

Ovrednotenje izgub v dušilki enosmernega presmernika

Peter Zajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-mail: peter.zajec@fe.uni-lj.si

Evaluation of choke's losses of a DC-DC converter

The paper proposes an indirect method for determining the losses of DC chokes under real working conditions faced in DC-DC converters. Instead of direct measurement of loss power based on power analyser with sufficient high bandwidth, the proposed method relies on measurements in phantom load configuration, which in turn enables the use of a lower quality power meter. The proposed method takes more time and labour, since choke has to reach its thermal steady-state under two different current set-ups, but nevertheless, the comparison proves that the indirect estimation is far more reliable especially in converters with high efficiency, and it provides a better estimation of losses also on MOSFETs.

1 Več-vejni presmernik s PWM prepletom

Zastopanost enosmeren presmernikov (DC-DC pretvorniki) z višjimi izhodnimi toki (več od 100 A) se iz leta v leto povečuje. Če smo jih do sedaj večinoma povezovali s t.i. *Point-of-load* (POL) napajalniki v nizkonapetostnih digitalnih sistemih [1], pa je glede na aktualne trende elektrifikacije vozil pričakovati, da se bodo tovrstni pretvorniki množičneje uveljavili tudi pri pretvorbi oziroma nadzoru pretoka moči med nizkonapetostnimi sklopi (do 60 V) [2]–[7].

V obeh aplikacijah so pretvorniki praviloma izvedeni iz večjega števila (n) vzporedno delujočih pretvornikov (slika 1a), kjer vsaka pretvorniška veja zagotovi bremenu enak delež celokupne moči. Močnostna stikala preklaplajo po načelu pulzno širinske modulacije (PWM) z enotno frekvenco (f_{sw}), pri čemer so PWM signali med posameznimi vejami fazno

zamaknjeni ($360^\circ/n$). Prednosti tovrstnega obratovanja so:

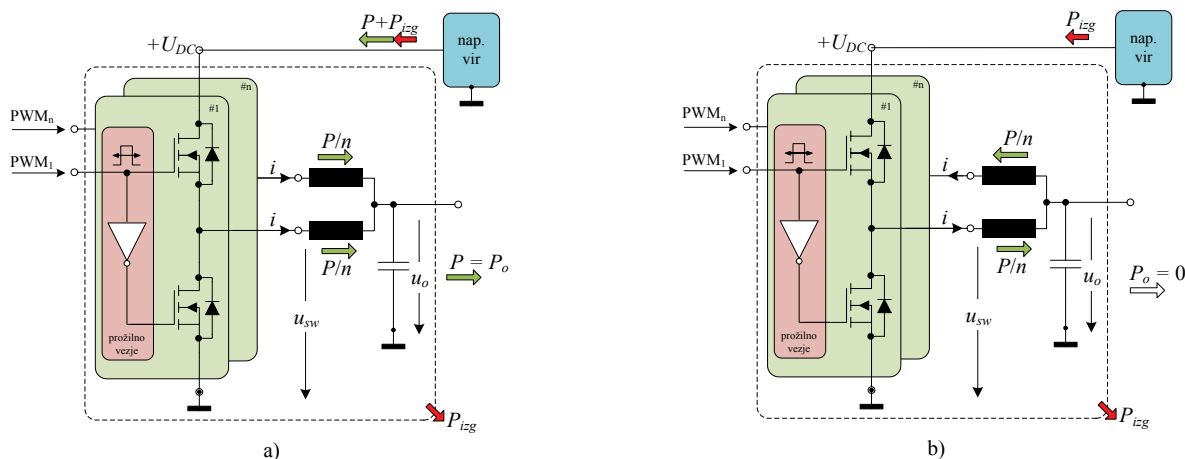
- zmanjšanje amplitude [6] in povišanje frekvence ($n \cdot f_{sw}$) valovitosti toka skozi izhodni ter v manjši meri tudi skozi vhodni kondenzator,
- zmanjšanje volumna obeh kondenzatorskih sklopov in pretvornika v celoti.

Zaradi načina in mesta uporabe se seveda pričakuje, da izkoristek in specifična moč pretvornika (izražena v kW/dm^3 ali v kW/kg) dosegata visoke vrednosti. Ob tem imata velikost kot tudi porazdelitev izgubne moči med komponentami ključno vlogo pri preprečevanju lokalnega pregrevanja in potencialnega skrajšanja življenjske dobe posamezne komponente.

2 Pasti pri napovedi in meritvi izgub

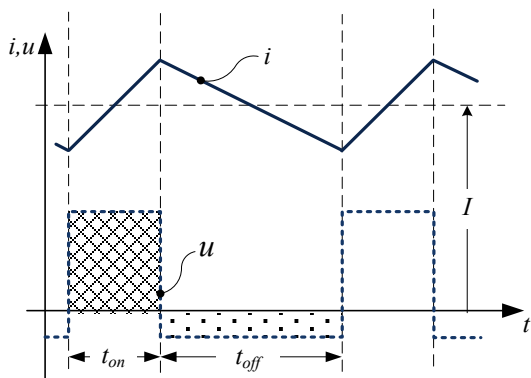
Posledično se pri načrtovanju pretvornika ne moremo izogniti termičnemu modeliranju. V splošnem je točnost tako dobljenih rezultatov odvisna od poenostavitve pri opisu modela posamezne komponente, mehanizmov prenosa toplotnega toka med komponentami ter poenostavitve pri izračunu izgubne moči v posamezni komponenti. Če v nadaljevanju vzamemo v obzir le izgube gladilne dušilke, lahko odstopanje njenih ocenjenih izgub od dejanskih pripišemo:

- uporabljenemu opisu magnetenja jedra [8], [9] ter njegovim omejitvam,
- odstopanju modelnih parametrov, ki so pogosto določeni pri sinusnih veličinah in z okrnjeno frekvenčno veljavnostjo,
- neupoštevanju izgub v zračni reži (slednje velja toliko bolj za dušilke narejene v lastni režiji),
- točnosti izmerjenih izgub dušilke.



Slika 1. Konceptualna shema več-vejnega presmernika – pretok moči pri: a) realni in b) fantomski obremenitvi.

Velikost omenjenih odstopanj je v posamični aplikaciji težko pravilno razvrstiti. Vendar pa se v praksi pogosto izkaže, da sta način in točnost meritve izgub v nasprotju s pričakovanji poglavitni izvor odstopanj.



Slika 2. Idealizirana poteka toka in napetosti dušilke.

Razlog odstopanj tiči v časovnem poteku toka in napetosti na dušilki enosmernega presmernika (slika 2). Tok dušilke ima praviloma veliko enosmerno komponento s po amplitudi majhno superponirano visokofrekvenčno komponento toka značilne trikotne oblike. Napetost na dušilki je enaka razliki med vsiljeno napetostjo posamezne tranzistorske veje u_{sw} ter izhodno napetostjo konstantnega iznosa. Ker je srednja vrednost napetosti na dušilki proporcionalna njeni ekvivalentni upornosti, le-ta pa lahko pri kakovostnih, nizkoizgubnih dušilkah znaša vsega nekaj tisočink Ohma, je razmerje med srednjo in izmenično komponento napetosti ravno obratno kot pri toku. Poleg tega ima frekvenčni spekter pravokotnega poteka napetosti v primerjavi s trikotno valovitostjo toka tudi mnogo večji delež visokofrekvenčnih komponent.

Zaradi opisanih lastnosti merjenih signalov je izbor primernih merilnikov moči malo številčen, saj morata imeti tokovni in napetostni kanal slednjih poleg široke pasovne širine tudi velik dinamičen obseg. Oboje je zaradi njihove splošne namembnosti izpolnjeno le izjemoma.

3 Posredno ovrednotenje izgub z merjenjem izkoristka

Vpogled v celokupne izgube pretvornika dobimo z meritvijo vhodne in izhodne moči. Pri tem sicer zaradi ugodnejše oblike vhodnih in izhodnih veličin (tok, napetost) ne potrebujemo merilnika moči s široko pasovno širino, vendar pa mora imeti merilnik majhen merilni pogrešek. Slednje je bistveno pri presmernikih z visokim izkoristkom, kjer sta lahko razlika med vhodno in izhodno močjo kot tudi pogrešek posamično izmerjene moči istega velikostnega reda.

Omenjenemu tveganju se pri več-vejnih presmernikih zlahka izognemo s t.i. fantomskim obratovanjem (slika 1b), kjer je vhodna moč (moč napajalnega vira) enaka izgubam, ki nastopijo pri

krožnem pretoku moči, nespremenjenega nominalnega iznosa, med obema polovicama pretvornika. Tako pomerjeno moč, ki zaradi različnih izgubnih mehanizmov nastopa na vseh komponentah izpostavljenih krožnemu pretoku moči, lahko razporedimo med njimi le na podlagi izkustveno določenih uteži.

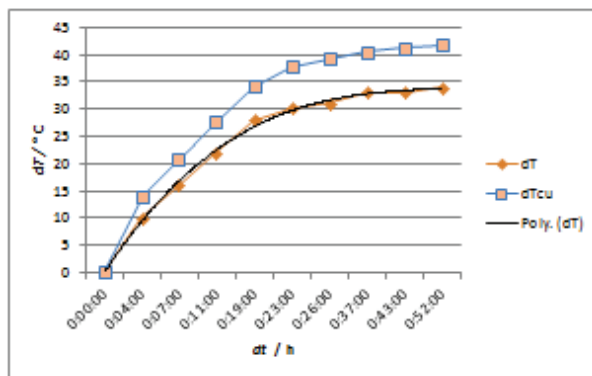
3.1 Posredna meritev izgubne moči dušilke na osnovi termičnega ravnovesja

Da bi se izognili dodatni negotovosti zaradi izkustvene porazdelitve celotnih izgub na delež, ki pripada le dušilki, smo njene izgube določili na osnovi poznavanja parametrov termičnega ravnovesja $dT/dt = 0$. Postopek sestoji iz dveh korakov, ki se razlikujeta po načinu oziroma obliki vzbujevalnega toka. Pri tem je bistveno, da se v obeh korakih zagotovi dušilki identične termične pogoje, tj. njena postavitev med meritvijo mora zagotavljati enako termično upornost in kapaciteto.

V prvem koraku smo s pomočjo pomožnega vira vsilili skozi dušilko konstanten enosmerni tok z vrednostjo, ki ustreza srednji vrednosti toka dušilke (I) v nominalni obratovalni točki.

Tabela 1: Časovna odvisnost nadtemperature dušilke CMI261927-100 v primeru segrevanja s konstantnim enosmernim tokom

t [min]	U_L [mV]	I [A]	T_{case} [°C]	T_{amb} [°C]	ΔT [°C]	P_{loss} [W]	R_{eq} [mΩ]	ΔT_{cu} [°C]
0	65,3	35	22	22	0	2,29	1,87	0
4	68,8	35	32	22	10	2,41	1,97	13,75
7	706	35	38	22	16	2,47	2,02	20,81
11	72,3	35	44	22	22	2,53	2,07	27,49
19	74,0	35	50	22	28	2,59	2,11	34,16
23	74,9	35	52	22	30	2,62	2,14	37,70
26	75,3	35	53	22	31	2,64	2,15	39,27
37	75,6	35	55	22	33	2,65	2,16	40,44
43	75,8	35	55	22	33	2,65	2,17	41,23
52	75,9	35	56	22	34	2,66	2,17	41,62



Slika 3: Časovna odvisnost nadtemperature – korak 1; ΔT in ΔT_{cu} označujeta doseženo nadtemperaturo ohišja in navitja dušilke glede na izmerjeno temperaturo okolice T_{amb} .

Ob tem smo neposredno na sponkah dušilke merili padec napetosti (U_L) ter izračunali električno moč (P_{loss}), ki povzroči naraščanje temperature (tabela 1). Ko se segrevanje dušilke (merjeno s termo členom nameščenim na spodnji strani dušilke) ustali (slika 3), nam vzpostavljeno termično ravnovesje ($P_{loss} = 2,66$ W, $\Delta T = 34$ °C) omogoča izračun termične upornosti

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{loss}} \quad (1)$$

med dušilko in okolico, ki je pogojena s sposobnostjo odvoda toplote tj. s postavitvijo dušilke med testiranjem.

Osenčena stolpca v tabeli 1 podajata izračunano vrednost ekvivalentne upornosti dušilke R_{eq} (ki ji pripišemo tudi izgube jedra) ter izračunano vrednost sredice navitja T_{cu} . Rezultati (tabela 1 in slika 3) pokažejo, da je sredica navitja v stacionarnem stanju približno za 7° C toplejša od ohišja dušilke, kjer se je merila temperatura.

V drugem koraku smo izmerili prehodni pojav segrevanja dušilke (z nespremenjeno pozicijo), le da smo tokrat dušilko izpostavili izmeničnemu vzbujanju (tabela 2 in slika 4) s potekom vsiljene napetosti, kot mu je podvržena med nominalnim obratovanjem z vklopnim razmerjem blizu vrednosti 0,5. Dušilko smo v ta namen priključili neposredno med sosednji tranzistorski veji – podobno kot je to storjeno pri fantomski obremenitvi (slika 2b).

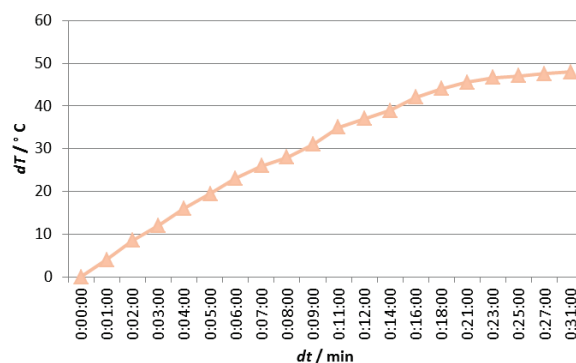
Ob identični vrednosti enosmerne komponente toka (korak 1) nastopijo sedaj dodatni izgubni mehanizmi v navitju in jedru dušilke, s čimer se segrevanje pohitri.

Tabela 2: Časovna odvisnost nadtemperature dušilke CM1261927-100 v primeru segrevanja v fantomski konfiguraciji presmernika pri $U_{DC} = 24$ V, $f_{sw} = 50$ kHz in $I = 35$ A.

t [min]	T_{case} [°C]	T_{amb} [°C]	ΔT [°C]	P_{loss} [W]
0	23,0	23,0	0	
1	27,0	23,0	4,0	
2	31,5	23,0	8,5	
3	35,0	23,0	12,0	
4	39,0	23,0	16,0	
5	42,5	23,0	19,5	
6	46,0	23,0	23,0	
7	49,0	23,0	26,0	
8	51,0	23,0	28,0	
9	54,0	23,0	31,0	
11	58,0	23,0	35,0	
12	60,0	23,0	37,0	
14	62,0	23,0	39,0	
16	65,0	23,0	42,0	
18	67,0	23,0	44,0	
21	68,5	23,0	45,5	
23	69,5	23,0	46,5	
25	70,0	23,0	47,0	
27	70,5	23,0	47,5	21,5
31	71,0	23,0	48,0	21,5

V ustaljenem stanju doseže dušilka višjo nadtemperaturo ($\Delta T = 48$ °C). Iz poznane

nadtemperature in v prvem koraku izračunane termične upornosti, lahko sedaj izračunamo (posredno izmerimo) izgube v dušilki ($P_{loss} = 3,75$ W).



Slika 4: Časovna odvisnost nadtemperature – korak 2.

Primerjava ustaljenih nadtemperatur razkrije, da je razmerje izmeničnih in enosmernih izgubnih moči enako 0,41.

3.1.1 Primerjava

Predlagani postopek ovrednotenja izgub smo preverili z neposredno meritvijo moči na dušilki. Uporabili smo merilnik moči (Power Analyzer – NORMA D5235), ki ima glede na uvodno razmišljanje dovolj veliko dinamično območje tokovnega in napetostnega kanala (≤ 60 dB), kot tudi široko pasovno širino (400 kHz s pogreškom manjšim od 3 %).

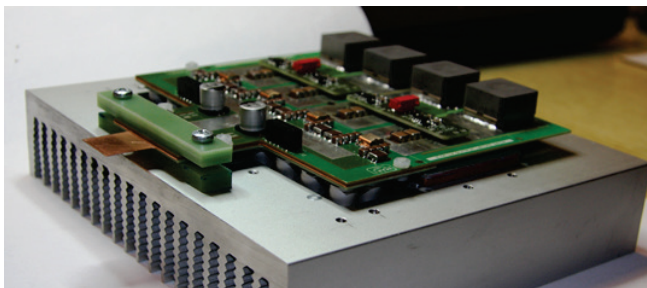
Izmerjeni tok dušilke je znašal $I = 34,8$ A, medtem ko je bila efektivna vrednost napetosti na dušilki $U_{L,rms} = 16,50$ V; kar je skladno s teorijo

$$U_{L,rms} = U_{DC} \cdot \sqrt{\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}} \quad (2)$$

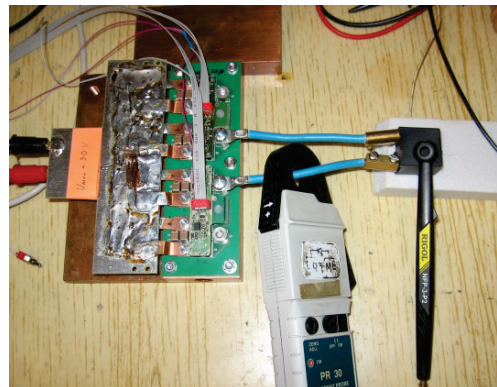
Odčitek moči ob tem ni bil konstanten, temveč se je spreminjal v širokem razponu med 0,2 W in 14 W. Vzrok tolikšnemu nihanju odčitka je možno pripisati ločljivosti obeh kanalnikov, zlasti napetostnega, ki znaša pri izbranem napetostnem območju (pogojenim z amplitudo merjenega signala) 10 mV. Medtem ko na podlagi kataloško podane upornosti dušilke (2 mΩ) znaša ocenjena srednja vrednost napetosti na dušilki le 70 mV. Po vsej verjetnosti pa je za nihanje odčitane moči krivo tudi dejstvo, da je vhodna stopnja napetostnega kanalnika izpostavljena napetosti skupnega načina z visokim deležem visokofrekvenčnih komponent. Slabljenja napetosti skupnega načina pri frekvencah višjih od 60 Hz proizvajalec namreč ne podaja, vendar le-ta v splošnem upada.

3.2 Posredna meritev – ocena izgubne moči MOSFET-ov

Fantomaska obremenitev presmernika nudi poleg predhodno ocenjene vrednosti izgub v dušilki tudi realnejšo oceno izgub na močnostnih stikalih – in sicer pri nominalnem pretoku moči. Osenčeni podatek v tabeli 2 podaja namreč vhodno moč v ustaljenem



a)



b)

Slika 5. Več-vejni presmernik s PWM prepletom: a) kompaktna prototipna izvedba, b) testna izvedba z izdvojeno dušilko.

termičnem stanju, ki ustreza izgubam na obeh tranzistorskih vejah, dušilki ter vhodnem kondenzatorskem sklopu. Če zanemarimo izgube na kondenzatorskem sklopu, nam razlika moči (21,5 – 3,75) omogoči tudi realnejšo oceno izgubnih moči na posameznem MOSFET-u (4,4 W). Ker vsi štirje MOSFET-i delajo s cca. 50% vklopnim razmerjem, lahko omenjeno razliko moči enakomerno porazdelimo med vse štiri.

4 Sklepna misel

V primerjavi z neposredno meritvijo izgub v dušilki enosmernega presmernika z merilnikom moči omogoča predlagani postopek posredne ocene izgub mnogo večjo merilno zanesljivost. Pasovna širina uporabljenega merilnika moči je zaradi priključitve v enosmerni tokokrog presmernika lahko mnogo manjša kot pri neposredni metodi. Pomanjkljivost posredne metode je njena časovna potratnost, ki pa ob pridobitvi dodatnega vpogleda v porazdelitev izgub na MOSFET-ih le ni tako pereča. Ob zapisanem velja izpostaviti, da v realni situaciji meritev izgub na neposredni način zaradi kompaktnosti naprave (slika 5a) ni izvedljiva. In-situ meritev oziroma ocena izgub v dušilki je neizvedljiva tudi s pogostejše uporabljenim kalorimetričnim postopkom [10].

Da bi se v obeh korakih predlaganega postopka zagotovile identične termične lastnosti, je brezpogojno da se vezi, ki povezujejo močnostno tiskanino in dušilko, vpne med »referenčno telo« konstantne temperature. S slednjim se prepreči, da bi se v drugem koraku predlagane metode dušilka dodatno segrevala s toplotnim tokom iz močnostne tiskanine. V ta namen smo med meritvijo obe vezi – na mestu, kjer so na sliki 5b razvidne tokovne klešče, stisnili med dve bakreni telesi.

Zahvala

Delo sta sofinancirali Republika Slovenija ter Evropska unija v sklopu projekta EVA4green (OP20.00362) ter Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v sklopu financiranja programske skupine (P2-0258).

Literatura

- [1] F. C. Lee and Q. Li, 'High-Frequency Integrated Point-of-Load Converters: Overview', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 9, pp. 4127–4136, Sep. 2013.
- [2] F. Krismer and J. W. Kolar, 'Accurate Power Loss Model Derivation of a High-Current Dual Active Bridge Converter for an Automotive Application', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 3, pp. 881–891, Mar. 2010.
- [3] '48-Volt-Bordnetz – Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität'. [Online]. Available: <http://www.zvei.org/Publikationen/ZVEI-Leitfaden-48-Volt-Bordnetz-2015.pdf>.
- [4] 'A Four-Phase High Voltage Conversion Ratio Bidirectional DC-DC Converter for Battery Applications'. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/7/6399/htm>.
- [5] D. Polenov, 'DC/DC-Wandler zur Einbindung von Doppelschichtkondensatoren in das Fahrzeugenergiebordnetz', 2009.
- [6] D. Christen, S. Tschannen, and J. Biela, 'Highly efficient and compact DC-DC converter for ultra-fast charging of electric vehicles', in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International*, 2012, p. LS5d–3.
- [7] 'Power Electronics System Integration for Electric and Hybrid Vehicles'. [Online]. Available: <https://ar.scribd.com/document/243579850/5-1-System-Integration-Mz-pdf>.
- [8] J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, 'Core Losses Under the DC Bias Condition Based on Steinmetz Parameters', *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 953–963, Feb. 2012.
- [9] W. Roshen, 'Ferrite core loss for power magnetic components design', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 6, pp. 4407–4415, Nov. 1991.
- [10] F. W. Fuchs, J. Schröder, and B. Wittig, 'State of the technology of power loss determination in power converters', in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, pp. 1–10.