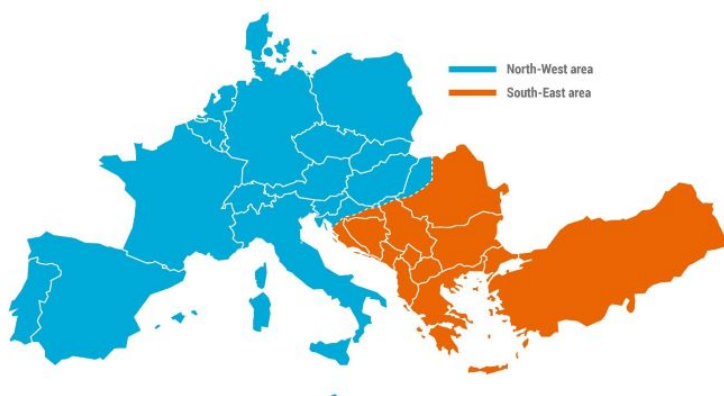


Zadatak 1

Joso je 8.1. nakon ručka krivo preklasio spojno polje u TS Ernestinovo i slučajno razdvojio pola Europe. Zbog Josinog lapsusa došlo je do kaskadnog ispada vodova te se sinkroni sustav kontinentalne Europe razdvojio na dva otoka prema slici 1. Podaci o proizvodnji i potrošnji neposredno prije kvara prikazani su u tablici 1. Dodatno, **neposredno nakon razdvajanja** velika promjena frekvencije u Francuskoj i Italiji je automatski uključila podfrekvencijsko rasterećenje koje je isključilo ukupno 1.7 GW potrošnje, dok je nadfrekvencijsko rasterećenje u Turskoj isključilo elektranu koja je u tom trenutku proizvodila 1 GW. Pretpostavite da su oba područja sposobna vratiti frekvenciju na nazivnu vrijednost te izračunajte sva stanja koja sustavi prolaze od trenutka neposredno prije nastanka kvara sve do trenutka neposredno prije resinkronizacije ova dva područja. (6 bodova)

Tablica 1: Podaci o interkonekciji

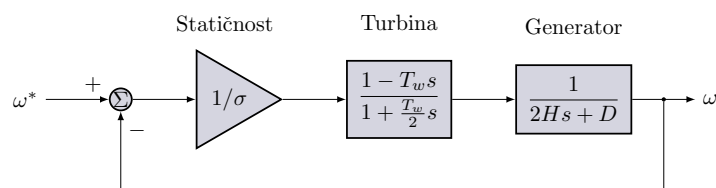
Proizvodnja		Potrošnja	
Snaga	Regulacijska energija	Snaga	Regulacijska energija
$P_g^{NW} = 293.7 \text{ GW}$	$K_g^{NW} = 42 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$	$P_l^{NW} = 300 \text{ GW}$	$K_l^{NW} = 4 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$
$P_g^{SE} = 36.3 \text{ GW}$	$K_g^{SE} = 24 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$	$P_l^{SE} = 30 \text{ GW}$	$K_l^{SE} = 2.5 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$



Slika 1: Separacija sustava u interkonekciji

Zadatak 2

Za hidroagregat u otočnom pogonu prema slici 2 potrebno je odrediti je li upravljanje brzinom vrtnje stabilno. U oba slučaja potrebno je odrediti minimalni iznos statičnosti pri kojem je ovaj upravljački sustav stabilan. Parametri sustava su: $T_w = 1 \text{ s}$, $\sigma = 0.06 \text{ p.u.}$, $H = 5 \text{ s}$, $D = 1 \text{ p.u.}$ (4 boda)

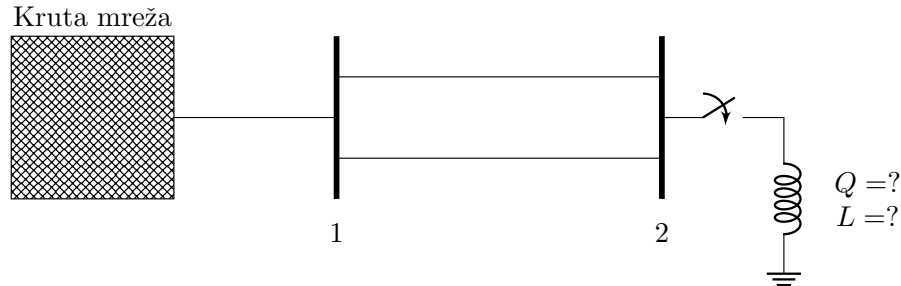


Slika 2: Hidroagregat u otočnom pogonu

Zadatak 3

Na slici 3 prikazan je dvostruki dalekovod u praznom hodu. Napon krute mreže iznosi 220 kV. Parametri voda su sljedeći: $R = 0.05 \Omega/\text{km}$, $L = 1.5 \text{ mH}/\text{km}$, $C = 15.0 \text{ nF}/\text{km}$. Parametri su izraženi po fazi za jedan dalekovod. Duljina dalekovoda je 300 km. Frekvencija sustava je 50 Hz. Potrebno je projektirati prigušnicu koja će spustiti napon čvorišta 2 za $\approx 6\%$. Koliko iznose nazivna snaga takve prigušnice¹, induktivitet po fazi ako je ona spojena u spoj zvijezda te snaga tijekom pogona (pri stvarnom naponu čvorišta 2)?

Napomena: U proračunu pretpostavite da je fazni kut napona čvorišta 2 $\approx 0^\circ$ u odnosu na krutu mrežu. (10 bodova)



Slika 3: Dalekovod u praznom hodu

Zadatak 4

Sinkroni turbogenerator sa sinkronom reaktancijom $x_s = 1.2 \text{ p.u.}$ radi u PV režimu rada: na generatorskim sabirnicama injektira djelatnu snagu $p = 0.5 \text{ p.u.}$ a regulator napona održava napon konstantnim $|u_t| = 1.05 \text{ p.u.}$ Jalova snaga koju generator injektira u ovoj radnoj točki iznosi $q = 0.29 \text{ p.u.}$ Generator je na krutu mrežu vezan blok transformatorom koji ima impedanciju $z_t = jx_t = j0.1 \text{ p.u.}$ i vodom koji ima impedanciju $z_l = jx_l = j0.1 \text{ p.u.}$ Potrebno je odrediti za koliko će se promijeniti uzbudna struja ako se napon mreže poveća za 5% u odnosu na početni. Skicirati strujni krug i označiti sve veličine.

Napomena: p , q i $|u_t|$ odnose se na generatorske sabirnice (prije blok-transformatora), a iznos napona krute mreže je nepoznat. Napon krute mreže postavite kao referentni. (6 bodova)

Zadatak 5

Trofazni asinkroni motor priključen je na mrežu nazivnog napona 10 kV u kojoj je stvarni pogonski napon 5% veći. Isprojektirajte kondenzatorsku bateriju za stvarni pogonski napon kojom se želi kompenzirati jalova snaga trofaznog asinkronog motora tako da motor radi s $\cos \varphi = 0.95 \text{ ind.}$ prema mreži pri nazivnoj snazi. Parametri motora su: $U_n = 10 \text{ kV}$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $S_n = 5 \text{ MVA}$, $\cos \varphi_n = 0.8$, $\eta = 0.95$ (učinkovitost). 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 10%;
- Iznos ukupne struje koju kompenzirani motor vuče iz mreže pri mehaničkom opterećenju $P_m = 4 \text{ MW}$.

(4 boda)

¹Nazivna snaga odnosi se na nazivni napon

1. ZADATAK

PROIZVODNJA		POTROŠNJA	
Snaga	Reg. en.	Snaga	Reg. en.
$P_g^{NW} = 293,76 \text{ W}$	$K_g^{NW} = 42 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$	$P_e^{NW} = 300 \text{ W}$	$K_e^{NW} = 4 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$
$P_g^{SE} = 36,3 \text{ W}$	$K_g^{SE} = 24 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$	$P_e^{SE} = 30 \text{ W}$	$K_e^{SE} = 2,5 \frac{\text{GW}}{\text{Hz}}$

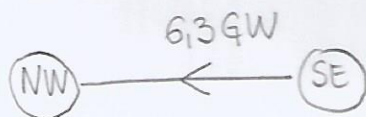
NW

- ispala potrošnja
1,7 GW

SE

- ispala proizvodnja
1 GW

$$\Sigma P_g = \Sigma P_e \rightarrow 330 \text{ GW} = 330 \text{ GW}$$



(NW) $\begin{aligned} \delta P_e &= -1,7 \text{ GW} \\ \delta P_g &= -6,3 \text{ GW} \end{aligned}$

$$\Delta f = \frac{\delta P_g - \delta P_e}{K_g + K_e} = \frac{-6,3 - (-1,7)}{4,2 + 4} = -0,1 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_g^{NW} = -K_g^{NW} \cdot \Delta f = -42 \cdot (-0,1) = 4,2 \text{ GW}$$

$$\Delta P_e^{NW} = K_e^{NW} \Delta f = 4 \cdot (-0,1) = -0,4 \text{ GW}$$

$$P_g^{2NW} = P_e^{2NW}$$

$$P_g^{2NW} = 293,7 + 4,2 = 297,9 \text{ GW}$$

$$P_e^{2NW} = 300 - 0,4 - 1,7 = 297,9 \text{ GW}$$

Sekundarna regulacija

$$\Delta f' = 0,1 \text{ Hz} \rightarrow f'' = 50 \text{ Hz}$$

$$\delta P_g = \Delta f (K_g^{NW} + K_e^{NW}) = 4,6 \text{ GW}$$

$$\Delta P_g^{2NW} = -K_g^{NW} \cdot \Delta f' = -4,2 \text{ GW} \rightarrow P_g^{3NW} = 297,9 - 4,2 + 4,6 = 298,3 \text{ GW}$$

$$\Delta P_e^{2NW} = -K_e^{NW} \cdot \Delta f' = 0,4 \text{ GW} \rightarrow P_e^{3NW} = 297,9 + 0,4 + 0 = 298,3 \text{ GW}$$

$$P_g^{3NW} = P_e^{3NW}$$

(SE) $\begin{aligned} \delta P_e &= -6,3 \text{ GW} \\ \delta P_g &= -1 \text{ GW} \end{aligned}$

$$\Delta f = \frac{\delta P_g - \delta P_e}{K_g + K_e} = \frac{-1 - (-6,3)}{2,4 + 2,5} = 0,2 \text{ Hz}$$

$$f' = f + \Delta f = 50,2 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_g^{SE} = -K_g^{SE} \cdot \Delta f = -2,4 \cdot 0,2 = -0,48 \text{ GW} \rightarrow P_g^{3SE} = 36,3 - 0,48 - 1 = 34,82 \text{ GW}$$

$$\Delta P_e^{SE} = K_e^{SE} \cdot \Delta f = 2,5 \cdot 0,2 = 0,5 \text{ GW} \rightarrow P_e^{3SE} = 30 + 0,5 + 0 = 30,5 \text{ GW}$$

Sekundarna regulacija

$$\Delta f' = -0,2 \text{ Hz} \rightarrow f'' = 50 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_g = \Delta f (K_g^{SE} + K_e^{SE}) = -5,3 \text{ GW}$$

$$\Delta P_g^{SE'} = -K_g \cdot \Delta f' = -24 \cdot (-0,2) = 4,8 \text{ GW}$$

$$\Delta P_e^{SE'} = K_e \cdot \Delta f' = 2,5 \cdot (-0,2) = -0,5 \text{ GW}$$

$$P_g^{SE''} = 30,5 + 4,8 - 5,3 = 30 \text{ GW}$$

$$P_e^{SE''} = 30,5 - 0,5 + 0 = 30 \text{ GW}$$

$$P_g'' = P_e''$$

Z1 2020. / 2021.

1. ZADATAK = ZIR 1. ZADATAK

2. ZADATAK

- Je li upravljanje brzinom urotnje stabilno?

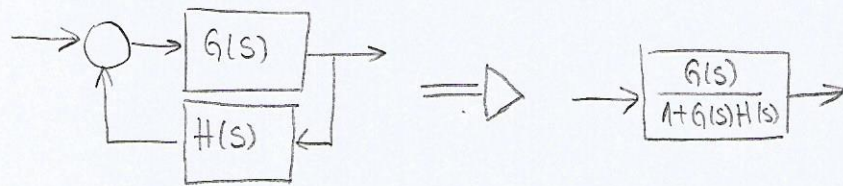
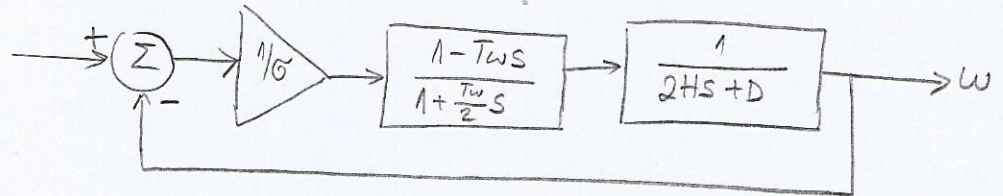
- $H_{min} = ?$ (da je stab.)

$$T_w = 1s$$

$$\sigma = 0,06 \text{ p.u.}$$

$$H = 5s$$

$$D = 1 \text{ p.u.}$$



$$1 + G(s)H(s) = 0, H(s) = 1$$

$$1 + \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{T_w}{2}s} \cdot \frac{1}{2Hs + D} = 0 \quad / \quad \sigma \left(1 + \frac{T_w}{2}s\right)(2Hs + D)$$

$$\sigma \left(1 + \frac{T_w}{2}s\right)(2Hs + D) + 1 - T_w s = 0$$

$$\sigma \left(1 + \frac{s}{2}\right)(2 \cdot 5s + 1) + 1 - s = 0$$

$$\sigma (5s^2 + 10,5s + 1) + 1 - s = 0$$

$$5\sigma s^2 + (10,5\sigma - 1)s + (\sigma + 1) = 0$$

Hurwitzovi kriteriji:

1. svi koeficijenti su pozitivni

$$5\sigma > 0 \rightarrow \sigma > 0$$

$$10,5\sigma - 1 > 0 \rightarrow \sigma > \frac{1}{10,5}$$

$$\sigma + 1 > 0 \rightarrow \sigma > -1$$

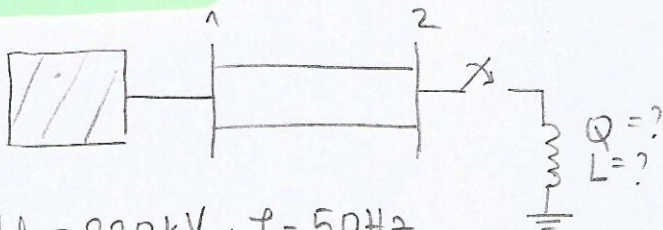
2. determinante veće od nula

$$10,5\sigma - 1 > 0$$

$$\sigma > \frac{2}{21}$$

Za $\sigma = 0,06$ sustav je nestabilan, a stabilan je za sve $\sigma > \frac{2}{21}$ ($\sigma > 0,095$)

3. ZADATAK



$$U_1 = 220 \text{ kV}, f = 50 \text{ Hz}$$

$$R = 0,05 \Omega \rightarrow 15 \Omega$$

$$L = 1,5 \frac{\text{mH}}{\text{km}} \rightarrow X = 141,37 \Omega$$

$$C = 15 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \rightarrow B = 1,414 \text{ mS}$$

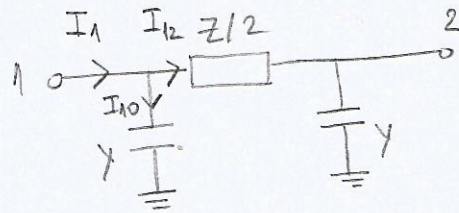
$$l = 300 \text{ km}$$

$$U_2' = 0,94 U_2$$

$$\lambda \rightarrow Q = ? \quad L = ?$$

1) Bez prigušnice

$$\frac{Z}{2} = \frac{R}{2} + j \frac{X}{2} = 7,5 + j70,685 = 71,08 \angle 83,9^\circ$$



$$U_1 = U_2 + \sqrt{3} I_{12} \cdot \frac{Z}{2}$$

$$I_{12} = I_{20} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} \cdot Y$$

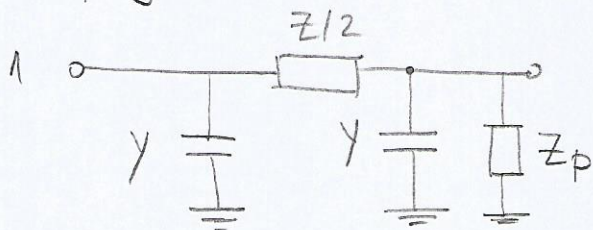
$$U_1 = U_2 + \sqrt{3} \frac{U_2}{\sqrt{3}} Y \cdot \frac{Z}{2} = U_2 \left(1 + Y \frac{Z}{2} \right)$$

$$U_2 = \frac{U_1}{1 + Y \frac{Z}{2}}$$

$$U_2 = \frac{U_1}{1 + Y \frac{Z}{2}} = \frac{220 \text{ k}}{1 + 1,414 \text{ m} \angle 90^\circ \cdot 71,08 \angle 83,9^\circ} = \frac{220 \text{ k}}{1 - 0,0982 - j0,0212} = \frac{220 \text{ k}}{0,902 \angle 1,346^\circ}$$

$$U_2 = 243,9 \text{ kV} (\approx 244)$$

2) S prigušnicom



$$U_2' = 0,94 \cdot U_2 = 0,94 \cdot 244 = 229 \text{ kV}$$

$$U_1 = U_2' + \sqrt{3} I_{12} \frac{Z}{2}$$

$$I_{12} = \frac{U_1 - U_2'}{\sqrt{3} \cdot \frac{Z}{2}} = \frac{220 \text{ k} - 229 \text{ k}}{\sqrt{3} \cdot 71,08 \angle 83,9^\circ}$$

$$I_{12} = 73,1 \angle 96,1^\circ$$

$$I_{12} = \frac{U_2'}{\sqrt{3}} \cdot Y + \frac{U_2'}{\sqrt{3} Z_p} \Rightarrow Z_p = \frac{1}{\frac{\sqrt{3} I_{12}}{U_2'} - Y} = \frac{1}{\frac{\sqrt{3} \cdot 73,1 \angle 96,1^\circ}{229 \text{ k}} - 1,414 \text{ m} \angle 90^\circ}$$

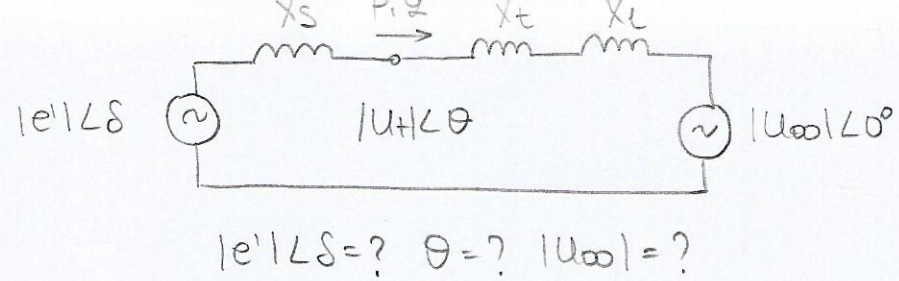
$$Z_p \approx j1152 \Omega$$

$$\lambda: Q = \frac{3 \left(\frac{U_2'}{\sqrt{3}} \right)^2}{Z_p} = \frac{U_2'^2}{Z_p} = 45,5 \text{ MVar}$$

$$Z_p = \omega L \Rightarrow L = \frac{Z_p}{\omega} = \frac{1152}{2\pi \cdot 50} = 3,67 \text{ H}$$

4. ZADATAK

$X_s = 1,2 \text{ p.u.}$
 $p = 0,5 \text{ p.u.}$
 $|u_t| = 1,05 \text{ p.u.}$
 $q = 0,29 \text{ p.u.}$
 $Z_t = jX_t = j0,1 \text{ p.u.}$
 $Z_L = jX_L = j0,1 \text{ p.u.}$



$|e| \angle \delta = ?$ $\theta = ?$ $|u_\infty| = ?$

$$S = p + jq = |u_t| \angle \theta \cdot i^* = |u_t| \angle \theta \cdot \left[\frac{|u_t| \angle \theta - |u_\infty| \angle 0^\circ}{jX_L + jX_t} \right]^* =$$

$$\frac{i_f'}{i_f} = ? \rightarrow |u_\infty|^2 = 1,05 |u_\infty|$$

$$= [|u_t| \cos \theta + j |u_t| \sin \theta] \left[\frac{|u_t| \cos \theta}{j(X_L + X_t)} + j \frac{|u_t| \sin \theta}{j(X_L + X_t)} - \frac{|u_\infty| \cos 0^\circ}{j(X_L + X_t)} - j \frac{|u_\infty| \sin 0^\circ}{j(X_L + X_t)} \right]^* =$$

$$= [|u_t| \cos \theta + j |u_t| \sin \theta] \left[\frac{|u_t| \cos \theta}{j(X_L + X_t)} + \frac{|u_t| \sin \theta}{X_L + X_t} - \frac{|u_\infty|}{j(X_L + X_t)} \right]^* =$$

$$= [|u_t| \cos \theta + j |u_t| \sin \theta] \left[-j \frac{|u_t| \cos \theta}{X_L + X_t} + \frac{|u_t| \sin \theta}{X_L + X_t} + j \frac{|u_\infty|}{X_L + X_t} \right]^* =$$

$$= [|u_t| \cos \theta + j |u_t| \sin \theta] \left[\frac{|u_t| \sin \theta}{X_L + X_t} + j \frac{|u_t| \cos \theta}{X_L + X_t} - j \frac{|u_\infty|}{X_L + X_t} \right] =$$

$$= \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} \cos \theta \sin \theta + j \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} \cos^2 \theta - j \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \cos \theta +$$

$$+ j \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} \sin^2 \theta - \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} \cos \theta \sin \theta + \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \sin \theta =$$

$$= \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \sin \theta + j \left[\frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} - \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \cos \theta \right] = P + jq$$

$Re = Re$ $Im = Im$

$$P = \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \rightarrow |u_\infty| = \frac{P(X_L + X_t)}{|u_t| \sin \theta}$$

$$q = \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} - \frac{|u_t| |u_\infty|}{X_L + X_t} \cos \theta = \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} - \frac{|u_t|}{X_L + X_t} \cdot \frac{P(X_L + X_t)}{|u_t|} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} =$$

$$q = \frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} - P \cdot \frac{1}{\tan \theta} \rightarrow \tan \theta = \frac{P}{\frac{|u_t|^2}{X_L + X_t} - q} = \frac{0,5}{\frac{1,05^2}{0,2} - 0,29} \Rightarrow \theta = 5,47^\circ$$

$$|U_{\infty}| = \frac{P(X_L + X_C)}{|U| \sin \theta} = \frac{0,5 \cdot 0,2}{1,05 \cdot \sin(5,47)} = 1 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} |e'| \angle \delta' &= |U| \angle 5,47^\circ + jX_S \cdot i = \\ &= \underset{1,05}{|U|} \angle 5,47^\circ + j1,2 \cdot \frac{\underset{1,05}{|U|} \angle 5,47^\circ - 1 \angle 0^\circ}{j0,2} = \\ &= 1,045 + j0,1 + 6(1,045 + j0,1 - 1) = 1,315 + j0,7 = 1,489 \angle 28,03^\circ \end{aligned}$$

$$\underline{|e'| = 1,489}$$

$$|U_{\infty}|' = 1,05 \text{ p.u.}$$

$$\frac{|U| + 1|U_{\infty}|}{X_L + X_C} \sin \theta' = P \Rightarrow \sin \theta' = \frac{P(X_L + X_C)}{|U| + 1|U_{\infty}|} = \frac{0,5 \cdot 0,2}{1,05 \cdot 1,05} \Rightarrow \theta = 5,2^\circ$$

$$\begin{aligned} |e'| \angle \delta' &= |U| \angle \theta' + jX_S \frac{|U| \angle \theta' - |U_{\infty}|' \angle 0^\circ}{j(X_L + X_C)} = 1,05 \angle 5,2^\circ + 6(1,05 \angle 5,2^\circ - 1,05) = \\ &= 1,046 + j0,095 - 0,024 + j0,57 = 1,22 \angle 33^\circ \end{aligned}$$

$$|e'|' = 1,22$$

$$\frac{I_f'}{I_f} = \frac{|e'|'}{|e'|} = \frac{1,22}{1,489} = 0,82 \Rightarrow \text{Uzbudna se struja smanji 18\%}.$$

Z1 2020/2021

5. ZADATAK

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

$$U = 1,05 U_n = 10,5 \text{ kV}$$

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

$$S_n = 5 \text{ MVA}$$

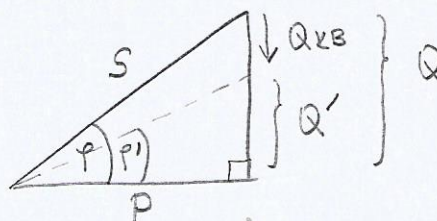
$$\cos \varphi_n = 0,8$$

$$\eta = 0,95$$

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

$$P = S_n \cdot \cos \varphi_n = 5 \cdot 0,8 = 4 \text{ MW}$$

$$Q = P \cdot \tan \varphi_n = 5 \cdot \tan(\arccos 0,8) = 3 \text{ MVar}$$



$$Q' = P \cdot \tan \varphi' = 4 \cdot \tan(\arccos 0,95) = 1,315 \text{ MVar}$$

$$Q_{KB} = Q - Q' = 1,685 \text{ MVar}$$

a) $C_\lambda = ?$

$$C_\lambda = \frac{Q_{KB}}{\omega U^2} = \frac{1,685}{2\pi \cdot 50 \cdot 10,5^2} = 48,64 \mu\text{F}$$

b) $C_\Delta = ?$

$$C_\Delta = \frac{Q_{KB}}{3\omega U^2} = \frac{1,685}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10,5^2} = 16,219 \mu\text{F}$$

c) napon mreže se smanji 10%

$$\lambda: \frac{Q'}{Q} = \frac{0,9^2 Q}{Q} = 0,81$$

Smanji se za 19%.

$$\Delta = \frac{Q'}{Q} = \frac{0,9^2 Q}{Q} = 0,81$$

d) $P_m = 4 \text{ MW}$

$$I = ?$$

$$|I| = \frac{|S|}{\sqrt{3} \cdot |U|}$$

$$P_e = \frac{P_m}{\eta} = \frac{4}{0,95} = 4,21 \text{ MW}$$

$$Q = P_e \cdot \tan \varphi' = 4,21 \cdot \tan(\arccos 0,95) = 1,38 \text{ MVar}$$

$$S = P_e + jQ$$

$$|I| = \frac{\sqrt{P_e^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{\sqrt{(4,21 \text{ M})^2 + (1,38 \text{ M})^2}}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \text{ kV}} = 243,6 \text{ A}$$