

Zadatak 1

Dio 1

Za otočni elektroenergetski sustav plinske elektrane (G), hidroelektrane (H) i parne termoelektrane (T) sa slike 1 potrebno je dizajnirati sustav primarne regulacije frekvencije s obzirom na sljedeće zahtjeve:

- sve elektrane ravnomjerno sudjeluju u regulaciji frekvencije i pri najgorem poremećaju odstupanje frekvencije u ustaljenom stanju mora biti $\Delta f_{\infty} < \pm 200$ mHz;
- parna termoelektrana pokriva bazno opterećenje i radi na 100% maksimalne snage, regulacijska energija se dijeli između plinske elektrane i hidroelektrane u omjeru 1:2 tako da pri najgorem poremećaju odstupanje frekvencije u ustaljenom stanju mora biti $\Delta f_{\infty} < \pm 200$ mHz;

Ovaj otočni sustav povezan je HVDC interkonekcijskim vodom s puno većim sustavom iz kojeg uvozi energiju koju ne može namiriti lokalnom proizvodnjom. Parametri otočnog sustava su: konstanta tromosti iznosi 5 s, nema regulacijske energije potrošača, a najgori poremećaj je ispad interkonekcijskog voda kojim otočni sustav gubi 0.2 p.u. uvezene snage.

Dio 2

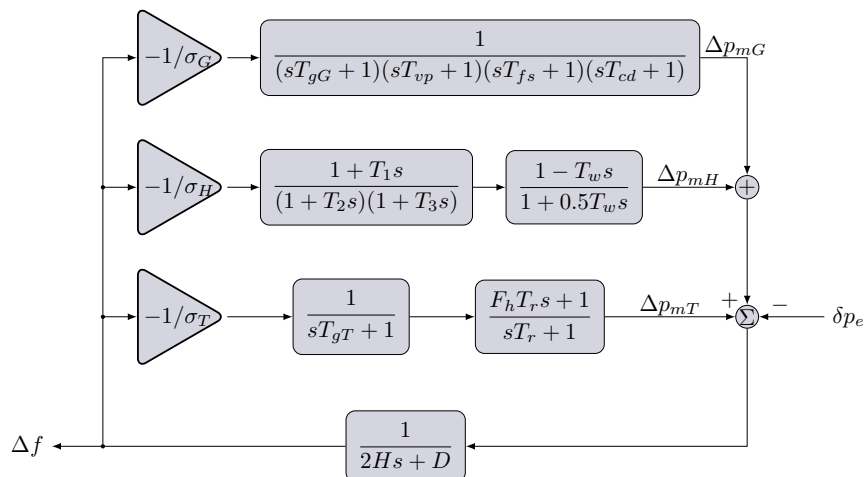
Konstanta tromosti otočnog sustava iz prvog dijela zadatka može se aproksimirati izrazom:

$$H = \alpha_G H_G + \alpha_H H_H + \alpha_T H_T,$$

gdje su: α_G , α_H i α_T udjeli sinkroniziranih plinskih elektrana, hidroelektrana, odnosno termoelektrana; $H_G = 2$ s, $H_H = 3$ s i $H_T = 6$ s su ukupne konstante tromosti pojedinih tipova elektrana. Ako otočni sustav radi s 50% termoelektrana, 25% hidroelektrana i 25% plinskih elektrana, potrebno je izračunati:

- koliko smije iznositi maksimalni udio vjetroelektrana u ovom sustavu ako one zamjenjuju termoelektrane i ako je uvjet da se maksimalni početni RoCoF ograniči ispod 1 Hz/s za najgori poremećaj? Vjetroelektrane ne doprinose konstanti tromosti.
- Za udio vjetroelektrana iz podzadatka a) i 75% najgoreg poremećaja, nakon koliko vremena nastupa prvi stupanj podfrekvencijskog rasterećenja ako je on podešen na 49.2 Hz? Pretpostavite da su turbinski regulatori dovoljno spori i da reagiraju tek nakon nekoliko sekundi.

(12 bodova)



Slika 1: Model EES-a s plinskom termoelektranom (G), hidroelektranom (H) i parnom termoelektranom (T)

Zadatak 2

Nacrtajte blok dijagram dinamičkog sustava opisanog jednadžbama (1)–(3), gdje su T , K , P_m , E' , U , X , T_t , R , P^* i D_1 , D_2 konstante, a P_m , δ i ω varijable stanja.

$$\frac{1}{K} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1) \quad (1)$$

$$T\omega \frac{d\omega}{dt} + (D_1 + D_2)(\omega - 1) = P_m - \frac{E'U}{X} \sin \delta \quad (2)$$

$$T_t \frac{dP_m}{dt} + P_m = P^* - \frac{1}{R}(\omega - 1) \quad (3)$$

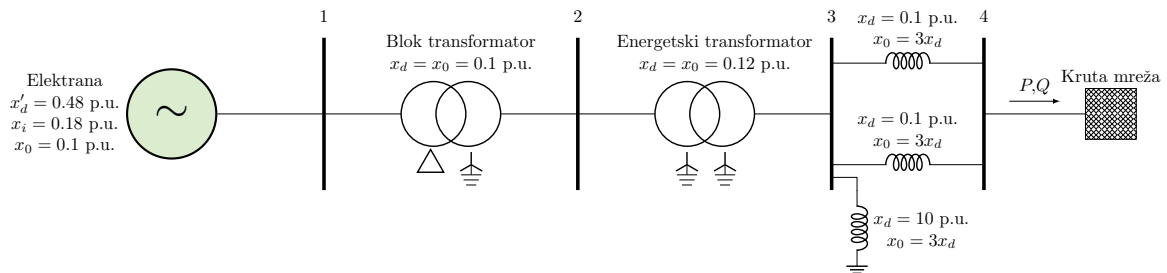
(3 boda)

Zadatak 3

Neka elektrana spojena je na krutu mrežu preko blok-transformatora, energetskog transformatora i dvostrukog dalekovoda prema slici 2. U čvorištu 3 ugrađena je prigušnica koja regulira napon u čvorištu 3. Agregat u nadzbuđenom režimu rada u mrežu predaje snagu $P = 0.9$ p.u. pri $\cos \varphi = 0.95$. Napon krute mreže iznosi $1\angle 0^\circ$ p.u. Na početku jednog od dva paralelna voda nastaje dvopolni kratki spoj sa zemljom. Potrebno je 1) odrediti kritični kut uklanjanja kvara i 2) nacrtati nadomjesnu shemu sustava sa slike 2 te odrediti izraz i skicirati krivulje za prijenos električne snage između elektrane i krute mreže za slučajeve:

- prije nastanka kratkog spoja;
- tijekom kratkog spoja;
- nakon isključenja voda u kvaru.

(18 bodova)



Slika 2: Spoj elektrane s krutom mrežom

Zadatak 4

Isprojektirajte kondenzatorsku bateriju kojom se želi kompenzirati jalova snaga trofaznog asinkronog motora pri nazivnom naponu tako da motor radi s $\cos \varphi = 0.95$ ind. prema mreži. Parametri motora su: $U_n = 10$ kV, $f_n = 50$ Hz, $S_n = 10$ MVA, $\cos \varphi_n = 0.7$. Potrebno je odrediti:

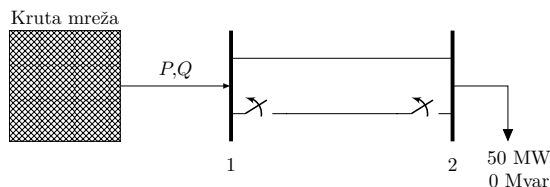
- kapacitet kondenzatorske baterije po fazi ako je kondenzatorska baterija spojena u spoj zvijezda;
- kapacitet kondenzatorske baterije po fazi ako je kondenzatorska baterija spojena u spoj trokut;
- promjenu snage kondenzatorske baterije za slučajeve a) i b) ako se napon mreže smanji za 5%.

(6 bodova)

Zadatak 5

U slabo opterećenim visokonaponskim mrežama regulacija napona može se vršiti isključivanjem dalekovoda. Za koliko se promjeni napon sabirnice 2 ako se isključi jedan dalekovod (Slika 3)? Pri oba dalekovoda uključena, kruta mreža u dvostruki dalekovod injektira $P = 50.4$ MW i apsorbira $Q = 63.5$ Mvar. Ako se jedan dalekovod isključi, kruta mreža u dalekovod injektira $P = 50.6$ MW i apsorbira $Q = 27.8$ Mvar. Napon krute mreže iznosi 220 kV. Parametri voda su sljedeći: $R = 0.05 \Omega/\text{km}$, $L = 1.553 \text{ mH}/\text{km}$, $C = 10.73 \text{ nF}/\text{km}$. Parametri su izraženi po fazi za jedan dalekovod. Napon krute mreže iznosi 220 kV. Duljina dalekovoda je 200 km. Frekvencija sustava je 50 Hz.

(6 bodova)



Slika 3: Prijenos snage preko dalekovoda

Zadatak 6

Obrazložite kako bi estimirali konstantu tromosti EES-a u kojem su konstrukcijski podaci o elektranama nepoznati. Na raspolaganju su vam sva mjerenja iz dispečerskog centra.

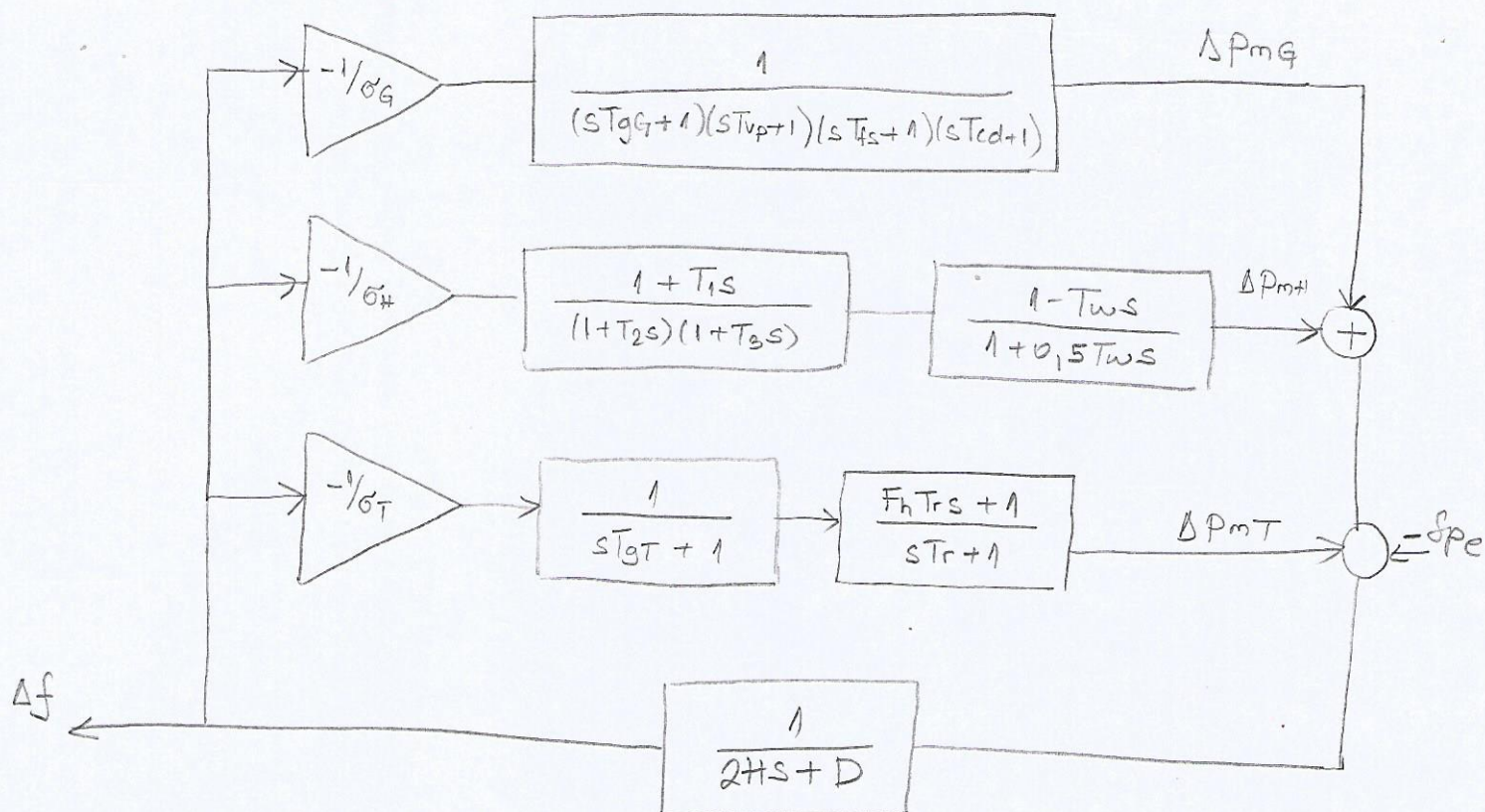
(2 boda)

Zadatak 7

Skicirajte i objasnite utjecaj konstante tromosti na a) maksimalno odstupanje frekvencije, b) brzinu promjene frekvencije, c) vrijednost frekvencije u stacionarnom stanju nakon poremećaja.

(3 boda)

1. ZADATAK



DIO 1

 G, H, T $H = 5s$ $D = 0$ $\delta_{pg} = -0,2$ $\Delta f_{\infty} < \pm 200 \text{ mHz}$

a) sve elektrane sudjeluju jednako

$$\Delta f_{\infty} < \pm 200 \text{ mHz} / : 50 \text{ Hz}$$

$$\Delta f_{\infty} < 0,004 \text{ p.u.}$$

$$\Delta f(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\frac{\delta_{pg}}{s}}{2Hs + D + \frac{1}{\sigma_T} G_T + \frac{1}{\sigma_H} G_H + \frac{1}{\sigma_G} G_G}$$

$$\Delta f(t \rightarrow \infty) = \frac{\delta_{pg}}{\frac{1}{\sigma_T} + \frac{1}{\sigma_H} + \frac{1}{\sigma_G}} = \frac{-0,2}{K_{UK}} < 0,004$$

$$K_{UK} > \frac{-0,2}{0,004} = 50 \text{ p.u.}$$

$$K_{UK} = K_G + K_H + K_T = 50$$

$$K_G = K_H = K_T = \frac{50}{3}$$

$$b) K_G : K_H = 1 : 2 \rightarrow K_G = \frac{K_H}{2}$$

$$\Delta f < 0,004 \text{ p.u.}$$

$$K_G + K_H = 50 \rightarrow \frac{1}{2} K_H + K_H = 50$$

$$K_H = \frac{100}{3} \quad K_G = \frac{50}{3}$$

D10 2

$$H = d_G H_G + d_H H_H + d_T H_T$$

$$H_G = 2s \quad d_G = 0,25$$

$$H_H = 3s \quad d_H = 0,25$$

$$H_T = 6s \quad d_T = 0,5$$

$$\frac{df}{dt} (t=0) = 1 \frac{Hz}{s} / = 50 Hz$$

$$\frac{df}{dt} (t=0) = 0,02 \frac{pu}{s}$$

$$a) \frac{df}{dt} (t=0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 \frac{\frac{P_m - P_e}{s}}{2Hs + D + \frac{1}{\sigma_T} G_T + \frac{1}{\sigma_H} G_H + \frac{1}{\sigma_G} G_G}$$

$$\frac{df}{dt} (t=0) = \frac{P_m - P_e}{2H} = 0,02$$

$$H = \frac{P_m - P_e}{2 \cdot 0,02} = \frac{0,2}{2 \cdot 0,02} = 5s$$

$$d_G H_G + d_H H_H + (d_T - d_v) H_T = 5$$

$$d_v = -0,125 \rightarrow \text{Nema rešenja}$$

2. ZADATOK

$$\frac{1}{K} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)$$

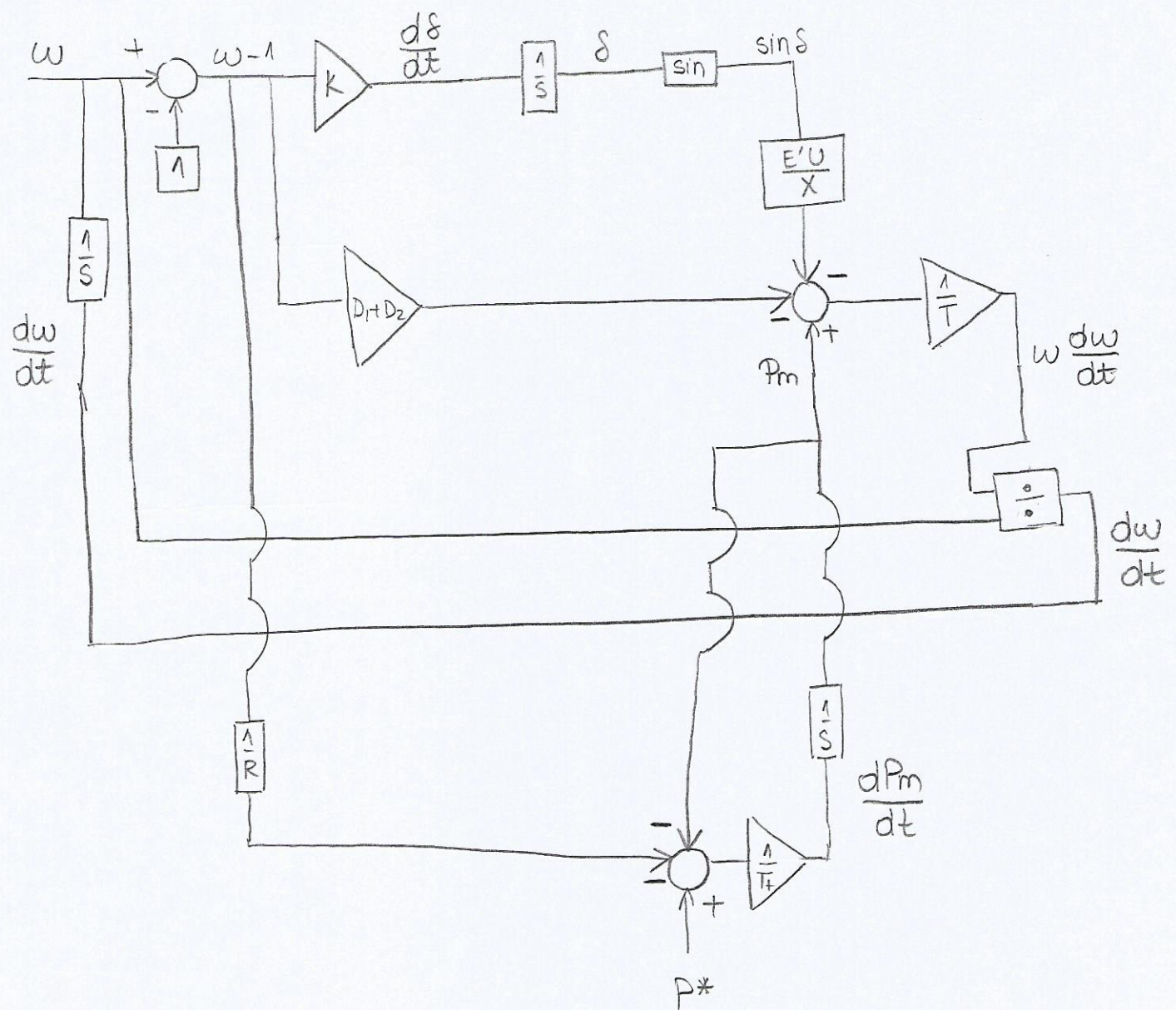
$$T_w \frac{d\omega}{dt} + (D_1 + D_2)(\omega - 1) = P_m - \frac{E'U}{X} \sin \delta$$

$$T_t \frac{dP_m}{dt} + P_m = P^* - \frac{1}{R} (\omega - 1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = K(\omega - 1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_w} \left[P_m - \frac{E'U}{X} \sin \delta - (D_1 + D_2)(\omega - 1) \right]$$

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_t} \left[P^* - \frac{1}{R} (\omega - 1) - P_m \right]$$



LJIR 2019./2020.

3. ZADATAK

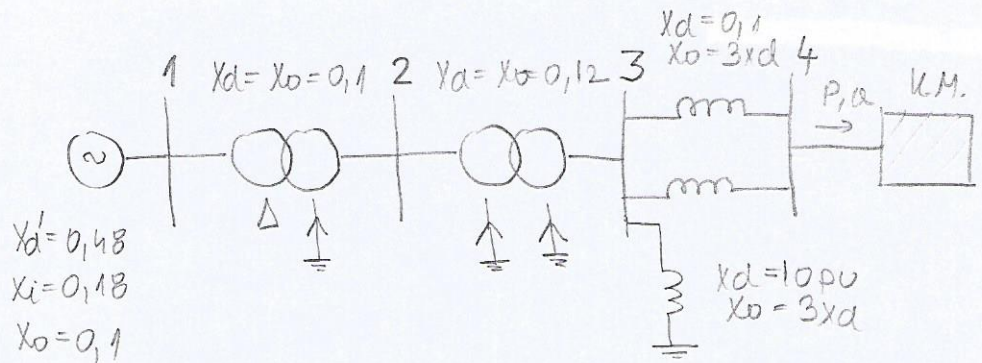
naduzbuđeni rež.r.

$$P = 0,9 \text{ p.u.}$$

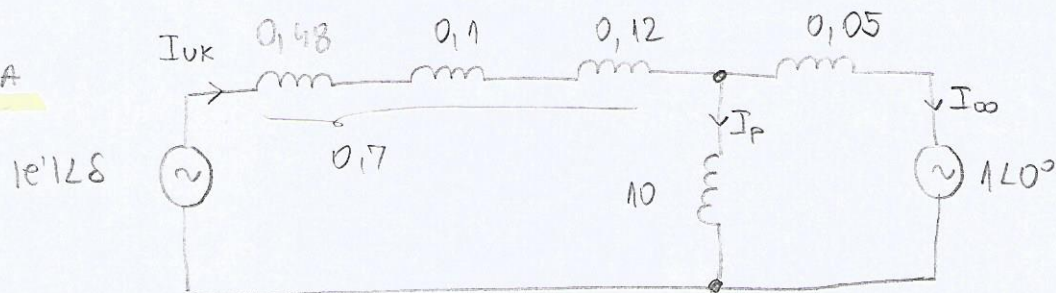
$$\cos \varphi = 0,95$$

$$U_{\infty} = 1 \angle 0^\circ$$

2PKSZ



PRIJE KVARA



$$X_d = 0,7 + 0,05 + \frac{0,7 \cdot 0,05}{10} = 0,7535$$

$$I_{\infty} = \left(\frac{S}{U_{\infty} \angle 0^\circ} \right)^* = \left(\frac{P + jP \tan \varphi_{\infty}}{1} \right)^* = P - jP \tan(\arccos 0,95) =$$

$$= 0,9 - j0,9 \cdot \tan(\arccos(0,95)) = 0,9 - j0,296 = 0,947 \angle -0,318$$

$$U_P = U_{\infty} + jI_{\infty} \cdot j0,05 = 1 + 0,947 \angle -0,318 \cdot 0,05 \angle \frac{\pi}{2} = 1,015 + j0,045 =$$

$$= 1,016 \angle 0,044$$

$$I_P = \frac{U_P}{jX_P} = \frac{1,016 \angle 0,044}{10 \angle \pi/2} = 0,1016 \angle -1,527 = -j0,1015$$

$$I_{uk} = I_P + I_{\infty} = -j0,1015 + 0,9 - j0,296 = 0,9 - j0,3975 = 0,984 \angle -0,416$$

$$|E'| \angle \delta = I_{uk} \cdot j0,7 + U_P = 0,984 \angle -0,416 \cdot 0,7 \angle \pi/2 + 1,015 + j0,045 =$$

$$= 0,278 + j0,63 + 1,015 + j0,045 = 1,293 + j0,675 =$$

$$= 1,458 \angle 0,481 \text{ rad}$$

$$|E'| = 1,458$$

$$\delta_0 = 0,481 \text{ rad}$$

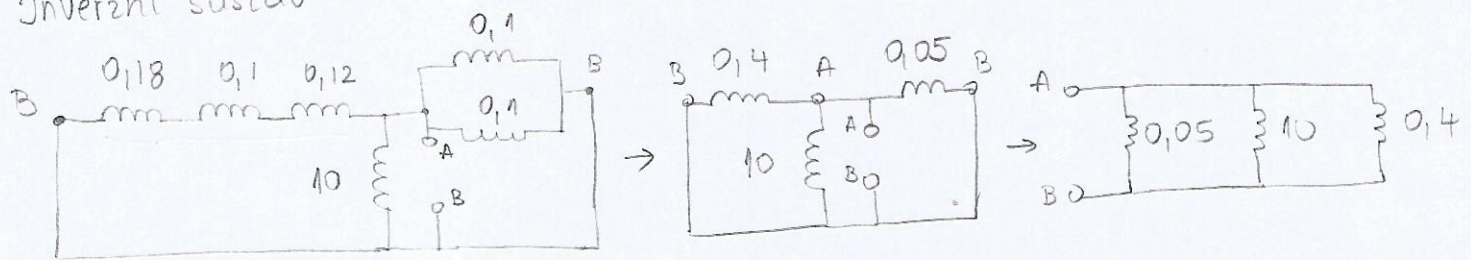
$$\varphi_m = 0,9$$

$$P_{ed} = \frac{1,458 \cdot 1}{0,7535} \sin \delta = 1,93 \sin \delta$$

ZA VRIJEME KVARA

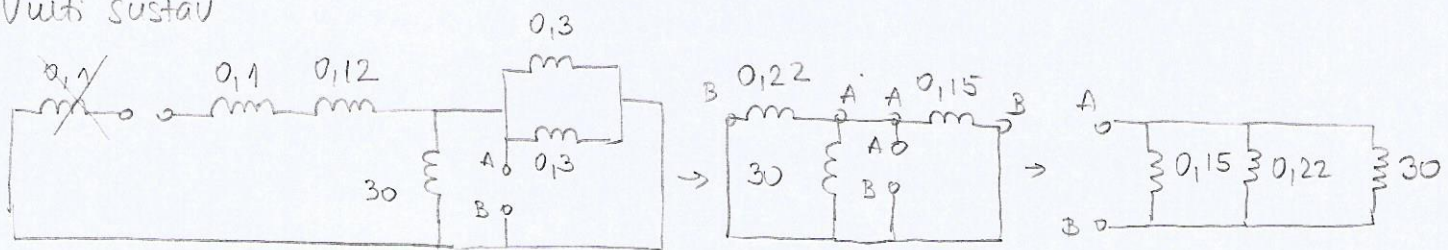
$$X_f = \frac{X_i X_o}{X_i + X_o}$$

Inverzni sustav



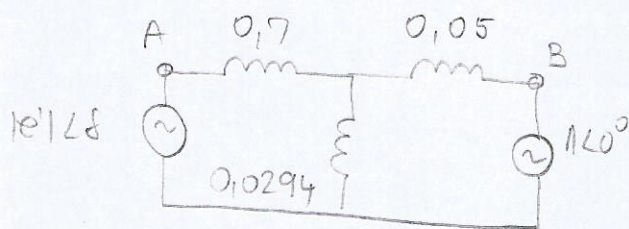
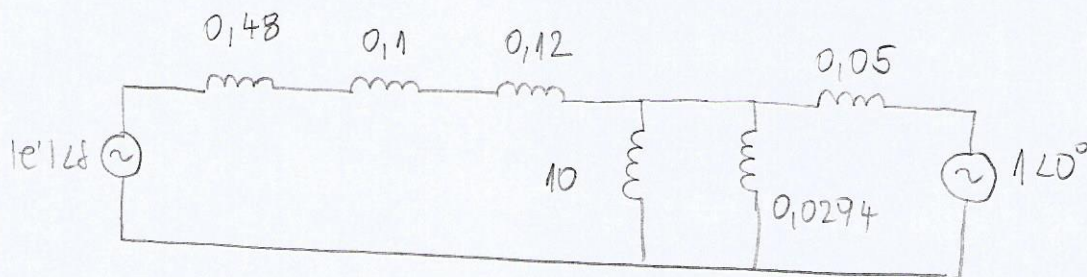
$$X_i = X_{AB}, \quad \frac{1}{X_{AB}} = \frac{1}{0.05} + \frac{1}{10} + \frac{1}{0.4} \rightarrow X_{AB} = 0.044$$

Multi sustav



$$X_o = X_{AB} = 0.0889$$

$$X_f = \frac{X_i X_o}{X_i + X_o} = \frac{0.044 \cdot 0.0889}{0.044 + 0.0889} = 0.0294$$

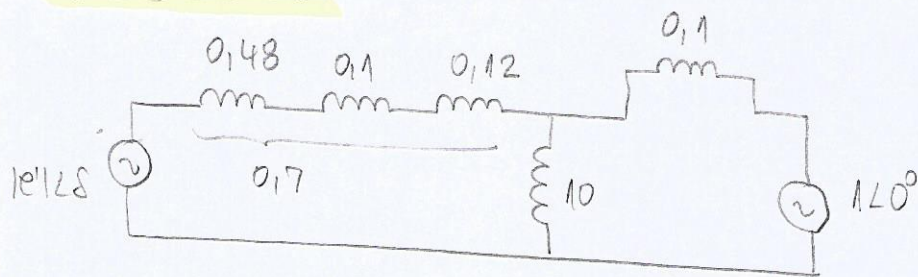


$\Delta \rightarrow \Delta$

$$X_{AB} = X_p = 0.7 + 0.05 + \frac{0.7 \cdot 0.05}{0.0294} = 1.94$$

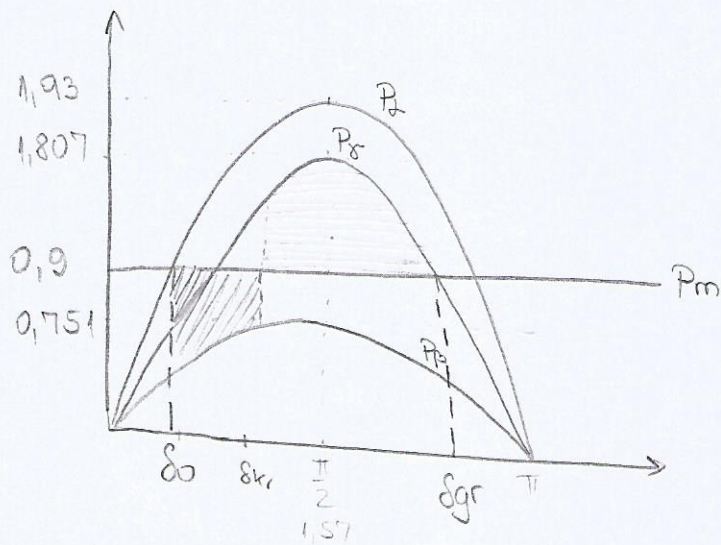
$$P_p = \frac{|e| |I| U \cos \phi}{Y_p} \sin \delta = \frac{1.458 \cdot 1}{1.94} \sin \delta = 0.751 \sin \delta$$

NAKON KVARA



$$X_{\Sigma} = 0,7 + 0,1 + \frac{0,7 \cdot 0,1}{10} = 0,807 \text{ p.u.}$$

$$P_{e\Sigma} = \frac{1e'11U_{001}}{X_{\Sigma}} \sin \delta = \frac{1,458 \cdot 1}{0,807} \sin \delta = 1,807 \sin \delta$$



$$P_{\delta} = 1,93 \sin \delta$$

$$P_{\beta} = 0,751 \sin \delta$$

$$P_{\Sigma} = 1,807 \sin \delta$$

$$P_m = 0,9$$

$$\delta_0 = 0,491$$

$$A_a = A_d$$

$$A_a = \int_{\delta_0}^{\delta_{kr}} (P_m - P_{\beta}) d\delta, \quad A_d = \int_{\delta_{kr}}^{\delta_{gr}} (P_{\Sigma} - P_m) d\delta$$

4. ZADATAK

$$\cos \varphi = 0,95 \text{ ind.}$$

$$U_n = 10 \text{ kV}$$

$$f_n = 50 \text{ Hz}$$

$$S_n = 10 \text{ MVA}$$

$$\cos \varphi_n = 0,7$$

$$P_n = S_n \cdot \cos \varphi_n = 10 \text{ M} \cdot 0,7 = 7 \text{ MW}$$

$$Q_n = P_n \cdot \tan \varphi_n = 7 \text{ M} \cdot \tan (\arccos 0,7) = 7,14 \text{ MVAR}$$

$$Q^2 = P_n \cdot \tan \varphi_n^2 = 7 \text{ M} \cdot \tan (\arccos 0,95) = 2,3 \text{ MVAR}$$

$$Q_{KB} = Q - Q^2 = 7,14 \text{ M} - 2,3 \text{ M} = 4,84 \text{ MVAR}$$

a) λ

$$Q_\lambda = 3 \cdot V \cdot I = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V^*}{X} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} \frac{U^*}{\sqrt{3} X}$$

$$Q_\lambda = \frac{U^2}{X}$$

$$Q_\lambda = U^2 \omega C \rightarrow C_\lambda = \frac{Q_\lambda}{U^2 \omega} = \frac{4,84 \text{ M}}{(10 \text{ k})^2 \cdot 2\pi \cdot 50}$$

$$C_\lambda = 154,06 \mu\text{F}$$

b) Δ

$$Q_\Delta = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot U \cdot \frac{V^*}{X} = 3 \cdot U \cdot \frac{U^*}{X} = 3 \frac{U^2}{X}$$

$$Q_\Delta = 3U^2 \omega C$$

$$C_\Delta = \frac{Q_\Delta}{3U^2 \omega} = \frac{4,84 \text{ M}}{3 \cdot (10 \text{ k})^2 \cdot 2\pi \cdot 50} = 51,35 \mu\text{F}$$

c) $0,95 U$

$$Q'_\lambda = U^2 \omega C = (0,95 U)^2 \omega C = 0,95^2 U^2 \omega C = (0,95 \cdot 10 \text{ k})^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 154,06 \mu = 4,368 \text{ MVAR}$$

$$Q'_\Delta = (0,95 \cdot 10 \text{ k})^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 51,35 \mu = 1,456 \text{ MVAR}$$

$$\Delta Q_\lambda = Q_\lambda - Q'_\lambda = 4,84 - 4,368 = 0,472 \text{ MVAR}$$

$$\Delta Q_\Delta = Q_\Delta - Q'_\Delta = 4,84 - 1,456 = 3,384 \text{ MVAR}$$

5. ZADATAK

Oba dalekovoda

$$P = 50,4 \text{ MW}$$

$$Q = 63,5 \text{ MVar}$$

Jedan dalekovod

$$P = 50,6 \text{ MW}$$

$$Q = 27,8 \text{ MVar}$$

$$U_1 = 220 \text{ kV}$$

$$R' = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$L' = 1,553 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

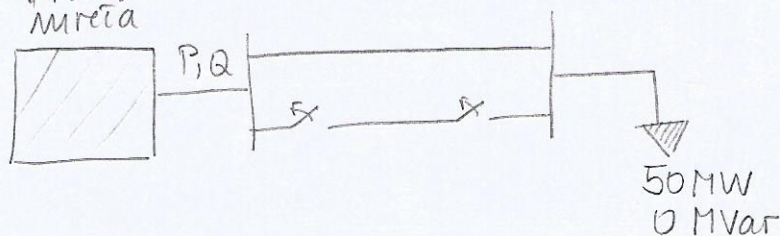
$$C' = 10,73 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$$

$$l = 200 \text{ km}$$

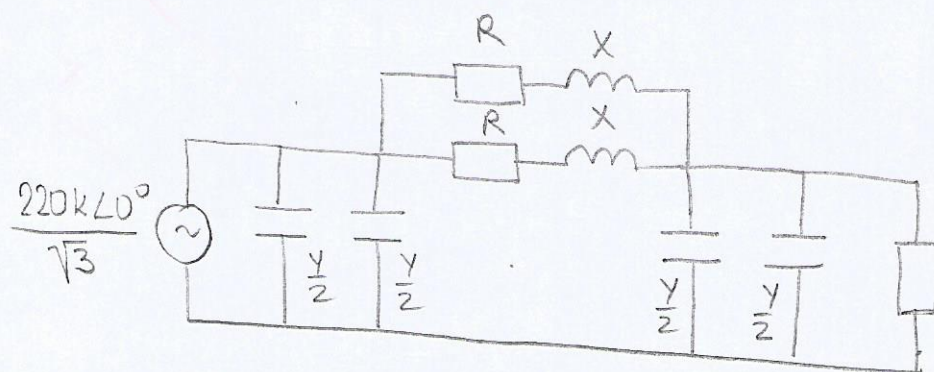
$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\Delta U_2 = ?$$

Kruta mreža



2 dalekovoda:



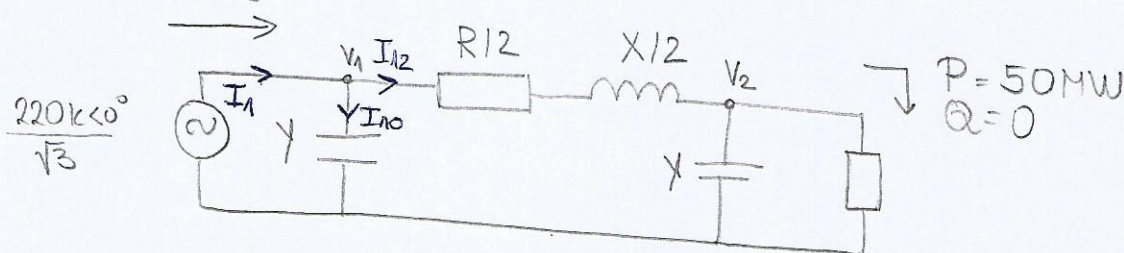
$$R = R' \cdot l = 0,05 \cdot 200 = 10 \Omega$$

$$X = \omega L' \cdot l = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,553 \text{ m} \cdot 200 = 97,6 \Omega$$

$$Y = j\omega C' \cdot l = j2\pi \cdot 50 \cdot 10,73 \text{ n} \cdot 200 = j0,674 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1}$$

$$\left(\frac{Y}{2} + \frac{Y}{2} = Y \right)$$

$$S_1 = 50,4 - j63,5$$



$$I_1 = \left(\frac{S_1}{\sqrt{3} U_1} \right)^* = \left(\frac{(50,4 - j63,5) \text{ M}}{\sqrt{3} \cdot 220 \text{ k}} \right)^* = 132,26 + j166,64$$

$$I_{10} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot Y = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} \cdot 0,674 \cdot 10^{-3} \angle 90^\circ = 85,61 \angle \frac{\pi}{2} = j85,61$$

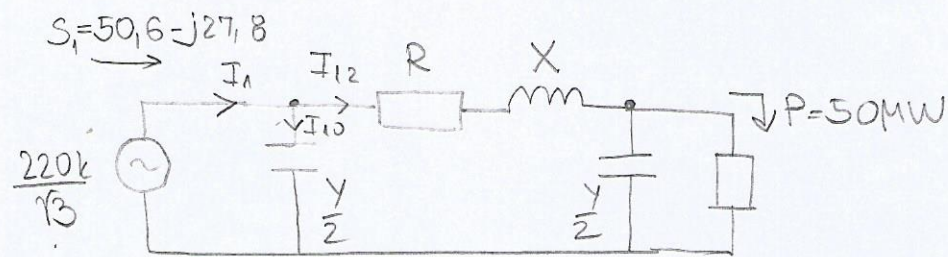
$$I_{12} = I_1 - I_{10} = 132,26 + j166,64 - j85,61 = 132,26 + j81,03 = 155,1 \angle 0,55$$

$$V_2 = V_1 - I_{12} \left(\frac{R}{2} + j \frac{X}{2} \right) = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} - 155,1 \angle 0,55 \cdot 48,8 \angle 1,57 = \frac{220 \text{ k}}{\sqrt{3}} + 3951,02 - 6455,8$$

$$= 131,1 \text{ kV} \angle \approx 0$$

$$U_2 = V_2 \cdot \sqrt{3} = 227,118 \text{ kV}$$

Jedán dalekoved



$$I_1' = \left(\frac{S_1}{\sqrt{3}U_1} \right)^* = \frac{(50,6 + j27,8)M}{\sqrt{3} \cdot 220k} = 132,79 + j72,96$$

$$I_{10}' = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Y}{2} = \frac{220k}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,674m \angle \pi/2}{2} = j42,8$$

$$I_{12}' = I_1' - I_{10}' = 132,79 + j72,96 - j42,8 = 132,79 + j30,16 = 136,2 \angle 0,223$$

$$V_2' = V_1' - I_{12}'(R + jX) = \frac{220k}{\sqrt{3}} - 136,2 \angle 0,223 \cdot 98,11 \angle 1,469 =$$

$$= \frac{220k}{\sqrt{3}} + 1568,18 - j12874,99 = 129,228k \angle \approx 0$$

$$U_2' = V_2' \cdot \sqrt{3} = 223,8 kV$$

$$\Delta U = |U_2'| - |U_2| = 223,8 - 227,2 = -3,4 kV$$