

VYSOKORYCHLOSTNÍ SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY – REGULACE MOMENTU

High-speed Permanent Magnet Synchronous Motors – Torque Control

Martin Novák, Marek Čambál, Jaroslav Novák

Abstrakt: Příspěvek se zabývá problematikou regulace momentu vysokootáčkových synchronních motorů s permanentními magnety určených především pro náhradu neelektrických pohonů v automobilní technice. Jsou diskutovány různé přístupy k tvorbě regulační struktury pro vysokootáčkový pohon. Je prezentována navržená a realizovaná jednoduchá metoda založená na predikci průběhů okamžitých hodnot statorových napětí z úhlového natočení rotoru, z okamžité rychlosti a žádané hodnoty proudu. Jsou uvedeny výsledky testů pohonu s navrženou strukturou.

Key words: Permanent Magnets Synchronous Motor, High-speed, Torque Control

1. Úvod

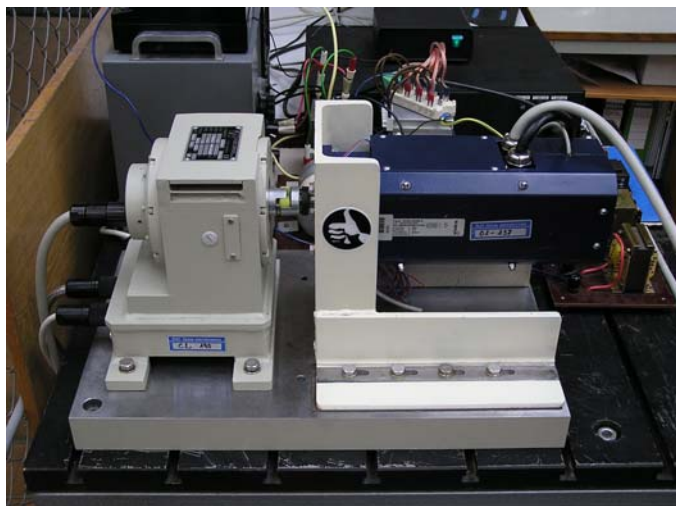
V současné technice pohonů a energetických systémů se ve velké míře začínají uplatňovat řešení založená na zvyšování výkonu při zachování malých rozměrů a hmotnosti zařízení cestou provozu při vysokých rychlostech. V oblasti pohonů se často jedná o neelektrické systémy.

Jednou z etap činnosti ve Výzkumném centru spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka na ČVUT v Praze, Fakultě strojní je výzkum možností náhrady některých neelektrických pohonů v automobilní technice pohony elektrickými. V oblasti vysokootáčkových pohonů je věnována velká pozornost například pohonu turbokompresoru, kde se předpokládá pokrytí otáčkového rozsahu od 40 000 min⁻¹ (u velkých pohonů např. pro traktory a nákladní automobily) až do 120 000 min⁻¹ pro pohony nižších výkonů. Výkony těchto pohonů dosahují desítek kW. V těchto aplikacích se při použití elektrického pohonu předpokládá zejména dosažení výrazně lepší dynamiky při regulaci momentu. V kontextu s požadavky na minimální rozměry a hmotnost pohonu, maximální účinnost a dobré momentové vlastnosti se jako nejperspektivnější jeví použití synchronního motoru s permanentními magnety. Na trhu jsou běžně dostupné elektronicky komutované motory pro otáčkový rozsah do 50 000 min⁻¹ s výkony desítek až stovek W a s účinnostmi až 90%.

Regulace těchto motorů je zpravidla prováděna na základě vyhodnocování šesti poloh za otáčku pomocí jednoduchého čidla nebo prostřednictvím vyhodnocování průchodu indukovaného napětí motoru nulou.

Na ČVUT v Praze byl postaven zkušební stav s asynchronním vysokootáčkovým dynamometrem. V současnosti je stav osazen synchronním motorem s permanentními magnety 2,9kW, 40 000 min⁻¹ se snímáním úhlového natočení rotoru pomocí resolveru. To dává předpoklady pro ověřování preciznějších regulačních struktur s výkonnějším motorem ve srovnání s běžnými velkosériově vyráběnými elektronicky komutovanými motory.

Na Odboru elektrotechniky Fakulty strojní se věnujeme implementacím regulačních struktur momentu synchronních strojů a v rámci Výzkumného centra byla zaměřena pozornost i na vysokootáčkové pohony, zejména v automobilní technice. Předpokládáme však, že vyvinuté algoritmy řízení vysokootáčkových strojů budou použitelné v širší aplikační sféře. Zkoušky probíhají na výše uvedeném zkušebním stavu.



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

testovacím rychloběžným synchronním motorem s permanentními magnety 2,9kW, 400V, 40 000min⁻¹, 0,7Nm (obr.1), IGBT střídačem a mikroprocesorovým regulátorem synchronního motoru a systémem pro vyhodnocení točivého momentu s tenzometrickým snímačem. Pro zmenšení zvlnění proudu synchronního motoru byly do série se statorovým vinutím zařazeny tlumivky s indukčností 2,4mH. Synchronní motor má integrovaný dvoupólový resolver pro snímání úhlového natočení rotoru. Pro vyhodnocení úhlového natočení rotoru byla vyvinuta elektronická jednotka, která generuje budicí 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 paralelní 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 [1].

2. Zkušební pracoviště

Pro účely testování statických a dynamických vlastností vysokorychlostního pohonu se synchronním motorem s permanentními magnety bylo v rámci Výzkumného centra spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka postaveno speciální zkušební pracoviště. Pracoviště je tvořeno vysokootáčkovým frekvenčně řízeným asynchronním dynamometrem 2,3kW, 350V, 70 000min⁻¹, 0,3Nm, dvoupólovým

3. Teoretický rozbor lineární regulace momentu

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. Souřadnicová soustava je osou d vázána na magnetický tok rotoru, tj. její poloha je dána polohou rotoru. Při regulaci momentu není složka i_d statorového proudu potřebná, neboť magnetický tok v ose d, který je nutný pro vznik točivého momentu, je buzen permanentními magnety. Proto se tedy proud reguluje tak, aby předbíhal polohu rotoru a magnetického toku o 90° , aby tedy byl souosý s indukovaným napětím. Za tohoto předpokladu platí pro moment vztah:

$$M = 1.5 \cdot p_p \cdot F_d \cdot I \quad (2)$$

kde I je efektivní hodnota proudu statoru. Celkový statorový proud je totožný se složkou i_q .

4. Použitá struktura zpětnovazební regulace momentu

Při tvorbě struktury regulace momentu se vycházelo z předchozích prací, které byly ve Výzkumném centru prováděny v oblasti řízení synchronních strojů - [2], [3], [4].

Lineární regulace s regulátory ve všech fázích, kdy je výstup regulátoru zadáván jako poměrné napětí u_R na vstup PWM modulátoru v dané fázi střídače, měla nenulovou střední hodnotu žádaných hodnot fázových napětí u_R . Dále byl upraven výstup regulátoru podle vztahu:

$$u_R = R \cdot i + L \cdot di / dt + u_i = u_{PI} + u_i \quad (3)$$

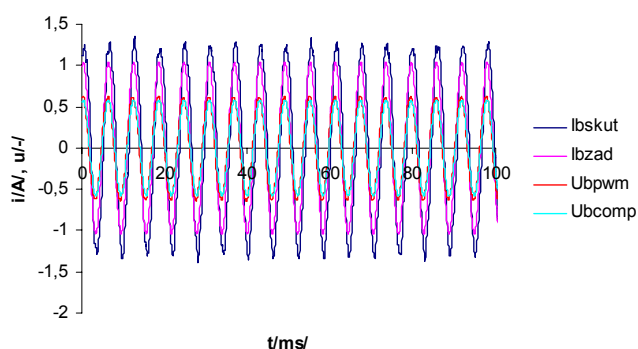
R a L jsou odpor a indukčnost statorového vinutí ($L_d=L_q=L$), u_R je poměrné napětí ve fázi, u_i je indukované napětí, i je proud a u_{PI} je výstup regulátoru fázového proudu. Vztah (3) je napěťovou rovnicí vinutí fáze statoru. Je z něho zřejmé, že regulátor v principu reguluje proud RL článku, tj. soustavy prvního řádu. Popsaná kompenzace vlivu indukovaného napětí při regulaci fázových proudů má podobnou funkci jako člen odvázení při regulaci v transformované souřadnicové soustavě.

Jak bylo uvedeno v [3], kvalita regulace nebyla po výše uvedených úpravách stále dostatečná vzhledem k odlišným vlastnostem při různých otáčkách a při stálém nastavení proporcionalní a integrační konstanty regulátoru. Proto byla implementována adaptace konstant regulátorů podle vztahů:

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + C_{p1} \cdot \Delta i_{set} / \Delta t + C_{pu} \cdot u_i \\ K_I &= K_{I0} + C_{I1} \cdot \Delta i_{set} / \Delta t + C_{Iu} \cdot u_i \end{aligned} \quad (4)$$

K_P je aktuální hodnota proporcionální konstanty regulátoru, K_I je aktuální hodnota integrační konstanty, K_{P0} je proporcionální konstanta odpovídající optimálnímu nastavení pro nízké frekvence, K_{I0} je integrační konstanta odpovídající optimálnímu nastavení pro nízké frekvence, C_{P1} a C_{I1} jsou konstanty odpovídající váhám derivace žádané hodnoty proudu v aktuální proporcionální resp. integrační konstantě, Δiset je změna žádané hodnoty proudu za periodu výpočtu regulátoru, Δt je perioda výpočtu regulátoru. C_{Pu} a C_{Iu} jsou váhy okamžité hodnoty indukovaného napětí u_i v dané fázi v aktuálních hodnotách konstant regulátorů.

Dosud popisované postupy zdokonalování regulační struktury byly prováděny na synchronním stroji 4kW, 1500min⁻¹, 50Hz a na tomto stroji bylo dosaženo dostatečné kvality regulace, jak je detailně prezentováno v [3]. Při prvních testech regulační struktury s vysokootáčkovým pohonem se ukázalo, že kvalita regulace je dostatečná jen do otáček přibližně 5000min⁻¹. Při dalším zvyšování rychlosti ze začalo projevovat úhlové zpoždění skutečných hodnot fázových proudů (v obr.2 I_{bskut}) za žádanými hodnotami (v obr. 2 I_{bzad}) a vyskytovala se velká regulační odchylka v oblasti amplitudy proudu. Zlepšení kvality regulace nebylo dosaženo žádnou modifikací konstant regulátorů ani vah adaptace těchto konstant.



Obr. 2 Průběhy skutečné (modrá) a žádané (fialová) hodnoty proudu ve fázi, napětí zadávaného do PWM modulátoru (červená) a kompenzačního napětí (světle modrá) bez kompenzace vlivu indukčnosti, $n=10\ 000\text{min}^{-1}$, $M=0,08\text{Nm}$

V případě rychloběžného pohonu se v širokých mezích mění frekvence statorového proudu a tím i velikost úbytku napětí na indukčnosti statoru a přidavných tlumivek $\omega L_1 I$. Regulační struktura byla doplněna o kompenzaci tohoto vlivu. V modifikované struktuře je napětí zadávané do PWM modulátoru vypočítáváno jako součet regulátoru okamžité hodnoty fázového proudu a kompenzačního napětí. Toto kompenzační napětí je vypočteno z průběhu okamžité hodnoty indukovaného napětí tak, že

kompenzační napětí předbíhá indukované napětí o úhel, jehož velikost roste přímo úměrně s napájecí frekvencí a velikostí žádaného momentu, resp. s efektivní hodnotou žádaného proudu. Výpočet úhlu probíhá podle vztahu:

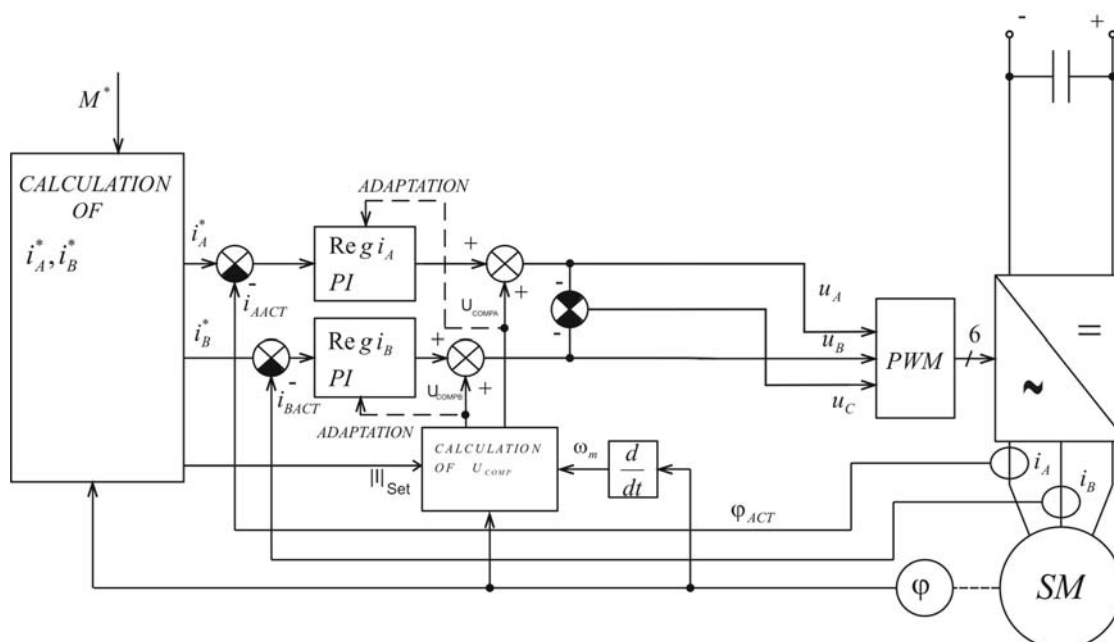
$$\varphi_U = \varphi_{U_i} + k \cdot I \cdot \omega \quad (5)$$

Závislost úhlu předstihu kompenzačního napětí před napětím indukovaným na proudu a frekvenci koresponduje se závislostí úbytku napětí na indukčnosti statorového obvodu na proudu a frekvenci.

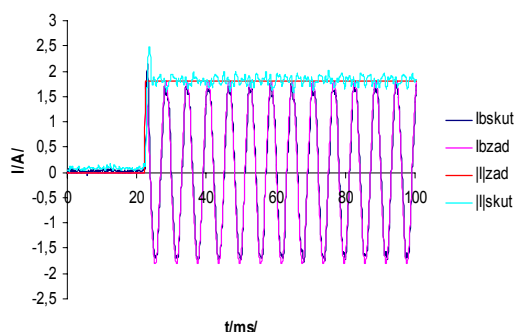
Blokové schéma regulační struktury je na obr. 3. Při řízení střídače byla využita symetrická asynchronní šířkově pulsní modulace s frekvencí 5kHz. S touto frekvencí bylo synchronizováno taktování výpočtu regulační struktury. Vzorkovací perioda výpočtu regulátoru odpovídá periodě aktualizace vstupů šířkově pulsního modulátoru při symetrické šířkově pulsní modulaci, tj. 100 μs . Se stejnou periodou je vyhodnocována i aktuální poloha rotoru stroje.

5. Výsledky testovacích měření

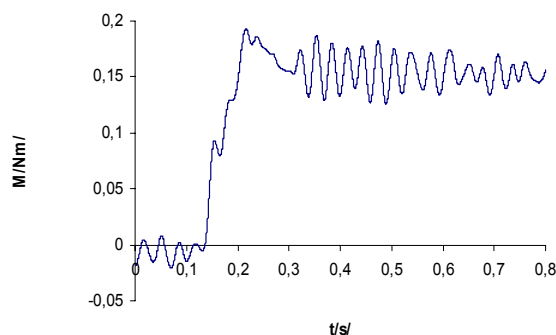
Na zkušebním pracovišti byla provedena řada testovacích měření v ustálených stavech i přechodných jevech. Vzhledem ke sledované aplikační sféře, tj. pohon turbokompresoru, a vzhledem k omezenému momentu dynamometru byl pohon testován jen v motorickém režimu. Při zkouškách byl dynamometr provozován v režimu otáčkové regulace, testovaný synchronní motor v režimu momentové regulace. Dosud byly zkoušky prováděny do otáček cca. 10000min^{-1} . Na následujících obrázcích jsou znázorněny průběhy žádaných (I_{bzad}) a skutečných (I_{bskut}) hodnot fázových proudů a amplitud fázových proudů - $|I|_{\text{zad}}$ - žádaná, $|I|_{\text{skut}}$ - skutečná - a momentu při přechodných jevech při změnách žádaných hodnot. Časové průběhy momentu na obr. 5 jsou změřeny tenzometrickým snímačem, který vyhodnocuje mechanickou reakci statoru dynamometru.



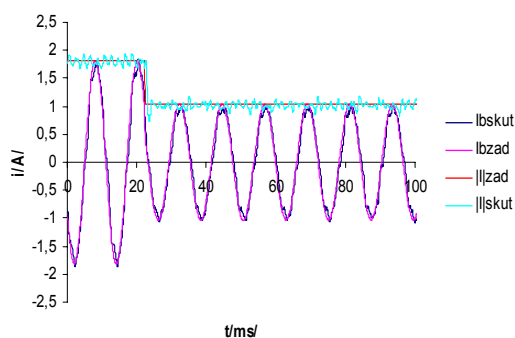
Obr. 3 Použitá struktura regulace rychloběžného motoru



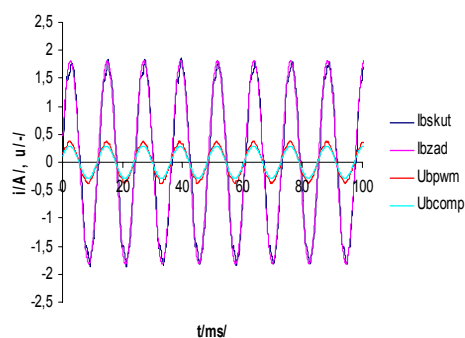
Obr. 4 Skok žádané hodnoty amplitudy proudů z 0 na 1,8A (0,14Nm) při $n=10\,000\text{min}^{-1}$



Obr. 5 Skok žádané hodnoty amplitudy proudů z 0 na 1,8A (0,14Nm) při $n=10\,000\text{min}^{-1}$ - záznam časového průběhu momentu sejmутý tenzometrickým snímačem



Obr. 6 Skok žádané hodnoty amplitudy proudu z 1,8A na 1A ($M=0,14 \rightarrow 0,08 \text{Nm}$) při $n=5000 \text{min}^{-1}$



Obr. 7 Průběhy žádané a skutečné hodnoty proudu a napětí na vstupu PWM modulátoru a kompenzačního v ustáleném stavu při 5000min^{-1} a $0,14 \text{Nm}$

6. Závěr

Jak je zřejmé z naměřených průběhů, je kvalita regulace momentu pomocí popsané struktury dobrá v ustáleném stavu i v přechodných dějích při zachování jednoduchého řídicího algoritmu. Odladěná regulační struktura je v principu založena na predikci přibližného průběhu okamžitých hodnot napětí ve fázích statoru vypočtených z úhlového natočení rotoru, rychlosti otáčení a žádané hodnoty momentu. Regulátory proudů ve dvou fázích statoru zabezpečují pak jen menší korekce regulačních odchylek. Popsaná metoda je algoritmicky a regulačně nenáročná, má dobré regulační vlastnosti, avšak je vhodná jen pro aplikace, kde se nevyžaduje režim generátorického brzdění.

V současnosti připravujeme nasazení výkonnějšího regulátoru na bázi TMS320F2812. V souvislosti s použitím výkonnějšího regulátoru plánujeme zvýšení frekvence PWM na 20kHz a testování motoru při otáčkách do $40\,000 \text{min}^{-1}$.

References

- [1] Čambál, M. - Novák, M. - Novák, J.: Study of Synchronous Motor Rotor Position Measuring Methods. In 13th International Conference on Electrical Drivers and Power Electronics. Zagreb, Croatia: KoREMA, 2005, p. 62-66. ISBN 953-6037-42-4.
- [2] Novák, M. - Čambál, M. - Novák, J.: Application of Sinusoidal Phase Current Control for Synchronous Drives. In ISIE 2006 International Symposium on Industrial Electronic [CD-ROM]. Montreal, Canada: IEEE Industrial Electronic Society, 2006, ISBN 1-4244-0497-5.
- [3] Čambál M. - Novák M. - Novák J.: Possibilities to Increase the Quality of Phase Current Control for Synchronous Motors, The 15th Mediterranean conference on Control and Automation - MED 07 - 27. - 29.6. 2007, Athina, Grece
- [4] Čambál, M. - Novák, M. - Novák, J.: Synchronous Motors Phase Current Adaptive Control. In *Proceedings of the 8th International Carpathian Control Conference*. Košice: Technical University, BERG Faculty, 2007, p. 91-94. ISBN 978-80-8073-805-1.