

Tokovni merilni pretvorniki v vezjih močnostne elektronike

Aleš Leban, Mitja Nemeč

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija
E-pošta: ales.leban@fe.uni-lj.si

Povzetek. Električni tok je najpogosteje merjena veličina na področju elektrotehnike, saj neposredno vpliva na lastnosti in potek določenega procesa. Tok merimo s tokovnimi merilnimi pretvorniki. Izbira ustreznega merilnega pretvornika poteka na podlagi zahtev posamezne aplikacije in ob dobrem poznavanju različnih tehnologij merjenja električnega toka. V prispevku podajamo splošen pregled obstoječih in uveljavljenih principov merjenja. Celotno področje merilnih pretvornikov smo glede na fizikalno ozadje delovanja razdelili v štiri osnovne skupine, katerim so podlaga za delovanje Ohmov zakon, Faradayev zakon, Amperov zakon in Faradayev efekt. Iz posamezne skupine smo predstavili tipične predstavnike tokovnih merilnih pretvornikov, podrobneje smo analizirali njihovo delovanje ter kritično podali prednosti oz. slabosti določene izvedbe. V ospredje smo postavili rešitve, ki so primerne za merjenje toka v vezjih močnostne elektronike. Tako smo tudi izvajali eksperimentalne meritve, kjer smo iz posamezne skupine zbrali reprezentativne predstavnike na trgu dostopnih tokovnih merilnih pretvornikov. Zanimale so nas njihove dinamične lastnosti, ki smo jih najprej ocenili z odzivom merilnikov na skočno spremembo merjenega toka. Izmerili smo njihove frekvenčne karakteristike, lastnosti posameznih merilnih pretvornikov pa smo dodatno ovrednotili na podlagi frekvenčnih spektrov, in sicer tako s stališča lastnega popačenja izmerjenega signala kot tudi s stališča zaznavanja konkretnih visokofrekvenčnih komponent toka.

Ključne besede: tokovni merilni pretvorniki, merilni upor, tuljava Rogowskega, merilnik fluxgate, tokovni transformator, Hall senzor, senzor AMR

Current transducers for power-electronic applications

Nowadays, electric current measurements play an utmost important role in processing control. The choice of an appropriate current transducer depends on the requirements of individual applications and a thorough knowledge of various current-sensing technologies. In this paper, a general overview of the existing and well-established measurement principles is presented. Based on the physical foundation (Ohm's law, Faraday's law, Ampere's law and Faraday's effect), the entire area of the current transducers is divided into four categories. For each category, the paper presents typical current-sensing solutions, analyses their operation and critically estimates its performance. Solutions enabling their constructive integration in to the power electronic circuits are offered and experimental measurements are made to determine the commercially available representatives of each category. A dedicated circuit is proposed to generate an adjustable and reproducible current step for the transducers step-response measurements. Their dynamics is evaluated based on the transducers frequency response. The frequency spectrum reveals transducers performance with regard to their distorting the measured signal and detecting specific high-frequency harmonics.

1 UVOD

Merjenje električnega toka je bilo še do nedavnega domena merjenja električne energije, zahtevnejših tehnoloških procesov in aplikacij močnostne

elektrotehnike. Tok je namreč veličina, ki neposredno vpliva na izvajanje posameznega procesa; hitrost oz. vrtilni moment v motorskih pogonih, količina prenesene snovi v elektrokemijskih procesih, temperatura pri elektrotermični obdelavi ... Merjenje električnega toka pa ni omejeno zgolj na področje reguliranih procesov, saj meritve pogosto izvajamo tudi z namenom omogočanja nadtokovne zaščite v električnih napravah in spremljanja ter prikazovanja trenutnih vrednosti tokov oz. pretokov moči. S tehnološkim razvojem avtomobilske industrije, baterijsko napajanih naprav in čedalje strožjimi omejitvami glede energijske učinkovitosti gospodinjskih aparatov se odpirajo nova področja z zahtevami po preciznem merjenju toka, s tem pa tudi dodatne tehnološke zahteve pri izvedbi tokovnih merilnih pretvornikov (current transducers). Ker se zahteve posameznih aplikacij pri merjenju toka razlikujejo glede na obširen nabor parametrov (dimenzije, natančnost, pasovna širina, tokovni obseg, cena ...), so bile razvite številne metode merjenja toka in različne izvedbe merilnih pretvornikov. Izbira ustreznega merilnika je zato kljub dobremu poznavanju zahtev posamezne aplikacije, vse prej kot preprosta. V prispevku so predstavljeni osnovni principi merjenja električnega toka skupaj z izvedbami tokovnih merilnih pretvornikov, ki so primerne za integracijo v

elektronskih vezjih in vezjih močnostne elektronike. Ob koncu prispevka podajamo medsebojno primerjavo reprezentativnih tokovnih merilnikov, ki je v nasprotju s sorodno literature [1–3] podkrepjena z eksperimentalnimi rezultati.

2 TOKOVNI MERILNI PRETVORNIKI

Prvotni principi merjenja toka so vključevali fizikalne pojave, ki so bili neposredno povezani z gibanjem elektrine (npr. sila magnetnega polja na vodnik s tokom, proizvedena toplota, izločanje snovi v prevodnem elektrolitu ...). Ob koncu 19. stoletja so tehnični procesi že narekovali amplitude toka, ki so zmožnost tovrstnih neposrednih principov merjenja presegale. Za enega prvih tokovnih merilnih pretvornikov velja v letu 1837 predstavljen tangencialni galvanometer [4], katerega osnova za delovanja je magnetna igla kompas. Sledili so principi merjenja toka z merilnimi upori (shunti) in, zlasti za večje tokove, merilniki na podlagi indukcije – tokovni transformatorji. Do začetka dvajsetih let prejšnjega stoletja so bila tako že postavljena teoretična izhodišča posrednega merjenja toka, vključno z idejo o merjenju enosmernih tokov z magnetnimi transduktorji. Zadnji so omogočali merjenje toka na podlagi merjenja magnetnega polja, z razvojem polprevodniške tehnike pa v tej vlogi nastopajo sodobni magnetni senzori. Celoten spekter tokovnih merilnih pretvornikov smo glede na fizikalni princip merjenja razvrstili v štiri osnovne skupine, katerih podlaga za delovanje so:

- Ohmov zakon,
- Faradayev zakon indukcije,
- Amperov zakon in
- Faradayev efekt.

3 MERJENJE TOKA NA PODLAGI OHMOVEGA ZAKONA

Podlaga za merjenje toka je poenostavljena oblika Lorenzovega zakona

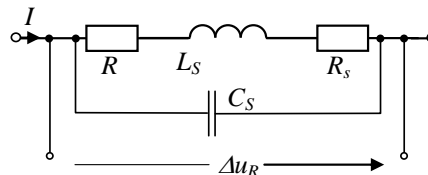
$$J = \sigma \cdot E, \quad (1)$$

bolj poznana kot Ohmov zakon. Iz (1) izhaja, da je padec napetosti na uporu sorazmeren toku, ki teče skozenj. Ob poznavanju upornosti lahko to dejstvo s pridom izkoristimo za merjenje električnega toka.

3.1 Merilni (Shunt) upori

Merilni upor – shunt – omogoča posredno merjenje toka, ki teče skozenj, prek padca napetosti na njem. Metoda ima kar nekaj pomanjkljivosti, in sicer: upornost merjenega tokokroga se poveča, na uporu se sprošča toplota, merilni upor ne omogoča galvanske ločitve med merjenim in detekcijskim tokokrogom, poleg tega se pri merjenju večjih tokov dimenzije merilnega upora znatno povečajo. Kljub navedenemu je ta način merjenja toka prisoten v številnih aplikacijah, kar lahko pripišemo predvsem preprosti izvedbi, nizki ceni, izjemno široki pasovni širini in zmožnosti

merjenja tako enosmernih kot izmeničnih tokov. Na sliki 1 je prikazano nadomestno vezje merilnega upora, ki ga sestavljajo nazivna – lastna – upornost R , parazitna induktivnost L_S in serijska upornost R_S . Zadnja združuje upornost pritrdilnega mesta, upornost priključkov in vpliv kožnega pojava (skin efekt).



Slika 1: Nadomestno vezje merilnega upora

V parazitni induktivnosti L_S je poleg lastne induktivnosti merilnega upora lahko združena tudi induktivnost, ki je posledica magnetne sklopljenosti glavnega tokokroga, po katerem teče merjeni tok (I), in tokokroga za zajem padca napetosti (ΔU_R) – detekcijskega tokokroga. Parazitna kapacitivnost C_S merilnega upora je zanemarljiva, zato pasovno širino merilnika določa zgolj parazitna induktivnost merilnega upora

$$f_m = \frac{R + R_S}{2\pi L_S}. \quad (2)$$

Poleg omejevanja pasovne širine je parazitna induktivnost merilnega upora lahko vzrok za napačno ovrednotenje merjenega toka. To je pogost primer v stikalnih pretvornikih, kjer se zaradi dinamičnih sprememb toka na induktivnosti merilnega upora inducira dodatna napetost, ki vpliva na merilni rezultat. Sodobni tehnološki postopki omogočajo izdelavo standardnih izvedb merilnih uporov z lastno induktivnostjo pod 10 nH. Nižje vrednosti je mogoče doseči s posebnimi geometrijskimi izvedbami (coaxial, wave folded, flat strap) [5], ki že v osnovi zmanjšujejo magnetni sklep, ne le v merjenem, temveč tudi med merjenim in detekcijskim tokokrogom. Zaradi zahtevne izdelave, geometrije in cene se te izvedbe merilnih uporov uporabljajo zgolj v posebnih aplikacijah (fuzija jeder, proučevanje strel ...) z zahtevo po širokem frekvenčnem območju merjenja (strmine toka več kA/ns).

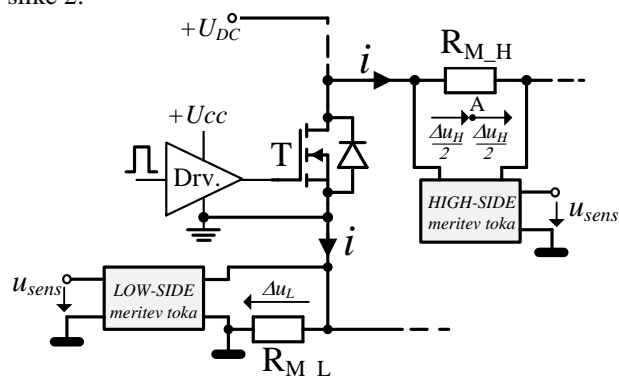
Na merilnem uporu se sprošča moč, ki je sorazmerna kvadratu merjenega toka. Če izhajamo iz zahteve po konstantni moči, se z večanjem amplitude merjenega toka zmanjšuje upornost merilnega upora in v skladu z (2) pasovna širina merilnika. Zmanjša se tudi informacija o merjenem toku, zato smo na mestu za zajem padca napetosti prisiljeni uporabiti ustrezna ojačevalna vezja. Njihova frekvenčna meja se z večanjem ojačenja zmanjšuje, kar naprej vpliva na skupno pasovno širino merilnega pretvornika. Dodatne težave lahko pričakujemo v zvezi s časovno in temperaturno stabilnostjo meritve, šumom ter zaradi parazitnih kapacitivnosti v vezju in s tem daljših časovnih konstant slabšimi odzivnimi časi meritve [6].

Pri merjenju nizkih amplitud toka moramo z namenom izmerljivosti padca napetosti ustrezno povečati vrednost merilnega upora. Pri tem moramo paziti, da povečana upornost v merjenem tokokrogu ne vpliva na pravilnost delovanja naprave.

Pomemben karakteristični podatek merilnega upora je temperaturni koeficient upornosti (TCR – Temperature Coefficient of Resistance), ki ga določajo materiali, iz katerih je merilni upor zgrajen. Ustrezne zlitine bakra, magnezija in niklja omogočajo izdelavo merilnih uporov s temperaturnim koeficientom pod 20 ppm/°C. Na temperaturno lezenje močno vplivata tudi temperaturno odvisna upornost spoja na mestu priključitve merilnega upora in upornost bakrenih povezav na tiskanem vezju (TCR bakra znaša 3900 ppm/°C). Težavam zaradi temperaturnega lezenja se uspešno izognemo s Kelvinovim priklopom merilnega upora. Ta ima poleg močnostnih priključnih sponk še dva t. i. Kelvinova priključka. Izvedena sta tako, da omogočata zajem padca napetosti zgolj na lastni upornosti merilnega upora (R) neodvisno od kontaktne upornosti priključnega spoja, upornosti priključnih sponk ali upornosti povezav na tiskanem vezju.

3.2 Mesto priklopa merilnega upora

Glede na mesto priklopa ločimo med priključitvijo merilnega upora v povratni vod opazovanega tokokroga (priklop low-side) in plavajočo priključitvijo upora (priklop high-side). Obe izvedbi priklopa sta razvidni s slike 2.



Slika 2: Shematski prikaz meritve toka low- in high-side

S stališča zajema informacije o toku je preprostejša prva izvedba, saj je padec napetosti na merilnem uporu (ΔU_L) definiran proti referenčni točki vezja, kar omogoča različne uveljavljene načine nadaljnje obdelave signala (ojačenje, A/D prilagoditev ...). Merjenje padca napetosti na merilnem uporu je izvedeno z vezjem (meritev LOW-SIDE), ki mora omogočati zajem napetosti v mV območju.

Za meritev toka v povratnem vodu veljajo določene omejitve, saj se prek merilnega upora lahko zaključujejo tudi tokovi na signalnem nivoju. Tipičen primer je proženje močnostnih stikal, kjer se prek merilnega upora zaključujejo tudi prožilni impulzi, ki v meritev

toka vnašajo napako. Temu se izognemo z razdruževanjem referenčnih potencialov, kot je to na sliki 2 nakazano, vendar moramo v tem primeru poskrbeti za ustrezno galvansko ločitev posameznih elektronskih sklopov (prožilnega vezja). Namestitev merilnega upora v povratni vod nam ne omogoča zaznavanja kratkostičnih tokov, če se le-ti zaključujejo mimo povratnega voda. Zato je zlasti v vezjih močnostne elektronike primernejša plavajoča priključitev merilnega upora ($R_{M,H}$ na sliki 2). Bistvena razlika glede na priklop v povratnem vodu je, da se priključne sponke merilnega upora nahajajo na visokem potencialu, ki je različen in bistveno višji od referenčnega (več 100 V). V konkretnem primeru (slika 2) se glede na stanje stikala T potencial točke A spreminja med nič in napajalno napetostjo U_{DC} . To moramo upoštevati pri načrtovanju vezja za zajem padca napetosti (meritev HIGH-SIDE), saj mora le-to zadostiti zahtevi po najvišji sofazni napetosti (Common Mode Voltage), ki se pojavi na vhodnih sponkah vezja.

Na specifične razmere pri plavajoči priključitvi merilnega upora so se izdelovalci elektronskih vezij odzvali s številnimi temu namenu prilagojenimi integriranimi vezji. Poleg zadostne vzdržne sofazne napetosti zahtevamo od tovrstnih vezij tudi visoko slabljenje sofaznih visokofrekvenčnih komponent (velik faktor CMMR), ki se v obliki motenj (šuma) pojavijo na vhodnih sponkah vezja.

Galvansko ločitev informacije o toku od visokonapetostnega tokokroga moramo zagotoviti z dodatnimi izolacijskimi vezji (izolacijski ojačevalnik), zaradi česar se pasovna širina merilnega pretvornika zmanjša.

3.3 Posebne izvedbe merjenja toka

Posebne izpeljanke merjenja toka na podlagi Ohmovega zakona težijo k brezizgubnemu merjenju. Vlogo merilnega upora v tem primeru prevzamejo drugi v vezju uporabljeni elementi (dušilke, stikala mosfet ...), ali pa kar same zbiralke oz. bakrene povezave na tiskanem vezju. Prednosti tega pristopa so, da meritev toka ne vpliva na izkoristek naprave, odpadejo pa tudi stroški, povezani z vgradnjo merilnega upora.

Pri merjenju toka prek padca napetosti na električnih povezavah se soočamo z izjemno nizkimi upornostmi povezav in s tem z nizkimi padci napetosti. Dodatna težava je tudi že omenjena velika odvisnost upornosti bakra od temperature (temperaturno lezenje).

Ena bolj razširjenih brezizgubnih metod merjenja toka se poslužuje lastnosti stikala mosfet. Ob poznavanju upornosti kanala v prevodnem stanju ($R_{DS(on)}$) lahko na podlagi padca napetosti na stikalu ocenimo tok, ki teče skozi stikalo. Zaradi temperaturne odvisnosti upornosti kanala se metoda večinoma uporablja v vlogi zaščite močnostnih stikal, zadovoljivo natančnost pa lahko dosežemo z dodatnimi ukrepi v vezju [7].

Kljub vsem naštetim omejitvam merjenja toka na podlagi Ohmovega zakona je ta eden najpreprostejših

načinov merjenja toka, ki ga odlikujejo nezahtevna izvedba, zanesljivost, linearnost, široka pasovna širina in ne nazadnje cena. Za področje močnostne elektronike moramo izmed pomanjkljivosti omeniti predvsem dejstvo, da sta merilni in detekcijski tokokrog galvanško povezana. Zadnjemu se sicer lahko izognemo z ustreznimi izolacijskimi vezji, vendar na račun zmanjšanja pasovne širine in natančnosti ter večje temperaturne odvisnosti in cene.

4 MERJENJE TOKA NA PODLAGI FARADAYEVEGA ZAKONA

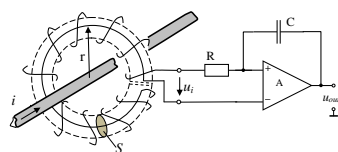
Tokovni merilni pretvorniki, ki delujejo na podlagi Faradayevega zakona, imajo pred merilnimi upori dve pglavitni prednosti; galvanška ločitev merjenega toka od informacije o merjenem toku in zanemarljive toplotne izgube. Zadnje omogoča višje napetostne nivoje na strani detekcijskega tokokroga in s tem višje razmerje med koristnim signalom in šumom. Galvanska ločitev pa nam omogoča lebdeče merjenje toka v visokonapetostnih tokokrogih, medtem ko je referenčni potencial izhodnega signala poljubno definiran – najpogosteje referenčni potencial elektronskega vezja. Osnova za delovanje tokovnih merilnih pretvornikov iz te skupine je Faradayev zakon indukcije v zaprti mirujoči zanki

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \propto \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

kjer je N število ovojjev, ki tvorijo zanko, v kateri se spreminja magnetni pretok Φ . Vir spreminjajočega se magnetnega pretoka je električni tok, ki ga želimo meriti. Iz (3) je razvidno, da je inducirana napetost sorazmerna spremembi toka, zato je ta princip namenjen predvsem merjenju izmeničnih tokov oz. tokovnih impulzov, z integracijo in izkoriščanjem lastnosti magnetnih krogov pa ga je mogoče aplicirati tudi za merjenje enosmernega električnega toka. Tipični predstavniki iz te skupine tokovnih merilnih pretvornikov so tuljava Rogowskega, tokovni transformator in merilniki, ki za delovanje izkoriščajo nasičenje jedra oz. zaznavanje magnetnega pretoka v njem.

4.1 Tuljava Rogowskega

Tuljava Rogowskega je eden prvih tokovnih merilnih pretvornikov (1912), katerega lastnosti in prednosti so prišle do izraza z uporabo elektronskega integratorja. Merilnik je sestavljen iz enoplastnega navitja z N_2 ovoji, ki so enakomerno porazdeljeni vzdolž gibkega, neferomagnetnega jedra. Principialno zgradbo merilnika kaže slika 3.



Slika 3: Tuljava Rogowskega

Merjenje toka izvedemo tako, da s tuljavo Rogowskega objamemo vodnik, po katerem teče merjeni tok. V navitju tuljave se inducira napetost

$$u_i = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} = -\frac{N_2 \cdot S \cdot \mu_0}{2\pi r} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

ki je odvisna zgolj od površine zanke S in njene dolžine ter od spremembe merjenega toka po času. Ustrezno informacijo o trenutni vrednosti merjenega toka dobimo z nadaljnjo obdelavo – integriranjem – inducirane napetosti u_i . To je tudi glavna pomanjkljivost merilnika, saj lahko težave s preostalo napetostjo in nasičenjem integracijskega vezja vplivajo na pravilnost meritev.

Za tuljavo Rogowskega je značilna koaksialna zgradba, pri kateri je konec navitja speljan skozi sredico tuljave nazaj na začetek, kar nam omogoča neinvaziven priklop merilnika v merjeni tokokrog. Zračno jedro tuljave zagotavlja zanemarljiv vpliv merilnika na impedanco merjenega tokokroga, onemogoča magnetno nasičenje in zagotavlja linearnost merilnika v širokem amplitudnem območju delovanja. Z istim merilnikom lahko merimo tok v območju nekaj amperov pa do več 100 kA. S posebnimi izvedbami, ki vključujejo aktivno in pasivno integracijo [8], je mogoče dosegati pasovno širino od nekaj Hz pa do več MHz.

Prostorska namestitvev tuljave vpliva na točnost meritve, ki je sicer majhna (v komercialnih izvedbah nekaj %), z ustreznim konstrukcijskim pristopom pri izvedbi tuljave Rogowskega pa lahko dosežemo 0,25-odstotno točnost meritve [9].

4.2 Tokovni transformator

Zgradba tokovnega transformatorja se od tuljave Rogowskega loči v visoko permeabilnem materialu jedra, na sponkah sekundarnega navitja pa je na mestu elektronskega integratorja priključen merilni upor R_S . Vzemimo za primer primarno navitje iz enega ovoja, po katerem teče merjeni tok i , in sekundarno navitje z N ovoji, skozi katerega teče tok i_S . Na sponkah sekundarnega navitja se inducira napetost u_i , ki jo izrazimo s pomočjo (4) prilagojene za namen tokovnega merilnega transformatorja

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot S \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{l_m} \cdot \frac{d(i - Ni_S)}{dt}. \quad (5)$$

S in l_m se nanašata na presek oz. srednjo dolžino magnetne poti jedra. S preoblikovanjem lahko za sekundarni tok i_S zapišemo

$$i_S = \frac{i}{N} - \frac{1}{N^2 S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} \int u_i \cdot dt. \quad (6)$$

Iz prvega člena je razvidna proporcionalna zveza med merjenim in sekundarnim tokom, drugi člen pa podaja magnetilni tok transformatorja. Geometrijsko-snovni parameter pred integralom poznamo pod pojmom magnetilna induktivnost transformatorja (L_m). Sekundarni tok povzroča na merilnem uporu padec napetosti, ki je glede na (6) sorazmeren merjenemu toku i , kar v primerjavi s tuljavo Rogowskega bistveno

poenostavi nadaljnjo interpretacijo izmerjenega signala. Magnetilni tok transformatorja povzroča napako merjenja, saj se zaključuje prek magnetilne induktivnosti in zato ne pripomore k padcu napetosti na merilnem uporu. Pojav se kaže v upadu napetosti na uporu in je še posebej izrazit pri merjenju tokovnih impulzov z dolgimi časi trajanja. Na zmanjšanje magnetilnega toka lahko vplivamo z izbiro ustreznega materiala jedra, ki naj ima v skladu s (6) čim višjo relativno permeabilnost. S številom sekundarnih ovojev lahko le do neke mere zmanjšamo magnetilni tok in tudi sekundarni tok in s tem izgube v sekundarnem tokokrogu. Če je ovojev preveč, se namreč poveča medovojna kapacitivnost sekundarnega navitja in s tem zmanjša pasovna širina tokovnega merilnega pretvornika. Spodnjo frekvenčno mejo določajo presek jedra in lastnosti uporabljenega materiala. Amplitudnemu in faznemu pogrešku tokovne meritve, ki sta posledica magnetilnega toka, se lahko izognemo tudi z izvedbami tokovnih transformatorjev, opisanimi v [10–12].

Med prednosti merilnega transformatorja štejemo zanesljivost, nizko ceno in dejstvo, da je informacija o toku posredovana v obliki napetostnega signala. Zgornja frekvenčna meja znaša več sto kHz, zato jih uporabljamo v širokem spektru aplikacij, najpogosteje pa jih srečamo v 50/60Hz distribucijskih omrežjih, in sicer za zaščito in merjenje pretokov moči.

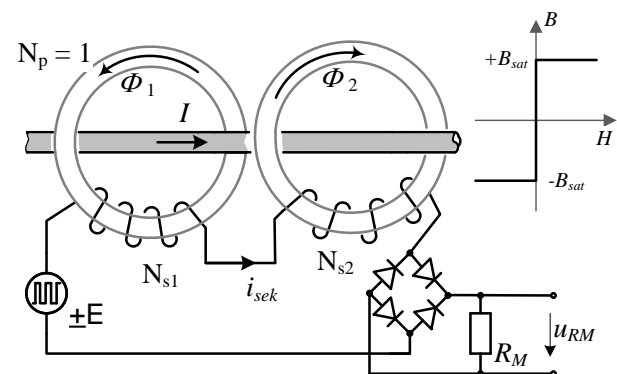
4.3 Merilniki toka z nasičenim magnetnim jedrom

V to skupino tokovnih merilnih pretvornikov uvrščamo izvedbe, katerih delovanje temelji na t. i. principu fluxgate – izmeničnem magnetenju jedra do točke nasičenja. Pri tem izkorišča nelinearno povezavo med magnetno poljsko jakostjo in gostoto magnetnega polja v jedru. Ključen element merilnika je torej jedro, ki mora poleg ostrega prehoda (kolena) v nasičenje zagotoviti čim bolj strm linearen del (pravokoten) B-H karakteristike. Reprezentativni predstavniki te skupine tokovnih merilnikov so: tokovni komparator, tokovni transformator za enosmerni tok in merilnik toka fluxgate. Zadnja dva bomo v nadaljevanju podrobneje predstavili.

4.3.1 Tokovni transformator za »enosmerni« tok

Pred razvojem polprevodniške tehnike in z njo povezanimi sodobnimi senzori je bilo zahtevno merjenje enosmernih tokov izključno domena tokovnih transformatorjev za enosmerni tok. Tipičen predstavnik te skupine je merilnik, zasnovan na magnetnem transduktorju. Zgradba transduktorskega merilnika toka je preprosta, merilnik lahko obratuje v širokem temperaturnem območju, je neobčutljiv na preobremenitve in zunanja magnetna polja, med prednosti pa uvrščamo tudi široko merilno območje. Njegove lastnosti so odvisne od uporabljenega materiala jedra, kot tudi od same izvedbe. Na sliki 4 je prikazana osnovna izvedba merilnika, ki je sestavljen iz dveh

identičnih jeder, na katerih sta nameščeni sekundarni navitji N_{s1} in N_{s2} . Skozi jedri je speljan vodnik z merjenim tokom (I). Navitji na jedrih sta povezani zaporedno in priključeni na izmenično napetost pravokotne oblike (E). Zaradi protifazne vezave sta jedri znotraj ene periode komplementarno magneteni med skrajnima točkama linearnega dela B-H karakteristike ($\pm B_{sat}$). Če je merjeni tok $I = 0$, sta magnetna pretoka (Φ_1 , Φ_2) v jedrih simetrična. Ob predpostavki, da imata jedri pravokotno karakteristiko B-H, sta srednja vrednost toka i_{sek} in posledično padec napetosti na merilnem uporu (u_{RM}) enaka nič. Če pa je merjeni tok I od nič različen, se v jedrih dušilk pojavi dodatna enosmerna komponenta magnetnega pretoka, zato se poruši simetrija polja v jedrih. V dani polperiodi vzbujalne napetosti E preide eno od jeder v nasičenje (kratkostično stanje), zato bo napetost na njenem navitju padla na nič. Preostalo jedro skupaj s sekundarnim navitjem pa se bo v tem času obnašalo kot tokovni transformator, pri čemer velja enakost primarnih ($N_p I$) in sekundarnih ($N_s i_{sek}$) amperovojev. Zato se potek sekundarnega toka spremeni.



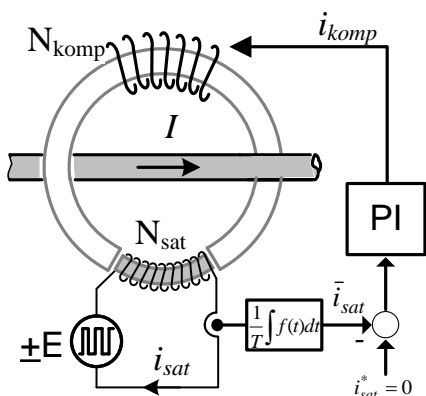
Slika 4: Merilnik toka na osnovi magnetnega transduktorja

V naslednji polperiodi vzbujalne napetosti se magnetne razmere v jedrih zamenjajo. Stanje, ko se posamezno jedro nahaja v linearnem območju karakteristike, ne sme trajati predolgo, saj bi s časom tudi to jedro prešlo v nasičenje. Zato je zaželena čim višja frekvenca vzbujanja sekundarnih navitij, od katere je odvisna tudi pasovna širina merilnika. Sekundarni tok, ki je speljan prek usmerniškega vezja, povzroči na merilnem uporu padec napetosti, njegova srednja vrednost pa je sorazmerna merjenemu toku I in je neodvisna od njegove smeri.

Uporabljeni usmernik v predstavljeni konfiguraciji merilnika (slika 4) ne dopušča merjenja izmeničnih tokov, obstajajo pa izpeljanke merilnika, ki takšno merjenje omogočajo. Med glavne pomanjkljivosti tokovnih transformatorjev za enosmerni tok štejemo nelinearnost merilnika, nizko pasovno širino in zahtevo po dodatnem vzbujalnem vezju. Zadnje se kaže v visoki porabi vezja in dimenzijah merilnega pretvornika.

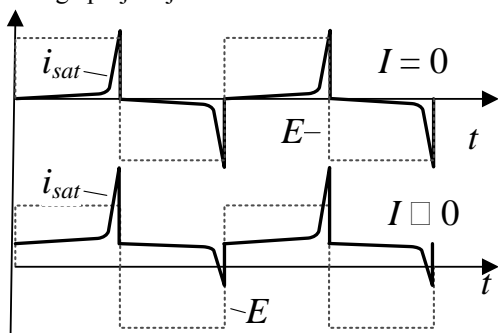
4.3.2 Merilnik toka fluxgate

Merilnik toka fluxgate je posebna oblika tokovnega transformatorja za »enosmerni tok« z dodano saturacijsko dušilko, ki je namenjena detekciji magnetnega pretoka v jedru. Merilnik omogoča galvanjsko ločeno merjenje enosmernih in izmeničnih tokov. Poznanih je več različnih oblik odprto- in zaprtozančnih merilnikov fluxgate. Tem izvedbam je skupen osnovni princip delovanja, razlikujejo pa se predvsem v konstrukcijski zasnovi. Slika 5 kaže osnovno zgradbo zaprtozančnega merilnika toka fluxgate. Skozi toroidno jedro je speljan vodnik z merjenim tokom, v zračni reži jedra pa je nameščena saturacijska dušilka.



Slika 5: Zaprtozančni merilnik toka fluxgate

Navitje saturacijske dušilke je priključeno na napetostni vir E , ki izmenoma magneti jedro do nasičenja ($\pm B_{sat}$). Zato se relativna permeabilnost jedra in s tem induktivnost saturacijske dušilke znotraj ene periode vzbujalne napetosti spreminjata. Ob predpostavki, da je merjeni tok I enak nič, teče v saturacijsko dušilko magnetilni tok i_{sat} simetrične oblike, katerega srednja vrednost je enaka nič. Simetričen je tudi potek magnetnega polja v jedru dušilke.



Slika 6: Potek toka i_{sat} : $I = 0$ (zgoraj) in $I \neq 0$ (spodaj)

Pod vplivom magnetnega polja, ki ga povzroči merjeni tok I , se magnetna simetrija v jedru saturacijske dušilke poruši. V odvisnosti od smeri merjenega toka in polaritete vzbujalne napetosti preide saturacijska dušilka v nasičenje predčasno (ena polperioda vzbujalne napetosti) oz. stanja nasičenja sploh ne doseže (druga

polperioda vzbujalne napetosti). Nesimetrija se odraža tudi v toku i_{sat} , katerega srednja vrednost se spremeni sorazmerno z amplitudo merjenega toka (slika 6). V praksi pogosto zasledimo rešitve, kjer se amplituda merjenega toka določa na podlagi amplitude drugega harmonika, ki se v primeru nesimetrije polja pojavi v vzbujalnem toku.

Srednja vrednost toka oz. napetosti ali amplituda njenega drugega harmonika nam je lahko povratna informacija v zaprtozančni izvedbi merilnega pretvornika fluxgate [13], kot je to nakazano na sliki 5. Zaprtozančni merilnik vsebuje vezje, ki na podlagi povratne informacije v dodatno kompenzacijsko navitje vsili kompenzacijski tok i_{komp} tako, da se srednja vrednost magnetnega pretoka v jedru izniči. Detekcijo tega stanja nam omogoča saturacijska dušilka. V primerjavi z odprtozančnim merilnikom fluxgate se merilno območje zaprtozančne izvedbe bistveno poveča, saj ni več omejeno z nasičenjem toroidnega jedra. Frekvenca vzbujalne napetosti mora biti čim višja, ker je od nje odvisna pasovna širina merilnika. Zaradi vzbujanja saturacijske dušilke se v kompenzacijskem navitju in v vodniku z merjenim tokom inducira napetost, kar vpliva na točnost meritve. Temu pojavu se izognemo z dvema protifazno vezanima saturacijskima dušilkama, katerih magnetni polji se med seboj odštejeta [14]. Zato je v toroidnem jedru zgolj magnetno polje, ki ga povzroča merjeni tok.

Zaprtozančni fluxgate princip merjenja toka velja za eno najbolj dovršenih tokovnih merilnih metod, ki jo odlikujejo visoka občutljivost, točnost, linearnost in široko frekvenčno in merilno območje delovanja. Med slabosti štejemo kompleksno zgradbo magnetnega tokokroga in elektronskega sklopa, kar vpliva na dimenzije, kot tudi na ceno merilnega pretvornika. V izhodnem signalu merilnika lahko pričakujemo dodatno visokofrekvenčno komponento, ki je posledica vzbujanja saturacijske dušilke. S tem je povezana tudi znatna električna poraba merilnika, ki zahteva ustrezen izmenični napajalni vir oz. pristop, kot ga navajajo avtorji v [15].

5 MERJENJE TOKA NA PODLAGI AMPEROVEGA ZAKONA

Tehnike merjenja električnega toka na podlagi magnetnega polja se skupaj z razvojem magnetnih senzorjev razvijajo od trenutka, ko je bila znana vzročna povezava med tema dvema veličinama. Zvezo podaja Amperov zakon

$$\oint B dl = \mu_0 \mu_r I, \quad (7)$$

iz katerega izhaja, da je integral gostote magnetnega polja po zaključeni zanki enak toku, ki to polje povzroča. To dejstvo nam omogoča posredno merjenje toka prek merjenja gostote magnetnega polja. Poleg galvanjsko ločenega merjenja lahko tako merimo tok, ne da bi pri tem posegali v merjeni tokokrog oz. bi s tem bistveno vplivali na njegove parametre. Izmed številnih

poznanih načinov merjenja magnetnega polja so se na področju komercialno dostopnih tokovnih merilnikov uveljavili senzori, ki delujejo bodisi na principu Hallovega bodisi na principu magneto-uporovnega (MR) efekta. Tokovne merilne pretvornike iz te skupine lahko glede na konfiguracijo merilnika razdelimo v tri osnovne skupine: odprtozančni (open-loop) sistemi, zaprtozančni (closed-loop) sistemi in kombinirani sistemi, ki v enem merilniku združujejo različne merilne principe.

5.1 Odprtozančni sistemi

Odprtozančni pristop ponuja preprost način uporabe magnetnega sensorja v funkciji merjenja električnega toka. Tokovna meritev temelji na predpostavki, da je gostota magnetnega polja v okolici vodnika proporcionalna merjenemu električnemu toku. Zvezo podaja

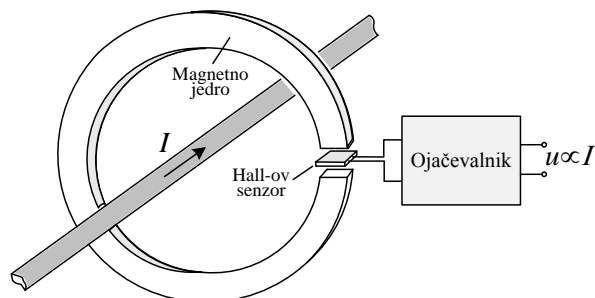
$$B = \mu_0 \frac{i}{2\pi r}, \quad (8)$$

pri čemer je r razdalja do vodnika, ki vodi tok i . Osnova za delovanje tokovnega merilnika je torej sensor gostote magnetnega polja, ki je po navadi integriran v elektronskem vezju. To mu omogoča, da ga lahko namestimo v neposredno bližino vodnika s tokom. V vlogi merilnika gostote magnetnega polja je po navadi uporabljen Hallov sensor. Slabosti Hallovega sensorja, kot so nelinearnost, temperaturna odvisnost in preostala (offsetna) napetost, vplivajo na točnost meritev, kar je upoštevano že med načrtovanjem in izdelavo merilnika. Ker je $\mu_r = 1$, je zatotovljena linearnost merilnika, zato izdelovalci to vrsto tokovnih merilnikov tržijo pod terminom »linearni Hall« merilniki toka [16].

Odprtozančni pristop merjenja toka ima kar nekaj pomanjkljivosti. Za doseganje ustrezne natančnosti je skladno z (8) potrebna predhodna kalibracija sensorja, da se določi ustrezen faktor občutljivosti. Pasovna širina ni nujno omejena z uporabljenim sensorjem magnetnega polja, temveč je vezana na zahtevano stopnjo ojačanja izhodnega signala. Pri namestitvi merilnika v neposredni bližini vodnika lahko dodatne težave oz. nepravilnosti meritve povzročata izriv toka (skin efekt), saj se zaradi toka, ki teče le po obodu vodnika, spremeni magnetno polje v merilniku. Slabost linearnih merilnikov Hall je tudi občutljivost merilnika na zunanje magnetno polje, zaščita pred njim pa je ob dodatnem strošku mogoča z ustreznimi magnetnimi ščiti.

5.1.1 Odprtozančni sistem z jedrom

Zgoraj navedenemu se izognemo z nekoliko kompleksnejšo zgradbo tokovnega merilnika, pri katerem je sensor integriran v zaključeni magnetni krog (jedro). Primer odprtozančnega merilnika z magnetnim jedrom je prikazan na sliki 7. Z integracijo sensorja Hall v magnetno jedro dosežemo večje gostote magnetnega polja ($\mu_r > 1$) in posledično višje razmerje signal-šum na

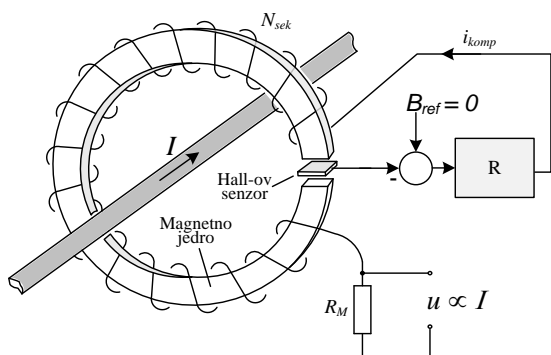


Slika 7: Odprtozančni Hallov merilnik z jedrom

izhodu magnetnega sensorja. Vpliv zunanjih polj je zanemarljiv, prav tako izriv toka v glavnem tokokrogu ne vpliva na samo meritev. Signal na izhodu merilnika (u) je neodvisen od razdalje med sensorjem magnetnega polja in vodnikom. Občutljivost merilnika lahko povečamo, če vodnik s tokom večkrat speljemo skozi jedro. Lastnosti integriranega odprtozančnega tokovnega pretvornika niso odvisne zgolj od tipa uporabljenega sensorja magnetnega polja, temveč tudi od jedra oz. uporabljenega materiala. Pri tem igrata odločilno vlogo vpliv histerezne zanke in nelinearnost B-H karakteristike. Zgornja frekvenčna meja merilnika je določena z izgubami v jedru in s frekvenčno mejo uporabljenega ojačevalnika. Nasičenje jedra omejuje tokovno območje merilnika, medtem ko se vpliv histerezne zanke oz. remanence jedra (B_{rem}) odraža v preostali napaki meritve. Pri merjenju toka z odprtozančnim merilnikom z jedrom tudi ne smemo spregledati njegovega vpliva na impedančne razmere v merjenem tokokrogu, saj zaradi obratovanja v linearnem delu B-H karakteristike lastna induktivnost merilnika ni zanemarljiva. Ker je sensor magnetnega polja integriran v magnetni krog, so dimenzije takega merilnika pričakovano večje.

5.2 Zaprtozančni sistemi

Tudi pri zaprtozančnih izvedbah tokovnih merilnikov je sensor magnetnega polja integriran v magnetni krog, vendar se sensor magnetnega polja v tem primeru uporabi le za detekcijo polja v jedru oz. za določanje napake regulacijske zanke, v kateri se izvaja kompenzacija magnetnega polja v jedru. Kompenzacija se izvaja z vsiljevanjem toka v sekundarno navitje (i_{komp}), in sicer tako, da se polje v jedru zmanjša na vrednost nič. Principialno shemo zaprtozančnega merilnika kaže slika 8. Sekundarni tok je za tokovno prestavno razmerje manjši od merjenega toka, zato je padec napetosti na merilnem uporu (R_M) sorazmeren merjenemu toku I . V zaprtozančni izvedbi tokovnega merilnega pretvornika se znatno zmanjšata temperaturna odvisnost in vpliv nelinearnosti tako uporabljenega sensorja magnetnega polja kot tudi jedra. Kljub temu lahko pride na izhodu merilnika do preostale napetosti, ki je posledica uporabljenega ojačevalnika in remanence jedra in preostale napake sensorja magnetnega polja.

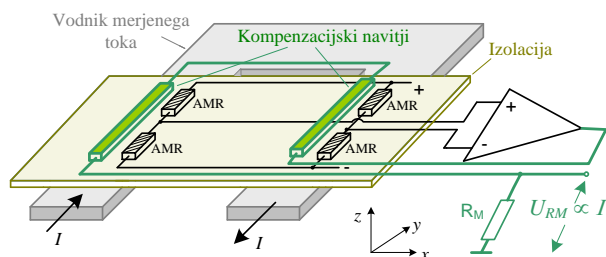


Slika 8: Zaprtzančni Hallov merilnik z jedrom

Dobra lastnost zaprtzančnega pristopa je tudi ta, da je magnetno polje v jedru tako rekoč nič, zato so izgube v jedru zanemarljive, zmanjšajo pa se tudi vplivi na meritev toka, ki so povezani z lastnostmi jedra (nelinearnost, histerezna zanka). Kot pomanjkljivost zaprtzančnega pristopa moramo omeniti predvsem zahtevnejšo izdelavo merilnika in s tem povezane stroške ter večje dimenzije samega merilnega pretvornika.

5.2.1 Zaprtzančni sistemi brez jedra

V zadnjih letih v vlogi senzorja gostote magnetnega polja pogosto nastopajo elementi iz skupine xMR, kar je skupna oznaka za magnetno odvisne upore. Sem spadajo AMR (anisotropic), GMR (Giant), TMR (Tunnel), CMR (Colossal) in drugi magnetno-uporovni senzorji. Odlikuje jih visoka občutljivost [17], ker pa je le-ta definirana zgolj v smeri x (slika 9), jih je tako rekoč nemogoče integrirati v ozko režo zaključenega magnetnega tokokroga (jedro). Senzorji magnetnega polja xMR imajo velik temperaturni koeficient (+0,3%/K) in znatno toleranco upornosti ($\pm 30\%$), poleg tega pa so zaradi visoke občutljivosti dovzetni za zunanja magnetna polja. Da se temu izognemo, jih po navadi vežemo mostično (Wheatstone bridge). Nelinearna karakteristika xMR onemogoča odprtozančno izvedbo, zato so bile razvite posebne zaprtzančne metode, ki za delovanje ne potrebujejo magnetnega jedra [18]. V komercialno dostopnih tokovnih merilnih pretvornikih najpogosteje nastopajo AMR- in GMR-senzorji magnetnega polja. Primer zaprtzančnega tokovnega merilnega pretvornika z uporabljenimi AMR-senzorji magnetnega polja je prikazan na sliki 9.



Slika 9: Zaprtzančni merilnik AMR brez jedra

Merjeni tok I teče v zanki, ki je nameščena pod uporovnim mostičem. Kompenzacija glavnega magnetnega polja se izvaja s tokom I_{komp} in kompenzacijskima navitjema, ki so vpeti v regulacijsko zanko. Kompenzacijski tok je generiran tako, da sta magnetno polje v merilniku in s tem izhodna napetost uporovnega mostiča, ki je hkrati napaka regulacije, enaka nič. Lastnosti opisanega tokovnega merilnega pretvornika so podobne lastnostim zaprtzančnih merilnikov z jedrom, prav odsotnost jedra pa mu omogoča kompaktnjšo zgradbo in manjše dimenzije. Merilnik brez jedra tudi ni izpostavljen omejitvam, kot sta nasičenje in remanentni magnetizem jedra, vplivom zunanjih magnetnih polj pa se izognemo z ustrezno razporeditvijo elementov.

Poleg že omenjenih principov merjenja magnetnega polja (Hall, XMR) je na področju merjenja toka mogoča implementacija sodobnih tehnologij zaznavanja magnetnega polja (nuclear magnetic resonance-NMR, SQID, quantum Hall effect...), ki pa so bodisi še v razvojni fazi bodisi jih zaradi zahtevnosti opreme in cene srečamo zgolj v specializiranih laboratorijih.

5.3 Kombinirani sistemi

Tokovni merilni pretvorniki, ki delujejo na principu merjenja magnetnega polja (Amperov zakon), imajo pred tokovnim transformatorjem oz. tuljavo Rogovskega to prednost, da omogočajo merjenje enosmernih tokov, ne dosegajo pa njune točnosti in pasovne širine. Zato so se na trgu pojavile rešitve, ki smiselno združujejo posamezne merilne pristope in tako način izkoristijo prednosti enih in drugih.

Po navadi je merilni pretvornik kombinacija odprtozančnega Hallovega merilnika z jedrom in tokovnega transformatorja [19]. Zadnji velja za visokofrekvenčno območje s tranzientnimi pojavi, medtem ko za merjenje nizkofrekvenčnih tokov poskrbi Hall del merilnika.

6 MERJENJE TOKA NA PODLAGI FARADAYEVEGA EFEKTA

Zaradi specifičnosti tokovnih merilnih pretvornikov, ki za svoje delovanje izkoriščajo Faradayev efekt, le-ti niso primerni za merjenje toka v vezjih močnostne elektronike. Ker pa je prispevek zasnovan za celovit pregled sodobnih načinov merjenja električnega toka, bomo na tem mestu podali fizikalne osnove delovanja in ključne lastnosti magnetnooptičnih merilnikov toka. Ti so se uveljavili predvsem v zadnjem času, in sicer na področju merjenja velikih amplitud toka (500 kA) v visokonapetostnih omrežjih, za svoje delovanje pa izkoriščajo magnetno-optični pojav, znan kot Faradayev efekt. Bistvo tega je, da se orientacija (zasuk polarizacijske ravnine) polarizirane svetlobe spremeni, če je ta izpostavljena magnetnemu polju [20]. Fazni zasuk (θ) polarizacijske ravnine je proporcionalen komponenti jakosti magnetnega polja (H), ki kaže v

smeri širjenja svetlobe in razdalji (s), na kateri omenjena komponenta polja deluje

$$\theta = V \int \vec{H} \cdot d\vec{s}. \quad (9)$$

Konstanta V podaja lastnost medija, v katerem se širi svetloba. Meritev toka se dodatno poenostavi, če predpostavimo integral po zaključeni poti

$$\theta = V \cdot I, \quad (10)$$

kjer je zasuk fazne ravnine sorazmeren toku. Kot medij, po katerem se opazovana svetloba širi, se po navadi uporablja silicijevo optično vlakno. S sklenitvijo le-tega v zaključeno zanko zadostimo izrazu (10). Magneto-optični tokovni merilni pretvornik sestoji iz večjega števila »optičnih« ovojev, kar mu omogoča večjo tokovno občutljivost. Merilnik vsebuje dodatno vezje za injiciranje polarizirane svetlobe v medij in vezje za detekcijo faznega zasuk polarizacijske ravnine.

Visoka izolacijska trdnost magnetno-optičnih tokovnih merilnih pretvornikov je svojstvena lastnost, ki jo izkoriščamo zlasti v visokonapetostnih aplikacijah (prenosna omrežja). V zadnjih desetletjih pa so raziskave magnetooptičnih merilnikov usmerjene predvsem v razvoj optičnih tokovnih transformatorjev [21]. Ti so alternativa klasičnim tokovnikom, saj omogočajo lažje izpolnjevanje zahtev po prebojni trdnosti in izključujejo vpliv nasičenja železnega jedra. Cena in občutljivost magneto-optičnega tokovnega merilnega pretvornika sta glavna faktorja, ki smiselno definirata uporabnost merilnika v tokovnem območju nad 50 kA.

7 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

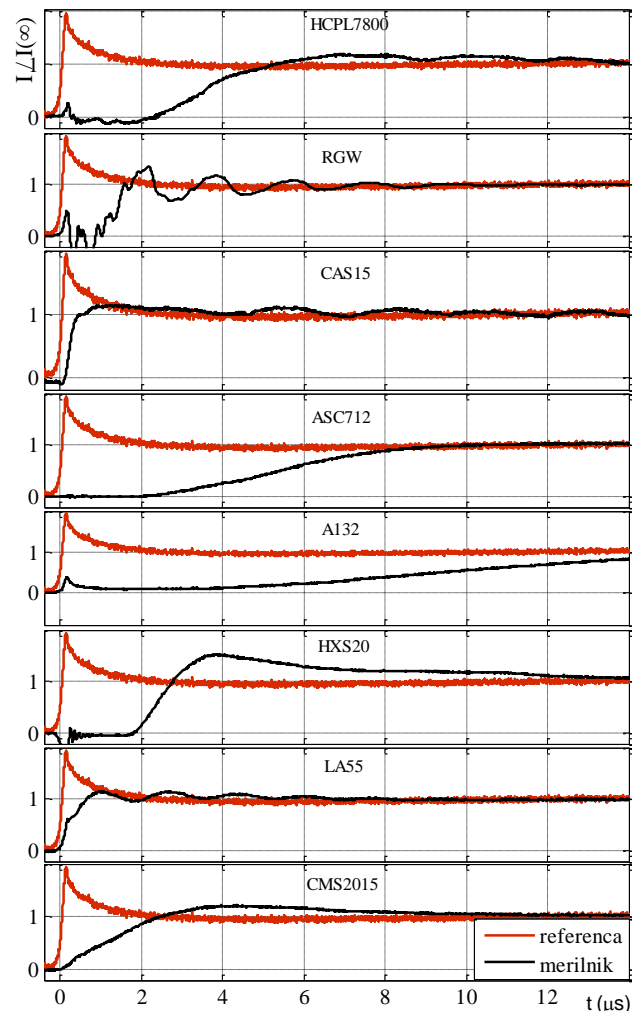
V tabelah 1 in 2 so zbrane osnovne značilnosti tokovnih merilnih pretvornikov in pretvornikov, ki smo jih za podrobnejšo analizo vključili v eksperimentalne meritve [22–29]. Pri izvajanju meritev smo se osredotočili na merilne pretvornike z merilnim območjem med nekaj 10 mA pa vse do 100 A, saj je to območje amplitud, s katerimi se pri svojem delu najpogosteje srečujemo. Zato izvedbe magnetooptičnih merilnih pretvornikov niso zajete v eksperimentalnih meritvah. Dinamične lastnosti tokovnih merilnikov smo ovrednotili s prehodno funkcijo (odziv merilnika na skočno spremembo merjenega toka) in frekvenčno karakteristiko.

Pasovna širina merilnega upora bistveno presega širino preostalih merilnih pretvornikov, zato je bil izmerjen signal na merilnem uporu hkrati tudi referenčna meritev, s katero smo primerjali rezultate preostalih merilnikov.

Amplitudo toka smo izbrali tako, da se je le-ta za posamezni merilnik nahajala v sredini njegovega merilnega območja. Odzivi na skočno spremembo merjene veličine za posamezne tokovne merilne pretvornike (temna sled) so skupaj z referenčno meritvijo (svetla sled) zbrani na sliki 10.

Tabela 1: Merilni pretvorniki, zajeti v meritvah

Merjenec	Skupina	Odprto/Zaprto znančni	Jedro
R_{REF} (10 m Ω)	Ohmova	-	-
$R + HCPL7800$	Ohmova	-	-
Rogowski	Faradayeva	-	-
CAS15	Faradayeva	Z	✓
ACS712	Amperova	O	-
A132	Amperova	O	✓-
HXS20	Amperova	O	✓
LA55	Amperova	Z	✓
CMS2015	Amperova	Z	-



Slika 10: Prehodne funkcije obravnavanih merjencev

Tabela 2: Lastnosti tokovnih merilnih pretvornikov glede na princip delovanja

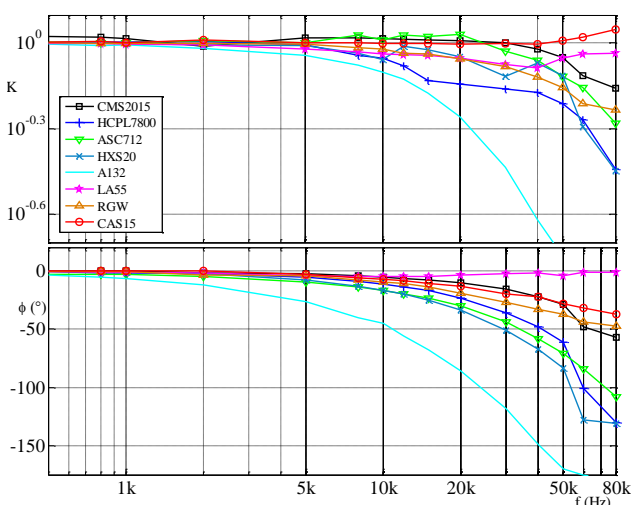
	Pasovna širina	DC	Točnost %	Galvanska ločitev	Merilno območje	Temperaturna odvisnost
Merilni upor	MHz	✓	0,1-2	-	mA - A	Zmerna
Merilni upor+izolacijsko vezje	kHz	✓	0,2-5	✓	mA - A	Zmerna
Tuljava Rogowskega (RGW)	Hz - MHz	-	0,2-5	✓	A - kA	Zanemarljiva
Tokovni transformator	Hz - MHz	-	0,1-1	✓	A-MA	Zanemarljiva
Transduktor (Fluxgate)	kHz	✓	0,01-0,5	✓	mA - kA	Zanemarljiva
Hall -linearni	kHz	✓	1-10	✓	mA - kA	
-odprtozančni (jedro)	kHz	✓	0,5-5	✓	A - kA	Zmerna
-zaprtzančni (jedro)	kHz	✓	0,5-5	✓	A - kA	
AMR	kHz	✓	0,5-2	✓	A	Zmerna
Magnetno-optični	MHz	✓	0,1-1	✓	kA - MA	Velika

Iz potekov je razvidna časovna zakasnitev, ki je po pričakovanju najmanjša ($< 2 \mu\text{s}$) pri zaprtzančnih izvedbah tokovnih merilnikov (CAS15, LA55 in CMS2015), medtem ko so preostali tokovni merilniki v tem elementu med seboj primerljivi. V izhodnem signalu transduktorskega merilnika (CAS15) je bilo mogoče zaslediti dodatno višjeharmonsko komponento (900 kHz), ki je posledica preklopnega načina delovanja. Iz tega izhaja tudi zahteva po ustrezni izvedbi tokokroga za napajanje merilnika z dodanimi podpornimi (decoupling) kondenzatorji v neposredni bližini napajalnih priključnih sponk. Zlasti pri nadtokovni zaščiti močnostnih stikal mora merilnik toka pravočasno zagotoviti informacijo o toku, zato izvedbe merilnikov z daljšimi odzivnimi časi na tem mestu niso primerne. Poudariti velja tudi rezultate nekaterih merilnikov, pri katerih je zaradi velikih strmin merjenega toka rezultat meritve ob nastopu tokovne stopnice popačen. Vpliv hitrih sprememb toka se kaže v dodatnih oscilacijah in negativnih konicah v izhodnem signalu merilnika.

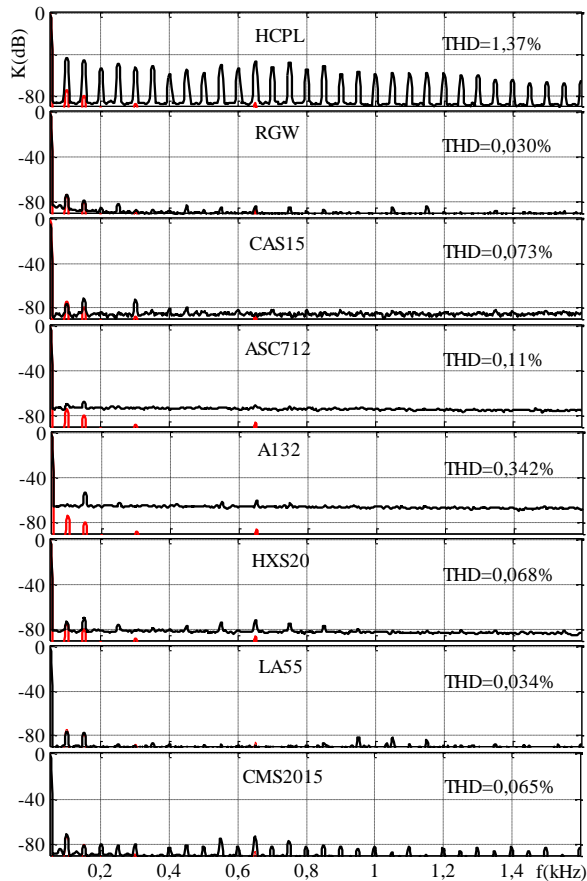
Podobne zaključke lahko razberemo tudi iz frekvenčnih karakteristik, ki jih kaže slika 11. V območju do 1 kHz ni bistvenega odstopanja med preizkušenimi merilniki.

S stališča dinamike so vsi merilniki povsem primerni za omrežne aplikacije, kjer ne pričakujemo tokov s frekvencami nad dvajsetim harmonikom. Z višanjem frekvence merjenega toka se povečuje fazni zamik izhodnega signala merilnika glede na merjeni tok. To moramo upoštevati v aplikacijah s tokovno regulacijo, saj fazni zamik neposredno vpliva na stabilnost regulacijske zanke. Pri merjenju pretokov moči/energije se zakasnjena informacija o toku odraža v napačnih rezultatih meritev.

Pri izvajanju meritev smo šli korak dlje in obravnavane merilnike ovrednotili tudi s stališča lastnega popačenja izhodnega signala. V nekaterih merilnih pretvornikih se namreč nahajajo dodatna vezja za odpravljanje preostale (offset) napetosti in temperaturno kompenzacijo, ki lahko s svojim delovanjem vnašajo dodatne višjeharmonske komponente v izmerjeni signal. Ti podatki nam pri izdelovalcih niso na voljo, pomembni pa so zlasti pri načrtovanju reguliranih precizijskih napajalnih virov, pri katerih se zahteva izrazito majhno popačenje izhodne veličine. V ta namen smo izmerili frekvenčni spekter izhodnega signala za posamezen merilnik in določili faktor popačenja (THD). Pred tem smo izdelali precizijski sinusni tokovni vir za generiranje referenčnega toka amplitude 8 A in frekvence 50 Hz z izrazito majhnim popačenjem (THD = 0,02 %). Rezultati meritev so zbrani na sliki 12. Temna sled prikazuje spekter signala iz merilnega pretvornika, svetla sled pa ustreza referenčnemu toku.



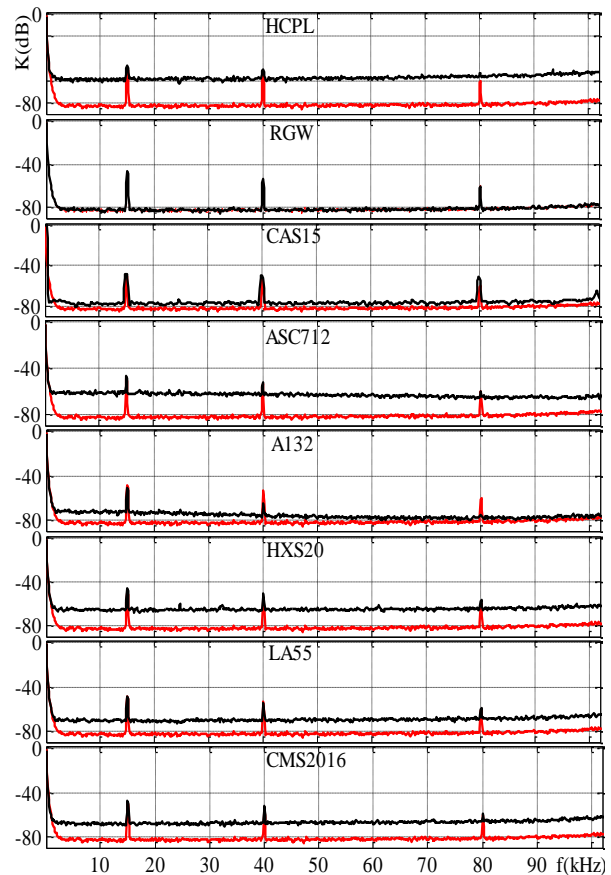
Slika 11: Frekvenčne karakteristike merjenjcev



Slika 12: Frekvenčni spekter s pripadajočim faktorjem popačenja – THD

Glede popačenja signala na izhodu merilnika se je najslabše odrezal uporovni merilnik z dodanim izolacijskim vezjem za galvansko ločitev, ki v meritev vnaša po amplitudi sicer nizke, vendar številne dodatne harmonike. Poleg samih komponent, ki jih posamezni merilni pretvornik vnaša v rezultat meritve, je s slike 12 mogoče razbrati tudi nivo šuma v izhodnem signalu posameznega merilnega pretvornika. Z nivojem šuma je namreč definirana najmanjša amplituda višjiharmonskih komponent toka, ki jih je merilni pretvornik še sposoben izmeriti. To je še boljše razvidno iz rezultatov na sliki 13, kjer smo meritev spektra razširili do frekvence 102.4 kHz. V tem primeru smo v referenčni sinusni tok namenoma dodali višjiharmonske komponente frekvenc 15 kHz, 40 kHz in 80 kHz, katerih amplituda je bila od -40 dB do -50 dB glede na osnovni harmonik referenčnega toka. To nam je med drugim omogočilo oceno občutljivosti (nivo šuma v izhodnem signalu) posameznega merilnika v širokem frekvenčnem pasu in tudi zmožnost zaznavanja visokofrekvenčnih komponent toka. Iz slike 13 je razvidno, da sta v danih razmerah tuljava Rogowskega in transduktorski merilnik CAS15 zmožna v širokem frekvenčnem območju zaznati komponente toka, ki so glede na osnovni signal do -80dB pod osnovnim signalom. Tudi s stališča zaznavanja višjiharmonskih komponent (15 kHz, 40 kHz in 80 kHz) z izrazito majhno

amplitudo je slika podobna. Poleg tuljave Rogowskega zaznavanje višjiharmonskih komponent toka ne predstavlja težav zaprtizančnim merilnim pretvornikom (CAS15, LA55, CMS2015), medtem ko nekateri merilni pretvorniki (ASC712, A132) vsiljenega harmonika frekvence 80 kHz ne zaznajo.



Slika 13: Frekvenčni spekter merjencev z vsiljenimi višjiharmonskimi komponentami toka

8 SKLEP

V prispevku smo predstavili načine merjenja električnega toka, pri katerih so upoštevani različni fizikalni zakoni. Podali smo splošen opis posameznih izvedb merilnikov in njihovo delovanje. V pregledu smo se osredinili na že uveljavljene tehnologije merjenja električnega toka. V aplikacijah močnostne elektronike je informacija o trenutni vrednosti toka ključna, pri čemer igra pomembno vlogo dinamičen razpon merilnika. S tega vidika smo tudi izvajali meritve. Pri tem smo v nasprotju s številnimi podobnimi preglednimi prispevki in podatkovnimi listi izdelovalcev, lastnosti merilnikov ocenili z razširjenim naborom meritev. V prvem primeru je bila to meritev prehodne funkcije, v drugem primeru pa smo s pomočjo frekvenčnega spektra ovrednotili vpliv samega delovanja merilnega pretvornika na meritev toka. Pri izvajanju meritev smo se lahko prepričali, da lahko na rezultate tokovnih meritev vpliva tudi izvedba napajanja merilnega pretvornika, pri čemer je priporočljivo slediti

navodilom izdelovalca. Rezultati meritev so v vseh pogledih v prid zaprtizančnim izvedbam tokovnih merilnih pretvornikov, zato so te primernejše za vgradnjo v kompleksne, visokodinamične močnostne aplikacije.

LITERATURA

- [1] P. Ripka, Electric current sensors: a review, *Measurement Science and Technology*, Vol.21, No.11, Sept. 2010.
- [2] C. Xiao, L. Zhao, T. Asada, W. G. Odendaal, J. D. van Wyk, An Overview of Integratable Current Sensor Technologies, Conference Record of the Industry Applications Conference 2003, Vol.2, Oct. 2003.
- [3] S. Ziegler, R.C. Woodward, H.H-Ching. Iu, L.J. Borle, Current Sensing Techniques: A Review, *IEEE Sensors Journal*, Vol.9, No.4, April 2009.
- [4] E. Favre, W. Teppan, Current Sensing in Electric Drives - A future and History Based on Multiple Innovations, LEM Group, *Electromotion 2005 6th International Symposium on Advanced Electro Mechanical Motion System*, Lausanne, Switzerland, Sep. 27–29, 2005.
- [5] P. S. Filipksi and M. Boecker, "AC-DC current shunts and system for extended current and frequency ranges," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 4, pp. 1222–1227, Aug. 2006.
- [6] B. Mammano, Current Sensing Solutions for Power Designers, *Unitrode Seminar Notes SEM1200*, 1999.
- [7] H. Lavrič, R. Fišer, "Lossless current sensing technique on MOSFET $R_{DS(on)}$ with improved accuracy", *Electronic Letters*, vol. 46, no. 5, pp. 370–371, March, 2010.
- [8] W.F. Ray., C.R Hewson, High Performance Rogowski Current Transducers, *Industry Applications Conference*, 2000.
- [9] J. D. Ramboz, "Machinable Rogowski coil, design, and calibration," *IEEE Instrumentation and Measurement Society*, Vol. 45, No.2, pp. 511–515, April 1996.
- [10] N. McNeill, N.K. Gupta, W.G. Armstrong, Active Current Transformer Circuits for Low Distortion Sensing in Switched Mode Power Converters, Transformer, *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol.19, No: 4, July 2004.
- [11] X. Ai, H. Bao, Y.H.Song, Novel Method of Error Current Compensation for Hall-Effect-Based High-Accuracy Current Transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No1, Jan. 2005.
- [12] N. Locci, C. Muscas, A Digital Compensation Method for Improving Current Transformer Accuracy, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.15, No. 4, Oct. 2005.
- [13] T. Sonoda, R. Ueda, "An AC and DC Current Sensor of High Accuracy," *IEEE Transaction on Industrial Applications*, Vol.28, No. 5, pp 1087–1094, Sept./Oct. 1992.
- [14] W. Teppan, "Closed-loop Fluxgate Current Sensor", št. patenta EP 09159946, 21.03.2012.
- [15] G. V. Quesada, M. R. Lumbreras, A. C. - Roca, F. Jeréz, Design of a Low-Consumption Fluxgate Transducer for High-Current Measurement Applications, *IEEE Sensors Journal*, Vol.11, No. 2, Feb. 2011.
- [16] J. Gilbert, R. Dewey, Linear Hall Effect Sensor ICs, Applications information – Application Note 27702A, Allegro MicroSystemss Inc., *Applied Power Electronic Conference and Exposition, Apec*, Vol. 2, pp. 1288–1292, March 2005
- [17] M. Vopálenký, P. Ripka, A. Platil, Precise Magnetic sensors, sensors and Actuators A:Physical. Vol. 106, No.1–3, Sept. 2003.
- [18] G. Laimer, J. W. Kolar, Design and experimental analysis of a DC ot 1MHz closed loop magnetoresistive current sensor, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005*. Vol. 2, March 2005.
- [19] P. Poulichet, F. Costa, É. Labouré, A New High-Current Large-Bandwidth DC Active Current Probe for Power Electronics Measurements, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 1, Feb. 2005.
- [20] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brändle, M. G. Brunzel, Fiber-Optic Current Sensor for Electrowinning of Metals, *Journal of Lightwave Technology*, Vol.25, No. 11, Nov. 2007.
- [21] S. Mohr, T. Bosselmann, A High Dynamic Range Magneto-optic Current Transformer With Advanced Signal Processing, *IEEE Sensors Journal*, Vol.3, No. 6, Dec. 2003.
- [22] Avago Technologies. HCPL-7800A/HCPL-7800 Isolation Amplifier. (26. maj 2008). Avago Technologies [Online]. Dosegljivo: www.avagotech.com/docs/AV02-0410EN. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [23] Chauvin-arnoux. Flexible probes for AC current. *Chauvin-arnoux* [Online]. Dosegljivo: <http://www.chauvin-arnoux.com/display.asp?10230>. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [24] Lem. Current Transducer CAS series. Lem [Online]. Dosegljivo: www.lem.com/docs/products/cas%20series.pdf. [Dostopano: 10. 3. 2014].
- [25] Allegro. Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. (16. nov. 2012). Allegro Microsystems. LLC [Online]. Dosegljivo: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [26] Allegro. Low noise, Linear hall Effect Sensor ICs with Analog Output. (26. sept. 2013). Allegro Microsystems.LLC [Online]. Dosegljivo: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Magnetic-Linear-And-Angular-Position-Sensor-ICs/Linear-Position-Sensor-ICs/A1324-5-6.aspx>. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [27] Lem. Current Transducer HXS 20-NP/SP30. Lem [Online]. Dosegljivo: http://www.lem.com/docs/products/hxs%20NP%20SP30_e_rev19.pdf. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [28] Lem. Current Transducer LA 55-P. Lem [Online]. Dosegljivo: <http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20e.pdf>. [Dostopano: 25. 2. 2014].
- [29] Sensitec. CMS2015 Magnetoresistive Current Sensor. (5. sept. 2012). Sensitec GmbH [Online]. Dosegljivo: http://www.sensitec.com/upload/SENSITEC/PDF_Downloads/Datenblatt/Sensitec_CMS2015_DSE_01.pdf. [Dostopano: 25. 2. 2014].

Aleš Leban je diplomiral leta 1997, magistriral leta 2002 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Težišče njegovega dela obsega načrtovanje stikalnih pretvornikov in njihovo krmiljenje, v raziskavah pa se posveča regulacijskim principom v mikrokrmilniških sistemih.

Mitja Nemeč je diplomiral leta 2003 in doktoriral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Ukvarja se s področjem diganostike, krmiljenja in regulacije močnostne elektronike s poudarkom na električnih pogonih, precizijskih virih in aktivnih filtrih.