

**Příklad 1**

Vedení 22 kV má dílčí kapacitu k zemi na 1 km délky  $k_0 = 4,3 \cdot 10^{-9}$  F/km. Rozhodněte, zda je nutná kompenzace proudu zemního spojení, je-li délka vedení  $l = 30$  km.

**Řešení:**

Vypočítáme poruchový proud dokonalého zemního spojení:

$$I_p = 3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot l \cdot U_f = 3 \cdot 314 \cdot 4,3 \cdot 10^{-9} \cdot 30 \cdot \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 1,54 \text{ A}$$

Kompenzace je nutná pro  $I_p > 10 \text{ A}$

Doporučuje se            pro  $I_p \geq 5 \text{ A}$

Neprovádí se            pro  $I_p < 5 \text{ A}$

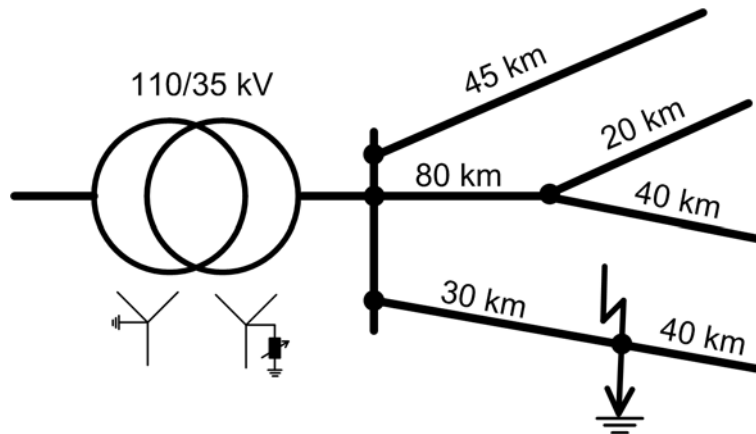
**Příklad 2**

Distribuční síť 35 kV má vedení s provozní kapacitou  $C = 9 \cdot 10^{-9}$  F/km a s dílčí kapacitou vzájemnou  $k' = 1,6 \cdot 10^{-9}$  F/km.

Určete:

- Proud zemního spojení
- Výkon a indukčnost zhášecí tlumivky

Zemní spojení vznikne v označeném místě distribuční sítě podle obr. 1.



Obr. 1

**Řešení:**

K výpočtu zemního spojení potřebujeme dílčí kapacitu k zemi, kterou můžeme určit ze vztahu:  $C = k_0 + 3k'$ , vyjádříme  $k_0 = C - 3k' = (9 - 3 \cdot 1,6) \cdot 10^{-9} = 4,2 \cdot 10^{-9}$  F/km.

Vzhledem k tomu, že proud zemního spojení prakticky nezávisí na vzdálenosti poruchy od zdroje, stanovíme celkovou rozlohu sítě jako součet všech délek vedení, která jsou připojena v rozvodně vn:

$$l = 45 + 80 + 20 + 40 + 30 + 40 = 255 \text{ km}$$

- Proud zemního spojení bude

$$I_p = 3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot l \cdot U_f = 3 \cdot 314 \cdot 4,2 \cdot 10^{-9} \cdot 255 \cdot \frac{32 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 20,4 \text{ A}$$

- Pro rezonanci platí podmínka

$$I_L = I_p = 20,4 \text{ A}$$

$$X_L = X_C$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot k_0 \cdot l}$$

Výkon zhašecí rezonanční tlumivky bude

$$S = U_f \cdot I_L = \frac{35}{\sqrt{3}} \cdot 20,4 = 414 \text{ kVAr}$$

Potřebná indukčnost zhašecí rezonanční tlumivky bude

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot k_0 \cdot l} = \frac{U_f}{\omega \cdot I_L} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 314 \cdot 20,4} = 3,16 \text{ H}$$

**Příklad 3**

Přesvědčte se, že náhradní složkové schéma soustavy na obr. 3 pro případ zemního spojení v místě K, uvedené na obr. 2, lze zjednodušit na tvar uvedený na obr. 4.

Parametry zařízení: Zkratový výkon na přípojnicích 110 kV je 1800 MVA. Transformátor: 25 MVA, 110/23 kV;  $u_k = 10,5 \%$ ; spojení vinutí Ynyd. Kapacita k zemi části sítě 22 kV napájené vedením V1  $K_0 = 200$  nF, části sítě napájené vedením V2  $K_0 = 250$  nF, části sítě napájené vedením V3  $K_0 = 300$  nF. Odpor úseku vedení V3 do místa zemního spojení je  $R = 5,6 \Omega$ , reaktance  $X = 7 \Omega$ , kapacita k zemi  $K_0 = 100$  nF, netočivá impedance  $Z_0 = 4Z$ , délka úseku je 1/3 celkové délky vedení.

**Řešení:**

Reaktance a odpory přepočteme k napěťové úrovni 22 kV:

$$X_S = \frac{U_N^2}{S_{KS}} \cdot \frac{U_V^2}{U_N^2} = \frac{110^2}{1800} \cdot \frac{23^2}{110^2} = 0,294 \Omega$$

$$X_1 = u_k \cdot \frac{U_N^2}{S_T} = 0,105 \cdot \frac{23^2}{25} = 2,222 \Omega$$

$$X_2 = 7 \Omega, \quad X_3 = 2 \cdot X_2 = 14 \Omega$$

$$R_2 = 5,6 \Omega, \quad R_3 = 2 \cdot R_2 = 11,2 \Omega$$

$$X_4 = \frac{1}{\omega \cdot K_{0(V1)}} = \frac{1}{314,16 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 15,915 \text{ k}\Omega$$

$$X_5 = \frac{1}{\omega \cdot K_{0(V2)}} = \frac{1}{314,1 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}} = 12,732 \text{ k}\Omega$$

$$X_6 = \frac{1}{\omega \cdot K_{0(V3)}} = \frac{1}{314,16 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 31,831 \text{ k}\Omega$$

$$X_7 = \frac{1}{\omega \cdot K_{0(V3'')}} = \frac{1}{314,16 \cdot (0,3 - 0,1) \cdot 10^{-6}} = 15,915 \text{ k}\Omega$$

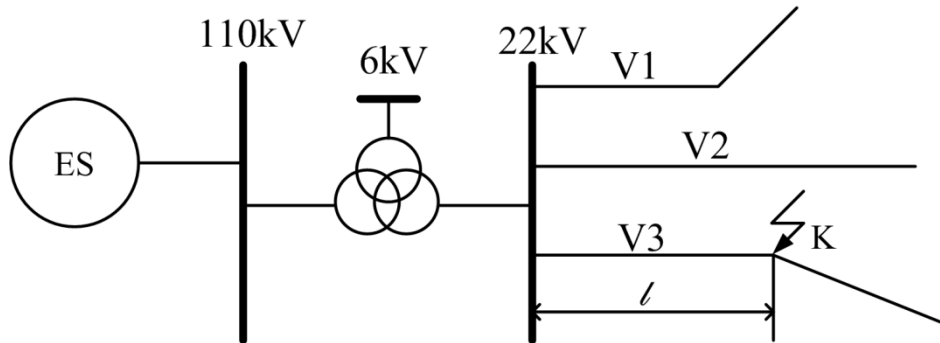
Z porovnání velikostí indukčních reaktancí a odporů s velikostmi příčných kapacitních reaktancí (parametry s indexy 4 až 7) plyne, že lze zanedbat indukční reaktance i rezistance ve schématu na obr. 3, tj. přejít ke zjednodušenému schématu na obr. 4, ve kterém:

$$X_{KO} = X_K = X_4 // X_5 // X_6 // X_7 = 15,915 // 12,732 // 31,831 // 15,915 = 4,244 \text{ k}\Omega$$

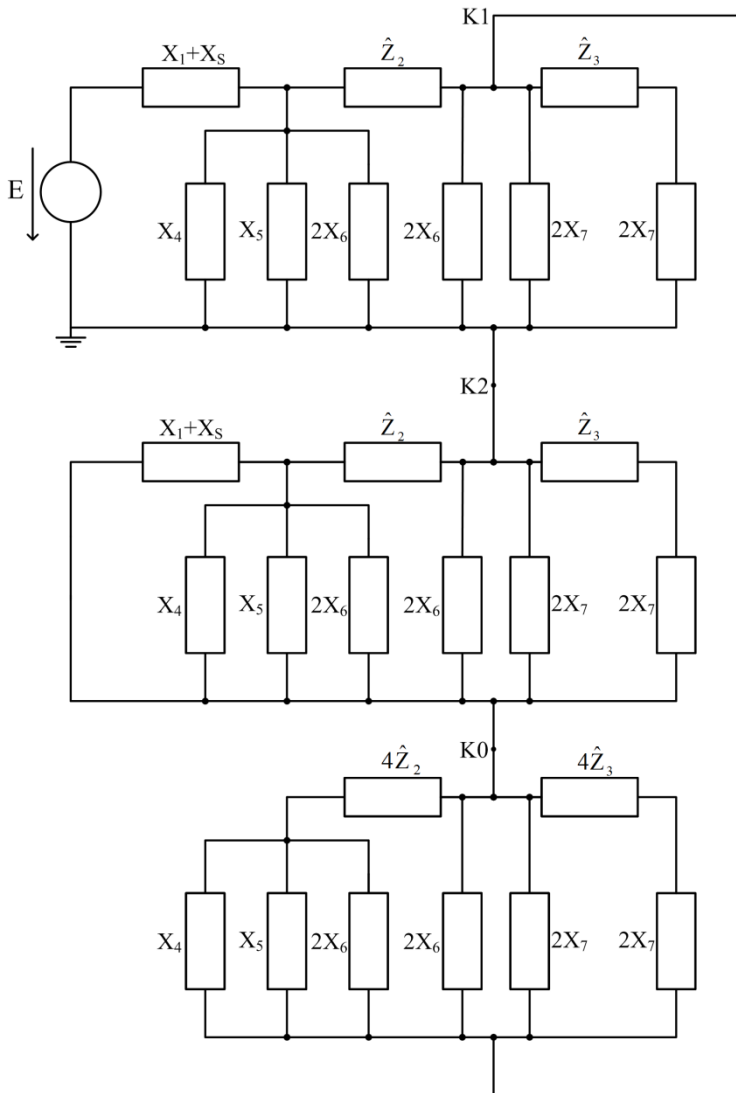
nebo:

$$X_{K0} = X_K = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot (K_{0(V1)} + K_{0(V2)} + K_{0(V3)})} = \frac{1}{314,16 \cdot (200 + 250 + 300) \cdot 10^{-9}}$$

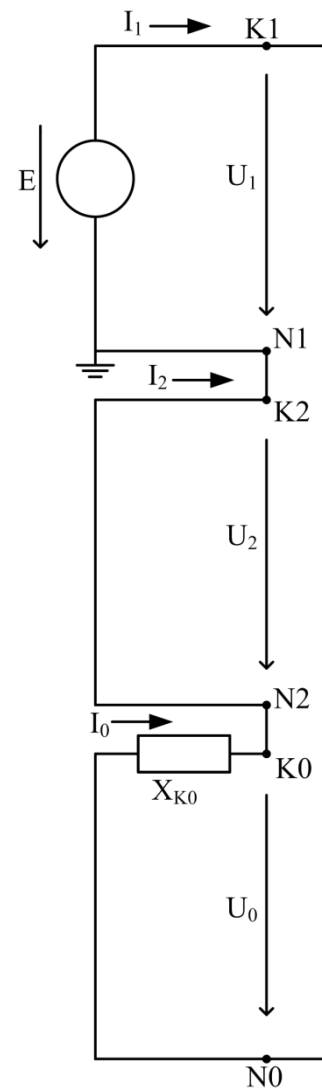
$$= 4,244 \text{ k}\Omega$$



Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4

**Příklad 4**

Vypočtete velikost poruchového proudu při zemním spojení v místě K ve schématu na obr. 2. Parametry článků soustavy převezměte z příkladu 3, napětí na sekundární straně transformátorů zvolte 23 kV.

**Řešení:**

Z náhradního schématu na obr. 4 dostáváme:

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_0 = \hat{I}_2 = \frac{\hat{U}_1}{-j \cdot X_{KO}} = \frac{U_f}{-j \cdot X_K} = j \frac{23}{\sqrt{3} \cdot 4,244} = j3,129 \text{ A}$$

$$\hat{I}_A = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0 = 3 \cdot \hat{I}_1 = j3 \cdot 3,129 = j9,387$$

Poruchový proud

$$\hat{I}_P = -\hat{I}_A = -j9,387 \text{ A}$$

*Poznámka 1:* Při praktických výpočtech se pro stanovení velikosti poruchového proudu nejčastěji používá vzorec

$$I_P = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot \frac{U_f}{\frac{1}{\omega \cdot C_0}} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f$$

Kde  $C_0$  je celková kapacita fáze el. sítě k zemi. V našem případě

$$C_0 = K_{0(V1)} + K_{0(V2)} + K_{0(V3)} = 200 + 250 + 300 = 750 \text{ nF}$$

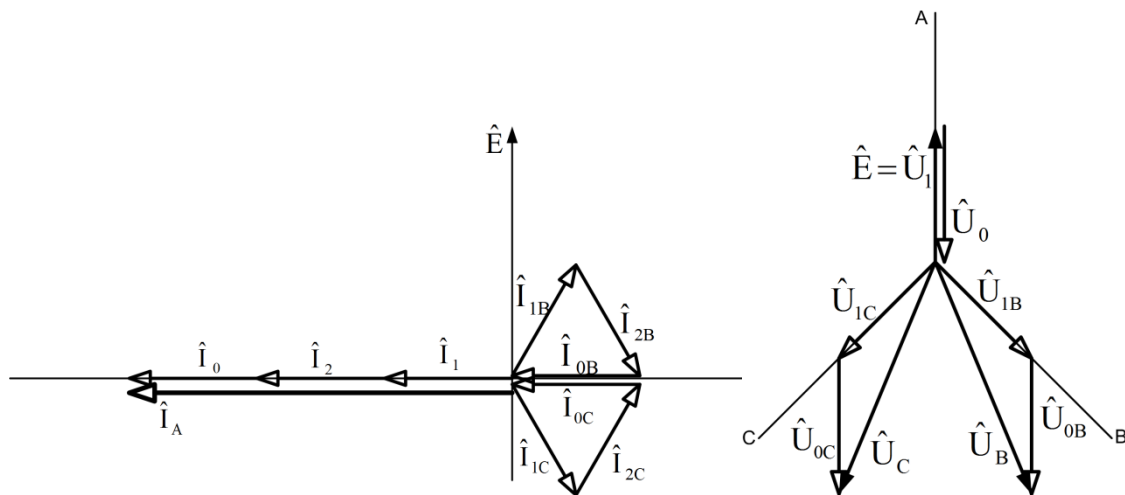
Takže velikost poruchového proudu

$$I_P = 3 \cdot 314,16 \cdot 750 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{23000}{\sqrt{3}} = 9,386 \text{ A}$$

Složková napětí:

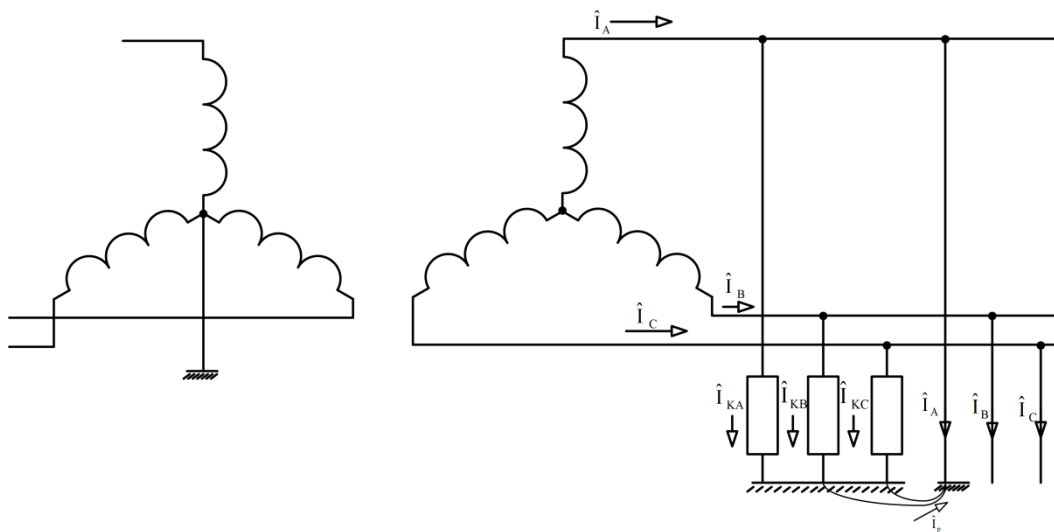
$$\hat{U}_1 = 23 \text{ kV} \qquad U_2 = 0 \qquad \hat{U}_0 = -\hat{U}_1 = -23 \text{ kV}$$

*Poznámka 2:* Vzhledem k tomu, že poruchový proud je větší než normou povolená velikost 5 A (kdy nemusí být síť kompenzována), doporučuje se provést kompenzaci. V případech kdy  $I_P > 10 \text{ A}$  je kompenzace povinná.



Obr. 5

*Poznámka 3:* Fázorový diagram proudů na obr. 5 odpovídá proudům odbočky s impedancemi  $\hat{Z}_A = \hat{Z}_B = \hat{Z}_C = 0$ , jejíž fáze A je uzemněná (obr. 6). Nelze proto zaměňovat fázové proudy v této odbočce s fázovými proudy kapacit elektrické sítě mezi fázemi a zemí ( $\hat{I}_{KA}, \hat{I}_{KB}, \hat{I}_{KC}$ ) nebo fázovými proudy transformátoru ( $\hat{I}_{tA}, \hat{I}_{tB}, \hat{I}_{tC}$ ).



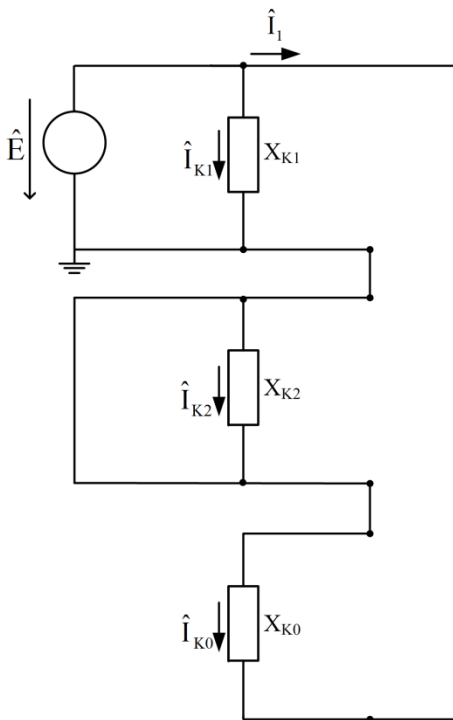
Obr. 6

Pro úplnost vypočteme ještě tyto proudy. V náhradním schématu na obr. 4 doplníme v sousledné a zpětné soustavě kapacitní reaktance elektrické sítě (obr. 7). Pro složkové proudy tekoucí těmito reaktancemi dostáváme na základě obr. 7 výrazy

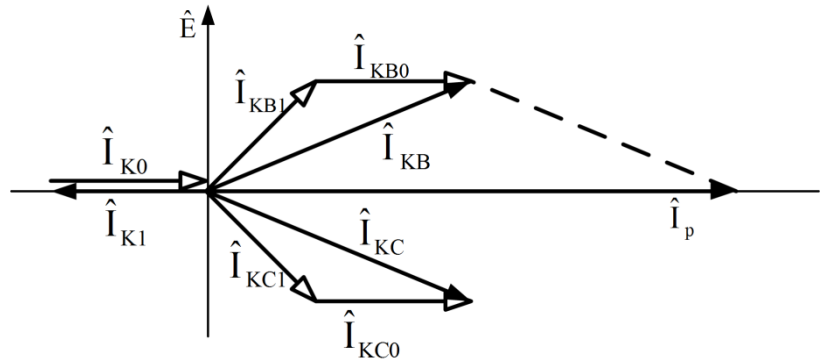
$$\hat{I}_{K1} = \frac{\hat{U}_f}{-jX_{K1}} = \frac{U_f}{-jX_K} = \hat{I}_1$$

$$\hat{I}_{K2} = 0$$

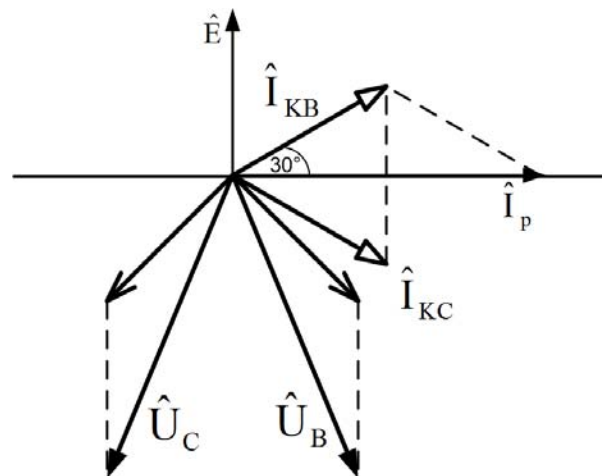
$$\hat{I}_{K0} = \frac{\hat{U}_0}{-jX_{K0}} = \frac{-\hat{U}_1}{-jX_K} = -\frac{U_f}{-jX_K} = -\hat{I}_1$$



Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9

Odpovídající fázorový diagram je na obr. 8. Z tohoto fázorového diagramu lze určit též poruchový proud  $I_P$ .

$$\hat{I}_P = -j2 \cdot I_{KB} \cdot \cos 30^\circ = -j\sqrt{3} \cdot I_{KB} = -j3 \cdot I_1 = -\hat{I}_A$$

Proudy transformátoru:

$$\hat{I}_{tA} = \hat{I}_A = 9,387 \cdot e^{j90^\circ} \text{ A}$$

$$\hat{I}_{tB} = \hat{I}_{KB} = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot e^{j300^\circ} = 5,4196 \cdot e^{j300^\circ} \text{ A}$$

$$\hat{I}_{tC} = \hat{I}_{KC} = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot e^{j240^\circ} = 5,4196 \cdot e^{j240^\circ} \text{ A}$$

Fázorový diagram proudů tekoucích kapacitami elektrické sítě k zemi lze stanovit též bezprostředně z fázorového diagramu napětí, jak je provedeno na obr. 9. Z diagramu odvodíme výrazy pro proudy:

$$\hat{I}_{KA} = \frac{\hat{U}_A}{-jX_K} = \frac{0}{-jX_K} = 0$$



$$\hat{I}_{KB} = \frac{\hat{U}_B}{-jX_K} = j \frac{\sqrt{3} \cdot U_f}{X_K} \cdot e^{j210^\circ} = \frac{23}{4,244} \cdot e^{j300^\circ} = 5,4194 \cdot e^{j300^\circ} \text{ A}$$

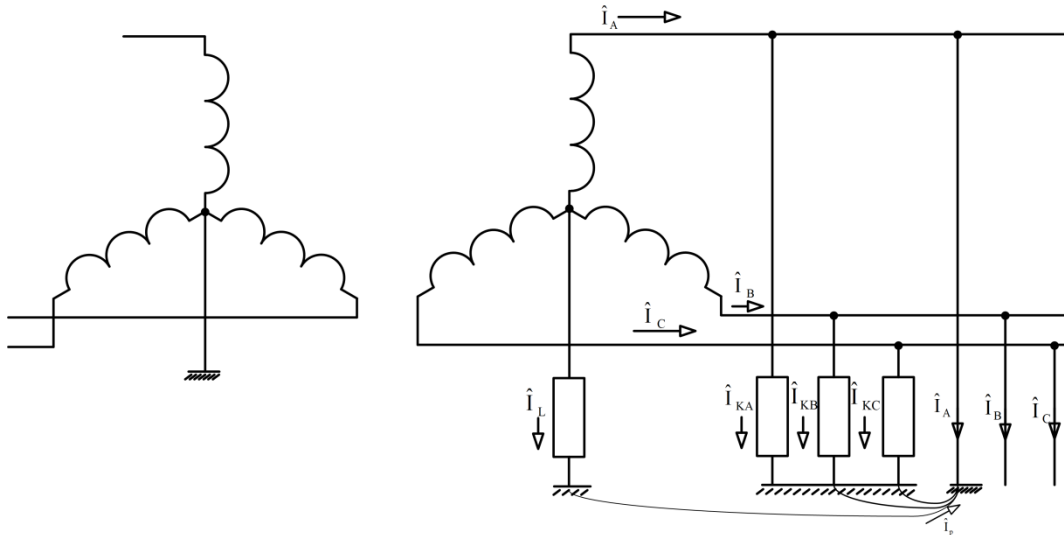
$$\hat{I}_{KC} = \frac{\hat{U}_C}{-jX_K} = j \frac{\sqrt{3} \cdot U_f}{X_K} \cdot e^{j150^\circ} = \frac{23}{4,244} \cdot e^{j240^\circ} = 5,4194 \cdot e^{j240^\circ} \text{ A}$$

**Příklad 5**

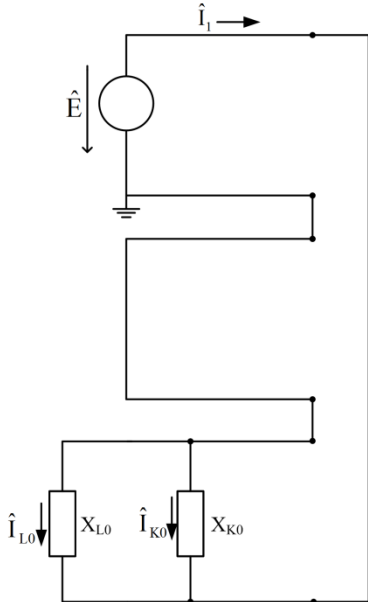
Vypočtete velikost zhášecí tlumivky pro kompenzaci sítě z příkladu 4.

**Řešení:**

Zapojením zhášecí tlumivky do uzlu transformátoru (obr. 10) se změní složkové schéma pro zemní spojení na tvar uvedený na obr. 11, kde  $X_{L0} = 3 \cdot X_L$  a  $X_{K0} = X_K$ .



Obr. 10



Obr. 11

Výsledná impedance netočivé složkové soustavy

$$\hat{Z}_{c0} = jX_{L0} // -jX_{K0} = \frac{X_{L0} \cdot X_{K0}}{-j(X_{K0} - X_{L0})} = j \frac{3X_L \cdot X_K}{X_K - 3X_L}$$

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0 = \frac{U_f}{j \frac{3 \cdot X_L \cdot X_K}{X_K - 3X_L}} = -j \frac{X_K - 3X_L}{3 \cdot X_L \cdot X_K} \cdot U_f$$

Poruchový proud:

$$\hat{I}_P = -\hat{I}_A = -(\hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_0) = -3 \cdot \hat{I}_1 = j \frac{X_K - 3 \cdot X_L}{X_L \cdot X_K} \cdot U_f$$

Zhášecí tlumivka se nastavuje tak, aby poruchový zemní proud byl nulový. Tento požadavek je zřejmě splněn, platí-li

$$X_K - 3 \cdot X_L = 0$$

$$X_L = \frac{1}{3} \cdot X_K = \frac{1}{3} \cdot 4,244 = 1,415 \text{ k}\Omega$$

Odpovídající indukčnost zhášecí tlumivky

$$L_t = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1415}{314,16} = 4,504 \text{ H}$$

Proud tekoucí zhášecí tlumivkou (viz. obr. 11)

$$\hat{I}_L = 3 \cdot \hat{I}_{L0} = 3 \cdot \frac{\hat{U}_0}{jX_{L0}} = 3 \cdot \frac{-\hat{U}_1}{j3 \cdot X_L} = j \frac{U_f}{X_L} = j \frac{23}{\sqrt{3} \cdot 1,415} = j9,385 \text{ A}$$

Výkon zhášecí tlumivky:

$$S_L = U_0 \cdot I_L = \frac{23}{\sqrt{3}} \cdot 9,385 = 124,624 \text{ kVA}$$

*Poznámka:* Při praktických výpočtech se většinou používají dále uvedené vzorce.

Reaktance tlumivky

$$X_L = \frac{1}{3} X_K = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0}$$

Indukčnost zhášecí tlumivky:

$$L_t = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0}$$

Součet proudů tekoucích kapacitami sítě k zemi  $I_K$  je vlastně poruchový proud, pro který byl v příkladu 4 odvozen vzorec

$$I_K = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f$$

Tomu se musí rovnat proud tlumivky  $I_L = I_K$ .

Výkon tlumivky

$$Q_L = \frac{U_f^2}{X_L} \quad \text{nebo} \quad Q_L = U_f \cdot I_L = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f^2$$

Při výpočtu podle těchto vzorců dostáváme:

$$X_L = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0} = \frac{1}{3 \cdot 314,16 \cdot 750 \cdot 10^{-9}} = 1415 \Omega$$

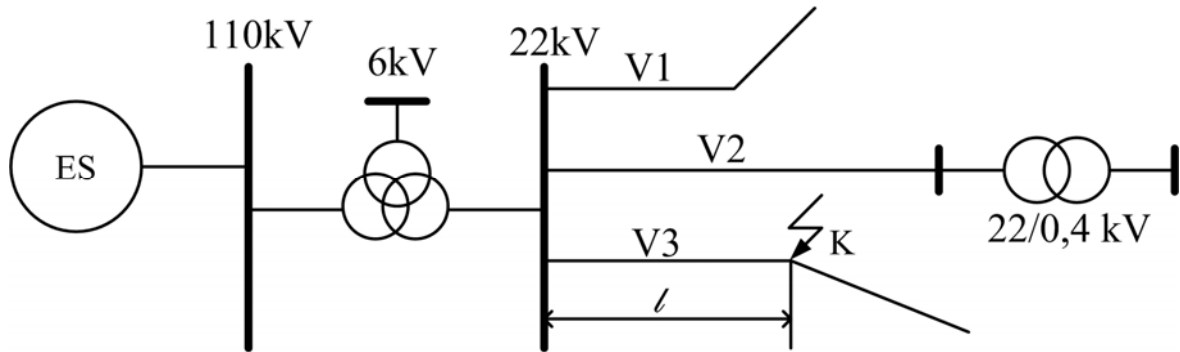
$$L_t = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} = \frac{1}{3 \cdot 314,16^2 \cdot 750 \cdot 10^{-9}} = 4,503 \text{ H}$$

$$I_L = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f = 3 \cdot 314,16 \cdot 750 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{23}{\sqrt{3}} = 9,386 \text{ A}$$

$$Q_L = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_f^2 = 3 \cdot 314,16 \cdot 750 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{23^2}{\sqrt{3}} = 124,6 \text{ kVA}$$

**Příklad 6**

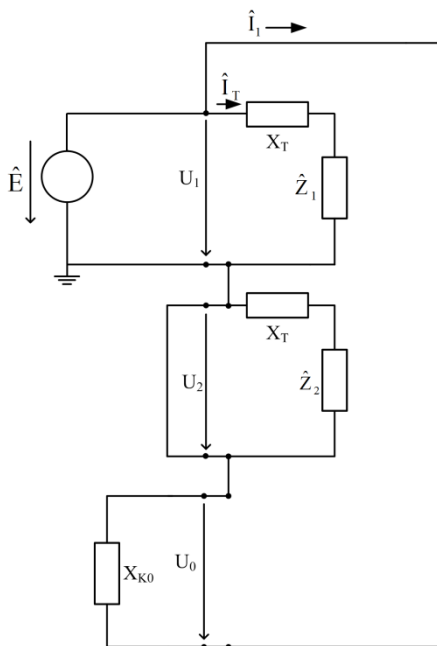
Na síť 22 kV z příkladu 3 je připojen transformátor 22/0,4 kV, schéma spojení Dyn (obr. 12). Určete napěťové poměry na sekundární straně tohoto transformátoru při zemním spojení v síti 22 kV.



Obr. 12

**Řešení:**

Náhradní složkové schéma pro tento případ je na obr. 13, transformátor 22/0,4 kV je ve schématu zastoupen reaktancí  $X_T$ , jeho zátěž impedancí  $\hat{Z}$ .



Obr. 13

Složková napětí na sekundární straně transformátoru:

$$\hat{U}_{T1} = \hat{U}_1 - \hat{I}_T jX_T \quad U_{T2} = 0 \quad U_{T0} = 0$$

Složkové proudy:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{U}_1}{jX_T + \hat{Z}}$$

$$I_2 = I_0 = 0$$

Z rovnic pro složkové proudy je zřejmé, že na sekundární straně transformátoru je při zemním spojení v síti 22 kV normální symetrický provozní stav.