

MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNET

Petr Fajkus

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xfajku01@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Petr Huták

E-mail: hutak@feec.vutbr.cz

Abstract: This project is dealing with vector control of permanent magnet synchronous motor simulation. Mathematical description of motor is in dq reference frame. Basic electrical and mechanical equations taking into account the saturation of magnetic circuit are used. Control design is performed for maximum speed range with the most possible torque.

Keywords: synchronous motor, permanent magnet synchronous motor, synchronous motor field-weakening, synchronous motor field oriented control

1. ÚVOD

Synchronní motory s permanentními magnety na rotoru jsou využívány v řadě aplikací. Tvorba matematického modelu motoru je vhodná pro simulace různých provozních stavů. Rotor synchronního motoru se otáčí synchronně s točivým polem statoru, proto je velmi vhodné použít řízené měniče. Stroje mohou mít stejnou příčnou a podélnou indukčnost, nebo rozdílnou. Pro konkrétní pohon s tímto motorem je nutné navrhnout správný algoritmus řízení. Všeobecně se používá tzv. vektorové řízení. Rozeznávají se dvě základní oblasti chodu synchronního motoru. Jedna oblast je pro otáčky v rozmezí od nuly až po základní (jmenovité) otáčky, druhá oblast je pro otáčky vyšší (mluvíme o odbuzování). Pro každou oblast jsou jiná kritéria řízení. Kritéria jsou závislá především na parametrech motoru a měniče (proudové a napěťové omezení).

V první části se práce zabývá úpravou často používaného modelu motoru pro motor s rozdílnou podélnou a příčnou indukčností. Druhá část se zabývá návrhem algoritmu řízení pro dosažení maximálního rozsahu otáček. Modely a následné simulace jsou provedeny v počítačovém programu MATLAB-Simulink.

2. MATEMATICKÝ MODEL MOTORU

U synchronních motorů se nejčastěji používá matematický model v rotorových souřadnicích (v dq osách). Většinou se parametry motoru (R_s , L_d a L_q) pro zjednodušení považují za konstantní (nezávislé). V této práci je model motoru doplněn o závislosti $L_d(i_d)$, $L_q(i_q)$ a $\psi_m(i_d)$. Model tak respektuje nasycení magnetického obvodu a odbuzování permanentních magnetů (ve skutečném motoru jsou zmíněné závislosti složitější). Matematický popis motoru je následující

$$u_d(t) = R_s \cdot i_d(t) + L_d(i_d) \cdot \frac{di_d(t)}{dt} - \omega_e \cdot L_q(i_q) \cdot i_q(t) \quad (1)$$

$$u_q(t) = R_s \cdot i_q(t) + L_q(i_q) \cdot \frac{di_q(t)}{dt} + \omega_e \cdot (L_d(i_d) \cdot i_d(t) + L_d(i_d) \cdot I_m) \quad (2)$$

$$m_i = p_p \cdot \frac{3}{2} \cdot \left((L_d(i_d) \cdot i_d(t) + L_d(i_d) \cdot I_m) \cdot i_q - L_q(i_q) \cdot i_q(t) \cdot i_d \right) = J \cdot \frac{d\omega_{\text{mech}}}{dt} + m_z \quad (3)$$

Spřažený tok permanentních magnetů je vyjádřen fiktivním proudem I_m a indukčností L_d podle úvahy dle zdroje [1]. Obecně když známe spřažený tok magnetů a indukčnost, lze vypočítat I_m a stanovit tak závislost $\psi_m(i_d)$. Závislosti $L_d(i_d)$ a $L_q(i_q)$ lze stanovit z měření na skutečném stroji, nebo simulací dle přesných rozměrů a použitých materiálů stroje.

3. ALGORITMUS ŘÍZENÍ

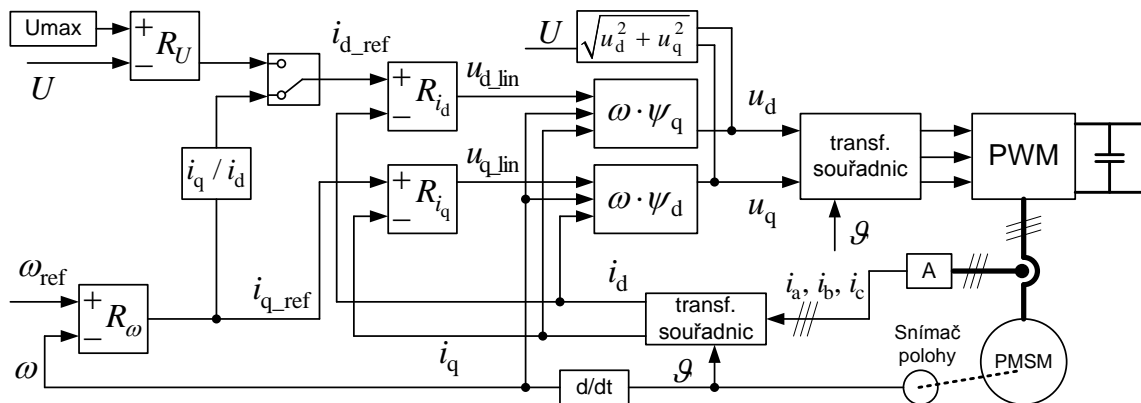
Použito je vektorové řízení v rotorovém souřadném systému (v dq osách). Strategie řízení je založena na možnosti využít co možná nejvyšší moment pro dané otáčky. Zároveň je snaha pro tvorbu momentu použít co nejmenší proud. Vše je limitováno proudovým a napěťovým omezením motoru a měniče.

Pro otáčky od nuly do základních otáček je použita klasická regulační struktura. Podřízená proudová smyčka a nadřazená otáčková smyčka. Otáčky se řídí napětím, které je vždy nižší než maximální. Všechny regulátory jsou typu PI. Výstup otáčkového regulátoru je i_{q_ref} a i_{d_ref} se vypočte dle následujícího vzorce [2]

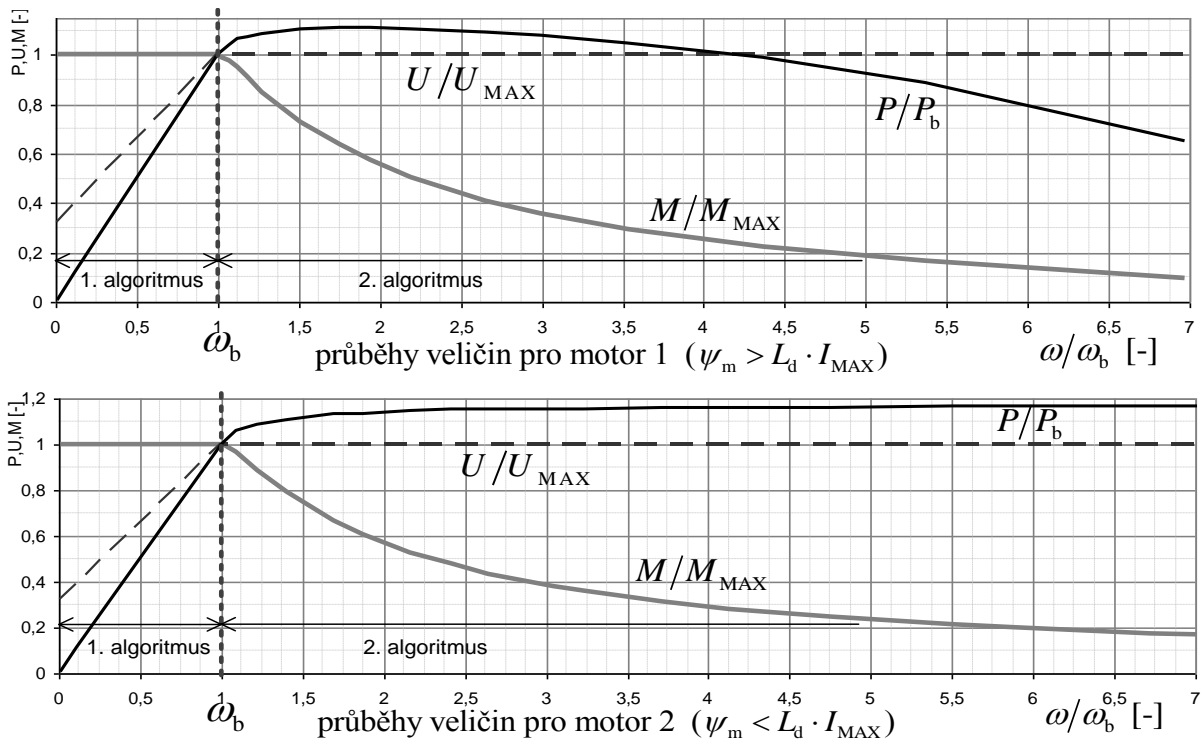
$$i_{d_ref} = \frac{\psi_m}{2 \cdot (L_q - L_d)} - \sqrt{4 \cdot (L_q - L_d)^2 + i_{q_ref}^2} \quad (1)$$

Tímto se zajistí, aby pro konkrétní moment byl proud statoru nejmenší. Maximální moment je konstantní a je omezen pouze maximálním proudem.

Pro otáčky vyšší než základní je navíc přidán PI regulátor napětí, jehož výstupem je i_{d_ref} . Maximální moment se při zvyšování otáček snižuje. Je omezen jak maximálním proudem, tak i maximálním napětím.



Obrázek 1: Blokové schéma řízení PMSM



Obrázek 2: Porovnání průběhů momentu, napětí a výkonu při různém toku PM

parametry	motor 1	motor 2	parametry	motor 1	motor 2
R_s [Ω]	3,95	3,95	L_d [mH]	22,5	22,5
J [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$7 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	L_q [mH]	54	54
p_p [-]	3	3	I_{MAX} [A]	8	8
ψ_m [mWb]	238,2	179	U_{MAX} [V]	100	100

Tabulka 1: Parametry použitých motorů pro simulaci

4. ZÁVĚR

Pro simulaci „odbuzování“ synchronního motoru není vhodné použít model s konstantními indukčnostmi (rozsah otáček je mnohem menší). Zvolený model více odpovídá skutečnosti, protože poměr indukčností se mění s jednotlivými proudy (zátěží). Většího rozsahu otáček lze dosáhnout při návrhu motoru (volbou magnetů, poměrů indukčností atd.), jak je patrné z obrázku 2.

Kvůli napěťovému omezení je nutné použít dva algoritmy řízení. Jejich přepínání je vázáno na velikost napětí, proto záleží na velikosti momentu. Pro přesnost řízení je problém měnící se indukčnosti a sprážený tok magnetů.

REFERENCE

- [1] Soong, W., L., Miller, T., J., E.: Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 141, No. 6, November 1994, s. 331-340
- [2] Zordan, M., Vas, P., Rashed, M., Bolognani, S., Zigliotto, M.: Field-weakening in high-performance PMSM drives: a comparative analysis. Industry Applications Conference, 2000 IEEE, 0-7803-6401-5/00/\$10.00, s. 1718-1724