

Primerjava metod merjenja toka v trifaznem razsmerniku

Zala Slapnik, Martin Petrun

UM FER

E-pošta: zala.slapnik@um.si

Comparison of Current Measurement Methods in a Three-Phase Inverter

This paper presents an overview of some current measurement methods for three-phase motor drives. The methods discussed include shunt-based current measurement using two shunts in the inverter branches, as well as a single shunt placed in the DC link. Additionally, a current measurement approach based on the voltage drops across the MOSFETs is presented, including a thermal model of the MOSFET to account for variations in MOSFET's on resistance. Simulations for all the mentioned current measurement methods were carried out using Simulink and the PLECS Blockset. Deviations were observed in the simulations of current measurement using the single-shunt method based on the DC link, compared to the other two methods.

1 Uvod

Učinkovito vodenje tokov v trifaznih RL-bremenih temelji na točnih izmerjenih vrednostih tokov, s katerimi ta bremena napajamo. Toke lahko merimo na različne načine. Najbolj pogoste metode merjenja toka so s Hallovimi senzorji, merilnimi upori, tokovnimi transformatorji in tuljavami Rogowskega. V primerjavi z merilnimi upori so ostale metode merjenja toka cenovno manj ugodne. Prav tako imata zadnji dve metodi omejitve, da lahko z njima merimo le izmenične tokove. Tok lahko merimo tudi s padcem napetosti na polprevodniških močnostnih stikalih MOSFET (angl. Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). MOSFET-i se uporabljajo kot močnostna stikala v razsmerniku. Na področju meritve toka s padcem napetosti na MOSFET-ih so že bile opravljene raziskave niso pa bile primerjane z meritvami tokov na merilnih uporih [1]. Cilj predstavljenega raziskovalnega dela je bil nadomestiti Hallove senzore z merilnimi upori oziroma z meritvijo toka na MOSFET-ih. Predstavili smo tri metode merjenja toka: merjenje toka z merilnimi upori na vejah razsmernika, merjenje toka z merilnimi upori na enosmernem vodilu razsmernika in merjenje toka na MOSFET-ih. Prvo metodo smo predstavili, ker je klasična metoda iz katere sta se razvili drugi dve. Metoda z merilnim uporom na enosmernem vodilu ima prednost, saj v vezje razsmernika dodamo le en merilni upor, zato so pri tej metodi izgube manjše. Slabost te metode je, da moramo izmerjene toke rekonstruirati

[2, 3]. Merjenje toka na MOSFET-u smo predstavili in primerjali, saj pri tej metodi nimamo izgub zaradi dodatnih merilnih uporov. Potrebujemo pa temperaturni senzor na ohišju ali hladilniku MOSFET-a in dober termični model tranzistorja s katerim kompenziramo spreminjanje upornosti MOSFET-a zaradi segrevanja [1]. Vsako od omenjenih metod smo simulirali v Simulink-u z uporabo PLECS Blockset-a.

Glavni cilj članka je predstavitev in sistematična primerjava opisanih metod merjenja toka na trifaznem razsmerniku. Rezultati so pokazali, da lahko z vsemi tremi metodami ustrezno ocenimo tok v trifaznem razsmerniku.

Zgradba članka je sledeča. Po uvodu so predstavljene metode merjenja toka, v podpoglavjih je predstavljena vsaka metoda. Tretje poglavje je razdeljeno na podpoglavja. V podpoglavjih so predstavljeni in primerjani rezultati simulacij. Zadnje poglavje je zaključek.

2 Metode merjenja toka

Merilne upore uporabljamo za merjenje toka. Vežemo jih zaporedno s tokokrogom in tok določimo posredno iz izmerjenega padca napetosti. Upornost merilnega upora mora biti majhna, da bistveno ne vpliva na delovanje vezja in ne povzroča prevelikih izgub. Hkrati se upornost pri segrevanju ne sme bistveno spreminjati, saj bi to vplivalo na točnost meritev. Merilni upori so zato narejeni iz termično stabilnih materialov. Padec napetosti zajemamo sinhronizirano s pulzno-širinsko modulacijo izven prehodnih pojavov tranzistorjev.

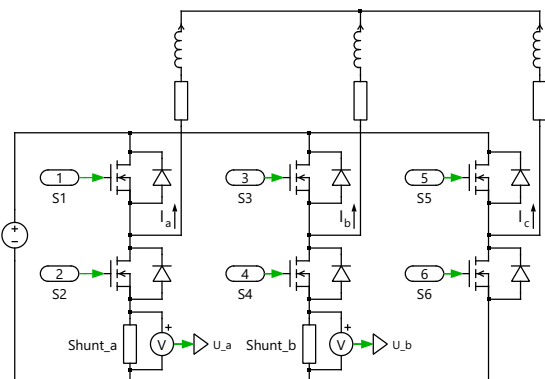
Na podoben način kot z merilnimi upori na vejah razsmernika lahko merimo tok, ki teče skozi MOSFET, pri čemer MOSFET izkoristimo kot merilni upor [1]. Izmerimo padec napetosti na MOSFET-u, ko ta prevaja in iz padca napetosti izračunamo tok. Upoštevati moramo, da se upornost MOSFET-a spreminja zaradi segrevanja.

Potek spreminjanja upornosti MOSFET-a običajno najdemo v podatkovnem listu, kjer je tipično podano spreminjanje upornosti glede na temperaturo spoja. Te temperature sicer ne moremo neposredno meriti ampak jo lahko izračunamo iz termičnega modela MOSFET-a oziroma močnostne stopnje. V termičnem modelu MOSFET-a lahko uporabimo podatke o termičnih upornostih, ki so navedene v podatkovnem listu. Termične upornosti modela lahko izmerimo tudi eksperimentalno.

2.1 Merjenje toka z dvema merilnima uporoma na vejah razsmernika

Zaporedno smo vezali merilna upora na dveh vejah razsmernika (Slika 1). Po meritvi dveh napetosti in računanju tokov izračunamo še tretji tok s pomočjo (1).

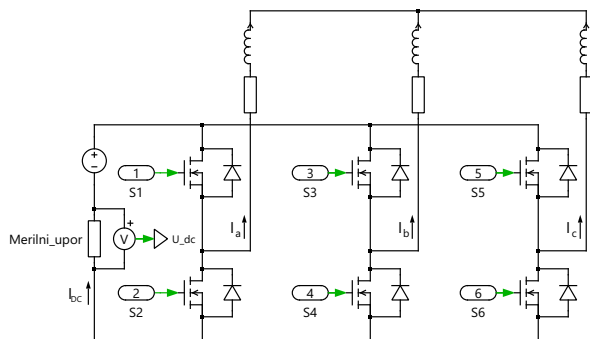
$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1)$$



Slika 1: Model vezja razsmernika z dvema merilnima uporoma in RL-bremenom.

2.2 Merjenje toka z merilnim uporom na enosmernem vodilu

Merilni upor smo vezali na negativni del enosmernega vodila, da smo lahko merili padec napetosti na njem glede na maso (Slika 2).



Slika 2: Model vezja razsmernika z merilnim uporom na enosmernem vodilu.

Pri merjenju toka na enosmernem vodilu moramo izbrati prave trenutke za merjenje toka [4]. Tokov ne moremo meriti v vseh sektorjih vektorske modulacije, posamezen tok lahko merimo v štirih od šestih sektorjev. V sektorjih, kjer toka ne moremo meriti ga izračunamo iz ostalih na osnovi (1). Vektorska modulacija je razdeljena na šest sektorjev v katerih generiramo želeni vektor s preklapljanjem treh vektorjev. Dva vektorja sta mejna vektorja sektorja, s katerima nadzorujemo kot vektorja toka. Tretji vektor je ničelni vektor s katerim prilagajamo amplitudo vektorja toka. V tem primeru tokov ne merimo na sredini periode pulzno-širinske modulacije ampak v trenutkih, ko se pojavi ustrezno stikalno stanje, kot je predstavljeno v tabeli 1. Zadnji stolpec v tabeli 1 predstavlja odstotek periode (tj. časovni trenutek v periodi) v katerem smo zajemali napetosti.

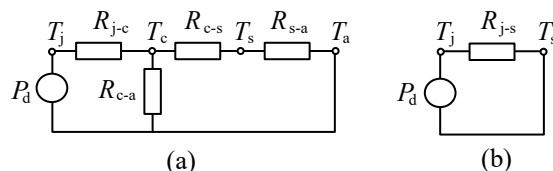
Tabela 1: Rekonstrukcija tokov z ustreznimi sektorji in odstotki periode za zajemanje padcev napetosti.

Merjeni toki	Sektor	Perioda
$i_a = +i_{dc}$	5, 6	56%
$i_a = -i_{dc}$	2, 3	94%
$i_b = +i_{dc}$	1, 2	56%
$i_b = -i_{dc}$	4, 5	94%
$i_c = +i_{dc}$	3, 4	56%
$i_c = -i_{dc}$	1, 6	94%

2.3 Merjenje toka na MOSFET-ih

MOSFET-om se pri segrevanju upornost znatno spreminja. Zato potrebujemo termični model MOSFET-a in karakteristiko spreminjanja upornosti glede na temperaturo spoja. Problematika merjenja toka s pomočjo padca napetosti na MOSFET-u je v splošnem v nedostopnosti oziroma netočnosti podatkov, ki jih potrebujemo za dober termični model.

Termični model MOSFET-a, nameščenega na hladilno telo, je sestavljen iz termičnih uporov, s katerimi upoštevamo kako se prenaša toplota iz notranjosti MOSFET-a (Slika 3(a)), pri čemer je R_{j-c} termična upornost med spojem in ohišjem, R_{c-s} je termična upornost med ohišjem in hladilnikom, R_{s-a} je termična upornost med hladilnikom in okolico, R_{c-a} je termična upornost med ohišjem in okolico. Del termičnega modela MOSFET-a so tudi temperature: temperatura spoja T_j , temperatura ohišja T_c , temperatura hladilnika T_s in temperatura okolice T_a . Opisan termični model lahko poenostavimo tako, da zanemarimo termično upornost R_{c-a} (Slika 3(b)) [1].



Slika 3: (a) Termični model MOSFET-a. (b) Poenostavljen termični model MOSFET-a.

Izgube v MOSFET-u P_d (2)

$$P_d = P_{con} + P_{sw} \quad (2)$$

so sestavljene iz prevodnih izgub P_{con} (3)

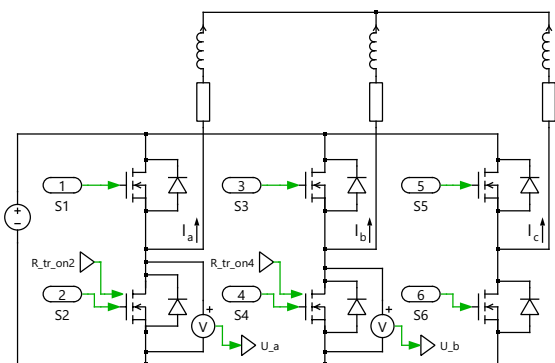
$$P_{con} = u_{tr} \cdot i_{tr} \cdot \Delta p \quad (3)$$

in stikalnih izgub P_{sw} (4)

$$P_{sw} = 0,5 \cdot u_{tr} \cdot i_{tr} \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_{mod}, \quad (4)$$

kjer je, u_{tr} napetost, ki se pojavi na tranzistorju, ko prevaja tok i_{tr} , Δp je prevajalno razmerje, f_{mod} frekvenca modulacije, t_{on} in t_{off} sta vklopni in izklopni čas MOSFET-a.

Merili smo padec napetosti na MOSFET-ih S2 in S4 (Slika 4). Iz upornosti, ki smo jo izračunali s termičnim modelom in padca napetosti smo izračunali toka. Tretji tok smo določili z (1).



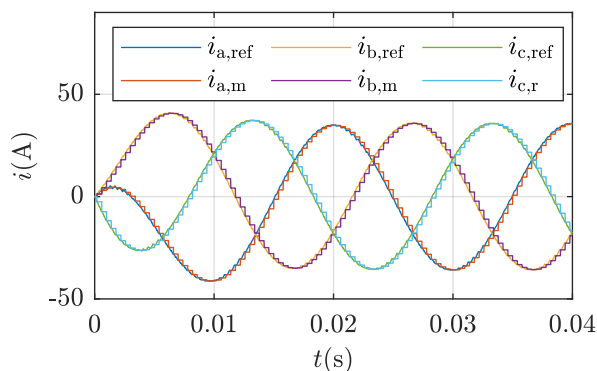
Slika 4: Model vezja razsmernika pri merjenju toka na MOSFET-ih.

3 Rezultati simulacije

Vsako od predstavljenih metod smo numerično ovrednotili. V okolju Simulink smo s PLECS Blockset-om izdelali model trifaznega razsmernika in termični model MOSFET-a. Modeli razsmernikov v PLECS Blockset-u so prikazani na slikah 1, 2 in 4. V Simulink-u smo izvedli vektorsko modulacijo, s katero smo preklapljali MOSFET-e na modelu razsmernika in napajali RL-breme. RL-breme smo vezali v zvezdo. Vse simulacije so bile izvedene pri modulacijski frekvenci 2,5 kHz. Frekvenca napajanja bremena je bila 50 Hz.

3.1 Uporaba dveh merilnih uporov na vejah razsmernika

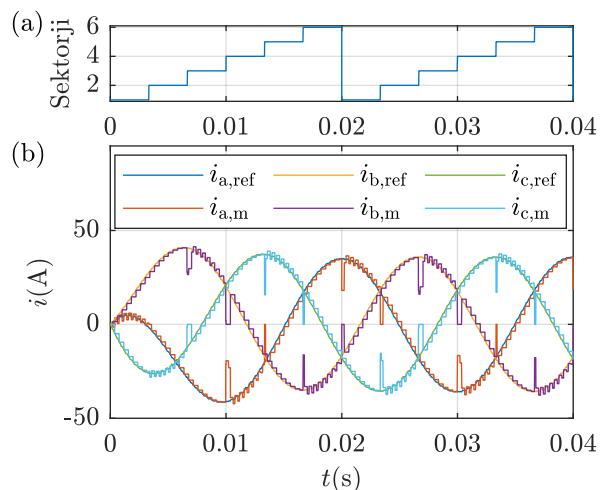
Rezultati so prikazani na sliki 5. Izmerjeni toki so se spreminjali stopnično, saj smo jih zajemali 1-krat v periodi pulzno-širinske modulacije in zadržali vrednost do naslednje periode. Rezultati so potrdili točnost te merilne metode.



Slika 5: Primerjava izmerjenih in dejanskih tokov v primeru uporabe dveh merilnih uporov.

3.2 Uporaba merilnega upora na DC vodilu

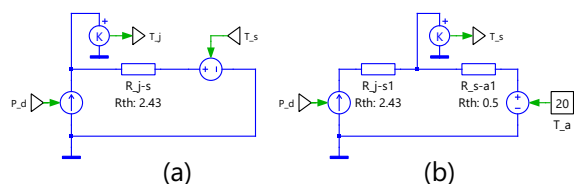
Pri merjenju napetosti in posledično toka smo upoštevali tabelo 1. Ob prehodu iz merjenja v računanje in obratno ne moremo določiti točne vrednosti toka. Območje, kjer bi lahko merili padec napetosti je v teh trenutkih prekratko oziroma ga ni, saj sovпада z menjavo sektorjev (Slika 6). Lahko bi aproksimirali vrednost oziroma zmanjšali pogrešek v trenutkih prehoda med območji merjenja in računanja, tako da bi zadržali prejšnjo izmerjeno vrednost.



Slika 6: Primerjava izmerjenih in dejanskih tokov v primeru uporabe merilnega upora na enosmernem vodilu: (a) sektorji, (b) toki.

3.3 Uporaba MOSFET-ov

Po zgledu [1] smo v termični domeni PLECS Blockset-a zasnovali termični model MOSFET-a. Uporabili smo poenostavljen model z izmerjeno termično upornostjo R_{j-s} iz [1]. Ostale podatke smo poiskali v podatkovnem listu [5]. Zasnovali smo dva termična modela s prvim smo računali temperaturo hladilnika T_s , ki bi jo v realni aplikaciji merili (Slika 7 (b)). Z drugim termičnim modelom smo računali temperaturo spoja MOSFET-a (Slika 7 (a)).



Slika 7: Uporabljeni termični modeli MOSFET-a za: (a) računanje temperature spoja, (b) računanje temperature hladilnika.

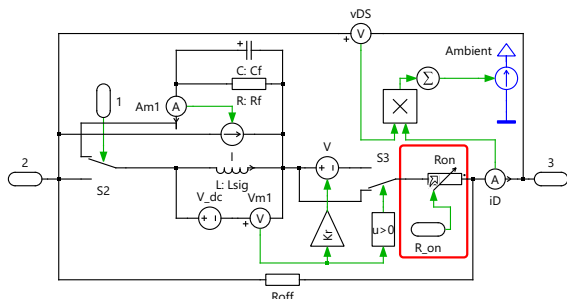
Glede na T_s smo s pomočjo modela na sliki 7 (a) izračunali temperaturo spoja T_j tranzistorja, ki je vplivala na prevodno upornost $R_{tr,on}$. Spremembo smo izračunali s (5)

$$R_{tr,on} = R_{tr,25^{\circ}\text{C}} \cdot (K_0 \cdot T_j^2 + K_1 \cdot T_j + K_2), \quad (5)$$

kjer je $R_{tr,25^{\circ}\text{C}}$ upornost MOSFET-a pri 25°C , K_0 , K_1 , K_2 so koeficienti polinoma, ki opisuje spreminjanje $R_{tr,on}$ glede na T_j in znašajo $K_0 = 2,6 \cdot 10^{-5}$, $K_1 = 5,36 \cdot 10^{-3}$, $K_2 = 8,49 \cdot 10^{-1}$.

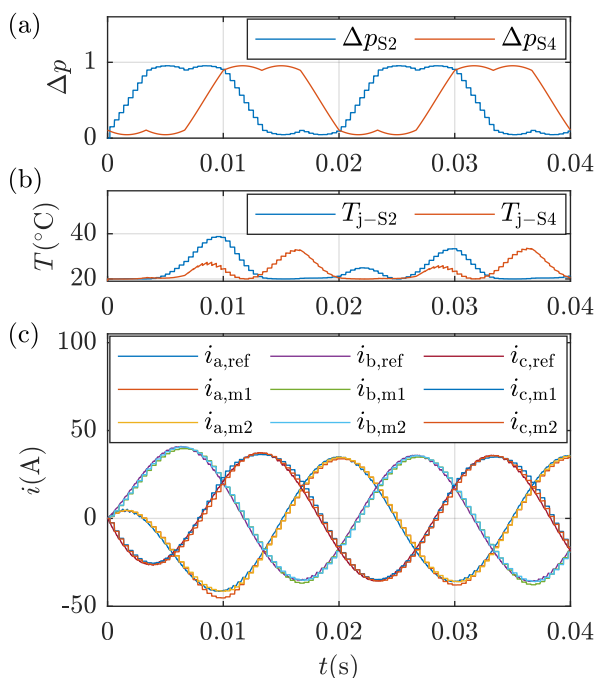
Modelu MOSFET-a iz PLECS Blockset knjižnice smo spremenili notranjo zgradbo. Nespremenljiv upor v modelu smo zamenjali s spremenljivim uporom (Slika 8), upornost pa spreminjali v skladu s (5).

Nato smo iz upornosti in padca napetosti na MOSFET-u izračunali tok. Prikazani so rezultati simulacije pri temperaturi okolice 20°C . Primerjali smo rezultate simulacije z in brez kompenzacije spreminjanja upornosti tranzistorja. Simulacije brez kompenzacije spreminjanja upornosti MOSFET-a odstopajo do 6,5 % tam kjer se najbolj poveča temperatura T_j (Slika 9).



Slika 8: Sprememba notranje zgradbe MOSFET-a.

Največje izgube na MOSFET-u so v obravnavanem primeru prevodne izgube. Največje so, ko so tok, napetost in prevajalno razmerje MOSFET-a največji. Izgube so na S2 in S4 največje pri maksimalnem negativnem toku, saj sta tam tudi napetost in prevajalno razmerje največja. Drugi očitni dvig temperature MOSFET-ov se pojavi takoj po maksimalnem pozitivnem toku, takrat je prevajalno razmerje v okolici 0,5. Prej je prevajalno razmerje manjše in zato velikost toka ne vpliva toliko na dvig temperature.

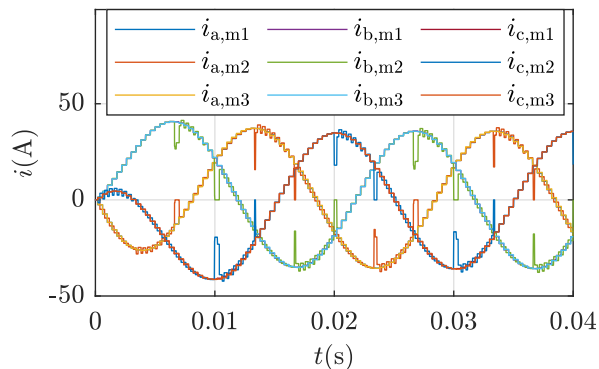


Slika 9: (a) Spreminjanje temperature spoja MOSFET-a, (b) prevajalno razmerje, (c) rezultati merjenja tokov na MOSFET-ih.

3.4 Primerjava metod

Relativna napaka merjenega toka glede na referenčno meritev pri metodi z merjenjem toka na dveh merilnih uporih na vejah razsmernika je 2,77 %. Pri metodi z merjenjem toka na MOSFET-ih je relativna napaka 3 %. Do večjih odstopanj pride pri metodi z merjenjem toka na merilnem uporu na enosmernem vodilu. Pri tej metodi je relativna napaka 4,38 %. V trenutkih, ko preidemo iz merjenja v računanje toka in obratno, so območja kjer bi lahko merili padec napetosti prekratka oziroma jih ni. Prav tako je opazna razlika v območjih, kjer pri

merjenju toka na enosmernem vodilu računamo tretji tok, saj periode vzorčenja niso sinhronizirane s sredino periode pulzno-širinske modulacije. Periode vzorčenja tudi ne morejo biti sinhronizirane, saj lahko merimo toke le v ustreznih stikalnih stanjih, ki se ne morejo pojaviti istočasno (Slika 10).



Slika 10: Primerjava treh različnih metod meritve toka.

4 Zaključek

V tem članku so predstavljene tri metode merjenja toka na trifaznem razsmerniku. Predstavljene so: metoda merjenje toka z dvema merilnima uporoma na vejah razsmernika, merjenje toka z merilnim uporom na enosmernem vodilu in merjenje toka s padcem napetosti na MOSFET-ih. Razloženo je delovanje omenjenih metod. V Simulink-u s pomočjo PLECS Blockset-a so bile izvedene simulacije vsake metode. Nazadnje je bila narejena primerjava med metodami. Rezultati simulacij so pokazali, da lahko z vsemi tremi metodami učinkovito ocenimo vrednosti tokov. Vsaka od metod ima prednosti in slabosti.

Literatura

- [1] R. Pajer, M. Milanovič, B. Premzel, and M. Rodič, "MOSFET as a Current Sensor in Power Electronics Converters," *Sensors*, vol. 15, no. 8, pp. 18061-18079, 2015, doi: 10.3390/s150818061.
- [2] H. Kovačević, "Three-Phase load current reconstruction using shunt current measurement and modified vector modulation for three-level DC-AC converter : doctoral dissertation," *Doktorska disertacija*, Fakulteta za elektrometodo, računalništvo in informatiko, Maribor, 2022. [Online]. Available: <https://dk.um.si/>
- [3] H. Kovačević, L. Korošec, and M. Milanovič, "Single-Shunt Three-Phase Current Measurement for a Three-Level Inverter Using a Modified Space-Vector Modulation," *Electronics*, vol. 10, p. 1734, 07/19 2021, doi: 10.3390/electronics10141734.
- [4] W. Wang et al., "New Three-Phase Current Reconstruction for PMSM Drive With Hybrid Space Vector Pulsewidth Modulation Technique," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 662-673, 2021, doi: 10.1109/tpel.2020.2997986.
- [5] International Rectifier, IRFB4110GPbF: HEXFET Power MOS-FET. International Rectifier, 2009. [On-line]. Available: www.infineon.com/dgdl/irfb4110pbf.pdf