

Riadenie synchronného motora s permanentnými magnetmi pomocou fuzzy regulátora

Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor Using Fuzzy Controller

Peter Girovský¹

¹peter.girovsky@tuke.sk

¹Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská Republika

Abstrakt — V tomto príspevku sa zaoberáme vplyvom rozmiestnenia funkcií príslušnosti na kvalitu regulácie pre fuzzy riadenie synchronného motora s permanentnými magnetmi (PMSM). V práci bol zostavený matematický model synchronného motora s permanentnými magnetmi a navrhnuté riadenie pomocou fuzzy logiky. Fuzzy regulátor pre synchronný motor bol navrhnutý pre 3, 5 a 7 funkcií príslušnosti. Návrh a simulácia fuzzy riadenia boli realizované v programe MATLAB/Simulink.

KLúčové slová—synchronný motor, permanentné magnety, fuzzy logika, riadenie

Abstract— In this paper we describe the proposal of the fuzzy control of permanent magnet synchronous machine (PMSM) and impact of deployment of membership functions of the controller on motor control performance. Mathematical model of the permanent magnet synchronous motor has been built and then fuzzy logic controller has been proposed. Fuzzy controller for a synchronous motor has been designed and compared for 3, 5 and 7 membership functions. Design and simulation of fuzzy control were done in Matlab/Simulink.

Keywords—synchronous motor, permanent magnet, fuzzy logic, controller

I. ÚVOD

Synchronný motor patrí medzi striedavé elektrické stroje, ktorých význam, podobne ako u asynchronných motorov, rastie s rozvojom riadiacej a výkonovej polovodičovej techniky. Výhodou synchronných motorov s permanentnými magnetmi oproti synchronným motorom s budiacim vinutím, je skutočnosť, že vďaka absencii budiaceho vinutia odpadajú budiace straty a nutnosť jednosmerného zdroja budiaceho prúdu, ako aj možnosť poruchy budiaceho vinutia. Výhody použitia permanentných magnetov ako budiča v rotore synchronného stroja sú spojené hlavne s kvalitou samotných magnetov. Spôsob riadenia synchronného pohonu je závislý na požadovaných vlastnostiach pohonu, pričom v súčasnosti patrí k najrozšírenejším spôsobom vektorové riadenie, ktoré zabezpečuje dosiahnutie maximálneho momentu v statických aj dynamických režimoch činnosti pohonu.

Využitie fuzzy logiky predstavuje alternatívne riešenie k vektorovému riadeniu synchronného motora. Riadenie pomocou fuzzy logiky je jednoduchšie, rýchlejšie a zlepšuje kvalitu regulácie všade tam, kde môžeme opísať regulátor podľa

pravidiel. Fuzzy logika je metóda založená na základe rozhodovacích pravidiel. Výhoda použitia tejto metódy je predovšetkým v jej jednoduchosti pri vytváraní modelov zložitých nelineárnych procesov a využití skúseností a znalostí pri navrhovaní metód riadenia týchto procesov. Vďaka využitiu fuzzy logiky môžeme regulovať veľkú časť procesov, pre ktoré nemáme k dispozícii presný matematický model.

II. MATEMATICKÝ MODEL PMSM V SÚRADNICOVOM SYSTÉME D, Q

Pre potreby návrhu vektorového riadenia pohonu je nevyhnutné zostaviť matematický model motora, ktorý vychádza zo známych rovníc a opisuje chovanie stroja v ustálených aj prechodných stavoch pri nasledovných zjednodušujúcich predpokladoch:

- parametre motora sú konštantné, rovnaké pre všetky tri fázy,
- priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere a indukovaného napätia je sínusový,
- straty v železe sú zanedbané,
- je uvažovaný rotor bez tlmiaceho vinutia a tlmiace účinky materiálu rotora nie sú uvažované,
- nulový vodič nie je pripojený.

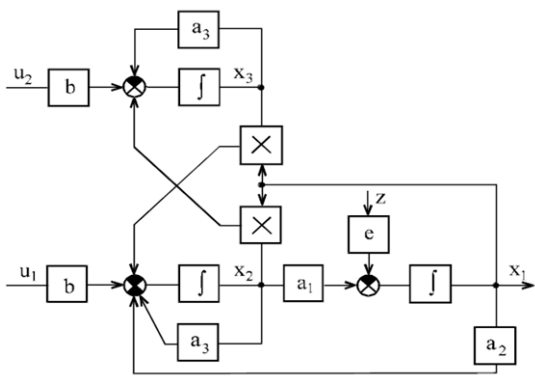
Pri definovaní vzťahov pre zostavenie matematického modelu vychádzame z náhradnej schémy synchronného motora s permanentnými magnetmi odvodené z rotorových súradníc motora, pre jednu fázu, kde q predstavuje momentotvornú os a d – magnetizačnú os.

Diferenciálne rovnice (1) až (3) vyjadrujú matematický model dvojpóloveho motora s hladkým rotorom v rotorových súradniciach [3]:

$$\frac{di_{1d}}{dt} = \frac{1}{L_s} u_{1d} - \frac{R_s}{L_s} i_{1d} - w i_{1q} \quad (1)$$

$$\frac{di_{1q}}{dt} = \frac{1}{L_s} u_{1q} - \frac{R_s}{L_s} i_{1q} + w i_{1d} - w \frac{y_m}{L_s} \quad (2)$$

$$m = \frac{3p}{2} \text{Im} \left\{ \hat{\mathcal{S}}_m (i_{1d} + j i_{1q}) \right\} \quad (3)$$



Obr. 1. Bloková schéma PMSM

kde pre zjednodušenie zostavenia matematického modelu sú zavedené konštanty:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{3p^2}{2J} y_m; a_2 = \frac{y_m}{L_s}; a_3 = \frac{R_s}{L_s} \\
 b &= \frac{1}{L_s}; e = \frac{p}{J}; y_m = \frac{2}{3p} \frac{m}{i_{iq}}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Bloková schéma modelu SMPM zostavená podľa rovníc (1)-(3) je uvedená na obr. 1, kde: $x_1 = \omega$; $x_2 = i_d$; $x_3 = i_q$; $z = m_z$.

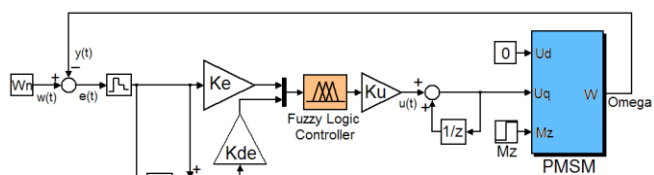
III. FUZZY REGULÁCIA PMSM

Pre návrh riadenia bol použitý model synchronného motora s permanentnými magnetmi v súradnicovom systéme dq , ktorý je opísaný vyššie. Navrhnutá regulačná sústava pozostáva z fuzzy PI regulátora, ktorý má priradenú FIS maticu s definovanými vlastnosťami regulátora. Regulačný obvod a priebeh prechodovej charakteristiky ovplyvňujeme nastavením periódy vzorkovania, ale aj jednotlivými zosilneniami na vstupe (Ke , Kde) a výstupe (Ku). Pri skokovej zmene žiadanej hodnoty u niektorých typov regulátorov môže akčný zásah mať veľmi vysoké hodnoty, čo by mohlo mať nepriaznivý vplyv na regulovanú sústavu. V takomto prípade, na obmedzenie akčného zásahu, môžeme zaradiť do obvodu obmedzenie.

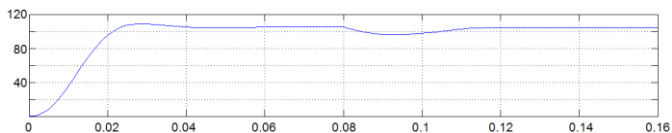
Základnou metódou riadenia v teórii regulácií je riadenie podľa regulačných odchýlok. Nech $w(t)$ je žiadaná hodnota, $y(t)$ je výstup riadeného procesu a $u(t)$ je akčný zásah v okamihu t . Pre zachytenie dynamiky regulátora je potreba nasledujúcich premenných:

- Regulačná odchýlka $e(t) = w(t) - y(t)$
- Zmena odchýlky $\Delta e(t) = e(t) - e(t-1)$
- Akčný zásah $u(t)$
- Zmena akčného zásahu $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$

Použitá regulačná štruktúra s navrhnutým fuzzy PI regulátorom je zobrazená na obr.2.



Obr. 2. Regulačný obvod PMSM s Fuzzy PI regulátorom



Obr. 3. Priebeh žiadanej uhlovej rýchlosti ω_z so záťažou M_z pri fuzzy riadení PMSM

Ako už bolo spomenuté, regulačný obvod a priebeh prechodovej charakteristiky je ovplyvnený nastavením periódy vzorkovania, ale aj jednotlivými zosilneniami na vstupe (Ke , Kde) a výstupe (Kdu), kde e predstavuje regulačnú odchýlku, de zmenu regulačnej odchýlky a výstupná premenná du predstavuje akčný zásah. Veľkosť vzorkovacej periódy bola nastavená na hodnotu 0,01. Pre funkcie príslušnosti bol vybraný trojuholníkový tvar a pre okrajové funkcie bol zvolený tvar lichobežníkový. Pre dosiahnutie žiadanych priebehov regulovanej veličiny sme nastavili zosilnenia na vstupe e , de a výstupe du nasledovne: $Ke = 1/(2,7\omega_n)$, $Kde = 1/(80\omega_n)$, $Kdu = 7,3$. Tieto nastavenie zabezpečili požadovaný priebeh regulovanej veličiny. Priebeh regulácie PMSM pomocou fuzzy regulátora je zobrazený na obr. 3, kde žiadaná hodnota uhlovej rýchlosti bola $\omega_n = 104,72$ rad/s a v čase 0,1s došlo k zaťaženiu motora.

IV. VPLYV TVARU A ROZMIESTNENIA FUNKCIE PRÍSLUŠNOSTI PRI FUZZY RIADENÍ PMSM

Pre testovanie sme zvolili tri druhy nastavení pre rozloženie funkcií príslušnosti FIS matíc:

- Nastavenie 1: Symetrické rozloženie pre všetky veličiny e , de a du .
- Nastavenie 2: Symetrické rozloženie, kde funkcie príslušnosti sú zhustené okolo hodnoty 0, pre všetky veličiny e , de a du .
- Nastavenie 3: Zhustenie funkcií príslušnosti vstupnej veličiny e okolo 0 a symetrické rozloženie funkcií príslušnosti pre veličinu de a nelineárne rozloženie funkcií príslušnosti na výstupe pre veličinu du .

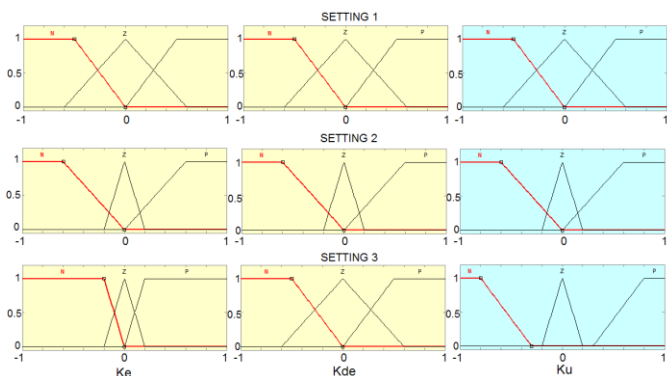
A. Vplyv tvaru a rozmiestnenia pre 3 funkcie príslušnosti

Pre jednotlivé premenné (e , de a du) pri troch funkciách príslušnosti sme použili nasledujúcu bázu pravidiel – {N, Z, P}.

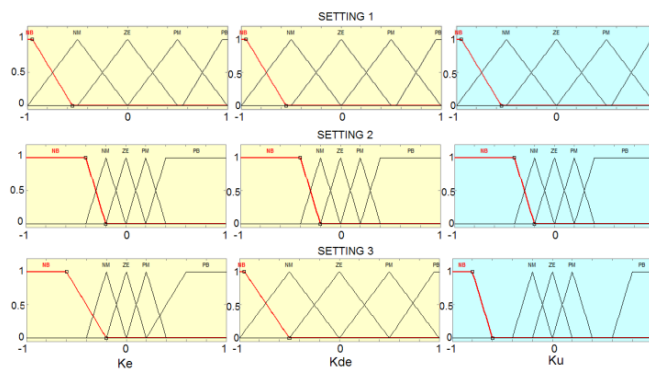
TABUĽKA I BÁZA PRAVIDIEL PRE TRI FUNKCIE PRÍSLUŠNOSTI

		de		
		N	Z	P
e	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

Pri simulácii sme vytvorili tri regulačné sústavy s troma fuzzy PI regulátormi, pričom jednotlivým schémam sme pridelili FIS matice podľa nastavení na obr. 4. Pre jednotlivé zosilnenia na vstupe a výstupe boli použité počiatočné hodnoty zosilnení, ktoré zabezpečili požadovaný priebeh regulovanej veličiny, ktoré sú popísané vyššie.

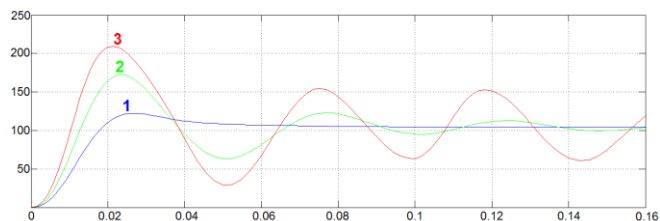


Obr. 4. FIS matice pre jednotlivé nastavenia pre tri funkcie príslušnosti

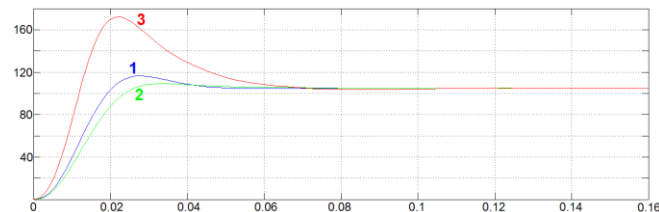


Obr. 6. FIS matice pre jednotlivé nastavenia pre päť funkcií príslušnosti

Výsledky tejto simulácie sú zobrazené na obr. 5, kde na priebehoch môžeme pozorovať, že nastavenie FIS matice 1 je v poriadku a nie je potrebné vôbec nastavovať zosilnenia. FIS matice s nastavením 2 a 3 spôsobí, že priebehy regulovanej veličiny budú rozkmitané. Odstránenie kmitania regulovanej veličiny a jej priblíženie sa k požadovanému priebehu by sme mohli dosiahnuť zmenou zosilnení jednotlivých veličín pri nastaveniach 2 a 3.



Obr. 5. Priebeh regulovanej veličiny pre tri funkcie príslušnosti



Obr. 7. Priebeh regulovanej veličiny pre päť funkcií príslušnosti

B. Vplyv tvaru a rozmiestnenia pre 5 funkcií príslušnosti

Pre jednotlivé premenné (e , de a du) pri piatich funkciách príslušnosti sme použili nasledujúcu bázu pravidiel – {NB, NM, ZE, PM, PB}.

TABUĽKA II BÁZA PRAVIDIEL PRE PÄŤ FUNKCIÍ PRÍSLUŠNOSTI

		de				
		NB	NM	ZE	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NM	ZE
	NM	NB	NM	NM	ZE	PM
	ZE	NM	NM	ZE	PM	PM
	PM	NM	ZE	PM	PM	PB
	PB	ZE	PM	PM	PB	PB

Taktiež, ako v predchádzajúcom prípade sme pre simuláciu vytvorili tri regulačné systavy s tromi fuzzy PI regulátormi, pričom jednotlivým schémam sme pridelili FIS matice podľa nastavení na obr. 6. Pre jednotlivé zosilnenia na vstupe a výstupe boli použité počítačové hodnoty zosilnení, ktoré sú popísané vyššie.

Výsledky tejto simulácie sú zobrazené na obr. 7, kde z na priebehoch môžeme pozorovať, že zmena nastavenia nespôsobila až také výrazné zmeny v regulovanej veličine, ako v predchádzajúcom prípade pri troch funkciách príslušnosti.

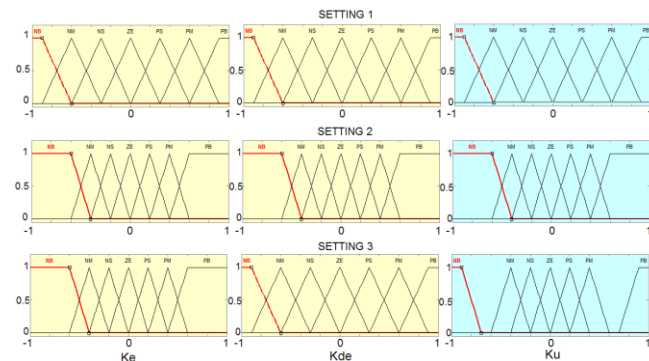
C. Vplyv tvaru a rozmiestnenia pre 7 funkcií príslušnosti

Pre jednotlivé premenné (e , de a du) pri siedmych funkciách príslušnosti sme použili nasledujúcu bázu pravidiel – {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}.

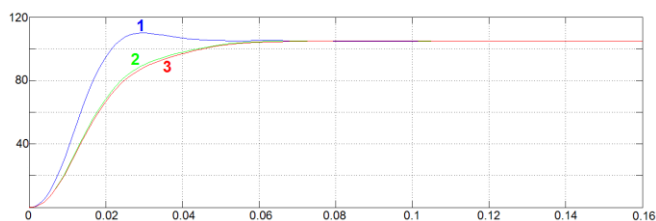
TABUĽKA III BÁZA PRAVIDIEL PRE SEDEM FUNKCIÍ PRÍSLUŠNOSTI

		de						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Rovnako, ako v dvoch predchádzajúcich prípadoch, sme aj pre túto simuláciu použili tri regulačné systavy s tromi fuzzy PI regulátormi, pričom jednotlivým schémam sme pridelili FIS matice podľa nastavení na obr. 8. Pre jednotlivé zosilnenia na vstupe a výstupe boli taktiež použité počítačové hodnoty zosilnení, ktoré sú opísané vyššie.



Obr. 8. FIS matice pre jednotlivé nastavenia pre sedem funkcií príslušnosti



Obr. 9. Priebeh regulovanej veličiny pre sedem funkcií príslušnosti

Výsledky tejto simulácie sú zobrazené na obr. 9, kde na priebehoch môžeme pozorovať, že zmena nastavenia spôsobuje najmenšie zmeny v regulovanej veličine na rozdiel od dvoch predchádzajúcich prípadov, kedy tie zmeny boli výraznejšie.

V. ZÁVER

Hlavným cieľom tejto práce bolo zistiť, aký vplyv má rozmiestnenie funkcií príslušnosti fuzzy regulátora synchronného motora s permanentnými magnetmi na priebeh regulovanej veličiny. Pre zistenie daných vplyvov bolo potrebné realizovať návrh fuzzy regulátora pre synchronný motor s permanentnými magnetmi a následne zistiť, ako sa zmení priebeh regulovanej veličiny pri zmene tvaru a rozmiestnení funkcií príslušnosti fuzzy regulátora.

Boli vytvorené rôzne FIS matice s tromi, piatimi a siedmi-
mi funkciami príslušnosti a s tromi rôznymi nastaveniami. Pri

testovaní FIS matíc sa preukázalo, že najvýhodnejšie boli nade-
finované funkcie príslušnosti podľa prvého nastavenia pre 3, 5
a 7 funkcií príslušnosti. Celkovo však najlepší priebeh regulo-
vanej veličiny sme dosiahli pre FIS maticu s prvým nastavením
pre 7 funkcií príslušnosti.

LITERATÚRA

- [1] F. Blaschke, The principle of field orientation as applied to the new "transvector" closed-loop control system for rotating-field machines". *Siemens Review*, 39 (1972), 217-220.
- [2] K. Hasse, *Zur dynamik drehzahleregelter antriebe mit stromrichter-
gepeisten asynchron-kurschlusslaufer maschinen*. Techn. Hochsch., Dar-
mstadt. Dissertation, (1969) 74-78.
- [3] L. Zboray, F. Ďurovský, J. Tomko; *Regulované pohony*, Viena, 2000.
- [4] P. Brandštetter, *Sřídavé regulační pohony: moderní způsoby řízení*.
VŠB TU, Ostrava, 1999.
- [5] V. Novák, *Základy fuzzy modelování*, 175s., ISBN 80-7300-009-1, 2000
Praha, nakladatelství BEN.
- [6] V. Mařík, O. Štěpánková, J. Lažanský, *Umělá inteligence (4)*, ISBN 80-
200-1044-0, 2003 Praha, ACADEMIA.

Peter Girovský sa narodil v roku 1979 vo Vranove nad
Topľou. V roku 2003 získal titul Ing. na Fakulte elektrotech-
niky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach v odbore
Silnoprádové inžinierstvo. V roku 2009 získal na tej istej
fakulte titul PhD. V súčasnosti pracuje na tejto fakulte ako
odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky .