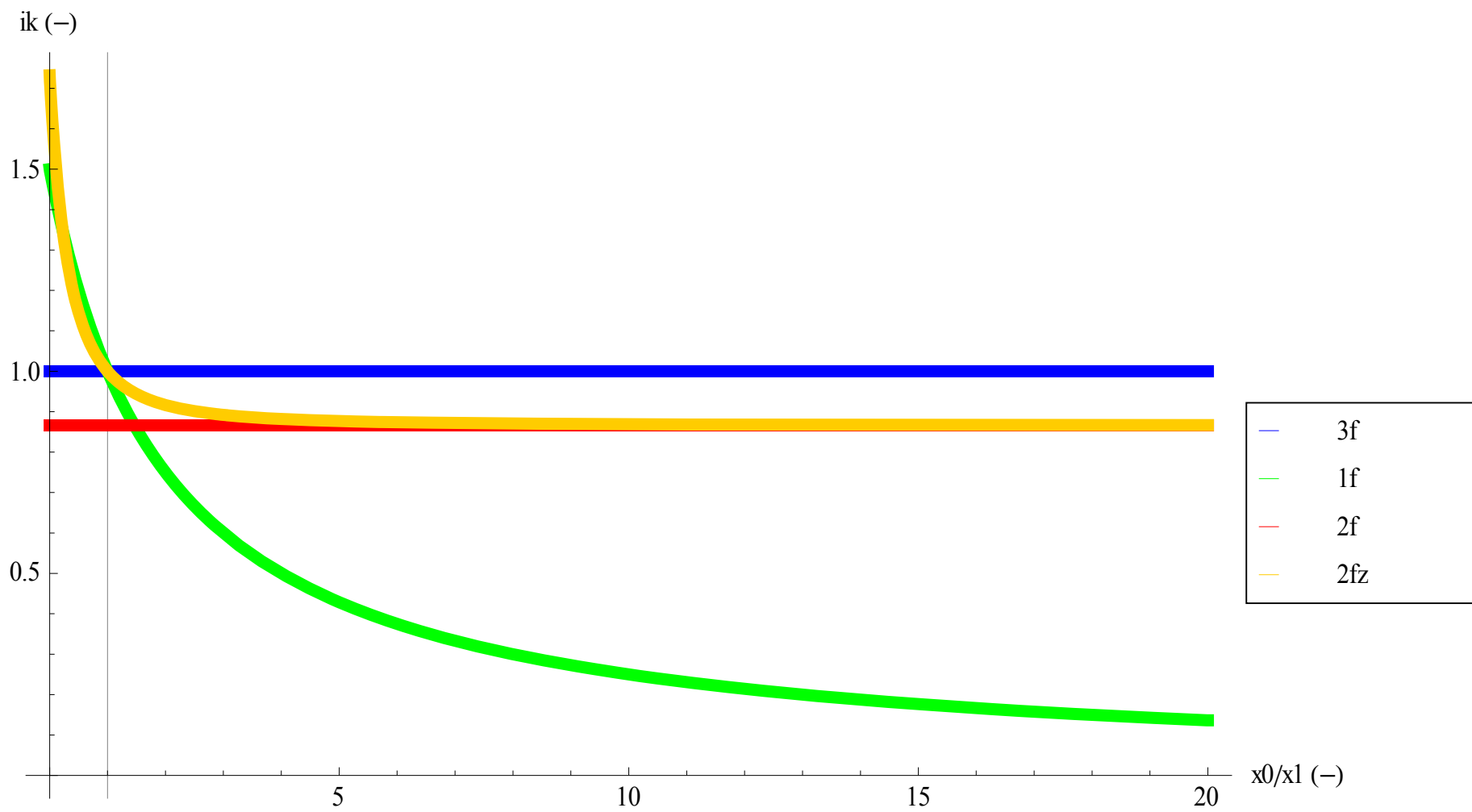
Dvoufázový zkrat

$$I_k^{(2)} = \sqrt{3}I_1 = \frac{\sqrt{3}E''}{X_1 + X_2} = \frac{\sqrt{3}X_1}{2X_1} I_k^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k^{(3)} \cong 0,866 I_k^{(3)}$$

Dvoufázový zemní zkrat

$$I_k^{(2z)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_2 \cdot X_0}{(X_2 + X_0)^2}} \frac{E''}{X_1 + \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 + X_0}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{\frac{X_0}{X_1}}{\left(1 + \frac{X_0}{X_1}\right)^2}} \frac{I_k^{(3)}}{1 + \frac{\frac{X_0}{X_1}}{1 + \frac{X_0}{X_1}}}$$

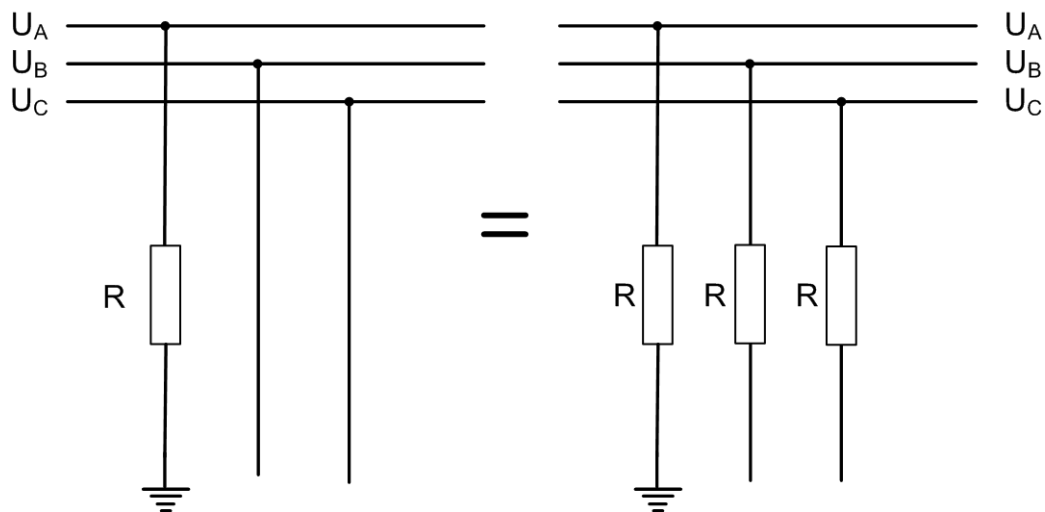
$$I_k^{(2z)} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \div \sqrt{3} \right) I_k^{(3)}$$



Vliv oblouku při zkratu

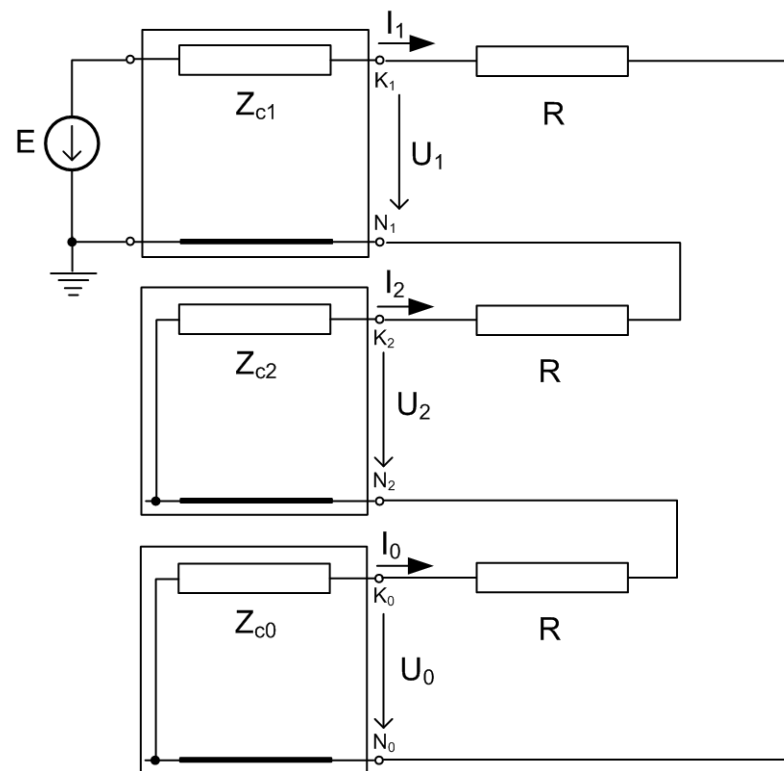
Jednofázový zkrat

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3R}$$



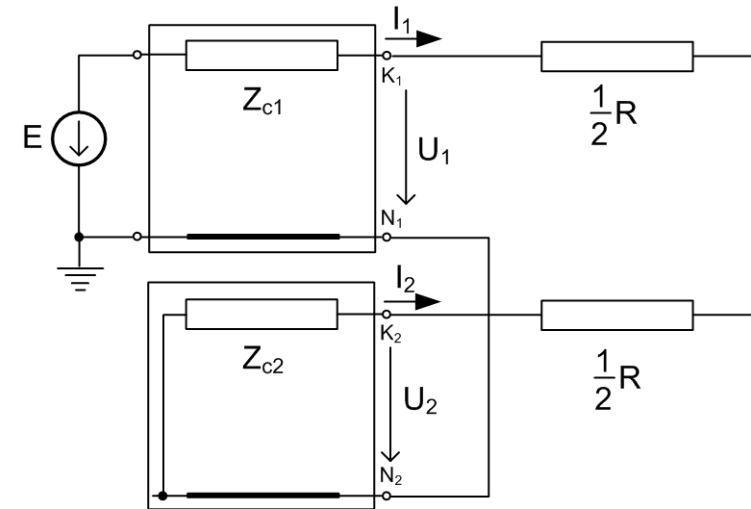
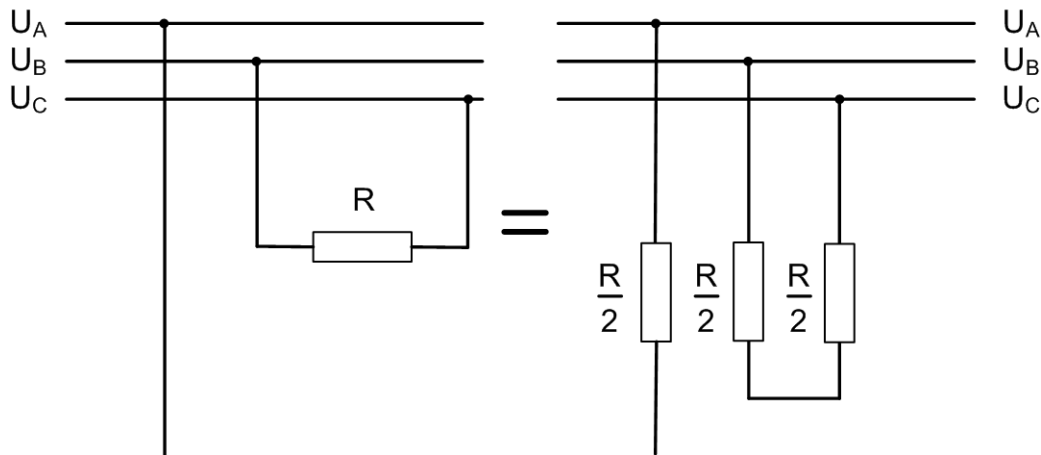
Trojfázový zkrat

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + R}$$

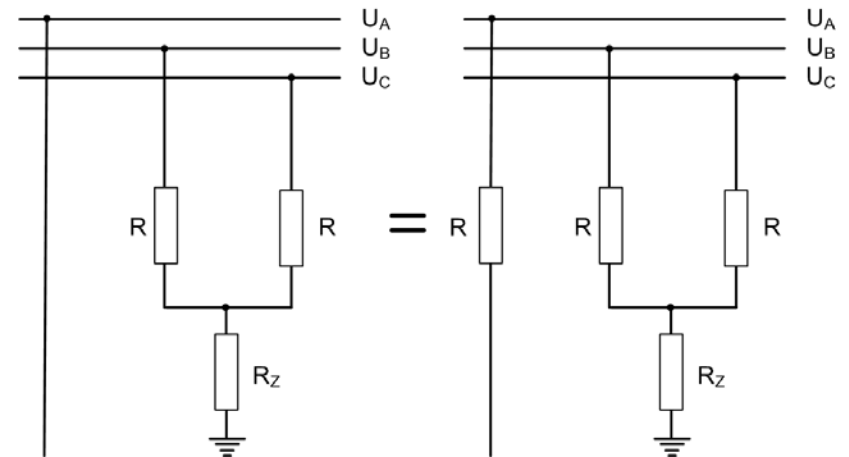


Dvoufázový zkrat

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + R}$$

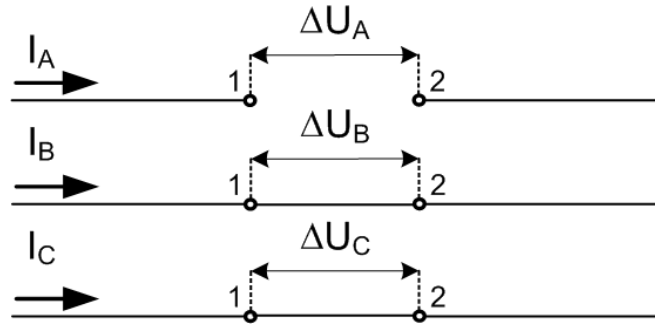


Pozn.: U dvoufázového zemního zkratu není symetrický odporový článek.



Přerušení fáze

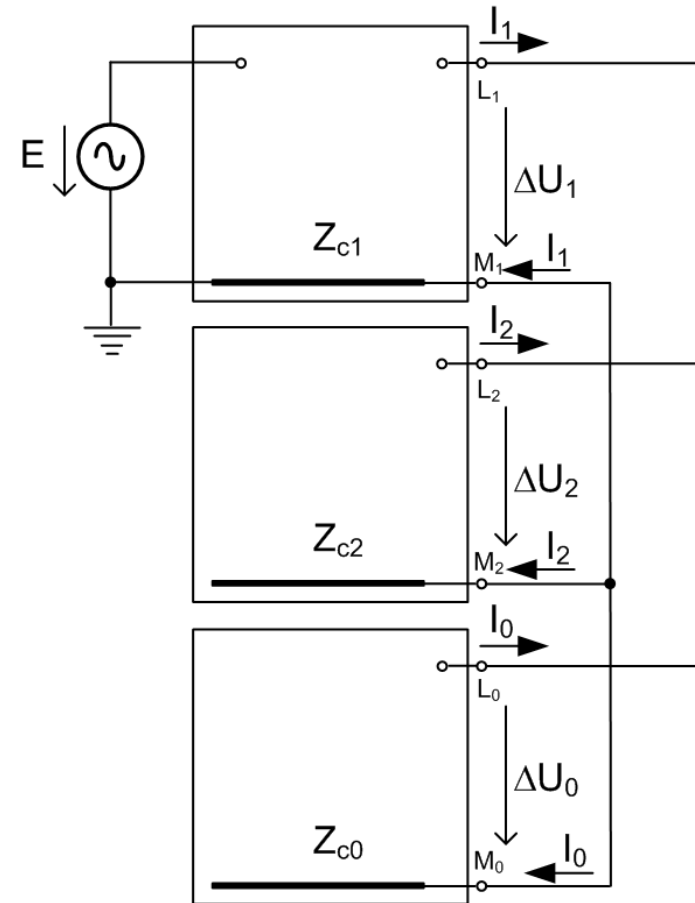
Přerušení jedné fáze (analogie s dvojfázovým zemním zkratem)



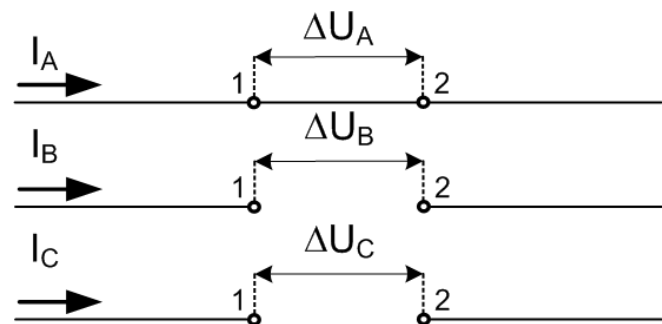
$$\Delta \hat{U}_B = \Delta \hat{U}_C = 0; \hat{I}_A = 0$$

Složky

$$\Delta \hat{U}_1 = \Delta \hat{U}_2 = \Delta \hat{U}_0 = \frac{1}{3} \Delta \hat{U}_A$$
$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \frac{\hat{Z}_0 \hat{Z}_2}{\hat{Z}_0 + \hat{Z}_2}} = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_\Delta}$$



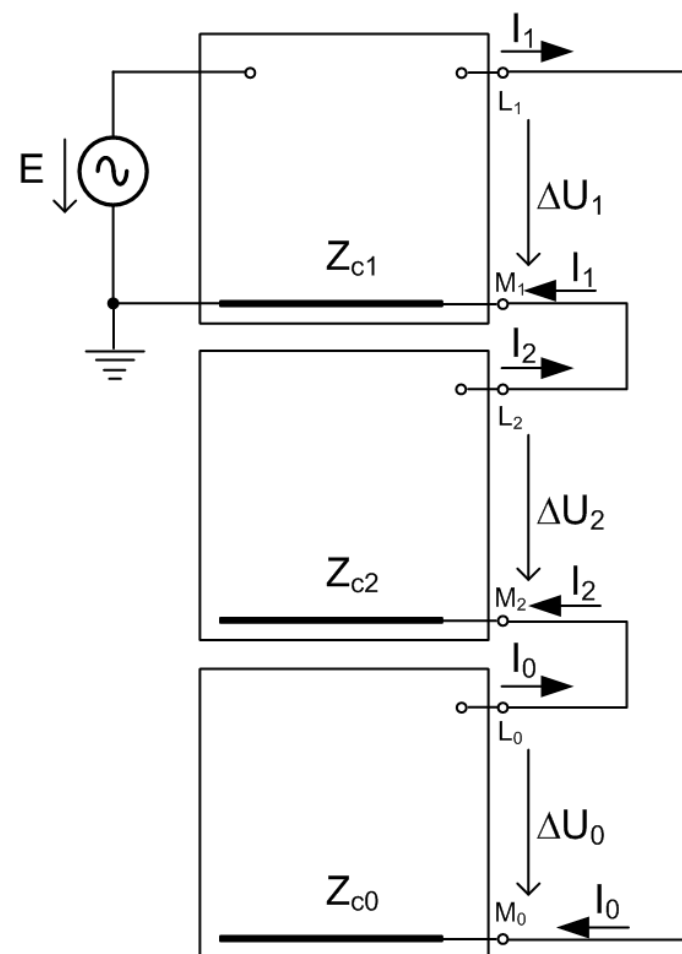
Přerušení dvou fází (analogie s jednofázovým zkratem)



$$\Delta \hat{U}_A = 0; \hat{I}_B = \hat{I}_C = 0$$

Složky

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0 = \frac{\hat{E}}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0} = \frac{1}{3} \hat{I}_A$$



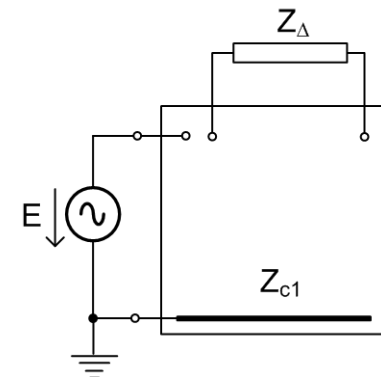
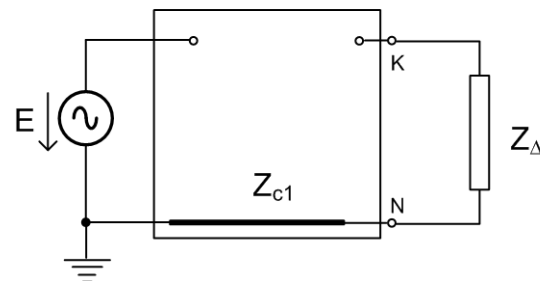
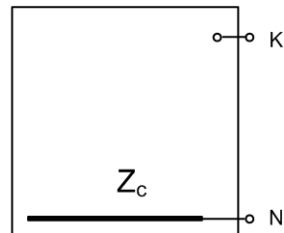
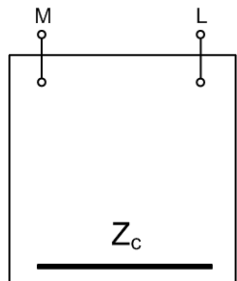
Analogie mezi přerušeními a zkraty

Složkové impedance

- zkraty – mezi místem zkratu a zemí
- přerušení – mezi body po obou stranách přerušení

Obdobně pro přidavnou impedanci.

Zdroje vždy pomocí impedancí k zemi.



Vícenásobné nesymetrie v ES

Jednofázový zkrat ve fázi B, referenční fáze A

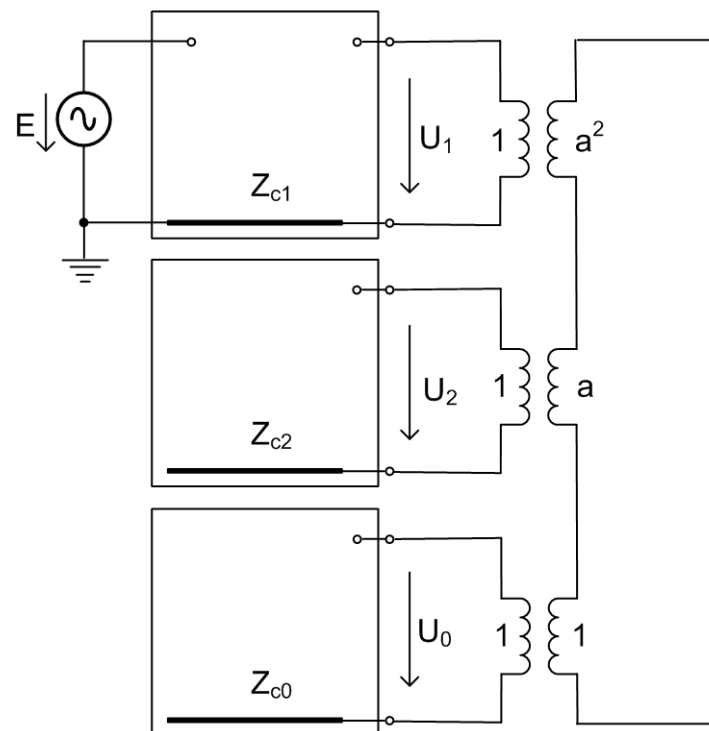
$$\begin{pmatrix} \hat{I}_{120} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ABC} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{I}_B \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \hat{a} \hat{I}_B \\ \hat{a}^2 \hat{I}_B \\ \hat{I}_B \end{pmatrix}$$

$$\hat{I}_1 = \hat{a} \hat{I}_0; \hat{I}_2 = \hat{a}^2 \hat{I}_0; \hat{I}_0 = \frac{1}{3} \hat{I}_B$$

$$\hat{p}_0 = 1$$

$$\hat{p}_1 = \frac{\hat{I}_0}{\hat{I}_1} = \frac{1}{\hat{a}} = \hat{a}^2$$

$$\hat{p}_2 = \frac{\hat{I}_0}{\hat{I}_2} = \frac{1}{\hat{a}^2} = \hat{a}$$



Pozn.: Převody TRF (1f)

$$\hat{u}_s = \hat{p}_u \hat{u}_p$$

$$\hat{i}_s = \hat{p}_i \hat{i}_p$$

výkonová invariance

$$\hat{u}_s \cdot \hat{i}_s^* = \hat{p}_u \hat{u}_p \cdot \hat{p}_i^* \hat{i}_p^* = \hat{u}_p \cdot \hat{i}_p^*$$

$$\hat{p}_u = \frac{1}{\hat{p}_i^*}$$

Jestliže $\hat{p}_u = \hat{a}$, pak $\hat{p}_i = \frac{1}{\hat{a}^*} = \frac{1}{\hat{a}^2} = \hat{a} = \hat{p}_u$.

Pro referenční fázi B platí

$$\hat{U}_1 = \hat{U}_{B1}, \hat{U}_2 = \hat{U}_{B2}, \hat{U}_0 = \hat{U}_{B0}$$

$$\hat{U}_A = \hat{a}\hat{U}_1 + \hat{a}^2\hat{U}_2 + \hat{U}_0$$

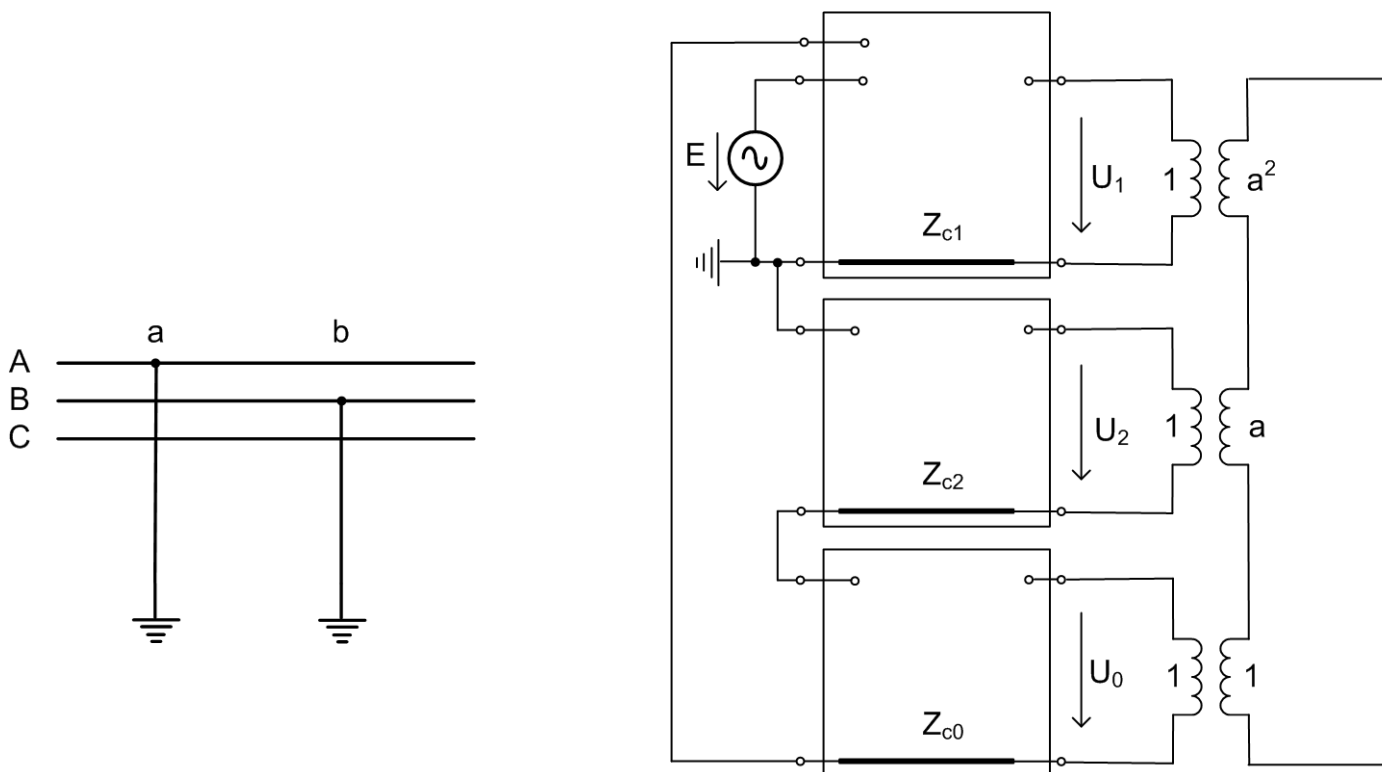
$$\hat{U}_B = \hat{U}_1 + \hat{U}_2 + \hat{U}_0$$

$$\hat{U}_C = \hat{a}^2\hat{U}_1 + \hat{a}\hat{U}_2 + \hat{U}_0$$

$$(\mathbf{T}) = \begin{pmatrix} \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \end{pmatrix} \quad (\mathbf{T}^{-1}) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \hat{a}^2 & 1 & \hat{a} \\ \hat{a} & 1 & \hat{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(\mathbf{I}_{120}) = (\mathbf{T}^{-1})(\mathbf{I}_{ABC}) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \hat{a}^2 & 1 & \hat{a} \\ \hat{a} & 1 & \hat{a}^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{\mathbf{I}}_B \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{I}}_B \\ \hat{\mathbf{I}}_B \\ \hat{\mathbf{I}}_B \end{pmatrix}$$

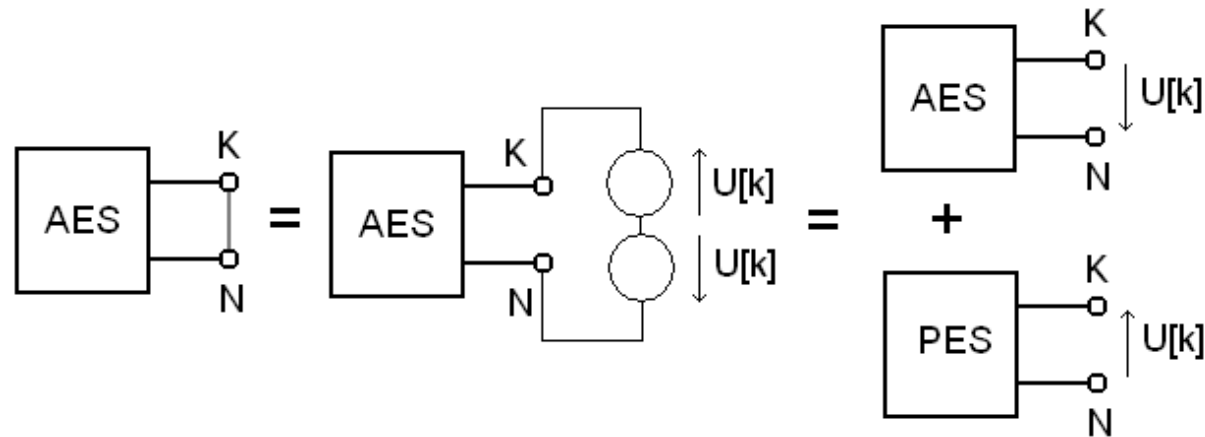
Dva současné jednofázové zkraty v různých místech ES



Více než 2 poruchy \rightarrow propojení složkových soustav komplikované \rightarrow raději fázově.

Zkratová impedanční matice

- zkrat nahradíme dvěma zdroji s napětím $U[k]$ a opačnou orientací
- velikost napětí $U[k]$ je rovna hodnotě napětí v uzlu k těsně před poruchou
- princip superpozice



- AES (aktivní ES) \Rightarrow ustálený chod ES těsně před zkratem, zdroje modelujeme ideálním zdrojem napětí a reaktancí generátoru
- PES (pasivní ES) \Rightarrow bez zdrojů: poruchový stav, generátory nahrazujeme pouze rázovou reaktancí proti zemi

$$(\mathbf{I}) = (\mathbf{Y})(\mathbf{U})$$

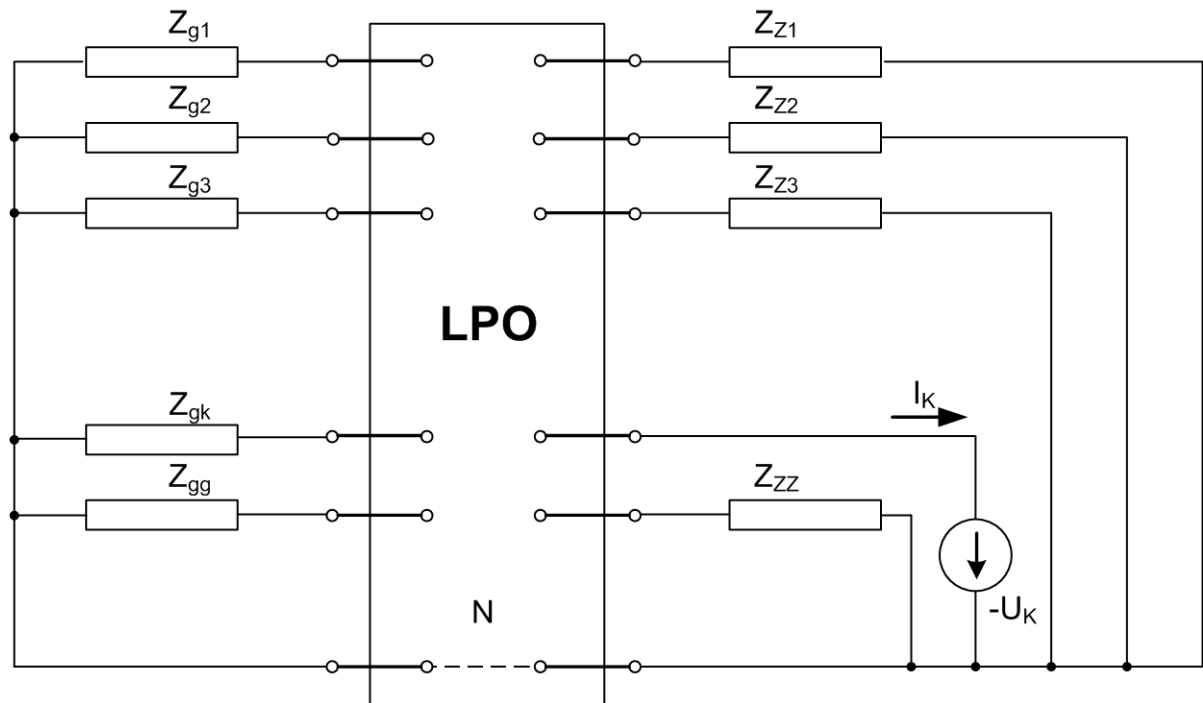
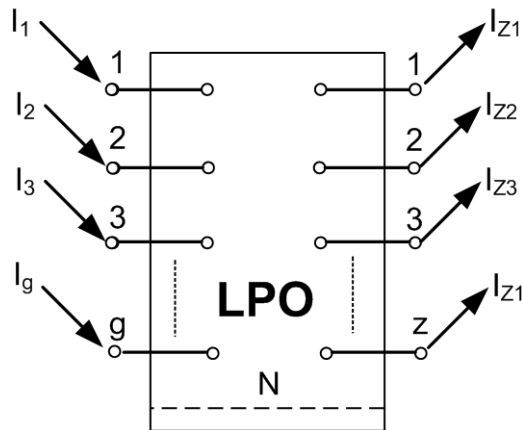
$$\hat{Y}_{(k,k)} = \sum_{m \in M_i} \hat{Y}_{km}$$

$$\hat{Y}_{(k,m)} = -\hat{Y}_{km}$$

Schématické znázornění ES

a) odpovídající uzlové admitanční matici

b) odpovídající zkratové admitanční matici



Všechny uzlové proudy nulové kromě místa zkratu, zde ideální zdroj napětí
→ zkratová admitanční matice.

$$(\mathbf{I}) = (\mathbf{Y}_k)(\mathbf{U})$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\hat{\mathbf{I}}_k \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = (\mathbf{Y}_k) \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{U}}_1 \\ \vdots \\ -\hat{\mathbf{U}}_k \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{U}}_n \end{pmatrix}$$

Přechod na zkratovou impedanční matici

$$(\mathbf{U}) = (\mathbf{Y}_k)^{-1}(\mathbf{I}) = (\mathbf{Z}_k)(\mathbf{I})$$

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \vdots \\ -\hat{U}_k \\ \vdots \\ \hat{U}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{Z}_{(1,1)} & \dots & \hat{Z}_{(1,n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Z}_{(n,1)} & \dots & \hat{Z}_{(n,n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\hat{I}_k \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Zkratový proud

$$\hat{I}_k = \frac{\hat{U}_k}{\hat{Z}_{(k,k)}}$$

$\hat{Z}_{(k,k)}$ zkratová impedance uzlu k

Napětí v libovolném uzlu

$$\hat{U}_j = -\hat{Z}_{(j,k)} \hat{I}_k$$

Proud ve větvi

$$\hat{I}_{ij} = \frac{\hat{U}_i - \hat{U}_j}{\hat{Z}_{ij}} = \frac{\hat{Z}_{(j,k)} - \hat{Z}_{(i,k)}}{\hat{Z}_{ij}} \hat{I}_k$$

\hat{Z}_{ij} impedance větve mezi uzly i a j

Skutečné napětí uzlů a skutečné proudy ve větvích při zkratu jsou dány:

porucha = AES + PES

$$I_{ij}^k = I_{(ij)} + I_{ij} \quad U_j^k = U_{(j)} + U_j$$

kde: proud ve větvi mezi uzly i a j , napětí uzlu j

I_{ij}^k, U_j^k při zkratu

$I_{(ij)}, U_{(j)}$ bezprostředně před vznikem zkratu

I_{ij}, U_j vlastního poruchového stavu

Účinky zkratových proudů

Silové účinky

Vliv zejména u pevně uložených tuhých vodičů, podpěrných izolátorů, odpojovačů, konstrukčních prvků,...

U AC frekvence sil $2f \rightarrow$ dynamické namáhání.

Síla na vodič v mag. poli

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (\text{N})$$

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{T})$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (\text{H/m})$$

α – úhel mezi vektorem mag. indukce a osou vodiče (směrem proudu)

Intenzita mag. pole ve vzdálenosti a od vodiče

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (\text{A/m})$$

2 rovnoběžné vodiče \rightarrow síla kolmo na osu vodiče ($\sin \alpha = 1$) \rightarrow je největší

$$F = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I}{2\pi a} \Pi = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I^2}{a} \Pi \quad (\text{N})$$

Nejvyšší síla odpovídá nejvyšší okamžité hodnotě proudu \rightarrow nárazový zkratový proud I_{km} (první amplituda po vzniku zkratu)

$$I_{km} = \sqrt{2} I''_{k0} \left(1 + e^{-0,01/T_k} \right) = \kappa \sqrt{2} I''_{k0} \quad (\text{A})$$

κ – nárazový činitel podle druhu sítě ($\kappa_{mn} = 1,8$; $\kappa_{vvn} = 1,7$)
teoretický rozsah $\kappa = 1 \div 2$

T_k – časová konstanta ekvivalentního zkratového obvodu (L_e/R_e)
tj. pro ss složku zkratového proudu

I''_{k0} - počáteční rázový zkratový proud

Skutečná velikost se liší podle okamžiku zkratu.

Doznívání stř. složky pomalejší než ss, proto se zanedbává.

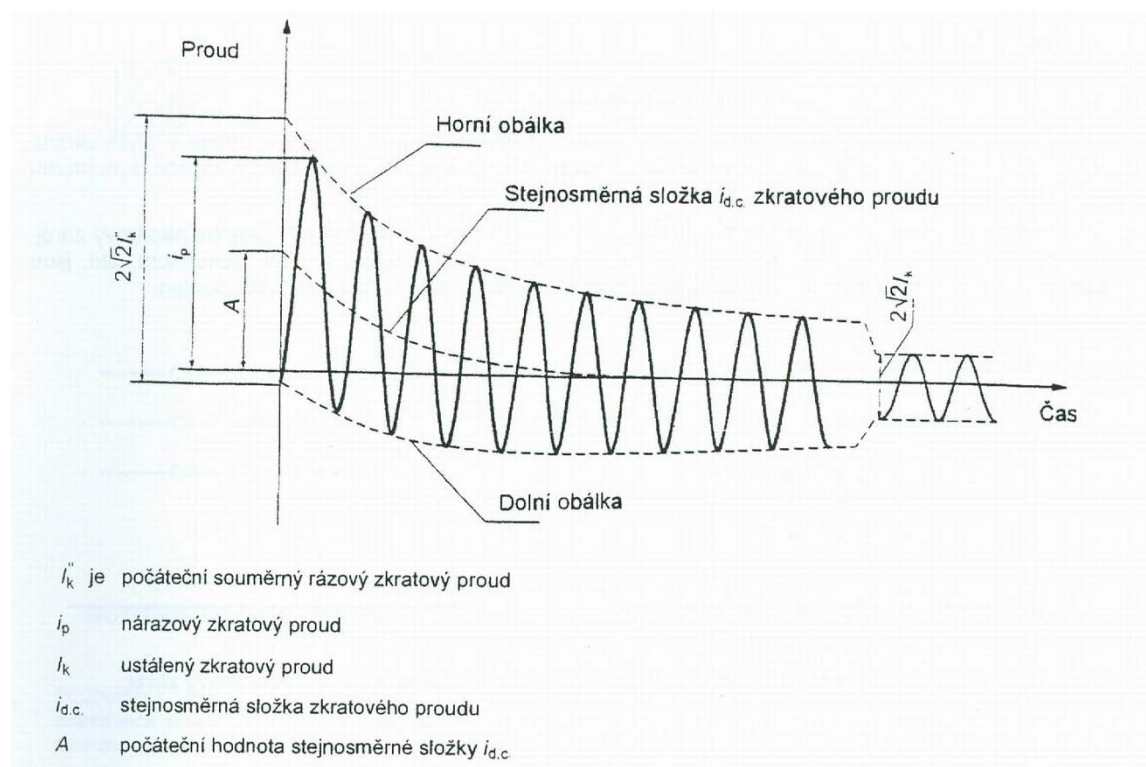
Max. okamžitá síla na jednotku délky vodiče

$$f = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot 10^{-7} \frac{I_{\text{km}}^2}{a} \quad (\text{N/m})$$

k_1 – činitel tvaru vodiče

k_2 – činitel uspořádání vodičů a fázového posunu proudů

a – vzdálenost vodičů



Tepelné účinky

Rozhodující zejména u volně uložených vodičů.

Dány akumulací tepla působením časově proměnného proudu po dobu trvání zkratu t_k (adiabatický děj).

Teplo vyvinuté ve vodičích

$$Q = \int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t) dt \quad (\text{J})$$

Ekvivalentní oteplovací proud – efektivní hodnota proudu, který za dobu zkratu vyvolá stejné tepelné účinky jako skutečný zkratový proud

$$I_{ke}^2 t_k = \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt$$
$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (\text{A})$$

Stanovení podle činitele k_e jako násobek I_k''

$$I_{ke} = k_e I_k''$$

Doba trvání zkratu t_k (s)	Činitel k_e		
	Zkrat na svorkách alternátoru	Zkrat v soustavě	
		vvn, vn	nn
pod 0,05	1,70	1,60	1,50
0,05 – 0,1	1,60	1,50	1,20
0,1 – 0,2	1,55	1,40	1,10
0,2 – 1,0	1,50	1,30	1,05
1,0 – 3,0	1,30	1,10	1,00
nad 3,0	1,15	1,00	1,00