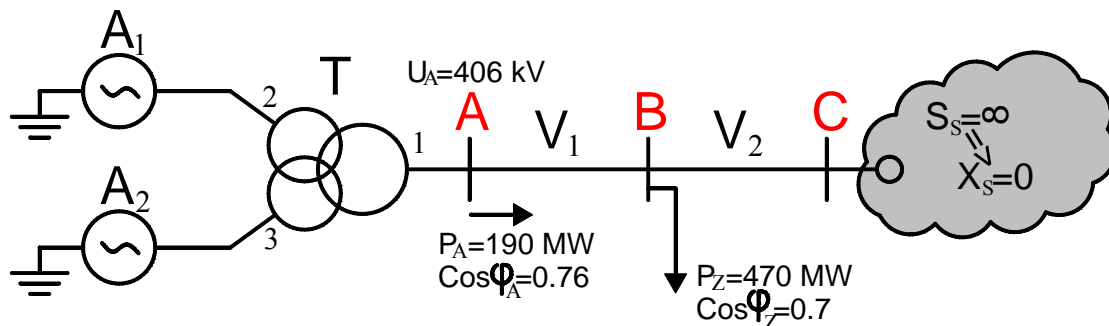


# 1 Statická stabilita jednoduché soustavy alternátor-tvrdá síť

U soustavy podle Obr. 1 zjistěte, zda je provoz v daném stavu stabilní. Sestrojte závislosti činných a jalových výkonů na úhlu  $\delta$ . Rezistance zanedbejte.



Obr. 1 Schéma soustavy

## 1.1 Parametry prvků:

**Alternátory A1(A2):**  $U_{gn} = 12kV, P_g = 110 MW, \cos\varphi = 0.8, x_d = 180\%$

**Transformátor T:**  $S_{t1}/S_{t2}/S_{t3} = 280/140/140 MVA,$

$$U_{t1}/U_{t2}/U_{t3} = 410/11.9/11.9 kV$$

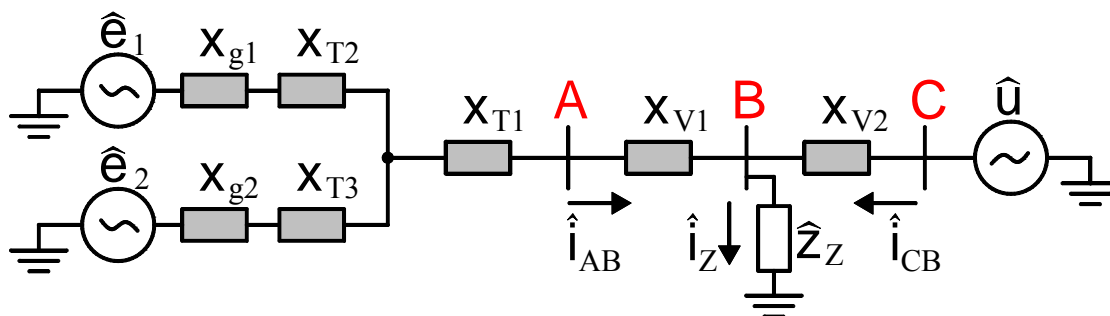
$$u_{k12}/u_{k13}/u_{k23} = 13/13/24 \%$$

**Vedení V1:**  $X_{l1} = 0.3 \Omega/km, l_1 = 460 km$

**Vedení V2:**  $X_{l2} = 0.3 \Omega/km, l_2 = 80 km$

**Volíme:**  $S_v = 500 MVA, U_v = 400 kV, I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} = 721.688 A$

## 1.2 Výpočet náhradních parametrů:



Obr. 2 Náhradní schéma soustavy - úplné

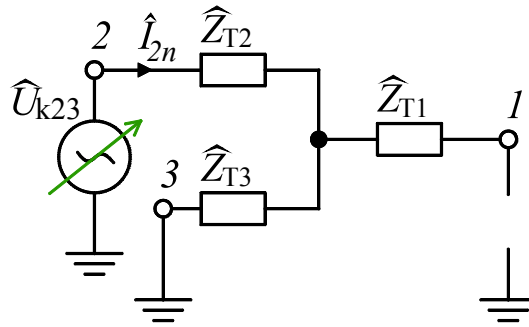
### 1.2.1 Generátory:

$$x_g = x_{g1} = x_{g2} = x_d \cdot \frac{U_g^2 \cdot \cos\varphi}{P_g} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot \left(\frac{U_{t1}}{U_{t2}}\right)^2 = 6.993 p.u$$

### 1.2.2 Transformátor:

Pro zjištění náhradních reaktancí trojvintového transformátoru  $x_{T1}$ ,  $x_{T2}$  a  $x_{T3}$  vycházíme z principu měření napětí nakrátko:

Pro zjištění  $\hat{u}_{k23}$  postupujeme dle Obr. 3. Zkratujeme uzel **3** a pomocí regulovatelného zdroje napětí v uzlu **2** zvyšujeme napětí  $\hat{U}_{k23}$  až do chvíle, kdy do uzlu vtéká jmenovitý proud  $\hat{I}_{2n}$ . Hodnotu v pojmenovaných hodnotách dále převedeme do poměrných vztaženou na jmenovitou hodnotu napětí v uzlu **2** tedy  $U_{2n}$ .



Obr. 3 Princip stanovení napětí nakrátko  $\hat{u}_{k12}$

$$\hat{u}_{k23}^+ = \frac{\hat{U}_{k23}}{\hat{U}_{2n}} = \frac{\hat{Z}_{k23}}{\hat{Z}_{23n}} \cdot \frac{\hat{I}_{2n}}{\hat{I}_{2n}} = \hat{z}_{k23}^+ \quad (1)$$

Z předchozího je patrné, že napětí nakrátko je obecně komplexní a je rovno poměrné impedanci nakrátko pro souslednou složkovou soustavu. Obecně je vhodné všechny impedance nakrátko  $\hat{z}_{k12}^+$ ,  $\hat{z}_{k13}^+$  a  $\hat{z}_{k23}^+$  přepočítat do jednoho zvoleného uzlu. Pokud za tento uzel zvolíme uzel **1** (uzel primární strany transformátoru), hodnoty vztažené do tohoto uzlu (tedy na  $Z_{1n} = U_{1n}^2/S_{1n}$ ) budou

$$\hat{z}_{k23} = \frac{\overbrace{\frac{\hat{U}_{k23}}{\hat{U}_{2n}}}^{**}}{\underbrace{\hat{U}_{2n}}_*} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{2n}} \cdot \underbrace{\left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}}\right)^2}_{***} \cdot \underbrace{\frac{S_{1n}}{U_{1n}^2}}_{****} = \frac{\hat{U}_{k23}}{\underbrace{\hat{U}_{2n}}_{\hat{u}_{k23}^+}} \cdot \frac{S_{1n}}{S_{2n}} \quad (2)$$

\* vztaženo na  $U_{2n}$

\*\* hodnota v  $\Omega$  v uzlu **2**

\*\*\* přepočet na napětí v uzlu **1**

\*\*\*\* vztažení na uzel **1**, tedy na jmenovitou impedanci uzlu **1**

Zbývající měření je možno provést přímo v uzlu **1** a získat

$$\hat{z}_{k12} = \frac{\hat{U}_{k12}}{\hat{U}_{1n}} \cdot \frac{U_{1n}^2}{S_{1n}} \cdot \frac{S_{1n}}{U_{1n}^2} = \frac{\hat{U}_{k12}}{\hat{U}_{1n}} = \hat{u}_{k12}^+ \quad (3)$$

$$\hat{z}_{k13} = \frac{\hat{U}_{k13}}{\hat{U}_{1n}} = \hat{u}_{k13}^+$$

Pro modul impedance  $\hat{z}_{k23}$  platí

$$z_{k23} = \sqrt{r_{k23}^2 + x_{k23}^2} \quad (4)$$

Rezistance transformátoru nakrátko se vypočte ze ztrát transformátoru nakrátko.

$$\Delta P_{k23} = 3 \cdot R_{k23}^+ \cdot I_{2n}^2 = 3 \cdot R_{k23}^+ \cdot \left( \frac{S_{2n}}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}} \right)^2 \quad (5)$$

Odtud

$$R_{k23}^+ = \frac{\Delta P_{k23}}{3 \cdot I_{2n}^2} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{2n}^2} \cdot U_{2n}^2 \quad (6)$$

Odpor přepočteme z uzlu 2 do uzlu 1 obdobně jako  $\hat{z}_{k23}$ .

$$r_{k23} = R_{k23}^+ \cdot \left( \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 \cdot \frac{S_{1n}}{U_{1n}^2} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{2n}^2} \cdot U_{2n}^2 \cdot \left( \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 \cdot \frac{S_{1n}}{U_{1n}^2} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{2n}^2} \cdot S_{1n} \quad (7)$$

Celková Impedance  $\hat{Z}_{k23}$  vztažená do uzlu 1 pak bude

$$\hat{z}_{k23} = r_{k23} + j \cdot x_{k23} = \frac{\Delta P_{k23}}{S_{2n}^2} \cdot S_{1n} + j \cdot \sqrt{\left( \frac{\hat{U}_{k23}}{\hat{U}_{2n}} \cdot \frac{S_{1n}}{S_{2n}} \right)^2 - \left( \frac{\Delta P_{k23}}{S_{2n}^2} \cdot S_{1n} \right)^2} \quad (8)$$

Při řešení poměrů v ES většinou zanedbáváme rezistanci transformátoru a počítáme pouze s jeho reaktancí.

$$x_{k23} \approx u_{k23} \quad (9)$$

Z Obr. 3 je dále patrné, že reaktance  $x_{T1}$  se při měření  $u_{k23}$  neuplatní a můžeme tedy napsat

$$\begin{aligned} u_{k12} &= x_{T1} + x_{T2} \\ u_{k13} &= x_{T1} + x_{T3} \\ u_{k23} &= x_{T2} + x_{T3} \end{aligned} \quad (10)$$

Což je možno upravit

$$\begin{aligned} x_{T1} &= u_{k12} - x_{T2} = u_{k12} - (u_{k23} - x_{T3}) = u_{k12} - u_{k23} + u_{k13} - x_{T1} \\ x_{T1} &= \frac{u_{k12} - u_{k23} + u_{k13}}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

Pro odvození  $x_{T2}$  a  $x_{T3}$  použijeme obdobný způsob. Všechny tři napětí nakrátko jsou nyní vztaženy do uzlu 1. V našem případě je tedy ještě přepočteme do poměrných hodnot a získáme výsledné hodnoty jako

$$\begin{aligned} x_{T1} &= \frac{u_{k12} - u_{k23} + u_{k13}}{2} \cdot \frac{U_{t1}^2}{S_{t1}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0.019 \text{ p.u} \\ x_{T2} &= \frac{u_{k12} - u_{k13} + u_{k23}}{2} \cdot \frac{U_{t1}^2}{S_{t1}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0.225 \text{ p.u} \\ x_{T3} &= \frac{-u_{k12} + u_{k13} + u_{k23}}{2} \cdot \frac{U_{t1}^2}{S_{t1}} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0.225 \text{ p.u} \end{aligned} \quad (12)$$

### 1.2.3 Vedení:

$$\begin{aligned}x_{v1} &= x_{l1} \cdot l_1 \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0.431 \text{ p.u} \\x_{v2} &= x_{l2} \cdot l_2 \cdot \frac{S_v}{U_v^2} = 0.075 \text{ p.u}\end{aligned}\quad (13)$$

## 1.3 Výpočty potřebných hodnot:

### 1.3.1 Výpočet proudu $\hat{i}_{AB}$ :

Napětí v bodě A převedeme do poměrných hodnot.

$$u_A = \frac{U_A}{U_v} = 1.015 \text{ p.u} \quad (14)$$

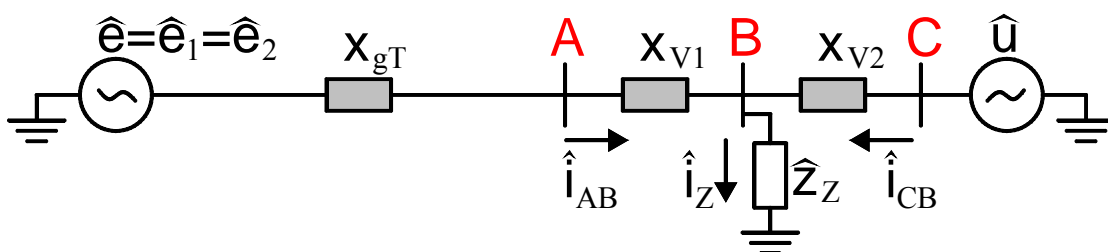
Zdánlivý výkon bude

$$\begin{aligned}p_A &= \frac{P_A}{S_v} = 0.38 \text{ p.u} \\ \varphi_A &= \arccos(\cos \varphi_A) = 40.536^\circ \\ \hat{s}_A &= \frac{p_A}{\cos \varphi_A} \cdot e^{j \cdot \varphi_A} = 0.5 \cdot e^{j \cdot 40.536^\circ} \text{ p.u}\end{aligned}\quad (15)$$

Proud  $\hat{i}_{AB}$  je pak

$$\hat{i}_{AB} = \left( \frac{\hat{s}_A}{u_A} \right)^* = 0.493 \cdot e^{-j \cdot 40.536^\circ} \text{ p.u} \quad (16)$$

### 1.3.2 Výpočet vnitřního napětí generátoru $\hat{e}$ :



Obr. 4 Náhradní schéma soustavy – po částečné úpravě

Schéma na Obr. 2 nejprve zjednodušíme na schéma na Obr. 4.

Protože  $\hat{e} = \hat{e}_1 = \hat{e}_2$ ,  $x_g = x_{g1} = x_{g2}$  a  $x_{T2} = x_{T3}$  můžeme napsat

$$x_{gT} = \frac{x_{g1} + x_{T2}}{2} + x_{T1} = 3.628 \text{ p.u} \quad (17)$$

Vnitřní napětí pak bude

$$\hat{e} = u_A + \hat{i}_{AB} \cdot j \cdot x_{gT} = 2.565 \cdot e^{j \cdot 31.965^\circ} \text{ p.u} \quad (18)$$

### 1.3.3 Výpočet napětí v bodě B (místo odběru):

$$\hat{u}_B = \hat{u}_A - \hat{i}_{AB} \cdot j \cdot x_{v1} = 0.892 \cdot e^{-j \cdot 10.432^\circ} \text{ p.u} \quad (19)$$

### 1.3.4 Výpočet proudu $\hat{i}_Z$ :

$$p_Z = \frac{P_Z}{S_v} = 0.94 \text{ p.u}$$

$$\varphi_Z = \arccos(\cos\varphi_Z) = 45.573^\circ \quad (20)$$

$$\hat{s}_Z = \frac{p_Z}{\cos\varphi_Z} \cdot e^{j\varphi_Z} = 1.343 \cdot e^{j45.573^\circ} \text{ p.u}$$

Impedanci zátěže  $\hat{z}_Z$  lze určit jako

$$\hat{s}_Z = \hat{u}_B \cdot \hat{i}_Z^* \Rightarrow \hat{i}_Z = \left( \frac{\hat{z}_Z}{\hat{u}_B} \right)^*$$

$$\hat{z}_Z = \frac{\hat{u}_B}{\hat{i}_Z} = \frac{\hat{u}_B \cdot \hat{u}_B^*}{\hat{s}_Z^*} = \frac{u_B^2}{\hat{s}_Z^*} = 0.592 \cdot e^{j45.573^\circ} \text{ p.u} \quad (21)$$

Proud  $\hat{i}_Z$  je pak

$$\hat{i}_Z = \frac{\hat{u}_B}{\hat{z}_Z} = 1.506 \cdot e^{-j56.005^\circ} \text{ p.u} \quad (22)$$

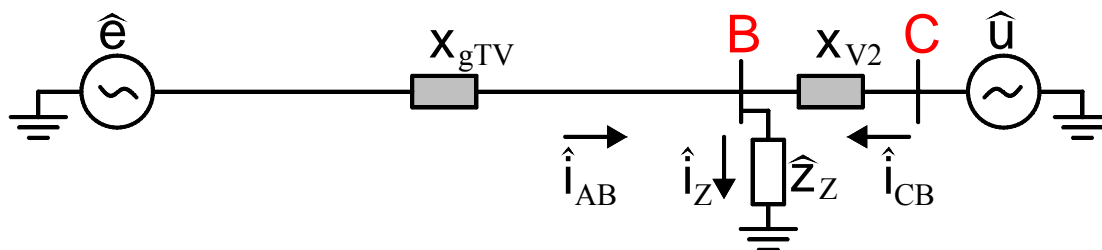
### 1.3.5 Výpočet proudu $\hat{i}_{CB}$ a napětí sítě $\hat{u}$ :

$$\hat{i}_{CB} = \hat{i}_Z - \hat{i}_{AB} = 1.039 \cdot e^{-j63.266^\circ} \text{ p.u}$$

$$\hat{u} = \hat{u}_B + \hat{i}_{CB} \cdot j \cdot x_{v2} = 0.955 \cdot e^{-j7.605^\circ} \text{ p.u} \quad (23)$$

## 1.4 Transformace hvězda - trojúhelník:

Nejprve schéma na Obr. 4 upravíme pro snazší výpočet.

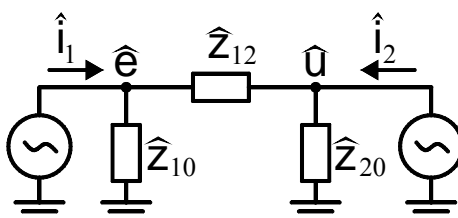


Obr. 5 Náhradní schéma soustavy – článek T

$$x_{gTV} = x_{gT} + x_{v1} = 4.059 \text{ p.u} \quad (24)$$

Vypočteme náhradní parametry  $\pi$  článku (transfigurace hvězda-trojúhelník) na Obr. 6.

$$\begin{aligned}\hat{z}_{12} &= j \cdot (x_{gTV} + x_{V2}) + \frac{j \cdot x_{gTV} \cdot j \cdot x_{V2}}{\hat{z}_Z} = 4.516 \cdot e^{j \cdot 94.572^\circ} \text{ p.u} \\ \hat{z}_{10} &= j \cdot x_{gTV} + \hat{z}_Z + \frac{j \cdot x_{gTV} \cdot \hat{z}_Z}{j \cdot x_{V2}} = 35.648 \cdot e^{j \cdot 50.145^\circ} \text{ p.u} \\ \hat{z}_{20} &= j \cdot x_{V2} + \hat{z}_Z + \frac{j \cdot x_{V2} \cdot \hat{z}_Z}{j \cdot x_{gTV}} = 0.659 \cdot e^{j \cdot 50.147^\circ} \text{ p.u}\end{aligned}\quad (25)$$

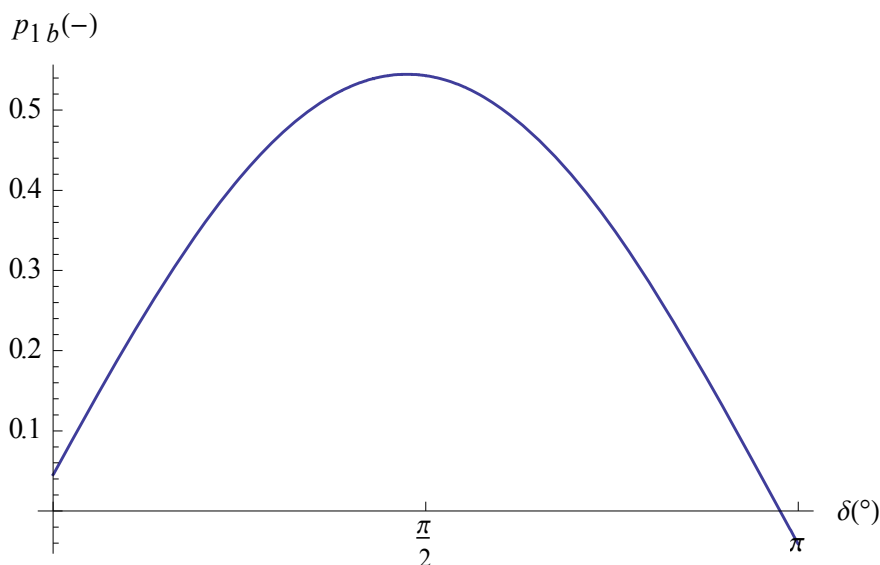


Obr. 6 Náhradní  $\pi$  článek

### 1.5 Zjištění stability soustavy:

$$\begin{aligned}\hat{s}_{1b} &= \hat{e} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\hat{z}_{12}} + \frac{1}{\hat{z}_{10}} \right) \cdot \hat{e} - \frac{1}{\hat{z}_{12}} \cdot \hat{u} \right]^* = \hat{e} \cdot \hat{i}_{AB}^* = 0.38 + j \cdot 1.206 \\ p_{1b} &= \frac{e^2}{z_{12}} \cdot \cos(\alpha_{12}) + \frac{e^2}{z_{10}} \cdot \cos(\alpha_{10}) + \frac{e \cdot u}{z_{12}} \cdot \cos \left( \alpha_{12} + \overbrace{(\delta_e - \delta_u)}^{\delta} \right) = 0.38 \text{ p.u}\end{aligned}\quad (26)$$

Z předcházejícího vyjádření lze sestavit závislost  $p_{1b}(\delta)$ .



Obr. 7 Výsledná závislost  $p_{1b}(\delta)$

Maximum této závislosti je  $\delta_{max} = 85.428^\circ$ . Platí

$$\delta = \delta_e - \delta_u = 31.965 - (-7.605) = 39.570 \quad (27)$$

Jelikož  $\delta_{max} > \delta$ , je systém staticky stabilní.