

## Cvičení číslo 1

**Pojmy:**

- **Elektrizační soustava** - soubor zařízení pro výrobu, přenos a spotřebu elektrické energie. Může být provozována samostatně nebo jako část propojené elektrizační soustavy.
- **Elektrická síť** - souhrn vedení a stanic téhož napětí galvanicky propojených, sloužících pro přenos a rozvod elektrické energie.
- **Nadřazená síť** - část elektrizační soustavy, která má z hlediska provozu větší důležitost než ostatní části, které napájí a jsou zpravidla nižšího napětí.
- **Přenosová síť** - část elektrizační soustavy, tvořící přenosovou cestu pro napájení velkých stanic nebo uzlů.
- **Rozvodná (distribuční) síť** - část elektrizační soustavy sloužící pro dodávku elektrické energie odběratelům.
- **Instalovaný příkon** - součet všech jmenovitých příkonů připojených nebo připojitelných spotřebičů.
- **Instalovaný výkon** - součet všech jmenovitých výkonů výrobních jednotek připojených nebo připojitelných do elektrizační soustavy.
- **Pohotový výkon** - je součet všech jmenovitých výkonů provozuschopných výrobních jednotek (instalovaný výkon snížený o výkon jednotek mimo provoz).
- **Diagram zatížení** - znázorňuje průběh výkonu (příkonu) v závislosti na čase (roční, měsíční, týdenní, denní). Množství spotřebované energie je úměrné ploše diagramu.

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt$$

- **Maximální zatížení** - je maximální příkon odebíraný nepřetržitě po dobu 15min za sledované období (maxiprint nebo elektroměr s ukazatelem maxima).
- **Střední zatížení** - je průměrný příkon ve sledovaném období, kterým bychom odebrali stejné množství energie

$$P_{STR} = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{T}$$

- **Minimální zatížení** - analogicky s max. zatížením.
- **Základní zatížení** - oblast diagramu pod minimálním zatížením.

➤ **Pološpičkové zatížení**-oblast diagramu nad středním zatížením.

➤ **Doba využití maxima**- je čas, za který bychom při odebíraném  $P_{\max}$  odebrali energii jako při časově proměnném odběru v daném období

$$P_{\max} \cdot \tau = \int_0^T P(t) \cdot dt \rightarrow \tau = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{P_{\max}} \leq T$$

➤ **Doba plných ztrát**- je čas, za který maximální odebíraný proud způsobí stejné ztráty jako časově proměnný proud ve sledovaném období

$$R \cdot I_{\max}^2 \cdot \tau_z = \int_0^T R \cdot I^2(t) \cdot dt \rightarrow \tau_z = \frac{\int_0^T I(t)^2 \cdot dt}{I_{\max}^2} = \frac{\int_0^T P(t)^2 \cdot dt}{P_{\max}^2}$$

➤ **Náročnost  $\beta$** -je poměr max. příkonu k instalovanému příkonu

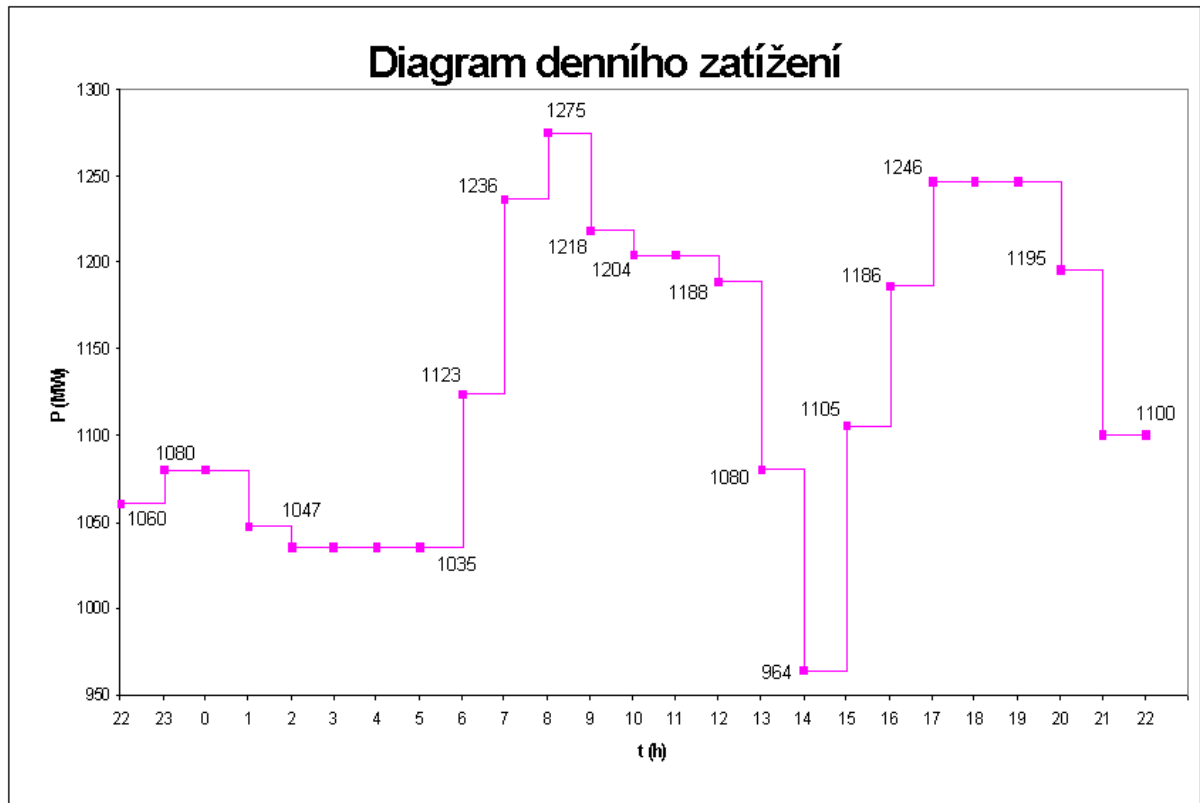
$$\beta = \frac{P_{\max}}{P_i} < 1$$

➤ **Soudobost  $\delta$** - ukazuje vliv nesoudobosti maxima různých připojených zařízení. Výsledné maximum je menší než součet maxima jednotlivých zařízení

$$P_{C \max} = \delta \cdot \sum_1^n P_{n \max} \quad \delta < 1$$

**PI:** Určete ze zadaného průběhu denního zatížení (viz Obr.) spotřebovanou elektrickou energii, maximální, střední a minimální zatížení, dobu využití maxima a dobu plných ztrát.

**Obr. Zprůměrovaný diagram denního odběru výkonu**



– **Spotřebovaná elektrická energie**

$$W = \int_0^T P(t) \cdot dt = \sum_{i=1}^{24} P_i \cdot t_i$$

$$= 1060 \cdot 1 + 1080 \cdot 2 + 1047 \cdot 1 + 1035 \cdot 4 + 1123 \cdot 1 + 1236 \cdot 1 + 1275 \cdot 1 + 1218 \cdot 1 + 1204 \cdot 2 + 1188 \cdot 1 + 1080 \cdot 1 + 964 \cdot 1 + 1105 \cdot 1 + 1186 \cdot 1 + 1246 \cdot 3 + 1195 \cdot 1 + 1100 \cdot 1 = \underline{\underline{27\,223\,MWh}}$$

– **Střední zatížení**

$$P_{STR} = \frac{W}{T} = \frac{27\,223}{24} = \underline{\underline{1134,3\,MW}}$$

– **Minimální zatížení .....  $P_{\min} = 964\,MW$**

– **Maximální zatížení.....  $P_{\max} = 1\,275\,MW$**

– **Doba využití maxima**

$$\tau = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{27\,223}{1\,275} = 21,35 \text{ hod} \rightarrow \underline{\underline{21 \text{ hod } 21 \text{ min}}}$$

– **Doba plných ztrát**

$$\tau_z = \frac{\int_0^T P(t)^2 \cdot dt}{P_{\max}^2} = \frac{\sum_1^{24} P_i^2 \cdot t_i}{P_{\max}^2} = \frac{1060^2 \cdot 1 + 1080^2 \cdot 2 + 1047^2 \cdot 1 + \dots}{1275^2} = \underline{\underline{19,1 \text{ hod}}}$$

## Cvičení číslo 2

### Parametry vedení - Indukčnost

**P:** Teplota venkovního vedení kolísá mezi  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+35^{\circ}\text{C}$ . O kolik procent je při  $+35^{\circ}\text{C}$  větší odpor než při  $-20^{\circ}\text{C}$ ?  $\alpha = 3,87 \cdot 10^{-3}$ .

$$\frac{R_{35}}{R_{-20}} = \frac{R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)}{R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t')} = \frac{1 + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot (35 - 20)}{1 + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot (-20 - 20)} = \underline{\underline{1,25}}$$

Při teplotě  $35^{\circ}\text{C}$  je odpor o 25% větší než při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ .

**PI:** Určete induktivní reaktanci jedné fáze trojfázového vedení o průměru vodičů 7,5 mm v naznačeném uspořádání.

Střední indukčnost a střední vzdálenost vodičů:

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

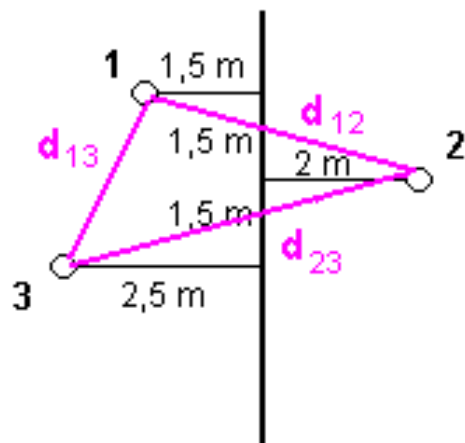
$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}$$

$$d_{12} = \sqrt{3,5^2 + 1,5^2} = \underline{\underline{3,807 \text{ m}}}$$

$$d_{13} = \sqrt{3^2 + 1^2} = \underline{\underline{3,162 \text{ m}}}$$

$$d_{23} = \sqrt{4,5^2 + 1,5^2} = \underline{\underline{4,743 \text{ m}}}$$

$$d_s = \sqrt[3]{3,807 \cdot 3,162 \cdot 4,743} = \underline{\underline{3,851 \text{ m}}}$$



Indukčnosti jednotlivých fází:

$$L_1 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{3,807 \cdot 3,162}}{7,5 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = \underline{\underline{1,414 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$L_2 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{21} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{3,807 \cdot 4,743}}{7,5 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = \underline{\underline{1,455 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$L_3 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{32}}}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{3,162 \cdot 4,743}}{7,5 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = \underline{\underline{1,43 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Výsledná střední indukčnost:

$$L = \frac{1}{3} \cdot (L_1 + L_2 + L_3) = \frac{1}{3} \cdot (1,414 + 1,455 + 1,43) = \underline{\underline{1,43 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

nebo

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{3,851}{\frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{2}} + 0,05 = \underline{\underline{1,43 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Induktivní reaktance:

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,43 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,449 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}}}$$

**P2:** Určete indukčnosti vodičů a střední indukčnost dvojitého třífázového vedení 110 kV podle uspořádání dle obr. S vodiči AlFe 4 95 mm<sup>2</sup> s průměrem lana 14 mm.

Indukčnosti fází:

$$L_1 = L_4 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{15} \cdot d_{16}}}{r \cdot d_{14}} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

$$L_2 = L_5 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{d_{21} \cdot d_{23} \cdot d_{24} \cdot d_{26}}}{r \cdot d_{25}} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

$$L_3 = L_6 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{d_{32} \cdot d_{31} \cdot d_{35} \cdot d_{34}}}{r \cdot d_{36}} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

Střední indukčnost:

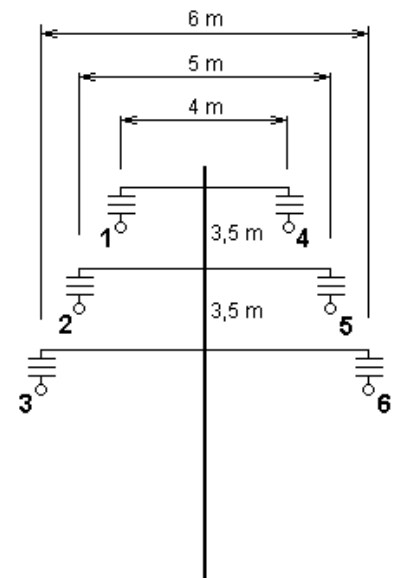
$$L_k = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 L_i \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

nebo

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

Střední vzdálenost vodičů:

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}}$$



$$d_{12} = 3,53 \text{ m} \quad d_{13} = 7,07 \text{ m} \quad d_{23} = d_{12}$$

$$d_{15} = 5,7 \text{ m} \quad d_{16} = 8,6 \text{ m} \quad d_{26} = 6,52 \text{ m}$$

Indukčnosti jednotlivých fází:

$$L_1 = L_4 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{3,53 \cdot 7,07 \cdot 5,7 \cdot 8,6}}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 4} + 0,05 = \underline{\underline{1,474 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$L_2 = L_5 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{3,53 \cdot 5,7 \cdot 3,53 \cdot 6,52}}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 5} + 0,05 = \underline{\underline{1,33 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$L_3 = L_6 = 0,46 \cdot \log \cdot \frac{\sqrt{3,53 \cdot 7,07 \cdot 6,52 \cdot 8,6}}{7 \cdot 10^{-3} \cdot 6} + 0,05 = \underline{\underline{1,41 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Střední indukčnost:

$$L_k = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 L_i = \frac{1}{3} \cdot (1,474 + 1,33 + 1,41) = \underline{\underline{1,405 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

Podle druhého způsobu:

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}} = \frac{\sqrt[3]{3,53 \cdot 7,07 \cdot 3,53} \cdot \sqrt[3]{5,7 \cdot 8,6 \cdot 6,52}}{\sqrt[3]{4 \cdot 5 \cdot 6}} = \underline{\underline{6,17 \text{ m}}}$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 = 0,46 \cdot \log \frac{6,17}{7 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = \underline{\underline{1,405 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

**P3:** Vypočítejte indukčnost a induktivní reaktanci jednoduchého vedení 400 kV AlFe 4 350 mm<sup>2</sup>, dlouhého 300 km, vodiče fáze jsou uspořádány v symetrickém trojsvazku se vzdáleností vodičů  $a = 350 \text{ mm}$ . Uspořádání vodičů je z stožáru.

Průměr vodiče AlFe 4 350 mm<sup>2</sup> je 27,2 mm.

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

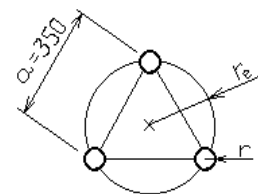
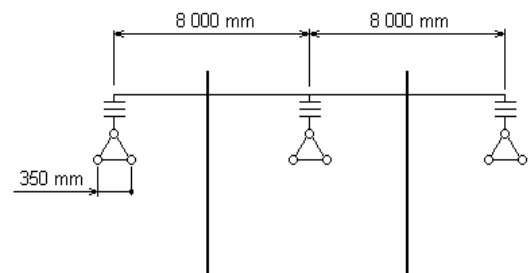
$$d_s = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 16} = \underline{\underline{10,079 \text{ m}}}$$

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{27,2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,35^2} = \underline{\underline{0,11855 \text{ m}}}$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{10,079}{0,11855} + \frac{0,05}{3} = \underline{\underline{0,904 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$X_{Lk} = \omega \cdot L_k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,904 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,284 \Omega \cdot \text{km}^{-1}}}$$



$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot a^{(n-1)}} \quad n - \text{počet vodičů ve svazku}$$

Induktivní reaktance:

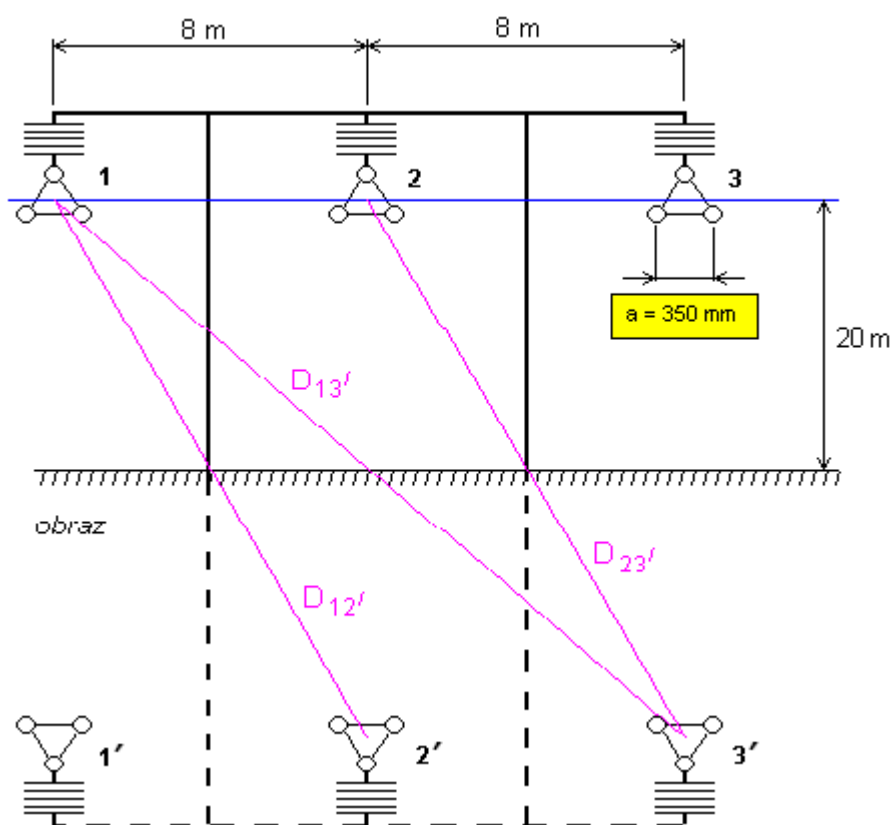
$$X_L = X_{Lk} \cdot \ell = 0,284 \cdot 300 = \underline{\underline{85,2 \, \Omega}} \quad \text{pak} \quad L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{85,2}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{0,271 \, H}}$$





Kapacita vedení  $C_K$ :

$$C_K = \frac{0,0242}{\log \left( \frac{3,85}{\frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{2}} \cdot \frac{2 \cdot 17,46}{35,15} \right)} = \underline{\underline{8,044 \cdot 10^{-3} \mu F / km}}$$



**P:** Určete kapacitu vodiče a nabíjecí proud vedení **400 kV** AlFe 4 s délkou **300 km**. Průměr vodiče je **27,2 mm**. Výška vodičů nad zemí je **20 m**.

$n$  .... počet vodičů ve svazku

Poloměr ekvivalentního vodiče:  $r_e = \sqrt[n]{r \cdot a^{(n-1)}} = \sqrt[3]{\frac{27,2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,35^2} = 0,11855 \text{ m}$

Střední vzdálenost vodičů od sebe:  $d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 16} = 10,079 \text{ m}$

Střední vzdálenost vodičů od země:  $m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{20 \cdot 20 \cdot 20} = 20 \text{ m}$

Střední vzdálenost od obrazu:  $D_s = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{13'} \cdot D_{23'}} = \sqrt[3]{40,8 \cdot 40,8 \cdot 43,1} = 41,547 \text{ m}$

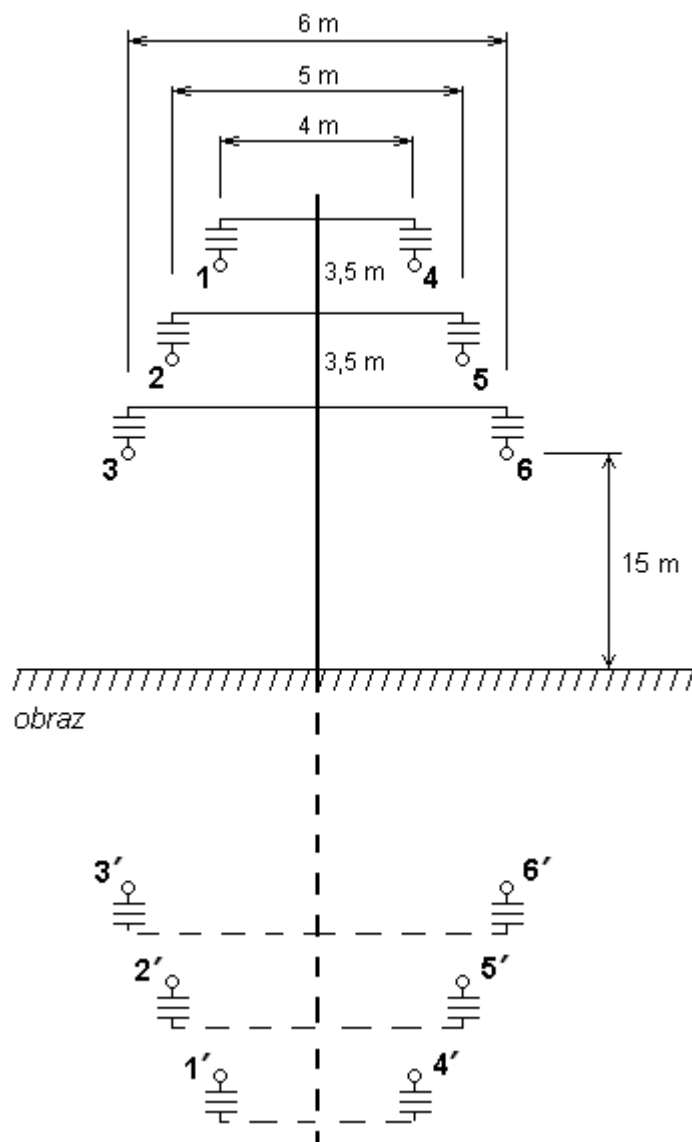
Kapacita vedení: 
$$C_K = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s}{r} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_s}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{10,079}{0,11855} \cdot \frac{2 \cdot 20}{41,547}\right)} = 12,65 \cdot 10^{-3} \mu F / km$$

Reaktance vedení  $X_C$ , kde  $C = C_K \cdot \ell = 12,65 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 3,795 \mu F$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,795 \cdot 10^{-6}} = 838,76 \Omega$$

Nabíjecí proud: 
$$I_{nab} = \frac{U_f}{X_C} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 838,76} = 275,3 A$$

**P:** Určete kapacitu vodiče, nabíjecí proud a nabíjecí výkon vedení **110 kV**, je-li výška spodního vodiče **15 m** nad zemí, délka vedení **80 km**. Poloměr vodiče je  $r = 7 \cdot 10^{-3} m$ . Uspořádání na stožáru dvojitého vedení viz. obrázek níže:



$$C_K = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s}{r} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_s}\right)} \quad (\mu F / km)$$

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}}$$

$$\begin{array}{ll} d_{12} = 3,53 \text{ m} & d_{15} = 5,7 \text{ m} \\ d_{13} = 7,07 \text{ m} & d_{16} = 8,6 \text{ m} \\ d_{23} = d_{12} & d_{26} = 6,52 \text{ m} \end{array}$$

$$d_s = 6,17 \text{ m}$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{13'} \cdot D_{23'}}$$

$$D_{12'} = 40,5 \text{ m}$$

$$D_{13'} = 37 \text{ m}$$

$$D_{23'} = 33,5 \text{ m}$$

$$D_s = 36,9 \text{ m}$$

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{15 \cdot 18,5 \cdot 22} = 18,3 \text{ m}$$

Kapacita vedení: 
$$C_K = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s}{r} \cdot \frac{2 \cdot m}{D_s}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{6,17}{7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 18,3}{36,9}\right)} = 8,22 \cdot 10^{-3} \mu F / km$$

Reaktance vedení  $X_C$ , kde  $C = C_K \cdot \ell = 8,22 \cdot 10^{-3} \cdot 80 = 0,6576 \mu F$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,6576 \cdot 10^{-6}} = 4840,48 \Omega$$

Nabíjecí proud: 
$$I_{nab} = \frac{U_f}{X_C} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4840,48} = 13,12 A$$

Nabíjecí výkon 3f. vedení  $Q_{nab}$ : 
$$Q_{nab} = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_{nab} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3 \cdot 13,12 = 2,5 MVar$$

## Cvičení číslo 4

### Určení průřezu

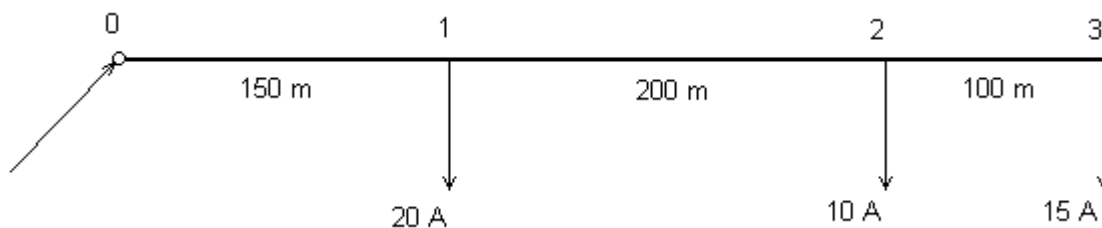
**P:** Navrhněte průřez vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil **5%**. Jmenovité napětí  $U_n = 220 \text{ V}$  **stejnoseměrných**.

Pro průřezy navržené podle metod:

- Konstantní průřez celého vedení
- Konstantní proudové hustoty
- Minima váhy vodivého materiálu vedení

Určete ztráty, váhu vedení a úbytky napětí v místech zátěží a v tabulce proveďte porovnání jednotlivých metod.

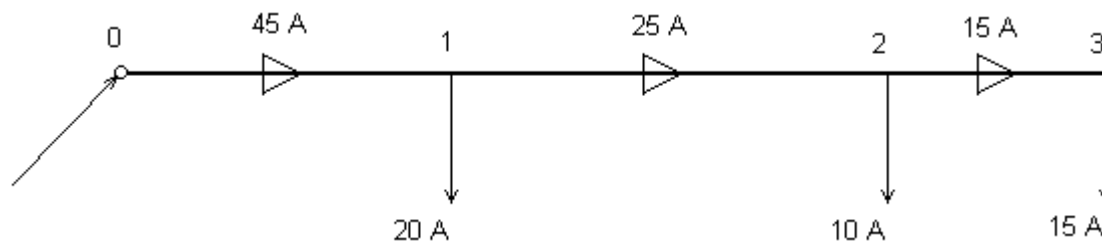
(hliník – Al:  $\rho = \frac{1}{33} \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ , měrná hmotnost  $\gamma = 2,7 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ )



#### a) Konstantní průřez celého vedení

maximální úbytek napětí na vedení:  $\Delta U_{\max} = \frac{\Delta u_{\max}}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 220 = 11 \text{ V}$

Rozložení proudů v jednotlivých úsecích vedení:



Stejnoseměrné vedení  $\Rightarrow \Delta U = 2 \cdot R \cdot I = 2 \cdot \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot I$

$$\Delta U = 2 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum \ell \cdot I$$

⇒ Průřez vedení:

$$S = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I$$

Kde  $\sum \ell \cdot I$  je proudový moment =  $\ell_{01} \cdot I_{01} + \ell_{12} \cdot I_{12} + \ell_{23} \cdot I_{23}$

$$\sum \ell \cdot I = 150 \cdot 45 + 200 \cdot 25 + 100 \cdot 15 = 13\,250 \quad A \cdot m$$

Průřez vedení

$$S = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2}{33 \cdot 11} \cdot 13\,250 = 73 \, mm^2 \approx 95 \, mm^2$$

Normalizovaná řada průřezů

**2,5 4 6 10 16 25 35 50 70 95 120 150 185 210 240 300 350 mm<sup>2</sup>**

Úbytky napětí v jednotlivých úsecích. Hodnoty v závorkách jsou hodnoty vypočtené pro normalizovaný průřez vedení – 95 mm<sup>2</sup>.

$$\Delta U_{01} = \frac{2 \cdot \rho}{S} \cdot I_1 \cdot \ell_1 = \frac{2}{33 \cdot 73} \cdot 45 \cdot 150 = 5,6 \, V \quad (4,3 \, V)$$

Pro porovnání metod dosadíme S vypočtené, ne z normalizované řady.

$$\Delta U_{02} = \frac{2}{33 \cdot 73} \cdot 25 \cdot 200 = 4,15 \, V \quad (3,2 \, V)$$

$$\Delta U_{03} = \frac{2}{33 \cdot 73} \cdot 15 \cdot 100 = 1,25 \, V \quad (0,96 \, V)$$

$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 \Delta U_{0i} = 5,6 + 4,15 + 1,25 = 11 \, V \quad (8,46 \, V)$$

Ztráty výkonu na vedení

$$\Delta P = 2 \cdot R \cdot I^2 = 2 \cdot \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot I^2 = \frac{2 \cdot \rho}{S} \cdot \sum \ell \cdot I^2$$

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \rho}{S} \cdot \sum \ell \cdot I^2 = \frac{2}{33 \cdot 73} \cdot (150 \cdot 45^2 + 200 \cdot 25^2 + 100 \cdot 15^2) = 374,6 \, W$$

Dodávaný výkon ze zdroje

$$P_0 = U_0 \cdot I_1 = 220 \cdot 45 = 9900 \, W$$

Procentní ztráty výkonu

$$\Delta p = \frac{\Delta P}{P_0} \cdot 100 = \frac{374,6}{9900} \cdot 100 = 3,784 \, \%$$

Celková váha vedení

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot S \cdot \ell \cdot 10^{-3} \quad (kg; kg \cdot dm^{-3}; mm^2; m)$$

$$\text{pro Al: } \gamma = 2,7 \text{ kg} \cdot dm^{-3}$$

$$Q = 2 \cdot 2,7 \cdot 73 \cdot 450 \cdot 10^{-3} = 177,4 \text{ kg}$$

### **b) Metoda proudové hustoty**

Proudová hustota

$$\sigma = \frac{I}{S} = \text{konst.}$$

$$\sigma = \frac{I}{S} = \frac{\Delta U}{2 \cdot R \cdot S} = \frac{\Delta U}{2 \cdot \rho \cdot \ell} = \frac{11 \cdot 33}{2 \cdot 450} = 0,4033 \text{ A} \cdot mm^{-2}$$

Průřezy jednotlivých úseků

$$0 - 1 \quad S_1 = \frac{I_1}{\sigma} = \frac{45}{0,4033} = 111,6 \text{ mm}^2 \Rightarrow 120 \text{ mm}^2$$

$$1 - 2 \quad S_2 = \frac{I_2}{\sigma} = \frac{25}{0,4033} = 62 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$2 - 3 \quad S_3 = \frac{I_3}{\sigma} = \frac{15}{0,4033} = 37,2 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

Je menší jelikož jsme zvolili větší průřez u předchozích dvou větví => ekonomické náklady a podmínka  $\Delta u = 5 \%$  je splněna.

Úbytky napětí

Hodnoty v závorkách jsou hodnoty vypočtené pro normalizované průřezy vedení.

$$\Delta U_{01} = \frac{2 \cdot \rho}{S_1} \cdot I_1 \cdot \ell_1 = \frac{2}{33 \cdot 111,6} \cdot 45 \cdot 150 = 3,66 \text{ V} \quad (3,4 \text{ V})$$

$$\Delta U_{02} = \frac{2 \cdot \rho}{S_2} \cdot I_2 \cdot \ell_2 = \frac{2}{33 \cdot 62} \cdot 25 \cdot 200 = 4,89 \text{ V} \quad (4,33 \text{ V})$$

$$\Delta U_{03} = \frac{2 \cdot \rho}{S_3} \cdot I_3 \cdot \ell_3 = \frac{2}{33 \cdot 37,2} \cdot 15 \cdot 100 = 2,45 \text{ V} \quad (2,6 \text{ V})$$

$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 \Delta U_{0i} = 3,66 + 4,89 + 2,45 = 11 \text{ V} \quad (10,33 \text{ V})$$

Ztráty na vedení

$$\Delta P = 2 \cdot \rho \cdot \sigma \cdot \sum \ell_i \cdot I_i = 2 \cdot \rho \cdot \sum \frac{\ell_i \cdot I_i^2}{S_i}$$

$$\Delta P = \frac{2}{33} \cdot \sum \left( \frac{150 \cdot 45^2}{111,6} + \frac{200 \cdot 25^2}{62} + \frac{100 \cdot 15^2}{37,2} \right) = 324 \text{ W}$$

Váha vedení

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot 10^{-3} \cdot \sum \ell_i \cdot S_i = 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot (150 \cdot 111,6 + 200 \cdot 62 + 100 \cdot 37,2) = 177,44 \text{ kg}$$

### **c) Minimum váhy vodivého materiálu vedení**

$$S_x = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_x}$$

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum_1^n (\ell_x \cdot \sqrt{I_x}) \quad (\text{mm}^2 \cdot \text{A}^{-\frac{1}{2}}; \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}; \text{V}; \text{m}; \text{A})$$

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2}{33 \cdot 11} \cdot 2 \cdot (150\sqrt{45} + 200\sqrt{25} + 100\sqrt{15}) = 13,187 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-\frac{1}{2}}$$

Průřezy jednotlivých úseků

$$0 - 1 \quad S_1 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_1} = 13,187 \cdot \sqrt{45} = 88,46 \text{ mm}^2 \Rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$1 - 2 \quad S_2 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_2} = 13,187 \cdot \sqrt{25} = 65,9 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$2 - 3 \quad S_3 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_3} = 13,187 \cdot \sqrt{15} = 51,07 \text{ mm}^2 \Rightarrow 50 \text{ mm}^2$$

Úbytky napětí na jednotlivých úsecích

$$0 - 1 \quad \Delta U_{01} = 2 \cdot \frac{\rho}{S_1} \cdot \ell_1 \cdot I_1 = \frac{2}{33 \cdot 88,46} \cdot 150 \cdot 45 = 4,62 \text{ V} \quad (4,3 \text{ V})$$

$$1 - 2 \quad \Delta U_{02} = 2 \cdot \frac{\rho}{S_2} \cdot \ell_2 \cdot I_2 = \frac{2}{33 \cdot 65,9} \cdot 200 \cdot 25 = 4,6 \text{ V} \quad (4,33 \text{ V})$$

$$2 - 3 \quad \Delta U_{03} = 2 \cdot \frac{\rho}{S_3} \cdot \ell_3 \cdot I_3 = \frac{2}{33 \cdot 51,07} \cdot 100 \cdot 15 = 1,78 \text{ V} \quad (1,82 \text{ V})$$

$$\Delta U = \sum_{i=1}^3 \Delta U_{0i} = 4,62 + 4,6 + 1,78 = 11 \text{ V} \quad (10,45 \text{ V})$$

Ztráty výkonu

$$\Delta P = 2 \cdot \rho \cdot \sum \frac{\ell_i \cdot I_i^2}{S_i} = \frac{2}{33} \cdot \left( \frac{150 \cdot 45^2}{88,46} + \frac{200 \cdot 25^2}{65,9} + \frac{100 \cdot 15^2}{51,07} \right) = 349,77 \text{ W}$$

Celková hmotnost vedení

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot 10^{-3} \cdot \sum \ell_i \cdot S_i = 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot (150 \cdot 88,46 + 200 \cdot 65,9 + 100 \cdot 51,07) = 170,4 \text{ kg}$$

### **Srovnání metod**

	$\Delta U$ (V)	$\Delta P$ (W)	Q (kg)
S = konst.	11	374,6	177,4
$\sigma$ = konst.	11	324	177,44
Q = konst.	11	349,8	170,4

Ačkoliv je metoda S = konst. nejhorší, právě tato metoda se v praxi používá.

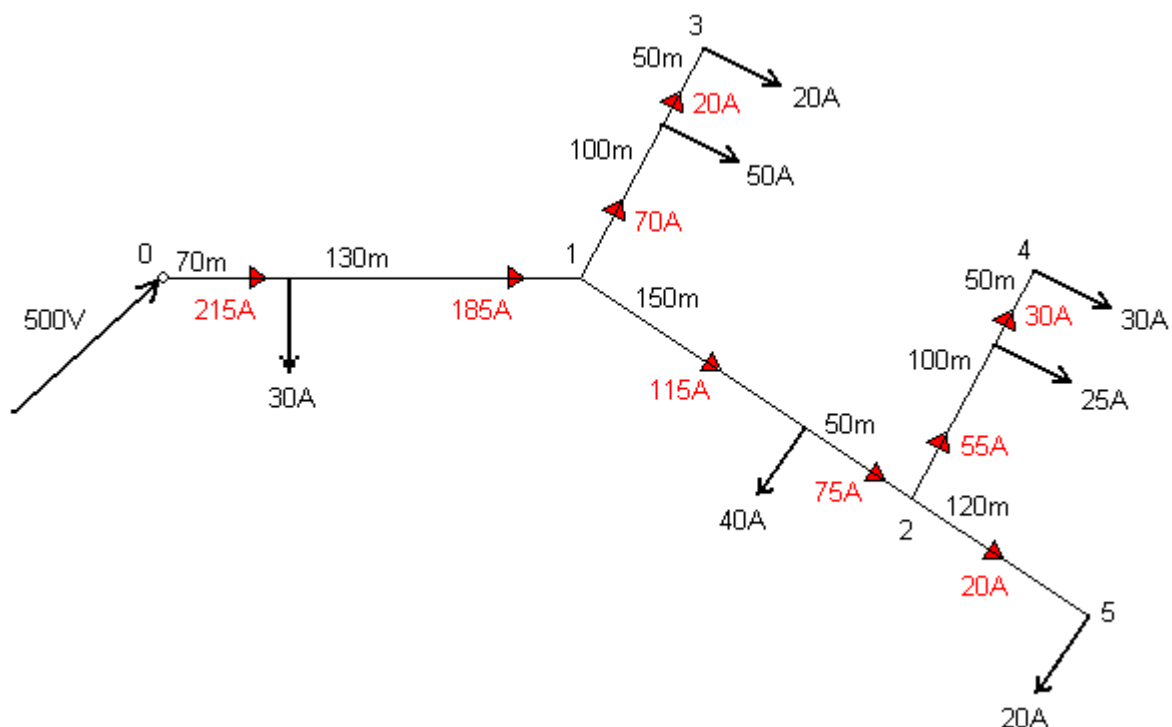


## Cvičení číslo 5

### Stejnoseměrné sítě - napájení z 1 strany, ze 2 stran

**P:** Stanovte průřezy naznačeného vedení pomocí metody hlavního vedení. Napětí je **500 V ss**, dovolený úbytek napětí  $\Delta u = 8 \%$ , materiál je hliník:  $\rho_{Al} = 1/33 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .

a) Určení úsekových proudů:



b) Určení hlavního vedení:

$$\Delta u = \frac{2 \cdot \rho}{S} \cdot \sum \ell \cdot I$$

$$\Delta u \cong \sum \ell \cdot I$$

$$\left( \sum \ell \cdot I \right)_{25} = 20 \cdot 120 = 2400 \quad A \cdot m$$

$$\left( \sum \ell \cdot I \right)_{24} = 100 \cdot 25 + 150 \cdot 30 = 7000 \quad A \cdot m$$

$$\left( \sum \ell \cdot I \right)_{13} = 100 \cdot 50 + 150 \cdot 20 = 8000 \quad A \cdot m$$

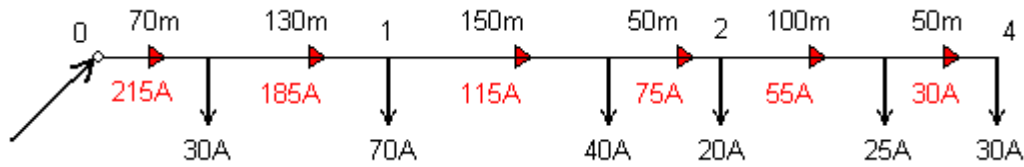
$$\left( \sum \ell \cdot I \right)_{124} = 115 \cdot 150 + 75 \cdot 50 + 55 \cdot 100 + 30 \cdot 50 = 28000 \quad A \cdot m$$

$$\left( \sum \ell \cdot I \right)_{124} > \left( \sum \ell \cdot I \right)_{13}$$

Hlavní vedení je: 0 – 1 – 2 – 4, vedení 1 – 3, 2 – 5 jsou vedlejší vedení.

c) Určení průřezu hlavního vedení:

$$\Delta u = \frac{2 \cdot \rho}{S} \cdot \sum (\ell \cdot I) \cdot \frac{100}{U_N} \quad (\%)$$



Metody:

$$\text{Adice: } \sum \ell \cdot I = 215 \cdot 70 + 185 \cdot 130 + 115 \cdot 150 + 75 \cdot 50 + 55 \cdot 100 + 30 \cdot 50 = 67100 \text{ A} \cdot \text{m}$$

$$\text{Superpozice: } \sum \ell \cdot I = 30 \cdot 70 + 70 \cdot 200 + 40 \cdot 350 + 20 \cdot 400 + 25 \cdot 500 + 30 \cdot 550 = 67100 \text{ A} \cdot \text{m}$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{\Delta u \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{8 \cdot 500 \cdot 33} \cdot 67100 = 101,65 \text{ mm}^2$$

Volíme nejbližší vyšší normalizovaný průřez:  $120 \text{ mm}^2$ .

d) Dimenzování odboček:

$$\Delta u_{01} = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{S \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{120 \cdot 500 \cdot 33} \cdot (215 \cdot 70 + 185 \cdot 130) = 3,949 \%$$

$$\Delta u_{13} = \Delta u - \Delta u_{01} = 8 - 3,949 = 4,051 \% \approx 20,255 \text{ V}$$

$$S_{13} = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{\Delta u_{13} \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{4,051 \cdot 500 \cdot 33} \cdot (70 \cdot 100 + 20 \cdot 50) = 23,9 \approx 25 \text{ mm}^2$$

$$\Delta u_{12} = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{S \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{120 \cdot 500 \cdot 33} \cdot (115 \cdot 150 + 75 \cdot 50) = 2,12 \%$$

$$\Delta u_{012} = \Delta u_{01} + \Delta u_{12} = 3,949 + 2,12 = 6,069 \%$$

$$\Delta u_{25} = \Delta u - \Delta u_{012} = 8 - 6,069 = 1,931 \%$$

$$S_{25} = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{\Delta u_{25} \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{1,931 \cdot 500 \cdot 33} \cdot (20 \cdot 120) = 15,07 \approx 16 \text{ mm}^2$$

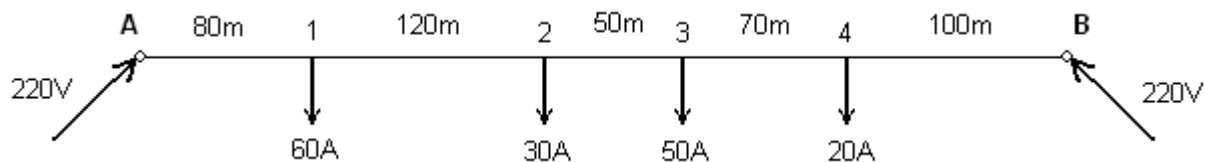
Kontrola průřezu v části vedení 2 – 4:

$$\Delta u_{24} = \Delta u_{25} = 1,931 \%$$

$$S_{24} = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{\Delta u_{24} \cdot U_0} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{1,931 \cdot 500 \cdot 33} \cdot (55 \cdot 100 + 30 \cdot 50) = 43,96 \approx 50 \text{ mm}^2$$

V části vedení 2 – 4 je možno snížit průřez na  $50 \text{ mm}^2$ .

**P:** Navrhněte průřez ss vedení. Nejnižší dovolené napětí v síti je **209 V**, materiál vedení je měď  $\rho_{\text{Cu}} = 1/57 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ . Napětí napáječů jsou stejná.



Za předpokladu **S = konst.** Určíme napájecí proudy z rovnosti proudových momentů.

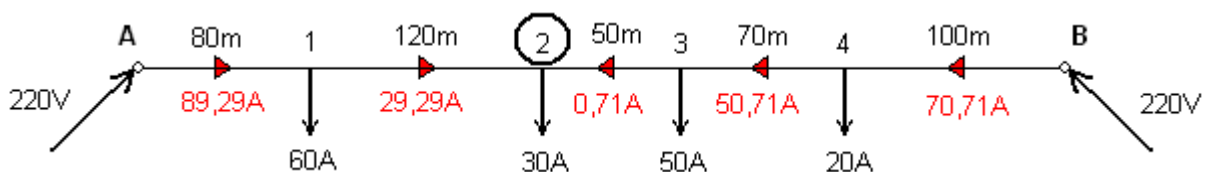
$$I_A \cdot L = \sum_B \ell \cdot I$$

$$I_A + I_B = \sum i$$

$$I_B \cdot L = \sum_A \ell \cdot I$$

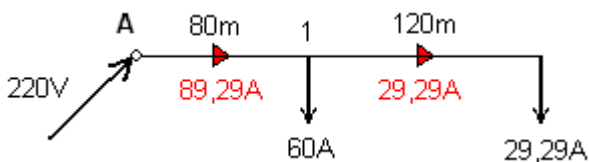
$$I_A = \frac{1}{420} \cdot (100 \cdot 20 + 170 \cdot 50 + 220 \cdot 30 + 340 \cdot 60) = 89,29 \text{ A}$$

$$I_B = 160 - 89,29 = 70,71 \text{ A}$$



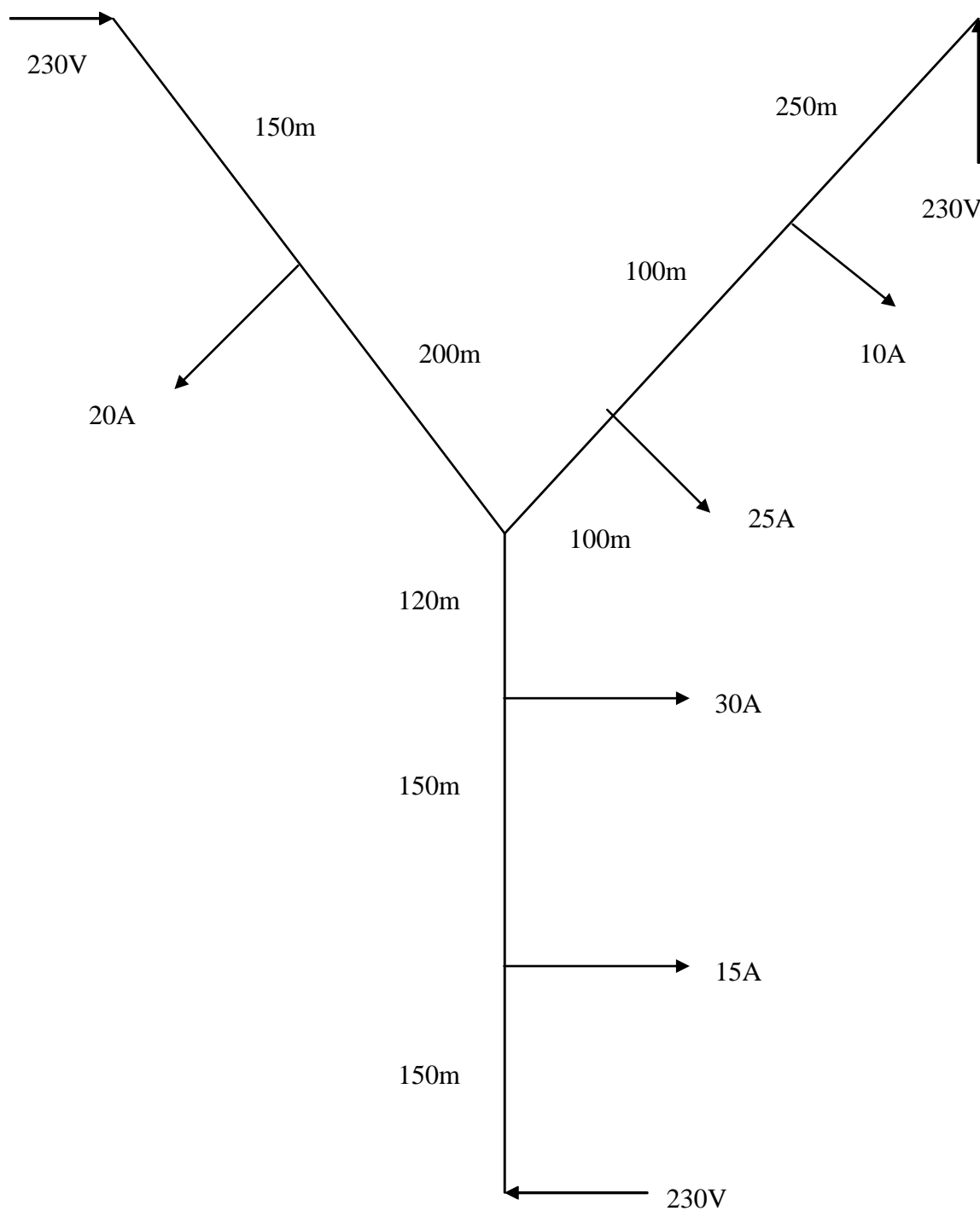
V místě maximálního úbytku napětí (odběr napájený z obou stran), vedení rozdělíme na dvě části napájené z jedné strany a dimenzujeme podle libovolné z nich.

„Pro snazší výpočet volíme stranu s nižším počtem odběrů“.



$$S = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2}{11 \cdot 57} \cdot (80 \cdot 89,29 + 120 \cdot 29,29) = 33,99 \approx 35 \text{ mm}^2$$

Př. Určete průřez naznačeného vedení napájeného ze tří stran. Průřez vypočítejte tak, aby maximální úbytek nepřekročil 5%  $U_n$ . Napáječe mají stejná napětí 230V ss, materiál vodiče je měď  $\rho = 1/57 \Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$ .



$$I'_A \cdot L_{AD} - \sum_{DA} \ell \cdot I = I'_B \cdot L_{BD} - \sum_{DB} \ell \cdot I = I'_C \cdot L_{CD} - \sum_{DC} \ell \cdot I$$

$$I'_A + I'_B + I'_C = \sum I_X$$

Dosazení:

$$\sum I_X = I'_A + I'_B + I'_C = 20 + 10 + 25 + 30 + 15 = 100 \text{ A}$$

$$20 \cdot 200 - I'_A \cdot 350 = 25 \cdot 100 + 10 \cdot 200 - I'_B \cdot 450$$

$$20 \cdot 200 - I'_A \cdot 350 = 30 \cdot 120 + 15 \cdot 270 - I'_C \cdot 420$$

Řešení:  $I'_A = \underline{\underline{34,54 \text{ A}}}$   $I'_B = \underline{\underline{27,98 \text{ A}}}$   $I'_C = \underline{\underline{37,48 \text{ A}}}$

2. Způsob řešení předešlého příkladu pomocí redukovaných proudů:

$$I_{rDA} = \frac{\sum_A \ell \cdot I}{L_A} = \frac{20 \cdot 150}{350} = \underline{\underline{8,57 \text{ A}}}$$

$$I_{rDB} = \frac{\sum_B \ell \cdot I}{L_B} = \frac{250 \cdot 10 + 350 \cdot 25}{450} = \underline{\underline{25 \text{ A}}}$$

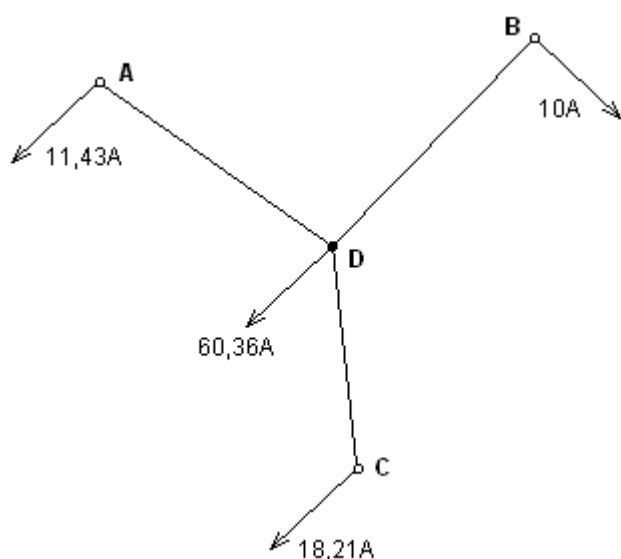
$$I_{rDC} = \frac{\sum_C \ell \cdot I}{L_C} = \frac{150 \cdot 15 + 300 \cdot 30}{420} = \underline{\underline{26,79 \text{ A}}}$$

$$I_{rAD} = \frac{\sum_D \ell \cdot I}{L_A} = \frac{200 \cdot 20}{350} = \underline{\underline{11,43 \text{ A}}}$$

$$I_{rBD} = \frac{\sum_D \ell \cdot I}{L_B} = \frac{100 \cdot 25 + 200 \cdot 10}{450} = \underline{\underline{10 \text{ A}}}$$

$$I_{rCD} = \frac{\sum_D \ell \cdot I}{L_C} = \frac{120 \cdot 30 + 270 \cdot 15}{420} = \underline{\underline{18,21 \text{ A}}}$$

$$I_{rD} = I_{rDA} + I_{rDB} + I_{rDC} = 8,57 + 25 + 26,79 = \underline{\underline{60,36 \text{ A}}}$$



Proud  $I_{rD}$  se rozdělí v přímém poměru vodivosti větví a v nepřímém poměru k délce větví vedení.

$$I'_{rA} : I'_{rB} : I'_{rC} = \frac{1}{L_{AD}} : \frac{1}{L_{BD}} : \frac{1}{L_{CD}}$$

$$I'_{rA} + I'_{rB} + I'_{rC} = 60,36$$

$$\frac{I'_{rA}}{I'_{rB}} = \frac{L_{BD}}{L_{AD}}; \quad \frac{I'_{rA}}{I'_{rC}} = \frac{L_{CD}}{L_{AD}}$$

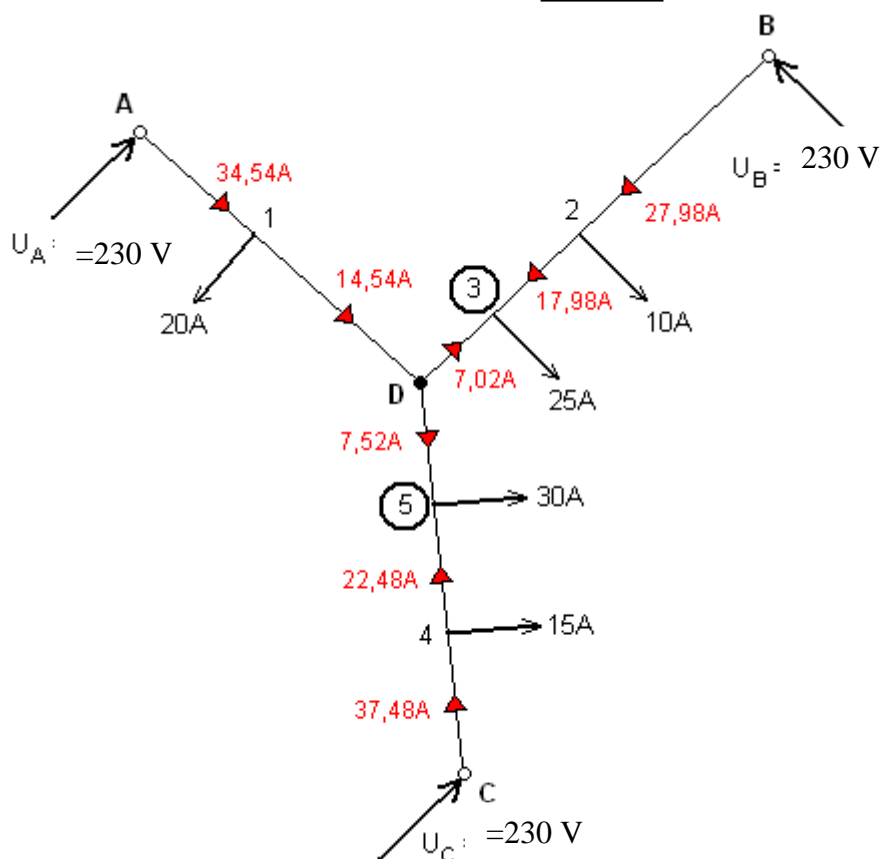
Po výpočtu:

$$I'_{rA} = \underline{\underline{23,11 \text{ A}}} \quad I'_{rB} = \underline{\underline{17,98 \text{ A}}} \quad I'_{rC} = \underline{\underline{19,27 \text{ A}}}$$

$$I'_A = I_{rAD} + I'_{rA} = 11,43 + 23,11 = \underline{\underline{34,54 \text{ A}}}$$

$$I'_B = I_{rBD} + I'_{rB} = 10 + 17,98 = \underline{\underline{27,98 \text{ A}}}$$

$$I'_C = I_{rCD} + I'_{rC} = 18,21 + 19,27 = \underline{\underline{37,48 \text{ A}}}$$



Rozdělení proudů po vedení a určení pravděpodobných míst s maximálním úbytkem napětí (místa stékání proudů):

Návrh průřezu vedení: v bodě 3

$$S = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2}{33 \cdot 0,05 \cdot 230} \cdot (27,98 \cdot 250 + 17,98 \cdot 100) = \underline{\underline{46,34}} \approx 50 \text{ mm}^2$$

Návrh průřezu vedení: v bodě 5

$$S = \frac{2 \cdot \rho}{\Delta U} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2}{33 \cdot 0,05 \cdot 230} \cdot (37,48 \cdot 150 + 22,48 \cdot 150) = \underline{\underline{47,40}} \approx 50 \text{ mm}^2$$

Kontrola dovoleného úbytku napětí na vedení, max. úbytek v bodě 3.

$$\Delta u = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{S \cdot U_N} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{33 \cdot 50 \cdot 230} (27,98 \cdot 250 + 17,98 \cdot 100) = \underline{\underline{4,63}} \%$$

Kontrola dovoleného úbytku napětí na vedení, max. úbytek v bodě 5.

$$\Delta u = \frac{2 \cdot \rho \cdot 100}{S \cdot U_N} \cdot \sum \ell \cdot I = \frac{2 \cdot 100}{33 \cdot 50 \cdot 230} (37,48 \cdot 150 + 22,48 \cdot 150) = \underline{\underline{4,74}} \%$$

## Cvičení číslo 6

### Výpočet uzlových sítí

Výpočet stejnosměrných uzlových sítí vychází ze známé konfigurace sítě (délky a průřezu vodičů), ze známých odběrů v sítí a definovaných napáječů. Při řešení stejnosměrných sítí můžeme stanovit:

- proudové zatížení zdrojů,
- proudové zatížení větví,
- napěťové poměry v uzlech,
- místo maximálního úbytku napětí,
- místo maximálního úbytku napětí,
- ztráty činného výkonu

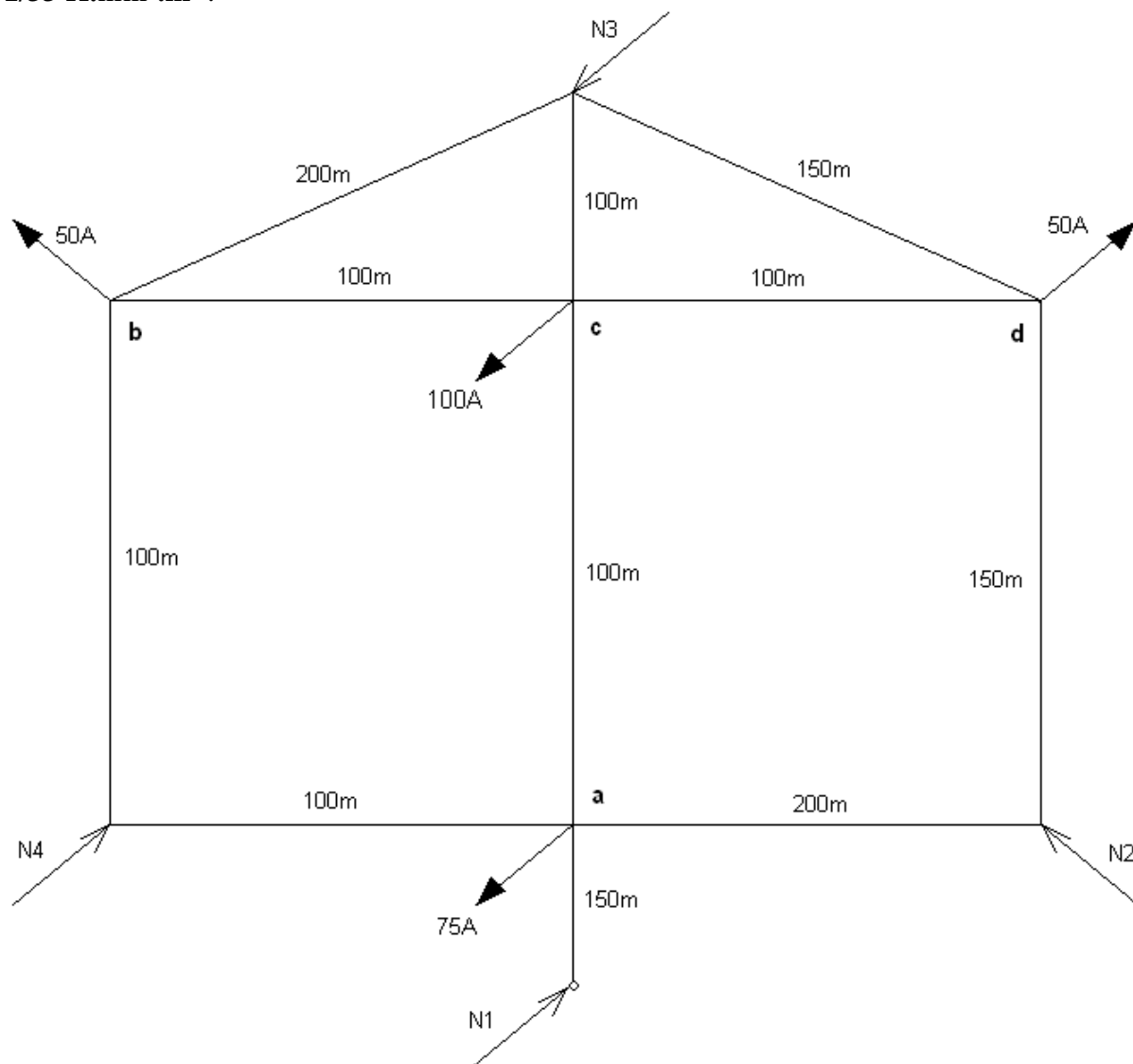
Tyto hodnoty lze stanovit při normálním chodu sítě i při výpadku jednoho či více napáječů.

Postup řešení:

- 1) Redukce všech odběrů do uzlů.
- 2) Sestavení uzlových rovnic
- 3) Výpočet úbytků napětí uzlů (řešení soustavy uzlových rovnic)
- 4) Rozdělení proudů - výpočet vyrovnávacích proudů
  - výpočet celkových proudů (celkový proud = vyrovnávací proud + redukováný proud).
- 5) Stanovení míst maximálního úbytku napětí a kontrola napětí v nich.
- 6) Určení proudového zatížení napáječů.



**P:** Proveďte kontrolu úbytku napětí a určete proudové rozdělení v naznačené síti, je-li  $U_N = 220 \text{ V ss}$ , dovolený úbytek napětí  $\Delta u_{\max} = 5 \%$ , síť je provedena z lan **AlFe 6 35mm<sup>2</sup>**,  $\rho_{\text{Al}} = 1/33 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .



$$\begin{aligned}
 i_a &= i_{ca} + i_{2Na} + i_{1Na} + i_{4Na} \\
 &= (U_c - U_a) \cdot g_{ac} + (U_{2N} - U_a) \cdot g_{2Na} + (U_{1N} - U_a) \cdot g_{1Na} + (U_{4N} - U_a) \cdot g_{4Na} \\
 &= (\Delta U_a - \Delta U_c) \cdot g_{ac} + (\Delta U_a - \Delta U_{2N}) \cdot g_{2Na} + (\Delta U_a - \Delta U_{1N}) \cdot g_{1Na} + (\Delta U_a - \Delta U_{4N}) \cdot g_{4Na} \\
 &= \Delta U_a \cdot (g_{ac} + g_{2Na} + g_{1Na} + g_{4Na}) - \Delta U_c \cdot g_{ac} - \Delta U_{2N} \cdot g_{2Na} - \Delta U_{1N} \cdot g_{1Na} - \Delta U_{4N} \cdot g_{4Na}
 \end{aligned}$$

**Závěr:**  $i_a = \Delta U_a \cdot G_a - \Delta U_c \cdot g_{ac}$

$\Delta U_c$  – úbytek sousedního ne napájecího uzlu

$g_{ac}$  – vodivost mezi uzly  $\underline{a}$  a  $\underline{c}$ 

**Obecně:**  $i_a = \Delta U_a \cdot G_a - \sum_{x=1}^n \Delta U_x \cdot g_{ax}$

 $\Delta U_a$  – úbytek v uzlu  $\underline{a}$ 

$$G_a = \sum_{x=1}^n g_{ax}$$

$G_a$  – vlastní vodivost uzlu  $\equiv$  vodivost větví  
vstupujících do uzlu

Sestavení proudových rovnic:

$$i_a = \Delta U_a \cdot G_a - \Delta U_c \cdot g_{ac}$$

$$i_b = \Delta U_b \cdot G_b - \Delta U_c \cdot g_{bc}$$

$$i_c = \Delta U_c \cdot G_c - \Delta U_a \cdot g_{ca} - \Delta U_d \cdot g_{cd} - \Delta U_b \cdot g_{cb}$$

$$i_d = \Delta U_d \cdot G_d - \Delta U_c \cdot g_{dc}$$

kde

$$G_a = g_{ac} + g_{2Na} + g_{1Na} + g_{4Na}$$

$$G_b = g_{bc} + g_{b4N} + g_{b3N}$$

$$G_c = g_{ca} + g_{cd} + g_{c3N} + g_{cb}$$

$$G_d = g_{dc} + g_{d2N} + g_{d3N}$$

Řešení:  $g = \frac{S}{2 \cdot \rho \cdot \ell} \quad [S; mm^2, \Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}, m]$

$$g_{a1N} = 3,89 \text{ S}$$

$$g_{b3N} = 2,92 \text{ S}$$

$$g_{c3N} = 5,83 \text{ S}$$

$$g_{d2N} = 3,89 \text{ S}$$

$$g_{a2N} = 2,92 \text{ S}$$

$$g_{bc} = 5,83 \text{ S}$$

$$g_{cd} = 5,83 \text{ S}$$

$$g_{d3N} = 3,89 \text{ S}$$

$$g_{ac} = 5,83 \text{ S}$$

$$g_{b4N} = 5,83 \text{ S}$$

$$g_{a4N} = 5,83 \text{ S}$$

Po dosazení:

$$G_a = 18,47 \text{ S}$$

$$G_b = 14,58 \text{ S}$$

$$G_c = 23,32 \text{ S}$$

$$G_d = 13,61 \text{ S}$$

Sestavení soustavy rovnic – proudů:

$$75 = \Delta U_a \cdot 18,47 - \Delta U_c \cdot 5,83$$

$$50 = \Delta U_b \cdot 14,58 - \Delta U_c \cdot 5,83$$

$$100 = \Delta U_c \cdot 23,32 - \Delta U_a \cdot 5,83 - \Delta U_d \cdot 5,83 - \Delta U_b \cdot 5,83$$

$$50 = \Delta U_d \cdot 13,61 - \Delta U_c \cdot 5,83$$

Výpočet:  $\Delta U_a = 7,19 \text{ V} \quad \Delta U_b = 7,39 \text{ V} \quad \Delta U_c = 9,92 \text{ V} \quad \Delta U_d = 7,92 \text{ V}$

Povolený úbytek nepřekročí daných 5 %  $\approx 11 \text{ V}$  v zadané síti.Výpočet proudů ve větvích soustavy:

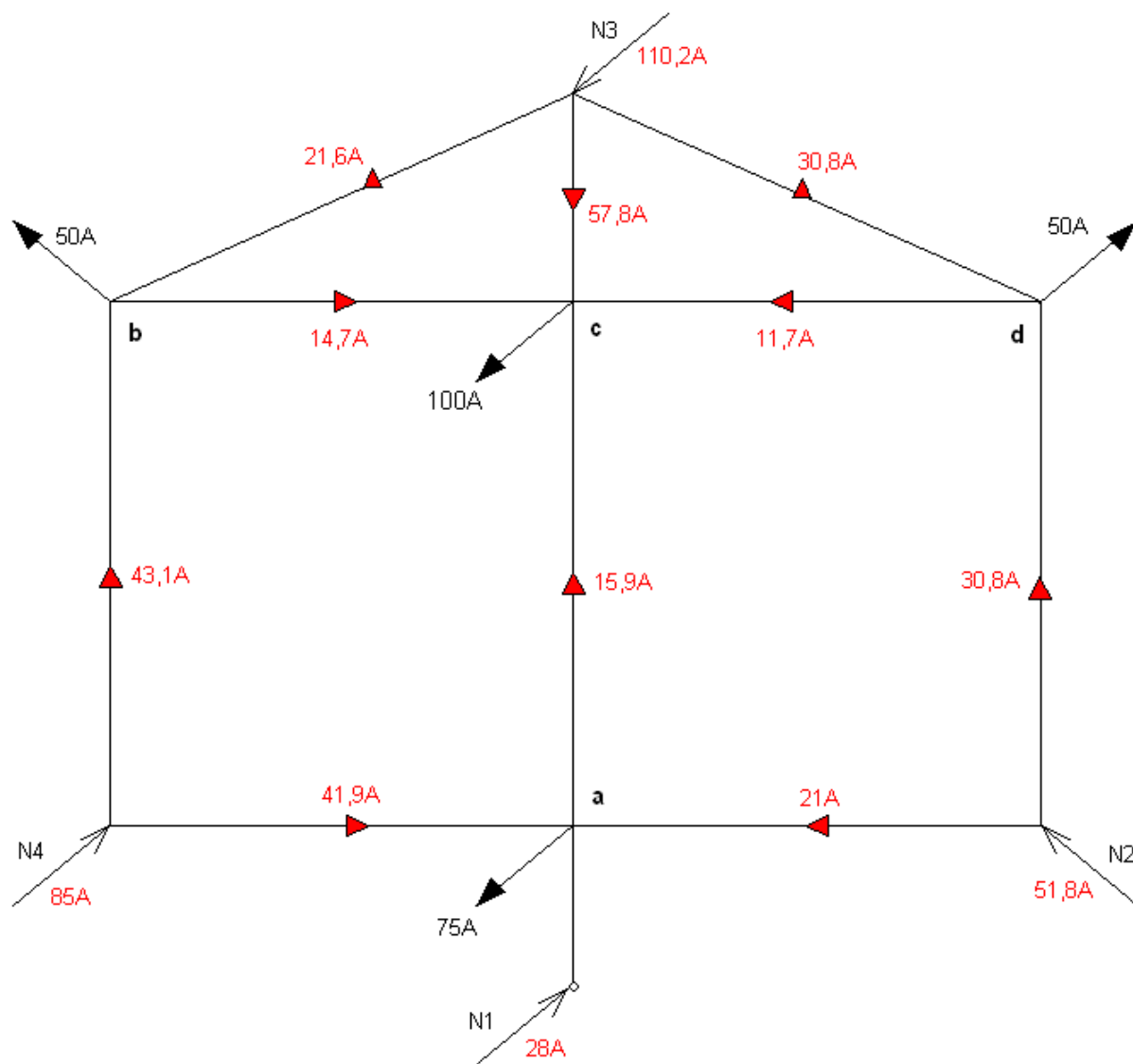
$$i_{a1N} = (\Delta U_a - \Delta U_{1N}) \cdot g_{a1N} = 7,19 \cdot 3,89 = 27,96 \text{ A}$$

$$i_{a2N} = (\Delta U_a - \Delta U_{2N}) \cdot g_{a2N} = 7,19 \cdot 2,92 = 21 \text{ A}$$

$$i_{ac} = (\Delta U_a - \Delta U_c) \cdot g_{ac} = (7,19 - 9,92) \cdot 5,83 = -15,9 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
 i_{a4N} &= (\Delta U_a - \Delta U_{4N}) \cdot g_{a4N} = 7,19 \cdot 5,83 = 41,9 \text{ A} \\
 i_{b3N} &= (\Delta U_b - \Delta U_{3N}) \cdot g_{b3N} = 7,39 \cdot 2,92 = 21,6 \text{ A} \\
 i_{b4N} &= (\Delta U_b - \Delta U_{4N}) \cdot g_{b4N} = 7,39 \cdot 5,83 = 43,1 \text{ A} \\
 i_{bc} &= (\Delta U_b - \Delta U_c) \cdot g_{bc} = (7,39 - 9,92) \cdot 5,83 = -14,7 \text{ A} \\
 i_{c3N} &= (\Delta U_c - \Delta U_{3N}) \cdot g_{c3N} = 9,92 \cdot 5,83 = 57,8 \text{ A} \\
 i_{cd} &= (\Delta U_c - \Delta U_d) \cdot g_{cd} = (9,92 - 7,92) \cdot 5,83 = 11,7 \text{ A} \\
 i_{d2N} &= (\Delta U_d - \Delta U_{2N}) \cdot g_{d2N} = 7,92 \cdot 3,89 = 30,8 \text{ A} \\
 i_{d3N} &= (\Delta U_d - \Delta U_{3N}) \cdot g_{d3N} = 7,92 \cdot 3,89 = 30,8 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Proudové rozdělení:



V případě, že v zadání je uvažováno se sítí po redukci do uzlů, je dalším krokem nakreslení skutečné sítě s rozdělením proudů. Určíme místa maximálního úbytku napětí a jejich velikosti.

## Cvičení číslo 7

### Střídavé sítě

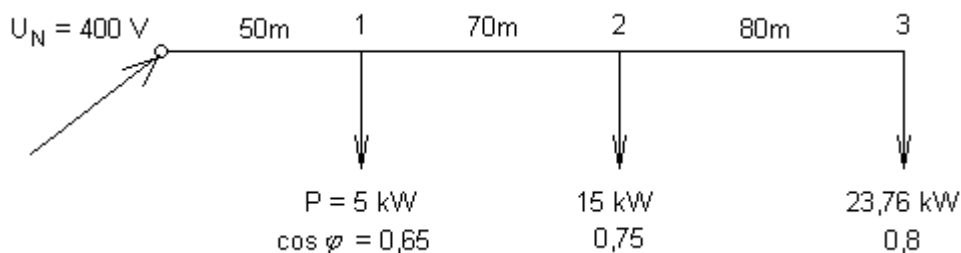
$$\Delta U_f = R \cdot I_\varepsilon + X \cdot I_j$$

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f$$

$$\Delta u_f = \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot I_\varepsilon + X_K \cdot \ell \cdot I_j$$

$$\Delta U_f = \frac{\rho}{S} \cdot \sum (I_{\varepsilon i} \cdot \ell_i) + X_K \cdot \sum (I_{ji} \cdot \ell_i)$$

**P:** Dimenzujte znázorněné 3-fázové vedení (kabelové  $A \ell$ ) zatížené třemi asynchronními motory, tak aby ztráty výkonu nepřekročily **8%** odebíraného výkonu. Napětí napájecího bodu je **400 V**, jmenovité napětí motorů je **380 V**,  $\rho_{Al} = 1/33 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .



$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{3 \cdot \rho}{S} = \frac{3 \cdot \rho}{S} \cdot \sum \ell \cdot I^2$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi}$$

$$I_\varepsilon = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s}$$

$$I_j = I_\varepsilon \cdot \tan \varphi$$

$$I = I_\varepsilon - j \cdot I_j$$

Odebíraný výkon:  $P_0 = \sum P = 5 + 15 + 23.76 = 43.76 \text{ kW}$

Ztráty:  $\Delta P_{\max} = 0.08 \cdot P_0 = 3.5 \text{ kW}$

Rozdělení úsekových proudů:

$$P = 5 \text{ kW}, \quad \cos \varphi = 0,65$$

$$I_{\varepsilon 1} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 7,6 \text{ A}$$

$$I_{j1} = I_{\varepsilon 1} \cdot \tan \varphi = 7,6 \cdot 1,169 = 8,88 \text{ A}$$

$$P = 15 \text{ kW}, \quad \cos \varphi = 0,75$$

$$I_{\varepsilon 2} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 22,8 \text{ A}$$

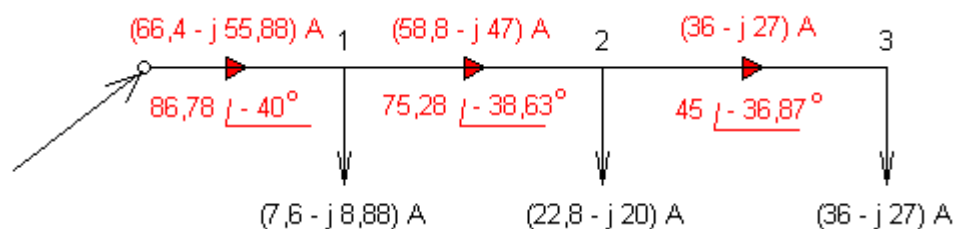
$$I_{j2} = I_{\varepsilon 2} \cdot \tan \varphi = 22,8 \cdot 0,8819 = 20 \text{ A}$$

$$P = 23,76 \text{ kW}, \quad \cos \varphi = 0,8$$

$$I_{\varepsilon 3} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{23,76 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 36 \text{ A}$$

$$I_{j3} = I_{\varepsilon 3} \cdot \tan \varphi = 36 \cdot 0,75 = 27 \text{ A}$$

Řešení úsekových proudů:



Určení průřezu vedení:

$$S = \frac{3 \cdot \rho}{\Delta P} \cdot \sum (\ell_i \cdot I_i^2)$$

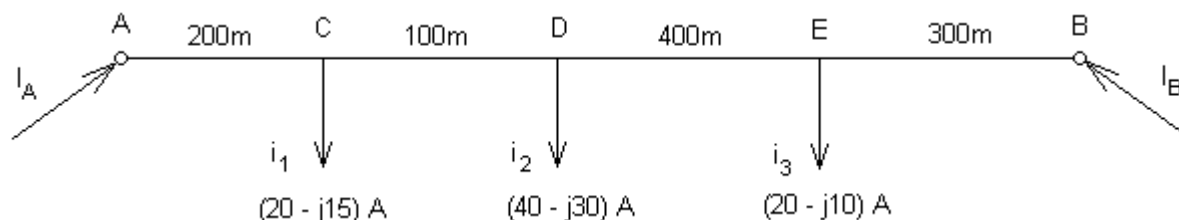
$$S = \frac{3}{33 \cdot 3,5 \cdot 10^3} \cdot (50 \cdot 86,78^2 + 70 \cdot 75,28^2 + 80 \cdot 45^2) = 24,3 \text{ mm}^2 \approx 25 \text{ mm}^2$$

Určení úbytku napětí ( $X_K = 0$  - kabelové vedení):

$$\Delta U_{\max} = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum (I_{\varepsilon i} \cdot \ell_i) + \sqrt{3} \cdot X_K \cdot \sum (I_{ji} \cdot \ell_i)$$

$$\Delta U_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{33 \cdot 25} \cdot (66,4 \cdot 50 + 58,8 \cdot 70 + 36 \cdot 80) = 21,66 \text{ V} \approx 5,7\%$$

**P:** Navrhněte průřez venkovního vedení **3x380/220V** pro  $\Delta u = 5\%$  při respektování reaktance vedení  $X_K = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ . Určete celkové ztráty a nakreslete grafické rozdělení proudu a  $\Delta u$ . Materiál vedení je hliník.

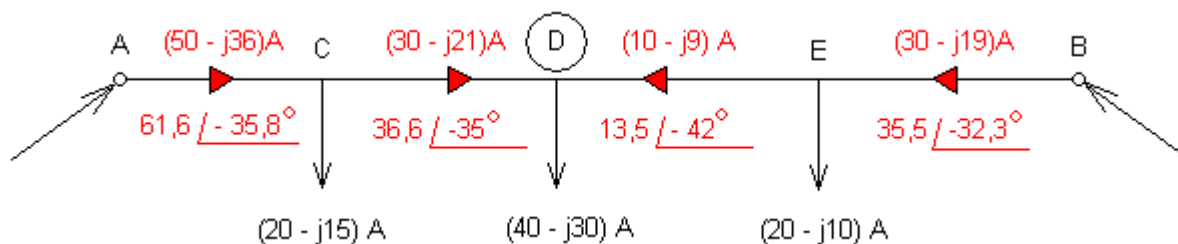


Řešení:

$$I_A = \frac{1}{L} \cdot \sum_B (\ell \cdot I) = \frac{1}{1000} \cdot [300 \cdot (20 - j10) + 700 \cdot (40 - j30) + 800 \cdot (20 - j15)] = (50 - j36) \text{ A}$$

$$I_B = \sum I_X - I_A = (30 - j19) \text{ A}$$

Rozdělení proudů:



$$\Delta U_s = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum (\ell_i \cdot I_{\epsilon i}) + \sqrt{3} \cdot X_K \cdot \sum (\ell_i \cdot I_{ji}) = \Delta U_1 + \Delta U_2 \quad (1)$$

$$\Delta U_{s \max} = \frac{5 \cdot 380}{100} = 19 \text{ V}$$

Pozor! Délka v km.

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \cdot X_K \cdot \sum (\ell_i \cdot I_{ji}) = \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot (0,2 \cdot 36 + 0,1 \cdot 21) = 4,8 \text{ V}$$

$$\Delta U_1 = \Delta U_{s \max} - \Delta U_2 = 19 - 4,8 = 14,2 \text{ V}$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{\Delta U_1} \cdot \sum (\ell_i \cdot I_{\epsilon i}) = \frac{\sqrt{3}}{33 \cdot 14,2} \cdot (200 \cdot 50 + 100 \cdot 30) = 48,05 \approx 50 \text{ mm}^2$$

Ztráty na vedení:

$$\Delta P = \frac{3 \cdot \rho}{S} \cdot \sum (\ell_i \cdot I_i^2) = \frac{3}{33 \cdot 50} \cdot (200 \cdot 61,6^2 + 100 \cdot 36,6^2 + 400 \cdot 13,5^2 + 300 \cdot 35,5^2) = 2,4 \text{ kW}$$

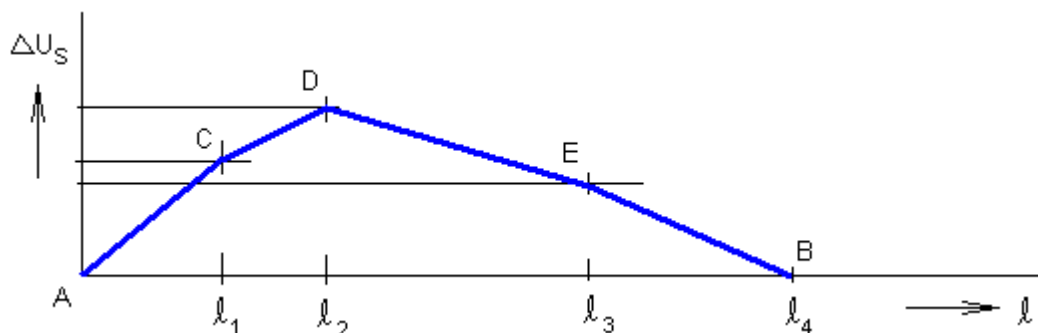
Skutečné úbytky napětí - podle vztahu (1):

$$\Delta U_c = \frac{\sqrt{3}}{33 \cdot 50} \cdot 200 \cdot 50 + \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 0,2 \cdot 36 = 14,2 \text{ V}$$

$$\Delta U_D = \Delta U_C + \Delta U_{CD} = 14,2 + \frac{\sqrt{3}}{33 \cdot 50} \cdot 100 \cdot 30 + \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 0,1 \cdot 21 = 18,5 \text{ V}$$

$$\Delta U_E = \frac{\sqrt{3}}{33 \cdot 50} \cdot 300 \cdot 30 + \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 0,3 \cdot 19 = 12,4 \text{ V}$$

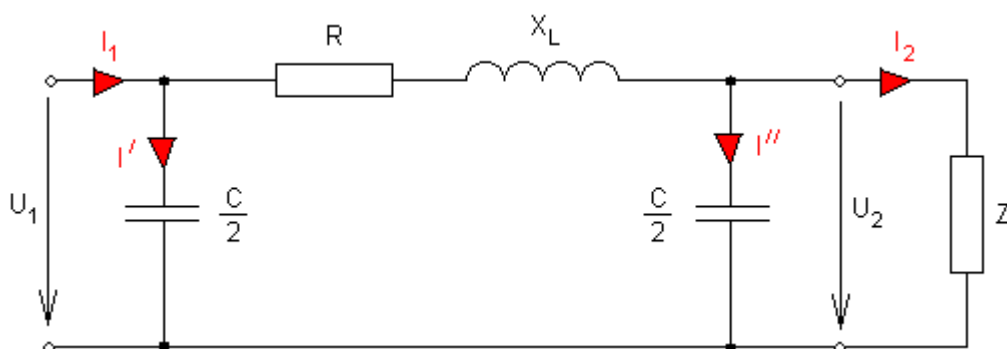
Průběh úbytku napětí podél vedení:



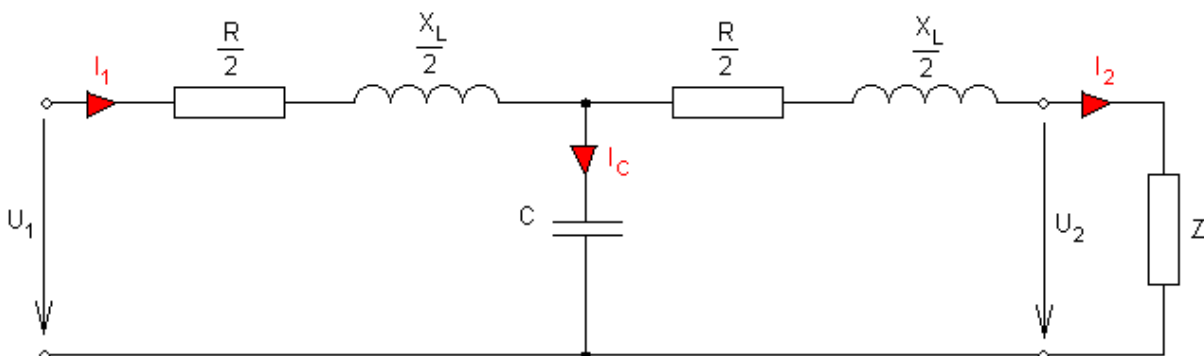
## Cvičení číslo 8

### Dlouhá vedení

$\pi$  – článek:



T – článek:



Blondelovy konstanty:

	<b>A = D ( - )</b>	<b>B ( Ω )</b>	<b>C ( S )</b>
T - článek	$1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2}$	$\bar{Z}_K \cdot \ell \cdot \left( \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} + 1 \right)$	$\bar{Y}_K \cdot \ell$
$\pi$ - článek	$1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2}$	$\bar{Z}_K \cdot \ell$	$\bar{Y}_K \cdot \ell \cdot \left( \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} + 1 \right)$

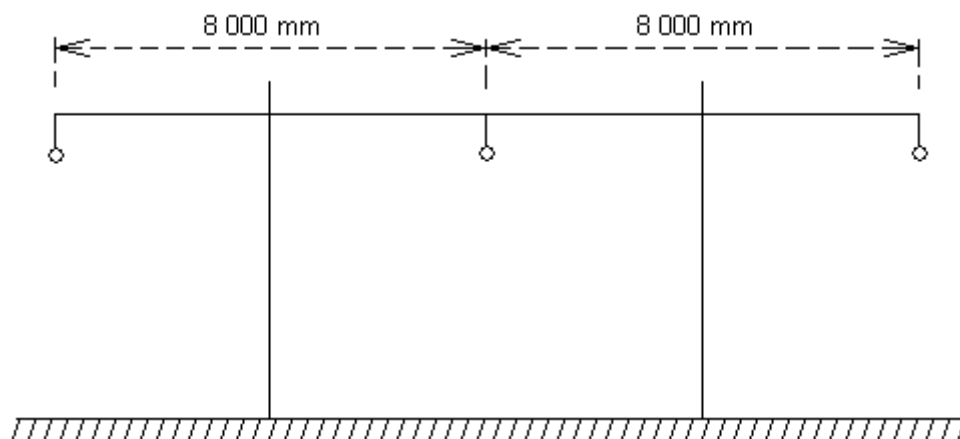
$\bar{Z}_K = R_K + j X_L$  .....podélná impedance

$\bar{Y}_K = G + j B_K$  .....příčná admittance

**P:** Projektované vedení, dlouhé **150 km** bude zhotoveno z lan **AlFe 4**. Vodiče jsou zavěšeny v jedné rovině na portálovém stožáru dle obrázku. Použitý vodič **350 mm<sup>2</sup>**. Vypočítejte pomocí  $\pi$ -článek  $U_1, I_1, \Delta P, \cos\varphi_1$ , bude-li napětí na konci vedení  $U_2 = 220 \text{ kV}$ , výkon  $P_2 = 100 \text{ MW}$  a  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .

Z tabulek:

$R_K = 0,085 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$  a průměr lana pro daný průřez:  $d = 27,2 \text{ mm}$ .



$$L_K = 0,46 \cdot \log\left(\frac{d_s}{r_e}\right) + \frac{0,05}{n} = 0,46 \cdot \log\left(\frac{\sqrt[3]{2} \cdot 8000}{13,6}\right) + 0,05 = 1,37 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_K = \omega \cdot L_K = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_K = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,37 \cdot 10^{-3} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$C_K = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{d_s}{r}\right)} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{\sqrt[3]{2} \cdot 8000}{13,6}\right)} = 8,43 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$B_K = \omega \cdot C_K = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_K = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,43 \cdot 10^{-9} = 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$$

Pak:



$$\bar{Z}_K = R_K + j \omega \cdot L_K = (0,085 + j 0,043) = 0,438 \angle 78,8^\circ \Omega \cdot km^{-1}$$

$$\bar{Y}_K = G_K + j \omega \cdot C_K = j 2,65 \cdot 10^{-6} = 2,65 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ S \cdot km^{-1}$$

$$\bar{Z}_V = \sqrt{\frac{\bar{Z}_K}{\bar{Y}_K}} = \sqrt{\frac{(0,085 + j 0,043)}{j 2,65 \cdot 10^{-6}}} = 404 \angle -5,6^\circ \Omega$$

Určení Blondelových konstant:

$$\begin{aligned} \bar{A} = \bar{D} &= 1 + \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{2} = 1 + \frac{(0,085 + j 0,43) \cdot j 2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 150^2}{2} = \\ &= (0,987 + j 0,0025) = 0,987 \angle 0,147^\circ \end{aligned}$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_K \cdot \ell = (0,085 + j 0,43) \cdot 150 = (12,75 + j 64,5) = 65,74 \angle 78,8^\circ \Omega$$

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{Y}_K \cdot \ell \cdot \left( \frac{\bar{Z}_K \cdot \bar{Y}_K \cdot \ell^2}{4} + 1 \right) = j 2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot \left( \frac{(0,085 + j 0,43) \cdot j 2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 150^2}{4} + 1 \right) = \\ &= (-5,03 \cdot 10^{-7} + j 3,945 \cdot 10^{-4}) = 3,945 \cdot 10^{-4} \angle 90,07^\circ S \end{aligned}$$

Výpočet  $U_1, I_1$ :

$$U_{2f} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 127,02 \cdot 10^3 V$$

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 328,04 A$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \Rightarrow \varphi = -36^\circ 52'$$

$$\bar{I}_2 = (262,43 - j 196,82) A$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{1f} &= \bar{A} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (0,987 + j 0,0025) \cdot 127,02 \cdot 10^3 + (12,75 + j 64,5) \cdot (262,43 - j 196,82) = \\ &= (141\,410 + j 14\,738) = 142,13 \angle 5,95^\circ V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_{2f} + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = (-5,03 + j 394,5) \cdot 10^{-6} \cdot 127,02 \cdot 10^3 + \\ &+ (0,987 + j 2,53 \cdot 10^{-3}) \cdot (262,43 - j 196,82) = (259,45 - j 143,4) = 296,46 \angle -28,9^\circ A \end{aligned}$$

Fázový posun mezi napětím na začátku a proudem na začátku je:

$$\varphi_1 = \varphi_{U1} - \varphi_{I1} = 5,95 + 28,9 = 34,85^\circ$$

Výpočet výkonu a ztrát:

$$S_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot I_1 = 3 \cdot 127,02 \cdot 10^3 \cdot 296,46 = 126,45 \cdot 10^6 \text{ VA}$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1 = 126,45 \cdot 10^6 \cdot 0,82 = 103,69 \text{ MW}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 103,69 - 100 = 3,69 \text{ MW}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 = 126,45 \cdot 10^6 \cdot 0,572 = 73,347 \text{ MVar}$$

Účinnost přenosu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{100}{103,69} \cdot 100 = 96,5 \%$$

## Cvičení číslo 9

### Zkratky

#### Dimenzování vodičů

**Př.** Kabel APK 3 x 150 + 70 mm<sup>2</sup> je uložen v zemi spolu s 5 kabely a vzdálenost mezi nimi je 70 mm. Jmenovitá proudová zatížitelnost je 280 A. Přičemž víte, že koeficient  $k_1=1,1$  (kabel v zemi), koeficient  $k_2=0,78$  (5 kabelů vedle sebe). Určete dovolený proud pro tyto kabely.

Dovolená proudová zatížitelnost :

$$I_D = k_1 \cdot k_2 \cdot I_n = 1,1 \cdot 0,78 \cdot 280 = \underline{\underline{240,28 \text{ A}}}$$

**Př.** Určete průřez kabelu CYKYDY tak, aby odolával tepelným účinkům zkratového proudu  $I_k''=10 \text{ kA}$ , vypínací čas je  $t_{vyp}=0,2\text{s}$ . Přičemž výrobce uvádí součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu  $k_e=1,02$  a koeficient respektující druh a materiál vedení  $K=116$ .

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = I_k'' \cdot k_e = 10 \cdot 10^3 \cdot 1,02 = \underline{\underline{10,2 \text{ kA}}}$$

Průřez:

$$S_{MIN} = I_{ke} \cdot \frac{\sqrt{t_{vyp}}}{K} = 10,2 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sqrt{0,2}}{116} = \underline{\underline{39,32 \text{ mm}^2}} \Rightarrow 50 \text{ mm}^2$$

## Cvičení 10

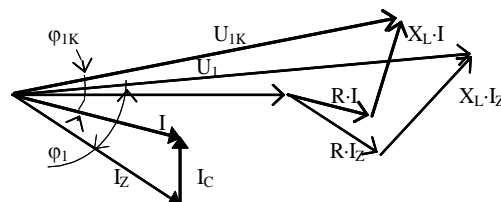
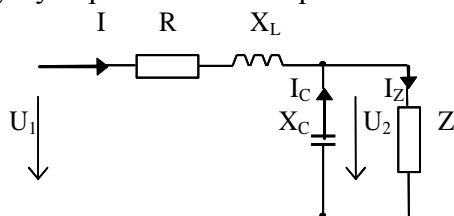
### Kompence účinníku

#### Kompence účinníku

Většina spotřebičů odebírá ze sítě jalovou induktivní energii, již potřebuje ke své činnosti. Vznik jalové složky proudu způsobuje v síti zvýšení přenosových ztrát, zmenšení průchodnosti vedení a další nepříznivé jevy. Tyto nepříznivé jevy se snažíme potlačit kompenzací.

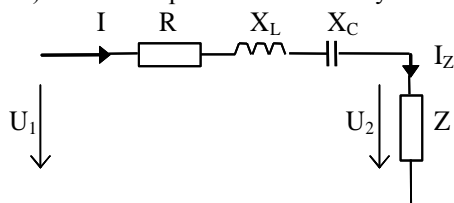
#### Paralelní kompenzace

Při této kompenzaci se mění charakter zátěže, čímž se snižuje jalový proud tekoucí vedením, úbytky napětí na vedení a přenosové ztráty.

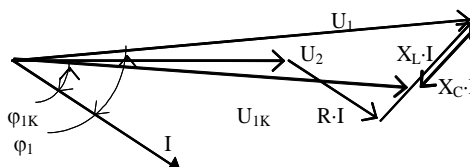


#### sériová kompenzace

Při této kompenzaci se mění impedance vedení (Redukcí reaktance se elektricky vedení zkracuje), Pozitivními efekty jsou: vyšší přenosová kapacita a nižší jalová spotřeba. Zhorší se však zkratové poměry na vedení (menší podélná impedance vedení). Užití: kompenzace krátké cesty oblouk.pecí.



$$I = I_Z$$



#### Výkon kondenzátorové baterie

$$Q_K = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_K)$$

objektu

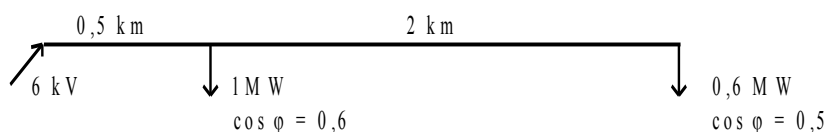
$$Q_K \dots\dots\dots \text{Výkon kondenzátorové baterie}$$

$$P \dots\dots\dots \text{Činný příkon kompenzovaného}$$

$$\cos \varphi \dots\dots\dots \text{Účinník před kompenzací}$$

$$\cos \varphi_K \dots\dots\dots \text{Účinník po kompenzaci}$$

**PŘ 1.** Navrhněte kondenzátorové baterie pro kompenzaci účinníku na vedení 6 kV, tak aby  $\cos \varphi_K = 0,95$ . Porovnejte úbytek napětí na vedení 185 AlFe 6 před kompenzací a po kompenzací.  $R_1 = 0,156 \Omega/\text{km}$ ,  $X_1 = 0,34 \Omega/\text{km}$ . Vypočítejte úsporu na ztrátách výkonu.



$$\begin{aligned} 1. \text{ odběr: } I_1 &= \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_1} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = \underline{\underline{160,5 A}} \\ I_{1j} &= I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 160,5 \cdot 0,8 = \underline{\underline{128,4 A}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ odběr: } I_2 &= \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_2} = \frac{0,6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = \underline{\underline{115,5 A}} \\ I_{2j} &= I_2 \cdot \sin \varphi_2 = 115,5 \cdot 0,866 = \underline{\underline{100 A}} \end{aligned}$$

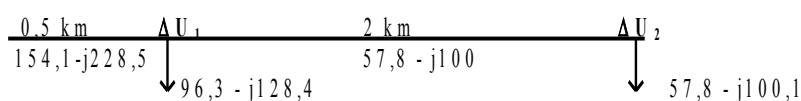
výkon kondenzátorové baterie 1. odběru

$$\begin{aligned} I_{1K} &= I_1 \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_K} = 160,5 \cdot \frac{0,6}{0,95} = \underline{\underline{101,37 A}} \\ I_{1jK} &= I_{1j} \cdot \sin \varphi_K = 101,37 \cdot 0,3122 = \underline{\underline{31,6 A}} \\ I_C &= I_{1j} - I_{1jK} = 128,4 - 31,6 = \underline{\underline{96,8 A}} \\ Q_{C1} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 96,8 = \underline{\underline{1,005 MVar}} \end{aligned}$$

výkon kondenzátorové baterie 2. odběru

$$\begin{aligned} I_{2K} &= I_2 \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_K} = 115,5 \cdot \frac{0,5}{0,95} = \underline{\underline{60,79 A}} \\ I_{2jK} &= I_{2j} \cdot \sin \varphi_K = 60,79 \cdot 0,3122 = \underline{\underline{18,98 A}} \\ I_C &= I_{2j} - I_{2jK} = 100 - 18,98 = \underline{\underline{81,02 A}} \\ Q_{C2} &= \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot 81,02 = \underline{\underline{0,842 MVar}} \end{aligned}$$

Rozdělení proudů před kompenzací



Úbytky napětí před kompenzací

$$\Delta U_f = \Sigma(R \cdot I_{\Sigma}) + \Sigma(X \cdot I_j)$$

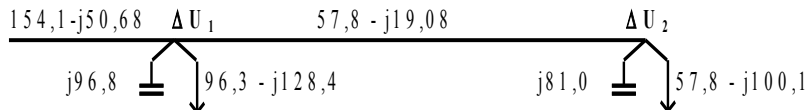
$$\Delta U_{1f} = 0,156 \cdot 0,5 \cdot 154,1 + 0,34 \cdot 0,5 \cdot 228,5 = \underline{50,9 \text{ V}}$$

$$\Delta U_{2f} = 0,156 \cdot 2 \cdot 54,8 + 0,34 \cdot 2 \cdot 100 = \underline{86,03 \text{ V}}$$

$$\Delta U_f = \Delta U_{1f} + \Delta U_{2f} = 50,9 + 86,03 = \underline{136,93 \text{ V}}$$

$$\Delta U_S = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \underline{237,12 \text{ V}} \approx \underline{3,952 \%}$$

Rozdělení proudů po kompenzaci



Úbytky napětí po kompenzaci

$$\Delta U_{f1} = 0,156 \cdot 0,5 \cdot 154,1 + 0,34 \cdot 0,5 \cdot 50,68 = \underline{20,63 \text{ V}}$$

$$\Delta U_{2f} = 0,156 \cdot 2 \cdot 54,8 + 0,34 \cdot 2 \cdot 19,08 = \underline{31,01 \text{ V}}$$

$$\Delta U_f = \Delta U_{1f} + \Delta U_{2f} = 20,63 + 31,01 = \underline{51,64 \text{ V}}$$

$$\Delta U_S = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \underline{89,45 \text{ V}} \approx \underline{1,491 \%}$$

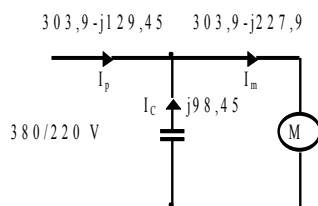
Ztráty výkonu před kompenzací

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot \Sigma I^2 = 3 \cdot 0,156 \cdot [0,5 \cdot (154,1^2 + 228,5^2) + 2 \cdot (57,8^2 + 100^2)] = \underline{30,261 \text{ kW}}$$

Ztráty výkonu po kompenzaci

$$\Delta P_K = 3 \cdot R \cdot \Sigma I^2 = 3 \cdot 0,156 \cdot [0,5 \cdot (154,1^2 + 50,68^2) + 2 \cdot (57,8^2 + 19,08^2)] = \underline{9,625 \text{ kW}}$$

**PŘ.2:** Asynchronní motor  $P = 200 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Určete výkon kondenzátorové baterie při kompenzaci na účinník  $\cos \varphi_k = 0,92$ . Určete proud tekoucí motorem, kondenzátorovou baterií a přívodním kabelem.



proud tekoucí zátěží

$$I_m = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = \underline{379,8 \text{ A}}$$

$$I_{mj} = I_m \cdot \sin \varphi = 379,8 \cdot 0,6 = \underline{227,9 \text{ A}}$$

$$I_{mz} = \frac{I_{1j}}{\tan \varphi} = \frac{227,9}{0,75} = \underline{303,9 \text{ A}}$$

$$I_m = \underline{303,9 + j227,9 \text{ A}}$$

proud tekoucí přívodním vedením po kompenzaci

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi_k} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,92} = \underline{\underline{330,29 A}}$$

$$I_{pj} = I_p \cdot \sin \varphi_k = 330,29 \cdot 0,39 = \underline{\underline{129,45 A}}$$

$$I_{p\dot{z}} = \frac{I_{pj}}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{129,45}{0,426} = \underline{\underline{303,9 A}}$$

$$I_p = \underline{\underline{303,9 + j129,45 A}}$$

proud tekoucí kompenzačním kondenzátorem

$$I_C = I_{jm} - I_{pj} = 227,9 - 129,45 = \underline{\underline{98,45 A}}$$

výkon kondenzátorové baterie

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 98,45 = \underline{\underline{64,8 kVar}}$$

$$Q_K = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) = 200 \cdot (0,75 - 0,426) = \underline{\underline{64,8 kVar}}$$

**PŘ.3:** Závod má průměrný činný příkon  $P=190$  kW a průměrný účinník  $\cos \varphi = 0,63$ . Je napájen kabelovým vedením, které má reaktanci  $X = 0,17 \Omega$ . Provozní napětí je  $3 \times 380/220$  V, dovolený úbytek napětí  $\Delta u_d = 5\%$ . Skutečný úbytek napětí je  $\Delta u = 9\%$ . Navrhněte kompenzaci tak, aby úbytek byl v dovolených mezích.

$$\Delta u_{\%} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3}}{U_s} \cdot (R \cdot I_{\varepsilon} + X \cdot I_j)$$

$$\Delta u_{\%d} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3}}{U_s} \cdot (R \cdot I_{\varepsilon} + X \cdot I_{jk})$$

$$\Delta u_{\%} - \Delta u_{\%d} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3}}{U_s} \cdot (X \cdot I_j - X \cdot I_{jk})$$

jelikož:

$$I_j = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_s} \quad a \quad I_{jk} = \frac{Q_k}{\sqrt{3} \cdot U_s}$$

platí:

$$\Delta u_{\%} - \Delta u_{\%d} = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot X}{\sqrt{3} \cdot U_s^2} \cdot (Q - Q_k)$$

Výkon kondenzátorové baterie potom bude:

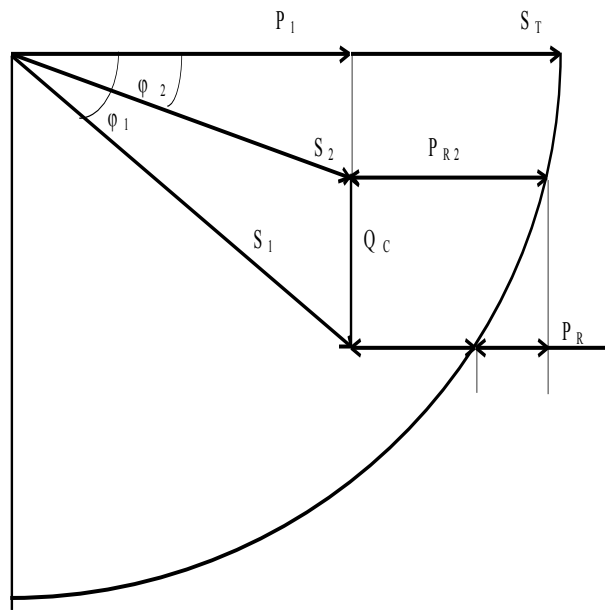
$$Q_C = Q - Q_k = \frac{(\Delta u_{\%} - \Delta u_{\%d}) \cdot U_s^2}{100 \cdot X} = \frac{(9 - 5) \cdot 380^2}{100 \cdot 0,17} = \underline{\underline{33,98 kVar}}$$

**PŘ.4:** Průmyslový závod má ve své rozvodně transformátor o jmenovitém výkonu  $S_T = 500$  kVA. Z tohoto transformátoru odebírá závod činný výkon  $P_1 = 270$  kW při účinníku  $\cos \varphi_1 = 0,78$ .

Určete: 1. Potřebný výkon kondenzátorové baterie  $Q_C$  pro zlepšení účinníku na hodnotu  $\cos \varphi_2 = 0,95$ .

## 2. Jak se zvýší rezerva činného výkonu transformátoru po provedené kompenzaci.

řešení:



1. Potřebný kompenzační výkon:

$$Q_K = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) = 270 \cdot (0,802 - 0,329) = \underline{\underline{127,87 \text{ kVar}}}$$

2. Rezerva činného výkonu před kompenzací a po ní:

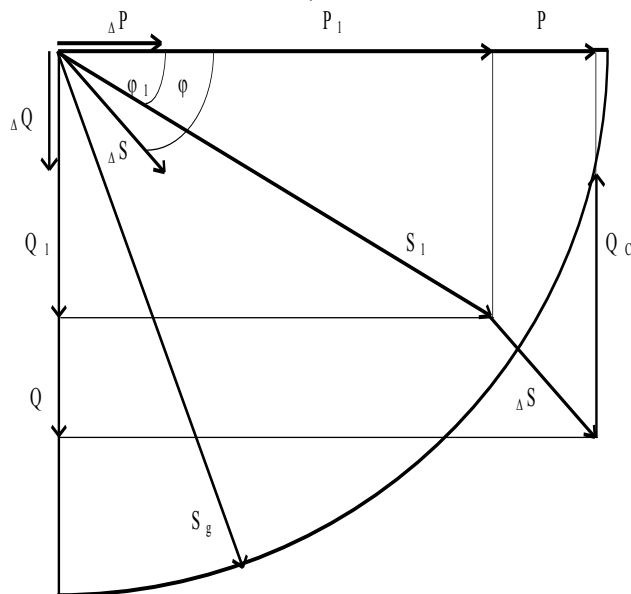
$$P_{R1} = \sqrt{S_T^2 - (P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1)^2} - P_1 = \sqrt{500^2 - (270 \cdot 0,802)^2} - 270 = \underline{\underline{180,7 \text{ kW}}}$$

$$P_{R2} = \sqrt{S_T^2 - (P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2)^2} - P_1 = \sqrt{500^2 - (270 \cdot 0,329)^2} - 270 = \underline{\underline{222 \text{ kW}}}$$

Zvýšení rezervy činného výkonu

$$P_R = P_{R2} - P_{R1} = 222 - 180,7 = \underline{\underline{41,3 \text{ kW}}}$$

**PŘ.5:** Generátor  $S = 200 \text{ kVA}$  je poháněn turbínou s výkonem  $P = 190 \text{ kW}$ . Generátor je zatížen výkonem  $P_1 = 140 \text{ kW}$  s účinnkem  $\cos \varphi_1 = 0,7$ . Spočítejte velikost kompenzační kondenzátorové baterie tak, aby generátor nebyl přetěžován při připojení dalšího odběru  $\Delta S = 50 \text{ kVA}$  s účinnkem  $\cos \varphi = 0,63$ .



Činný výkon po zvýšení zatížení:

$$P = P_1 + \Delta S \cdot \cos \varphi = 140 + 50 \cdot 0,63 = \underline{\underline{171,5 \text{ kW}}}$$

Jalový výkon po zvýšení zatížení

$$Q = P_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \Delta S \cdot \sin \varphi = 140 \cdot 1,02 + 50 \cdot 0,777 = \underline{\underline{181,7 \text{ kVar}}}$$

Výkon kompenzační kondenzátorové baterie:

$$Q_C = Q - \sqrt{S^2 - P^2} = 181,7 - \sqrt{200^2 - 171,5^2} = \underline{\underline{78,8 \text{ kVar}}}$$

## Cvičení číslo 11

Ztráty v rozvodu elektrické energie

**P1:** Určete ztráty v transformátoru o jmenovitém výkonu  $S_n=16$  MVA, převod transformátoru je 110/22 kV, jsou-li ztráty naprázdno  $_{\Delta}P_0 = 41$  kW, nakrátko  $_{\Delta}P_k = 142$  kW, procentní proud naprázdno  $i_0 = 3\%$  a napětí nakrátko  $u_k = 12\%$ . Při maximálním zatížení  $P=10$  MW,  $\cos \varphi = 0,95$ . Doba plných ztrát je  $T_{\Delta} = 3000$  hod., uvažujeme-li chod transformátoru  $T_n = 8760$  hod.

Celkové ztráty v transformátoru - jsou dány součtem ztrát v železe a ve vinutí:

$$_{\Delta}P = _{\Delta}P_0 + _{\Delta}P_k \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 = 41 + 142 \cdot \left( \frac{\frac{10}{0,95}}{16} \right)^2 = \underline{\underline{102,4 \text{ kW}}}, \text{ kde } S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

$$_{\Delta}p = \frac{_{\Delta}P}{S_n} = \frac{102,4}{16 \cdot 10^3} \cdot 100 = \underline{\underline{0,64 \%}} \quad \text{jmenovitého výkonu}$$

Ztráty energie:

$$_{\Delta}W = _{\Delta}P_0 \cdot T_n + _{\Delta}P_k \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot T_{\Delta} = 41 \cdot 8760 + 142 \cdot (0,65)^2 \cdot 3000 = \underline{\underline{543 \cdot 10^3 \text{ kWh/rok}}}$$

Jalový příkon transformátoru (jalové ztráty) jsou dány magnetizačním příkonem, který je přibližně roven:

$$_{\Delta}Q = \frac{i_0 \%}{100} \cdot S_n = \frac{3}{100} \cdot 16 \cdot 10^3 = \underline{\underline{480 \text{ kVar}}}$$

Jalový příkon transformátoru při skutečném zatížení:

$$_{\Delta}Q = _{\Delta}Q_0 + _{\Delta}Q_k \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 = 480 + 1920 \cdot \left( \frac{\frac{10}{0,95}}{16} \right)^2 = \underline{\underline{1306 \text{ kVar}}}$$

$$_{\Delta}Q_k = \frac{u_k}{100} \cdot S_n = \frac{12}{100} \cdot 16 \cdot 10^3 = \underline{\underline{1920 \text{ kVar}}}$$

Jalová spotřeba za rok:

$$_{\Delta}W_j = _{\Delta}Q_0 \cdot T_n + _{\Delta}Q_k \cdot \left( \frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot T_{\Delta} = 480 \cdot 8760 + 1920 \cdot (0,65)^2 \cdot 3000 = \underline{\underline{6680 \cdot 10^3 \text{ kVar/rok}}}$$



**P2:** Jaký vliv má činný a jalový příkon transformátoru ( viz. P1) na ztráty na vedení 110 kV, 50 km, 3x95 mm<sup>2</sup> AlFe<sub>3</sub>, R<sub>k</sub>= 0,319 Ω/km

**Ztráty ve vedení odpovídající přenosu 110 MW, cos φ = 0,95 bez uvažování transformátoru**

činný výkon:  $P = 10 \text{ MW}$

jalový výkon:  $Q = P \cdot \tan \varphi = 10.0328 = 3,28 \text{ MVar}$

Ztráty od činného výkonu:

$$_{\Delta} P_1 = 3 \cdot R \cdot I_{\epsilon}^2 = 15,95 \cdot \left( \frac{10 \cdot 10^3}{100} \right)^2 = 131,8 \text{ kW} , \text{ kde } R = \frac{P^2}{U^2}$$

Ztráty od jalového výkonu:

$$_{\Delta} P_2 = 3 \cdot R \cdot I_j^2 = 15,95 \cdot \left( \frac{3280}{110} \right)^2 = 14,2 \text{ kW} , \text{ kde } R = \frac{Q^2}{U^2}$$

Ztráty celkem:

$$_{\Delta} P = _{\Delta} P_1 + _{\Delta} P_2 = 131,8 + 14,2 = 146 \text{ kW}$$

**Ztráty ve vedení s uvažováním příkonu transformátoru:**

Celkový přenášený činný výkon vedením:

$$P' = P + _{\Delta} P_T = 10 \cdot 10^6 + 102,4 \cdot 10^3 = 10102,4 \text{ kW}$$

Ztráty od celkového činného výkonu:

$$_{\Delta} P'_1 = R \cdot \frac{P'^2}{U^2} = 15,95 \cdot \left( \frac{10102,4}{110} \right)^2 = 134,5 \text{ kW}$$

Celkový přenášený jalový výkon:

$$Q' = Q + _{\Delta} Q_T = 3280 \cdot 10^3 + 1306 \cdot 10^3 = 4,586 \text{ MVar}$$

Ztráty od celkového jalového výkonu:

$$_{\Delta} P'_2 = R \cdot \frac{Q'^2}{U^2} = 15,95 \cdot \left( \frac{4586}{110} \right)^2 = 27,7 \text{ kW}$$

Ztráty celkem:

$$_{\Delta} P' = _{\Delta} P'_{1} + _{\Delta} P'_{2} = 134,5 + 27,7 = \underline{\underline{162,2 \text{ kW}}}$$

Celkové ztráty se zvýší o 16,2 kW, což je asi o 11%.

**Snižování ztrát - KOMPENZACE ÚČINÍKU**

Většina spotřebičů odebírá ze sítě jalovou induktivní energii, již potřebuje ke své činnosti. Vznik jalové složky proudu způsobuje v síti zvýšení přenosových ztrát, zmenšení průchodnosti vedení a další nepříjemné jevy. Tyto nepříznivé jevy se snažíme potlačit kompenzací.

Výkon kondenzátorové baterie:

$$Q_k = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k)$$

kde

$Q_k$  - výkon kondenzátorové baterie

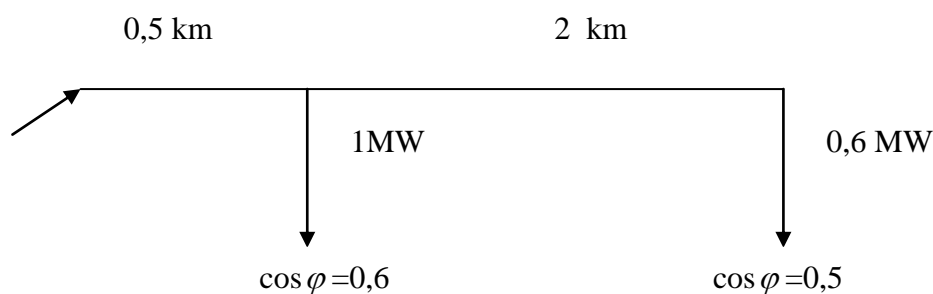
$P$  - činný příkon kompenzovaného objektu

$\cos \varphi$  - účinník před kompenzací

$\cos \varphi_k$  - účinník po kompenzací

**P1:** Navrhněte kondenzátorové baterie pro kompenzaci účinníku 6 kV, tak aby  $\cos \varphi_k = 0,95$ .

Porovnejte úbytek napětí na vedení 185 AlFe<sub>6</sub> před kompenzací a po kompenzací. Parametry vedení  $R_1 = 0,15 \Omega / \text{km}$ ,  $X_1 = 0,134 \Omega / \text{km}$ . Vypočítejte úsporu na ztrátách výkonu.

1. odběr:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,6} = \underline{\underline{160,4 \text{ A}}}$$

$$I_{1j} = I_1 \cdot \sin \varphi = 160,4 \cdot 0,8 = \underline{\underline{128,3 \text{ A}}}$$

2.odběr:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{0,6 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = \underline{\underline{115,5 \text{ A}}}$$

$$I_{1j} = I_1 \cdot \sin \varphi = 115,5 \cdot 0,866 = \underline{\underline{100 \text{ A}}}$$

Výkon kondenzátorové baterie 1. odběr

$$I_{1k} = I_1 \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_k} = 160,4 \cdot \frac{0,6}{0,95} = \underline{\underline{101,3 \text{ A}}}$$

$$I_{1jk} = I_{1k} \cdot \sin \varphi_k = 101,3 \cdot 0,3122 = \underline{\underline{31,6 \text{ A}}}$$

$$I_c = I_{1j} - I_{1jk} = 128,4 - 31,6 = \underline{\underline{96,8 \text{ A}}}$$

$$Q_{c1} = \sqrt{3} \cdot I_c \cdot U_s = \sqrt{3} \cdot 96,8 \cdot 6 \cdot 10^3 = \underline{\underline{1,005 \text{ MVar}}}$$

Výkon kondenzátorové baterie 2. odběr

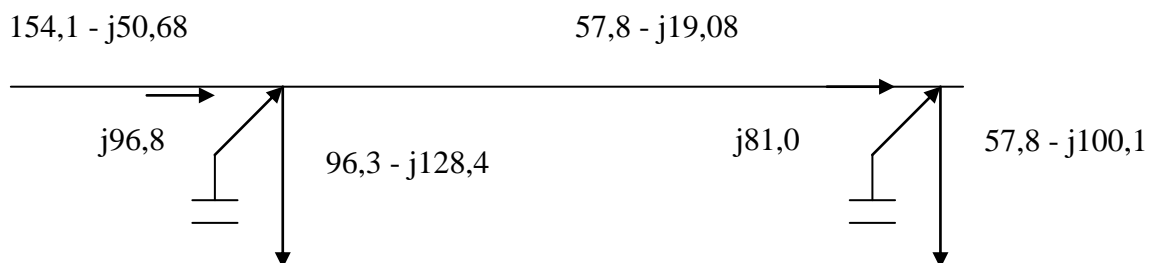
$$I_{2k} = I_2 \cdot \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_k} = 115,5 \cdot \frac{0,5}{0,95} = \underline{\underline{60,79 \text{ A}}}$$

$$I_{2jk} = I_{2k} \cdot \sin \varphi_k = 60,79 \cdot 0,3122 = \underline{\underline{18,98 \text{ A}}}$$

$$I_c = I_{2j} - I_{2jk} = 100 - 18,98 = \underline{\underline{81,02 \text{ A}}}$$

$$Q_{c1} = \sqrt{3} \cdot I_c \cdot U_s = \sqrt{3} \cdot 81,02 \cdot 6 \cdot 10^3 = \underline{\underline{0,842 \text{ MVar}}}$$

Rozdělení proudů po kompenzaci:



Úbytky napětí před kompenzací

$$\Delta U_{f1} = \sum (R_k \cdot I_{\epsilon}) + \sum (X_k \cdot I_j) = 0,156 \cdot 0,5 \cdot 154,1 + 0,34 \cdot 0,5 \cdot 228,5 = \underline{\underline{50,9 \text{ V}}}$$

$$\Delta U_{f2} = \sum (R_k \cdot I_{\epsilon}) + \sum (X_k \cdot I_j) = 0,156 \cdot 2 \cdot 57,8 + 0,34 \cdot 0,2 \cdot 100 = \underline{\underline{86,03 \text{ V}}}$$

$$\Delta U_f = \Delta U_{f1} + \Delta U_{f2} = 50,9 + 86,09 = \underline{\underline{136,9 \text{ V}}}$$

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \sqrt{3} \cdot 136,9 = \underline{\underline{237,12 \text{ V}}} \approx \underline{\underline{3,952 \%}}$$

Úbytky napětí po kompenzaci:

$$\Delta U_{f1} = \sum (R_k \cdot I_{\varepsilon}) + \sum (X_k \cdot I_j) = 0,156 \cdot 0,5 \cdot 154,1 + 0,34 \cdot 0,5 \cdot 50,68 = \underline{\underline{20,63 \text{ V}}}$$

$$\Delta U_{f2} = \sum (R_k \cdot I_{\varepsilon}) + \sum (X_k \cdot I_j) = 0,156 \cdot 2 \cdot 57,8 + 0,34 \cdot 0,2 \cdot 19,08 = \underline{\underline{51,64 \text{ V}}}$$

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f = \sqrt{3} \cdot 51,64 = \underline{\underline{89,45 \text{ V}}} \approx \underline{\underline{1,491 \%}}$$

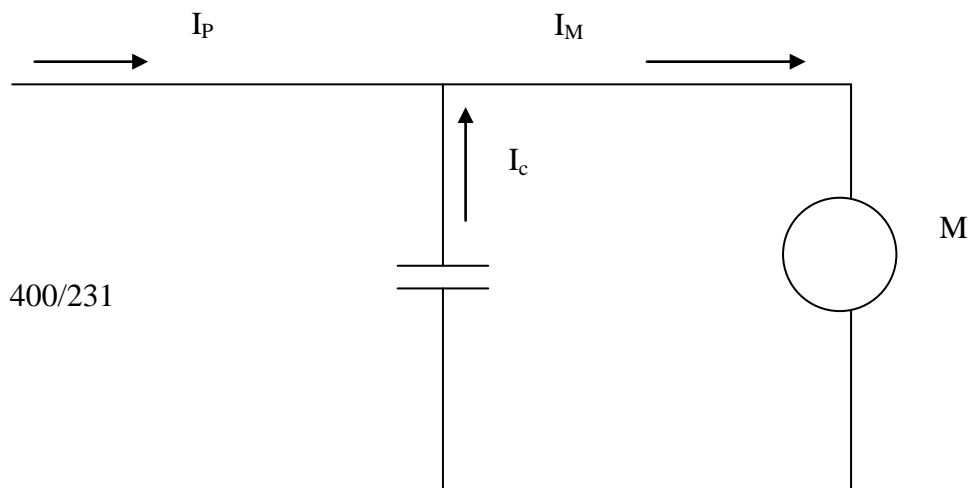
Ztráty výkonu před kompenzací:

$$\Delta P = 3 \cdot R_k \cdot \sum (I^2 \cdot l) = 3 \cdot 0,156 \cdot [0,5 \cdot (154,1^2 + 228,5^2)] + [2 \cdot (57,8^2 + 100,1^2)] = \underline{\underline{30,261 \text{ kW}}}$$

Ztráty výkonu po kompenzaci:

$$\Delta P = 3 \cdot R_k \cdot \sum (I^2 \cdot l) = 3 \cdot 0,156 \cdot [0,5 \cdot (154,1^2 + 50,68^2)] + [2 \cdot (57,8^2 + 19,08^2)] = \underline{\underline{9,625 \text{ kW}}}$$

**P:** Asynchronní motor o výkonu  $P=200 \text{ kW}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ , kompenzujte na  $\cos \varphi_k = 0,92$ . Určete proudy v jednotlivých větvích a také určete výkon kondenzátorové baterie.



Proud motorem:

$$I_M = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = \underline{\underline{360,8 \text{ A}}}$$

$$I_{M\check{c}} = I_M \cdot \cos \varphi = 360,8 \cdot 0,8 = \underline{\underline{288,7 \text{ A}}}$$

$$I_{Mj} = I_M \cdot \sin \varphi = 360,8 \cdot 0,6 = \underline{\underline{216,5 \text{ A}}}$$

Proud přívodním kabelem:

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,92} = \underline{\underline{313,8 \text{ A}}}$$

$$I_{p\check{c}} = I_p \cdot \cos \varphi = 313,8 \cdot 0,92 = \underline{\underline{288,6 \text{ A}}}$$

$$I_{Mj} = I_p \cdot \sin \varphi = 313,8 \cdot 0,39 = \underline{\underline{123,0 \text{ A}}}$$

Proud kondenzátorem:

$$I_c = I_{Mj} - I_{pj} = 216,5 - 123,0 = \underline{\underline{93,5 \text{ A}}}$$

Výkon kondenzátorové baterie:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_c = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 93,5 = \underline{\underline{64,8 \text{ kVA}}}$$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi - \tan \varphi_k) = 200 \cdot 10^3 (0,75 - 0,425) = \underline{\underline{64,8 \text{ kVA}}}$$