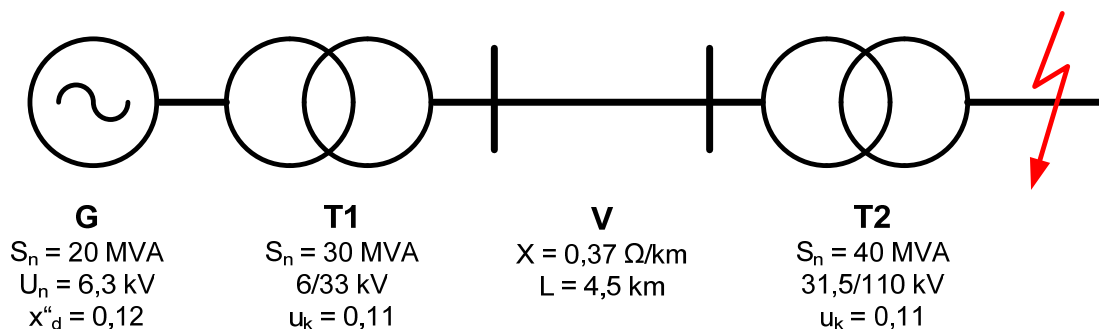


Příklad č. 1

V soustavě na obrázku je v označeném místě trojfázový zkrat.

- Určete:
- počáteční rázový zkratový proud
 - počáteční rázový zkratový výkon
 - nárazový proud

**Řešení:**

- Zvolíme vztahný výkon; v tomto případě to může být libovolné číslo, například $S_v = 110 \text{ MVA}$.
- Provedeme přepočítání všech reaktancí na zvolený vztahný výkon a na napětí v místě zkratu, označené U_v . V zadaném příkladu jsou nenávazné napěťové hladiny, proto musíme při přepočtu respektovat převody transformátorů.

Přepočítací vztahy lze získat následovně:

- reaktance generátoru – dosazujeme rázovou reaktanci generátoru

$$x_G = x''_d \cdot \frac{Z_{nG}}{Z_v} \cdot p^2 = x''_d \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nG}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_{nG}^2} = x''_d \cdot \frac{S_v}{S_{nG}}$$

- reaktance transformátoru – dosazujeme napětí nakrátko

$$x_T = u_k \cdot \frac{Z_{nT}}{Z_v} \cdot p^2 = u_k \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_{nT}^2} = u_k \cdot \frac{S_v}{S_{nT}}$$

- reaktance vedení – dosazujeme reaktanci vedení na 1 km délky

$$x_{VED} = x_{VED1} \cdot l \cdot \frac{1}{Z_v} \cdot p^2 = x_{VED1} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_{nVED}^2} = x_{VED1} \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_{nVED}^2}$$

- reaktance soustavy – dosazujeme zkratový výkon soustavy

$$x_S = \frac{Z_S}{Z_v} \cdot p^2 = \frac{U_S^2}{S_{ks}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_S^2} = \frac{S_v}{S_{ks}}$$

kde Z_{nG}, Z_{nT} jmenovitá impedance generátoru/transformátoru (Ω)

Z_v vztažná impedance (Ω)

x_d'' rázová reaktance generátoru (-)

u_k napětí nakrátko transformátoru (-)

x_{VED1} reaktance vedení na 1 km délky ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)

S_{ks} trojfázový zkratový výkon soustavy (VA)

l délka vedení (km)

p napěťový převod všech transformátorů mezi místem zkratu (místem se vztažným napětím) a místem generátoru (-)

Pozn.: V případě, že navazující napěťové hladiny neodpovídají převodům transformátorů, je třeba respektovat plný vztah pro přepočítání, který pak není možné dále zjednodušit.

Přepočítání reaktancí

Alternátor:

$$x_g = x_d'' \cdot \frac{S_v}{S_{ng}} \cdot \left(\frac{U_{ng}}{U_v}\right)^2 \cdot p_{T1}^2 \cdot p_{T2}^2 = 0,12 \cdot \frac{110}{20} \cdot \left(\frac{6,3}{110}\right)^2 \cdot \left(\frac{33}{6}\right)^2 \cdot \left(\frac{110}{31,5}\right)^2 = 0,799$$

Transformátor T1

$$x_{T1} = x_k \cdot \frac{S_v}{S_{nT1}} \cdot \left(\frac{U_{nT1}}{U_v}\right)^2 \cdot p_{T2}^2 = 0,11 \cdot \frac{110}{30} \cdot \left(\frac{33}{110}\right)^2 \cdot \left(\frac{110}{31,5}\right)^2 = 0,443$$

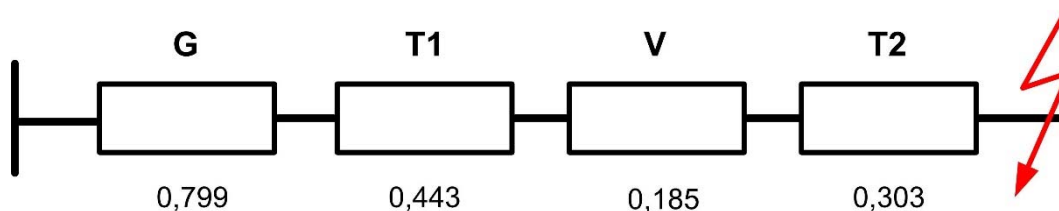
Transformátor T2

$$x_{T2} = x_k \cdot \frac{S_v}{S_{nT2}} \cdot \left(\frac{U_{nT2}}{U_v}\right)^2 = 0,11 \cdot \frac{110}{40} \cdot \left(\frac{110}{110}\right)^2 = 0,303$$

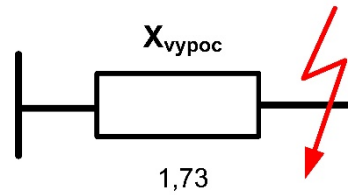
Vedení V: (přepočítání veličiny v Ohmech na poměrnou hodnotu a její přepočítání na hodnoty S_v a U_v)

$$x_v = x \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot p_{T2}^2 = 0,37 \cdot 4,5 \cdot \frac{110}{110^2} \cdot \left(\frac{110}{31,5}\right)^2 = 0,185$$

- 3) Nakreslíme náhradní schéma (při 3 fázovém zkratu se jedná o schéma sousledných složek) a vyplníme hodnotami reaktancí.



- 4) Náhradní schéma zjednodušíme a stanovíme výpočtovou reaktanci přepočtenou na hodnoty S_v a U_v .



- 5) Vypočteme vztažený proud

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,577 \text{ kA}$$

- 6) Hledaný počáteční rázový zkratový proud

$$I_{k0}'' = k \cdot \frac{I_v}{X_{vypoc}} = 1,1 \cdot \frac{0,577}{1,73} = 0,367 \text{ kA}$$

- 7) Počáteční rázový zkratový výkon

$$S_{k0}'' = \sqrt{3} \cdot U_v \cdot I_{k0}'' = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 0,367 = 69,9 \text{ MVA}$$

Druhý možný způsob výpočtu:

$$S_{k0}'' = k \cdot \frac{S_v}{X_{vypoc}} = 1,1 \cdot \frac{110}{1,73} = 69,9 \text{ MVA}$$

- 6a) Počáteční rázový zkratový proud

$$I_{k0}'' = \frac{S_{k0}''}{\sqrt{3} \cdot U_{sv}} = \frac{69,9}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,367 \text{ kA}$$

- 8) Nárazový proud

$$I_{km} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k0}'' = 1,7 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,367 = 0,882 \text{ kA}$$

činitel $k = 1,7$ pro zkrat v soustavě vvn. Koeficienty k vychází z normy pro výpočet zkrat. proudů.

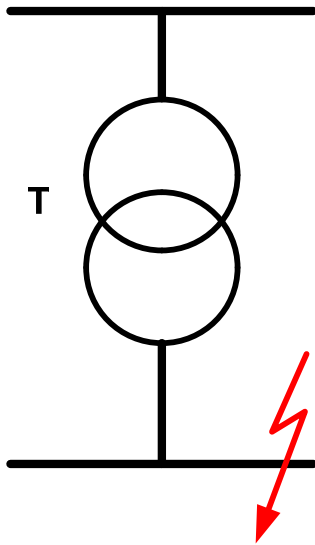
Příklad č. 2

Určete počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu za transformátorem $S_{nT} = 15 \text{ MVA}$, $u_k = 10 \%$, 115/10,5 kV. Transformátor je podle obrázku připojen k síti s počátečním rázovým zkratovým výkonem soustavy $S''_{ks} = 3500 \text{ MVA}$. To znamená, že při zkratu na takto označených přípojnicích bude počáteční zkratový výkon od soustavy roven zadanému číslu, tj.

$$S''_{ks} = \frac{S_v}{x_s} = 3500 \text{ MVA}$$

Zvolíme vztažný výkon $S_v = S_{nT}$. Náhradní reaktance soustavy bude

$$S''_{ks} = 3500 \text{ MVA}$$



$$x_s = \frac{S_v}{S''_{ks}} = \frac{15}{3500} = 0,00428$$

Reaktance transformátoru

$$x_t = u_k = 0,1$$

Výpočet reaktance

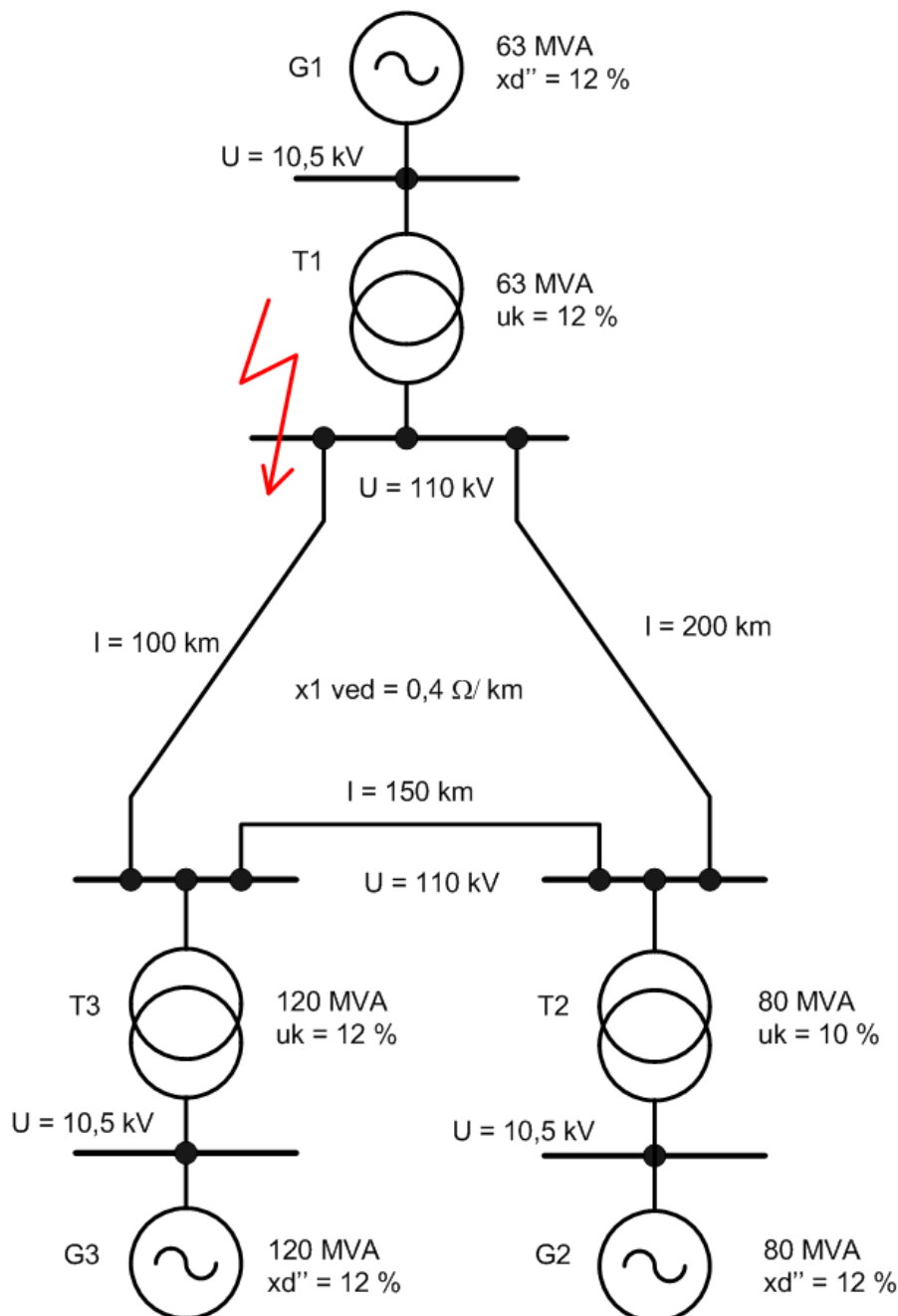
$$x_{vyp} = x_s + x_t = 0,00428 + 0,1 = 0,10428$$

Počáteční rázový zkratový výkon

$$S''_{ks} = \frac{S_v}{x_{vyp}} = \frac{15}{0,10428} = 143,8 \text{ MVA}$$

Příklad č. 3

Určete počáteční rázový zkratový proud a rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu v označeném místě soustavy dle obr. 1.



Obr. 1

Zvolíme vztažný výkon $S_v = 120 \text{ MVA}$ a vztažné napětí $U_v = 110 \text{ kV}$

a odtud dostaneme vztažný proud $I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 630 \text{ A}$.

Provedeme přepočítání reaktancí prvků na zvolený vztažný výkon a na napětí v místě zkratu:

- alternátory

$$G1: x_{G1} = x_d'' \frac{S_v}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{120}{63} = 0,23$$

$$G2: x_{G2} = 0,12 \cdot \frac{120}{80} = 0,18$$

$$G3: x_{G3} = 0,12 \cdot \frac{120}{120} = 0,12$$

• transformátory

$$T1: x_{T1} = u_k \frac{S_v}{S_n} = 0,12 \cdot \frac{120}{63} = 0,23$$

$$T2: x_{T2} = 0,10 \cdot \frac{120}{80} = 0,15$$

$$T3: x_{T3} = 0,12 \cdot \frac{120}{120} = 0,12$$

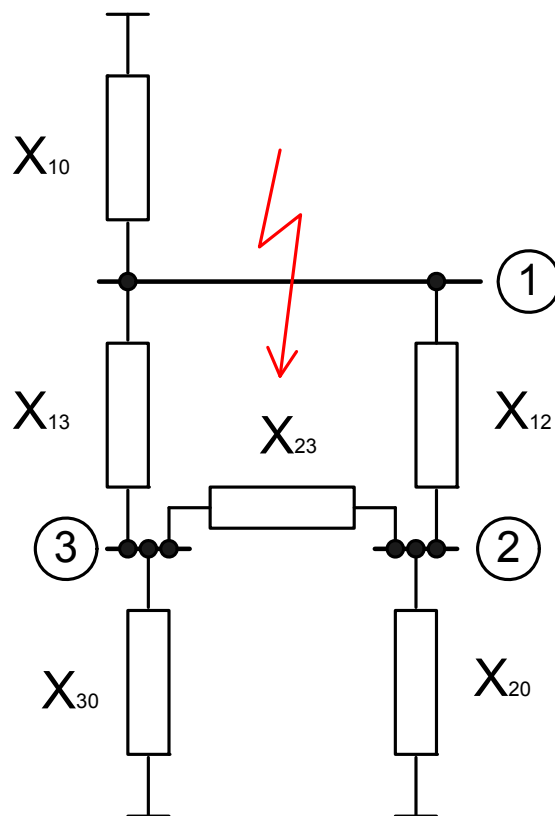
• vedení

$$V12: x_{V12} = x_{Ived} \cdot 1 \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0,4 \cdot 200 \cdot \frac{120}{110^2} = 0,8$$

$$V13: x_{V13} = 0,4 \cdot 100 \cdot \frac{120}{110^2} = 0,4$$

$$V23: x_{V23} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{120}{110^2} = 0,6$$

Náhradní schéma s přepočtenými reaktancemi lze zjednodušit do podoby na obr. 2.



Obr. 2

$$x_{10} = x_{G1} + x_{T1} = 0,46$$

$$x_{20} = x_{G2} + x_{T2} = 0,33$$

$$x_{30} = x_{G3} + x_{T3} = 0,24$$

$$x_{12} = x_{V12} = 0,8$$

$$x_{13} = x_{V13} = 0,4$$

$$x_{23} = x_{V23} = 0,6$$

Přepočtené reaktance (impedance) pro další postup převedeme na admitance, zjistíme tedy jejich převrácené hodnoty:

$$\begin{aligned} y_{10} &= 2,17 & y_{12} &= y_{21} = 1,25 \\ y_{20} &= 3,03 & y_{13} &= y_{31} = 2,5 \\ y_{30} &= 4,17 & y_{23} &= y_{32} = 1,67 \end{aligned}$$

Nyní můžeme sestavit admitanční matici soustavy na obr. 2.

Na diagonále (prvek $y_{(i,i)}$) jsou záporně vzaté součty všech admitancí vedoucích z uzlu i , mimo diagonálu (prvek $y_{(i,j)}$) jsou admitance mezi uzly i a j .

$$\begin{aligned} y_{(1,1)} &= -(2,17 + 2,5 + 1,25) = -5,92 \\ y_{(2,2)} &= -(3,03 + 1,25 + 1,67) = -5,95 \\ y_{(3,3)} &= -(4,17 + 1,67 + 2,5) = -8,33 \end{aligned}$$

Admitanční matice má tedy podobu:

$$(y) = \begin{pmatrix} -5,92 & 1,25 & 2,5 \\ 1,25 & -5,95 & 1,67 \\ 2,5 & 1,67 & -8,33 \end{pmatrix}$$

Z ní inverzí dostaneme impedanční matici soustavy $(z) = (y)^{-1}$:

$$(z) = \begin{pmatrix} 0,216 & 0,067 & 0,078 \\ 0,067 & 0,199 & 0,060 \\ 0,078 & 0,060 & 0,155 \end{pmatrix}$$

(je-li admitanční matice symetrická podle diagonály, platí totéž i u impedanční matice)

(pozn: zde se jedná pouze o imaginární složky impedancí i admitancí)

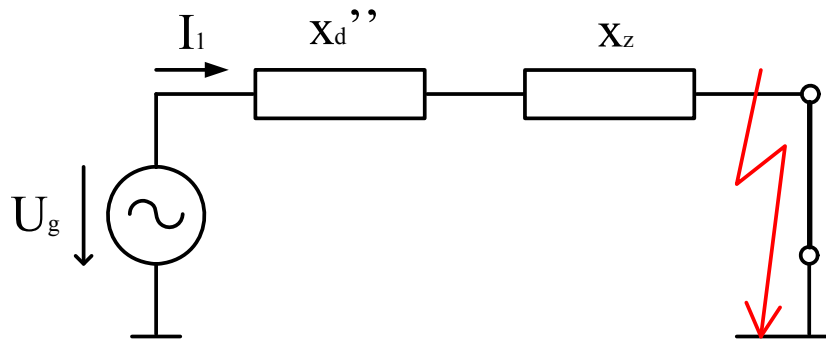
Impedanční matice určuje vztah mezi vektorem uzlových napětí a proudů:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{z}_{(1,1)} & \hat{z}_{(1,2)} & \hat{z}_{(1,3)} \\ \hat{z}_{(2,1)} & \hat{z}_{(2,2)} & \hat{z}_{(2,3)} \\ \hat{z}_{(3,1)} & \hat{z}_{(3,2)} & \hat{z}_{(3,3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_1 \\ \hat{i}_2 \\ \hat{i}_3 \end{pmatrix}$$

Uzlová napětí jsou (zde všechno v poměrných hodnotách) napětí uzlů proti zemi.

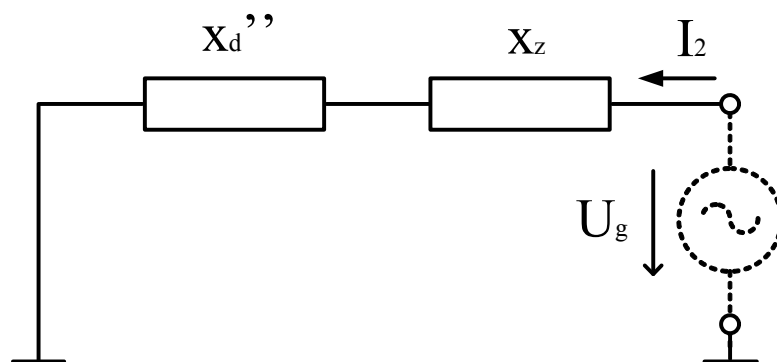
Uzlové proudy reprezentují odběry, příp. dodávky proudů v jednotlivých uzlech. V našem případě budou prvky \hat{I}_2 a \hat{I}_3 nulové, neboť zde žádný odběr není a podle 1. Kirchhoffova zákona je součet proudů v uzlu roven nule. V uzlu 1 nastal zkrat, který představuje místo odběru (proudy tečou do tohoto uzlu) a proto prvek \hat{I}_1 bude nenulový a roven hledanému zkratovému proudu.

Ve skutečnosti je referenční napětí (rovno 1) v místě zdroje = alternátoru a proud v místě obvodu je omezen impedancemi, kterými proud prochází (viz obr. 3).



Obr. 3

Pro výpočet s výhodou využijeme úvahu, kdy referenční napětí umístíme do místa zkratu a vnitřní napětí zdroje považujeme za nulové (zdroj tedy nahradíme pouze jeho rázovou reaktancí). Potom zůstane pochopitelně procházející proud nezměněn (viz obr. 4).



Obr. 4

Podle výše uvedeného se maticový vztah zjednoduší na

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{z}_{(1,1)} & \hat{z}_{(1,2)} & \hat{z}_{(1,3)} \\ \hat{z}_{(2,1)} & \hat{z}_{(2,2)} & \hat{z}_{(2,3)} \\ \hat{z}_{(3,1)} & \hat{z}_{(3,2)} & \hat{z}_{(3,3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

přičemž v poměrných hodnotách bude $u_1 = 1$.

Protože z maticového vztahu platí $\hat{u}_1 = \hat{z}_{(1,1)} \cdot \hat{i}_1$, bude v poměrných hodnotách zkratový proud

v uzlu 1 roven převrácené hodnotě prvku $\hat{z}_{(1,1)}$ impedanční matice: $i_1 = -\frac{1}{0,216} = -4,63$.

(záporné znaménko odpovídá proudu tekoucímu ven z uzlu, tedy odběru z uzlu)

V pojmenovaných hodnotách bude mít zkratový proud velikost

$$I_1 = 4,63 \cdot I_v = 4,63 \cdot 0,63 \text{ kA} = 2,92 \text{ kA}.$$

Rázový zkratový výkon pak bude:

$$S_1 = \sqrt{3} U_v I_1 = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,92 \text{ MVA} = 555 \text{ MVA}$$

Známe-li velikost všech uzlových proudů a impedanční matici (obojí v poměrných hodnotách), můžeme spočítat všechna uzlová napětí:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \hat{u}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{z}_{(1,1)} & \hat{z}_{(1,2)} & \hat{z}_{(1,3)} \\ \hat{z}_{(2,1)} & \hat{z}_{(2,2)} & \hat{z}_{(2,3)} \\ \hat{z}_{(3,1)} & \hat{z}_{(3,2)} & \hat{z}_{(3,3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -4,63 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,312 \\ 0,362 \end{pmatrix}$$

Odtud již můžeme zjistit příspěvky ke zkratovému proudu od jednotlivých alternátorů, které jsou rovny proudům tekoucím přes reaktance x_{10} , x_{20} , x_{30} . Ty určíme jako podíl napětí v jednotlivých uzlech a příslušných reaktancí.

$$i_{10} = \frac{u_1}{x_{10}} = \frac{1}{0,46} = 2,17 \rightarrow I_{10} = 1,37 \text{ kA}$$

$$i_{20} = \frac{u_2}{x_{20}} = \frac{0,312}{0,33} = 0,94 \rightarrow I_{20} = 0,60 \text{ kA}$$

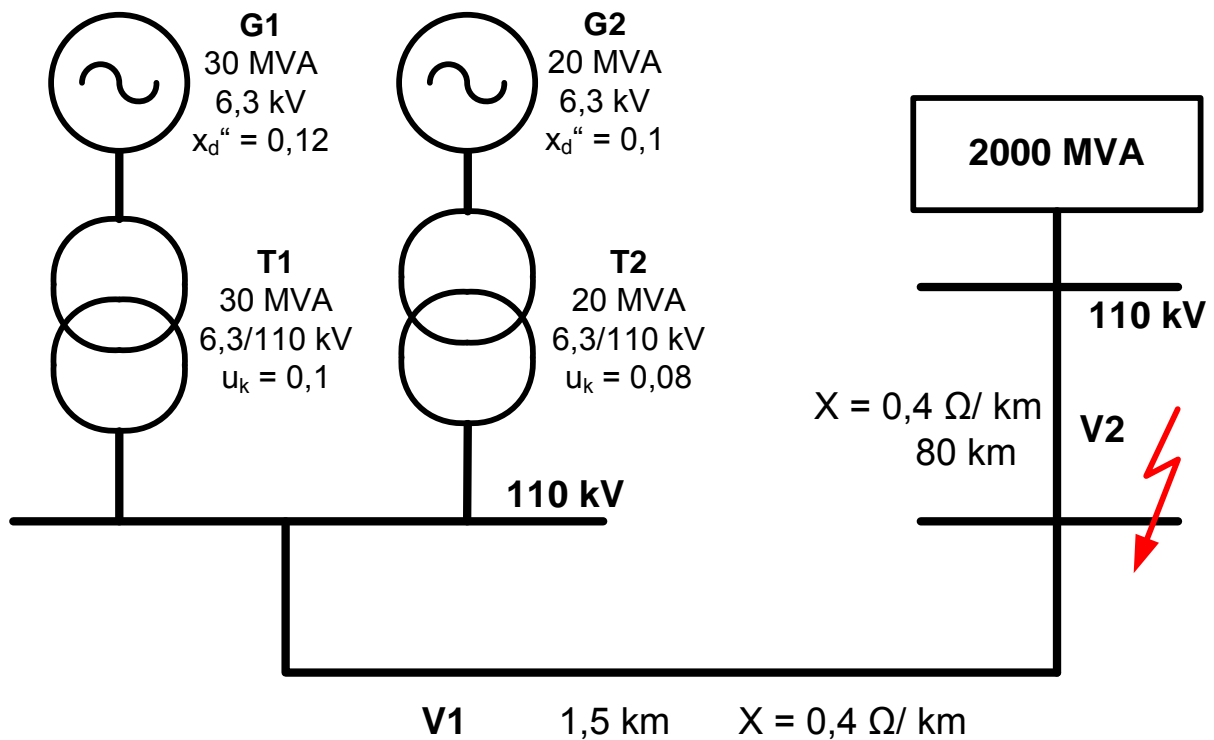
$$i_{30} = \frac{u_3}{x_{30}} = \frac{0,362}{0,24} = 1,51 \rightarrow I_{30} = 0,95 \text{ kA}$$

Také je dobré si uvědomit, co znamenají hodnoty prvků v napěťovém vektoru. V místě zkratu při jednopólové náhradě je evidentně nulové napětí. Avšak nám vyšlo $\hat{u}_1 = 1$. To je z důvodu obrácené úvahy podle obr. 3 a 4. Odtud je zřejmé, že výsledná napětí vlastně znamenají napěťové úbytky od referenční hladiny. Skutečná uzlová napětí v okamžiku zkratu pak vypočteme jako doplněk do 1. Dostaneme tedy:

$$\hat{u}_{\text{skut}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,688 \\ 0,638 \end{pmatrix} \rightarrow \hat{U}_{\text{skut}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 75,7 \\ 70,2 \end{pmatrix} \text{ kV}$$

Příklad č. 4

Určete počáteční rázový zkratový výkon a počáteční rázový zkratový proud při 3 fázovém zkratu v označeném místě na obrázku.



1) volba vztažného výkonu a napětí:

$$S_v = 30 \text{ MVA}, U_v = 110 \text{ kV}$$

2) přepočítání reaktancí na zvolený vztažný výkon a na napětí v místě zkratu

alternátor G1: $x_{G1} = 0,12$

alternátor G2: $x_{G2} = x_d'' \cdot \frac{S_v}{S_{nG2}} = 0,1 \cdot \frac{30}{20} = 0,15$

transformátor T1: $x_{T1} = 0,1$

transformátor T2: $x_{T2} = u_k \cdot \frac{S_v}{S_{nT2}} = 0,08 \cdot \frac{30}{20} = 0,12$

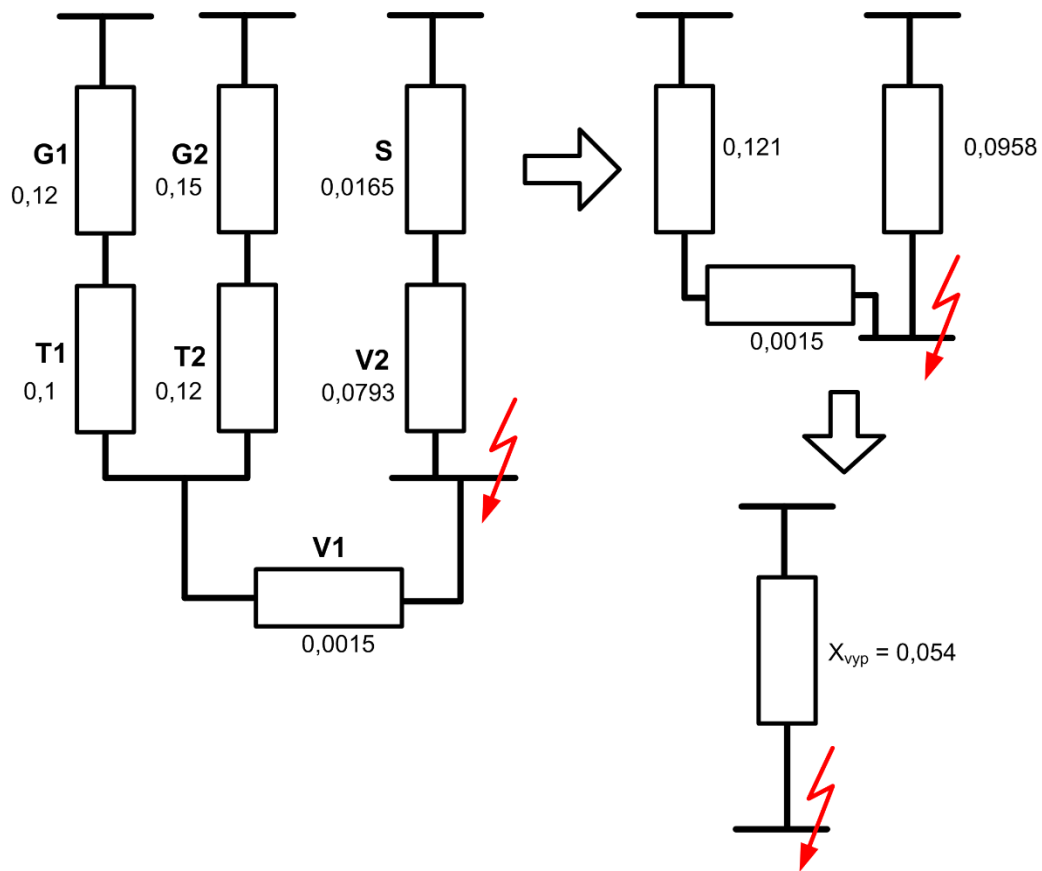
vedení V1: $x_{V1} = x \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0,4 \cdot 1,5 \cdot \frac{30}{110^2} = 0,0015$

vedení V2: $x_{V2} = X \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{30}{110^2} = 0,0793$

připojená soustava: $x_S = 1,1 \cdot \frac{S_v}{S_{kos}} = 1,1 \cdot \frac{30}{2000} = 0,0165$

($k = 1,1 \dots$ koeficient respektující vnitřní napětí generátorů pracujících do soustavy se zátěží $e = 1,1$, uvažujeme svorkové napětí generátoru $u_n = 1$, platí pro VN a VVN sítě, převzato z normy pro výpočet zkrat. proudů)

3) náhradní schéma, úprava schématu a stanovení výpočtové reaktance – je provedeno na následujícím obrázku



4) počáteční rázový zkratový výkon

$$S_{k0}'' = k \cdot \frac{S_v}{x_{vyp}} = 1,1 \cdot \frac{30}{0,054} = 611,1 \text{ MVA}$$

5) počáteční rázový zkratový proud

$$I_{k0}'' = \frac{S_{k0}''}{\sqrt{3} \cdot 110} = 3,207 \text{ kA}$$

Pozn.: Výpočet zkratové reaktance soustavy ze zkratového výkonu

$$S_{ks} = \sqrt{3}U_n I_k$$

a) Vnitřní napětí ekvivalentního napěťového zdroje uvažujeme jmenovité.

$$S_{ks} = \sqrt{3}U_n \frac{E_f}{Z_k} = \sqrt{3}U_n \frac{U_{fn}}{Z_k} = \frac{U_n^2}{Z_k}$$

$$Z_k = \frac{U_n^2}{S_{ks}}$$

$$z_k = \frac{Z_k}{Z_v} \cdot p^2 = \frac{U_n^2}{S_{ks}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_n^2} = \frac{S_v}{S_{ks}}$$

b) Vnitřní napětí ekvivalentního napěťového zdroje uvažujeme vyšší než jmenovité ($k > 1$)

$$S_{ks} = \sqrt{3}U_n \frac{E_f}{Z_k} = \sqrt{3}U_n \frac{k \cdot U_{fn}}{Z_k} = \frac{k \cdot U_n^2}{Z_k}$$

$$Z_k = \frac{k \cdot U_n^2}{S_{ks}}$$

$$z_k = \frac{Z_k}{Z_v} \cdot p^2 = \frac{k \cdot U_n^2}{S_{ks}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \frac{U_v^2}{U_n^2} = k \cdot \frac{S_v}{S_{ks}}$$