

VEKTOROVÉ ŘÍZENÍ VYSOKOotáčkového SYNCHRONNÍHO STROJE

Vector Control of High-Speed Synchronous Motor

Martin Novák

Abstrakt: Paper deals with torque control of high speed permanent magnet synchronous motor. Control structure which includes regimes with both full magnetic flux and flux weakening is described. Paper describes the research working place and presents test results achieved on 40 000 rev/min permanent magnet synchronous motor.

Key words: synchronous motor, vector control, high speed motor

1. Úvod

Technicky a zejména ekonomicky zajímavou možností pro výrobu tepla a současně elektrické energie je kogenerace. Při kogeneraci se využívá zdroj energie (např. spalovací motor, turbína) ke generování mechanické energie, která pohání generátor, a současně je odpadní teplo využíváno jako zdroj elektrické energie. Touto kombinací dochází ke zvýšení účinnosti celého procesu a snížení provozních nákladů na vytápění objektů. V současné době pomalu nastupující technologií je využití mikroturbíny ke kogeneraci. Výhodné je využít vysokorychlostních mikroturbín. Mikroturbína se vyznačuje relativně malým výkonem – ve srovnání např. s leteckými turbínami – řádově jednotky kW a vysokými otáčkami – okolo 100 tis. otáček/min. Zařízení se dále skládá z vysokorychlostního generátoru elektrické energie. Generátor je synchronní stroj s permanentními magnety nebo s budícím vnutím. Tento článek se dále zabývá vektorovým řízením takového vysokorychlostního stroje, který může pracovat jako motor (např. pro startování turbína) i jako generátor.

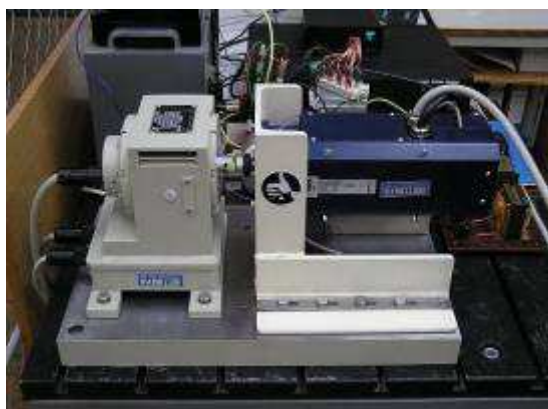
2. Výzkumné pracoviště

Pro účely výzkumu a testování statických a dynamických vlastností vysokorychlostního pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety bylo postaveno speciální zkušební pracoviště, navržené a realizované experimentální HW pro řízení. Testy HW byly prováděny na vysokootáčkovém frekvenčně řízeném asynchronním dynamometru 2,3kW, 350V, 70 000min⁻¹, 0,3Nm, dvoupólovém testovacím rychloběžném synchronním motorem s permanentními magnety 2,9kW, 400V, 40 000min⁻¹, 0,7Nm (obr.1). Vyvinutý HW se skládá z IGBT střídače (obr. 2), mikroprocesorového regulátoru synchronního motoru (obr.3) a

systemu pro vyhodnocení točivého momentu s tenzometrickým snímačem. Na základě doporučení výrobce motoru byly pro zmenšení zvlnění proudu synchronního motoru do série se statorovými vinutími zařazeny tlumivky s indukčností 2,4 mH. Synchronní motor má integrovaný dvoupólový resolver pro snímání úhlového natočení rotoru. Pro vyhodnocení úhlového natočení rotoru byla vyvinuta elektronická jednotka, která generuje budící signál resolveru 10kHz a poskytuje dvanáctibitové rozlišení polohy – 4096 poloh na otáčku. Po resetu regulátoru a v klidových stavech se přenáší informace o absolutní poloze rotoru do regulátoru prostřednictvím sériové sběrnice, při chodu pohonu se přenášejí informace o relativní poloze ve formě signálu IRC snímače. Další informace o systému snímání úhlového natočení jsou uvedeny v [2].

Při úvodních zkouškách byl k regulaci momentu použit systém s DSP TMS320F240. Při zkouškách v celém otáčkovém rozsahu 0 – 40 000 min⁻¹ byl použit DSP regulátor na bázi TMS320F2812. Spínací frekvence střídače byla při zkouškách s prvním řídicím systémem 5kHz, při zkouškách s novým řídicím systémem v celém otáčkovém rozsahu byla spínací frekvence 10kHz a frekvence výpočtu regulační struktury momentu 15kHz.

Při budování soustrojí nebyl dostupný dynamometr výkonově a otáčkově sladěný se zkoušeným motorem. Proto mohl být motor zatěžován jen přibližně do čtvrtiny jmenovitého momentu. I tak však bylo možno dobře ověřit možnosti pohonu.



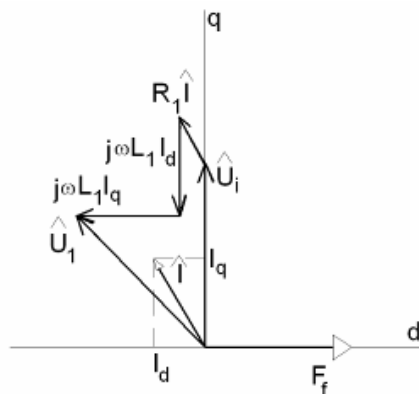
Obr.1 Rychloběžné soustrojí s asynchronním dynamometrem (vlevo) a synchronním motorem (vpravo)



Obr.2 Experimentální IGBT střídač pro vysokootáčkový pohon



Obr.3 DSP regulátor vysokootáčkového pohonu s TMS320F2812 s přídatnou kartou pro vyhodnocení úhlového natočení rotoru



Obr.4 Fázorový diagram synchronního stroje při regulaci momentu

3. Teoretický rozbor regulace moment

Ve sledované aplikaci vycházíme ze standardních metod používaných u pohonů s PMSM. Metody pro regulaci momentu synchronních strojů vycházejí ze základního vztahu:

$$M = 1.5 \cdot p_p \cdot (F_d \cdot i_q - F_q \cdot i_d) \quad (1)$$

F_d je složka magnetického toku v ose d, F_q je složka magnetického toku v ose q, i_d je složka proudu statoru v ose d, i_q je složka proudu statoru v ose q, p_p je počet pólových dvojic stroje. S použitím rovnic matematického modelu synchronního stroje lze tento vztah dále rozepsat do tvaru:

$$M = 1.5 \cdot p_p \cdot [(F_f + L_d \cdot i_d) \cdot i_q - L_q \cdot i_q \cdot i_d] = 1.5 \cdot p_p \cdot i_q \cdot (F_f + L_d \cdot i_d - L_q \cdot i_d) \quad (2)$$

F_f je magnetický tok rotoru, L_d je podélná indukčnost statorového vinutí a L_q je příčná indukčnost statorového vinutí. Jestliže pracuje stroj s plným magnetickým tokem, je složka proudu statoru i_d nulová a pro moment dostáváme vztah:

$$M = 1.5 \cdot p_p \cdot F_f \cdot i_q \quad (3)$$

Rovnice (3) vyjadřuje analogii se stejnosměrným strojem. Regulaci proudu a momentu synchronního stroje je možno provádět buď v transformovaných souřadnicích nebo regulací okamžitých hodnot fázových proudů ve vazbě na okamžitou polohu rotoru. V tomto případě je v režimu s plným magnetickým tokem generována žádaná hodnota proudu v dané fázi tak, že amplituda proudu v dané fázi nastává v okamžiku, kdy je rotor v kolmém postavení na osu vinutí této fáze. Žádané hodnoty proudů v jednotlivých fázích jsou posunuty vzájemně o 120° a jejich okamžitý úhel je dán polohou rotoru. Prostorový vektor proudu statoru předbíhá rotor o 90° . Regulace momentu prostřednictvím regulace okamžitých hodnot proudů ve fázích statoru byla implementována a testována ve spojení s regulátorem na bázi TMS320F240 při otáčkách do 10 000 min⁻¹. Po doplnění adaptace parametrů regulátorů a predikce určení akčních veličin – referenčních hodnot napětí na vstupech PWM modulátoru bylo dosaženo dobrých výsledků. Výsledky byly publikovány v [1]. V režimu se zeslabeným magnetickým tokem předbíhá prostorový vektor proudu statoru indukované napětí. Obecně, pro režim se zeslabeným magnetickým tokem a pro $L_d=L_q=L_1$, vystihuje situaci fázorový diagram na obr. 4. V případě režimu s plným magnetickým tokem je $i_d = 0$ a prostorový vektor proudu statoru leží v ose q. V obr.4 je R_1 odpor vinutí statoru, U_1 napětí statoru a U_i je indukované napětí.

4. Struktura regulace momentu a její implementace

Struktura regulace momentu PMSM použitá při zkouškách vysokootáčkového pohonu do 40 000min⁻¹ a implementovaná v regulátoru na bázi TMS320F2812 pracuje v pravoúhlé soustavě souřadnic d, q ve spojení s příslušnými transformačními bloky. Blokové schéma struktury je uvedeno na obr. 5. Jádrem regulační struktury představuje lineární vektorovou regulaci momentu synchronního motoru v pravoúhlé souřadnicové soustavě. Odděleně se reguluje momentotvorná složka statorového proudu i_q , jejíž žádaná hodnota je vypočtena ze

zadaného momentu a tokotvorná složka statorového proudu i_d , jejíž žádaná hodnota je v režimu s plným magnetickým tokem nulová. Skutečné hodnoty složek i_q , i_d jsou vypočteny z naměřených hodnot fázových proudů motoru s využitím informace o okamžitém úhlovém natočení rotoru φ podle standardních vztahů:

$$i_\alpha = i_U \qquad i_\beta = \frac{i_V - i_W}{\sqrt{3}} = \frac{i_U + 2i_V}{\sqrt{3}} \qquad (4)$$

$$i_d = i_\alpha \cos \varphi + i_\beta \sin \varphi$$

$$i_q = -i_\alpha \sin \varphi + i_\beta \cos \varphi$$

Výstupy regulátorů složek i_q , i_d představují složky statorových napětí u_q , u_d . Tyto složky jsou v transformačních blocích přepočítány na referenční hodnoty fázových napětí opět s využitím informace o okamžitém úhlu φ podle standardních vztahů:

$$u_\alpha = u_d \cos \varphi - u_q \sin \varphi$$

$$u_\beta = u_d \sin \varphi + u_q \cos \varphi \qquad (5)$$

$$u_U = u_\alpha$$

$$u_V = \frac{\sqrt{3} \cdot u_\beta - u_\alpha}{2}$$

$$u_W = -u_U - u_V$$

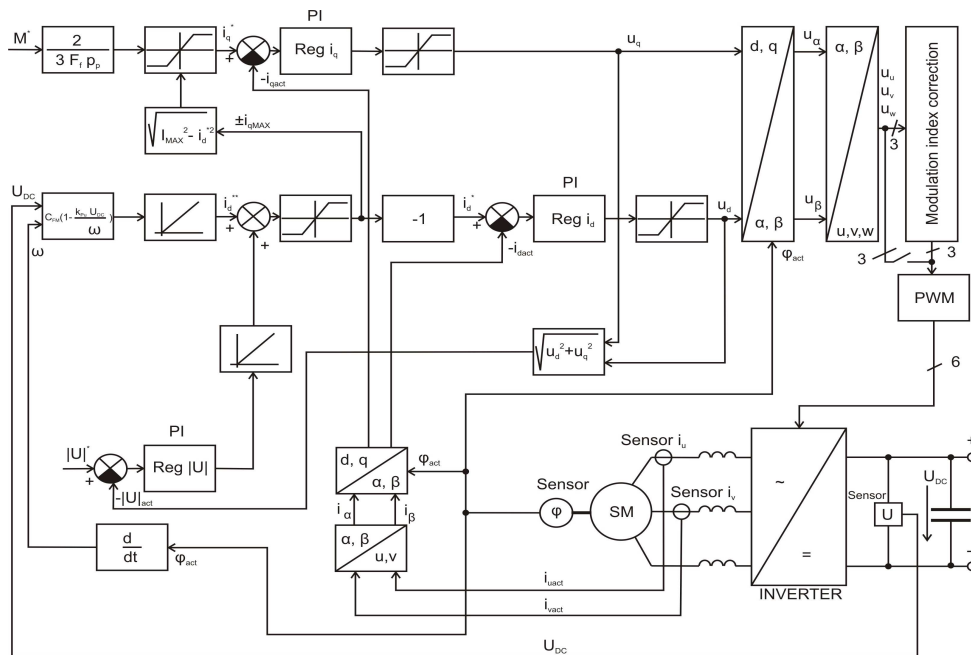
Základní regulační struktura je nadřazen algoritmus pro regulaci v režimu se zeslabeným magnetickým tokem. Systém v tomto režimu generuje nenulovou žádanou demagnetizační složku statorového proudu i_d^* tak velkou, aby se amplituda referenčních napětí zadávaných do PWM modulátoru udržovala na nastavené hodnotě (při zkouškách bylo nastaveno přibližně 85% maximální hodnoty). Žádaná hodnota i_d^* je určena jako součet výstupu PI regulátoru amplitudy vstupních referenčních napětí PWM modulátoru a výpočtového bloku, který určuje velikost i_d^{**} výpočtem pro případ chodu naprázdno, tj. pro kompenzaci té části indukovaného napětí motoru, která převyšuje maximální výstupní napětí střídače pro dané vstupní stejnosměrné napětí střídače a pro dané otáčky. Přírůstek indukovaného napětí, který je po přechodu do režimu se zeslabeným magnetickým tokem potřeba eliminovat složkou i_d^{**} je dán vztahem:

$$\Delta U_i = L_d \cdot i_d \cdot \omega = k_\Phi \cdot F_f \cdot (\omega - \omega_{pr}) \qquad (6)$$

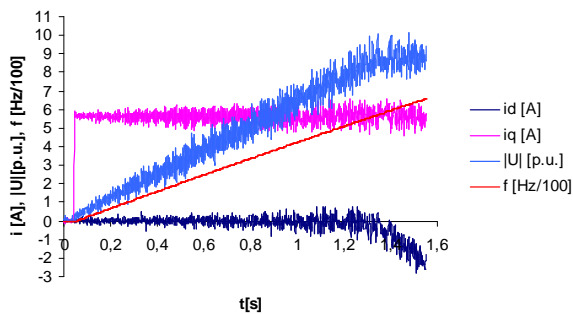
V tomto vztahu je L_d indukčnost statoru, ω je mechanická úhlová rychlost, k_Φ je konstanta motoru určující závislost mezi indukovaným napětím, magnetickým tokem rotoru a otáčkami a ω_{pr} je úhlová rychlost, při které nastává přechod do režimu se zeslabeným tokem při daném vstupním napětí střídače ve stavu na-prázdko.

5. Příklady výsledků testovacích měření

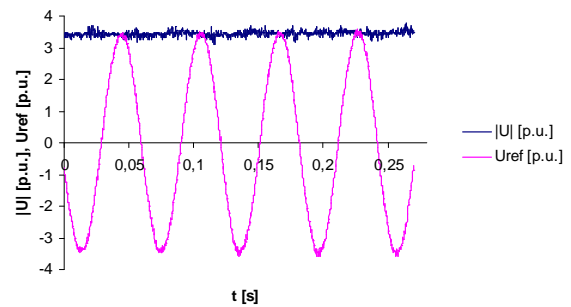
V následujícím odstavci je uvedeno několik průběhů, které byly naměřeny na realizovaném experimentálním pohonu. Byly prováděny zejména zkoušky, při kterých se motor rozbíhal naprázdno při různých momentech a dále zkoušky při zatížení, při kterých byly otáčky udržovány na konstantní hodnotě prostřednictvím zpětnovazební smyčky dynamometru.



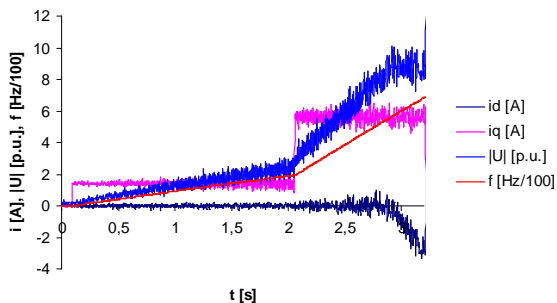
Obr.5 Bloková struktura regulace momentu vysokootáčkového pohonu



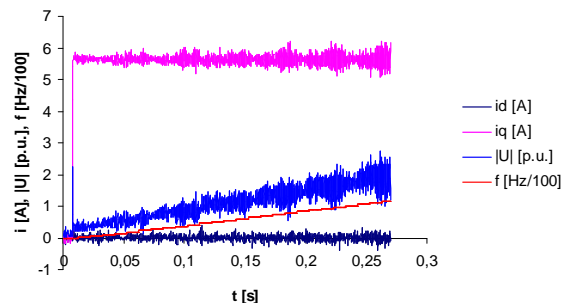
Obr.6 Průběhy složek i_d , i_q , amplitudy referenčního napětí a otáček (frekvence) při rozběhu naprázdno na $40\,000\text{ min}^{-1}$ při momentu $0,44\text{Nm}$ bez korekce modulačního indexu



Obr.7 Časový průběh referenčního napětí zadávaného do PWM modulatoru a amplitudy první harmonické – bez korekce modulačního indexu



Obr.8 Průběhy složek i_d , i_q , amplitudy referenčního napětí a otáček (frekvence) při rozběhu na-prázdně na $40\,000\text{ min}^{-1}$ při momentu $0,11\text{Nm}$ následně změněném na $0,44\text{Nm}$



Obr.12 Detail zahájení rozběhu pohonu naprázdno při momentu $0,44\text{Nm}$

Na obr. 6 jsou uvedeny průběhy veličin pohonu při rozběhu naprázdno z 0 na 40 000 min⁻¹ při momentu 0,44Nm ($i_q=5,7A$) bez korekce zvyšující modulační index. Fialovou barvou je znázorněn průběh skutečné hodnoty složky i_q , tmavě modrou barvou je znázorněn průběh skutečné hodnoty složky i_d , průběh otáček je znázorněn červeně (v měřítku Hz/100), průběh amplitudy referenčního napětí zadávaného do PWM modulátoru v poměrných jednotkách (maximum=10) je modrý. Z obrázku 7 jsou zřejmé průběhy referenčních napětí na vstupu PWM modulátoru bez korekce modulačního indexu. Na obrázku 8 je příklad dalších průběhů složek i_d , i_q , amplitudy referenčního napětí a otáček při rozbězích naprázdno – bez korekce modulačního indexu. Při těchto rozbězích byla měněna žádaná hodnota momentu, to se projeví i na změně rychlosti vzrůstu otáček. Na obrázku 9 je detail průběhů veličin pohonu sejmuté v krátkém čase. Na obr. 9 je detail zahájení rozběhu naprázdno při momentu 0,44Nm (i_d , i_q , amplituda referenčního napětí a otáčky).

6. Závěr

Výsledky testovacích měření uvedené v předcházejícím odstavci dokládají plnou funkčnost a dobré regulační vlastnosti pohonu. Pouze při velmi rychlých rozbězích se projeví určité zpoždění regulační smyčky amplitudy referenčního napětí. Vzhledem k tomu, že jedná jen o vysoce dynamické stavy a ve sledované aplikaci se nepředpokládá velká míra využití režimu se zeslabeným magnetickým tokem, není toto zpoždění regulační smyčky zásadním problémem.

Acknowledgement

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu MSM6840770035

References

- [1] Čerovský Z., Novák J., Novák M., Čambál M.: Digital Controlled High Speed Synchronous Motor, Conference EPE PEMC, Poznaň, Polsko 2008.
- [2] Čambál, M. - Novák, M. - Novák, J.: Study of Synchronous Motor Rotor Position Measuring Methods. 13th International Conference on Electrical Drivers and Power Electronics. Zagreb, Chorvatsko: KoREMA, 2005
- [3] Lettl, J., Fligl, S.: Matrix Converter in Hybrid Drives. Sborník z 8th International Conference "Problems of Present-day Electrotechnics, PPE 2004", Vol. 3, , Kyiv, 2004

Kontaktní adresa

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, odbor elektrotechniky, Technická 4, 166 07 Praha, Česká republika, tel: +420 2 2435 2573, E-mail: Martin.Novak2@fs.cvut.cz