

PWM DC-DC menič s jednoduchou sekundárnou vypínacou sieťou

PWM DC-DC Converter with Simple Secondary Turn-Off Snubber

Jaroslav Dudrik

jaroslav.dudrik@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita, Letná 9, Košice, Slovenská republika

Abstrakt—V článku je uvedený nepriamy jednosmerný menič v mostíkovom zapojení so šírkovým riadením so spínaním v nule napätia a v nule prúdu (ZVZCS). Na výstupnej strane meniča je použitý riadený usmerňovač pozostávajúci z dvoch usmerňovacích diód a s jedného aktívneho sekundárneho polovodičového spínača. Výkonové spínače striedača zapínajú v nule napätia a vypínajú v nule prúdu. Sekundárny spínač síce zapína v nule prúdu, ale má tvrdé vypínanie. Menič je preto doplnený o jednoduchú sieť na zníženie vypínacích strát sekundárneho spínača, čím sa dosiahne jeho vypínanie v nule napätia. Navyše tento obvod, umožňuje vrátiť energiu vzniknutú pri vypínaní sekundárneho spínača do záťaže. Pre riadenie meniča je použité modifikované šírkové riadenie. V článku je vysvetlená a analyzovaná činnosť meniča a sú uvedené simulačné výsledky z programu OrCAD.

Kľúčové slová—DC-DC menič, spínanie v nule napätia (ZVS), spínanie v nule prúdu (ZCS), sekundárny riadený usmerňovač

Abstract—A zero-voltage zero-current switching (ZVZCS) full-bridge PWM DC-DC converter with controlled secondary side rectifier consisting of two rectifying diodes and one active switch is presented in the paper. Zero-voltage turn-on and zero-current turn-off for power switches of the inverter are achieved. Secondary switch of the DC-DC converter turns on at zero current but turns off hard. Therefore the converter is complemented by simple secondary turn-off snubber and thus turn off of the secondary switch is achieved. Moreover, the energy incurred at turn-off of the secondary switch is transferred back to the load. Modified PWM control strategy is used for the converter. In the paper the principle of operation is explained and analyzed and simulation results are presented.

Keywords—DC-DC converter, zero-voltage switching (ZVS), zero-current switching (ZCS), secondary controlled rectifier

I. ÚVOD

Klasické DC-DC meniče so šírkovým riadením s fázovým posunom (PS-PWM - phase shifted pulse width modulation) sa často používajú v rôznych aplikáciách, pretože ich topológia umožňuje využiť parazitné prvky obvodu, ako napr. rozptylovú indukčnosť transformátora a výstupné kapacity spínačov, na dosiahnutie spínanie v nule napätia (ZVS - zero-voltage switching) [1-5].

V praxi často používané meniče so šírkovým riadením s fázovým posunom (PS-PWM - phase shifted pulse width modulation) [1-5] majú nevýhodu v tom, že vplyvom uvedeného riadenia vzniká okruhový prúd tečúci cez primárne a sekundárne vinutie transformátora a cez primárne spínače v čase tzv. nulového intervalu, t. j. intervalu, kedy je na pri-

márnom aj teda aj na sekundárnom vinutí transformátora nulové napätie. V tom čase vyhladzovacia indukčnosť sekundárneho LC filtra pretláča prúd cez sekundárne usmerňovacie diódy a sekundárne (a teda aj primárne) vinutie transformátora. Keďže v tom čase je napätie transformátora nulové, neprenáša sa na výstup meniča žiadny výkon. Ide teda o jalovú energiu, ktorá má však za následok zvýšenie vodivostných strát vo vinutí transformátora a v polovodičových súčiastkach na primárnej aj sekundárnej strane, ktoré stoja v ceste tomuto okruhovému prúdu. Tieto vodivostné straty majú za následok zníženie účinnosti meniča.

Na zníženie okruhových prúdov, podľa možnosti na nulu, sa používajú rôzne prídavné obvody, siete a odľahčovacie obvody, ktoré sú zapojené obvyčajne na sekundárnej strane výkonového transformátora [1-5].

Zníženie okruhových prúdov sa obvyčajne dosiahne pripojením záporného potenciálu na diódy sekundárneho usmerňovača, čím dôjde k ich vypnutiu. Takýmto spôsobom sa dosiahne pokles prúdu v sekundárnom a tým aj v primárnom vinutí transformátora.

Rovnaký alebo ešte výraznejší efekt pri odpojení sekundárneho vinutia transformátora sa dosiahne použitím sekundárneho riadeného usmerňovača [6-8]. Pre energiu vyhladzovacej indukčnosti je potom potrebné vytvoriť voľnú cestu, čo sa zvyčajne realizuje pripojením sekundárnej nulovej diódy. Okrem zníženia okruhového prúdu sa pri tomto konkrétnom meniči a pri tomto spôsobe riadenia dosiahne súčasne aj vypínanie tranzistorov striedača v nule prúdu.

II. ZAPOJENIE MENIČA

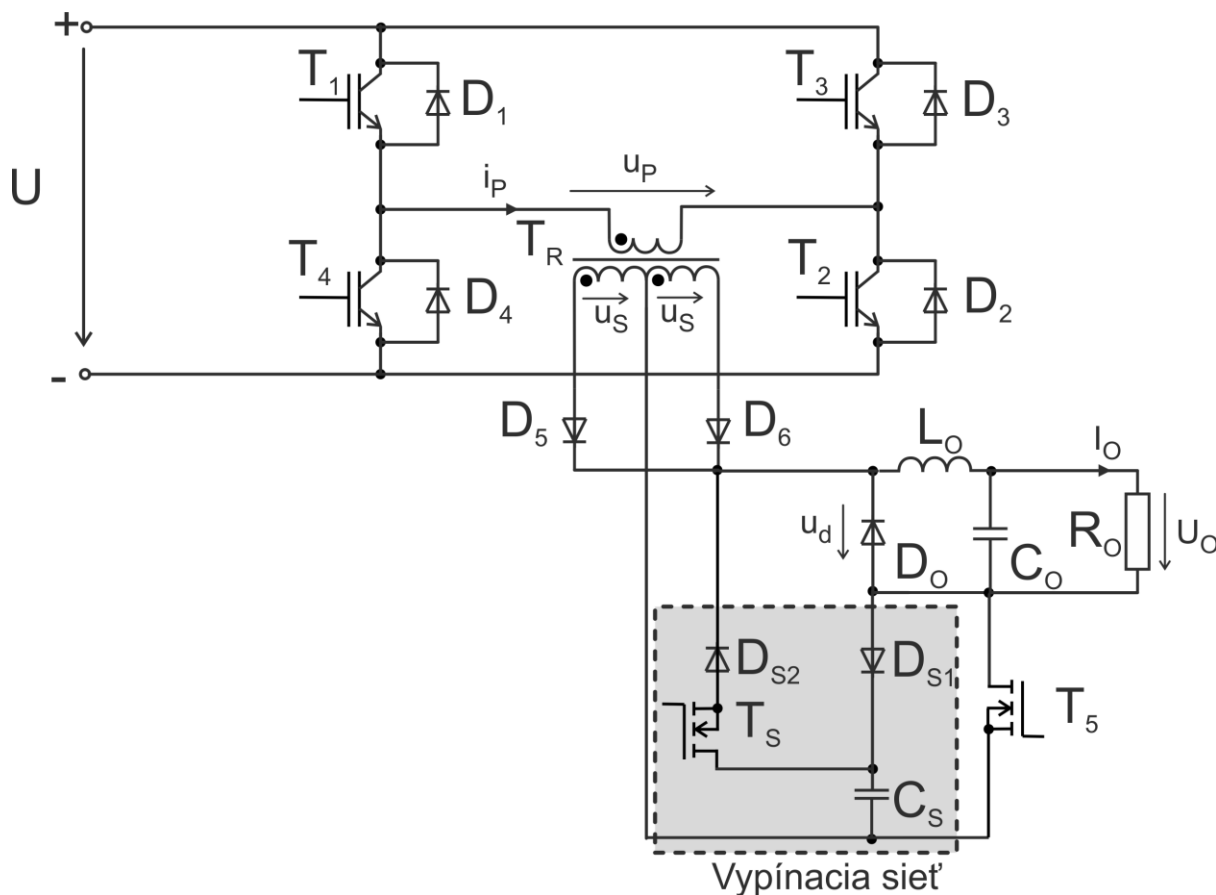
Nepriamy jednosmerný menič s mäkkým spínaním s výstupným riadeným usmerňovačom je znázornený na obr. 1. Hlavnou časťou DC-DC meniča je vysokofrekvenčný striedač v mostíkovom zapojení pozostávajúci zo štyroch IGBT tranzistorov ($T_1 - T_4$) a štyroch spätných diód ($D_1 - D_4$). Sekundárne vinutie vysokofrekvenčného znižovacieho transformátora je pripojené cez rýchle usmerňovacie diódy D_5 , D_6 a sekundárny spínač T_5 na výstupný filter pozostávajúci z vyhladzovacej indukčnosti L_O a kondenzátora C_O . Použitie nulovej diódy D_O je v tomto prípade nutné.

Výstupný výkon meniča je riadený šírkou riadiaceho impulzu na sekundárnom spínači T_5 .

Základná schéma meniča je doplnená o prídavné obvody pozostávajúce z kondenzátora C_S , diód D_{S1} , D_{S2} a pomocného spínača T_S . Tieto súčiastky tvoria bezstratovú vypínanú od-

ľahčovaciu sieť. Je veľmi jednoduchá a obsahuje len jednu reaktívnu súčiastku – kondenzátor C_S . Funkcia vypínacej odľahčovacej siete spočíva v znížení nárastu kolektorového napätia na sekundárnom MOSFET tranzistore T_5 , čo vedie k zníženiu jeho vypínacích strát.

Bez použitia tejto siete by mal tranzistor T_5 tvrdé vypínanie a teda veľké vypínacie straty. Tým by sa znižovala aj celková účinnosť meniča. Funkcia vypínacej siete je akumulčná aj rekuperačná. Energia akumulovaná v kondenzátore siete sa následne odovzdáva do záťaže.



Obr. 1. Schéma meniča.

III. PRINCÍP ČINNOSTI

Činnosť meniča môžeme rozdeliť do jedenástich intervalov v rámci jednej polperiódy. Teoretické priebehy jednotlivých veličín meniča sú zobrazené na obr. 2. Riadenie striedača je veľmi jednoduché – striedavo spínajú dvojice tranzistorov v uhlopriečke T_1, T_2 a T_3, T_4 s konštantnou striedou 0,5 (ak zanedbáme bezpečnostnú medzeru t_d). Sekundárny tranzistor T_5 zapína súčasne s dvojicami tranzistorov T_1, T_2 a T_3, T_4 a jeho doba zapnutia sa môže meniť od nuly až po takmer $T/2$. Frekvencia spínania sekundárneho spínača T_5 je dvojnásobná oproti tranzistorom striedača, čo je v tomto prípade 100 kHz. Šírkou riadiaceho impulzu pre sekundárny spínač sa riadi veľkosť výstupného výkonu meniča. Tranzistor siete T_5 má rovnakú šírku riadiaceho signálu ako sekundárny spínač T_5 , ale je oproti nemu posunutý o určitý čas t_{ds} .

Interval (t_0-t_1):

V čase t_0 zapnú primárne tranzistory T_1, T_2 v striedači súčasne so sekundárnym spínačom T_5 . V tomto intervale prebieha komutácia medzi nulovou diódou D_O a usmerňovacou diódou D_5 . Nárast sekundárneho a teda aj primárneho prúdu je obmedzený rozptyľovou indukčnosťou transformátora. Týmto obmedzením nárastu prúdu sa zabezpečí zapínanie v nule prúdu sekundárneho tranzistora ako aj primárnych tranzisto-

rov. V čase komutácie je na sekundárnom vinutí transformátora nulové napätie.

Interval (t_1-t_2):

V čase t_1 je ukončená komutácia medzi nulovou diódou D_O a usmerňovacou diódou D_5 a prúd diódy D_5 ako aj sekundárneho tranzistora T_5 dosiahol hodnotu prúdu vo vyhladzovacej indukčnosti.

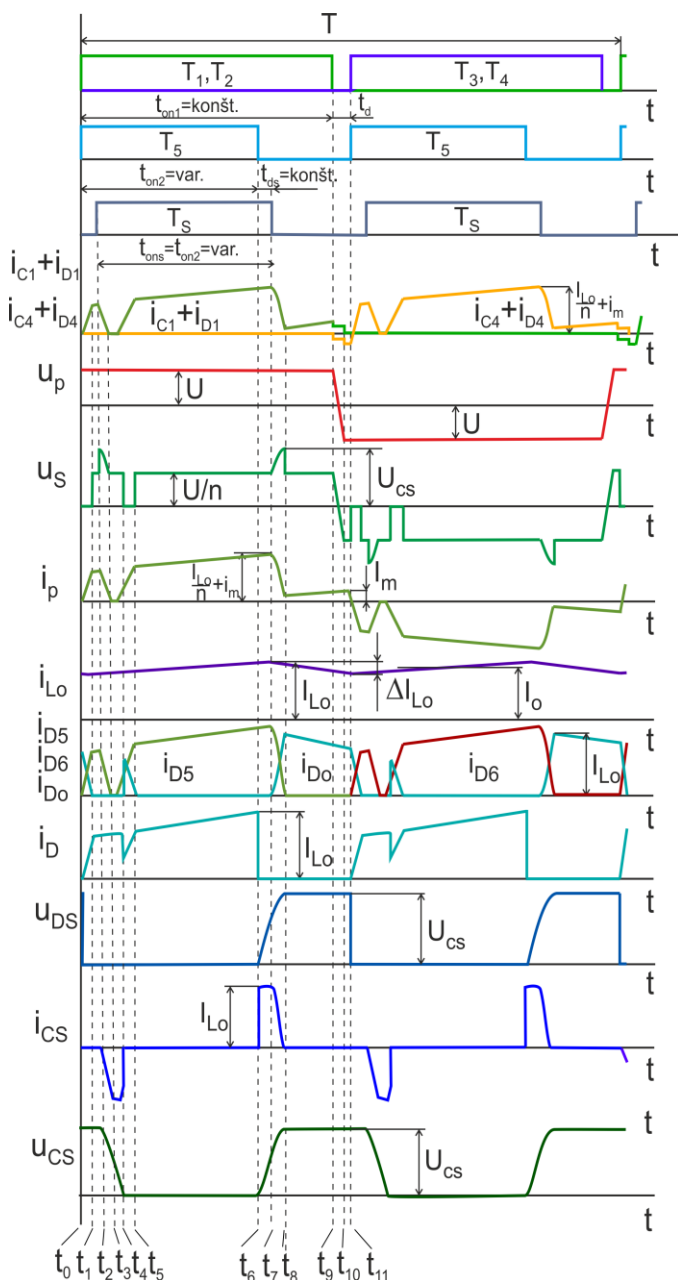
Interval (t_2-t_3):

V čase t_2 zapne tranzistor T_5 vypínacej siete a začne komutácia medzi ním a usmerňovacou diódou D_5 , pričom nárast prúdu tranzistora T_5 je obmedzený rozptyľovou indukčnosťou transformátora a tým sa dosiahne zapínanie tranzistora T_5 v nule prúdu. Zapnutím tranzistora siete T_5 pripojíme nabitý kondenzátor C_S na výstup usmerňovača, čím sa dosiahne vypnutie usmerňovača. Zároveň sa to prejaví zvýšeným sekundárnym napätím, keďže kondenzátor má vyššie napätie ako je na sekundárnej strane transformátora.

Interval (t_3-t_4):

V tomto intervale dosiahol prúd tranzistora T_5 a teda aj vybíjací prúd i_{CS} kondenzátora C_S vypínacej siete hodnotu prúdu

vyhladzovacej indukčnosti L_O . V intervale t_2 - t_4 sa odovzdáva energia, akumulovaná v kondenzátore siete, do záťaže a napätie u_{CS} kondenzátora siete klesne v čase t_4 na nulu.



Obr. 2. Základné časové priebehy meniča.

Interval (t_4 - t_5):

V čase t_4 prekomutuje vybijací prúd kondenzátora C_S (je to aj prúd tranzistora T_S) i_{CS} späť na nulovú diódu D_O . Táto komutácia je rýchla, lebo v obvodu komutácie je len parazitná indukčnosť vodičov. V intervale t_4 - t_5 prebieha aj komutácia medzi nulovou diódou D_O a usmerňovacou diódou D_5 . V tom čase je na sekundárnom napätí transformátora nulové napätie. O hodnotu prúdu, ktorý v intervale t_4 - t_5 vedie nulová dióda je zmenšený prúd sekundárneho tranzistora T_5 .

Pokles v prúde diódy D_5 , a teda aj sekundárneho a primárneho prúdu transformátora v intervale t_2 - t_5 je spôsobený vybijaním kondenzátora siete do záťaže s následnou rýchlou komutáciou na nulovú diódu v čase t_4 .

Interval (t_5 - t_6):

V tomto intervale sa odohráva prenos energie zo zdroja do záťaže. Nárast sekundárneho ako aj primárneho prúdu transformátora je daný vyhladzovacou tlmivkou L_O vo výstupnom filtri.

Interval (t_6 - t_7):

V čase t_6 vypne sekundárny tranzistor T_5 a jeho prúd prekomutuje na kondenzátor C_S a diódu D_{S1} . Komutácia je rýchla, lebo v obvodu komutácie je len parazitná indukčnosť vodičov. Sekundárny prúd teraz tečie cez usmerňovaciu diódu D_5 , kondenzátor C_S a diódu D_{S1} . Prúd kondenzátora C_S počas intervalu t_6 - t_7 môžeme považovať za konštantný a preto nárast napätia na kondenzátore je lineárny. Pretože kondenzátor C_S je cez diódu D_{S1} pripojený paralelne ku sekundárnemu tranzistoru T_5 , potom rovnaká strmosť nárastu napätia je aj na tranzistore T_5 . Tým sa dosiahne vypínanie tranzistora T_5 v nule napätia, čo je hlavnou úlohou navrhutej vypínacej siete.

Interval (t_7 - t_8):

V čase t_7 sa nabije kondenzátor C_S na hodnotu sekundárneho napätia a tak nulová dióda začne byť kladne polarizovaná. Dôjde ku komutácii medzi nulovou diódou D_O a usmerňovacou diódou D_5 . V obvodu komutácie sa nachádza rozptylová indukčnosť transformátora a preto sa celá jej energia odovzdá do kondenzátora C_S , čo sa prejaví na zvýšenom napätí u_S na sekundárnej strane transformátora, ktoré stúpne na hodnotu U_{CS} .

V čase t_8 prúd na sekundárnej strane poklesne na nulu a na primárnej strane na hodnotu magnetizačného prúdu.

Interval (t_8 - t_9):

Tento interval sa vyznačuje tým, že na výkonovom transformátore je síce napätie, ale výkon sa na výstup meniča nedodáva, lebo sekundárny spínač T_5 je vypnutý. Na primárnej strane tečie len malý magnetizačný prúd I_m a na výstupe meniča sa prúd vyhladzovacej indukčnosti L_O uzatvára cez nulovú diódu D_O .

Interval (t_9 - t_{10}):

V čase t_9 zanikne riadiaci signál pre tranzistory T_1, T_2 , ktoré následne vypínajú malý magnetizačný prúd. Vypínajú v podstate v nule prúdu. Zároveň sa v intervale ($t_9 - t_{10}$) nabíjajú magnetizačným prúdom výstupné kapacity tranzistorov T_1, T_2 , ktoré znižujú strmosť nárastu napätia kolektor-emitor na tranzistoroch, čím zabezpečia aj vypínanie v nule napätia. Nabitie výstupných kapacít tranzistorov T_1, T_2 , (a zároveň vybitie výstupných kapacít tranzistorov T_3, T_4) sa musí stihnúť počas bezpečnostnej medzery t_d . Zároveň dôjde k prepólovaniu primárneho aj sekundárneho napätia transformátora.

Interval (t_{10} - t_{11}):

V okamihu t_{10} je nabíjanie (resp. vybijanie) výstupných kapacít tranzistorov ukončené a magnetizačný prúd prekomutuje na spätné diódy D_3, D_4 , čím sa zabezpečí zapínanie v nule napätia pre tranzistory T_3, T_4 .

Analogicky by postupovalo pri analýze meniča v druhej polperióde.

IV. SIMULAČNÉ VÝSLEDKY

Pre získanie simulačných výsledkov bol zostavený simulačný model meniča v programe OrCAD. Na tomto modeli sa overovali vlastnosti navrhnutého a predtým teoreticky analyzovaného meniča. Základné parametre meniča sú zhrnuté v Tab. 1 a parametre vysokofrekvenčného výkonového transformátora sú v Tab. 2.

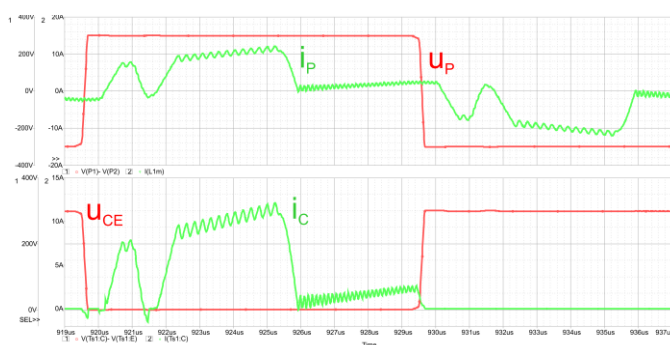
TABUEKA I

Parametre meniča	
Napájacie napätie	$U = 300 \text{ V}$
Frekvencia spínania	$f_s = 50 \text{ kHz}$
Výstupné napätie	$U_o = 50 \text{ V}$
Výstupný prúd	$I_o = 50 \text{ A}$
Spôsob riadenia meniča	Modifikované PWM
Kondenzátor vypínacej siete	$C_s = 150 \text{ nF}$

TABUEKA II

Parametre transformátora	
Prevod transformátora $p = N_1/N_2$	$p = 5$
Hlavná indukčnosť	$L_m = 610 \mu\text{H}$
Rozptylová indukčnosť	$L_\sigma = 9 \mu\text{H}$

Na hornej časti obr. 3 je primárne napätie a primárny prúd transformátora. Hodnota primárneho prúdu klesne na veľkosť magnetizačného prúdu po vypnutí sekundárneho tranzistora T_5 . Tento malý magnetizačný prúd je následne vypínaný primárnym tranzistorom T_1 a preto jeho vypínacie straty sú zanedbateľné. Zároveň je vidieť, že okružový prúd typický pre meniče so šírkovým riadením s fázovým posunom je tu vplyvom riadeného usmerňovača úplne potlačený. Znížili sa tým vodivostné straty.

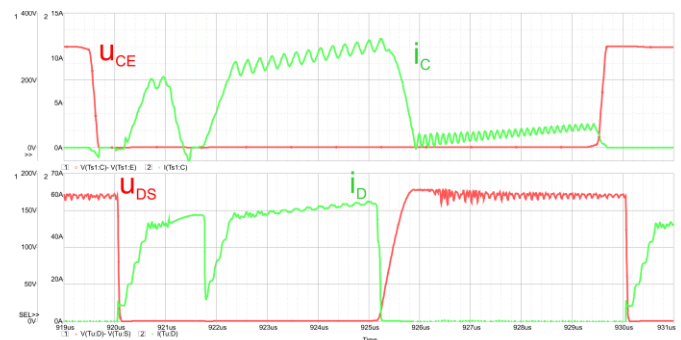


Obr. 3. Primárne napätie U_P a primárny prúd I_P transformátora (horná časť). Napätie kolektor-emitor U_{CE} a prúd kolektora I_C tranzistora T_1 (dolná časť)

Napätie a prúd primárneho spínača T_1 sú znázornené v dolnej časti obr. 3. Zapnutie tranzistora T_1 sa uskutočňuje v nule napätia, pretože jeho výstupná kapacita je predtým vybitá na nulové napätie a len malý magnetizačný prúd tečie cez jeho spätnú diódu D_1 (vidieť to v intervale $t_{10} - t_{11}$ pre T_4 na obr. 2), teda podmienky pre zapnutie v nule napätia sú splnené. Nárast kolektorového prúdu tranzistora T_1 je obmedzený rozptylovou indukčnosťou transformátora a preto

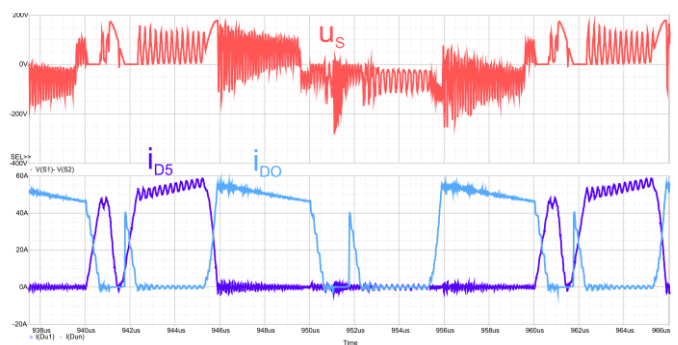
je dosiahnuté zapínanie aj v nule prúdu. Tranzistor vypína len malý magnetizačný prúd a preto môžeme povedať, že vypína približne v nule prúdu (interval $t_9 - t_{10}$ na obr. 2).

Na dolnej časti obr. 4 sú zobrazené priebehy napätia a prúdu sekundárneho spínača T_5 , časovo porovnávané s napätím a prúdom primárneho spínača T_1 . Pri zapnutí tranzistora T_5 klesne jeho napätie kolektor-emitor prudko k nule. Nárast kolektorového prúdu je však obmedzený rozptylovou indukčnosťou transformátora. Zapínacie straty môžeme teda zanedbať. Pri vypínaní je strmosť nárastu kolektorového napätia obmedzená nabíjaním kondenzátora siete C_s a tým je dosiahnuté vypínanie v nule napätia (interval $t_6 - t_8$ na obr. 2 a priebeh u_{CS} na obr. 6).



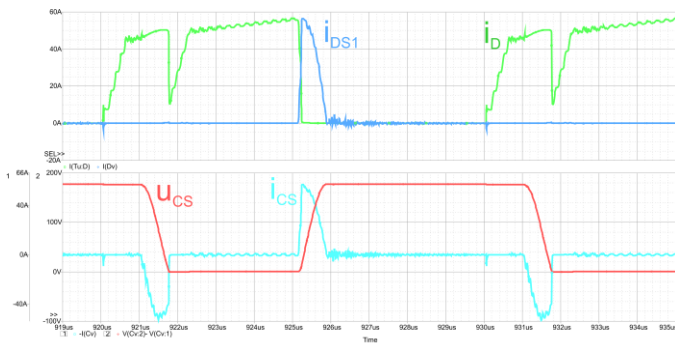
Obr. 4. Napätie kolektor-emitor u_{CE} a prúd kolektora i_C tranzistora T_1 (horná časť). Napätie kolektor-emitor u_{DS} a prúd kolektora i_D tranzistora T_5 (dolná časť).

V čase keď sa sekundárny spínač T_5 zapína dochádza zároveň ku komutácii z nulovej diódy na usmerňovacia diódu a tým sa vytvára skrat na výstupe transformátora, čo sa prejaví nulovým úsekom v sekundárnom napätí u_s (obr. 5). Takýto stav nastáva v intervaloch $t_0 - t_1$ a $t_4 - t_5$.



Obr. 5. Sekundárne napätie transformátora u_s (horná časť). Prúdy usmerňovacej diódy i_{DS} a nulovej diódy i_{DO} (dolná časť).

V čase vypnutia sekundárneho spínača (okamih t_6 na obr. 2) energia rozptylovej indukčnosti transformátora, ktorá je v sérii so spínačom, najprv nabíja kondenzátor C_s vypínacej siete na hodnotu sekundárneho napätia transformátora (interval $t_6 - t_7$) a potom sa uskladňuje v kondenzátore C_s a spôsobuje zvýšenie napätia na kondenzátore siete, čo sa prejaví aj na zvýšenom sekundárnom napätí transformátora v intervale $t_7 - t_8$ (obr. 2, obr. 5).



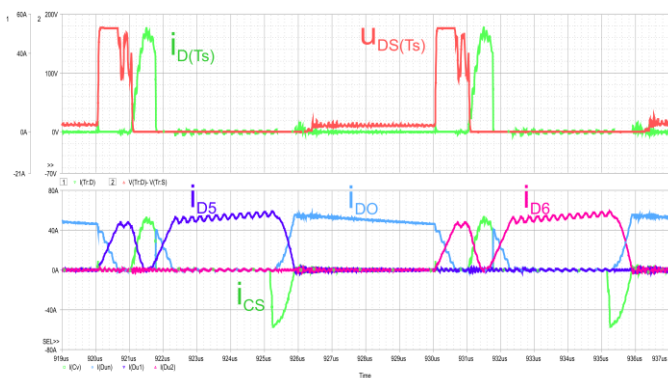
Obr. 6. Kolektorový prúd i_D tranzistora T_5 a prúd diódy siete i_{DS1} (horná časť). Napätie u_{CS} a prúd i_{CS} kondenzátora vypínacej siete (dolná časť).

Po vypnutí sekundárneho tranzistora T_5 , preberie prúd najprv kondenzátor vypínacej odľahčovacej siete C_S cez diódu D_{S1} (obr. 6). Týmto prúdom sa nabije kondenzátor siete na napätie vyššie ako je sekundárne napätie transformátora. Je to dané rozptyľovou indukčnosťou transformátora, ktorá je v sérii s tranzistorom T_5 , a ktorej energia sa uskladní v kondenzátore siete (horný priebeh).

Vybitie kondenzátora C_S na nulu nastane po zapnutí tranzistora siete T_S (dolný priebeh na obr. 6)

Spínacie pomery na tranzistore siete T_S sú znázornené na obr. 7 - horný priebeh. Tranzistor má mäkké spínanie - zapína v nule prúdu a vypína v nule napätia aj v nule prúdu.

Na dolnej časti obr. 7 je vysvetlený pokles sekundárneho aj primárneho prúdu transformátora. Tento pokles je spôsobený jednak prúdom, ktorý je dodávaný kondenzátorm C_S pri zapnutí spínača siete T_S (interval $t_2 - t_4$ na obr. 2) a jednak prúdom nulovej diódy počas komutácie s usmerňovačovou diódou v intervale $t_4 - t_5$ na obr. 2.



Obr. 7. Napätie kolektor-emitor $u_{DS(Ts)}$ a prúd kolektora $i_{D(Ts)}$ tranzistora siete T_S (horná časť). Prúdy usmerňovacích diód i_{DS} , i_{D6} , nulovej diódy i_{DO} a kondenzátora vypínacej siete i_{CS} (dolná časť).

V. ZÁVER

Simulačné výsledky potvrdzujú predpokladanú činnosť DC-DC meniča s novou rekuperačnou odľahčovacou sieťou na sekundárnej strane transformátora. Tranzistory striedača $T_1 - T_4$ zapínajú v nule napätia a v nule prúdu a vypínajú v nule prúdu. Sekundárny spínač T_5 zapína v nule prúdu a vypína v nule napätia. Tranzistor siete T_S zapína v nule prúdu a vypína v nule napätia aj v nule prúdu. Okruhový reaktívny prúd,

ktorý je typický pre meniče so šírkovým riadením s fázovým posunom, je úplne zredukovaný pomocou riadeného výstupného usmerňovača. Možno teda konštatovať, že všetky výkonové spínače v meniči majú zabezpečené mäkké spínanie, čo umožňuje ďalšie zvyšovanie spínacích frekvencií a tým aj znižovanie rozmerov a hmotností meničov.

POĎAKOVANIE

Článok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0187/18 "Vývoj dynamicky náročných a energeticky optimálnych elektromechanických systémov".

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] G.N.B., Yadav, N.L. Narasamma, "An Active Soft Switched Phase-Shifted Full-Bridge DC-DC Converter: Analysis, Modeling, Design, and Implementation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 9, pp. 4538-4550, doi: 10.1109/TPEL.2013.2284780
- [2] S. Moiseev, S. Hamada, M. Nakaoka, "Full-bridge soft-switching phase-shifted PWM DC-DC power converter using tapped inductor filter", *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, no. 12, pp. 924-925, doi: 10.1049/el:20030604.
- [3] A. Safaei, P. Jain, A. Bakhshai, A, "A ZVS Pulse width Modulation Full-Bridge Converter With a Low-RMS-Current Resonant Auxiliary Circuit", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 6, pp. 4031-4047, doi: 10.1109/TPEL.2015.2473822
- [4] H. Wu, L. Chen, Y. Xing, "Secondary-Side Phase-Shift-Controlled Dual-Transformer-Based Asymmetrical Dual-Bridge Converter With Wide Voltage Gain", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, no. 10, pp. 5381 - 5392, doi: 10.1109/TPEL.2014.2371922.
- [5] A. Mousavi, G. Moschopoulos, "A New ZCS-PWM Full-Bridge DC-DC Converter With Simple Auxiliary Circuits", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 3, pp. 1321 - 1330, doi: 10.1109/TPEL.2013.2259847.
- [6] M. Bodor, J. Dudrik, J. Perduľak, "ZVZCS PWM converter using secondary active clamp", *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 26-30, doi: 10.2478/v10198-011-0026-7.
- [7] T. Mishima, K. Akamatsu, M. Nakaoka, "A High Frequency-Link Secondary-Side Phase-Shifted Full-Range Soft-Switching PWM DC-DC Converter With ZCS Active Rectifier For EV Battery Chargers", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28 no. 12., pp. 5758 - 5773, doi: 10.1109/TPEL.2013.2258040.
- [8] J. Dudrik, M. Pástor, M. Lacko, 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 / - 2018. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 33, no. 7 (2018), p. 6012-6023. - ISSN 0885-8993



Jaroslav Dudrik ukončil vysokoškolské štúdium na Vysokej škole technickej v Košiciach v odbore Silnoprávová elektrotechnika v roku 1976. V roku 1987 po obhájení kandidátskej dizertačnej práce získal vedeckú hodnosť CSc. v odbore Elektrické pohony a trakcia. V roku 1991 bol habilitovaný v odbore Výkonová elektronika

a v roku 2008 vymenovaný za vysokoškolského profesora v odbore Silnoprávová elektrotechnika. Od ukončenia svojho štúdia pracuje na Katedre elektrických pohonov, v súčasnosti pod názvom Katedra elektrotechniky a mechatroniky. Oblasťou jeho výskumu je výkonová elektronika a v rámci nej hlavne oblasť výkonových vysokofrekvenčných meničov s mäkkým spínaním.