

Precizijski AC+DC generator (300 A/6 kHz) za umerjanje kompenzacijskih tokovnih merilnikov

Peter Zajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: peter.zajec@fe.uni-lj.si

Precision current source for calibration of compensated current transducers

For a leading manufacturer of industrial current and voltage transducers MBS AG (Germany), a R&D has been carried out on a prototype of precision current source for calibration of compensated current transducers. The source is capable to generate a DC and AC (20 Hz to 6 kHz) current from 0.3 A to 300 A. AC part is based on the performance of the hybrid amplifier, which successfully combines the features of commercially available linear power amplifier and specifically developed switching power converter - amplifier. In order to limit the supply voltage of hybrid amplifier, an additional switching converter performs also control of bipolar supply voltage. The supply voltage has been also successfully utilized thanks to the innovative clamping circuit with low resistance and inductance. Special attention is paid to the implemented concept of an analog/digital controller, which eliminates the nonlinear distortions caused by matching transformers, connecting the clamping high-current circuitry to the hybrid amplifier.

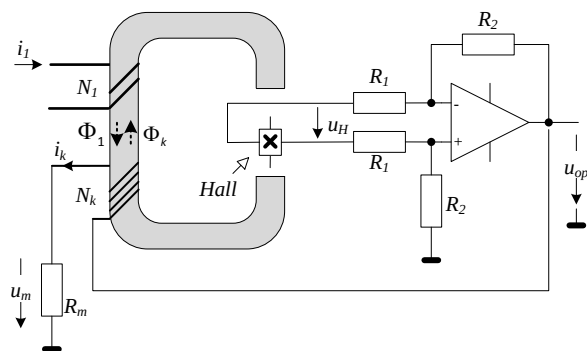
1 Uvod

V sodobnih pretvorniških napravah se soočamo s prepletom regulacijskih zank in posledično s številnimi merilniki veličin, ki posredujejo informacijo o trenutni vrednosti toka, napetosti, vrtilni hitrosti, poziciji in pospešku obdelovanca itd.

Ker pa merilniki ne služijo le nadzoru energijskega pretoka skozi pretvorniško vezje temveč tudi njegovi

zaščiti (preprečevanje strojeloma) ter zaščiti posluževalnega osebja, se razpon merilnega območja, želeni frekvenčni pas in želene komunikacijske zmožnosti merilnikov razlikujejo glede na mesto njihove vgradnje.

Našteto še posebej velja za merilnike toka (tabela 1), med katerimi prevladujejo zaprtozančni merilniki toka s Hallovo sondo (angl. closed loop current transducer - tabela 1).



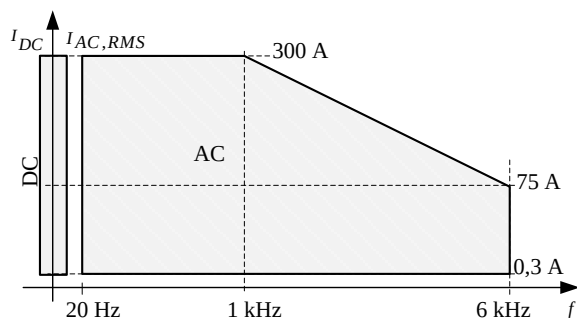
Slika 1. Zaprtozančni merilnik toka s Hallovo sondo.

Učinku (slika 1) merjenega toka i_1 nasprotuje kompenzacijski tok i_k , ki ga skozi pripadajoče navitje vsili regulacijsko vezje. Ker se učinek $(\Phi_1 - \Phi_k)$ obeh navitij meri in odpravlja s Hallovo sondo, je tovrstni merilnik posledično sposoben meriti enosmerni kot tudi izmenični tok. Brez eksplicitnega dokaza je iz opisa možno sklepati, da sta njegova zgornja frekvenčna meja ter časovna stabilnost izhodne informacije pogojeni z izvedbo regulacijskega vezja ter temperaturno odvisnostjo (lezenjem) karakteristik Hallove sonde.

Med proizvodnjo merilnika kot tudi pri končnem umerjanju sta ključni kontroli: i) preostalega enosmernega toka (offset) ter ii) kontrola točnosti v izbranih delovnih točkah (1%, 25% ter 100% I_{PN}). Zaradi posodobitve proizvodnega programa v podjetju MBS AG je bilo slednje primorano posodobiti svoje umerjevalne sisteme. V ospredju zahtev kontrole merilnikov z nazivnim tokom I_{PN} v razponu med 30 A in 300 A je bilo izboljšanje točnosti (0,2% I_{PN}) in časovne stabilnosti umerjevalnega generatorja (0,05% I_{PN}) ter razširitve njegovega frekvenčnega pasu (do 6 kHz). Zaradi uporabe enotnega umerjevalnega generatorja je njegov tokovno-frekvenčni razpon podrobneje podan na sliki 2.

Tabela 1: Najpogostejše zastopani merilniki toka

AC+DC (ne-izolirani)	
➤	merilni upor
AC+DC (izolirani)	
➤	Hall senzor
○	odprtozančni merilnik
○	zaprtozančni merilnik
➤	magnetoupornostni senzor
➤	DC tokovni transformator
➤	Optični
AC (izolirani)	
➤	tuljava Rogowski
➤	pasivni tokovni transformator
➤	aktivni tokovni transformator

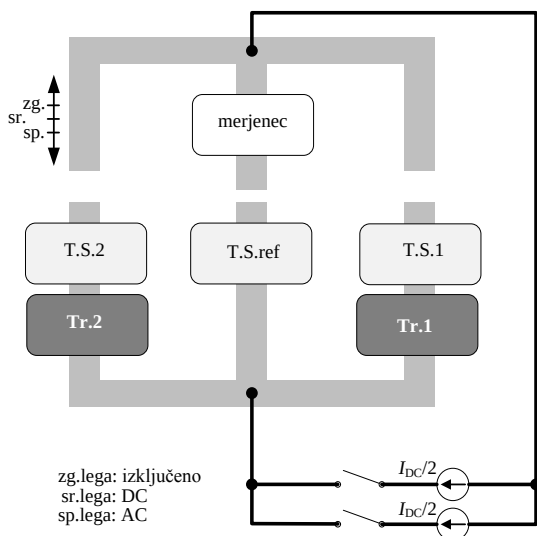


Slika 2. Tokovno-frekvenčni razpon umerjevalnega generatorja.

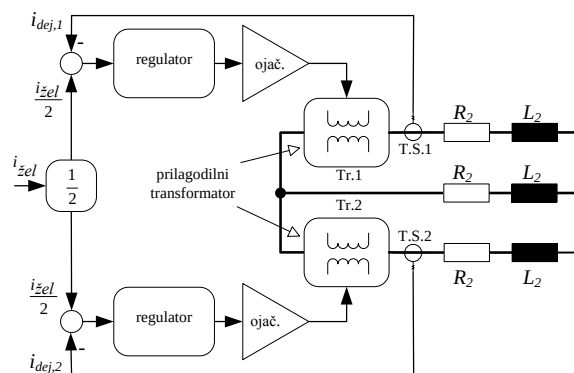
2 Zasnova umerjevalnega generatorja

Način umerjanja tokovnega merilnika izhaja iz opisa njegovega delovanja – v ta namen moramo v njegovo skoznjo odprtino namestiti vodnik ($N_1 = 1$) in skozenj vsiliti tok želenih parametrov (slika 2). Generiranju velikih tokov se lahko izognemo s povečanjem števila primarnih ovojev, kar pa ni priročno. Potrebovali bi namreč večpolni konektor, s čimer se nezanesljivost električnega spoja in število mehanskih okvar na podlagi izkušenj bistveno poveča [1]. Zaradi lažje in robustnejše izvedbe vpenjala (sliki 5 in 6) smo se odločili za $N_1 = 1$.

Umerjevalni generator se sestoji iz dveh ločenih pretvorniških vezij – prvo, ki je podrobneje opisano v [2], generira enosmerni tok, medtem ko izmenični tok vsilimo skozi merjenec z močnostnima ojačevalnikoma. Njun bremenski tokokrog ni priključen v sistem neposredno temveč preko pripadajočih prilagodilnih transformatorjev Tr.1 in Tr.2. Toroidna transformatorja sta povezana na stranska stebra umerjevalnega tokokroga, ki posledično tvorita sekundarni ovoj na vsakem izmed transformatorjev. Da preprečimo



Slika 3. Vpenjalni tokokrog s ključnimi komponentami.



Slika 4. Posplošena regulacijska shema izmeničnega generatorja.

neenakomerno tokovno porazdelitev med stranskima stebroma, reguliramo njun tok z dvema med seboj neodvisnima regulacijskima krogoma (slika 4).

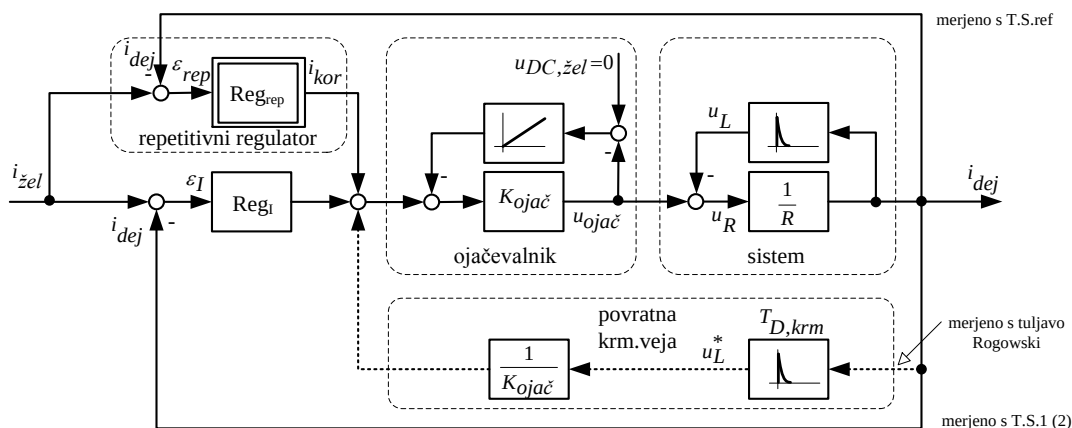
2.1 Vpenjalni mehanizem

Čeprav tehnične lastnosti ojačevalnikov izhajajo iz uvodoma podanih zahtev, pa je njuna izbira in dimenzioniranje pogojeno tudi z izvedbo vpenjalnega tokokroga.

Slednji mora imeti majhno upornost, s čimer zagotovimo majhno vhodno moč naprave, oziroma še pomembneje – majhen porast nadtemperature v notranjosti merilne naprave. Nadtemperaturi so namreč izpostavljene vse komponente sistema vključno z merilnikom toka, ki sta del regulacijske zanke. Še pomembneje pa je, da preprečimo lezenje karakteristik referenčnega merilnika toka (T.S.ref), s katerim vršimo primerjavo z odčitki (poteki) kontroliranega merjenca.

Opisana namestitvev prilagodilnih transformatorjev je zato laičnemu očesu sprva moteča, saj poveča višino umerjevalnega mehanizma in bi zato pričakovali, da je namestitvev prilagodilnih transformatorjev izven vpenjalnega mehanizma/tokokroga ugodnejša (slika 5). Omogoča namreč namestitvev poljubnega števila sekundarnih ovojev in posledično povečanje njene napetosti v jakostnem tokokrogu – pri čemer ne smemo prezreti povečanja dolžin povezovalnih vodnikov in s tem njihove upornosti. A četudi bi vztrajali pri enem sekundarnem ovoju, upornosti vpenjalnega tokokroga bistveno ne bi povečali. Izkazalo pa se je, da ob tem občutneje povečamo induktivnost. Njen porast je pereč, saj se zaradi majhne upornosti tokokroga močnejše odraza v povečanju časovne konstante vpenjalnega tokokroga in posledično povzroča:

- povečanje faznega zamika ter povečanje impedance, ki narašča s frekvenco toka,
- porast jalove moči, ki jo morata zagotavljati ojačevalnika in posledično,
- omejevanje maksimalno dosegljive amplitude izhodnega toka z naraščajočo frekvenco.



Slika 8. Podrobnejša shema regulacije generatorjevega toka.

Napetost u_n reguliramo po principu pulzno-širinske modulacije (PWM). Zaradi želenega frekvenčnega razpona generatorja, mora biti dinamika PWM regulacijske zanke ustrezno večja od primera, ko se potencial središčne točke ne spreminja ($u_n = u_s/2$), t.j. v polmostičnem obratovanju. Kapacitivnost kondenzatorjev C_p in C_n znaša zato vsega 2,2 μF .

2.3 Regulacija generatorjevega toka

Iz posplošene sheme regulacijskega kroga na sliki 4 je razvidno, da sta toka v stranskih stebrih regulirana med seboj neodvisno. Podrobnejšo blokovno shemo njunih regulacijskih krogov kaže slika 8.

Pri hibridnem ojačevalniku je razvidna dodatna povratna vez z integralnim regulatorjem, ki je namenjena preprečitvi pojava enosmerne komponente izhodne napetosti (u_{izh}) – in posledičnemu enosmernemu predmagnetanju prilagodilnih transformatorjev. Ohmsko induktivne lastnosti vpenjalnega tokokroga, podane so namenoma z osnovnima členoma, onemogočajo, da bi regulator toka optimiral s ciljem vzdrževanja zadovoljivo velike stabilnostne rezerve ter sočasnega vzdrževanja majhnega regulacijskega pogreška ε_I .

V ta namen je bila že uvodoma predvidena uporaba repetitivnega regulatorja [4], ki učinkoviteje zmanjša amplitudni in fazni pogrešek. Njegovo delovanje si lahko posplošeno tolmačimo v vlogi generatorja korekcijskega signala i_{kor} , ki ga izoblikuje N med seboj neodvisnih integralnih regulatorjev, ki procesirajo regulacijski pogrešek ε_{rep} le v njim pripadajočem, k-tem časovnem intervalu ($1 \leq k \leq N$). Pri tem je N število diskretnih časovnih intervalov, na katere razdelimo periodo reguliranih veličin. V konkretnem primeru regulator odpravi tudi popačitev izhodne napetosti hibridnih ojačevalnikov, ki je povzročena z nelinearno magnetilno karakteristiko prilagodilnih transformatorjev.

3 Sklepna misel

Generatorji, ki se uporabljajo v umerjevalnih postopkih v proizvodnji različnih naprav ali njihovih sestavnih komponent, morajo praviloma generirati izhodno veličino v širokem amplitudnem in frekvenčnem razponu – tako da z enim generatorjem uspemo umeriti komponente različnih nazivnih vrednosti (npr. toka) ter s čim manjšim številom posegov v umerjevalni tokokrog. Kombinacija predlaganega generatorja in njegove sklopitve z vpenjalnim tokokrogom, kjer so popačitev, točnost ter časovna stabilnost umerjevalnega toka v okviru želenih meja, opisano vlogo uspešno izpolnjuje. Pomanjkljiv je le čas nastavitve (s predpisanimi tokovnimi parametri), ki je posledica uporabljenega repetitivnega regulatorja oziroma kompromisa med hitrostjo in stabilnostjo iterativnega postopka. V prihodnje ga nameravamo izboljšati z dodatnim zmanjšanjem regulacijskega pogreška osnovne proge ε_I , ki narašča s frekvenco. Glavni povzročitelj tega je frekvenčno pogojeni padec napetosti u_L , ki ga bomo kompenzirali s povratnim vplivom krmilne veje u_L^* .

Literatura

- [1] Marko Petkovšek, Peter Zajec, Postopek ugotavljanja magnetnih lastnosti mehkomagnetnih tračnih jeder, Zbornik devetnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2010, Portorož, Slovenija, 20.-22. september 2010, zv. A, str. 564-567.
- [2] Aleš Leban, Danijel Vončina, Procesni vir za impulzno bakrenje tiskanih vezij - enota za generiranje tokovnih impulzov, Elektroteh. vestn., letn. 75, št. 3, str. 105-110, 2008.
- [3] Henrik Lavrič, Danijel Vončina, Peter Zajec, France Pavlovčič, Janez Nastran, A precision hybrid amplifier for voltage calibration systems, Inf. MIDEEM, letn. 34, št. 1, str. 37-42, 2004.
- [4] Gorazd Modrijan, Marko Petkovšek, Peter Zajec, Danijel Vončina, Precision B-H analyser with low THD secondary induced voltage, IEEE trans. ind. electron., vol. 55, issue 1, str. 364-370, Jan. 2008.