

Porovnanie PI a fuzzy PI riadenia pre znižovací menič napätia s mäkkým spínaním

Comparison between PI and fuzzy PI control of buck converter with soft switching

Martin Lešo, Jaroslava Žilková²

¹martin.leso@tuke.sk, ²jaroslava.zilkova@tuke.sk

^{1,2}Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt — Článok sa zaoberá opisom riadenia výstupného napätia nepriameho jednosmerného znižovacieho meniča s mäkkým spínaním pomocou fuzzy regulátora, ktorý bol zvolený z dôvodu problematického odvodenia matematického modelu meniča, ako aj jeho nelinearít. Hlavnou výhodou fuzzy riadenia je možnosť riadiť nelineárne systémy bez nutnosti poznať ich matematický model a schopnosť pracovať aj s nepresnými údajmi. V rámci článku sú prezentované simulačné výsledky predkladaného riešenia a ich porovnanie voči predošlej PI regulácii, z ktorých možno usudzovať, že oba typy regulácií zabezpečujú stabilnú reguláciu výstupného napätia meniča, pričom fuzzy regulátor preukázal zlepšené dynamické vlastnosti meniča v prípade jeho náhleho zaťaženia.

Kľúčové slová— DC-DC menič, fuzzy regulácia, MATLAB, mäkké spínanie

Abstract—The article deals with the description of the output voltage control of the buck converter with soft switching using a fuzzy controller, which was chosen due to problematic deduction of the mathematical model of the DC-DC converter, as well as its non-linearity. An ability to control nonlinear systems without knowing their mathematical models, and an ability to work with inaccurate data are the main advantages of fuzzy logic control. In the paper, the simulation results of the fuzzy solution and their comparison with the previous PI controller are presented. The results suggest that both types of controllers provide stable control of the output voltage of the converter. Additionally, the fuzzy controller shows improved dynamic properties of the DC-DC converter in case of its sudden load.

Keywords— DC-DC converters, fuzzy logic control, MATLAB, soft-switching

I. ÚVOD

DC-DC meniče slúžia na premenu vstupného jednosmerného napätia na inú úroveň jednosmerného výstupného napätia, a preto sú často používané vo väčšine elektronických zariadení v komerčných aj priemyselných zariadeniach. V posledných desaťročiach sa kladie zvýšená pozornosť na zvýšenie účinnosti DC-DC meničov. Jednou z možností ako zvýšiť účinnosť DC-DC meničov je navrhnutie obvodov pre mäkké spínanie tranzistorov meničov za účelom minimalizovania ich spínacích strát, čím je umožnené zvýšiť spínanie frekvenciu tranzistorov meniča a tým zároveň aj zmenšiť váhu, objem a tým aj výrobnú cenu DC-DC meničov. Takéto meniče sú tiež nasadzované

v prípadoch, ktoré požadujú vysokú stabilitu výstupného napätia pri zmenách záťaže a vstupného napájacieho napätia. To je hlavná (Tým je kladená) požiadavka pri vývoji pokročilých metód riadenia pri vývoji DC-DC meničov. Na riešenie tejto problematiky bolo predkladaných mnoho rôznych radiacích stratégií, pričom každá z nich poskytuje určité výhody a nevýhody vyplývajúce z princípu ich činnosti [1].

Všeobecne sa pre riadenie a reguláciu výstupného napätia meničov používajú napäťové alebo prúdové metódy riadenia. K výhodám takýchto riešení je možné priradiť stálu spínanie frekvenciu meničov a nulovú regulačnú odchýlku požadovaného napätia. Naopak, k ich nevýhodám je možné zaradiť ich horšiu odozvu na skokové zmeny záťaže a vstupného napätia [2, 6]. K odstráneniu týchto nedostatkov sú vyvíjané klzavé metódy riadenia, ktoré sú stabilnejšie pri zmenách záťaže a parametrov meniča. Ich hlavnou nevýhodou je však ich variabilná spínanie frekvencia počas zmien záťaže a vstupného napätia meniča, čo vedie k problémom pri dimenzovaní filtrov meničov. Nedostatky súčasne používaných metód riadenia vedú k vývoju pokročilejších metód riadenia ako je prediktívne riadenie, či k implementácii metód umelej inteligencie v riadení [3, 7].

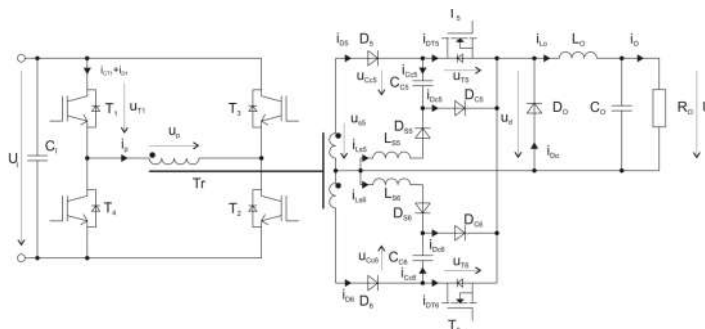
Jednou z najrozšírenejších metód umelej inteligencie v radiacích systémoch je teória fuzzy množín, ktorá je uplatnená v rôznych fuzzy systémoch. Fuzzy systémy poskytujú metodiku pre reprezentáciu, spracovanie a implementovanie znalostí pre riadenie dynamických systémov. Teória fuzzy množín je jednou z často používaných metód v oblasti umelej inteligencie pre riadenie rôznych nelineárnych systémov a bola úspešne aplikovaná aj v oblasti výkonovej elektroniky. Jednou z hlavných predností fuzzy riadenia je jeho schopnosť práce s nepresnými vstupmi údajmi, ako aj možnosť jeho návrhu regulátora, ak nie je známy matematický model regulovaného systému. Fuzzy riadenie je vhodné predovšetkým pre aplikáciu pre nelineárne systémy a vyznačuje sa vysokou toleranciou na zmeny parametrov systému [3, 8].

Fuzzy PI regulácia FLC (Fuzzy Logic Control) je jednou z najčastejšie aplikovaných foriem fuzzy logiky v riadení. Doteraz bolo navrhnutých mnoho rôznych typov regulátorov na báze fuzzy logiky, ktoré obsahovali rôzne spracovanie vstupov a výstupov [8]. Z hľadiska použitia si doteraz našli najväčšie uplatnenie fuzzy PI regulátory, ktoré ako vstupy využívajú regulačnú odchýlku e a jej deriváciu Δe podľa Obr. 4. [4].

V [5] je uvedené porovnanie PID riadenia s fuzzy PI riadením pre priamy znižovací a zvyšovací menič napätia. Experimentálne výsledky meraním preukázali, že oba typy riadenia sú schopné dosiahnuť požadované napätie v ustálenom stave. V prechodových dejoch dosiahol lepšie výsledky fuzzy regulátor, ktorý umožnil menší prechod pri zmenách zaťaženia meničov. Pri ostatných testoch dosiahli oba regulátory približne rovnaké výsledky.

II. DC-DC MENIČ

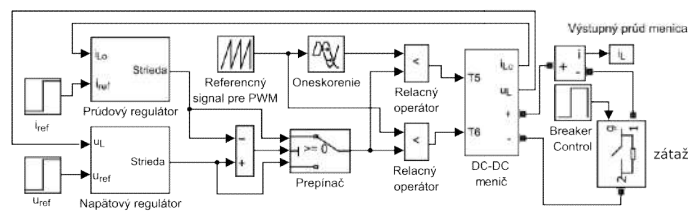
Vnútroštruktúra navrhnutého simulačného modelu meniča je zobrazená na obr. 2. Navrhnutý menič pozostáva z mostíkového striedača, vysokofrekvenčného transformátora, riadeného usmerňovača, výstupného LC filtra a bezstratovej odľahčovacej siete. Striedač je zostavený zo štyroch IGBT tranzistorov T_1-T_4 , ktoré vytvárajú vysokofrekvenčný napäťový signál, ktorý je cez transformátor prenášaný do riadeného usmerňovača. Usmerňovač je tvorený tranzistorom T_5 a T_6 s diódami D_5, D_6 , ktoré sú pripojené na výstupný LC filter tvorený indukčnosťou L_o a kapacitou C_o za účelom vyhladenia výstupného prúdu a napätia meniča. Odľahčovacia sieť je tvorená diódami $D_{S5}, D_{C5}, D_{S6}, D_{C6}$ a kondenzátormi C_{C5}, C_{C6} a indukčnosťami L_{S5}, L_{S6} , ktoré minimalizujú vypinacie straty tranzistorov usmerňovača [9, 10].



Obr. 1 Schéma zapojenia meniča

III. SIMULAČNÝ MODEL MENIČA

Pre navrhnutý menič bol v programe MATLAB Simulink zostavený simulačný model meniča s reguláciou výstupného prúdu a napätia, ktorého štruktúra je zobrazená na Obr. 1 [1].



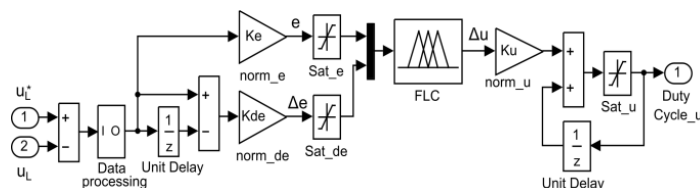
Obr. 2 Celková simulačná schéma meniča

Simulačný model pozostáva z viacerých blokov. V ľavej časti simulačného modelu sú umiestnené regulátory prúdu a napätia, ktoré regulujú prúd, resp. napätie na základe nastavených referenčných hodnôt i_{ref} a u_{ref} a nameraných hodnôt v meniči i_{L0} a u_L , pričom i_{L0} predstavuje vyhladzovací prúd indukčnosti a u_L predstavuje napätie na výstupe LC filtra. V strednej časti modelu je zobrazený prepínač, ktorý na základe hodnoty rozdielu výstupov prúdového a napäťového regulátora prepne požadovaný výstup regulátora pre generovanie PWM, ktorá je tvorená porovnávaním referenčného signálu s výstupom regulátora. Referenčný signál je synchronizovaný so spí-

naciami impulzmi tranzistorov striedača, pričom pre T_5 je tento signál posunutý o polovicu periódy. Vstupy do DC-DC meniča predstavujú impulzy pre spínanie tranzistorov usmerňovača. Výstup meniča je pripojený na variabilnú odporovú záťaž, čím vieme otestovať správanie sa regulátora pri zmene záťaže. Pre tvorbu subsystému "DC-DC menič" (Obr. 1) bol použitý zásuvný modul programu MATLAB Simscape s knižnicou SimPowerSystem [10].

IV. FUZZY REGULÁTOR NAPÄTIA

Všeobecný postup návrhu fuzzy regulátorov je možné nájsť napr. v [11], pričom na obr. 3 je znázornená nami navrhnutá štruktúra fuzzy PI regulátora výstupného napätia pre jeho simuláciu v programe Simulink, pričom ako vstupy do regulátora sú privádzané dve veličiny, regulačná odchýlka e a zmena regulačnej odchýlky Δe . Regulačná odchýlka predstavuje rozdiel medzi požadovanou hodnotou u_L^* a aktuálnou hodnotou napätia na výstupe meniča. Táto hodnota je spracovaná blokom „Data processing block“, ktorý obsahuje filtráciu výstupnej hodnoty filtrom prvého rádu s malou časovou konštantou a priemerovaním hodnoty posledných štyroch vzoriek. Zmena regulačnej odchýlky Δe je následne prepočítavaná ako rozdiel súčasnej a predchádzajúcej vzorky. Oba vstupy sú ohraničené v intervale $\{-1, 1\}$. Výstupom FLC regulátora je normalizovaná hodnota prírastku striedy Δu . Požadovaná hodnota striedy tranzistorov usmerňovača je vypočítavaná ako suma prírastkov požadovanej striedy vypočítanej FLC regulátorom, pričom maximálna veľkosť striedy je nastavená na 0,85.



Obr. 2 Štruktúra FLC regulátora

Navrhnutý fuzzy regulátor používa Mamdaniho typ inferencie pravidiel s max-min kompozičnými pravidlami inferencie.

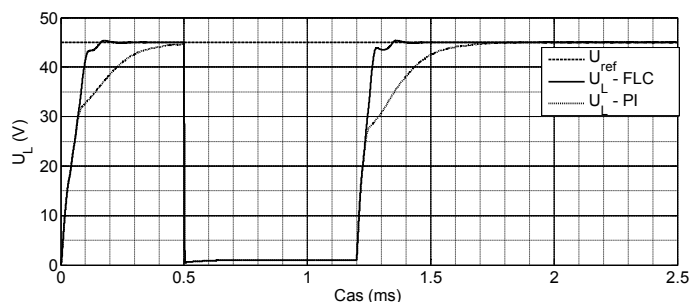
Rozmiestnenie vstupných fuzzy množín v rámci univerza je zobrazené na Obr. 4 a Obr. 5., pričom bol zvolený ich trojuholníkový, resp. lichobežníkový tvar z dôvodu rýchlosti výpočtu. Tento typ rozmiestnenia fuzzy množín bol zvolený preto, že sa jedná o štandardne aplikovanú techniku počítateľného rozmiestnenia množín, ktorá sa osvedčila pri riadení rôznych systémov [8].

Označenie jednotlivých fuzzy množín vychádza zo štandardnej anglickej terminológie, pričom *NL* (Negative Large) označuje veľkú zápornú regulačnú odchýlku, *NS* (Negative Small) označuje malú zápornú regulačnú odchýlku, *Z* (Zero) označuje nulovú regulačnú odchýlku, *PS* (Positive Small) označuje malú kladnú regulačnú odchýlku a *PL* (Positive Large) označuje veľkú kladnú regulačnú odchýlku.

V. SIMULAČNÉ VÝSLEDKY

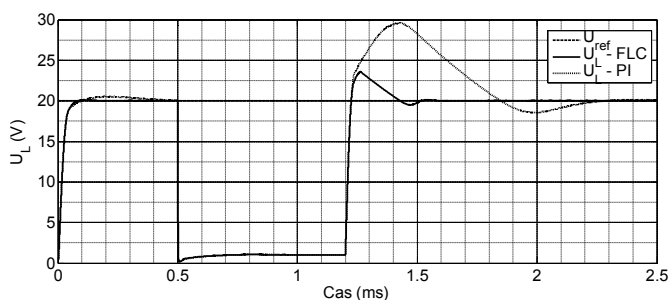
Celková simulačná schéma meniča je zobrazená na obr. 1, pričom pri spúšťaní bola záťaž nastavená na 10 Ω, a následne bolo simulované skratovanie meniča s hodnotou impedancie 0,01Ω. Pri spúšťaní meniča pracoval fuzzy regulátor napätia, pričom pri skratovaní meniča rozhodovacia logika prešla na prúdový PI regulátor. Po odstránení skratu opäť prebral regulačnú úlohu výstupného napätia FLC regulátor napätia. Vstupné napätie meniča bolo nastavené na 325 V, spínacia frekvencia bola nastavená na 100 KHz a výstupné napätie bolo testované pre hodnoty 20V a 45V.

V rámci simulácie pri požadovanom napätí 45V bolo vykonané porovnanie PI regulátora s FLC regulátorom. Simulačné výsledky preukazujú zlepšenie prechodovej charakteristiky meniča pri jeho skratovaní, ako aj pri odpojení skratkovacieho rezistora. Po spustení dosiahol FLC regulátor požadovanú hodnotu rýchlejšie za cenu malého prekmitu, pri skratovaní výstupu meniča prebral úlohu prúdový regulátor pre oba prípady správne a po odpojení skratkovacieho rezistora dosiahol požadovanú hodnotu napätia rýchlejšie FLC regulátor za cenu malého prekmitu (Obr. 4) [1, 4].



Obr. 7 Odozva na zmenu záťaže meniča pri požadovanom napätí 45V

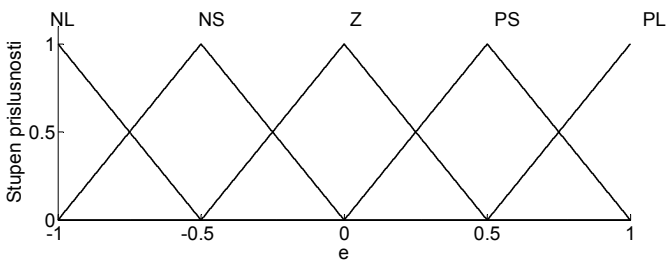
Pre požadované napätie meniča pri 20V bola vykonaná obdobná simulácia, pričom možno pozorovať, že pri štarte nedosiahol FLC žiaden prekmít, a rýchlejšie vyreguloval požadované napätie. Pri odpojení skratkovacieho rezistora oba regulátory dosiahli určitý prekmít, pričom prekmít FLC regulácie bol podstatne menší (Obr.8).



Obr. 8 Odozva na zmenu záťaže meniča pri požadovanom napätí 25V

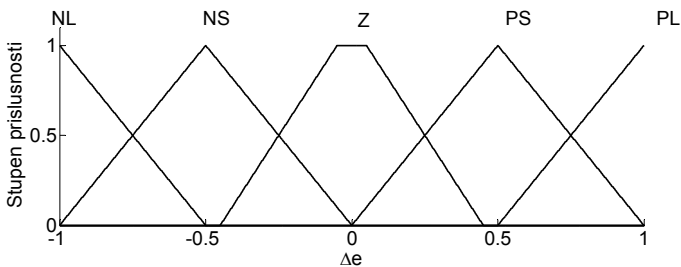
VI. ZÁVER

V rámci príspevku je preukázaná verifikácia nami predkladaného FLC regulátora pre výstupné napätia nepriameho DC-DC meniča s mäkkým spínaním a jeho vzájomné porovnanie s PI reguláciou, pri prvotnom zapnutí meniča, a následne pri jeho zaťažení. Ako zaťaženie meniča bolo zvolené jeho skratovanie, pri ktorom dochádza k prepnutiu na prúdový regulátor. Takýto test bol zvolený z dôvodu, že je ho možné považovať



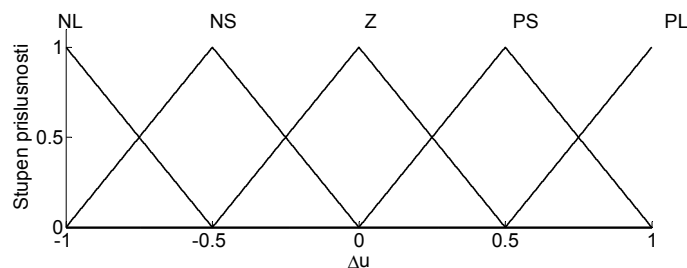
Obr. 43 Rozmiestnenie fuzzy množín pre e

Počas ladenia FLC regulátora bol upravený tvar funkcie príslušnosti Z (Obr. 5) pre vstup Δe na lichobežníkový tvar s cieľom zníženia citlivosti regulátora na drobné oscilácie a šum meraného výstupného napätia meniča.



Obr. 5 Rozmiestnenie fuzzy množín pre Δe

Na Obr. 6 je znázornené rozloženie funkcií príslušnosti pre výstup fuzzy regulátora napätia. Označovanie množín je obdobné ako pri vstupných množinách.



Obr. 6 Rozmiestnenie fuzzy množín pre Δu

Pre navrhnutý regulátor bolo definovaných 26 pravidiel na základe skúseností autorov, pričom 25 pravidiel je tvorených ako všetky možné kombinácie vstupných fuzzy množín za použitia logického súčinu, ktoré sú zapísané v pravdivostnej tabuľke (Tab. 1).

Tab. 14 Pravidlá pre zostavenie fuzzy regulátora

$\Delta e \backslash e$	Nm	Ns	Z	Ps	Pm
Nm	Nm	Nm	Ns	Ns	Z
Ns	Nm	Ns	Ns	Z	Ps
Z	Ns	Ns	Z	Ps	Ps
Ps	Ns	Z	Ps	Ps	Pm
Pm	Z	Ps	Ps	Pm	Pm

Posledné prídavné pravidlo, ktoré nie je uvedené v rámci pravdivostnej tabuľky je v nasledujúcom tvare:

AK e je PL **POTOM** Δu je PL

bolo pridané pre zrýchlenie dosiahnutia požadovanej hodnoty napätia.

za najhoršiu možnosť, ktorá sa môže počas zmeny zaťaženia meniča vyskytnúť. Pomocou simulačných testov sme preukázali opodstatnenosť použitia fuzzy regulácie, ktorá preukazovala zvýšenú stabilitu, zrýchlenie prechodových dejov meniča, menšie prekmity výstupného napätia oproti pôvodne navrhnutej PI regulácii.

Týmito simuláciami bola dokázaná výhoda FLC regulácie oproti štandardnej PI regulácii pre riadenie vyššie opísaného typu DC-DC meniča, a v rámci ďalšieho pokračovania práce bude nasledovať verifikácia daného riešenia na fyzikálnom modeli meniča.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA 1/0464/15 a grant FEI-2015-20.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] M. Lešo, „Aplikácia metód umelej inteligencie v dynamických systémoch“, písomná práca k dizertačnej skúške, KEM, TUKE, Košice, Slovensko, 2016.
- [2] M. Lešo, J. Žilková, M. Pástor, "Control Methods of DC-DC converters", *Elektrotechnické listy*, ročník 1, číslo 1, str. 1-4, 2016.
- [3] M. Lešo, J. Žilková, M. Pástor, "Advanced Control Methods of DC-DC converters", *Elektrotechnické listy*, ročník 1, číslo 2, str. 1-4, 2016.
- [4] M. Lešo, J. Žilková, M. Pástor, J. Dudrik: "Fuzzy Logic Control of Soft - Switching DC - DC Converter", ročník 22, číslo 5, str. 3-7, 2016.
- [5] Liping Guo, J.Y. Hung, R.M. Nelms: "Evaluation of DSP-Based PID and Fuzzy Controllers for DC-DC Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 56, číslo 6, str. 2237-2248, 2009.
- [6] S. Maniktala, "Voltage-Mode, Current-Mode (and Hysteretic Control)", *MicroSemi Technical note*, 2012.
- [7] Sujata Verma, S.K. Singh, Rao, A.G. – "Overview of control Techniques for DC-DC converters", v *Journal of Engineering Research*, Roč. 2, č. 8, str. 18-21, 2013, ISSN 2278 – 9472.
- [8] Vas P.: *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Press, New York, 1999.

- [9] J. Dudrik, M. Bodor and M. Pástor, "Soft-Switching Full-Bridge PWM DC-DC Converter With Controlled Output Rectifier and Secondary Energy Recovery Turn-Off Snubber," v *IEEE Transactions on Power Electronics*, roč. 29, č. 8, str. 4116-4125, 2014.
- [10] Bodor, M.: *Výkonový DC/DC menič s mäkkým spínaním*. Dizertačná práca. Košice: Technická Univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2012. 112 s.
- [11] Modrák, O.: *FUZZY ŘÍZENÍ A REGULACE*, 26p, 2002.



Martin Lešo (Ing.) sa narodil v roku 1990 v Poprade (Slovensko). V roku 2014 dokončil inžinierku stupeň štúdia v odbore Elektrotechniky na Katedre elektrotechniky a mechatroniky na Technickej univerzite v Košiciach. V súčasnosti je študentom druhého ročníka tretieho stupňa štúdia na katedre elektrotechniky a mechatroniky v odbore Silnoprúdová elektro-

technika a zaoberá sa problematikou aplikácie metód umelej inteligencie v oblasti elektrických pohonov a výkonovej elektroniky.



Jaroslava Žilková (Doc., Ing., PhD.) ukončila inžinierske štúdium na Katedre Technickej kybernetiky FEI TU v Košiciach. Po ukončení štúdia pracovala ako výskumná pracovníčka v EVÚ Nová Dubnica det. prac. Košice / ZŤS VVÚ Košice. V roku 2001 obhájila dizertačnú prácu a v roku 2008 sa habilitovala v odbore Silnoprúdová elektrotechnika. V

súčasnosti je docentkou na Katedre elektrotechniky a mechatroniky FEI TU v Košiciach. Oblasť jej výskumnej činnosti sú hlavne moderné metódy riadenia elektrických pohonov a aplikácie metód umelej inteligencie v elektrotechnických systémoch.