

Merjenje toka na MOSFET-u v močnostnih pretvornikih

Rok Pajer

Univerza v Mariboru
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova 17, SI-2000 Maribor
E-pošta: rok1pajer@gmail.com

Current measurement on MOSFET in power converters

This paper presents current sensing principle, appropriate for using in power electronics converters. The current measurement principle is based on MOSFET U_{DS} voltage measurement. In practice, shunt resistors and Hall Effect sensors are used usually for these purposes, but presented principle (MOSFET based sensor) has many advantages. There is no need for additional circuit elements in high current paths, which cause parasitic inductances and increase production complexity. The problem is temperature dependence of MOSFETs conductive resistance - R_{DS-ON} and sensing circuit frequency band-pass. Measurement principle was verified and compared to the Hall Effect sensor. In order to achieve the sufficient accuracy, a temperature compensation for R_{DS-ON} is used and appropriate linearization for measurement calibration is performed. The program algorithm runs on 32-bit ARM M4 MCU, STM32F407.

1 Uvod

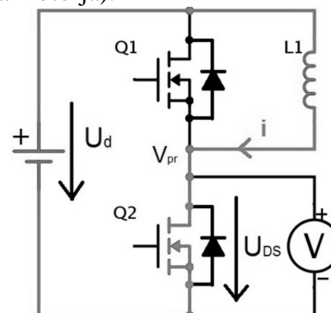
V močnostni elektroniki se pojavlja potreba po meritvi tokov. Senzorji, ki so najpogosteje uporabljeni, delujejo na magnetnem principu (npr. senzorji s Hallovo sondo), kar omogoča tudi galvansko ločitev merilnega vezja od močnostnega. Če galvanska ločitev ni potrebna, so uporabna rešitev tudi uporovni senzorji. Tok je določen iz padca napetosti na znani upornosti. Ker pa skozi upor teče velik tok, se na njem porablja energija. Zaradi tega je bolje izkoristiti upornosti, ki so že prisotne v električnih elementih. Primer je ohmska upornost MOSFET-a R_{DS-ON} . Princip merjenja lahko močno zmanjša ceno vezja, saj so prej omenjeni Hallovi senzorji relativno dragi. Izognemo se tudi problemu preostale vrednosti, ki se pri merjenju preko R_{DS-ON} pojavlja le zaradi merilnih ojačevalnikov. Njena vrednost je manjša in se s staranjem manj spreminja, zato je dovolj, da jo izmerimo le v proizvodni fazi.

Problem merjenja sta omejena točnost, ki je odvisna od kvalitete merilnega vezja ter spreminjanje R_{DS-ON} . Upornost se spreminja v odvisnosti od napetosti vrat – U_{GS} in od temperature spoja MOSFET-a, ki jo ocenjujemo na osnovi termičnih modelov. Postopki določanja temperature so opisani v [2], [3]. Princip merjenja toka prek R_{DS-ON} je bil že raziskan, zanimiva je hkratna meritev toka in temperature spoja [4]. Posebna

izvedba senzorja je z dodatnim MOSFET-om in merilnim uporom, ki sta namenjena kalibraciji [5]. Za te potrebe je tudi možno dobiti posebne MOSFET-e z merilnimi priključki [6].

2 Princip meritve

Napetost U_{DS} merimo, ko je tranzistor odprt. Slika 1 prikazuje polmostično vejo močnostnega pretvornika, v našem primeru je breme dušilka (eno fazno navitje izmeničnega motorja).



Slika 1. Meritev U_{DS} pri vklopljenem MOSFET-u.

Zgornji tranzistor Q1 je zaprt, spodnji tranzistor Q2 pa odprt, na njem je izvedena meritev napetosti. Napetost se pojavi kot posledica toka, ki teče skozi upornost R_{DS-ON} . Upornost se med delovanjem spreminja. Za določitev njene vrednosti je potrebno poznati njeno odvisnost od temperature spoja T_j . V [4] je podrobneje opisano, kako jo lahko aproksimiramo s kvadratno funkcijo (enačba (1)).

$$R_{DS-ON} = K_2 T_j^2 + K_1 T_j + K_0 \quad (1)$$

Enačba velja, ko je $U_{GS} > U_{TH}$ in $U_{DS} < U_{GS} - U_{TH}$ (U_{TH} je v tem primeru pragovna napetost). Predpostavljeno je tudi, da je U_{GS} konstantna. Temperature spoja ne merimo direktno, ampak je določena prek termičnih modelov. Ti niso nikoli popolnoma točni, za čim bolj enostavno implementacijo na procesorju je bil izbran enostaven model (2).

$$T_j = T_s + P \cdot R_{\theta_{j-s}} \quad (2)$$

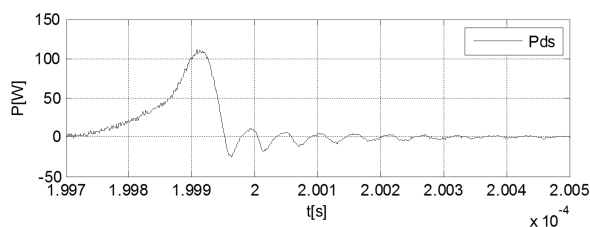
Model vključuje temperaturo hladilnika T_s in izgube na tranzistorju P , ki segrevajo spoj. $R_{\theta_{j-s}}$ je skupna termična upornost med hladilnikom in spojem.

Izgube na tranzistorju P so sestavljene iz prispevka prevodnih P_{pr} in stikalnih P_{st} . Prevodne izgube so pri

majhnih tokovih deterministične in jih je enostavno izračunati, kar opisuje enačba (3).

$$P_{pr} = U_{DS} \cdot I \cdot d \quad (3)$$

Izračun stikalnih izgub je le približen in je bil izveden z osciloskopom (meritvijo tokov in napetosti) in programom Matlab po enačbi (4).

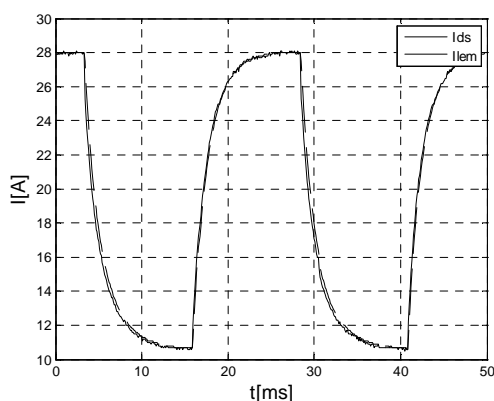


Slika 2. Izklopne izgube

$$P_{st\ ON/OFF} = \frac{1}{T_s} \sum_{n=1}^{n_{ON/OFF}} u_n \cdot i_n \cdot \Delta t_n \quad (4)$$

3 Eksperimentalni rezultati

Za namene raziskav je bilo zgrajeno testno vezje, ki vsebuje tudi Hallov senzor (LEM, HTB100-P) za primerjavo rezultatov meritev. Delovanje je bilo prej preverjeno v simulacijskem programu na osnovi SPICE. Napisan je bil testni program za procesor ARM STM32F407, ki krmili tranzistorje, izvaja meritve U_{DS} med prevajanjem tranzistorjev in meritve temperature hladilnika. Sproti se v vsaki stikalni periodi izvede preračun izgub, temperature spoja in vrednosti toka na osnovi prej opisanih enačb. Stikalna frekvenca je bila 10 kHz. Merilni podatki za izris so bili prek serijske komunikacije preneseni na osebni računalnik. Istočasno so bile merilne vrednosti zajete z LEM senzorja. Signal »Ids« je meritev toka preko U_{DS} , »Ilem« pa meritev z LEM senzorja. Rezultate meritve prikazuje Slika 3.



Slika 3. Kvadratna modulacija d od 0,1 do 0,3 s kompenzacijo pogreška.

4 Zaključek

MOSFET je možno uporabiti kot senzor toka v močnostni elektroniki. S skrbnim načrtovanjem je možno doseči čiste merilne signale, primerljive ostalim

senzorjem. Senzor ima veliko prednosti, princip merjenja ne vnaša dodatnih izgub. V primerjavi s Hall-ovimi senzorji je tu precej manjši problem preostale vrednosti ($\gg \text{offset-a} \ll$). Problem merilnika je spreminjanje R_{DS-ON} in delovanje pri majhnih prevajalnih razmerjih, kar je bilo kompenzirano z linearizacijsko funkcijo. Problem je možno bolje rešiti v primeru trifaznih razsmernikov, kjer so tri polmistične veje. V tem primeru je v istem trenutku odprt več kot en MOSFET. Meritev je izvedena na MOSFETu, ki je odprt z največjim prevajalnim razmerjem, pogrešek meritve je manjši.

Zahvala

Za pomoč pri načrtovanju vezja in razvoju se zahvaljujem dr. Branku Premzlu. Hvala prof. dr. Miru Milanoviču in doc. dr. Miranu Rodiču za vodenje in nasvete pri delu.

Literatura

- [1] International Rectifier, IRFB4110GPbF: HEXFET Power MOSFET, 2009. Dostopno na: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfb4110pbf.pdf> [21.10.2013]
- [2] H. Chen, V. Pickert, D. J. Atkinson, L. S. Pritchard, On-line monitoring of the mosfet device junction temperature by computation of the threshold voltage, Power Electronics, Machines and Drives, 2006. PEMD 2006. The 3rd IET International Conference, (2006), str. 440-444.
- [3] M. Musallam, P.P. Acarnley, M. Johnson, L. Pritchard, Real-time power electronic device junction temperature estimation, Power Electronics, Machines and Drives, 2004. (PEMD 2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498), vol. 1,(2004), str. 231-235 B. Zajc, A. Trost: Zbornik triindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2014, 22. - 24. September 2014, Portorož, Slovenija (ERK_Ref)
- [4] C. Buttay, D. Bergogne, M. Hervé, A. Bruno, E. Rene, B. Pascal, Towards a Sensorless Current and Temperature Monitoring in MOSFET-Based H-Bridge, IEEE Power electronics Specialists Conference, 2, (2003), str. 901-906.
- [5] H. Lavrič, R. Fišer, Lossless current sensing technique on MOSFET RDS(on) with improved accuracy, Electronics Letters, vol. 46, (2010), št. 5, str. 370-371.
- [6] Y. Xiao, J. Cao, J. D. Chen, K. Spring, Current sensing trench power MOSFET for automotive applications, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, vol. 2, (2005), str.766 – 770
- [7] G. Laimer, J. W. Kolar, Accurate Measurement of the Switching Losses of Ultra High Switching Speed CoolMOS Power Transistor / SiC Diode Combination Employed in Unity Power Factor PWM Rectified Systems, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Dostopno na: http://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/laimer_PCIM-PQC02.pdf [18.11.2013]