



**Универзитет у Београду
Електротехнички факултет**

Елементи електроенергетских система

– рачунске вежбе –

- **СИНХРОНИ ГЕНЕРАТОРИ**

Жељко Ђуришић

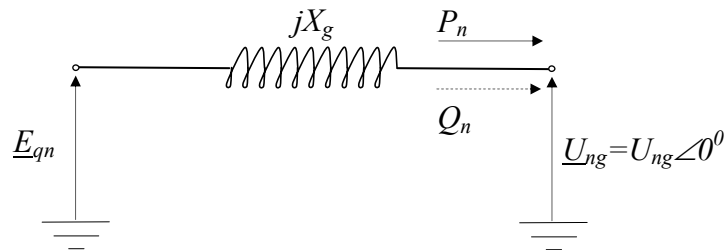
Београд, 2004.

ЗАДАТАК 1: Турбогенератор у ТЕ Морава има следеће параметре: $S_{ng}=150$ MVA; $P_{ng}=120$ MW; $Q_{ng}=90$ Mvar; $U_{ng}=13,8$ kV; $\cos \varphi_n=0,8$; $x_g=181\%$.

Ако је генератор оптерећен са $P=100$ MW, при номиналној струји побуде и номиналном напону, израчунати колику реактивну снагу одаје у електроенергетски систем. Активне отпорности намотаја статора занемарити.

Решење:

Заменска шема турбогенератора за режиме рада када је генератор прикључен на трофазну мрежу са директним редоследом напона на његовим статорским прикључцима приказан је на слици (на слици су назначене величине које одговарају номиналном радном режиму). На основу података који су дати за номинални режим рада генератора, може се одредити електромоторна сила услед побуде генератора (E_{qn}) при номиналној побудној струји генератора.



На основу заменске шеме генератора може се написати следећа релација:

$$\underline{E}_{qn} = U_{ng} + jX_g \underline{I} = U_{ng} + jX_g \left(\frac{S_{ng}}{U_{ng}} \right)^* = U_{ng} + jX_g \left(\frac{P_{ng} - jQ_{ng}}{U_{ng}} \right) = U_{ng} + \frac{X_g Q_{ng}}{U_{ng}} + j \frac{X_g P_{ng}}{U_{ng}}.$$

У претходној једначини сви напони су међуфазни, све снаге су трофазне, а струја I је фиктивна рачунска струја генератора, тј. стварна фазна струја (која протиче кроз статорске прикључне проводнике) помножена са $\sqrt{3}$, односно $I = \sqrt{3} I_f$. Синхрона реактанса генератора X_g представља збир реактансе расипања статорског фазног намотаја X_r и реактансе магнетнења X_μ , када би се генератор магнетно са статорске стране трофазним симетричним директним системом струја.

Синхрона реактанса генератора (на напонском нивоу генератора) је:

$$X_g = \frac{x_g (\%) U_{ng}^2}{100 S_{ng}} = 1,81 \frac{13,8^2}{150} = 2,298 \Omega.$$

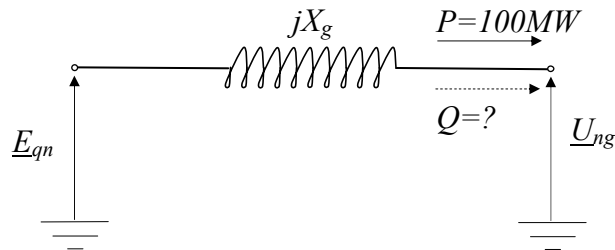
Уважавајући претходне релације може се спровести следећи рачун:

$$\underline{E}_{qn} = \left(U_{ng} + \frac{x_g}{100} U_{ng} \sin \varphi_n \right) + j \frac{x_g}{100} U_{ng} \cos \varphi_n.$$

Ефективна вредност електромоторне силе генератора услед побуде номиналном струјом је:

$$E_{qn} = U_{ng} \sqrt{\left(1 + \frac{x_g}{100} \sin \varphi_n\right)^2 + \left(\frac{x_g}{100} \cos \varphi_n\right)^2} = 13,8 \sqrt{(1 + 1,81 \cdot 0,6)^2 + (1,81 \cdot 0,8)^2} = 35,04 \text{ kV}.$$

По услови задатка генератор је остао побуђен номиналном струјом побуде и при задатом оптерећењу. Пошто је побудна струја остала номинална, онда је и њена одговарајућа електромоторна сила остала номинална.



Уважавајући претходну констатацију и услов да је напон на прикључцима генератора номиналан, на основу угаоних карактеристика турбогенератора може се одредити тражена реактивна снага коју турбогенератор одеаје у ЕЕС.

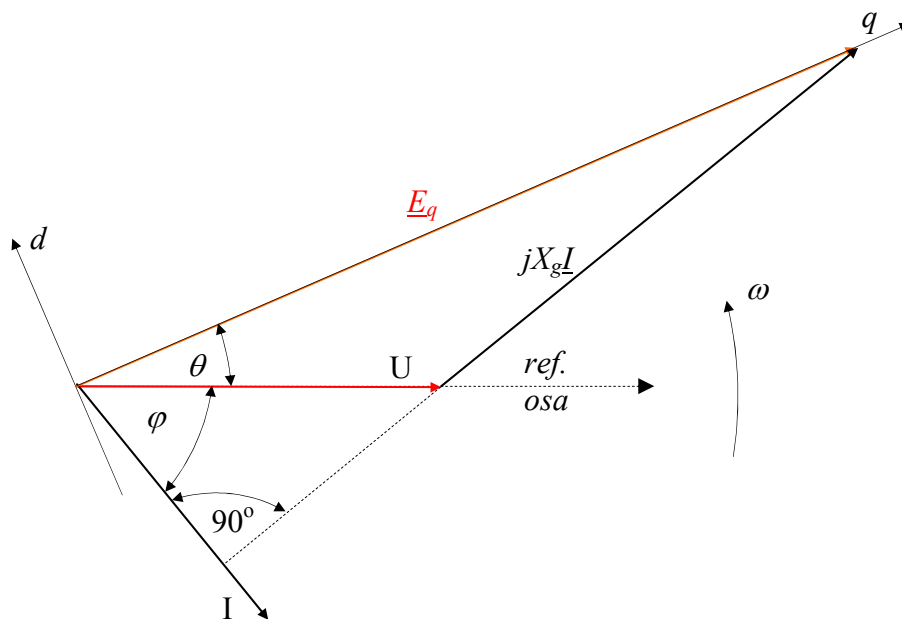
$$P = \frac{E_{qn} U_{ng}}{X_g} \sin \theta \Rightarrow \theta = \arcsin\left(\frac{X_g P}{E_{qn} U_{ng}}\right) = \arcsin\left(\frac{100 \cdot 2,298}{35,04 \cdot 13,8}\right) = 28,37^\circ$$

$$Q = \frac{E_{qn} U_{ng}}{X_g} \cos \theta - \frac{U_{ng}^2}{X_g} = \frac{35,04 \cdot 13,8}{2,298} \cos 28,37 - \frac{13,8^2}{2,298} \approx 102,3 \text{ M var}$$

Фазни померај између напона и струје генератора за дати режим рада је:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right) = \arctg\left(\frac{102,3}{100}\right) = 50,72^\circ.$$

Фазорски дијаграм напона и струја генератора за анализрани радни режим је приказан на слици. На дијаграму су занемарени падови напона на омској отпорности статорског намота.



На основу фазорског дијаграма може се уочити да је индукована електромоторна сила E_q (која делује испред синхроне реактансе X_g на заменској шеми) у датом радном режиму, по модулу већа од напона на прикључцима статора U (генератор је надпобуђен). Дакле, у надпобуђеном режиму ток реактивне енергије је од генератора ка мрежи јер је напон испред синхроне реактансе већи од напона на прикључцима генератора (иза синхроне реактансе). Један део ове реактивне снаге "троши" се на синхроној реактанси (на магнећење машине и расипни флуks) и то је такозвана унутрашња реактивна енергија

генератора ($\frac{U^2}{X_g}$ у изразу за угаону карактеристику по реактивној снази), преостали део се ињектира у мрежу. Уколико би побуда генератора била мала, односно ако би $E_q < U$ (потпобуђена машина), онда би ток реактивне енергије био из мреже ка машини.

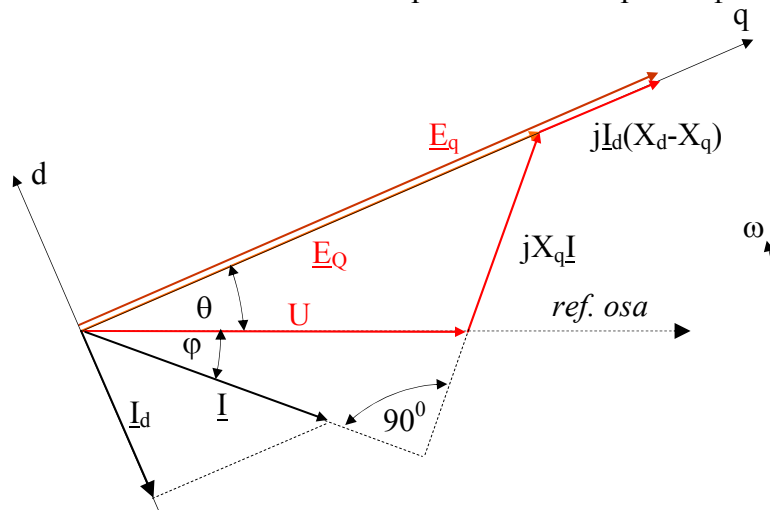
Такође, треба уочити да обртни фазор електромоторне силе E_q предњачи обртном фазору напона U (за угао снаге θ), па је ток активне снаге од генератора ка мрежи (један мали део те снаге се троши у намотима статора (у виду Фулових губитака) и у гвожђу статора). Ако би генератор радио као мотор, онда би фазор напона предњачио фазору електромоторне силе, тј. ток активне снаге би био из мреже ка синхроној машини.

ЗАДАТАК 2: Хидрогенератор у ХЕ Зворник има следеће параметре: $S_{ng}=30 \text{ MVA}$; $P_{ng}=24 \text{ MW}$; $Q_{ng}=18 \text{ Mvar}$; $\cos \varphi_n=0,8$; $U_{ng}=11 \text{ kV}$; $x_{d\%}=147,5\%$; $x_{q\%}=77\%$.

Ако је генератор оптерећен са $P = 20 \text{ MW}$ при номиналном напону и номиналној струји побуде, колику реактивну снагу одаје у ЕЕС. Активне отпорности намотаја статора занемарити.

Решење:

Код хидрогенератора ротор има различите магнетске отпорности у правцу осе побудног намотаја (d оса) и попречне осе (q оса). Дакле, хидрогенератор има различите магнетске отпорности када се фазор флукса, којег ствара струја кроз статорски намот (реакција индукта), нађе у правцу d и у правцу q осе, односно генератор има различите синхроне реактансе у правцу d и q осе. Из тог разлога је у општем случају за хидрогенератор немогуће формирати јединствену заменску шему, па је често за анализу радних режима погодно поћи од векторског дијаграма напона и струја хидрогенератора, који је за случај претежно индуктивног оптерећења генератора приказан на слици (занемарени су падови напона на омским отпорностима статорских фазних намотаја):



Ознаке на дијаграму имају следеће значење:

E_q –електромоторна сила (међуфазна вредност) која потиче од побудне струје генератора (у стационарним режимима рада пропорционална је побудној струји),

I - рачунска струја генератора (струја кроз статорске фазне намотаје (који су везани у звезду) помножена са $\sqrt{3}$),

I_d - компонента рачунске струје статора по d осе,

U - међуфазни напон на прикључцима статора.

E_Q - фиктивна електромоторна сила (међуфазна вредност) иза реактансе x_q .

Прорачун синхроних реактанси генератора по d и q осе:

$$X_d = \frac{x_{d\%}}{100} \frac{U_{ng}^2}{S_{ng}} = \frac{147,5}{100} \frac{11^2}{30} = 5,95 \Omega, \quad X_q = \frac{x_{q\%}}{100} \frac{U_{ng}^2}{S_{ng}} = \frac{77}{100} \frac{11^2}{30} = 3,105 \Omega.$$

Када је генератор у номиналном режиму рада, електромоторна сила E_Q се може срачунати као:

$$\underline{E}_{Qn} = U_{ng} + \frac{Q_n X_q}{U_{ng}} + j \frac{P_n X_d}{U_{ng}} = 11 + \frac{18 \cdot 3,105}{11} + j \frac{24 \cdot 3,105}{11} = 17,45 \angle 22,84^\circ \text{ kV}$$

Пошто је фазор напона усвојен да коинцидира са референтном осом, угао генератора је: $\theta_n = 22,84^\circ$.

Номинална фазна струја генератора може се срачунати на основу датих података за номинални режим:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_n} = \frac{24}{\sqrt{3} \cdot 11 \cdot 0,8} = 1,57 \text{ kA}.$$

Фазни померај струје у односу на напон при номиналном режиму је:

$$\cos \varphi_n = 0,8 \Rightarrow \varphi_n = 36,87^\circ.$$

Компоненте струје статора у правцу оса d и q су:

$$I_{qn} = I_n \cos(\varphi + \theta) = 1,575 \cos(36,87 + 22,84) = 0,794 \text{ kA};$$

$$I_{dn} = \sqrt{I_n^2 - I_{qn}^2} = \sqrt{1,575^2 - 0,794^2} = 1,36 \text{ kA}.$$

Сада се може срачунати ефективна вредност електромоторне силе (међуфазна вредност) услед побуде генератора номиналном побудном струјом:

$$E_{qn} = E_{Qn} + (X_d - X_q) \sqrt{3} I_d = 17,45 + (5,95 - 3,105) \cdot \sqrt{3} \cdot 1,36 = 24,15 \text{ kV}.$$

Пошто према услови задатка, за дати режим, побудна струја одговара номиналној, онда је и електромоторна сила услед побуде номинална. На основу ове констатације може се из угаоних карактеристика хидрогенератора срачунати одговарајући угао снаге генератора θ и тражена реактивна снага генерисања Q .

$$P = \frac{E_{qn} U_n}{X_d} \sin \theta + \frac{U_n^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \Rightarrow 20 = \frac{24,15 \cdot 11}{5,95} \sin \theta + \frac{11^2}{2} \left(\frac{1}{3,105} - \frac{1}{5,95} \right) \sin 2\theta$$

$$9,317 \sin 2\theta + 44,647 \sin \theta - 20 = 0 \Rightarrow \theta = 18,74^\circ.$$

Претходна једначина се може релативно брзо итеративно решити, пошто угао снаге у анализираном режиму мора бити мањи од угла снаге који је прорачунат за номинални режим јер је у анализираном режиму снага коју генератор одаје систему мања а напон и побуда генератора су остали непромењени.

$$Q = \frac{E_q U_n}{X_d} \cos \theta - U_n^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{X_q} - \frac{\cos^2 \theta}{X_d} \right) = \frac{24,15 \cdot 11}{5,95} \cos 18,74^\circ - 11^2 \left(\frac{\sin^2 18,74}{3,105} - \frac{\cos^2 18,74}{5,95} \right)$$

$$Q = 20,02 \text{ Mvar}.$$

ЗАДАТАК 3: Турбогенератор има следеће податке: $S_n=100 \text{ MVA}$, $P_n=80 \text{ MW}$, $Q_n=60 \text{ Mvar}$, $U_n=10,5 \text{ kV}$, $X_g=160\%$, $X_r=15\%$ (реактанса расипања фазних намотаја), номинална побудна струја $I_{pn}=450 \text{ A}$. Одредити однос броја навојака побудног и фазног намотаја генератора.

Решење:

Индукована електромоторна сила у фазним намотајима примара директно је пропорционална побудној струји (ако је магнетско коло линеарно) и брзини обртања ротора (побудног намотаја). Ефективна вредност индуковане електромоторне силе у фазним намотајима примара E_{qf} дата је следећом релацијом:

$$E_{qf} = \frac{I_p M_d \omega}{\sqrt{2}},$$

где је M_d међусобна индуктивност фазног и побудног намотаја када им се осе поклапају, тј. :

$$M_d = \frac{N_p N_f}{\Lambda},$$

где су:

N_p - број навојака побудног намотаја,

N_f - броја навојака фазног намотаја,

Λ - магнетска отпорност магнетског кола ротор – статор.

Синхрона реактанса генератора X_g представља збир реактансе расипања статора X_r и реактансе магнећења X_μ , када би се генератор магнетисао са статорске стране. На основу датих података може се израчунати реактанса магнећења X_μ :

$$x_\mu (\%) = x_g (\%) - x_r (\%) = 160 - 15 = 145\%$$

$$X_\mu = \frac{x_\mu (\%) U_n^2}{100 S_n} = \frac{145 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 100} = 1,5986 \Omega ;$$

$$X_g = \frac{x_g (\%) U_n^2}{100 S_n} = \frac{160 \cdot 10,5^2}{100 \cdot 100} = 1,764 \Omega ;$$

Магнетска отпорност кола ротор – статор је иста и ако би се магнећење машине вршило са статорске стране, па важи:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega} = \frac{3 N_f^2}{2 \Lambda} \Rightarrow \Lambda = \frac{3 N_f^2}{2 L_\mu}.$$

У претходној релацији коефицијент $\frac{3}{2}$ је последица чињенице да магнећење са статорске стране врше три симетричне фазне струје које протичу кроз фазне намотаје који су међусобно просторно померени за по 120° .

Користећи претходне једнакости могу се успоставити следеће аналитичке везе:

$$M_d = \frac{N_p N_f}{\frac{3 N_f^2}{2 L_\mu}} = \frac{2 N_p}{3 N_f} L_\mu \Rightarrow E_{qf} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_p L_\mu \omega \frac{N_p}{N_f} \Rightarrow \frac{N_p}{N_f} = \frac{3 E_{qf}}{\sqrt{2} I_p X_\mu}.$$

С обзиром да је дат номинални режим рада генератора, на основу угаоних карактеристика генератора може се срачунати индукована електромоторна сила при номиналној побудној струји.

$$\left. \begin{aligned} P_n &= \frac{E_{qn} U_n}{X_g} \sin \theta_n; \\ Q_n &= \frac{E_{qn} U_n}{X_g} \cos \theta_n - \frac{U_n^2}{X_g} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_n &= \frac{P_n}{Q_n + \frac{U_n^2}{X_g}} = \frac{80}{60 + \frac{10,5^2}{1,764}} = 0,653 \Rightarrow \theta_n = 33,14^\circ \\ E_{qn} &= \frac{X_g P_n}{U_n \sin \theta_n} = \frac{1,764 \cdot 80}{10,5 \sin 33,14} = 24,58 \text{ kV} \Rightarrow E_{qnf} = \frac{E_{qn}}{\sqrt{3}} = 16,5 \text{ kV} \end{aligned}$$

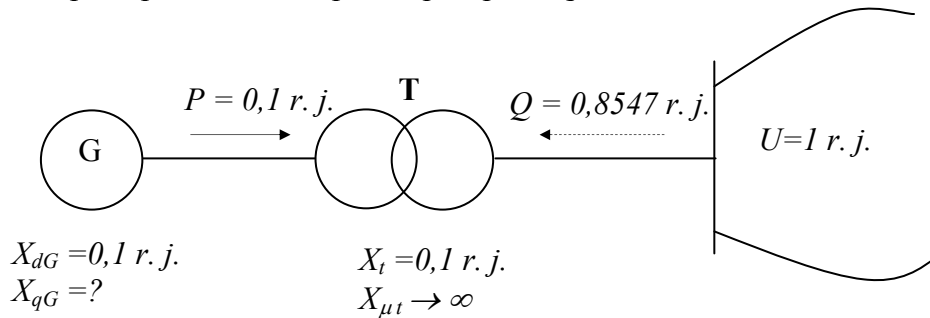
Однос броја навојака побудног и фазног намотаја је:

$$\frac{N_p}{N_f} = \frac{3 E_{qnf}}{\sqrt{2} I_{pn} X_\mu} = \frac{3 \cdot 16,5}{\sqrt{2} \cdot 0,45 \cdot 1,5986} = 48,66.$$

У претходном прорачуну је претпостављено да је статорски намот везан у звезду (што је и најчешћи случај у пракси). Уколико би статорски намот био везан у троугао онда би однос броја навојака побудног и фазног намотаја био:

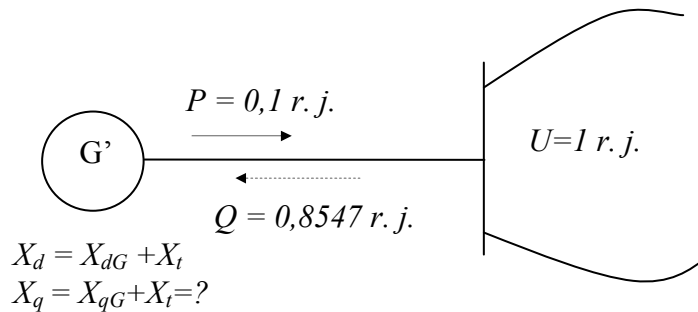
$$\frac{N_p}{N_{f\Delta}} = \sqrt{3} \cdot 48,66.$$

ЗАДАТАК 4: Синхрони хидрогенератор је преко блок-трансформатора везан на сабирнице константног напона. На слици је приказан режим када је генератор непобуђен. Колика је синхрона реактанса хидрогенератора по q оси?



Решење:

При решавању задатака погодно је блок генератор – трансформатор посматрати као еквивалентни генератор чије су реактансе расипања фазних намотаја увећане за реактансу расипања блок - трансформатора.



При оваквим еквивалентирањима треба имати у виду да струје кроз фазне намотаје еквивалентног генератора не одговарају стварним струјама статора, односно еквивалентирањем се може анализирати рад генератора према мрежи. При прорачуну напона и струја реалног генератора мора се уважити трансформација величина кроз блок трансформатор.

За еквивалентни хидрогенератор могу се дефинисати угаоне карактеристике:

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta;$$

$$Q = \frac{E_q U}{X_d} \cos \theta - U^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{X_q} + \frac{\cos^2 \theta}{X_d} \right).$$

Треба напоменути да су угаоне карактеристике изведене са генераторским позитивним смеровима за активну и реактивну снагу, тј. када генератор одаје реактивну снагу ЕЕС-у она је позитивна, такође и активна снага је позитивна ако је генератор одаје у ЕЕС (могући су режими генератора када он узима активну снагу из мреже, односно када ради као синхрони мотор).

С обзиром да је према задатом режиму смер реактивне енергије од мреже ка еквивалентном генератору, треба у угаоним карактеристикама узети да је реактивна снага еквивалентног генератора $Q < 0$, односно $Q = -0,8547 \text{ r. j.}$.

У задатом режиму искључена је побуда генератора па је електромоторна сила услед побуде генератора $E_q = 0$. У оваквом режиму генератор може генерисати извесну активну снагу захваљујући разлици у магнетским отпорностима по d и q оси, односно хидрогенератор без побуде ради као релуктантна машина. У оваквим условима рада генератор се магнети из мреже, односно мора бити $Q < 0$.

Одговарајући рачун се може спровести на основу угаоних карактеристика у којима је потребно уважити да је $E_q = 0$:

$$P = \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \Rightarrow \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} = \frac{2P}{U^2 \sin 2\theta} \Rightarrow \frac{1}{X_q} = \frac{2P}{U^2 \sin 2\theta} + \frac{1}{X_d},$$

$$Q = -U^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{X_q} + \frac{\cos^2 \theta}{X_d} \right) \Rightarrow Q = -U^2 \left[\left(\frac{2P}{U^2 \sin 2\theta} + \frac{1}{X_d} \right) \sin^2 \theta + \frac{\cos^2 \theta}{X_d} \right]$$

$$Q = -U^2 \left(\frac{2P \sin^2 \theta}{2U^2 \sin \theta \cos \theta} + \frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{X_d} \right) = -U^2 \left(\frac{1}{X_d} + \frac{P}{U^2} \operatorname{tg} \theta \right) \Rightarrow \operatorname{tg} \theta = -\frac{Q}{P} - \frac{U^2}{PX_d}.$$

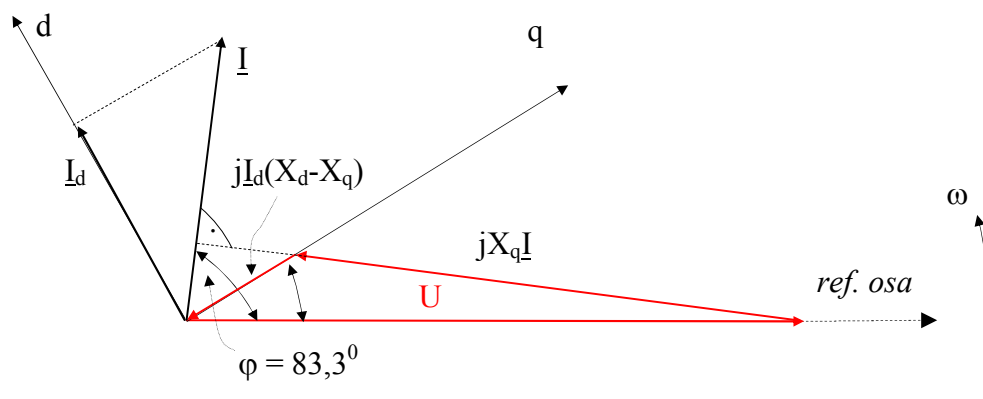
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{-(-0,8547)}{0,148} - \frac{1^2}{1,3 \cdot 0,148} = 0,5775 \Rightarrow \theta \approx 30^\circ.$$

Пошто је прорачунати угао снаге $\theta < 45^\circ$ дати радни режим је могућ, јер се генератор налази у статички стабилној зони (теоријска граница стабилности за непобуђени хидрогенератор је 45°). Сада се може израчунати тражена синхрона реактанса хидрогенератора:

$$\frac{1}{X_q} = \frac{2P}{U^2 \sin 2\theta} + \frac{1}{X_d} = \frac{2 \cdot 0,148}{1^2 \sin 60^\circ} + \frac{1}{1,3} = 1,111 \text{ r. j.} \Rightarrow X_q = 0,9 \text{ r. j.}$$

$$X_{qG} = X_q - X_t = 0,9 - 0,1 = 0,8 \text{ r. j.}$$

На наредној слици је приказан фазорски дијаграм напона и струја за дати режим рада еквивалентног хидрогенератора.



ЗАДАТАК 5: Трофазни синхронни генератор са цилиндричним ротором има податке: $25MVA$, $20kV$, $50Hz$, спрега Y . Отпор статора може се занемарити. Генератор ради на крутој мрежи номиналног напона ($U_n = 20 kV$) и учестаности.

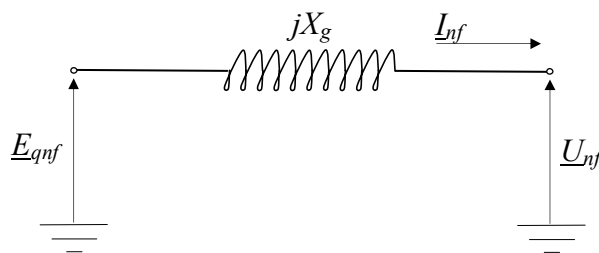
Карактеристика празног хода (фазна електромоторна сила у функцији струје побуде) снимљена је при номиналној брзини и представљена следећом табелом:

$I_p [A]$	20	50	80	100	120	140	160	180	200
$E_{qf} [kV]$	1,73	8,53	16,90	18,48	20,13	21,46	22,53	23,33	24

Када је струја побуде $100A$ генератор у мрежу испоручује номиналну струју уз индуктивни фактор снаге $\cos \varphi = 0,8$. Колика треба да буде струја побуде да би генератор у мрежу испоручивао исту активну снагу уз фактор снаге $\cos \varphi = 1$?

Решење:

Еквивалентна заменска шема турбогенератора са назначеним величинама које одговарају номиналном режиму приказана је на слици:



Једначина напонске равнотеже синхронног надпобуђеног генератора је:

$$\underline{E}_{qnf} = \underline{U}_{nf} + jX_g I_{nf} .$$

Номинални фазни напон и струја генератора су:

$$U_{nf} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 11,55kV ,$$

$$I_{nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 721,69A .$$

Активна и реактивна снага коју генератор испоручује мрежи у номиналном режиму су:

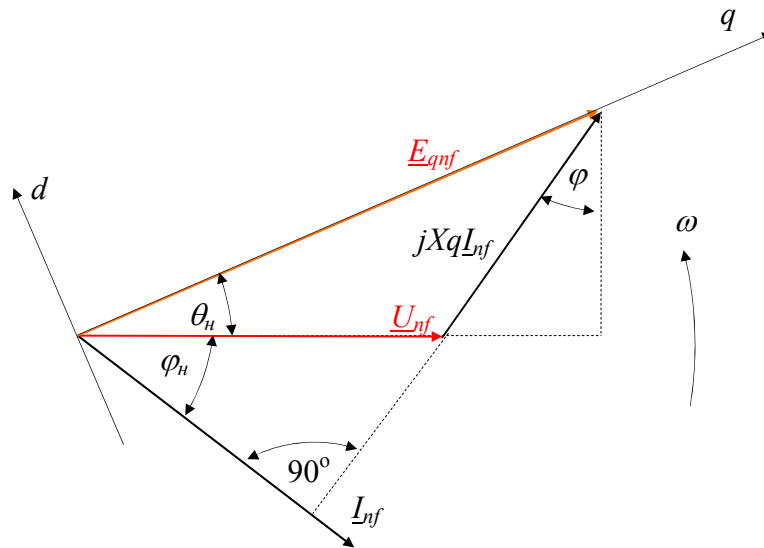
$$P_n = S_n \cos \varphi_n = 25 \cdot 10^6 \cdot 0,8 = 20 MW ,$$

$$Q_n = S_n \sin \varphi_n = 25 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 15 M var$$

Струји побуде од $100A$ из табеле одговара фазна вредност електромоторне силе

$$E_{qnf} = 18,48kV .$$

На следећој слици је приказан фазорски дијаграм напона за номинални режим:



На основу фазорског дијаграма пишу се следеће једначине које важе за номинални режим:

$$E_{qnf} \sin(\varphi_n + \theta_n) = U_{nf} \sin \varphi_n + X_g I_n$$

$$E_{qnf} \cos(\varphi_n + \theta_n) = U_{nf} \cos \varphi_n,$$

одакле је у номиналном режиму:

$$\cos(\varphi_n + \theta_n) = \frac{U_{nf} \cos \varphi_n}{E_{qnf}} = \frac{11,55 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{18,48 \cdot 10^3} = 0,5, \text{ па је}$$

$$\varphi_n + \theta_n = 60^\circ, \text{ односно } \theta_n = 60^\circ - \arccos 0,8 = 23,13^\circ.$$

Сада се може израчунати синхрона реактанса турбогенератора:

$$X_g = \frac{E_{qnf} \sin(\varphi_n + \theta_n) - U_{nf} \sin \varphi_n}{I_{nf}} = \frac{18,48 \cdot 10^3 \sin 60^\circ - 11,55 \cdot 10^3 \cdot 0,6}{721,69} = 12,57 \Omega.$$

Да би генератор испоручивао $P_1 = P_n = 20 MW$ при $\cos \varphi_1 = 1$ потребно је да струја генератора буде:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_1} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 1} = 577,35 A.$$

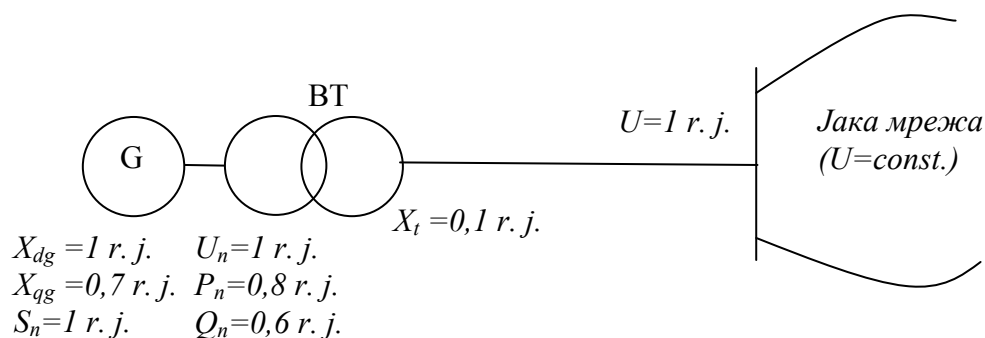
Пошто је у овом режиму $\varphi = 0^\circ$, троугао напона генератора на фазорском дијаграму је правоугли, па је индукована електромоторна сила у том режиму:

$$E_{qf1} = \sqrt{U_{nf}^2 + (X_g I_1)^2} = \sqrt{(11,55 \cdot 10^3)^2 + (12,57 \cdot 577,35)^2} = 13,625 kV$$

Фазној вредности електромоторне силе од $E_{qf1} = 13,58kV$ одговара струја побуде $50A < I_{p1} < 80A$. Линеарном интерполацијом криве магнећења између тачака $(50A, 8,53kV)$ и $(80A, 16,90kV)$ може се одредити потребна струја I_{p1} која одговара електромоторној сили E_{qf1} .

$$(E_{qf1} - 8,53 \cdot 10^3) = \frac{16,9 \cdot 10^3 - 8,53 \cdot 10^3}{80 - 50} (I_{p1} - 50) \Rightarrow I_{p1} = 68,26A.$$

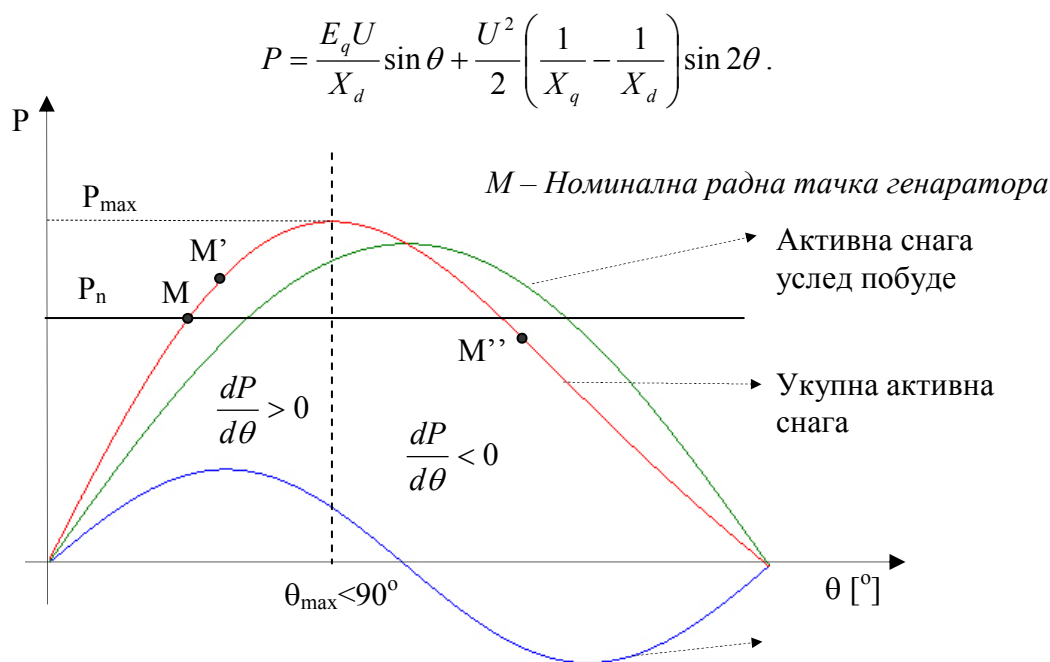
ЗАДАТАК 6: Одредити угао при коме блок хидрогенератор - трансформатор долази на границу статичке стабилности ако му је побудна струја једнака половини номиналне побудне струје ($I_f = I_{fn}/2$). Генератор преко блок – трансформатора (ВТ) ради на сабирницама јаке мреже, као на слици.



Снаге се односе на блок генератор-трансформатор.

Решење:

Хидрогенератор претвара механичку снагу погонске машине (хидротурбине) у електричну. Да би постојало стационарно стање (константна брзина обртања ротора генератора) потребно је да постоји баланс између електричне снаге генератора (снага коју он одаје потрошачу или ЕЕС-у увећана за губитке у генератору) и механичке снаге коју му предаје турбина. Уколико се из неког разлога (нпр. квара) краткотрајно наруши овај баланс, тако да механичка снага турбине буде већа од електричне снаге генератора, онда ће се "вишак" механичке енергије "трошити" на убрзање ротора генератора (сходно Њутновој механичкој једначини), односно на повећање кинетичке енергије ротора. Да ли ће се генератор након престанка поремећаја вратити у радно стање пре настанка поремећаја (задржати синхронизам) зависи од величине и дужине трајања поремећаја (дебаланса) и радног стања из којег је наступио поремећај. Анализа се може спровести на основу угаоне карактеристике хидрогенератора по активној снази која је илустрована на слици.



Ако је услед поремећаја ротор генератора убрзао и прешао из номиналног радног режима (којем одговара радна тачка М) у режим којем по престанку поремећаја одговара радна тачка М', онда ће по престанку поремећаја бити дебаланс у снагама такав да је електрична снага генератора већа од механичке снаге коју добија од турбине. Овај дебаланс ће условити смањење брзине обртања (смањење угла снаге θ) генератора и повратак у радно стање које је претходило поремећају (тачку М).

Ако је поремећај био велики, тако да по престанку поремећаја угао снаге одговара радној тачки М', онда ће по престанку поремећаја бити дебаланс у снагама такав да је механичка снага погонске турбине већа од електричне снага генератора па ће ротор наставити да повећава брзину, односно генератор ће *"испасти из синхронизма"*.

Колики поремећај може генератор успешно да преброди зависи од радне тачке из које је наступио тај поремећај, односно од синхронизационе снаге $P_s = \frac{dP}{d\theta}$ коју генератор има у одређеном радном режиму. Што је већа синхронизациона снага то је и већи поремећај након којег генератор може остати у синхронном раду (задржати синхронизам). Синхронизациона снага се за конкретан генератор и одређену побуду смањује са повећањем угла снаге, тако да при граничном углу θ_{\max} она постаје једнака 0. Угао θ_{\max} назива се теоријска граница статичке стабилности.

На основу слике може се закључити да се угао на теоријској граници статичке стабилности може наћи из услова:

$$\frac{dP}{d\theta} = 0 = \frac{E_q U}{X_d} \cos \theta + U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta$$

Из угаоних карактеристика за номинални режим може се израчунати номинална електромоторна сила услед побуде:

$$P_n = \frac{E_{qn} U_n}{X_{de}} \sin \theta_n + \frac{U_n^2}{2} \left(\frac{1}{X_{qe}} - \frac{1}{X_{de}} \right) \sin 2\theta_n \quad \Rightarrow \quad \operatorname{tg} \theta_n = \frac{X_{qe} P_n}{U^2 + X_{qe} Q_n} = \frac{0,8 \cdot 0,8}{1^2 + 0,8 \cdot 0,6} = 0,43$$

$$Q_n = \frac{E_{qn} U_n}{X_{de}} \cos \theta_n - U_n^2 \left(\frac{\sin^2 \theta_n}{X_{qn}} - \frac{\cos^2 \theta_n}{X_{dn}} \right)$$

$$\theta_n = 23,385^\circ$$

$$E_{qn} = \frac{P_n X_{de}}{U_n \sin \theta_n} - \frac{U_n X_{de}}{2 \sin \theta_n} \left(\frac{1}{X_{qe}} - \frac{1}{X_{de}} \right) \sin 2\theta_n = \frac{1 \cdot 1,1}{1 \cdot \sin 23,385^\circ} - \frac{1 \cdot 1,1}{2 \cdot \sin 23,385^\circ} \left(\frac{1}{0,8} - \frac{1}{1,1} \right) \sin 2 \cdot 23,385^\circ$$

$$E_{qn} = 1,87284 \text{ r. j.}$$

За задати режим побуда је једнака половини номиналне, па је и електромоторна сила услед побуде (претпоставка је да је магнетско коло линеарно):

$$E_q = \frac{E_{qn}}{2} = \frac{1,87284}{2} = 0,93642 \text{ r. j.}$$

Сада се може срачунати угао снаге блока на граници стабилности:

$$\frac{E_q U}{X_{de}} \cos \theta + U^2 \left(\frac{1}{X_{qe}} - \frac{1}{X_{de}} \right) \cos 2\theta = 0 \Rightarrow \frac{0,93642 \cdot 1}{1,1} \cos \theta + 1^2 \left(\frac{1}{0,8} - \frac{1}{1,1} \right) \cos 2\theta = 0$$

$$0,85133 \cos \theta + 0,34041 \cos 2\theta = 0$$

$$\theta_{\max} \approx 71,5^\circ .$$

ЗАДАТАК 7: Израчунати максималну реактивну снагу коју може да произведе хидрогенератор, при номиналном напону, ако је максимална побудна струја дефинисана номиналним режимом. Подаци о генератору су: $S_n=100 \text{ MVA}$; $\cos\varphi_n=0,8$; $U_n=21 \text{ kV}$; $x_d=120\%$; $x_q=80\%$.

Решење:

Активна и реактивна снага коју одаје хидрогенератор мрежи дефинисане су угаоним карактеристикама генератора:

$$P = \frac{E_q U_n}{X_d} \sin \theta + \frac{U_n^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

$$Q = \frac{E_q U_n}{X_d} \cos \theta - U_n^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{X_q} - \frac{\cos^2 \theta}{X_d} \right).$$

Анализирајући угаоне карактеристике хидрогенератора, може се закључити да ће генератор генерисати максималну реактивну снагу при максималној побуди и ако је угао снаге једнак нули, односно ако не генерише активну снагу ($P=0$).

Пошто је максимална побуда дефинисана номиналним режимом, може се на основу датих података за номинални режим израчунати номинална, односно максимална, електромоторна сила услед побуде.

Номинални режим генератора:

$$U_n = 21 \text{ kV},$$

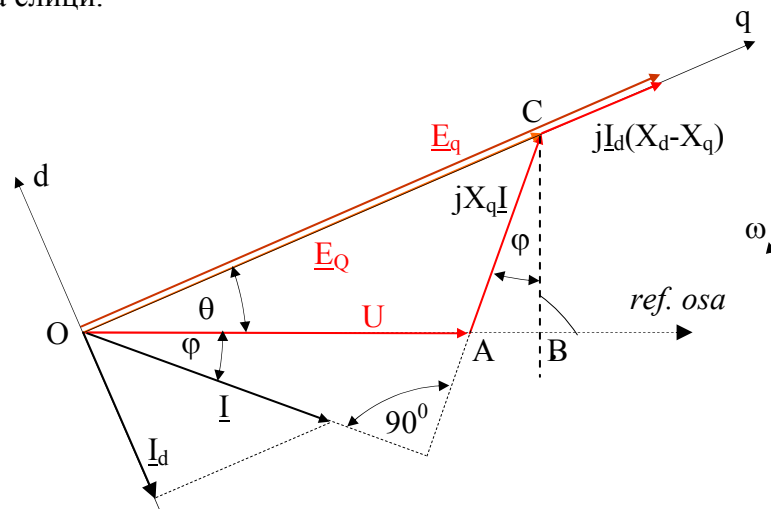
$$P_n = S_n \cos \varphi_n = 0,8 \cdot 100 = 80 \text{ MW},$$

$$Q_n = S_n \sin \varphi_n = 0,6 \cdot 100 = 60 \text{ M var}.$$

Нормализација величина:

$$\begin{aligned} U_b = U_n = 21 \text{ kV} \\ S_b = S_n = 100 \text{ MVA} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} U_n &= 1 \text{ r. j.} \\ P_n &= 0,8 \text{ r. j.} \\ Q_n &= 0,6 \text{ r. j.} \end{aligned}$$

Да би се израчунала електромоторна сила услед побуде при номиналном оптерећењу потребно је израчунати одговарајући угао снаге θ . Угао снаге се за неки познати радни режим може одредити на основу векторског дијаграма хидрогенератора који је приказан на слици.



Посматра се троугао $\triangle OBC$ који је назначен на дијаграму напона хидрогенератора:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\overline{BC}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{BC}}{\overline{OA} + \overline{AB}} = \frac{X_q I \cos \varphi}{U + X_q I \sin \varphi} = \frac{X_q I \cos \varphi}{U + X_q I \sin \varphi} \cdot \frac{1 \cdot U}{1 \cdot U} = \frac{X_q U I \cos \varphi}{U^2 + X_q U I \sin \varphi} = \frac{X_q P}{U^2 + X_q Q}$$

При номиналном режиму рада угао снаге хидрогенератора θ_n је:

$$\operatorname{tg} \theta_n = \frac{X_q P_n}{U_n^2 + X_q Q_n} = \frac{0,8 \cdot 0,8}{1^2 + 0,8 \cdot 0,6} = 0,4324 \Rightarrow \theta_n = 23,38^\circ$$

Прорачун електромоторне силе, услед побуде која одговара номиналном режиму рада генератора може се сада извршити на основу угаоних карактеристика:

$$P_n = \frac{E_{qn} U_n}{X_d} \sin \theta_n + \frac{U_n^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta_n \Rightarrow E_{qn} = \frac{X_d}{U_n \sin \theta_n} \left(P_n - U_n^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{\sin 2\theta_n}{2} \right)$$

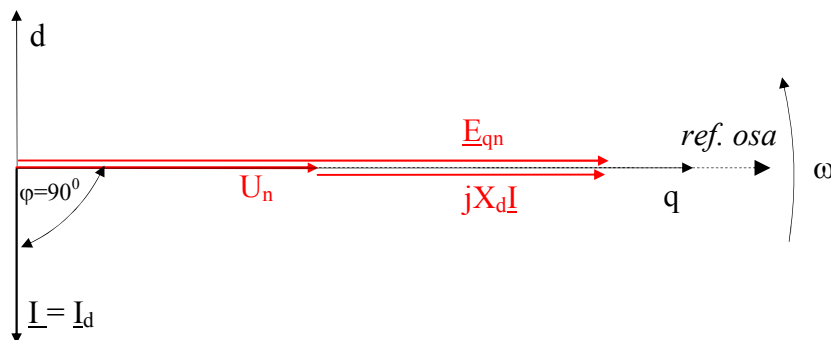
$$E_{qn} = \frac{1,2}{1 \cdot 0,3969} \left(0,8 - 1^2 \left(\frac{1}{0,8} - \frac{1}{1,2} \right) \frac{0,7286}{2} \right) = 1,96 \text{ r. j.}$$

Режим генерисања максималне реактивне снаге:

$$Q_{\max} = Q_{(\theta=0^\circ)} = \frac{E_{qn} U_n}{X_d} - U_n^2 \frac{1}{X_d} = \frac{E_{qn} U_n - U_n^2}{X_d} = \frac{1,96 \cdot 1 - 1^2}{1,2} = 0,8 \text{ r. j.}$$

$$Q_{\max} = Q_{\max} (\text{r. j.}) \cdot S_{\text{baz}} = 0,8 \cdot 100 = 80 \text{ M var.}$$

На наредној слици је приказан фазорски дијаграм напона и струја хидрогенератора за режим генерисања максималне реактивне снаге:



На основу дијаграма се може закључити да, у режимима када хидрогенератор не генерише активну снагу, флуксеве у машини (побудни и флукс који стварају статорске струје (ракација индуката)) делују у правцу магнетске осе побудног намотаја (d), из тог разлога је за овакве режиме меродавна само синхрона реактанса по d осе.

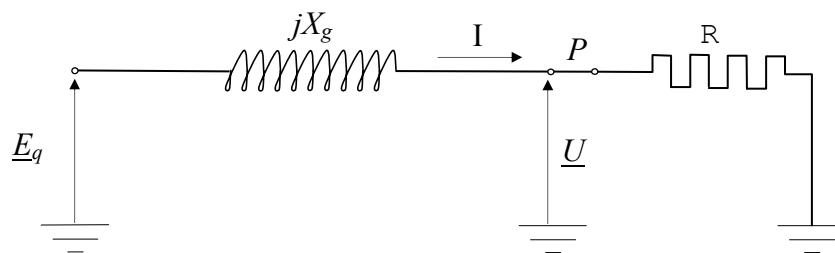
ЗАДАТАК 8: Синхрони турбогенератор побуђен је тако да у празном ходу има напон $U_0 = \sqrt{2} U_n$. Израчунати напон и снагу генератора ако се на њега прикључи чисто активан потрошач, са отпорношћу једнакој синхроној реактанси генератора. Побудна струја и брзина генератора су константне.

Подаци о генератору су: $S_n = 100 \text{ MVA}$, $X_g = 100\%$, $U_n = 10,5 \text{ kV}$.

Решење:

У овом задатку анализира се изоловани рад турбогенератора. Када је генератор изолован од мреже, онда се губи појам синхроне брзине (која је била дефинисана мрежном учестаношћу), односно генератор успоставља радну брзину у зависности од карактеристика система *погонска машина – генератор – потрошач*.

С обзиром да је у овом случају потрошња чисто активна може се дати следећа заменска шема:



Када је прекидач P отворен (генератор се налази у празном ходу), напон на прикључцима генератора је $U_0 = E_q$. Према услову задатка побуда остаје непромењена па је и електромоторна сила услед побуде непромењена и при оптерећеном генератору (затворен прекидач P), тј. :

$$E_q = U_0 = \sqrt{2} U_n .$$

Задатак ће бити решаван у систему релативних јединица са базним вредностима:

$$U_{baz} = U_n = 10,5 \text{ kV} ; \quad S_{baz} = S_n = 100 \text{ MVA} .$$

У дефинисаном систему релативних јединица електромоторна сила E_q је:

$$E_q = \sqrt{2} \text{ r.j.}$$

С обзиром да кроз статорски намот протиче струја, услед реакције индукта и пада напона на реактанси расипања статорског намота који узрокује струја оптерећења, доћи ће до смањења напона на прикључцима генератора у односу на празан ход (уколико би оптерећење било капацитивно, онда би реакција индукта појачавала магнетноће машине па би генерално дошло до повећања напона). Промена напона изазвана оптерећењем се у заменској шеми моделује падом напона на синхроној реактанси генератора X_g .

На основу заменске шеме може се спровести следећи рачун:

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{E}{\sqrt{X_g^2 + R^2}} ,$$

где је, I фазна струја кроз намотаје генератора.

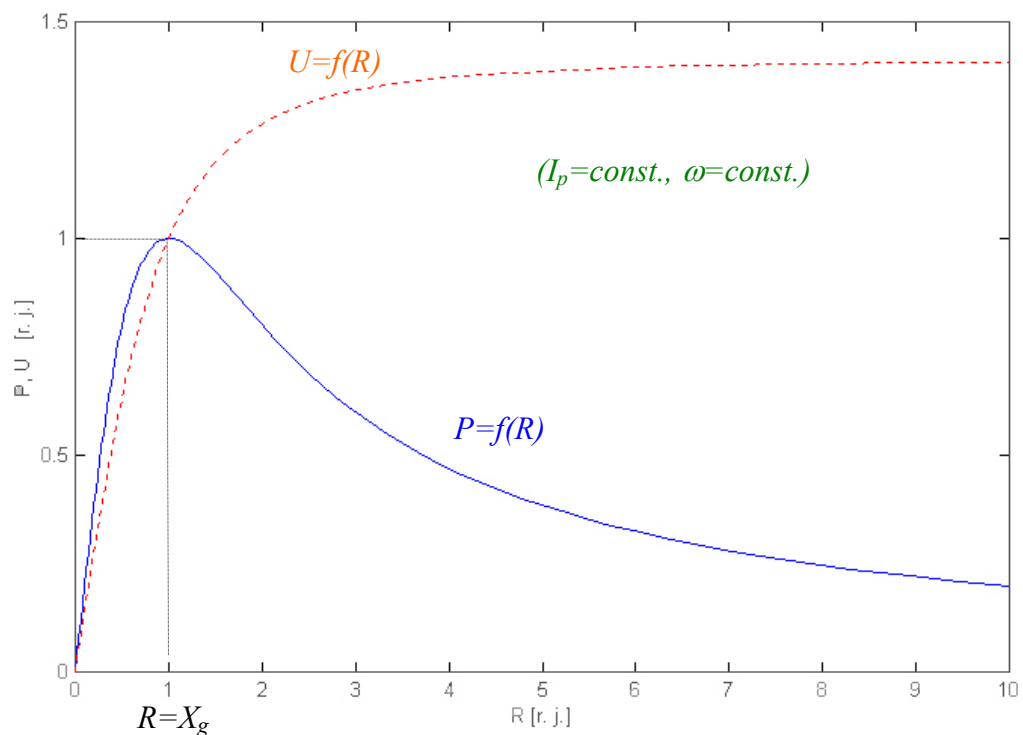
Међуфазни напон на прикључцима генартора је:

$$U = \sqrt{3}RI = \frac{RE}{\sqrt{X_g^2 + R^2}} = \frac{1 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{1+1}} = 1 \text{ r. j.}$$

Трофазна снага потрошача је:

$$P = 3RI^2 = R \frac{E^2}{X_g^2 + R^2} = 1 \frac{(\sqrt{2})^2}{1+1} = 1.$$

Треба уочити да је ово максимална снага коју генератор може да преда потрошачу при дефинисаној побудној струји и брзини обртања, јер се екстремум функције $P=f(R)$ ($I_p=const.$, $\omega=const.$) постиже при $R=X_g$, што се може уочити са следећег графика:

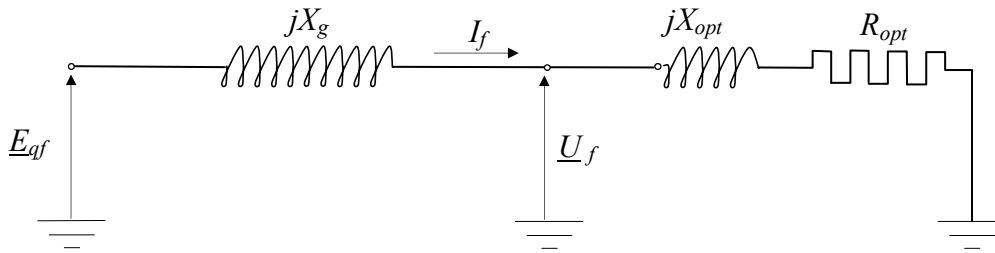


ЗАДАТАК 9: Трофазни синхронни генератор са цилиндричним ротором има следеће номиналне податке: $10kVA$, Y , $\cos \varphi = 0,8$, $400V$, $1500o / \text{min}$, $50Hz$. Синхрона реактанса је 2Ω , док се омски отпори намотаја, губици у гвожђу, трење и вентилација занемарују.

Генератор ради на изолованој симетричној пасивној мрежи, фазне импедансе $R = 50\Omega$, $L = 0,15H$. При брзини обртања од $1300o / \text{min}$ потребно је одредити активну и реактивну снагу коју генератор даје у мрежу, у овом режиму (струја побуде је номинална).

Решење:

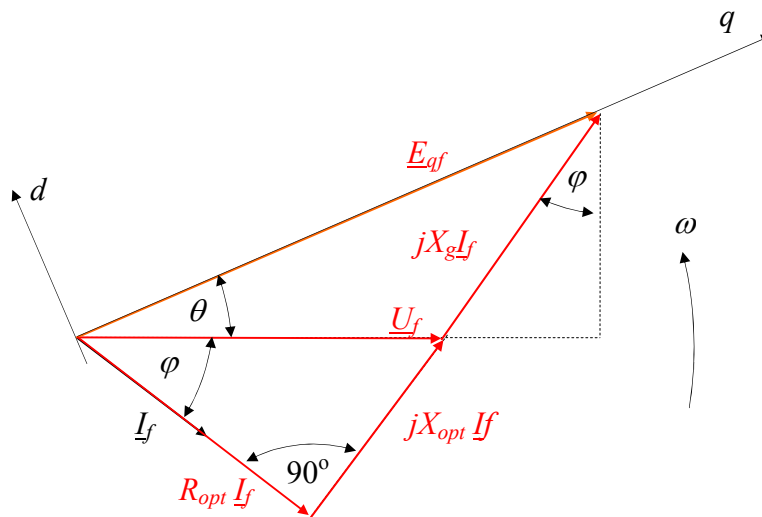
Еквивалентна шема за задати радни режим приказана је на слици:



На основу еквивалентне заменске шеме може се написати једначина напонске равнотеже синхроног надпобуђеног генератора:

$$\underline{E}_{qf} = \underline{U}_f + jX_g I_f,$$

где је I_f фазна струја кроз сататорске намотаје генератора. Фазорски дијаграм напона и струја који одговара датој заменској шемаи приказан је на слици:



Да би се одредила снага коју одаје генератор пасивној мрежи, потребно је одредити побудну електромоторну силу, која се има при номиналној побудној струји и задатој брзини обртања.

Номинална фазна струја генератора је:

$$I_{nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nf}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 14,43 A.$$

На основу фазорског дијаграма за номиналан режим могу се написати следеће једначине:

$$\begin{aligned} E_{qnf} \sin(\varphi_n + \theta_n) &= U_{nf} \sin \varphi_n + X_{gn} I_{nf} \\ E_{qnf} \cos(\varphi_n + \theta_n) &= U_{nf} \cos \varphi_n, \end{aligned}$$

одакле је у номиналном режиму:

$$\operatorname{tg}(\varphi_n + \theta_n) = \frac{U_{nf} \sin \varphi_n + X_{gn} I_{nf}}{U_{nf} \cos \varphi_n} = \frac{400/\sqrt{3} \cdot 0,6 + 2 \cdot 14,43}{400/\sqrt{3} \cdot 0,8} = 0,906,$$

односно,

$$\varphi_n + \theta_n = 42,18^\circ.$$

Фазна вредност електромоторне силе у номиналном режиму је:

$$E_{qnf} = \frac{U_{nf} \cos \varphi_n}{\cos(\varphi_n + \theta_n)} = \frac{400/\sqrt{3} \cdot 0,8}{\cos 42,18^\circ} = 249,31 \text{ V}.$$

Пошто је у задатом режиму брзина обртања мања од номиналне а побудна струја једнака номиналној, онда ће електромоторна сила при смањеној брзини обртања бити мања. Пошто је по услову задатка магнетно коло линеарно, онда је смањење електромоторне силе пропорционално смањењу брзине обртања, односно, електромоторна сила услед побуде за задати режим је:

$$E_{gf} = E_{qnf} \frac{n}{n_n} = 249,31 \frac{1300}{1500} = 216,1 \text{ V}.$$

Учестаност напона на прикључцима генератора директно је сразмерна брзини обртања генератора, тј. :

$$f = f_n \frac{n}{n_n} = 50 \frac{1300}{1500} = 43,33 \text{ Hz}.$$

Сада се могу прорачунати и реактансе које фигуришу у заменској шеми (претпоставка је да отпорност потрошње не зависи од фреквенције):

$$X_{g1} = X_g \frac{f}{f_n} = X_g \frac{n_1}{n_n} = 2 \cdot \frac{1300}{1500} = 1,73 \Omega$$

$$X_{opt} = \omega_{s1} L = 2\pi \cdot 43,33 \cdot 0,15 = 40,84 \Omega.$$

Фазна струја I_f коју генератор ињектира у мрежу је на основу заменске шеме:

$$I_f = \frac{E_{gf}}{\sqrt{R_{opt}^2 + (X_{g1} + X_{opt})^2}} = \frac{216,1}{\sqrt{50^2 + (1,73 + 40,84)^2}} = 3,291 \text{ A}$$

Активна и реактивна снага коју генератор предаје пасивној мрежи је:

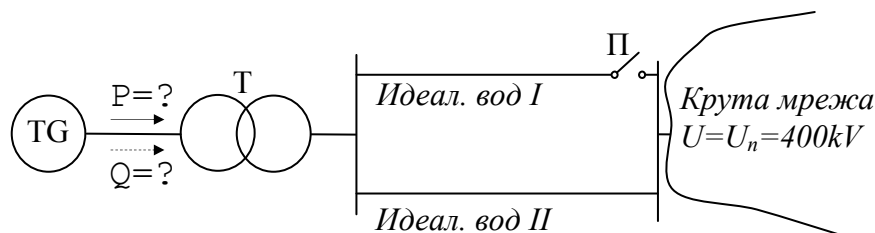
$$P = 3R_{opt}I_f^2 = 3 \cdot 50 \cdot 3,291^2 = 1,63 \text{ kW},$$

$$Q = 3X_{opt}I_f^2 = 3 \cdot 40,84 \cdot 3,291^2 = 1,33 \text{ kvar}.$$

Међуфазни напон на прикључцима генератора у задатом режиму је:

$$U = \sqrt{3}I_f Z_{opt} = \sqrt{3}I_f \sqrt{R_{opt}^2 + X_{opt}^2} = \sqrt{3} \cdot 3,291 \cdot \sqrt{50^2 + 40,84^2} = 368 \text{ V}.$$

ЗАДАТАК 10: Синхрони турбогенератор повезан је на круту мрежу са два идентична далековода, који се могу сматрати идеалним водовима. Ако се вод I налази у режиму празног хода (отворен је прекидач Π на крају вода, до мреже) а водом II се преноси његова природна снага, одредити: електромоторну силу побуде, акивну и реактивну снагу (P , Q) генерисања турбогенератора.



Потребни параметри су:

Генератор: $U_{ng} = 21 \text{ kV}$; $S_{ng} = 600 \text{ MVA}$; $x_g = 120 \%$.

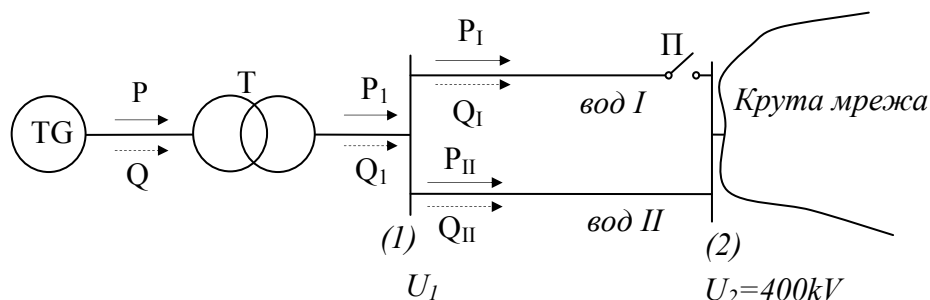
Блок трансформатор: $S_{nt} = S_{ng}$; $m_t = 400/21 \text{ (kV/kV)}$; $x_t = 10\%$.

Идеализовани водови: $U_n = 400 \text{ kV}$; $l = 200 \text{ km}$; $Z_c = 320 \Omega$.

Све активне отпорности занемарити.

Решење:

Токови снага и напонске прилике на делу ЕЕС који се разматра у задатку приказан је на слици.



Пошто је идеализовани вод II у режиму преноса природне снаге, ефективне вредности напона на воду су исте у свим тачкама, па је:

$$U_1 = U_2 = 400 \text{ kV}.$$

Треба водити рачуна да ови напони нису у фази, односно између напона дуж вода увек постоји фазни раскорак ако се водом преноси активна снага.

Пошто је вод II идеализован његова природна снага је чисто активна, па важи:

$$Q_{II} = 0,$$

$$P_{II} = \frac{U_1^2}{Z_c} = \frac{400^2}{320} = 500 \text{ MW}.$$

Вод I је у режиму празног хода. На почетку вода, до сабирница 1 постојаће извесна струја (тзв. струја пуњења вода). С обзиром да је вод I идеализован, струја пуњења је

чисто капацитивна (за реалне дужине водова), односно, вод у празном ходу представља извор реактивне енергије. Дакле, важи следећи рачун:

$$P_I = 0,$$

$$Q_I = -\frac{U_1^2}{Z_c} \operatorname{tg} \lambda$$

где је λ електрична угаона дужина вода, која је за идеални вод одређена производом дужине вода l и фазне константе β , односно:

$$\lambda = \beta \cdot l = 0,06 \cdot 200 = 12^\circ,$$

па је,

$$Q_I = -\frac{U_1^2}{Z_c} \operatorname{tg} \lambda = -\frac{400^2}{320} \operatorname{tg} 12^\circ = -106,28 \text{ M var.}$$

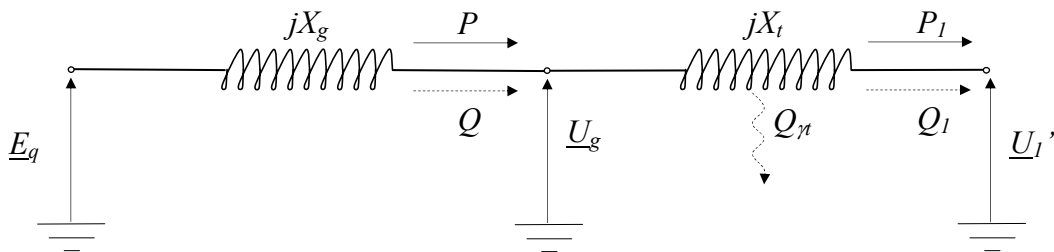
Знак "-" у претходном изразу означава да је смер снаге супротан од назначеног на слици, тј. од вода према сабирницама 1.

Сада се може срачунати снага кроз примарне прикључке блок – трансформатора:

$$P_1 = P_I + P_{II} = 0 + 500 = 500 \text{ MW};$$

$$Q_2 = Q_I + Q_{II} = -106,28 + 0 = -106,28 \text{ M var.}$$

Одговарајућа заменска шема дела ЕЕС-а који се анализира дата је на следећој слици:



Величине које фигуришу у заменској шеми потребно је свести на јединствен напонски ниво. С обзиром да је потребно израчунати електромоторну силу услед побуде генератора, најзгодније је све величине и параметре свести на напонски ниво генератора:

$$U_1' = U_1 \frac{1}{m_t} = 400 \frac{21}{400} = 21 \text{ kV}$$

$$X_t = \frac{x_t (\%) U_n^2}{100 S_{nt}} = \frac{10 \cdot 21^2}{100 \cdot 600} = 0,0735 \Omega;$$

$$X_g = \frac{x_g (\%) U_{ng}^2}{100 S_{ng}} = \frac{120 \cdot 21^2}{100 \cdot 600} = 0,882 \Omega.$$

При преношењу снаге кроз трансформатор имају се одређени губици реактивне снаге Q_n на расипање флукса у трансформатору, док су губици активне снаге занемарени:

$$P = P_1 = 500 \text{ MW}$$

$$Q = Q_1 + Q_{\gamma}$$

$$Q_{\gamma} = 3 \cdot X_t \cdot I_f^2,$$

где је I_f фазна струја кроз статорске намотаје генератора:

$$I_f = \frac{S}{\sqrt{3}U_1} m_t = \frac{S}{\sqrt{3}U_1} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{3}U_1} = \frac{\sqrt{500^2 + (-106,28)^2}}{\sqrt{3} \cdot 21} = 14,053 \text{ kA}.$$

$$Q_{\gamma} = 3X_t I_f^2 = 3 \cdot 0,0735 \cdot 14,053^2 = 43,55 \text{ M var}$$

$$Q = Q_1 + Q_{\gamma} = -106,28 + 43,55 = -62,73 \text{ M var}$$

На основу претходног рачуна може се констатовати да се реактивна енергија коју генерише вод I (вод II је самокомпензован тј. нити одаје нити захтева реактивну енергију споља) једним делом троши на расипање у трансформатору а остатак допуњује магнећење генератора.

Електромоторна сила услед побуде генератора је:

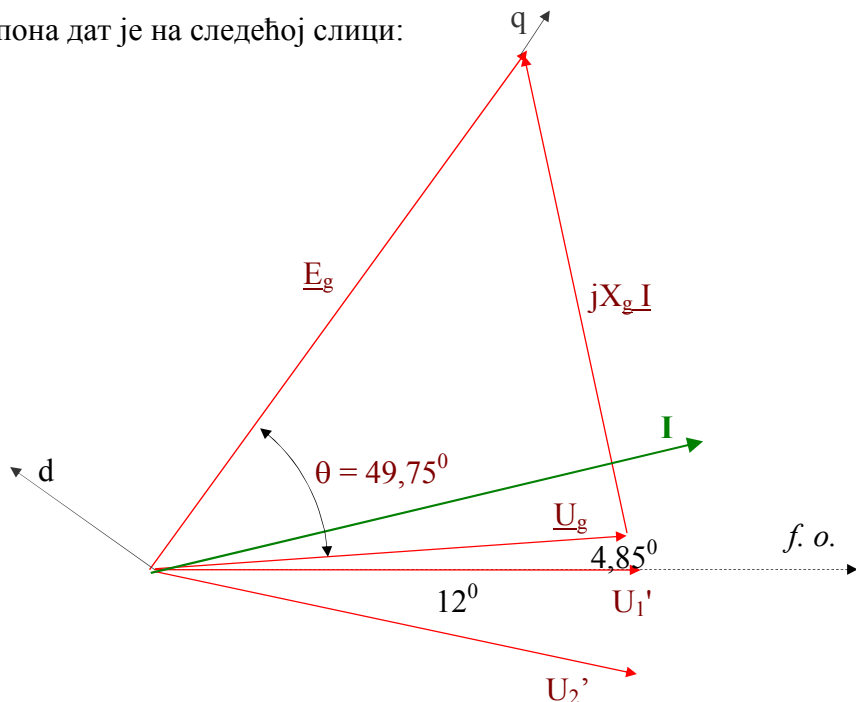
$$\underline{E}_g = U_1' + \frac{Q_1(X_t + X_g)}{U_1'} + j \frac{P_1(X_t + X_g)}{U_1'} = 21 + \frac{(-106,28) \cdot 0,9555}{21} + j \frac{500 \cdot 0,9555}{21}$$

$$\underline{E}_g = (16,164 + j22,75) \text{ kV} = 27,91 \angle 54,6^\circ.$$

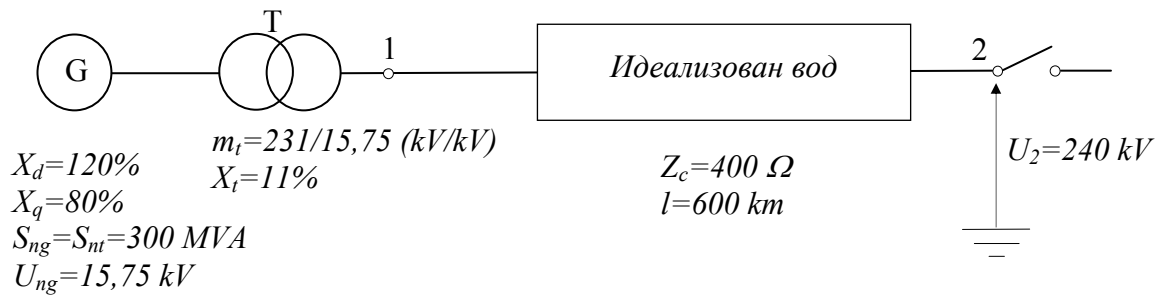
Напон на прикључцима генератора је:

$$\underline{U}_g = U_1' + \frac{Q_1 X_t}{U_1'} + j \frac{P X_t}{U_1'} = (20,63 + j1,75) \text{ kV} = 20,7 \angle 4,85^\circ.$$

Фазорски дијаграм напона дат је на следећој слици:

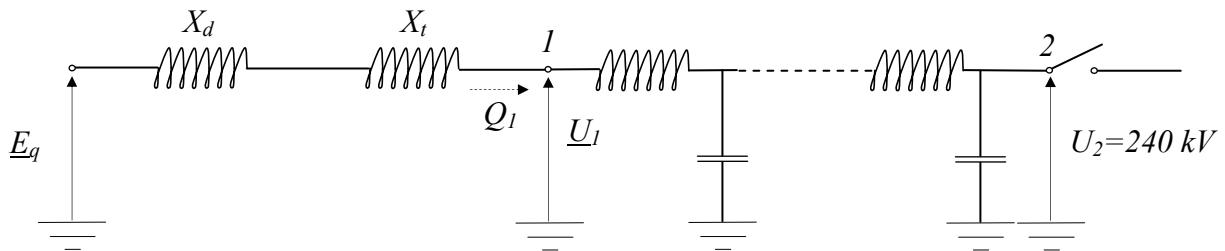


ЗАДАТАК II: Хидрогенератор напаја преко блок-трансформатора идеализовани надземни вод у празном ходу, као што је приказано на слици. Одредити електромоторну силу побуде генератора E_q . Параметри генератора, трансформатора и вода дати су на слици.



Решење:

С обзиром да хидрогенератор напаја идеализовани вод у празном ходу он не генерише активну снагу. У режимима рада хидрогенератора у којима он не генерише активну снагу, хидрогенератор се може еквивалентирати синхроним реактансом X_d , иза које стоји електромоторна сила услед побуде E_q . Имајући ово у виду може се нацртати еквивалентна заменска шема за дати систем:



Рачун ће бити спроведен на основу заменске шеме у систему релативних јединица.

Избор базних величина:

$$U_b = 231 \text{ kV} \quad S_b = 300 \text{ MVA} \quad \Rightarrow \quad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{231^2}{300} = 177,87 \Omega$$

Нормализација величина и параметара система:

$$x_d = 1,2 \text{ r.j.}$$

$$x_q = 0,8 \text{ r.j.}$$

$$x_t = 0,11 \text{ r.j.}$$

$$Z_c(\text{r.j.}) = \frac{Z_c}{Z_b} = \frac{400}{177,87} = 2,2488 \text{ r.j.}$$

$$U_2 = \frac{240}{231} = 1,03896 \text{ r.j.}$$

Електрична угаона дужина вода је:

$$\lambda = \beta \cdot l = 0,06 \cdot 600 = 36^{\circ}.$$

На идеализованом воду који је у празном ходу јавиће се Фарантијев ефекат који је описан следећом једначином:

$$U_1 = U_2 \cos \lambda = 240 \cos 36^{\circ} = 1,03896 \cdot \cos 36^{\circ} = 0,84054 \text{ r. j.}$$

Улазна реактивна снага вода је:

$$Q_1 = -\frac{U_1^2}{Z_c} \operatorname{tg} \lambda = -\frac{0,84054^2}{2,2488} \operatorname{tg} 36^{\circ} = -0,228257 \text{ r. j.}$$

Знак "-" значи да реактивну снагу генерише вод, а апсорбује је трансформатор и генератор.

Имајући у виду да је $\theta = 0$ ($P=0$), из угаоних карактеристика еквивалентног генератора добија се веза између реактивне снаге коју генерише (апсорбује) блок генератор – трансформатор и електромоторне силе побуде:

$$Q_1 = \frac{E_q U_1}{X_d + X_t} - U_1^2 \frac{1}{X_d + X_t} \Rightarrow E_q = \frac{X_d + X_t}{U_1} \left(Q_1 + \frac{U_1^2}{X_d + X_t} \right)$$

$$E_q = \frac{1,2 + 0,11}{0,84054} \left(-0,228257 + \frac{0,84054^2}{1,2 + 0,11} \right) = 0,48479 \text{ r. j.}$$

Прорачун електромоторне силе на напонском нивоу генератора:

$$E_q = E_q (\text{r. j.}) \cdot U_{baz} \cdot \frac{1}{m_t} = 0,48479 \cdot 231 \cdot \frac{15,75}{231} = 7,636 \text{ kV.}$$
