

# FIELD WEAKENING AND DYNAMIC CONSTRAINTS IN PREDICTIVE CONTROL OF SYNCHRONOUS MACHINE

Zbyněk Mynář

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xmynar03@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Pavel Václavek

E-mail: vaclavek@feec.vutbr.cz

**Abstract:** This paper describes an implementation of dynamic constraints and field weakening of permanent magnet synchronous machine (PMSM) drive controlled by linear model-based predictive control (LMPC) algorithm. Usually the semi-linear shape like hexagon is used in LMPC to approximate circular voltage and current constraint in  $d, q$  plane. The proposed way uses single tangent to limitation circle, perpendicular to constrained vector, which reduces number of constraint equations and delivers better circle approximation. The field weakening (and strengthening, which results in desired torque increase) is achieved by dynamic model linearization.

**Keywords:** predictive motor control, field weakening, constraints, LMPC, PMSM

## 1 ÚVOD

LMPC algoritmus patří mezi prediktivní řízení založené na modelu. Vychází tedy z explicitně zadaného modelu (zde stavového popisu) a využívá strategie ustupujícího horizontu s konstantní délkou. V případě, že je účelová funkce zadána jako  $\mathcal{L}_2$  norma, je možné úlohu převést na optimalizační problém kvadratického programování, pro něj existují velmi rychlé solvery. Ty jsou obsaženy i v MPT Toolboxu, který byl využit v této práci. LMPC nabízí řadu výhodných vlastností. Jedná se především o možnost snadné implementace pro složité MIMO systémy, jednoduchého nastavení regulátoru a systematického přístupu k omezení stavů a akčních veličin. Mezi nevýhody lze zařadit závislost LMPC na přesnosti modelu (u motorů však obvykle nebývá problém), vymezení pouze pro lineární systémy a především výpočetní náročnost algoritmu. [1][2]

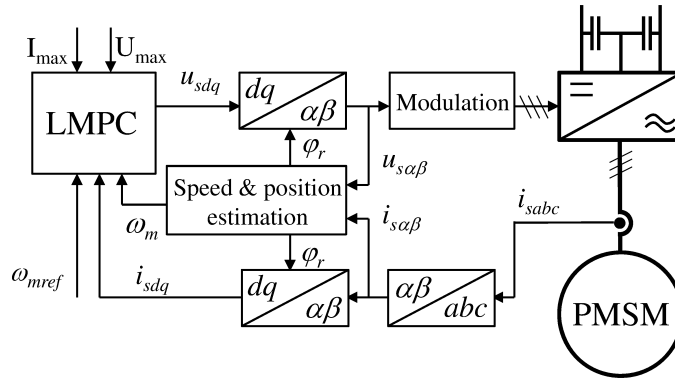
Účelem této práce bylo zavedení schopnosti LMPC algoritmu vhodně ovlivňovat přímou složku rotorového magnetický toku PMSM motoru  $\Psi_{rd}$ . Při odbuzení PMSM motoru je pak možno dosáhnout mírně vyšších otáček  $\omega_m$ , ale co je důležitější, při vyšším  $\Psi_{rd}$  lze, za určitých podmínek, získat vyšší moment. K tomu je zapotřebí využít jiného způsobu linearizace modelu než běžně používaných měřených poruch. Se schopností odbuzování je spojena i druhá část práce, tedy dynamické omezení statorového napětí  $u_s$  a proudu  $i_s$ , které lépe aproximuje kružnici omezení. Rovněž tak dojde i ke snížení počtu rovnic omezení a z tohoto pohledu i ke snížení výpočetní náročnosti.

## 2 POPIS LMPC ALGORITMU PRO ŘÍZENÍ PMSM MOTORU

Regulace PMSM s pomocí LMPC probíhá v  $d, q$  souřadnicích, tedy stejně jako u vektorového řízení (VOC). Samotný LMPC algoritmus pouze nahrazuje řídicí část VOC, tedy všechny PI regulátory. Blokové schéma je uvedeno na obrázku 1. [1]

### 2.1 IMPLEMENTACE ODBUZOVÁNÍ

Účelem odbuzování je snížení magnetického toku  $\Psi_{rd}$  při dosažení napět'ového omezení a tím i zmenšení zpětného elektromotorického napětí (EMF). To umožní dosažení vyšších otáček.



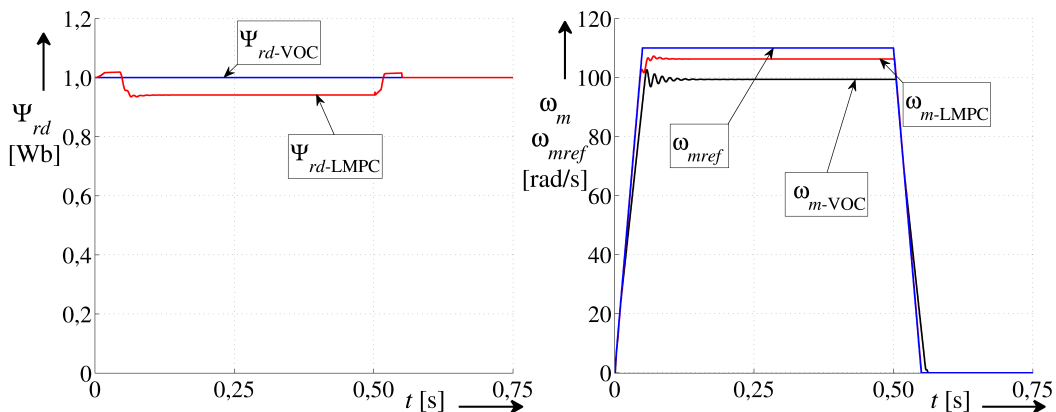
**Obrázek 1:** Blokové schéma řízení PMSM motoru pomocí LMPC

Pro linearizaci EMF nelze použít Taylorovu řadu (není jednoznačně dán pracovní bod). Běžně se tedy EMF do modelu zavádí jako měřená porucha, která je konstantní na predikčním horizontu, což model linearizuje. Tím se však ztrácí informace o chování EMF a LMPC algoritmus není schopen motor odbudít. V této práci je použito jiného postupu, kdy jsou (ve členech matice zpětných vazeb popisující EMF) otáčky  $\omega_m$  prohlášeny za konstantní na predikčním horizontu. Tím se model PMSM motoru linearizuje. Před každým výpočtem LMPC algoritmu je pak pouze nutno vhodně tyto koeficienty matice zpětných vazeb stavového popisu PMSM motoru pozměnit. Tak dostáváme diskretní model PMSM motoru

$$\begin{bmatrix} i_{sd}(k+1) \\ i_{sq}(k+1) \\ \omega_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s}{L_d} & T_s P_p \omega_m(k) \frac{L_q}{L_d} & 0 \\ -T_s P_p \omega_m(k) \frac{L_d}{L_q} & 1 - \frac{R_s}{L_q} & T_s P_p \Psi_{PM} \\ 0 & 3 P_p \Psi_{PM} / 2J & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}(k) \\ i_{sq}(k) \\ \omega_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd}(k) \\ u_{sq}(k) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde  $i_{sd}$  a  $i_{sq}$  jsou  $d, q$  složky statorového proudu,  $\omega_m$  jsou mechanické otáčky,  $u_{sd}$  a  $u_{sq}$  jsou  $d, q$  složky statorového napětí,  $T_s$  je vzorkovací perioda,  $R_s$  je statorový odpor,  $L_d$  a  $L_q$  jsou  $d, q$  složky statorové indukčnosti,  $\Psi_{PM}$  je magnetický tok permanentního magnetu a  $P_p$  je počet pólových párů. [1]

Pakliže je koeficient penalizace v účelové funkci zvolen dostatečně nízký, bude  $\Psi_{rd}$  měněna tak, aby bylo dosaženo vyšších otáček či momentu. To je ostatně vidět i na obrázku 2, kde je ukázka výsledků simulace řízení třípólového PMSM pomocí LMPC a vektorového řízení (VOC) v prostředí MATLAB-Simulink. Nevýhodou tohoto přístupu je znemožnění použití explicitního řízení.



**Obrázek 2:** Srovnání průběhů  $\Psi_{rd}$  a  $\omega_m$  při řízení PMSM motoru pomocí LMPC a VOC

## 2.2 DYNAMICKÉ OMEZENÍ

Omezení stavů (případně akčních veličin) lze v LMPC definovat jako lineární kombinaci stavů, přičemž vymezená oblast ve stavovém prostoru musí být konvexní. Lze tedy použít soustavu

nerovnic  $\mathbf{A}_{set}\vec{x}(k) \leq \vec{b}$ , kde  $\mathbf{A}_{set}$  a  $\vec{b}$  je matice a vektor vhodných koeficientů. V případě napět'ového (proudového) omezení je snaha dosáhnout co nejlepší aproximace rovnice kružnice

$$\sqrt{u_{sd}^2(k) + u_{sq}^2(k)} \leq U_{max}, \quad (2)$$

kde  $U_{max}$  je maximální dovolená amplituda statorového napětí. Tato kružnice napět'ového omezení se obvykle aproximuje staticky pomocí pravidelného  $n$ -úhelníku (viz obrázek 3a). [2]

Při dynamickém omezení je použito jediné rovnice přímky, a to tečny ke kružnici napět'ového omezení, vždy kolmé na aktuální vektor statorového napětí (viz obrázek 3b). Lze ji popsat rovnicí

$$f(k) = a(k)u_{sd}(k) + b(k)u_{sq}(k) \leq c(k), \quad (3)$$

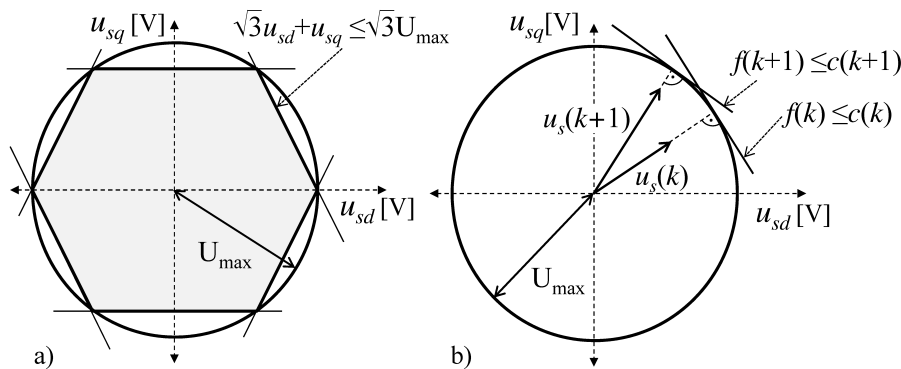
kde  $a(k)$ ,  $b(k)$  a  $c(k)$  jsou neznámé parametry, jež lze vypočítat jako

$$a(k) = \frac{u_{sd}(k-1)}{u_{sq}(k-1)} \text{sign}(u_{sq}(k-1)), \quad (4)$$

$$b(k) = \text{sign}(u_{sq}(k-1)), \quad (5)$$

$$c(k) = \sin\left(\text{atan}\left(\frac{u_{sd}(k-1)}{u_{sq}(k-1)}\right)\right) U_{max} \left(1 + \frac{u_{sd}^2(k-1)}{u_{sq}^2(k-1)}\right) \text{sign}(u_{sq}(k-1)). \quad (6)$$

Tento způsob má několik úskalí. Je nutné omezit velikost změny vektoru statorového napětí, taky aby nedošlo k opuštění vymezené oblasti stavového prostoru (především penalizací difference statorového napětí). Také nesmí být omezení kladeno na první krok v predikčním horizontu, neboť úloha by se snadno mohla stát neřešitelnou. Dynamické omezení ve výsledku aproximuje kružnici lépe než statické.



**Obrázek 3:** Napět'ové omezení a) staticky b) dynamicky

### 3 ZÁVĚR

V této práci byla zkoumána možnost změny buzení a dynamického napět'ového a proudového omezení při řízení PMSM motoru LMPC algoritmem. Prvního bylo dosaženo vhodnou linearizací modelu. LMPC je pak schopno motor budít, tak aby bylo dosaženo vyšších otáček či momentu (viz obrázek 2), což FOC bez zvláštního algoritmu odbuzování nedokáže. Dynamické omezení, jež přináší přesnější aproximaci kružnice omezení, je popsáno v kapitole 2.2.

### REFERENCE

- [1] BOLOGNANI, S., et al. Design and Implementation of Model Predictive Control for Electrical Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, vol. 56, issue 6, s. 1925-1936. DOI: 10.1109/tie.2008.2007547.
- [2] GRAHAM C. GOODWIN, Graham C. Maria M. *Constrained control and estimation: an optimisation approach*. London: Springer, 2005. ISBN 18-523-3548-3.