

# Optimální řízení IPMSM s uvažováním statorového odporu

Antonín Glac

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
glac@rice.zcu.cz

## Optimal Control of IPMSM Considering Stator Resistance

**Abstract** – This paper presents the implementation of feedforward optimal control of interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM), where stator resistance is not neglected. Proposed method improves the efficiency of a drive.

*Keywords* – IPMSM; MTPA; MTPC; Optimal control; Quadrics

### I. ÚVOD

V dnešní době je velký důraz kladen na účinnost pohonu. Elektrické stroje s rozdílnou indukčností v osách  $[d, q]$  (IPMSM a stroje s vyniklými póly a vinutým rotorem (WRSM)) vykazují také reluktanční složku momentu. Vhodnou variantou optimálního řízení lze maximalizovat moment stroje a zároveň minimalizovat ztráty. Navrhovaná metoda optimálního řízení, vycházející z [1], uvažuje také vliv statorového odporu. To přináší zvýšení efektivity oproti dřívějším řešením [2], [3], zanedbávajícím statorový odpor. Nevýhodou jsou vyšší nároky na výpočetní výkon. Pro kompenzaci nepřesnosti parametrů se hodnota dostupného napětí snižuje o tzv. bezpečnostní koeficient  $k$ . Navrhovaná metoda pracuje stabilně při  $k=0,95$ , metoda [2] zanedbávající statorový odpor vyžaduje pro stabilní chod hodnotu  $k=0,8$  nebo nižší.

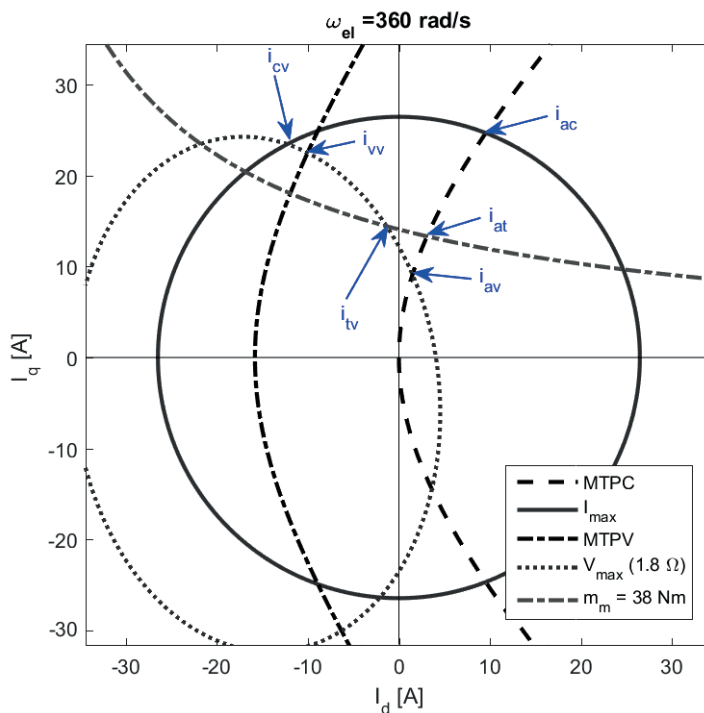
### II. FORMULACE PROBLÉMU

Optimální pracovní bod hledáme jako referenční proud, který dodá požadovaný moment a zároveň nepřekročí limit maximálního proudu a dostupného napětí. V  $[d, q]$  rovině lze proudové omezení zobrazit jako kružnici, napěťové omezení jako elipsu. Křivka konstantního momentu má tvar hyperboly. Spojnici bodů, které pro daný moment mají nejnižší amplitudu proudu bez dalších omezení napětím nebo maximálním proudem nazýváme hyperbolou MTPC nebo MTPA (maximum torque per current/ampere). Druhou optimální křivkou je hyperbola MTPV (maximum torque per voltage), která spojuje body s maximálním momentem při omezení dostupným napětím, zároveň určuje mezní hranici odbuzení. Příklad zobrazení těchto křivek včetně vyznačených průsečíků je na Obr. 1. Všechny křivky jsou závislé na parametrech stroje, napěťová elipsa a křivka MTPV také na aktuálních otáčkách stroje, momentová hyperbola závisí na požadovaném momentu.

Každou z těchto křivek lze vyjádřit v kvadratické formě:

$$Q_A(x) = \mathbf{i}_s^T \mathbf{A} \mathbf{i}_s + 2\mathbf{a}^T \mathbf{i}_s + \alpha \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}, \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2, \alpha \in \mathbf{R} \quad (2)$$



**Obrázek 1. Mezní a optimální křivky synchronního stroje s vyznačenými důležitými průsečíky**

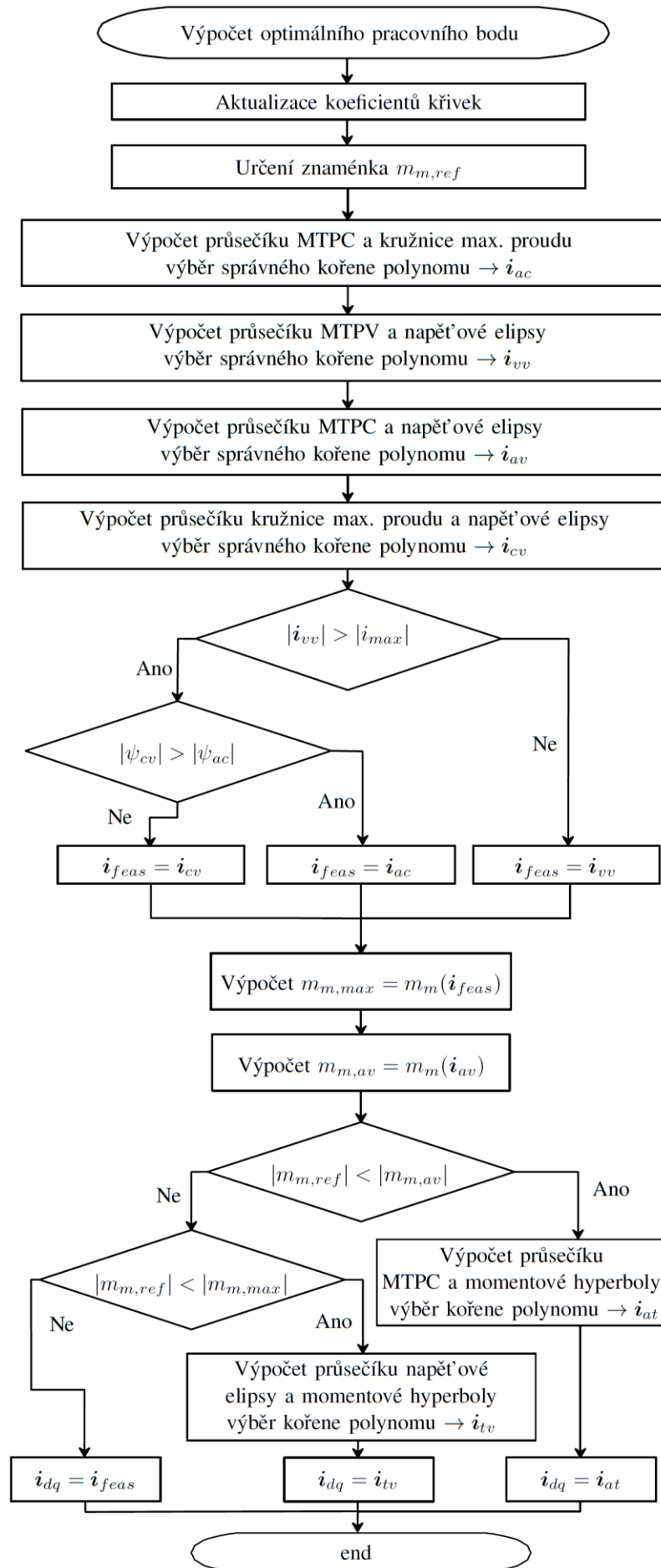
Pro výpočet průsečíků libovolné dvojice křivek existuje univerzální analytická metoda (detailně popsaná v [1], Appendix 4). Tato metoda vede na řešení polynomu 4. řádu. Počet reálných kořenů odpovídá počtu průsečíků dvojice křivek. Polynom 4. řádu lze řešit analyticky pomocí Ferrariho nebo Eulerovy metody. Pro implementaci v DSP byla použita knihovna pro výpočet polynomů [3].

### III. IMPLEMENTACE

Do DSP TMS320F28377S byl implementován algoritmus, popsáný vývojovým diagramem na Obr. 2. V každé vzorkovací periodě je nutné aktualizovat koeficienty jednotlivých křivek (pokud jsou parametry stroje v čase konstantní, část koeficientů se nemění). Pro výběr správného kořene polynomu je nutné určit znaménko požadovaného momentu  $m_{m,ref}$ . Před úvodní selekcí jsou vypočteny celkem 4 průsečíky dvojic jednotlivých křivek. Na základě těchto hodnot je určen pracovní bod s maximálním dosažitelným momentem  $i_{feas}$  a z něj dále hodnota maximálního dosažitelného momentu ( $m_{m,max}$ ) a maximálního momentu v rámci MTPC ( $m_{m,av}$ ). Na základě porovnání požadované a dosažitelné hodnoty je vypočten průsečík s momentovou hyperbolou. V případě, že požadovaná hodnota je vyšší než maximální dosažitelný moment, jako referenční proud je zvoleno dostupné maximum  $i_{feas}$ .

Pro zajištění numerické stability (proměnné jsou ve formátu 32bit floating point number dle IEEE 754) je důležité koeficienty křivek (resp. parametry stroje, rychlost, napětí, proud) normovat [1].

Porovnání konkrétních provozních stavů pro stroj s parametry:  $I_N = 8,6 A_{rms}$ ,  $I_{max} = 12,47 A_{rms}$ ,  $P = 4,5 kW$ ,  $R_s = 1,8 \Omega$ ,  $L_{sd} = 27,5 mH$ ,  $L_{sq} = 19,3 mH$  je uveden v tabulkách I a II.



Obrázek II. Vývojový diagram

TABULKA I. POROVNÁNÍ OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ IPMSM BEZ ODBUZOVÁNÍ

	$M(I_N)$ [Nm]	$M(I_{max})$ [Nm]
<b>Optimální řízení (MTPC)</b>	33,61	49,86
$I_{sd} = 0, I_{sq} = I_{max}$	32,84	47,61
<b>rozdíl</b>	2,37%	4,72%

TABULKA II. POROVNÁNÍ OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ IPMSM PŘI ODBUZOVÁNÍ

$M = 26 \text{ Nm}$	$I_{sd}$ [A]	$I_{sq}$ [A]	$ I_s $ [A]
<b>Optimální řízení (<math>R_s = 1,8\Omega</math> <math>k=0,95</math>)</b>	-2,645	10,123	10,46
<b>Řízení [2] (<math>R_s = 0\Omega</math>, <math>k=0,8</math>)</b>	-4,148	10,425	11,22
<b>rozdíl</b>			7,26%

#### IV. ZÁVĚR

Implementovaná funkce optimálního řízení zvyšuje účinnost pohonu s IPMSM. Při stejném proudu motor produkuje vyšší moment než v případě běžně používaného řízení s nulovou složkou proudu v ose d. Podobně i v oblasti odbuzování je možné dosáhnout stejného momentu při nižší amplitudě proudu. Výpočet celého algoritmu na použitém DSP zabere přibližně 40  $\mu\text{s}$  při konstantních parametrech, případně 50  $\mu\text{s}$  při časově proměnných parametrech stroje.

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2018-005 a projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III.

#### LITERATURA

- [1] H. Eldeeb, C. M. Hackl, L. Horlbeck, and J. Kullick, *A unified theory for optimal feedforward torque control of anisotropic synchronous machines*, Jan. 2017 <https://www.researchgate.net/publication/317265316>
- [2] M. Preindl, S. Bolognani, *Optimal State Reference Computation With Constrained MTPA Criterion for PM Motor Drives*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 4524–4535, Aug. 2015 <http://ieeexplore.ieee.org/document/6891383/>
- [3] S. Jung, J. Hong and K. Nam, *Current Minimizing Torque Control of the IPMSM Using Ferrari's Method*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5603-5617, Dec. 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6457462&isnumber=6525347>
- [4] S. Khasin. *Solution of cubic and quartic equations inc++*, Sept. 2017 <http://math.ivanovo.ac.ru/dalgebra/Khashin/poly/index.html>