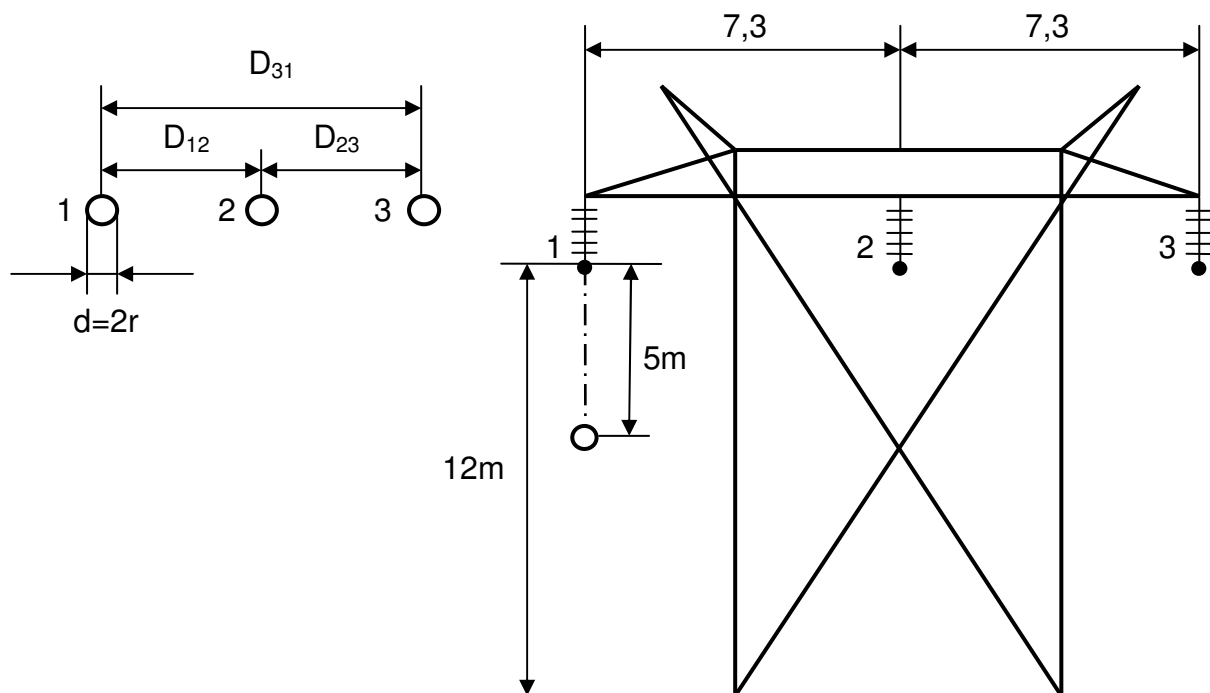


13. Izračunati pogonsku induktivnost i kapacitivnost za trofazni vazdušni vod nazivnog napona 220 kV preseka 400/50 AlČ i prečnika $d=27,7\text{mm}$. Proračune kapacitivnosti uraditi sa tačnim i približnim obrascima za srednje geometrijsko rastojanje provodnika i njegovog lika. Maksimalni ugib provodnika je $f_{\max} = 5\text{m}$. Za ekvivalentni poluprečnik AlČ provodnika usvojiti $r_{ep} = 0,9 \cdot r$



Proračun induktivnosti:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{SG}}{r_{ep}}$$

$$r_{ep} = 0,9 \cdot r = 0,9 \cdot \frac{d}{2} = 0,9 \cdot \frac{27,7}{2} = 12,465\text{mm}$$

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{7,3 \cdot 7,3 \cdot 14,6} = 9,20\text{m}$$

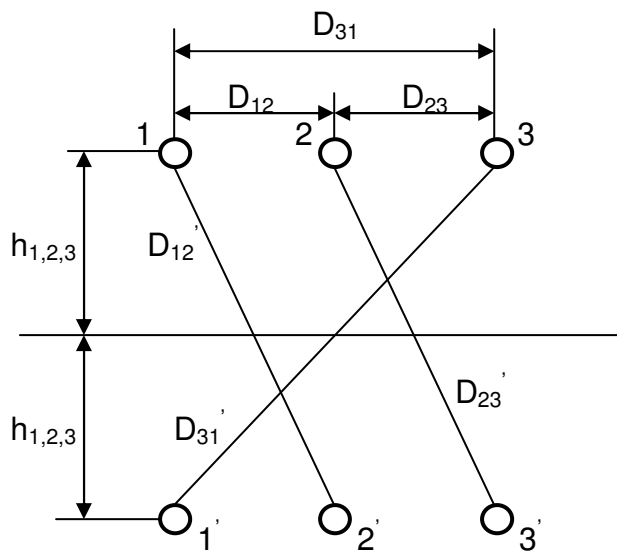
(zamenjivati veličine u istim jedinicama)

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{9200\text{mm}}{12,465\text{mm}} = 1,32 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right] = 13,2 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$x = \omega \cdot l = 2\pi \cdot f \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,32 \cdot 10^{-3} = 0,415 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Proračun kapacitivnosti:

Prvo se izračuna ekvivalentna srednja visina za proračun kapacitivnosti



$$h = h_1 = h_2 = h_3 = H - \frac{2}{3}f_{\max} = 12 - \frac{2}{3} \cdot 5 = 8,67\text{m}$$

Tačan izraz za kapacitivnost:

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij'}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij'}}} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

Iz geometrije:

$$D_{SGij} = D_{SG} = 9,20\text{m}$$

$$h_{SG} = h = 8,67\text{m}$$

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}$$

$$D_{12'} = D_{23'} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + D_{12}^2} = \sqrt{(2 \cdot 8,67)^2 + 7,3^2} = 18,81\text{m}$$

$$D_{31'} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + D_{31}^2} = \sqrt{(2 \cdot 8,67)^2 + (2 \cdot 7,3)^2} = 22,67\text{m}$$

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{18,81 \cdot 18,81 \cdot 22,67} = 20,02\text{m}$$

pa je:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{27,7}{2} \text{ mm} = 13,85 \text{ mm} = 1,385 \text{ cm}$$

$$c = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{920}{1,385} \cdot \frac{2 \cdot 867}{2002}} = 8,74 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

(sve u istim jedinicama)

Prvi približni obrazac je:

$$D_{SGij'} = \sqrt{(2 \cdot h_{SG})^2 + D_{SGij}^2}$$

$$c = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{\sqrt{(2 \cdot h_{SG})^2 + D_{SGij}^2}}} = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{920}{1,385} \cdot \frac{2 \cdot 867}{\sqrt{(2 \cdot 867)^2 + 920^2}}} = 8,71 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

Drugi približni obrazac je:

$$\frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij'}} \approx 1$$

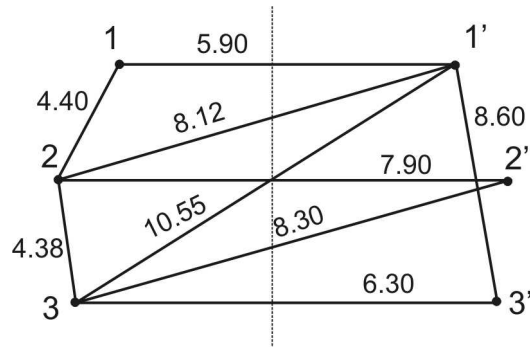
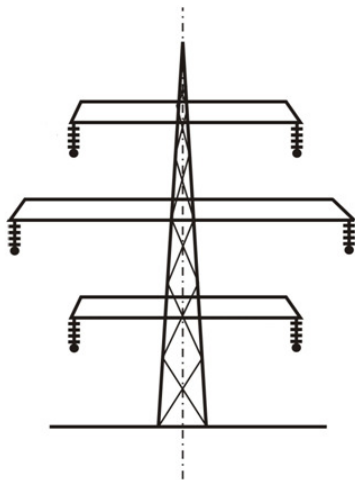
$$c = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r}} = \frac{55,55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{920}{1,385}} = 8,55 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

Susceptansa je:

$$b = \omega \cdot c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot c = 314 \cdot c = 314 \cdot 8,74 \cdot 10^{-9} = 2,74 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$$

Razlika proračuna kapacitivnosti po približnom i tačnom obrascu je praktično zanemarljiva. Praktično, kapacitivnost ne zavisi od visine vešanja provodnika! (ako posmatramo drugi približan obrazac).

14. Izračunati pogonsku induktivnost i kapacitivnost dvosistemskog trofaznog vazdušnog voda nazivnog napona 132 kV preseka AlČ 235/55mm² i prečnika užeta d=22mm; $r_e=0.9 \cdot r$



Proračun induktivnosti:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{SG} \cdot D_{SG}^{ij'}}{r_e \cdot D_{SG}^{ii'}}$$

Izračunavanje srednjih geometrijskih rastojanja:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{4,40 \cdot 4,38 \cdot 5,90} = 5,49\text{m}$$

$$D_{SG}^{ij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}} = \sqrt[3]{8,12 \cdot 8,30 \cdot 10,55} = 8,92\text{m}$$

(sa predavanja: ako je sistem geometrijski simetričan:)

$$D_{ij} = D_{ij}'' \quad (\text{isti raspored u oba sistema})$$

$$D_{ij}' = D_{ij} \quad (\text{simetrija u odnosu na provodnik})$$

$$D_{SG}^{ii'} = \sqrt[3]{D_{11'} \cdot D_{22'} \cdot D_{33'}} = \sqrt[3]{5,90 \cdot 7,90 \cdot 6,30} = 6,65\text{m}$$

$$r_e = 0,9 \cdot r = 0,9 \cdot \frac{22}{2} \text{mm} = 9,9\text{mm} \quad (\text{nije zadato, usvajamo } 0,9)$$

(nije zadato, usvojeno 0,9)

Pa je:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{549 \cdot 892}{0,99 \cdot 665} = 13,22 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$x = \omega \cdot l = 0,415 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Proračun kapacitivnosti:

Približni obrazac je:

$$c = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SG}}{r} \cdot \frac{D_{SGij}}{D_{SGii}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{549 \cdot 892}{1,1 \cdot 665}} = 8,54 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

$$\frac{D_{SGij}}{D_{SGii}}$$

ovo je isto kao i kod induktivnosti, jedina razlika je što se kapacitivnost računa sa r a ne sa r_e ($r_e=0,9 \cdot r$)

Susceptansa:

$$b = \omega \cdot c = 2,68 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$$

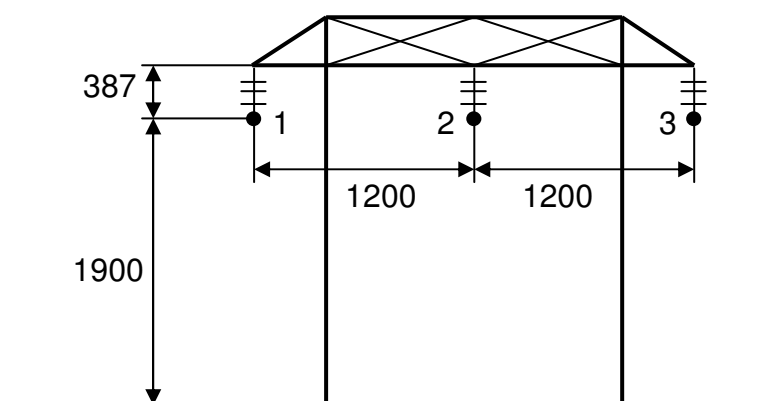
15. Izračunati pogonsku induktivnost i kapacitivnost za trofazni vazdušni vod nazivnog napona $U_n=400\text{kV}$ čiji su provodnici izvedeni u obliku snopa od AlČ 490/65 mm^2 , prečnik provodnika je $d=2\cdot r=31,7\text{mm}$ a rastojanje susednih provodnika u snopu je $D_s=40\text{cm}$, za slučajeve:

a) dva provodnika u snopu,

b) tri provodnika u snopu,

c) četiri provodnika u snopu

Maksimalni ugeb provodnika je $f_{\max} = 11\text{m}$. Uporediti izračunate induktivnosti i kapacitivnosti sa slučajem kada je vod sa jednim provodnikom po fazi. U proračunima induktivnosti usvojiti ekvivalentni poluprečnik jednog užeta kao $r_e=0,95\cdot r$



(oznake su u cm)

Proračun induktivnosti:

Jedan provodnik po fazi $n=1$

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{12 \cdot 12 \cdot 24} = 15,12\text{m}$$

Induktivnost je:

$$l = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{SG}}{r_{ep}} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

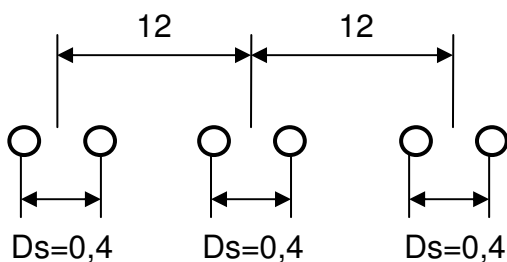
$$r_{ep} = 0,95 \cdot r = 0,95 \cdot \frac{31,7}{2} = 15,0\text{mm}$$

$$l_1 = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1512}{1,5} = 13,83 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right] \quad [1 \div 1,36] \text{ ne tipična vrednost}$$

$$x_1 = \omega \cdot l_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_1 = 314 \cdot l_1 = 0,43 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad [0,314 \div 0,43] \text{ ne tipična vrednost}$$

Vrednost $x=0,43$ nije tipična. Ovde je pretpostavka o jednom provodniku po fazi, što se ne koristi za ovaj naponski nivo, zbog korone.

a) Dva provodnika po fazi n=2



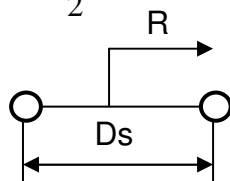
Ekvivalentni poluprečnik sa aspekta induktivnosti je:

$$r_{es} = \sqrt[n]{n \cdot r_{ep} \cdot R^{n-1}}$$

$$n=2$$

$$r_{ep}=0,95 \cdot r$$

$$R = \frac{Ds}{2}$$



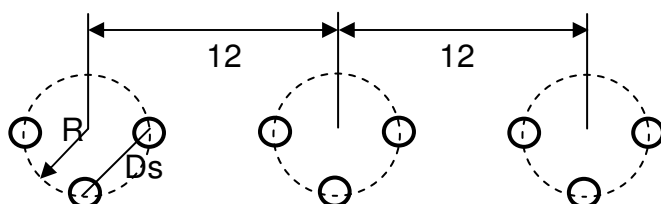
R – poluprečnik opisanog kruga oko poligona. Provodnici snopa su raspoređeni u temenima pravilnog poligona.

$$r_{es} = \sqrt[2]{2 \cdot (0,95 \cdot r) \cdot \frac{Ds}{2}} = \sqrt[2]{2 \cdot 0,95 \cdot \frac{31,7}{2} \cdot \frac{400}{2}} = 77,6 \text{ mm}$$

$$l_2 = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{Dsg}{r_{es}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1512}{7,76} = 10,54 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$x_2 = \omega \cdot l_2 = 314 \cdot l_2 = 0,33 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

b) Tri provodnika po fazi n=3



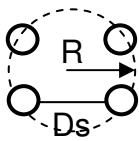
$$R = \frac{Ds}{\sqrt{3}}$$

$$r_{es} = \sqrt[3]{3 \cdot r_{ep} \cdot R^2} = \sqrt[3]{3 \cdot 15 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2} = 134 \text{ mm}$$

$$l_3 = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{Dsg}{r_{es}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1512}{13,4} = 9,45 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$x_3 = \omega \cdot l_3 = 0,297 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

c) Četiri provodnika u snopu: n=4



$$R = \frac{Ds}{\sqrt{2}}$$

$$r_{es} = \sqrt[4]{4 \cdot r_{ep} \cdot R^3} = \sqrt[4]{4 \cdot 15 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{2}}\right)^3} = 192 \text{ mm}$$

$$l_4 = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{Dsg}{r_{es}} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{1512}{19,2} = 8,73 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{H}}{\text{km}} \right]$$

$$x_4 = \omega \cdot l_4 = 0,27 \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

U odnosu na induktivnost voda sa jednim provodnikom:

$$\Delta l_2 = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot 100 = -23,8\%$$

$$\Delta l_3 = \frac{l_3 - l_1}{l_1} \cdot 100 = -31,7\%$$

$$\Delta l_4 = \frac{l_4 - l_1}{l_1} \cdot 100 = -36,9\%$$

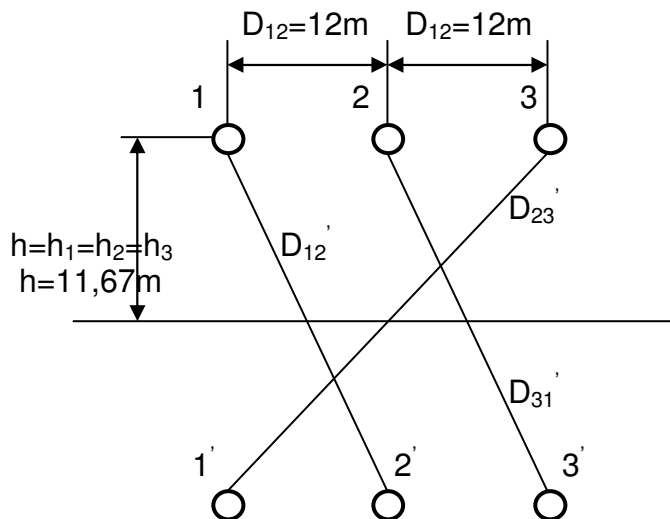
Sa povećanjem broja provodnika po fazi $\nearrow$ $\searrow$ l

(jer $\nearrow$ r_{es} $\searrow$ $\ln \frac{Dsg}{r_{es}}$ $\searrow$ l)

Proračun kapacitivnosti:

$$c = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij}'}} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

$$h = h_1 = h_2 = h_3 = h_{SG} = H - \frac{2}{3} f_{\max} = 19 - \frac{2}{3} \cdot 11 = 11,67\text{m}$$



Iz geometrije:

$$D_{12'} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + D_{12}^2} = \sqrt{(2 \cdot 11,67)^2 + 12^2} = 26,24\text{m}$$

$$D_{23'} = D_{12'} = 26,24\text{m}$$

$$D_{31'} = \sqrt{(2 \cdot h)^2 + D_{31}^2} = \sqrt{(2 \cdot 11,67)^2 + 24^2} = 33,48\text{m}$$

Ekvivalentno rastojanje originala je:

$$D_{SGij} = D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = 15,12\text{m}$$

Ekvivalentno rastojanje originala i likova je:

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}} = \sqrt[3]{26,24 \cdot 26,24 \cdot 33,48} = 28,46\text{m}$$

U slučaju jednog provodnika:

$$r_{esc} = r = \frac{31,7}{2} = 15,85\text{mm} > r_{ep} = 0,95 \cdot r \quad (\text{za induktivnost, za jedan provodnik})$$

$$r_{esc} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$$

pa je pogonska kapacitet:

$$c_1 = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{1512}{1,585} \cdot \frac{2 \cdot 11,67}{28,46}} = 8,34 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

a susceptansa:

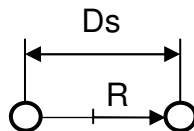
$$b_1 = \omega \cdot c_1 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot c_1 = 314 \cdot c = 2,62 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$$

a) Dva provodnika po fazi n=2

Ekvivalentni poluprečnik snopa sa aspekta kapacitivnosti

$$r_{esc} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$$

$$R = \frac{Ds}{2}$$



$$r_{esc} = \sqrt{2 \cdot r \cdot R} = \sqrt{2 \cdot 15,85 \cdot \frac{400}{2}} = 79,6 \text{ mm}$$

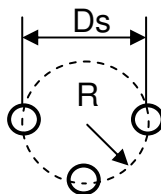
$$c_2 = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{1512}{7,96} \cdot \frac{2 \cdot 11,67}{28,46}} = 11,00 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{F}}{\text{km}} \right]$$

pa je susceptansa:

$$b_2 = \omega \cdot c_2 = 3,45 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{S}}{\text{km}} \right]$$

b) Tri provodnika po fazi n=3

$$R = \frac{Ds}{\sqrt{3}}$$



$$r_{esc} = \sqrt[3]{3 \cdot r \cdot R^2} = \sqrt[3]{3 \cdot 15,85 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}} \right)^2} = 136,4 \text{ mm}$$

$$c_3 = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{1512}{13,64} \cdot \frac{2 \cdot 11,67}{28,46}} = 12,3 \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right]$$

$$b_3 = \omega \cdot c_2 = 3,84 \cdot 10^{-6} \left[\frac{S}{km} \right]$$

c) Četiri provodnika u snopu: n=4

$$R = \frac{Ds}{\sqrt{2}}$$

$$r_{esc} = \sqrt[4]{4 \cdot r \cdot R^3} = \sqrt[4]{4 \cdot 15,85 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{2}} \right)^3} = 194,6 \text{ mm}$$

$$c_4 = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{D_{SGij}}{r_{esc}} \cdot \frac{2 \cdot h_{SG}}{D_{SGij}}} = \frac{55.55 \cdot 10^{-9}}{\ln \frac{1512}{19,46} \cdot \frac{2 \cdot 11,67}{28,46}} = 13,37 \cdot 10^{-9} \left[\frac{F}{km} \right]$$

$$b_4 = \omega \cdot c_4 = 4,20 \cdot 10^{-6} \left[\frac{S}{km} \right]$$

U odnosu na kapacitivnost voda sa jednim provodnikom po fazi:

$$\Delta c_2 = \frac{c_2 - c_1}{c_1} \cdot 100 = \frac{11 - 8,34}{8,34} \cdot 100 = 31,9\%$$

$$\Delta c_3 = \frac{c_3 - c_1}{c_1} \cdot 100 = 47,5\%$$

$$\Delta c_4 = \frac{c_4 - c_1}{c_1} \cdot 100 = 60,3\%$$

Sa povećanjem broja provodnika po fazi $\nearrow n$ $\nearrow c$

(jer $\nearrow r_{esc}$ $\searrow \ln \frac{const}{r_{esc}}$ $\searrow c = \frac{const}{\ln}$)

ovo je suprotno u odnosu na induktivnost

Interesantno je izračunati karakterističnu impedansu:

$$Z = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

$$Z_{c1} = \sqrt{\frac{l_1}{c_1}} = \sqrt{\frac{13,83 \cdot 10^{-4}}{8,34 \cdot 10^{-9}}} = 407,2\Omega$$

$$Z_{c2} = \sqrt{\frac{l_2}{c_2}} = \sqrt{\frac{10,54 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 10^{-9}}} = 309,5\Omega$$

$$Z_{c3} = \sqrt{\frac{l_3}{c_3}} = \sqrt{\frac{9,45 \cdot 10^{-4}}{12,3 \cdot 10^{-9}}} = 277,2\Omega$$

$$Z_{c4} = \sqrt{\frac{l_4}{c_4}} = \sqrt{\frac{8,73 \cdot 10^{-4}}{13,37 \cdot 10^{-9}}} = 255,5\Omega$$

Vidi se da kada $\frac{n}{Z_c}$ tj, prirodna snaga voda P_{nat} što je logično:

$$P_{nat} = \frac{U_m^2}{Z_c}$$

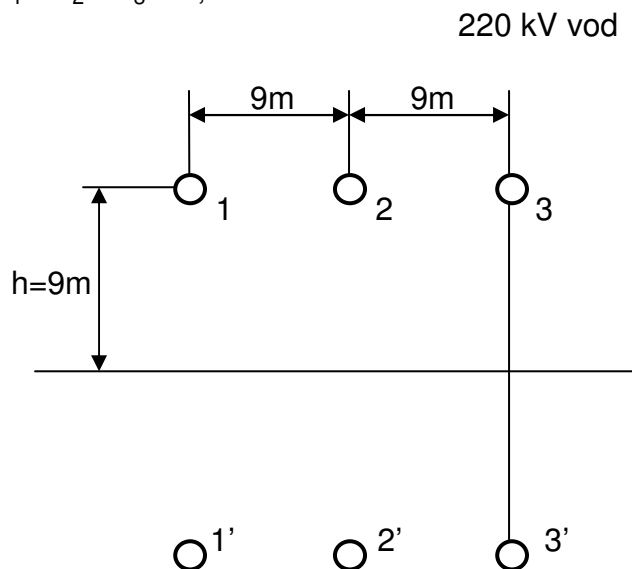
16.

a) Trofazni vazdušni vod nominalnog napona $U_n = 220$ kV, čiji je maksimalni radni napon $U_{mr} = 245$ kV, izveden je provodnikom AlČ 360/57 mm². Prečnik provodnika je $2r=d=26,6$ mm. Fazni provodnici leže u jednoj ravni na srednjoj visini $h=9$ m od zemlje. Rastojanje između provodnika je 9m. Izračunati gubitke pri raznim radnim naponima.

b) Isti proračun izvršiti i za trofazni vod nominalnog napona $U_n = 400$ kV, čiji je maksimalni radni napon $U_{mr} = 420$ kV, koji je izveden sa dva provodnika u snopu 2x AlČ 490/65 mm². Prečnik provodnika je $2r=d=31,7$ mm. Rastojanje provodnika u snopu je $D_s=400$ mm. Rastojanje između faznih provodnika je 12m. Oni leže u jednoj ravni na srednjoj visini $h=12$ m, od površine zemlje.

U oba slučaja usvojiti vrednost proizvoda koeficijenata stanja površine provodnika i vremenskih uslova:

$$m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 = 0,76$$



a) **Idealni kritični napon sa aspekta korone je (međufazni):**

$$U_{kr.id.} = \frac{36,54}{1 + \frac{r \cdot (n-1)}{R}} \cdot n \cdot r \cdot \ln \frac{D_{SGij} \cdot 2 \cdot h_{SG}}{r_{esc} \cdot D_{SGij'}} \quad (r \text{ je u cm})$$

n – broj provodnika u snopu

$$n=1$$

Iz uslova zadatka je:

$$h_{SG} = h_1 = h_2 = h_3 = 9\text{m} \quad (\text{ako ovo nije zadato, računa se iz:})$$

$$h_i = H_i - \frac{2}{3} f_{\max} \quad i = \overline{1,2,3}$$

$$h_{SG} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$$

Srednje geometrijsko rastojanje između provodnika:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{9 \cdot 9 \cdot 18} = 11,34\text{m}$$

Srednje geometrijsko rastojanje $D_{SGij'}$ je :

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}}$$

$$D_{12'} = D_{23'} = \sqrt[2]{D_{12}^2 + (2 \cdot h)^2} = \sqrt[2]{9^2 + 18^2} = 20,12\text{m}$$

$$D_{31'} = \sqrt{D_{31}^2 + (2 \cdot h)^2} = \sqrt{18^2 + 18^2} = 25,45\text{m}$$

pa je:

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{20,12 \cdot 20,12 \cdot 25,45} = 21,76\text{m}$$

Idealni kritični napon za $n=1$ je:

$$U_{kr.id.} = 36,54 \cdot r \cdot \ln \frac{D_{SGij} \cdot 2 \cdot h_{SG}}{r \cdot D_{SGij'}} = 36,54 \cdot 1,33 \cdot \ln \frac{1134 \cdot 2 \cdot 900}{1,33 \cdot 2176} = 318,7\text{kV}$$

Uvažavajući proizvod koeficijenata stanja površine provodnika i vremenskih uslova $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 = 0,76$

$$U_{kr} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot U_{kr.id} = 0,76 \cdot 318,7 = 242,2\text{kV}$$

Gubici usled korone:

$$P_{kor} = g_{kor} \cdot U^2 \quad (U^2 \text{ međufazni napon})$$

gde je:

$$g_{kor} = 62,5 \cdot \left(\frac{U}{U_{kr}} \right)^5 \left[\frac{\text{nS}}{\text{km}} \right] \quad \text{za } U < U_{kr} \quad (1)$$

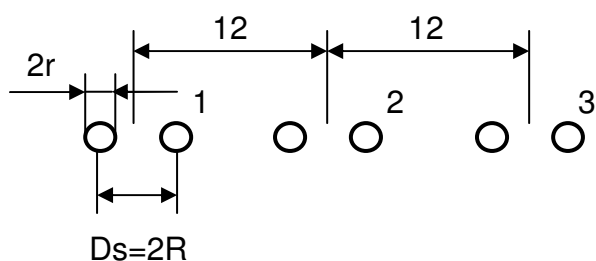
$$g_{kor} = 10^{-4} \cdot \left[1 - e^{-3,05 \cdot \left(\frac{U}{U_{kr}} - 1 \right)} \right] \left[\frac{\text{s}}{100\text{km}} \right] \quad \text{za } U > U_{kr} \quad (2)$$

Un [kV]	Ur [kV]	Ur/Ukr	g_{kor} [s/100km]	$P_{kor}(g_{kor} \cdot U_r^2)$ [MW/100km]
220	200	0,826	$2,40 \cdot 10^{-6}$	0,096
	215	0,888	$3,44 \cdot 10^{-6}$	0,159
	230	0,950	$4,83 \cdot 10^{-6}$	0,255
	240	0,991	$5,97 \cdot 10^{-6}$	0,344
	245	1,012	$3,46 \cdot 10^{-6}$	0,208

} (1)

} (2) drugi izraz

b) Trofazni vod 400kV sa dva provodnika u snopu



$$h_i = H_i - \frac{2}{3} f_{\max} \quad i = \overline{1,3}$$

$$h_{SG} = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$$

$$h_{SG} = h_1 = h_2 = h_3 = 12\text{m}$$

Iz geometrije:

$$D_{SG} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} = \sqrt[3]{12 \cdot 12 \cdot 24} = 15,12\text{m}$$

$$D_{12'} = D_{23'} = 26,83\text{m}$$

$$D_{31'} = 33,94\text{m} \Rightarrow$$

$$D_{SGij'} = \sqrt[3]{D_{12'} \cdot D_{23'} \cdot D_{31'}} = 29,02\text{m}$$

Ekvivalentni poluprečnik snopa:

$$r_{esc} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$$

$$n=2$$

$$r_{esc} = \sqrt{2 \cdot r \cdot R} = \sqrt{2 \cdot 15,85 \cdot \frac{400}{2}} = 79,6\text{mm}$$

Idealni kritični napon pri lepom vremenu:

$$U_{kr.id.} = \frac{36,54}{1 + \frac{r \cdot (n-1)}{R}} \cdot n \cdot r \cdot \ln \frac{D_{SGij} \cdot 2 \cdot h_{SG}}{r_{esc} \cdot D_{SGij'}} \quad (r \text{ je u cm})$$

$$U_{kr.id.} = \frac{36,54}{1 + \frac{r}{R}} \cdot 2 \cdot r \cdot \ln \frac{D_{SGij} \cdot 2 \cdot h_{SG}}{r_{esc} \cdot D_{SGij'}}$$

$$U_{kr.id.} = \frac{36,54}{1 + \frac{1,585}{20}} \cdot 2 \cdot 1,585 \cdot \ln \frac{1512 \cdot 2 \cdot 1200}{7,95 \cdot 2902} = 542,7 \text{ kV}$$

Uvažavajući proizvod koeficijenata stanja površine provodnika i vremenskih uslova

$$m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 = 0,76$$

$$U_{kr} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot U_{kr.id} = 0,76 \cdot 542,7 = 412,5 \text{ kV}$$

pa su gubici usled korone:

Un [kV]	Ur [kV]	Ur/Ukr	g _{kor} [s/100km]	P _{kor} (g _{kor} ·Ur ²) [MW/100km]	
400	385	0,933	4,43 · 10 ⁻⁶	0,656	} (1)
	400	0,970	5,36 · 10 ⁻⁶	0,857	
	410	0,994	6,06 · 10 ⁻⁶	1,019	} (2)
	415	1,006	1,83 · 10 ⁻⁶	0,315	
	420	1,018	5,39 · 10 ⁻⁶	0,952	

17. Nadzemni vod nominalnog napona 220kV i dužine $L=400\text{km}$ ima sledeće podužne parametre:

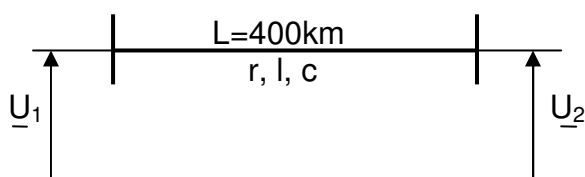
$$r = 0,08 \text{ [} \Omega/\text{km}, f \text{]}$$

$$x = 0,42 \text{ [} \Omega/\text{km}, f \text{]}$$

$$c = 8,44 \cdot 10^{-9} \text{ [F/km}, f \text{]}$$

Izračunati parametre ekvivalentne Π – šeme voda koristeći Ridenbergove sačinioce popravke

Rešenje:



Susceptansa, podužna, fazna:

$$b = \omega \cdot c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot c = 314 \cdot c = 314 \cdot 8,44 \cdot 10^{-9} = 2,65 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{S}}{\text{km}, f} \right]$$

Proizvodi dužine voda i pogonskih parametara:

$$R_L = r \cdot L = 0,08 \cdot 400 = 32\Omega$$

$$X_L = x \cdot L = 0,42 \cdot 400 = 168\Omega$$

$$B_L = b \cdot L = 2,65 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 1,06 \cdot 10^{-3}\Omega$$

Ridenbergovi sačinioći popravke:

$$k_R = 1 - \frac{1}{3} \cdot X_L \cdot B_L = 1 - \frac{1}{3} \cdot 168 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} = 0,9406$$

$$k_X = 1 - \frac{1}{6} \cdot X_L \cdot B_L \cdot \left(1 - \frac{R_L^2}{X_L^2} \right) = 1 - \frac{1}{6} \cdot 168 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{32^2}{168^2} \right) \Rightarrow$$

$$k_X = 0,9714$$

$$k_B = 1 + \frac{1}{12} \cdot X_L \cdot B_L = 1 + \frac{1}{12} \cdot 168 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} = 1,0148$$

Parametri ekvivalentne Π šeme su:

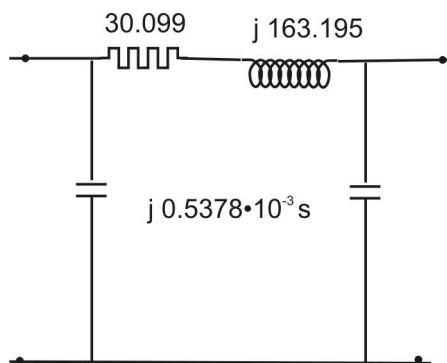
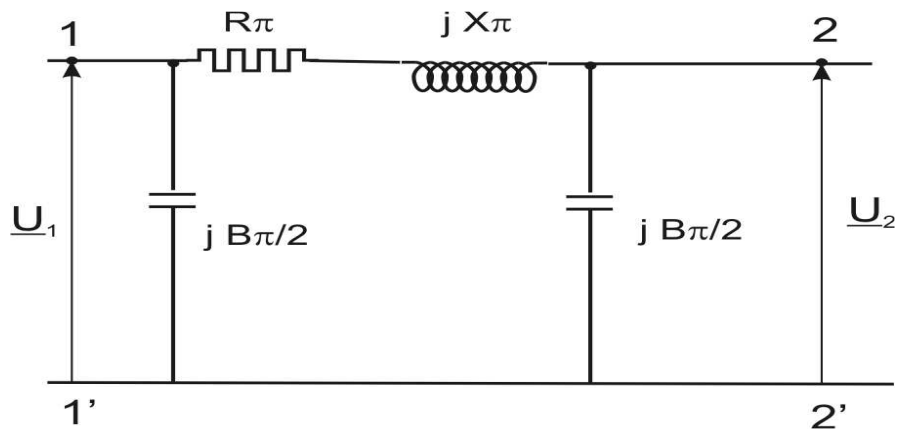
$$R_{\Pi} = k_R \cdot R_L = 0,9406 \cdot 32 = 30,099 \Omega/f$$

$$X_{\Pi} = k_X \cdot X_L = 0,9714 \cdot 168 = 163,195 \Omega/f$$

$$\boxed{B_{\Pi} = k_B \cdot B_L} = 1,0148 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} = 1,0757 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

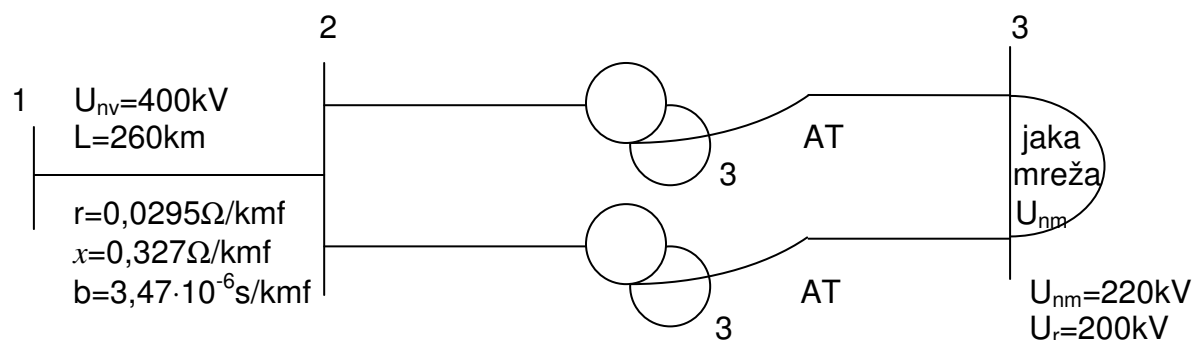
$$\frac{B_{\Pi}}{2} = 0,5378 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Ekvivalentna šema je:



18. Za deo elektroenergetskog sistema prikazanog na slici izračunati parametre zamenjenih šema voda i transformatora (svedene na 400 kV stranu), kao i svedeni radni napon 220 kV jake mreže U_{rsv} .

Tercijer autotransformatora se koristi samo kao produžni namotaj.



$$S_{nAT1,2} = 400 \text{ MVA}$$

$$m_{AT} = 400/231/36,75 \text{ kV/kV/kV}$$

$$x_{12}\% = 12\% \quad P_{cunAT} = 727 \text{ kW}$$

$$x_{23}\% = 14\% \quad P_{FenAT} = 148 \text{ kW}$$

$$x_{13}\% = 17,5\% \quad I_0\%_{AT} = 0,15\% I_{nAT}$$

Rešenje:

Vod je duži od 200km pa se moraju računati parametri Π zamenske šeme koristeći Ridenbergove skalarne popravke.

$$R_L = r \cdot L = 0,0295 \cdot 260 = 7,67 \Omega$$

$$X_L = x \cdot L = 0,327 \cdot 260 = 85,02 \Omega$$

$$B_L = b \cdot L = 3,47 \cdot 10^{-6} \cdot 260 = 0,9022 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Koeficijenti popravke su:

$$k_R = 1 - \frac{1}{3} \cdot X_L \cdot B_L = 1 - \frac{1}{3} \cdot 85,02 \cdot 0,9022 \cdot 10^{-3} = 0,974$$

$$k_X = 1 - \frac{1}{6} \cdot X_L \cdot B_L \cdot \left(1 - \frac{R_L^2}{X_L^2} \right) = 1 - \frac{1}{6} \cdot 85,02 \cdot 0,9022 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{7,67^2}{85,02^2} \right) \Rightarrow$$

$$k_X = 0,987$$

$$k_B = 1 + \frac{1}{12} \cdot X_L \cdot B_L = 1 + \frac{1}{12} \cdot 85,02 \cdot 0,9022 \cdot 10^{-3} = 1,0064$$

Parametri ekvivalentne Π šeme su:

$$R_{\Pi} = k_R \cdot R_L = 0,974 \cdot 7,67 = 7,47 \Omega$$

$$X_{\Pi} = k_X \cdot X_L = 0,987 \cdot 85,02 = 83,91 \, \Omega$$

$$B_{\Pi} = k_B \cdot B_L = 1,0064 \cdot 0,9022 \cdot 10^{-3} = 0,908 \cdot 10^{-3} \, s$$

$$\frac{B_{\Pi}}{2} = 0,454 \cdot 10^{-3} \, s$$

Najlakše je sve svesti na 400kV stranu, jer se tada samo U_r svodi preko prenosnog odnosa AT

Tercijer se ne koristi kao energetski, već samo kao prigušni namotaj (pregnut u trougao) pa se ne prikazuje u namenskoj šemi!

Parametri transformatora svedeni na 400kV stranu:

$$\begin{array}{l} \text{[%]} \quad \text{[kV]} \\ \boxed{X_{12AT} \frac{x_{12}}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn^2}} = \frac{12}{100} \cdot \frac{400^2}{400} = 48 [\Omega] \quad \begin{array}{l} \text{kV}=10^3 \quad (10^3)^2=10^6 \\ \text{MVA}=10^6 \end{array} \\ \text{[MVA]} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{[kW]} \quad \text{[kV]} \\ \boxed{R_{AT} = P_{cun} \cdot \frac{Un^2}{Sn^2}} = 0,727 \cdot \frac{400^2}{400} = 0,727 [\Omega] \quad \begin{array}{l} \text{MW}=10^6 \quad (10^3)^2 \\ \text{MVA}=(10^6)^2 \end{array} \\ \text{[MVA]} \end{array}$$

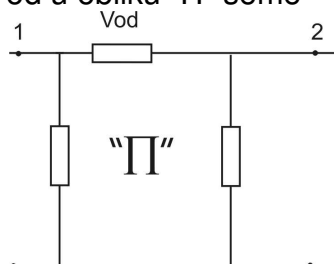
$$Y_{tAT} = G_{AT} + j \cdot B_{AT} = \frac{1}{R_{Fe}} - j \cdot \frac{1}{x_{\mu}} \Rightarrow \boxed{B_{AT} = -\frac{1}{x_{\mu}}}$$

$$\boxed{G_{AT} = \frac{P_{Fe}}{Un^2}} = \frac{0,148}{400^2} = 0,925 \cdot 10^{-6} s \quad \begin{array}{l} \text{MW}=10^6 \\ \text{kV}=(10^3)^2=10^6 \end{array}$$

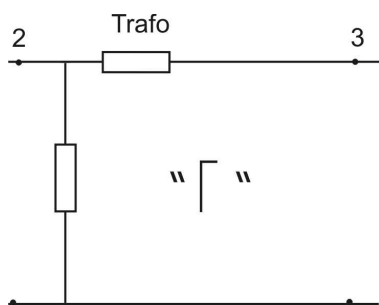
$$\boxed{B_{AT} = -\frac{I_0 \%}{100} \cdot \frac{Sn}{Un^2}} = -\frac{0,15}{100} \cdot \frac{400}{400^2} = 3,75 \cdot 10^{-6} s$$

b) Kako dobiti najjednostavniju šemu:

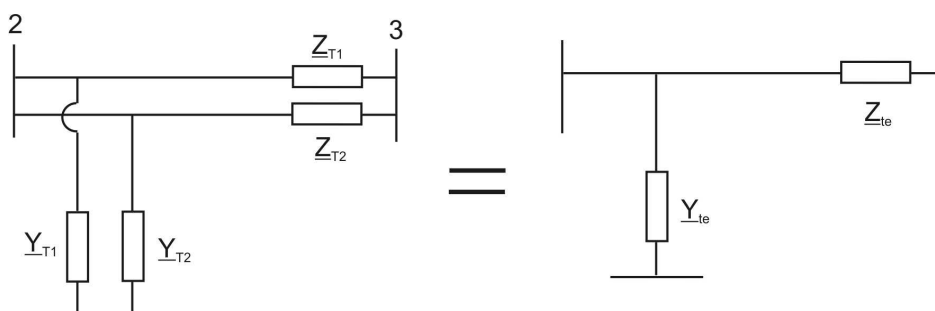
- Vod u obliku "Π" šeme



- Transformator najbolje u obliku "Γ" šeme (nema nepotrebnih novih čvorova)



c) Šta raditi sa paralelnom vezom dva transformatora:



$$X_{12e} = \frac{1}{2} \cdot X_{12AT} = \frac{1}{2} \cdot 48 = 24 \Omega$$

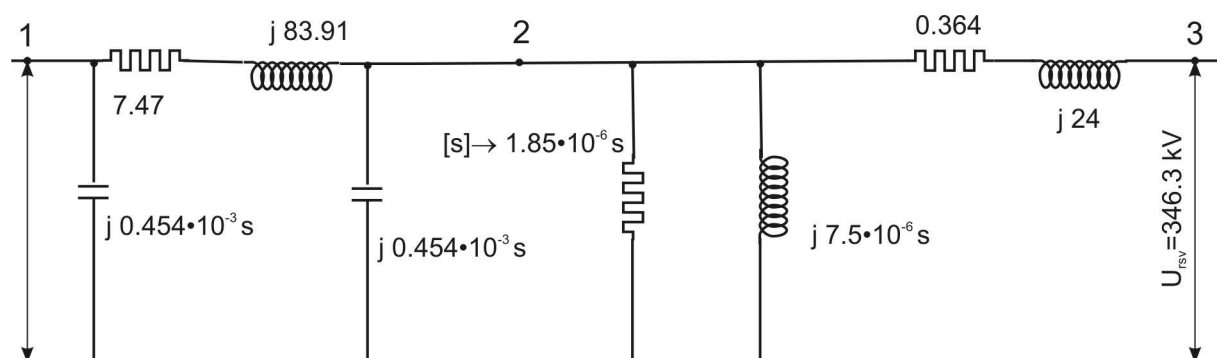
$$R_{ATe} = \frac{1}{2} \cdot R_{AT} = \frac{1}{2} \cdot 0,727 = 0,364 \Omega$$

$$B_{ATe} = 2 \cdot B_{AT} = 2 \cdot (-3,75 \cdot 10^{-6}) = -7,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$G_{ATe} = 2 \cdot G_{AT} = 2 \cdot 0,925 \cdot 10^{-6} = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

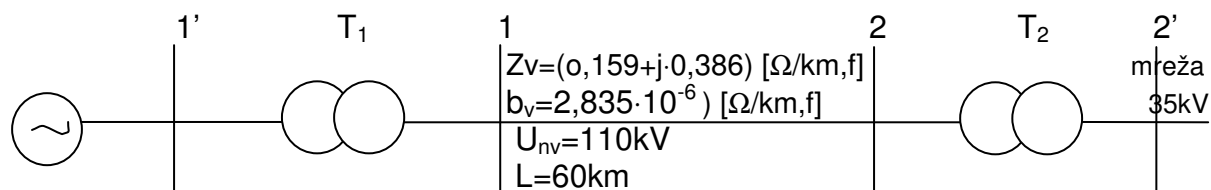
Svedeni na 220 kV napon jake mreže na 400 kV stranu:

$$U_{rsV} = U_r \cdot m_{AT} = 200 \cdot \frac{400}{231} = 346,3 \text{ kV}$$



19. Za deo elektroenergetskog sistema prikazanog na slici izračunati parametre zamenske šeme. Generator u razmatranom režimu daje u mrežu $P_G=50,5$ MW i $Q_G=31,8$ MVA, a napon na krajevima generatora je $U_G=11$ kV. Svi regulatori na transformatorima su u srednjim položajima. Napon u tački 2' je $U_2'=35,3$ kV. Zadatak: uraditi na sledeća dva načina:

- svođenjem na 110kV način,
- svođenjem na 35kV stranu



$$S_{ng}=70\text{MVA}$$

$$x_d\%=170[\%]$$

$$U_{nG}=10,5\text{kV}$$

$$S_{nT1}=65\text{MVA}$$

$$m_{T1} = \frac{10,5}{121 \pm 5\%} \text{ kV}$$

$$I_0[\%]=3\% \cdot I_{nT1}$$

$$X_{T1}[\%]=10[\%]$$

$$\Delta P_{cun1}=0,6\% \cdot S_{nT1}$$

$$\Delta P_{Fen1}=0,23\% \cdot S_{nT1}$$

$$S_{nT2}=50\text{MVA} \quad U_2'=35,3\text{kV}$$

$$m_{T2} = \frac{110 \pm n \cdot 2,5\%}{36,75} \text{ kV}$$

$$I_0[\%]=3\% \cdot I_{nT2}$$

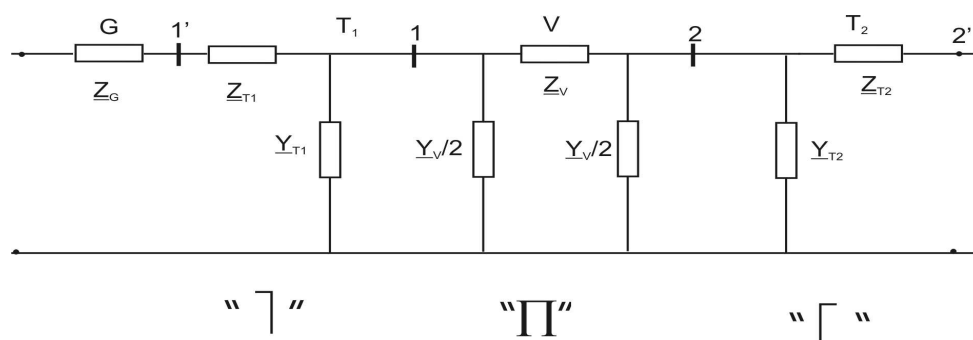
$$X_{T2}[\%]=10[\%]$$

$$\Delta P_{cun2}=0,6\% \cdot S_{nT2}$$

$$\Delta P_{Fen2}=0,23\% \cdot S_{nT2}$$

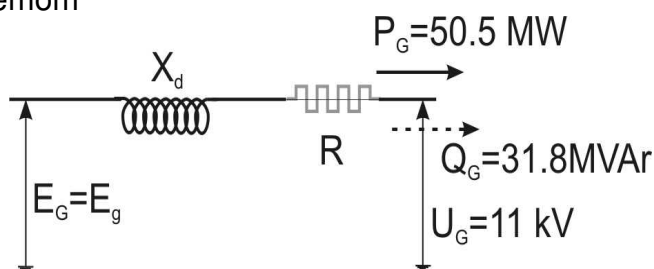
Rešenje:

Najjednostavnija ekvivalentna šema:



GENERATOR

U stacionarnom režimu rada generator se predstavlja sledećom ekvivalentnom šemom



$$R_G \approx 0$$

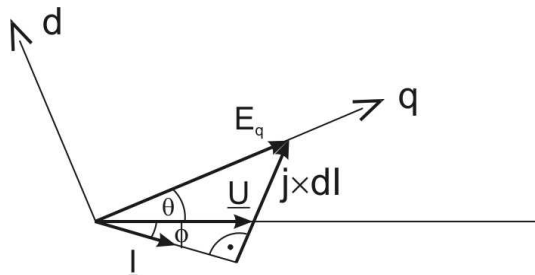
E_q - specifična vrednost elektromotorne sile koja potiče od pobude struje

d - direktna osa rotora (određuje je vektor indukcije pobudnog namotaja)

X_d - sinhrona reaktansa

q - poprečna osa rotora (zaostaje 90° iza ose d)

Vektorski dijagram



$$\underline{E}_q = U_G + j \cdot X_d \cdot I$$

Formula za pad napona:

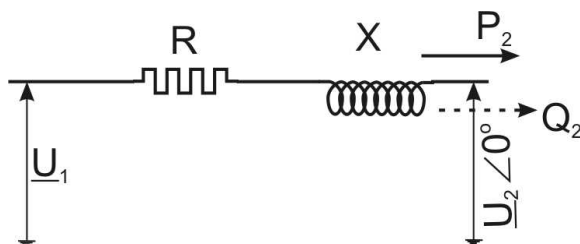
$$\underline{U}_1 = U_2 + \Delta U_2 + j \cdot \delta \cdot U_2$$

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X}{U_2} + j \cdot \frac{P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R}{U_2}$$

podužna poprečna

ΔU_2 – podužna komponenta pada napona

δU_2 – poprečna komponenta pada napona



$$P_2 = P_G = 50,5 \text{ MW} \quad R = 0 \quad U_2 = U_G = 11 \text{ kV} \quad \underline{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$$

$$Q_2 = Q_G = 31,8 \text{ Mvar} \quad X = X_d \quad U_1 = E_q$$

$$X_d = \frac{x_d [\%]}{100} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_n} = \frac{170}{100} \cdot \frac{10,5^2}{70} = 2,68 [\Omega]$$

$$E_q = 11 + \frac{31,8 \cdot 2,68}{11} + j \cdot \frac{50,5 \cdot 2,68}{11} = 11 + 7,75 + j \cdot 12,3 = 18,75 + j12,3 [\text{kV}]$$

$$|E_q| = \sqrt{18,75^2 + 12,3^2} = 22,42 [\text{kV}]$$

Prenosni odnosi:

$$m_{T1} = \frac{10,5}{121} = 0,08678$$

$$m_{T2} = \frac{110}{36,75} = 2,993$$

a) Svođenje na 110kV napnski nivo:

Vod: Kraći je od 200km, pa ne treba Rid. koeficijent popravke

$$\underline{Z}_v = \underline{Z}_v \cdot L = (0,156 + j \cdot 0,386) \cdot 60 = (9,36 + j \cdot 23,16) \Omega$$

$$B_v = b_v \cdot L = 2,835 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 170,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$\frac{B_v}{2} = 0,85 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Transformator T1:

$$X_{T1} \frac{x_{T1} [\%]}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T1}^2} = \frac{10}{100} \cdot \frac{121^2}{65} = 22,52 [\Omega]$$

$$R_{T1} = P_{cun1} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T1}^2} = \frac{0,6 \cdot Sn_{T1}}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T1}^2} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T1}} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{121^2}{65} = 1,35 [\Omega]$$

$$G_{T1} = \frac{P_{Fen1}}{Un^2} = \frac{0,23}{100} \cdot \frac{Sn_{T1}}{Un^2} = \frac{0,23}{100} \cdot \frac{65}{121^2} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$B_{T1} = -\frac{I_0 [\%]}{100} \cdot \frac{Sn_{T1}}{Un^2} = -\frac{3}{100} \cdot \frac{65}{121^2} = -1,33 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Transformator T2:

$$X_{T2} \frac{x_{T2} [\%]}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T2}^2} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{50} = 24,2 [\Omega]$$

$$R_{T2} = P_{cun2} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T2}^2} = \frac{0,6 \cdot Sn_{T2}}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T2}^2} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{Un^2}{Sn_{T2}} = \frac{0,6}{100} \cdot \frac{110^2}{50} = 1,452 [\Omega]$$

$$G_{T2} = \frac{P_{Fen2}}{U_n^2} = \frac{0,23}{100} \cdot \frac{S_{nT2}}{U_n^2} = \frac{0,23}{100} \cdot \frac{50}{110^2} = 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$B_{T2} = -\frac{I_0[\%]}{100} \cdot \frac{S_{nT2}}{U_n^2} = -\frac{3}{100} \cdot \frac{50}{110^2} = -1,24 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Generator:

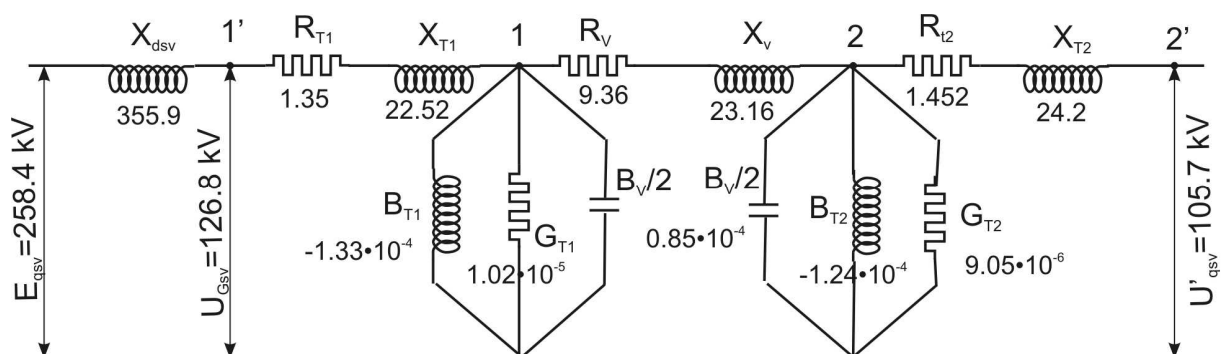
$$U_{GSV} = \frac{1}{m_{T1}} \cdot U_G = \frac{1}{10,5} \cdot 11 = 126,8 \text{ kV}$$

$$X_{dSV} = \left(\frac{1}{m_{T1}^2} \right) \cdot X_d = \left(\frac{1}{10,5^2} \right) \cdot 2,68 = 355,9 \Omega$$

$$E_{qSV} = \frac{1}{m_{T1}} \cdot E_q = \frac{1}{10,5} \cdot 22,42 = 258,4 \text{ kV}$$

Mreža:

$$U_{2sv} = m_{T2} \cdot U_2 = \frac{110}{36,75} \cdot 35,3 = 105,7 \text{ kV}$$



b) Zamenska šema je ista samo su druge brojne vrednosti!

20. Potrošačko područje napajano iz TF 110/35 kV pri naponu $U_n=36$ kV i učestanosti $f=50$ Hz povlači iz mreže $P_p=20$ MW i $Q_p=10$ Mvar. Odrediti koliku će snagu isti potrošači uzimati iz mreže u sledećim situacijama:

a) ako usled poremećaja u sistemu učestanost ostane $f_1=50$ Hz a napon padne na $U_1=34$ kV

b) ako usled poremećaja napon padne na $U_2=34$ kV i učestanost na $f_2=49,9$ Hz

Poznati su koeficijenti samoregulacije potrošača:

$k_{pu}=1,5$ $k_{qu}=1$ $k_{pf}=0,9$ $k_{qf}=0$

Rešenje:

k_{pu} – koeficijent statičke k.ke aktivne snage po naponu

koeficijent (konstanta) samoregulacije aktivne snage potrošača po naponu

$$k_{pu} = \frac{\Delta P_p / P_p}{\Delta U / U}$$

$$\Delta P_p = k_{pu} \cdot \frac{\Delta U}{U} \cdot P_p$$