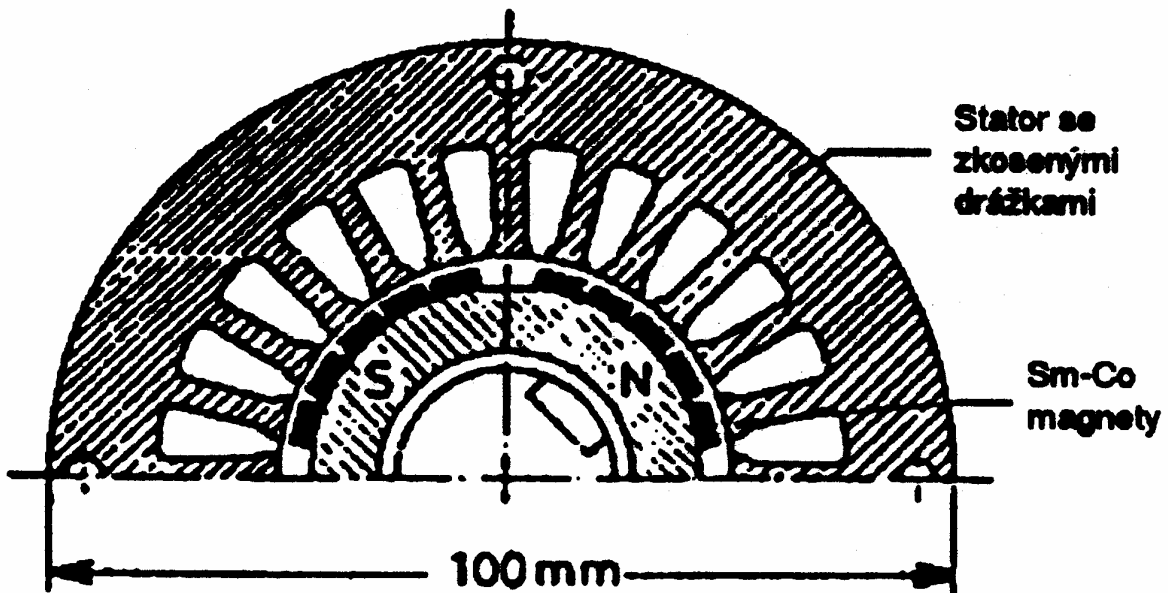


1 Motory s permanentními magnety



Obr. 1 Příčný řez synchronním motorem s permanentními magnety 1.2 kW, $2p=4$

Motory s permanentními magnety jsou synchronní motory, které místo budicího vinutí pro vytvoření magnetického toku používají permanentní magnety z moderních materiálů na bázi vzácných zemin např. Sa-Co, nebo Nd-Fe-B. Kromě podstatného zjednodušení motoru (motor neobsahuje budicí vinutí, kroužky), odpadá zdroj budicího proudu. Motor pracuje s podstatně lepším účínkem než srovnatelný asynchronní motor, protože neodebírá ze sítě magnetizační proud. Navíc v rotoru nevznikají ztráty ani v budicím vinutí jako u klasického synchronního motoru, ani v rotorové kleci jako u asynchronního motoru. Důsledkem je, že motor o stejném výkonu má podstatně menší rozměry než klasický asynchronní motor a lepší účinnost.

Provedení motoru

Schématický řez typickým provedením motoru ukazuje Obr. 1. Stator má shodné provedení jako běžný AM, tedy třífázové vinutí se shodným počtem pólů jako má rotor ($2p_S = 2p_R$). Obvykle se používá provedení se šikmým drážkováním statoru. Na rotoru se střídají póly tvořené permanentními magnety, které mají vysoké sycení (okolo 1 T). Poměrná permeabilita materiálu permanentních magnetů je vysoká $\mu = 1 \Rightarrow X_d = X_q$. Proto lze pro náhradní schéma SM s permanentními magnety použít náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem.

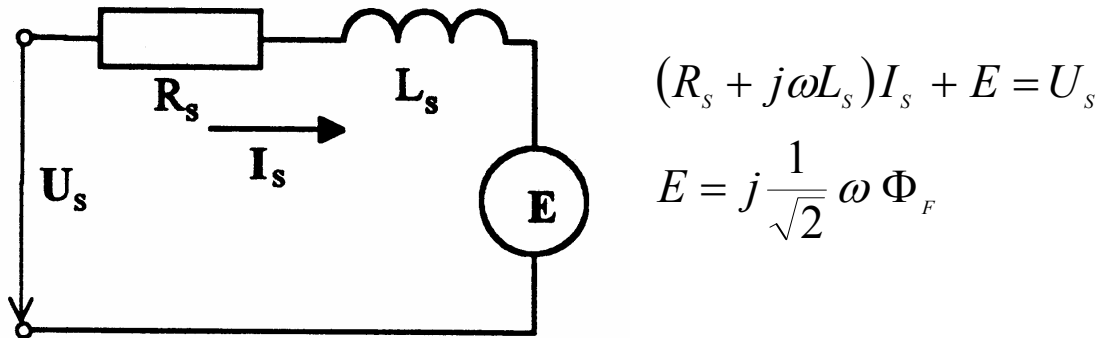
Podle způsobu určení se používají motory s vnějším nebo vnitřním rotorem. Statorem se vždy rozumí část stojící a rotorem část se otáčející.

Napájení motoru.

Z popisu konstrukce motoru je patrné, že motor v rotoru neobsahuje žádné vinutí, které by bylo možné použít k asynchronnímu rozběhu. Proto je možné tento typ motoru použít pouze v kombinaci s napájením z frekvenčního měniče obvykle s napěťovým meziobvodem, s šířkovou pulzní modulací. **Pozor** nelze použít běžný FM, ale FM měnič se speciálním softwarem určeným pro řízení synchronního motoru s permanentními magnety.

1.1 Řízení motoru.

Řízení motoru je podobné vektorovému řízení asynchronního motoru. U motorů s permanentními magnety slouží jako vztažný úhel poloha rotoru. Základní princip řízení vychází z náhradního schéma viz. Obr. 2. R_s je odpor jedné fáze statorového vinutí, L_s je náhradní indukčnost reakce kotvy, E je napětí indukované magnetickým tokem Φ_F permanentních magnetů a U_s je fázové napájecí napětí.



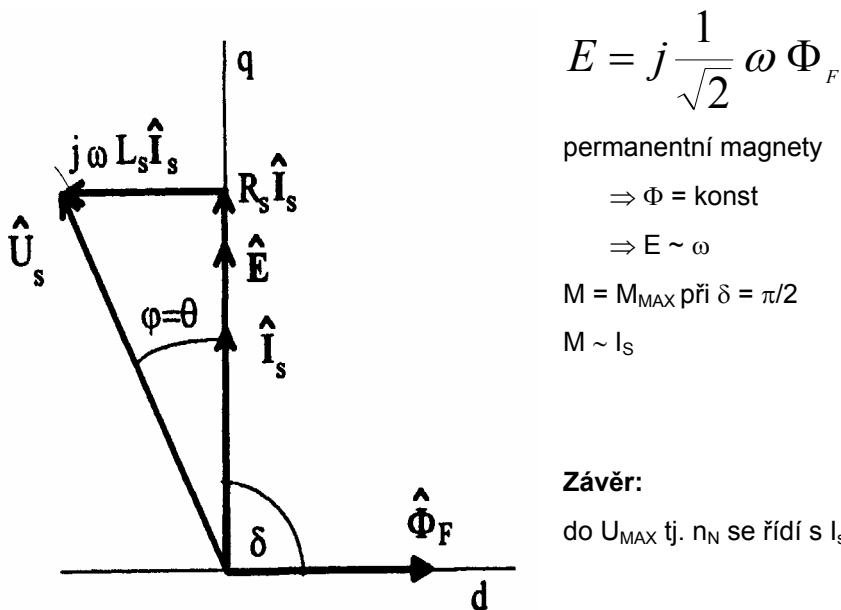
Obr. 2 Náhradní schéma motoru s permanentními magnety

Pro řízení synchronního motoru s permanentními magnety se používají dva způsoby - principy řízení, které vyplývají z fyzikálních vlastností motoru. Rozhodujícím kritériem pro volbu způsobu řízení je velikost okamžité rychlosti otáčení.

1.1.1 Oblast nízkých otáček $n < n_N$

Princip: řízení zvyšováním E

Velikost fázoru indukovaného napětí E je úměrná úhlové rychlosti rotoru ω , protože magnetický tok Φ_F permanentních magnetů lze považovat za konstantní. Ve zvolené soustavě d, q leží Φ_F v ose d a proud I_s v ose q . Fázový posun fázoru napájecího napětí U_s vzhledem k fázoru E je dán parametry R_s , L_s a velikostí E a I_s . Velikost U_s vyplývá z fázorového diagramu. Aby motor vyvinul maximální moment, musí být, jak vyplývá z výrazu pro moment synchronního stroje s hladkým rotorem, fázory toku Φ_F a statorového proudu I_s na sebe kolmé.



Obr. 3 Fázorový diagram pro oblast nízkých otáček $n < n_N$

1.1.2 Oblast vysokých otáček $n > n_N$

Princip: řízení nepřímým odbuzováním, tj. zavedením složky proudu I_{sd} v záporném směru osy d

Když úhlová rychlost rotoru ω dosáhne takové velikosti, že by bylo potřeba větší napájecí napětí U_s , než může dodat napájecí zdroj, musí být použita metoda odbuzování. Protože řídit magnetický tok permanentních magnetů Φ_F není možné, dosahuje se účinku odbuzení nepřímo, zavedením složky proudu I_s v záporném směru osy d. Fázor statorového proudu I_s se v důsledku toho natočí proti ose q. Složka I_{sq} vytváří stejně jako při řízení v oblasti $n < n_N$ moment motoru.

Vzhledem k velké vzduchové mezeře je efekt odbuzování méně účinný než u klasických synchronních strojů.

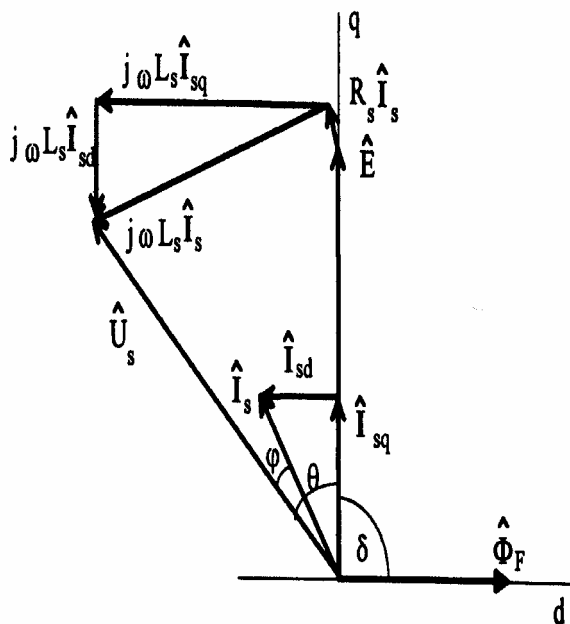
Při popsaném způsobu řízení musí být vždy dodrženy následující podmínky:

- Modul fázoru napájecího napětí musí nesmí překročit velikost, kterou je schopný dodat napájecí zdroj.
- Musí být dodrženy proudové omezení, vyplývající z dimenzování statorového vinutí.

$$I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2} \leq I_{SMAX}$$

I_{SMAX} - maximální statorový proud

Z uvedeného výrazu vyplývá, že při odbuzování dochází ke snížení momentu na hřídeli, protože generování složky I_{sd} potřebné pro odbuzování při zachování I_{SMAX} probíhá na úkor momentotvorné složky I_{sq} .



$$E = j \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Phi_F$$

$$U_s = U_{SMAX} = \text{konst}$$

$$E = \text{konst}$$

$$\omega \sim 1/\Phi_F$$

$$M \sim I_{sq}$$

$$\Phi_{Odb} \sim I_{sd}$$

Podmínky řízení:

$$U_s \leq U_{MAX}, \text{ tak aby:}$$

$$I_s = \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2} \leq I_{SMAX}$$

Závěr:

Pro $n > n_N$ se řídí natáčením fázoru I_s při $U = \text{konst}$.

Obr. 4 Fázorový diagram pro oblast vysokých otáček $n > n_N$

Souhrn způsobů řízení:

- ⇒ oblast nízkých otáček $I_{sqMAX} = I_{SMAX}$
- ⇒ oblast vysokých otáček $I_{sq} < I_{SMAX}$
 - ⇒ ⇒ s rostoucím I_{sd} klesá I_{sq} při $I_s = \text{konst}$.
 - ⇒ ⇒ ⇒ pokles momentu $M \sim I_{sq}$
- ⇒ řízení odbuzováním při $M = \text{konst} = M_{MAX}$
 - ⇒ ⇒ pouze pro krátkodobé provozní stavy
 - ⇒ ⇒ pro trvalý chod – řešení předdimenzovat stator

1.2 Oblast použití synchronních motorů s permanentními magnety

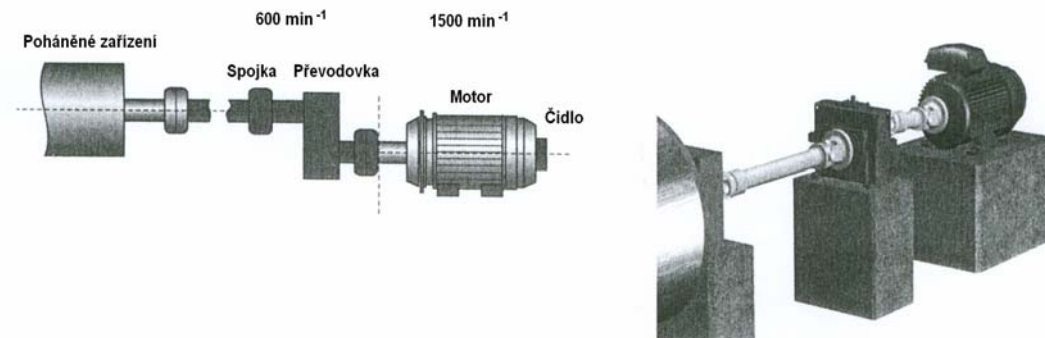
Servomotory

Oblast menších výkonů cca. do 10 kW. Rozhodujícími parametry jsou přenos informace (např. poloha), a vysoká dynamika, nikoliv účinnost.

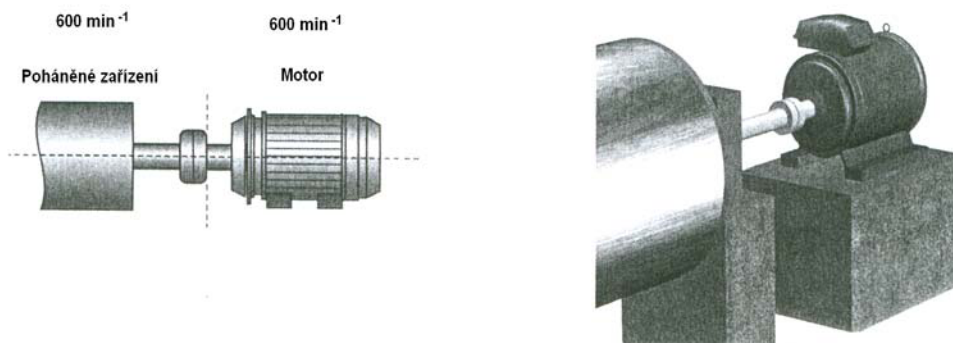
Pomaluběžné regulované pohony $n_N \leq 600 \text{ min}^{-1}$

Použití synchronních motorů s permanentními magnety pro pomaluběžné regulované pohony vychází ze snahy o maximální zjednodušení pohonu při současném zvýšení spolehlivosti a užitečných vlastností.

a)



b)



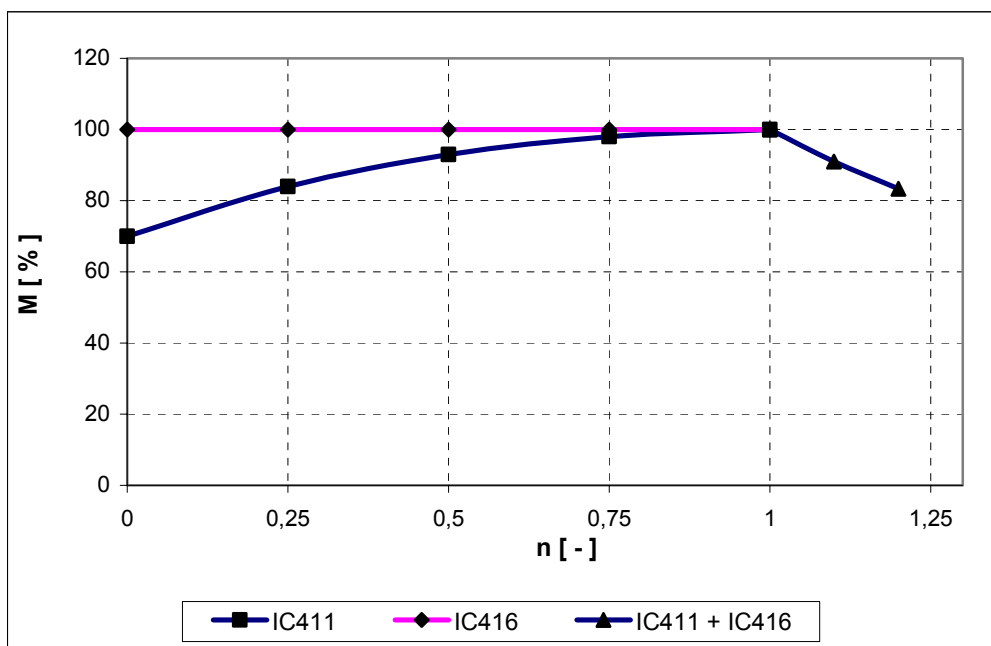
Obr. 5 Zjednodušení pohonu při použití motoru s permanentními magnety

Cíl – náhrada převodovky, zjednodušení pohonu, zvýšení spolehlivosti a účinnosti pohonu.

Oblast použití – papírenské stroje, extrudéry, elevátory, výtahy.

Provedení – obvykle je řada motorů navržena pouze s jedním konstantním počtem pólů (např. 12) pro každou typovou velikost. Změna jmenovitého pracovního bodu (jmenovitých otáček) je docílena posouváním bodu odbuzení ve fázi návrhu motoru, která je v závislosti na chlazení buď spojená s redukcí výkonu (motory s vlastním chlazením) nebo je bez redukce (motory s cizím chlazením). Jako výchozí zatěžovací křivku lze při tom použít zatěžovací křivku pro motor s nejvyššími jmenovitými otáčkami. Motor je proto vždy navržen na určitou polohu bodu odbuzení (kmitočet) ze které vyplývají jmenovité otáčky. Tím se dosáhne optimální velikosti (zmenšení) frekvenčního měniče. Kdyby tomu tak nebylo a motor měl konstantní polohu bodu odbuzení, tak by se výkon do motoru předával v proudu a frekvenční měnič, který se dimenzuje podle proudu, by byl zbytečně velký a tudíž drahý. Platí stejné zákonitosti viz. návrh frekvenčního měniče a motoru pro klasický regulovaný pohon.

Závěr – Synchronní motory s permanentními magnety se pro různé jmenovité otáčky, při přibližně stejné velikosti jmenovitého momentu motoru, neliší počtem pólů, ale polohou bodu odbuzení, tedy velikostí kmitočtu při kterém je dosažené jmenovité napětí. Pro konkrétní polohu bodu odbuzení má motor navržené vinutí.



Obr. 6 Zatěžovací diagram synchronního motoru s permanentními magnety

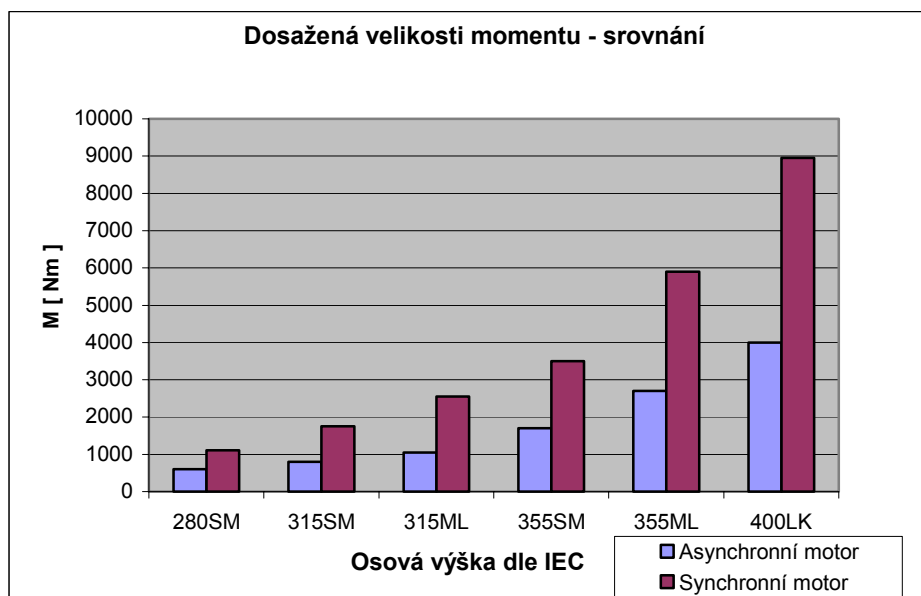
Přednosti pomaluběžného regulovaného pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety:

- permanentní magnety umístěné v rotoru budí konstantní magnetický tok v motoru. Magnetizační proud odebíraný ze sítě je minimální. Účinnost motoru je výrazně lepší než srovnatelného asynchronního motoru viz.Tab. 1, nezávisí na jmenovitých otáčkách motoru
- lepší účinnost a účinnost pohonu vedou při stejném výkonu k menšímu proudu motoru, ze kterého vyplývá menší typová velikost a cena frekvenčního měniče viz.Tab. 1

| Výkon [kW] | Synchronní motor | | | | Asynchronní motor | | | |
|-----------------|------------------|-----------|-------|----------|-------------------|-----------|-------|----------|
| | | Cos φ [-] | η [-] | m [kg] | | Cos φ [-] | η [-] | m [kg] |
| 57 | 280SM | 0,93 | 93,8 | 620 | 315MB | 0,83 | 92,5 | 895 |
| 88 | 315SM | 0,92 | 94,6 | 820 | 315LB | 0,82 | 93,7 | 1105 |
| 120 | 315ML | 0,91 | 95,2 | 1000 | 355MX | 0,82 | 94,3 | 1550 |
| 165 | 355SM | 0,96 | 95,6 | 1570 | 355LB | 0,81 | 94,6 | 1900 |
| 314 | 355ML | 0,90 | 95,8 | 1940 | 400LN | 0,80 | 95,8 | 3100 |
| 413 | 400LK | 0,96 | 96,7 | 2930 | 450LL | 0,80 | 96,1 | 4100 |

Tab. 1 Porovnání účinnosti a účinnosti u srovnatelných synchronních a asynchronních motorů 600 min⁻¹.

- synchronní motor s permanentními magnety má podstatně menší rozměry než srovnatelný asynchronní motor viz. Tab. 1, konstrukce motoru je však stejně robustní jako konstrukce klasického asynchronního motoru s kotvou nakrátko
- neobsahuje převodovku ⇒ jednodušší instalace, menší prostorové nároky, nevznikají ztráty v převodovce, odpadají možné poruchy převodovky
- cena převodovky s klasickým asynchronním motorem je srovnatelná s cenou synch. motoru
- synchronní motory umožňují větší přesnost řízení – nepracují se skluzem, nemusí mít zpětnou vazbu – odpadá u některých aplikací velmi náročná instalace čidel



Obr. 7 Porovnání velikosti jmenovitého momentu u synchronních a asynchronních motorů 600 min⁻¹ stejné konstrukční velikosti.

- moment na hřídeli je do jmenovitého kmitočtu konstantní, limitujícím faktorem je chlazení stejně jako u klasického asynchronního motoru

Závěr – výsledkem je motor, který v sobě spojuje robustní konstrukci asynchronního motoru s přesností synchronního motoru.

Nevýhody pomaluběžného regulovaného pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety:

- permanentní magnety budí trvale konstantní magnetický tok. Při samovolném protáčení vypnutého motoru se do statorového vinutí indukují napětí. Jeho velikost závisí na rychlosti otáčení.
- vnitřní napětí je při konstantním magnetickém toku ve vzduchové mezeře přímo úměrné rychlosti otáčení. Proto jsou maximální otáčky omezené na $n_{MAX} = 1.2 n_N$, jinak by mohlo dojít k poškození izolace.
- synchronní motor je citlivější na dodržování štitkového napětí než klasický AM. Příčina – viz. způsoby řízení.
- synchronní motor má menší momentovou přetížitelnost ($1,2 \div 1,7 M_N$) než klasický AM ($2 \div 2,7 M_N$). Při napájení klasického AM z FM je však jeho přetížitelnost definovaná proudovou přetížitelností FM, která má obvykle hodnotu 1,1 resp. 1,5 I_N (M_N).
- u motoru s permanentními magnety je třeba vždy pamatovat na to, že motor i ve vypnutém stavu je zdrojem magnetického pole.

2 Pohony s reluktančními motory

Princip funkce: Otáčivý moment motoru vzniká v důsledku rozdílných magnetických odporů magnetického obvodu, které jsou důsledkem nerovnoměrné vzduchové mezery nad póly statorového vinutí.

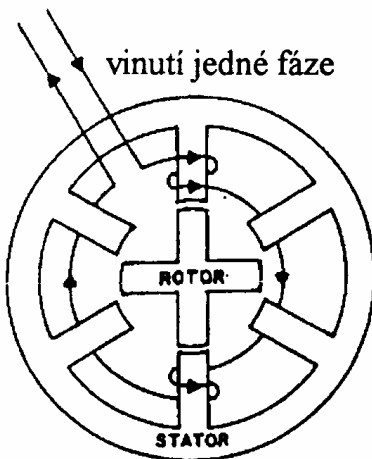
Rotor reluktančního motoru je složený pouze z vhodně tvarovaných plechů. Neobsahuje budicí ani jiné vinutí ani permanentní magnety. Klasický reluktanční motor má stejný počet pólů na statoru i rotoru.

Pro reluktanční moment platí výraz viz. Teorie synchronních strojů:

$$M_{REL} = \frac{3 \times p_p}{\omega} * \frac{U^2}{2} * \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) * \sin 2\beta$$

Velikost reluktančního momentu zásadně ovlivňuje poměr podélné X_d a příčné reaktance X_q , který u speciálně navržených rotorů může dosáhnout 5 až 10 násobku. I při tomto poměru je však reluktanční moment poměrně malý ve srovnání s jinými typy motorů. Reluktanční motory se stejným počtem pólů na statoru a rotoru se proto prakticky nepoužívají. Problém s velikostí vyvozaného momentu odstraňují spínané reluktanční motory.

2.1 Spínaný reluktanční motor (SRM)



Schématiký příčný řez spínaným reluktančním motorem

Spínaný reluktanční motor může být napájen vždy jen ze speciálního vícefázového napájecího zdroje. Pro motor je charakteristický rozdílný počet pólů na statoru a rotoru. K nejčastěji užívaným kombinacím patří poměry 3/2, 4/3, 5/4. Další výklad je provedený pro nejpoužívanější poměr 3/2, zároveň se předpokládá, že platí, že šířka pólu je vždy rovná jedné polovině příslušné pólové rozteče ($b_{PS} = \tau_{PS}/2$ a $b_{PR} = \tau_{PR}/2$). Stator má tedy 6 pólů, rotor 4 póly a obě části jsou složeny z plechů. Na statorových pólech je nasazeno 6 budicích cívek, které jsou zapojeny do 3 fází statorového vinutí, tj. dvě protilehlé cívky jsou zapojeny vždy tak, aby jejich mmf působilo ve směru magnetického obvodu a tvořilo jednu fázi.

Při otáčení rotoru se indukčnost cívek jedné fáze mění. Je-li pól statoru zcela nad pólem rotoru je objem vzduchové mezery mezi póly nejmenší a indukčnost fáze je největší (L_{MAX}). Naopak, nachází-li se pól statoru zcela mimo pól rotoru, je objem vzduchové mezery mezi oběma póly největší a indukčnost fáze je nejmenší (L_{MIN}). Protože šířka pólu rotoru je větší, než šířka pólu statoru, nemění se po určité době otáčení objem vzduchové mezery a indukčnost je po tuto dobu vždy prakticky konstantní.

Idealizovaný průběh $L=f(\varphi)$ jedné fáze statorového vinutí, kde φ je úhel natočení rotoru, je pro pootočení rotoru o 90° na Obr. 8. Pro pochopení průběhu indukčnosti si je třeba uvědomit - nezapomenout, že z rozdílného počtu pólů na statoru a rotoru (6/4) vyplývá různá skutečná šířka pólů ve stupních - stator 30° , rotor 45° .

Průběh lze proto podle úhlu natočení rotoru vůči statoru rozdělit na 4 úseky:

$0^\circ \div 15^\circ$ proti pólu statoru je vždy část pólu rotoru, tloušťka vzduchové mezery nad pólem je konstantní

indukčnost je maximální a konstantní

$15^\circ \div 45^\circ$ překrytí pólu statoru částí pólu rotoru se postupně zmenšuje, tloušťka vzduchová mezery nad pólem se postupně zvětšuje

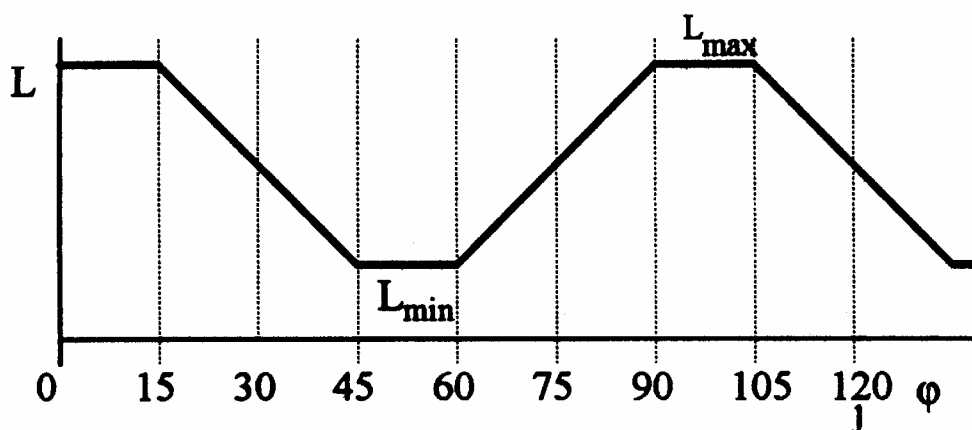
indukčnost lineárně klesá z maximální na minimální hodnotu, kterou dosáhne v 45°

$45^\circ \div 60^\circ$ proti pólu statoru není žádná část pólu rotoru, tloušťka vzduchová mezery nad pólem je konstantní

indukčnost je minimální a konstantní

$60^\circ \div 90^\circ$ pól statoru začíná postupně překrývat další pól rotoru, vzduchová mezera nad pólem se postupně zmenšuje

indukčnost lineárně stoupá z minimální na maximální hodnotu, kterou dosáhne v 90°



Obr. 8 Průběh indukčnosti jedné fáze budícího vinutí v závislosti na poloze rotoru vůči statoru

2.2 Způsob napájení motoru

Každá fáze je připojena na dvoukvadrantový elektronický stejnosměrný měnič pro jednu polaritu proudu a dvě polarity napětí zátěže. Schéma zapojení takového měniče je na Obr. 9. Obvod je tvořen dvěma elektronickými spínači V1, V2 a dvěma zpětnými diodami V11, V12. Jsou-li sepnuty oba spínače V1 a V2 je na fázi připojeno napětí zdroje v kladné polaritě a fází protéká proud ve směru propustnosti spínačů. Je-li sepnut pouze jeden ze spínačů, je vinutí fáze spojeno dokrátka a proud se uzavírá fází, sepnutým spínačem (např. V1) a diodou (V11). Pokud budou oba spínače vypnuty, bude na vinutí fáze do doby zániku proudu přes diody V11, V12 připojené napětí zdroje o záporné polaritě, které povede k rychlému zániku proudu.

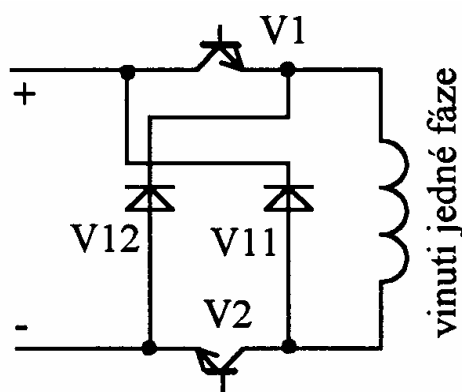


Schéma elektronického spínače jedné fáze SRM

Obr. 9 Schéma elektronického spínače jedné fáze pro SRM

Souhrn:

| | | |
|-----------|---------|----------------|
| V1 + V2 | + U | L je spotřebič |
| V1 + V11 | 0 (- U) | L je zdroj |
| V2 + V12 | 0 (- U) | L je zdroj |
| V11 + V12 | - U | L je zdroj |

Průběhy základních veličin

Pro okamžité hodnoty v jedné fázi platí:

$$u = R * i + \frac{d\Phi}{dt} \cong \frac{d\Phi(L, i)}{dt} = \frac{dL}{dt} * i + L \frac{di}{dt}$$

$$p = u * i = \frac{dL}{d\varphi} * \frac{d\varphi}{dt} * i^2 + L * i * \frac{di}{dt} = p_1 + p_2$$

První člen v rovnici - p_1 představuje okamžitý činný výkon

$$p_1 = \frac{dL}{d\varphi} * \omega * i^2$$

Druhý člen v rovnici - p_2 představuje energii pro nabíjení a vybíjení indukčnosti

$$p_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L * i^2 \right)$$

Pro okamžitý moment na hřídeli motoru proto platí

$$m = \frac{p_1}{\omega} = \frac{dL}{d\varphi} * i^2$$

Z rovnice pro výpočet momentu vyplývá, že okamžitá hodnota momentu na hřídeli závisí na velikosti změny indukčnosti L v závislosti na úhlu natočení rotoru a na druhé mocnině proudu fází.

Z hlediska způsobu napájení se rozlišuje napájení z napěťového a proudového zdroje.

2.2.1 Napájení ze zdroje napětí

Obr. 10 shrnuje průběhy základních veličin v závislosti na poloze rotoru, pro dva možné způsoby spínání napájení vinutí pomocí spínačů V1 a V2. Jednotlivé průběhy vyplývají z řešení výše uvedených diferenciálních rovnic pro okamžité hodnoty.

Stručné shrnutí:

Vstupní veličiny

Průběh indukčnosti – je identický s dřív vysvětleným průběhem viz. Obr. 8

Průběh napětí – vychází ze zvoleného způsobu řízení

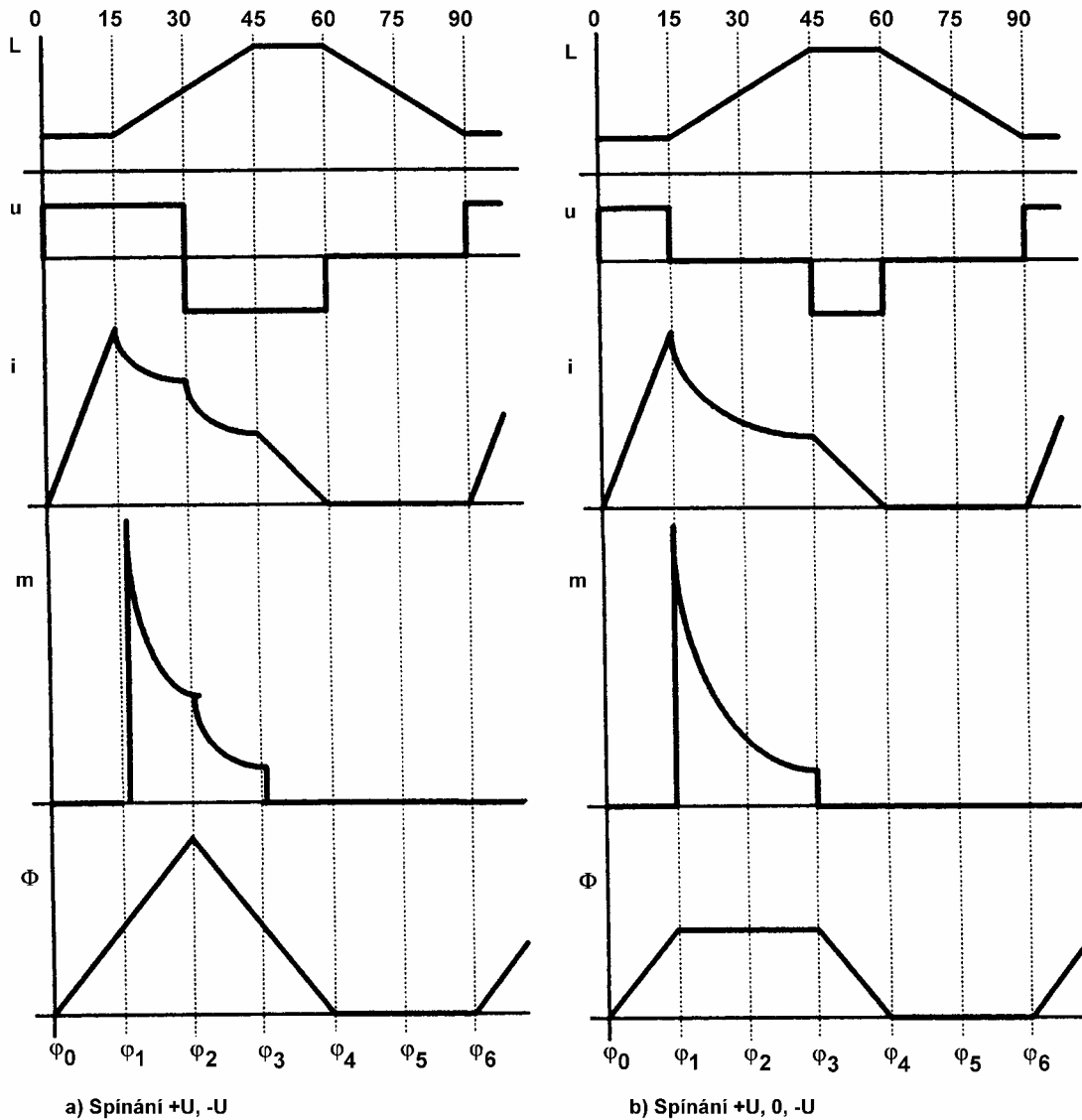
Výstupní veličiny

Způsob řízení a.

V prvním úseku $0 \div 15^\circ$, kdy je indukčnost vinutí minimální a konstantní (L_{MIN}), narůstá proud ve vinutí z nuly na maximální velikost L_{MAX} . Kladné napětí zůstává připojené i v dalším úseku $15^\circ \div 30^\circ$. V tomto úseku se již dochází ke změně indukčnosti L. V důsledku této změny se do obvodu indukuje napětí a

jeho důsledkem začne proud obvodem klesat. Při dosažení polohy 30° jsou spínače V1 a V2 vypnuty. Proud který protéká vinutím se začne uzavírat přes diody V11, V12 a na vinutí se tak objeví záporné napětí $-U$. Toto přepólování napětí zvýší strmost poklesu proudu a současně se změní i směr toku energie, tj. nyní se vrací energie z vinutí do zdroje. Při poloze 45° dosáhne indukčnost své maximální hodnoty L_{MAX} . Lze odvodit, že v tomto okamžiku proud poklesne na hodnotu

$$i = \frac{L_{min}}{L_{max}} * i_{max}$$

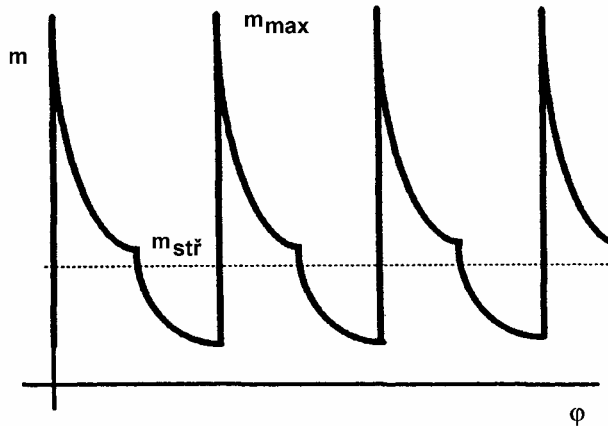


Obr. 10 Příklady průběhů indukčnosti L, napětí u, proudu i, momentu m a toku Φ - napětíový zdroj

V následujícím úseku $45^\circ \div 60^\circ$, kdy je indukčnost konstantní, dochází k lineárnímu poklesu proudu k nule. Konečně v posledním úseku mezi úhly $60^\circ \div 90^\circ$ neprotéká vinutím žádný proud.

Moment generovaný konkrétní fází vzniká pouze při změně indukčnosti tj. v rozmezí $15^\circ - 45^\circ$. V prvním okamžiku dosáhne maximální velikosti a dále prudce klesá. Poměr mezi maximální a střední hodnotou bývá až 10. V Obr. 10 je zakreslen také průběh magnetického toku Φ . Tok lineárně stoupá v rozmezí $0^\circ \div 30^\circ$ a lineárně klesá mezi úhly $30^\circ \div 60^\circ$.

Spínače zbývajících dvou fází jsou spínané shodným způsobem, pouze s časovým posunem odpovídajícím při dané rychlosti rotoru jeho otočení o úhel 30° ($\Delta t = \pi/(6*\omega)$). Na Obr. 11 je nakreslený časový průběh výsledného momentu na hřídeli. Je z něj patrné, že momenty od jednotlivých fází se navzájem vhodně střídají. Přesto je nerovnoměrnost momentu značná a projevuje se nejen zvýšeným namáháním spojky a dalších mechanických částí, ale i zvýšeným hlukem.



Obr. 11 Průběh celkového momentu

Časové průběhy napětí i proudu v jednotlivých fázích jsou nesinusové. Proto nelze určit účinník nebo činitel výkonu. Zavádí se proto poměrné číslo ER (Energy Ratio), které je definované

$$ER = \frac{W_P - W_V}{W_P}$$

W_P celková přivedená energie

W_V energie vrácená do zdroje

$W_P - W_V$ užitečná energie

Popsaný způsob řízení a má hodnotu ER kolem 0.9.

Způsob řízení b.

Spínače V1 a V2 se opět sepnou v poloze 0° a na vinutí je tím připojené kladné napětí U. V prvním úseku $0^\circ \div 15^\circ$, kdy je indukčnost vinutí minimální a konstantní L^{min} , narůstá proud ve vinutí lineárně z nuly na stejnou maximální velikost a jako u způsobu řízení a. V okamžiku dosažení polohy 15° je jeden ze spínačů vypnut a vinutí je spojeno dokrátka přes druhý spínač a příslušnou diodu. Protože se v tomto úseku mění indukčnost L, indukuje se v důsledku této změny do obvodu napětí, které urychluje zanikání proudu. Proud obvodem začne prudce klesat. Při dosažení úhlu 45° je vypnut i druhý spínač, proud se začne uzavírat přes diody V11, V12 a na vinutí se tak objeví záporné napětí zdroje $-U$ a energie se začne vracet z vinutí do zdroje. Při úhlu 45° ale dosáhla indukčnost současně i své maximální hodnoty L_{MAX} a proto opět platí výraz pro velikost proudu

$$i = \frac{L_{min}}{L_{max}} * i_{max}$$

V následujícím úseku mezi úhly $45^\circ \div 60^\circ$, kdy je indukčnost konstantní, dochází k lineárnímu poklesu proudu k nule. Konečně v posledním úseku neprotéká vinutím žádný proud.

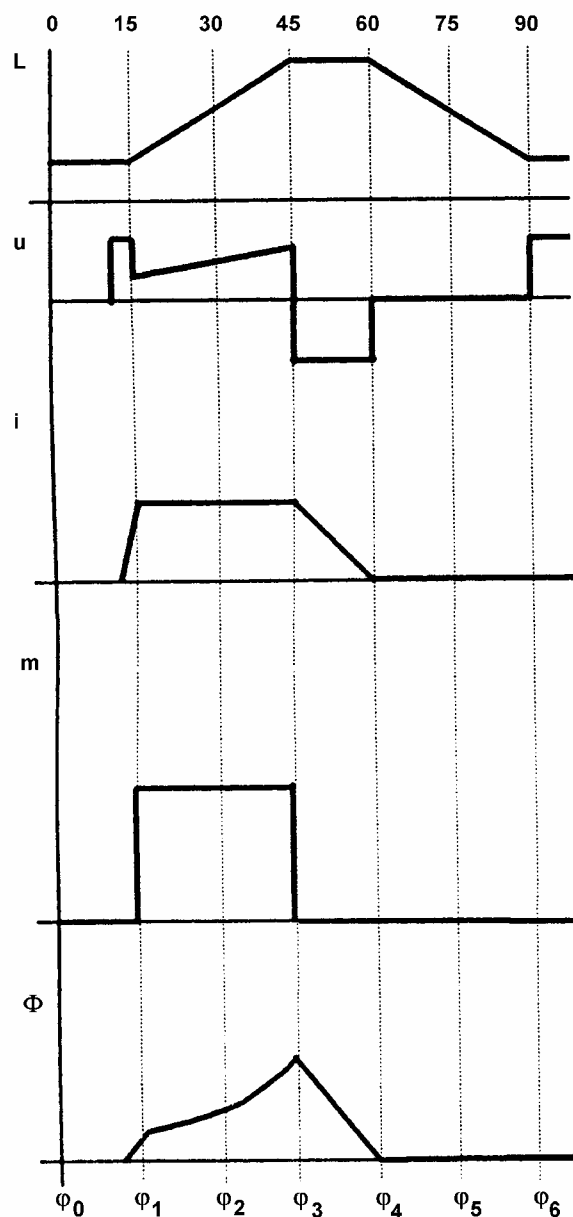
Z porovnání obou způsobů řízení je patrné, že při způsobu řízení typu b je průběh proudu a proto i momentu prakticky stejný. Podstatný rozdíl je však v průběhu magnetického toku, jehož maximální Pohony s motory s permanentními magnety, reluktančními motory, krokové motory

hodnota je poloviční. Protože velikost maximálního magnetického toku je rozhodující pro dimenzování magnetického obvodu, zdálo by se, že bude možné pro stejný moment zmenšit rozměry magnetického obvodu. Ve skutečnosti ale vychází nepříznivěji namáhání jha jak rotoru tak statoru a proto musí být jejich rozměry větší než při způsobu řízení a.

Oba uvedené způsoby řízení vycházejí z předpokladu napájení z napěťového zdroje, tj. průběh napětí je příčinou a průběh proudu důsledkem. Opačným případem je napájení z proudového zdroje, kdy vycházíme z vhodného zdroje proudu – tj. průběh proudu je příčinou a průběh napětí je naopak důsledkem.

2.2.2 Napájení ze zdroje proudu

Obr. 12 shrnuje průběhy základních veličin v závislosti na poloze rotoru. Jednotlivé průběhy vyplývají z řešení výše uvedených diferenciálních rovnic pro okamžité hodnoty.



Obr. 12 Příklady průběhů – okamžitých hodnot indukčnosti L , napětí u , proudu i , momentu m a toku Φ - proudový zdroj

Potřebná hodnota napájecího napětí je daná požadavkem na pokles proudu z hodnoty i_{MAX} v úseku mezi $45^\circ \div 60^\circ$, kdy je indukčnost vinutí maximální. Naopak k sepnutí spínačů může dojít podstatně později, protože k němu dochází při $L=L_{MIN}$ a požaduje se nárůst na stejný proud. Protože ale vlivem změny indukčnosti se do vinutí indukuje napětí, které se snaží tento proud zmenšit, musí spínače spínat tak, aby střední hodnota napájecího napětí toto indukované napětí eliminovala. Díky konstantnímu proudu v úseku mezi $15^\circ \div 45^\circ$ je průběh momentu konstantní, což je hlavní předností tohoto způsobu řízení. Naopak ER je velmi nízké, pohybuje se okolo 0.2.

Velká napěťová rezerva vyžaduje napěťové předdimenzování napájecího zdroje.

Podle podkladů různých výrobců je účinnost SRM pohonů plně srovnatelná s pohony s permanentními magnety a v porovnání se střídavými regulovanými pohony dokonce o 2% lepší. Díky jednoduché konstrukci rotoru lze dosáhnout vysokých otáček (až 100 000 ot/min), motory lze navrhovat i pro vysoké teploty okolí (500°C). Poměr hmotnosti a výkonu je příznivější než u běžných pohonů.

3 Krokové motory

3.1 Princip funkce

Motor pracuje na principu pohybu rotoru o definovaný počet kroků (poloh) rotoru na základě proměnného magnetického odporu vzduchové mezery. V každém kroku se rotor vždy snaží zaujmout takovou polohu, aby energie naakumulovaná v magnetickém obvodu byla co největší.

Ke změně polohy rotoru dojde v důsledku změny hodnoty proudu procházejícím „řídícím“ vinutím. Řízení je pouze dvouhodnotové +I, 0, -I.

3.2 Provedení motoru

Stator má vyniklé póly. Na každém pólu je umístěná jedna cívka řídicího vinutí, která při průtoku proudu vytváří magnetické pole. Statorové vinutí je zapojené jako dvoufázové, tj. cívky na pólech jsou rozdělené do dvou skupin. Póly jedné a druhé skupiny se navzájem střídají. Cívky každé skupiny jsou navzájem zapojené do série. Obě skupiny cívek pak tvoří dva navzájem galvanicky oddělené obvody.

Rotor má stejný počet pólů jako stator $2p_S = 2p_R$ a může být pasivní nebo aktivní.

Pasivní rotor má speciálně navržený tvar rotorových plechů s nerovnoměrnou vzduchovou mezerou.

Aktivní rotor má na rotoru konstrukčně uchycené permanentní magnety nebo jeden permanentní magnet s mnoha s pólovými nástavci.

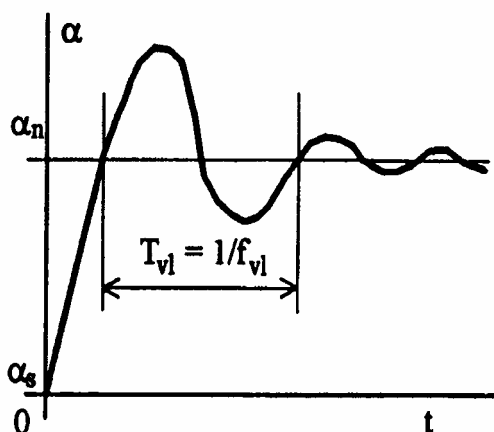
3.3 Řízení

Změna polohy rotoru se dosahuje změnou velikosti řídicího proudu. Na rozdíl od jiných typů pohonů je řízení pouze dvouhodnotové. Řídící proud může nabývat pouze hodnot +I, 0, -I (I je jmenovitá hodnota proudu proudového napájecího zdroje). Podle způsobu souslednosti změn velikosti proudu se rozlišuje čtyřtaktní a osmitaktní řízení.

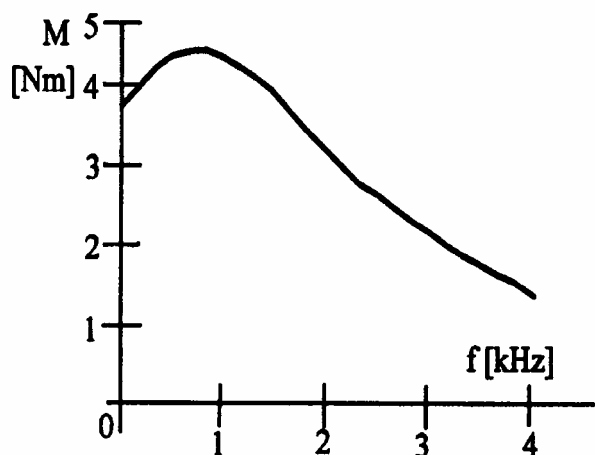
Při změně hodnoty řídicího proudu dojde k přechodnému jevu, který se projeví natočením rotoru do nové polohy s případným zakmitáním okolo této nové polohy – viz. Obr. 13. Frekvence těchto tlumených kmitů je vlastní frekvencí pohonu. Vlastní frekvence pohonu nesmí být rovná nebo blízká k frekvenci přepínání (krokování) nebo jejímu násobku. Pokud by tomu tak bylo, došlo by k vzájemné rezonanci, která by vedla ke ztrátě kroku nebo k zastavení motoru.

Rychlost krokování krokového motoru je tedy omezena:

- vlastní frekvencí pohonu a jejími násobky
- ze zhora poklesem velikosti momentu důsledkem omezené – konečné rychlosti nárůstu proudu di/dt v řídicím vinutí. Díky indukčnosti L „řídícího“ vinutí totiž nestačí při vyšších frekvencích řídicí proud narůst na svou jmenovitou hodnotu a v důsledku toho se sníží střední moment na hřídeli motoru viz. Obr. 14.



Obr. 13 Závislost průběhu změny natočení



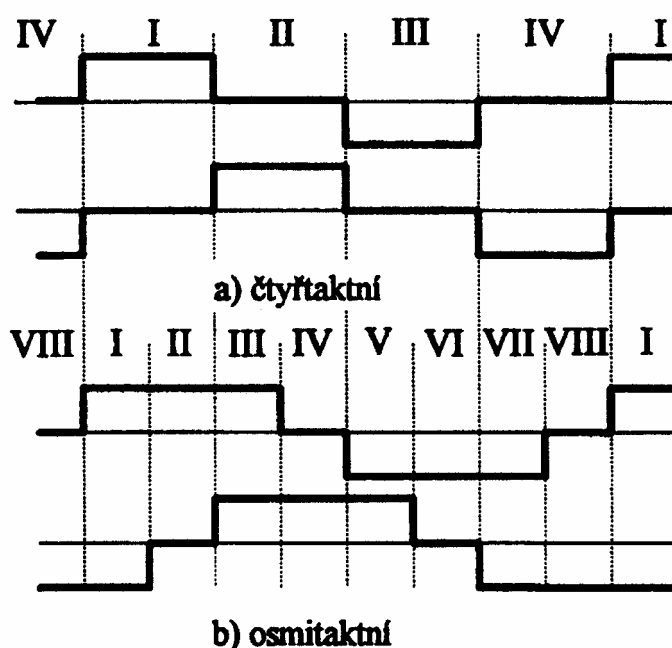
Obr. 14 Závislost momentu krokového motoru

Průběhy proudů v obou fázích řídicího vinutí, pro oba způsoby řízení, jsou uvedené v Obr. 15.

Při čtyřtaktním řízení se pravidelně střídají stavy napájení jedné nebo druhé fáze. Magnetické pole se při každém přepnutí posune o jeden krok, daný úhlem mezi dvěma sousedními póly. V době napájení jedné fáze je druhá fáze vypnuta. Teoreticky tedy nenastávají stavy, kdy by byly obě fáze napájeny současně. Prakticky ale vždy po krátkou dobu dochází k současnému vedení proudu v obou fázích – tento stav se nazývá komutací.

Při osmitaktním řízení je doba zapnutí třikrát delší, než je doba vypnutí $T_{ZAP} = 3 T_{VYP}$. V takovém případě kromě stavů, popsaných pro čtyřtaktní řízení nastávají ještě další čtyři stavy viz. Obr. 15, v nichž proudy protékají oběma skupinami vinutí. Mezi každou polohou magnetického pole při čtyřtaktním řízení tak vzniká další poloha. Získá se tak dvojnásobný počet poloh – dvojnásobná přesnost krokování.

Při vyšších spínacích frekvencích oba způsoby řízení splynou, protože skutečné proudy po přepnutí při čtyřtaktním řízení nestačí sledovat žádané proudy a doba komutace, která zůstává stále stejná, se relativně ke zkracující se délce proudového pulsu prodlužuje.



Obr. 15 Způsoby spínání fází krokového motoru.

4 Literatuta

Elektrické pohony, skriptum ČVUT, Pavelka J., Čeřovský Z., Javůrek J.

Drive^{IT} Low Voltage Permanent Magnet Motors M3000 Range, katalog ABB

Drive Low Voltage Permanent Magnet Motors for low speed applications, Technical Notes ABB

DYNASYS S, Getriebelose Aufzugsantriebe, katalog Loher GmbH