

4. ASYNCHRÓNNE STROJE

4.1 Všeobecne

Asynchrónne stroje patria k najpoužívanejším elektrickým strojom. Na vrchol rebríčka ich vyniesli ich nesporne zaujímavé vlastnosti: jednoduchá konštrukcia, vysoký hmotný výkon, nenáročná údržba, robustnosť. Tento stroj má však aj svoje nevýhody. Jednou z nich je zložitá a technicky náročná riadenie ich rýchlosti pri maximálnom využití stroja. Tento nedostatok sa však postupne odstraňuje prudkým rozvojom polovodičovej a mikropočítačovej techniky a používaním vektorovo orientovaného riadenia stroja.

Asynchrónny, tiež nazývaný indukčný stroj sa po konštrukčnej stránke skladá z dvoch častí – statora a rotora, ktoré sú navzájom prepojené pomocou ložísk umožňujúcich ich vzájomný relatívny pohyb. Stator je zložený z vrstvených plechov v tvare medzikružia, drážkovaných z vnútornej strany. V drážkach je uložené viacfázové (obyčajne trojfázové) rozložené vinutie. Rotor je tiež tvorený z vrstvených plechov v tvare medzikružia, v strede s otvorom pre hriadeľ. Plechy sú drážkované z vonkajšej strany. V drážkach sa nachádza vinutie rotora. Vinutie rotora sa nazýva kotva, ktorá môže byť dvojakeho typu – vinutá kotva alebo kotva nakrátko (klietková kotva).

Ak je trojfázové rozložené vinutie statora, vzájomne priestorovo posunuté o 120° el., napájané 3-fázovou súmernou sústavou prúdov, vzájomne časovo posunutých o 120° , tak sa vo vzduchovej medzere vytvára točivé magnetické pole, ktorého rýchlosť závisí od frekvencie napájacej siete f_s a počtu pólových dvojíc stroja p :

$$n_{\text{syn}} = \frac{60 f_s}{p} \left[\text{min}^{-1} \right] \quad (4.1)$$

Index *syn* znamená *synchronný*, lebo s touto rýchlosťou poľa budeme porovnávať rýchlosť rotora. Ak bude rýchlosť rotora totožná s rýchlosťou poľa, budeme hovoriť, že je synchronná, ak nie, bude asynchrónna.

Prepočet otáčok n_{syn} na mechanickú synchronnú uhlovú rýchlosť je daný vzťahom:

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi n_{\text{syn}}}{60} \left[\text{s}^{-1}; \text{min}^{-1} \right] \quad (4.2)$$

Točivé pole touto rýchlosťou pretína vodiče rotorového vinutia a indukuje v ňom napätie. Ak je vinutie kotvy uzavreté, indukované napätie pretláča v kotve prúd, ktoré vytvára magnetické pole kotvy (rotora). Vzájomná interakcia polí statora a rotora spôsobí, že sa rotor začne otáčať v smere točivého magnetického poľa a bude sa ho snažiť dobehnúť. Jeho rýchlosť však nikdy nemôže dosiahnuť (bez vonkajšieho zásahu), okrem ideálneho stavu naprázdno, pretože by sa v rotore prestalo indukovať napätie, netiekol by ním žiadny prúd a stroj by nevyvíjal moment.

Rotor sa preto v ustálenom stave otáča nižšou rýchlosťou n , čiže asynchrónnou rýchlosťou a preto tento stroj nazývame asynchrónny. Rozdiel rýchlosti točivého poľa a

rotora je definovaný ako sklzová rýchlosť ($n_{\text{syn}} - n$) a jej relatívny vzťah k n_{syn} udáva sklz s :

$$s = \frac{n_{\text{syn}} - n}{n_{\text{syn}}} \quad (4.3)$$

alebo pomocou mechanickej uhlovej rýchlosti:

$$s = \frac{\Omega_{\text{syn}} - \Omega}{\Omega_{\text{syn}}} \quad (4.4)$$

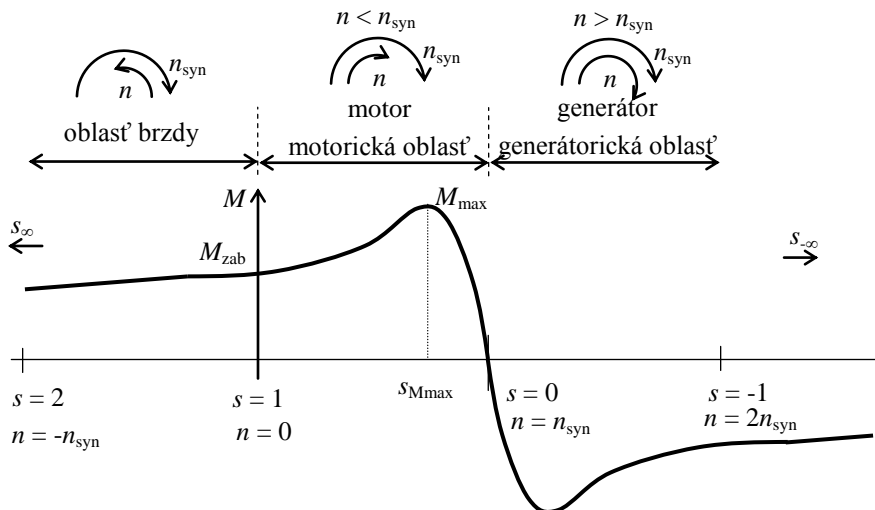
Zo vzťahov (4.3 a 4.4) možno odvodiť vzťah pre otáčky rotora, resp. jeho mechanickú uhlovú rýchlosť:

$$n = n_{\text{syn}}(1 - s) = \frac{60f_s}{p}(1 - s) \quad (4.5)$$

$$\Omega = \Omega_{\text{syn}}(1 - s) = \frac{2\pi f_s}{p}(1 - s) = \frac{\omega_s}{p}(1 - s) \quad (4.6)$$

Rozborom vzťahu (4.3) dostaneme rozsah hodnôt sklzu, ktoré stroj môže nadobúdať v prevádzke:

$s \in \langle 1, 0 \rangle$ -oblasť motora; $s \in \langle 0, -\infty \rangle$ -oblasť generátora, $s \in \langle \infty, 1 \rangle$ -oblasť brzdy (rotor sa točí opačne ako magnetické pole statora). Ilustračný diagram je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Ilustračný obrázok hodnôt sklzu, rýchlostí a prevádzkových oblastí asynchrónneho stroja

Po úprave vzťahu (4.3) alebo 4.4 dostaneme, že sklz udáva pomer medzi frekvenciou napätia indukovaného v rotore f_r a frekvencie napätia statora f_s

$$f_r = sf_s \quad (4.7)$$

Na obrázku 4.2a) je náhradná schéma jednej fázy asynchrónneho stroja, kde:

R_s – odpor jednej fázy statorového vinutia

$L_{\sigma s}$ – rozptylová indukčnosť jednej fázy statorového vinutia

L_μ – magnetizačná indukčnosť

R_{Fe} – odpor charakterizujúci straty v železe a straty mechanické

$L'_{\sigma r}$ – rozptylová indukčnosť jednej fázy rotorového vinutia prepočítaná na stator

R'_r – odpor jednej fázy rotora prepočítaný na stator

U_s – fázor svorkového napätia statora; U_{sf} – fázová hodnota tohto napätia

U_{is} – fázor indukovaného napätia statora (fázová hodnota)

U'_{ir} – fázor indukovaného napätia rotora prepočítaný na stator (fázová hodnota)

$$U_{is} = U'_{ir}$$

I_s – fázor statorového prúdu

I'_r – fázor rotorového prúdu prepočítaný na stator

I_0 – fázor prúdu naprázdno (pozri obr. 4.2d)), ktorý sa skladá z dvoch zložiek:
 – magnetizačného prúdu I_μ
 – prúdu reprezentujúceho straty v železe a straty mechanické I_{Fe}

$$I_0 = I_{Fe} + I_\mu = I_0 \angle \varphi_0, \quad I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0, \quad I_\mu = I_0 \sin \varphi_0, \quad I_0 = I_{Fe} - jI_\mu,$$

pričom

$$I_{Fe} = \frac{U_{sf}}{R_{Fe}} \quad (4.8)$$

a

$$I_\mu = \frac{U_{sf}}{X_\mu} \quad (4.9)$$

Prepočet prúdov, indukovaných napätí a parametrov stroja sa robí pomocou vzťahov známych z teórie elektrických strojov:

$$I'_r = I_r \frac{m_r N_r k_{vr}}{m_s N_s k_{vs}} \quad (4.10)$$

$$U'_{ir} = U_{ir} \frac{N_s k_{vs}}{N_r k_{vr}} = U_{is} \quad (4.11)$$

kde

$$U_{is} = \sqrt{2}\pi f_s \phi N_s k_{vs} \quad (4.12)$$

$$U_{ir} = \sqrt{2}\pi f_r \phi N_r k_{vr} = \sqrt{2}\pi s f_s \phi N_r k_{vr} = s\sqrt{2}\pi f_s \phi N_r k_{vr} = sU_{ir0}, \quad (4.13)$$

to znamená, že U_{ir0} je indukované napätie rotora, ak rotor stojí, t. j. pri statorovej frekvencii f_s .

$$R'_r = R_r \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s k_{vs}}{N_r k_{vr}} \right)^2 \quad (4.14)$$

$$X'_{\sigma r} = X_{\sigma r0} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s k_{vs}}{N_r k_{vr}} \right)^2 \quad (4.15)$$

kde:

m_s – počet fáz statora

m_r – počet fáz rotora

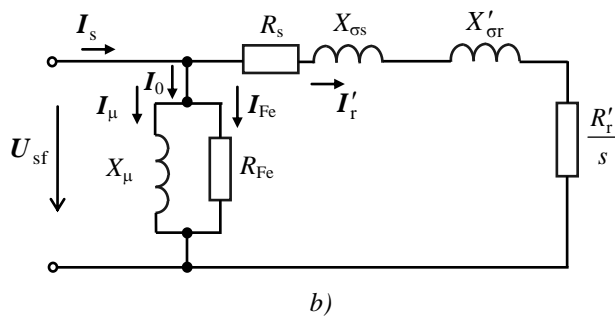
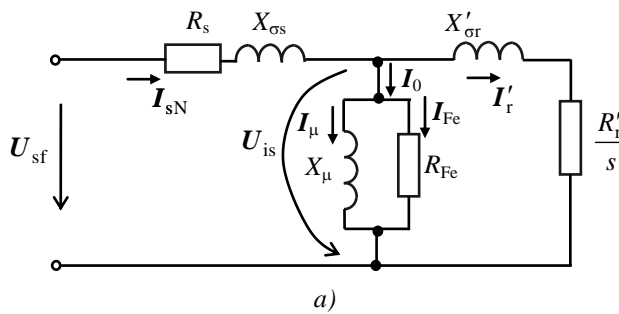
N_s – počet závitov jednej fázy statorového vinutia

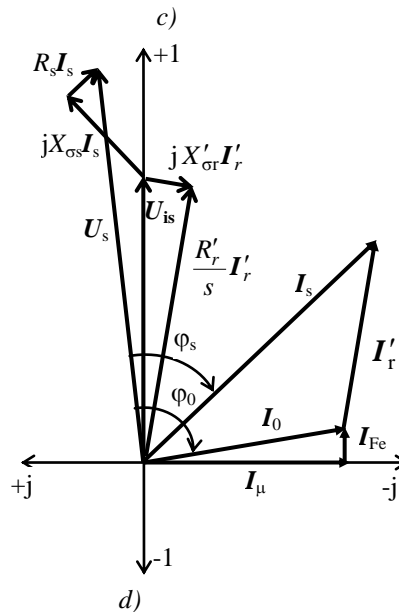
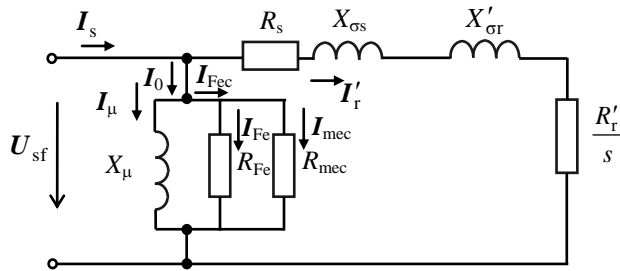
N_r – počet závitov jednej fázy rotorového vinutia

k_{vs} – koeficient vinutia statora

k_{vr} – koeficient vinutia rotora

$X_{\sigma r0}$ – rozptylová reaktancia rotorového vinutia pri statorovej frekvencii





Obr.4.2 a) Náhradná schéma jednej fázy asynchrónneho stroja, b) zjednodušená náhradná schéma, pričom je priečna vetva vysunutá na statorové svorky, c) náhradná schéma s uvažovaním odporu R_{mec} , d) fázorový diagram asynchrónneho stroja

Prepočet prúdov, indukovaných napätí a parametrov stroja sa robí pomocou už uvedených vzťahov.

Ak je rotor vinutý, počet fáz, koeficient vinutia a všetko, čo sa týka vinutia sa určuje tak isto ako v statore.

Ak má rotor kliečkovú kotvu, tak platí:

- ak počet drážok rotora Q_r nemá iného spoločného deliteľa s počtom pólových dvojíc p ako 1, t. j. najvyšší spoločný deliteľ je $t = 1$, potom počet fáz rotora sa rovná počtu drážok: $m_r = Q_r$. Počet závitov jednej fázy je $N_r = 1/2$ a koeficient rotorového vinutia $k_{vr} = 1$.

- ak najvyšší spoločný deliteľ Q_r a p je t , tak potom $m_r = \frac{Q_r}{t}$, $N_r = 1/2$ a $k_{vr} = 1$.

Rovnice opisujúce náhradnú schému:

$$I_s = \frac{U_{sf}}{Z_{in}} \quad (4.16)$$

$$Z_{in} = Z_s + \frac{Z_0 Z'_r}{Z_0 + Z'_r} \quad (4.17)$$

$$I_s = I_0 + I'_r \Rightarrow I_0 = I_s - I'_r = I_{Fe} - jI_\mu \quad (4.18)$$

$$I'_r = \frac{U_{is}}{Z'_r} \quad (4.19)$$

kde

$Z_s = R_s + jX_{\sigma s}$ je impedancia jednej fázy statorového vinutia

$Y_0 = G_{Fe} + jB_\mu$ je admitancia magnetizačnej vetvy, zo strany statora

kde

$G_{Fe} = \frac{1}{R_{Fe}}$ je konduktancia, čiže elektrická vodivosť reprezentujúca straty v železe

a R_{Fe} je elektrický odpor reprezentujúci straty v železe.

$B_\mu = \frac{1}{X_\mu}$ je susceptancia, X_μ je magnetizačná reaktancia magnetického obvodu.

$Z'_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}$ je impedancia jednej fázy rotora prepočítaná na stator. Jeho činná zložka R'_r/s zahŕňa jednak samotný odpor rotorového vinutia prepočítaný na stator R'_r , jednak odpor, ktorý reprezentuje záťaž na hriadelí $\frac{1-s}{s} R'_r$:

$$\frac{R'_r}{s} - R'_r = \frac{1-s}{s} R'_r \quad (4.20)$$

Ak je v rotore použitá dvojité kľetka, tak impedancia rotora prepočítaná na stator sa určí ako paralelná kombinácia impedancie vonkajšej kľetky (index „von“) a impedancie vnútornej kľetky (index „vn“), obidve prepočítané na stator:

$$\mathbf{Z}'_r = \frac{\mathbf{Z}'_{rvon}\mathbf{Z}'_{rvn}}{\mathbf{Z}'_{rvon} + \mathbf{Z}'_{rvn}} \quad (4.21)$$

kde:

$$\mathbf{Z}'_{rvon} = \frac{R'_{rvon}}{s} + jX'_{\sigma rvon} \quad (4.22)$$

$$\mathbf{Z}'_{rvn} = \frac{R'_{rvn}}{s} + jX'_{\sigma rvn} \quad (4.23)$$

Pre výpočet veličín v ustálených stavoch sa používa zjednodušená náhradná schéma (pozri obr.4.3.a). Zjednodušenie spočíva v tom, že magnetizačná vetva je presunutá na satorové svorky. Chyba vznikajúca týmto zjednodušením, t. j. že priečna vetva je na satorovom napätí a nie na indukovanom, ktoré je o úbytky na satorovej impedancii menšie, je asi 10 %, ale vzťahy pre výpočet prúdov a momentu sú jednoduchšie. Prepočítaný prúd rotora je potom daný

$$\mathbf{I}'_r = \frac{\mathbf{U}_{sf}}{\mathbf{Z}'_s + \mathbf{Z}'_r} = \frac{\mathbf{U}_{sf}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right) + j(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} \quad (4.24)$$

Prúd satora je daný súčtom prúdu naprázdno a prepočítaného prúdu rotora $\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}'_r$. Elektrický príkon na satorových svorkách je definovaný nasledujúco:

$$P_p = 3U_{sf}I_{sf} \cos \varphi_s = \sqrt{3}U_s I_s \cos \varphi_s. \quad (4.25)$$

Ak uvažujeme motorickú prevádzku, tak mechanický výkon na hriadeli je

$$P = M\Omega \quad (4.26)$$

kde M je moment na hriadeli stroja, $\Omega = 2\pi n / 60$ je mechanická uhlová rýchlosť rotora. Účinnosť stroja je definovaná ako pomer činného výkonu a činného príkonu stroja

$$\eta = \frac{P}{P_p} \quad (4.27)$$

čo platí všeobecne pre akýkoľvek typ stroja.

V motorickej oblasti asynchrónneho stroja je príkon daný odoberaným činným príkonom zo siete a výkon daný činným výkonom na hriadeli motora. V generátorickej oblasti je to opačne: príkon je daný privádzaným činným príkonom na hriadeli stroja od pohonného stroja a výkon daný elektrickým výkonom na satorových svorkách.

Avšak vo všetkých režimoch činnosti rozdiel medzi príkonom a výkonom udáva straty ΔP v stroji. V asynchrónnom stroji môžeme tieto straty rozdeliť na straty vo vinutí statora (index „j“ je od názvu Jouleovej straty):

$$\Delta P_{js} = m_s R_s I_{sf}^2, \quad (4.28)$$

straty vo vinutí rotora:

$$\Delta P_{jr} = m_r R_r I_{rf}^2 = m_s R'_r I_{rf}^2 \quad (4.29)$$

Straty v železe statora ΔP_{Fes} sú definované podobne ako v transformátore t. j. sú dané súčtom strát vírivými prúdmi a hysteréznymi strátami a sú funkciou statorovej frekvencie a magnetickej indukcie.

Straty v železe rotora ΔP_{Fer} sú definované rovnako ako straty v železe statora, ale sú funkciou rotorovej frekvencie, ktorá závisí od sklzu: $f_r = sf_s$.

Mechanické straty ΔP_{mec} sú to straty trením v ložiskách a ventilačné straty.

Dodatkové straty ΔP_{ad} vplyvom dodatočného rozptylu a ich hodnota sa rovná približne pol percenta menovitého výkonu (pozri príslušnú normu STN).

Cez vzduchovú medzeru zo statora na rotor sa prenáša činný výkon, ktorý označujeme ako výkon vo vzduchovej medzere P_δ . Ten je v súlade s náhradnou schémou definovaný vzťahom

$$P_\delta = m_s \frac{R'_r}{s} I_r^2 \quad (4.30)$$

Porovnaním so vzťahom (4.29) pre straty v rotorovom vinutí dostaneme:

$$\Delta P_{jr} = s P_\delta \quad (4.31)$$

Elektrický výkon premenený na mechanický môžeme vypočítať buď pomocou odporu, ktorý reprezentuje záťaž na hriadelí,

$$P_{mec} = 3 \frac{1-s}{s} R'_r I_r^2, \quad (4.32)$$

alebo pomocou výkonu vo vzduchovej medzere a sklzu, ak tie dva vzťahy dáme do pomeru:

$$P_{mec} = (1-s) P_\delta \quad (4.33)$$

Mechanický výkon na hriadelí je menší o straty mechanické

$$P = P_{mec} - \Delta P_{mec} \quad (4.34)$$

Vyvíjaný elektromagnetický moment určíme ako podiel výkonu premeneného na mechanickú formu P_{mec} a mechanickej uhlovej rýchlosti rotora:

$$M_e = \frac{P_{\text{mec}}}{\Omega} \quad (4.35)$$

Ak dosadíme do čitateľa aj menovateľa už odvodené vzťahy, dostaneme:

$$M_e = \frac{(1-s)P_\delta}{(1-s)\Omega_{\text{syn}}} = \frac{P_\delta}{\Omega_{\text{syn}}} \quad (4.36)$$

Toto je veľmi užitočný vzťah, lebo vyvíjaný elektromagnetický moment stroja možno určiť na základe výkonu vo vzduchovej medzere a konštantnej synchrónnej rýchlosti. Znalosť P_δ tak dáva priamo znalosť elektromagnetického momentu:

$$M_e = \frac{P_\delta}{\Omega_{\text{syn}}} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} m_s \frac{R'_r}{s} I_r'^2 \quad (4.37)$$

V prípade zjednodušenej náhradnej schémy možno prúd vyjadriť podľa Ohmovho zákona:

$$I_r' = \frac{U_{\text{sf}}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\text{cs}} + X'_{\text{cr}})^2}} \quad (4.38)$$

Potom elektromagnetický moment je:

$$M_e = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} m_s \frac{R'_r}{s} \frac{U_{\text{sf}}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\text{cs}} + X'_{\text{cr}})^2} \quad (4.39)$$

kde sklz „s“ udáva pracovný bod stroja.

Moment zvratu (maximálny moment) asynchrónneho stroja je v prípade zjednodušenej náhradnej schémy odvodený tak, že prvú deriváciu momentu podľa sklzu položíme rovnú 0, aby sme vyhľadali extrém funkcie a dostaneme takýto vzťah:

$$M_{\text{max}} = \pm \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} m_s \frac{U_{\text{sf}}^2}{2 \left[R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_{\text{cs}} + X'_{\text{cr}})^2} \right]} \quad (4.40)$$

a vyvíja sa pri sklze zvratu (sklz, pri ktorom je moment maximálny)

$$s_{M_{\text{max}}} = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{cs}} + X'_{\text{cr}})^2}} \quad (4.41)$$

pričom znamienko „+“ platí pre motor a znamienko „-“ pre generátor.

Tento na prvý pohľad komplikovaný výraz možno napísať priamo na základe pravidla pre prenos maximálneho výkonu. V sériových obvodoch, akým je z hľadiska svoriek zdroja aj obvod približnej náhradnej schémy na obr. 4.3a, sa maximálny výkon

bude prenášať vtedy, keď sa odpor záťaže, t. j. R_r'/s bude rovnať impedancii zdroja, t. j. zostávajúcim parametrom obvodu:

$$Z_{\text{zdroja}} = R_s + j(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r}) \quad (4.42)$$

Ak túto skutočnosť dáme do rovnice s tým, že k sklzu doplníme index „max“, lebo pri tomto sklze nastane prenos maximálneho výkonu vo vzduchovej medzere a tým aj tvorba maximálneho momentu, pre absolútnu hodnotu impedancie dostaneme:

$$\frac{R_s}{s_{M_{\max}}} = \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2} \quad (4.43)$$

V ďalšom kroku dostaneme výraz (4.44), resp. ak zanedbáme statorový odpor, dostaneme vzťah (4.47). Po dosadení (4.44), resp. lepšie povedané (4.43) do vzťahu (4.39), po dvoch krokoch úprav dostaneme výraz pre maximálny vyvíjaný elektromagnetický moment (4.40):

$$M_{e_{\max}} = \pm \frac{m_s U_{sf}^2}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}{\left\{ R_s \pm \left(\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2} \right)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2 \right\}} \quad (4.44)$$

Ak tento výraz v menovateli roznásobíme, upravíme a potom podelíme členom $\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}$, dostaneme spomínaný výraz (4.40).

Ak dáme do pomeru vzťah pre elektromagnetický moment pre sklz s a vzťah pre moment maximálny pri sklze s_{\max} , po úprave dostaneme

$$\frac{M_e}{M_{\max}} = \frac{2 \left[1 \pm \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}} \right]}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s} + 2 \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}} \quad (4.45)$$

kde sklz „ s “ udáva pracovný bod, v ktorom je vyvíjaný moment M_e .

Vo veľkých strojoch, kde sa môže odpor statora R_s voči ostatným parametrom zanedbať sa uvedené vzťahy značne zjednodušia:

$$M_{\max} = \pm \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} m_s \frac{U_{sf}^2}{2(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} \quad (4.46)$$

$$s_{\max} = \pm \frac{R_r'}{(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} \quad (4.47)$$

a pomer M_e/M_{\max} dáva známy *Klossov vzťah*

$$\frac{M_e}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}} \quad (4.48)$$

Výkon na hriadeli P je s momentom M a rýchlosťou točenia na hriadeli viazaný vzťahom

$$P = M\Omega = M \frac{2\pi n}{60} = \frac{M n}{9,55} \quad (4.49)$$

Teda moment na hriadeli je

$$M = \frac{P}{\Omega} = 9,55 \frac{P}{n} \quad (4.50)$$

RIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 4.1

Trojfázový asynchrónny motor zapojený do hviezdy, 50 Hz, 500V, 8-pólový, má tieto prvky náhradnej schémy:

Odpor satorového vinutia $R_s = 0,13 \Omega$, odpor rotorového vinutia $R_r = 0,32 \Omega$, rozptylová reaktancia satorového vinutia $X_{\sigma s} = 0,6 \Omega$, rozptylová reaktancia rotorového vinutia $X_{\sigma r} = 1,48 \Omega$, admitancia priečnej vetvy prepočítaná na stator $Y_0 = G_{Fe} - jB_\mu = (0,004 - j0,05) \Omega^{-1}$. Menovitý sklz je 5 %. Nakreslite „presnú“ a „približnú“ náhradnú schému a pre obidva prípady vypočítajte vstupný satorový prúd, jeho účinník a elektromagnetický moment v menovitom chode. Stator aj rotor majú tri fázy. Prevodový pomer závitov stator/rotor = 1/1,57. Zanedbajte mechanické straty.

Riešenie:

Náhradná schéma asynchrónneho motora pre tento príklad je na obr.4.3. „Približnou“ voláme také usporiadanie náhradnej schémy, v ktorej je priečna vetva vysunutá na satorové svorky (4.3a). „Presná“ je taká, v ktorej je priečna vetva medzi satorovou a rotorovou impedanciou (4.3b). Ak sa pri prepočte T – článku na Γ - článok použijú komplexné činitele rozptylu, možno považovať aj náhradnú schému Γ za presnú. Účelom výpočtu je ukázať, ako sa líšia výsledky v oboch usporiadaniach a kedy je výpočet jednoduchší. Najprv prepočítame rotorové hodnoty na stator:

$$R'_r = 0,32(1/1,57)^2 = 0,13 \Omega \quad X'_{\sigma r} = 1,48(1/1,57)^2 = 0,6 \Omega$$

Hodnota rotorového odporu pre menovitý sklz $s_N = 0,05$ je $\frac{R'_r}{s_N} = 0,13/0,05 = 2,6 \Omega$.

Výpočet pre približnú náhradnú schému:

Rotorový prúd prepočítaný na stator, pri menovitom sklze:

$$I'_{rN} = \frac{U_{sf}}{Z_N} = \frac{500/\sqrt{3}}{(0,13 + 2,6) + j(0,6 + 0,6)} = 88,8 - j39 = 97 \angle -23,7^\circ \text{ A}$$

$$\text{kde } Z_N = (R_s + R'_r/s_N) + j(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})$$

Zložky prúdu naprázdno:

$$I_{Fe} = U_{sf} G_{Fe} = \frac{500}{\sqrt{3}} \cdot 0,004 = 1,154 - j0 = 1,154 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_\mu = -jU_{sf} B_\mu = \frac{500}{\sqrt{3}} (-j0,05) = 0 - j14,425 = 14,425 \angle -90^\circ \text{ A}$$

Statorový menovitý prúd:

$$I_{sN} = (I_{Fe} + I_{\mu}) + I'_{rN} = 89,95 - j53,4 = 104,6 \angle -34,1^\circ \text{ A}$$

Vstupný statorový účinník pri menovitom prúde:

$$\cos \varphi_{sN} = \frac{\operatorname{Re}(I_{sN})}{|I_{sN}|} = \frac{89,95}{104,6} = 0,859$$

Elektromagnetický moment pre menovitý stav

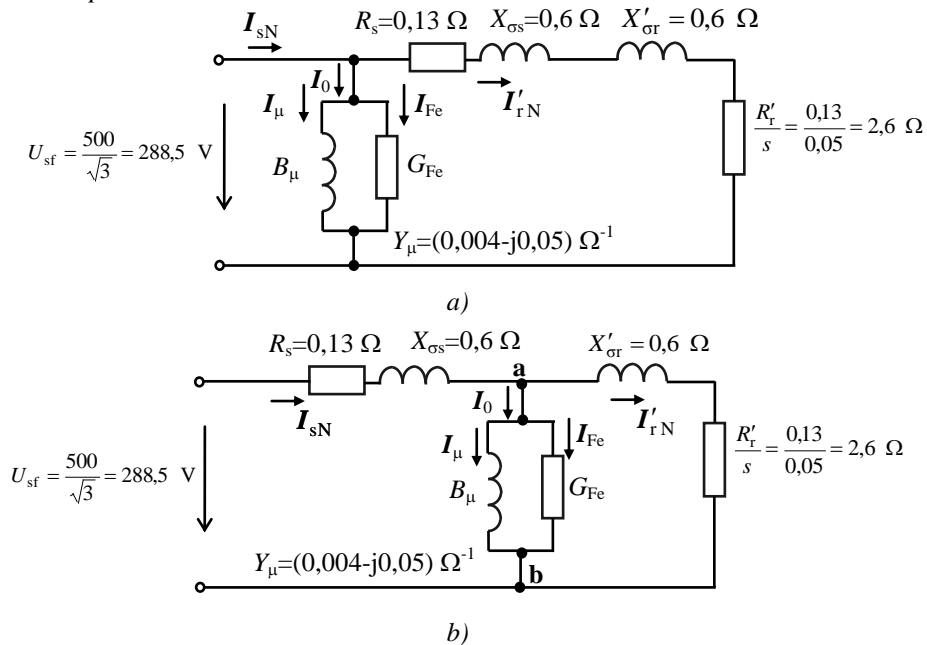
$$M_{eN} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} 3 \frac{R'_r}{s_N} I_{rN}'^2 = \frac{1}{78,53} 3 \cdot 2,6 \cdot 97^2 = 934,55 \text{ Nm}$$

kde

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi n_{\text{syn}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 60 f_s}{60 p} = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{4} = 78,53 \text{ s}^{-1}$$

je mechanická uhlová synchronná rýchlosť a synchronne otáčky vypočítame ako

$$n_{\text{syn}} = \frac{60 f_s}{p} = \frac{3000}{4} = 750 \text{ min}^{-1}$$



Obr. 4.3 Náhradná schéma k príkladu 4.1, a) približná náhradná schéma (Γ - článok), b) presná náhradná schéma (T - článok)

Výpočet pre „presnú“ náhradnú schému

Admitancia medzi bodmi „a“ a „b“ je

$$Y_{ab} = G_{Fe} - jB_{\mu} + \frac{1}{\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r}} = 0,004 - j0,05 + \frac{1}{2,6 + j0,6} = (0,396 - j0,1345) \Omega^{-1}$$

Zodpovedajúca impedancia

$$Z_{ab} = \frac{1}{Y_{ab}} = 2,4 + j0,872 = 2,55 \Omega$$

Pridaním satorovej impedancie $Z_s = R_s + jX_{\sigma s}$ dostaneme celkovú impedanciu:

$$Z_{inN} = (2,4 + 0,13) + j(0,872 + 0,6) = 2,53 + j1,472 = 2,927 \angle 33,54^\circ \Omega$$

Celkový vstupný satorový prúd

$$I_{sN} = \frac{U_{sf}}{Z_{inN}} = \frac{288,5}{2,53 + j1,472} = 85,5 - j49,6 = 98,5 \angle -30,1^\circ \text{ A}$$

Vstupný satorový účinník

$$\cos \varphi_s = \frac{85,5}{98,5} = 0,858$$

Na výpočet rotorového prúdu treba najprv určiť napätie medzi bodmi „a“ a „b“, t. j. indukované napätie U_{is} . Môžeme ho určiť napríklad tak, že dáme do pomeru napätia a impedancie, t. j. napätie U_{sf} je na celej impedancii Z_{inN} , napätie U_{is} len na Z_{ab}

$$\frac{U_{is}}{U_{sf}} = \frac{Z_{ab}}{Z_{inN}} \Rightarrow U_{is} = 288,5 \frac{2,55}{2,92} = 252 \text{ V}$$

Potom

$$I'_r = \frac{U_{is}}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + X'^2_{\sigma r}}} = \frac{252}{\sqrt{2,6^2 + 0,6^2}} = 94,44 \text{ A}$$

Moment vypočítame s týmto novým prúdom:

$$M_{cN} = \frac{m_s}{\Omega_{syn}} \frac{R'_r}{s_N} I'^2_{rN} = \frac{3}{78,53} 2,6 \cdot 94,44^2 = 885,89 \text{ Nm}$$

alebo jednoducho pomocou pomeru prúdov

$$M_{eN} = 934,55 \left(\frac{94,45}{97} \right)^2 = 885,89 \text{ Nm}$$

Zložky prúdu v priečnej vetve

$$I_{Fe} = U_{is} G_{Fe} = 252 \cdot 0,004 = 1,01 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = U_{is} (-jB_{\mu}) = 252(-j0,05) = -j12,6 \text{ A}$$

Takže prúd naprázdno je

$$I_0 = I_{Fe} + I_{\mu} = 1,01 - j12,6 = 12,64 \text{ A}$$

Porovnajtie výsledky pre obidva spôsoby výpočtu.

Príklad 4.2

Použite približnú náhradnú schému z príkladu 4.1 (obr. 4.3a) a vypočítajte zdanlivý výkon asynchrónneho stroja, keď je poháňaný rýchlosťou 780 min^{-1} .

Riešenie:

Sklz pri danej rýchlosti je

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} = \frac{750 - 780}{750} = -0,04$$

Sklz je záporný, lebo $n > n_{syn}$, čiže stroj pracuje v generátorickom režime. Celkový rotorový odpor je

$$\frac{R'_r}{s} = -\frac{0,13}{0,04} = -3,25 \text{ } \Omega$$

Rotorový prúd prepočítaný na stator je

$$I'_r = \frac{U_{sf}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right) + j(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} = \frac{500/\sqrt{3}}{(0,13 - 3,25) + j1,2} = \frac{500/\sqrt{3}}{-3,12 + j1,2} = -80,5 - j31 \text{ A}$$

$$I_0 \text{ (obr. 4.2)} = 1,154 - j14,425 \text{ A}$$

$$I_s = I'_r + I_0 = -79,35 - j45,4 = 91,5 \angle 213^\circ \text{ A}$$

Účinník záťaže tohto indukčného generátora je:

$$\cos \varphi_s = \frac{-79,35}{91,5} = 0,865 \text{ kap. char.}$$

Účinník záťaže kapacitného charakteru znamená, že na svorky tohto zdroja - indukčného generátora, treba pripojiť zdroj magnetizačnej energie. Tým môže byť sieť, ak je asynchrónny stroj pripojený na tvrdú sieť, alebo sada kondenzátorov, pomocou ktorej by sa nabudil, v prípade, že by pracoval v ostrovej prevádzke. Pozri kapitolu synchrónne stroje – prebudovaný a podbudovaný synchrónny generátor.

Zdanlivý výstupný výkon na svorkách je

$$S = \sqrt{3} U_s I_s = \sqrt{3} \cdot 500 \cdot 91,5 = 79,2 \text{ kVA}$$

Príklad 4.3

3 - fázový asynchrónny motor zapojený do hviezdy, 978 kW, 6600 V, 50 Hz, 8 – pólový, má pri meraní naprázdno tieto údaje:

U_0 [V]	6600	6000	5000	4000	3000
I_0 [A]	40				
P_0 [kW]	45	40,2	31,5	26,7	21

Z merania nakrátko (rotor zabrzdzený, skratované rotorové vinutie) máme tieto údaje: 1400 V, 80 A, 50 kW. Ak predpokladáme, že $R_s = R'_r$ a $X_{\sigma s} = X'_{\sigma r}$, vypočítajte účinnosť motora pri menovitej záťaži.

Riešenie:

Po vynesení údajov z merania naprázdno do grafu $I_0, P_0 = f(U_0)$, nájdeme na osi príkonu naprázdno pri nulovom napätí hodnotu strát mechanických $\Delta P_{\text{mec}} = 15 \text{ kW}$. Zvyšok do 45 kW pri menovitom napätí (pozri tabuľku) je 30 kW a to je súčet strát v železe ΔP_{Fe} a straty vo vinutí statora prechodom prúdu naprázdno 40A:

$$\Delta P_{\text{Fe}} + 3 R_s I_0^2 = \Delta P_{\text{Fe}} + 3 R_s 40^2 = 30000 \text{ W} = 30 \text{ kW}$$

Aby sme teda mohli určiť ΔP_{Fe} , potrebujeme poznať odpor satorového vinutia R_s . Podobne ako v prípade transformátora, aj tu to urobíme z údajov merania nakrátko: Príkon nakrátko je

$$P_k = \sqrt{3} U_k I_k \cos \varphi_k$$

Činná zložka prúdu nakrátko

$$I_k \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k} = \frac{50000}{\sqrt{3} \cdot 1400} = 20,6 \text{ A}$$

Jalová zložka prúdu nakrátko

$$I_k \sin \varphi_k = \sqrt{I_k^2 - I_k^2 \cos^2 \varphi_k} = \sqrt{80^2 - 20,6^2} = 77,2 \text{ A}$$

Toto sú prúdy pri napätí 1400 V. Pri menovitom napätí 6600 V bude prúd nakrátko úmerne väčší:

$$I_{kN} = (20,6 - j77,2) \frac{6600}{1400} = 97,2 - j364 \text{ A}$$

Celková impedancia merania nakrátko (impedancia pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy)

$$Z_k = \frac{U_{sf}}{I_{kN}} = \frac{6600 / \sqrt{3}}{97,2 - j364} = 2,62 + j9,8 = R_k + jX_{\sigma k}$$

$$R_k = 2,62 \text{ } \Omega = R_s + R'_r \Rightarrow R_s = R'_r = \frac{R_k}{2} = 1,31 \text{ } \Omega$$

$$X_{\sigma k} = 9,8 \text{ } \Omega = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} \Rightarrow X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma k}}{2} = 4,9 \text{ } \Omega$$

Ak teda určíme straty vo vinutí statora prechodom prúdu naprázdno

$$3R_s I_0^2 = 3 \cdot 1,31 \cdot 40^2 = 6,28 \text{ kW}$$

môžeme určiť straty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = 30 - 6,28 = 23,7 \text{ kW.}$$

Účinník naprázdno je

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_s I_0} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 40} = 0,0985$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - 0,0985^2} = 0,995$$

Potom zložky prúdu naprázdno sú:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 = 40 \cdot 0,0985 = 3,94 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 = 40 \cdot 0,995 = 39,8 \text{ A}$$

Magnetizačná reaktancia

$$X_{\mu} = \frac{U_{sf}}{I_{\mu}} = \frac{6600 / \sqrt{3}}{39,8} = 95,85 \text{ } \Omega$$

Odpor charakterizujúci straty v železe a straty mechanické, t. j. celé straty naprázdno

$$R_{\text{Fe+mec}} \cong \frac{U_{\text{sf}}}{I_{\text{Fe}}} = \frac{6600/\sqrt{3}}{3,94} = 967,1 \Omega$$

Ak chceme oddeliť odpor reprezentujúci straty v železe R_{Fe} a straty mechanické R_{mec} , počítame R_{Fe} len zo strát ΔP_{Fe}

$$I_{\text{Fe}} = \frac{\Delta P_{\text{Fe}}}{\sqrt{3} U_s} = \frac{23700}{\sqrt{3} \cdot 6600} = 2,073 \text{ A}$$

$$R_{\text{Fe}} = \frac{U_{\text{sf}}}{I_{\text{Fe}}} = \frac{6600/\sqrt{3}}{2,073} = 1838 \Omega$$

a obidva odpory zapojíme paralelne. Preto odporom R_{mec} necháme pretekať prúd

$$I_{\text{mec}} = 3,94 - 2,073 = 1,867 \text{ A}$$

a jeho hodnotu vyčíslime pomocou napätia:

$$R_{\text{mec}} = \frac{U_{\text{sf}}}{I_{\text{mec}}} = \frac{6600/\sqrt{3}}{1,867} = 2041 \Omega$$

Pre kontrolu môžeme z týchto dvoch paralelne zapojených odporov vypočítať výsledný odpor

$$R_{\text{Fe+mec}} = \frac{R_{\text{Fe}} R_{\text{mec}}}{R_{\text{Fe}} + R_{\text{mec}}} = \frac{1838 \cdot 2041}{1838 + 2041} = 967,1 \Omega$$

čo sa zhoduje s už vypočítanou hodnotou.

Výpočet prvkov priechnej vetvy náhradnej schémy by bol presnejší, keby sme namiesto svorkového napätia U_s použili indukované napätie U_{is} , ktoré je na priechnej vetve náhradnej schémy. Približný výpočet U_{is} pri zanedbaní fázových posunov by mohol vyzeráť takto:

$$U_{\text{isf}} = U_{\text{sf}} - I_0 X_{\text{cs}} = 6600/\sqrt{3} - 40 \cdot 4,9 = 3614,5 \text{ V}$$

Potom $X_{\mu} = 90,8 \Omega$, $R_{\text{Fe+mec}} = 917,38 \Omega$, $R_{\text{Fe}} = 1796,47 \Omega$.

Ďalej potrebujeme zistiť menovitý sklz s_N a menovitý prúd I_N . Na výpočet použijeme približnú náhradnú schému, ale mohli by sme použiť aj presnú náhradnú schému, rozdiel vo výpočtoch sme videli v príklade 4.1. Na výpočet s_N máme údaj o konvertovanom výkone, t. j. o výkone premenenom z elektrickej formy na mechanickú P_{mec} , z ktorého po odčítaní mechanických strát ΔP_{mec} dostaneme výkon na hriadelí P a údaj o výkone vo vzduchovej medzere P_{δ} . Pre menovitý stav dostaneme:

$$P_{\text{mecN}} = (1 - s_N) P_{\delta N}$$

pričom $P_{\delta N}$ je dané podľa vzťahu (4.30).

$$P_{\text{mecN}} = P_N + \Delta P_{\text{mec}} = (1 - s_N) 3 \frac{R'_r}{s_N} \frac{U_{\text{sf}}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + X_{\sigma k}^2}$$

$$P_{\text{mecN}} = 978 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3 = (1 - s_N) \cdot 3 \cdot \frac{1,31}{s_N} \cdot \frac{(6600/\sqrt{3})^2}{\left(1,31 + \frac{1,31}{s_N}\right)^2 + 9,8^2}$$

Po úprave dostaneme kvadratickú rovnicu pre $1/s_N$:

$$\frac{1}{s_N^2} - \frac{31,1}{s_N} + 90,5 = 0$$

Riešením rovnice je $1/s_N = 27,8$, teda $s_N = 0,036$, druhý koreň vychádza v nestabilnej oblasti.

Potom rotorový menovitý prúd prepočítaný na stator je:

$$I'_{rN} = \frac{U_{\text{sf}}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_N}\right) + jX_{\sigma k}} = \frac{6600/\sqrt{3}}{\left(1,31 + \frac{1,31}{0,036}\right) + j9,8} = 95,5 - j24,6 = 99 \text{ A}$$

a ak pridáme prúd naprázdno

$$I_0 = 3,94 - j39,8 \text{ A}$$

dostaneme statorový menovitý prúd:

$$I_{sN} = 99,44 - j64,4 = 118,45 \text{ A}$$

Teraz môžeme vypočítať straty vo vinutí statora a rotora v menovitom stave:

$$\Delta P_{jsN} = 3R_s I_{sN}^2 = 3 \cdot 1,31 \cdot 118,45^2 = 55\,139 \text{ W}$$

$$\Delta P_{jrN} = 3R'_r I'_{rN}{}^2 = 3 \cdot 1,31 \cdot 99^2 = 38\,518 \text{ W}$$

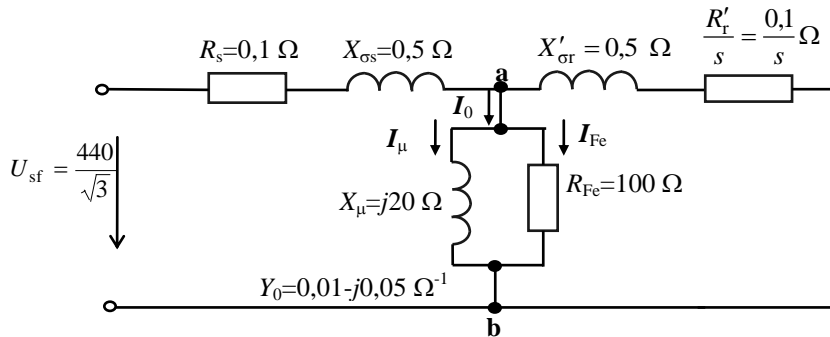
Celkové straty vo vinutiach pri menovitom zaťažení	= 93 657 W
Straty v železe	= 23 700 W
Straty mechanické	= <u>15 000 W</u>
Celkové straty	= 132 357 W

Menovitý výstupný výkon je podľa zadania $P_N = 978 \text{ kW}$. Potom účinnosť motora v menovitom stave je

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_N} = \frac{978}{978 + 132,35} = 0,88$$

Príklad 4.4

Náhradná schéma 3-fázového, 8-pólového asynchrónneho motora, zapojeného do hviezdy, s menovitým napätím $U_N = 440$ V, 50 Hz je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Náhradná schéma asynchrónneho motora k príkladu 4.4

Pri meraní nakrátko so zabrzdovým rotorom je prúd vo fáze 80 A. Meranie naprázdno pri menovitom napätí je urobené tak, že motor je poháňaný synchronnou rýchlosťou v smere točenia magnetického poľa, teda $s = 0$.

Vypočítajte: a) Fázové a združené napätie a účinník pri meraní nakrátko.

b) Prúd naprázdno a účinník naprázdno pri meraní naprázdno.

Riešenie:

a) Celková vstupná impedancia z hľadiska svoriek asynchrónneho motora pri meraní nakrátko, čiže $s = 1$:

$$\mathbf{Z}_{\text{ink}} = \mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}_{\text{abk}} =$$

$$= R_s + jX_{gs} + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}} + \frac{1}{R'_r + jX'_{gr}}} = 0,1 + j0,5 + \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{j20} + \frac{1}{0,1 + j0,5}} =$$

$$= 0,1 + j0,5 + \frac{1}{0,01 - j0,05 + \frac{0,1 - j0,5}{0,1^2 + 0,5^2}} = 0,1 + j0,5 + \frac{1}{0,395 - j1,973} =$$

$$= 0,1 + j0,5 + 0,097 + j0,487 = 0,197 + j0,987 = 1,006 \angle 78,8^\circ \Omega$$

Fázové napájacie napätie pri meraní nakrátko

$$U_{kf} = 1,006 \cdot 80 = 80,48 \text{ V}$$

a združené

$$U_k = \sqrt{3} \cdot 80,48 = 140 \text{ V}$$

pri účinníku nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{R_{in}}{Z_{in}} = \frac{0,197}{1,006} = 0,1957$$

kde R_{in} je reálna časť vstupnej impedancie Z_{in} .

b) Pri meraní naprázdno $R'_r / s = \infty$, takže vstupná impedancia bude

$$\begin{aligned} Z_{in0} &= 0,1 + j0,5 + \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{j20}} = 0,1 + j0,5 + \frac{1}{0,01 - j0,05} = 0,1 + j0,5 + 3,85 + j19,23 = \\ &= 3,95 + j19,73 = 20,1 \angle 78,7^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\text{Prúd naprázdno } I_0 = \frac{440 / \sqrt{3}}{20,1} = 12,64 \text{ A pri účinníku } \cos \varphi_0 = 0,196$$

Príklad 4.5

Pre asynchrónny motor a náhradnú schému z príkladu 4.4 vypočítajte pri sklze 3 % tieto veličiny:

- rotorový prúd prepočítaný na stator I'_r
- vstupný statorový prúd I_s a účinník $\cos \varphi_s$
- elektromagnetický moment M_e
- mechanický výstupný výkon P_{mec}
- účinnosť η
- záberový moment M_{zab}

Uvažujte mechanické straty 1000 W a

- a) náhradnú schému, ktorá zanedbáva statorovú impedanciu
- b) približnú náhradnú schému (pričná vetva na svorkách)
- c) „presnú“ náhradnú schému

Riešenie:

Fázová hodnota statorového napätia:

$$U_{sf} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ V}$$

Synchrónna mechanická uhlová rýchlosť

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{4} = 78,54 \text{ rad/s}$$

Mechanická uhlová rýchlosť na hriadeľi

$$\Omega = \Omega_{\text{syn}}(1 - s) = 78,54(1 - 0,03) = 76,18 \text{ rad/s}$$

Pre prípad a) a b) sú výpočty prehľadne uvedené v nasledujúcej tabuľke.

a) $R_s \rightarrow 0, X_{\text{gs}} \rightarrow 0$	b) Približná náhradná schéma
$I_r' = \frac{254}{\frac{0,1}{0,03} + j0,5} = 74,7 - j11,2 \text{ A}$	$I_r' \frac{254}{\left(0,1 + \frac{0,1}{0,03}\right) + j1} = 68,25 - j19,9 \text{ A}$
$I_0 = \frac{254}{100} - j \frac{254}{20} = 2,54 - j12,7 \text{ A}$	$I_0 = 2,54 - j12,7 \text{ A}$
$I_s = I_r' + I_0 = 77,24 - j23,9 = 80,6 \text{ A}$ pri $\cos \varphi_s = 0,955$	$I_s = 70,79 - j32,6 = 77,9 \text{ A}$ pri $\cos \varphi_s = 0,908$
$I_r' = \sqrt{74,5^2 + 11,2^2} = 75,32 \text{ A}$	$I_r' = \sqrt{68,2^2 + 19,9^2} = 71 \text{ A}$
$M_e = \frac{3}{78,54} \cdot \frac{0,1}{0,03} \cdot 75,32^2 = 722,2 \text{ Nm}$	$M_e = \frac{3}{78,54} \cdot \frac{0,1}{0,03} \cdot 71^2 = 641,8 \text{ Nm}$
$P_{\text{mec}} = 76,18 \cdot 722,2 - 1000 = 54,017 \text{ kW}$	$P_{\text{mec}} = 76,18 \cdot 641,8 - 1000 = 47,89 \text{ kW}$
$P_{\text{in}} = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 77,24 = 58,7 \text{ kW}$	$P_{\text{in}} = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 70,74 = 53,9 \text{ kW}$
$\eta = 55,7 / 58,7 = 0,949$	$\eta = 49,41 / 53,9 = 0,917$
$M_{\text{zab}} = \frac{3}{78,54} \cdot \frac{0,1}{1} \cdot \frac{254^2}{0,1^2 + 0,5^2} = 947,8 \text{ Nm}$	$M_{\text{zab}} = \frac{3}{78,54} \cdot \frac{0,1}{1} \cdot \frac{254^2}{0,2^2 + 1^2} = 236,9 \text{ Nm}$

Z výpočtov vidno, že zanedbanie statorovej impedancie spôsobuje značné rozdiely vo výsledkoch, najmä pri výpočte M_{zab} (stav nakrátko, kedy je dôležitá celá pozdĺžna vetva). Ako uvidíme z nasledujúcich výpočtov s „presnou“ náhradnou schémou, približná náhradná schéma dáva výsledky s chybou 10 %.

c) Pri presnej náhradnej schéme treba vypočítať impedanciu medzi bodmi „ab“ (obr. 4.4)

$$Z_{\text{ab}} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{j20} + \frac{1}{\frac{0,1}{0,03} + j0,5}} = \frac{1}{0,01 - j0,05 + 0,293 - j0,044} =$$

$$= 3,01 + j0,934 = 3,15 \angle 17,2^\circ \Omega$$

Ak pridáme do série zapojenú impedanciu statora

$$Z_{in} = Z_s + Z_{ab} = 3,11 + j1,434 = 3,42 \angle 24,7^\circ \Omega$$

Vstupný prúd

$$I_s = \frac{U_{sf}}{Z_{in}} = \frac{254}{3,42 \angle 24,7^\circ} = 74,3 \text{ A pri } \cos \varphi_s = 0,908 \text{ ind.}$$

$$U_{is} = U_{ab} = \frac{|Z_{ab}|}{|Z_{in}|} U_s = \frac{3,15}{3,42} 254 = 234 \text{ V}$$

$$I_r' = \frac{U_{ab}}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}'^2}} = \frac{234}{\sqrt{3,33^2 + 0,5^2}} = 69,4 \text{ A}$$

$$I_0 = \frac{U_{is}}{R_{Fe}} - j \frac{U_{is}}{X_\mu} = \frac{234}{100} - j \frac{234}{20} = 2,34 - j11,7 = 11,93 \angle -87,43^\circ \text{ A}$$

$$M_e = \frac{3}{\Omega_{syn}} \frac{R_r'}{s} I_r'^2 = \frac{3}{78,54} \cdot 3,33 \cdot 69,4^2 = 613,6 \text{ Nm}$$

$$P_{mec} = \Omega_{syn} M_e - \Delta P_{mec} = 76,18 \cdot 613,6 - 1000 = 45,66 \text{ kW}$$

$$P_{in} = \sqrt{3} U I_s \cos \varphi_s = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 74,3 \cdot 0,908 = 51,4 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{in}} = \frac{45,66}{51,4} = 0,888$$

Pre výpočet M_{zab} použijeme niektoré hodnoty vypočítané v príklade 4.4 a)

$$Z_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{100} + \frac{1}{j20} + \frac{1}{0,1 + j0,5}} = 0,097 + j0,487 = 0,496 \angle 78,7^\circ \Omega$$

$$Z_{in} = 1,006 \Omega$$

Potom M_{zab} počítame s hodnotou $U_{is} = \frac{Z_{ab}}{Z_{in}} U_{sf}$ a prvkami rotorovej impedancie

$$R_r'^2 + X_{\sigma r}'^2 = 0,1^2 + 0,5^2$$

$$M_{zab} = \frac{3}{\Omega_{syn}} \frac{R_r'}{s} \frac{U_{is}^2}{(R_r'^2 + X_{\sigma r}'^2)} = \frac{3}{78,54} \cdot \frac{0,1}{1} \cdot \left(\frac{0,496}{1,006} \cdot 254 \right)^2 \cdot \frac{1}{(0,1^2 + 0,5^2)} = 230,4 \text{ Nm}$$

Príklad 4.6

Trojfázový asynchrónny motor, 440 V, zapojený do trojuholníka, 4-pólový, 50 Hz, pracuje s menovitým výkonom pri rýchlosti 1447 min^{-1} . Náhradná schéma má tieto parametre:

$$R_s = 0,2 \Omega; R_r' = 0,4 \Omega; X_{\sigma s} = X_{\sigma r}' = 2 \Omega, R_{Fe} = 200 \Omega; X_{\mu} = 40 \Omega;$$

- Použite približnú náhradnú schému a pri menovitej záťaži vypočítajte hodnoty satorového prúdu a účinníka, momentu, výstupného výkonu a účinnosti. Uvažujte mechanické straty 1000 W.
- Vypočítajte tie isté veličiny, ak stroj pracuje ako generátor s tou istou hodnotou sklzu.

Riešenie:

a) Sklz pri menovitej záťaži

$$s_N = \frac{n_{syn} - n_N}{n_{syn}} = \frac{1500 - 1447}{1500} = 0,0353$$

kde

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

Náhradná schéma sa týka jednej fázy, preto budeme pracovať s fázovými prúdmi, (v zapojení do trojuholníka je napätie na fáze 440 V):

Menovitý fázový prúd prepočítaný na stator:

$$I'_{rN} = \frac{440}{\left(0,2 + \frac{0,4}{0,0353} \right) + j(2 + 2)} = 34,05 - j11,8 = 36,04 \angle -21,25^\circ \text{ A}$$

$$I_{of} = \frac{440}{200} + \frac{440}{j40} = 2,2 - j11 \text{ A}$$

$$I_{sfN} = I'_{rN} + I_{of} = 36,25 - j22,8 = 42,8 \angle -35,68^\circ \text{ A pri } \cos \varphi_s = \frac{36,25}{42,8} = 0,847$$

Združený (líniový) prúd

$$I_{sN} = \sqrt{3}I_{sfN} = \sqrt{3} \cdot 42,8 = 74,13 \text{ A}$$

$$M_{eN} = \frac{3}{\Omega_{syn}} \frac{R'_r}{s_N} I_{rN}^2 = \frac{3}{157,1} \cdot \frac{0,4}{0,0353} \cdot 36,04^2 = 281 \text{ Nm}$$

$$\text{kde } \Omega_{syn} = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157,1 \text{ s}^{-1}$$

Výkon na hriadeľi pri menovitej rýchlosti

$$P_N = (1 - s_N)P_\delta - \Delta P_{mec} = (1 - s_N)M_{eN}\Omega_{syn} - \Delta P_{mec} = \\ = (1 - 0,0353)281 \cdot 157,1 - 1000 = 41,59 \text{ kW}$$

$$P_{inN} = \sqrt{3}U_N I_{sN} \cos \varphi_s = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 74,13 \cdot 0,847 = 47,85 \text{ kW}$$

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{inN}} = \frac{41,59}{47,85} = 0,869$$

b) Ak stroj pracuje ako generátor, má sklz

$$s_G = -0,0353$$

a odtiaľ vyplýva, že fázové prúdy

$$I'_{Gf} = \frac{U_{sf}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_G}\right) + j(X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})} = \frac{440}{\left(0,2 - \frac{0,4}{0,0353}\right) + j4} = \frac{440}{-11,13 + j4} = -35 - j12,6 \text{ A}$$

$$I_{0f} = 2,2 - j11 \text{ A}$$

$$I_{sGf} = I'_{Gf} + I_{0f} = -32,8 - j23,6 = 40,4 \angle -144^\circ \text{ A}$$

a združený statorový prúd v generátorickom chode je

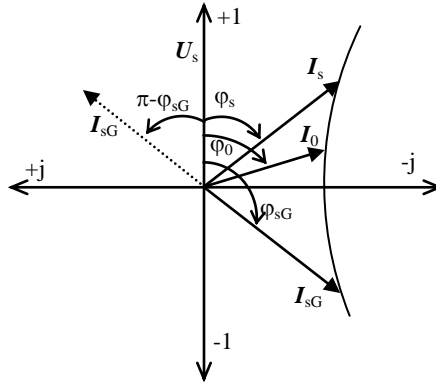
$$I_{sG} = \sqrt{3} \cdot 40,4 = 70 \text{ A}$$

$$\text{pri } \cos \varphi_{sG} = \frac{-32,8}{40,4} = 0,81 \text{ kap. char.}$$

Kapacitný charakter záťaže znamená, že na svorky indukčného generátora musí byť pripojený zdroj magnetizačnej energie, to znamená, sada kondenzátorov, alebo sieť, do ktorej magnetizačnú energiu dodávajú prebudené synchronne stroje (porovnaj s

podbudeným synchronným generátorom, ktorý tiež potrebuje magnetizačnú energiu zo siete).

Na ilustráciu je na obr. 4.5 znázornený fázorový diagram s naznačeným kruhovým diagramom.



Obr. 4.5 Fázorový diagram motorického a generátorického chodu s naznačeným kruhovým diagramom

Vnútrotný elektromagnetický moment indukčného generátora

$$M_{eG} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s_G} I_r'^2 = \frac{3}{157,1} \frac{0,4}{-0,0353} 37,19^2 = -299,4 \text{ Nm}$$

pôsobí proti hnaciemu momentu na hriadeľi a musí byť krytý mechanickým príkonom na hriadeľi, ktorý po konverzii na elektrickú energiu má hodnotu:

$$P_{\text{mec}} = (1 - s_G) P_\delta = (1 - s_G) M_{eG} \Omega_{\text{syn}} = (1 + 0,0353)(-299,4)157,1 = -48700,5 \text{ W}$$

Vstupný príkon P_{in} na hriadeľi kryje okrem P_{mec} aj mechanické straty $\Delta P_{\text{mec}} = 1000 \text{ W}$:

$$P_{\text{in}} = P_{\text{mec}} + \Delta P_{\text{mec}} = -48700,5 - 1000 = -49,7 \text{ kW}$$

Straty mechanické musia byť generátoru dodané rovnako ako mechanický príkon P_{mec} , preto majú tiež záporné znamienko. Na svorkách stroja výstupný elektrický výkon je:

$$P_{\text{out}} = \sqrt{3} U_s I_{sG} \cos \varphi_s = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 70 \cdot 0,81 = 43,217 \text{ kW}$$

a účinnosť generátora je:

$$\eta_G = \frac{43,217}{49,700} = 0,869$$

čo je presne toľko ako v motorickom chode, lebo straty má stroj tie isté.

Príklad 4.7

Trojfázový, do hviezdy zapojený IM, 147,2 kW, 3300 V, $R_s = R'_r = 0,8 \Omega$; $X_{gs} = X'_{gr} = 3,5 \Omega$ má mechanické straty 3 kW.

Vypočítajte:

- Sklz pri menovitej záťaži.
- Aký rotorový odpor je potrebný na to, aby sklz vzrástol trojnásobne pri tom istom momente?
- Aký satorový odpor je potrebný na to, aby sa dosiahol ten istý efekt a aké zníženie maximálneho momentu by nastalo?

Riešenie:

- Neznámou je sklz. Ten vystupuje vo výraze pre výkon vo vzduchovej medzere:

$$P_\delta = 3 \frac{R'_r}{s} \frac{U_{sf}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{gs} + X'_{gr})^2},$$

prítom výkon konvertovaný z elektrickej formy na mechanickú P_{mec} možno tiež vyjadriť pomocou sklzu:

$$P_{mec} = (1-s)P_\delta$$

Zároveň tento výkon dostaneme, ak k výkonu na hriadelí $P = 147,2$ kW pridáme mechanické straty:

$$P_{mec} = P + \Delta P_{mec}$$

Takže zostavíme rovnicu na základe ktorej vypočítame sklz:

$$P + \Delta P_{mec} = (1-s)P_\delta$$

$$P + \Delta P_{mec} = (1-s) \cdot 3 \frac{R'_r}{s} \frac{U_{sf}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{gs} + X'_{gr})^2}$$

$$147200 + 3000 = (1-s) \cdot 3 \frac{0,8}{s} \frac{(3300/\sqrt{3})^2}{\left(0,8 + \frac{0,8}{s}\right)^2 + (3,5 + 3,5)^2}$$

$$150,2 \cdot 10^3 = (1-s) \frac{8712 \cdot 10^3}{s \left(0,64 + \frac{1,28}{s} + \frac{0,64}{s^2} + 49\right)}$$

$$0,01724 \left(49,64 + \frac{1,28}{s} + \frac{0,64}{s^2}\right) = \frac{1}{s} - 1$$

$$1,855 + \frac{-0,978}{s} + \frac{0,011}{s^2} = 0$$

$$\frac{1}{s^2} - 88,91 \frac{1}{s} + 168,63 = 0$$

$$\frac{1}{s} = \frac{88,91 \pm \sqrt{88,91^2 - 4 \cdot 168,63}}{2}$$

$$\frac{1}{s} = 86,97$$

$$s = 0,0115$$

Skzlz pri menovitej záťaži je $s_N = 0,0115$.

Druhý koreň $s = 0,515$ je v nestabilnej oblasti, lebo je väčší ako sklz, pri ktorom je moment maximálny:

$$s_{M_{\max}} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{gs} + X'_{gr})^2}} = \frac{0,8}{\sqrt{0,8^2 + (3,5 + 3,5)^2}} = 0,113$$

b) Z výrazu pre moment

$$M_e = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s} \frac{U_{st}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{gs} + X'_{gr})^2}$$

vyplýva, že moment ostane konštantný vtedy, keď sú všetky ostatné parametre konštantné a pomer R'_r/s ostane nezmenený. Ak R'_r sa zmení úmerne so sklzom, pomer R'_r/s sa nezmení a moment ostane konštantný. Preto ak sa má sklz zvýšiť 3x, musí sa aj R'_r zvýšiť 3x, t. j. na $2,4 \Omega$, a teda prídavný odpor prepočítaný na stator, ktorý treba zaradiť do obvodu rotora je $2,4 - 0,8 = 1,6 \Omega$.

Maximálny moment sa zmenou R'_r nezmení, pretože R'_r vo výraze pre maximálny moment nevystupuje. Na trojnásobok sa však zvýši sklz, pri ktorom je moment maximálny: $s_{M_{\max}3R'} = 3 \cdot 0,1142 = 0,342$ (pozri obr.4.6).

c) Čo sa týka zvýšenia statorového odporu, hodnota momentu má ostať konštantná, t. j. výraz

$$M_e = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s} \frac{U_{\text{sf}}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s} \frac{U_{\text{sf}}^2}{Z^2}$$

má byť nezmenený, a pretože U_{sf} a R'_r majú ostať bez zmeny, potom aj hodnota $\frac{1}{Z^2 s}$ musí ostať rovnaká pre ten istý moment, čo napíšeme do rovnice takto (vľavo je nový stav, vpravo pôvodný stav):

$$\frac{1}{\left[\left(R_s + \frac{R'_r}{3s}\right)^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2\right] 3s} = \frac{1}{\left[\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2\right] s}$$

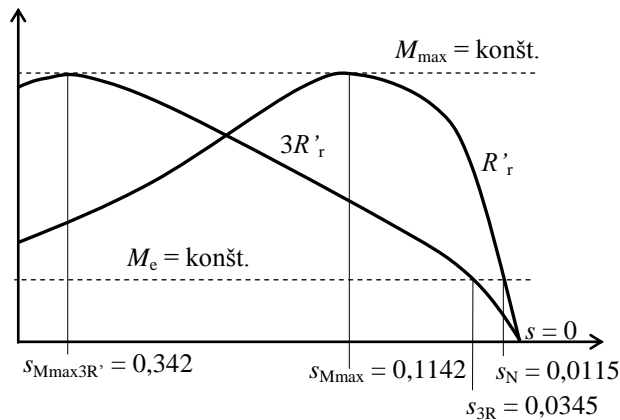
$$\frac{1}{\left[\left(R_s + \frac{0,8}{3 \cdot 0,0117}\right)^2 + (3,5 + 3,5)^2\right] 3 \cdot 0,0117} = \frac{1}{\left[\left(0,8 + \frac{0,8}{0,0117}\right)^2 + (3,5 + 3,5)^2\right] \cdot 0,0117}$$

$$\frac{1}{519,5 + 45,584R_s + R_s^2 + 49} = \frac{3}{4785,32 + 49}$$

Úpravou dostaneme kvadratickú rovnicu pre R_s :

$$R_s^2 + 45,58R_s - 1042,5 = 0$$

Kladná hodnota $R_s = 16,73 \Omega$, preto prídavný odpor, ktorý treba do obvodu statora zapojiť je $16,73 - 0,8 = 15,93 \Omega$.



Obr.4.6 Ilustračný obrázok k príkladu 4.7 (detail charakteristiky)

Teraz maximálny moment bude

$$M_{\max} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \cdot \frac{U_{\text{sf}}^2}{2 \left(R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2} \right)}$$

čo je úmerné

$$\frac{1}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}}$$

takže pomer maximálnych momentov v pôvodnom a terajšom stave je

$$\frac{0,8 + \sqrt{0,8^2 + 7^2}}{16,73 + \sqrt{16,73^2 + 7^2}} = \frac{7,845}{34,86} = 0,225$$

čo je redukcia o 77,5 % pôvodnej hodnoty.

Príklad 4.8

Trojfázový, 4-pólový, 3300 V, 50 Hz, do hviezdy zapojený asynchrónny motor má $Z_s = Z'_r = (3 + j9)\Omega$. Pomer počtu závitov (stator/rotor) je 3/1, rotorové vinutie je zapojené do trojuholníka a vyvedené na klzné krúžky.

Vypočítajte:

- Moment pri menovitej záťaži a sklze 5 %.
- Maximálny moment pri menovitej napätí a frekvencii a sklz pri ktorom ho dosiahne.
- Také zníženie napájacieho napätia, pri ktorom motor neprestane pracovať.
- Maximálny moment, ak napájacie napätie aj frekvencia klesnú na polovicu menovitej hodnoty.
- Zvýšenie odporu rotorového obvodu, pri ktorom sa pri menovitej frekvencii a napätí vyvinie maximálny moment pri zábere ($M_{\max} = M_{\text{zab}}$), keď je vinutie zapojené do hviezdy.

Riešenie:

Pri výpočte použijeme približnú náhradnú schému a zanedbáme priečnu vetvu.

- Menovitý moment sa vyvíja pri menovitej sklze:

$$M_{eN} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s_N} \frac{U_{sf}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2} =$$

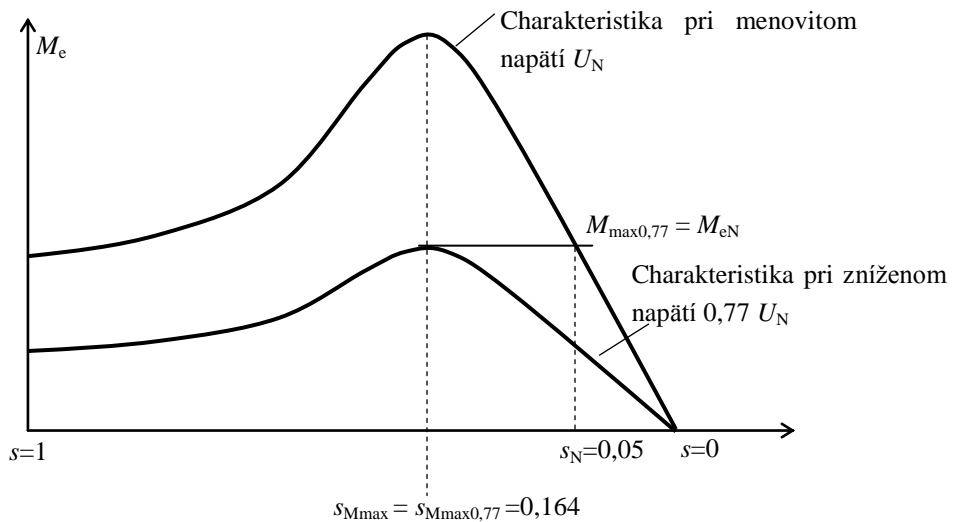
$$= \frac{3}{\frac{2\pi \cdot 50}{2}} \frac{3}{0,05} \frac{(3300/\sqrt{3})^2}{\left(3 + \frac{3}{0,05}\right)^2 + (9+9)^2} = 969 \text{ Nm}$$

b) Maximálny moment

$$M_{\text{max}} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \cdot \frac{U_{sf}^2}{2\left(R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}\right)} = \frac{3}{\frac{2\pi \cdot 50}{2}} \frac{(3300/\sqrt{3})^2}{2(3 + \sqrt{3^2 + 18^2})} = 1631 \text{ Nm}$$

Sklz, pri ktorom je moment maximálny je

$$s_{M\text{max}} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}} = \frac{3}{\sqrt{3^2 + (9+9)^2}} = 0,164$$



Obr.4.7 Ilustračný obrázok k príkladu 4.8, bodom a), b), c)

c) Ak sa napätie zníži na U' , moment nesmie klesnúť pod 969 Nm a táto hodnota bude pri U' momentom maximálnym. Pretože $M_e \approx U^2$, napíšeme pomer momentov a napätí:

$$\frac{969}{1631} = \left(\frac{U'}{U_N} \right)^2 \Rightarrow U' = \sqrt{\frac{969}{1631}} U_N = 0,77 U_N$$

to znamená, že môže nastať 23% zníženie napätia, inak povedané napätie môže klesnúť na 77% U_N .

d) Táto situácia by mohla nastať, keby rýchlosť synchronného generátora, ktorý motor napája, klesla na polovicu bez toho, aby sa budenie generátora zmenilo. Potom aj napätie aj frekvencia klesnú na polovicu. Aj frekvenčný menič môže dodať polovičné napätie s polovičnou frekvenciou.

Sú dva spôsoby, ako vypočítať M_{\max} pri polovičnom napätí a polovičnej frekvencii (index 1/2):

1. Vypočítame priamo M_{\max} podľa upraveného vzťahu (ako v bode b):

$$M_{\max 1/2} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}1/2}} \cdot 3 \cdot \frac{U_{\text{sf}1/2}^2}{2 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma 1/2})^2} \right]}$$

$$\text{kde } \Omega_{\text{syn}1/2} = \frac{2\pi f_s / 2}{2} = \frac{2\pi \cdot 50 / 2}{2}$$

$$U_{\text{sf}1/2} = \frac{3300 / \sqrt{3}}{2} = 1650 / \sqrt{3}$$

$$X_{\sigma 1/2} = \frac{2\pi f_s}{2} (L_s + L'_r) = \frac{X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}}}{2} = \frac{18}{2}$$

Potom

$$M_{\max 1/2} = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot 50 / 2}{2}} 3 \frac{(1650 / \sqrt{3})^2}{2 \left[3 + \sqrt{3^2 + \left(\frac{18}{2} \right)^2} \right]} = 1386 \text{ Nm}$$

Vidíme, že ak odpor statora berieme do úvahy, maximálny moment sa pri polovičnom napätí a frekvencii zníži.

Ak odpor statora zanedbáme, maximálny moment pri polovičnom napätí a frekvencii bude:

$$M_{\max 1/2} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}1/2}} 3 \frac{U_{\text{sf}1/2}^2}{2 X_{\sigma 1/2}} = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot 50 / 2}{2}} 3 \frac{(1650 / \sqrt{3})^2}{2 \cdot \frac{18}{2}} = 1925 \text{ Nm}$$

a pri plnom napätí a frekvencii:

$$M_{\max} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} 3 \frac{U_{\text{sf}}^2}{2X_{\sigma}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50/2} 3 \frac{(3300/\sqrt{3})^2}{2 \cdot 18} = 1925 \text{ Nm}$$

Vidíme, že ak možno odpor statora voči reaktancii zanedbať, maximálny moment sa pri úmernom znížení napätia a frekvencie nezmení.

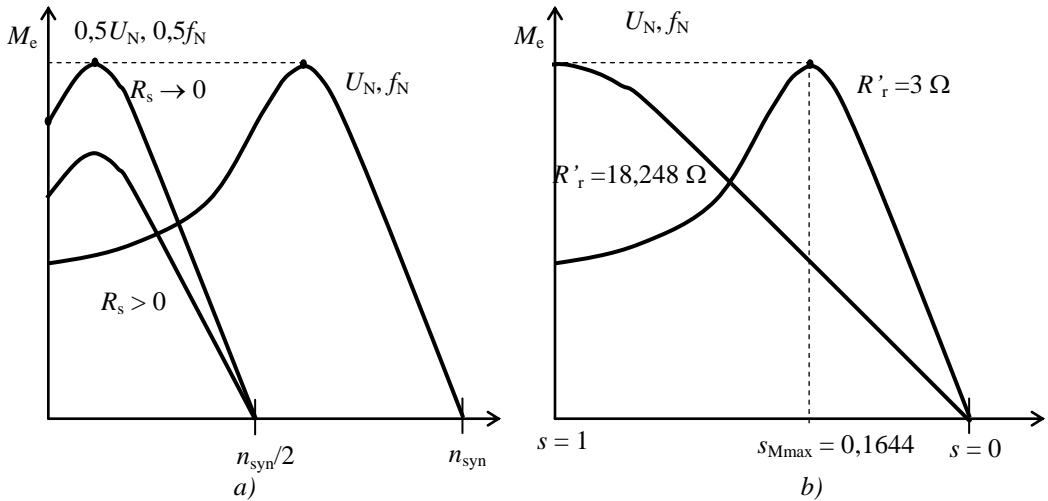
2. Druhá možnosť výpočtu maximálneho momentu je taká, že vypočítame sklz, pri ktorom je moment maximálny

$$s_{M_{\max 1/2}} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma 1/2})^2}} = \frac{3}{\sqrt{3^2 + (18/2)^2}} = 0,316$$

a dosadíme do vzťahu pre moment

$$\begin{aligned} M_{\max 1/2} &= \frac{3}{\Omega_{\text{syn}1/2}} \frac{R'_r}{s_{M_{\max 1/2}}} \frac{U_{\text{sf}1/2}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_{M_{\max 1/2}}}\right)^2 + (X_{\sigma 1/2})^2} = \\ &= \frac{3}{\frac{2\pi \cdot 50/2}{2}} \frac{3}{0,316} \frac{(3300/\sqrt{3}/2)^2}{\left(3 + \frac{3}{0,316}\right)^2 + \left(\frac{18}{2}\right)^2} = 1386 \text{ Nm} \end{aligned}$$

čo je tá istá hodnota, ako pri prvom spôsobe výpočtu.



Obr.4.8 Ilustračný obrázok k príkladu 4.8, a) k bodu d), b) k bodu e)

e) Ak je v obvode rotora len odpor $R'_r = 3 \Omega$, M_{\max} sa vyvíja pri

$$s_{M_{\max}} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}} = \frac{3}{\sqrt{3^2 + 18^2}} = 0,1644$$

Aby sa M_{\max} objavil pri $s_{\max} = 1$, treba do obvodu rotora zapojiť ďalší odpor R'_{rdod} a musí platiť rovnica

$$1 = \frac{R'_r + R'_{\text{rdod}}}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}} = \frac{3 + R'_{\text{rdod}}}{\sqrt{3^2 + 18^2}} = \frac{3 + R'_{\text{rdod}}}{18,248}$$

$$R'_{\text{rdod}} = 18,248 - 3 = 15,248 \Omega$$

Toto je požadovaný dodatočný odpor, ktorý treba pripojiť do obvodu kotvy, aby motor zaberol s maximálnym momentom, ale zatiaľ je prepočítaný na stranu statora. Skutočný odpor, ktorý treba zapojiť do obvodu kotvy rotora vypočítame pomocou zadaného prevodu

$$p = 3/1, R'_{\text{rdod}} = p^2 R_{\text{rdod}} \Rightarrow R_{\text{rdod}} = \frac{R'_{\text{rdod}}}{p^2} = \frac{15,248}{9} = 1,694 \Omega$$

Príklad 4.9

Trojfázový, 50 Hz, 440 V, 6-pólový, do trojuholníka zapojený asynchrónny motor má pri menovitej frekvencii tieto parametre náhradnej schémy: $R_s = 0,2 \Omega$, $R'_r = 0,18 \Omega$, $X_{\text{gs}} = X'_{\text{gr}} = 0,58 \Omega$.

- Počas prevádzky motora sa zníži napätie aj frekvencia o 40 %. Akú celkovú mechanickú záťaž na hriadeľ je motor schopný za týchto okolností zvládnuť bez toho, aby sa zastavil?
- Vypočítajte rýchlosť, pri ktorej motor dosiahne moment vypočítaný v a) ak pracuje pri menovitom napätí a frekvencii. Aký výkon dodáva v tomto pracovnom bode?
- Ak napätie aj frekvencia sú polovičné, ako sa zvýši záberový moment oproti stavu pri menovitých hodnotách?
- Ak je motor napájaný zo zdroja s premenlivým napätím a frekvenciou, vypočítajte požadované svorkové napätie a frekvenciu, aby vyvinul moment vypočítaný v a) pri zábere a pri rýchlosti 500 min^{-1} .
- Zopakujte výpočet ako v d) tak, že požiadavka je, aby motor vyvinul maximálny moment zodpovedajúci menovitému napätiu a frekvencii. V oboch prípadoch, d) aj e) platí, že magnetický tok je konštantný pre každý moment.

Riešenie:

a) Otázka vlastne znie, aký maximálny moment je schopný motor vyvinúť pri danom napätí a frekvencii. Použijeme vzťah pre maximálny moment s napätím a frekvenciou zníženou na 0,6 menovitej hodnoty (index 0,6) a s vhodnou úpravou parametrov, ktorú sme už aplikovali v predchádzajúcom príklade v bode d1) dostaneme:

$$M_{\max} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}0,6}} \frac{U_{0,6}^2}{2 \left(\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})_{0,6}^2} + R_s \right)} =$$

$$\frac{3}{\frac{2\pi \cdot 0,6 \cdot 50}{3}} \frac{(0,6 \cdot 440)^2}{2 \left(\sqrt{0,2^2 + (0,6 \cdot 1,16)^2} + 0,2 \right)} = 1800 \text{ Nm}$$

b) Sklz, pri ktorom motor vyvíja moment 1800 Nm ak je napájaný menovitým napätím U_N a frekvenciou f_N dostaneme zo vzťahu pre moment

$$M_e = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} \cdot 3 \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot \frac{U_{\text{stN}}^2}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}$$

$$\text{kde } \Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi f_N}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3}$$

$$1800 = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot 50}{3}} \cdot 3 \cdot \frac{0,18}{s} \cdot \frac{440^2}{\left(0,2 + \frac{0,18}{s} \right)^2 + 1,16^2}$$

Úpravou dostaneme kvadratickú rovnicu pre $1/s$:

$$1,803 \left(0,04 + \frac{0,072}{s} + \frac{0,0324}{s^2} + 1,3456 \right) = \frac{1}{s}$$

$$\frac{1}{s^2} - \frac{214,9}{s} + 42,77 = 0$$

Menšia hodnota koreňa $s = 0,0907$, čo zodpovedá rýchlosti $n = 1000(1-s) = 909 \text{ min}^{-1}$, je vzhľadom na mechanickú charakteristiku správna. Pri tejto rýchlosti a momente 1800 Nm je vyvíjaný výkon

$$P = M_e \Omega = 1800 \frac{2\pi \cdot 909}{60} = 171,3 \text{ kW}$$

Sklz, pri ktorom je moment maximálny pri menovitom napätí a frekvencii je

$$s_{M\max} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\text{gs}} + X'_{\text{gr}})^2}} = \frac{0,18}{\sqrt{0,2^2 + 1,16^2}} = 0,1529$$

a rýchlosť zodpovedajúca tomuto sklzu je

$$n_{M_{\max}} = n_{\text{syn}} (1 - s_{M_{\max}}) = 1000(1 - 0,1529) = 847 \text{ min}^{-1}.$$

c) Výraz pre moment záberový je

$$M_{\text{zab}} = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} 3 \frac{R'_r}{1} \frac{U_{\text{sf}}^2}{(R_s + \frac{R'_r}{1})^2 + (X_{\text{cs}} + X'_{\text{gr}})^2}$$

Máme dve možnosti výpočtu:

1. Vypočítať M_{zab} pre menovité hodnoty U_N a f_N , potom pre polovičné $U_N/2$ a $f_N/2$
2. Urobiť pomer výrazov pre M_{zab} , konštanty vykrátiť a dostaneme priamo požadované zvýšenie M_{zab} pri $U_N/2$ a $f_N/2$.

Tu uvedieme druhý spôsob výpočtu:

$$\frac{M_{\text{zab}1/2}}{M_{\text{zab}}} = \frac{1}{\frac{f_N/2}{f_N}} \frac{((U_N/2)/U_N)^2}{(0,38^2 + (1,16/2)^2)/(0,38^2 + 1,16^2)} = 2 \frac{0,25}{0,1478/1,497} = 1,55$$

M_{zab} pri $U_N/2$ a $f_N/2$ sa zvýši 1,55 krát oproti M_{zab} pri U_N a f_N .

d) a e) Zadania oboch týchto bodov sú spracované do tabuľky. Napájacie svorkové napätie podľa približnej náhradnej schémy (obr. 4.3a) je dané impedanciou obvodu a prúdom I'_r :

$$U = Z I'_r$$

pričom reaktančnú časť impedancie (reaktanciu) treba vypočítať s požadovanou napájacou frekvenciou f_s , ktorú určíme takto: Otáčky vyjadríme pomocou synchronnej rýchlosti a sklzu

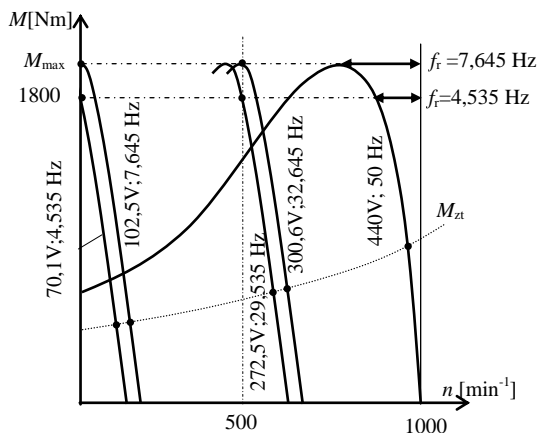
$$n = n_{\text{syn}} (1 - s) \Rightarrow n_{\text{syn}} = n + s n_{\text{syn}}$$

Všetky tri členy rozšírime o $p/60$:

$$\frac{n_{\text{syn}} p}{60} = \frac{n p}{60} + s \frac{n_{\text{syn}} p}{60}$$

čím dostaneme výraz, ktorým budeme počítať statorovú frekvenciu:

$$f_s = \frac{n p}{60} + s f_s = \frac{n p}{60} + f_r$$



Obr. 4.9 Charakteristika k príkladu 4.9 d, e

Ako je známe z teórie frekvenčnej zmeny rýchlosti asynchrónneho motora, ak sa udržiava konštantný magnetický tok, t. j. $U / f = \text{konšt.}$, určitý moment sa vyvinie vždy pri tej istej hodnote rotorovej frekvencie f_r a rotorového prúdu I_r' (pozri hodnoty f_r a I_r' v tabuľke):

	1800 Nm	M_{\max}	1800 Nm	M_{\max}
sklz pri 50Hz	0,0907	0,1529	0,0907	0,1529
	záber	$n = 0$		$n = 500$ min^{-1}
$f_r = s \cdot 50$	4,535	7,645	4,535	7,645
$f_s = \frac{n p}{60} + f_r$	4,535	7,645	29,535	32,645
$I_r' = \frac{440}{\sqrt{(0,2 + 0,18/s)^2 + 1,16^2}}$	177,9	244,4	177,9	244,4
skutočný $s_{\text{sk}} = f_r / f_s$	1	1	0,1536	0,234
R_r' / s_{sk}	0,18	0,18	1,172	0,7692
$X = 1,16 f_s / 50$	0,1052	0,177	0,6812	0,757
$Z = \sqrt{(0,2 + R_r' / s_{\text{sk}})^2 + X^2}$	0,3943	0,4192	1,532	1,23
$U_s = Z I_r'$	70,1	102,5	272,5	300,6

Vypočítané hodnoty sú použité na obr. 4.6 na znázornenie charakteristík pre jednotlivé frekvencie a napätia.

Príklad 4.10

3-fázový, 6-pólový, 50 Hz, 400 V, do hviezdy zapojený asynchrónny motor s dvojitou kľetkou má tieto parametre náhradnej schémy pri zabrzdennom rotore:

$$\mathbf{Z}_s = 0,1 + j0,4 \ \Omega, \ \mathbf{Z}'_{rvon} = 0,3 + j0,4 \ \Omega, \ \mathbf{Z}'_{rvn} = 0,1 + j1,2 \ \Omega$$

Vyjadrite pomocou svorkového napätia moment pri 980 min^{-1} a záberový moment M_{zab} :

a) pri zanedbaní vonkajšej kľetky \mathbf{Z}'_{rvon} , t.j. uvažujeme len \mathbf{Z}'_{rvn}

b) s uvažovaním vonkajšej kľetky \mathbf{Z}'_{rvon}

Náhradná schéma je na obr. 4.7.

Riešenie:

Pre 6-pólový, 50 Hz asynchrónny motor je $n_{syn} = 1000 \text{ min}^{-1}$ a pre rýchlosť 980 min^{-1} je sklz

$$s = \frac{1000 - 980}{1000} = 0,02$$

a) Ak zanedbáme vonkajšiu kľetku, tak uvažujeme len \mathbf{Z}_s a \mathbf{Z}'_{rvn} ako v prípade asynchrónneho motora s jednoduchou kľetkou. Celková impedancia pri sklze 0,02 je

$$\mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}'_{rvn} = 0,1 + j0,4 + \frac{0,1}{0,02} + j1,2 = 5,1 + j1,6 = 5,345 \ \Omega$$

Moment pri sklze 0,02 je

$$M_e = \frac{1}{2\pi \cdot 50} 3 \frac{0,1}{0,02} \frac{(U / \sqrt{3})^2}{5,345^2} = 0,00167 U^2 = 267,4 \text{ Nm}$$

Celková impedancia pre $s = 1$

$$\mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}'_{rvn} = 0,1 + j0,4 + 0,1 + j1,2 = 0,2 + j1,6 = 1,615 \ \Omega$$

$$M_{zab} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} 3 \frac{0,1}{1} \frac{(U / \sqrt{3})^2}{1,615^2} = 0,000367 U^2 = 58,72 \text{ Nm}$$

b) S uvažovaním vonkajšej kľetky:

Treba vypočítať celkovú impedanciu rotora

$$\frac{1}{Z'_r} = \frac{1}{\frac{R'_{rvon}}{s} + jX'_{\sigma r von}} + \frac{1}{\frac{R'_{rvn}}{s} + jX'_{\sigma r vn}} = \frac{1}{\frac{0,1}{0,02} + j1,2} + \frac{1}{\frac{0,3}{0,02} + j0,4}$$

$$Z'_r = \frac{1}{0,1891 - j0,04539 + 0,06661 - j0,00178} = 3,78 + j0,698 = \frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r} \Omega$$

Pridaním $Z_s = 0,1 + j0,4 \Omega$ je celková vstupná impedancia

$$Z_{in} = 3,88 + j1,098 = 4,032 \Omega$$

Moment dostaneme z činného výkonu vo vzduchovej medzere, ktorý je úmerný

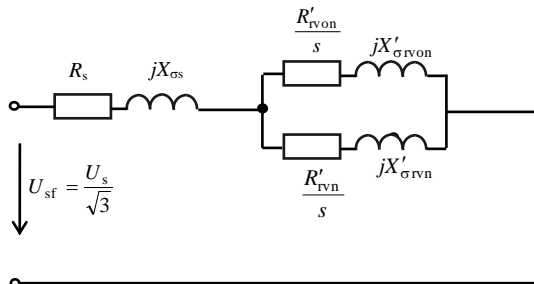
$$R_{ef} I^2 = R_{ef} \left(\frac{U_{sf}}{Z} \right)^2$$

kde R_{ef} je reálna časť celkovej impedancie rotorovej dvojitej kľetky pri danom sklze, pričom vonkajšia a vnútorná kľetka sa považujú za paralelne zapojené (pozri výpočet Z'_r) a zodpovedá výrazu R'_r/s v jednoduchej kľetke.

Moment pri sklze 0,02:

$$M_e = \frac{3}{2\pi \cdot 50} 3,78 \frac{(U/\sqrt{3})^2}{4,032^2} = 0,00222 U^2 = 355,2 \text{ Nm}$$

kde hodnota 3,78 reprezentuje výslednú hodnotu činného odporu oboch kľetok pri sklze 0,02. Z výsledku vidíme, že moment pri sklze 0,02 s dvojitou kľetkou vzrástol 1,329-krát.



Obr. 4.10 Náhradná schéma asynchrónneho motora s dvojitou kľetkou k príkladu 4.10

Na výpočet M_{zab} opäť potrebujeme Z'_r pri $s=1$

$$\frac{1}{Z'_r} = \frac{1}{0,1 + j1,2} + \frac{1}{0,3 + j0,4}$$

$$\mathbf{Z}'_r = 0,169 + j0,324 \ \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{in} = \mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}'_r = 0,1 + j0,4 + 0,169 + j0,324 = 0,269 + j0,724 = 0,77 \ \Omega$$

Potom

$$M_{zab} = \frac{3}{2\pi \cdot 50} 0,169 \frac{(U / \sqrt{3})^2}{0,772^2} = 0,00271 U^2 = 433,6 \text{ Nm}$$

Z výsledkov vidíme, že zatiaľ čo pri sklze 0,02 sa uvažovaním vonkajšej kľetky moment zvýšil len 1,33-krát, záberový moment sa zvýšil 7,38 krát. Tým je vysvetlený účinok vonkajšej, resp. dvojitej kľetky pri zábere a pri normálnom chode.

Príklad 4.11

Trojfázový, 440 V, do trojuholníka zapojený asynchrónny motor s dvojitou kľetkou má tieto parametre statorovej a rotorovej impedancie, vonkajšej a vnútornej kľetky:

$$\mathbf{Z}_s = 1 + j3 \ \Omega; \ \mathbf{Z}'_{rvon} = 3 + j1 \ \Omega; \ \mathbf{Z}'_{rvn} = 0,6 + j5 \ \Omega$$

Vypočítajte:

- záberový moment,
- moment pri sklze 4 %.

Magnetizačnú priečnu vetvu pripojte na primárne svorky motora, t. j. použite približnú náhradnú schému.

Riešenie:

a) Rotorová impedancia pri zábere, keď $s=1$ je

$$\frac{1}{\mathbf{Z}'_r} = \frac{1}{\mathbf{Z}'_{rvon}} + \frac{1}{\mathbf{Z}'_{rvn}} = \frac{1}{3 + j1} + \frac{1}{0,6 + j5} \Rightarrow \mathbf{Z}'_r = 1,68 + j1,538 = R_{ef} + jX_{ef}$$

Celková vstupná impedancia podľa približnej náhradnej schémy:

$$\mathbf{Z}_{in} = \mathbf{Z}_s + \mathbf{Z}'_r = 1 + j3 + 1,68 + j1,538 = 2,68 + j4,538 \ \Omega$$

Kvadrát prúdu vo vinutí jednej fázy

$$I_r^2 = \frac{U_{sf}^2}{Z_{in}^2} = \frac{440^2}{2,68^2 + 4,538^2} = 6960 \text{ A}^2$$

M_{zab} bude úmerný výkonu vo vzduchovej medzere:

$$M_{zab} \approx P_\delta = 3R_{ef}I_r^2 = 3 \cdot 1,68 \cdot 6960 = 35 \text{ kW}$$

Na presný výpočet M_{zab} musí byť zadaná frekvencia a počet pólov asynchrónneho motora.

b) Teraz vypočítame moment pri sklze 4 %. Výpočet urobíme s uvažovaním celej impedancie vonkajšej kľietky podľa príkladu 4.10.

$$\frac{1}{Z'_r} = \frac{1}{\frac{R'_{rvon}}{s} + jX'_{\sigma rvon}} + \frac{1}{\frac{R'_{rvn}}{s} + jX'_{\sigma rvn}} = \frac{1}{\frac{3}{0,04} + j1} + \frac{1}{\frac{0,6}{0,04} + j5} = \frac{1}{75 + j1} + \frac{1}{15 + j5}$$

$$Z'_r = 12,7 + j3,46 = R_{ef} + jX_{ef} \quad \Omega$$

Pridaním $Z_s = 1 + j3 \quad \Omega$ je celková vstupná impedancia

Vstupná impedancia

$$Z_{in} = Z_s + Z'_r = 1 + j3 + 12,7 + j3,46 = 13,7 + j6,46 \quad \Omega$$

Moment pri sklze 4 % bude úmerný výkonu vo vzduchovej medzere pri sklze 4 %:

$$M_e \approx P_\delta = 3 \cdot 12,7 \frac{440^2}{13,7^2 + 6,46^2} = 32,15 \text{ kW}$$

Význam R_{ef} bol vysvetlený v príklade 4.10.

Príklad 4.12

Trojfázový asynchrónny motor, ktorého náhradná schéma je na obr. 4.4 pracuje v stave naprázdno, keď sa poistka v jednej fáze preruší a motor ďalej pokračuje v prevádzke s dvojfázovým napájaním (v skutočnosti je to jednofázové napájanie, pretože predpokladáme, že nulový vodič nie je zapojený). Vypočítajte moment tohto motora, keď je zaťažený tak, že pracuje so sklzom 3 %. Urobte porovnanie s 3-fázovým napájaním motora. Použite hodnoty prvkov, aj napätia a spôsobu zapojenia z príkladu 4.4 a približnú náhradnú schému na obr. 4.11b.

Riešenie:

Pri použití približnej náhradnej schémy podľa obr.4.11 zanedbáme priečnu magnetizačnú vetvu a všetky ostatné prvky sú v sérii. Treba si uvedomiť, že ak 3-fázový IM zapojený do Y pracuje v 1-fázovom režime, dve fázy vinutia sú zapojené do série, čo sa premietne do hodnôt parametrov náhradnej schémy:

Impedancia pre jednu fázu 3-fázového asynchrónneho motora:

$$Z_{1f} = 0,1 + j0,5 + j0,5 + \frac{0,1}{s} = \left(0,1 + \frac{0,1}{s} \right) + j1 \quad \Omega$$

a pre 1-fázový režim (obr.4.11b):

$$0,2 + j1 + j1 + \frac{0,1}{s} + \frac{0,1}{2-s} = \left(0,2 + \frac{0,1}{s} + \frac{0,1}{2-s}\right) + j2$$

Prúd pre 3-fázový režim pre $s = 0,03$ je

$$I'_r = \frac{440/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(0,1 + \frac{0,1}{s}\right)^2 + 1^2}} = 71 \text{ A}$$

ako je to aj v tabuľke v príklade 4.5 v stĺpci približnej náhradnej schémy, kde je aj moment pre 3-fázový motor: 641,8 Nm.

Pre 1-fázový režim pre $s = 0,03$ je prúd

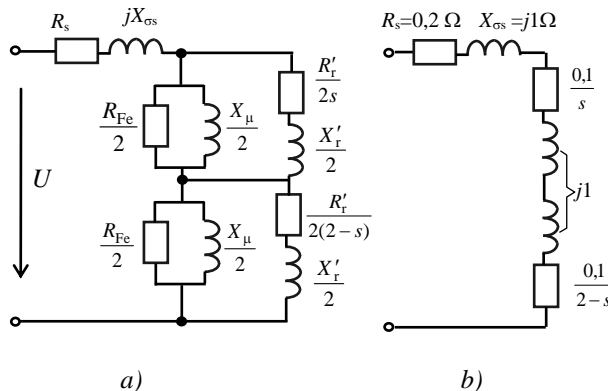
$$I'_r = \frac{440}{\sqrt{\left[0,2 + \frac{0,1}{s} + \frac{0,1}{(2-s)}\right]^2 + 2^2}} = 107,2 \text{ A}$$

Moment pri $s = 0,03$ v 1-fázovom režime vypočítaný na princípe dvoch proti sebe sa točiacich polí je

$$M_c = \frac{1}{\Omega_{\text{syn}}} I'_r{}^2 \left(\frac{R'_r}{s} - \frac{R'_r}{2-s} \right) = \frac{1}{78,54} 107,2^2 \left(\frac{0,1}{0,03} - \frac{0,1}{2-0,03} \right) = 480 \text{ Nm}$$

kde $\Omega_{\text{syn}} = 78,54 \text{ rad/s}$ je vypočítaný v príklade 4.5.

Z porovnania hodnôt v 3-fázovom a 1-fázovom režime vidno, že prúd sa zvýši o 50 % a moment klesne na 75 %, ak 3-fázový motor pracuje ako 1-fázový.



Obr. 4.11 Náhradná schéma jednofázového motora a) presná náhradná schéma jednej fázy motora, b) približná náhradná schéma dvoch fáz v sérii

Príklad 4.13

Je daný trojfázový asynchrónny motor s jednoduchou kľetkou: menovitý výkon $P_N = 7,5$ kW, počet pólov $2p = 4$, menovitý sklz $s_N = 6$ %, napätie $U_N = 380$ V pri zapojení svorkovnice Y, preťažiteľnosť $M_{\max}/M_N = 3,3$, a frekvencia $f = 50$ Hz. Činný odpor satorového vinutia R_s a mechanické straty zanedbajte. Pri výpočte uvažujte zjednodušenú náhradnú schému.

1. Vypočítajte menovité otáčky n_N , menovitý moment na hriadelí M_N , maximálny moment M_{\max} .
2. Pri akom sklze a otáčkach vyvinie tento motor M_{\max} ? Nakreslite charakteristiku $M = f(s, n)$ a vyznačte príslušné vypočítané body.
3. Vypočítajte celkovú rozptylovú reaktanciu X_σ , odpor rotorového vinutia prepočítaný na sator R'_r , menovitý prúd rotora prepočítaný na sator I'_{rN} , záberový prúd rotora prepočítaný na sator I'_{zabN} a záberový moment pri menovitom napätí M_{zabN} . Nakreslite charakteristiku $I'_r = f(s, n)$ a vyznačte príslušné body.
4. Vypočítajte otáčky n' , pri ktorých motor vyvinie menovitý moment M_N , ak napätie klesne o 15 %, vypočítajte výkon, ktorý motor v tomto stave dodáva na hriadelí a ďalej vypočítajte $M_{zab0,85}$, $M_{\max0,85}$, $I_{zab0,85}$ a $I'_{r0,85}$. Nakreslite príslušné charakteristiky a vyznačte vypočítané body.
5. Vypočítajte moment M' , ktorý motor vyvinie pri zníženom napätí U' , ak sklz ostane nezmenený, t. j. menovitý a vypočítajte výkon v tomto stave a prúd I'_r . Nakreslite príslušné charakteristiky a vyznačte vypočítané body.
6. Ako sa zmení hodnota momentu zvratu M_{\max} , ak napätie U' aj frekvencia f' klesnú na polovicu svojej menovitej hodnoty? Vypočítajte n'_{syn} pri f' . Nakreslite príslušné charakteristiky $M = f(s, n)$.
7. Pri akom sklze a otáčkach vyvinie motor M_{\max} pri hodnotách U' a f' z bodu 6? Porovnajzte rozdiel medzi synchronnými otáčkami a otáčkami, pri ktorom dosiahne motor maximálny moment pre menovité napätie a pre znížené napätie. Vyznačte príslušné body do charakteristiky z bodu 6.
8. Vypočítajte záberový moment a prúd pri U' a f' , porovnajzte ich s hodnotami pri U_N a f_N a nakreslite príslušné body do charakteristiky z bodu 6.
9. Vypočítajte s' a I'_r pri záťaži M_N , ak je daný motor napájaný polovičným napätím U' s frekvenciou f' a porovnajzte ho s hodnotou pri U_N a f_N (bod 3) a nakreslite príslušnú charakteristiku.
10. Uvažujte, že daný motor má dvojitú kľetku. Impedancie sú dané takto: $R'_r = R'_{rvn}$, $X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = X'_{\sigma rvn}$, $R'_{rvon} = 3R'_{rvn}$, $X'_{\sigma rvon} = 0,3X'_{\sigma rvn}$, $Z_s = jX_{\sigma s}$, $Z'_{vn} = R'_{rvn} + jX'_{\sigma rvn}$, $Z'_{von} = R'_{rvon} + jX'_{\sigma rvon}$. a) Nakreslite náhradnú schému asynchrónneho motora s dvojitou schémou, b) vypočítajte, aký je M_{zab} motora s dvojitou kľetkou a porovnajzte ho s M_{zabN} motora s jednoduchou kľetkou (bod 3).

11. V generátorickom chode s tou istou hodnotou sklzu s_N vypočítajte I'_{IGN} , M_{eGN} . Nakreslite príslušný fázorový diagram.

Riešenie:

1.

Pre výpočet menovitých otáčok n_N , potrebujeme vypočítať najskôr synchronne otáčky n_{syn} :

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

Potom menovité otáčky sú:

$$n_N = n_{\text{syn}}(1 - s_N) = 1500(1 - 0,06) = 1410 \text{ min}^{-1}$$

Pre výpočet menovitého momentu na hriadeli potrebujeme poznať okrem menovitého výkonu, ktorý je zadaný aj menovitú uhlovú rýchlosť:

$$\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi \cdot 1410}{60} = 147,65 \text{ rad/s}.$$

Potom menovitý moment na hriadeli je

$$M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{7500}{147,65} = 50,79 \text{ Nm}.$$

Maximálny moment môžeme vypočítať na základe danej preťažiteľnosti M_{max}/M_N :

$$M_{\text{max}} = 3,3M_N = 167,6 \cong 168 \text{ Nm}.$$

2.

Pre výpočet sklzu, pri ktorom dosahuje motor maximálny moment môžeme využiť Klossov vzťah, pretože poznáme pomer M_{max}/M_N a mechanické straty sú zanedbané. Za s dosadíme menovitý sklz.

$$\frac{M_{\text{eN}}}{M_{\text{e max}}} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_{\text{max}}} + \frac{s_{\text{max}}}{s_N}} \Rightarrow \frac{1}{3,3} = \frac{2}{\frac{0,06}{s_{\text{max}}} + \frac{s_{\text{max}}}{0,06}}.$$

Úpravou dostaneme kvadratickú rovnicu

$$M_{\text{eN}}s_{\text{max}}^2 - 2s_N M_{\text{max}} s_{\text{max}} + M_{\text{eN}}s_N^2 = 0$$

a po dosadení a úprave dostaneme

$$s_{\text{max}}^2 - 0,396s_{\text{max}} + 0,0036 = 0.$$

Riešením tejto kvadratickej rovnice sú dva korene

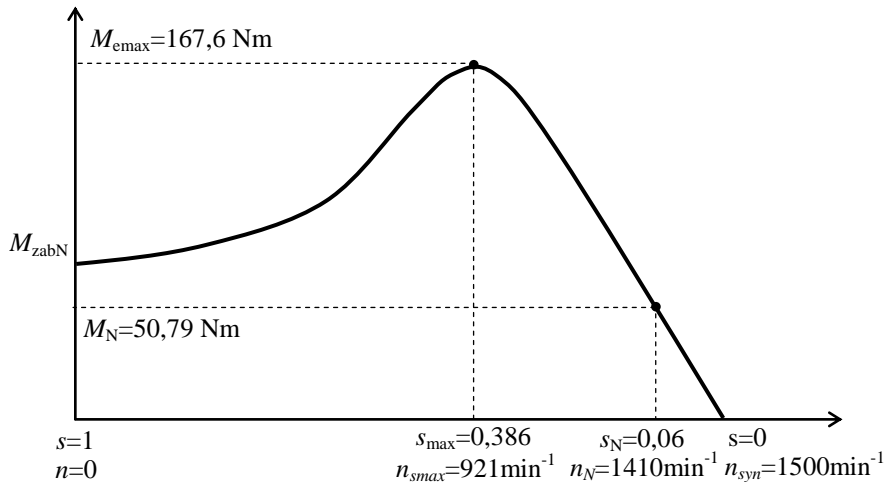
$$s_{\max 1} = 0,0095 \text{ a } s_{\max 2} = 0,386.$$

Pretože podľa mechanickej charakteristiky asynchrónneho motora je sklz, ktorý zodpovedá maximálnemu momentu väčší ako menovitý sklz za správnu hodnotu považujeme $s_{\max 2}$.

Otáčky, ktoré vyvinie pri tomto sklze sú

$$n_{s \max} = n_{\text{syn}}(1 - s_{\max}) = 1500(1 - 0,386) = 921 \text{ min}^{-1}.$$

Príslušné body zo zadania, ktoré treba vyznačiť na charakteristike $M = f(s, n)$ sú uvedené na obr.4.12



Obr.4.12 Charakteristika $M = f(s, n)$ s vyznačením príslušných bodov

3.

Celkovú rozptylovú indukčnosť môžeme vypočítať zo vzťahu pre maximálny moment

$$M_{e \max} = \frac{3}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{U_f^2}{2 \left[R_s + \sqrt{R_s^2 + X_\sigma^2} \right]}$$

Pretože v zadaní je napísané, že odpor R_s zanedbávame, tak celkovú rozptylovú reaktanciu vypočítame z upraveného vzťahu

$$M_{e \max} = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{U_{\text{sf}}^2}{2X_\sigma} \Rightarrow X_\sigma = \frac{3U_{\text{sf}}^2}{\Omega_{\text{syn}} 2M_{e \max}} = \frac{3 \cdot 220^2}{\frac{2\pi 1500}{60} \cdot 2 \cdot 167,6} = 2,75 \Omega$$

Odpor rotora prepočítaný na stator R_r' môžeme vypočítať zo vzťahu pre s_{\max} ak $R_s=0$

$$s_{\max} = \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + X_\sigma^2}} \Rightarrow \frac{R'_r}{X_\sigma} \Rightarrow R'_r = s_{\max} X_\sigma = 0,386 \cdot 2,75 = 1,06 \Omega.$$

Menovitý prúd rotora prepočítaný na stator vypočítame pre menovité fázové napätie:

$$I'_{rN} = \frac{U_{sfn}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{U_{sfn}}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0 + \frac{1,06}{0,06}\right)^2 + 2,75^2}} = 12,3 \text{ A}.$$

Záberový prúd rotora prepočítaný na stator I'_{rzabN} môžeme vypočítať z predchádzajúceho vzťahu, ak za sklz pri zábere dosadíme hodnotu $s=1$:

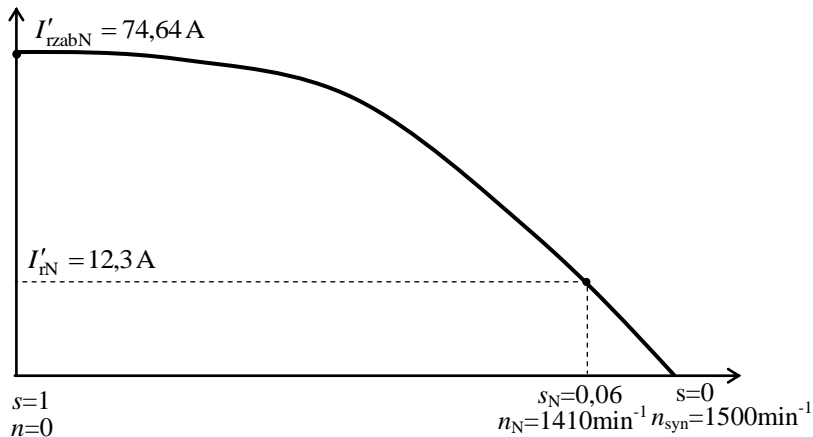
$$I'_{rzabN} = \frac{U_{sfn}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{220}{\sqrt{\left(0 + \frac{1,06}{1}\right)^2 + 2,75^2}} = 74,64 \text{ A}.$$

Menovitý záberový moment motora M_{zabN} pri menovitom napätí vypočítame zo vzťahu pre elektromagnetický moment, ak za sklz dosadíme hodnotu $s = 1$:

$$M_{zabN} = \frac{m}{\Omega_{syn}} \frac{R'_r}{s} I_{rzabN}^2 = \frac{3}{157,07} \frac{1,06}{1} 74,64^2 \cong 113 \text{ Nm}.$$

Záberový moment pre menovité napätie je uvedený na obr.4.12.

Charakteristika prúdu rotora prepočítaného na stator $I'_r = f(s, n)$ s vyznačením príslušných bodov je na obr.4.13.



Obr.4.13 Charakteristika prúdu rotora prepočítaného na stator $I'_r = f(s, n)$ s vyznačením príslušných bodov

4.

V tomto bode je potrebné vypočítať otáčky n' a výkon, ktorý motor bude dodávať na hriadeľ, ak svorkové napätie poklesne o 15 % a motor bude zaťažený menovitým momentom M_N . Pri výpočte budeme vychádzať zo vzťahu pre elektromagnetický moment, z ktorého si vyjadríme sklz s' , ktorý bude zodpovedať otáčkam n' (parametre označené čiarokou ' tu, aj v ďalších bodoch, znamenajú nový stav oproti menovitému a s prepočtom veličín na stator nemajú nič spoločné):

$$M_e = M_N = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s'} \frac{(0,85U_{\text{sfN}})^2}{\left(\frac{R'_r}{s'}\right)^2 + X_\sigma^2} \Rightarrow 50,79 = \frac{3}{157,07} \frac{1,06}{s'} \frac{(0,85 \cdot 220)^2}{\left(\frac{1,06}{s'}\right)^2 + 2,75^2}.$$

Uvedená rovnica vedie na kvadratickú rovnicu, z ktorej vypočítame dva sklzy:

$$s'^2 - 1,843s' + 0,1485 = 0 \Rightarrow s'_1 = 0,0846 \text{ a } s'_2 = 1,76$$

Vidíme, že správny je sklz s'_1 , lebo druhý koreň zodpovedá oblasti brzdy, preto pre tento sklz vypočítame požadované otáčky a výkon na hriadeľi.

$$n' = n_{\text{syn}}(1 - s') = 1500(1 - 0,0846) = 1373 \text{ min}^{-1},$$

$$P' = M_N \Omega' = M_N \frac{2\pi n'}{60} = 50,79 \frac{2\pi 1373}{60} = 7334 \text{ W}.$$

Záberový rotorový prúd prepočítaný na stator pre dané napätie vypočítame takto:

$$I'_{\text{r zab } 0,85} = \frac{0,85U_{\text{sfN}}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{0,85 \cdot 220}{\sqrt{\left(0 + \frac{1,06}{1}\right)^2 + 2,75^2}} = 63,45 \text{ A}.$$

Potom záberový moment je:

$$M_{\text{zab } 0,85} = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{s} I_{\text{r zab } 0,85}^2 = \frac{3}{157,07} \frac{1,06}{1} 63,45^2 \cong 81,5 \text{ Nm}.$$

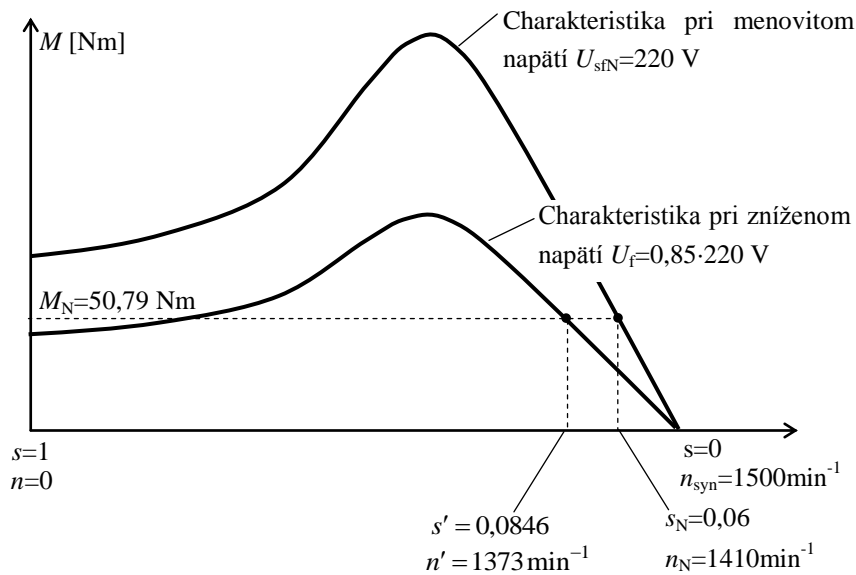
Ďalej vypočítame maximálny moment

$$M_{e \text{ max } 0,85} = \frac{m}{\Omega_{\text{syn}}} \frac{(0,85U_{\text{sf}})^2}{2X_\sigma} = \frac{3}{157,07} \frac{(0,85 \cdot 220)^2}{2 \cdot 2,75} = 121 \text{ Nm}.$$

Pre výpočet rotorového prúdu prepočítaného na stator pri danom sklze a pri zníženom napätí použijeme už vypočítaný sklz, ktorý zodpovedá tejto situácii:

$$I'_{r0,85} = \frac{0,85U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s'}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{0,85 \cdot 220}{\sqrt{\left(0 + \frac{1,06}{0,0846}\right)^2 + 2,75^2}} = 14,56 \text{ A}$$

Príslušné charakteristiky a vypočítané body sú uvedené na obr.4.14.



Obr.4.14 Porovnanie charakteristík $M = f(s, n)$ pre menovité napätie a napätie znížené o 15 % s vyznačením príslušných bodov

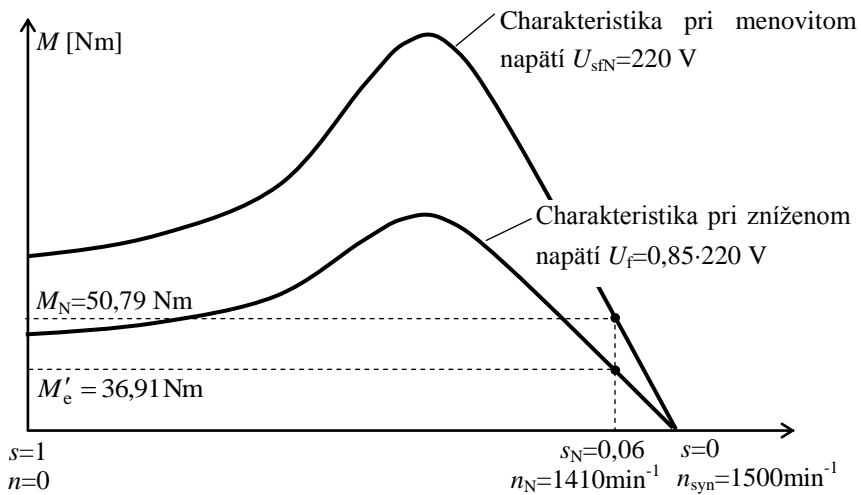
5.

V tomto bode je potrebné vypočítať veľkosť momentu M' , ktorý motor vyvinie pri zníženom napätí o 15 % a sklz ostane menovitý s_N . Pri výpočte budeme vychádzať zo vzťahu pre elektromagnetický moment:

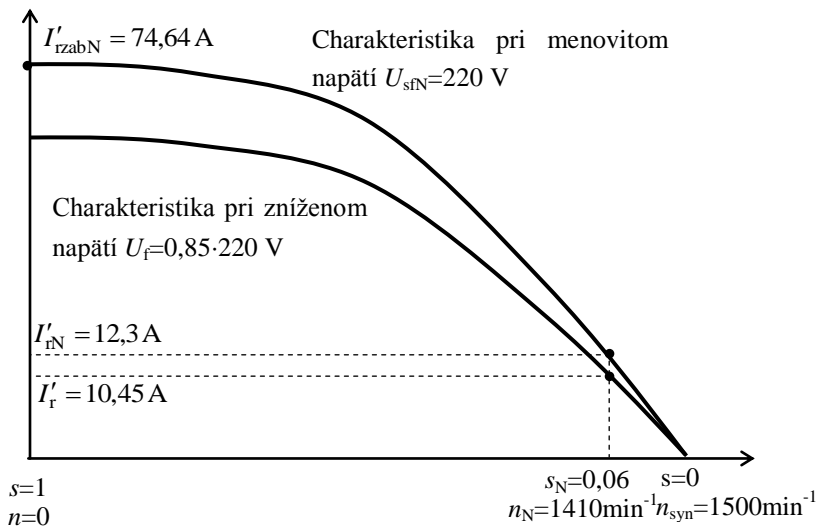
$$M'_e = \frac{m R'_r (0,85U_{sN})^2}{\Omega_{syn} s_N \left(\frac{R'_r}{s_N}\right)^2 + X_\sigma^2} = \frac{3 \cdot 1,06 \cdot (0,85 \cdot 220)^2}{157,07 \cdot 0,06 \left(\frac{1,06}{0,06}\right)^2 + 2,75^2} = 36,91 \text{ Nm} .$$

Výkon v tomto stave, ak zanedbáme moment strát bude:

$$P' = M' \Omega_N = 36,91 \cdot 147,65 = 5450 \text{ W} .$$



a)



b)

Obr.4.15 Porovnanie charakteristík pre menovité a znížené napätie, ak sklz ostane nezmenený, t. j. menovitý a) $M = f(s, n)$, b) $I'_r = f(s, n)$

Prúd I_r' pre tento stav vypočítame ako:

$$I_r' = \frac{0,85U_{sN}}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s_N}\right)^2 + X_\sigma^2}} = \frac{0,85220}{\sqrt{\left(\frac{1,06}{0,06}\right)^2 + 2,75^2}} = 10,45 \text{ A .}$$

Príslušné charakteristiky pre moment a prúd sú zobrazené na obr.4.15.

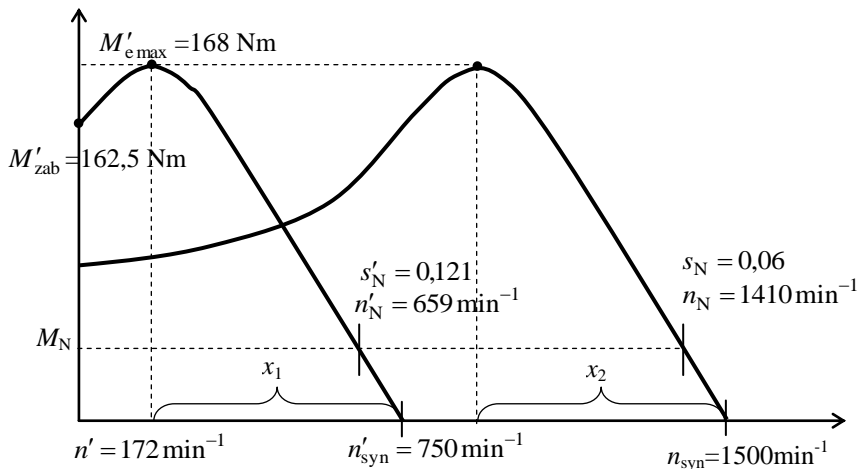
6

V tomto bode je potrebné vypočítať hodnotu momentu zvratu $M'_{e\max}$ ak napätie aj frekvencia klesnú na polovicu svojej hodnoty, t. j.:

$$U_f' = \frac{U_{fsN}}{2} = \frac{220}{2} = 110 \text{ V} \quad f' = \frac{f_N}{2} = \frac{50}{2} = 25 \text{ Hz}$$

Pre polovičnú frekvenciu sa zmenia aj synchronne otáčky:

$$n'_{\text{syn}} = \frac{60f'}{p} = \frac{60 \cdot 25}{2} = 750 \text{ min}^{-1}$$



Obr.4.16 Charakteristiky $M = f(n)$ pre menovitú synchronnú rýchlosť a pre polovičnú rýchlosť.

Pretože sa zmení frekvencia, tak sa zmení aj rozptylová reaktancia, ktorá je závislá od frekvencie. Takže keď klesne frekvencia na polovicu, tak sa zníži aj rozptylová reaktancia na polovicu. Po dosadení do vzťahu pre maximálny moment, vypočítame hodnotu momentu zvratu takto:

$$M'_{e\max} = \frac{3}{\Omega'_{\text{syn}}} \frac{\left(\frac{U_{f\text{sN}}}{2}\right)^2}{2 \frac{X_{\sigma}}{2}} = \frac{3}{78,53} \frac{(110)^2}{2,75} = 168 \text{ Nm}$$

Z uvedeného výpočtu vidíme, že pokiaľ zostane pomer napätia a frekvencie rovnaký a R_s možno zanedbať, tak maximálny moment sa nezmení, čím sme potvrdili známy teoretický predpoklad. Príslušné charakteristiky $M = f(n)$ sú uvedené na obr.4.16.

7.

Pri polovičnom napätí a frekvencii môžeme hodnotu sklzu, pri ktorom dosiahne maximálny moment vypočítať takto.

$$s'_{\max} = \frac{R'_r}{\frac{X_{\sigma}}{2}} = \frac{1,06}{2,75} = 0,77.$$

Tomuto sklzu zodpovedajú otáčky

$$n' = n'_{\text{syn}}(1 - s'_{\max}) = 750(1 - 0,77) = 172 \text{ min}^{-1}.$$

Vypočítajme rozdiel medzi synchronnými otáčkami a otáčkami, pri ktorom motor dosahuje maximálny moment pri polovičnom napätí a frekvencii:

$$x_1 = n'_{\text{syn}} - n' = 750 - 172 = 578 \text{ min}^{-1}.$$

Urobme ten istý výpočet aj pre menovité napätie a frekvenciu (pozri bod 2):

$$x_2 = n_{\text{syn}} - n' = 1500 - 921 = 579 \text{ min}^{-1}$$

Ak zanedbáme chybu spôsobenú zaokrúhľovaním, tak vidíme, že rozdiely x_1 a x_2 sa rovnajú. Tým sme potvrdili, že sklon charakteristík pri súčasnej zmene napätia a frekvencie je rovnaký a charakteristiky sú rovnobežné.

Hodnota sklzu, pri ktorom dosiahne moment maximálnu hodnotu pre polovičné napätie a frekvenciu je zakreslená v predchádzajúcom obr.4.16.

8.

Záberový moment a prúd pri polovičnom napätí U' a frekvencii f' vypočítame nasledujúco:

$$M'_{\text{zab}} = \frac{m}{\Omega'_{\text{syn}}} \frac{R'_r}{1} \frac{(U')^2}{\left(\frac{R'_r}{1}\right)^2 + \left(\frac{X_{\sigma}}{2}\right)^2} = \frac{3}{78,53} \frac{1,06}{1} \frac{(110)^2}{\left(\frac{1,06}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,75}{2}\right)^2} = 162,5 \text{ Nm},$$

$$I'_{\text{Izab}} = \frac{U'}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{1}\right)^2 + \left(\frac{X_\sigma}{2}\right)^2}} = \frac{110}{\sqrt{\left(\frac{1,06}{1}\right)^2 + \left(\frac{2,75}{2}\right)^2}} = 63,35 \text{ A}.$$

(porovnaj s hodnotami pri menovitom napätí)

9.

Ak chceme vypočítať hodnotu prúdu rotora prepočítanú na statorovú stranu pre polovičné napätie a frekvenciu a pre menovitý moment, musíme najskôr vypočítať sklz, ktorý zodpovedá týmto podmienkam. Vychádzať budeme zo vzťahu pre moment:

$$M_e = M_N = \frac{m}{2} \frac{R'_r}{\Omega_{\text{syn}} s'_N} \frac{\left(\frac{U_{\text{sf}}}{2}\right)^2}{\left(\frac{R'_r}{s'_N}\right)^2 + \left(\frac{X_\sigma}{2}\right)^2} \Rightarrow 50,79 = \frac{3}{2} \frac{1,06}{s'_N} \frac{\left(\frac{220}{2}\right)^2}{\left(\frac{1,06}{s'_N}\right)^2 + \left(\frac{2,75}{2}\right)^2}$$

Úpravou vzťahu opäť dostávame kvadratickú rovnicu, ktorej riešením sú dva korene:

$s'_{N1} = 4,981$ a $s'_{N2} = 0,121$, s ktorým budeme počítať ďalej. Tomuto sklzu zodpovedajú otáčky $n'_N = 659 \text{ min}^{-1}$. Tieto hodnoty sú uvedené na obr.4.16.

Potom môžeme vypočítať prepočítanú hodnotu prúdu rotora na stator v tomto stave pri záťaži menovitým momentom takto:

$$I'_r = \frac{U'}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{s'_N}\right)^2 + \left(\frac{X_\sigma}{2}\right)^2}} = \frac{110}{\sqrt{\left(\frac{1,06}{0,121}\right)^2 + \left(\frac{2,75}{2}\right)^2}} = 12,4 \text{ A}$$

10.

Pri uvažovaní dvojitej kľetky na rotore, bude platiť náhradná schéma motora podľa obr.4.10 so zanedbaním statorového odporu. Jednotlivé impedancie použité pri výpočte sú nasledujúce, ak predpokladáme, že $X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = X_\sigma / 2$:

$$Z_s = jX_{\sigma s} = j \frac{X_\sigma}{2} = j \frac{2,75}{2} = j1,375 \Omega$$

$$Z'_{rvn} = R'_{rvn} + jX'_{\sigma rvn} = 1,06 + j1,375 \Omega$$

$$Z'_{rvon} = R'_{rvon} + jX'_{\sigma rvon} = 3,18 + j0,4125 \Omega$$

Najskôr treba vypočítať celkovú impedanciu rotora pre $s = 1$:

$$\frac{1}{Z'_r} = \frac{1}{\frac{R'_{rvon}}{s} + jX'_{grvon}} + \frac{1}{\frac{R'_{rvn}}{s} + jX'_{grvn}} = \frac{1}{\frac{3,18}{1} + j0,4125} + \frac{1}{\frac{1,06}{1} + j1,375}$$

$$Z'_r = 0,967 + j0,726 = \frac{R'_r}{s} + jX'_{gr} \Omega$$

Ďalej vypočítame celkovú vstupnú impedanciu

$$Z_{in} = Z_s + Z'_r = j1,375 + 0,967 + j0,726 = 0,967 + j2,076 = 2,29 \Omega$$

Potom

$$M_{zab} = \frac{3}{2} \frac{0,967}{2\pi \cdot 50} \frac{(380/\sqrt{3})^2}{1 \cdot 2,29^2} = 169,5 \text{ Nm}$$

Z výsledkov vidíme, že v menovitom stave (bod 3 – jednoduchá klietka na rotore) bol záberový moment $M_{zabN} = 113 \text{ Nm}$, zatiaľ čo pre dvojitú klietku rotora je záberový moment $M_{zab} = 169,5 \text{ Nm}$. Tým je vysvetlený účinok vonkajšej, resp. dvojitej klietky pri zábere.

11.

V generátorickom režime sa rotor točí nadsynchrónnymi otáčkami so sklzom $s_G = -0,06$. Takže otáčky rotora budú:

$$n = n_{syn}(1 - s_G) = 1500(1 + 0,06) = 1590 \text{ min}^{-1}.$$

Potom prúd rotora prepočítaný na statorovú stranu je

$$I'_{rGN} = \frac{U_{sfN}}{\frac{R'_r}{s_G} + jX_{\sigma}} = \frac{220}{\frac{1,06}{-0,06} + j2,75} = -12,16 - j1,89 \text{ A}$$

Elektromagnetický moment stroja v generátorickom režime je

$$M_{eG} = \frac{m}{\Omega_{syn}} \frac{R'_r}{s_G} I_{rGN}^2 = \frac{3}{157,07} \frac{1,06}{-0,06} \left((-12,16)^2 + (-1,89)^2 \right) = -51,1 \text{ Nm}$$

Ak by sme poznali prvky priečnej vetvy náhradnej schémy indukčného motora alebo prúd naprázdno, tak by sme mohli vypočítať statorový prúd v tomto stave a tiež aj účinník v generátorickom režime. V takomto prípade je príslušný fázorový diagram zobrazený na obr.4.5

NERIEŠENÉ PRÍKLADY

Príklad 4.14

Je daný trojfázový asynchrónny motor s jednoduchou kliečkou: počet pólů, menovité napätie U_N , zapojenie svorkovnice, frekvencia f_s , priemer kotvy D , aktívna dĺžka železa l_{Fe} , dvojvrstvové vinutie uložené v Q drážkach so skrátením kroku Y/Q_p , v každej drážke je n_Q vodičov. Ďalej je dané: $R_s, R_r', X_{\sigma s}, X'_{\sigma r}, R_{Fe}, X_{\mu}, \Delta P_{mec}, n_N$.

Vypočítajte:

1. Koefficient vinutia 1., 5. a 7. harmonickej.
2. Amplitúdu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere základnej harmonickej $B_{\delta max1}$.
3. Použitím zjednodušenej náhradnej schémy (nakreslite ju) vypočítajte a) menovitý prúd rotora prepočítaný na stator I'_{rN} , záberový prúd pri menovitom napätí I'_{rzab} a nakreslite charakteristiku $I'_r = f(s, n)$ s vyznačením vypočítaných bodov, b) prúd naprázdno pri menovitom napätí I_{0N} , c) menovitý prúd statora I_{sN} a $\cos\varphi_{sN}$, d) menovitý elektromagnetický moment M_{eN} , maximálny moment pri menovitom napätí M_{maxN} , záberový moment pri menovitom napätí M_{zabN} , e) menovitý výkon na hriadelí P_N , f) menovitý príkon na svorkách stroja P_{pN} , g) menovitú účinnosť η_N .
4. Zanedbajte R_s a pokračujte výpočtom podľa bodov 3) až 11) z príkladu 4.13.

Príklad 4.15

Je daný trojfázový asynchrónny motor s jednoduchou kliečkou: menovité napätie U_N , zapojenie svorkovnice, menovitý výkon P_N .

Z merania naprázdno pri U_N je daný prúd naprázdno I_{0N} a príkon naprázdno P_{0N} , z toho ΔP_{mec} .

Zmerania nakrátko pri napätí U'_{kmer} je daný prúd I'_{kmer} a príkon P'_{kmer} .

1. Vypočítajte: a) prúd nakrátko I_{kN} a príkon nakrátko P_{kN} pri menovitom napätí U_N , b) prvky pozdĺžnej vetvy náhradnej schémy, ak predpokladáme $R_s = R_r', X_{\sigma s} = X'_{\sigma r}$, c) prvky priečnej vetvy, zložky prúdu naprázdno, straty v železe a účinník naprázdno.
2. Použite približnú náhradnú schému (nakreslite ju) a vypočítajte menovitý sklz, menovité otáčky, menovitý rotorový prúd prepočítaný na stator, menovitý statorový prúd, Jouleove straty vo vinutí statora a vinutí rotora, celkové straty, menovitý príkon, menovitú účinnosť, menovitý moment, maximálny moment pri menovitom napätí, záberový moment pri menovitom napätí, záberový prúd rotora prepočítaný na stator pri menovitom napätí. Nakreslite charakteristiky $I'_r = f(s, n)$ a $M = f(s, n)$ a vyznačte príslušné vypočítané body.
3. Zanedbajte R_s a pokračujte výpočtom podľa bodov 3. až 11. z príkladu 4.13.

Príklad 4.16

3-fázový, 440 V, 50 Hz, 4-pólový, do hviezdy zapojený asynchrónny stroj má totožné hodnoty statorovej a prepočítanej rotorovej impedancie: $R_s = R'_r = 1 \ \Omega$; $L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = 10 \text{ mH}$. Predpokladajme, že magnetizačná vetva je pripojená k statorovým svorkám a skladá sa z paralelnej kombinácie odporu $R_{Fe} = 300 \ \Omega$ a indukčnosti $L_{\mu} = 200 \text{ mH}$.

Pre sklz $s = 0,05$ vypočítajte:

- vstupný prúd a účinník
 - elektromagnetický moment
 - mechanický výkon na hriadeli, pokiaľ moment mechanických strát je 1 Nm
 - účinnosť
 - Ak zvýšime záťažový moment, pri akej rýchlosti stroj prestane pracovať?
- (a) $I_s = 14 \text{ A}$; $\cos\varphi_s = 0,85$ induktívneho charakteru, (b) $M_e = 51,3 \text{ Nm}$, (c) $P = 7,5 \text{ kW}$, (d) $\eta = 82,7 \%$, (e) $n = 1264 \text{ min}^{-1}$.

Príklad 4.17

Je daný trojfázový, 440 V, 50 Hz, 4-pólový do hviezdy zapojený asynchrónny stroj.

Údaje z merania nakrátko: $U_{kmer} = 120 \text{ V}$; $I_{kmer} = 25 \text{ A}$; $P_{kmer} = 2 \text{ kW}$.

Údaje z merania naprázdno: $U_0 = 440 \text{ V}$; $I_0 = 8 \text{ A}$; $P_0 = 1,5 \text{ kW}$.

Mechanické straty sú 600 W .

Použitím zjednodušenej náhradnej schémy (magnetizačná vetva je na statorových svorkách) vypočítajte hodnoty prvkov náhradnej schémy, pričom uvažujte s tým, že impedancia statorovej vetvy je rovná prepočítanej impedancii rotorovej vetvy.

Pri určovaní prvkov R_{Fe} a R_{mec} použite postup, ktorý je opísaný v príklade 4.3.

- Pri menovitom sklze 4% vypočítajte menovitý statorový prúd, prepočítaný rotorový prúd, účinník, elektromagnetický moment, výkon na hriadeli a účinnosť.
 - Vypočítajte záberový moment pri menovitých hodnotách napätia a frekvencie. Aký je pomer záberového prúdu k menovitému?
- ($R_s = R'_r = 0,53 \ \Omega$; $X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = 1,28 \ \Omega$; $R_{Fe} = 242,6 \ \Omega$; $R_{mec} = 275,8 \ \Omega$; $X_{\mu} = 32,1 \ \Omega$)
- $I_{sN} = 22,06 \text{ A}$; $I'_{rN} = 18,126 \text{ A}$; $\cos\varphi_N = 0,861 \text{ ind.}$; $M_{eN} = 83,14 \text{ Nm}$; $P = 11,94 \text{ kW}$; $\eta = 82,5 \%$
 - $M_{zab} = 85 \text{ Nm}$; $\frac{I_{szab}}{I_{sN}} = 4,51$

Príklad 4.18

Použitím hodnôt motora z príkladu 4.17 vypočítajte pri rýchlosti 1560 min^{-1} :

- rotorový prúd prepočítaný na stator
- statorový prúd

- c) elektromagnetický moment
- d) mechanický výkon na hriadelí
- e) účinnosť

Výpočet opakujte, ale s „presnou“ náhradnou schémou.

- (a) $I_r' = 19,6 \text{ A}$; „presne“ $I_r' = 19,1 \text{ A}$
- (b) $I_s = 21,5 \text{ A}$ pri $\cos\varphi = 0,84$ kap.; „presne“ $I_s = 20,28 \text{ A}$ pri $\cos\varphi = 0,886$ kap.
- (c) $M_e = 97,2 \text{ Nm}$; „presne“ $M_e = 92,1 \text{ A}$
- (d) $P = 16,479 \text{ kW}$; „presne“ $P = 15,646 \text{ kW}$
- (e) $\eta = 83,5 \%$; „presne“ $\eta = 87,5 \%$)

Príklad 4.19

3-fázový, 6-pólový, 50 Hz indukčný stroj s vinutým rotorom má statorové vinutie zapojené do hviezdy a rotorové do trojuholníka. Efektívny prevod stator/rotor je 2/1. Rotorová rozptylová reaktancia v pokoji, keď sa rotor netočí, je $(0,36 + j1,5) \Omega$, zodpovedajúca statorová rozptylová reaktancia je $(1,4 + j7) \Omega$.

Pri statorovom napätí 220 V / fázu vypočítajte:

- a) skutočný rotorový záberový prúd
 - b) skutočný rotorový prúd pri otáčkach 960 min^{-1}
 - c) skutočný počiatočný rotorový prúd ak pri podmienkach v stave b) zameníme dve fázy
 - d) elektrický príkon odoberaný zo siete v stave c)
- (a) $I_{rzab} = 33 \text{ A}$
 - (b) $I_r = 11,1 \text{ A}$
 - (c) $I_r = 33,4 \text{ A}$
 - (d) $P_{in} = 1,79 \text{ kW}$)

Príklad 4.20

Trojfázový asynchrónny motor 50 Hz, v zapojení do hviezdy, $2p = 6$ má maximálny moment 120 Nm pri 875 min^{-1} a odpor rotora prepočítaný na stator $0,2 \Omega$ na fázu. Vypočítajte moment pri sklze 4 %. Aký prepočítaný spúšťačací odpor je potrebný k tomu, aby mal motor pri zábere moment rovný $2/3M_{max}$. Zanedbajte činný odpor statora R_s a vplyvy zmeny výsledného magnetického toku.

($M_e = 69,7 \text{ Nm}$; $R'_{sp1} = 0,41 \Omega$; $R'_{sp2} = 4 \Omega$)

Príklad 4.21

Asynchrónny motor 380 V, 50 Hz, $2p = 6$, má výkon 22,4 kW, kmitočet napätia v rotore je 2 Hz. Ak moment strát je 20,3 Nm a statorové straty sú 1 kW, vypočítajte príkon a účinnosť.

($P_{in} = 26,46 \text{ kW}$; $\eta = 84,66 \%$)

Príklad 4.22

Trojfázový asynchrónny motor 380 V, so statorovým vinutím spojeným do hviezdy má tieto parametre: $R_s = 0,46 \Omega$; $R_r = 0,02 \Omega$; $X_{\sigma s} = 2,24 \Omega$; $X_{\sigma r} = 0,08 \Omega$; $N_s = 192$; $N_r = 36$; $2p = 6$; činitele vinutí $k_{vs} = 0,932$; $k_{vr} = 0,955$.

Za predpokladu rovnakého počtu fáz statora a rotora a pri zanedbaní prúdu naprázdno vypočítajte:

- záberový moment pri rotorovom vinutí spojenom nakrátko a veľkosť spúšťacieho odporu, ktorý zabezpečí, že motor sa bude rozbiehať s maximálnym momentom
 - moment pri sklze 3 % a moment maximálny
- (a) $M_{zab} = 40 \text{ Nm}$; $R'_{rpr} = 3,83 \Omega$; $R_{rpr} = 0,142 \Omega$
(b) $M_e = 63,3 \text{ Nm}$; $M_{max} = 141 \text{ Nm}$)

Príklad 4.23

Kružkový asynchrónny motor 380 V, trojfázový, 50 Hz, 6-pólový má statorovú rozptylovú impedanciu $(0,75 + j2,1) \Omega$ na fázu a rotorovú rozptylovú impedanciu v pokoji (keď sa rotor netočí) $(0,25 + j0,9) \Omega$ na fázu. Stator je spojený do trojuholníka a pomer statorových a rotorových efektívnych závitov je 3/2. Pri sklze motora 4 % sa vzájomne prepoja dve fázy a do každej fázy rotora sa zaradi odpor 1,1 Ω . Vypočítajte brzdiaci moment hneď po reverzácii. Pri riešení zanedbajte prúd naprázdno a vplyv sýtenia.

($M_b = 287,4 \text{ Nm}$)

Príklad 4.24

Vypočítajte hodnotu záberového momentu a momentu zvratu (moment maximálny) vzhľadom na menovitý moment pre asynchrónny motor s menovitým sklzom 4 %. Pokiaľ je statorová a rotorová rozptylová impedancia prepočítaná na spoločnú vzťažnú sústavu, tak ich hodnoty sú identické. Rozptylová reaktancia je päťnásobne vyššia ako odpor.

$$\left(\frac{M_{zab}}{M_{eN}} = 0,298 ; \frac{M_{max}}{M_{eN}} = 1,4 \right)$$

Príklad 4.25

V stave nakrátko odoberá indukčný stroj prúd nakrátko rovný trojnásobku menovitého prúdu pri napätí, ktoré sa rovná polovici menovitého napätia. Sklz stroja v menovitej oblasti je 4 % a záťaž vyžaduje záberový moment rovný tretine menovitého momentu. Na zabezpečenie tejto počiatočnej podmienky je použitý autotransfómator. Aké percentuálne zníženie napájacieho napätia je možné, aby sa zabezpečil daný záberový moment a aký prúd bude odoberať motor pri zábere zo siete pri tomto napätí?

($U = 0,481 U_N$; $I_{zab} = 2,89 I_N$)

Príklad 4.26

Trojfázový 4-pólový asynchrónny motor, 50 Hz, dosahuje $M_{\max} = 30 \text{ Nm}$ pri rýchlosti 1100 min^{-1} . Mechanická záťaž na hriadeli vyžaduje moment 14 Nm a mechanické straty sú 1 Nm .

- Aká je rýchlosť pri danej záťaži a menovitom napätí?
- Je potrebné znížiť rýchlosť na 1200 min^{-1} . Predpokladajme, že mechanická záťaž a mechanické straty sa nezmenia so zmenou rýchlosti. Ako musíme znížiť napätie, aby sme dosiahli túto rýchlosť?
- Nakreslite príslušné charakteristiky.
($n_N = 1392 \text{ min}^{-1}$; $U = 0,722U_N$)

Príklad 4.27

3-fázový, 440 V, 50 Hz, 6-pólový do trojuholníka zapojený indukčný motor poháňa ventilátor rýchlosťou 920 min^{-1} pri menovitom napätí. Parametre náhradnej schémy sú: $R_s = 8 \text{ } \Omega$; $R'_r = 16 \text{ } \Omega$; $X_{\text{os}} = X'_{\text{or}} = 12 \text{ } \Omega$. Pokiaľ predpokladáme, že mechanický moment závisí od štvorca otáčok, vypočítajte hodnotu napätia potrebného pre otáčanie ventilátora rýchlosťou 460 min^{-1} . Aký bude potom rotorový prúd a straty vo vinutí?

($U_{\text{sf}} = 121,8 \text{ V}$; $I'_r = 2,73 \text{ A}$; $\Delta P_{\text{jr}} = 357,7 \text{ W}$)

Príklad 4.28

3-fázový, 400 V, 50 Hz, 6-pólový, do hviezdy zapojený asynchrónny motor napájaný zo zdroja premenlivej frekvencie má nasledujúce hodnoty statorovej a rotorovej rozptylovej impedancie prepočítanej na stator: $Z_s = Z'_r = (0,15 + j0,75) \text{ } \Omega$ pri menovitej frekvencii. Vypočítajte moment pri menovitej frekvencii a napätí a menovitom sklze $s_N = 3 \text{ } \%$. Vypočítajte hodnoty napätia a frekvencie, ak je pri otáčkach 750 min^{-1} žiadaný menovitý moment a stroj má pracovať s nezmeneným magnetickým tokom.
($M_N = 265,5 \text{ Nm}$; $U_s = 312 \text{ V}$ (združená hodnota); $f = 39 \text{ Hz}$)

Príklad 4.29

3-fázový, 400 V, 50 Hz, 4-pólový, do hviezdy zapojený asynchrónny motor s dvojitou kľetkou má nasledujúce hodnoty prvkov náhradnej schémy na fázu v pokoji:

- statorová rozptylová impedancia: $Z_s = (0,5 + j2) \text{ } \Omega$
- rotorová rozptylová impedancia vonkajšej kľetky prepočítaná na stator: $Z'_{\text{von}} = (2 + j0,6) \text{ } \Omega$

- rotorová rozptyľová impedancia vnútornej kľetky prepočítaná na stator:

$$\mathbf{Z}'_{vn} = (0,3 + j2,5) \Omega$$

Vypočítajte záberový moment a mechanický výkon na hriadeli pri otáčkach 1410 min^{-1} .
($M_{zab} = 87,1 \text{ Nm}$; $P = 15,9 \text{ kW}$)

Príklad 4.30

Trojfázový krúžkový 4-pólový indukčný motor má statorové vinutie zapojené do hviezdy a jeho menovité hodnoty sú:

- menovitý výkon $P_N = 3,6 \text{ kW}$
- menovité svorkové napätie $U_{sN} = 380 \text{ V}$
- menovité otáčky $n_N = 1470 \text{ min}^{-1}$
- menovitá frekvencia napájacej siete $f_N = 50 \text{ Hz}$
- menovitý prúd statora $I_N = 8,5 \text{ A}$
- menovitý účinník $\cos\varphi_N = 0,85$

Vypočítajte menovitý moment, menovitý sklz, účinnosť a straty.

($M_N = 23,4 \text{ Nm}$; $s_N = 0,02$; $\eta_N = 75,7 \%$; $\Delta P = 1155 \text{ W}$)

Príklad 4.31

Trojfázový, štvorpólový, $P = 6,3 \text{ kW}$ asynchrónny motor s kľetkovou kotvou s menovitým sklzom $s_N = 5 \%$, 50 Hz , účinníkom $\cos\varphi_N = 0,85$ a účinnosťou $\eta_N = 0,86$ sa rozbieha prepínačom Y/ Δ . $U_{sN} = 380 \text{ V}$ v trojuholníku. $M_{zab} = 0,8M_N$ a $I_{zab} = 5I_N$. Vypočítajte záberový moment a prúd v zapojení statorového vinutia do hviezdy.

($M'_{zab} = 11,25 \text{ Nm}$; $I'_{zab} = 21,8 \text{ A}$)

Príklad 4.32

Trojfázový štvorpólový asynchrónny motor s kotvou nakrátko $P_N = 1,5 \text{ kW}$; $U_{sN} = 380 \text{ V}$; $s_N = 6 \%$, 50 Hz odoberá v menovitom stave $I'_r = 2,6 \text{ A}$. Vypočítajte elektromagnetický moment stroja a otáčky pri prúde $I'_r = 4 \text{ A}$

($M_e = 13,84 \text{ Nm}$; $n_N = 1343 \text{ min}^{-1}$)

Príklad 4.33

Trojfázový dvojpólový asynchrónny stroj, 50 Hz s menovitým výkonom $P_N = 1,2 \text{ kW}$ a menovitými otáčkami $n_N = 2820 \text{ min}^{-1}$ má sklz, pri ktorom je moment maximálny $s_{Mmax} = 0,2$. Vypočítajte maximálny a záberový moment.

($M_{max} = 7,4 \text{ Nm}$; $M_{zab} = 2,85 \text{ Nm}$)

Príklad 4.34

Trojfázový 6-pólový asynchrónny motor má nasledujúce štítkové údaje: $P_N = 2,5$ kW; 380 V, Y, $n_N = 960 \text{ min}^{-1}$ a preťažiteľnosť stroja je 1,6.

Aký bude záberový moment?

($M_{zab} = 8,7 \text{ Nm}$)

Príklad 4.35

Vypočítajte straty v rotore trojfázového 8-pólového krúžkového asynchrónneho stroja s menovitým výkonom $P_N = 80 \text{ kW}$; $s_N = 2 \%$; $U_{sN} = 380 \text{ V}$, 50 Hz, Y, preťažiteľnosť 1,75. Vypočítajte, aký odpor treba zaradiť do obvodu rotora, aby sa otáčky znížili na 700 min^{-1} . Ako vzrastú straty v rotore?

($\Delta P_{jr} = 1640 \text{ W}$, $R'_{sp} = 0,073 \Omega$; $\Delta P'_{jr} = 5700 \text{ W}$)