

PŘEDMLUVA

Toto skriptum je určeno především pro výuku předmětů Elektroenergetika I a II pro posluchače oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony, využít jej mohou také studenti oboru Elektroenergetika v předmětech Teoretická elektroenergetika, Přenos a rozvod elektrické energie a Přejchodové jevy v elektrizačních soustavách.

Řešené příklady by měly být studentům oporou především při řešení samostatných programů.

Ve skriptu je využito některých podkladů ze skript prof. Ruska (Elektroenergetika - návody do cvičení) a doc. Gureckého (Elektroenergetika - návody do cvičení).

1. ZÁKLADNÍ ENERGETICKÉ 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 el. 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

- Součet všech jmenovitých výkonů provozuschopných výrobních jednotek (instalovaný výkon zmenšený o výkony jednotek mimo provoz – opravy, havárie).

Diagram zatížení

- Znázorňuje průběh výkonu (příkonu) na čase: roční (8760 hodin), měsíční (720 hodin), týdenní (168 hodin), denní (24 hodin).

- Množství spotřebované energie je úměrné ploše diagramu:

$$W = \int_0^T P(t) dt \quad (1.1)$$

Maximální zatížení

- Maximální příkon odebíraný nepřetržitě po dobu 15 minut za sledované období.

Střední zatížení

- Průměrný příkon ve sledovaném období, kterým bychom odebrali stejné množství energie:

$$P_{\text{str}} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{T} \quad (1.2)$$

Minimální zatížení

- Minimální příkon odebíraný nepřetržitě po dobu 15 minut za sledované období.

Základní zatížení

- Oblast diagramu pod minimálním zatížením.

Pološpičkové zatížení

- Oblast diagramu mezi min. a středním zatížením.

Špičkové zatížení

- Oblast diagramu nad středním zatížením.

Doba využití maxima

- Čas, za který bychom při odebíraném P_{max} odebrali energii jako při časově proměnném odběru v daném období:

$$P_{\text{max}} \cdot \tau = \int_0^T P(t) dt \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{\text{max}}} \leq T \quad (1.3)$$

Doba plných ztrát

- Je čas, za který maximální odebíraný proud způsobí stejné ztráty jako časově proměnný proud ve sledovaném období:

$$R \cdot I_{\text{max}}^2 \cdot \tau_z = \int_0^T R \cdot I(t)^2 dt \quad \Rightarrow \quad \tau_z = \frac{\int_0^T I(t)^2 dt}{I_{\text{max}}^2} = \frac{\int_0^T P(t)^2 dt}{P_{\text{max}}^2} \quad (1.4)$$

Náročnost β

- Poměr maximálního příkonu k instalovanému příkonu:

$$\beta = \frac{P_{\text{max}}}{P_i} \leq 1 \quad (1.5)$$

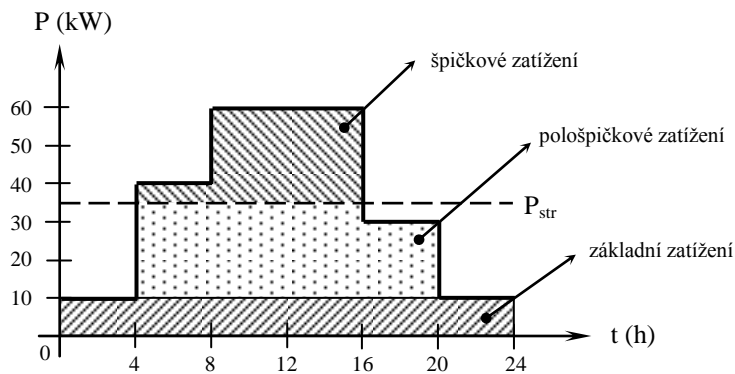
Soudobost δ

- Ukazuje vliv nesoudobosti maxima různých připojených zařízení. Výsledné maximum je menší než součet maxim jednotlivých zařízení:

$$P_{C_{\text{max}}} = \delta \cdot \sum_{k=1}^n P_{n_{\text{max}}} \quad \delta < 1 \quad (1.6)$$

Př. 1.1

Z denního diagramu zatížení určete spotřebovanou el. energii, maximální, střední a minimální zatížení, dobu využití maxima a dobu plných ztrát.



$$W = \int_0^T P(t) dt = 10 \cdot 4 + 40 \cdot 4 + 60 \cdot 8 + 30 \cdot 4 + 10 \cdot 4 = 840 \text{ kWh}$$

$$P_{\text{str}} = \frac{W}{T} = \frac{840}{24} = 35 \text{ kW}$$

$$P_{\text{max}} = 60 \text{ kW} \quad (t > 15 \text{ min})$$

$$P_{\text{min}} = 10 \text{ kW} \quad (t > 15 \text{ min})$$

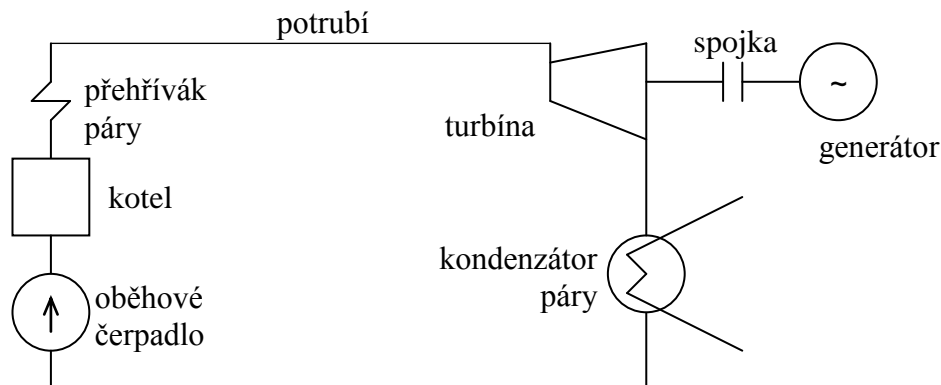
$$\tau = \frac{W}{P_{\text{max}}} = \frac{840}{60} = 14 \text{ h}$$

$$\tau_z = \frac{\int_0^T P(t)^2 dt}{P_{\text{max}}^2} = \frac{10^2 \cdot 4 + 40^2 \cdot 4 + 60^2 \cdot 8 + 30^2 \cdot 4 + 10^2 \cdot 4}{60^2} = \frac{39600}{3600} = 11 \text{ h}$$

2. VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Př. 2.1

Vypočítejte tepelnou bilanci a dílčí účinnosti elektrárny s kondenzačním soustrojím dle naznačeného schématu.

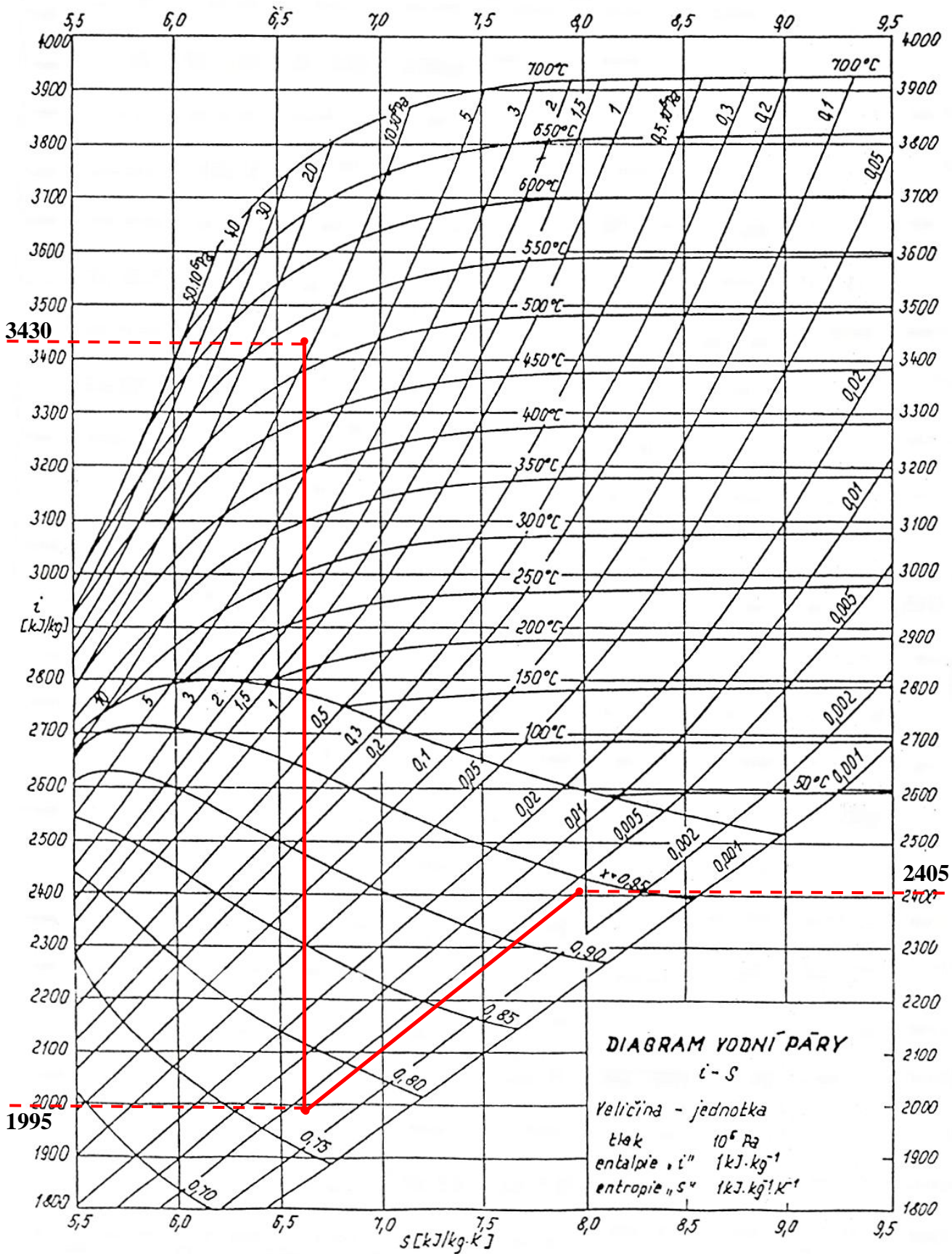


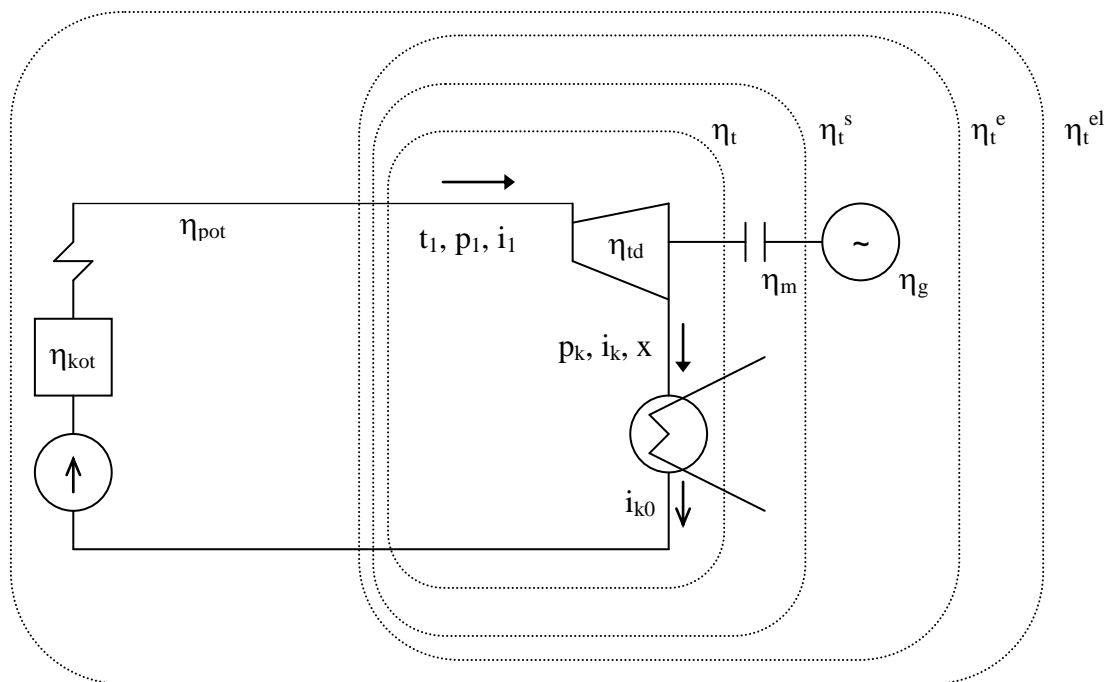
Zadané parametry:

t_1	= 525 °C	p_1	= 11 MPa
x	= 0,94	p_k	= 4 kPa
η_{kot}	= 0,85	η_{pot}	= 0,98
η_m	= 0,97	η_g	= 0,96
P_{el}	= 25 MW	k_v	= $19 \cdot 10^3$ kJ.kg ⁻¹ (výhřevnost)

Z *i-s* diagramu určíme pro hodnoty p_1 a t_1 velikost entalpie $i_1 = 3430$ kJ.kg⁻¹. Spuštěním kolmice z bodu (p_1 , t_1) na křivku zadaného tlaku v kondenzátoru p_k určíme velikost $i_k^{\text{ad}} = 1995$ kJ.kg⁻¹. Hodnotu skutečné entalpie i_k najdeme jako průsečík tlaku v kondenzátoru a zadané suchosti páry x , $i_k = 2405$ kJ.kg⁻¹. Entalpii kondenzátu $i_{ko} = 121$ kJ.kg⁻¹ určíme z parních tabulek vody podle tlaku.

p (MPa)	t (°C)	i_{ko} (KJ.kg ⁻¹)	p (MPa)	t (°C)	i_{ko} (KJ.kg ⁻¹)	p (MPa)	t (°C)	i_{ko} (KJ.kg ⁻¹)
0,001	6,98	29,37	0,140	109,31	458,44	1,800	207,10	885,60
0,002	17,51	73,46	0,160	113,32	475,39	2,000	212,36	908,60
0,004	28,98	121,44	0,200	120,23	504,70	2,400	221,77	951,90
0,006	36,18	151,52	0,240	126,09	529,60	3,000	233,83	1008,40
0,010	45,83	191,89	0,300	133,53	561,40	3,400	240,88	1041,70
0,015	54,00	226,00	0,340	137,86	580,10	4,000	250,33	1087,30
0,020	60,09	251,50	0,400	143,62	604,70	5,000	263,92	1154,80
0,025	64,99	272,02	0,450	147,92	623,20	6,000	275,55	1213,60
0,030	69,12	289,31	0,500	151,85	640,30	7,000	285,80	1267,20
0,040	75,88	317,67	0,600	158,84	670,30	8,000	294,98	1317,10
0,050	81,34	340,58	0,700	164,95	697,10	9,000	303,31	1363,70
0,060	85,96	359,97	0,800	174,41	721,10	10,000	310,96	1407,80
0,070	89,96	376,79	0,900	175,35	742,90	13,000	330,81	1531,60
0,080	93,51	391,75	1,000	179,88	762,80	15,000	342,12	1610,00
0,090	96,71	405,23	1,200	187,96	798,40	18,000	356,96	1732,10
0,100	99,63	417,53	1,400	195,04	830,00	20,000	365,71	1826,90
0,120	104,81	439,39	1,600	201,36	858,40	22,000	373,67	2011,20





Výpočet jednotlivých účinností

Tepelná účinnost:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_k}{i_1 - i_{k0}} \quad (2.1)$$

$$\eta_t = \frac{3430 - 2405}{3430 - 121} = 0,3098 = 30,98\%$$

Tepelná účinnost na spojce:

$$\eta_t^s = \eta_t \cdot \eta_m \quad (2.2)$$

$$\eta_t^s = 0,3098 \cdot 0,97 = 0,3005 = 30,05\%$$

Účinnost na svorkách generátoru (alternátoru):

$$\eta_t^e = \eta_t^s \cdot \eta_g \quad (2.3)$$

$$\eta_t^e = 0,3005 \cdot 0,96 = 0,2885 = 28,85\%$$

Celková účinnost elektrárny:

$$\eta_t^{el} = \eta_t^e \cdot \eta_{kot} \cdot \eta_{pot} \quad (2.4)$$

$$\eta_t^{el} = 0,2885 \cdot 0,85 \cdot 0,98 = 0,2403 = 24,03\%$$

Pro úplnost můžeme ještě stanovit následující účinnosti:

Tepelná účinnost ideálního pochodu (skutečný polytropický děj nahradíme adiabatickým):

$$\eta_{\text{tep}} = \frac{i_1 - i_k^{\text{ad}}}{i_1 - i_{k0}} \quad (2.5)$$

$$\eta_{\text{tep}} = \frac{3430 - 1995}{3430 - 121} = 0,4337 = 43,37\%$$

Termodynamická účinnost (účinnost pro případ, kdy by nebylo nutné kondenzovat páru):

$$\eta_{\text{td}} = \frac{i_1 - i_k}{i_1 - i_k^{\text{ad}}} \quad (2.6)$$

$$\eta_{\text{td}} = \frac{3430 - 2405}{3430 - 1995} = 0,7143 = 71,43\%$$

Tepelná bilance elektrárny

Spotřeba páry pro turbínu:

$$M = \frac{3600 \cdot P_{\text{el}}}{(i_1 - i_k) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (\text{t.h}^{-1}; \text{MW}, \text{kJ.kg}^{-1}, -) \quad (2.7)$$

$$M = \frac{3600 \cdot 25}{(3430 - 2405) \cdot 0,96 \cdot 0,97} = 94,29 \text{ t.h}^{-1}$$

Spotřeba tepla pro turbínu:

$$Q = M \cdot (i_1 - i_{k0}) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ.h}^{-1}; \text{t.h}^{-1}, \text{kJ.kg}^{-1}) \quad (2.8)$$

$$Q = 94,29 \cdot (3430 - 121) \cdot 10^3 = 312,01 \cdot 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$$

Spotřeba tepla celková:

$$Q_{\text{el}} = \frac{Q}{\eta_{\text{kot}} \cdot \eta_{\text{pot}}} \quad (\text{kJ.h}^{-1}; \text{kJ.h}^{-1}, -) \quad (2.9)$$

$$Q_{\text{el}} = \frac{312,01 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,98} = 374,56 \cdot 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$$

Spotřeba paliva:

$$M_u = \frac{Q_{\text{el}}}{k_v} \quad (\text{kg.h}^{-1}; \text{kJ.h}^{-1}, \text{kJ.kg}^{-1}) \quad (2.10)$$

$$M_u = \frac{374,56 \cdot 10^6}{19 \cdot 10^3} = 19,71 \cdot 10^3 \text{ kg.h}^{-1}$$

Pokud tyto hodnoty vztáhneme k elektrickému výkonu, získáme měrné hodnoty spotřeby tepla, páry a paliva.

Měrná spotřeba páry pro turbínu:

$$m = \frac{M}{P_{el}} \quad (\text{kg.kWh}^{-1}; \text{kg.h}^{-1}, \text{kW}) \quad (2.11)$$

$$m = \frac{94,29 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} = 3,77 \text{ kg.kWh}^{-1}$$

Měrná spotřeba tepla pro turbínu:

$$q = \frac{Q}{P_{el}} \quad (\text{kJ.kWh}^{-1}; \text{kJ.h}^{-1}, \text{kW}) \quad (2.12)$$

$$q = \frac{312,01 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3} = 12,48 \cdot 10^3 \text{ kJ.kWh}^{-1}$$

Měrná spotřeba tepla celková:

$$q_{el} = \frac{Q_{el}}{P_{el}} \quad (\text{kJ.kWh}^{-1}; \text{kJ.h}^{-1}, \text{kW}) \quad (2.13)$$

$$q = \frac{374,56 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3} = 14,98 \cdot 10^3 \text{ kJ.kWh}^{-1}$$

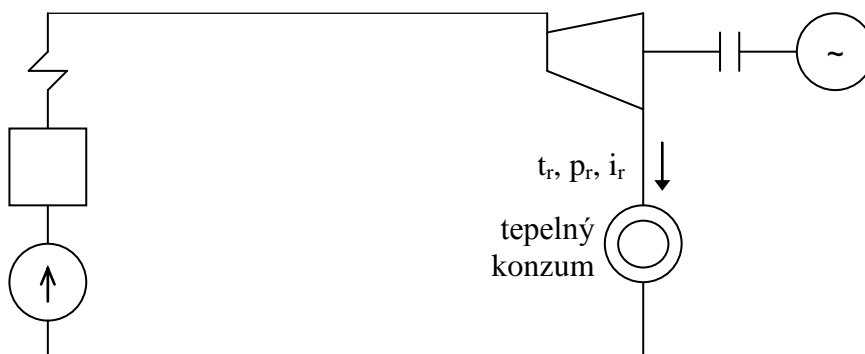
Měrná spotřeba paliva:

$$m_u = \frac{M_u}{P_{el}} \quad (\text{kg.kWh}^{-1}; \text{kg.h}^{-1}, \text{kW}) \quad (2.14)$$

$$m_u = \frac{19,71 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} = 0,79 \text{ kg.kWh}^{-1}$$

Př. 2.2

Vypočítejte tepelnou bilanci a celkovou účinnosti teplárny s protitlakým soustrojím dle naznačeného schématu.



Zadané parametry:	$t_1 = 525 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_1 = 11 \text{ MPa}$
	$t_r = 220 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_r = 0,9 \text{ MPa}$
	$P_{el} = 20 \text{ MW}$	$p_k = 4 \text{ kPa}$
	$\eta_{kot} = 0,85$	$\eta_{pot} = 0,98$
	$\eta_m = 0,95$	$\eta_g = 0,96$
	$k_v = 19 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	

Obdobným způsobem jako v předchozím příkladu určíme $i_1 = 3\,430 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $i_r = 2\,890 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (i_r určíme jako průsečík t_r a p_r), $i_{ko} = 121 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tepelná bilance teplárny

Spotřeba páry pro turbínu:

$$M = \frac{3600 \cdot P_{el}}{(i_1 - i_r) \cdot \eta_m \cdot \eta_g} \quad (\text{t} \cdot \text{h}^{-1}; \text{MW}, \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}, -) \quad (2.15)$$

$$M = \frac{3600 \cdot 20}{(3430 - 2890) \cdot 0,95 \cdot 0,96} = 146,20 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba tepla pro turbínu:

$$Q = M \cdot (i_1 - i_{ko}) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (2.16)$$

$$Q = 146,20 \cdot (3430 - 121) \cdot 10^3 = 483,78 \cdot 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba tepla celková:

$$Q_{tep} = \frac{Q}{\eta_{kot} \cdot \eta_{pot}} \quad (\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}, -) \quad (2.17)$$

$$Q_{tep} = \frac{483,78 \cdot 10^6}{0,85 \cdot 0,98} = 580,77 \cdot 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Spotřeba paliva:

$$M_u = \frac{Q_{tep}}{k_v} \quad (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}; \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (2.18)$$

$$M_u = \frac{580,77 \cdot 10^6}{19 \cdot 10^3} = 30,57 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Množství dodaného tepla:

$$Q_{dod} = M \cdot (i_r - i_{ko}) \cdot 10^3 \quad (\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}; \text{t} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (2.19)$$

$$Q_{dod} = 146,20 \cdot (2890 - 121) = 404,83 \cdot 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$$

Celková účinnost teplárny:

$$\eta_t^{tep} = \frac{3600 \cdot P_{el} + Q_{dod}}{Q_{tep}} \quad (-; \text{kW}, \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}, \text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (2.20)$$

$$\eta_t^{tep} = \frac{3600 \cdot 20 \cdot 10^3 + 404,83 \cdot 10^6}{580,77 \cdot 10^6} = 0,8210 = 82,10\%$$

Př. 2.3

Akumulační vodní elektrárna má instalovaný výkon $P_i = 144$ MW, v průběhu 1 roku vyrobí 359 GWh el. energie. Průměrný spád elektrárny $H = 56$ m, hltnost celé elektrárny $Q = 330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Určete střední hodnotu výkonu, dobu využití instalovaného výkonu, zatěživatel a účinnost celé elektrárny.

Střední hodnota výkon:

$$P_{\text{str}} = \frac{A}{T} \quad (\text{MW; MWh, h}) \quad (2.21)$$
$$P_{\text{str}} = \frac{359 \cdot 10^3}{8760} = 40,98 \text{ MW}$$

Doba využití:

$$\tau_i = \frac{A}{P_i} \quad (\text{h; MWh, MW}) \quad (2.22)$$
$$\tau_i = \frac{359 \cdot 10^3}{144} = 2493,06 \text{ h}$$

Zatěživatel:

$$\xi = \frac{P_{\text{str}}}{P_i} = \frac{\tau_i}{T} \quad (-; \text{MW, MW, h, h}) \quad (2.23)$$
$$\xi = \frac{40,98}{144} = 0,2846$$

Účinnost elektrárny:

$$\eta = \frac{P_i}{9,81 \cdot Q \cdot H} \quad (-; \text{kW, m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}) \quad (2.24)$$
$$\eta = \frac{144 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 330 \cdot 56} = 0,7943 = 79,43\%$$

Př. 2.4

Elektrárna má instalovaný výkon $P_i = 2 \times 12$ MW, průměrný spád $H = 120$ m a průtok jednou turbínou $Q = 12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Určete účinnost turbín, dobu špičkového provozu, je-li průměrný přítok do nádrže $Q_p = 3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($t_p = 24$ h), čas plnění prázdné nádrže, je-li její objem $V = 45 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a energetický ekvivalent, je-li užitečný objem $V_u = 25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ při jednodenní akumulaci.

Účinnost turbín:

$$\eta = \frac{P_i}{9,81 \cdot Q \cdot H} = \frac{12 \cdot 10^3}{9,81 \cdot 12 \cdot 120} = 0,8495 = 84,95\%$$

Doba špičkového provozu:

$$t_s = \frac{t_p \cdot Q_p}{Q_s} \quad (\text{h; h, m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.25)$$
$$t_s = \frac{24 \cdot 3}{2 \cdot 12} = 3 \text{ h}$$

Doba plnění nádrže:

$$t = \frac{V}{3600 \cdot Q_p} \quad (\text{h; m}^3, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.26)$$

$$t = \frac{45 \cdot 10^6}{3600 \cdot 3} = 4166,67 \text{ h}$$

Energetický ekvivalent:

$$E_o = \frac{V_u \cdot H \cdot \eta}{367} \quad (\text{kWh; m}^3, \text{m}, -) \quad (2.27)$$

$$E_o = \frac{25 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 0,85}{367} = 6,95 \cdot 10^6 \text{ kWh}$$

3. PARAMETRY VEDENÍ

Př. 3.1

Teplota venkovního vedení ($\alpha = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) kolísá mezi -20°C a $+35^\circ\text{C}$. O kolik procent je při $+35^\circ\text{C}$ větší odpor než při -20°C ?

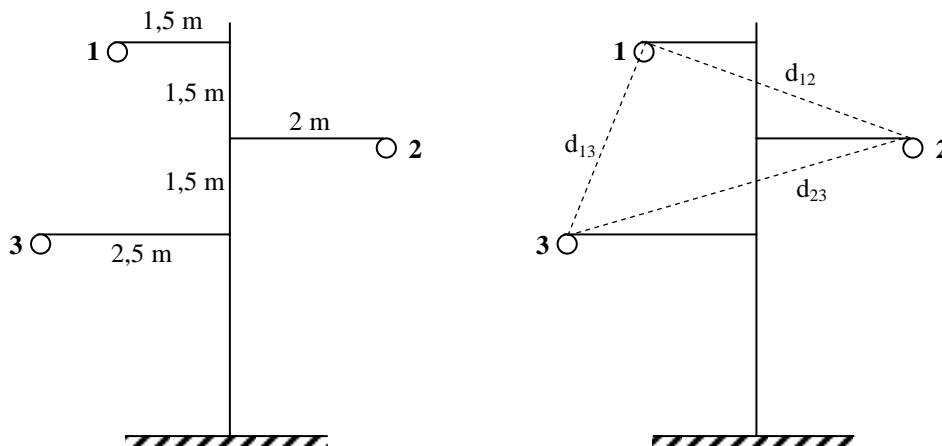
$$R_v = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v) \quad (\Omega; \Omega, \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (3.1)$$

$$\frac{R_{35}}{R_{-20}} = \frac{R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v_1)}{R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta v_2)} = \frac{1 + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot (35 - 20)}{1 + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot (-20 - 20)} = 1,25$$

Odpor je větší při 35°C a 25% oproti -20°C .

Př. 3.2

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



$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05 \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.2)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad (\text{m}) \quad (3.3)$$

$$d_{12} = \sqrt{(1,5 + 2)^2 + 1,5^2} = 3,81 \text{ m}$$

$$d_{13} = \sqrt{(2,5 - 1,5)^2 + (1,5 + 1,5)^2} = 3,16 \text{ m}$$

$$d_{23} = \sqrt{4,5^2 + 1,5^2} = 4,74 \text{ m}$$

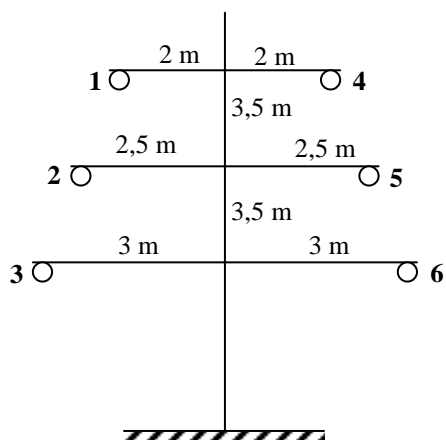
$$d_s = \sqrt[3]{3,81 \cdot 3,16 \cdot 4,74} = 3,85 \text{ m}$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{3,85}{7,5 \cdot 10^{-3}} + 0,05 = 1,435 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_{lk} = \omega \cdot L_k = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,435 \cdot 10^{-3} = 0,451 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Př. 3.3

Určete indukčnost vodičů a střední indukčnost dvojitého trojfázového vedení v naznačeném uspořádání s vodiči AlFe4 95 mm², průměr lana je 14 mm.



$$d_s = \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \cdot \sqrt[3]{d_{15} \cdot d_{16} \cdot d_{26}}}{\sqrt[3]{d_{14} \cdot d_{25} \cdot d_{36}}} \quad (\text{m}) \quad (3.4)$$

$$\begin{array}{lll} d_{12} = 3,54 \text{ m} & d_{23} = 3,54 \text{ m} & d_{15} = 5,70 \text{ m} \\ d_{24} = 5,70 \text{ m} & d_{35} = 6,52 \text{ m} & d_{26} = 6,52 \text{ m} \\ d_{13} = 7,07 \text{ m} & d_{34} = 8,60 \text{ m} & d_{16} = 8,60 \text{ m} \end{array}$$

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{3,54 \cdot 7,07 \cdot 3,54} \cdot \sqrt[3]{5,7 \cdot 8,6 \cdot 6,52}}{\sqrt[3]{4 \cdot 5 \cdot 6}} = 6,18 \text{ m}$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{6,18}{\frac{14 \cdot 10^{-3}}{2}} + 0,05 = 1,405 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

Výpočet lze provést také jinak:

$$\begin{aligned} L_1 = L_4 &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{15} \cdot d_{16}}}{r \cdot d_{14}} + 0,05 \\ L_2 = L_5 &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{21} \cdot d_{23} \cdot d_{24} \cdot d_{26}}}{r \cdot d_{25}} + 0,05 \end{aligned} \quad (3.5)$$

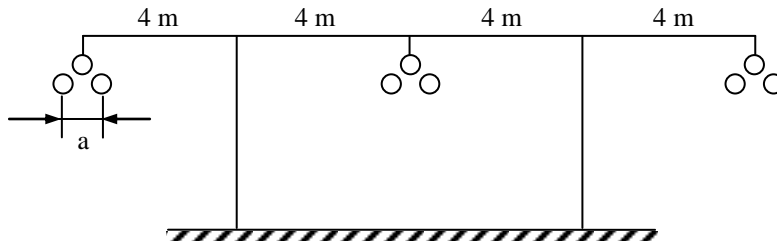
$$L_3 = L_6 = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{d_{31} \cdot d_{32} \cdot d_{34} \cdot d_{35}}}{r \cdot d_{36}} + 0,05$$

$$L_k = \frac{1}{3}(L_1 + L_2 + L_3) \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$$

$$\begin{aligned} L_1 = 1,475 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} & \quad L_2 = 1,333 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} & \quad L_3 = 1,407 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} \\ L_k = 1,405 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1} & & \end{aligned}$$

Př. 3.4

Vypočítejte induktivní reaktanci jednoduchého vedení 400 kV AlFe4 350 mm² dlouhého 300 km, vodiče jedné fáze jsou v symetrickém trojsvazku (n = 3) o vzdálenosti vodičů a = 350 mm, průměr vodiče AlFe4 350 mm² je 27,2 mm.



$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} \quad (\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.6)$$

$$r_e = \sqrt[3]{r \cdot a^2} \quad (\text{m}) \quad (\text{ekvivalentní poloměr}) \quad (3.7)$$

$$d_s = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 16} = 8 \cdot \sqrt[3]{2} = 10,08 \text{ m}$$

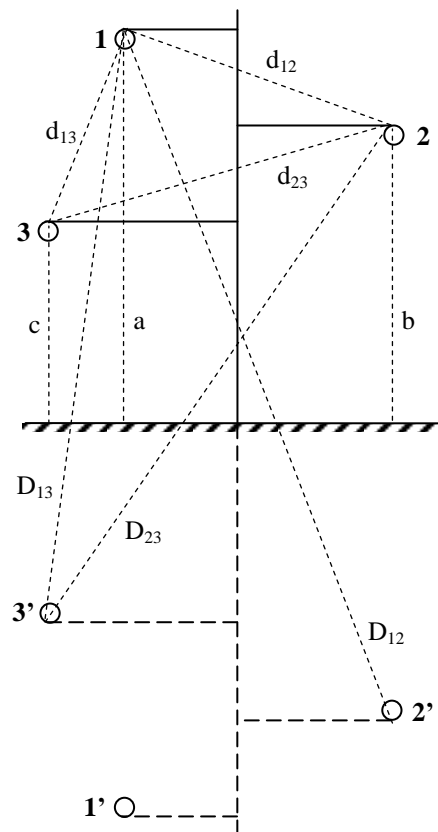
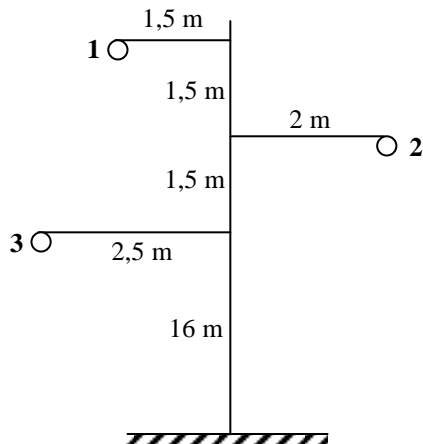
$$r_e = \sqrt[3]{\frac{27,2}{2} \cdot 350^2} = 119 \text{ mm}$$

$$L_k = 0,46 \cdot \log \frac{10,08}{119 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,05}{3} = 0,904 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_L = \omega \cdot L_k \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,904 \cdot 10^{-3} \cdot 300 = 85,2 \Omega$$

Př. 3.5

Určete kapacitu vodiče trojfázového vedení o průměru vodičů 7,5 mm v naznačeném uspořádání. Výška spodního vodiče od země je 16 m.



$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r} \cdot \frac{2m}{D_s}} \quad (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.6)$$

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} \quad (\text{m}) \quad (3.7)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} \quad (\text{m}) \quad (3.8)$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} \quad (\text{m}) \quad (3.9)$$

$$m = \sqrt[3]{16 \cdot 17,5 \cdot 19} = 17,46 \text{ m}$$

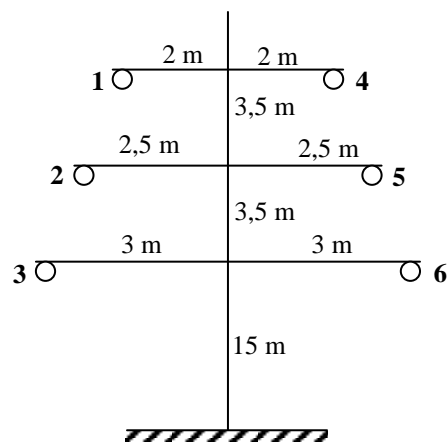
$$d_s = \sqrt[3]{3,81 \cdot 3,16 \cdot 4,74} = 3,85 \text{ m}$$

$$D_s = \sqrt[3]{36,67 \cdot 35,01 \cdot 33,8} = 35,14 \text{ m}$$

$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{3,85}{7,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 17,46}{35,14}} = 8,043 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

Př. 3.6

Určete kapacitu vodiče a nabíjecí výkon vedení 110 kV v naznačeném uspořádání, je-li výška spodního vodiče 15 m nad zemím, délka vedení 80 km, průměr lana 14 mm.



$$m = \sqrt[3]{15 \cdot 18,5 \cdot 22} = 18,28 \text{ m}$$

$$d_s = \frac{\sqrt[3]{3,54 \cdot 7,07 \cdot 3,54} \cdot \sqrt[3]{5,7 \cdot 8,6 \cdot 6,52}}{\sqrt[3]{4 \cdot 5 \cdot 6}} = 6,18 \text{ m}$$

$$D_s = \sqrt[3]{40,5 \cdot 37,01 \cdot 33,5} = 36,89 \text{ m}$$

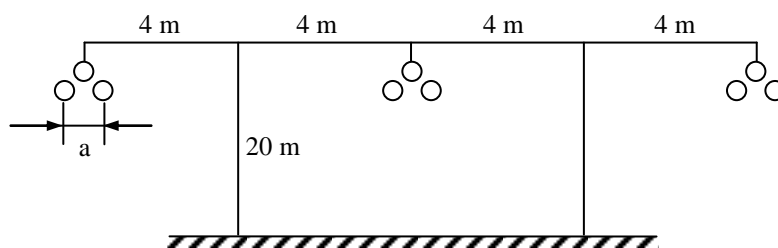
$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{6,18}{14 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 18,28}{36,89}} = 8,226 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,226 \cdot 10^{-9} \cdot 80} = 4836,9 \Omega$$

$$Q_0 = 3 \cdot U_f \cdot I_0 = \frac{U_s^2}{X_C} = \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{4836,9} = 2,5 \text{ M var}$$

Př. 3.7

Určete kapacitu vodiče a nabíjecí proud vedení 400 kV AlFe4 350 mm² s délkou 300 km v naznačeném uspořádání. Výška vodičů nad zemí je 20 m, vodiče jsou v symetrickém trojsvazku o vzdálenosti vodičů a = 350 mm, průměr vodiče AlFe4 350 mm² je 27,2 mm.



$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r_e} \cdot \frac{2m}{D_s}} \quad (\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (3.10)$$

$$m = 20 \text{ m}$$

$$d_s = \sqrt[3]{8 \cdot 8 \cdot 16} = 8 \cdot \sqrt[3]{2} = 10,08 \text{ m}$$

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{27,2}{2} \cdot 350^2} = 119 \text{ mm}$$

$$D_s = \sqrt[3]{40,79 \cdot 43,08 \cdot 40,79} = 41,54 \text{ m}$$

$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{10,08}{119 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2 \cdot 20}{41,54}} = 12,660 \cdot 10^{-3} \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_k \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12,66 \cdot 10^{-9} \cdot 300} = 838,10 \Omega$$

$$I_0 = \frac{U_f}{X_C} = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 838,1} = 275,6 \text{ A}$$

4. USTÁLENÝ CHOD SÍTÍ

Řada průřezů vodičů (mm²):

... 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 210; 240; 300; 350; 400; 450 ...

(V dnešní době se také objevují průřezy vodičů mimo tuto základní řadu.)

Materiálové konstanty:

$$\rho_{Al} = 1/33 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\rho_{Cu} = 1/57 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\gamma_{Al} = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

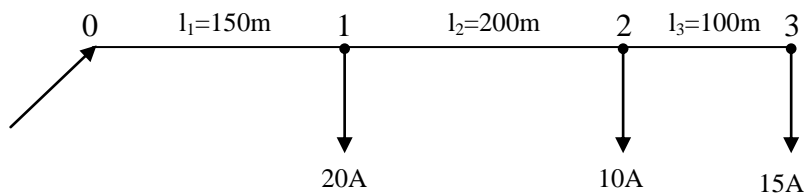
$$\gamma_{Cu} = 8900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Př. 4.1

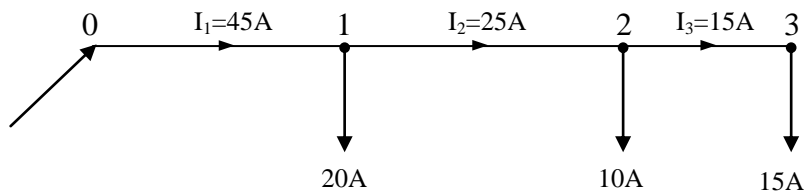
Navrhněte průřez Al vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V}$ ss. Výpočet proveďte pomocí následujících metod:

- metoda konstantního průřezu
- metoda konstantní proudové hustoty
- metoda minima hmotnosti vodivého materiálu

Pro jednotlivé varianty určete ztráty, hmotnost vedení a celkové úbytky napětí.



Rozdělení proudů v jednotlivých úsecích vedení:



Dovolený úbytek napětí:

$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

Metoda konstantního průřezu

$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_i \quad (4.1)$$

$$S = \frac{2}{33 \cdot 11,5} \cdot (150 \cdot 45 + 200 \cdot 25 + 100 \cdot 15) = 69,8 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_i \quad (4.2)$$

$$\Delta U = \frac{2}{33.70} \cdot (150.45 + 200.25 + 100.15) = 11,47 \text{ V}$$

$$\Delta P = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot I_i^2 \quad (4.3)$$

$$\Delta P = \frac{2}{33.70} \cdot (150.45^2 + 200.25^2 + 100.15^2) = 390,7 \text{ W}$$

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot l \cdot S \quad (4.4)$$

$$Q = 2 \cdot 2700 \cdot 450 \cdot 70 \cdot 10^{-6} = 170,1 \text{ kg}$$

Metoda konstantní proudové hustoty

$$\sigma = \frac{I_i}{S_i} = \text{konst.} \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{I}{S} = \frac{\Delta U_{\text{dov}}}{2R \cdot S} = \frac{\Delta U_{\text{dov}}}{2\rho \cdot l} = \frac{11,5 \cdot 33}{2 \cdot 450} = 0,4217 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$S_1 = \frac{I_1}{\sigma} = \frac{45}{0,4217} = 106,7 \text{ mm}^2 \Rightarrow 120 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{I_2}{\sigma} = \frac{25}{0,4217} = 59,3 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \frac{I_3}{\sigma} = \frac{15}{0,4217} = 35,6 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U = 2\rho \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot I_i}{S_i} \quad (4.6)$$

$$\Delta U = \frac{2}{33} \left(\frac{150.45}{120} + \frac{200.25}{70} + \frac{100.15}{35} \right) = 10,34 \text{ V}$$

$$\Delta P = 2\rho \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot I_i^2}{S_i} \quad (4.7)$$

$$\Delta P = \frac{2}{33} \left(\frac{150.45^2}{120} + \frac{200.25^2}{70} + \frac{100.15^2}{35} \right) = 300,6 \text{ W}$$

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot S_i \quad (4.8)$$

$$Q = 2 \cdot 2700 \cdot (150 \cdot 120 + 200 \cdot 70 + 100 \cdot 35) \cdot 10^{-6} = 191,7 \text{ kg}$$

Metoda minima hmotnosti vodivého materiálu

$$Q = \min \Rightarrow V = \min$$

$$S_i = \sqrt{I_i} \cdot \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot \sqrt{I_i} = \sqrt{I_i} \cdot \sqrt{\lambda} \quad (4.9)$$

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2}{33 \cdot 11,5} \cdot (150 \cdot \sqrt{45} + 200 \cdot \sqrt{25} + 100 \cdot \sqrt{15}) = 12,61 \text{ mm}^2 \cdot \text{A}^{-0,5}$$

$$S_1 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_1} = 12,61 \cdot \sqrt{45} = 84,6 \text{ mm}^2 \Rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_2} = 12,61 \cdot \sqrt{25} = 63,1 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \sqrt{\lambda} \cdot \sqrt{I_3} = 12,61 \cdot \sqrt{15} = 48,8 \text{ mm}^2 \Rightarrow 50 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U = 2\rho \sum \frac{l_i \cdot I_i}{S_i} = \frac{2}{33} \left(\frac{150 \cdot 45}{95} + \frac{200 \cdot 25}{70} + \frac{100 \cdot 15}{50} \right) = 10,45 \text{ V}$$

$$\Delta P = 2\rho \cdot \sum \frac{l_i \cdot I_i^2}{S_i} = \frac{2}{33} \left(\frac{150 \cdot 45^2}{95} + \frac{200 \cdot 25^2}{70} + \frac{100 \cdot 15^2}{50} \right) = 329,3 \text{ W}$$

$$Q = 2 \cdot \gamma \cdot \sum l_i \cdot S_i = 2 \cdot 2700 \cdot (150 \cdot 95 + 200 \cdot 70 + 100 \cdot 50) \cdot 10^{-6} = 179,6 \text{ kg}$$

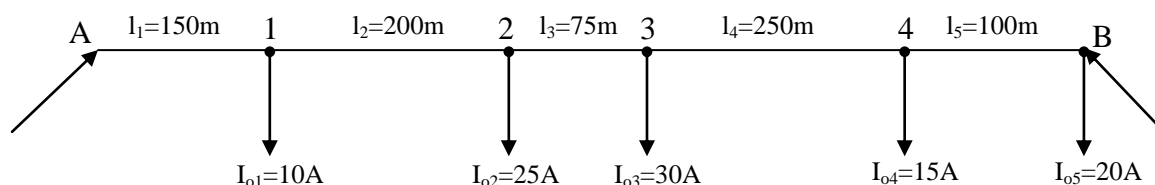
V následující tabulce je provedeno srovnání výsledků pro případ nezaokrouhlených průřezů:

	ΔU (V)	ΔP (W)	Q (kg)
S = konst.	11,5	391,8	169,7
σ = konst.	11,5	338,6	169,7
Q = min	11,5	365,6	163,0

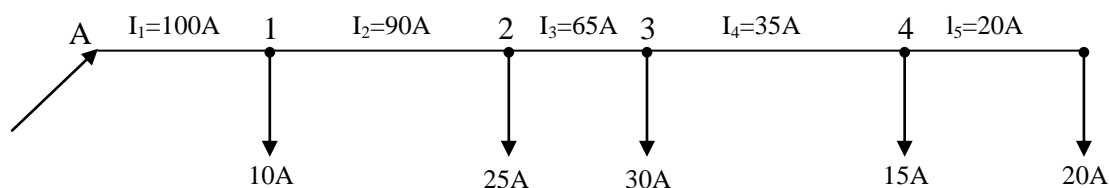
V dalších příkladech bude pro návrh hlavního vedení používána metoda konstantního průřezu.

Př. 4.2

Navrhněte průřez Cu vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V}$ ss. Návrh proveďte pro vedení napájené z jedné a ze dvou stran. Určete skutečný úbytek napětí a ztráty.



Vedení napájené ze strany A



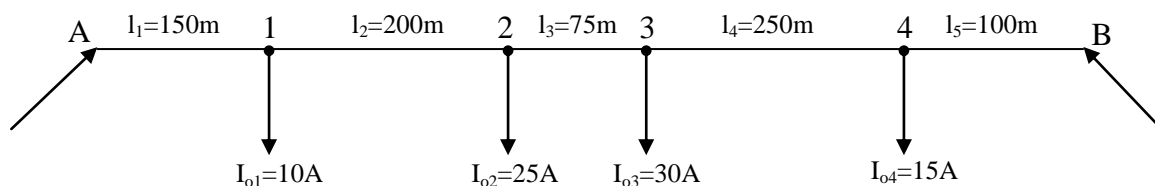
$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 11,5} \cdot (150 \cdot 100 + 200 \cdot 90 + 75 \cdot 65 + 250 \cdot 35 + 100 \cdot 20) = 148,4 \text{ mm}^2 \Rightarrow 150 \text{ mm}^2$$

$$\Delta U = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 150} \cdot (150 \cdot 100 + 200 \cdot 90 + 75 \cdot 65 + 250 \cdot 35 + 100 \cdot 20) = 11,37 \text{ V}$$

$$\Delta P = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_i^2 = \frac{2}{57 \cdot 150} \cdot (150 \cdot 100^2 + 200 \cdot 90^2 + 75 \cdot 65^2 + 250 \cdot 35^2 + 100 \cdot 20^2) = 884,9 \text{ W}$$

Vedení napájené ze dvou stran ($U_A = U_B$)



Odběr I_{05} v tomto případě již neuvažujeme, protože se jedná o napájecí bod, ve kterém předpokládáme nulový úbytek napětí od tohoto odběru.

Napájecí proudy určíme z rovnosti proudových momentů (pro $S = \text{konst.}$)

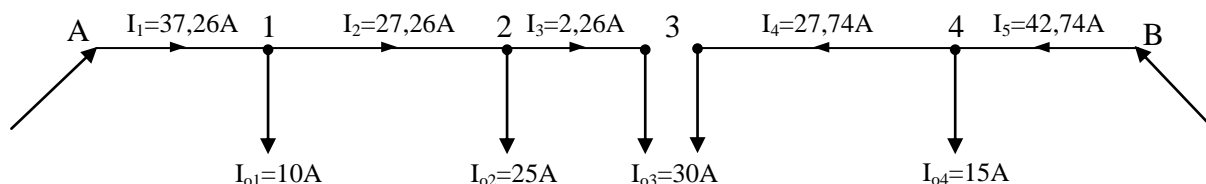
$$lI_A = \sum_B l_{oi} \cdot I_{oi} \quad (4.10)$$

$$I_A = \frac{\sum_B l_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{100 \cdot 15 + 350 \cdot 30 + 425 \cdot 25 + 625 \cdot 10}{775} = 37,26 \text{ A}$$

$$I_B = \frac{\sum_A l_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \sum I_{oi} - I_A = 80 - 37,26 = 42,74 \text{ A}$$

(l_{oi} je vzdálenost odběru I_{oi} od příslušného napáječe)

Vedení nyní rozdělíme na dvě vedení napájené z jedné strany.



$$S_A = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57,11,5} \cdot (150 \cdot 37,26 + 200 \cdot 27,26 + 75 \cdot 2,26) = 34,2 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

$$S_B = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57,11,5} \cdot (100 \cdot 42,74 + 250 \cdot 27,74) = 34,2 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

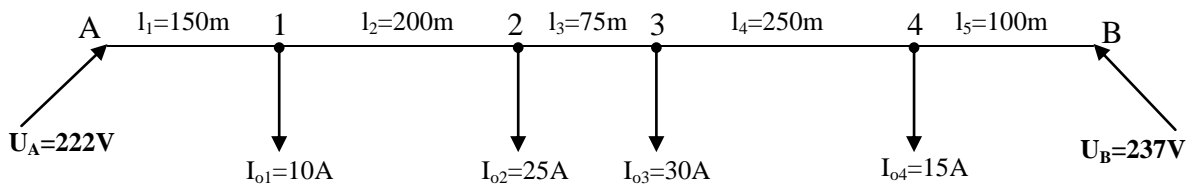
$$\Delta U = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57,35} \cdot (150 \cdot 37,26 + 200 \cdot 27,26 + 75 \cdot 2,26) = 11,24 \text{ V}$$

$$\Delta P = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_i^2 = \frac{2}{57,35} \cdot (150 \cdot 37,26^2 + 200 \cdot 27,26^2 + 75 \cdot 2,26^2 + 250 \cdot 27,74^2 + 100 \cdot 42,74^2) = 734,1 \text{ W}$$

Př. 4.3

Vedení podle příkladu 4.2 je napájeno ze dvou stran, napětí napáječů jsou však různá. Navrhněte průřez tohoto vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V ss}$, tj. $U_{\text{dov}} = 218,5 \text{ V}$.

Podle příkladu 4.2 jsou při stejných napájecích napětích proudy $I_A = 37,26\text{A}$, $I_B = 42,74\text{A}$ a navržený průřez vedení $S = 35\text{ mm}^2$.



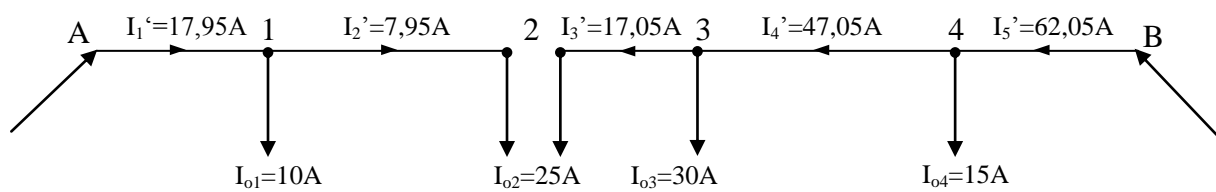
V důsledku rozdílných napětí teče vedením vyrovnávací proud:

$$I_v = \frac{U_B - U_A}{R} = \frac{(U_B - U_A)S}{2\rho l} \quad (U_B > U_A) \quad (4.11)$$

$$I_v = \frac{U_B - U_A}{R} = \frac{(U_B - U_A)S}{2\rho l} = \frac{(237 - 222) \cdot 35 \cdot 57}{2 \cdot 775} = 19,31\text{A}$$

$$I_A' = I_A - I_v = 37,26 - 19,31 = 17,95\text{A}$$

$$I_B' = I_B + I_v = 42,74 + 19,31 = 62,05\text{A}$$



$$\Delta U = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum I_i \cdot I_i = \frac{2}{57,35} \cdot (150 \cdot 17,95 + 200 \cdot 7,95) = 4,3\text{V}$$

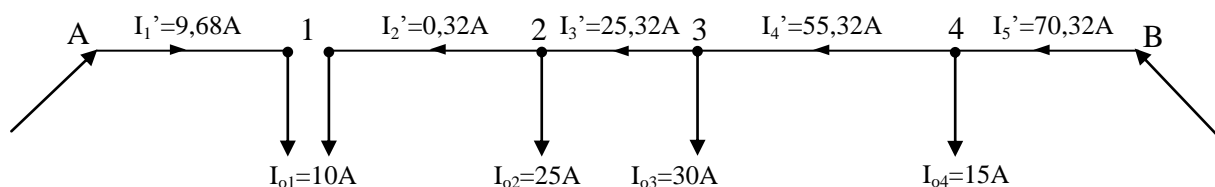
$$U_{\min} = 222 - 4,3 = 217,7\text{V} < U_{\text{dov}}$$

Zvětšíme průřez vedení na 50 mm^2 .

$$I_v = \frac{U_B - U_A}{R} = \frac{(U_B - U_A)S}{2\rho l} = \frac{(237 - 222) \cdot 50 \cdot 57}{2 \cdot 775} = 27,58\text{A}$$

$$I_A' = I_A - I_v = 37,26 - 27,58 = 9,68\text{A}$$

$$I_B' = I_B + I_v = 42,74 + 27,58 = 70,32\text{A}$$

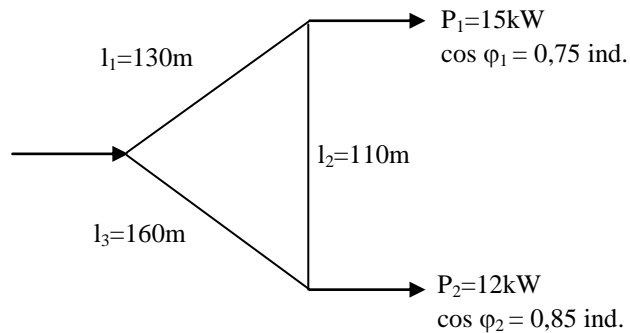


$$\Delta U = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum I_i \cdot I_i = \frac{2}{57,50} \cdot (150 \cdot 9,68) = 1,02\text{V}$$

$$U_{\min} = 222 - 1,02 = 220,98\text{V} > U_{\text{dov}}$$

Př. 4.4

Navrhněte průřez Cu vedení 3 x 400 / 230 V tak, aby úbytek napětí nepřekročil 5%. Respektujte reaktanci vedení $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Určete ztráty.



$$\Delta U_{\text{s dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 400 = 20 \text{ V}$$

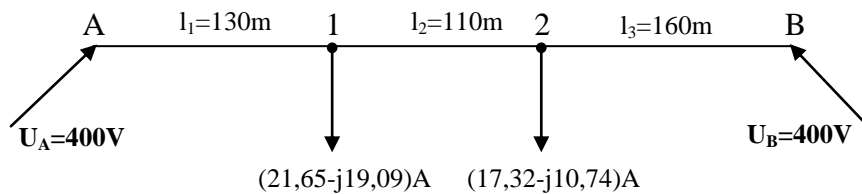
$$I_{\epsilon 1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 21,65 \text{ A}$$

$$I_{j1} = I_{\epsilon 1} \cdot \text{tg} \varphi_1 = 21,65 \cdot \text{tg} 41,41^\circ = 19,09 \text{ A}$$

$$I_{\epsilon 2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{12 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 17,32 \text{ A}$$

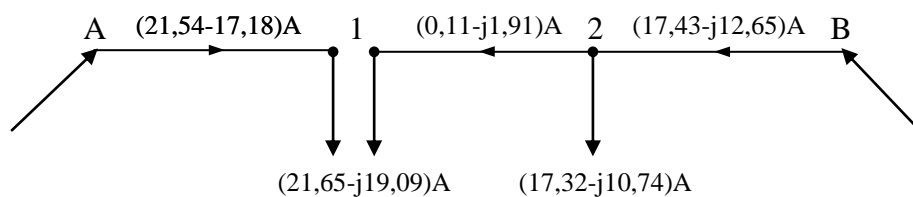
$$I_{j2} = I_{\epsilon 2} \cdot \text{tg} \varphi_2 = 17,32 \cdot \text{tg} 31,79^\circ = 10,73 \text{ A}$$

V místě napájení vedení rozdělíme a získáme tak vedení napájené ze dvou stran.



$$I_A = \frac{\sum_B I_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{160 \cdot (17,32 - j10,74) + 270 \cdot (21,65 - j19,09)}{400} = (21,54 - j17,18) \text{ A}$$

$$I_B = \frac{\sum_A I_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{130 \cdot (21,65 - j19,09) + 240 \cdot (17,32 - j10,74)}{400} = (17,43 - j12,65) \text{ A}$$



Pro sdružený úbytek napětí platí:

$$\Delta U_s = \frac{\sqrt{3}\rho}{S} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\xi i} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{j i} \quad (4.12)$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\xi i}}{\Delta U_{s \text{ dov}} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{j i}} = \frac{\rho \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\xi i}}{\Delta U_{f \text{ dov}} - X_k \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{j i}} \quad (4.13)$$

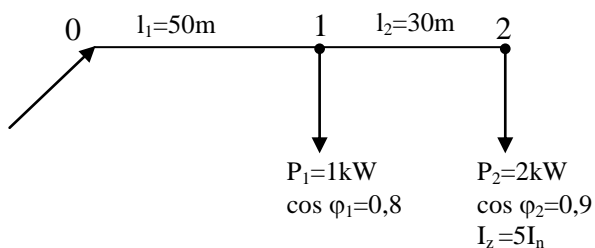
$$S = \frac{1}{57} \cdot \frac{130 \cdot 21,54}{\frac{20}{\sqrt{3}} - 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (130 \cdot 17,18)} = 4,5 \text{ mm}^2 \Rightarrow 6 \text{ mm}^2$$

$$\Delta P = 3 \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_i^2 \quad (4.14)$$

$$\Delta P = \frac{3}{57,6} \cdot [130 \cdot (21,54^2 + 17,18^2) + 110 \cdot (0,11^2 + 1,91^2) + 160 \cdot (17,43^2 + 12,65^2)] = 1520 \text{ W}$$

Př. 4.5

Navrhněte průřez Cu vedení $U_n = 230 \text{ V}$ tak, aby úbytek napětí při ustáleném chodu motorů nepřekročil 5% a při rozběhu většího motoru 10%. Reaktanci vedení zanedbejte. Určete ztráty.



$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

$$\Delta U_{\text{zdov}} = \frac{\Delta u_z}{100} \cdot U_n = \frac{10}{100} \cdot 230 = 23 \text{ V}$$

$$I_{\xi 01} = \frac{P_1}{U_n} = \frac{1000}{230} = 4,35 \text{ A}$$

$$I_{j01} = I_{\xi 01} \cdot \text{tg} \varphi_1 = 4,35 \cdot \text{tg} 36,87^\circ = 3,26 \text{ A}$$

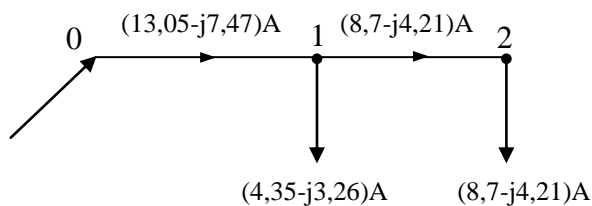
$$I_{o1} = \frac{I_{\xi 01}}{\cos \varphi_1} = \frac{4,35}{0,8} = 5,43 \text{ A}$$

$$I_{\xi 02} = \frac{P_2}{U_n} = \frac{2000}{230} = 8,7 \text{ A}$$

$$I_{j02} = I_{\xi 02} \cdot \text{tg} \varphi_2 = 8,7 \cdot \text{tg} 25,84^\circ = 4,21 \text{ A}$$

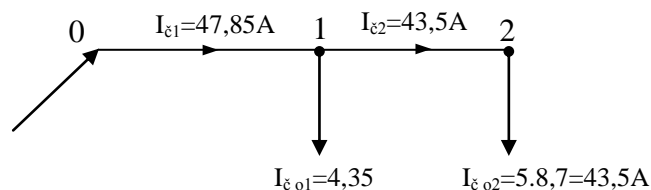
$$I_{o2} = \frac{I_{\xi 02}}{\cos \varphi_2} = \frac{8,7}{0,9} = 9,67 \text{ A}$$

Zanedbáním reaktance vedení považujeme také úbytek napětí způsobený jalovým proudem za nulový.



$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum I_i \cdot I_{ci} = \frac{2}{57,11,5} \cdot (50 \cdot 13,05 + 30 \cdot 8,7) = 2,79 \text{ mm}^2 \Rightarrow 4 \text{ mm}^2$$

Úbytek napětí při ustáleném chodu motoru č. 1 a rozběhu motoru č. 2:



$$\Delta U_z = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum I_i \cdot I_{ci} = \frac{2}{57,4} \cdot (50 \cdot 47,85 + 30 \cdot 43,5) = 32,43 \text{ V} > \Delta U_{z\text{dov}}$$

Zvětšíme průřez vedení na 6 mm².

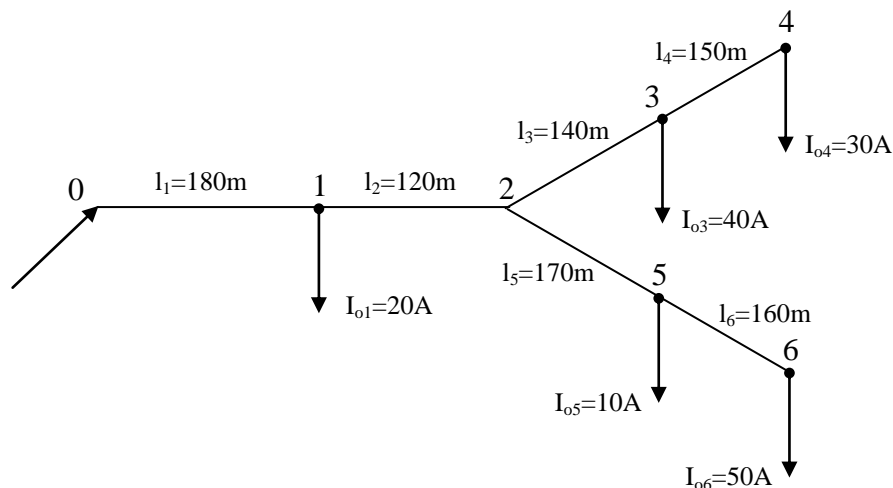
$$\Delta U_z = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum I_i \cdot I_{ci} = \frac{2}{57,6} \cdot (50 \cdot 47,85 + 30 \cdot 43,5) = 21,62 \text{ V} < \Delta U_{z\text{dov}}$$

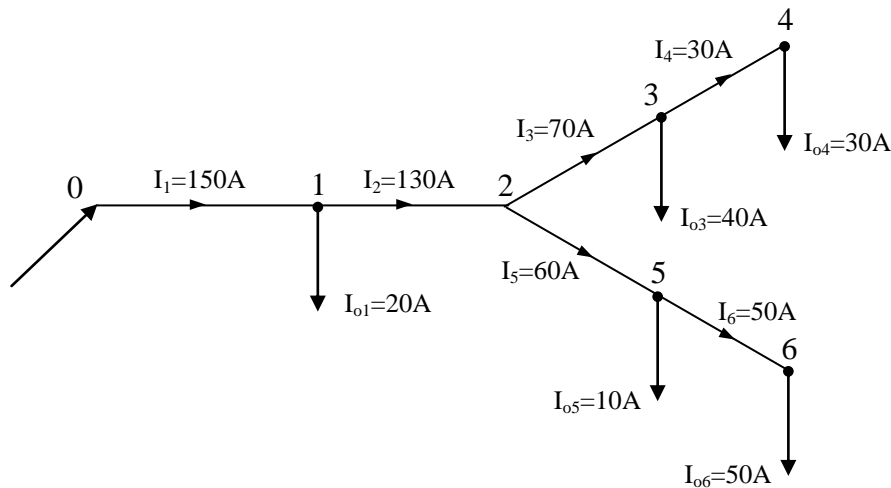
$$\Delta P = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum I_i \cdot I_i^2 = \frac{2}{57,6} \cdot [50 \cdot (13,05^2 + 7,47^2) + 30 \cdot (8,7^2 + 4,21^2)] = 82,5 \text{ W}$$

Pozn.: Při návrhu vedení uvažujeme vždy nejhorší stav, který může v síti nastat. Proto v tomto případě volíme 5-ti násobek činného proudu bez ohledu na skutečný stav při rozběhu motoru.

Př. 4.6

Metodou hlavního vedení navrhnete průřez Cu vedení $U_n = 500 \text{ V}$ ss tak, aby úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovité hodnoty. Dále určete ztráty na vedení.





Hlavní vedení bude to, které bude mít větší proudový moment.

$$\sum_{2-4} l_{oi} I_{oi} = 140 \cdot 40 + 290 \cdot 30 = 14300 \text{ A}\cdot\text{m}$$

$$\sum_{2-6} l_{oi} I_{oi} = 170 \cdot 10 + 330 \cdot 50 = 18200 \text{ A}\cdot\text{m}$$

Hlavní vedení je 0-1-2-5-6:

$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 500 = 25 \text{ V}$$

$$S_{0-2-6} = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 25} (180 \cdot 150 + 120 \cdot 130 + 170 \cdot 60 + 160 \cdot 50) = 85,3 \text{ mm}^2 \Rightarrow 95 \text{ mm}^2$$

Dimenzování odbočky 2-3-4:

$$\Delta U_{0-2} = \frac{2\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 95} (180 \cdot 150 + 120 \cdot 130) = 15,73 \text{ V}$$

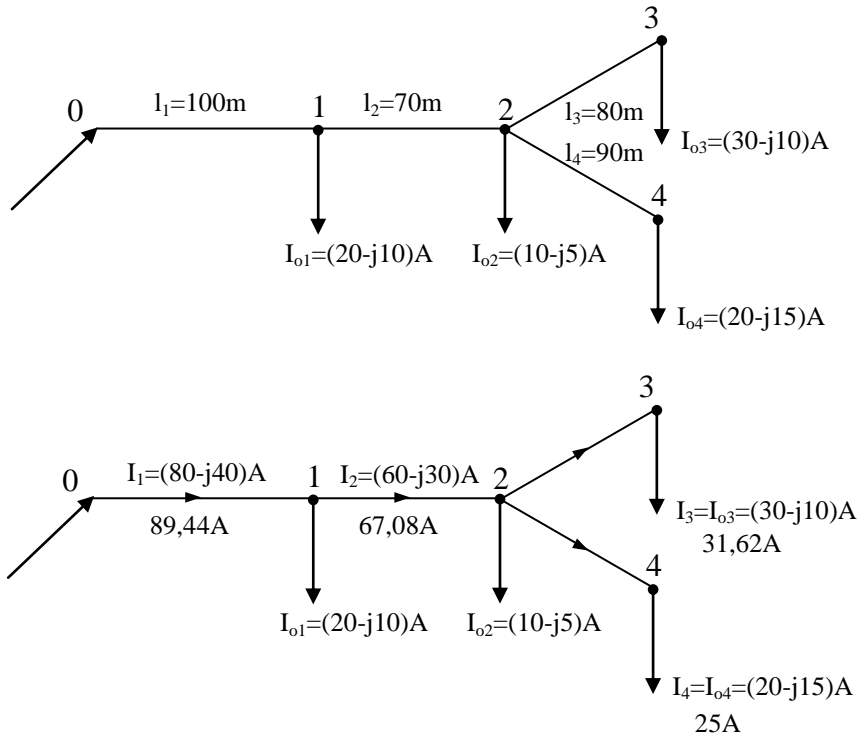
$$\Delta U_{\text{dov}2-4} = \Delta U_{\text{dov}} - \Delta U_{0-2} = 25 - 15,73 = 9,27 \text{ V}$$

$$S_{2-4} = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}2-4}} \cdot \sum l_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 9,27} (140 \cdot 70 + 150 \cdot 30) = 54,1 \text{ mm}^2 \Rightarrow 70 \text{ mm}^2$$

$$\Delta P = 2\rho \cdot \sum \frac{l_i \cdot I_i^2}{S_i} = \frac{2}{57} \left(\frac{180 \cdot 150^2 + 120 \cdot 130^2 + 170 \cdot 60^2 + 160 \cdot 50^2}{95} + \frac{140 \cdot 70^2 + 150 \cdot 30^2}{70} \right) = 3030 \text{ W}$$

Př. 4.7

Metodou hlavního vedení navrhnete průřez Cu vedení 3 x 400 / 230 V tak, aby úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovité hodnoty, $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Dále určete ztráty na vedení.



Hlavní vedení bude to, které bude mít větší proudový moment.

$$\sum_{2-3} l_{oi} I_{oi} = 80 \cdot \sqrt{30^2 + 10^2} = 2530 \text{ A.m}$$

$$\sum_{2-4} l_{oi} I_{oi} = 90 \cdot \sqrt{20^2 + 15^2} = 2250 \text{ A.m}$$

Hlavní vedení je 0-1-2-3:

$$\Delta U_{\text{sdov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 400 = 20 \text{ V}$$

$$S_{0-2-3} = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\xi i}}{\Delta U_{\text{sdov}} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{j i}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{57} \cdot (100 \cdot 80 + 70 \cdot 60 + 80 \cdot 30)}{20 - \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (100 \cdot 40 + 70 \cdot 30 + 80 \cdot 10)} = 27 \text{ mm}^2 \Rightarrow 35 \text{ mm}^2$$

Dimenzování odbočky 2-4:

$$\Delta U_{0-2} = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho}{S} \cdot \sum l_i \cdot I_{i\xi} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l_i \cdot I_{ij} =$$

$$= \sqrt{3} \cdot \frac{1}{57,35} \cdot (100 \cdot 80 + 70 \cdot 60) + \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (100 \cdot 40 + 70 \cdot 30) = 13,76 \text{ V}$$

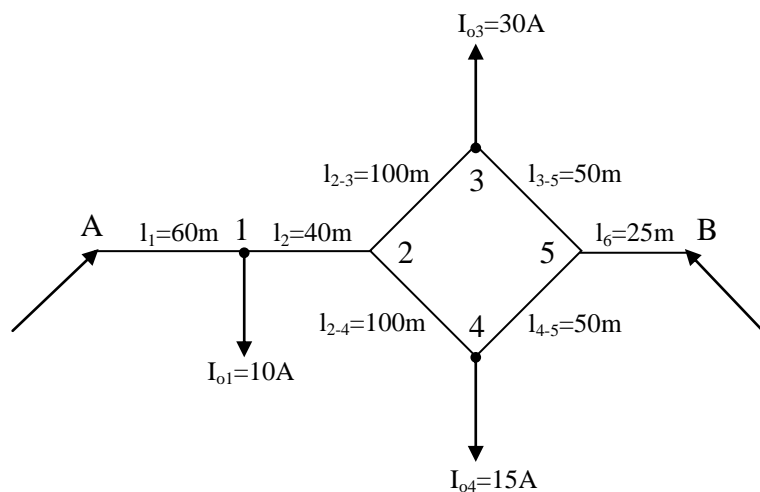
$$\Delta U_{\text{dov}2-4} = \Delta U_{\text{sdov}} - \Delta U_{0-2} = 20 - 13,76 = 6,24 \text{ V}$$

$$S_{2-4} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{57} \cdot (90 \cdot 20)}{6,24 - \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot (90 \cdot 15)} = 9,88 \text{ mm}^2 \Rightarrow 10 \text{ mm}^2$$

$$\Delta P = 3 \cdot \rho \cdot \sum \frac{l_i \cdot I_i^2}{S_i} = \frac{3}{57} \left(\frac{100 \cdot 89,44^2 + 70 \cdot 67,08^2 + 80 \cdot 31,62^2}{35} + \frac{90 \cdot 25^2}{10} \right) = 2,09 \text{ kW}$$

Př. 4.8

Navrhněte průřez Cu vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V ss}$. Oba napáječe mají jmenovitá napětí.



$$I_{2-3-5} = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{\sum l_i} = \frac{50 \cdot 30}{150} = 10 \text{ A} \quad I_{5-3-2} = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{\sum l_i} = \frac{100 \cdot 30}{150} = 20 \text{ A}$$

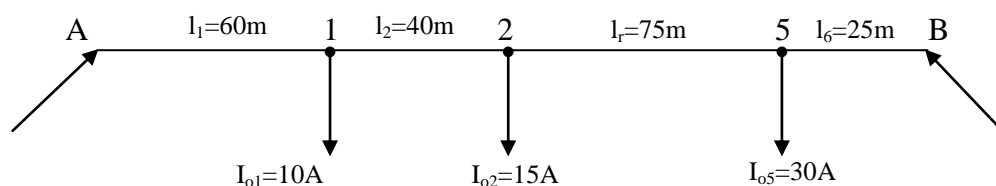
$$I_{2-4-5} = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{\sum l_i} = \frac{50 \cdot 15}{150} = 5 \text{ A} \quad I_{5-4-2} = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{\sum l_i} = \frac{100 \cdot 15}{150} = 10 \text{ A}$$

$$I_{2-5} = I_{o2} = I_{2-3-5} + I_{2-4-5} = 10 + 5 = 15 \text{ A}$$

$$I_{5-2} = I_{o5} = I_{5-3-2} + I_{5-4-2} = 20 + 10 = 30 \text{ A}$$

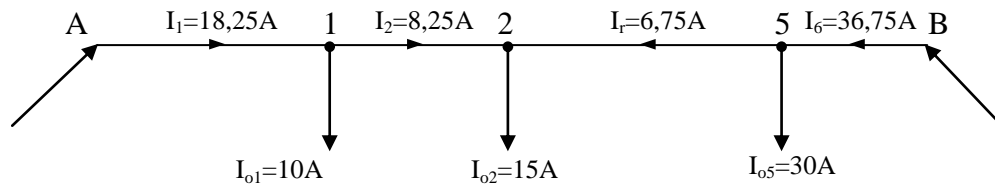
Vedení 2-3-5 a 2-4-5 nahradíme vedením s redukovanou délkou l_r :

$$l_r = \frac{l_{2-3-5} \cdot l_{2-4-5}}{l_{2-3-5} + l_{2-4-5}} = \frac{150 \cdot 150}{150 + 150} = 75 \text{ m}$$



$$I_A = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{25 \cdot 30 + 100 \cdot 15 + 140 \cdot 10}{200} = 18,25 \text{ A}$$

$$I_B = \frac{\sum l_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{60 \cdot 10 + 100 \cdot 15 + 175 \cdot 30}{200} = 36,75 \text{ A}$$



$$\frac{I_{r5-3-2}}{I_{r5-4-2}} = \frac{I_{2-4-5}}{I_{2-3-5}} \Rightarrow I_{r5-3-2} = I_{r5-4-2} \cdot \frac{I_{2-4-5}}{I_{2-3-5}} = (I_r - I_{r5-3-2}) \cdot \frac{I_{2-4-5}}{I_{2-3-5}}$$

$$I_{r5-3-2} = \frac{I_r \cdot I_{2-4-5}}{I_{2-3-5} + I_{2-4-5}} = \frac{6,75 \cdot 150}{150 + 150} = 3,375 \text{ A}$$

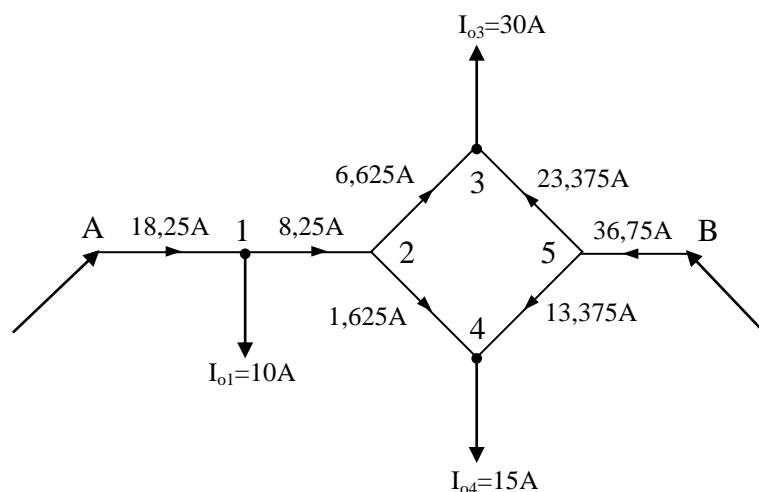
$$I_{r5-4-2} = \frac{I_r \cdot I_{2-3-5}}{I_{2-3-5} + I_{2-4-5}} = \frac{6,75 \cdot 150}{150 + 150} = 3,375 \text{ A}$$

$$I'_{2-3-5} = I_{2-3-5} - I_{r5-3-2} = 10 - 3,375 = 6,625 \text{ A}$$

$$I'_{5-3-2} = I_{5-3-2} + I_{r5-3-2} = 20 + 3,375 = 23,375 \text{ A}$$

$$I'_{2-4-5} = I_{2-4-5} - I_{r5-4-2} = 5 - 3,375 = 1,625 \text{ A}$$

$$I'_{5-4-2} = I_{5-4-2} + I_{r5-4-2} = 10 + 3,375 = 13,375 \text{ A}$$



Místo maximálního úbytku může být v bodě 3 nebo 4. V těchto místech vedení rozdělíme a budeme řešit jako dvě vedení napájená z jedné strany s odbočkou viz př. 4.6. V tomto případě však budeme pro celé vedení volit jednotný průřez.

$$\sum_{A-3} I_{oi} I_{oi} = 60 \cdot 10 + 100 \cdot 1,625 + 200 \cdot 6,625 = 2087,5 \text{ A.m}$$

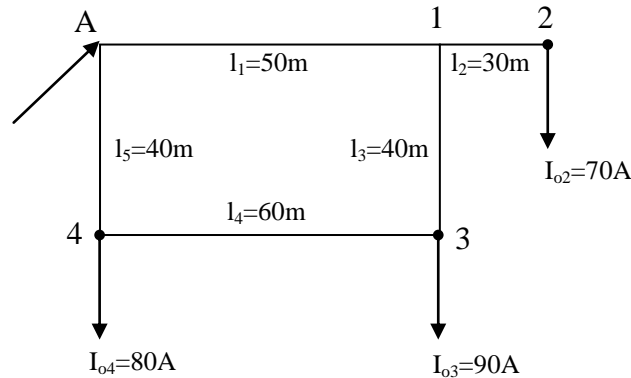
$$\sum_{A-4} I_{oi} I_{oi} = 60 \cdot 10 + 100 \cdot 6,625 + 200 \cdot 1,625 = 1587,5 \text{ A.m}$$

$$\Delta U_{dov} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

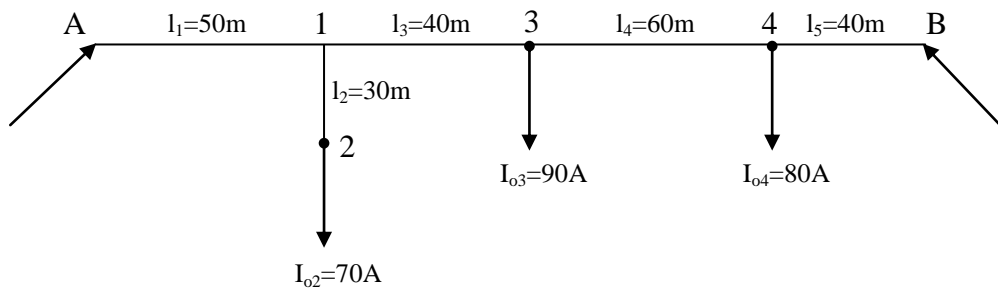
$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{dov}} \cdot \sum_{A-3} I_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 11,5} \cdot (60 \cdot 18,25 + 40 \cdot 8,25 + 100 \cdot 6,625) = 6,37 \text{ mm}^2 \Rightarrow 10 \text{ mm}^2$$

Př. 4.9

Navrhněte průřez Cu vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V ss}$.

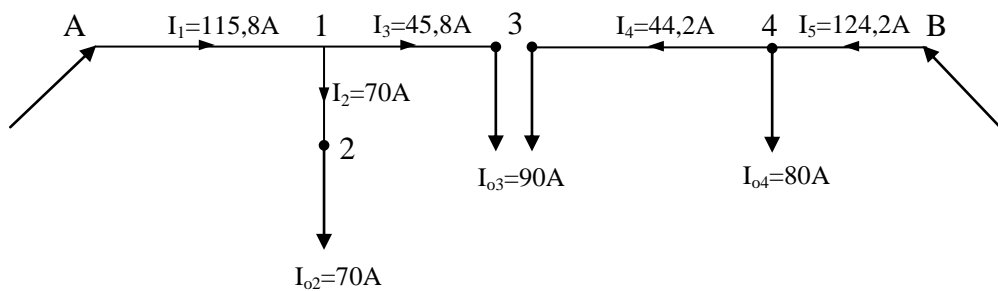


V místě napájení vedení rozdělíme a získáme tak vedení napájené ze dvou stran.



$$I_A = \frac{\sum_B I_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{40 \cdot 80 + 100 \cdot 90 + 140 \cdot 70}{190} = 115,8 \text{ A}$$

$$I_B = \frac{\sum_A I_{oi} \cdot I_{oi}}{l} = \frac{50 \cdot 70 + 90 \cdot 90 + 150 \cdot 80}{190} = 124,2 \text{ A}$$



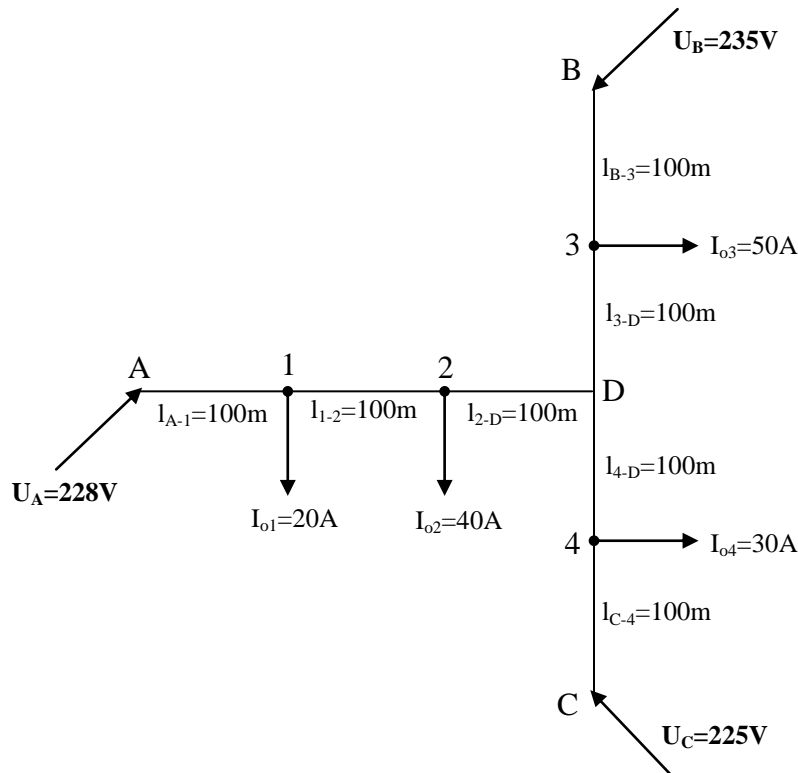
$$\sum_{1-3} I_{oi} I_{oi} = 40 \cdot 45,8 = 1832 \text{ A}\cdot\text{m} \quad \sum_{1-2} I_{oi} I_{oi} = 30 \cdot 70 = 2100 \text{ A}\cdot\text{m}$$

$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum_{A-2} I_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 11,5} \cdot (50 \cdot 115,8 + 30 \cdot 70) = 24,07 \text{ mm}^2 \Rightarrow 25 \text{ mm}^2$$

Př. 4.10

Navrhněte průřez Cu vedení tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého napětí $U_n = 230 \text{ V ss}$.



D je společný bod se stejným napětím, musí platit rovnost momentů proudu k tomuto bodu:

$$\sum_D I_a \cdot l_a - I'_A \cdot l_A = \sum_D I_b \cdot l_b - I'_B \cdot l_B = \sum_D I_c \cdot l_c - I'_C \cdot l_C$$

$$40 \cdot 100 + 20 \cdot 200 - I'_A \cdot 300 = 50 \cdot 100 - I'_B \cdot 200$$

$$40 \cdot 100 + 20 \cdot 200 - I'_A \cdot 300 = 30 \cdot 100 - I'_C \cdot 200$$

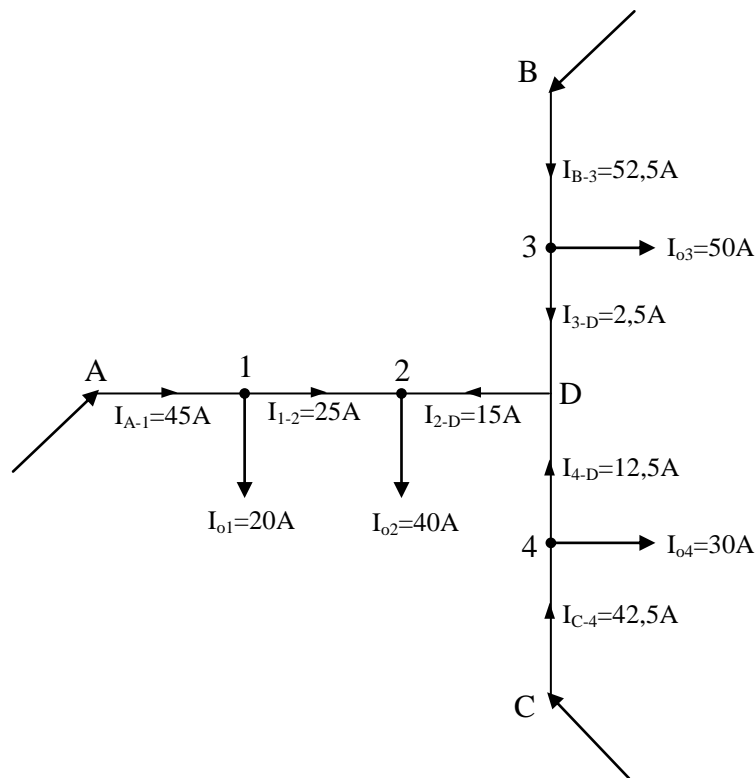
$$I'_A + I'_B + I'_C = \sum I_{oi} = 20 + 40 + 50 + 30 = 140 \text{ A}$$

$$I'_A = 45 \text{ A} \quad I'_B = 52,5 \text{ A} \quad I'_C = 42,5 \text{ A}$$

Dále pro vyrovnávací proudy můžeme podle 1. Kirchhoffova zákona zapsat:

$$\frac{U_A - U_D}{l_A} + \frac{U_B - U_D}{l_B} + \frac{U_C - U_D}{l_C} = 0$$

$$U_D = \frac{\frac{U_A}{l_A} + \frac{U_B}{l_B} + \frac{U_C}{l_C}}{\frac{1}{l_A} + \frac{1}{l_B} + \frac{1}{l_C}} = \frac{\frac{228}{300} + \frac{235}{200} + \frac{225}{200}}{\frac{1}{300} + \frac{1}{200} + \frac{1}{200}} = 229,5 \text{ V}$$



$$\Delta U_{\text{dov}} = \frac{\Delta u}{100} \cdot U_n = \frac{5}{100} \cdot 230 = 11,5 \text{ V}$$

$$S = \frac{2\rho}{\Delta U_{\text{dov}}} \cdot \sum_{A-2} I_i \cdot I_i = \frac{2}{57 \cdot 11,5} \cdot (100 \cdot 45 + 100 \cdot 25) = 21,4 \text{ mm}^2 \Rightarrow 25 \text{ mm}^2$$

Vyrovnávací proudy:

$$I_{\text{AV}} = \frac{U_A - U_D}{R_A} = \frac{228 - 229,5}{\frac{2}{57} \cdot \frac{300}{25}} = -3,56 \text{ A}$$

$$I_{\text{BV}} = \frac{U_B - U_D}{R_B} = \frac{235 - 229,5}{\frac{2}{57} \cdot \frac{200}{25}} = 19,59 \text{ A}$$

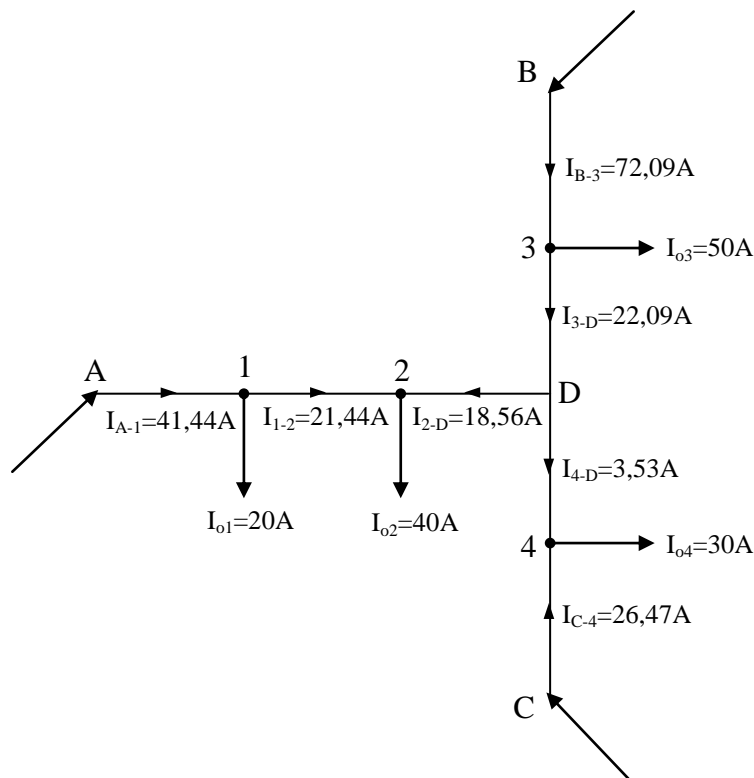
$$I_{\text{CV}} = \frac{U_C - U_D}{R_C} = \frac{225 - 229,5}{\frac{2}{57} \cdot \frac{200}{25}} = -16,03 \text{ A}$$

Skutečné napájecí proudy:

$$I_A = I'_A + I_{\text{AV}} = 45 - 3,56 = 41,44 \text{ A}$$

$$I_B = I'_B + I_{\text{BV}} = 52,5 + 19,59 = 72,09 \text{ A}$$

$$I_C = I'_C + I_{\text{CV}} = 42,5 - 16,03 = 26,47 \text{ A}$$



Místo maximálního úbytku může být v bodě 2 nebo 4:

$$U_2 = U_A - \frac{2\rho}{S} \cdot \sum_{A-2} I_i \cdot I_i = 228 - \frac{2}{57,25} \cdot (100 \cdot 41,44 + 100 \cdot 21,44) = 219,17 \text{ V}$$

$$U_4 = U_C - \frac{2\rho}{S} \cdot \sum_{C-4} I_i \cdot I_i = 225 - \frac{2}{57,25} \cdot (100 \cdot 26,47) = 221,28 \text{ V}$$

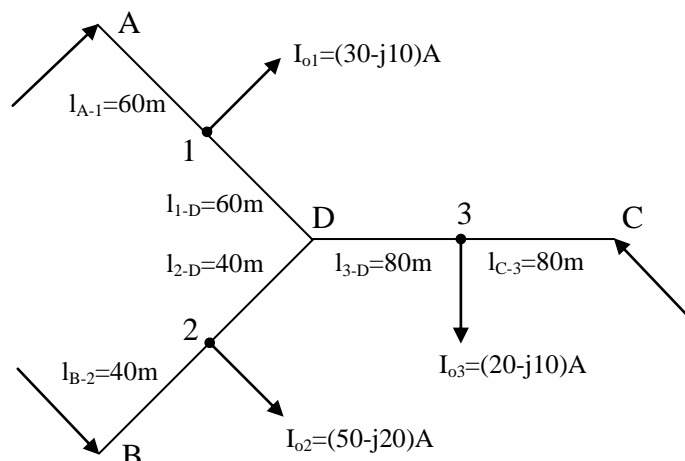
$$U_{\text{dov}} = U_n - \Delta U_{\text{dov}} = 230 - 11,5 = 218,5 \text{ V}$$

V obou bodech je napětí vyšší než dovolené, navržený průřez tedy vyhovuje.

Kdyby napětí bylo nižší než dovolené, potom bychom museli zvětšit průřez vedení a znovu vypočítat vyrovnávací a napájecí proudy.

Př. 4.11

Navrhněte průřez Cu vedení 3 x 400 / 230 V tak, aby maximální úbytek napětí nepřekročil 5% jmenovitého hodnoty, $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Všechny tři napáječe mají jmenovitá napětí.



$$I'_A = I'_{DA} = \frac{I_{o1}}{2} = \frac{30 - j10}{2} = (15 - j5)A$$

$$I'_B = I'_{DB} = \frac{I_{o2}}{2} = \frac{50 - j20}{2} = (25 - j10)A$$

$$I'_C = I'_{DC} = \frac{I_{o3}}{2} = \frac{20 - j10}{2} = (10 - j5)A$$

$$I'_D = I'_{DA} + I'_{DB} + I'_{DC} = (50 - j20)A$$

Proud I'_D se rozdělí v poměru vodivostí větví, tedy při stejném průřezu v poměru délek.

$$I''_A = I'_D \cdot \frac{\frac{1}{120}}{\frac{1}{120} + \frac{1}{80} + \frac{1}{160}} = (50 - j20) \cdot 0,308 = (15,4 - j6,2)A$$

$$I''_B = I'_D \cdot \frac{\frac{1}{80}}{\frac{1}{120} + \frac{1}{80} + \frac{1}{160}} = (50 - j20) \cdot 0,462 = (23,1 - j9,2)A$$

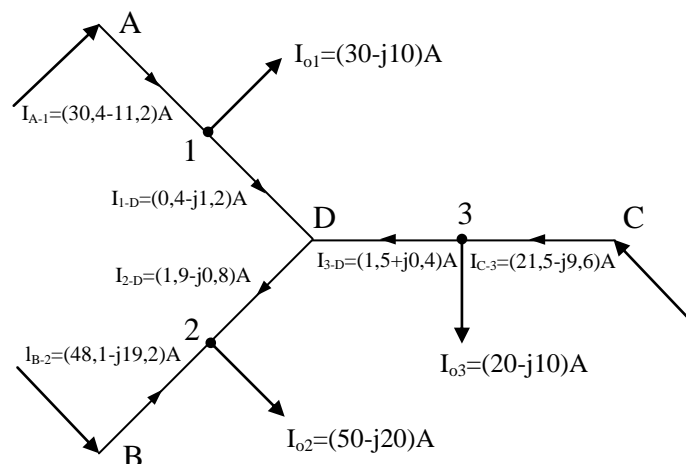
$$I''_C = I'_D \cdot \frac{\frac{1}{160}}{\frac{1}{120} + \frac{1}{80} + \frac{1}{160}} = (50 - j20) \cdot 0,231 = (11,5 - j4,6)A$$

Výsledné napájecí proudy jsou:

$$I_A = I'_A + I''_A = (30,4 - j11,2)A$$

$$I_B = I'_B + I''_B = (48,1 - j19,2)A$$

$$I_C = I'_C + I''_C = (21,5 - j9,6)A$$

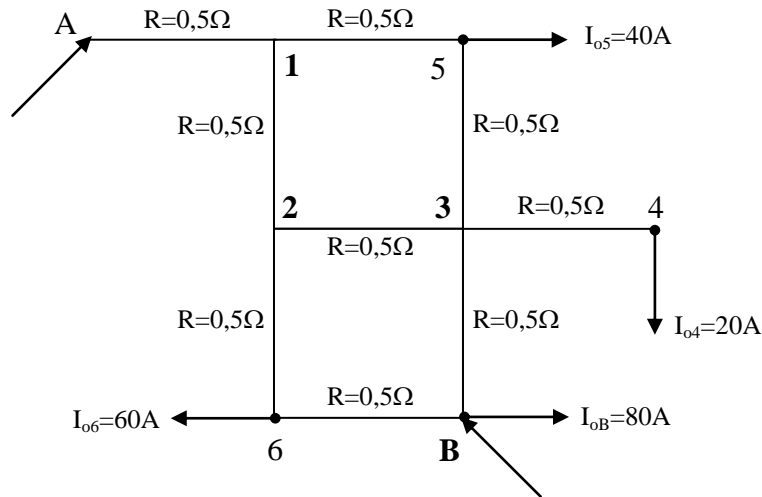


Místo maximálního úbytku je v bodě 2.

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{ci}}{\Delta U_{sdov} - \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{ji}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{57} \cdot 40 \cdot 48,1}{0,05 \cdot 400 - \sqrt{3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 19,2} = 3 \text{ mm}^2 \Rightarrow 4 \text{ mm}^2$$

Př. 4.12

Určete proudové rozdělení a místo maximálního úbytku napětí v naznačené stejnosměrné uzlové síti $U_n = 1000$ V.



Nenapájené uzly jsou 1, 2, 3.

Redukce proudů do uzlů:

$$i_{13} = \frac{\sum I_{oi} \cdot I_{oi}}{1} = \frac{\sum R_{oi} \cdot I_{oi}}{R} = \frac{0,5 \cdot 40}{0,5 + 0,5} = 20 \text{ A}$$

$$i_{31} = \sum I_{oi} - I_{13} = 40 - 20 = 20 \text{ A}$$

$$i_{2B} = \frac{0,5 \cdot 60}{0,5 + 0,5} = 30 \text{ A}$$

$$i_{B2} = 60 - 30 = 30 \text{ A}$$

$$I_B = \sum i_{Bi} + I_{oB} = 30 + 80 = 110 \text{ A}$$

$$I_1 = 20 \text{ A}$$

$$I_2 = 30 \text{ A}$$

$$I_3 = 20 + 20 = 40 \text{ A} \quad (\text{odběr } I_{o4} \text{ taktéž zahrneme do uzlu 3)}$$

Vodivosti větví:

$$g_{A1} = g_{B3} = g_{12} = g_{23} = g_{34} = \frac{1}{2R} = \frac{1}{2 \cdot 0,5} = 1 \text{ S} \quad (g_{xy} = g_{yx})$$

$$g_{1(5)3} = g_{B(6)2} = \frac{1}{2 \cdot (0,5 + 0,5)} = 0,5 \text{ S}$$

Vodivosti uzlů:

$$G_B = \sum g_{Bx} = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ S}$$

$$G_1 = 1 + 1 + 0,5 = 2,5 \text{ S}$$

$$G_2 = 1 + 1 + 0,5 = 2,5 \text{ S}$$

$$G_3 = 1 + 1 + 0,5 = 2,5 \text{ S}$$

(vodivost g_{34} již neuvažujeme, protože odběr I_{o4} byl redukován do uzlu 3)

Uzlové rovnice:

$$I_i = G_i \cdot \Delta U_i - \sum g_{ix} \cdot \Delta U_x \quad (4.15)$$

$$I_1 = G_1 \cdot \Delta U_1 - g_{1A} \cdot \Delta U_A - g_{12} \cdot \Delta U_2 - g_{13} \cdot \Delta U_3$$

$$I_2 = G_2 \cdot \Delta U_2 - g_{21} \cdot \Delta U_1 - g_{23} \cdot \Delta U_3 - g_{2B} \cdot \Delta U_B$$

$$I_3 = G_3 \cdot \Delta U_3 - g_{31} \cdot \Delta U_1 - g_{32} \cdot \Delta U_2 - g_{3B} \cdot \Delta U_B$$

$$\Delta U_A = \Delta U_B = 0 \text{ V} \quad (\text{jedná se o napájecí místa})$$

$$20 = 2,5 \cdot \Delta U_1 - 0 - \Delta U_2 - 0,5 \cdot \Delta U_3$$

$$30 = 2,5 \cdot \Delta U_2 - \Delta U_1 - \Delta U_3 - 0$$

$$40 = 2,5 \cdot \Delta U_3 - 0,5 \cdot \Delta U_1 - \Delta U_2 - 0$$

$$\Delta U_1 = 31,67 \text{ V} \quad \Delta U_2 = 40 \text{ V} \quad \Delta U_3 = 38,33 \text{ V}$$

Vyrovnávací proudy:

$$\Delta I_{xy} = g_{xy} \cdot (\Delta U_y - \Delta U_x) \quad (4.16)$$

$$\Delta I_{A1} = 1 \cdot (31,67 - 0) = 31,67 \text{ A}$$

$$\Delta I_{12} = 1 \cdot (40 - 31,67) = 8,33 \text{ A}$$

$$\Delta I_{13} = 0,5 \cdot (38,33 - 31,67) = 3,33 \text{ A}$$

$$\Delta I_{23} = 1 \cdot (38,33 - 40) = -1,67 \text{ A}$$

$$\Delta I_{B2} = 0,5 \cdot (40 - 0) = 20 \text{ A}$$

$$\Delta I_{B3} = 1 \cdot (38,33 - 0) = 38,33 \text{ A}$$

Skutečné rozdělení proudů:

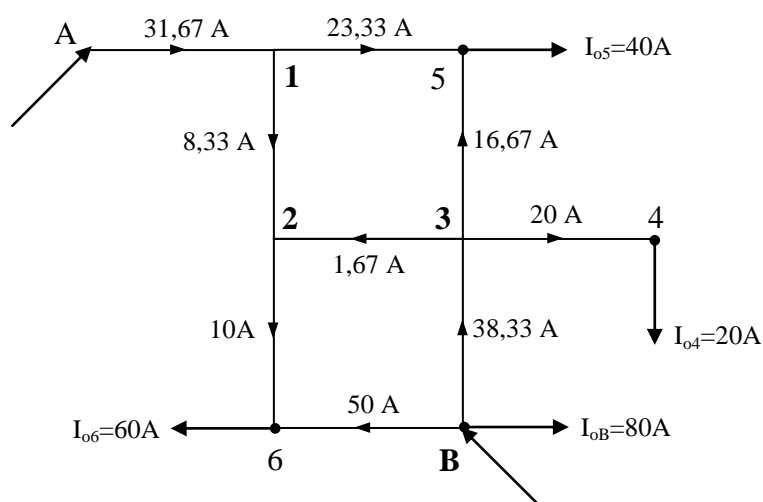
$$I_{xy} = i_{xy} + \Delta I_{xy} \quad (\Delta I_{xy} = -\Delta I_{yx}) \quad (4.17)$$

$$I_{13} = 20 + 3,33 = 23,33 \text{ A} \quad I_{31} = 20 - 3,33 = 16,67 \text{ A}$$

$$I_{2B} = 30 - 20 = 10 \text{ A} \quad I_{B2} = 30 + 20 = 50 \text{ A}$$

$$I_{12} = 0 + 8,33 = 8,33 \text{ A} \quad I_{32} = 0 + 1,67 = 1,67 \text{ A}$$

$$I_{A1} = 0 + 31,67 = 31,67 \text{ A} \quad I_{B3} = 0 + 38,33 = 38,33 \text{ A}$$



$$\Delta U_4 = \sum 2R_{xy} \cdot I_{xy} = 2 \cdot 0,5 \cdot 38,33 + 2 \cdot 0,5 \cdot 20 = 58,33 \text{ V}$$

$$\Delta U_5 = 2 \cdot 0,5 \cdot 31,67 + 2 \cdot 0,5 \cdot 23,33 = 55 \text{ V}$$

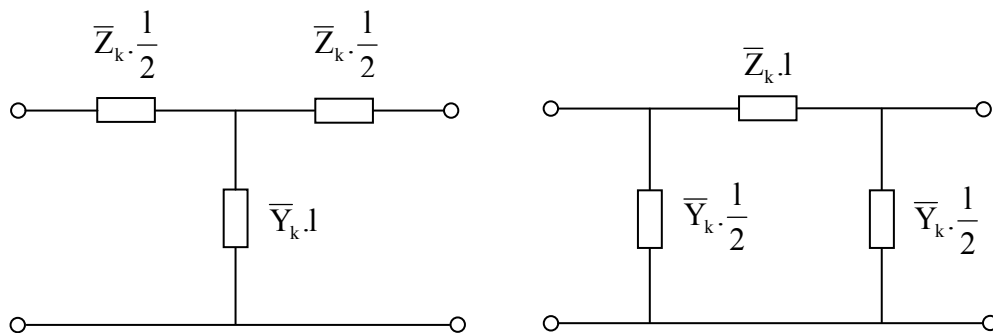
$$\Delta U_6 = 2 \cdot 0,5 \cdot 50 = 50 \text{ V}$$

Poznámky k výpočtům ustáleného chodu sítí:

- 1) V případě, že by byl místo dovoleného úbytku napětí zadán dovolený úbytek výkonu, pak by výpočet průřezu vedení vycházel ze vztahu $S = k \cdot \frac{\rho}{\Delta P} \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot I_i^2$ ($k = 2$ pro ss a 1f, $k = 3$ pro 3f vedení).
- 2) Výpočet proudového momentu $\sum I_{oi} \cdot I_{oi}$ pomocí odběrových proudů a výpočet $\sum I_i \cdot I_i$ pomocí úsekových proudů je totožný. V prvním případě se jedná o tzv. metodu superpozice, v druhém případě o tzv. metodu adice. Je zde vidět podoba s mechanikou, kdy moment síly je dán $M = r \cdot F$, analogicky tedy proudový moment $M = I_o \cdot I_o$. Výpočet úbytku napětí je dán ohmovým zákonem $\Delta U = R \cdot I$, čemuž odpovídá $\Delta U = \frac{\rho \cdot I_i}{S} \cdot I_i$.
- 3) Postup výpočtu střídavých uzlových sítí je totožný s výpočtem stejnosměrných uzlových sítí. Je však třeba respektovat obě složky admitance (impedance) $Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX}$, napětí $U = U_\varepsilon + jU_j$ a proudů $I = I_\varepsilon - jI_j$ (pokud není zadáno jinak, předpokládáme induktivní odběr).
Dále musíme zohlednit, zda se jedná 1f nebo 3f síť a uvažovat $2Z$ nebo Z .
V případě, že se v jedné větvi vyskytuje více průřezů, musíme nejdříve určit celkovou impedanci větve, a poté teprve admitanci celé větve.

5. STŘÍDAVÁ VEDENÍ VVN

Náhradní článek	$\bar{A} = \bar{D}$	\bar{B}	\bar{C}	Použití
T	$1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{2}$	$\bar{Z}_k \cdot l \left(1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{4} \right)$	$\bar{Y}_k \cdot l$	do 300 km
Π	$1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{2}$	$\bar{Z}_k \cdot l$	$\bar{Y}_k \cdot l \left(1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{4} \right)$	do 500 km



$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \quad (5.1)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2 \quad (5.2)$$

$$\bar{A} \cdot \bar{D} - \bar{B} \cdot \bar{C} = 1 \Rightarrow \bar{A}^2 - \bar{B} \cdot \bar{C} = 1 \quad (5.3)$$

V rovnicích 5.1 a 5.2 jsou fázové hodnoty napětí a proudů.

Př. 5.1

Stanovte Blondelovy konstanty, byla-li změřena impedance nakrátko $\bar{Z}_k = 90 \angle 65^\circ \Omega$ a impedance naprázdno $\bar{Z}_0 = 1600 \angle -83^\circ \Omega$.

Při stavu naprázdno je $\bar{I}_2 = 0$:

$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 \quad \bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 \quad \bar{Z}_0 = \frac{\bar{A}}{\bar{C}} \quad (5.4)$$

Při stavu nakrátko je $\bar{U}_2 = 0$:

$$\bar{U}_1 = \bar{B} \cdot \bar{I}_2 \quad \bar{I}_1 = \bar{A} \cdot \bar{I}_2 \quad \bar{Z}_k = \frac{\bar{B}}{\bar{A}} \quad (5.5)$$

Dosažením do 5.3 získáme:

$$\bar{A}^2 \cdot \left(1 - \frac{\bar{Z}_k}{\bar{Z}_0} \right) = 1$$

$$\bar{A} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 - \bar{Z}_k}} = \sqrt{\frac{1600 \angle -83^\circ}{1600 \angle -83^\circ - 90 \angle 65^\circ}} = 0,977 \angle 0,81^\circ$$

(Existují 2 řešení, druhé je posunuto o 180° .)

$$\bar{B} = \bar{Z}_k \cdot \bar{A} = 90 \angle 65^\circ \cdot 0,977 \angle 0,81^\circ = 87,9 \angle 65,81^\circ \Omega$$

$$\bar{C} = \frac{\bar{A}}{\bar{Z}_0} = \frac{0,977 \angle 0,81^\circ}{1600 \angle -83^\circ} = 6,1 \cdot 10^{-4} \angle 83,81^\circ S$$

Př. 5.2

Vedení vvn 220 kV dlouhé 250 km přenáší výkon $S_{2n} = 160$ MVA, $\cos \varphi_{2n} = 0,8$. Dovolená proudová hustota je $\sigma = 1,3$ A.mm⁻². Pomocí náhradního článku Π určete:

- vlnovou impedanci a přirozený výkon
- parametry na začátku vedení při 100% a 50% S_{2n}
- velikost kompenzačního výkonu pro kompenzaci na účinník $\cos \varphi_{2k} = 0,95$
- napětí, proud, nabíjecí výkon a ztráty při stavu naprázdno
- účinnost přenosu při přenosu s maximální proudovou hustotou
- poměry při $U_1 = U_2$
- poměry při přenosu s minimálními ztrátami

$$I_{2n} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}} = \frac{160 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} = 419,9 \text{ A}$$

$$S = \frac{I_{2n}}{\sigma} = \frac{419,9}{1,3} = 323 \text{ mm}^2 \Rightarrow 350 \text{ mm}^2$$

Volíme jednoduché vedení 350 mm² AlFe4 umístěné na stožárech typu portál s následujícími parametry: $R_k = 0,087 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $X_k = 0,4392 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $B_k = 2,597 \cdot 10^{-6} S \cdot \text{km}^{-1}$.

$$\bar{Z}_k = R_k + jX_k = 0,087 + j0,4392 = 0,448 \angle 78,79^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\bar{Y}_k = G_k + jB_k = j2,597 \cdot 10^{-6} = 2,597 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ S \cdot \text{km}^{-1}$$

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{2} = 1 + \frac{0,448 \angle 78,79^\circ \cdot 2,597 \angle 90^\circ \cdot 250^2}{2} = 0,964 \angle 0,42^\circ$$

$$\bar{B} = \bar{Z}_k \cdot l = 0,448 \angle 78,79^\circ \cdot 250 = 112 \angle 78,79^\circ \Omega$$

$$\bar{C} = \bar{Y}_k \cdot l \left(1 + \frac{\bar{Z}_k \cdot \bar{Y}_k \cdot l^2}{4} \right) = 2,597 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \cdot 250 \cdot \left(1 + \frac{0,448 \angle 78,79^\circ \cdot 2,597 \angle 90^\circ \cdot 250^2}{4} \right) = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ S$$

a)

Vlnová impedance:

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}_k}{\bar{Y}_k}} \quad (5.6)$$

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{\bar{Z}_k}{\bar{Y}_k}} = \sqrt{\frac{0,448 \angle 78,79^\circ}{2,597 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ}} = 415,3 \angle -5,61^\circ \Omega$$

Přirozený výkon:

$$\bar{S}_p = \frac{U_{2n}^2}{\bar{Z}_v} \quad (5.7)$$

$$\bar{S}_p = \frac{U_{2n}^2}{\bar{Z}_v} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{415,3 \angle -5,61^\circ} = 116,5 \angle 5,61^\circ \text{ MVA}$$

b)

Pro 100% S_{2n}

$$I_2 = I_{2n} = 419,9 \text{ A} \quad \varphi_{2I} = \arccos 0,8 = -36,87^\circ \text{ (induktivní)}$$

$$U_2 = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} = \frac{220 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 127 \text{ kV} \quad (\varphi_{2U} = 0^\circ)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 112 \angle 78,79^\circ \cdot 419,9 \angle -36,87^\circ = 160,7 \angle 11,60^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 419,9 \angle -36,87^\circ = 362,3 \angle -26,12^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = \varphi_{1U} - \varphi_{1I} = 11,60 - (-26,12) = 37,72^\circ \quad \cos \varphi_1 = \cos 37,72^\circ = 0,79$$

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 3 \cdot 160,7 \cdot 10^3 \cdot 362,3 \cdot 0,79 = 138 \text{ MW}$$

$$P_2 = S_{2n} \cdot \cos \varphi_2 = 160 \cdot 0,8 = 128 \text{ MW}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 138 - 128 = 10 \text{ MW}$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \text{tg} \varphi_1 = 138 \cdot 10^6 \cdot \text{tg} 37,72^\circ = 106,7 \text{ M var}$$

Účinnost přenosu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5.8)$$

$$\eta = \frac{128}{138} \cdot 100 = 92,8\%$$

Pro 50% S_{2n}

$$I_2 = 0,5 \cdot I_{2n} = 210 \text{ A} \quad U_2 = 127 \text{ kV}$$

$$\bar{U}_1 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 112 \angle 78,79^\circ \cdot 210 \angle -36,87^\circ = 140,9 \angle 6,77^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 210 \angle -36,87^\circ = 167,2 \angle -13,58^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = 6,77 - (-13,58) = 20,35^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,94$$

$$P_1 = 3 \cdot 140,9 \cdot 10^3 \cdot 167,2 \cdot 0,94 = 66,4 \text{ MW} \quad P_2 = 0,5 \cdot 160 \cdot 0,8 = 64 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 66,4 - 64 = 2,4 \text{ MW}$$

$$Q_1 = 66,4 \cdot 10^6 \cdot \text{tg} 20,35^\circ = 24,6 \text{ M var}$$

$$\eta = \frac{64}{66,4} \cdot 100 = 96,4\%$$

c)

Kompenzační výkon:

$$Q_k = P_2 \cdot (\text{tg} \varphi_2 - \text{tg} \varphi_{2k}) \quad (5.9)$$

$$Q_k = 128 \cdot (\text{tg} 36,87^\circ - \text{tg} 18,19^\circ) = 53,9 \text{ M var}$$

d)

$$I_2 = 0 \text{ A} \quad U_2 = 127 \text{ kV}$$

$$\bar{U}_1 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 = 122,4 \angle 0,42^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 = 81 \angle 90,21^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = 0,42 - 90,21 = -89,79^\circ$$

$$Q_c = Q_1 = 3 \cdot 122,4 \cdot 10^3 \cdot 81 \cdot \sin(-89,79^\circ) = -29,7 \text{ M var}$$

$$\Delta P = P_1 = 3 \cdot 122,4 \cdot 10^3 \cdot 81 \cdot \cos(-89,79^\circ) = 109 \text{ kW}$$

e)

$$I_{2\max} = \sigma \cdot S = 1,3 \cdot 350 = 455 \text{ A}$$

$$\bar{U}_1 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 112 \angle 78,79^\circ \cdot 455 \angle -36,87^\circ = 164,1 \angle 12,29^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 455 \angle -36,87^\circ = 395,6 \angle -26,99^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = 12,29 - (-26,99) = 39,28^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,77$$

$$P_1 = 3 \cdot 164,1 \cdot 10^3 \cdot 395,6 \cdot 0,77 = 150 \text{ MW} \quad P_2 = 3 \cdot 127 \cdot 455 \cdot 0,8 = 138,7 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{138,7}{150} \cdot 100 = 92,5\%$$

f)

$$|\bar{U}_1| = |\bar{U}_2| \Rightarrow U_1^2 = U_2^2$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2 = (A_\varepsilon + jA_j)U_2 + (B_\varepsilon + jB_j)(I_{2\varepsilon} - jI_{2j}) = \\ &= (A_\varepsilon \cdot U_2 + B_\varepsilon \cdot I_{2\varepsilon} + B_j \cdot I_{2j}) + j(A_j \cdot U_2 + B_j \cdot I_{2\varepsilon} - B_\varepsilon \cdot I_{2j}) \end{aligned}$$

$$U_1^2 = U_{1\varepsilon}^2 + U_{1j}^2 = U_2^2$$

Úpravou dostaneme následující kvadratickou rovnici:

$$B^2 \cdot I_{2j}^2 + [2U_2 \cdot (A_\varepsilon \cdot B_j - A_j \cdot B_\varepsilon)] I_{2j} + [U_2^2 \cdot (A^2 - 1) + I_{2\varepsilon}^2 \cdot B^2 + 2I_{2\varepsilon} \cdot U_2 \cdot (A_\varepsilon \cdot B_\varepsilon + A_j \cdot B_j)] = 0$$

$$A = 0,964 \quad A_\varepsilon = 0,964 \quad A_j = 0,007$$

$$B = 112 \Omega \quad B_\varepsilon = 21,8 \Omega \quad B_j = 109,9 \Omega$$

$$I_2 = 419,9 \text{ A} \quad I_{2\varepsilon} = 335,9 \text{ A}$$

Dosazením získáme:

$$1,2544 \cdot 10^4 \cdot I_{2j}^2 + 2,6871 \cdot 10^7 \cdot I_{2j} + 2,1336 \cdot 10^9 = 0$$

$$I_{2j} = -82,6 \text{ A} \quad (\text{druhé řešení nemá fyzikální význam } I_{2j} = -2059,6 \text{ A})$$

$$I_2 = 335,9 + j82,6 = 345,9 \angle 13,82^\circ \text{ A} \quad (\text{proud má kapacitní charakter})$$

$$\bar{U}_1 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 112 \angle 78,79^\circ \cdot 345,9 \angle 13,82^\circ = 127 \angle 18,17^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 345,9 \angle 13,82^\circ = 361,7 \angle 26,79^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = 18,17 - 26,79 = -8,62^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,99$$

$$P_1 = 3 \cdot 127 \cdot 10^3 \cdot 361,7 \cdot 0,99 = 136,4 \text{ MW}$$

$$\varphi_2 = 0 - 13,82 = -13,82^\circ \quad \cos \varphi_2 = 0,97$$

$$P_2 = 3 \cdot 127 \cdot 10^3 \cdot 345,9 \cdot 0,97 = 127,8 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 136,4 - 127,8 = 8,6 \text{ MW}$$

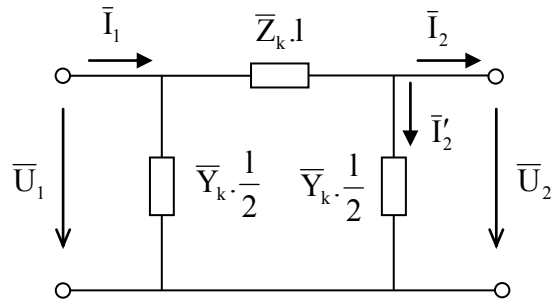
$$\eta = \frac{127,8}{136,4} \cdot 100 = 93,7\%$$

$$Q_1 = 136,4 \cdot 10^6 \cdot \text{tg}(-8,62^\circ) = -20,7 \text{ M var}$$

$$Q_2 = 127,8 \cdot 10^6 \cdot \text{tg}(-13,82^\circ) = -31,4 \text{ M var}$$

g)

Ztráty budou minimální, bude-li podélnou impedancí protékat pouze činná složka proudu \bar{I}_2 .



$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{Y}_k \cdot 1}{2} \cdot \bar{U}_2 = \frac{j2,597 \cdot 10^{-6} \cdot 250}{2} \cdot 127 \cdot 10^3 = j41,2 \text{ A}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}} - \bar{I}'_2 = \frac{160 \cdot 10^6 \cdot 0,8}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} - j41,2 = 335,9 - j41,2 = 338,4 \angle -6,99^\circ \text{ A}$$

$$\bar{U}_1 = 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 112 \angle 78,79^\circ \cdot 338,4 \angle -6,99^\circ = 139,2 \angle 15,37^\circ \text{ kV}$$

$$\bar{I}_1 = 6,379 \cdot 10^{-4} \angle 90,21^\circ \cdot 127 \cdot 10^3 + 0,964 \angle 0,42^\circ \cdot 338,4 \angle -6,99^\circ = 326,7 \angle 7,68^\circ \text{ A}$$

$$\varphi_1 = 15,37 - 7,68 = 7,69^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,99$$

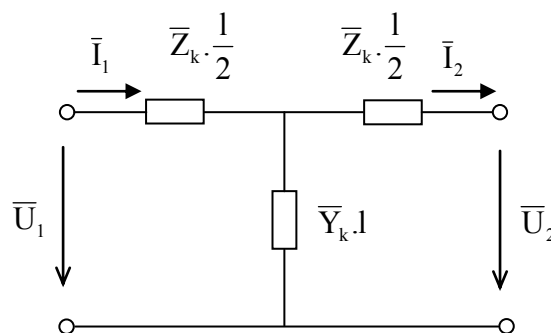
$$P_1 = 3 \cdot 139,2 \cdot 10^3 \cdot 326,7 \cdot 0,99 = 135,1 \text{ MW} \quad P_2 = 160 \cdot 0,8 = 128 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 135,1 - 128 = 7,1 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{128}{135,1} \cdot 100 = 94,7\%$$

Př. 5.3

Odvoďte vztah pro výpočet proudu I_{2j} pro přenos výkonu s minimálními ztrátami při použití T článku.



Ztráty v jedné fázi jsou:

$$\Delta P = \frac{1}{2} R \cdot I_1^2 + \frac{1}{2} R \cdot I_2^2 = \frac{1}{2} R \cdot (I_1^2 + I_2^2)$$

$$I_{2\text{č}} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_{2n}} \quad I_{2j} = ?$$

$$\begin{aligned}
\bar{I}_1 &= \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{A} \cdot \bar{I}_2 = jC \cdot U_2 + (A_\epsilon + jA_j)(I_{2\epsilon} - jI_{2j}) = \\
&= jC \cdot U_2 + A_\epsilon \cdot I_{2\epsilon} - jA_\epsilon \cdot I_{2j} + jA_j \cdot I_{2\epsilon} + A_j \cdot I_{2j} = (A_\epsilon \cdot I_{2\epsilon} + A_j \cdot I_{2j}) + j(C \cdot U_2 - A_\epsilon \cdot I_{2j} + A_j \cdot I_{2\epsilon}) \\
I_1^2 &= A_\epsilon^2 \cdot I_{2\epsilon}^2 + 2 \cdot A_\epsilon \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} \cdot I_{2j} + A_j^2 \cdot I_{2j}^2 + C^2 \cdot U_2^2 - C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon \cdot I_{2j} + C \cdot U_2 \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} - \\
&- C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon \cdot I_{2j} + A_\epsilon^2 \cdot I_{2j}^2 - A_\epsilon \cdot I_{2j} \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} + C \cdot U_2 \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} - A_\epsilon \cdot I_{2j} \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} + A_j^2 \cdot I_{2\epsilon}^2 \\
I_2^2 &= I_{2\epsilon}^2 + I_{2j}^2 \\
I_1^2 + I_2^2 &= A_\epsilon^2 \cdot I_{2\epsilon}^2 + A_j^2 \cdot I_{2j}^2 + C^2 \cdot U_2^2 - C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon \cdot I_{2j} + C \cdot U_2 \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} - C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon \cdot I_{2j} + \\
&+ A_\epsilon^2 \cdot I_{2j}^2 + C \cdot U_2 \cdot A_j \cdot I_{2\epsilon} + A_j^2 \cdot I_{2\epsilon}^2 + I_{2\epsilon}^2 + I_{2j}^2
\end{aligned}$$

Pro minimum musí platit:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta P}{dI_{2j}} &= \frac{1}{2} R \cdot (2 \cdot A_j^2 \cdot I_{2j} - 2 \cdot C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon + 2 \cdot A_\epsilon^2 \cdot I_{2j} + 2 \cdot I_{2j}) = 0 \\
I_{2j} \cdot (A_j^2 + A_\epsilon^2 + 1) - C \cdot U_2 \cdot A_\epsilon &= 0 \\
I_{2j} &= \frac{C \cdot A_\epsilon}{A^2 + 1} \cdot U_2
\end{aligned} \tag{5.10}$$

6. ZKRATOVÉ POMĚRY

Výpočet zkratových proudů ve fyzikálních jednotkách

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k3} při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (6.1)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k2} při dvoufázovém zkratu:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (6.2)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k1} při jednofázovém zkratu:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (6.3)$$

c - napěťový činitel

U_n - jmenovité sdružené napětí sítě v místě zkratu

$Z_{(1)}$ - výsledná sousledná impedance zkratového obvodu

$Z_{(2)}$ - výsledná zpětná impedance zkratového obvodu

$Z_{(0)}$ - výsledná nulová impedance zkratového obvodu

Zkrat v soustavě	c_{\max}	c_{\min}
nn	1,00	0,95
vn, 110 kV, 220 kV	1,10	1,00
400 kV, 750 kV	1,05	1,00

Nárazový zkratový proud I_{km} :

$$I_{km} = \sqrt{2} \cdot K \cdot I''_k \quad (\text{kA}; -, \text{kA}) \quad (6.4)$$

K - součinitel nárazového zkratového proudu

I''_k - počáteční rázový zkratový proud

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} :

$$I_{ke} = k_e \cdot I''_k \quad (\text{kA}; -, \text{kA}) \quad (6.5)$$

k_e - součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu

I''_k - počáteční rázový zkratový proud

Sousledné parametry prvků ve fyzikálních jednotkách

Soustava:

$$Z_{(1)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_k} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} \quad (\Omega; -, \text{kV}, \text{kA}, \text{MVA}) \quad (6.6)$$

U_n - jmenovité sdružené napětí nahrazované sítě

c - napěťový činitel

I''_k - počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu

S_k - zkratový výkon soustavy při trojfázovém zkratu

Při zběžném výpočtu lze uvažovat $Z_{(1)} = X_{(1)}$.

Alternátor:

$$X_{(1)} = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{100 \cdot S_{nG}} \quad (\Omega; \%, \text{ kV, MVA}) \quad (6.7)$$

x_d'' - rázová reaktance alternátoru
 U_{nG} - jmenovité napětí alternátoru
 S_{nG} - jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

Reaktor (tlumivka omezující zkratový proud):

$$Z_{(1)} = \frac{10 \cdot u_R \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (\Omega; \%, \text{ kV, A}) \quad (6.8)$$

u_R - imedanční napětí reaktoru
 U_n - jmenovité sdružené napětí reaktoru
 I_n - jmenovitý proud reaktoru

Rezistanci reaktoru můžeme proti jeho reaktanci zanedbat, neboť je nepatrná ($R = 0,01 \cdot X$), takže $Z_{(1)} = X_{(1)}$.

Transformátor (dvouvinitý):

$$Z_{(1)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega; \%, \text{ kV, MVA})$$

$$R_{(1)} = \frac{P_{knT} \cdot U_{nT}^2}{S_{nT}^2} \quad (\Omega; \text{ MW, kV, MVA}) \quad (6.9)$$

$$X_{(1)} = \sqrt{Z_{(1)}^2 - R_{(1)}^2} \quad (\Omega; \Omega, \Omega)$$

u_k - jmenovité napětí nakrátko
 U_{nT} - jmenovité napětí transformátoru
 S_{nT} - jmenovitý výkon transformátoru
 P_{knT} - jmenovité ztráty nakrátko

Při zběžném výpočtu lze uvažovat $X_{(1)} = Z_{(1)}$, $R_{(1)} = 0$.

Vedení:

$$\begin{aligned} X_{(1)} &= X_k \cdot l && (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{ km}) \\ R_{(1)} &= R_k \cdot l && (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{ km}) \\ Z_{(1)} &= \sqrt{R_{(1)}^2 + X_{(1)}^2} && (\Omega; \Omega, \Omega) \end{aligned} \quad (6.10)$$

X_k - reaktance sousledné složky vedení
 R_k - rezistance sousledné složky vedení
 l - délka vedení

U vedení vvn můžeme R zanedbat.

Asynchronní motor:

$$X_{(1)} = \frac{U_{nM}^2}{i_z \cdot S_{nM}} \quad (\Omega; \text{ kV, -, MVA}) \quad (6.11)$$

i_z - poměrný záběrný proud motoru
 U_{nM} - jmenovité napětí motoru
 S_{nM} - jmenovitý zdánlivý výkon motoru

Vliv asynchronních motorů lze zanedbat v sítích nn nebo pokud jsou od místa zkratu odděleny dvojí transformací.

Parametry jednotlivých prvků musíme přepočítat na napět'ovou hladinu v místě zkratu podle vztahu:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (\Omega; \Omega, \text{kV}, \text{kV}) \quad (6.12)$$

Z_2 - impedance přepočtena na napět'ovou hladinu U_2 v místě zkratu

Z_1 - impedance na napět'ové hladině U_1

Výpočet zkratových proudů v poměrných hodnotách

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k3} při trojfázovém zkratu:

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -) \quad (6.13)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k2} při dvoufázovém zkratu:

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -, -) \quad (6.14)$$

Počáteční rázový zkratový proud I''_{k1} při jednofázovém zkratu:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_v}{|\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kA}, -, -) \quad (6.15)$$

Při výpočtu v poměrných hodnotách volíme vhodně vztažný výkon S_v . Vztažné napětí U_v je napětí v místě zkratu. Pro vztažný proud platí vztah:

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} \quad (\text{kA}; \text{MVA}, \text{kV}) \quad (6.16)$$

Sousledné parametry prvků v poměrných hodnotách

Soustava:

$$z_{(1)} = \frac{c \cdot I_v}{I''_k} = \frac{c \cdot S_v}{S_k} \quad (-; -, \text{kA}, \text{kA}, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (6.17)$$

c - napět'ový činitel

I''_k - počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu

I_v - vztažný proud odvozený pro napětí napájecí sítě v místě připojení ze vztažného výkonu

S_k - zkratový výkon soustavy při trojfázovém zkratu

S_v - vztažný výkon

Alternátor:

$$x_{(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_v}{100 \cdot S_{nG}} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (6.18)$$

x_d'' - rázová reaktance alternátoru

S_{nG} - jmenovitý zdánlivý výkon alternátoru

Reaktor:

$$x_{(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_R} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (6.19)$$

$$S_R = \sqrt{3} \cdot U_{sR} \cdot I_R \quad (\text{MVA}; \text{kV}, \text{kA})$$

u_k - impedanční napětí reaktoru

I_R - jmenovitý proud reaktoru

U_{sR} - jmenovité sdružené napětí reaktoru

S_R - průchozí výkon reaktoru

Transformátor:

$$z_{(1)} = \frac{u_k \cdot S_v}{100 \cdot S_{nT}} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA})$$

$$r_{(1)} = \frac{P_{knT} \cdot S_v}{S_{nT}^2} \quad (-; \text{MW}, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (6.20)$$

$$x_{(1)} = \sqrt{z_{(1)}^2 - r_{(1)}^2} \quad (-; -, -)$$

u_k - jmenovité napětí nakrátko

S_{nT} - jmenovitý výkon transformátoru

P_{knT} - jmenovité ztráty nakrátko

Vedení:

$$x_{(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}, \text{MVA}, \text{kV}) \quad (6.21)$$

$$r_{(1)} = R_k \cdot l \cdot \frac{S_v}{U_s^2} \quad (-; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}, \text{MVA}, \text{kV})$$

X_k - reaktance sousledné složky vedení

R_k - rezistance sousledné složky vedení

l - délka vedení

U_s - jmenovité sdružené napětí vedení

Asynchronní motor:

$$x_{(1)} = \frac{S_v}{i_z \cdot S_{nM}} \quad (-; \text{MVA}, -, \text{MVA}) \quad (6.22)$$

i_z - poměrný záběrný proud motoru

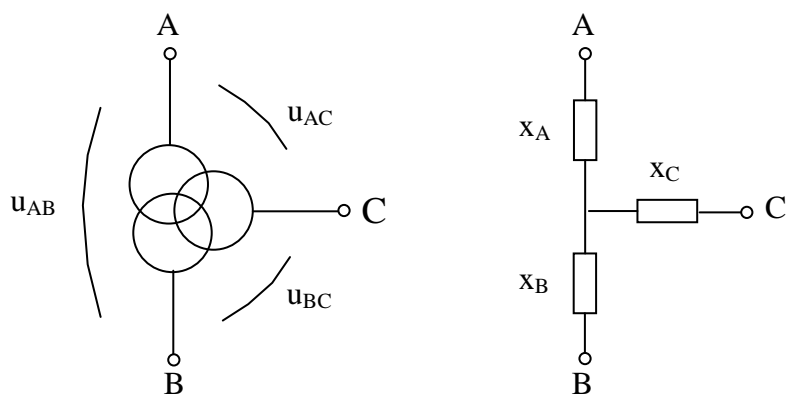
S_{nM} - jmenovitý zdánlivý výkon motoru

Trojvintuřový transformátor:

$$x_{A(1)} = \frac{1}{2} (u_{AB} + u_{AC} - u_{BC}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}}$$

$$x_{B(1)} = \frac{1}{2} (u_{AB} + u_{BC} - u_{AC}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}} \quad (-; \%, \text{MVA}, \text{MVA}) \quad (6.23)$$

$$x_{C(1)} = \frac{1}{2} (u_{AC} + u_{BC} - u_{AB}) \cdot \frac{S_v}{100 \cdot S_{nT}}$$



Zpětné parametry prvků

Náhradní schéma zpětných složek impedancí je stejné jako náhradní schéma sousledných složek impedancí a také $Z_{(2)} = Z_{(1)}$.

Nulové (netočivé) parametry prvků

Soustava:

$$X_{(0)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{I''_{k1}} - \frac{2}{I''_{k3}} \right) \quad (\Omega; -, \text{ kV, kA, kA}) \quad (6.24)$$

U_n - jmenovité sdružené napětí nahrazované sítě

c - napěťový činitel

I''_{k3} - počáteční rázový zkratový proud soustavy při trojfázovém zkratu

I''_{k1} - počáteční rázový zkratový proud soustavy při jednofázovém zkratu

Alternátor:

$X_{(0)}$ udává výrobce

Reaktor:

$X_{(0)} = X_{(1)}$

Transformátor:

$X_{(0)} = 0,85 \cdot X_{(1)}$

pro jádrové transformátory

$X_{(0)} = X_{(1)}$

pro plášťové transformátory

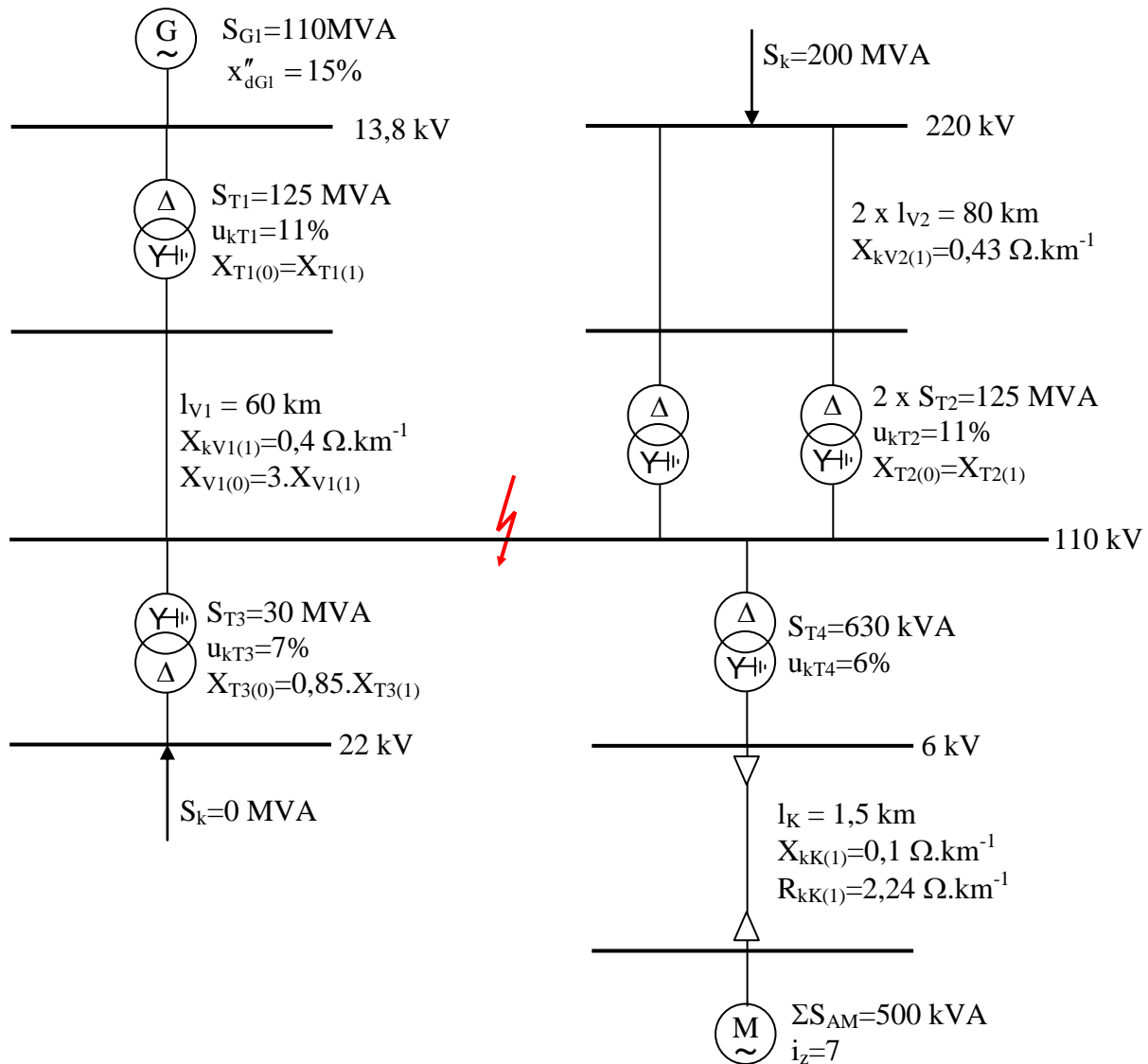
Vedení:

$X_{(0)} = (2 \div 5,8) \cdot X_{(1)}$

podle napětí a druhu vedení

Př. 6.1

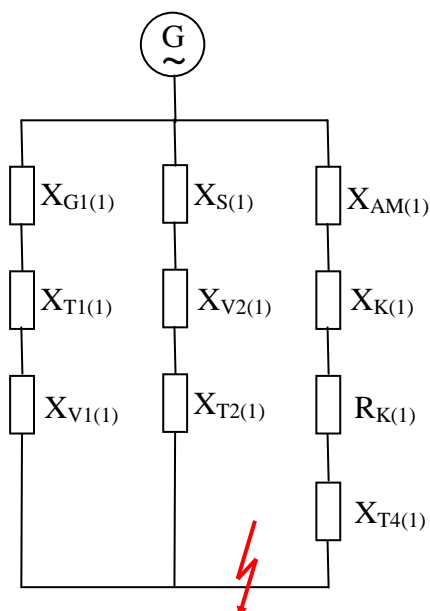
Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu při třífázovém, dvoufázovém a jednofázovém zkratu v označeném místě soustavy. Výpočet provedte ve fyzikálních i poměrných hodnotách.



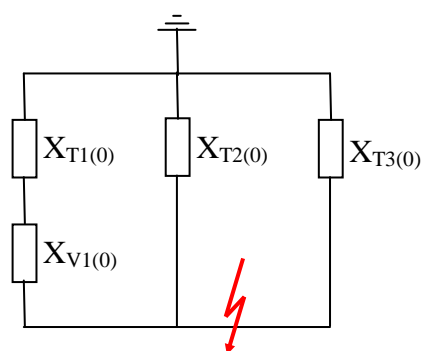
Skutečné hodnoty	Skutečné hodnoty přepočtené na hladinu zkratu 110 kV	Poměrné hodnoty pro $S_v = 200$ MVA
$X'_{G1(1)} = \frac{15 \cdot 13,8^2}{100 \cdot 110} = 0,26 \Omega$	$X_{G1(1)} = 0,26 \cdot \left(\frac{110}{13,8}\right)^2 = 16,52 \Omega$	$x_{G1(1)} = \frac{15 \cdot 200}{100 \cdot 110} = 0,273$
$X'_{T1(1)} = \frac{11 \cdot 110^2}{100 \cdot 125} = 10,65 \Omega$	$X_{T1(1)} = 10,65 \Omega$	$x_{T1(1)} = \frac{11 \cdot 200}{100 \cdot 125} = 0,176$
$X'_{T2(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11 \cdot 110^2}{100 \cdot 125} = 5,33 \Omega$	$X_{T2(1)} = 5,33 \Omega$	$x_{T2(1)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{11 \cdot 200}{100 \cdot 125} = 0,088$
$X'_{T3(1)} = \frac{7 \cdot 110^2}{100 \cdot 30} = 28,23 \Omega$	$X_{T3(1)} = 28,23 \Omega$	$x_{T3(1)} = \frac{7 \cdot 200}{100 \cdot 30} = 0,467$

$X'_{T4(1)} = \frac{6 \cdot 110^2}{100 \cdot 0,63} = 1152,38 \Omega$	$X_{T4(1)} = 1152,38 \Omega$	$x_{T4(1)} = \frac{6 \cdot 200}{100 \cdot 0,63} = 19,048$
$X'_{V1(1)} = 0,4 \cdot 60 = 24 \Omega$	$X_{V1(1)} = 24 \Omega$	$x_{V1(1)} = 0,4 \cdot 60 \cdot \frac{200}{110^2} = 0,397$
$X'_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot 0,43 \cdot 80 = 17,2 \Omega$	$X_{V2(1)} = 17,2 \cdot \left(\frac{110}{220}\right)^2 = 4,3 \Omega$	$x_{V2(1)} = \frac{1}{2} \cdot 0,43 \cdot 80 \cdot \frac{200}{220^2} = 0,071$
$X'_{K(1)} = 0,1 \cdot 1,5 = 0,15 \Omega$	$X_{K(1)} = 0,15 \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = 50,41 \Omega$	$x_{K(1)} = 0,1 \cdot 1,5 \cdot \frac{200}{6^2} = 0,833$
$R'_{K(1)} = 2,24 \cdot 1,5 = 3,36 \Omega$	$R_{K(1)} = 3,36 \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = 1129,33 \Omega$	$r_{K(1)} = 2,24 \cdot 1,5 \cdot \frac{200}{6^2} = 18,667$
$X'_{AM(1)} = \frac{6^2}{7 \cdot 0,5} = 10,29 \Omega$	$X_{AM(1)} = 10,29 \cdot \left(\frac{110}{6}\right)^2 = 3458,58 \Omega$	$x_{AM(1)} = \frac{200}{7 \cdot 0,5} = 57,143$
$X'_{S(1)} = \frac{1,1 \cdot 220^2}{200} = 266,2 \Omega$	$X_{S(1)} = 266,2 \cdot \left(\frac{110}{220}\right)^2 = 66,55 \Omega$	$x_{S(1)} = 1,1 \cdot \frac{200}{200} = 1,1$
$X'_{T1(0)} = 10,65 \Omega$	$X_{T1(0)} = 10,65 \Omega$	$x_{T1(0)} = 0,176$
$X'_{T2(0)} = 5,33 \Omega$	$X_{T2(0)} = 5,33 \Omega$	$x_{T2(0)} = 0,088$
$X'_{T3(0)} = 0,85 \cdot 28,23 = 24 \Omega$	$X_{T3(0)} = 24 \Omega$	$x_{T3(0)} = 0,85 \cdot 0,467 = 0,397$
$X'_{V1(0)} = 3 \cdot 24 = 72 \Omega$	$X_{V1(0)} = 72 \Omega$	$x_{V1(0)} = 3 \cdot 0,397 = 1,191$

Náhradní schéma sousledné složky:



Náhradní schéma nulové složky:



Výpočet počátečních rázových zkratových proudů pomocí skutečných hodnot impedancí:

$$\frac{1}{\bar{Z}_{(1)}} = \frac{1}{j(16,52 + 10,65 + 24)} + \frac{1}{j(66,55 + 4,3 + 5,33)} + \frac{1}{1129,33 + j(3458,58 + 50,41 + 1152,38)}$$

$$\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)} = 30,42 \angle 89,8^\circ \Omega$$

$$\frac{1}{\bar{Z}_{(0)}} = \frac{1}{j(10,65 + 72)} + \frac{1}{j5,33} + \frac{1}{j24}$$

$$\bar{Z}_{(0)} = 4,14 \angle 90^\circ \Omega$$

$$2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} = 2 \cdot 30,42 \angle 89,8^\circ + 4,14 \angle 90^\circ = 64,98 \angle 89,8^\circ \Omega$$

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 30,42} = 2,3 \text{ kA}$$

$$I''_{k2} = \frac{1,1 \cdot 110}{2 \cdot 30,42} = 1,99 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 110}{64,98} = 3,23 \text{ kA}$$

Výpočet počátečních rázových zkratových proudů pomocí poměrných hodnot impedancí:

$$\frac{1}{\bar{z}_{(1)}} = \frac{1}{j(0,273 + 0,176 + 0,397)} + \frac{1}{j(1,1 + 0,071 + 0,088)} + \frac{1}{18,667 + j(57,143 + 0,833 + 19,048)}$$

$$\bar{z}_{(1)} = \bar{z}_{(2)} = 0,503 \angle 89,8^\circ$$

$$\frac{1}{\bar{z}_{(0)}} = \frac{1}{j(0,176 + 1,191)} + \frac{1}{j0,088} + \frac{1}{j0,397}$$

$$\bar{z}_{(0)} = 0,068 \angle 90^\circ$$

$$2\bar{z}_{(1)} + \bar{z}_{(0)} = 2 \cdot 0,503 \angle 89,8^\circ + 0,068 \angle 90^\circ = 1,074 \angle 89,8^\circ$$

$$I_v = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 110} = 1,05 \text{ kA}$$

$$I''_{k3} = \frac{1,1 \cdot 1,05}{0,503} = 2,3 \text{ kA}$$

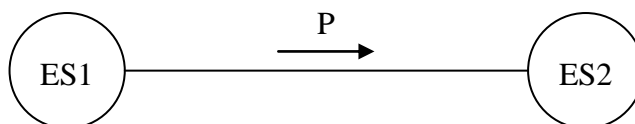
$$I''_{k2} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,05}{2 \cdot 0,503} = 1,99 \text{ kA}$$

$$I''_{k1} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 1,05}{1,074} = 3,23 \text{ kA}$$

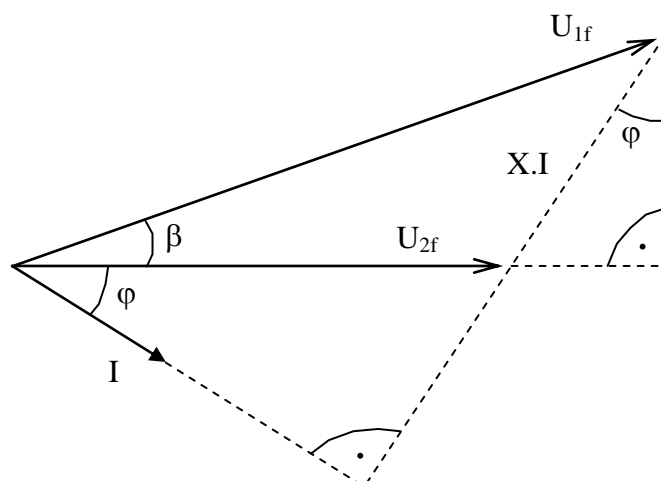
7. STABILITA ELEKTROENERGETICKÝCH SOUSTAV

Statická stabilita je schopnost elektroenergetické soustavy udržet se v synchronním chodu s jinou soustavou při pomalu rostoucím činném výkonu až do meze statické stability.

Dynamická stabilita je schopnost elektroenergetické soustavy přejít znovu do synchronního chodu s jinou soustavou po přechodném ději (vypnutí vedení, zkrat, atd.).



Stabilita tedy limituje délku vedení a přenášený výkon mezi dvěma soustavami. Řeší se pouze u soustav vvn, zanedbávají se činné odpory, uvažují se pouze reaktance prvků.



$$P = 3 \cdot U_{2f} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$X \cdot I \cdot \cos \varphi = U_{1f} \cdot \sin \beta$$

$$P = \frac{3 \cdot U_{1f} \cdot U_{2f}}{X} \cdot \sin \beta$$

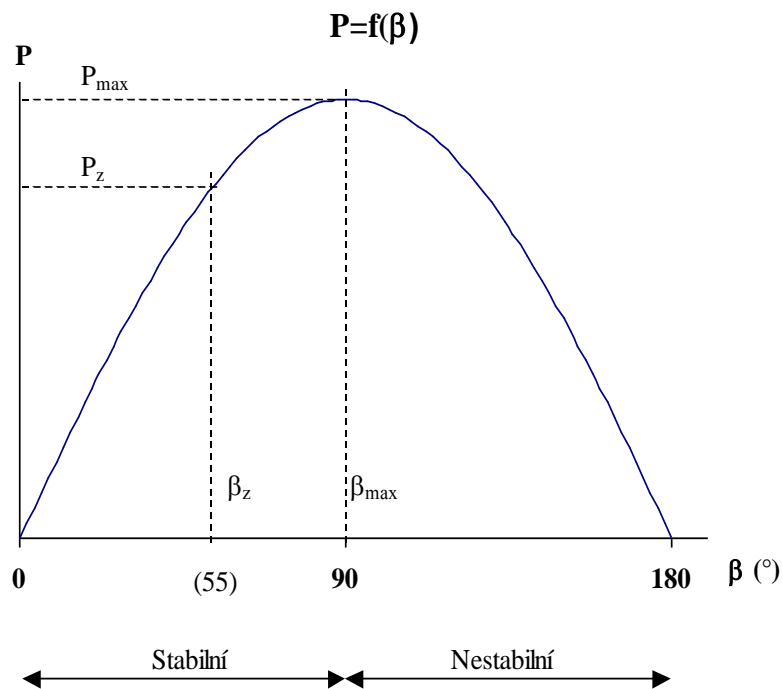
$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin \beta$$

β ... zátěžný úhel

(7.1)

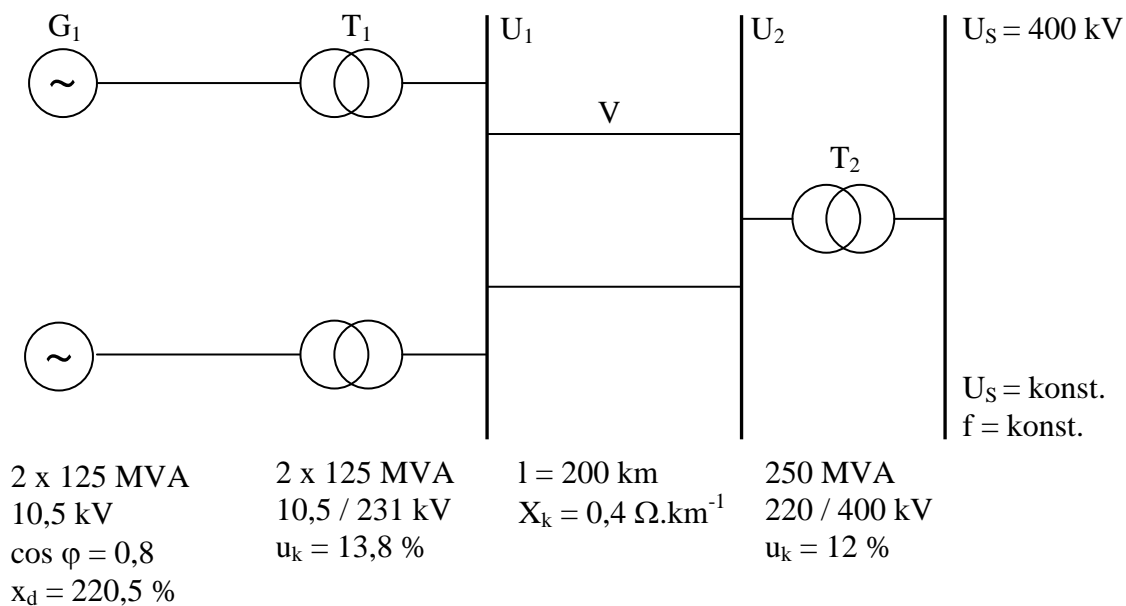
Soustava je staticky stabilní, pokud $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

Optimální stav je při $\beta_z = 55^\circ$.



Př. 7.1:

Elektroenergetickou soustavou podle naznačeného obrázku máme přenášet ustálený výkon 200 MW s $\cos \varphi = 0,98$. Určete zátěžný úhel β a maximálně možný ustálený výkon P_{\max} .



Reaktance generátoru:

$$X_G = \frac{x_d}{100} \cdot \frac{U_G^2}{S_G} = \frac{220,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{125} = 1,945 \Omega$$

Reaktance generátoru přepočtená na napětí přenosu:

$$X'_G = X_G \cdot \left(\frac{U_2}{U_G} \right)^2 = 1,945 \cdot \left(\frac{220}{10,5} \right)^2 = 853,8 \Omega$$

Reaktance transformátoru T₁:

$$X_{T1} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{13,8}{100} \cdot \frac{220^2}{125} = 53,4 \Omega$$

Reaktance bloku G + T₁:

$$X_B = X'_G + X_{T1} = 853,8 + 53,4 = 907,2 \Omega$$

Reaktance dvou paralelních bloků:

$$X'_B = \frac{X_B}{2} = \frac{907,2}{2} = 453,6 \Omega$$

Reaktance jednoduchého vedení:

$$X_V = X_k \cdot l = 0,4 \cdot 200 = 80 \Omega$$

Reaktance dvojitého vedení:

$$X'_V = \frac{X_V}{2} = \frac{80}{2} = 40 \Omega$$

Reaktance transformátoru T₂:

$$X_{T2} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{12}{100} \cdot \frac{220^2}{250} = 23,2 \Omega$$

Celková reaktance:

$$X_C = X'_B + X'_V + X_{T2} = 453,6 + 40 + 23,2 = 516,8 \Omega$$

Přenášený proud :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos \varphi} = \frac{200 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 0,98} = 535,6 \text{ A}$$

Úbytek napětí (sdružený):

$$\Delta U_C = \sqrt{3} \cdot Z \cdot I = \sqrt{3} \cdot X \cdot I = \sqrt{3} \cdot 516,8 \cdot 535,6 = 479,4 \text{ kV}$$

Úbytek napětí na generátoru:

$$\Delta U_1 = \sqrt{3} \cdot X'_G \cdot \frac{I}{2} = \sqrt{3} \cdot 853,8 \cdot \frac{535,6}{2} = 396 \text{ kV}$$

Úbytek napětí na transformátoru T₁:

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \cdot X_T \cdot \frac{I}{2} = \sqrt{3} \cdot 53,4 \cdot \frac{535,6}{2} = 24,8 \text{ kV}$$

Úbytek napětí na vedení:

$$\Delta U_3 = \sqrt{3} \cdot X'_V \cdot I = \sqrt{3} \cdot 40 \cdot 535,6 = 37,1 \text{ kV}$$

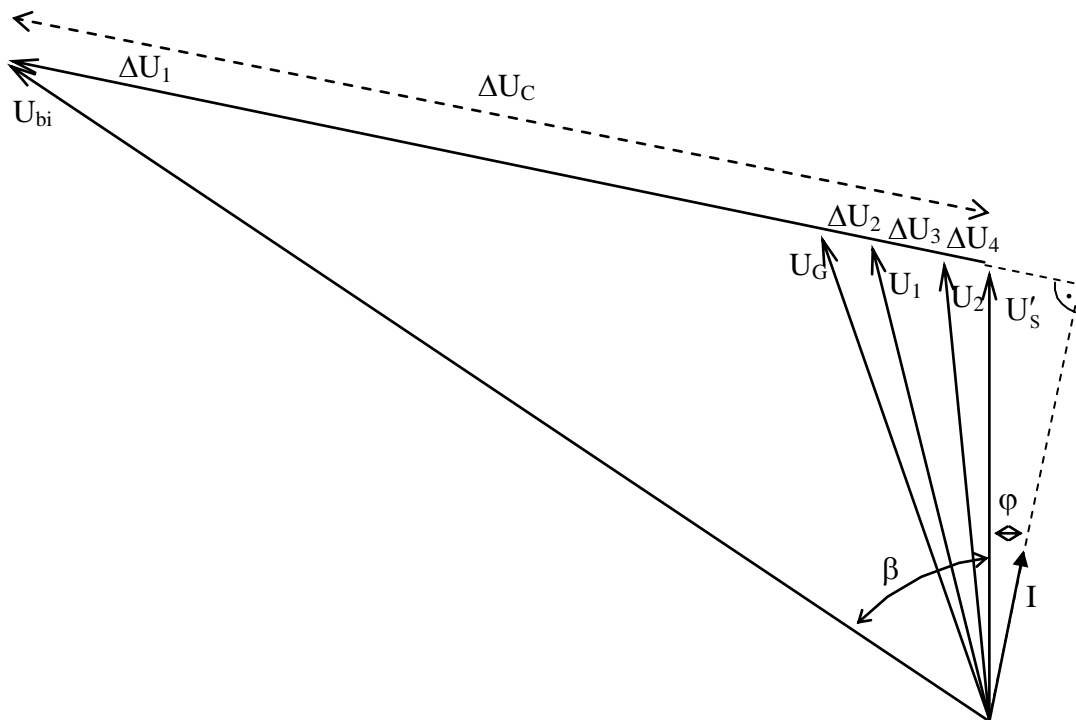
Úbytek napětí na transformátoru T₂:

$$\Delta U_4 = \sqrt{3} \cdot X_{T2} \cdot I = \sqrt{3} \cdot 23,2 \cdot 535,6 = 21,5 \text{ kV}$$

Celkový úbytek napětí:

$$\Delta U_C = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \Delta U_4 = 396 + 24,8 + 37,1 + 21,5 = 479,4 \text{ kV}$$

Na základě vypočtených údajů sestrojíme vektorový diagram:



Z vektorového diagramu určíme:

Indukované napětí:

$$\begin{aligned} U_{bi} &= \sqrt{(U'_S + \Delta U_C \cdot \sin \varphi)^2 + (\Delta U_C \cdot \cos \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{(220 + 479,4 \cdot 0,199)^2 + (479,4 \cdot 0,98)^2} = 565,9 \text{ kV} \end{aligned} \quad (7.2)$$

Zátěžný úhel:

$$\beta = \arctg \frac{\Delta U_C \cdot \cos \varphi}{U'_S + \Delta U_C \cdot \sin \varphi} = \arctg \frac{479,4 \cdot 0,98}{220 + 479,4 \cdot 0,199} = 56,13^\circ \quad (7.3)$$

Maximální přenášený výkon:

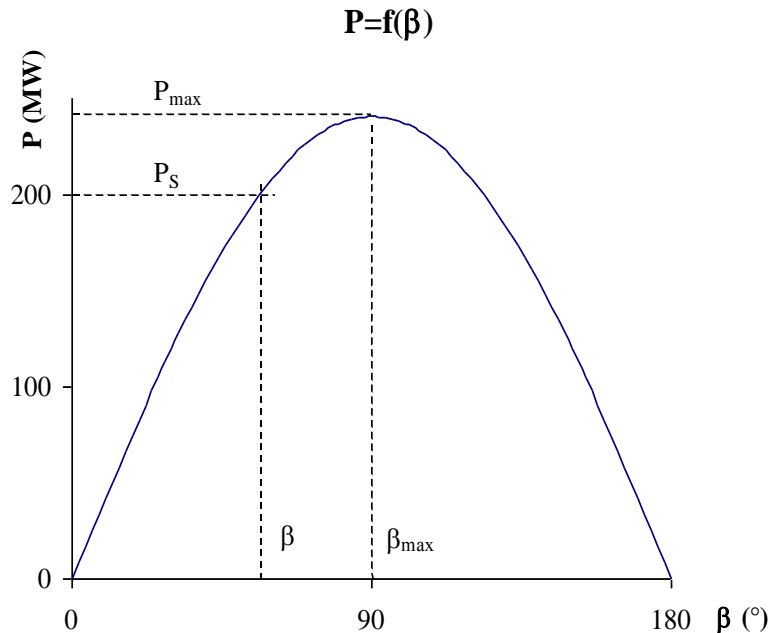
$$P_{\max} = \frac{U_{bi} \cdot U'_S}{X_C} = \frac{565,9 \cdot 220}{516,8} = 240,9 \text{ MW} \quad (7.4)$$

Skutečný přenášený výkon:

$$P_S = P_{\max} \cdot \sin \beta = 240,9 \cdot 0,83 = 200 \text{ MW} \quad (7.5)$$

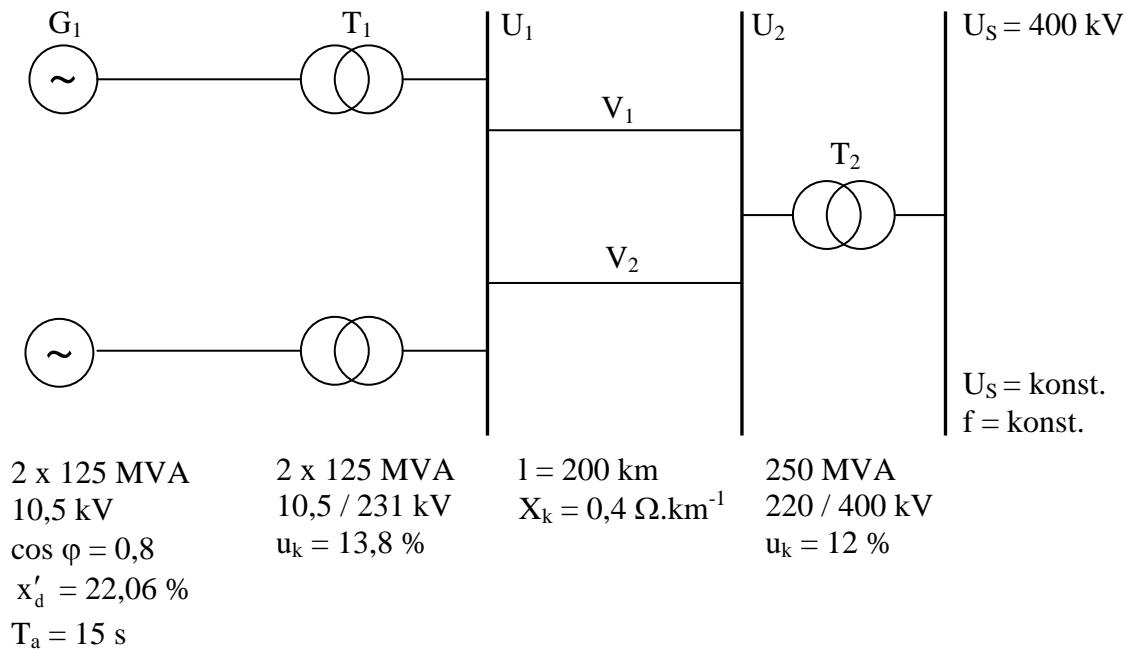
Synchronizační výkon:

$$P_C = P_{\max} \cdot \cos \beta = 240,9 \cdot 0,557 = 134,2 \text{ MW} \quad (7.6)$$



Př. 7.2:

V energetickém systému dle naznačeného zadání vyhodnoťte dynamickou stabilitu pro případ třífázového zkratu uprostřed vedení V_2 . Uvažujte vypínací čas $t_{\text{vyp}} = 0,2$ s, přenášený výkon do systému 200 MW a $\cos \varphi = 0,98$.



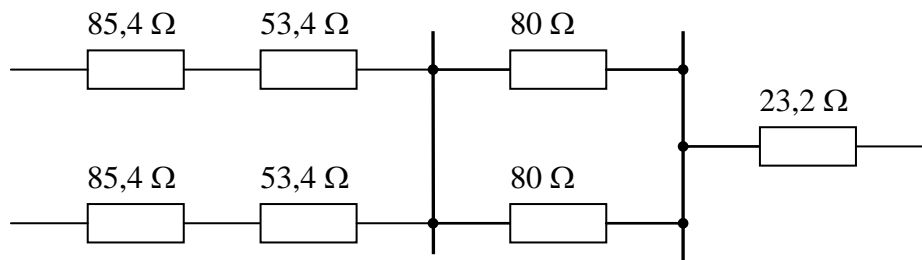
Reaktance generátoru přepočtená na napětí přenosu:

$$X_G = \frac{x'_d}{100} \cdot \frac{U_G^2}{S_G} \cdot \left(\frac{U_2}{U_G} \right)^2 = \frac{22,06}{100} \cdot \frac{220^2}{125} = 85,4 \Omega$$

Reaktance ostatních prvků jsou stejné jako při výpočtu statické stability:

$$X_{T1} = 53,4 \Omega \quad X_{T2} = 23,2 \Omega \quad X_{V1} = X_{V2} = 80 \Omega$$

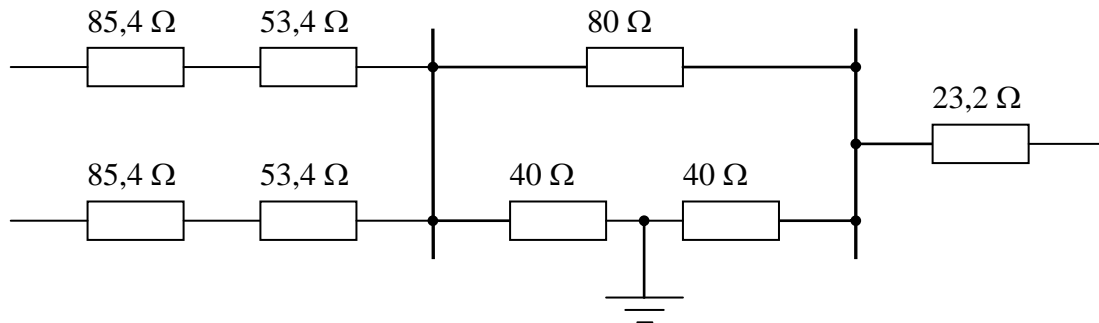
Schéma situace před zkratem:



Výsledná reaktance přenosové cesty před zkratem:

$$X_0 = 132,6 \Omega$$

Schéma situace při zkratu:

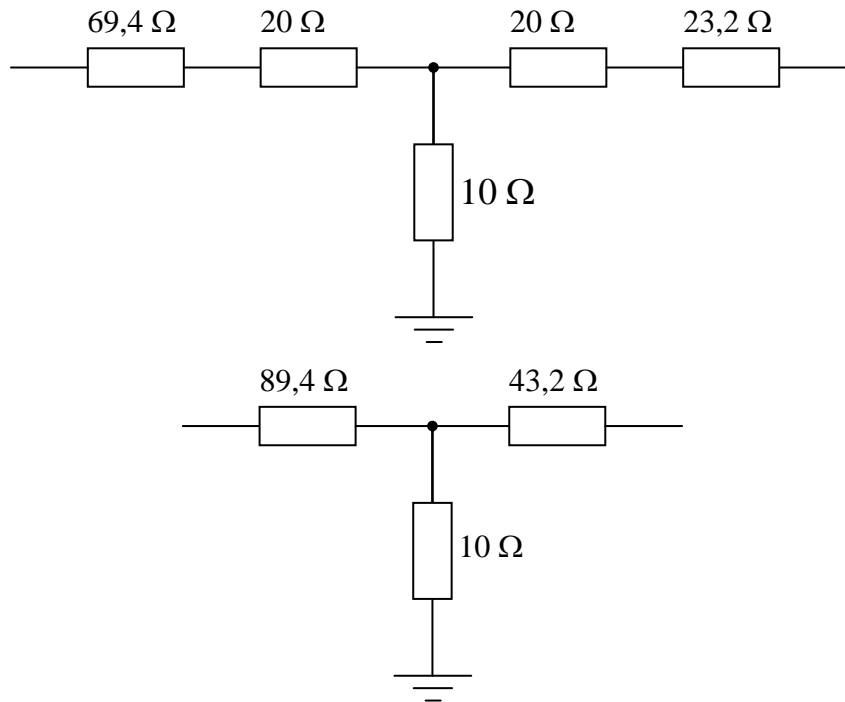


Provedeme transfiguraci a obvod zjednodušíme:

$$X_a = \frac{X_1 \cdot X_3}{X_1 + X_2 + X_3} = \frac{80 \cdot 40}{80 + 40 + 40} = 20 \Omega$$

$$X_b = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2 + X_3} = \frac{80 \cdot 40}{80 + 40 + 40} = 20 \Omega$$

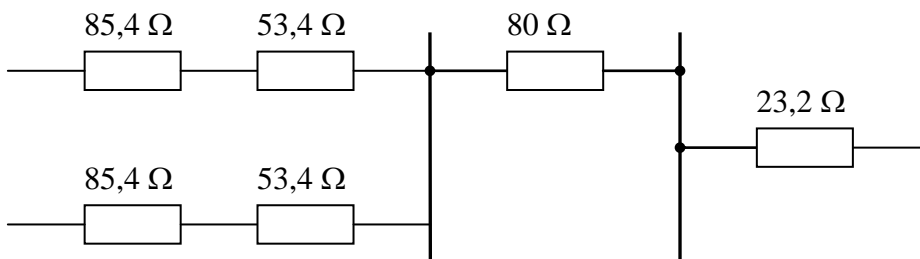
$$X_c = \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1 + X_2 + X_3} = \frac{40 \cdot 40}{80 + 40 + 40} = 10 \Omega$$



Výsledná reaktance přenosové cesty při zkratu:

$$X_1 = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3} = 89,4 + 43,2 + \frac{89,4 \cdot 43,2}{10} = 518,8 \Omega$$

Schéma situace po vypnutí zkratu:



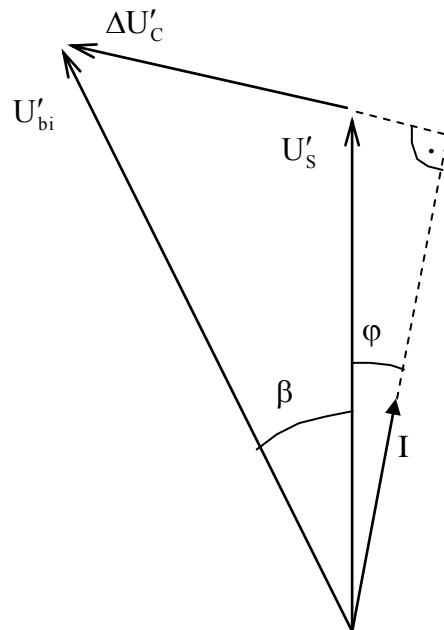
Výsledná reaktance přenosové cesty po vypnutí zkratu:

$$X_{II} = 172,6 \Omega$$

Celkový úbytek napětí ve výchozím stavu:

$$\Delta U'_C = X_0 \cdot \frac{P_s}{U'_s \cdot \cos \varphi} = 132,6 \cdot \frac{200 \cdot 10^6}{220 \cdot 10^3 \cdot 0,98} = 123 \text{ kV} \quad (7.7)$$

Vektorový diagram výchozího stavu:



Z vektorového diagramu určíme:

Indukované napětí:

$$\begin{aligned} U'_{bi} &= \sqrt{(U'_s + \Delta U'_C \cdot \sin \varphi)^2 + (\Delta U'_C \cdot \cos \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{(220 + 123 \cdot 0,199)^2 + (123 \cdot 0,98)^2} = 272,6 \text{ kV} \end{aligned} \quad (7.8)$$

Zátěžný úhel:

$$\beta' = \arctg \frac{\Delta U'_C \cdot \cos \varphi}{U'_s + \Delta U'_C \cdot \sin \varphi} = \arctg \frac{123 \cdot 0,98}{220 + 123 \cdot 0,199} = 26,25^\circ \quad (7.9)$$

Maximální přenášený výkon ve skutečných a poměrných hodnotách vztažený k přenášenému výkonu:

Před zkratem:

$$P_{0\max} = \frac{U'_{bi} \cdot U'_s}{X_0} = \frac{272,6 \cdot 220}{132,6} = 452,3 \text{ MW} \quad (7.10)$$

$$P_{0\max}^* = \frac{P_{0\max}}{P_S} = \frac{452,3}{200} = 2,262 \quad (7.11)$$

V době trvání zkratu:

$$P_{l\max} = \frac{U'_{bi} \cdot U'_s}{X_l} = \frac{272,6 \cdot 220}{518,8} = 115,6 \text{ MW} \quad (7.12)$$

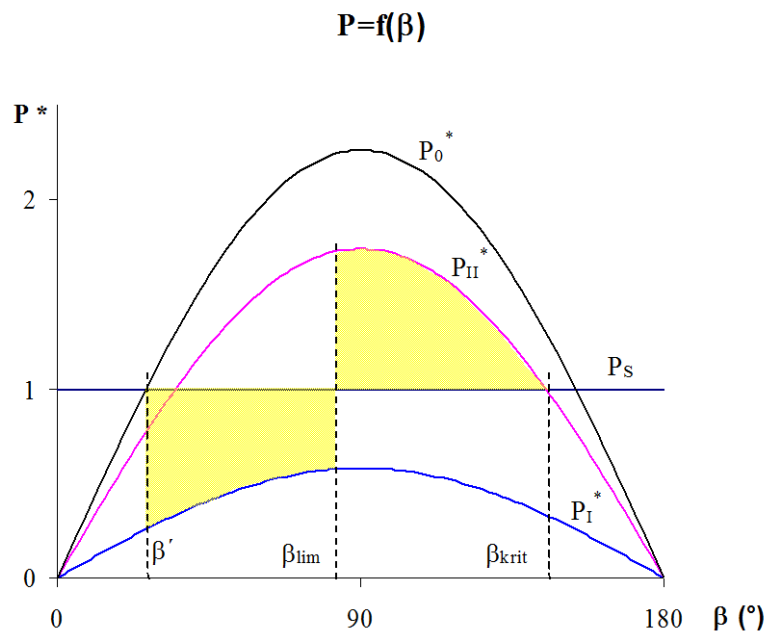
$$P_{l\max}^* = \frac{P_{l\max}}{P_S} = \frac{115,6}{200} = 0,578 \quad (7.13)$$

Po vypnutí zkratu:

$$P_{I\text{max}} = \frac{U'_{bi} \cdot U'_S}{X_{II}} = \frac{272,6 \cdot 220}{172,6} = 347,5 \text{ MW} \quad (7.14)$$

$$P_{I\text{max}}^* = \frac{P_{I\text{max}}}{P_S} = \frac{347,5}{200} = 1,738 \quad (7.15)$$

Vypočítané údaje vyneseme do křivek výkonu pro všechny tři stavy:



Přepočítáme na vztažný výkon rozběhovou konstantu soustrojí:

$$T'_a = T_a \cdot \frac{P_G}{P_S} = 15 \cdot \frac{250 \cdot 0,8}{200} = 15 \text{ s} \quad (7.16)$$

Metodou „krok za krokem“ vyšetříme křivku kyvu pro různé časy vypnutí. Volíme časový interval $\Delta t = 0,05 \text{ s}$, tomu odpovídá konstanta:

$$k = \frac{\omega \cdot \Delta t^2}{T'_a} = \frac{360 \cdot f \cdot \Delta t^2}{T'_a} = \frac{360 \cdot 50 \cdot 0,05^2}{15} = 3^\circ \quad (7.17)$$

Výpočet 1. kroku:

$$\Delta\beta_1 = k \cdot \frac{\Delta P_0^*}{2} = \frac{k}{2} \cdot (P_S^* - P_{I\text{max}}^* \cdot \sin \beta_0) = \frac{3}{2} \cdot (1 - 0,578 \cdot \sin 26,25) = 1,12^\circ \quad (7.18)$$

$$\beta_1 = \beta_0 + \Delta\beta_1 = 26,25 + 1,12 = 27,37^\circ \quad (7.19)$$

Výpočet 2. kroku:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_2 &= \Delta\beta_1 + k \cdot \Delta P_1^* = \Delta\beta_1 + k \cdot (P_S^* - P_{I\text{max}}^* \cdot \sin \beta_1) = \\ &= 1,12 + 3 \cdot (1 - 0,578 \cdot \sin 27,37) = 3,32^\circ \end{aligned} \quad (7.20)$$

$$\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta_2 = 27,37 + 3,32 = 30,69^\circ \quad (7.21)$$

Výpočet dalších kroků se provede obdobně jako 2. krok:

$$\Delta\beta_n = \Delta\beta_{n-1} + k \cdot \Delta P_{n-1}^* \quad (7.22)$$

$$\beta_n = \beta_{n-1} + \Delta\beta_n \quad (7.23)$$

krok	t (s)	Bez vypnutí			Vypnuto za 0,2 s			Vypnuto za 0,5 s		
		$\Delta\beta$	β	ΔP^*	$\Delta\beta$	β	ΔP^*	$\Delta\beta$	β	ΔP^*
0	0,00	0,00	26,25	0,744	0,00	26,25	0,744	0,00	26,25	0,744
1	0,05	1,12	27,37	0,734	1,12	27,37	0,734	1,12	27,37	0,734
2	0,10	3,32	30,69	0,705	3,32	30,69	0,705	3,32	30,69	0,705
3	0,15	5,44	36,13	0,659	5,44	36,13	0,659	5,44	36,13	0,659
t_{vyp} 4	0,20	7,42	43,55	0,602	7,42	43,55	-0,197	7,42	43,55	0,602
5	0,25	9,22	52,77	0,540	6,82	50,37	-0,339	9,22	52,77	0,540
6	0,30	10,84	63,61	0,482	5,81	56,18	-0,444	10,84	63,61	0,482
7	0,35	12,29	75,89	0,439	4,48	60,65	-0,515	12,29	75,89	0,439
8	0,40	13,61	89,50	0,422	2,93	63,58	-0,557	13,61	89,50	0,422
9	0,45	14,87	104,37	0,440	1,26	64,85	-0,573	14,87	104,37	0,440
t_{vyp} 10	0,50	16,19	120,56	0,502	-0,46	64,39	-0,567	16,19	120,56	-0,497
11	0,55	17,70	138,26	0,615	-2,16	62,23	-0,538	14,70	135,26	-0,223
12	0,60	19,54	157,80	0,782	-3,77	58,45	-0,481	14,03	149,30	0,113
13	0,65	21,89	179,69	0,997	-5,22	53,24	-0,392	14,37	163,66	0,511
14	0,70	24,88	204,57	1,240	-6,39	46,84	-0,268	15,90	179,57	0,987
15	0,75	28,60	233,17	1,463	-7,20	39,65	-0,109	18,86	198,43	1,550
16	0,80	32,99	266,16	1,577	-7,52	32,12	0,076	23,51	221,94	2,162
17	0,85	37,72	303,88	1,480	-7,30	24,83	0,270	30,00	251,94	2,652
18	0,90	42,16	346,04	1,139	-6,49	18,34	0,453	37,95	289,90	2,634
19	0,95	45,58	391,62	0,697	-5,13	13,21	0,603	45,86	335,75	1,714
20	1,00	47,67	439,28	0,432	-3,32	9,90	0,701	51,00	386,75	0,218
21	1,05	48,96	488,25	0,546	-1,21	8,68	0,738	51,65	438,40	-0,703
22	1,10	50,60	538,85	0,988	1,00	9,68	0,708	49,54	487,95	-0,371
23	1,15	53,57	592,42	1,458	3,12	12,80	0,615	48,43	536,38	0,890
24	1,20	57,94	650,36	1,542	4,97	17,77	0,470	51,10	587,48	2,281

$$\Delta P_n^* = P_S^* - P_{In}^* = 1 - P_{I_{max}}^* \cdot \sin \beta_n \quad \text{před vypnutím zkratu} \quad (7.24)$$

$$\Delta P_n^* = P_S^* - P_{In}^* = 1 - P_{I_{max}}^* \cdot \sin \beta_n \quad \text{po vypnutí zkratu} \quad (7.25)$$

Výpočet 5. kroku při vypnutí zkratu $t_{vyp} = 0,2$ s:

$$\Delta\beta_5 = \Delta\beta_4 + k \cdot \Delta P_4^* = \Delta\beta_4 + k \cdot (P_S^* - P_{I_{max}}^* \cdot \sin \beta_4) =$$

$$= 7,42 + 3 \cdot (1 - 1,738 \cdot \sin 43,55) = 6,82^\circ$$

$$\beta_5 = \beta_4 + \Delta\beta_5 = 43,55 + 6,82 = 50,37^\circ \quad (7.27)$$

Další výpočet jako v 5. kroku.

Určení kritického a limitního úhlu vypnutí (pomocí pravidla ploch, z rovnosti urychlovací a brzdící plochy):

$$\beta_{krit} = 180 - \arcsin \frac{P_S^*}{P_{I_{max}}^*} = 180 - \arcsin \frac{1}{1,738} = 144,87^\circ \quad (7.28)$$

$$\beta_{krit} = 144,87^\circ = 2,529$$

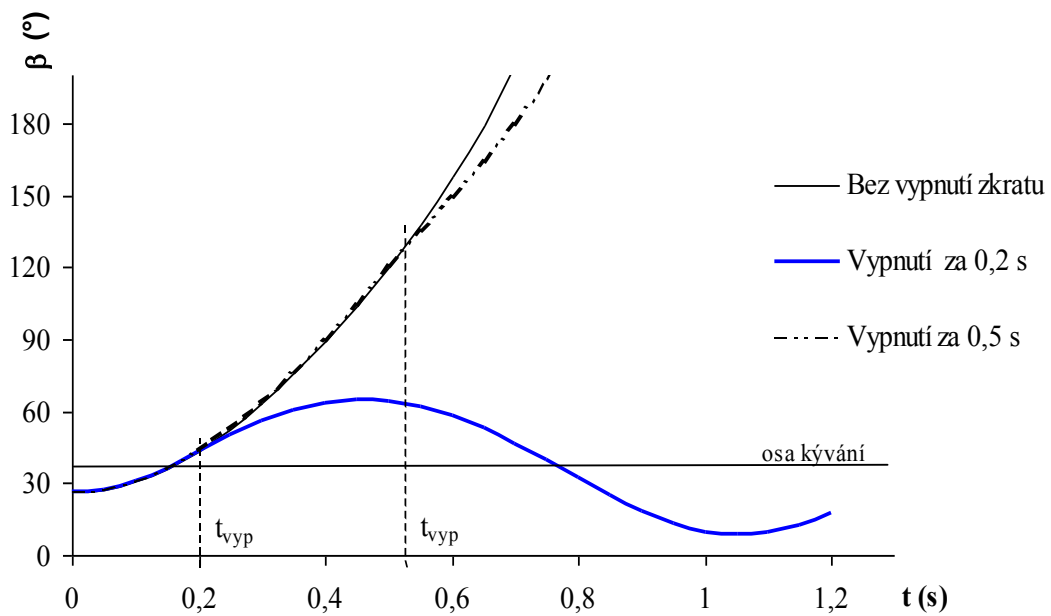
$$\beta_0 = 26,25^\circ = 0,458$$

$$\beta_{lim} = \arccos \frac{P_S^* (\beta_{krit} - \beta_0) + P_{I_{limax}}^* \cdot \cos \beta_{krit} - P_{limax}^* \cdot \cos \beta_0}{P_{I_{limax}}^* - P_{limax}^*} =$$

$$= \arccos \frac{1 \cdot (2,529 - 0,458) + 1,738 \cdot \cos 144,87 - 0,578 \cdot \cos 26,25}{1,738 - 0,578} = 83,51^\circ \quad (7.29)$$

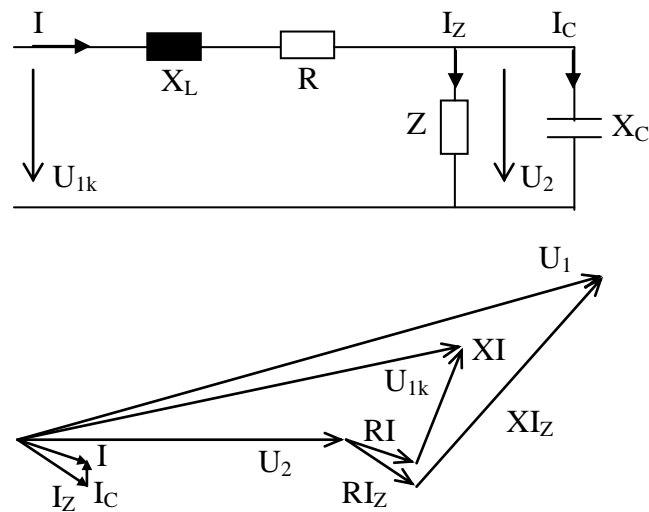
$$\beta_{lim} = 83,51^\circ \approx t_{lim} = 0,37s$$

Křivka kyvu pro vypočtené případy



8. KOMPENZACE ÚČINÍKU

Paralelní kompenzace



Dochází ke zmenšení úbytku napětí a snížení přenosových ztrát.

Výkon kondenzátorové baterie:

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

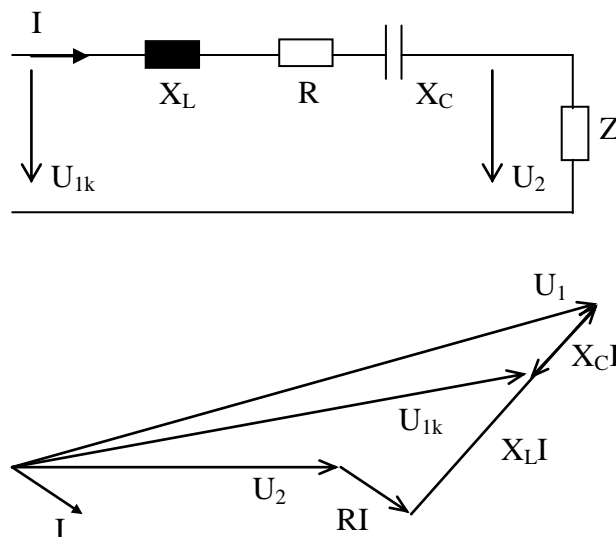
(8.1)

P - činný příkon kompenzovaného objektu

$\cos \varphi$ - účinník před kompenzací

$\cos \varphi_k$ - účinník po kompenzací

Sériová kompenzace



Dochází ke zmenšení úbytku napětí. Nedochozí ke snížení přenosových ztrát, protože vedením teče stejný proud. Nevýhodou je zvýšení zkratových proudů vlivem zmenšené reaktance.

Př. 8.1:

Asynchronní motor $P = 200 \text{ kW}$, $\cos\varphi = 0,8$, $U_n = 400 \text{ V}$. 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:

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

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

$$I_{M\dot{e}} = \frac{I_{Mj}}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{216,5}{0,75} = 288,7 \text{ A}$$

$$\bar{I}_M = (288,7 - j216,5) \text{ A}$$

Proud tekoucí přívodním kabelem po kompenzaci:

$$I_K = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_S \cdot \cos\varphi_k} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,92} = 313,8 \text{ A}$$

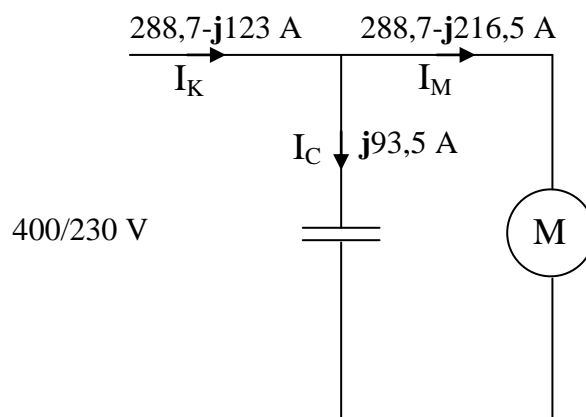
$$I_{Kj} = I_K \cdot \sin\varphi_k = 313,8 \cdot 0,392 = 123 \text{ A}$$

$$I_{K\dot{e}} = \frac{I_{Kj}}{\operatorname{tg}\varphi_k} = \frac{123}{0,426} = 288,7 \text{ A}$$

$$\bar{I}_K = (288,7 - j123) \text{ A}$$

Proud tekoucí kompenzačním kondenzátorem:

$$I_C = I_{Mj} - I_{Kj} = 216,5 - 123 = 93,5 \text{ A}$$



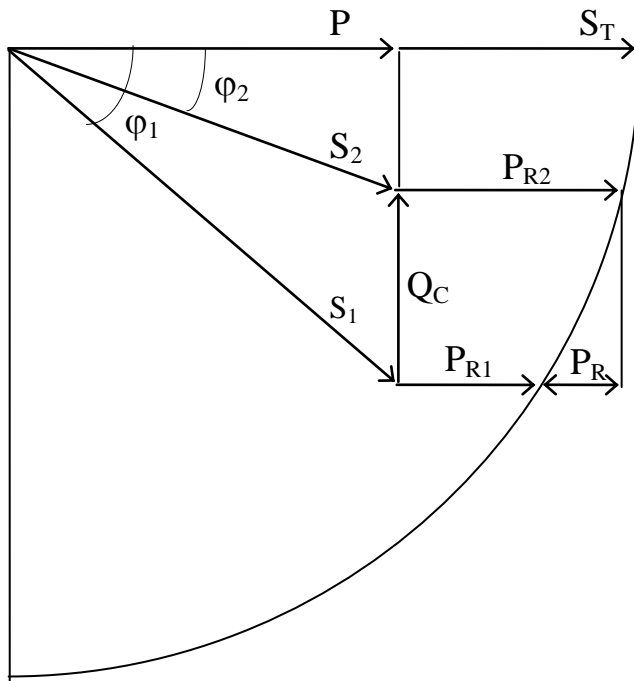
Výkon kondenzátorové baterie:

$$Q_C = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_C = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 93,5 = 64,8 \text{ k var}$$

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) = 200 \cdot (0,75 - 0,426) = 64,8 \text{ k var}$$

Př. 8.2:

Průmyslový závod má ve své rozvodně transformátor o jmenovitém výkonu $S_T = 500$ kVA. Z tohoto transformátoru odebírá závod činný výkon $P = 270$ kW při účinníku $\cos\varphi_1 = 0,78$. Určete potřebný výkon kondenzátorové baterie Q_C pro zlepšení účinníku na hodnotu $\cos\varphi_2 = 0,95$. Jak se zvýší rezerva činného výkonu transformátoru po provedené kompenzaci?



Potřebný kompenzační výkon:

$$Q_k = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_k) = 270 \cdot (0,802 - 0,329) = 127,7 \text{ k var}$$

Rezerva činného výkonu před kompenzací a po ní:

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

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

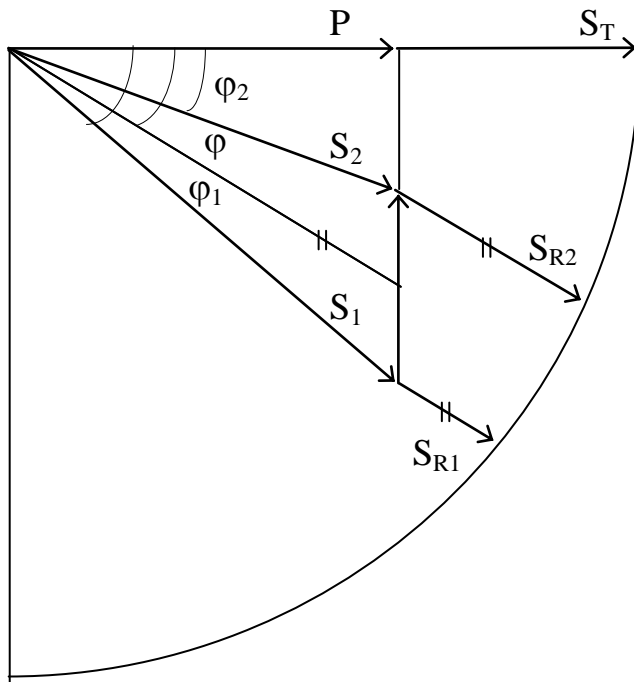
(8.2)

Zvýšení rezervy činného výkonu:

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

Př. 8.3:

Průmyslový závod má ve své rozvodně transformátor o jmenovitém výkonu $S_T = 500$ kVA. Z tohoto transformátoru odebírá závod činný výkon $P = 270$ kW při účinníku $\cos\varphi_1 = 0,78$. Jak se zvýší rezerva zdánlivého výkonu transformátoru ($\cos\varphi = 0,85$) po provedené kompenzaci na účinník $\cos\varphi_2 = 0,95$?



$$\begin{aligned}
 S_T^2 &= (S_1 \cdot \cos \varphi_1 + S_{R1} \cdot \cos \varphi)^2 + (S_1 \cdot \sin \varphi_1 + S_{R1} \cdot \sin \varphi)^2 \\
 S_T^2 &= S_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 + 2 \cdot S_1 \cdot S_{R1} \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi + S_{R1}^2 \cdot \cos^2 \varphi + \\
 &+ S_1^2 \sin^2 \varphi_1 + 2 \cdot S_1 \cdot S_{R1} \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi + S_{R1}^2 \cdot \sin^2 \varphi \\
 S_T^2 &= S_1^2 (\cos^2 \varphi_1 + \sin^2 \varphi_1) + 2 \cdot S_1 \cdot S_{R1} (\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi + \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi) + S_{R1}^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \\
 S_T^2 &= S_1^2 + 2 \cdot S_1 \cdot S_{R1} \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) + S_{R1}^2
 \end{aligned}$$

Řešíme následující kvadratickou rovnici:

$$S_{R1}^2 + 2 \cdot S_1 \cdot S_{R1} \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) + S_1^2 + S_T^2 = 0$$

Její obecné řešení je:

$$S_{R1} = -S_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) \pm \sqrt{S_1^2 \cdot \sin^2(\varphi - \varphi_1) + S_T^2}$$

Hledané řešení S_{R1} tedy je:

$$S_{R1} = -S_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) + \sqrt{S_1^2 \cdot \sin^2(\varphi - \varphi_1) + S_T^2} \quad (8.3)$$

(Záporné řešení nemá fyzikální význam)

Obdobně pro S_{R2} platí:

$$S_{R2} = -S_2 \cdot \cos(\varphi - \varphi_2) + \sqrt{S_2^2 \cdot \sin^2(\varphi - \varphi_2) + S_T^2} \quad (8.4)$$

Po dosazení získáme:

$$S_{R1} = -\frac{270}{0,78} \cdot \cos(31,79 - 38,74) + \sqrt{\left(\frac{270}{0,78}\right)^2 \cdot \sin^2(31,79 - 38,74) + 500^2} = 158,1 \text{ kVA}$$

$$S_{R2} = -\frac{270}{0,95} \cdot \cos(31,79 - 18,19) + \sqrt{\left(\frac{270}{0,95}\right)^2 \cdot \sin^2(31,79 - 18,19) + 500^2} = 228,2 \text{ kVA}$$

Zvýšení rezervy zdánlivého výkonu při $\cos\varphi$:

$$S_R = S_{R2} - S_{R1} = 228,2 - 158,1 = 70,1 \text{ kVA}$$

Poznámka:

Při malých úhlech $\alpha_1 = \varphi - \varphi_1$ a $\alpha_2 = \varphi - \varphi_2$ můžeme v obecném řešení zanedbat členy $\sin^2(\varphi - \varphi_1)$ a $\sin^2(\varphi - \varphi_2)$ a získat tak následující řešení:

$$S_{R1} = -S_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) + S_T$$

$$S_{R2} = -S_2 \cdot \cos(\varphi - \varphi_2) + S_T$$

$$S_R = S_1 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1) - S_2 \cdot \cos(\varphi - \varphi_2) \quad (8.5)$$

Po dosazení:

$$S_R = \frac{270}{0,78} \cdot \cos(31,79 - 38,74) - \frac{270}{0,95} \cdot \cos(31,79 - 18,19) = 67,4 \text{ kVA}$$

9. SPOLEHLIVOST

Rozvodna 110/10 kV má dva transformátory o výkonu 25 MVA. Jeden transformátor je zapojen, druhý slouží jako 100 % rezerva (studená rezerva). V případě poruchy na transformátoru dojde k zapojení rezervy za 0,5 h (manipulační čas).

a) Jak se změní spolehlivost rozvodny, dojde-li ke snížení manipulační doby na 0,25 h ?

b) Jak se změní spolehlivost rozvodny, budou-li trvale zapojena obě trať ?

V obou případech zanedbejte údržbový prostož

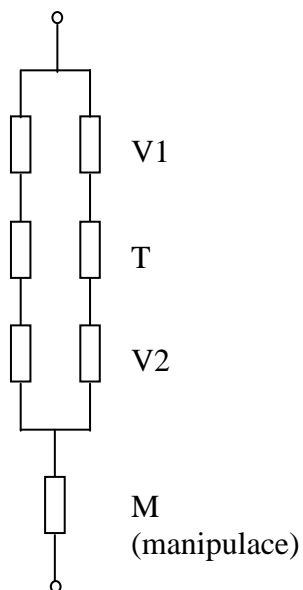
Z přílohy ČEZ 22/80 lze určit následující spolehlivostní parametry prvků:

		λ_P (rok ⁻¹)	τ_P (h)
T	Trafo 110/10 kV	0,04	1300
V1	Vývod 110 kV	0,01	100
V2	Vývod 10 kV	0,01	30

λ_P ...intenzita poruch

τ_P ...střední doba trvání poruchy

Spolehlivostní schéma



Pravděpodobnost bezporuchového chodu:

$$P = 1 - \frac{\lambda_P \cdot \tau_P}{8760} \quad (9.1)$$

$$P_T = 1 - \frac{0,04 \cdot 1300}{8760} = 0,994064$$

$$P_{V1} = 1 - \frac{0,01 \cdot 100}{8760} = 0,999886$$

$$P_{V2} = 1 - \frac{0,01 \cdot 30}{8760} = 0,999966$$

Spolehlivost větve V1, T, V2 – sériové řazení:

$$\lambda_p = \lambda_{PV1} + \lambda_{PT} + \lambda_{PV2} = 0,01 + 0,04 + 0,01 = 0,06 \text{ rok}^{-1} \quad (9.2)$$

$$\tau_p = \frac{\lambda_{PV1} \cdot \tau_{PV1} + \lambda_{PT} \cdot \tau_{PT} + \lambda_{PV2} \cdot \tau_{PV2}}{\lambda_p} =$$

$$= \frac{0,01 \cdot 100 + 0,04 \cdot 1300 + 0,01 \cdot 30}{0,06} = 888,33 \text{ h} \quad (9.3)$$

$$P = 1 - \frac{\lambda_p \cdot \tau_p}{8760} = 1 - \frac{0,06 \cdot 888,33}{8760} = 0,993916$$

$$P = P_{V1} \cdot P_T \cdot P_{V2} \quad (9.4)$$

Spolehlivost paralelního zapojení (bez manipulace) = spolehlivost rozvodny při zapojení obou traf (horká rezerva):

$$\lambda_{PI} = \frac{\lambda_p^2 \cdot 2 \cdot \tau_p}{8760} = \frac{0,06^2 \cdot 2 \cdot 888,33}{8760} = 0,00073 \text{ rok}^{-1} \quad (9.5)$$

$$\tau_{PI} = \frac{\lambda_p^2 \cdot \tau_p^2}{\lambda_{PI} \cdot 8760} = \frac{0,06^2 \cdot 888,33^2}{0,00073 \cdot 8760} = 444,17 \text{ h} \quad (9.6)$$

$$P_1 = 1 - \frac{\lambda_{PI} \cdot \tau_{PI}}{8760} = 1 - \frac{0,00073 \cdot 444,17}{8760} = 0,999963$$

Spolehlivost rozvodny s manipulací:

Prvek M má:

$$\lambda_{PM} = \lambda_p = 0,06 \text{ rok}^{-1}$$

$$\tau_{PM} = 0,5 \text{ h} \quad (\text{stávající stav})$$

$$\tau'_{PM} = 0,25 \text{ h} \quad (\text{snížený manipulační čas})$$

$$\lambda_{PR} = \lambda_{PI} + \lambda_{PM} = 0,00073 + 0,06 = 0,06073 \text{ rok}^{-1} \equiv \lambda'_{PR}$$

Výsledná intenzita poruch nezávisí na manipulačním čase.

$$\tau_{PR} = \frac{\lambda_{PI} \cdot \tau_{PI} + \lambda_{PM} \cdot \tau_{PM}}{\lambda_{PR}} = \frac{0,00073 \cdot 444,17 + 0,06 \cdot 0,5}{0,06073} = 5,83 \text{ h}$$

$$P_{R1} = 1 - \frac{\lambda_{PR} \cdot \tau_{PR}}{8760} = 1 - \frac{0,06073 \cdot 5,83}{8760} = 0,999960$$

$$\tau'_{PR} = \frac{\lambda_{PI} \cdot \tau_{PI} + \lambda_{PM} \cdot \tau'_{PM}}{\lambda_{PR}} = \frac{0,00073 \cdot 444,17 + 0,06 \cdot 0,25}{0,06073} = 5,59 \text{ h}$$

$$P'_{R1} = 1 - \frac{\lambda_{PR} \cdot \tau'_{PR}}{8760} = 1 - \frac{0,06073 \cdot 5,59}{8760} = 0,999961$$

10. ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ

Při návrhu průřezu vodičů se zvolí největší průřez požadovaný některou z těchto podmínek:

- Při daném proudové zatížení nesmí být teplota vodiče větší než dovolená.
- Úbytek napětí musí být ve stanovených mezích.
- Vodiče musí odolávat tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu.
- Vodiče musí být dostatečně mechanicky pevné.
- Průřezy vodičů musí být v hospodárných mezích.
- Musí být zaručena správná funkce elektrických ochran.

Proudové zatížení

Trvalé proudové zatížení jednotlivých druhů vodičů při jejich dovolené provozní teplotě je závislé na druhu a teplotě prostředí a způsobu, jakým je vodič v tomto prostředí uložen (dle ČSN 33 2000-5-523).

$$I = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot I_n \quad (10.1)$$

k_i - přepočítací koeficienty

Úbytek napětí

hladina napětí	dovolené odchylky	norma
NN	± 10%	ČSN 33 0121
VN	± 10%	ČSN EN 50 160 (ČSN 33 0122)
110 kV	± 10%	ČSN 33 0120
220 kV	± 10%	
400 kV	± 5%	

Tepelné účinky zkratových proudů

Minimální průřez musí splňovat následující podmínku (dle ČSN EN 60 865-1):

$$S_{\min} \geq I_{ke} \frac{\sqrt{t_k}}{K} \quad (10.2)$$

I_{ke} - ekvivalentní oteplovací proud

t_k - doba trvání zkratu

K - koeficient respektující materiál a teplotu jádra před a po zkratu

$$I_{ke} = I_k'' \cdot k_e \quad (10.3)$$

I_k'' - počáteční rázový zkratový proud

k_e - součinitel pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu

Dynamické účinky zkratových proudů

Kontroluje se síla působící mezi vodiči (dle ČSN 60 865-1):

$$F_k = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{I_{km}^2}{a} \cdot 10^{-7} \quad (10.4)$$

I_{km} - nárazový zkratový proud

k_1 - koeficient tvaru

k_2 - koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů

a - vzájemná vzdálenost vodičů

Mechanická pevnost

Při rozpětí větším než 20 m je nutné provést kontrolu namáhání vodičů a výpočet průhybu pro tyto případy počasí (dle ČSN 33 3300):

- a) $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, bezvětří, námrazek
- b) $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vítr, bez námrazku
- c) $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, bezvětří
- d) $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, bezvětří, bez námrazku
- e) $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, vítr, námrazek

U každého vedení vvn, vn a nn vyjma vedení do rozpětí 50 m se musí kontrolovat, zda namáhání vodičů při zvětšeném námrazku nepřesahuje 90 % pevnosti u vodičů ocelových, 85 % pevnosti u lan AlFe, 80 % pevnosti u lan Al.

Hospodárnost průřezu

Hospodárný průřez určíme ze vztahu (dle ČSN 34 1610):

$$S = k \cdot I_p \cdot \sqrt{T} \quad (10.5)$$

k - koeficient respektující druh a materiál vedení

I_p - výpočtový proud

T - doba plných ztrát

$$T = t \cdot \left[0,2 \frac{A}{P_p \cdot t} + 0,8 \left(\frac{A}{P_p \cdot t} \right)^2 \right] \quad (10.6)$$

A - energie přenesená vedením za rok

P_p - výpočtový výkon

t - počet provozních hodin připojeného zařízení za rok

$$P_p = P_i \cdot \beta \quad (10.7)$$

P_i - instalovaný výkon

β - součinitel náročnosti

Bezpečnost provozu

Jedná se o správné působení ochrany před nebezpečným dotykem (dle ČSN 332000-4-41).

Impedance poruchové smyčky musí splňovat vztah :

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0 \quad (10.8)$$

$$Z_s = Z_{sv} \cdot k_v \quad (10.9)$$

Z_{sv} - impedance poruchové smyčky zahrnuje zdroj, fázový vodič až k místu poruchy a ochranný vodič mezi místem poruchy a zdrojem

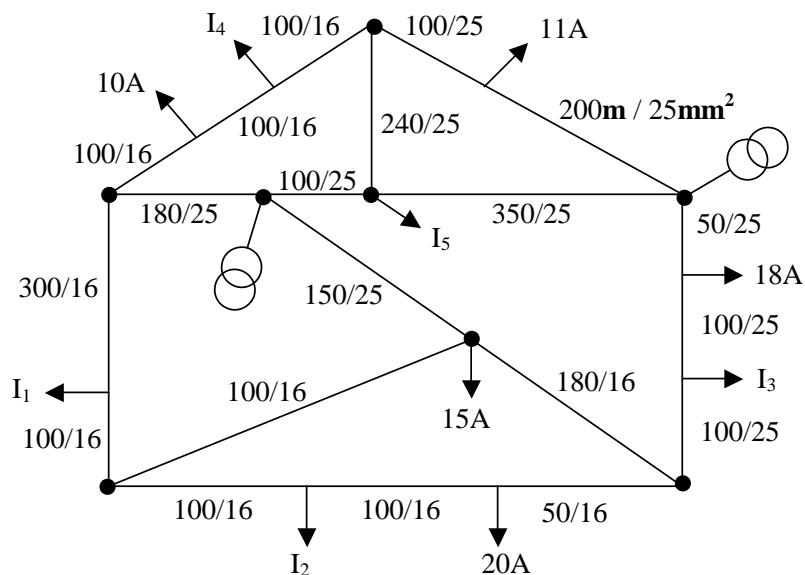
I_a - proud zajišťující samočinné působení odpojovacího ochranného prvku v době stanovené normou

U_0 - jmenovité napětí proti zemi

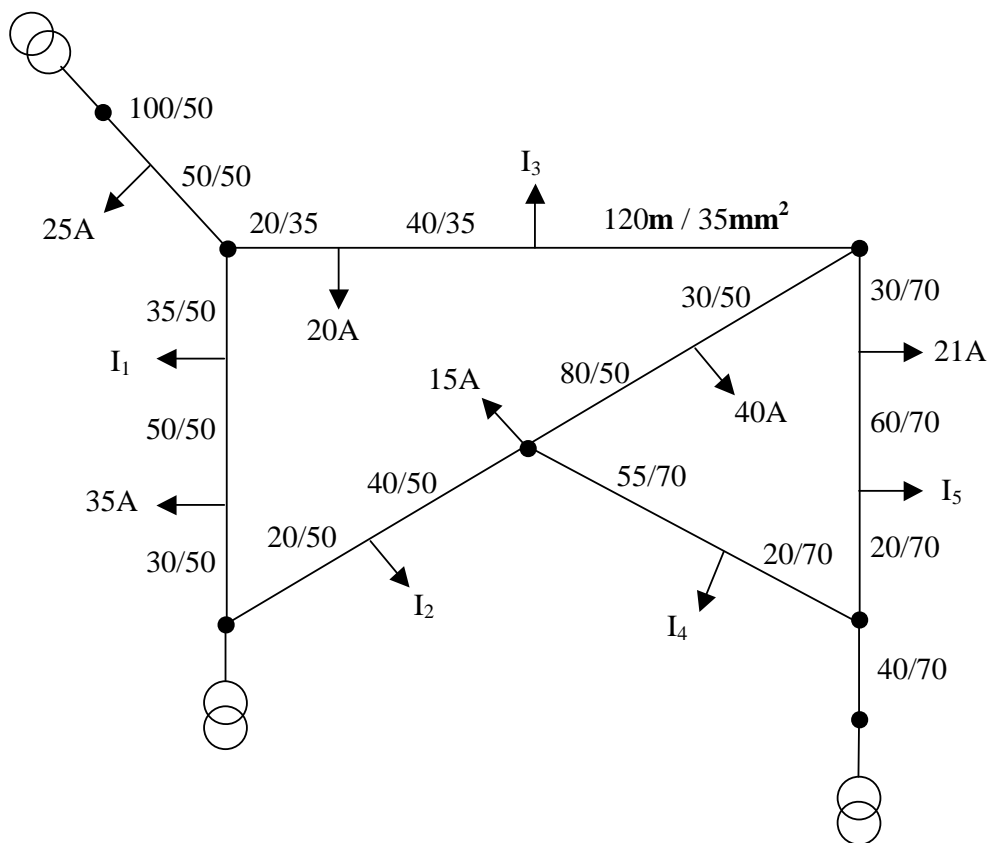
k_v - koeficient zohledňující provozní vlivy, tolerance a napěťový součinitel zatížení sítě ($k_v = 1,25$)

11. SAMOSTATNÉ PROGRAMY

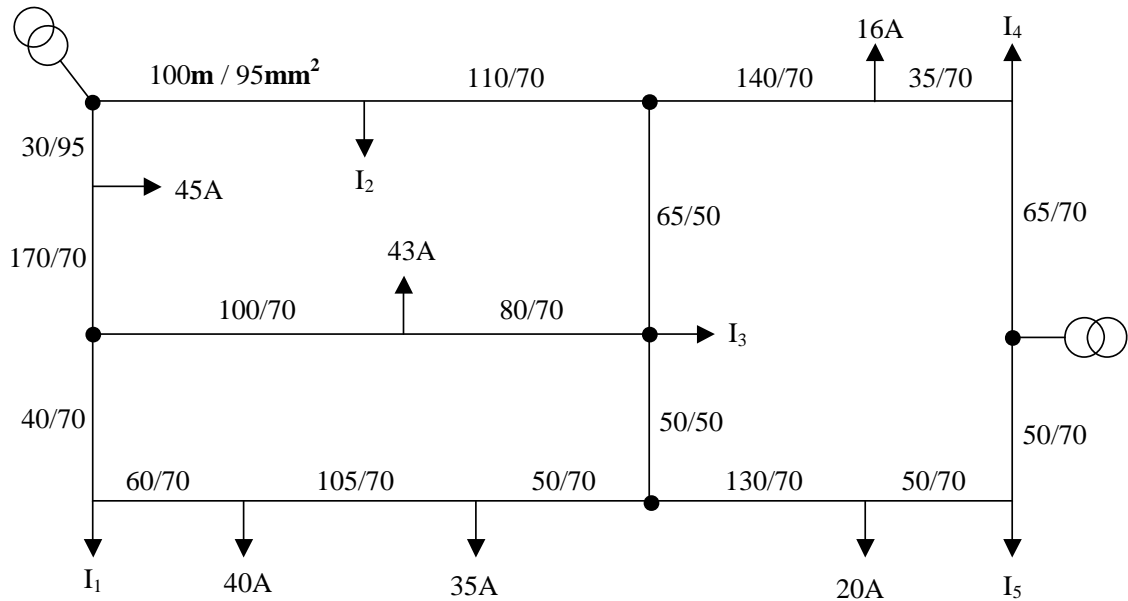
I/1: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené jednofázové síti 230V, $\cos \varphi = 1$, Cu vodiče. Určete, zda maximální úbytek napětí nepřekračuje dovolenou mez 5%, případně proveďte úpravu průřezů.



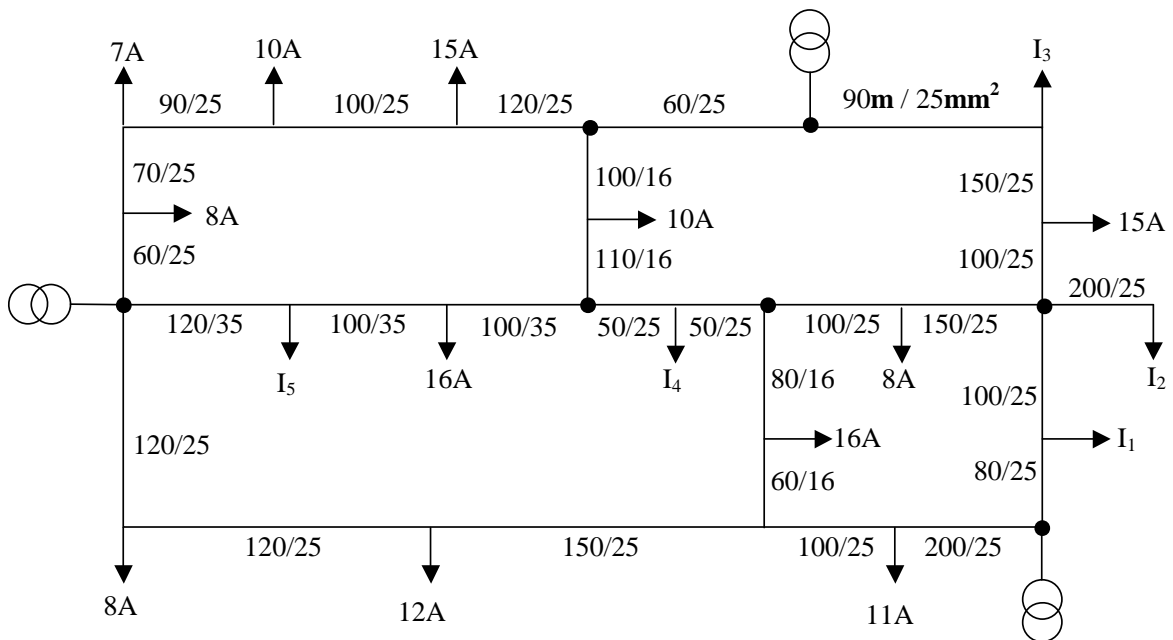
I/2: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené jednofázové síti 230V, $\cos \varphi = 1$, Cu vodiče. Určete, zda maximální úbytek napětí nepřekračuje dovolenou mez 5%, případně proveďte úpravu průřezů.



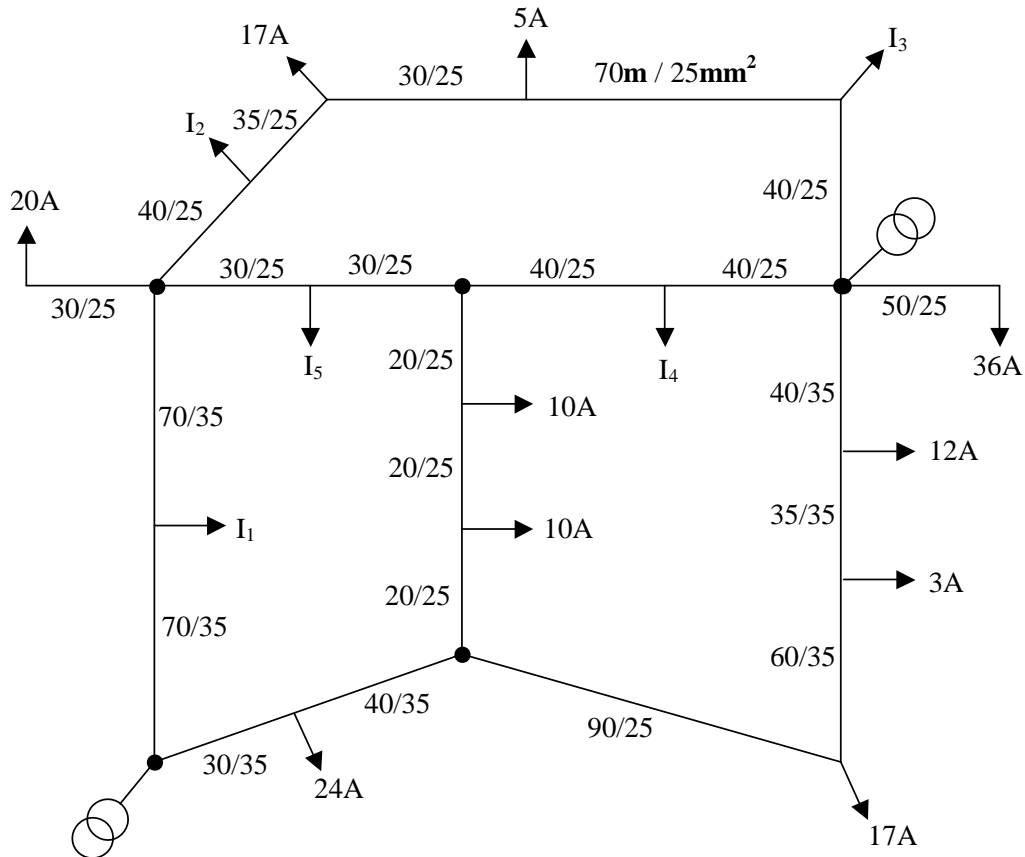
I/3: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené jednofázové síti 230V, $\cos \varphi = 1$, Cu vodiče. Určete, zda maximální úbytek napětí nepřekračuje dovolenou mez 5%, případně proveďte úpravu průřezů.



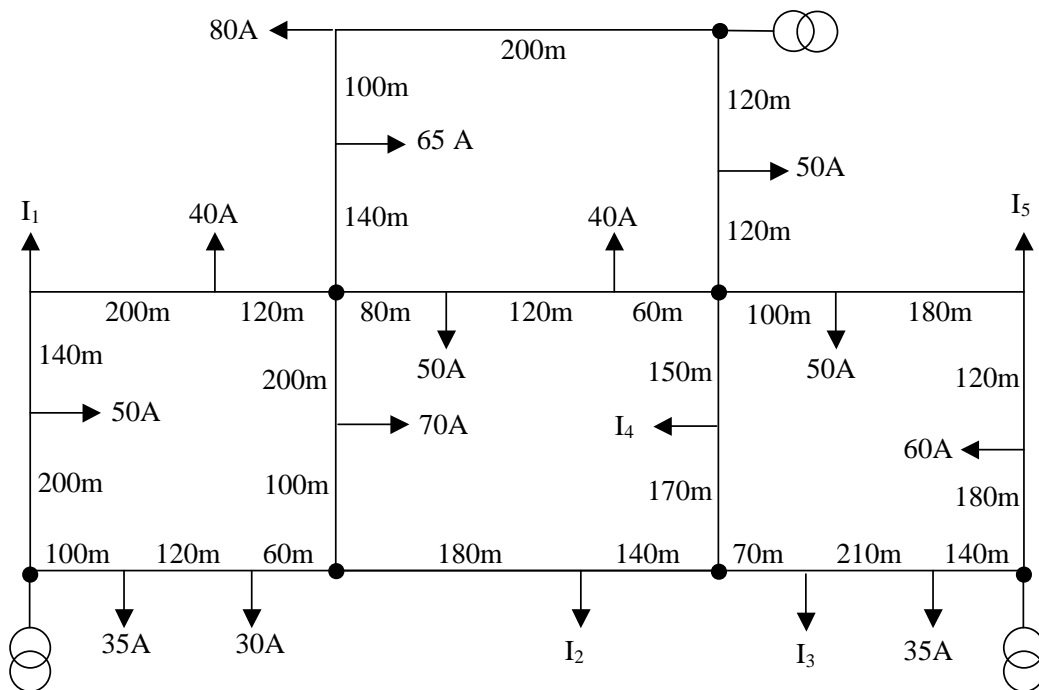
I/4: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené jednofázové síti 230V, $\cos \varphi = 1$, Cu vodiče. Určete, zda maximální úbytek napětí nepřekračuje dovolenou mez 5%, případně proveďte úpravu průřezů.



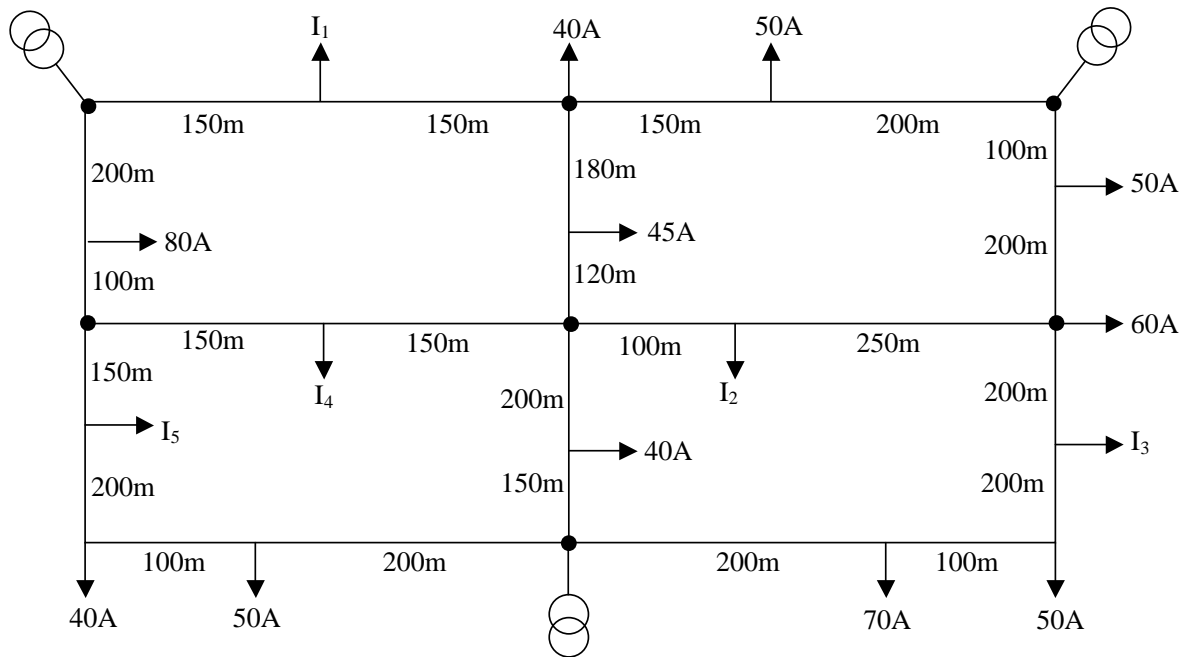
I/5: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené jednofázové síti 230V, $\cos \varphi = 1$, Cu vodiče. Určete, zda maximální úbytek napětí nepřekračuje dovolenou mez 5%, případně proveďte úpravu průřezů.



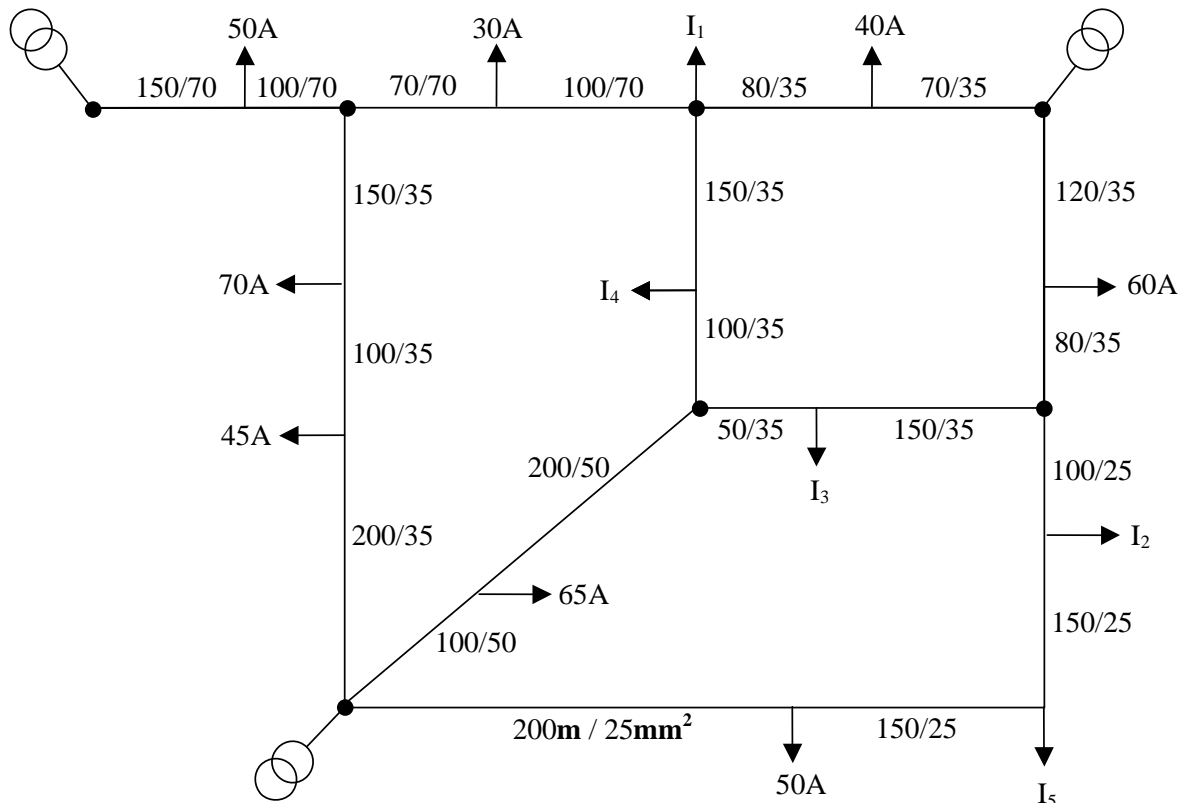
I/6: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené kabelové síti 3x400/230V, $\cos \varphi = 0,75$. Síť je provedena Cu kabelem 50 mm², uvažujte $X_k = 0$. Dále určete místo maximálního úbytku napětí a minimální napájecí výkony jednotlivých transformátorů.



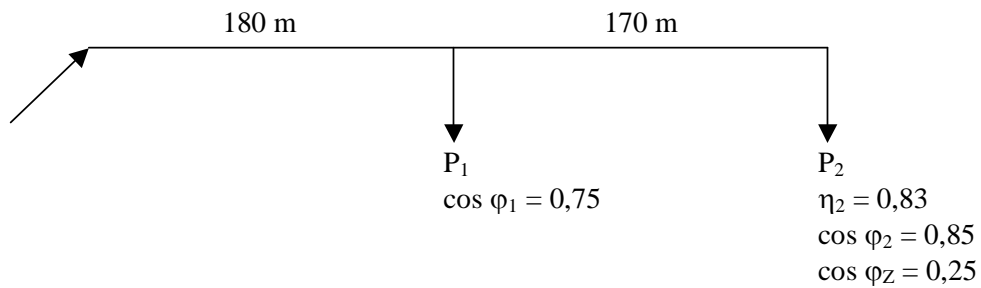
I/7: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené kabelové síti 3x400/230V, $\cos \varphi = 0,8$. Síť je provedena kabelem Cu 50 mm², uvažujte $X_k = 0$. Dále určete místo maximálního úbytku napětí a minimální napájecí výkony jednotlivých transformátorů.



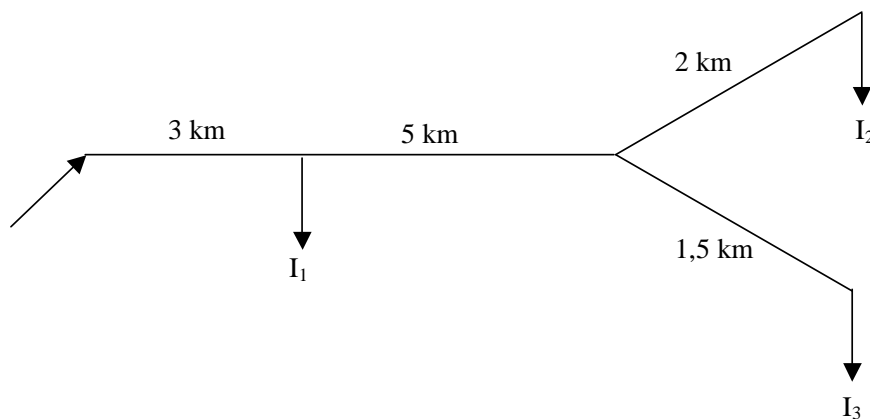
I/8: Určete a zakreslete proudové rozdělení v naznačené kabelové síti 3x400/230V, $\cos \varphi = 0,8$, Cu vodiče, uvažujte $X_k = 0$. Dále určete místo maximálního úbytku napětí a minimální napájecí výkony jednotlivých transformátorů.



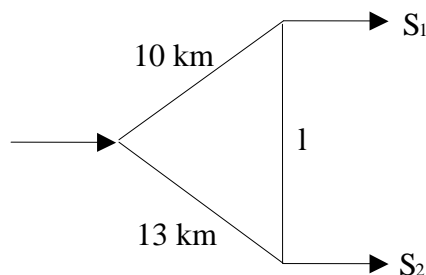
II/1: Určete napětí motoru o výkonu P_2 při jeho spouštění a za chodu v síti $3 \times 400 / 230 \text{ V}$, reaktance vedení $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Uvažujte Al vodiče.



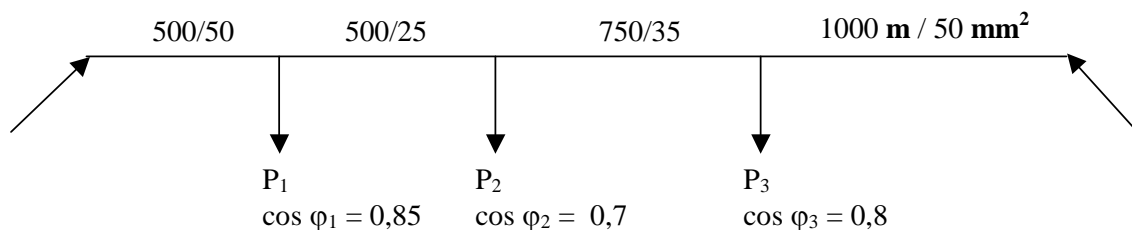
II/2: Navrhňte průřez rozvětveného vedení 22 kV dle dovoleného $\Delta U = 5\%$, $X_k = 0,35 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Uvažujte Al vodiče.



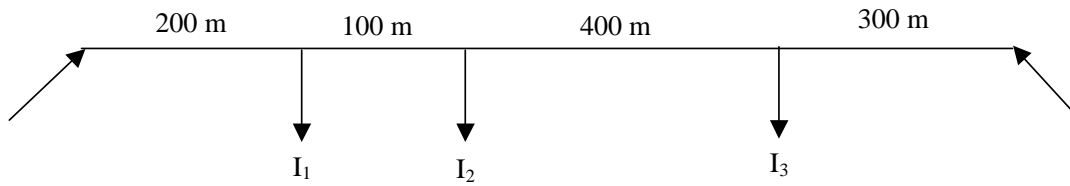
II/3: Navrhňte průřez venkovního vedení 35 kV dle dovoleného $\Delta U = 5\%$, $X_k = 0,37 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Určete přirozené rozdělení výkonů a místo a velikost maximálního úbytku napětí. Uvažujte Al vodiče.



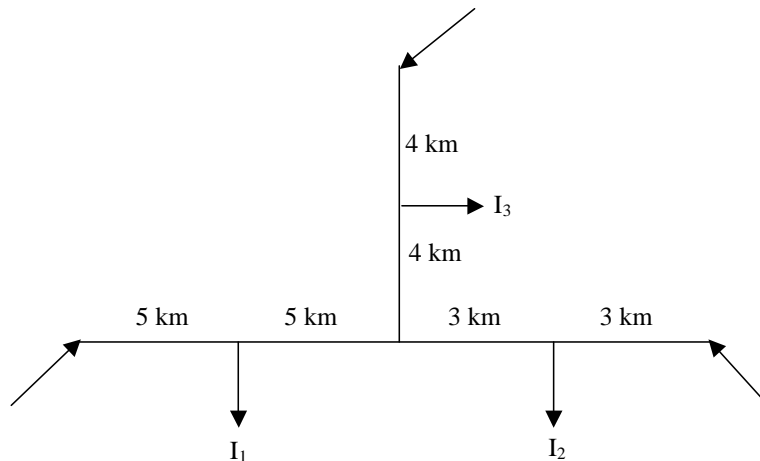
II/4: Pro dané vedení $3 \times 400 / 230 \text{ V}$, $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ určete místo a velikost maximálního úbytku napětí, proudové rozdělení a celkové ztráty. Nakreslete průběh I a ΔU podél vedení. Uvažujte Al vodiče.



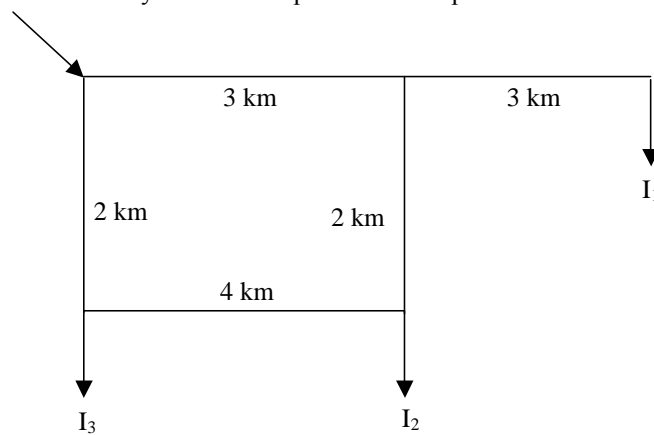
II/5: Navrhňte průřez venkovního vedení 3 x 400 / 230 V dle dovoleného $\Delta U = 5\%$, uvažujte reaktanci $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Určete celkové ztráty a nakreslete průběh I a ΔU podél vedení. Uvažujte Al vodiče.



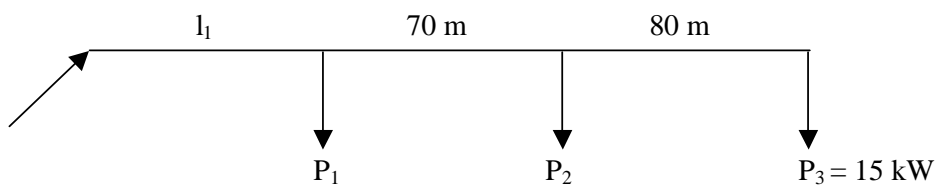
II/6: Navrhňte průřez venkovního vedení 22 kV napájeného ze tří stran dle dovoleného $\Delta U = 5\%$. Uvažujte stejná napájecí napětí, reaktance vedení $X_k = 0,35 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Uvažujte Al vodiče.



II/7: Navrhňte průřez venkovního vedení 22 kV dle dovoleného $\Delta U = 5\%$, uvažujte reaktanci vedení $X_k = 0,35 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. Určete celkové ztráty a nakreslete průběh I a ΔU podél vedení. Uvažujte Al vodiče.



II-8: Dimenzujte trojfázové vedení 3 x 500 V. Dovolené ztráty výkonu činí 8%. Určete napětí na svorkách motorů při rozběhu třetího motoru ($I_z = 5 \cdot I_n$). Reaktance vedení $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, účinnost motorů $\cos \varphi = 0,75$. Uvažujte Al vodiče.



III/1: Náhradním článkem π nebo T pro vedení 400 kV:

1. určete účinnost přenosu pro 50 a 100% S_2 a $\cos \varphi_2$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu při 50 a 100% S_2 pro kompenzaci z $\cos \varphi_2$ na $\cos \varphi_{2k} = 1$
 3. určete I_2, I_1, S_1 při přenosu zadaného výkonu S_2 při 110% U_2 .
 4. určete P_2, P_1, S_1 a η při přenosu I_2 zvoleným vedením s maximální proudovou hustotou a $\cos \varphi_2$.
- Průřez svazkových vodičů a uspořádání na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

III/2: Náhradním článkem π nebo T pro vedení 220 kV:

1. určete účinnost přenosu pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu při 50 a 100% P_2 pro kompenzaci z $\cos \varphi_2$ na $\cos \varphi_{2k} = 1$
 3. určete poměry na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η při přenosu přirozeného výkonu
 4. určete parametry $I_2, I_1, \cos \varphi_1, Q_{2k}$ při přenosu zadaného výkonu P_2 při $U_1 = U_2$.
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

III/3: Náhradním článkem π nebo T pro vedení vvn:

1. určete hodnoty na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2 = 0,8$
 2. určete účinnost přenosu při přenosu P_2 při $U_1 = U_2$
 3. určete $Q_2, \cos \varphi_2, U_1, I_1, \cos \varphi_1$ a η při přenosu P_2 s minimálními ztrátami
 4. určete P_2, P_1 a η při přenosu I_2 zvoleným vedením s maximální proudovou hustotou a $\cos \varphi_2 = 0,8$.
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

III/4: Náhradním článkem π nebo T pro vedení vvn:

1. určete účinnost přenosu pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2 = 0,85$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu při 50 a 100% P_2 pro kompenzaci z $\cos \varphi_2 = 0,85$ na $\cos \varphi_{2k} = 1$
 3. určete ztráty a účinnost při přenosu P_2 při $U_1 = U_2$
 4. určete poměry na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η při přenosu přirozeného výkonu.
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

III/5: Náhradním článkem π nebo T pro vedení 110 kV:

1. určete hodnoty na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu pro 50 a 100% $P_2, \cos \varphi_2$ pro kompenzaci úbytku napětí na $U_1 = U_2$
 3. určete účinnost a ztráty při přenosu P_2 s minimálními ztrátami
 4. určete parametry $U_1, I_1, \cos \varphi_1$ při přenosu P_2 a 110% U_2 .
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

III/6: Náhradním článkem π nebo T pro vedení vvn:

1. určete hodnoty na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2 = 0,7$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu při 50 a 100% P_2 pro kompenzaci z $\cos \varphi_2 = 0,7$ na $\cos \varphi_{2k} = 1$
 3. určete poměry na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η při přenosu P_2 při 110% U_2
 4. určete poměry na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η při přenosu přirozeného výkonu.
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

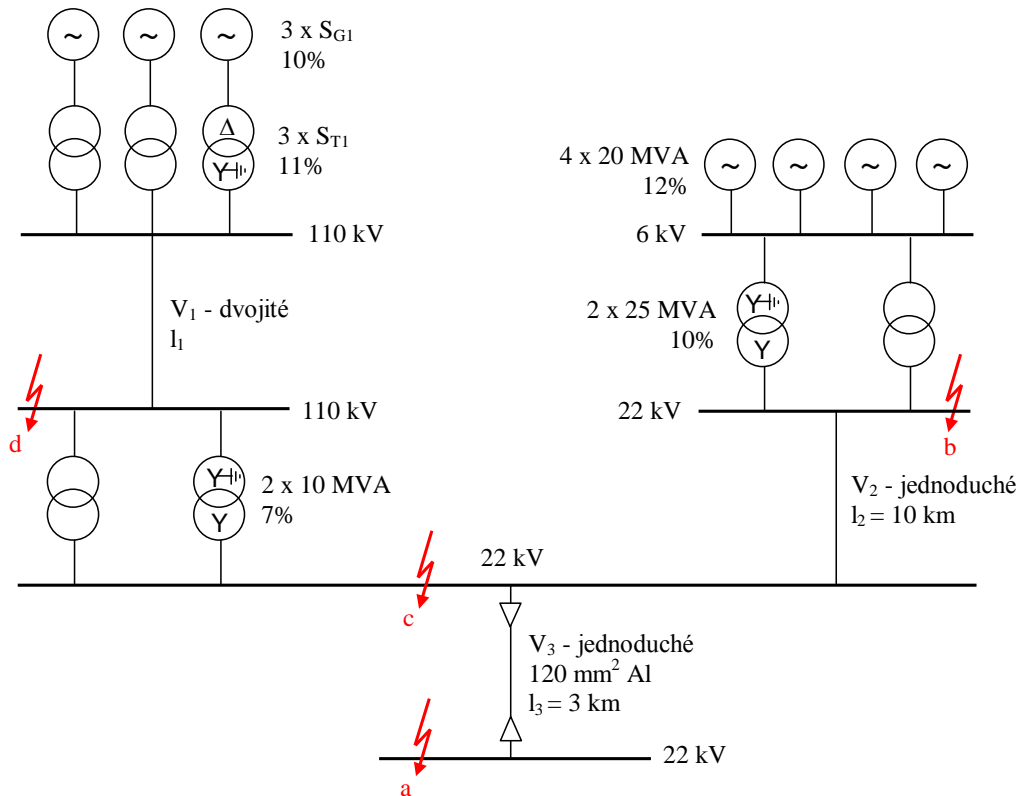
III/7: Náhradním článkem π nebo T pro vedení 220 kV:

1. určete hodnoty na začátku vedení $U_1, I_1, \cos \varphi_1, S_1, P_1$ a η pro 50 a 100% P_2 při $\cos \varphi_2$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu pro 50 a 100% P_2 a $\cos \varphi_2$ tak, aby $U_1 = U_2$
 3. určete $P_2, U_1, I_1, \cos \varphi_1, P_1$ a η při přenosu I_2 zvoleným vedením s maximální proudovou hustotou a $\cos \varphi_2$
 4. určete účinnost přenosu při přenosu přirozeného výkonu.
- Průřez vodičů a uspořádání vodičů na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

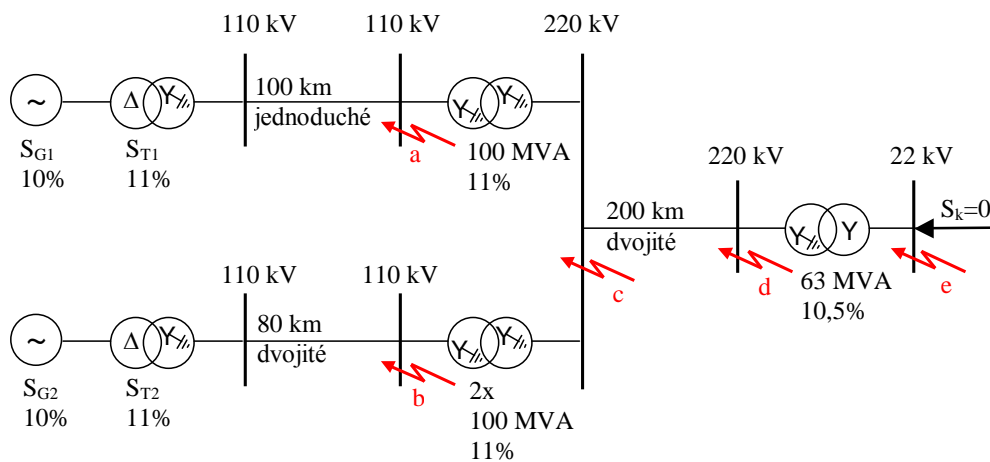
III/8: Náhradním článkem π nebo T pro vedení 400 kV:

1. určete účinnost přenosu pro 50 a 100% S_2 a $\cos \varphi_2$
 2. určete velikost kompenzačního výkonu při 50 a 100% S_2 pro kompenzaci z $\cos \varphi_2$ na $\cos \varphi_{2k} = 1$
 3. určete I_2, I_1, S_1 při přenosu zadaného výkonu S_2 při 110% U_2
 4. určete P_2, P_1, S_1 a η při přenosu I_2 zvoleným vedením s maximální proudovou hustotou a $\cos \varphi_2$.
- Průřez svazkových vodičů a uspořádání na stožáru zvolte. Dovolená proudová hustota $\sigma = 1,3 \text{ A.mm}^{-2}$.

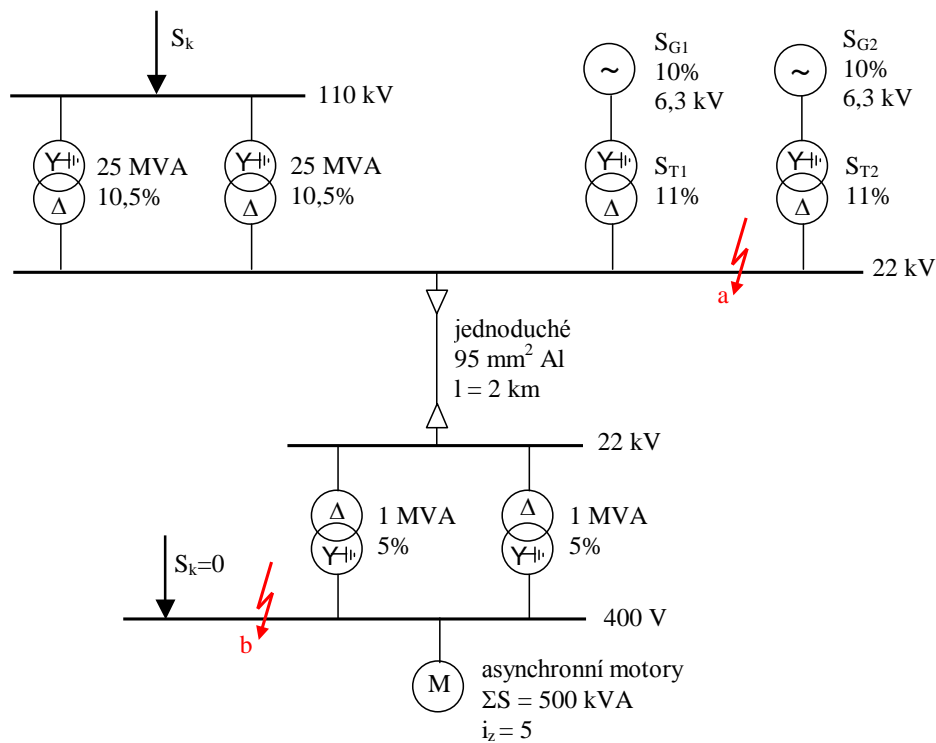
IV/1: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



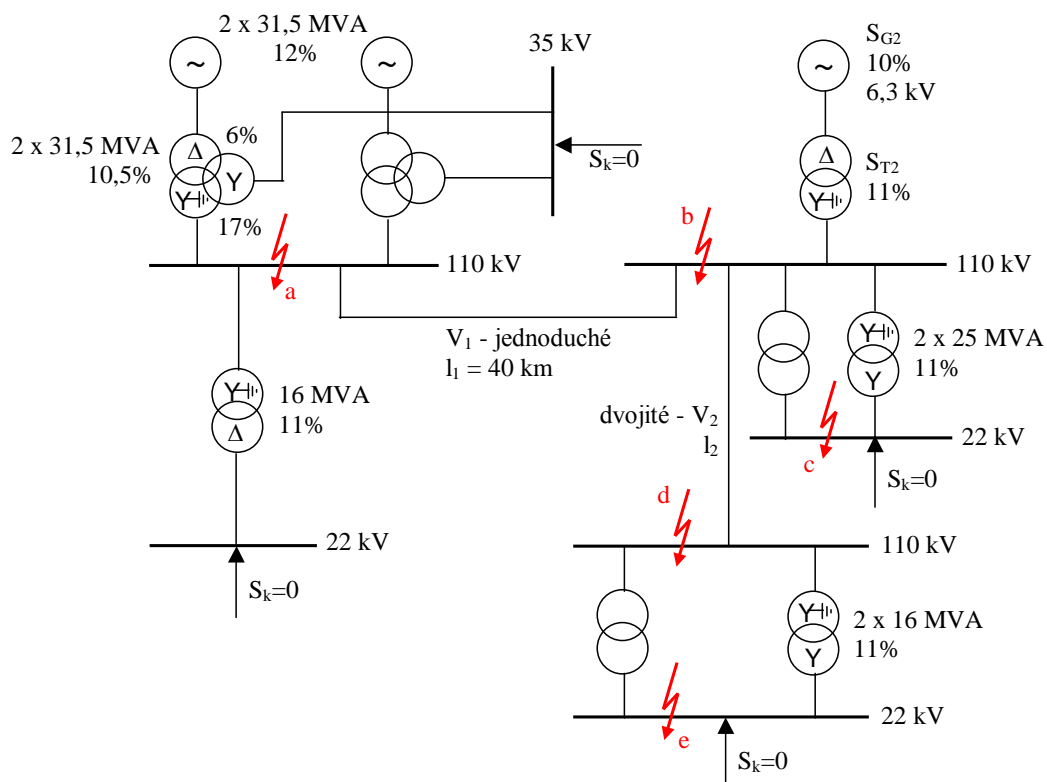
IV/2: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



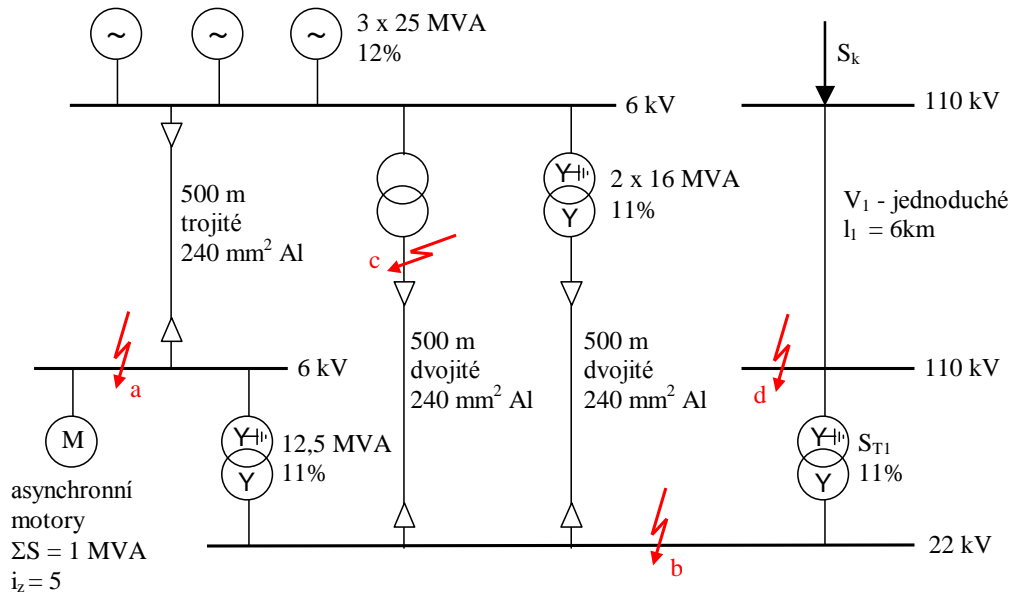
IV/3: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



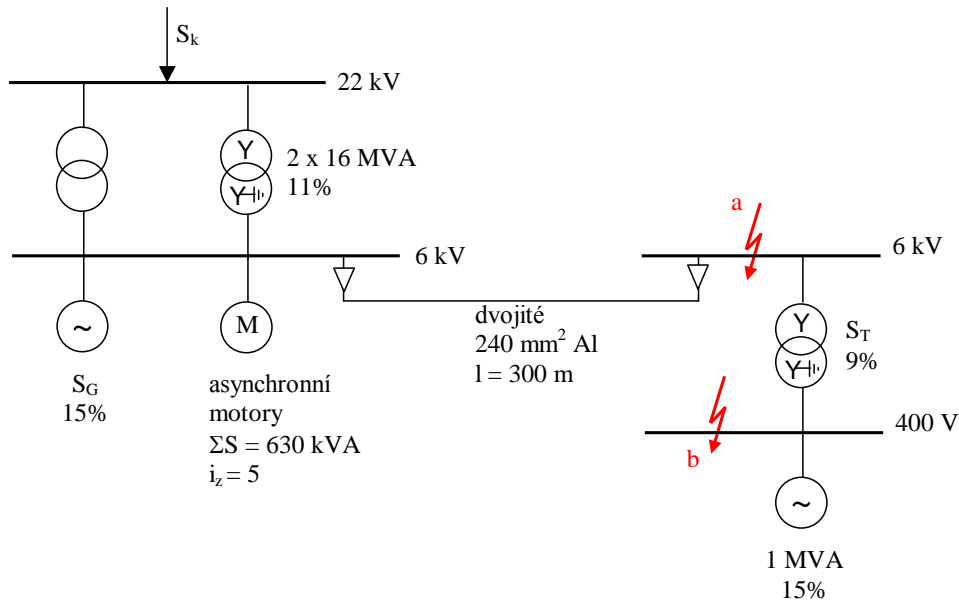
IV/4: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



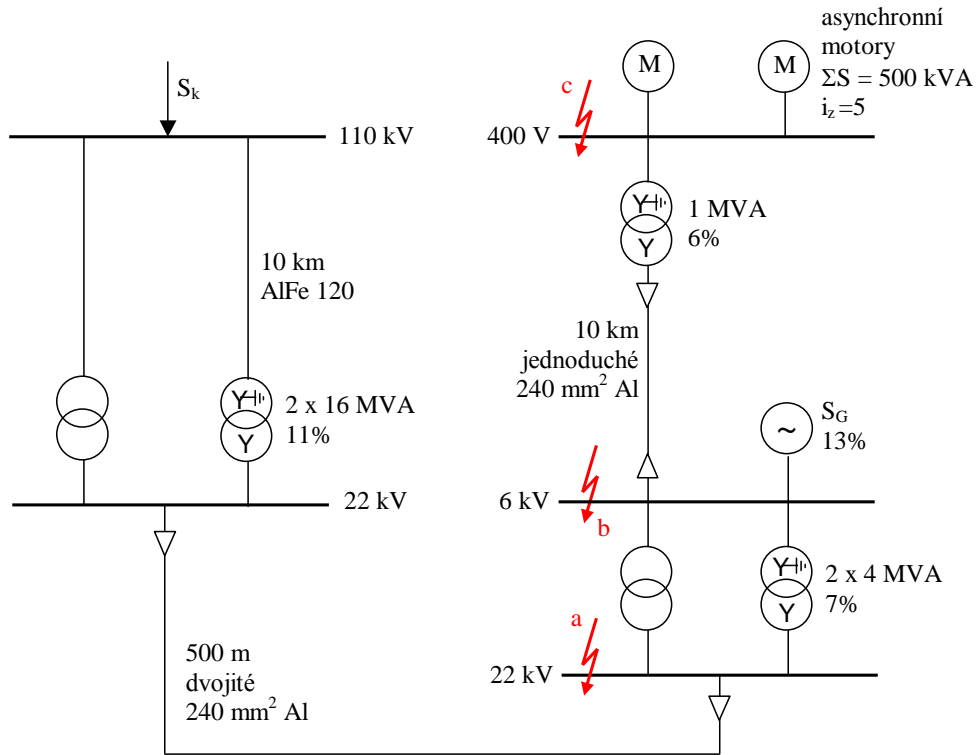
IV/5: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



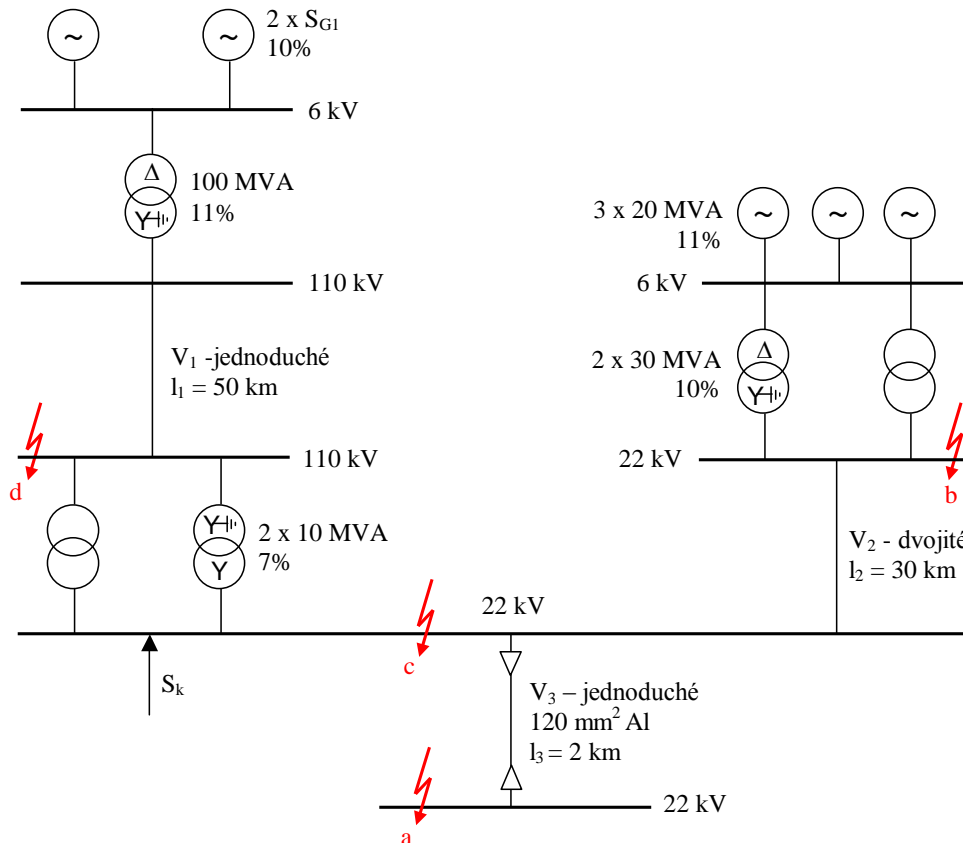
IV/6: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



IV/7: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



IV/8: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu a zkratového výkonu pro třífázový a jednofázový zkrat v zadaných místech schématu. Dále navrhnete reaktor tak, aby v místě zkratu poklesla hodnota třífázového zkratového výkonu o 25%.



Vstupní hodnoty:

I/1	A	B	C	D	E	I/2	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	30	26	26	17	28	I ₁ (A)	75	70	87	87	70
I ₂ (A)	12	12	14	9	11	I ₂ (A)	30	46	43	48	30
I ₃ (A)	16	15	12	24	19	I ₃ (A)	16	10	13	15	17
I ₄ (A)	8	16	8	16	12	I ₄ (A)	60	55	57	43	57
I ₅ (A)	11	11	21	21	16	I ₅ (A)	40	19	43	36	39

I/3	A	B	C	D	E	I/4	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	41	43	80	52	39	I ₁ (A)	8	12	10	8	9
I ₂ (A)	64	70	57	46	70	I ₂ (A)	12	10	14	12	13
I ₃ (A)	80	91	76	74	78	I ₃ (A)	15	8	10	20	10
I ₄ (A)	45	50	54	83	61	I ₄ (A)	6	8	8	16	7
I ₅ (A)	50	57	33	70	87	I ₅ (A)	15	13	15	15	17

I/5	A	B	C	D	E	I/6	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	36	17	19	24	30	I ₁ (A)	60	70	80	50	60
I ₂ (A)	10	15	10	15	10	I ₂ (A)	60	80	40	60	50
I ₃ (A)	17	15	17	20	15	I ₃ (A)	40	20	60	50	45
I ₄ (A)	40	24	36	29	40	I ₄ (A)	50	30	30	70	60
I ₅ (A)	16	24	10	20	24	I ₅ (A)	60	70	60	50	65

I/7	A	B	C	D	E	I/8	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	60	75	45	40	55	I ₁ (A)	40	60	50	36	54
I ₂ (A)	75	65	50	40	50	I ₂ (A)	60	40	70	54	36
I ₃ (A)	55	60	50	65	40	I ₃ (A)	35	55	60	33	54
I ₄ (A)	40	40	60	70	65	I ₄ (A)	50	40	30	45	36
I ₅ (A)	50	40	35	35	45	I ₅ (A)	40	65	30	36	63

II/1	A	B	C	D	E	II/2	A	B	C	D	E
S (mm ²)	35	50	25	50	35	I ₁ (A)	60-j30	80-j20	70	70-j30	70-j30
P ₁ (kW)	12	14	10	15	8	I ₂ (A)	10-j50	20-j20	50-j10	50	50-j10
P ₂ (kW)	15	20	11	14	18	I ₃ (A)	80-j40	80-j40	60-j40	70-j30	70

II/3	A	B	C	D	E	II/4	A	B	C	D	E
l (km)	5	6	7	8	9	P ₁ (kW)	11	12	9	6	7
S ₁ (MVA)	4,8+j2,6	5+j2	6+j1,3	5,7+j2	6+j1,3	P ₂ (kW)	7	9	7	5	9
S ₂ (MVA)	6,5+j4	6,2+j4,1	6+j3,1	6+j3	7,5+j3	P ₃ (kW)	3	5	6	6	15

II/5	A	B	C	D	E	II/6	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	20-j15	30-j10	25-j5	25-j5	25-j5	I ₁ (A)	25-j5	27-j2	20-j5	20-j4	27-j4
I ₂ (A)	40-j30	40-j25	40-j20	40-j20	40-j30	I ₂ (A)	15-j10	12-j8	15-j6	18-j10	18-j5
I ₃ (A)	20-j10	20-j10	25-j10	25-j10	20-j5	I ₃ (A)	35-j12	33-j10	35-j8	30-j8	20-j12

II/7	A	B	C	D	E	II/8	A	B	C	D	E
I ₁ (A)	15-j4	18-j2	16	15-j3	18-j5	P ₁ (kW)	11	15	12	12	10
I ₂ (A)	15-j10	16	10-j10	20-j5	15-j10	P ₂ (kW)	15	11	5	10	5
I ₃ (A)	12-j8	16-j9	20-j2	10-j5	18	l ₁ (m)	70	60	100	80	90

III/1	A	B	C	D	E	III/2	A	B	C	D	E
S ₂ (MVA)	600	550	650	450	520	P ₂ (MW)	150	170	170	120	130
cos φ ₂ (-)	0,80	0,82	0,76	0,85	0,80	cos φ ₂ (-)	0,70	0,73	0,70	0,72	0,70
l (km)	300	350	400	360	320	l (km)	200	230	180	210	190

III/3	A	B	C	D	E	III/4	A	B	C	D	E
U ₂ (kV)	110	110	110	220	220	U ₂ (kV)	110	220	400	110	220
P ₂ (MW)	80	70	60	140	150	P ₂ (MW)	60	180	400	70	140
l (km)	150	160	100	230	170	l (km)	90	200	300	110	210

III/5	A	B	C	D	E	III/6	A	B	C	D	E
P ₂ (MW)	45	60	35	70	55	U ₂ (kV)	110	110	220	220	110
cos φ ₂ (-)	0,75	0,77	0,75	0,78	0,75	P ₂ (MW)	70	80	140	120	65
l (km)	70	160	90	85	150	l (km)	120	140	210	170	90

III/7	A	B	C	D	E	III/8	A	B	C	D	E
P ₂ (MW)	150	170	160	140	150	S ₂ (MVA)	1200	1100	1000	900	1000
cos φ ₂ (-)	0,70	0,80	0,90	0,75	0,85	cos φ ₂ (-)	0,80	0,82	0,76	0,85	0,80
l (km)	130	180	150	140	160	l (km)	300	350	400	360	350

IV/1	A	B	C	D	E	IV/2	A	B	C	D	E
S _{G1} =S _{T1} (MVA)	50	63	100	50	63	S _{G1} =S _{T1} (MVA)	100	125	50	200	50
l ₁ (km)	20	50	60	60	20	S _{G2} =S _{T2} (MVA)	100	63	125	50	200
místo zkratu	a, b	b, c	a, d	a, b	b, d	místo zkratu	a, b	a, c	b, e	a, e	b, d

IV/3	A	B	C	D	E	IV/4	A	B	C	D	E
S _{G1} =S _{T1} (MVA)	20	50	50	63	30	S _{G2} =S _{T2} (MVA)	100	125	200	100	125
S _{G2} =S _{T2} (MVA)	30	50	30	50	30	l ₂ (km)	30	30	30	40	40
S _k (MVA)	1500	1000	1500	800	1000	místo zkratu	a, b	a, c	a, d	a, e	a, b

IV/5	A	B	C	D	E	IV/6	A	B	C	D	E
S _k (MVA)	1000	1500	1000	1500	800	S _k (MVA)	250	300	350	300	400
S _{T1} (MVA)	30	25	25	30	30	S _G (MVA)	2,5	1,6	4	2,5	4
místo zkratu	a, b	a, c	a, d	a, b	a, c	S _T (MVA)	25	40	25	40	25

IV/7	A	B	C	D	E	IV/8	A	B	C	D	E
S _k (MVA)	1300	1100	1600	1200	1000	S _{G1} (MVA)	50	30	50	20	50
S _G (MVA)	6	10	6	4	10	S _k (MVA)	300	200	400	300	350
místo zkratu	a, c	b, c	a, c	b, c	a, c	místo zkratu	a, b	b, c	a, d	a, b	b, d

Pro nulové složky transformátorů a vedení uvažujte $X_{T(0)} = 0,85 \cdot X_{T(1)}$ a $X_{V(0)} = 3 \cdot X_{V(1)}$.

12. SAMOSTATNÝ PROJEKT

Vypracujte projekt kabelového rozvodu napájecího spotřebiče v obráběcí dílně. V dílně je 10 motorických spotřebičů. Jejich výběr je ponechán na vlastní volbě studenta.

Dokumentace bude obsahovat následující doklady:

- Technická zpráva
 - údaje, kde začíná a končí rozvod
 - volba rozvodné soustavy
 - údaje o celkové maximální soudobé spotřebě, instalovaný příkon
 - způsob řešení ochrany proti zkratu, přetížení, nebezpečnému dotykovému napětí
 - způsob kompenzace účinníku (porovnání individuální a skupinové kompenzace)
 - výpočty zkratových proudů, výkonových ztrát, úbytku napětí při chodu i při rozběhu, spotřeby elektrické energie činné i jalové před i po kompenzaci
 - způsob ovládání chodu spotřebičů
- dispozice spotřebičů a rozváděčů se zakreslením rozvodu silnoproudu
- jednopólové schéma rozváděčů s označením typu zařízení, vystihující způsob napájení a jištění
- schéma vystihující způsob obsluhy, případně blokování
- seznam strojů a zařízení
- seznam kabelů

Situaci napojení objektu dílny a dispozici uspořádání strojů, rozváděčů i kabelového rozvodu si každý student zvolí individuálně.

13. LABORATORNÍ MĚŘENÍ

13.1 Měření na modelu střídavého krátkého vedení NN

Zadání

1. Měřením na modelu určete napájecí proudy, napětí na spotřebičích a napětí na jednotlivých částech vedení při napájení vedení z jedné a ze dvou stran.
2. Nakreslete fázorový diagram napětí a závislost $U = f(I)$.
3. Výsledky měření srovnajte s výpočtem provedeným v programu *StřNN* a vysvětlete případné rozdíly.

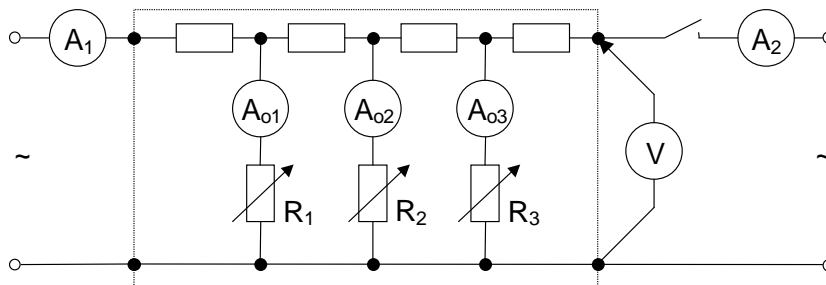
Teoretický rozbor

U tzv. krátkých střídavých vedení respektujeme pouze činný odpor a indukčnost. Protože trojfázové sítě jsou obvykle symetrické, lze je modelovat pomocí jednofázového modelu. Jednotlivé úseky vedení jsou nahrazeny podélnými impedancemi a odběry jsou nahrazeny odběrovými impedancemi, v případě pouze činných odběrů, odběrovými odpory.

Pro reálnou část fázového úbytku napětí platí vztah: $\Delta U = R.I.\cos\varphi + X.I.\sin\varphi$

Úbytek napětí závisí i na úhlu mezi proudem a napětím. U vedení, kde je respektována indukčnost, je nutno počítat s odběrem jalového proudu z napáječů i při pouze činných odběrech spotřebičů.

Schéma zapojení



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu pro vedení napájené z jedné strany.
2. Přepočítat zadané hodnoty odběrů na modelové.
3. Nastavit napájecí napětí.
4. Pomocí reostatů $R_1 \div R_3$ nastavit odběrové proudy a znovu zkontrolovat napájecí napětí. (Příklad odběrových proudů: $I_{o1} = 40$ A, $I_{o2} = 35$ A, $I_{o3} = 30$ A.)
5. Změřit příslušné proudy a napětí dle zadání.
6. Měření zopakovat pro případ napájení ze dvou stran.

Parametry modelu

$3 \times 400 / 230$ V, $X_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $m_U = 1$, $m_I = 10^{-3}$, $m_Z = 10^3$

úsek A-1		úsek 1-2		úsek 2-3		úsek 3-B		$R_k (\Omega \cdot \text{km}^{-1})$
l_1 (km)	sepnutý spín.	l_2 (km)	sepnutý spín.	l_3 (km)	sepnutý spín.	l_4 (km)	sepnutý spín.	
0,60	S_1+S_2	0,40	S_4+S_5	0,80	S_7+S_8	0,60	$S_{10}+S_{11}$	0,23
1,05	S_1	0,70	S_4	1,50	S_7	1,05	S_{10}	0,33
1,50	S_3	0,95	S_6	2,10	S_9	1,50	S_{12}	0,55

13.2 Měření na modelu střídavého dlouhého vedení VVN

Zadání

1. Měřením na modelu určete velikost proudu, napětí, výkonu a účinníku na začátku vedení při odběru 100, 75, 50, 25 a 0% zadaného výkonu P_2 při $\cos \varphi_2 = 1$.
2. Sestrojte příslušné fázorové diagramy a grafickou závislost veličin na začátku vedení na hodnotě P_2 .
3. Výsledky měření srovnajte s výpočtem provedeným v programu *VedeníVVN* a vysvětlete případné rozdíly.

Teoretický rozbor

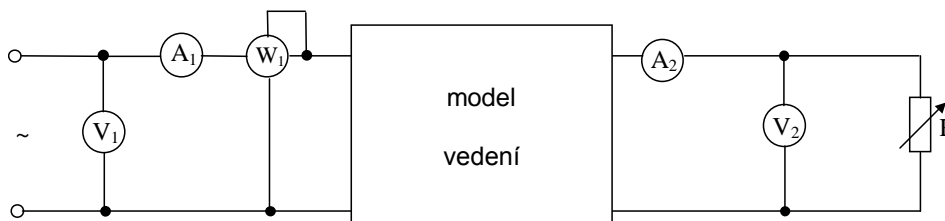
Přenosové vedení lze řešit jednofázově jako souměrný pasivní čtyřpól. Vedení je možno nahradit různými články (T, Π , Γ) a popsat soustavou rovnic:

$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2$$

\bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} jsou tzv. Blondelovy konstanty vedení. Pro souměrný čtyřpól, tedy i pro vedení platí: $\bar{A} = \bar{D}$

Schéma zapojení



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu.
2. Vypočítat modelové hodnoty proudů a napětí na konci vedení pro $P_2 = 0, 25, 50, 75, 100\%$ zadaného výkonu P_2 . (Příklad výkonu: $P_2 = 120 \text{ MW}$.)
3. Pomocí proměnlivé zátěže R a zdroje napětí nastavit modelové hodnoty na konci vedení a odečíst příslušné hodnoty na začátku vedení.

Parametry modelu

$3 \times 220 / 127 \text{ kV}$, $l = 300 \text{ km}$, $R_k = 0,3 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $X_k = 0,5 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$, $B_k = 3 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$
 $m_U = 10^{-3}$, $m_I = 10^{-3}$, $m_Z = 1$

13.3 Měření na jednofázového elektroměru

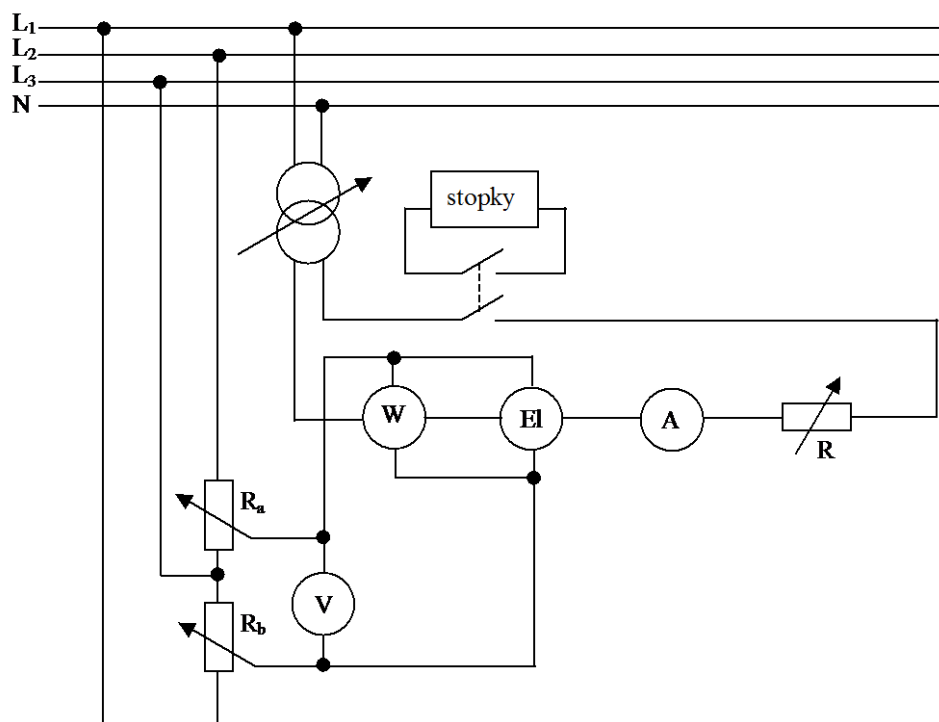
Zadání

1. Proveďte zkoušku přesnosti elektroměru pro různá zatížení a účinník.
2. Stanovené chyby zpracujte do grafu.

Teoretický rozbor

Elektroměry jsou převážně konstruovány na indukčním (Ferrarisově) principu. Ústrojí se skládá z proudového a napěťového jádra, mezi nimiž je vzduchová mezera, kudy prochází kotouč elektroměru. Točivý moment je úměrný činnému příkonu obvodu. Měřit točivý moment je však obtížné a proto se proti točivému momentu kotouče přidruží přidavný brzdný moment od permanentního magnetu. Výsledné otáčky kotouče jsou pak úměrné výkonu střídavého proudu. Údaj číselníku pak představuje elektrickou práci vykonanou za určitou dobu.

Schéma zapojení:



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu.
2. Při nastaveném proudu a účinníku změřit dobu pro 10 otáček kotouče elektroměru
3. Zopakovat měření pro různé účinníky a proudy.

Štítkové hodnoty elektroměru EJ 914 D (v.č. 6669008)

230 V, 50 Hz, 10 ÷ 40 A, 375 r / kWh

13.4 Kompensace účinníku

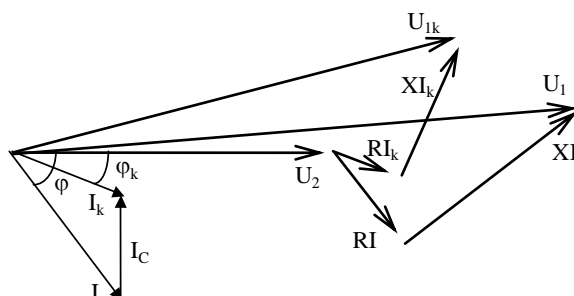
Zadání

1. Určete, jak se změní úbytek napětí a ztráty na vedení nn 3 x 400 / 230 V po provedené kompenzaci účinníku na hodnotu $\cos \varphi_k = 0,95$ kondenzátorovou baterií zapojenou do hvězdy: měřením, výpočtem.
2. Z naměřených hodnot sestrojte fázorové diagramy.

Teoretický rozbor

Protože velká část spotřebičů elektrické energie odebírá vedle činného výkonu také jalový výkon k vytváření magnetického pole. Jalový výkon je charakterizován jalovou složkou proudu. Protože jalová složka proudu zvětšuje celkový proud, zvětšují se tím i činné ztráty a úbytek napětí. Jalovou složku proudu lze zmenšit nebo zcela vyloučit připojením paralelních kompenzátorů, což mohou být kondenzátory nebo synchronní kompenzátory.

Paralelní kompenzaci ukazuje následující fázorový diagram:

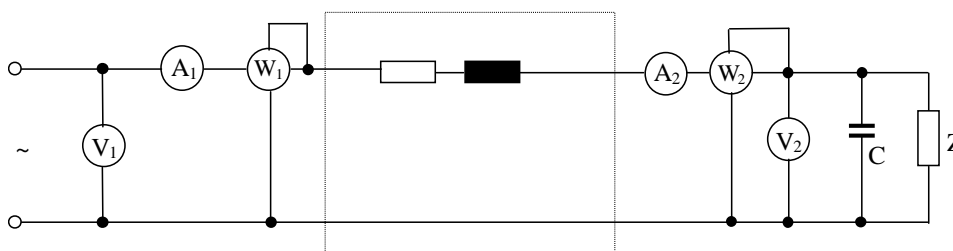


Potřebný kompenzační výkon se vypočte ze vztahu: $Q_C = P \cdot (tg \varphi - tg \varphi_k)$

Úbytek napětí lze určit podle vztahu: $\Delta U = \frac{P \cdot R}{U} \cdot (1 + tg \varphi \cdot tg \alpha)$ kde: $tg \alpha = \frac{X}{R}$

Činné ztráty se zmenší o hodnotu: $\Delta P = R \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k}\right)$

Schéma zapojení



Postup měření

1. Zapojit úlohu dle schématu bez kompenzačních kondenzátorů.
2. Určit a nastavit modelové napětí na konci vedení.
3. Změřit potřebné údaje a stanovit velikost kompenzačního kondenzátoru ($C = \frac{Q_C}{\omega \cdot U^2}$).
4. Zapojit kondenzátory dle schématu a měření zopakovat.

Parametry modelu

3 x 400 / 230 V, $l = 1$ km, $R_k = 0,3 \Omega \cdot km^{-1}$, $X_k = 0,5 \Omega \cdot km^{-1}$, $m_U = 0,3$, $m_I = 10^{-3}$, $m_Z = 300$

13.5 Měření na ochraně ALOX A100

Zadání

1. Zkontrolujte hlavní body stupnice nadproudového stupně a stanovte přídržný poměr při jmenovitém proudu.
2. Zkontrolujte hlavní body stupnice přepětového stupně a stanovte přídržný poměr při jmenovitém napětí.
3. Změřené chyby zpracujte do grafu.

Teoretický rozbor

Náběh napětových jednotek V 501 je při hodnotě: $U = U_n \cdot (0,4 + A) \cdot C$

kde: C - konstanta převodníků PV 501 ($C = 1$)

A - stupeň seřízení V 501

U_n - jmenovité napětí ($U_n = 100 \text{ V}$)

Náběh proudových jednotek AT 501 je při hodnotě: $I = I_n \cdot (0,5 + A) \cdot C$

kde: C - konstanta převodníků PA 501 ($C = 1$)

A - stupeň seřízení AT 501

I_n - jmenovitý proud ($I_n = 1 \text{ A}$)

Napájecí napětí ochrany: 110 V ss

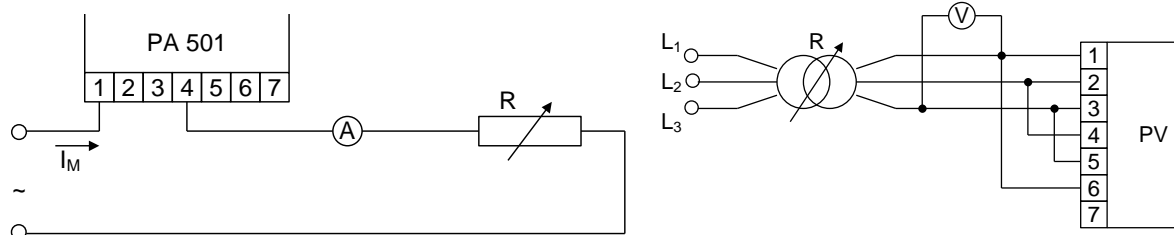
Přídržný poměr: $k_U = 0,95$

Přídržný poměr: $k = \frac{A_o}{A_r}$

kde: A_o - napětí/proud odpadnutí ochrany

A_r - napětí/proud rozběhnutí ochrany

Schéma zapojení



Postup měření

1. Zapojit úlohu dle schématu pro měření nadproudového stupně.
2. Nastavit požadovanou hodnotu proudu. Pomocí reostatu zvyšovat proud až do rozběhnutí ochrany a tuto hodnotu zaznamenat. Měření opakovat pro různé proudy.
3. Pro jmenovitý proud zjistit hodnotu rozběhnutí a odpadnutí ochrany - určit přídržný poměr.
4. Zapojit úlohu dle schématu pro měření přepětového stupně.
5. Nastavit požadovanou hodnotu napětí. Pomocí zdroje zvyšovat napětí až do rozběhnutí ochrany a tuto hodnotu zaznamenat. Měření opakovat pro různá napětí.
6. Pro jmenovité napětí zjistit hodnotu rozběhnutí a odpadnutí ochrany - určit přídržný poměr.

13.6. Měření na ochraně VT 12X1

Zadání

1. Zkontrolujte hlavní body stupnice podpětového stupně a stanovte přídržný poměr při jmenovitém napětí.
2. Zkontrolujte hlavní body stupnice časového relé při jmenovitém napětí.
3. Změřené chyby zpracujte do grafu.

Teoretický rozbor

Podpětová ochrana VT 12X1 je časově zpožděná - nezávislá. Chrání před nežádoucím poklesem napětí u generátorů, sítí nebo jiných elektrických zařízení.

Jmenovité napětí : 100 V

Jmenovitá frekvence : 50 Hz

Napětový rozsah : $0,5 \div 1 U_n$

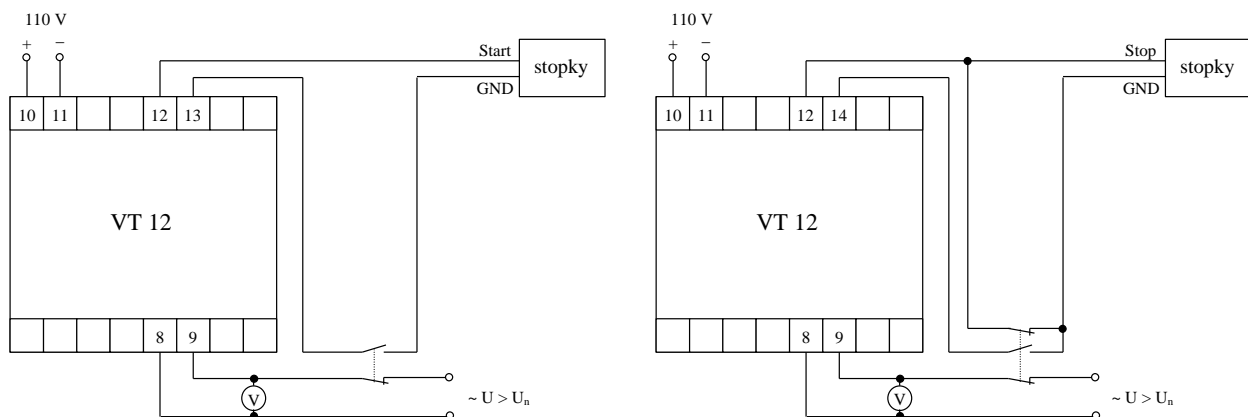
Přesnost měřicího článku : $\pm 5\%$

Rozsah časového článku : $0,5 \div 6$ s

Přídržný poměr : $< 1,15$

Pomocné napětí : 110 V ss

Schéma zapojení



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu (podle typu stopky).
2. Nastavit napětový rozsah ochrany, snižovat napětí až do rozběhnutí ochrany, odečíst napětí. Měření opakovat pro různá napětí.
3. Pro jmenovité napětí zjistit hodnotu rozběhnutí a odpadnutí ochrany - určit přídržný poměr.
4. Nastavit na časové stupnici hodnotu (při jmenovitém napětí). Nastavit napětí vyšší než jmenovité. Sepnout stykač a změřit vypínací čas. Měření opakovat pro různé časy.

13.7 Měření na ochraně AT 31X1

Zadání

1. Zkontrolujte hlavní body stupnice nadproudového stupně a stanovte přídržný poměr při jmenovitém proudu.
2. Zkontrolujte hlavní body stupnice časového relé při jmenovitém proudu.
3. Změřené chyby zpracujte do grafu.

Teoretický rozbor

Nadproudová ochrana AT 31X1 je ochrana s časovým zpožděním - nezávislá. Používá se pro nadproudé jištění elektrických zařízení při přetíženích a zkratech.

Jmenovitý proud : $I_n = 1 \text{ A}$

Jmenovitá frekvence : $f_n = 50 \text{ Hz}$

Proudové nastavení : $0,8 \div 1,6 I_n$

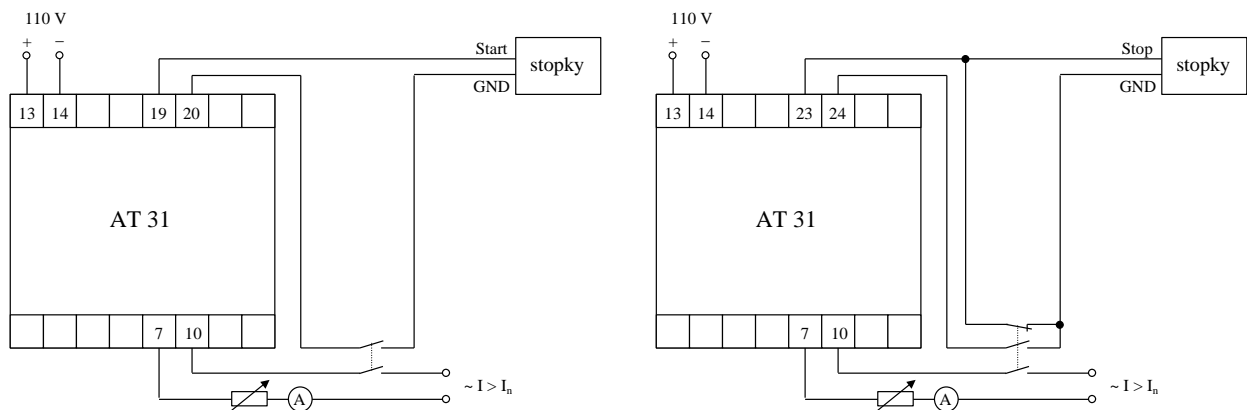
Přesnost měřícího článku : $\pm 5\%$

Rozsah časového nastavení : $0,5 \div 6 \text{ s}$

Přídržný poměr měřícího článku : $> 0,85$

Pomocné napětí : 110 V ss

Schéma zapojení



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu (podle typu stopky).
2. Nastavit proudový rozsah ochrany, zvyšovat proud až do rozběhnutí ochrany, odečíst proud. Měření opakovat pro různé proudy.
3. Pro jmenovitý proud zjistit hodnotu rozběhnutí a odpadnutí ochrany - určit přídržný poměr.
4. Nastavit na časové stupnici hodnotu (při jmenovitém proudu). Nastavit proud vyšší než jmenovitý. Sepnout stykač a změřit vypínací čas. Měření opakovat pro různé časy.

13.8 Měření na ochraně SPAU 330C5

Zadání

1. Zkontrolujte hlavní body stupnice přepětového stupně a stanovte přídržný poměr při jmenovitém napětí.
2. Zkontrolujte hlavní body stupnice časového relé při jmenovitém napětí.
3. Proměřte dobu působení při časově závislé charakteristice.
4. Změřené chyby a časově závislou charakteristiku zpracujte do grafu.

Teoretický rozbor

Přepětová a podpětová ochrana SPAU 330C5 je určena pro kontrolu sdružených napětí v přípojnicovém systému. Napětí jsou kontrolována třífázovým přepětovým a podpětovým ochranným modulem SPCU 3C14. Jestliže jedno z napětí překročí nastavenou hodnotu přepětového stupně, tento stupeň nastartuje a po uplynutí nastaveného operačního času provede vypnutí. V případě, že jedno z napětí měřených klesne pod nastavenou hodnotu podpětového stupně, spustí se časovací obvod podpětového stupně. Po uplynutí doby tohoto obvodu provede podpětový stupeň vypnutí.

Jmenovité napětí : 100 V

Jmenovitá frekvence : 50 Hz

Pomocné napájecí napětí : 80 ÷ 265 V ss/st

Přepětový stupeň $U >$

Startovací napětí: 0,8 ÷ 1,6 U_n

Doba působení $t >$: 0,05 ÷ 100 s

Časový násobitel $k >$ při časově závislé charakteristice: 0,05 ÷ 1,00

Přídržný poměr: 0,97

Přesnost doby působení: ± 2 % nastavené hodnoty nebo ± 25 ms

Provozní přesnost: ± 3 % nastavené hodnoty

Podpětový stupeň $U <$

Startovací napětí: 0,4 ÷ 1,2 U_n

Doba působení: 1 ÷ 120 s

Přídržný poměr: 1,03

Přesnost doby působení: ± 2 % nastavené hodnoty nebo ± 25 ms

Provozní přesnost: ± 3 % nastavené hodnoty

Spínače SG1

SG1/1 = 0 - třífázový režim

SG1/1 = 1 -jednofázový režim

SG1/2 = 0 (volba startovacího času přepětového stupně)

SG1/3 = 0 - časově nezávislý režim přepětového stupně

SG1/3 = 1 - časově závislý režim podle dvou charakteristik

SG1/3	SG1/4	SG1/5	Provozní režim	Doba působení $t >$ nebo křivka charakteristiky
0	0	0	časově nezávislý	0,05 ÷ 1,00 s
0	0	1	časově nezávislý	0,5 ÷ 10,0 s
0	1	1	časově nezávislý	5 ÷ 100 s
1	0	0	časově závislý	charakteristika A
1	1	0	časově závislý	charakteristika B

SG1/6 = 1 (volba automatického blokování podpětového stupně)

SG1/7 = 0 (volba startovacího času podpětového stupně)

SG1/8 = 0 - rozsah nastavení doby působení podpětového stupně 1,0 ÷ 12,0 s

SG1/8 = 1 - rozsah nastavení doby působení podpětového stupně 10 ÷ 120 s

Při časově závislé charakteristice bude doba působení přepětového stupně tím kratší, čím větší bude odchylka od nastavené hodnoty. Přepětový stupeň pracuje podle této

charakteristiky:
$$t = \frac{k > .a}{(b.(U/U > -1) - 0.5)^p} + c$$

kde: t - doba působení

k> - časový násobitel (0,05 ÷ 1,0)

U - měřené napětí

U> - nastavené startovací napětí

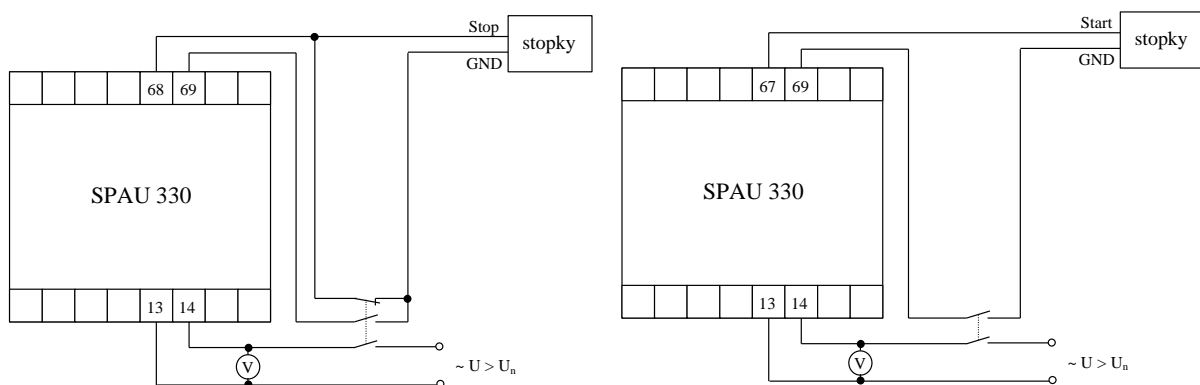
a - konstanta a = 480

b - konstanta b = 32

c - konstanta c = 0,03

p - konstanta p = 2 pro charakteristiku A a pro charakteristiku B je p = 3

Schéma zapojení



Postup měření

1. Provést zapojení dle schématu (podle typu stopek).
2. Nastavit napětový rozsah ochrany, zvyšovat napětí až do rozběhnutí ochrany, odečíst napětí. Měření opakovat pro různá napětí.
3. Pro jmenovité napětí zjistit hodnotu rozběhnutí a odpadnutí ochrany - určit přídržný poměr.
4. Nastavit na časové stupnici hodnotu (při jmenovitém napětí). Nastavit napětí vyšší než jmenovité. Sepnout stykač a změřit vypínací čas. Měření opakovat pro různé časy.
5. Nastavit ochranu na časově závislý režim, nastavit jmenovité napětí, nastavit časový násobitel $k > = 1$, provést měření vypínacího času pro napětí 110 ÷ 150V.

14. TABULKOVÁ ČÁST

1-AYKY (uložení v zemi)			
S (mm ²)	I _d (A)	R (Ω.km ⁻¹)	L (mH.km ⁻¹)
3x95+70	216	0,326	0,254
3x120+70	245	0,258	0,249
3x150+70	278	0,206	0,250
3x185+95	313	0,167	0,251
3x240+120	359	0,129	0,246

1-CYKY (uložení v zemi)			
S (mm ²)	I _d (A)	R (Ω.km ⁻¹)	L (mH.km ⁻¹)
3x35+16	161	0,537	0,264
3x50+25	191	0,376	0,264
3x70+35	236	0,269	0,256
3x95+50	280	0,198	0,254
3x120+70	317	0,157	0,249
3x150+70	359	0,125	0,250
3x185+95	401	0,102	0,251
3x240+120	464	0,078	0,246

22-AXEKVCEY (uložení vedle sebe v zemi)				
S (mm ²)	I _d (A)	R (Ω.km ⁻¹)	L (mH.km ⁻¹)	C (μF.km ⁻¹)
35	165	0,868	0,70	0,16
50	195	0,641	0,68	0,18
70	237	0,443	0,66	0,20
95	282	0,320	0,64	0,22
120	319	0,253	0,62	0,24
150	352	0,206	0,60	0,26
185	396	0,164	0,59	0,28
240	455	0,125	0,58	0,30

22-CXEKVCEY (uložení vedle sebe v zemi)				
S (mm ²)	I _d (A)	R (Ω.km ⁻¹)	L (mH.km ⁻¹)	C (μF.km ⁻¹)
35	213	0,524	0,70	0,16
50	250	0,387	0,68	0,18
70	303	0,268	0,66	0,20
95	360	0,193	0,64	0,22
120	407	0,153	0,62	0,24
150	445	0,124	0,60	0,26
185	498	0,099	0,59	0,28
240	568	0,075	0,58	0,30

Kabely do 1 kV				
Průřez (mm ²)	Činný odpor při teplotě jader 60°C (Ω.km ⁻¹)		Induktivní reaktance (mΩ.km ⁻¹)	
	Cu	Al	s cel. kov. pláštěm	bez kov. pláště
1,5	14,5	-	-	-
2,5	8,7	14,3	-	-
4	5,43	8,97	-	-
6	3,62	5,98	99 ÷ 107	88 ÷ 94
10	2,17	3,59	94 ÷ 102	83 ÷ 89
16	1,36	2,24	89 ÷ 97	79 ÷ 85
25	0,87	1,43	85 ÷ 93	75 ÷ 81
35	0,62	1,02	83 ÷ 91	73 ÷ 79
50	0,434	0,718	81 ÷ 89	71 ÷ 77
70	0,31	0,513	79 ÷ 87	69 ÷ 75
95	0,229	0,378	78 ÷ 86	68 ÷ 74
120	0,181	0,229	78 ÷ 86	66 ÷ 72
150	0,145	0,239	77 ÷ 85	66 ÷ 75
185	0,117	0,194	77 ÷ 85	65 ÷ 71
240	0,09	0,149	77 ÷ 85	65 ÷ 71

Kabely VN							
Průřez (mm ²)	Činný odpor při teplotě jader 60°C (Ω.km ⁻¹)		Induktivní reaktance jedné fáze (Ω.km ⁻¹)				
	Cu	Al	3 kV	6 kV	10 kV	22 kV	35 kV
10	2,17	3,59	0,1	0,107	0,129	-	-
16	1,36	2,24	0,097	0,1	0,119	-	-
25	0,87	1,43	0,088	0,097	0,107	0,135	-
35	0,62	1,02	0,085	0,094	0,1	0,126	-
50	0,434	0,718	0,082	0,088	0,097	0,116	0,145
70	0,31	0,513	0,082	0,085	0,094	0,107	0,129
95	0,229	0,378	0,078	0,082	0,091	0,104	0,123
120	0,181	0,299	0,075	0,078	,088	0,097	0,116
150	0,145	0,239	0,075	0,078	0,085	0,094	0,113
185	0,117	0,194	0,075	0,078	0,085	0,091	0,107
240	0,09	0,149	0,075	0,078	0,082	0,088	0,1

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 6				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
16	5,40	62,5	1,882	5250
25	6,75	97,6	1,205	8150
35	8,10	140,5	0,837	11450
50	9,60	197,3	0,596	15850
70	11,55	277,1	0,434	23200
95	13,35	370,9	0,319	30750
120	15,65	509,2	0,234	41900
150	17,25	619,4	0,193	50200
185	19,20	765,5	0,156	62300
210	20,43	868,7	0,137	69650
240	21,70	979,2	0,122	78300
300	24,20	1217,2	0,097	97250

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 4				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
50	11,20	280,8	0,476	25000
70	12,60	355,4	0,376	31600
95	14,00	438,8	0,305	39000
120	15,75	555,3	0,241	49400
150	17,85	713,3	0,188	62750
185	19,60	860,0	0,156	74800
210	21,00	978,2	0,136	85900
240	22,55	1126,9	0,119	97100
300	25,65	1456,1	0,094	126950
350	27,20	1636,8	0,085	143350

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 3				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
35	9,35	195,3	0,803	18700
50	11,22	261,3	0,558	26450
70	13,30	395,1	0,514	36800
95	14,40	509,	0,397	49050
120	16,80	693,1	0,230	66750
150	18,00	795,6	0,201	76650
185	20,79	1003,7	0,156	95150
210	22,02	1125,2	0,139	105750
240	23,65	1298,1	0,121	122000
300	26,25	1642,1	0,093	155050
350	27,90	1855,3	0,081	173050

Parametry venkovních vedení 110 kV					
Provedení	Vodiče AlFe (mm ²)	Stožáry	R ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	X ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	B ₍₁₎ (μS.km ⁻¹)
Jednoduché	150/6	Jednodřík	0,200	0,4165	2,744
	185/6	Jednodřík	0,156	0,4091	2,796
Dvojité	150/6	Soudek	0,200	0,4220	2,713
	185/6	Soudek	0,156	0,4143	2,766
	210/3	Soudek	0,130	0,4023	2,852
	240/6	Soudek	0,125	0,4070	2,817
	450/6	Soudek	0,065	0,3854	2,982
	670/8	Donau	0,042	0,3661	3,142

Parametry venkovních vedení 220 kV					
Provedení	Vodiče AlFe (mm ²)	Stožáry	R ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	X ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	B ₍₁₎ (μS.km ⁻¹)
Jednoduché	2x185/3	Portál	0,0815	0,3411	3,379
	350/4	Portál	0,0870	0,4392	2,597
	450/6	Portál	0,0670	0,4327	2,638
	2x350/4	Portál	0,0435	0,3325	3,471
Dvojité	350/4	Soudek	0,0870	0,4338	2,637
	350/4	Donau	0,0870	0,4168	2,746
	450/6	Donau	0,0650	0,4097	2,793
	500/8	Donau	0,0586	0,4080	2,807
	2x210/4	Portál	0,0680	0,3275	3,530

Parametry venkovních vedení 400 kV					
Provedení	Vodiče AlFe (mm ²)	Stožáry	R ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	X ₍₁₎ (Ω.km ⁻¹)	B ₍₁₎ (μS.km ⁻¹)
Jednoduché	3x350/4	Portál	0,0290	0,3151	3,674
	3x350/6	Portál	0,0283	0,3153	3,671
	2x450/6	Portál	0,0325	0,3419	3,372
	3x450/6	Portál	0,0217	0,3074	3,711
	3x450/6	Delta	0,0217	0,2989	3,687
	3x450/6	Kočka	0,0217	0,2870	4,029
Dvojité	3x350/6	Donau	0,0283	0,2948	3,948
	3x450/8	Donau	0,0225	0,2931	3,972

Pozn.: Jedná se o střední hodnoty jednoho vodiče (i pro dvojitá vedení).

Směrné hodnoty reaktancí sousledné složkové soustavy venkovních vedení							
Jmenovité napětí (kV)	0,4	6	22	35	110	220	400
Reaktance X_1 ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,43	0,29

Směrné hodnoty reaktancí netočivé složkové soustavy venkovních vedení			
Typ vedení	Jmenovité napětí (kV)	Jednoduché vedení	Dvojité vedení
Bez zemnicích lan	110	$X_0 = 3,5X_1$	$X_0 = 5,5X_1$
Vedení s Fe zemnicími lany	110	$X_0 = 3X_1$	$X_0 = 5X_1$
	220 ¹⁾	$X_0 = 2,7X_1$	$X_0 = 4,8X_1$
	220 ²⁾	$X_0 = 3,3X_1$	$X_0 = 5,4X_1$
	400 ²⁾	$X_0 = 3,4X_1$	$X_0 = 5,8X_1$
Vedení s AlFe zemnicími lany	110	$X_0 = 2X_1$	$X_0 = 3,5X_1$
	220 ¹⁾	$X_0 = 2,2X_1$	$X_0 = 4,3X_1$
	220 ²⁾	$X_0 = 2,3X_1$	$X_0 = 4X_1$
	400 ²⁾	$X_0 = 2,3X_1$	$X_0 = 4X_1$

¹⁾ Pro fázové vodiče tvořené jedním lanem
²⁾ Pro fázové vodiče svazkové: u vedení 220 kV – dvojsvazek, u vedení 400 kV - trojsvazek

Parametry turboalternátorů a hydroalternátorů				
Parametry	Turboalternátory		Hydroalternátory	
	Přibližný rozsah	Typový	Přibližný rozsah	Typový
x_d''	0,09 ÷ 0,22	0,154	0,15 ÷ 0,35	0,19
x_q''	0,10 ÷ 0,22	0,154	0,15 ÷ 0,70	0,20
x_d'	0,15 ÷ 0,29	0,206	0,20 ÷ 0,40	0,40
x_d	1,20 ÷ 2,70	1,740	0,70 ÷ 1,40	1,25
x_q	1,10 ÷ 2,20	1,640	0,45 ÷ 0,90	0,75
x_2	0,09 ÷ 0,21	0,162	0,12 ÷ 0,40	0,20
x_0	0,02 ÷ 0,15	0,090	0,03 ÷ 0,15	0,09
T_k'' (s)	0,03 ÷ 0,08	0,030	0,04 ÷ 0,10	0,06
T_k' (s)	0,06 ÷ 1,50	1,080	0,80 ÷ 2,50	2,00
T_{k0}' (s)	2,00 ÷ 10,0	7,750	3,00 ÷ 10,0	8,00
T_a (s)	0,05 ÷ 0,50	0,370	0,10 ÷ 0,40	0,30

Hodnota součinitele K pro výpočet nárazového zkratového proudu		
Místo zkratu	bez asynchronních motorů	s asynchronními motory ⁴⁾
za alternátorem do 55 MW ¹⁾	1,95	2,7
v soustavě vvn, zvvn	1,7	-
v soustavě vn	1,6	2,4
v soustavě nn	1,4	-
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	1,3	1,9
za transformátory ³⁾		
vvn/vn nebo vn/nn	1,7	2,5
vn/nn do 250 kVA včetně	1,3	1,9
do 630 kVA včetně	1,5	2,1
do 1600 kVA včetně	1,6	2,3

¹⁾ Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem
²⁾ Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu)
³⁾ Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu)
⁴⁾ Hodnoty součinitele K ve sloupci II slouží k orientačnímu stanovení nárazového zkratového proudu v el. rozvodu s asynchronními motory. Ve vztahu pro výpočet nárazového zkratového proudu se přitom použije hodnota počátečního rázového zkratového proudu stanovená bez příspěvku asynchronních motorů.

Součinitele k_e pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu bez uvažování vlivu asynchronních motorů										
Místo zkratu	T _a (s)	k _e pro t _k (s)								
		0,02	0,035	0,05	0,08	0,1	0,2	0,5	1,0	3,0
za alternátorem do 55 MW ¹⁾	0,161	1,65	1,60	1,58	1,54	1,50	1,46	1,23	1,08	1,03
v soustavě ²⁾										
vvn a zvvn	0,03	1,44	1,32	1,24	1,16	1,13	1,07	1,03	1,01	1,00
vvn	0,02	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00
nn	0,01	1,24	1,15	1,10	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00
v kabelovém rozvodu nn ²⁾	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
za transformátory ³⁾										
vvn/vn nebo vn/nn	0,036	1,49	1,37	1,29	1,20	1,17	1,09	1,04	1,02	1,01
vn/nn do 250 kVA včetně	0,008	1,18	1,11	1,08	1,05	1,04	1,02	1,01	1,00	1,00
do 630 kVA včetně	0,014	1,29	1,18	1,13	1,09	1,07	1,04	1,01	1,01	1,00
do 1600 kVA včetně	0,019	1,35	1,24	1,17	1,11	1,09	1,05	1,02	1,01	1,00

¹⁾ Pro zkrat v blízkosti alternátoru nebo za blokovým transformátorem
²⁾ Pro zkrat vzdálený od napájecího transformátoru i alternátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je větší než 10% ze sousledné impedance zkratového obvodu)
³⁾ Pro zkrat v blízkosti sekundární strany transformátoru (impedance mezi místem zkratu a napájecím transformátorem je do 10% sousledné impedance zkratového obvodu)

Koeficient K pro dimenzování vedení podle tepelných účinků zkratového proudu				
Součinitel K	materiál jádra vodiče			
	Cu		Al	
	materiál izolace vodiče			
	PVC	Pryž	PVC	Pryž
	115	135	74	87

Součinitel zatížitelnosti vodičů pro druh prostředí při 25°C			
Druh prostředí	Vzduch	Země	Voda
k	1,0	1,1	1,4

Součinitel zatížitelnosti kabelů podle uložení									
počet lávek	počet kabelů	Způsob uložení							
		Neperforované lávky		Perforované lávky		Svislé lávky		Kabelové rošty, háky	
		těsně	volně	těsně	volně	těsně	volně	těsně	volně
1	1	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,85	0,95	0,90	1,00	0,90	0,90	0,85	1,00
	3	0,80	0,95	0,80	1,00	0,80	0,90	0,80	1,00
	4	0,75	0,95	0,80	0,95	0,75	0,90	0,80	1,00
	6	0,70	0,90	0,75	0,90	0,75	0,85	0,80	1,00
	9	0,70	-	0,75	-	0,70	-	0,80	-
2	1	0,95	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	2	0,85	0,95	0,85	1,00	0,90	0,90	0,85	1,00
	3	0,75	0,90	0,80	0,95	0,90	0,90	0,80	1,00
	4	0,75	0,90	0,75	0,90	0,75	0,85	0,80	0,95
	6	0,70	0,85	0,75	0,85	0,70	0,85	0,75	0,95
	9	0,65	-	0,70	-	0,70	-	0,75	-
3	1	0,95	0,95	1,00	1,00	-	-	1,00	1,00
	2	0,85	0,95	0,85	1,00	-	-	0,85	1,00
	3	0,75	0,90	0,80	0,95	-	-	0,80	0,95
	4	0,70	0,90	0,75	0,90	-	-	0,75	0,95
	6	0,65	0,85	0,70	0,85	-	-	0,75	0,95
	9	0,60	-	0,65	-	-	-	0,70	-

Součinitel zatížitelnosti kabelů podle uspořádání						
Uspořádání	Počet kabelů					
	1	2	3	4	6	9
Zapuštěné nebo uzavřené	1,0	0,8	0,7	0,7	0,55	0,5
Jednoduchá vrstva na stěnách, podlahách, neperforovaných lávkách	1,0	0,85	0,8	0,75	0,7	0,7
Jednoduchá vrstva na stropě	0,95	0,8	0,7	0,7	0,65	0,6
Jednoduchá vrstva na perforovaných lávkách	1,0	0,9	0,8	0,75	0,75	0,7
Jednoduchá vrstva na roštech, hácích a pod.	1,0	0,85	0,8	0,75	0,80	0,8

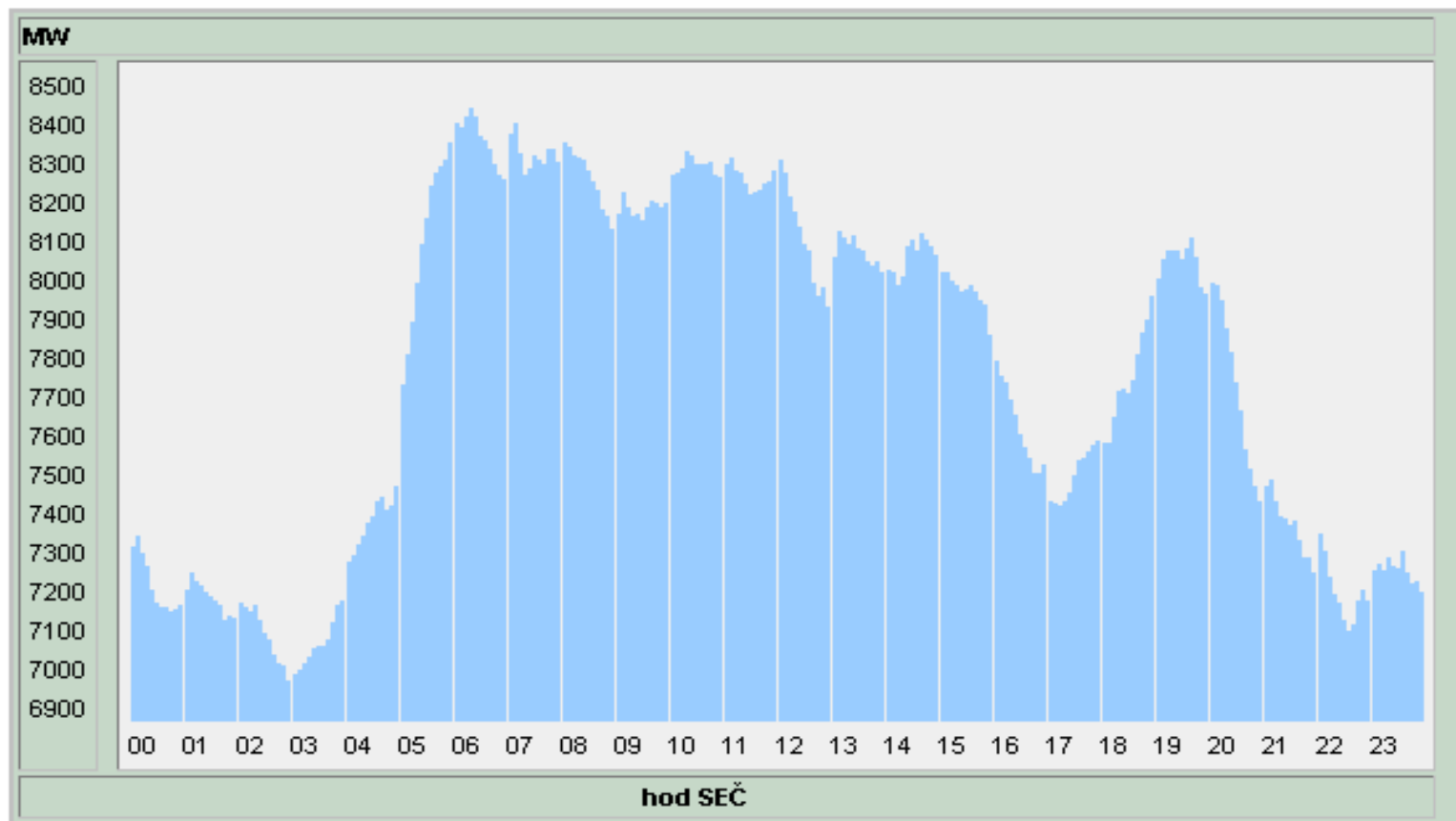
Součinitel zatížitelnosti izolovaných vodičů a kabelů pro teplotu prostředí									
Dovolená provozní teplota jader (°C)	teplota prostředí (°C)								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
80	1,10	1,08	1,04	1	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
75	1,11	1,08	1,04	1	0,96	0,91	0,86	0,80	0,74
70	1,12	1,08	1,04	1	0,95	0,90	0,84	0,78	0,70
65	1,13	1,09	1,05	1	0,95	0,89	0,82	0,73	0,64
60	1,15	1,10	1,05	1	0,93	0,86	0,77	0,67	0,56

Parametry transformátorů 22/0,4 kV ABB RESIBLOC				
Výkon (kVA)	Napětí nakrátko (%)	Proud naprázdno (%)	Ztráty nakrátko (W)	Ztráty naprázdno (W)
160	4	4	2 150	870
250	4	4	3 000	1 100
400	4	4	4 250	1 450
630	4	4	6 000	2 000
160	6	5	2 500	650
250	6	5	3 300	880
400	6	5	4 800	1 200
630	6	5	6 900	1 650
800	6	4	8 100	1 900
1 000	6	4	9 600	2 300
1 250	6	4	11 500	2 700
1 600	6	4	14 000	3 100

Parametry transformátorů 22/0,4 kV SIEMENS TUNORMA				
Výkon (kVA)	Napětí nakrátko (%)	Proud naprázdno (%)	Ztráty nakrátko (W)	Ztráty naprázdno (W)
160	4	5	3 100	460
250	4	5	4 200	650
400	4	5	6 000	930
630	4	5	8 400	1 300
1 000	6	4	13 000	1 700
1 250	6	4	16 000	2 100
1 600	6	3	20 000	2 600
2 500	6	3	29 000	3 500

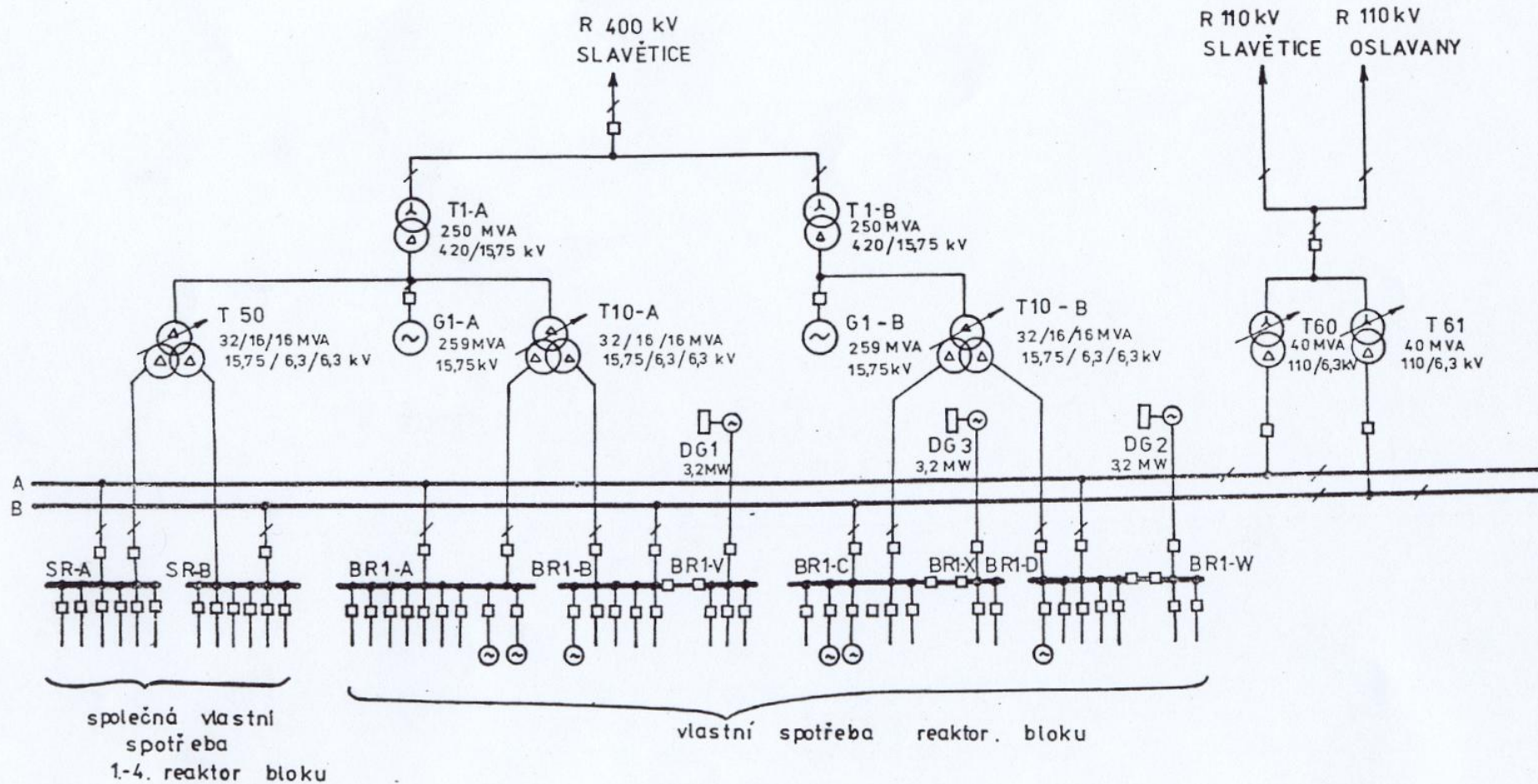
Parametry transformátorů 110/22 kV SIEMENS				
Výkon (MVA)	Napětí nakrátko (%)	Proud naprázdno (%)	Ztráty nakrátko (kW)	Ztráty naprázdno (kW)
10	9,6	3	42	13
16	9,6	3	51	17
25	9,5	2	63	24
40	9,8	2	86	35
63	10,5	2	113	49

15. PŘÍLOHY

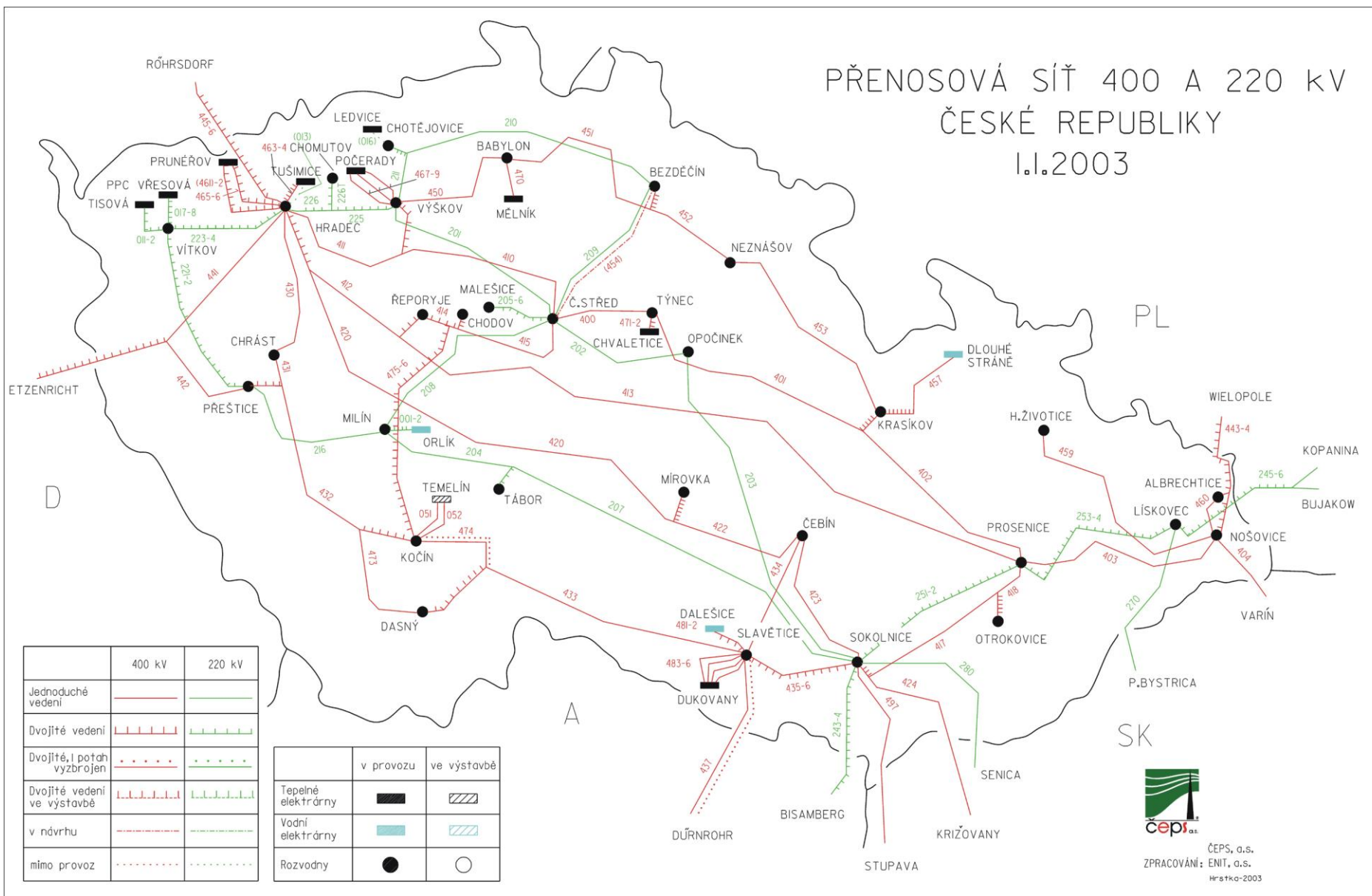


Průběh brutto spotřeby ČR - pětiminutové hodnoty (16.4.2003)
max: 8395 MW (6²⁰)
min: 6992 MW (3⁰⁰)

ELEKTRICKÉ SCHÉMA JE DUKOVANY



PŘENOSOVÁ SÍŤ 400 A 220 kV ČESKÉ REPUBLIKY I.I.2003



16. LITERATURA

- [1] Rusek S.: Elektroenergetika – návody do cvičení
Skripta VŠB Ostrava, 1991
- [2] Gurecký J.: Elektroenergetika – návody do cvičení
Skripta VŠB-TU Ostrava, 2000
- [3] Normy ČSN

OBSAH

Předmluva	1
1. Základní energetické pojmy	2
2. Výroba elektrické energie.....	5
3. Parametry vedení	13
4. Ustálený chod sítí.....	18
5. Střídavá vedení vvn	38
6. Zkratové poměry	44
7. Stabilita elektroenergetických soustav	52
8. Kompenzace účinníku	63
9. Spolehlivost	68
10. Zásady dimenzování vodičů	70
11. Samostatné programy	72
12. Samostatný projekt	85
13. Laboratorní měření.....	86
14. Tabulková část.....	95
15. Přílohy	103
16. Literatura.....	106
Obsah.....	107