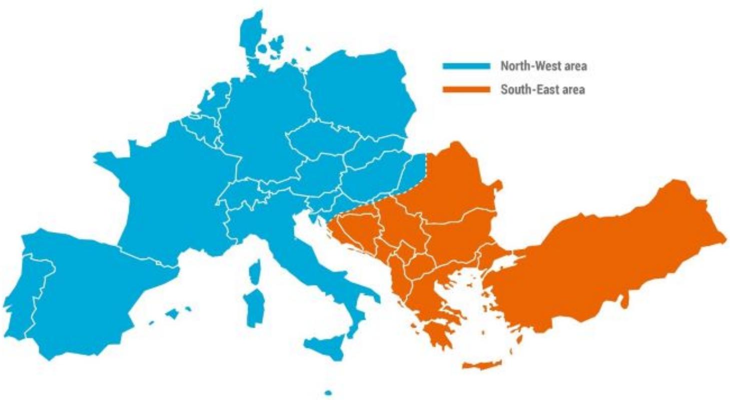
Zadatak 1

Joso je 8.1. nakon ručka krivo preklopio 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 isklopilo ukupno 1.7 GW potrošnje, dok je nadfrekvencijsko rasterećenje u Turskoj isklopilo 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. **(10 bodova)**

Tablica 1: Podaci o interkonekciji

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



Slika 1: Separacija sustava u interkonekciji

Zadatak 2

Jednostavan dinamički model AC mikromreže (50 Hz) u otočnom pogonu prikazan je na slici ispod. Mikromreža se sastoji od sinkronog hidroagregata te baterije koja pomaže u regulaciji frekvencije. Parametri sustava su: $H = 5$ s; $D = 2$ p.u.; $K_1 = 24$ p.u.; $T_1 = 0.5$ s; $T_2 = 5$ s; $T_3 = 50$ s; $K_2 = 10$ p.u.; $T_r = 1$ s; $T_b = 0.02$ s. Prije nastanka poremećaja, hidroagregat je radio na 50% nazivne snage, dok se baterija punila s -0.1 p.u. Ako se snaga potrošnje naglo poveća za 0.1 p.u., potrebno je izračunati:

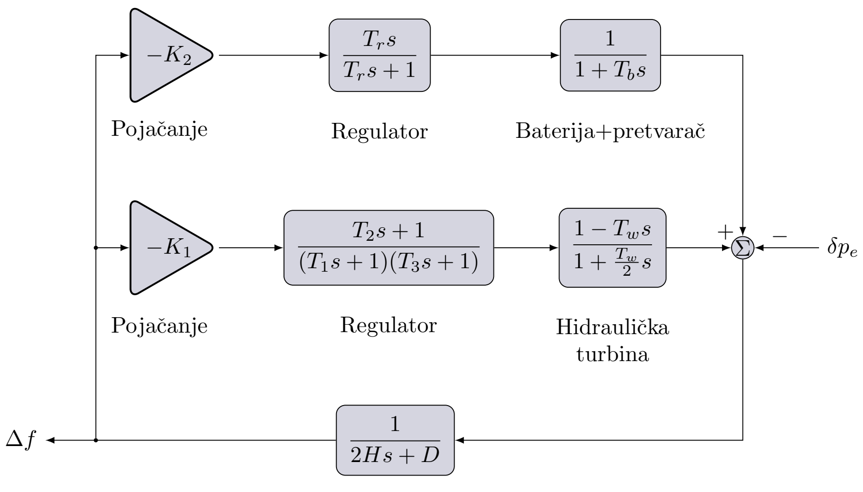
a) novu frekvenciju sustava u stacionarnom stanju nakon poremećaja;

b) novu snagu koju baterija daje u mrežu ili uzima iz mreže u stacionarnom stanju nakon poremećaja;

c) novu snagu proizvodnje hidroagregata u stacionarnom stanju nakon poremećaj;

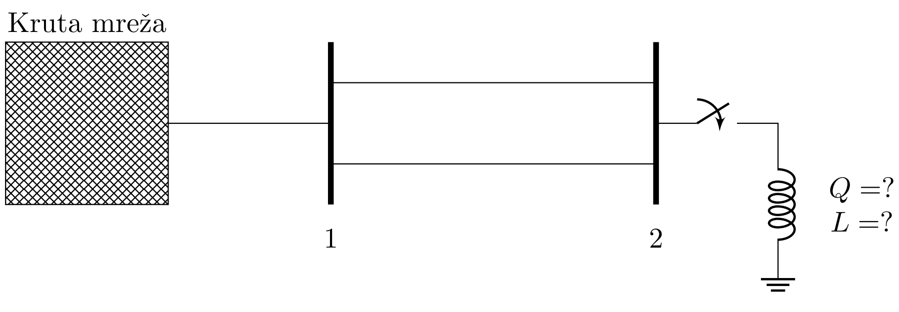
d) početni RoCoF ($t = 0^+$).

(10 bodova)



Zadatak 3

Na slici 2 prikazan je dvostruki dalekovod u praznom hodu. Napon krute mreže iznosi 220 kV. Parametri voda su sljedeći: $R = 0.05\ \Omega$/km, $L = 1.5$ mH/km, $C = 15.0$ nF/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 prigušnice[1], induktivitet po fazi ako je ona spojena u spoj **trokut** te snaga tijekom pogona (pri stvarnom naponu čvorišta 2)?
Napomena: U proračunu pretpostavite da je fazni kut napona čvorišta 2 $\approx 0°$ u odnosu na krutu mrežu.
(10 bodova)

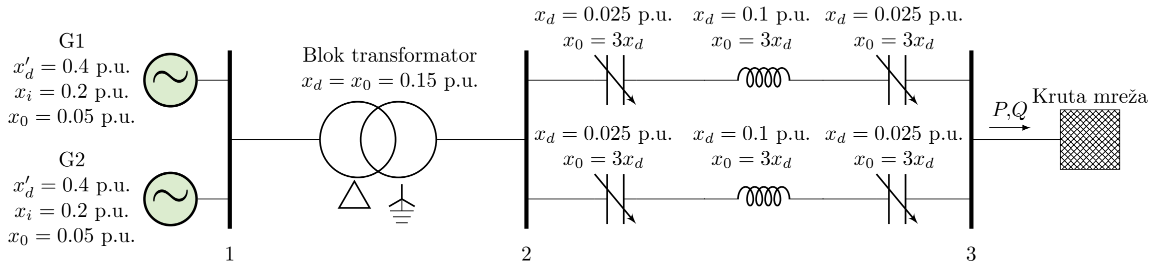


Slika 2: Dalekovod u praznom hodu

[1]Nazivna snaga odnosi se na nazivni napon

Zadatak 4

Dva identična agregata neke elektrane spojena su na krutu mrežu preko blok-transformatora i dvostrukog dalekovoda kompenziranog s oba kraja preko tiristorski upravljanih serijskih kondenzatora (TCSC) koji su podešeni prema slici 3. Agregati u naduzbuđenom režimu rada u mrežu predaju snagu $P = 0.9$ p.u. pri $\cos\varphi = 0.95$. Napon krute mreže iznosi $1\angle 0^{\circ}$ p.u. Na jednom od dva paralelna voda nastaje tropolni kratki spoj neposredno iza sabirnice 2. Ako zaštita isklopi vod u kvaru u trenutku kada elektrana postigne kut opterećenja $\delta = \frac{5\pi}{9}$, a automatski ponovni uklop (APU) proradi pri $\delta = \frac{2\pi}{3}$, potrebno je odrediti ostaje li predmetna elektrana u sinkronizmu.
(10 bodova)



Slika 3: Spoj elektrane s dva agregata s krutom mrežom

Zadatak 5

Potrebno je linearizirati nelinearni, dvomaseni dinamički model vjetroagregata koji je opisan jednadžbama (1)–(5), te definirati varijable stanja i odrediti matricu stanja. $T_t(\omega_t, v_w, \beta)$ je funkcija koja opisuje mehanički moment turbine, dok je $T_e(\omega_g)$ funkcija koja opisuje elektromehanički moment generatora. $C_t(\omega_t, v_w, \beta)$ je funkcija aerodinamičkog koeficijenta agregata.
(10 bodova)

$$2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t(\omega_t, v_w, \beta) - K_s\gamma - D_s(\omega_t - \omega_g) \tag{1}$$

$$2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_s\gamma + D_s(\omega_t - \omega_g) - T_e(\omega_g) \tag{2}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = 2\pi f_n(\omega_t - \omega_g) \tag{3}$$

$$T_t(\omega_t, v_w, \beta) = \frac{1}{2}R^2\pi v_w^3 C_t(\omega_t, v_w, \beta) \tag{4}$$

$$T_e(\omega_g) = K_g\omega_g^2 \tag{5}$$

Varijable sustava su:
ω_t, ω_g — brzina vrtnje turbine, odnosno generatora;
γ — kut uvijanja vratila;
v_w—brzina vjetra;
β—kut zakreta lopatica.

Parametri sustava su:
H_t, H_g—konstanta tromosti turbine, odnosno generatora;
K_s, D_s — krutost i trenje vratila;
K_g—koeficijent elektromehaničkog momenta generatora;
f_n—nazivna mrežna frekvencija;
R—polumjer koji opisuju lopatice turbine.

U stacionarnom stanju vrijedi sljedeće: $\omega_{t,0} = \omega_{g,0}$; $T_{t,0} = T_{e,0} = K_s\gamma_0$.
Napomena: Zbog složenosti funkcija T_t i C_t nije potrebno izvoditi točan analitički izraz. Potrebno je samo postaviti čemu su jednaki koeficijenti linearizirane funkcije T_t.

1. ZADATAK

PROIZVODNJA		POTROŠNJA	
Snaga	Reg. en.	Snaga	Reg. en.
$P_g^{NW} = 293{,}7\,GW$	$Kg^{NW} = 42\,\frac{GW}{Hz}$	$P_e^{NW} = 300\,GW$	$Ke^{NW} = 4\,\frac{GW}{Hz}$
$P_g^{SE} = 36{,}3\,GW$	$Kg^{SE} = 24\,\frac{GW}{Hz}$	$P_e^{SE} = 30\,GW$	$Ke^{SE} = 2{,}5\,\frac{GW}{Hz}$

NW
- ispala potrošnja 1,7GW

SE
- ispala proizvodnja 1GW

$$\Sigma P_g = \Sigma P_e \rightarrow 330\,GW = 330\,GW$$

$$NW \xleftarrow{6{,}3\,GW} SE$$

NW

$$\delta P_e = -1{,}7\,GW$$
$$\delta P_g = -6{,}3\,GW$$

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

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

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

$$P_g'^{NW} = 293{,}7 + 4{,}2 = 297{,}9\,GW$$
$$P_e'^{NW} = 300 - 0{,}4 - 1{,}7 = 297{,}9\,GW$$

Sekundarna regulacija

$$\Delta f' = 0{,}1\,Hz \Rightarrow f'' = 50\,Hz$$
$$\delta P_g = \Delta f\,(Kg^{NW} + Ke^{NW}) = 4{,}6\,GW$$

$$\Delta P_g'^{NW} = -Kg^{NW} \cdot \Delta f' = -4{,}2\,GW \rightarrow P_g''^{NW} = 297{,}9 - 4{,}2 + 4{,}6 = 298{,}3\,GW$$
$$\Delta P_e'^{NW} = -Ke^{NW} \cdot \Delta f' = 0{,}4\,GW \rightarrow P_e''^{NW} = 297{,}9 + 0{,}4 + 0 = 298{,}3\,GW$$

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

SE

$$\delta P_e = -6{,}3\,GW$$
$$\delta P_g = -1\,GW$$

$$\Delta f = \frac{\delta P_g - \delta P_e}{Kg + Ke} = \frac{-1-(-6{,}3)}{24+2{,}5} = 0{,}2\,Hz$$

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

$$\Delta P_g^{SE} = -Kg^{SE} \cdot \Delta f = -24 \cdot 0{,}2 = -4{,}8\,GW \rightarrow P_g'^{SE} = 36{,}3 - 4{,}8 - 1 = 30{,}5\,GW$$
$$\Delta P_e^{SE} = Ke^{SE} \cdot \Delta f = 2{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}5\,GW \rightarrow P_e'^{SE} = 30 + 0{,}5 + 0 = 30{,}5\,GW$$

Sekundarna regulacija

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

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

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

$\Delta P_l^{SE'} = K_l \cdot \Delta f' = 2{,}5\,(-0{,}2) = -0{,}5\,GW$

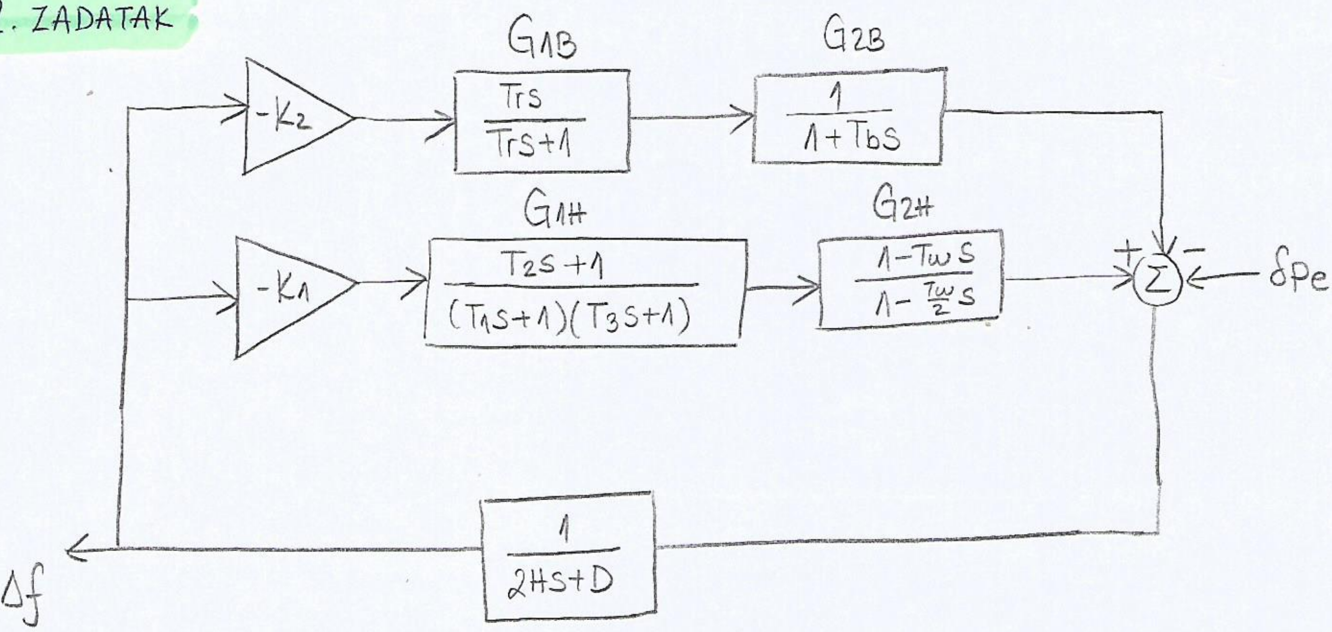
$P_g^{SE''} = 30{,}5 + 4{,}8 - 5{,}3 = 30\,GW$

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

$P_g'' = P_l''$

ZIR 2020./2021.

2. ZADATAK



$f = 50\,Hz$ $\quad T_1 = 0{,}5\,s$ $\quad T_r = 1\,s$ $\quad \delta P_e = 0{,}1\,p.u.$

$H = 5\,s$ $\quad T_2 = 5\,s$ $\quad T_b = 0{,}02\,s$

$D = 2\,p.u.$ $\quad T_3 = 50\,s$ $\quad P_H(0) = 0{,}5\,p.u.$

$K_1 = 24\,p.u$ $\quad K_2 = 10\,p.u.$ $\quad P_B(0) = -0{,}1\,p.u$

a) $f_\infty = ?$

$$\Delta f = \left[\Delta f\left(-K_2 G_{1B} G_{2B} - K_1 G_{1H} G_{2H}\right) - \delta P_e\right]\frac{1}{2HS+D}$$

$$\circ \; \circ \; \circ$$

$$\Delta f = \frac{-\delta P_e}{2HS + D + K_2 G_{1B} G_{2B} + K_1 G_{1H} G_{2H}}$$

$$\Delta f(t\to\infty) = \lim_{s\to 0} \cancel{s}\, \frac{\frac{-\delta P_e}{\cancel{s}}}{2H\cancel{S} + D + K_2\cdot 0\cdot 1 + K_1\cdot 1\cdot 1}$$

$$\Delta f(t\to\infty) = \frac{-\delta P_e}{D+K_1} = \frac{-0{,}1}{2+24} = -0{,}00385 \;/\cdot 50\,Hz$$

$$\Delta f_\infty = -0{,}1923\,Hz$$

$$f_\infty = f_0 + \Delta f_\infty = 49{,}8077\,Hz$$

b) $P_b(\infty) = ?$

$$\Delta P_B(\infty) = \lim_{s\to 0} s\cdot \Delta P_B(s) = \lim_{s\to 0} s\,\Delta f(s)(-K_2)\, \overset{0}{G_{1B}(0)}\, \overset{1}{G_{2B}(0)} = \lim_{s\to 0} \cancel{s}\,\frac{-0{,}00385}{\cancel{s}}\cdot 0 = 0$$

$$P_{B\infty} = P_B(0) + \Delta P_B(\infty) = -0{,}1\,p.u.$$

c) $P_H(\infty) = ?$

$$\Delta P_H(\infty) = \lim_{s \to 0} s \cdot \Delta P_H(s) = \Delta f(s)(-K_1) = 0,0923$$

$$P_H(\infty) = P_H(0) + \Delta P_H(\infty) = 0,5923 \text{ p.u.}$$

d) $\left.\frac{df}{dt}\right|_{t=0+} = ?$

$$\Delta f(t \to 0) = \lim_{s \to \infty} s \frac{-\frac{\delta pe}{s}}{2Hs + D + K_2 G_{1B} G_{2B} + K_1 G_{1H} G_{2H}}$$

$$\left.\frac{df}{dt}\right|_{t=0+} = \lim_{s \to \infty} s \left[\Delta f(s)\right]_{t \to 0}$$

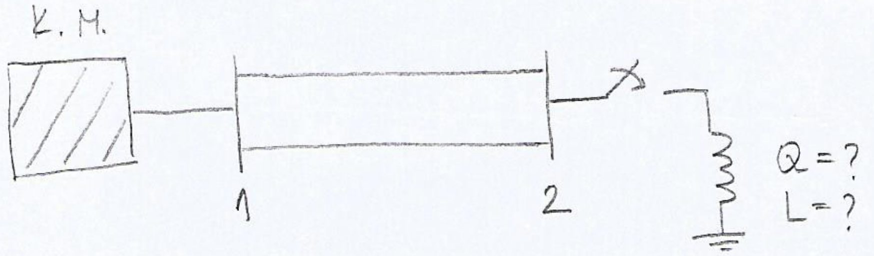
$$\frac{df}{dt}(0) = \lim_{s \to \infty} \cancel{s^2} \frac{-\frac{\delta pe}{\cancel{s}}}{2Hs + D + K_2 \underbrace{G_B}_{=0} + K_1 \underbrace{G_H}_{=0}} =$$

$$= \lim_{s \to \infty} \frac{-\delta pe}{2H + \underbrace{\frac{D}{s}}_{0}} = -\frac{\delta pe}{2H} = -\frac{0,1}{2 \cdot 5} = -0,01 \frac{\text{p.u.}}{s} \Big/ \cdot 50\text{Hz}$$

$$= -0,5 \frac{\text{Hz}}{s}$$

ZIR 2020./2021.

3. ZADATAK



$U_1 = 220\,kV$

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

$L = 1{,}5\,\frac{mH}{km}$

$C = 15\,\frac{nF}{km}$

$l = 300\,km$

$f = 50\,Hz$

$U_2' = 0{,}94\,U_2$

Δ - spoj

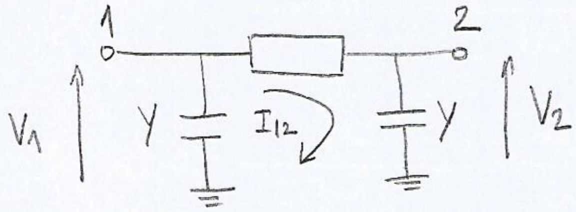
$Q,\ C = ?$

$$\frac{Z}{2} = \frac{1}{2}(R + j\omega L)\cdot l = 7{,}5 + j70{,}6858\ \Omega$$

$$= 71{,}08\angle 83{,}94^\circ$$

$$Y = j\omega C \cdot l = j1{,}4137\ mS$$

1) BEZ PRIGUŠNICE



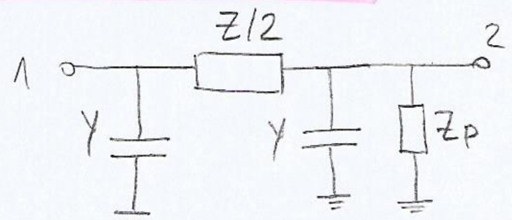
$$V_1 = V_2 + I_{12}\cdot\frac{Z}{2}\quad,\quad I_{12} = I_{20} = V_2 \cdot Y$$

$$V_1 = V_2 + V_2 Y \cdot \frac{Z}{2} = V_2\left(1 + Y\frac{Z}{2}\right)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{1 + Y\frac{Z}{2}}\ \Big/\cdot\sqrt{3} \rightarrow U_2 = \frac{U_1}{1 + Y\frac{Z}{2}} = \frac{220k}{\underbrace{1 - 0{,}0999 + j0{,}0106}_{0{,}9\angle 0{,}675}} = 244{,}4k\angle -0{,}675$$

$$U_2 = 244{,}4\,kV$$

2) S PRIGUŠNICOM



$$U_2' = 0{,}94\,U_2 = 229{,}76\,kV$$

$$V_1 = V_2' + I_{12}\frac{Z}{2}$$

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2'}{\frac{Z}{2}} = \frac{(220k - 229{,}76k)/\sqrt{3}}{71{,}08\angle 83{,}94^\circ} = \frac{5{,}635k\angle 180^\circ}{71{,}08\angle 83{,}94^\circ} = 79{,}28\angle 96{,}06^\circ$$

$$= -8{,}37 + j78{,}84$$

$$I_{12} = I_{20} + I_p = V_2' \cdot Y + \frac{V_2'}{Z_p} \Rightarrow Z_p = \frac{V_2'}{I_{12} - V_2' Y}$$

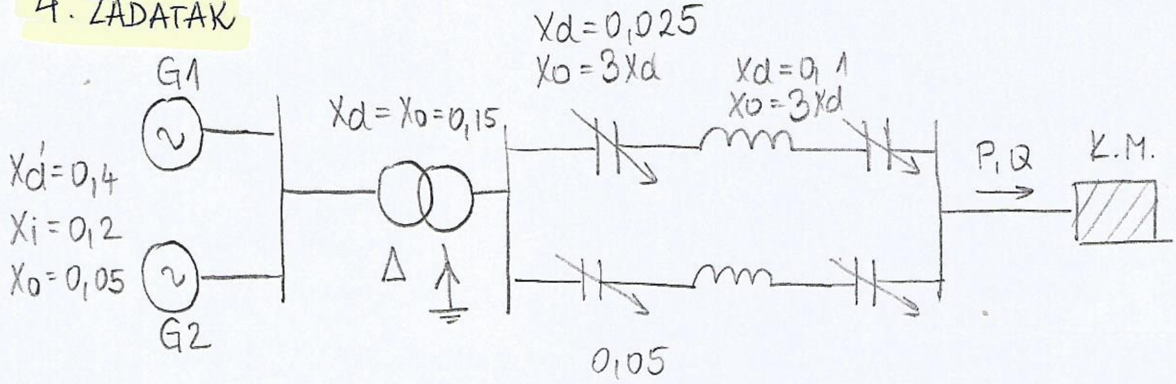
$$Z_p = \frac{229{,}76k/\sqrt{3}}{\underbrace{-8{,}37 + j78{,}84 - j187{,}53}_{109\angle -94^\circ}} = j1216\,\Omega$$

$$\Delta Q = 3\frac{U_2'^2}{Z_p} = 3\frac{(229{,}76k)^2}{1216} = 130{,}24\text{ MVAr}$$

$$Z_p = \omega L \rightarrow L = \frac{Z_p}{\omega} = \frac{1216}{2\pi \cdot 50} = 3{,}87\text{ H}$$

ZIR 2020./2021.

4. ZADATAK



naduzbudeni re

$P = 0,9$ p.u.

$\cos\varphi = 0,95$

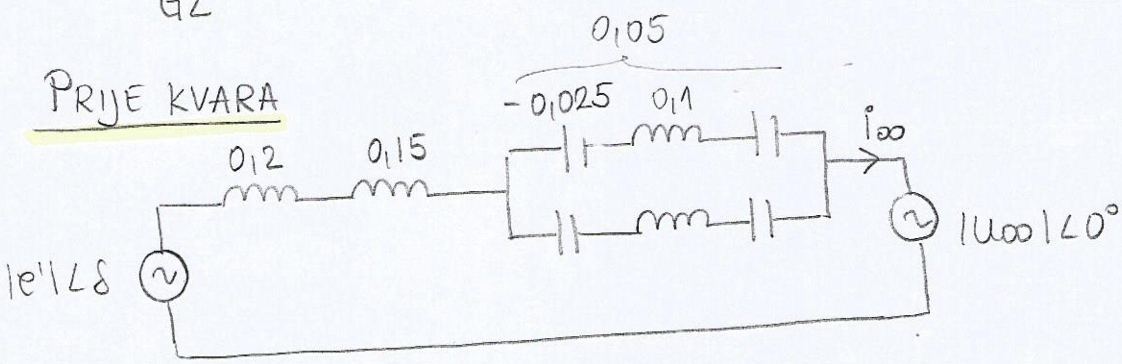
$U_\infty = 1\angle 0°$

3PKS, dv

$\delta = \frac{5\pi}{9} \rightarrow$ isklop

$\delta = \frac{2\pi}{3} \rightarrow$ uklop

PRIJE KVARA



$$X_d = 0,2 + 0,15 + \frac{0,05}{2} = 0,375 \text{ p.u.}$$

$$i_\infty = \left(\frac{S}{U_\infty}\right)^* = \left(\frac{P + jP\,tg\varphi}{1}\right)^* = 0,9 - j0,9\,tg(a\cos 0,95) =$$

$$= 0,9 - j0,296 = 0,947\angle -18,2°$$

$$\boxed{|e'|\angle\delta = |U_\infty|\angle 0° + j i_\infty \cdot X_d} = 1 + 0,947\angle -18,2° \cdot 0,375\angle 90° =$$

$$= 1 + 0,111 + j0,337 = 1,161\angle 16,87° \; (0,294 \text{ rad})$$

$$|e'| = 1,161$$

$$\delta_0 = 0,294$$

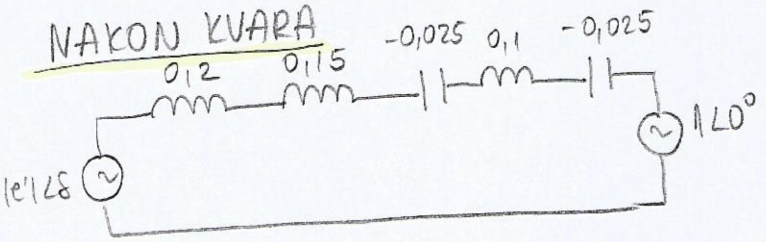
$$P_m = \frac{|e'||U_\infty|}{X_d}\sin\delta_0 = \frac{1,161}{0,375}\sin(0,294) = 0,9$$

$$P_\alpha = \frac{1,161}{0,375}\sin\delta = 3,096\sin\delta$$

ZA VRIJEME KVARA

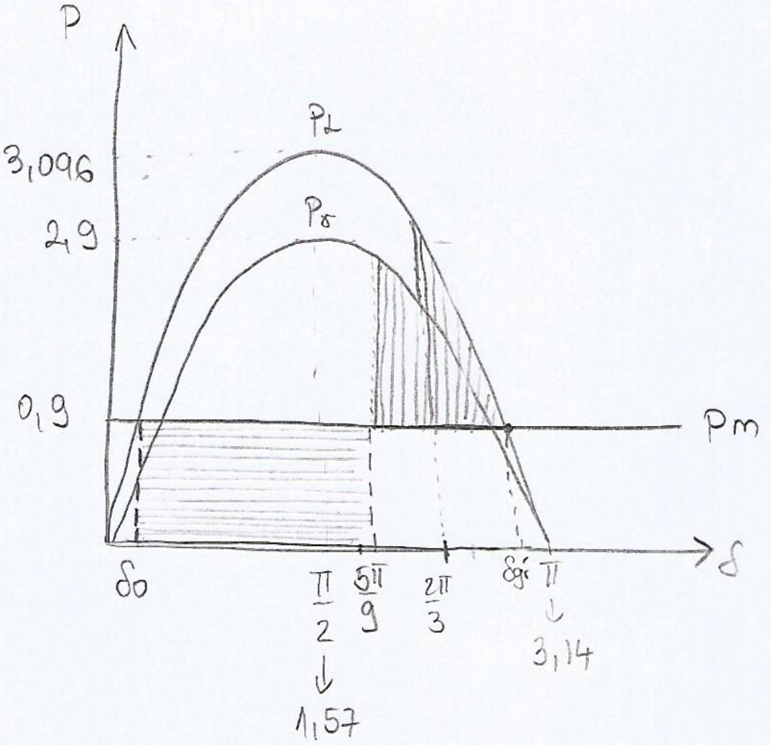
$$P_\beta = 0$$

NAKON KVARA



$$X_\gamma = 0,2 + 0,15 + 0,1 - 2\cdot 0,025 = 0,4$$

$$P_\gamma = \frac{|e'||U_\infty|}{X_\gamma}\sin\delta = 2,9\sin\delta$$



$P_\alpha = 3{,}096$

$P_\beta = 0$

$P_\gamma = 2{,}9$

$P_m = 0{,}9$

$2{,}094$ = UKLOP $\delta_u = 2\pi/3$

$1{,}745$ = ISKLOP $\delta_i = \frac{5\pi}{9}$

$\delta_0 = 0{,}294$

$\delta_{gr} \Rightarrow P_\alpha = P_m$

$\delta_{gr} = \pi - \delta_0 = 2{,}847$

$$A_a = p_m\left(\frac{5\pi}{9} - \delta_0\right) = 0{,}9\left(\frac{5\pi}{9} - 0{,}294\right) = 1{,}306$$

$$A_d = \int_{\frac{5\pi}{9}}^{\frac{2\pi}{3}} (P_\gamma \sin\delta - p_m)\, d\delta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{2{,}847} (P_\alpha \sin\delta - p_m)\, d\delta =$$

$$= P_\gamma\left(-\cos\frac{2\pi}{3} + \cos\frac{5\pi}{9}\right) - p_m\left(\frac{2\pi}{3} - \frac{5\pi}{9}\right) + P_\alpha\left(-\cos 2{,}847 + \cos\frac{2\pi}{3}\right) - p_m\left(2{,}847 - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$= 2{,}9 \cdot 0{,}326 - 0{,}9 \cdot 0{,}349 + 3{,}096 \cdot 0{,}457 - 0{,}9 \cdot 0{,}752 =$$

$$= 1{,}369$$

$A_d > A_a$ Sustav je stabilan.