

5. Elektrické motory

Elektrické motory sú zariadenia, v ktorých sa mení elektrická energia na mechanickú. Podľa charakteru mechanického pohybu môžu byť „točivé“ alebo lineárne. Počas vývoja sa elektrické motory konštrukčne veľmi zmenili ale princíp činnosti zostal rovnaký. Dve základné časti motora (stator a rotor) pracujú na princípe elektromagnetickej interakcie.

Súčasnú elektrické motory musia zabezpečiť vysoké požiadavky kladené na:

- bezpečnosť,
- spoľahlivosť,
- úspornosť.

Vo výrobnom procese sa používa oceľová alebo liatinová konštrukcia rámu motorov a na redukciiu hmotnosti aj hliníková. Ak sú motory určené do prostredia s nebezpečenstvom výbuchu (ťažba, preprava a spracovanie ropy a plynu, resp. v chemickom a petrochemickom priemysle), ukladajú sa do stanovených bezpečnostných krytov. Bežné chladenie motorov je pomocou prúdenia okolitého vzduchu a pri veľkých výkonoch môže byť použité aj chladenie vodou.

Elektrické motory sa podľa charakteru napájacieho zdroja delia na:

- jednosmerné – DC (direct current) motory,
- striedavé – AC (alternating current) motor.

Jednosmerné motory (JM) podľa usporiadania delíme na:

- JM s cudzím budením,
- JM so sériovým budením (jednokvadrantový pohon s vysokým záberovým momentom),
- JM s permanentnými magnetmi.

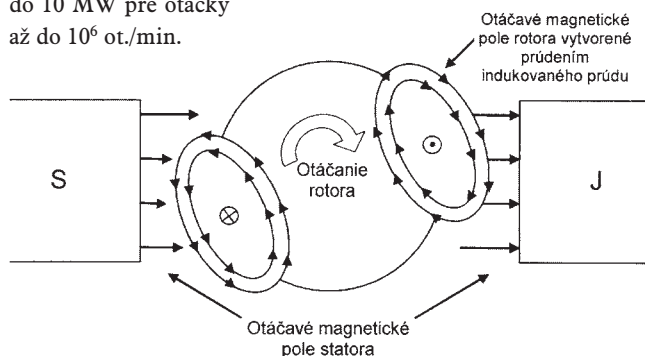
Striedavé motory delíme do dvoch základných skupín:

- Asynchrónne (indukčné) motory (AM)
 - podľa konštrukcie rotora:
 - s fázovým rotorom (krúžkový motor),
 - s kotvou nakrátko;
 - podľa napájacieho zdroja alebo usporiadania statorového vinutia:
 - jednofázové,
 - dvojfázové,
 - trojfázové.
- Synchronné motory (SM)
 - buденé motory:
 - s hladkým rotorom,
 - s vyjadrenými pólmi;
 - motory s permanentnými magnetmi (SMPM):
 - motory s elektrickým komutátorom (BDCM – brushless direct current motor),
 - krokové motory;
 - nebuденé SM:
 - reluktančné motory.

Striedavé motory sú v porovnaní s jednosmernými konštrukčne jednoduchšie, bezpečnejšie a spoľahlivejšie. Vývojom polovodičovej techniky sa za posledné dve desaťročia výborne zvládla aj problematika ich riadenia, čo spôsobilo dominantné postavenie striedavých motorov v priemyselných aplikáciách.

Asynchrónne motory

Asynchrónne motory sú najrozšírenejšie točivé elektrické motory. Predpokladá sa, že viac ako 60 % vyrobenej elektrickej energie sa v súčasnosti využíva na ich poháňanie v rôznych priemyselných a domácich zariadeniach. Vyrábajú sa pre výkony rádovo od 10 W do 10 MW pre otáčky až do 10^6 ot./min.

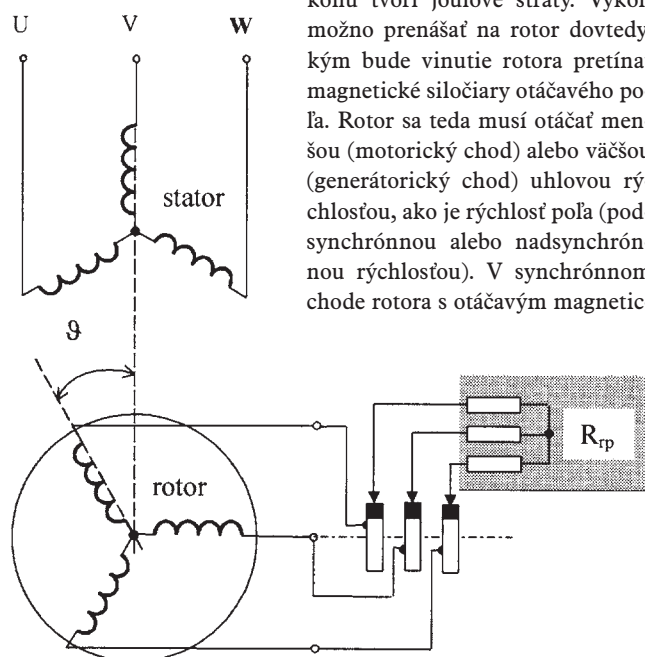


Obr.25 Princíp činnosti AM

Princíp činnosti asynchrónnych motorov

Asynchrónny motor je z elektrického hľadiska transformátor zložený s primárneho (statorového) a sekundárneho (rotorového) vinutia. Od transformátora sa líši v tom, že vinutia motora sú uložené v dvoch oddelených železných jadrách, medzi ktorými je vzduchová medzera. Pripojením statorového vinutia na striedavý symetrický zdroj vzniká vo vzduchovej medzere otáčavé magnetické pole. Keďže sa rotor otáča pomalšie ako otáčavé magnetické pole, vo vinutiach rotora sa indukuje prúd. Okolo tečúceho indukovaného prúdu sa vytvára ďalšie magnetické pole, ktoré v interakcii so statorovým vyvíja silové účinky (otáčavý moment) v rotore. Princíp činnosti AM zobrazuje obr. 25. Prenášaný výkon na hriadeľ motora je úmerný uhlovej rýchlosti otáčavého poľa a momentu. Rozdiel výkonu otáčavého poľa a mechanického výkonu tvorí joulové straty. Výkon možno prenášať na rotor dovtedy,

kým bude vinutie rotora pretínať magnetické siločiaru otáčavého poľa. Rotor sa teda musí otáčať menšou (motorický chod) alebo väčšou (generátorický chod) uhlovou rýchlosťou, ako je rýchlosť poľa (pod-synchronnou alebo nadsynchronnou rýchlosťou). V synchronnom chode rotora s otáčavým magnetic-



Obr.26 Schéma AM s fázovým rotorom

kým polom statora sa vo vinutí rotora nebude indukovať prúd a moment motora bude nulový. Často sa tomuto stroju hovorí indukčný, pretože jeho činnosť sa zakladá na indukčných zákonoch.

Rotor býva konštruovaný dvomi spôsobmi. Asynchrónny motor s fázovým rotorom má rotor realizovaný podobne ako stator viacfázovými vinutiami, najčastejšie ako trojfázové vinutie. Vývody vinutia sú na kolektore. Uvedeným zapojením možno zapájať do série s vinutím regulačné odpory a tým meniť celkový odpor rotora, obr. 26.

AM s kotvou nakrátko patrí pre jednoduchosť a odolnosť medzi najspoločnejšie elektrické motory. Kotva sa skladá z medených alebo hliníkových tyčí spojených čelnými kruhmi. Pri veľkých výrobných sériách je rotorové vinutie priamo pod tlakom vstreknuté z roztaveného hliníka.

Uhlová rýchlosť otáčavého elektrického poľa sa označuje ako synchrónna uhlová rýchlosť ω_s a je určená pomocou sieťovej frekvencie f_s vzťahom

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (15)$$

Ak ω je elektrická uhlová rýchlosť rotora, potom rozdiel synchrónnej elektrickej uhlovej rýchlosti a rýchlosti rotora určuje sklzovú uhlovú rýchlosť

$$\omega_{sl} = \omega_s - \omega \quad (16)$$

Medzi mechanickou uhlovou rýchlosťou ω_m a elektrickou platí nasledujúci vzťah

$$\omega = p' \omega_m \quad (17)$$

kde p' je počet pólových dvojíc.

Sklz je definovaný ako bezrozmerná veličina

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s} \quad (18)$$

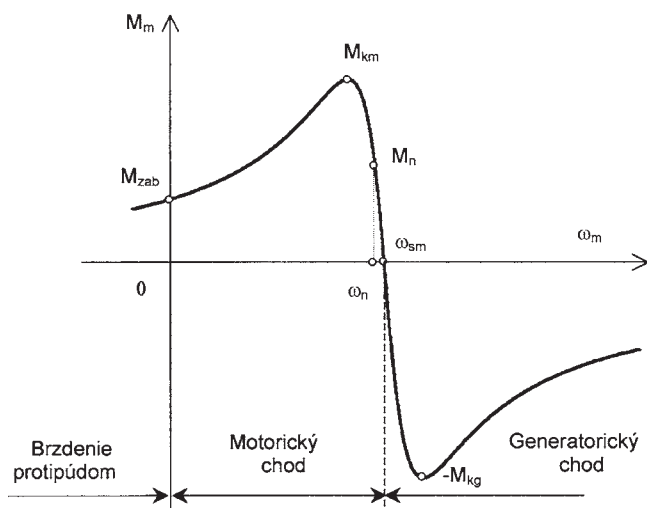
Základné prevádzkové stavy AM určuje momentová charakteristika, obr. 27.

Momentová charakteristika AM určuje tri charakteristické oblasti:

1. motorický chod: $0 < \omega < \omega_s, P > 0$
2. generátorický chod: $\omega > \omega_s, P < 0$
3. brzdenie protiprúdom: $\omega < 0, P < 0$.

Statická momentová charakteristika na obr. 27 má ďalšie významné pracovné body:

- záberový moment M_{zab} , moment motora pri nulovej rýchlosti,
- nominálny moment M_n , (nominálny prúd I_n), určuje nominálne zaťaženie pri nominálnej hodnote rýchlosti,
- nominálne otáčky n_n (nominálna uhlová rýchlosť ω_n),
- maximálny moment M_{max} , pomer M_{max}/M_n , určuje momentovú preťažiteľnosť,



Obr.27 Momentová charakteristika AM v závislosti od uhlovej rýchlosti rotora

- moment zvratu, maximálny moment v motorickom chode M_{mk} , v generátorickom chode M_{gk} .

Vzťah medzi otáčkami a uhlovou rýchlosťou je daný výrazom

$$n = \omega \frac{30}{\pi} \quad [\text{ot/min; s}^{-1}] \quad (19)$$

Z katalógových a štítkových parametrov AM majú význam najmä tieto veličiny:

nominálny moment

$$M_n = \frac{30P_n}{\pi n_n} \quad [\text{Nm, W, ot/min}] \quad (20)$$

činný elektrický výkon

$$P_{en} = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi_n \quad [\text{W, V, A,}] \quad (21)$$

nominálna účinnosť

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{en}} \quad [\text{W, W}] \quad (22)$$

kde P_n je nominálny výkon,

n_n – nominálne otáčky,

U_n – nominálne združené napätie,

I_n – nominálny fázový prúd,

$\cos \varphi_n$ – nominálny účinník motora,

φ – fázový posun medzi napätím a prúdom.

Vznik kruhového otáčavého poľa

Vznik kruhového rovinného otáčavého poľa tvorí fyzikálny základ striedavých strojov. Pre názornú predstavu treba vychádzať z toho, že rovinu tvorí priečny rez stroja. Na vytvorenie kruhového poľa treba generovať dva budiace signály, ktoré sú fázovo posunuté o 90° a pôsobia v smere osi x a y , obr. 28.

$$u_x = u_m \cos \omega_s t \quad u_y = u_m \sin \omega_s t \quad (23)$$

Na zavedenie ďalších pojmov je vhodné stotožniť rovinu $x - y$ s komplexnou rovinou, kde x je reálna os a y je imaginárna os komplexnej roviny. Budiace signály u_x, u_y sú zložky rovinného, časovo premenlivého vektora vyjadreného v kartézskych súradniciach vzťahom

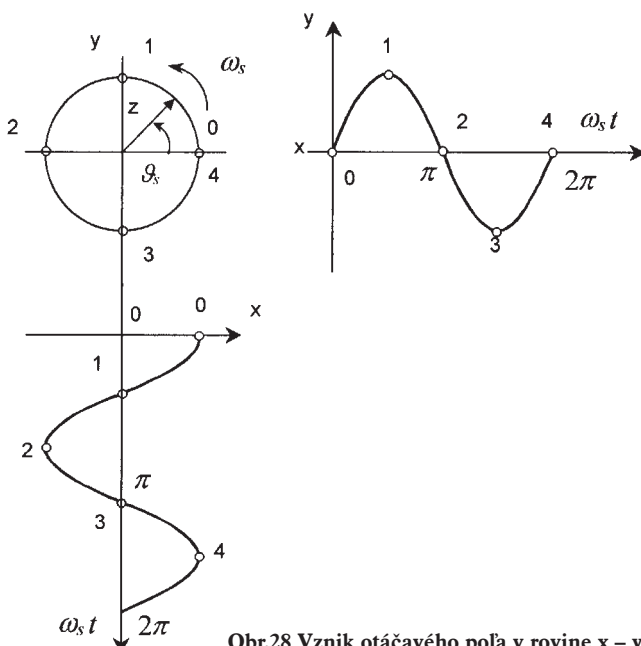
$$\hat{u} = u_x + j u_y = u_m (\cos \omega_s t + j \sin \omega_s t) \quad (24)$$

alebo v polárnych súradniciach

$$\hat{u} = u_m e^{j\omega_s t} = u_m e^{j\vartheta_s} \quad \vartheta_s = \int \omega_s dt \quad (25)$$

kde ϑ_s je argument vektora,

u_m – modul vektora.

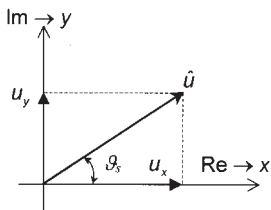


Obr.28 Vznik otáčavého poľa v rovine $x - y$

Vo všeobecnosti platia tieto vzťahy na vyjadrenie argumentu a modulu vektora.

$$\vartheta_s = \arctg \frac{u_y}{u_x}$$

$$u_m = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (26)$$



Obr.29 Vektorový diagram vektora napätia

Vektor napätia možno zobraziť v komplexnej rovine, obr. 29.

Ekvivalentné kruhové pole môžeme vytvoriť nielen dvojfázovým symetrickým systémom, ale aj trojfázovým alebo m -fázovým systémom napätí alebo prúdov. Otáčavé kruhové pole sa môže vytvoriť m -fázovým symetrickým systémom napätí

kde $m \geq 2$, $m = 2, 3, 5, 7$ (vynechávajú sa párne násobky čísla 2, 3, 5, 7). Trojfázový symetrický systém napätí nech je vyjadrený vzťahom

$$u_a = U_m \cos(\vartheta_s)$$

$$u_b = U_m \cos(\vartheta_s - 120^\circ) \quad \text{kde } \vartheta_s = \int \omega_s dt$$

$$u_c = U_m \cos(\vartheta_s + 120^\circ) \quad (27)$$

Nech $\hat{1}_a, \hat{1}_b, \hat{1}_c$ sú jednotkové vektory definované vzťahmi

$$\hat{1}_a = 1$$

$$\hat{1}_b = 1\hat{a} = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\hat{1}_c = 1\hat{a}^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (28)$$

Vektor napätia získame, ak hodnoty fázových napätí (27) vynásobíme príslušnými jednotkovými vektormi (28) a následne ich sčítame,

$$\hat{u} = 1(u_a + \hat{1}_b u_b + \hat{1}_c u_c) = u_a + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) u_b + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) u_c$$

$$\hat{u} = u_x + j u_y \rightarrow u_x = u_a - \frac{1}{2}(u_b + u_c) \quad u_y = \frac{\sqrt{3}}{2}(u_b - u_c) \quad (29)$$

Pre symetrickú trojfázovú sústavu napätí platí vzťah

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad u_a = -u_b - u_c \quad (30)$$

Dosadením vzťahu (30) do (29) získame výsledné vzťahy pre transformované zložky trojfázového systému symetrickej sústavy napätí (27) do dvojfázového systému.

$$u_x = \frac{3}{2} u_a \quad u_y = \frac{\sqrt{3}}{2} (u_b - u_c) \quad (31)$$

Cieľom transformácie trojfázovej sústavy veličín na dvojfázovú môžu byť ďalšie požiadavky, ktoré charakterizujú špecifické vlastnosti transformácie. Pre tieto ciele treba zovšeobecniť vzťahy pre lineárnu transformáciu (29), kde namiesto jednotkového vektora „1“ zavádzame jeho hodnotu „ k “.

priama Clarkova transformácia (3/2)

$$\hat{z} = \frac{2}{3} (z_a + \hat{a} z_b + \hat{a}^2 z_c) \quad \hat{a} = e^{j120^\circ} \quad (32)$$

alebo v zložkovom tvare

$$z_x = z_a \quad z_y = \frac{\sqrt{3}}{3} (z_b - z_c) \quad (33)$$

Spätná Clarkova transformácia z (2/3)

$$z_a = z_x \quad z_b = -\frac{1}{2} z_x + \frac{\sqrt{3}}{2} z_y \quad z_c = -\frac{1}{2} z_x - \frac{\sqrt{3}}{2} z_y \quad (34)$$

Dynamický model AM

s kotvou nakrátko v rovine „s“: (α, β)

Nasledujúce vzťahy opisujú dynamický model AM s kotvou nakrátko v rovine statora so stavovými veličinami $\hat{i}_s, \hat{\Psi}_r$.

$$\hat{u}_s = R_1 (1 + T_1 s) \hat{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \hat{\Psi}_r + j \omega k_r \hat{\Psi}_r$$

$$\text{alebo } \hat{i}_s = \frac{1}{R_1 (1 + T_1 s)} \left(\hat{u}_s + \frac{k_r}{T_r} \hat{\Psi}_r - j \omega k_r \hat{\Psi}_r \right)$$

$$\text{kde } T_1 = \frac{\sigma L_s}{R_1} \quad T_r = \frac{L_r}{T_r} \quad k_r = \frac{L_m}{L_r} \quad (35)$$

Rozpísaním do zložkového tvaru a vyjadrením zložiek statorového prúdu dostaneme vzťahy

$$\hat{u}_s = R_1 (1 + T_1 s) \hat{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \hat{\Psi}_r + j \omega k_r \hat{\Psi}_r$$

$$\text{alebo } \hat{i}_s = \frac{1}{R_1 (1 + T_1 s)} \left(\hat{u}_s + \frac{k_r}{T_r} \hat{\Psi}_r - j \omega k_r \hat{\Psi}_r \right)$$

$$\text{kde } T_1 = \frac{\sigma L_s}{R_1} \quad T_r = \frac{L_r}{T_r} \quad k_r = \frac{L_m}{L_r} \quad (36)$$

$$i_{s\alpha} = \frac{1}{R_1 + L_s s} \left(u_{s\alpha} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{r\alpha} + k_r \Psi_{r\beta} \omega \right)$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{R_1 + L_s s} \left(u_{s\beta} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{r\beta} - k_r \Psi_{r\alpha} \omega \right) \quad (37)$$

Podobne sa rozpíše vektorová rovnica pre rotorový obvod

$$\Psi_{r\alpha} = \frac{L_m}{1 + s T_r} \left(i_{s\alpha} - \omega \Psi_{r\beta} \frac{T_r}{L_m} \right)$$

$$\Psi_{r\beta} = \frac{L_m}{1 + s T_r} \left(i_{s\beta} + \omega \Psi_{r\alpha} \frac{T_r}{L_m} \right) \quad (38)$$

Vzťah pre moment motora modelu AM v zložkovom tvare

$$M_m = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \Im(\hat{\Psi}_r^* \hat{i}_s) = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (39)$$

Model motora je kompletný doplnením pohybovej rovnice

$$M_m - M_z = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad \omega = p' \omega_m \quad (40)$$

kde J je moment zotrvačnosti,

R_s – odpor statora,

R_r – odpor rotora,

L_s – indukčnosť statora,

L_r – indukčnosť rotora,

L_m – vzájomná indukčnosť,

T_r – časová konštanta rotora,

σ – rozptylový činiteľ,

\hat{u}_s – vektor statorového napätia,

\hat{i}_s – vektor statorového prúdu,

$\hat{\Psi}_r$ – vektor magnetického toku rotora,

M_m – moment motora,

M_z – moment záťaže a dolné indexy α, β označujú

reálnu, resp. imaginárnu zložku príslušného vektora v súradnicovom systéme statora.

Ing. Ján Jovankovič, PhD.

prof. Ing. Milan Žalman, PhD.

41

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra automatizácie a regulácie

Ilkovičova 3, 842 47 Bratislava

e-mail: jan.jovankovic@stuba.sk

milan.zalman@stuba.sk