

5. SYNCHRÓNNE STROJE

5.1 Všeobecne

Synchrónne stroje sú najpoužívanejšími elektrickými strojmi pri výrobe elektrickej energie. V súčasnosti, s prudkým rozvojom polovodičovej a riadiacej techniky, sa začínajú používať aj synchrónne motory – hlavne synchrónne motory s permanentnými magnetmi.

Konštrukcia statora (kotvy) synchrónneho stroja je rovnaká ako asynchrónneho stroja, t. j. stator je zložený z plechov tvaru medzikružia, ktoré majú po vnútornom obvode drážky. Do nich je vložené rozložené viacfázové, obvykle trojfázové, vinutie. Konštrukčné usporiadanie rotora môže byť dvojaké – a) hladký alebo valcový rotor (skryté póly), b) rotor s vyjadrenými pólmi. Podľa zdroja budiaceho magnetického napätia rozoznávame synchrónne stroje s vinutým rotorom, t. j. na rotore sú umiestnené závitky budiacich cievok napájané jednosmerným prúdom a synchrónne stroje s permanentnými magnetmi, t. j. na rotore sú permanentné magnety, ktoré tvoria zdroj budiaceho magnetického napätia.

Synchrónny stroj pracuje pri synchrónnej rýchlosti, ktorá je daná frekvenciou napájacej siete f_s

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi f_s}{p} \quad (5.1)$$

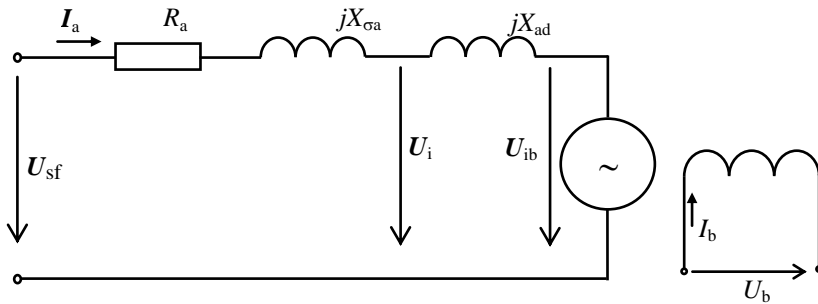
kde Ω_{syn} je mechanická synchrónna uhlová rýchlosť v rad^{-1} , p je počet pólových dvojíc. Synchrónna rýchlosť n_{syn} v min^{-1} je daná tiež frekvenciou napájacej siete a počtom pólových dvojíc:

$$n_{\text{syn}} = \frac{60 f_s}{p}, \text{ z čoho vyplýva } \Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi n_{\text{syn}}}{60} \quad (5.2)$$

5.2 Teória synchrónneho stroja s hladkým rotorom

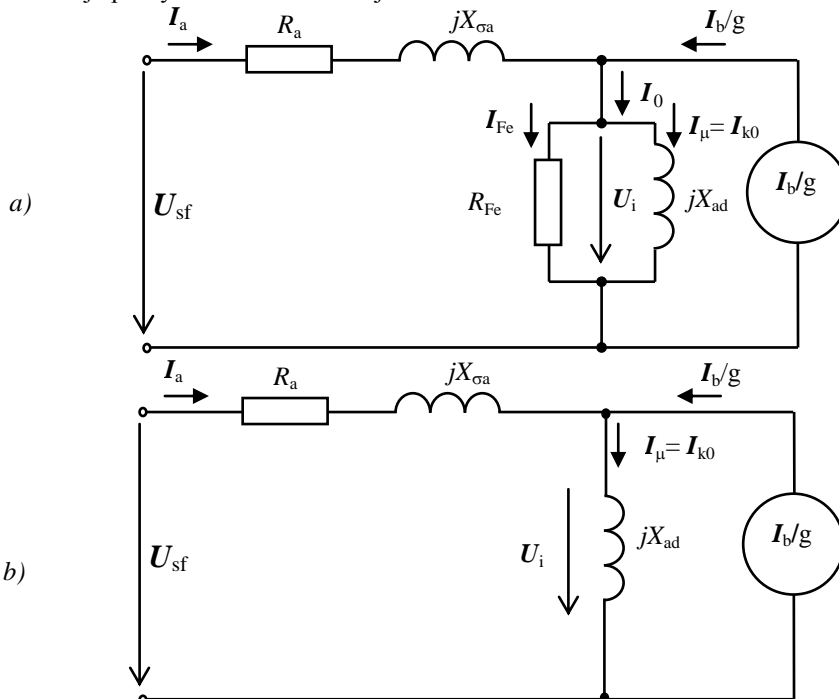
Na obrázku 5.1 je zjednodušená náhradná schéma jednej fázy synchrónneho stroja s valcovým alebo hladkým rotorom, kde

- U_{sf} je fázor svorkového napätia
- I_a je fázor prúdu kotvy
- U_i je fázor indukovaného napätia kotvy
- U_{ib} je fázor budiaceho napätia na strane kotvy
- R_a je odpor jednej fázy statorového vinutia
- $X_{\sigma a}$ je rozptylová reaktancia kotvy
- X_{ad} je reaktancia reakcie kotvy
- $X_d = X_{\text{ad}} + X_{\sigma a}$ je synchrónna reaktancia



Obr. 5.1 Náhradná schéma jednej fázy synchronného stroja s hladkým rotorom s napäťovým zdrojom

Pokiaľ by sme chceli zohľadniť straty v železe synchronného stroja, pridali by sme do náhradnej schémy priečný prvok R_{Fe} v mieste fázora U_i . Môžeme použiť aj náhradnú schému s prúdovým zdrojom, ktorý umožňuje spomínaný prvok zohľadniť (obr.5.2a). Náhradné schémy s prúdovým zdrojom sa jednak viac podobajú náhradnej schéme asynchronného motora a jednak na ich základe sa kreslí tá časť fázorového diagramu, ktorá ilustruje prúdy synchronného stroja.



Obr. 5.2 a) Náhradná schéma jednej fázy synchronného stroja s prúdovým zdrojom a s uvažovaním strát v železe, b) so zanedbaním strát v železe

Pokiaľ chceme počítať s budiacim prúdom I_b (budenie - index "b") na strane kotvy (kotva - index „a“, niekde sa používa aj index „s“ ako stator), musíme ho prepočítať na stator pomocou tzv. redukčného činiteľa g , ktorý má podobný význam ako prevod v transformátore, ktorým sa prepočítavajú veličiny sekundárneho vinutia na primárnu stranu, alebo opačne.

Budiaci prúd rotora prepočítaný na stator, čiže do obvodu kotvy, je I_b / g , prúd kotvy prepočítaný na stranu budiaceho obvodu je: gI_a . Redukčný činiteľ g získame pomerom dvoch prúdov $g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}}$, ktoré majú ten istý účinok, a síce ich úlohou je vybudit' menovité napätie v kotve. Budiaci prúd I_{b0} je prúd v rotorovom budiacom obvode, ktorým vybudíme v stave naprázdno na svorkách statora menovité napätie U_N a I_{k0} je budiaci prúd v obvode statora, ktorým vybudíme rovnakú hodnotu napätia na svorkách stroja, ak $I_b = 0$. Takýto stav môže nastať vtedy, keď je synchronný stroj pripojený svorkami kotvy na tvrdý zdroj napätia U_N a nie je budený, čiže $I_b = 0$. V takom prípade synchronný stroj ťahá magnetizačný prúd na vybudenie U_{iN} zo siete. Je to istý druh stavu nakrátko synchronného stroja, preto je tento prúd označovaný I_{k0} . Je priamo-úmerný menovitému napätiu a je obmedzený impedanciou synchronného stroja Z_d . Prúd I_{k0} teda môžeme vypočítať zo vzťahu:

$$I_{k0} = \frac{U_{sN}}{Z_d}, \quad (5.3)$$

kde Z_d je synchronná impedancia definovaná súčtom činného odporu vinutia kotvy a synchronnej reaktancie: $Z_d = R_a + jX_d$. Ak činný odpor statorového vinutia možno zanedbať (je to bežné v prípade veľkých synchronných strojov), tak $Z_d = X_d$ a

$$I_{k0} = \frac{U_{sN}}{X_d} \quad (5.4)$$

Všimnime si, že hovoríme o budiacom prúde I_{b0} , ak ide o vybudenie menovitého napätia zo strany rotora a o magnetizačnom prúde $I_\mu = I_{k0}$ (pozri obr. 5.3a,b), ak ide o statorový prúd, ktorým sa má vybudit' menovité napätie. Je to v súlade s terminológiou ostatných elektrických strojov, napr. transformátorov, indukčných strojov, alebo aj jednosmerných strojov.

Rovnice opisujúce náhradnú schému a fázorový diagram (obr 5.1 a 5.3)

$$U_{sf} = I_a Z_d + U_{ib} \quad (5.5)$$

$$U_i = U_{sf} - I_a (R_a + jX_{\sigma a}) \quad (5.6)$$

$$U_i = U_{ib} + jI_a X_{ad} \quad (5.7)$$

$$U_i = jX_{ad} I_a + jX_{ad} \frac{I_b}{g} = jX_{ad} I_\mu \quad (5.8)$$

$$gI_a + I_b = I_{b0}, \text{ alebo } I_a + \frac{I_b}{g} = I_{k0} \text{ (obr. 5.2b a 5.3a,b), resp. } I_a + \frac{I_b}{g} = I_\mu$$

$$U_{ib} = j \frac{I_b}{g} X_{ad} \quad (5.9)$$

Absolútna hodnota menovitej impedancie synchronného stroja Z_N je daná pomerom menovitých hodnôt napätia a prúdu:

$$Z_N = \frac{U_{sfN}}{I_{aN}}, \quad (5.10)$$

kde U_{sfN} a I_{aN} predstavujú absolútne hodnoty menovitého fázového svorkového napätia a prúdu kotvy synchronného stroja. Prvky náhradnej schémy môžeme vyjadriť v pomerných, alebo percentuálnych veličinách, podobne ako v transformátore.

Percentuálny činný odpor kotvy $r_\%$ je:

$$r_\% = \frac{R_a}{Z_N} 100 \quad (5.11)$$

a percentuálna synchronná reaktancia

$$x_{d\%} = \frac{X_d}{Z_N} 100. \quad (5.12)$$

V teórii synchronného stroja definujeme tzv. pomerný prúd nakrátko k_k , udávajúci, akú časť z menovitého prúdu tvorí prúd magnetizačný a ktorý hovorí o elektrickom a magnetickom využití synchronného stroja. Tento pomer možno vyjadriť na strane statora aj na strane rotora, ale ako sme vysvetlili, za magnetizačný prúd na strane rotora považujeme prúd I_{b0} , a preto aj menovitý satorový prúd musí byť prepočítaný na stranu budenia:

$$k_k = \frac{I_{k0}}{I_{aN}} = \frac{I_{b0}}{gI_{aN}} \quad (5.13)$$

Ak R_a je voči X_d zanedbateľné, potom $Z_d = X_d$ a po dosadení za I_{k0} a X_d možno odvodiť vzťah

$$x_{d\%} = \frac{X_d}{Z_N} 100 = \frac{\frac{U_{sfN}}{I_{aN}}}{\frac{U_{sfN}}{I_{aN}}} 100 = \frac{1}{\frac{I_{k0}}{I_{aN}}} 100 = \frac{1}{k_k} 100 \quad (5.14)$$

Ak je synchronný stroj pripojený na tvrdú sieť, t. j. napätie siete U_{sN} a frekvencia siete f_{sN} sú konštantné, tak za normálne budenie považujeme stav, keď $I_b = I_{b0}$. Ak je pri menovitom napätí statora $I_b > I_{b0}$, synchronný stroj je prebudený a môže do siete dodávať

jalový výkon, sieť sa k nemu chová ako induktívna záťaž a on zaťažuje sieť kapacitne. Ak je pri menovitom napätí statora $I_b < I_{b0}$, synchronný stroj je podbudený, odoberá zo siete jalovú energiu induktívneho charakteru (je pre sieť induktívnou záťažou) a sieť sa k nemu správa ako impedancia kapacitného charakteru (čiže je zdrojom jalovej energie, ako kondenzátor).

Na obrázku 5.3 je fázorový diagram prebudeného synchronného generátora s induktívnym charakterom záťaže, na ktorom vysvetlíme význam jednotlivých uhlov synchronného stroja.

- ϑ_L - záťažový uhol, definovaný ako uhol fázového posunu medzi osou statorového točivého póla a osou rotorového póla
- ϑ'_L - vnútorný záťažový uhol medzi U_i a U_{ib} , alebo medzi I_{b0} a I_b
- φ - uhol fázového posunu medzi napätím a prúdom
- ψ - vnútorný fázový posun medzi U_{ib} a gI_a . Priestorový posun medzi osami oboch pólov je $\psi + \pi/2$, pritom $\psi = \varphi + \vartheta_L$
- δ - uhol momentu: $\delta = \psi + \pi/2$ - má význam pri riadení stroja na maximálny moment.

Vo veľkých synchronných strojoch sa R_a voči X_d zanedbáva. V takomto prípade platia všetky uvedené vzťahy s predpokladom $R_a = 0$. Pokiaľ nie je zadaná hodnota rozptylovej reaktancie (percentuálne alebo v Ω), počíta sa iba so synchronnou reaktanciou X_d a vo fázorovom diagrame sa stotožní U_{sfN} s U_i . Fázorové diagramy sa tak zjednodušia. Pre rôzne stavy synchronného stroja v motorickom režime sú fázorové diagramy uvedené na obr.5.4 a v generátorickom režime na obr.5.5 pri predpoklade $R_a = 0$ a $U_{sfN} = U_i$.

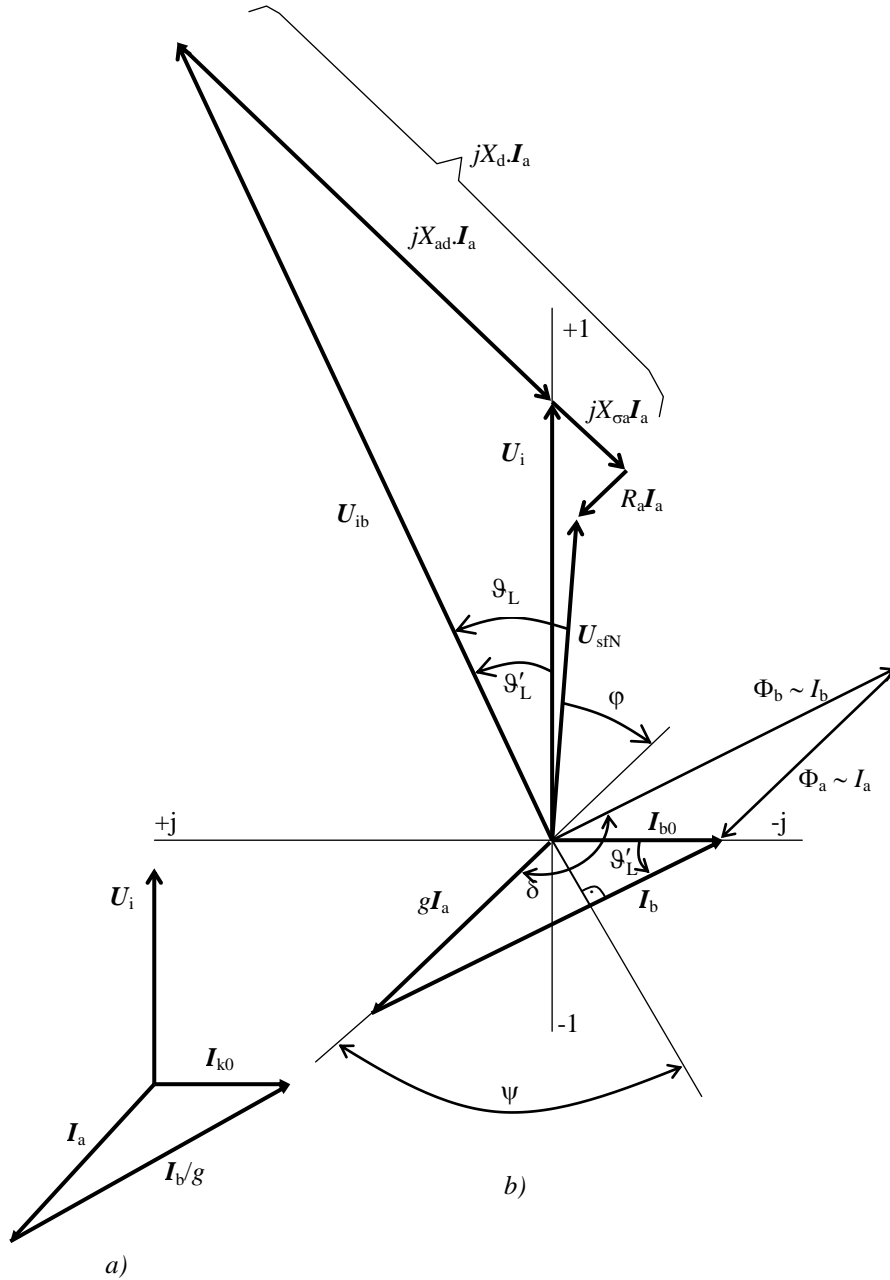
Pre tieto diagramy môžeme písať:

$$U_{sfN} \angle 0^\circ = U_{ib} \angle \vartheta_L + jX_d I_a \angle \varphi \quad (5.15)$$

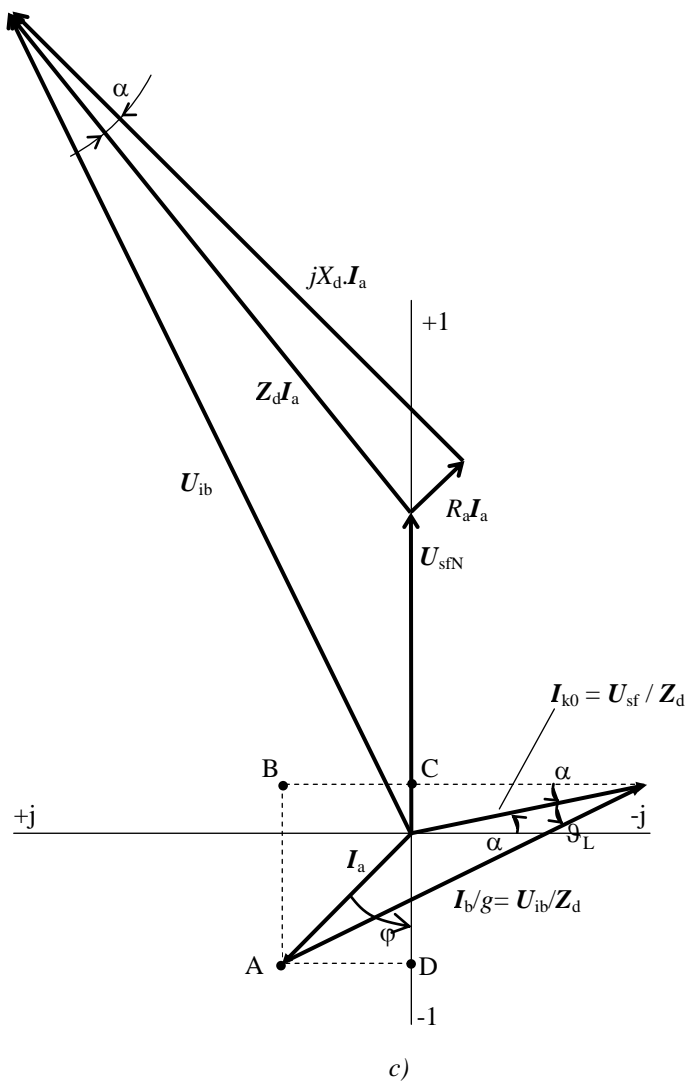
Potom prúd v kotve môžeme vyjadriť ako fázový súčet dvoch zložiek, z ktorých každá zaostáva za svojim napätím o 90° :

$$I_a \angle \varphi = \frac{U_{sfN} \angle 0^\circ}{jX_d} - \frac{U_{ib} \angle \vartheta_L}{jX_d} = -jI_{k0} - \frac{U_{ib} \angle \vartheta_L}{jX_d} \quad (5.16)$$

Prvá zložka predstavuje magnetizačný prúd I_{k0} , ktorý tečie vo vinutí statora, ak je $I_b = 0$, to znamená, že synchronný stroj je magnetizovaný cez statorové vinutie zo siete. Druhá zložka predstavuje budiaci prúd prepočítaný na stranu statora I_b / g pri danej záťaži prúdom $I_a \angle \varphi$. Na obr.5.4 vidno tieto zložky prúdov pre motorický a na obr. 5.5 pre generátorický režim. Inak povedané, riešenie pre I_a určuje režim prevádzky stroja. Ak reálna časť prúdu je kladná, znamená to motorický režim, ak je reálna časť záporná, je to generátorický režim. A ak je nulová, stroj pracuje ako synchronný kompenzátor.



Obr. 5.3 Fázorový diagram prebudeného synchrónneho generátora, a) prúdy na strane statorového vinutia b) prúdy na strane budiaceho vinutia, fázory napätí a dôležité uhly c) trojuholník úbytkov napätí na Z_d



Obr. 5.3 Fázorový diagram prebudeného synchronného generátora – pokračovanie, c) trojuholník úbytkov napätí na Z_d , pomocné označenia

Pri zanedbaní odporu statorového vinutia je činný výkon synchronného stroja vo vzduchovej medzere daný vzťahom

$$P_{\delta} = \pm m U_{sfN} I_a \cos \varphi \quad (5.17)$$

Vyvíjaný elektromagnetický moment synchronného stroja je daný výkonom vo vzduchovej medzere a synchronnou mechanickou uhlovou rýchlosťou. Po odvodení z fázorového diagramu napr. na obr.5.5a dostaneme vzťah, v ktorom vidno, že vyvíjaný moment závisí priamo-úmerne od svorkového napätia U_{sfN} a napätia od budenia U_{ib} a nepriamo-úmerne od synchronnej reaktancie:

$$M_e = \frac{P_{\delta}}{\Omega_{syn}} = - \frac{m}{\Omega_{syn}} \frac{U_{sfN} U_{ib}}{X_d} \sin \vartheta_L \quad (5.18)$$

Záporné znamienko je použité preto, že podľa dohody je moment kladný v motorickej prevádzke a záporný v generátorickej prevádzke, ale záťažový uhol je kladný v generátorickej prevádzke a záporný v motorickej prevádzke, ako to vidno na obr.5.6a. To znamená, že ak za ϑ_L dosadíme záporný uhol pre motorický režim, funkcia $\sin(-\vartheta_L)$ bude záporná $-\sin(\vartheta_L)$ a moment bude kladný. Ak za ϑ_L dosadíme kladný uhol pre generátorický režim, sínusová funkcia ostane kladná a moment bude záporný.

Vzťah pre moment možno napísať aj stručnejšie:

$$M_e = -M_{emax} \sin \vartheta_L \quad (5.19)$$

kde maximálny moment je:

$$M_{emax} = \frac{m}{\Omega_{syn}} \frac{U_{sfN} U_{ib}}{X_d} \quad (5.20)$$

Tu vidno, že maximálny moment závisí lineárne od budenia a lineárne od svorkového napätia. Tým sa zásadne líši od indukčného motora, kde je moment úmerný kvadrátu svorkového napätia. Z toho vyplýva, že synchronný motor nie je taký citlivý na zmenu svorkového napätia ako indukčný motor.

Na základe uvedeného vzťahu sa tým istým spôsobom dá uvažovať o výkone vo vzduchovej medzere, lebo medzi nimi je len konštantná synchronna rýchlosť:

$$P_{\delta} = -P_{\delta max} \sin \vartheta_L \quad (5.21)$$

kde

$$P_{\delta max} = m \frac{U_{sfN} U_{ib}}{X_d} \quad (5.22)$$

V synchronných strojoch malých výkonov nemôžeme zanedbať odpor kotvy R_a . Náhradná schéma je na obr.5.2 a fázorový diagram na obr.5.3. V tomto prípade treba pri

odvodzovaní vzťahu pre výkon vo vzduchovej medzere P_δ aj pre elektromagnetický moment M_e zobráť tento fakt do úvahy. Ak opäť prepíšeme vzťah pre svorkové napätie:

$$U_{sfN} = I_a Z_d + U_{ib} \quad (5.23)$$

Dostaneme pre prúd kotvy výraz, z ktorého vyplýva, že tento prúd sa skladá z dvoch zložiek, z ktorých každá zaostáva za svojím napätím o uhol $(90-\alpha)^\circ$, ako to vidno na obr.5.3c:

$$I_a = \frac{U_{sfN}}{Z_d} - \frac{U_{ib}}{Z_d} = I_{k0} - \frac{I_{b0}}{g} \quad (5.24)$$

Z obr.5.3 vidíme, že prúd v generátorickom režime má zápornú reálnu časť, teda aj činný výkon bude záporný, čiže stroj je naozaj zdrojom elektrickej energie. Na obr.5.4 vidíme, že v motorickom režime je reálna časť prúdu kladná, takže aj výkon bude kladný, a teda stroj je spotrebičom elektrickej energie.

Výraz pre výkon generátora na jeho svorkách odvodíme na základe obr.5.3c tak, že urobíme priemet prúdu do osi svorkového napätia, aby sme získali činnú zložku prúdu. Najprv si pripravíme pomocné výrazy:

$$\sin(\vartheta_L + \alpha) = \frac{\overline{AB}}{I_b / g} = \frac{\overline{AB}}{U_{ib} / Z_d} \quad (5.25)$$

$$\overline{AB} = \frac{U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) \quad (5.26)$$

$$\sin \alpha = \frac{\overline{0C}}{I_{k0}} = \frac{\overline{0C}}{U_{sf} / Z_d} \quad (5.27)$$

$$\overline{0C} = \frac{U_{sf}}{Z_d} \sin \alpha \quad (5.28)$$

$$\cos \varphi = \frac{\overline{0D}}{I_a} \Rightarrow \overline{0D} = I_a \cos \varphi \quad (5.29)$$

$$I_a \cos \varphi = \overline{0D} = \overline{AB} - \overline{0C} = \frac{U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) - \frac{U_{sf}}{Z_d} \sin \alpha \quad (5.30)$$

Výkon generátora na svorkách stroja je

$$\begin{aligned}
 P &= 3U_{sfN}(-I_a \cos \varphi) = 3U_{sfN} \left(-\frac{U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) + \frac{U_{sfN}}{Z_d} \sin \alpha \right) = \\
 &= 3 \left(-\frac{U_{sfN}U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) + \frac{U_{sfN}^2}{Z_d} \sin \alpha \right)
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

Ak zoberieme do úvahy, že $\sin(\alpha) = \frac{R_a}{Z_d}$, pozri obr.5.3c, tak elektrický výkon na svorkách generátora je

$$P = 3 \left(-\frac{U_{sfN}U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) + \frac{U_{sfN}^2 R_a}{Z_d^2} \right) \tag{5.32}$$

Ako sme už spomenuli, pre generátor je záťažový uhol kladný, pretože os rotora predbieha os točivého magnetického poľa. Potom celý výraz pre výkon je záporný, správne naznačujúc, že elektrický výkon na svorkách predstavuje výstupný výkon, a teda je to zdroj elektrickej energie. Pre motor je záťažový uhol záporný, a tak výraz pre výkon nadobúda kladnú hodnotu ukazujúc, že ide o spotrebič elektrickej energie a na svorkách je vstupný výkon stroja. Preto tento vzťah zároveň vyjadruje aj elektrický príkon motora.

Výraz pre výkon s uvažovaním R_a možno odvodiť aj z diagramu pre motorický chod, obr.5.4e, ale treba rešpektovať fakt, že ak má byť ϑ_L záporný, vo výrazoch ho treba písať so záporným znamienkom, aby výsledkom bol kladný záťažový uhol ϑ_L tak, ako je to už v uvedených vzťahoch. Podľa obr.5.4e, v trojuholníku 0AD platí:

$$\overline{0A} = U_{ib} \cos(\varphi + \vartheta_L) \tag{5.33}$$

čím sme vykonalí priemet U_{ib} do smeru prúdu I_a .

Podľa vyššie uvedenej poznámky zmeníme znamienko a napíšeme:

$$\overline{0A} = U_{ib} \cos(\varphi - \vartheta_L). \tag{5.34}$$

V trojuholníku 0BC platí:

$$\overline{0B} = U_{sf} \cos \varphi. \tag{5.35}$$

Pretože $\overline{AB} = R_a I_a$, možno napísať:

$$\overline{0B} = \overline{0A} + R_a I_a, \tag{5.36}$$

z čoho vyplýva:

$$U_{sfN} \cos \varphi = U_{ib} \cos(\varphi - \vartheta_L) + R_a I_a \quad (5.37)$$

Potom elektrický príkon na svorkách motora vyjadríme takto:

$$\begin{aligned} P_p &= 3I_a U_{sfN} \cos \varphi = 3[I_a U_{ib} \cos(\varphi - \vartheta_L) + R_a I_a^2] = \\ &= 3I_a U_{ib} \cos(\varphi - \vartheta_L) + 3R_a I_a^2 \end{aligned} \quad (5.38)$$

Tento príkon je súčtom strát vo vinutí kotvy

$$\Delta P_a = 3R_a I_a^2 = 3 \frac{U_{sfN}^2}{Z_d^2} \quad (5.39)$$

a výkonu vo vzduchovej medzere, ktorý súvisí s premenou na mechanickú energiu v podobe elektromagnetického momentu:

$$P_p = P_\delta + \Delta P_a \quad (5.40)$$

Čiže výkon vo vzduchovej medzere je:

$$P_\delta = 3U_{ib} I_a \cos(\varphi - \vartheta_L) \quad (5.41)$$

Na úpravu vzťahu pre P_δ treba urobiť priemet prúdu I_a do smeru U_{ib} . Kvôli prehľadnosti nakreslíme obr.5.4e ešte raz a označíme ho ako obr.5.4f, aby sme mohli kótovať príslušné priemety. Najprv uvedieme pomocné vzťahy: V trojuholníku 0AC platí:

$$\overline{0A} = I_a \cos(\varphi + \vartheta_L). \quad (5.42)$$

Urobíme priemet I_{k0} do U_{ib} a z trojuholníka 0BS napíšeme:

$$\sin(\alpha + \vartheta_L) = \frac{\overline{0B}}{I_{k0}} = \frac{\overline{0B}}{U_{sfN} / Z_d} \Rightarrow \overline{0B} = \frac{U_{sfN}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) \quad (5.43)$$

Z trojuholníka CSD napíšeme:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{CD}}{I_b / g} = \frac{\overline{CD}}{U_{ib} / Z_d} \Rightarrow \overline{CD} = \frac{U_{ib}}{Z_d} \sin \alpha = \overline{AB} \quad (5.44)$$

Do výrazu pre P_δ potrebujeme $I_a \cos(\varphi - \vartheta_L)$, čo je výraz $\overline{0A} = I_a \cos(\varphi + \vartheta_L)$, ale s dohodnutým záporným znamienkom záťažového uhla pre motorický chod, čiže

$$\overline{0A} = I_a \cos(\varphi - \vartheta_L) = \overline{0B} - \overline{AB} = \frac{U_{sfN}}{Z_d} \sin(-\vartheta_L + \alpha) - \frac{U_{ib}}{Z_d} \sin \alpha \quad (5.45)$$

Po dosadení do výrazu pre P_δ dostaneme:

$$\begin{aligned} P_\delta &= 3U_{ib} \left(\frac{U_{sfN}}{Z_d} \sin(-\vartheta_L + \alpha) - \frac{U_{ib}}{Z_d} \sin \alpha \right) = 3 \left(\frac{U_{ib}U_{sfN}}{Z_d} \sin(-\vartheta_L + \alpha) - \frac{U_{ib}^2}{Z_d} \sin \alpha \right) = \\ &= 3 \left(\frac{U_{ib}U_{sfN}}{Z_d} \sin(-\vartheta_L + \alpha) - \frac{U_{ib}^2 R_a}{Z_d^2} \right) = 3 \left(\frac{U_{ib}U_{sfN}}{Z_d} \sin-(\vartheta_L - \alpha) - \frac{U_{ib}^2 R_a}{Z_d^2} \right) = \\ &= 3 \left(-\frac{U_{ib}U_{sfN}}{Z_d} \sin(\vartheta_L - \alpha) - \frac{U_{ib}^2 R_a}{Z_d^2} \right) \end{aligned} \quad (5.46)$$

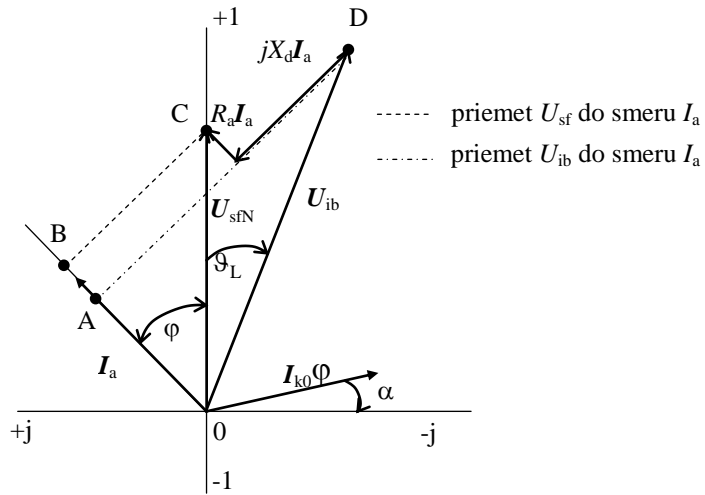
$$\text{kde } \alpha = \arcsin \left(\frac{R_a}{Z_d} \right). \quad (5.47)$$

Z výrazu pre P_δ , ktorý podelíme mechanickou uhlovou rýchlosťou dostaneme výraz pre elektromagnetický moment

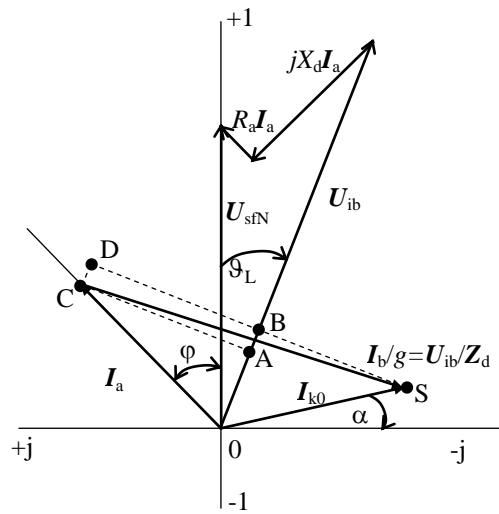
$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} \quad (5.48)$$

Zdôrazňujeme, že za ϑ_L treba dosadiť záporný uhol, lebo ide o motor, čím vznikne kladný prvý člen. Tento výraz však platí aj pre generátor: Ak za ϑ_L dosadíme kladný uhol, výkon P_δ aj moment M_e budú záporné. Ak R_a možno zanedbať, druhý člen vypadne, uhol $\alpha = 0$ a výraz prejde do tvaru, ktorý je známy pre veľké synchronné stroje.

Maximálny elektrický výkon generátora a maximálny mechanický výkon motora (rovný výkonu vo vzduchovej medzere, ak zanedbáme mechanické straty) sa objaví pri uhle menšom ako 90° , čiže $(90-\alpha)^\circ$, kvôli stratám na odpore vinutia kotvy, ako to vidno na obr.5.6b.

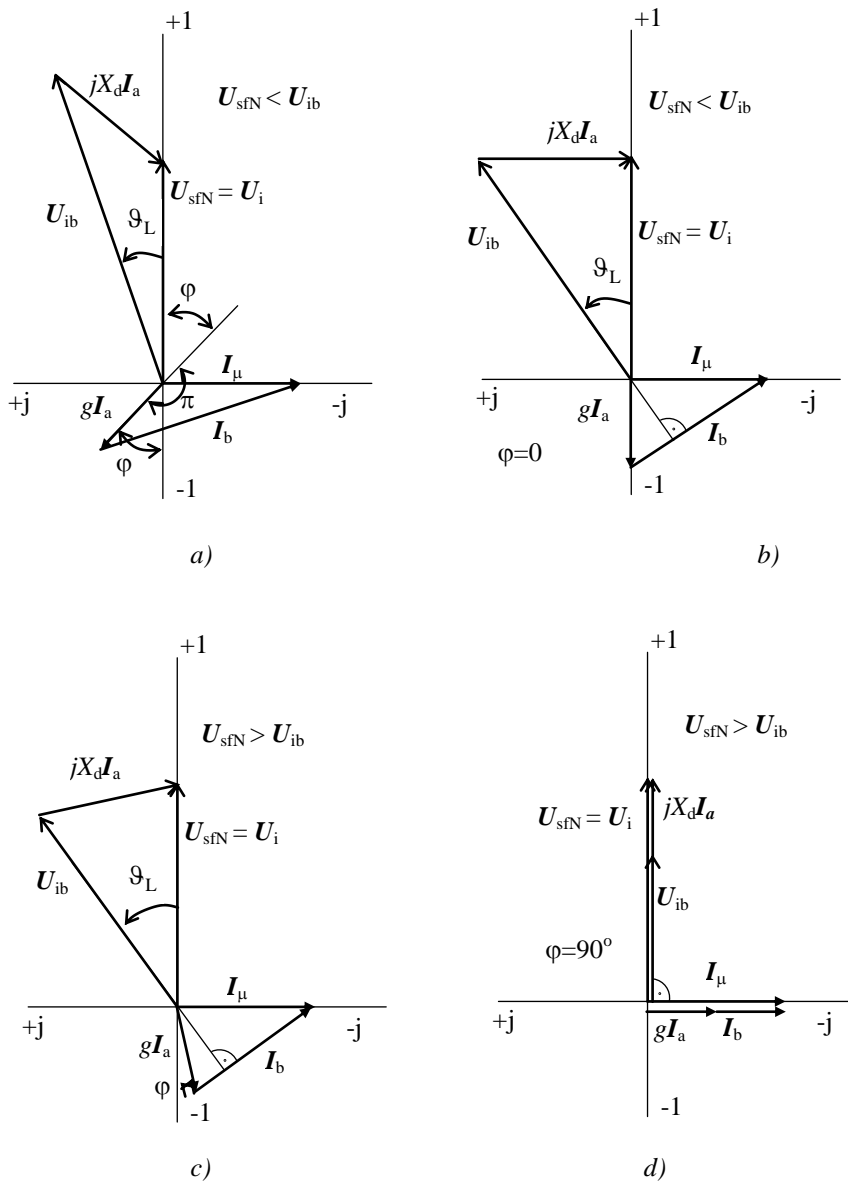


e)

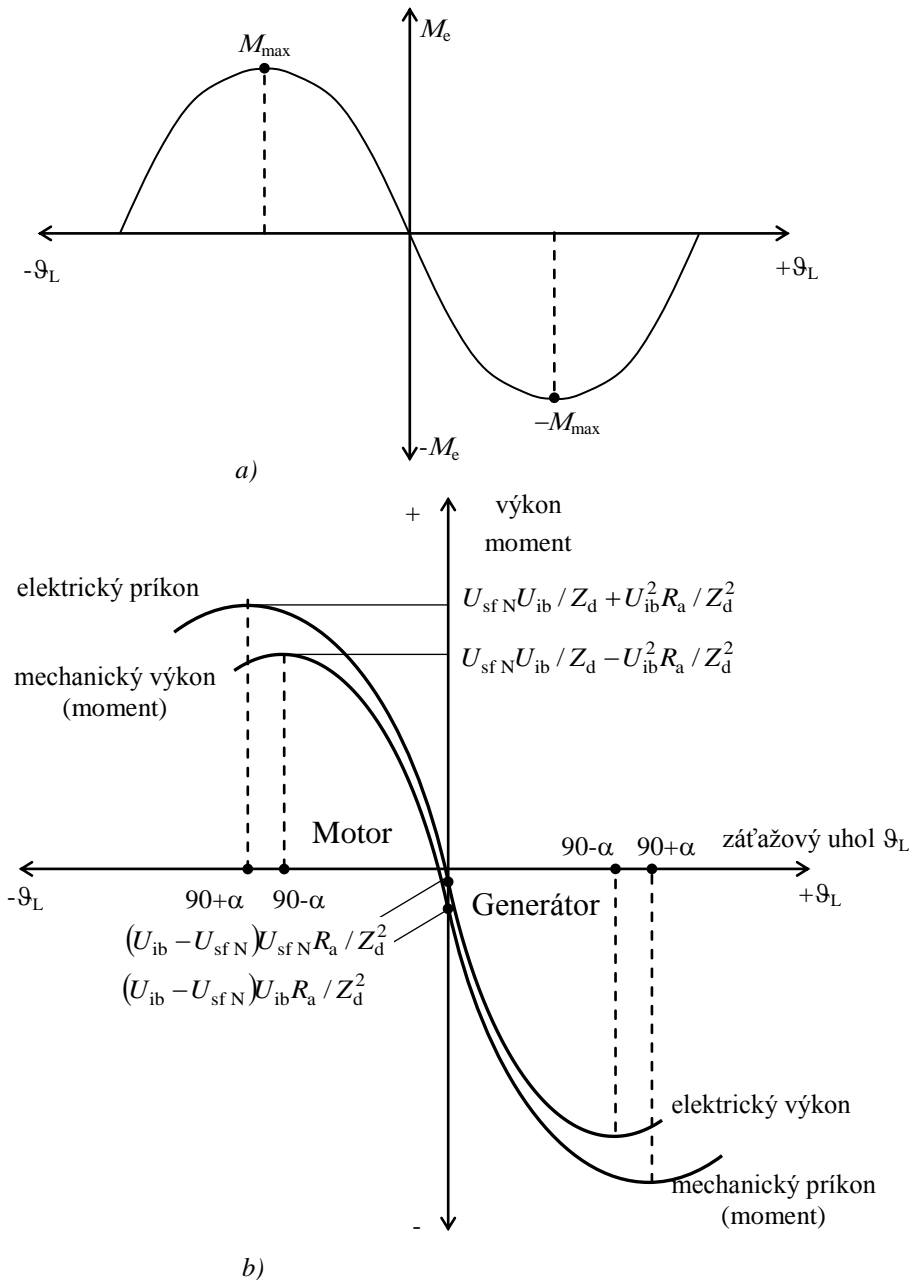


f)

Obr. 5.4 Fázorové diagramy synchrónneho motora - pokračovanie: e) diagram na odvodenie vzťahu pre príkon stroja, f) diagram na odvodenie vzťahu pre výkon vo vzduchovej medzere



Obr. 5.5 Fázorové diagramy synchronného generátora s: a) indukčným charakterom záťaže, b) charakterom záťaže s účinnosťou = 1, c) kapacitným charakterom záťaže, d) synchronný induktor



Obr. 5.6 Vplyv odporu kotvy R_a na výkonové charakteristiky synchrónneho stroja a) $R_a=0$, b) $R_a>0$

5.3. Teória synchronného stroja s rotorom s vyjadrenými pólmi

V synchronnom stroji s vyjadrenými pólmi nie je vzduchová medzera konštantná (obr.5.7a) a je zvykom vyjadrovať vzduchovú medzeru, indukčnosti aj reaktancie v dvoch na seba kolmých osiach a síce v pozdĺžnej osi d a priečnej osi q . Tzv. pozdĺžna synchronná reaktancia je definovaná v osi d : $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$ a priečna synchronná reaktancia v osi q : $X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$, pričom X_{ad} (X_{aq}) je reaktancia reakcie kotvy v d (q) osi a $X_{\sigma a}$ je rozptylová reaktancia jednej fázy statorového vinutia, ktorá je rovnaká v osi d aj q , pretože nezávisí od polohy rotora.

Tento typ stroja sa používa pre pomalobežné vysoko výkonové aplikácie. V takom prípade sa v teórii zanedbáva odpor kotvy R_a a teoretický výklad je jednoduchší. Existujú však relatívne malé stroje s vyjadrenými pólmi, v ktorých R_a voči X_d nemožno zanedbať.

Na obr. 5.7b je fázorový diagram prebudeneho synchronného motora s vyjadrenými pólmi, pre ktorý platí:

$$X_d I_d = U_{ib} - U_{sfN} \cos \vartheta_L \quad (5.49)$$

$$X_q I_q = U_{sfN} \sin \vartheta_L \quad (5.50)$$

Prúd v osi d vypočítame podľa vzťahu

$$I_d = \frac{U_{ib} - U_{sfN} \cos \vartheta_L}{X_d} = I_a \sin \psi \quad (5.51)$$

kde $\psi = \varphi + \vartheta_L$

a prúd v osi q podľa vzťahu

$$I_q = \frac{U_{sfN} \sin \vartheta_L}{X_q} I_a \cos \psi. \quad (5.52)$$

Vo všetkých vzťahoch, ktoré boli alebo budú uvedené budeme dosadzovať absolútnu hodnotu ϑ_L .

Pre výkon synchronného stroja s vyjadrenými pólmi vo vzduchovej medzere platí:

$$P_\delta = m U_{sfN} I_a \cos \varphi \quad (5.53)$$

a ďalším odvođením dostaneme nasledujúci vzťah pre výkon:

$$P_\delta = m \left(\frac{U_{sfN} U_{ib}}{X_d} \sin \vartheta_L + U_{sfN}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\vartheta_L \right) \quad (5.54)$$

a pre elektromagnetický moment:

$$M_e = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} \left(\frac{U_{\text{sfN}} U_{\text{ib}}}{X_d} \sin \vartheta_L + U_{\text{sfN}}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\vartheta_L \right). \quad (5.55)$$

Prvý výraz v tomto vzťahu je tzv. synchronný moment a je identický so vzťahom pre moment synchronného stroja s hladkým rotorom (pri zanedbaní R_a). Druhý výraz predstavuje reluktančný moment

$$M_{\text{rel}} = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} U_{\text{sfN}}^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\vartheta_L, \quad (5.56)$$

ktorého maximálna hodnota závisí od štvorca napájacieho napätia a rozdielu medzi synchronnými reaktanciami v osi d a q , mení sa s druhou harmonickou záťažového uhla ϑ_L a nezávisí od budenia synchronného stroja. Tvar celkového momentu a jeho zložiek vidno na obr.5.7c.

Na záver tejto kapitoly si pripomenieme ešte jeden dôležitý pojem z teórie synchronného stroja – *synchronizačný moment*. Tento synchronizačný moment M_{syn} sa uplatní vždy, keď prechádza stroj z jedného ustáleného stavu do druhého, napr. z polohy ϑ_{L0} o uhol ε .

$$M_{\text{syn}} = C\varepsilon \quad (5.57)$$

kde C je synchronizačný činiteľ a je daný deriváciou momentu podľa záťažového uhla v danom bode ϑ_{L0} :

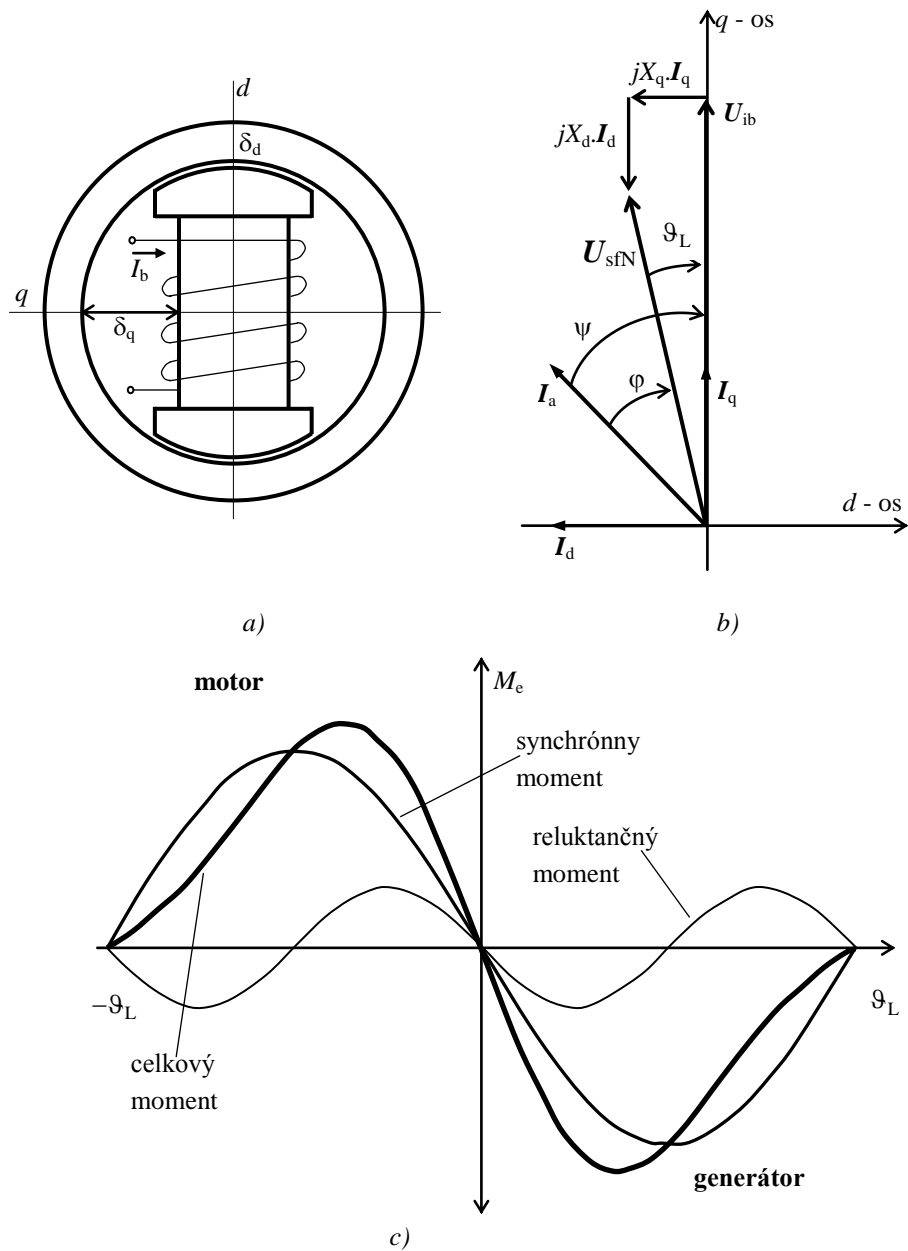
$$C = \left[-\frac{dM_e}{d\vartheta_L} \right]_{\vartheta_{L0}} \quad (5.58)$$

Pre synchronný stroj s hladkým rotorom je to $C = M_{e\text{max}} \cos \vartheta_L$

Uvedený vzťah platí pre synchronné stroje s oboma konštrukciami rotora. Interakciu rušivého vplyvu a synchronizačného momentu vzniká kývanie stroja, tlmené momentom mechanických strát. Kmitočet netlmeného voľného kývania f_0 je daný vzťahom:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Cp}{J}} \quad [\text{Hz}] \quad (5.59)$$

kde p je počet pólových dvojíc
 J je moment zotrvačnosti sústavy [kgm^2].



Obr. 5.7 a) Pričný rez synchronného stroja s vyjadrenými pólmi, b) Fázorový diagram synchronného prebudeného motora s vyjadrenými pólmi, c) Moment synchronného stroja s vyjadrenými pólmi a jeho zložky ak $X_d > X_q$

5.4. Prevádzka synchronného generátora na tvrdej sieti

Vo väčšine prípadov je synchronný generátor pripojený na tvrdú sieť, čo znamená, že napätie a frekvencia siete sú konštantné. Pracovná oblasť generátora je odvodená z fázorového diagramu na obr.5.5a a je znázornená na obr.5.8.

Pracovná oblasť je ohraničená veľkosťou menovitého prúdu kotvy gI_{aN} , ktorý sa v prípade strojov s valcovým rotorom môže pohybovať po kružnici so stredom 0 a polomerom gI_{aN} , ďalej je ohraničená veľkosťou budiaceho prúdu I_{bN} , ktorý sa tiež môže pohybovať po kružnici so stredom S a polomerom I_{bN} , menovitým výkonom generátora P_N , ktorý je v diagrame označený priamkou pretínajúcou reálnu os vo vzdialenosti úmernej činnnej zložke prúdu $I_{aN}\cos\varphi_N$ a maximálnym záťažovým uhlom ϑ_{Lmax} . Určité preťaženie oproti ϑ_{LN} je dovolené a uvádza ho výrobca.

Interval 1 – 2 predstavuje činnosť generátora pri zníženom činnom výkone pričom pracuje s maximálnym budiacim prúdom, ktorý je väčší ako menovitý a zníženým satorovým prúdom.

Interval 2 – 3 zodpovedá prevádzke generátora s menovitým satorovým prúdom pre rôzne hodnoty činného a jalového výkonu, budiaci prúd je nižší ako jeho maximálna hodnota a v bode 3 dosahuje menovitú hodnotu.

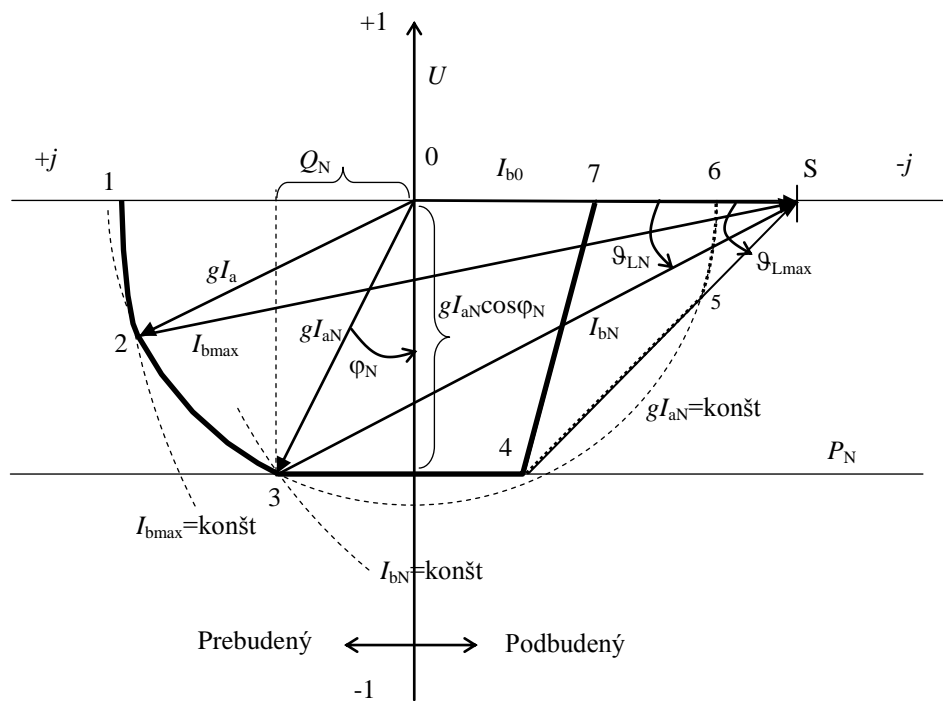
Bod 3 predstavuje menovitý stav generátora, na ktorý bol navrhnutý a vyrobený. Tu sú aj satorový prúd aj budiaci prúd menovité. Na obr.5.8 vidno aj jeho jalový výkon Q_N .

Interval 3 – 4 zodpovedá činnosti generátora s konštantným menovitým výkonom s rôznymi hodnotami účinníka, ktorý prechádza z prebudeného do podbudeného stavu, t. j. mení sa induktívny charakter záťaže na kapacitný.

Interval 4 – 5 zodpovedá činnosti generátora s maximálnym povoleným záťažovým uhlom, ktorý udáva výrobca (generátor môže teoreticky dosiahnuť záťažový uhol 90° , kde je už medza statickej stability).

Interval 5 – 6 zodpovedá podbudenému stavu pre menovitý prúd satora.

Interval 4 – 7 udáva výrobca, pretože v praxi sa odbudzovaním a súčasným znižovaním dodávaného činného výkonu pohybuje pracovný bod práve po tejto priamke 4 – 7, pričom bod 7 predstavuje tzv. medzu podbudení a je daná výrobcom z dôvodu stability chodu generátora vzhľadom na neprekročenie maximálneho povoleného záťažového uhla pri náhodnom skokovom zaťažení.



Obr. 5.8 Pracovná oblasť synchronného generátora na tvrdej sieti

RIEŠENÉ PRÍKLADY**Príklad 5.1**

Turboalternátor má zdanlivý menovitý výkon $S_N = 20$ MVA, synchronne otáčky $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$, napätie $U_N = 6300$ V v zapojení do hviezdy, frekvencia $f_N = 50$ Hz, účinník $\cos\varphi_N = 0,8$ ind. a účinnosť pri plnom zaťažení $\eta = 96,5$ %.

Vypočítajte činný výkon P_N stroja, jeho jalový výkon Q_N , potrebný menovitý výkon turbíny P_{tN} , menovitý prúd turboalternátora a menovitý moment turbíny M_{tN} .

Riešenie:

Menovitý činný výkon turboalternátora

$$P_N = S_N \cos\varphi_N = 20 \cdot 0,8 = 16 \text{ MW}$$

Menovitý jalový výkon

$$Q_N = S_N \sin\varphi_N = 12 \text{ Mvar}$$

alebo

$$Q_N = \sqrt{S_N^2 - P_N^2} = \sqrt{20^2 - 16^2} = 12 \text{ Mvar}$$

Potrebný výkon turbíny je príkonom synchronneho turboalternátora

$$P_{tN} = \frac{P_N}{\eta} = \frac{16}{0,965} = 16,58 \text{ MW}$$

Menovitý moment turbíny

$$M_{tN} = \frac{P_{tN}}{\Omega_s} = \frac{P_{tN}}{2\pi \frac{n_{syn}}{60}} = 9,55 \frac{P_{tN}}{n_{syn}} = 9,55 \frac{16,58 \cdot 10^6}{3000} = 52,7 \cdot 10^3 \text{ Nm}$$

Menovitý prúd turboalternátora

$$I_{aN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} 6,3 \cdot 10^3} = 1830 \text{ A}$$

Príklad 5.2

Nakreslite zjednodušený fázorový diagram pre menovitý stav turboalternátora z príkladu 5.1. Z merania naprázdno vieme, že pri menovitom statorovom napätí je jeho

budiaci prúd 146 A a z merania nakrátko, že pre tento budiaci prúd 146 A je prúd kotvy 1080 A.

a) Vypočítajte redukčný činiteľ g , ktorým sa prepočítava prúd kotvy I_a na rotorové budiace vinutie $gI_a = I'_a$. Zanedbajte vplyv statorového odporu kotvy, straty a vplyv sýtenia.

b) Vypočítajte budiaci prúd I_{bN} pre menovitý záťažový prúd a záťažový uhol ϑ_L .

Riešenie:

a) Redukčný činiteľ vypočítame zo vzťahu

$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} = \frac{146}{1080} = 0,135$$

Touto hodnotou budeme prepočítavať statorové prúdy kotvy na rotor, aby sme ich mohli spolu nakresliť do fázorového diagramu. Danú úlohu môžeme riešiť 1. graficky, 2. komplexno-symbolickým počtom, 3. goniometrickými funkciami.

Zjednodušený fázorový diagram synchronného stroja, v ktorom je naznačený len súčet prúdov a ich vzťah k indukovanému statorovému napätiu, je na obr. 5.9. Fázor napätia je v hornej polrovine, fázory prúdov v dolnej polrovine, lebo ide o zdroj elektrickej energie.

b)

1. Graficky by sme zadanie riešili tak, že v treťom kvadrante vedieme lúč pod uhlom

$$\varphi_N = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$$

V zvolenej mierke prúdov nanesieme dĺžku

$$\overline{OA} = gI_{aN} = 0,135 \cdot 1830 = 247 \text{ A}$$

a v smere osi $-j$ dĺžku

$$\overline{OS} = I_{b0} = 146 \text{ A}$$

Z trojuholníka OAS odčítame dĺžku \overline{AS} , ktorá v danej mierke prúdov predstavuje menovitý budiaci prúd

$$\overline{AS} = I_{bN} = 354 \text{ A}$$

Záťažový uhol potom odmeriame uhlomerom z obr.5.9, $\vartheta_{LN} = 33,9^\circ$. Meranie uhlomerom je vždy problematické, preto uvádzame ďalšie spôsoby riešenia.

2. Riešenie komplexno-symbolickým počtom

$$I_{b0} = gI_{aN} + I_{bN} \quad I_{bN} = I_{b0} - gI_{aN} \quad I_{b0} = -j146 \text{ A}$$

$$I_{aN} = -I_{aN} \cos \varphi_N + jI_{aN} \sin \varphi_N = -1830(0,8 - j0,6) = (-1464 + j1098) \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_{bN} &= I_{b0} - gI_N = -j146 - 0,135(-1464 + j1098) = \\ &= (197,64 - j294,23) = 354,4 \angle -56,11^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

kde absolútna hodnota budiaceho prúdu pre menovitú záťaž je

$$I_{bN} = \sqrt{197,64^2 + 294,23^2} = 354,4 \text{ A}$$

Na obr. 5.9 vidno polohu fázora I_{bN} s príslušným uhlom $\varphi_{bN} = 56,1^\circ$, ale aj jeho posunutie do trojuholníka, v ktorom spolu vidno súvis všetkých troch zložiek prúdov. V tomto trojuholníku vidno aj hľadaný záťažový uhol ϑ_{LN} , ktorý určíme ako doplnok uhla φ_{bN} do 90° :

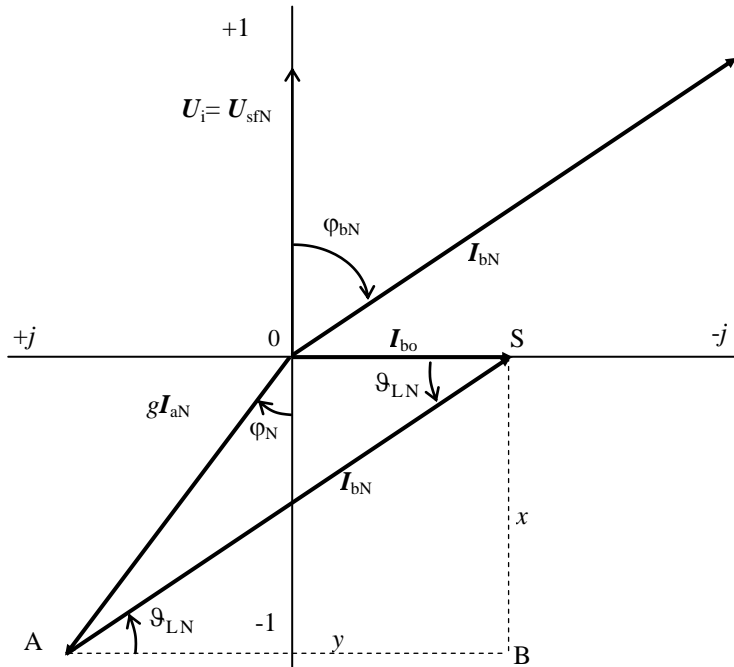
$$\vartheta_{LN} = 90^\circ - \varphi_{bN} = (90 - 56,1)^\circ = 33,9^\circ.$$

3. Ak nepotrebujeme vedieť polohu fázora budiaceho prúdu v rovine, tak stačí výpočet absolútnej hodnoty napr. podľa Pytagorovej vety (obr. 5.9), pričom zostrojíme pomocný trojuholník ABS, s odvesnami x a y a preponou I_{bN} :

$$\begin{aligned} I_{bN} &= \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(gI_{aN} \cos \varphi)^2 + (gI_{aN} \sin \varphi + I_{b0})^2} = \\ &= \sqrt{(0,135 \cdot 1830 \cdot 0,8)^2 + (0,135 \cdot 1830 \cdot 0,6 + 146)^2} = 354,4 \text{ A} \end{aligned}$$

Záťažový uhol ϑ_{LN} môžeme potom vypočítať pomocou jednej z goniometrických funkcií v uvedenom trojuholníku ABS, napr.:

$$\sin \vartheta_{LN} = \frac{x}{I_{bN}} = \frac{gI_{aN} \cos \varphi}{I_{bN}} = \frac{0,135 \cdot 1830 \cdot 0,8}{354,4} = 0,5576 \Rightarrow \vartheta_{LN} = \arcsin 0,5576 = 33,9^\circ$$



5.9 Zjednodušený fázorový diagram synchronného stroja

Príklad 5.3

Turboalternátor z príkladu 5.2 je pripojený k tvrdej sieti ($U_{sfN}=\text{konšt.}$, $f_s=\text{konšt.}$). Ako sa zmení jeho účinník $\cos\varphi$ a satorový prúd I_a , ak klesne jeho činný výkon o 10 % následkom menšej výkonnosti turbíny a ak zostane budenie nezmenené?

Riešenie:

Tento príklad je ilustrovaný na obr. 5.10. Zníženie činného výkonu o 10 % sa v diagrame prejaví znížením činnej zložky prúdu o 10 %. Pretože sa budenie nemení, nakreslíme kružnicu so stredom S a polomerom $\overline{SA_N}$. Na kružnici hľadáme taký bod A, aby činná zložka satorového prúdu I_a bola o 10 % menšia ako činná zložka menovitého prúdu. Neznámu je prúd I_a , príslušný účinník $\cos\varphi$, pričom $I_{ač} = 90 \% I_{ačN}$. Kvôli prehľadnosti obrázku je zníženie činného výkonu prehnane veľké (asi o 70 %).

Pre dve neznáme φ a I_a zostavíme dve rovnice

$$I_{bN}^2 = (g I_{ač})^2 + (I_{b0} + g I_a \sin\varphi)^2 - \text{prvá rovnica}$$

$$\cos \varphi = \frac{g I_{a\check{c}}}{g I_a} \text{ - druhá rovnica}$$

Činnú zložku neznámeho prúdu I_a vieme vyčísliť hneď:

$$I_{a\check{c}} = 0,9 I_a \check{c} = 0,9 I_{aN} \cos \varphi_N = 0,9 \cdot 1830 \cdot 0,8 = 1317,6 \text{ A}$$

Po prepočítaní na stranu rotora dostaneme:

$$g I_{a\check{c}} = 0,135 \cdot 1317,6 = 177,87 \text{ A}$$

a po dosadení do upraveného vzťahu, ktorý bol už uvedený

$$(I_{b0} + g I_a \sin \varphi)^2 = I_{bN}^2 - (g I_{a\check{c}})^2 = 354,4^2 - 177,87^2 = 93961,6$$

$$I_{b0} + g I_a \sin \varphi = \sqrt{93961,6} = 306,5$$

$$g I_a \sin \varphi = 306,5 - 146 = 160,5$$

$$g I_a = \frac{160,5}{\sin \varphi}$$

Teraz tento výraz dosadíme do druhej rovnice

$$\cos \varphi = \frac{177,87}{160,5} \sin \varphi = 1,108 \Rightarrow \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{1,108} = 0,9025 \Rightarrow \varphi = \operatorname{arctg} 0,9025 = 42,06^\circ$$

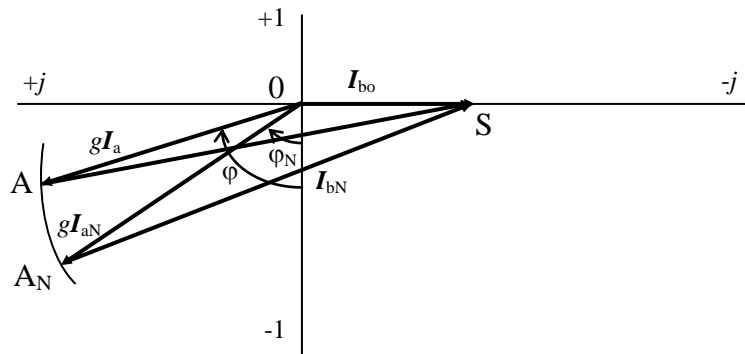
Hľadaný účinník je $\cos \varphi = 0,742$ ($\sin \varphi = 0,67$)

$$g I_a = \frac{160,5}{0,67} = 239,5 \text{ A}$$

Nový záťažový prúd bude

$$I_a = \frac{239,5}{g} = \frac{239,5}{0,135} = 1774 \text{ A.}$$

Ako sme mohli podľa obr. 5.9 predpokladať, prúd I_a je menší ako I_{aN} , ale zhorší sa účinník, lebo $\cos \varphi < \cos \varphi_N$.

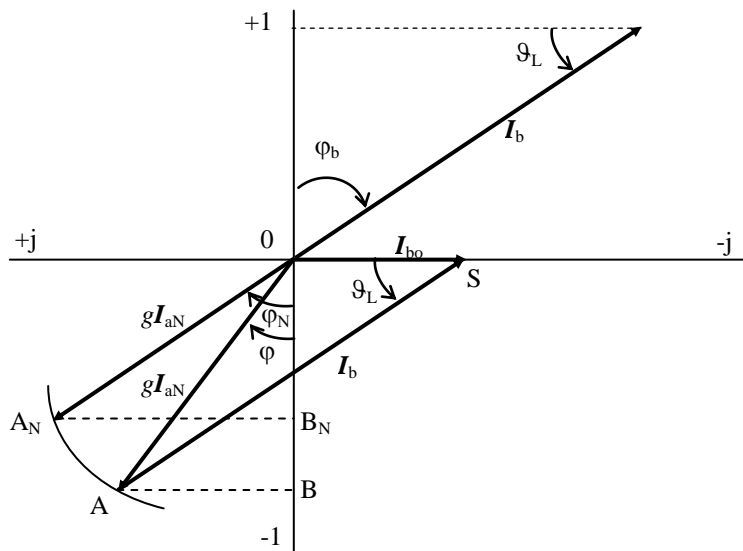


Obr. 5.10 Vplyv poklesu činného výkonu na prúd a účinník (ilustračný obrázok k príkladu 5.3- zníženie činného výkonu je nakreslené omnoho výraznejšie)

Príklad 5.4

O koľko percent je preťažená turbína, ak je v turboalternátore z príkladu 5.2 (prifázovaného k tvrdej sieti) zmenšená spotreba jalového výkonu tak, že stroj pracuje s $\cos\varphi = 0,9$ ind. Pritom však chceme turboalternátor plne tepelne využiť, t. j. ponechať menovitý satorový prúd I_{aN} .

Riešenie:



Obr. 5.11 Vplyv zmenšenia jalového výkonu na preťaženie turbíny (k príkladu 5.4)

Preťaženie pohonnej turbíny sa v diagrame prejaví veľkosťou činnnej zložky statorového prúdu. Pretože menovitý statorový prúd ostáva konštantný, nakreslíme kružnicu so stredom 0 a polomerom $\overline{0A_N}$. Na kružnici hľadáme taký bod A, aby statorový prúd $g I_{aN}$ mal daný účinník $\cos \varphi = 0,9$ ind ($\varphi = 25,84^\circ$, obr. 5.11). Potrebujeme určiť veľkosť činnnej zložky statorového prúdu. Vypočítame ho pomocou nového účinníka:

$$I_{ač} = I_{aN} \cos \varphi = 1830 \cdot 0,9 = 1647 \text{ A}$$

Keďže pôvodná činná zložka bola

$$I_{ačN} = I_{aN} \cos \varphi_N = 1830 \cdot 0,8 = 1464 \text{ A}$$

a nová činná zložka prúdu je 1647 A, nastalo zvýšenie prúdu

$$I_{ač} = 112,5 \% I_{ačN}$$

a teda turbína je preťažená o 12,5 %.

Príklad 5.5

Ako by sme museli zmeniť budiaci prúd I_b turboalternátora z príkladu 5.2, aby pri $\cos \varphi = 0,9$ ind. bol statorový prúd menovitý $I_{aN} = 1830 \text{ A}$, a pritom výkon turbíny je 1,125 P_{tN} , t. j. o 12,5 % vyšší. Ako sa zmení záťažový uhol?

Riešenie:

Pre tento príklad platí zasa diagram na obr. 5.11. Úlohou je vypočítať I_b . Výpočet urobíme alebo komplexno-symbolickým počtom, alebo jednoducho Pytagorovou vetou.

Výpočet komplexno-symbolickým počtom:

$$g I_{aN} + I_b = I_{b0}$$

$$g I_{aN} = g I_{aN} (-\cos \varphi + j \sin \varphi) = 0,135 \cdot 1830 (-0,9 + j0,4358) = -222,34 + j107,66$$

$$I_{b0} = -j146$$

$$I_b = I_{b0} - g I_{aN} = -j146 - (-222,34 + j107,66) = 222,34 - j253,66 = 337,31 \angle -48,7^\circ \text{ A}$$

Výpočet pomocou Pytagorovej vety:

$$\begin{aligned} I_b &= \sqrt{(g I_{aN} \cos \varphi)^2 + (I_{b0} + g I_{aN} \sin \varphi)^2} = \\ &= \sqrt{(0,135 \cdot 1830 \cdot 0,9)^2 + (146 + 0,135 \cdot 1830 \cdot 0,4358)^2} = 337,3 \text{ A} \end{aligned}$$

pričom

$$I_N \sin \varphi = 1830 \cdot 0,4358 = 797,5 \text{ A}$$

Zhoda výsledkov je dobrá, výhodou výpočtu symbolicko-komplexným počtom je, že máme k dispozícii aj polohu fázora. V tomto prípade je posun fázora voči reálnej osi $\varphi_b = 48,7^\circ$. Na obr. 5.11 to vidno pri posunutí fázora I_b do počiatku sústavy.

Zaťažový uhol ϑ_L je doplnkom uhla φ_b do 90° , takže nový zaťažový uhol $\vartheta_L = 90^\circ - 48,7^\circ = 41,3^\circ$. Oproti menovitému stavu $\vartheta_{LN} = 33,9^\circ$ je to 1,218-násobné zvýšenie.

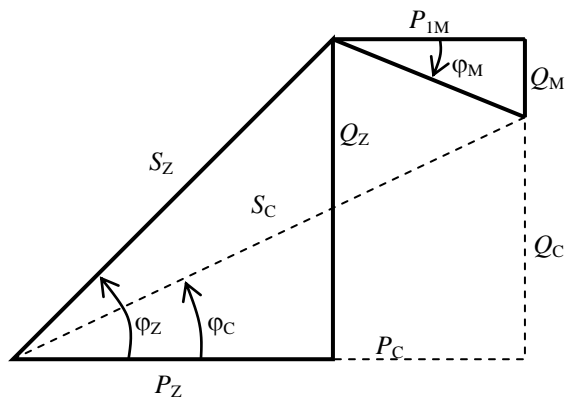
Príklad 5.6

Činný príkon zlievarne je $P_z = 800 \text{ kW}$ pri účinníku $\cos \varphi_z = 0,65$ ind. Ako sa zlepši celkový účinník $\cos \varphi_c$, keď na pohon novoinštalovaného kompresora sa použije synchronný motor s výkonom $P_M = 630 \text{ kW}$, ktorý v prebudenom stave pracuje s účinníkom $\cos \varphi_M = 0,9$ kap. Účinnosť synchronného motora $\eta_M = 93 \%$.

Riešenie:

Postup výpočtu je zrejmý z obr. 5.12, kde je nakreslený výkonový trojuholník zlievarne, synchronného motora a ich súčet. Jalový príkon zlievarne pred inštalovaním kompresora bol

$$Q_z = P_z \operatorname{tg} \varphi_z = 800 \cdot 1,17 = 936 \text{ kvar}$$



Obr. 5.12 K príkladu 5.6: Výkonový trojuholník zlievarne a synchronného motora

Činný príkon motora

$$P_{pM} = \frac{P_M}{\eta_M} = \frac{630}{0,93} = 677,42 \text{ kW}$$

Kapacitný charakter záťaže vyjadríme záporným znamienkom, takže jalový príkon motora je

$$Q_M = -P_{pM} \operatorname{tg} \varphi_M = -677 \cdot 0,484 = -328 \text{ kvar}$$

Celkový činný príkon zo siete

$$P_c = P_z + P_{pM} = 800 + 677 = 1477 \text{ kW}$$

Celkový jalový príkon zo siete

$$Q_c = Q_z + Q_M = 936 - 328 = 608 \text{ kvar}$$

Celkový zdanlivý príkon zo siete

$$S_c^2 = P_c^2 + Q_c^2 = 1477^2 + 608^2 = 1595 \text{ kVA}$$

Celkový účinník sa po pripojení kompresora, poháňaného prebudeným synchronným motorom zlepšil na

$$\cos \varphi_c = \frac{P_c}{S_c} = \frac{1477}{1595} = 0,926 \text{ ind.}$$

Príklad 5.7

Vypočítajte prúd I_z zlievarne z príkladu 5.6 pred inštalovaním kompresora, prúd motora I_M a celkový prúd I_c po inštalovaní kompresora, poháňaného prekompenzovaným synchronným motorom, ak napätie siete je 6000 V pri zapojení do Y. Nakreslite fázorový diagram prúdov. Skontrolujte výpočet $\cos \varphi_c$ z príkladu 5.6 pomocou fázového posunu prúdu I_c .

Riešenie:

Fázorový diagram prúdov je na obr. 5.13
Prúd zlievarne

$$I_z = \frac{P_z}{\sqrt{3} U \cos \varphi_z} = \frac{800 \cdot 10^3}{\sqrt{3} 6000 \cdot 0,65} = 118,4 \text{ A}$$

$$I_z = I_z \angle \varphi_z = 118,4 \angle -49,45^\circ = (76,96 - j89,96) \text{ A}$$

Prúd motora

$$I_M = \frac{P_{pM}}{\sqrt{3}U \cos \varphi_M} = \frac{677 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,9} = 72,4 \text{ A}$$

$$I_M = I_M \angle \varphi_M = 72,4 \angle 25,8^\circ = (65,16 + j31,56) \text{ A}$$

Celkový prúd je daný fázorovým súčtom prúdu motora a prúdu zlievarne:

$$I_c = I_z + I_M = 76,96 - j90 + 65,16 + j31,56 = 142,12 - j58,44 = 153,66 \angle -22,35^\circ \text{ A}$$

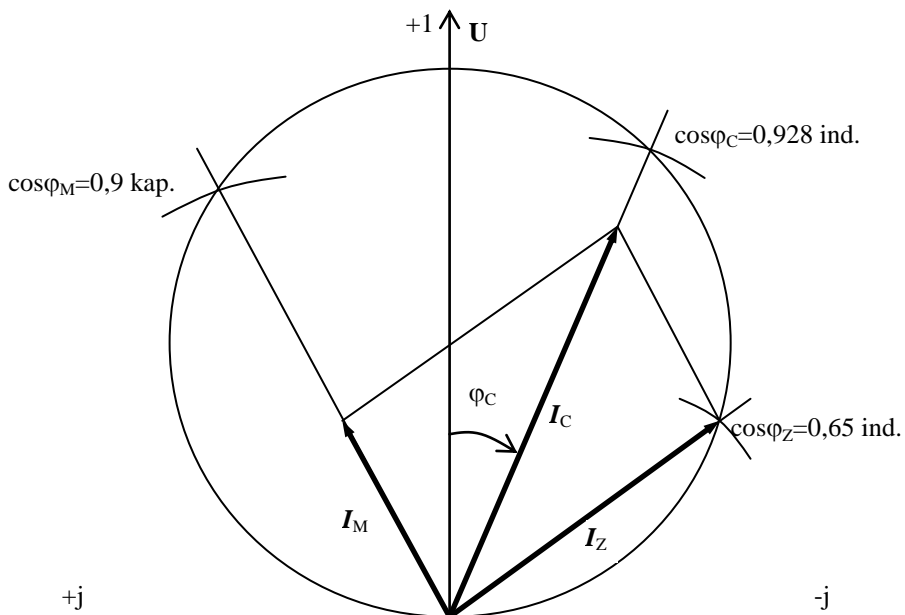
Celkový účinník je

$$\cos \varphi_c = \cos(-22,35^\circ) = 0,925$$

Teraz urobíme kontrolu. Celkový činný výkon je:

$$P_c = \sqrt{3}U I_c \cos \varphi_c = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 153,66 \cdot 0,925 = 1477,11 \text{ kW}$$

Rozdiely medzi výsledkami $\cos \varphi_c$ v predchádzajúcom a tomto príklade sú spôsobené nepresnosťami výpočtov hlavne vplyvom zaokrúhľovania.



Obr. 5.13 K príkladu 5.7 Zlepšenie účinníka použitím synchrónneho motora

Príklad 5.8

Pomalobežný autosynchronný motor s výkonom $P = 4 \text{ MW}$, na napätie $U_{sN} = 6000 \text{ V}$, zapojený do hviezdy, frekvencia $f_s = 50 \text{ Hz}$, má menovitú rýchlosť $n_{syn} = 300 \text{ min}^{-1}$, účinník $\cos\varphi_N = 0,9$ kap. Skratový pomer $k_k = 1,1$; účinnosť pri plnom zaťažení $\eta = 96,1 \%$. Záberový prúd $I_{zab} = 4,8I_{aN}$, záberový moment $M_{zab} = 1,4M_N$.

Koľko pólov má tento stroj? Aký veľký je menovitý prúd a záberový prúd? Aký veľký je menovitý moment a záberový moment?

Riešenie:

Počet pólových dvojíc

$$p = \frac{60f_s}{n_{syn}} = \frac{60 \cdot 50}{300} = 10$$

Počet pólov $2p = 20$

Príkon motora

$$P_p = \frac{P}{\eta} = \frac{4 \cdot 10^6}{0,961} = 4,16 \text{ MW}$$

Menovitý prúd motora

$$I_{aN} = \frac{P_p}{\sqrt{3}U_{sN} \cos\varphi} = \frac{4,16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,9} = 447,8 \text{ A}$$

Záberový prúd motora

$$I_{zab} = 4,8I_{aN} = 4,8 \cdot 447,8 = 2149,4 \text{ A}$$

Menovitý moment

$$M_N = \frac{P}{\Omega_s} = \frac{P}{\frac{2\pi n_{syn}}{60}} = 9,55 \frac{P}{n_{syn}} = 9,55 \frac{4 \cdot 10^6}{300} = 12,7 \cdot 10^4 \text{ Nm}$$

Záberový moment

$$M_{zab} = 1,4M_N = 1,4 \cdot 12,7 \cdot 10^4 = 17,8 \cdot 10^4 \text{ Nm}$$

Príklad 5.9

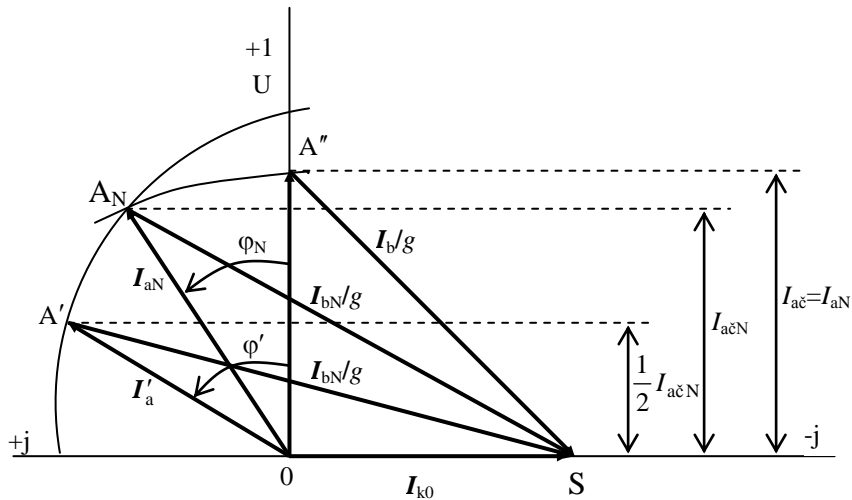
S akým účinníkom $\cos\varphi'$ bude pracovať autosynchronný motor z príkladu 5.8, ak klesne jeho mechanické zaťaženie na polovicu a ak zostane buď napätie i sieťové napätie U_s nezmenené? Aký veľký bude prúd I'_a odoberaný zo siete?

Riešenie:

Fázorový diagram k tomuto príkladu je na obr. 5.14.

Pretože ide o synchronný motor, ktorý je spotrebičom elektrickej energie, kreslíme diagram prúdov do hornej polovice Gaussovej roviny a pretože účinník je kapacitného charakteru, fázory prúdu sú vľavo od napätia, pretože prúd predbieha napätie. Diagram je nakreslený pre prúdy na strane statora, preto namiesto I_{b0} vystupuje tu prúd I_{k0} a budiaci prúd je prepočítaný redukčným činiteľom na I_{bN}/g . Zníženie mechanického zaťaženia sa v diagrame prejaví znížením činnnej zložky prúdu. Pretože budenie ostane nezmenené, nový pracovný bod A' hľadáme na kružnici so stredom S a polomerom I_{bN}/g tak, aby činná zložka jeho statorového prúdu tvorila polovicu pôvodného v menovitom stave. V ďalšom výpočte budeme potrebovať I_{k0} a I_{bN}/g . Prúd I_{k0} , ktorým by sa zo siete vybudilo menovité napätie, ak $I_b = 0$, vypočítame pomocou skratového pomeru:

$$I_{k0} = k_k I_{aN} = 1,1 \cdot 447,8 = 492,6 \text{ A}$$



Obr. 5.14 K príkladu 5.9: Fázorový diagram prebudeného synchronného motora

Budiaci menovitý prúd v rotore prepočítaný na stator vypočítame pomocou kosínusovej vety pre trojuholník v bode A_N :

$$\begin{aligned} (I_{bN}/g)^2 &= I_{aN}^2 + I_{k0}^2 - 2I_{aN}I_{k0} \cos(\varphi_N + \pi/2) = I_{aN}^2 + I_{k0}^2 + 2I_{aN}I_{k0} \sin(\varphi_N) = \\ &= 447,8^2 + 492,6^2 + 2 \cdot 447,8 \cdot 492,6 \cdot 0,436 \Rightarrow I_{bN}/g = 797 \text{ A} \end{aligned}$$

Činná zložka menovitého prúdu

$$I_{a\check{c}N} = I_{aN} \cos \varphi_N = 447,8 \cdot 0,9 = 403 \text{ A}$$

$$1/2I_{\text{čN}} = 201,5 \text{ A.}$$

Napišeme rovnice pre výpočet I'_a a $\cos \varphi'$ v novom prevádzkovom stave:

$$\cos \varphi' = \frac{I_{\text{ačN}}/2}{I'_a}$$

$$(I_{\text{bN}}/g)^2 = (1/2I_{\text{ačN}})^2 + (I_{\text{k0}} + I'_a \sin \varphi')^2$$

$$797^2 - 201,5^2 = (492,6 + I'_a \sin \varphi')^2$$

$$I'_a \sin \varphi' = 278,5$$

Po dosadení do prvej rovnice

$$\cos \varphi' = \frac{201,5}{278,5} \sin \varphi'$$

dostaneme

$$\text{tg } \varphi' = 1,38$$

Hľadaný účinník je $\cos \varphi' = 0,586$

a satorový prúd

$$I'_a = \frac{201,5}{0,586} = 343,7 \text{ A}$$

čo je zníženie oproti menovitému prúdu na 76,75 %.

Príklad 5.10

O koľko percent väčší výkon dáva synchronný motor z príkladu 5.8, ak pracuje s účinníkom $\cos \varphi'' = 1$ a ak vzhľadom na oteplenie je satorový prúd rovnako veľký, t.j. menovitý I_{aN} . Ako sa zmení potrebný budiaci prúd?

Riešenie:

Fázorový diagram je na obr.5.14, daný stav je charakterizovaný pracovným bodom A'' . Činný výkon motora je reprezentovaný činnou zložkou prúdu, ktorá je v tomto prípade zhodná s celkovým menovitým prúdom kotvy:

$$I_{\text{aN}} = I_{\text{ač}} = 447,8 \text{ A}$$

Oproti činnnej zložke menovitého prúdu pri menovitom účinníku $I_{acN} = 403$ A je to zvýšenie o 11 %, preto výkon motora bude väčší o 11 %. Veľkosť budiaceho prúdu určíme napr. takto:

$$(I_b / g)^2 = I_{k0}^2 + I_{aN}^2 = 492,6^2 + 447,8^2$$

$$I_b / g = 665,7 \text{ A,}$$

čo je oproti pôvodnej hodnote menovitého budiaceho prúdu $I_{bN} / g = 797$ A zníženie o 16,5 %.

Príklad 5.11

Vypočítajte budiaci prúd a záťažový uhol 3-fázového alternátora s menovitým výkonom $S_N = 40$ kVA, napätie 400 V, zapojenie Y, účinník $\cos\varphi = 0,8$ ind. pri menovitom zaťažení, ak magnetizačný prúd v budiacom vinutí $I_{b0} = 18$ A a skratový pomer $k_k = 1,2$. Pri riešení zanedbajte magnetizačný prúd pri chode nakrátko. Výpočet zopakujte pre $\cos\varphi = 0,8$ kap.

Riešenie:

Najskôr vypočítame budiaci prúd pre účinník induktívneho charakteru. Na obr. 5.15a je fázorový diagram, podľa ktorého budeme počítať. Neznámou je budiaci prúd pri menovitom zaťažení I_{bN} . Pre tento prúd platí

$$I_{bN}^2 = (gI_{aN} \cos\varphi)^2 + (I_{b0} + gI_{aN} \sin\varphi)^2,$$

a preto potrebujeme vedieť tieto údaje

Menovitý prúd kotvy

$$I_{aN} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U} = \frac{40 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 57,7 \text{ A}$$

Prúd nakrátko statora pri budení zo siete na menovité napätie

$$I_{k0} = k_k I_{aN} = 1,2 \cdot 57,7 = 69,28 \text{ A}$$

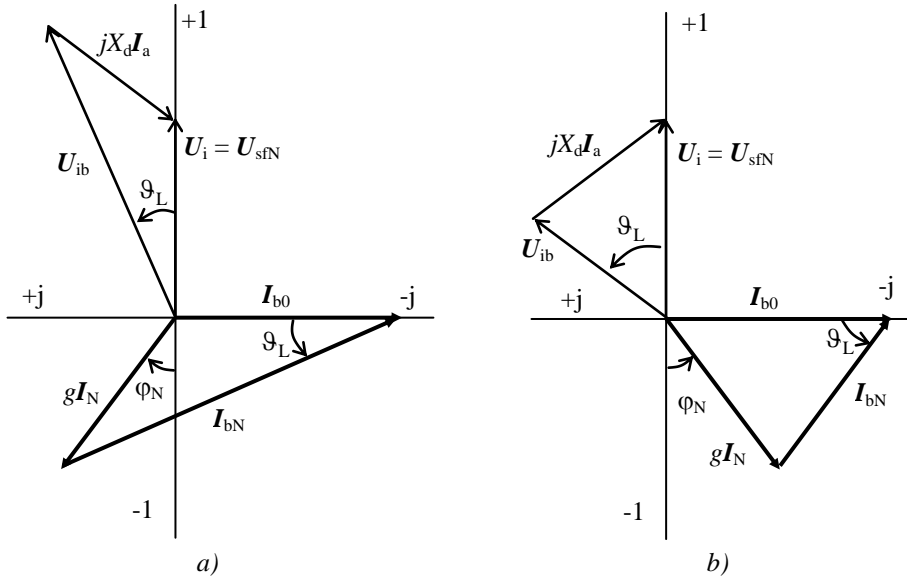
Redukčný činiteľ

$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} = \frac{18}{69,28} = 0,259$$

Po dosadení do vzťahu pre I_{bN} a príslušných výpočtoch dostaneme, že budiaci prúd pri menovitom zaťažení je $I_{bN} = 29,5$ A.

Tento príklad môžeme vypočítať aj jednoduchšie pomocou komplexno-symbolickej metódy. Fázor menovitého statorového prúdu je daný

$$I_N = I_N \angle \varphi_N = 57,73 \angle 36,9^\circ = (-46,18 + j34,66) \text{ A}$$



Obr. 5.15 Fázorové diagramy k príkladu 5.11 pre a) účinník induktívneho charakteru, b) účinník kapacitného charakteru

Fázor magnetizačného prúdu zo strany statora

$$I_{k0} = I_{k0} \angle -90^\circ = -j69,28 \text{ A}$$

Menovitý budiaci prúd určíme pomocou vzťahu

$$I_{k0} = I_N + \frac{I_{bN}}{g} \Rightarrow I_{bN} = g(I_{k0} - I_N)$$

$$I_{bN} = 0,259(-j69,28 + 46,18 - j34,66) = 11,96 - j26,96 = 29,5 \angle 246,1^\circ \text{ A}$$

Ďalej môžeme vypočítať budiaci prúd pre účinník kapacitného charakteru. Fázorový diagram pre tento prípad je na obr. 5.15b. Výpočet urobíme oboma spôsobmi ako pre účinník induktívneho charakteru.

Neznámou je budiaci prúd pri menovitom zaťažení I_{bN} . Pre tento prúd platí

$$I_{bN}^2 = (gI_N \cos \varphi)^2 + (I_{b0} - gI_N \sin \varphi)^2 = (0,259 \cdot 57,7 \cdot 0,8)^2 + (18 - 0,259 \cdot 57,7 \cdot 0,6)^2$$

Pretože už poznáme menovitý prúd a aj redukčný činiteľ, tak potom môžeme po dosadení do uvedeného vzťahu vypočítať menovitý budiaci prúd pre kapacitný charakter účinníka, $I_{bN} = 14,96 \text{ A}$.

Vidíme, že budiaci prúd je teraz menší ako bol v prípade induktívneho charakteru záťaže, synchronný stroj je podbudený.

Teraz urobíme tento výpočet podľa komplexno-symbolickej metódy. Fázor menovitého statorového prúdu je daný

$$I_N = I_N \angle \varphi_N = 57,73 \angle -36,9^\circ = (-46,18 - j34,66) \text{ A}$$

Fázor magnetizačného prúdu zo strany statora

$$I_{k0} = I_{k0} \angle -90^\circ = -j69,28 \text{ A}$$

Menovitý budiaci prúd určíme pomocou vzťahu

$$I_{k0} = I_N + \frac{I_{bN}}{g} \Rightarrow I_{bN} = g(I_{k0} - I_N)$$

$$I_{bN} = 0,259(-j69,28 - (-46,18 - j34,66)) = 11,96 - j8,96 = 14,96 \angle 216,9^\circ \text{ A}$$

Príklad 5.12

Je daný trojfázový štvorpólový generátor, ktorý má menovitý výkon $S_N = 125 \text{ kVA}$, napätie $U_N = 400 \text{ V}$, pri zapojení statorového vinutia do hviezdy, $\cos \varphi_N = 0,8 \text{ ind.}$, skratový pomer $k_k = 0,912$, budiace napätie $U_{ib} = 342 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Vypočítajte záťažový uhol a moment zvratu (moment maximálny).

Treba si uvedomiť, že hodnota $U_N = 400 \text{ V}$ je združené napätie, ako je to zvykom vo všetkých trojfázových zariadeniach a hodnota $U_{ib} = 342 \text{ V}$ je fázové napätie, lebo je to indukované napätie vo vinutí jednej fázy statora spôsobené budením rotora. Toto napätie sa vyskytuje v náhradnej schéme, ktorá sa kreslí vždy pre jednu fázu.

Riešenie:

Menovitý prúd generátora

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 180 \text{ A}$$

Synchronná rýchlosť

$$n_{\text{syn}} = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ min}^{-1}$$

Prúd nakrátko statora pri buzení zo siete na menovité napätie

$$I_{k0} = k_k I_N = 0,912 \cdot 180 = 164,5 \text{ A}$$

Moment synchronného stroja je daný vzťahom

$$M_e = \frac{9,55}{n_{\text{syn}}} m U_{\text{sIN}} \frac{U_{\text{ib}}}{X_d} \sin \vartheta_L \quad [\text{Nm}]$$

pričom $U_{\text{sIN}} / X_d = I_{k0}$ a m je počet fáz. Vzťah U_{ib} k ostatným parametrom je zrejmý z obr. 5.16, kde je naznačený aj záťažový uhol ϑ_L .

Synchronný stroj vyvíja maximálny moment (moment zvratu) pri $\vartheta_L = \pi/2$, t.j. $\sin \vartheta_L = 1$:

$$M_{e\text{max}} = \frac{9,55}{1500} 3 \cdot 164,5 \cdot 342 = 1074,55 \text{ Nm}$$

Menovitý moment získame z výkonu a rýchlosti

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_s} = \frac{P_N}{2\pi n_s} = 9,55 \frac{125 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{1500} = 636,67 \text{ Nm}$$

Ak zanedbáme moment strát, môžeme napísať:

$$M_N = M_{e\text{max}} \sin \vartheta_L$$

A preto záťažový uhol ϑ_L vychádza

$$\sin \vartheta_L = \frac{M_N}{M_{e\text{max}}} = \frac{636,67}{1074,55} = 0,592$$

čo zodpovedá záťažovému uhlu $\vartheta_L = 36,33^\circ$.

Príklad 5.13

Je daný trojfázový dvojpólový synchronný generátor, ktorého menovité napätie $U_N = 6300 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$, dĺžka kotvy $l_{\text{Fe}} = 120 \text{ cm}$, priemer kotvy $d = 50 \text{ cm}$, vzduchová medzera $\delta = 20 \text{ mm}$. Na statore je 48 drážok so štyrmi vodičmi v drážke. Faktor vinutia $k_v = 0,9$. Statorové vinutie je spojené do hviezdy. Na rotore je 200 budiacich závitov na jednom póle. Vypočítajte veľkosť budiaceho prúdu potrebného na vytvorenie príslušného magnetického toku, ktorý vybudí dané napätie. Magnetický odpor železa zanedbajte. (Uvažujeme nenasýtený stroj).

Riešenie:

Budiaci prúd určíme z hodnoty magnetického napätia, pre ktoré platí zákon celkového prúdu. Ak zanedbávame magnetický odpor železa, celé magnetické napätie je na vzduchovej medzere:

$$U_{\text{mag}} = N_b I_b \cong H_\delta \delta$$

Počet budiacich závitov na pól je $N_b = 200$, dĺžka vzduchovej medzery je $\delta = 20 \cdot 10^{-3}$ m. Intenzitu magnetického poľa vo vzduchovej medzere H_δ určíme pomocou magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere B_δ a magnetickej permeability vákua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Magnetickú indukciu B_δ určíme pomocou vzťahu pre indukované napätie striedavých strojov, ktoré v stave naprázdno považujeme za totožné so svorkovým napätím.

$$U_{sIN} = \sqrt{2} \pi f \phi N k_v \quad [\text{V}]$$

Stredná hodnota magnetického toku je

$$\phi = \frac{U_{sIN}}{\sqrt{2} \pi f_s N k_v} = \frac{6300 / \sqrt{3}}{\sqrt{2} \pi \cdot 50 \cdot 32 \cdot 0,9} = 0,568 \text{ Wb}$$

pričom počet závitov v jednej fáze sme dostali z počtu vodičov v drážke a počtu drážok na pól a fázu q :

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{48}{2 \cdot 3} = 8$$

Ak je počet závitov jednej fázy N , tak počet vodičov je $2N$, a tieto vodiče uložíme do toľkých drážok, koľko patrí jednej fáze, čiže do Q/m drážok. Takže počet vodičov v drážke je:

$$\frac{2N}{m} = \frac{2N}{2pq} = \frac{N}{pq}$$

Keďže je dané, že v drážke sú 4 vodiče, potom z predchádzajúceho vzťahu možno vypočítať počet závitov jednej fázy:

$$\frac{N}{pq} = 4 \Rightarrow N = 4pq = 4 \cdot 1 \cdot 8 = 32$$

Táto hodnota je dosadená do vzťahu pre výpočet magnetického toku.

Amplitúdu magnetickej indukcie vypočítame zo strednej hodnoty magnetického toku:

$$B_\delta = \frac{\pi \phi}{2 \delta} = \frac{\pi \phi}{2 \frac{\pi d}{2p} l_{Fe}} = \frac{0,568}{0,5 \cdot 1,2} = 0,95 \text{ T}$$

Intenzita magnetického poľa vo vzduchovej medzere

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,95}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 755,98 \cdot 10^3 \text{ A/m}$$

Budiaci prúd potom je

$$I_b = \frac{H_\delta \delta}{N_b} = \frac{755,98 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{200} = 75,6 \text{ A}$$

Príklad 5.14

Je daný trojfázový, štvorpólový synchronný generátor s hladkým rotorom, ktorý má menovitý výkon $S_N = 125 \text{ kVA}$, účinník $\cos\varphi_N = 0,8$ ind., napätie $U_{sN} = 400 \text{ V}$, zapojenie Y, pomernú rozptylovú reaktanciu $x_\sigma = 10 \%$. Na vybudenie menovitého napätia v stave naprázdno je potrebný budiaci prúd $I_{b0} = 7 \text{ A}$, skratový pomer $k_k = 0,912$.

Vypočítajte:

- vnútorné napätie stroja U_i
- budiace napätie stroja U_{ib}
- záťažový uhol ϑ_{LN} , ak stroj pracuje s menovitým výkonom a účinníkom
- $U'_i, U'_{ib}, \vartheta'_L$ ak stroj pracuje s výkonom 60 kW pri menovitom napätí a menovitom účinníku.

Riešenie:

Pre lepšiu názornosť je na obr. 5.16 fázorový diagram synchronného stroja. Postupne vypočítame hodnoty, ktoré potrebujeme na zistenie indukovaného napätia:

- Menovitý prúd

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{sN}} = \frac{125 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 180 \text{ A}$$

Prúd nakrátko

$$I_{k0} = k_k I_N = 0,912 \cdot 180 = 164 \text{ A}$$

Menovitá impedancia

$$Z_N = \frac{U_{sfN}}{I_N} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 180} = 1,28 \Omega$$

Rozptylová reaktancia

$$X_\sigma = \frac{x_\sigma Z_N}{100} = \frac{10 \cdot 1,28}{100} = 0,128 \Omega$$

Úbytok napätia na rozptylovej reaktancii

$$X_\sigma I_N = 0,128 \cdot 180 = 23 \text{ V}$$

Vnútorné napätie stroja U_i vypočítame podľa kosínusovej vety

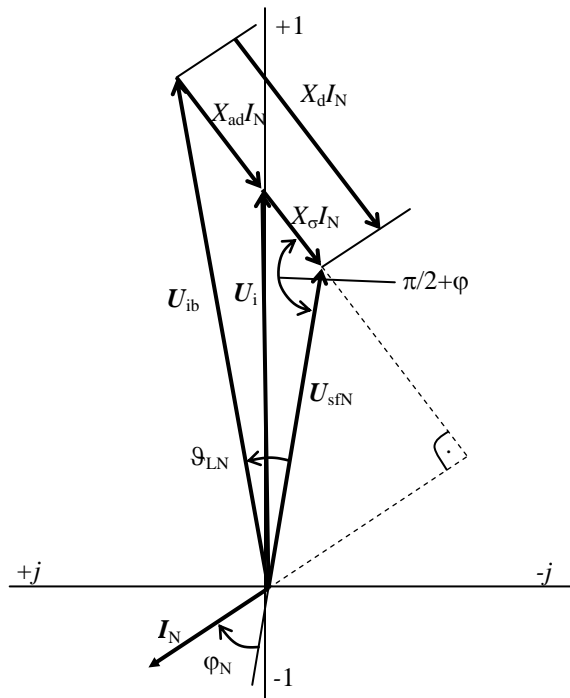
$$U_i^2 = U_{sfn}^2 + (X_\sigma I_N)^2 - 2U_{sfn}(X_\sigma I_N) \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = U_{sfn}^2 + (X_\sigma I_N)^2 + 2U_{sfn}(X_\sigma I_N) \sin \varphi$$

keďže $\cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = -\sin \varphi$, $U_i^2 = 231^2 + 23^2 + 2 \cdot 231 \cdot 23 \cdot 0,6 \Rightarrow U_i = 245,5 \text{ V}$

b) Budiace napätie U_{ib} vypočítame pomocou úbytku na synchronnej reaktancii. Synchronná reaktancia X_d zahrňuje reaktanciu reakcie kotvy X_{ad} a rozptylovú reaktanciu X_σ . Je podstatnou časťou synchronnej impedancie a ak činný odpor možno zanedbať, obmedzuje skratový prúd I_{k0} , ak je synchronný stroj pripojený na tvrdú sieť s napätím U_{sfn} a ak ho nebudíme zo strany rotora. Preto:

$$I_{k0} = \frac{U_{sfn}}{X_d} \quad [\text{A}; \text{V}; \Omega]$$

$$X_d = \frac{U_{sfn}}{I_{k0}} = \frac{231}{164} = 1,4 \Omega$$



Obr.5.16 Fázorový diagram synchronného stroja

Úbytok napätia na synchronnej reaktancii

$$X_d I_N = 1,4 \cdot 180 = 252 \text{ V}$$

Na výpočet budiaceho napätia U_{ib} použijeme opäť kosínusovú vetu

$$U_{ib}^2 = U_{stN}^2 + (X_d I_N)^2 - 2U_{stN} \cdot (X_d I_N) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$$

$$U_{ib}^2 = 231^2 + 252^2 + 2 \cdot 231 \cdot 252 \cdot 0,6 \Rightarrow U_{ib} = 432 \text{ V}$$

c) Na výpočet záťažového uhla v menovitom stave použijeme zase kosínusovú vetu v tom istom trojuholníku s uhlom ϑ_{LN} :

$$(X_d I_N)^2 = U_{ib}^2 + U_{stN}^2 - 2U_{ib} U_{stN} \cos \vartheta_{LN}$$

$$\cos \vartheta_{LN} = \frac{U_{ib}^2 + U_{stN}^2 - (X_d I_N)^2}{2U_{ib} U_{stN}} = \frac{432^2 + 231^2 - 252^2}{2 \cdot 432 \cdot 231} = 0,884$$

Záťažový uhol ϑ_{LN} je teda $27,84^\circ$.

d) Prúd pri zmenšenom výkone 60 kW je

$$I' = \frac{60 \cdot 10^3}{\sqrt{3} 400 \cdot 0,8} = 108 \text{ A}$$

Hodnota rozptylovej reaktancie sa nemení $X_\sigma = 0,128 \Omega$. Úbytok na rozptylovej reaktancii

$$X_\sigma I' = 0,128 \cdot 108 = 13,8 \text{ V}$$

Výpočet U'_i je analogický ako U_i v odseku a)

$$U'_i{}^2 = U_{stN}^2 + (X_\sigma I')^2 - 2U_{stN} (X_\sigma I') \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$$

$$U'_i{}^2 = 231^2 + 13,8^2 + 2 \cdot 231 \cdot 13,8 \cdot 0,6 \Rightarrow U'_i = 239 \text{ V}$$

Na výpočet U'_{ib} určíme najprv úbytok na synchronnej reaktancii novým záťažovým prúdom

$$X_d I' = 1,4 \cdot 108 = 151,2 \text{ V}$$

Ďalší výpočet je ako v odseku b)

$$U'_{ib}{}^2 = U_{stN}^2 + (X_d I')^2 - 2U_{stN} (X_d I') \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$$

$$U'_{ib}{}^2 = 231^2 + 151,2^2 + 2 \cdot 231 \cdot 151,2 \cdot 0,6 \Rightarrow U'_{ib} = 343 \text{ V}$$

Výpočet nového záťažového uhla je podľa odseku c)

$$\cos \vartheta'_L = \frac{U'_{ib}{}^2 + U'_{sfN}{}^2 - (X_d I')^2}{2U'_{ib} U'_{sfN}} = \frac{343^2 + 231^2 - 151^2}{2 \cdot 343 \cdot 231} = 0,935 \Rightarrow \vartheta'_L = 20,77^\circ$$

Zaťaženie je menšie, preto aj U'_{ib} , U'_i a ϑ'_L sú menšie ako pri menovitom zaťažení.

Príklad 5.15

Turboalternátor 5 MVA, 50 Hz, $x_d = 70\%$, dvojpólový, má zanedbateľne malý ohmický odpor statora. Moment zotrvačnosti točiacich sa častí $J = 300 \text{ kgm}^2$. Vypočítajte vlastný kmitočet netlmeného lineárneho kývania pri menovitom zaťažení a účinníku $\cos \varphi_N = 1,0$.

Riešenie:

Kývanie synchronného stroja značí periodický pohyb rotora, ktorý sa superponuje na jeho rotáciu stálou synchronnou rýchlosťou. Môže to nastať po vychýlení rotora z rovnovážnej polohy ϑ_{L0} , čím vznikne moment vracajúci rotor späť k rovnovážnej polohe. Zotrvačnosťou však rotor prebehne rovnovážnu polohu a prekývne na opačnú stranu, pričom sa spomaľuje momentom pôsobiacim v opačnom zmysle. Voľné kmitanie netlmené by nastalo v stroji bez tlmenia, ktorý by pracoval do tvrdej siete. Veľkosti záťaže (v našom prípade menovitej) zodpovedá určitý záťažový uhol ϑ_{LN} .

Kmitočet netlmeného voľného kývania f_0 je daný vzťahom

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_P}{J}} \quad [\text{Hz}]$$

kde $C = M_{\max} \cos \vartheta_L$ je činiteľ synchronizačného momentu.

Potrebujeme vypočítať moment synchronného stroja i záťažový uhol ϑ_{LN} . Ak zanedbáme moment strát, pre menovitý moment synchronného stroja platí jednak vzťah

$$M_N = M_{\max} \sin \vartheta_{LN}$$

a jednak vzťah

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_{\text{syn}}} = \frac{S_N \cos \varphi_N}{2\pi n_{\text{syn}}} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 1,0}{2\pi \cdot 3000} = 15915 \text{ Nm}$$

kde

$$n_{\text{syn}} = \frac{60 f_s}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ min}^{-1}$$

potom

$$M_{\max} = \frac{M_N}{\sin \vartheta_{LN}}$$

a činiteľ synchronizačného momentu

$$C = M_{\max} \cos \vartheta_{LN} = \frac{M_N}{\sin \vartheta_{LN}} \cos \vartheta_{LN} = \frac{M_N}{\operatorname{tg} \vartheta_{LN}}$$

Na výpočet ϑ_{LN} použijeme fázorový diagram na obr.5.16, ktorý upravíme pre $\varphi_N = 90^\circ$.

Potom pre uhol ϑ_{LN} môžeme písať

$$\operatorname{tg} \vartheta_{LN} = \frac{X_d I_N}{U_{Nf}} = \frac{x_d}{100} = 0,7 \Rightarrow \vartheta_{LN} = 35^\circ$$

pretože pomerná synchronná reaktancia

$$x_d = \frac{X_d}{Z_N} 100 = \frac{X_d I_N}{U_{sN}} 100$$

Po dosadení do vzťahu pre C

$$C = \frac{M_N}{\operatorname{tg} \vartheta_{LN}} = \frac{15916,66}{0,7} = 22738 \text{ Nm/rad}$$

Kmitočet voľného netlmeného kývania je

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Cp}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{22738 \cdot 1}{300}} = 1,386 \text{ Hz}$$

Poznamenajme, že f_0 býva 1 až 3 Hz.

Príklad 5.16

3-fázový synchronný generátor, spojený do hviezdy dodáva prúd 600A pri $\cos \varphi = 1$ do siete konštantného napätia $U_s = 11 \text{ kV}$. Statorové vinutie má impedanciu $Z_s = (0,5 + j8) \Omega / \text{fázu}$. Odpor kotvy zanedbajte.

Vypočítajte:

- činný výkon jednej fázy, vnútorné budiace napätie a záťažový uhol
- nový záťažový uhol ϑ'_{LN} , prúd I' a účinník $\cos \varphi'$, ak buďenie stroja vzrastie o 20 % a odoberaný činný výkon je rovnaký ako v bode a)
- maximálny výstupný výkon pri novom buďení

Riešenie:

- Činný výkon jednej fázy vypočítame podľa známeho vzťahu:

$$P = U_{sfn} I_a \cos \varphi = \frac{11000}{\sqrt{3}} 600 \cdot 1 = 3813,6 \text{ kW/ fázu}$$

Pri nasledujúcich výpočtoch budeme vychádzať z fázorového diagramu na obr.5.17. Vnútorne indukované napätie vypočítame pomocou Pytagorovej vety:

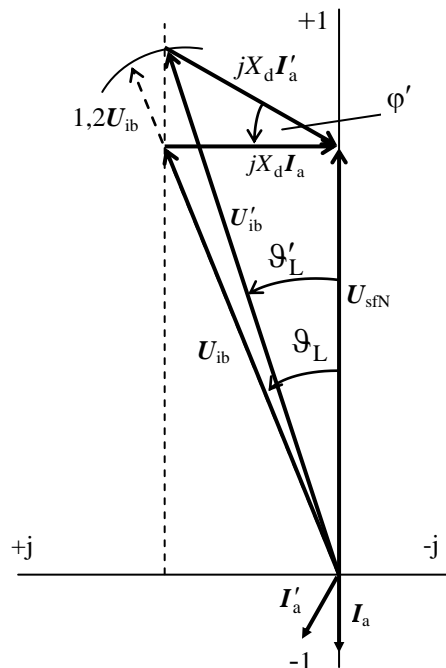
$$U_{ib}^2 = U_{sfn}^2 + (X_d I_a)^2 = 6730 \cdot 10^4 \Rightarrow U_{ib} = 8200 \text{ V}$$

Hodnotu záťažového uhla si môžeme ľahko vypočítať tiež z pravouhlého trojuholníka

$$\sin \vartheta_L = \frac{X_d I_a}{U_{ib}} = \frac{4800}{8200} = 0,586 \Rightarrow \vartheta_L = 35,9^\circ el.$$

b) Nová hodnota vnútorného budiaceho napätia je

$$U'_{ib} = 1,2 U_{ib} = 1,2 \cdot 8200 = 9840 \text{ V}$$



Obr. 5.17 Fázorový diagram k príkladu 5.16

Novú hodnotu záťažového uhla môžeme vypočítať zo vzťahu pre výkon vo vzduchovej medzere, pretože nie sú dané žiadne straty v stroji ani jeho účinnosť, je výkon vo vzduchovej medzere rovný elektrickému výkonu na svorkách stroja.

Pretože sme v bode a) počítali len výkon jednej fázy aj tu budeme uvažovať vzťah len pre jednu fázu

$$P = \frac{U_{sfn} U'_{ib}}{X_d} \sin \vartheta'_L \Rightarrow \sin \vartheta'_L = \frac{PX_d}{U_{sfn} U'_{ib}} = \frac{3813,6 \cdot 10^3 \cdot 8}{6350 \cdot 9840} = 0,4882 \Rightarrow \vartheta'_L = 29,2^\circ el.$$

Pre výpočet novej hodnoty prúdu použijeme kosínusovú vetu

$$(X_d I'_a)^2 = U'_{ib2} + U_{sfn}^2 - 2U'_{ib} U_{sfn} \cos \vartheta'_L \Rightarrow I'_a = 662 \text{ A}$$

Výkon na svorkách statora ostal nezmenený, a preto môžeme vypočítať nový účinník

$$P = U_{sfn} I'_a \cos \varphi' \Rightarrow \cos \varphi' = \frac{P}{U_{sfn} I'} = \frac{3813,6 \cdot 10^3}{6350 \cdot 662} = 0,907 \text{ ind.}$$

c) Stroj dodáva maximálny výkon pri záťažovom uhle $\vartheta_L = 90^\circ$ ($\sin \vartheta_L = 1$)

$$P_{\max} = \frac{U_{sfN} U'_{ib}}{X_d} = \frac{6350 \cdot 9840}{8} = 7810,5 \text{ kW/fázu}$$

Príklad 5.17

3 fázový, 8 pólový, $f = 50 \text{ Hz}$, $U_N = 6600 \text{ V}$, do hviezdy zapojený synchronný motor má synchronnú impedanciu jednej fázy $(0,66 + j 6,6) \Omega$. Pri budiacom indukovanom napätí $U_{ib} = 4500 \text{ V/fázu}$ odoberá tento motor zo siete príkon 2500 kW .

- Vypočítajte elektromagnetický moment stroja, odoberaný prúd zo siete, účinník a uhol záťaže.
- Vypočítajte hodnotu U_{ib} ak motor odoberá zo siete prúd 180 A pri účinníku $\cos \varphi = 1$. Pri tomto prúde a účinníku vypočítajte výstupný mechanický výkon a účinnosť synchronného motora ak suma mechanických strát, strát v železe a budiacich strát je 50 kW .

Riešenie:

a) Najprv vypočítame absolútnu hodnotu synchronnej impedancie

$$Z_d = \sqrt{R_a^2 + X_d^2} = \sqrt{0,66^2 + 6,6^2} = 6,63 \Omega$$

Pretože v tomto prípade sa R_a nezanedbáva, musíme pre výpočet výkonov a momentu použiť vzťahy uvedené v teoretickej časti, ktoré zohľadňujú vplyv R_a . Na to treba vypočítať uhol α :

$$\alpha = \arcsin \frac{R_a}{Z_d} = \arcsin \frac{0,66}{6,63} = 5,7^\circ$$

Vstupný príkon pre synchronný motor je daný

$$P_p = 3 \left(-\frac{U_{sfn} U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L + \alpha) + \frac{U_{sfn}^2 R_a}{Z_d^2} \right) = 3 \left(-\frac{6600 \cdot 4500}{\sqrt{3} \cdot 6,63} \sin(\vartheta_L + 5,7^\circ) + \frac{6600^2 \cdot 0,66}{3 \cdot 6,63^2} \right) = 2,5 \text{ MW}$$

Odtiaľ môžeme vypočítať uhol záťaže ϑ_L :

$$\sin(\vartheta_L + 5,7^\circ) = -0,238 \Rightarrow \vartheta_L = -19,4^\circ$$

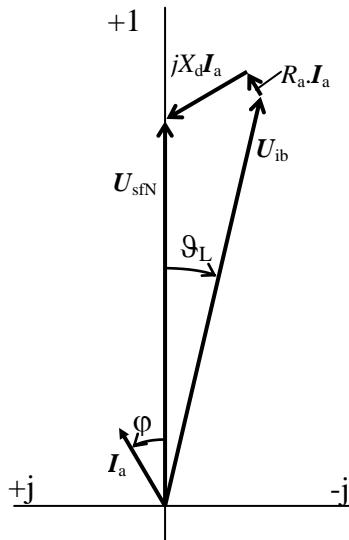
V zadaní bolo uvedené, že ide o synchronný motor, čo potvrdzuje aj záporné znamienko záťažového uhla ϑ_L .

Teraz už poznáme všetky potrebné parametre a môžeme vypočítať výkon vo vzduchovej medzere

$$P_\delta = 3 \left(-\frac{U_{sfn} U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L - \alpha) - \frac{U_{ib}^2 R_a}{Z_d^2} \right) = 3 \left(-\frac{6600 \cdot 4500}{\sqrt{3} \cdot 6,63} \sin(-19,46^\circ - 5,7^\circ) - \frac{4500^2 \cdot 0,66}{6,63^2} \right) = 2387 \text{ kW}$$

Z tohto výkonu určíme hodnotu elektromagnetického momentu

$$M_c = \frac{P_\delta}{\Omega_{syn}} = \frac{P_\delta}{2\pi f / p} = \frac{2387 \cdot 10^3}{2\pi 50 / 4} = 30390 \text{ Nm}$$



Obr. 5.18 Fázorový diagram prebudeného synchronného motora

Menovitý prúd určíme pomocou fázorového diagramu na obr.5.18:

$$U_{ib} + I_a (R_a + jX_d) = U_f$$

$$I_a = \frac{U_{sN} - U_{ib}}{Z_d} = \frac{6600/\sqrt{3} - 4500(\cos(-19,46^\circ) + j \sin(-19,46^\circ))}{0,66 + j6,6} = 235,5 \angle 21,8^\circ \text{ A}$$

Účinník: $\cos \varphi = \cos(\varphi_U - \varphi_I) = \cos(-21,8^\circ) = 0,928$ kapacitného charakteru.

b) Indukované napätie určíme zo vzťahu

$$U_{ib} = U_{sN} - Z_d I_a = 6600/\sqrt{3} - (0,66 + j6,6)180(1 + j0) = 3878 \angle -17,8^\circ \text{ V}$$

Tým je určený aj záťažový uhol:

$$\vartheta_L = -17,8^\circ$$

Výstupný výkon určíme takto:

$$P_{out} = P_\delta - \Delta P.$$

Pritom výkon vo vzduchovej medzere vypočítame

$$P_\delta = m \left(-\frac{U_{sN} U_{ib}}{Z_d} \sin(\vartheta_L - \alpha) - \frac{U_{ib}^2 R_a}{Z_d^2} \right) = 3 \left(\frac{(6600/\sqrt{3}) \cdot 3878}{6,63} \sin(17,8^\circ + 5,7^\circ) - \frac{3878^2 \cdot 0,66}{6,63^2} \right) = 1988,8 \text{ kW}$$

Výstupný výkon

$$P_{out} = 1988,82 - 50 = 1938,82 \text{ kW}$$

Účinnosť je definovaná ako pomer výstupného výkonu a príkonu

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_p} = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} U_{sN} I \cos \varphi} = \frac{1938,82 \cdot 10^3}{\sqrt{3} 6600 \cdot 180 \cdot 1} = 0,942$$

Príklad 5.18

Dva trojfázové, 3,3 kV synchronné generátory, obidva v zapojení do hviezdy, sú spojené paralelne a napájajú záťaž 800 kW pri induktívnom účinníku $\cos \varphi = 0,8$. Primárne pohonné stroje sú nastavené tak, že jeden synchronný generátor je voči druhému zaťažovaný dvojnásobným výkonom. Viac zaťažovaný generátor má synchronnu reaktanciu $X_A = j10 \Omega$ a jeho budenie je nastavené tak, že pracuje pri účinníku 0,75 induktívneho charakteru. Synchronna reaktancia druhého stroja je $X_B = j16 \Omega$ na fazu.

Vypočítajte prúd, indukované napätie, účinník a záťažový uhol každého stroja.

Riešenie:

Celkový zdanlivý výkon

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{800}{0,8} = 1000 \text{ kVA}$$

Celkový prúd

$$\mathbf{I} = \frac{S}{\sqrt{3}U_N}(\cos \varphi - j \sin \varphi) = \frac{10^6}{\sqrt{3} \cdot 3300}(0,8 - j0,6) = (140 - j105) \text{ A}$$

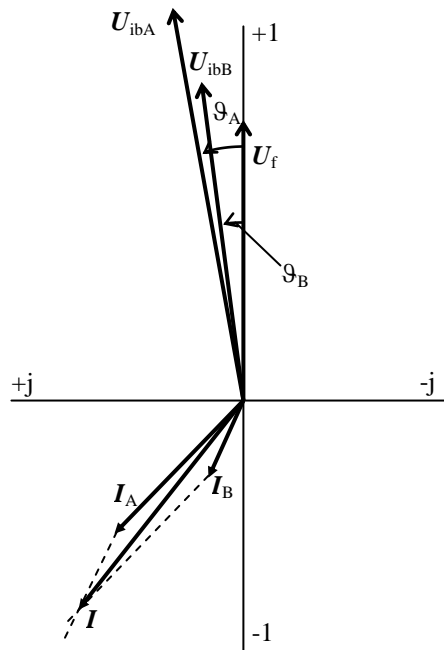
Viac zaťažený stroj sme označili indexom A a menej zaťažený stroj indexom B.

Zo zadania vyplýva, že činná zložka prúdu stroja A je dvakrát vyššia ako činná zložka prúdu stroja B, takže stroj A bude zaťažený dvoma tretinami činnnej zložky celkového prúdu.

$$I_A \cos \varphi_A = \frac{2}{3} I \cos \varphi = \frac{2}{3} 140 = 93,3 \text{ A}$$

Jalová zložka prúdu stroja A je:

$$I_A \sin \varphi_A = I_A \cos \varphi_A \cdot \operatorname{tg} \varphi_A = 93,3 \cdot 0,882 = 82,3 \text{ A}$$



Obr.5.19 Fázorový diagram k príkladu 5.18

Celkový prúd stroja A je $\mathbf{I}_A = (93,3 - j82,3) \text{ A}$. Teraz môžeme určiť aj prúd stroja B

$$I_B = I - I_A = 140 - j105 - 93,3 + j82,3 = 46,7 - j22,7 = 51,9 \angle -25,9^\circ \text{ A},$$

pričom $\varphi_B = -25,9^\circ$ a účinník stroja B je $\cos \varphi_B = 0,9$ induktívneho charakteru. Teraz vypočítame budiace indukované napätia oboch strojov:

$$U_{ibA} = U_{sIN} + jX_A I_A = \frac{3300}{\sqrt{3}} + j10(93,3 - j82,3) = 2728 + j933 = 2883 \angle 18,8^\circ \text{ V}$$

$$U_{ibB} = U_{sIN} + jX_B I_B = \frac{3300}{\sqrt{3}} + j16(46,7 - j22,7) = 2268 + j747 = 2388 \angle 18,2^\circ \text{ V}$$

Príklad 5.19

Priemyselný závod má dva indukčné stroje a jeden transformátor napájajúci ďalšie zariadenia. Všetky spomínané stroje majú menovité napätie 6,6 kV a ich ďalšie menovité hodnoty sú uvedené v tabuľke:

	IM A	IM B	Transformátor
Menovitý výkon (kW)	100	200	300
Menovitá účinnosť	94%	95%	99%
Menovitý účinník	0,91 ind.	0,93 ind.	0,98 ind.

- Na kompenzáciu účinníka tohto závodu je použitý synchronný stroj menovitého výkonu 250 kVA, ktorý je buďený tak, že pokiaľ sú všetky spomínané stroje zaťažené svojim menovitým výkonom je celkový účinník závodu rovný 1. Tento stav je pre synchronný stroj menovitým stavom. Vypočítajte indukované napätie U_{ib} synchronného stroja v menovitom stave, pokiaľ predpokladáme, že jeho menovitá účinnosť je 96 % a synchronná impedancia jednej fázy je $(0 + j100) \Omega$.
- Vypočítajte zdanlivý výkon synchronného stroja za už uvedených podmienok (nezmenené buďenie a činný výkon) pri účinníku celého závodu $\cos \varphi = 0,95$ kapacitného charakteru.

Riešenie:

- Najprv vypočítame činné a jalové menovité prúdy všetkých spotrebičov podľa tohto vzťahu:

$$I = \frac{P}{\eta \sqrt{3} U \cos \varphi} (\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

Indukčný motor A

$$I_A = \frac{100 \cdot 10^3}{0,94 \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 0,91} (0,91 - j0,4146) = 9,306 - j4,24 \text{ A}$$

Indukčný motor B

$$I_B = \frac{200 \cdot 10^3}{0,95 \cdot \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 0,93} (0,93 - j0,3676) = 18,42 - j7,28 \text{ A}$$

Transformátor

$$I_T = \frac{300 \cdot 10^3}{0,99 \cdot \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 0,98} (0,98 - j0,199) = 26,51 - j5,38 \text{ A}$$

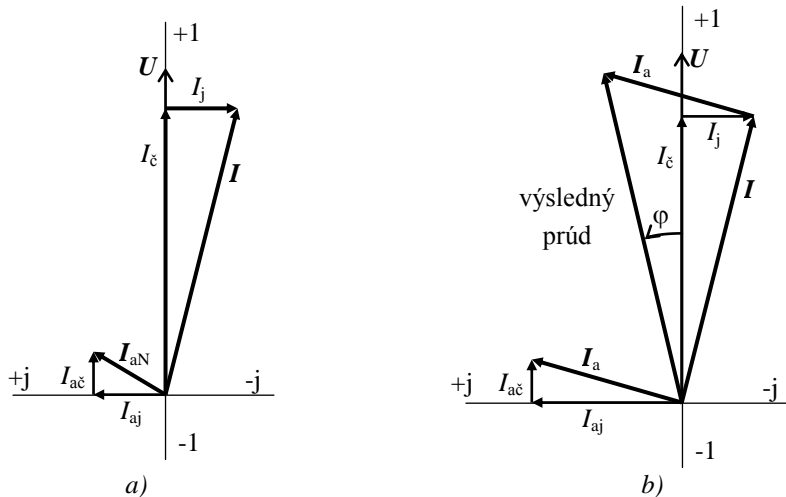
Celkový prúd inštalovaných strojov je

$$I = I_A + I_B + I_T = 54,24 - j16,9 = I_\xi - jI_j \text{ A.}$$

To znamená, že činná zložka celkového prúdu je $I_\xi = 54,24 \text{ A}$, jalová zložka $I_j = -j16,9 \text{ A}$ a pokiaľ chceme, aby boli zariadenia závodu v menovitom stave vykompenzované, synchronný stroj musí dodávať do siete jalový prúd $I_{aj} = -I_j = +j16,9 \text{ A}$.

Menovitý prúd synchronného stroja

$$I_{aN} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6600} = 21,87 \text{ A}$$



Obr.5.20 Fázorové diagramy k príkladu 5.19. a) pri účinníku 1,0, b) pri účinníku 0,95

To znamená, že synchronný stroj bude odoberať zo siete činný prúd

$$I_{a\check{c}} = \sqrt{I_{aN}^2 - I_{aj}^2} = \sqrt{21,87^2 - 16,9^2} = 13,88 \text{ A}$$

Činný výkon synchronného motora v menovitom stave bude

$$P_S = \sqrt{3} U_N I_{ac} \eta = \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 13,88 \cdot 0,96 = 152,3 \text{ kW}$$

Teraz už môžeme vypočítať veľkosť budiaceho indukovaného napätia:

$$U_{ib} = U - jX_S I_{aN} = \frac{6600}{\sqrt{3}} - j100(13,88 + j16,9) = 5500,5 - j1388 = 5673 \angle -14,16^\circ \text{ V}$$

b) Z obr.5.20b môžeme pre účinník 0,95 kapacitného charakteru, pri nezmenenej hodnote činného prúdu stroja, napísať nasledujúci vzťah:

$$\tan \varphi = \frac{I_{aj} - I_j}{I_{ac} + I_{\xi}} = \frac{I_{aj} - 16,9}{13,88 + 54,24} = \tan(\arccos 0,95)$$

Výpočtom dostaneme: $I_{aj} = 39,29 \text{ A}$

Požadovaný zdanlivý výkon synchronného stroja vypočítame

$$S = \sqrt{3} U \sqrt{I_{ac}^2 + I_{aj}^2} = \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot \sqrt{13,88^2 + 39,29^2} = 476 \text{ kVA}$$

Príklad 5.20

3-fázový, 6-pólový synchronný generátor s vyjadrenými pólmi, zapojený do hviezdy, 50 Hz, ktorého menovité svorkové napätie je 6,6 kV a menovitý zdanlivý výkon 5 MVA, má nasledujúce hodnoty fázových reaktancií: $X_d = 8,7 \Omega$; $X_q = 4,35 \Omega$. Stroj je budený tak, že $U_{ib} = 11/\sqrt{3} \text{ kV}$ a pri danej záťaži je hodnota záťažového uhla 30° . Vypočítajte:

- účinník, prúd kotvy a výkon
- záťažový uhol pri maximálnom momente
- pomer medzi maximálnym momentom a tým, ktorý stroj vyvíja pri $\vartheta_L = 30^\circ$
- synchronizačný činiteľ C pre uhol záťaže $\vartheta_L = 30^\circ$
- frekvenciu vlastných netlmených kmitov f_0 pre uhol záťaže $\vartheta_L = 30^\circ$, ak celkový momentotrvačnosti sústavy je $J = 8200 \text{ kgm}^2$

Riešenie:

Na obrázku 5.21 je fázorový diagram prebudeneho synchronného generátora s vyjadrenými pólmi, pretože z hodnôt U_{stN} a U_{ib} vyplýva, že synchronný stroj je prebudенý.

- Prúd v osi q

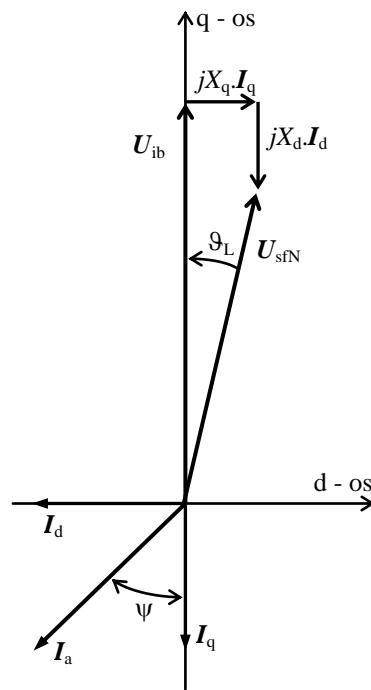
$$I_q = \frac{-U \sin \vartheta_L}{X_q} = \frac{(-6600/\sqrt{3}) \sin 30^\circ}{4,35} = -438 \text{ A}$$

Prúd v osi d

$$I_d = \frac{U_{ib} - U \cos \vartheta_L}{X_d} = \frac{6600 \cos 30^\circ - 11000}{\sqrt{3} \cdot 8,7} = 350,7 \text{ A}$$

Efektívna hodnota prúdu dodávaného synchronným generátorom je

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \sqrt{350,7^2 + 438^2} = 561,1 \text{ A}$$



Obr. 5.21 Fázorový diagram prebudeného synchronného generátora s vyjadrenými pólmi

Teraz určíme účinník

$$\tan \psi = \frac{I_d}{I_q} = \frac{-350,7}{-438} \quad \text{takže} \quad \psi = 38,7^\circ = \vartheta_L - \varphi, \quad \text{odtiaľ} \quad \varphi = -8,7^\circ \text{ a}$$

účinník $\cos \varphi = 0,988$ ind.

Činný výkon

$$P = \sqrt{3}UI_a \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 561,1 \cdot 0,988 = 6,34 \text{ MW}$$

b) Moment synchronného stroja s vyjadrenými pólmi je daný vzťahom:

$$M_e = -\frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{U_{\text{sfN}}}{X_d} \left(U_{\text{ib}} \sin \vartheta_L + \frac{U_{\text{sfN}}}{2} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \sin 2\vartheta_L \right)$$

Synchronný stroj s vyjadrenými pólmi dosahuje maximálny moment pri záťažovom uhle, ktorý závisí od pomeru synchronného a reluktančného momentu. Pri daných hodnotách X_d , X_q , U_{ib} a U_{sfN} nájdeme záťažový uhol, pri ktorom je moment maximálny tak, že hľadáme extrém funkcie elektromagnetického momentu:

$$\frac{dM_e}{d\vartheta_L} = 0$$

Toto platí vtedy, ak

$$U_{\text{ib}} \cos \vartheta_{L\text{max}} = -U_{\text{sfN}} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \cos 2\vartheta_{L\text{max}} = -U_{\text{sfN}} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) (2\cos^2 \vartheta_{L\text{max}} - 1)$$

Z tejto kvadratickej rovnice určíme uhol $\vartheta_{L\text{max}}$

$$\cos \vartheta_{L\text{max}} = -\frac{U_{\text{ib}}}{4U_{\text{sfN}}} \left(\frac{X_q}{X_d - X_q} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{U_{\text{ib}}}{4U_{\text{sfN}}} \right)^2 \left(\frac{X_q}{X_d - X_q} \right)^2 + \frac{1}{2}}$$

Po dosadení hodnôt dostaneme $\cos \vartheta_{L\text{max}} = -0,417 \pm 0,8207$. Keďže ide o generátor budeme brať kladnú hodnotu záťažového uhla $\vartheta_{L\text{max}} = 66,2^\circ$.

Takže pri záťažovom uhle $\vartheta_{L\text{max}} = 66,2^\circ$ dosahuje synchronný generátor s vyjadrenými pólmi s danými hodnotami maximálny moment.

c) Pomer medzi maximálnym momentom a momentom vyvíjaným pri záťažovom uhle $\vartheta_L = 30^\circ$ je daný

$$\frac{M_{e\text{max}}}{M_e} = \frac{U_{\text{ib}} \sin \vartheta_{L\text{max}} + \frac{U_{\text{sfN}}}{2} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \sin 2\vartheta_{L\text{max}}}{U_{\text{ib}} \sin \vartheta_L + \frac{U_{\text{sfN}}}{2} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \sin 2\vartheta_L}$$

Po číselnom dosadení dostaneme $\frac{M_{\text{max}}}{M} = 1,496$.

d) Synchronizačný činiteľ je daný deriváciou momentu podľa záťažového uhla v danom bode zaťaženia

$$C = \left[\frac{dM}{d\vartheta_L} \right]_{\vartheta_{L0}} = \left[\frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{U_{\text{sfn}}}{X_d} \left(U_{\text{ib}} \cos \vartheta_L + U_{\text{Nf}} \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right) \cos 2\vartheta_L \right) \right]_{\vartheta_{L0}}$$

$$C = \frac{3}{100\pi} \frac{6600}{\sqrt{3} \cdot 8,7} \left(\frac{11000}{\sqrt{3}} \cos 30^\circ + \frac{6600}{\sqrt{3}} \left(\frac{8,7}{4,35} - 1 \right) \cos 60^\circ \right) = 30972 \text{ Nm/rad.el.}$$

Ak chceme poznať synchronizačný činiteľ v Nm na mechanický radián, vynásobíme hodnotu C počtom pólových dvojíc

$$C_{\text{mec}} = Cp = 30972 \cdot 3 = 92917 \text{ Nm/ rad.mech.}$$

e) Frekvenciu vlastných netlmených kmitov pre uhol záťaže $\vartheta_L = 30^\circ$ určíme zo vzťahu

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\text{mec}}}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{92917}{8200}} = 0,5357 \text{ Hz}$$

Príklad 5.21

Synchronný stroj s hladkým rotorom má synchronnú reaktanciu $x_d = 1$ (jednotková hodnota) pri napätí $u = 1$ (jednotková hodnota).

Vypočítajte jednotkovú hodnotu prúdu, výkonu, momentu a účinník, ak jednotková hodnota vnútorného indukovaného budiaceho napätia je $u_{\text{ib}} = 0,5$ a záťažový uhol stroja $\vartheta_L = -30^\circ$.

Ako zaťažuje tento stroj sieť?

Riešenie:

V teórii elektrických strojov a v jej aplikáciách sa často stretávame s pojmom jednotková hodnota (v angličtine je to skratka „p.u.“, čo znamená „per unit“). Je to pomerná hodnota danej veličiny vzťahujúca sa vo väčšine prípadov na jej menovitú hodnotu.

Pri výpočtoch s jednotkovými veličinami využívame klasické vzťahy teórie elektrických strojov.

Pri výpočte prúdu a účinníka budeme vychádzať z fázorového diagramu na obr. 5.11.

$$U = U_{\text{ib}} + I_a jX_d$$

$$1 \angle 0^\circ = 0,5 \angle -30^\circ + I_a j1 = 0,433 - j0,25 + I_a j1 = 1$$

$$I_a = 0,25 - j0,567 = 0,62 \angle -66,2^\circ \text{ A}$$

Prúd má induktívny charakter a jeho jednotková hodnota je 0,62. Účinník stroja je $\cos \varphi = 0,4$ induktívneho charakteru. Jednotkové hodnoty výkonu vo vzduchovej medzere

a momentu stroja sa rovnajú, pretože moment stroja je vypočítaný len pomocou konštanty (mechanickej uhlovej rýchlosti) z výkonu vo vzduchovej medzere.

Ak zanedbávame straty v stroji, výkon vo vzduchovej medzere sa rovná elektrickému výkonu na svorkách stroja.

$$P_{\delta} = UI_{ac} = 1 \cdot 0,25 = 0,25$$

Z vypočítaných hodnôt môžeme usúdiť, že ide o podbudený synchronný motor, ktorý predstavuje pre sieť induktívnu záťaž.

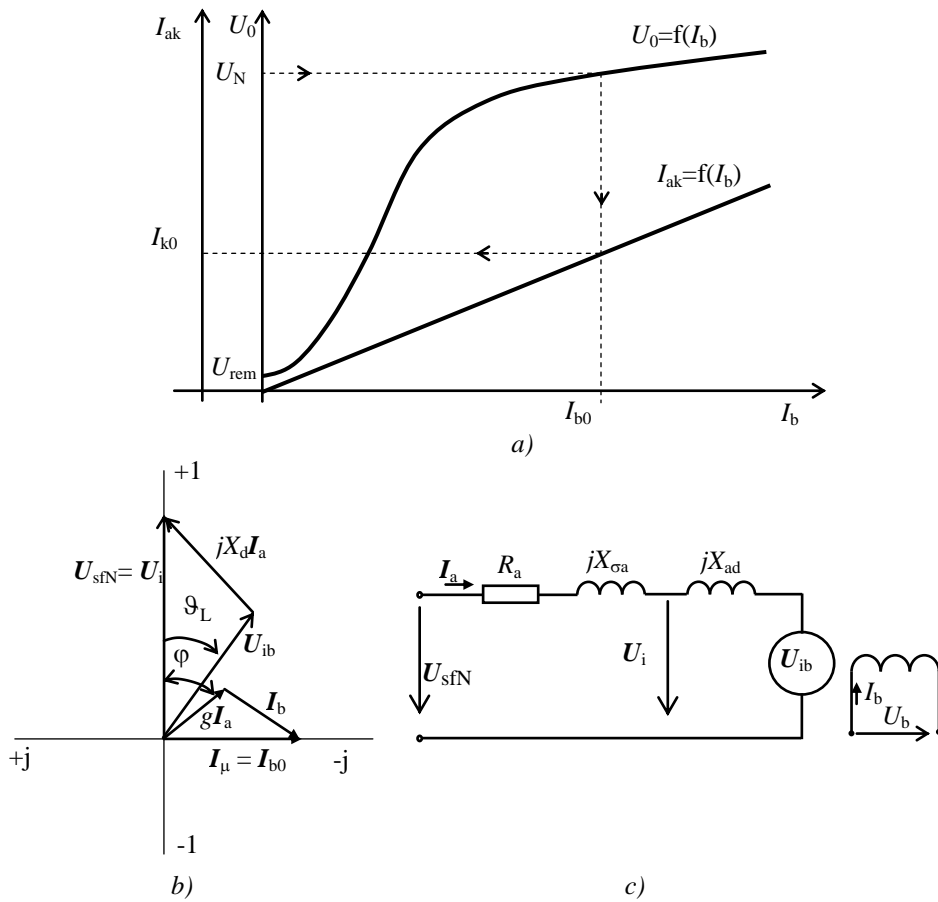
Príklad 5.22

Synchronný stroj je na tvrdej sieti s $f_s = 50$ Hz. Je dané $U_N = 6300$ V, zapojenie Y, menovitý výkon $S_N = 20$ MVA, $\cos\varphi = 0,8$ ind, počet pólov $2p = 2$, $I_{b0} = 146$ A, $I_{k0} = 2080$ A, režim práce - motor. Odpor satorového vinutia zanedbajte.

1. Nakreslite charakteristiku naprázdno a nakrátko, a vyznačte I_{b0} , I_{k0} . Nakreslite náhradnú schému a úplný fázorový diagram pre menovitý stav.
2. Pre daný menovitý stav vypočítajte:
 Ω_{syn} , n_{syn} , I_{aN} , Z_N , X_d , x_d , redukčný činiteľ g , skratový pomer k_k , budiaci prúd I_{bN} , záťažový uhol ϑ_{LN} , budiace indukované napätie U_{ibN} , elektromagnetický moment M_{eN} .
3. a) Ako sa zmení dodávaný výkon, ak stroj bude pracovať s účinníkom $\cos\varphi = 1$, a ak satorový prúd ostane nezmenený?
 b) Ako sa zmení budiaci prúd potrebný pre tento stav a ktoré veličiny sa zmenia?
 c) Nakreslite príslušný fázorový diagram a porovnajte ho s fázorovým diagramom pre menovitý stav.
4. a) Ako sa zmení účinník, ak činný výkon klesne na 50 % menovitého výkonu a budenie ostane nezmenené, t. j. menovité?
 b) Ako sa zmení prúd kotvy v tomto stave?
 c) Nakreslite príslušný fázorový diagram s vypočítanými hodnotami a porovnajte ho s fázorovým diagramom v menovitom stave.
5. a) Budenie stroja vzrastie o 25 % menovitého budenia. Činný výkon ostane nezmenený, t. j. menovitý. Nakreslite príslušný fázorový diagram a vypočítajte všetky veličiny, ktoré sa v tomto stave zmenia.
 b) Aký je maximálny výstupný výkon pri tomto novom budení?

Riešenie:

1. Charakteristika naprázdno a nakrátko s vyznačením príslušných bodov je na obr.5.22a. Ak v zadaní nie je uvedená rozptylová reaktancia, uvažuje sa pri riešení s celkovou synchronnou reaktanciou X_d a potom fázorový diagram pre zadaný stav je na obr.5.22b a náhradná schéma je na obr.5.22c.



Obr.5.22 a) charakteristika naprázdno a nakrátko, b) fázorový diagram, c) náhradná schéma

2.

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2\pi 50}{1} = 314,159 \text{ rad/s}, \quad n_{\text{syn}} = \frac{60 f_s}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$I_{aN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 1832,85 \text{ A}, \quad Z_N = \frac{U_N / \sqrt{3}}{I_{aN}} = \frac{6300 / \sqrt{3}}{1832,85} = 1,98 \text{ } \Omega$$

$$X_d = \frac{U_N / \sqrt{3}}{I_{k0}} = \frac{6300 / \sqrt{3}}{2080} = 1,74 \text{ } \Omega, \quad x_d = \frac{X_d}{Z_N} 100 = \frac{1,74}{1,98} 100 = 87,8 \text{ } \%$$

$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} = \frac{146}{2080} = 0,07, \quad k_k = \frac{I_{k0}}{I_{aN}} = \frac{2080}{1832,85} = 1,13$$

Menovitý budiaci prúd vypočítame pomocou kosínusovej vety z fázorového diagramu, ktorý je na obr.5.22b.

$$\begin{aligned} I_{bN} &= \sqrt{(gI_{aN})^2 + I_{b0}^2 - 2gI_{aN}I_{b0} \cos(90^\circ - \varphi)} = \\ &= \sqrt{(0,07 \cdot 1832,85)^2 + 146^2 - 2 \cdot 0,07 \cdot 1832,85 \cdot 146 \cos(90^\circ - 36,8^\circ)} = 123,8 \text{ A} \end{aligned}$$

Podobným spôsobom vypočítame U_{ibN}

$$\begin{aligned} U_{ibN} &= \sqrt{(U_N / \sqrt{3})^2 + (X_d I_{aN})^2 - 2(U_N / \sqrt{3})(X_d I_{aN}) \cos(90^\circ - \varphi)} = \\ &= \sqrt{(6300 / \sqrt{3})^2 + (1,74 \cdot 1832,85)^2 - 2 \cdot (6300 / \sqrt{3})(1,74 \cdot 1832,85) \cos(90^\circ - 36,8^\circ)} \\ U_{ibN} &= 3082 \text{ V} \end{aligned}$$

Zaťažový uhol môžeme vypočítať z fázorového diagramu podľa sínusovej vety:

$$\frac{X_d I_{aN}}{\sin \vartheta_L} = \frac{U_{ib}}{\sin(90^\circ - \varphi)} \Rightarrow \sin \vartheta_L = \frac{X_d I_{aN} \sin(90^\circ - \varphi)}{U_{ib}} = \frac{1,74 \cdot 1832,85 \sin(90^\circ - 36,8^\circ)}{3082}$$

$$\sin \vartheta_L = 0,828 \Rightarrow \vartheta_L = 55,9^\circ$$

Elektromagnetický menovitý moment je

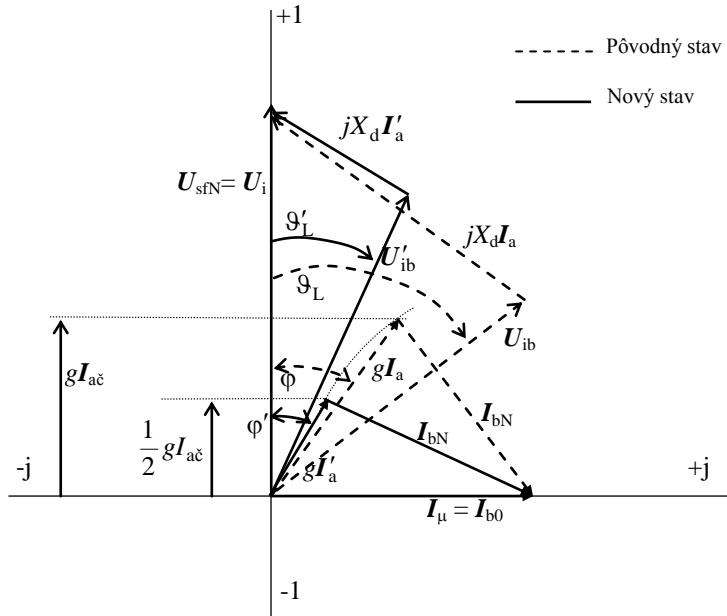
$$M_{eN} = \frac{m}{\Omega_{syn}} \frac{U_{ibN} U_N / \sqrt{3}}{X_d} \sin \vartheta_L = \frac{3}{314,159} \frac{3082 \cdot 6300 / \sqrt{3}}{1,74} \sin(55,9^\circ) = 50,944 \text{ kNm}$$

3.

a) V tomto bode je účinník $\cos\varphi=1$ a statorový prúd ostáva nezmenený, t. j. menovitý. Fázorový diagram pre tento stav je na obr.5.23. Vidíme, že v tomto stave sa zmenia nasledujúce veličiny oproti pôvodnému stavu: zaťažový uhol ϑ'_L , U'_{ib} a I'_b . Skôr ako vypočítame dodávaný elektromagnetický výkon, môžeme z Pytagorovej vety vypočítať U'_{ib} a I'_b .

$$I_{bN}^2 = \left(\frac{1}{2} g I_{ač}\right)^2 + (I_{b0} - g I_{aj})^2 \Rightarrow g I_{aj} = I_{b0} - \sqrt{I_{bN}^2 - \left(\frac{1}{2} g I_{ač}\right)^2}$$

$$g I_{aj} = 146 - \sqrt{123,8^2 - (51,3)^2} = 33,3 \text{ A}$$



Obr.5.24 Fázorový diagram pre polovičný činný výkon a menovitý budiaci prúd

Takže potom nový statorový prúd bude

$$g I'_a = \sqrt{\left(\frac{1}{2} g I_{ač}\right)^2 + (g I_{aj})^2} = \sqrt{(51,3)^2 + (33,3)^2} = 61,1 \text{ A} \Rightarrow I'_a = 872,8 \text{ A}$$

Z toho môžeme vypočítať nový účinník

$$\cos \varphi' = \frac{\frac{1}{2} g I_{ač}}{g I'_a} = 0,839 \Rightarrow \varphi' = 32,9^\circ$$

Nové budiace napätie bude

$$\begin{aligned}
 U'_{ib} &= \sqrt{\left(U_N / \sqrt{3}\right)^2 + \left(X_d I'_a\right)^2 - 2\left(U_N / \sqrt{3}\right)\left(X_d I'_a\right)\cos\left(90^\circ - \varphi'\right)} = \\
 &= \sqrt{\left(6300 / \sqrt{3}\right)^2 + \left(1,74 \cdot 872,8\right)^2 - 2 \cdot \left(6300 / \sqrt{3}\right)\left(1,74 \cdot 872,8\right)\cos\left(90^\circ - 32,9^\circ\right)} \\
 U'_{ib} &= 3088 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Nový záťažový uhol vypočítame ako

$$\begin{aligned}
 \frac{X_d I'_a}{\sin \vartheta'_L} &= \frac{U'_{ib}}{\sin\left(90^\circ - \varphi'\right)} \Rightarrow \sin \vartheta'_L = \frac{X_d I'_a \sin\left(90^\circ - \varphi'\right)}{U'_{ib}} = \frac{1,74 \cdot 872,8 \sin\left(90^\circ - 32,9^\circ\right)}{3088} \\
 \sin \vartheta'_L &= 0,413 \Rightarrow \vartheta'_L = 24,4^\circ
 \end{aligned}$$

Z vypočítaných hodnôt a aj z fázorového diagramu vidíme, že účinník sa mierne zvýšil, hodnota budiaceho napätia sa takmer nezmenila a záťažový uhol sa približne na polovičnú hodnotu.

5.

V tomto novom stave sa zvýši budiace napätie o 25 %, t. j. a činný výkon ostane menovitý, takže aj činná zložka menovitého prúdu ostane nezmenená. Fázorový diagram pre tento stav je na obr.5.25. Takže ďalej budeme počítat' s nasledujúcim budiacim napätím

$$U'_{ib} = 1,25U_{ibN} = 1,25 \cdot 3082 = 3852,5 \text{ V}$$

Záťažový uhol pre tento stav vypočítame zo vzťahu pre elektromagnetický výkon synchronného stroja. V menovitom stave je menovitý elektromagnetický výkon daný takto

$$P_{eN} = m \frac{U_N / \sqrt{3} U_{ibN}}{X_d} \sin \vartheta_{LN} = 3 \frac{6300 / \sqrt{3} \cdot 3082}{1,74} 0,828 = 16 \text{ MW}$$

Pre novú hodnotu budiaceho napätia môžeme z predchádzajúceho vzťahu vypočítat' nový záťažový uhol

$$P_{eN} = m \frac{U_N / \sqrt{3} U'_{ib}}{X_d} \sin \vartheta'_L \Rightarrow \sin \vartheta'_L = \frac{P_{eN} X_d}{m U_N / \sqrt{3} U'_{ib}} = \frac{16 \cdot 10^6 \cdot 1,74}{3 \cdot 6300 / \sqrt{3} \cdot 3852,5} = 0,662$$

$$\vartheta'_L = 41,4^\circ$$

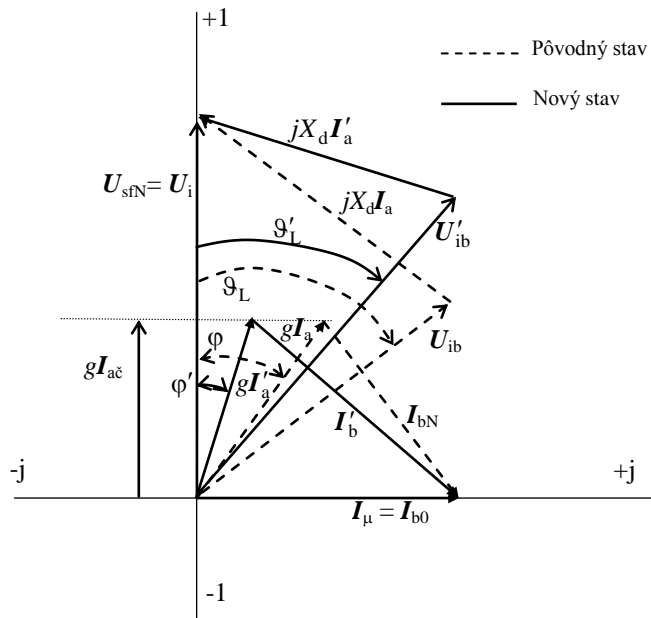
Pomocou kosínusovej vety vypočítame nový statorový prúd

$$\begin{aligned}
 \left(X_d I'_a\right)^2 &= \left(U_N / \sqrt{3}\right)^2 + \left(U'_{ib}\right)^2 - 2 U_N / \sqrt{3} U'_{ib} \cos \vartheta'_L = \\
 &= \left(6300 / \sqrt{3}\right)^2 + \left(3852,5\right)^2 - 2 \cdot 6300 / \sqrt{3} \cdot 3852,5 \cos 41,4^\circ \Rightarrow I'_a = 1526 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Ak sme zvýšili o 25 % hodnotu budiaceho napätia, tak sa tiež o tú istú hodnotu zvýši aj budiaci prúd. Na základe podobnosti trojuholníkov vo fázorovom diagrame a pomocou sínusovej vety môžeme potom vypočítať veľkosť nového účinníka

$$\frac{I'_b}{\sin(90 - \varphi')} = \frac{gI'_a}{\sin \vartheta'_L} \Rightarrow \sin(90 - \varphi') = \frac{I'_b}{gI'_a} \sin \vartheta'_L = \frac{1,25 \cdot 123,8}{0,07 \cdot 1526} 0,662 = 0,959$$

$$(90 - \varphi') = 73,5^\circ \Rightarrow \varphi' = 16,5^\circ$$



Obr.5.25 Fázorový diagram pre menovitý činný výkon a zvýšené budenie

Podobným spôsobom odporúčame prepočítať celý tento príklad pre ostatné možnosti práce synchronného stroja na tvrdej sieti, to znamená pre motorickú aj generátorickú oblasť s induktívnym aj kapacitným účinníkom.

NERIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 5.23

3 fázový synchronný motor v zapojení do hviezdy, 3300 V, 50 Hz má synchronnú impedanciu jednej fázy $2+j15\Omega$. Stroj pracuje s maximálnou záťažou (pri ktorej ešte nevypadne zo synchronizmu) pri vnútornom indukovanom napätí $U_{ib} = \frac{2500}{\sqrt{3}} \text{ V}$.

Vypočítajte novú hodnotu U'_{ib} pri ktorej stroj ešte nevypadne zo synchronizmu, ak ho zaťažíme o 50 % vyšším momentom.

Vypočítajte prúd kotvy, účinník a výkon motora s novou hodnotou budenia U'_{ib} , ak je motor zaťažený pôvodným momentom.

($U'_{ib} = 3750/\sqrt{3} \text{ V}$; $I_a=95,7\text{A}$; $\cos\varphi=0,998$ kapacitného charakteru; $P=545,8\text{kW}$)

Príklad 5.24

3 fázový, 4-pólový, 150 kW synchronný motor s menovitým napätím kotvy 400 V v zapojení do hviezdy má menovité synchronnú reaktanciu jednej fázy statorového vinutia $0,5\Omega$. Vypočítajte záťažový uhol (mechanický), vstupný prúd a účinník, ak motor pracuje s menovitou záťažou a indukované napätie U_{ib} je 1 (v jednotkových veličinách). Odpor kotvy zanedbajte, ale uvažujte mechanické straty 10 kW.

($\vartheta_{L\text{mech}}=-14,9^\circ$; $I_{aN}=237,8\text{A}$; $\cos\varphi=0,966$ induktívneho charakteru)

Príklad 5.25

3-fázový, 6-pólový, 50Hz synchronný motor so statorovým vinutím zapojeným do hviezdy má menovité hodnoty 6600 V, 425 kW, účinnosť 85 % a $\cos\varphi_N=1$. Jeho fázová hodnota synchronnej impedancie je $0+j80\Omega$. Vypočítajte menovité hodnoty mechanického momentu, prúdu, budenia a záťažového uhla daného stroja. Vypočítajte prúd kotvy I_a , budenie U_{ib} a záťažový uhol ϑ_L stroja ak bude pracovať s účinníkom a) 0,9 induktívneho charakteru; b) 0,9 kapacitného charakteru. Ako sa zmení v prípadoch a) a b) hodnota maximálneho momentu?

($M_{eN}=4775\text{Nm}$; $I_{aN}=43,74\text{A}$; $U_{ibN}=5173\text{V}$; $\vartheta_{LN}=-42,6^\circ$; $M_{\text{max}N}=7053\text{Nm}$;

a) $I_a=48,6\text{A}$; $U_{ib}=4088\text{V}$; $\vartheta_L=-58,9^\circ$; $M_{\text{max}}=5577\text{Nm}$

b) $I_a=48,6\text{A}$; $U_{ib}=6524\text{V}$; $\vartheta_L=-32,4^\circ$; $M_{\text{max}}=8910\text{Nm}$)

Príklad 5.26

3-fázový, 6-pólový synchronný stroj so statorovým vinutím zapojeným do hviezdy a menovitými hodnotami 1000 kVA; 6,6 kV; 50 Hz je pripojený k tvrdej sieti. Synchronná

impedancia jednej fázy je $0+j50\Omega$. Stroj pracuje ako motor s menovitým prúdom a s takou hodnotou budenia, že je možné 50 % preťaženie stroja, pri ktorom ešte nevypadne zo synchronizmu. Aká musí byť hodnota U_{ib} v tomto stave? Vypočítajte tiež menovitý prúd, účinník a výkon stroja. Všetky straty v stroji zanedbajte.

a) Ako sa zmení prúd, účinník, záťažový uhol a maximálne preťaženie stroja ak pri nezmenenej záťaži odbudíme stroj na 70% U_{ib} ?

($I_{aN}=87,48A$; $\cos\varphi_N=0,976$ induktívneho charakteru; $P=976kW$; $U_{ib}=6403V$)

a) $I_a=98,3A$; $\cos\varphi=0,868$ induktívneho charakteru; $\vartheta_L=-72,3^\circ$; je možné 5 % preťaženie)

Príklad 5.27

3-fázový, 6600 V, 6-pólový, 50 Hz synchronný motor so zapojením satorového vinutia do hviezdy má synchronnú impedanciu $0+j30\Omega$ na jednu fázu, $\cos\varphi=0,9$ kapacitného charakteru, $I_{aN}=100A$. Pri zanedbaní strát:

- Určite menovité budiace indukované napätie U_{ibN} , mechanický záťažový uhol ϑ_{LNmec} a menovitý moment stroja M_N .
 - Aké zvýšenie budenia je potrebné na to, aby mohol stroj spoľahlivo pracovať s momentom záťaže 25000 Nm?
 - Aká bude hodnota prúdu kotvy, účinníka a záťažového uhla s týmto novým buđením, pokiaľ stroj bude pracovať s menovitou záťažou?
 - Vypočítajte ako možno znížiť svorkové napätie, pri ktorom motor zaťažený menovitým momentom ešte nevypadne zo synchronizmu. Budenie stroja bude menovité.
 - Aká bude hodnota prúdu naprázdno tohto motora s buđením určeným v bode b)?
- $U_{ibN}=5787V$; $\vartheta_{LNmec}=-9,3^\circ$; $M_N=9827Nm$
 - $U_{ib}=6870V$
 - $\vartheta_L=-23,1^\circ$; $I_a=122,9A$; $\cos\varphi=0,732$ kapacitného charakteru
 - $U=1775V$, čo je redukcia na 46,6 %
 - $I_a=102A$ pri účinníku $\cos\varphi=0$ kapacitného charakteru)

Príklad 5.28

Alternátor 625 kVA, 3300 V, Y, 50 Hz, 300min^{-1} , $x_d=100\%$, $x_q=65\%$ má pri danom buzení napätie naprázdno $1,3U_N$. Určite výkon a činiteľ synchronizačného momentu v Nm/mech. rad. pri záťažovom uhle 30° .

($P=552\text{ kW}$, $C_m=27,76\text{ kNm/mech. rad.}$)

Príklad 5.29

3-fázový, 500 kVA, 6600 V, 50 Hz, 6-pólový synchronný stroj so satorovým vinutím zapojeným do hviezdy má synchronnú reaktanciu jednej fázy $j70\Omega$. V menovitej motorickej prevádzke je stroj budený tak, že $\cos\varphi=1$. Vypočítajte:

a) menovitý prúd kotvy I_{aN}

- b) budiace indukované napätie U_{ibN}
 - c) menovitý elektromagnetický moment M_{eN} a záťažový uhol ϑ_{LN}
 - d) maximálny moment pri U_{ibN}
 - e) žiadanú hodnotu U_{ib} , ktorá zabezpečí, že ak zaťažíme motor 200 % M_{eN} ešte nevypadne zo synchronizmu
 - f) záťažový uhol, prúd a účinník, ak budenie z bodu e) bude pri menovitej záťaži.
- (a) $I_{aN}=43,74$ A, b) $U_{ibN}=4888,2$ V, c) $M_N=4766,2$ Nm; $\vartheta_{LN}=-38,7^\circ$, d) $M_{maxN}=7623$ Nm, e) $U_{ib}=6112,6$ V (fázová hodnota), $\vartheta_L=-30^\circ$; $I_a=48,53$ A; $\cos\varphi=0,899$ kapacitného charakteru)

Príklad 5.30

6600 V, 3-fázový, do hviezdy zapojený synchronný motor má fázovú synchronnú impedanciu $0+j30 \Omega$. Ak poháňa menovitú záťaž, tak odoberá prúd 100 A pri induktívnom účinníku $\cos\varphi=0,9$.

- a) Budenie stroja sa zvýši o 50 % pri nezmenenej záťaži. Ktoré veličiny sa v stroji menia a ako?
 - b) Akú hodnotu bude mať prúd a účinník s týmto novým budením v stave naprázdno?
- (a) - záťažový uhol ϑ_L klesne z hodnoty $-47,17^\circ$ na hodnotu $-29,27^\circ$
- prúd kotvy I_a klesne z hodnoty 100A na hodnotu 96A
- zmení sa hodnota a charakter účinníka $\cos\varphi$ z 0,9 induktívneho charakteru na 0,937 kapacitného charakteru
- b) $I_a=57A$; prúd bude kapacitného charakteru a $\cos\varphi=0$)

Príklad 5.31

Menovité hodnoty 3-fázového, 6-pólového synchronného stroja zapojeného do hviezdy sú 11 kV; 1 MVA, 50 Hz; $\cos\varphi_N=0,9$ kapacitného charakteru. Budeme predpokladať, že jeho synchronná impedancia je induktívneho charakteru a jej fázová hodnota je $j120 \Omega$. Stroj pracuje v motorickom režime.

Vypočítajte menovitý prúd I_{aN} , menovité budiace indukované napätie U_{ibN} , menovitý elektromagnetický moment M_N a menovitý činný výkon P_N .

($I_{aN}=52,49$ A; $U_{ibN}=10718$ V; $M_{eN}=8599$ Nm; $P_N=0,9$ MW)

Príklad 5.32

3-fázový synchronný motor, 6,6 kV, so statorovým vinutím zapojeným do hviezdy, menovitého výkonu 550 kW, s účinnosťou 84,6 % má synchronnú impedanciu jednej fázy $0+j48 \Omega$. Aký bude vstupný prúd, záťažový uhol a účinník, ak $U_{ib} = 1,5U$?

($I_a=62,2$ A; $\vartheta_L=28,5^\circ$ e.l.; $\cos\varphi=0,91$ kapacitného charakteru)

Príklad 5.33

Priemyselný závod, napájaný 3-fázovým systémom 3,3 kV, obsahuje nasledujúce indukčné stroje:

	IM 1	IM 2	IM 3
Menovitý výkon [kW]	50	100	150
Menovitá účinnosť [%]	93	94	94,5
Menovitý účinník	0,89	0,91	0,93

Na vylepšenie účinníka tohto závodu je použitý synchronný stroj 150 kVA, Y a je buďený tak, že pri menovitom zaťažení všetkých strojov je celkový účinník závodu 1.

Aké musí byť U_{ib} ak $Z_s=0+j50 \Omega$? Aký bude mať synchronný motor výstupný výkon ak jeho menovitá účinnosť je $\eta_N=0,95$?

($U_{ib}=3217,6 \text{ V}$; $P=53,41 \text{ kW}$)

Príklad 5.34

Je daný trojfázový 4-pólový synchronný generátor. Jeho menovité hodnoty sú – menovitý zdanlivý príkon $S_N=125 \text{ kVA}$, menovité svorkové napätie $U_N=400 \text{ V}$ pri zapojení satorového vinutia do hviezdy, menovitý účinník $\cos\varphi_N=0,8$ induktívneho charakteru. Rozptylová reaktancia jednej fázy je daná percentuálne $x_\sigma=10 \%$. Skratový pomer daného stroja je $k_k=0,912$. Z charakteristiky naprázdno poznáme hodnotu budiaceho prúdu potrebného na vybudenie menovitého napätia $I_{b0}=7 \text{ A}$.

- Vypočítajte menovitý prúd kotvy I_{aN} , synchronnú reaktanciu jednej fázy stroja X_d , redukčný činiteľ g , menovité indukované napätie U_{iN} , menovité vnútorné indukované napätie U_{ibN} , menovitý záťažový uhol ϑ_{LN} , menovitý moment synchronného stroja M_{eN} , maximálny moment, ktorý môže tento stroj vyvinúť s menovitým buďením M_{\max} , menovitý budiaci prúd stroja I_{bN} .
- Budenie sa zvýši o 20 %. Ako sa zmení prúd, účinník a záťažový uhol, ak výstupný činný výkon ostáva nezmenený.
- $I_{aN}=180,42 \text{ A}$; $X_d=1,406 \Omega$; $g=0,0426$; $U_{iN}=245,16 \text{ V}$; $U_{ibN}=434 \text{ V}$; $\vartheta_{LN}=28^\circ$; $M_{eN}=639,2 \text{ Nm}$; $M_{\max}=1361,5 \text{ Nm}$; $I_{bN}=13,12 \text{ A}$, b) $I_a=326,3 \text{ A}$; $\cos\varphi=0,442$; $\vartheta_L=61,7^\circ$

Príklad 5.35

Zariadenia v závode sú napájané z trojfázovej siete 3,3 kV. Celkový účinník týchto zariadení je $\cos\varphi=0,88$. Na kompenzáciu účinníka je použitý 200 kVA synchronný stroj. Celková záťaž je potom 350 kVA pri jednotkovom účinníku. Pokiaľ využijeme tento stroj ako motor aj ako zdroj mechanickej energie, $\eta_N=0,95$, aký mechanickej výkon je schopný dodávať pri celkovom účinníku závodu:

- $\cos\varphi=1$
- $\cos\varphi=0,96$ induktívneho charakteru.

(a) $P=177,65$ kW, b) $P=193,8$ kW)

Príklad 5.36

Synchrónny motor pracuje pri sieťovom napätí 2300 V (v zapojení do hviezdy) a je buđený tak, že pri chode naprázdno je jeho prúd nulový. Pre $X_d=5,2 \Omega$, $X_q=4,25 \Omega$ a záťažový uhol 60° el., určite prúd, účinník a výkon motora. Ďalej určite výkon pri nulovom buđení a pri záťažovom uhle 45° . Pri riešení zanedbajte ohmický odpor statora. ($I_a=300$ A, $\cos\varphi=0,822$ kapacitného charakteru, $P=982$ kW, $P'=114$ kW.)

Príklad 5.37

Synchrónny motor s vyjadrenými pólmi má $U=1$ (jednotková hodnota), $x_d=0,9$ a $x_q=0,6$ (jednotkové hodnoty). Prúd je jednotkový pri účinníku 0,8 kapacitného charakteru, $\vartheta_{LN}=19,4^\circ$. Vypočítajte potrebné buđenje, výkon a moment a tiež zložky I_d a I_q (jednotkové hodnoty). ($U_{ib}=1,692$ – jednotková hodnota; výkon a moment stroja v pomerných veličinách majú tú istú hodnotu $P=0,8$; $I_d= -0,832$ – pomerná veličina; $I_q=0,554$ – pomerná veličina)

Príklad 5.38

3-fázový synchrónny generátor s menovitým napätím $U_N=520$ V v zapojení do hviezdy má hodnotu synchrónnej reaktancie $X_d=10 \Omega$ a dodáva menovitý výkon pri $I_N=40$ A a $\cos\varphi_N=1$.

- Vypočítajte menovitý výkon P_N , menovité vnútorné indukované napätie U_{ibN} a menovitý záťažový uhol ϑ_{LN} .
- Pri nezmenenom buđení ($U_{ibN}=\text{konšt.}$) sa činný výkon zvýši na maximálnu hodnotu P_{\max} . Vypočítajte hodnotu maximálneho výkonu P_{\max} a hodnotu prúdu statora I'_a a účinníka $\cos\varphi'$ v tomto stave.

(a) $P_N=36$ kW; $U_{ibN}=500$ V; $\vartheta_{LN}=53,1^\circ$, b) $P_{\max}=45$ kW; $I'_a = 58,3$ A ; $\cos\varphi' = 0,857$ kap.)