

Riadenie výstupného napätia DC-DC meniča

Output voltage control of DC-DC converter

Marek Pástor, Jaroslava Žilková

marek.pastor@tuke.sk, jaroslava.zilkova@tuke.sk

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

Abstrakt — Príspevok sa zaoberá návrhom PI regulátora pre DC-DC menič s mäkkým spínaním. Model DC-DC meniča s mäkkým spínaním bol vytvorený v programe Matlab/Simulink. Dynamika DC-DC meniča bola aproximovaná systémom druhého rádu. Na základe požadovanej dynamiky systému bol navrhnutý spojité PI regulátor. Uvedený návrh je simulačne verifikovaný na modeli DC-DC meniča s mäkkým spínaním a dosiahnuté výsledky sú uvedené v závere príspevku.

Kľúčové slová — riadenie, DC-DC menič, mäkké spínanie, modelovanie.

Abstract — The paper presents a proposal of PI controller for a soft-switching DC-DC converter. Model of the DC-DC converter was created in program Matlab/Simulink. The dynamics of the DC-DC converter was approximated by a second order system. Based on the required system dynamics, a continuous PI controller was designed. This proposal is verified by simulations on the model of a soft-switching DC-DC converter in the end of the paper.

Keywords — control, DC-DC converter, soft-switching, modelling.

I. ÚVOD

V súvislosti s obnoviteľnými zdrojmi energie rastie záujem o vývoj nových meničov. Moderné elektrické vozidlá, obnoviteľné zdroje energie a zdroje energie pre všeobecné potreby vyžadujú vysoko účinnú, ľahkú a spoľahlivú výkonovú elektroniku. Pre mobilné aplikácie je dôležitá aj nízka hmotnosť a veľkosť meniča. Ďalšou významnou požiadavkou je požiadavka na zvýšenie frekvencie spínania. Táto požiadavka prináša nevýhodu, ktorou je zvýšenie spínacích strát [1] - [6]. Na zníženie spínacích strát meniča v mostíkovom zapojení boli navrhnuté rôzne techniky mäkkého spínania [2] - [5].

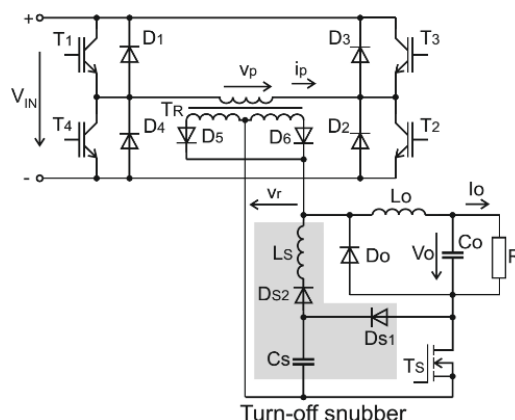
Pre riadenie výstupného napätia DC-DC meniča sa zvyčajne používa regulácia napätia alebo prúdu [7]. Pre DC-DC meniče sa zvyčajne používa PID regulátor s modulátorom šírky impulzu [7] - [16]. Zmenou šírky impulzu sa riadi efektívna hodnota napätia striedača a tým výstupný výkon jednosmerného meniča.

Príspevok predstavuje návrh a overenie riadenia výstupného napätia mostíkového DC-DC meniča s mäkkým spínaním (Obr. 1) pomocou PI regulátora. Model meniča je aproximovaný lineárnym systémom druhého rádu. Činnosť navrhnutého PI regulátora je overená simuláciou v programe Matlab/Simulink. V závere príspevku sú uvedené dosiahnuté simulačné výsledky.

II. DC-DC MENIČ S MÄKKÝM SPÍNANÍM

A. Topológia a princíp činnosti meniča

Na obr. 1 je zobrazená schéma meniča jednosmerného napätia so spínaním v nule napätia a v nule prúdu. Menič jednosmerného prúdu pozostáva z mostíkového striedača tvoreného štyrmi IGBT tranzistormi T1 - T4 s antiparalelnými diódami D1 - D4. Menič napája vysokofrekvenčný transformátor TR, ktorý zabezpečuje galvanické oddelenie výstupu od vstupu. Výstup transformátora je pripojený k výstupnému filtru (L_o , C_o) cez riadený výstupný usmerňovač pozostávajúci z diód D5 a D6 a sekundárneho tranzistora MOSFET T_s . Vypínanie straty sekundárneho tranzistora T_s sú odstránené bezstratovou odľahčovacou sieťou, ktorá zabezpečuje vypínanie tranzistora T_s pri nulovom napätí. Bezstratová odľahčovacia sieť je tvorená kondenzátorom C_s , diódami D_{s1} a D_{s2} a cievkou L_s . V transformátore sa straty pri vypnutí tranzistorov striedača odstránia riadeným usmerňovačom, kde sa tranzistor T_s vypína pred vypnutím tranzistorov striedača.

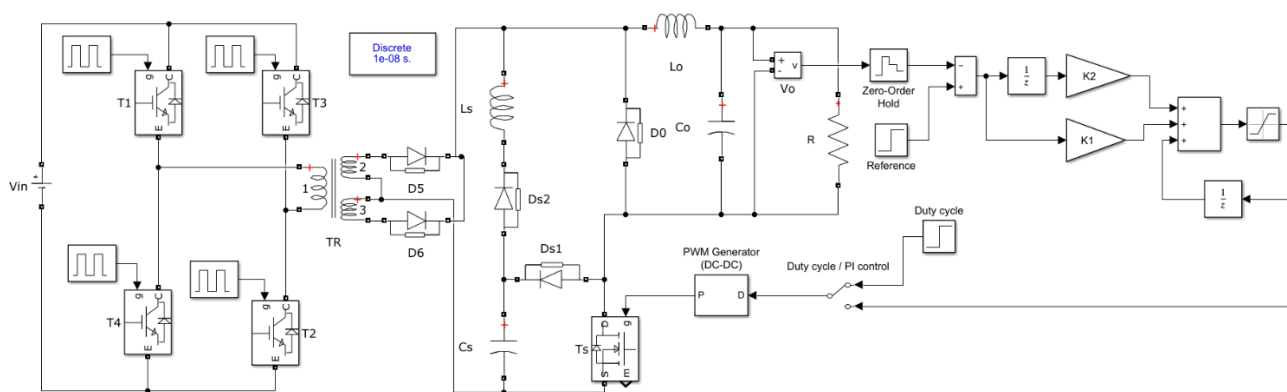


Obr. 1. Schéma DC-DC meniča s mäkkým spínaním

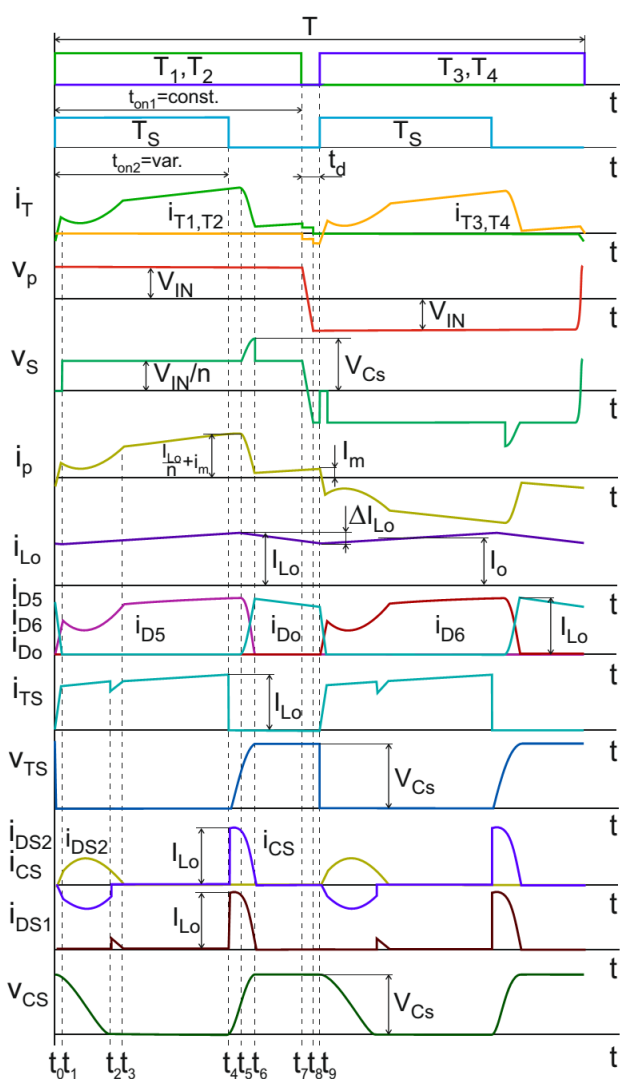
Týmto spôsobom tranzistory mostíka spínajú len malý magnetizačný prúd transformátora a tým vypínajú pri nulovom prúde. Výstupné kapacity primárnych tranzistorov sa vybíjajú pred ich zapnutím magnetizačným prúdom transformátora. Tranzistory mostíka tak spínajú pri nulovom napätí.

B. Riadiace signály a priebehy meniča

Priebehy napätí a prúdov skúmaného DC-DC meniča, ktorý je podrobne opísaný v [5], sú znázornené na Obr.2. Na riadenie meniča je potrebných päť riadiacich signálov. Štyri tranzistory striedača T1 - T4 sú riadené pomocou PS-PWM s fázovým posunom nastaveným na 180 stupňov a pevným časovým úsekom $ton1$ (Obr.2)



Obr. 2. Schéma DC-DC meniča v programe Matlab /Simulink



Obr. 3. Priebehy napätí a prúdov DC-DC meniča [12]

Menič teda nemôže riadiť výkon prenášaný na záťaž. Interval vedenia usmerňovača je riadený tranzistorom T_S . Časový interval t_{on2} na obr. 2 riadi výkon prenášaný na záťaž od 0 do 100 % nominálneho výkonu.

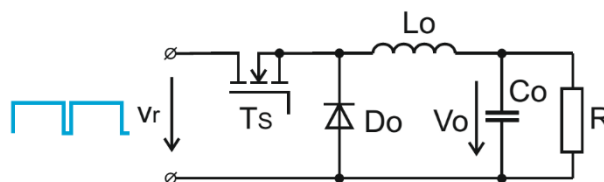
TABLE I. PARAMETRE DC-DC MENIČA

Parameter	Value	Unit
Výstupný výkon P_{OUT}	2	kW
Vstupné napätie V_{IN}	300	V
Spínacia frekvencia f_s of $T_1 - T_4$	50	kHz
Výstupné napätie V_O	40	V
Výstupný prúd I_O	50	A
Prevod transformátora TR	5	-
Kapacita výstupného filtra C_O	27	μF
Indukčnosť výstupného filtra L_O	4	μH
Kapacita odľahovacej siete C_S	220	nF
Indukčnosť odľahovacej siete L_S	300	nH

III. MODEL DC-DC MENIČA S MÄKKÝM SPÍNANÍM

V programe Matlab/Simulink bol vytvorený model DC-DC meniča s mäkkým spínaním, ktorého schéma je uvedená na obr. 3.

Pre návrh regulátora môže byť DC-DC menič zjednodušiť na menič napätia, ktorý je napájaný usmerneným sekundárnym napätím v_r , ako je znázornené na obr. 4. Pracovný cyklus sekundárneho tranzistora MOSFET T_S je obmedzený na cca.75%.

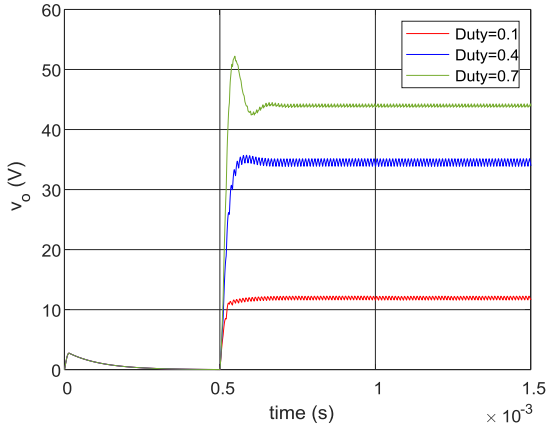


Obr. 4. Zjednodušený buck menič

Prenosová funkcia DC-DC meniča s mäkkým spínaním je aproximovaná spojitým systémom druhého rádu (1). Tento prístup síce zanedbáva zvlnenie spôsobené spínaním, ale zároveň vhodne zjednodušuje model meniča.

$$P(s) = \frac{v_o(s)}{d_{Ts}(s)} = \frac{K_c \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

Prenosová funkcia (1) má tri parametre, ktoré je potrebné určiť. Zisk K_C sa rovná priemernej hodnote výstupného napätia V_O a zahŕňa zosilnenie modulatora PWM. Prirodzená frekvencia ω_n je určená rezonančnou frekvenciou výstupného LC filtra. Tlmenie ζ je ovplyvnené zaťažením a pracovným cyklom. Na obr. 5 sú zobrazené simulované prenosové funkcie meniča, zaťaženého na cca. 25% menovitého výkonu ($R = 4 \Omega$) pre rôzne pracovné cykly.

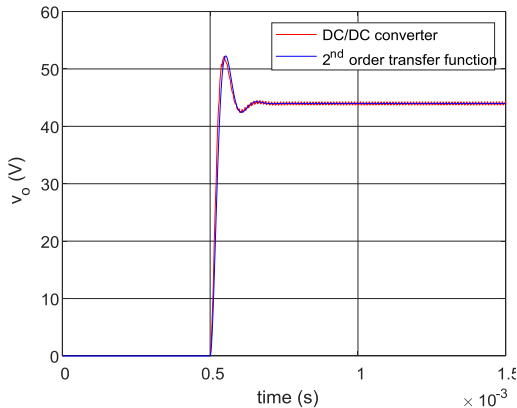


Obr. 5. Odozvy DC-DC meniča pre rôzne pracovné stavy

Prenosová funkcia je silne závislá od pracovného cyklu tranzistora T_S . Pre pracovný cyklus rovný 0,7 možno prenosovú funkciu aproximovať rovnicou (2).

$$P(s) = \frac{2 \cdot 10^{11}}{s^2 + 6,33 \cdot 10^4 s + 4,54 \cdot 10^9} \quad (2)$$

Grafické porovnanie aproximovanej (2) a reálnej prenosovej funkcie meniča je znázornené na obr. 6. Počiatočné zvýšenie výstupného napätia na začiatku simulácie je spôsobené nabíjaním výstupného kondenzátora C_O cez kondenzátor C_S a jeho následným vybitím.



Obr. 6. Porovnanie výstupného napätia DC-DC meniča a výstupu po aproximácii DC-DC meniča

IV. NÁVRH REGULÁTORA NAPÄTIA

Ako je možné vidieť na obr. 5, DC-DC menič predstavuje stabilný systém. Pre návrh PI regulátora bola použitá aproximovaná prenosová funkcia (2) DC-DC meniča. Spojitý PI regulátor (3) je navrhnutý s ohľadom na požadovanú časovú konštantu riadeného systému s uzavretou slučkou [11].

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (3)$$

Prenosová funkcia systému s uzavretou slučkou s PI regulátorom je:

$$F(s) = \frac{K_C K_p \omega_n^2 s + K_C K_I \omega_n^2}{s^3 + 2\zeta \omega_n s^2 + (K_C K_p + 1) \omega_n^2 s + K_C K_I \omega_n^2} \quad (4)$$

Na základe [11] sú póly menovateľa (4) umiestnené podľa (5) tak, že majú rovnaké časové konštanty:

$$s^3 + 2\zeta \omega_n s^2 + (K_C K_p + 1) \omega_n^2 s + K_C K_I \omega_n^2 = \left(s + \frac{1}{\tau}\right)^3 \quad (5)$$

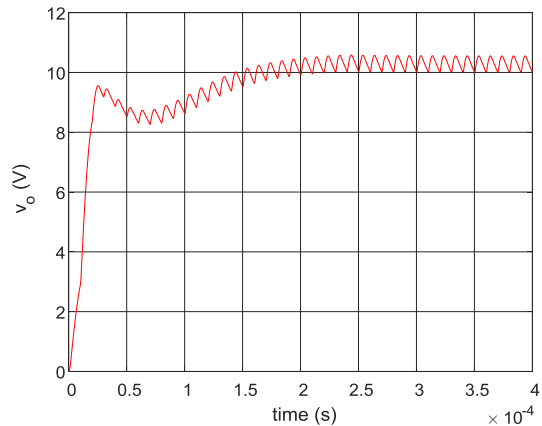
kde τ je dominantná časová konštanta uzavretej slučky. Riešením (5) boli získané koeficienty spojitého PI regulátora definované (6).

$$K_p = \frac{3/\tau^2 - \omega_n^2}{K_C \omega_n^2}; \quad K_I = \frac{1}{K_C \omega_n^2 \tau^3} \quad (6)$$

Spojitý PI regulátor bol v programe Matlab/Simulink verifikovaný na modeli DC-DC meniča (Obr.3), ktorého parametre sú uvedené v Tab.I.

V. OVERENIE

Činnosť navrhnutého spojitého PI regulátora bola overená simuláciou v programe MATLAB / Simulink. Programová schéma riadenia DC-DC meniča je uvedená na obr. 3. Dosiahnutá odozva DC-DC meniča je zobrazená na Obr. 7. Požadovaná hodnota výstupného napätia bola 10 V. Doba nastavenia výstupného napätia je cca. 150 μ s.



Obr. 7. Výstupné napätie riadeného DC-DC meniča simulovaného v programe MATLAB / Simulink (čas kroku $t = 0$ s, hodnota kroku = 10 V)

VI. ZÁVER

V príspevku je opísaný spôsob riadenia vhodný pre riadenie DC-DC meničov s mäkkým spínaním. Daný menič v porovnaní s tvrdo spínanými meničmi má schopnosť pracovať pri vyššej spínacej frekvencii s vyššou účinnosťou, čím sa zlepšujú dynamické vlastnosti a znižujú rozmery a hmotnosť meniča. V závere príspevku je uvedené simulačné overenie navrhnutého spôsobu riadenia.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Slovenskou agentúrou pre výskum a vývoj (APVV) v rámci Projektu APVV-16-020 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied (VEGA) v rámci projektu 1/0187/18.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] G. Kácsor, P. Špánik, J. Dudrik, M. Luft, and E. Szychta, "Principles of operation of three-level phase shift controlled converter", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 69-74, 2008.
- [2] M. Bodor, J. Dudrik and J. Perdulak, "ZVZCS PWM converter using secondary active clamp", *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 11, no. 3, pp. 26–30, 2011, [online] Available: <http://dx.doi.org/10.2478/v10198-011-0026-7>.
- [3] J. Dudrik and V. Ruscin, "Voltage fed zero-voltage zero-current switching PWM DC-DC converter," 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, (*EPE-PEMC*) pp. 295-300, 2008, [online] Available: doi:10.1109/EPEPEMC.2008.4635281.
- [4] J. Dudrik, M. Pástor, M. Lacko and R. Žatkovič, "High-frequency soft-switching PWM DC-DC converter with active output rectifier operating as a current source for arc welding applications," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 6, pp. 681-691, 2017.
- [5] J. Dudrik, M. Pástor, M. Lacko and R. Žatkovič, "Zero-voltage and zero-current switching PWM DC-DC converter using controlled secondary rectifier with one active switch and nondissipative turn-off snubber," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 6012-6023, 2018.
- [6] H. M. Rashid, *Power Electronics Handbook*, ISBN 978-0-12-382036-5, pp. 1409, 2011.
- [7] M. Leso, J. Žilková, J., M. Biros and P. Talian, "Survey of control methods for DC-DC converters," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 18, no. 3, pp. 41-46, 2018, [online] Available: DOI: 10.15546/aei-2018-0024.
- [8] S. Verma, S.K. Singh and A.G. Rao, "Overview of control techniques for DC-DC converters", *Research Journal of Engineering Sciences*, vol.2, no. 8, pp. 18-21, 2013, ISSN 2278 – 9472.
- [9] A.I. Bogdan and N. Bizon, "Voltage-mode control of the DC-DC power converter - a short review", 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, pp.E-27-E-32, 2015.
- [10] Jian Sun: *Dynamics and control of switched electronic systems*, Chapter 2: Pulse-Width Modulation, ISBN: 978-1-4471-2884-7, 2012.

- [11] F. Deniz, B. Alagoz, and N. Tan, "PID controller design based on second order model approximation by using stability boundary locus fitting," *Proc. 9th Int. Conf. Elect. Electron. Eng.*, pp. 827–831, Nov. 2015.
- [12] N. George, V. N. Panchalai, E. Sebastian and S. Narayanan, "Digital voltage-mode-control of a full-bridge phase-shift-modulated DC-DC converter," *Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*, pp. 1-6, 2014.
- [13] G. Mallesham, S. Mishra, A.N. Jha, "Maiden application of Ziegler-Nichols method to AGC of distributed generation system," *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09 IEEE/PES*, pp.1-7, 2009.
- [14] H. Jingqing, "From PID to active disturbance rejection control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, no.3, pp.900-906, March 2009.
- [15] M. Namnabat, M. B. Poodeh and S. Eshtehardiha, "Comparison of the control methods in improvement the performance of the DC-DC converter", *ICPE '07, 7th International Conference on Power Electronics*, pp.246-251, 2007.
- [16] M. P. Kazmierkowski, F. Blaabjerg and R. Krishnan, *Control in power electronics-selected problems*. Elsevier Science, San Diego, 2002.

M. Pástor (Ing., PhD.) - titul PhD. získal na Technickej univerzite v Košiciach v odbore silnoprúdová elektrotechnika v roku 2014. V súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky so zameraním na výkonovú elektroniku, polovodičové meniče a obnoviteľné zdroje energie.

J. 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.

Oblasti jej výskumnej činnosti sú hlavne moderné metódy riadenia elektrických pohonov a aplikácie metód umelej inteligencie v elektrotechnických systémoch.