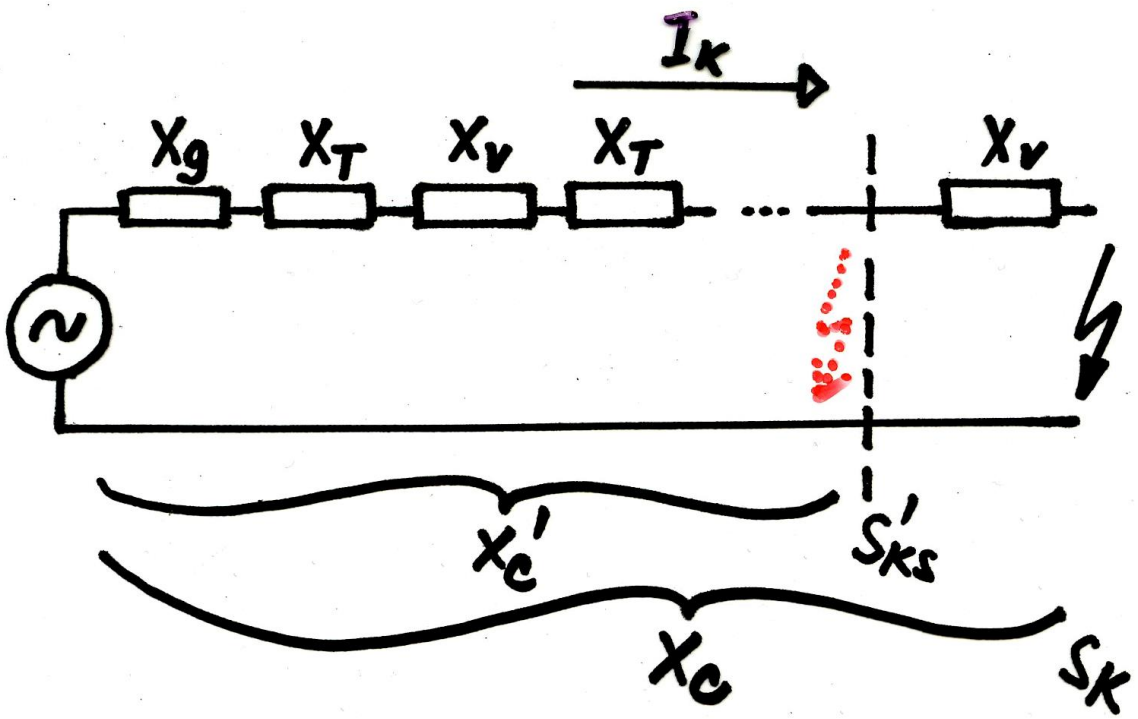
## 4.6 Zkratové poměry - výpočet velikosti zkratových proudů




$$X_C = \sum_I X_I \qquad X_C = X_C{}' + X_V$$

$$S_{KS}{}' = \sqrt{3} U_N I_{KS}{}' = \sqrt{3} U_N \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C{}'} = \frac{c \cdot U_N{}^2}{X_C{}'} \qquad c = 1.1$$

$$S_K = c \cdot \frac{U_N{}^2}{X_C} \qquad I_K = c \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}\, x_C}$$

### 4.6.1 Výpočet velikosti zkratových proudů

Náhradní reaktance prvků: $X = x \cdot Z_N$

Generátor: $$X_G = \frac{x_{d\%}^{''}}{100} \cdot \frac{U_{NG}{}^2}{S_{NG}}$$

Transformátor: $$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{NT}{}^2}{S_{NT}}$$

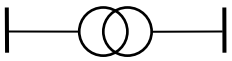
Vedení: $$X_V = X_{Vk} \cdot l$$

$$X_{Vk} = \omega L_P \qquad L_P = 0{,}46 log \frac{d_S}{r_E} + 0.05 \text{ mH}/km$$

Elektrizační soustava (napájecí síť): $X_S = \frac{c \cdot U_{NS}^{\ 2}}{S_{KS}''}$

Přepočty přes transformátor (na jmenovité napětí v místě zkratu $U_n$):

$$X_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{\frac{U_1}{p}}{p \cdot I_1} = \frac{U_1}{I_1} \cdot \frac{1}{p^2} \approx X_1 \cdot \frac{U_{N2}^{\ 2}}{U_{N1}^{\ 2}}$$



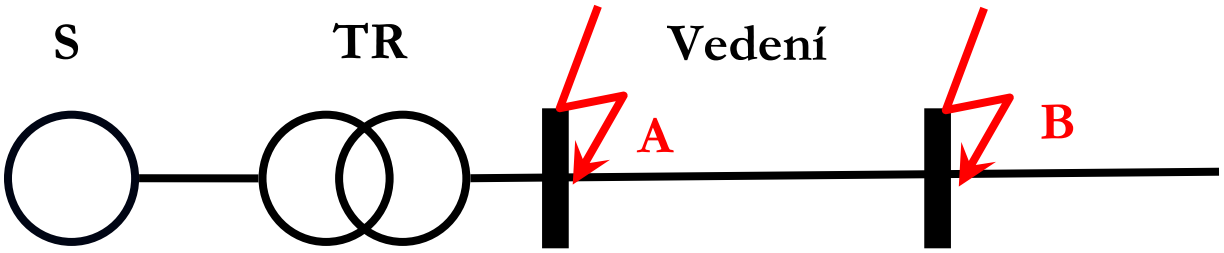

$$p = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$$

**Výsledný zkratový proud:** $I_K'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_C}$ c = 1.1

**Zkratový výkon:**

$$S_K'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_K'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_C} = \frac{c \cdot U_n^2}{X_C}$$

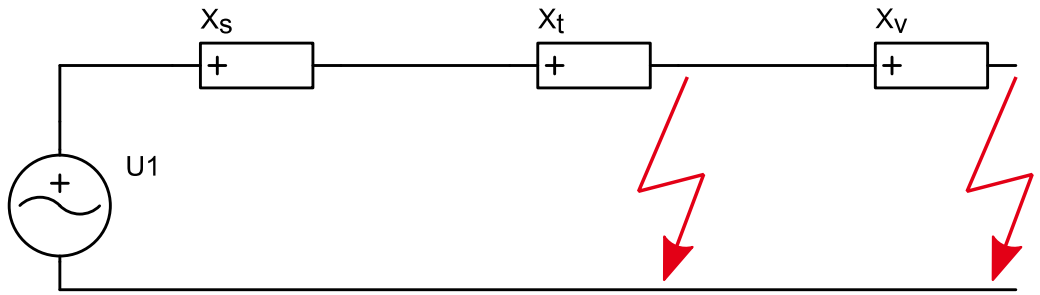
**Příklad:**




**Napájecí síť:**
$U_N$ = 22 kV
$S_K$" = 200 MVA

**Transformátor:**
$U_1/U_2$ = 22/6 kV
$S_{NT}$ = 1000 kVA
$u_k$ = 6%

**Vedení 6 kV:**
$l$ = 2 km
$X_{Vk}$ = 0.3 Ω/km




Síť 22 kV (reaktance se musí přepočítat na napětí v místě zkratu):

$$X_S = \frac{c \cdot U_{NS}^{\ 2}}{S_{KS}"} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1.1 \cdot 22^2}{200} \cdot \left(\frac{6}{22}\right)^2 = \frac{c \cdot U_n^{\ 2}}{S_{KS}"} = 0{,}2\ \Omega$$

V případě použití fiktivního převodu (dle jmenovité hodnoty napětí), lze rovnou dosadit napětí v místě zkratu.

Transformátor 22/6 kV (použijeme jmenovité napětí sekundárního vinutí, které je na napětí jako místo vzniku zkratu, dosadíme tedy rovnou napětí sekundární strany):

$$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{NT}^{\ 2}}{S_{NT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6^2}{1} = 2{,}2\ \Omega$$

Venkovní vedení 6 kV:

$$X_V = X_{Vk} \cdot l = 0{,}3 \cdot 2 = 0{,}6\ \Omega$$

**Zkrat na začátku vedení (zkrat v místě A):**

Celková zkratová rektance

$$X_{CA} = X_S + X_T = 2{,}4\,\Omega$$

Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:

$$I_{KA}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{CA}} = \frac{1{,}1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 2{,}4} = 1{,}59\ kA \qquad \text{c = 1,1}$$

$$S_{KA}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KA}'' = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 1{,}59 = 16{,}5\ MVA$$

**Zkrat na konci kabelu (zkrat v místě B):**

Celková zkratová rektance

$$X_{CB} = X_S + X_T + X_V = 3\,\Omega$$

nebo celou soustavu v místě A (síť + transformátor) nahradíme

reaktancí sítě

$$X_{SA} = \frac{c \cdot U_n{}^2}{S_{KA}''} = \frac{1{,}1 \cdot 6^2}{16{,}5} = 2{,}4\,\Omega = X_{CA}$$

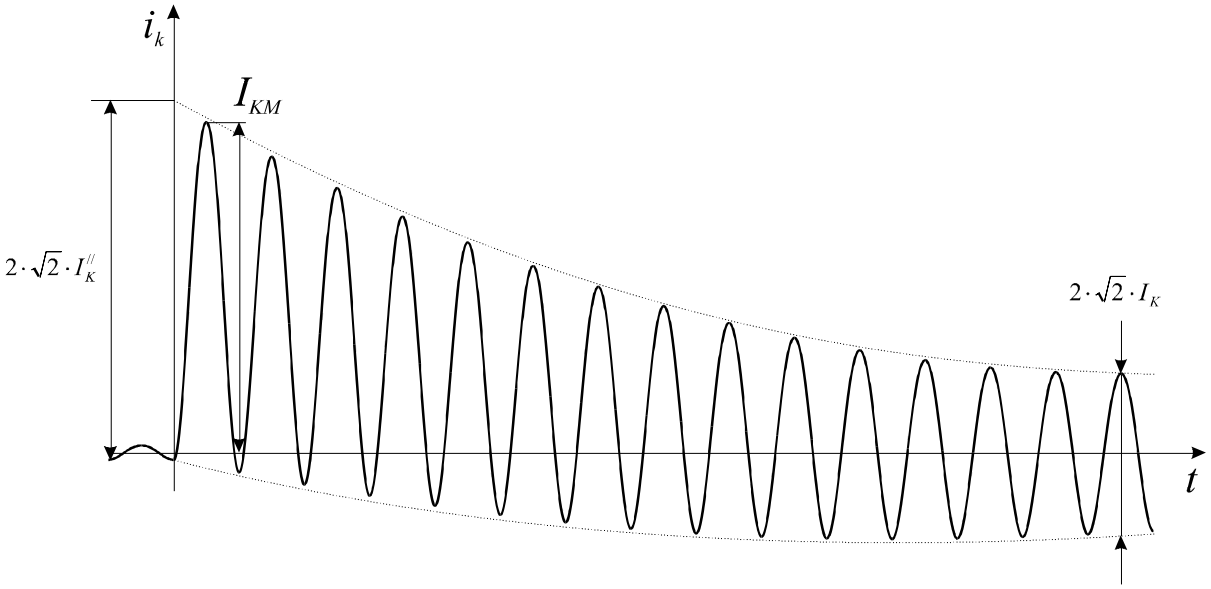
$$X_{CB} = X_{SA} + X_V = 3\,\Omega$$

Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:

$$I_{KB}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{CB}} = \frac{1{,}1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 3} = 1{,}27\ kA \qquad \text{c = 1,1}$$

$$S_{KB}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KB}'' = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 1{,}27 = 13{,}2\ MVA$$

## 4.6.2 Časový průběh zkratového proudu

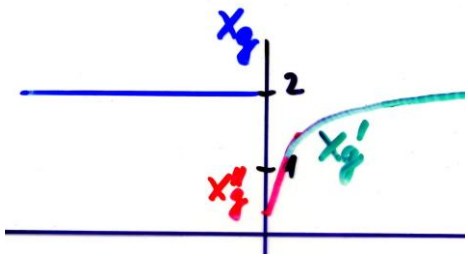



$I''_K$ efektivní hodnota (střídavé složky) zkratového proudu těsně po vzniku zkratu

$I_K$ efektivní hodnota zkratového proudu po ustálení jeho amplitudy

Vliv stavu alternátoru na jeho reaktanci:

| | |
|---|---|
| $x_g$ [-] | 1.1 ÷ 2.7 |
| $x_g'$ [-] | 0.25 ÷ 0.5 |
| $x_g''$ [-] | 0.15 ÷ 0.30 |
| $T'$ [sec] | 2 ÷ 9 |
| $T''$ [sec] | 0.02 ÷ 0.06 |

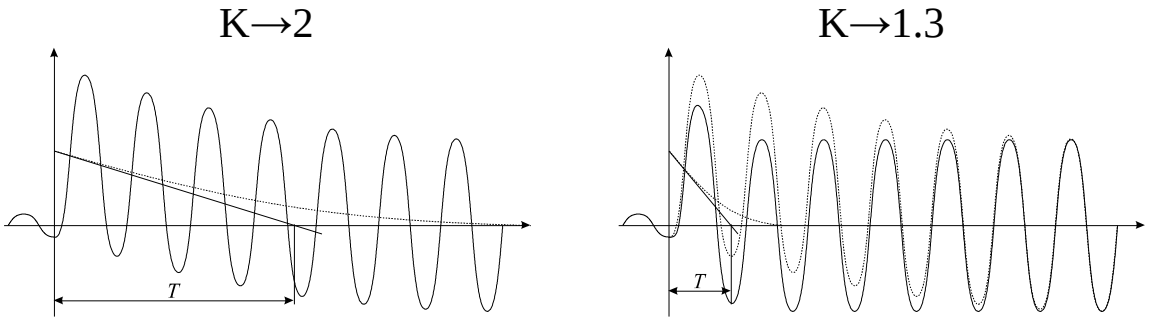



## 4.6.3 Nárazový zkratový proud $i_p$ ($I_{km}$)

Dříve označovaný také jako dynamický zkratový proud $I_{km}$

$$I_{km} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I''_K$$

$K$ - normalizovaný koeficient závislý na poměru L a R ve smyčce, ve které se uzavírá zkratový proud, tabelizován je dle napěťové úrovně




vvn => R<<L => časová konst. *T* je dlouhá => K→ 2

…

nn => R>=L => časová konst. *T* je krátká => K→ 1.3

| Místo zkratu | K |
|---|---|
| za alternátorem do 55 MW | 1,95 |
| v soustavě vvn, zvn | 1,7 |
| v soustavě vn | 1,6 |
| v soustavě nn | 1,4 |
| v kabelovém rozvodu nn | 1,3 |
| za transformátory | |
| vvn/vn | 1,7 |
| vn/nn do 250 kVA včetně | 1,3 |
| do 630 kVA včetně | 1,5 |
| do 1600 kVA včetně | 1,6 |

$I_{km}$ je maximální okamžitá hodnota zkratového proudu během doby trvání zkratu.

### 4.6.4 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud $I_{th}$ ($I_{ke}$)

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_K}\int_0^{t_K} i^2 \cdot dt} = k_e \cdot I_K''$$

$I_{ke}$ je velikost stejnosměrného (efektivní hodnota střídavého) proudu, který má stejné tepelné účinky jako skutečný zkratový proud během doby trvání zkratu.

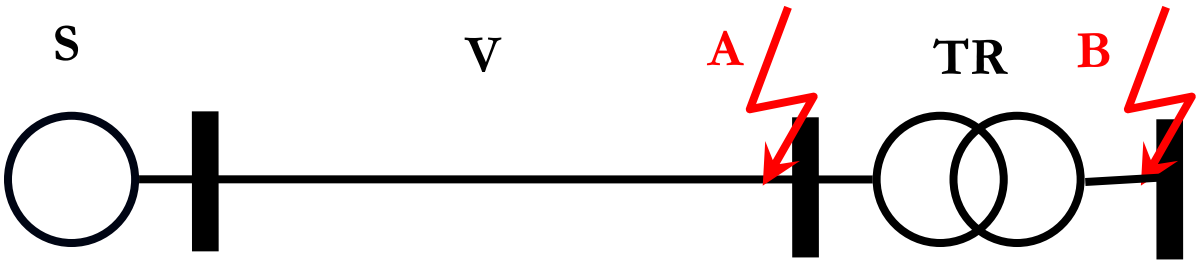
$t_K$ - doba trvání zkratu

$k_e$ - normalizovaný koeficient závislý na poměru L a R ve smyčce, ve které se uzavírá zkratový proud a době trvání zkratu, tabelizován je dle napěťové úrovně a doby trvání zkratu:

| Místo zkratu | $k_e$ pro $t_k$ (s) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,02 | 0,035 | 0,05 | 0,08 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| za alternátorem do 55 MW | 1,65 | 1,60 | 1,58 | 1,54 | 1,50 | 1,46 | 1,23 | 1,08 | 1,03 |
| v soustavě [2]) | | | | | | | | | |
| vvn a zvn | 1,44 | 1,32 | 1,24 | 1,16 | 1,13 | 1,07 | 1,03 | 1,01 | 1,00 |
| Vn | 1,35 | 1,24 | 1,17 | 1,11 | 1,09 | 1,05 | 1,02 | 1,01 | 1,00 |
| Nn | 1,24 | 1,15 | 1,10 | 1,07 | 1,05 | 1,03 | 1,01 | 1,00 | 1,00 |
| v kabelovém rozvodu nn | 1,18 | 1,11 | 1,08 | 1,05 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 1,00 |
| za transformátory | | | | | | | | | |
| vvn/vn nebo vn/vn | 1,49 | 1,37 | 1,29 | 1,20 | 1,17 | 1,09 | 1,04 | 1,02 | 1,01 |
| vn/nn do 250 kVA včetně | 1,18 | 1,11 | 1,08 | 1,05 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 1,00 |
| do 630 kVA včetně | 1,29 | 1,18 | 1,13 | 1,09 | 1,07 | 1,04 | 1,01 | 1,01 | 1,00 |
| do 1600 kVA včetně | 1,35 | 1,24 | 1,17 | 1,11 | 1,09 | 1,05 | 1,02 | 1,01 | 1,00 |

Pro vzdálené zkraty s dobou trvání zkratu $t_k \geq 0{,}5$ s je dovolené uvažovat $k_e = 1$ .

## Příklad:




| | | |
|---|---|---|
| $U_N$ = 110 kV | vedení 110 kV | 110/6 kV |
| $S_K$" = 1200 MVA | l = 50 km | $S_N$ = 40 MVA |
| | $X_{Vk}$ = 0,4 Ω/km | $u_k$ = 10% |

**Zkrat v místě A (Un = 110 kV):**

Síť 110 kV:

$$X_S = \frac{c \cdot U_{NS}^{\ 2}}{S_{KS}"} = \frac{1{,}1 \cdot 110^2}{1200} = 11{,}1\,\Omega$$

Vedení:

$$X_V = X_{Vk} \cdot l = 0{,}4 \cdot 50 = 20\,\Omega$$

Celková zkratová reaktance:

$$X_{CA} = X_S + X_V = 31{,}1\,\Omega$$

**Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:**

$$I_{KA}" = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{CA}} = \frac{1{,}1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 31{,}1} = 2{,}25\ kA \qquad \text{c = 1,1}$$

$$S_{KA}" = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KA}" = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2{,}25 = 429\ MVA$$

**Zkrat v místě B (Un = 6 kV):**

Síť 110 kV (reaktance se musí přepočítat na napětí v místě zkratu):

$$X_S = \frac{c \cdot U_{NS}{}^2}{S_{KS}"} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1{,}1 \cdot 110^2}{1200} \cdot \left(\frac{6}{110}\right)^2 = \frac{c \cdot U_n{}^2}{S_{KS}"} = 0{,}033\,\Omega$$

Vedení 110kV (reaktanci musíme přepočítat na napětí v místě vzniku zkratu):

$$X_V = X_{Vk} \cdot l \cdot \frac{1}{p^2} = 0{,}4 \cdot 50 \cdot \left(\frac{6}{110}\right)^2 = 0{,}06\,\Omega$$

Transformátor 110/6 kV (sekundání strana je na napětí v místě vzniku zkratu):

$$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{NT}{}^2}{S_{NT}} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n{}^2}{S_{NT}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{6^2}{40} = 0{,}09\,\Omega$$

Celková zkratová reaktance:

$$X_{CB} = X_S + X_T + X_V = 0{,}183\,\Omega$$

nebo celou soustavu v místě A (síť + vedení) nahradíme reaktancí sítě, ale musíme ji ještě přepočítat přes transformátor na napětí v místě zkratu:

$$X_{SA} = \frac{c \cdot U_{NS}{}^2}{S_{KA}"} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{1{,}1 \cdot 110^2}{429} \cdot \left(\frac{6}{110}\right)^2 = 0{,}093\,\Omega$$

$$X_{CB} = X_{SA} + X_T = 0{,}183\,\Omega$$

**Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:**

$$I_{KB}" = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{CB}} = \frac{1{,}1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0{,}183} = 20{,}8\ kA \qquad \text{c = 1,1}$$

$$S_{KB}" = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KB}" = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 20{,}8 = 216{,}2\ MVA$$

**Dílčí úkol:**
Vypočítejte zkratové poměry v místě A (Un = 110 kV), jestliže za transformátorem je umístěn místní generátor.
G: $U_{NG}$ = 6 kV, $S_{NG}$ = 10 MVA, $x_{d\%}^{"}$ = 12%

Transformátor 110/6 kV (primár je na napětí v místě zkratu):

$$X_T = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{NT}^{\ 2}}{S_{NT}} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^{\ 2}}{S_{NT}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{40} = 30,25\,\Omega$$

Generátor 6kV (reaktanci musíme přepočítat na napětí v místě zkratu):

$$X_G = \frac{x_{d\%}^{"}}{100} \cdot \frac{U_{NG}^{\ 2}}{S_{NG}} \cdot \frac{1}{p^2} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6^2}{10} \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = 145,2\,\Omega$$

Zkratová reaktance ze strany sítě 110 kV:

$$X_1 = X_S + X_V = 31,1\,\Omega$$

Zkratová reaktance ze strany generátoru 6 kV:

$$X_2 = X_G + X_T = 175,45\,\Omega$$

Zdroje jsou k místu zkratu A připojeny paprskově (paralelně).

Celková zkratová reaktance (paralelní spojení):

$$X_{CA} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = 26,42\,\Omega$$

**Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:**

$$I_{KA}" = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_{CA}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 26,42} = 2,64\ kA \qquad \text{c = 1,1}$$

$$S_{KA}" = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KA}" = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,64 = 503\ MVA$$

Zdroje jsou k místu zkratu A připojeny paprskově (paralelně) → celkový zkratový proud v místě A = součet příspěvků obou zdrojů

Zkratový proud ze strany sítě 110 kV:

$$I_{K1}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_1} = \frac{1{,}1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 31{,}1} = 2{,}24\ kA$$

Zkratový proud ze strany generátoru 6 kV:

$$I_{K2}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_2} = \frac{1{,}1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 175{,}45} = 0{,}4\ kA$$

**Výsledný zkratový proud a zkratový výkon:**

$$I_{KA}'' = I_{K1}'' + I_{K2}'' = 2{,}24 + 0{,}4 = 2{,}64\ kA \qquad c = 1{,}1$$

$$S_{KA}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{KA}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2{,}64 = 503\ MVA$$