

# Nizkonapetostni napajalni modul z galvansko ločitvijo in enofazno PFC stopnjo

Aleš Leban, Danijel Vončina, Peter Zajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: ales.leban@fe.uni-lj.si

**Povzetek:** Posledice čedalje večjega števila nelinearnih električnih porabnikov, ki s svojim delovanjem »onesnažujejo« distribucijsko omrežje, se kažejo tudi v dodatnih izgubah pri prenosu električne energije in v harmonski vsebini omrežnega toka in napetosti. Zato je bila na ravni EU sprejeta direktiva, ki za posamezno skupino električnih porabnikov predpisuje dopustne vrednosti višjeharmonskih komponent toka. V članku predstavljamo načrtovanje in gradnjo pretvornika – enofaznega napajalnega modula. Ta poleg upoštevanja zakonodaje izpolnjuje zahteve sodobnih napajalnih virov, med katerimi bi posebej omenili kompaktno zgradbo, modularnost, galvansko ločitev, visok faktor delavnosti, dinamiko... Napajalni modul je sestavljen iz dveh stopenj. V vlogi vhodnega pretvornika je bilo uporabljeno PFC usmerniško vezje, v katerem poteka pretvorba izmeničnih veličin v enosmerne in se zagotovi ustrezna oblika omrežnega toka. Drugi korak pretvorbe se izvede v DC/DC presmerniku, namenjen pa je prilagoditvi napetostnih nivojev in galvanski ločitvi bremenskega tokokroga od omrežnega. V vlogi DC/DC presmernika smo uporabili topologijo mostičnega pretvornika z visokofrekvenčnim transformatorjem. Zgradbo le-tega smo dodatno poenostavili z uporabljen topologijo tokovnega podvojevalnega vezja v sekundarnem tokokrogu. Delovanje posameznega sklopa napajalnega modula z galvansko ločitvijo smo ob koncu prispevka potrdili z meritvami na eksperimentalnem modelu.

**Ključne besede:** PFC usmernik, DC/DC presmernik, tokovno podvojevalno vezje, tokovni PWM princip

## Low-voltage galvanic isolated power supply with a PFC input stage

Many equipments connected to the power distribution network employ rectification to produce a non-sinusoidal line current. Since the number of such equipment has been gradually increasing, the power transmission losses and decreased quality of the electric energy have become a serious problem. For this reason, a standardization activity was carried out to limit the line current harmonics for various groups of the equipment connected to the power distribution network. In the paper, the presented converter – a low-voltage galvanic-isolated power supply with a PFC input stage – meets the requirements of the modern power supplies like the compact structure, modularity, galvanic isolation, high power factor, fast dynamic response, legislation, etc. As the rectifier consists of two stages, the energy conversion takes place in two distinctive steps. The input stage employs a PFC boost converter to provide rectification of the line voltage and to control the DC voltage and, in order to gain the desired power factor, it shapes the sine line current. In the second step, the DC/DC conversion is carried out to adjust the voltage levels and ensure galvanic isolation. This stage consists of a bridge converter with a high-frequency transformer. Its construction was simplified by applying the current doubler topology in the secondary circuit. At the end of the paper, the properties and the operation of the proposed power supply was confirmed with the measurements on an experimental model.

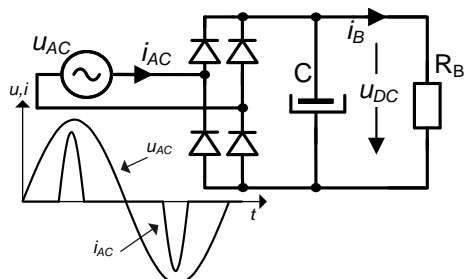
## 1 UVOD

V zadnjih desetletjih smo priča skokovitemu tehnološkemu razvoju, ki se med drugim kaže v povečanem številu priključenih električnih porabnikov na distribucijsko omrežje. Hkrati s kompleksnostjo in zahtevnostjo sodobnih naprav se povečuje tudi delež njihove priključne moči. Zaradi načina delovanja povzročajo v distribucijskem omrežju dodatne izgube in vplivajo na kakovost električne energije. Vpliv posameznega porabnika na omrežje podaja faktor delavnosti naprave [1]

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (1),$$

za katerega želimo, da bi bil enak 1. Faktor delavnosti ni odvisen zgolj od faznega premika ( $\varphi_1$ ) med omrežno napetostjo in osnovno harmonsko komponento toka, tj. faktorja premaknitve (displacement factor), temveč nanj vpliva tudi faktor popačenja (distortion factor) omrežnega toka. Ta je odvisen od harmonskega popačenja ( $THD$ ) [2] in podaja vsebnost višjeharmonskih komponent toka, s katerimi posamezna naprava obremenjuje omrežje. Pri svojem delu se pogosto srečujemo s pretvorniški napravami z nizkim faktorjem delavnosti ( $\lambda$ ). Tipični predstavniki so procesni viri z velikimi izhodnimi tokovi in sorazmerno nizkimi napetostmi (elektrokemija, obločno varjenje...). Tem napravam je skupna vhodna usmerniška stopnja, s

katero se omrežne veličine pretvorijo v ustrezne enosmerne vrednosti. Topologijo klasičnega usmerniškega vezja ter pripadajoča poteka omrežne napetosti in toka kaže slika 1. Kljub minimalnemu faznemu kotu  $\varphi_1$  je faktor delavnosti nizek zaradi izrazito popačenega toka (velik  $THD$ ), ki teče iz omrežja.



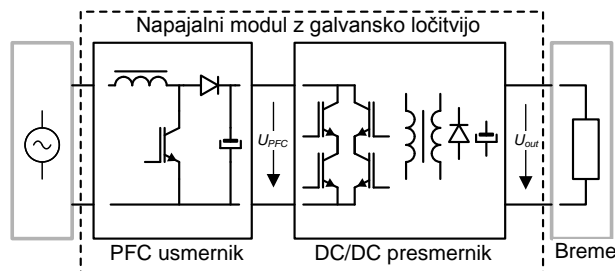
Slika 1: Klasična topologija usmerniške stopnje

Širok spekter višjiharmonskih komponent omrežnega toka ne pomeni težav zgolj distributerjem električne energije, širijo se namreč vzdolž omrežja in vplivajo na pravilnost delovanja preostalih na omrežje priključenih naprav. Prav z namenom, da se zagotovi ustrezna kakovost električne energije, je bil na območju EU sprejet standard EN61000-3-2, ki je del Evropske direktive EMC (Electro Magnetic Compatibility). Ta za posamezne skupine električnih naprav ureja dopustno višino harmonskih komponent toka, s katerimi lahko naprava obremenjuje javno električno omrežje [3].

Ob upoštevanju omenjene direktive smo se v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME) lotili gradnje enofaznega nizkonapetostnega napajalnega modula z visokim faktorjem delavnosti. Modul je namenjen napajanju tehnoloških procesov, v konkretnem primeru pa je bil uporabljen v procesnem viru za impulzno bakrenje tiskanih vezij (pulse plating) [4]. Odlikuje ga tudi modularnost, ki smo jo zagotovili z galvanško ločitvijo bremenskega tokokroga. V nadaljevanju podajamo opis gradnje in osnovni princip delovanja posameznih sklopov nizkonapetostnega napajalnega modula.

## 2 NIZKONAPETOSTNI NAPAALNI MODUL Z GALVANSKO LOČITVIJO IN ENOFAZNO PFC STOPNJO

Pri načrtovanju napajalnega modula smo izhajali iz zahtev sodobnih napajalnih virov, med katerimi bi posebej poudarili: modularnost, zanesljivost, skladnost naprave s trenutno veljavnimi predpisi glede EMC in avtonomnost obratovanja. Ob nadaljnjem upoštevanju fizikalnih parametrov modula (moč, izhodna napetost, faktor delavnosti...) smo pretvorbo moči zasnovali v dveh stopnjah. Principialno blokovno shemo dvostopenjskega pretvorniškega sklopa kaže slika 2. Vhodno stopnjo modula tvori PFC usmerniško vezje. Njegova primarna naloga je zagotoviti ustrezno obliko

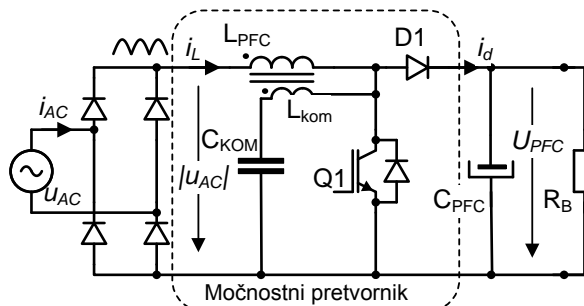


Slika 2: Blokovna shema nizkonapetostnega napajalnega modula

omrežnega toka in želeno izhodno napetost, ki je obenem napajalna napetost DC/DC presmernika. Ta zagotavlja galvanško ločitev in prilagoditev napetosti bremenskega tokokroga.

### 2.1 PFC usmerniško vezje

Topologija PFC usmerniškega vezja je prikazana na sliki 3. Sestavljajo ga diodni mostič, prek katerega je vezje priklopljeno na distribucijsko omrežje, močnostno vezje – pretvornik navzgor (boost converter) in gladilni kondenzator  $C_{PFC}$ .

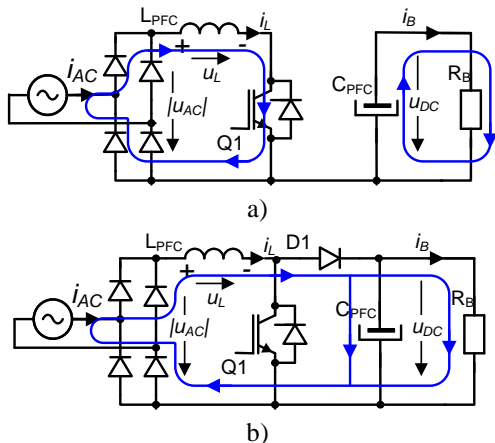


Slika 3: Topologija PFC usmerniškega vezja

Vloga diodnega mostiča in kondenzatorja je enaka kot pri klasičnem usmerniškem vezju – usmerjanje izmenične omrežne napetosti in glajenje izhodne napetosti usmernika. Z dodanim močnostnim pretvornikom in pripadajočim krmilno-regulacijskim vezjem zagotovimo konstantno, od obremenitve neodvisno izhodno napetost  $U_{PFC}$  in ustrezno obliko toka ( $i_L$ ) skozi gladilno dušilko.

S pomočjo slike 4 bo opis delovanja pretvornika podan ob predpostavki, da so elementi v vezju obravnavani idealno. Elementa  $L_{kom}$  in  $C_{kom}$  (slika 3) sta del kompenzacijskega vezja, ki ne vpliva na osnovno delovanje vezja, njegova vloga pa bo pojasnjena v poglavju 2.1.2.

V časovnem intervalu, ko prevaja stikalo Q1, se omrežni tok zaključuje skozi dušilko  $L_{PFC}$  in enakomerno narašča (slika 4a). Dioda D1 je zaporno polarizirana in breme se v celoti napaja iz kondenzatorja  $C_{PFC}$ .



Slika 4: Nadomestni shemi obratovalnih stanj PFC usmernika

V trenutku izklopa stikala Q1 se na dušilki inducirana napetost prišteva vhodni napetosti  $|u_{AC}|$ , zato pride do komutacije toka iz stikala Q1 na diodo D1. V tem intervalu teče tok skozi diodo D1 v kondenzator  $C_{PFC}$  in breme ter se zaključi skozi izmenični vir (omrežje) (slika 4b). Tok skozi dušilko postopno upada do nastopa naslednjega stikalnega cikla. Napetost na izhodu PFC usmerniškega vezja, ki je odvisna od trenutne omrežne napetosti in vklopnega razmerja stikala  $D$

$$u_{PFC} = \frac{1}{1-D} \cdot |u_{AC}|, \quad (2)$$

ne sme biti nižja od temenske vrednosti usmerjene napetosti ( $|u_{AC}|$ ). Le v tem primeru namreč lahko vzdržujemo konstantno izhodno napetost  $U_{PFC}$  usmernika in imamo sočasen nadzor nad oblikovanjem omrežnega toka. Ob predpostavki, da v vezju ni izgub, lahko iz enakosti vhodne in izhodne moči ter ob upoštevanju trigonometrije določimo tok skozi diodo D1 [5]

$$P_{AC}(t) = P_{PFC}(t) \Rightarrow \hat{U}_{AC} \cdot \hat{I}_{AC}(t) \sin^2(\omega t) = U_{PFC} \cdot \hat{i}_d, \quad (3)$$

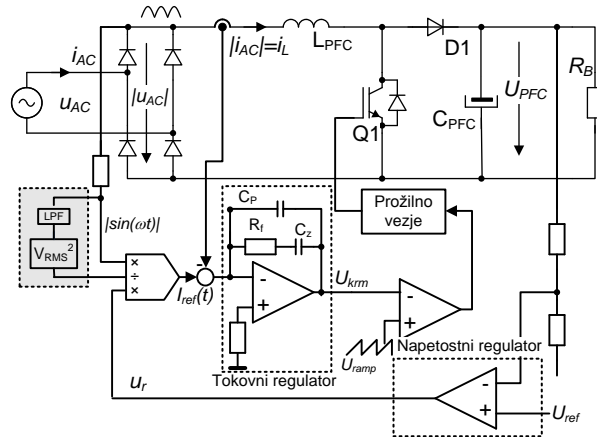
$$\hat{i}_d(t) = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{AC} \hat{I}_{AC}}{U_{PFC}} - \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{AC} \hat{I}_{AC}}{U_{PFC}} \cos(2\omega t). \quad (4)$$

Trenutna moč na vходу pretvornika pulzira s frekvenco 100 Hz. Posledično je v toku skozi D1 poleg enosmerne komponente prisotna tudi po amplitudi primerljiva izmenična komponenta, ki jo predstavlja drugi člen v (4). Ta tok se zaključuje skozi gladilni kondenzator, zato je v izhodni napetosti  $U_{PFC}$  prisoten drugi harmonik omrežne napetosti, kar je svojstvena lastnost uporabljene topologije pretvornika. Za zmanjšanje valovitosti izhodne napetosti mora biti kapacitivnost gladilnega kondenzatorja čim večja.

### 2.1.1 Regulacijska shema PFC usmernika

Regulacijska shema PFC usmernika je zasnovana kaskadno. Nadrejena regulacijska zanka regulira izhodno napetost usmernika ( $U_{PFC}$ ) in določa amplitudo želene vrednosti toka, notranja zanka pa poskrbi, da je

omrežni tok  $i_{AC}$  v fazi z omrežno napetostjo  $u_{AC}$  in po obliki sledi njenemu poteku. Pretvornik navzgor omogoča zvezen potek omrežnega toka, katerega absolutna vrednost  $|i_{AC}|$  je enaka toku  $i_L$  skozi gladilno dušilko. Zato lahko regulacijo omrežnega toka izvedemo posredno prek regulacije toka  $i_L$ . Uporabili smo metodo srednje vrednosti toka [6], ki jo odlikujeta točnost in preprosta izvedba. Principialno regulacijsko shemo PFC usmerniškega vezja kaže slika 5.



Slika 5: Regulacijska shema PFC usmernika

Izhodni signal napetostnega regulatorja  $u_r$ , ki predstavlja amplitudo želene vrednosti toka skozi gladilno dušilko, se v množilniku množi z obliko usmerjene omrežne napetosti ( $|\sin(\omega t)|$ ). Tako dobimo na izhodu množilnega vezja signal, ki ustreza časovnemu poteku referenčnega toka  $I_{ref}(t)$  skozi gladilno dušilko. Podrejena tokovna regulacija se izvaja po metodi srednje vrednosti, pri kateri se tok skozi dušilko meri in primerja z želeno vrednostjo toka. Dobljeni tokovni pogrešek je pripeljan na vhod tokovnega regulatorja (PI člen), nakar njegov izhodni signal v PWM primerjalniku (PWM modulator) definira vklopno razmerje močnostnega tranzistorja Q1. Regulacijsko shemo PFC usmernika smo realizirali z namenskim vezjem L4981 izdelovalca STMicroelectronics.

Tudi v vlogi napetostnega regulatorja je uporabljen PI člen, katerega zgornja frekvenčna meja mora biti nižja od dvakratnika omrežne frekvence, s katero pulzira moč na vходу pretvornika. V tem primeru regulator omogoča ustrezno slabljenje izmenične komponente napetosti na izhodu usmernika. Prav nizka frekvenčna meja napetostnega regulatorja pa je vzrok za nizko dinamiko regulacijskega kroga med prehodnimi pojavi, do katerih pride bodisi zaradi spremembe amplitude omrežne napetosti bodisi zaradi spremembe v obremenitvi vezja. Zato se v regulacijsko shemo PFC usmernika namenoma dodajajo direktne krmilne veje (feedforward) [7], ki s svojim delovanjem vplivajo na regulacijski krog v smislu zmanjšanja napake regulacije. Krmilne veje vplivajo na mestih za napetostnim regulatorjem, zato so krmilni signali neodvisni od parametrov regulatorja, le-ta pa je ob prehodnih pojavih

»razbremenjen«. Krmilne veje vsebujejo zgolj P-člene, zato se odzivnost oz. dinamika regulacijskega kroga z dodanimi direktnimi krmilnimi vejami bistveno poveča.

Na sliki 5 je v osenčenem okvirju prikazana direktna krmilna veja, ki se v literaturi označuje s pojmom » $V_{RMS}^2$  control«. Pri spremembi omrežne napetosti ( $u_{AC}$ ) se mora za enako preneseno moč spremeniti amplituda omrežnega toka oz. amplituda želene vrednosti toka. Manjši del te spremembe še vedno prispeva regulator napetosti s prilagoditvijo signala  $u_R$ , vso preostalo korekcijo želene amplitude toka pa prispeva direktna krmilna veja. Na podoben način bi lahko v regulacijsko shemo vpeljali dodatno krmilno vejo, ki bi amplitudo želene vrednosti toka korigirala v odvisnosti od bremenskega toka.

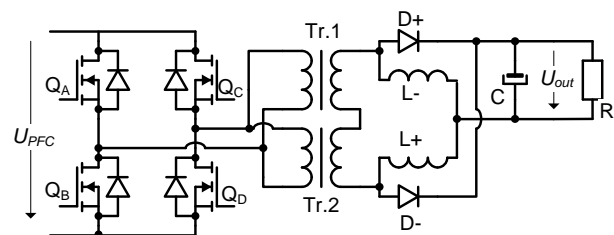
### 2.1.2 Kompenzacija valovitosti toka

Posledica stikalnega delovanja PFC usmerniških vezij je prisotnost višjiharmonskih komponent v omrežnem toku, zato moramo zahteve EMC predpisov zadostiti z uporabo dodatnih filtrskih vezij na vходу pretvornika. V našem primeru smo se omenjene problematike lotili na mestu njenega izvora in uporabili rešitev s kompenzacijskim vezjem [8] (slika 3). Omenjeno vezje sestavljata kondenzator ( $C_{KOM}$ ) in dodatno navitje ( $L_{KOM}$ ), ki je magnetno sklopljeno z glavnim navitjem ( $L_{PFC}$ ) gladilne dušilke. Ob ustreznem načrtovanju sklopljenih dušilk lahko tako dosežemo občutno zmanjšanje valovitosti vhodnega toka, saj del izmenične višjiharmonske komponente toka prevzame kompenzacijsko navitje. Valovitost toka  $i_L$  skozi glavno navitje gladilne dušilke se temu ustrezno zmanjša – teoretično je mogoče valovitost vhodnega toka popolnoma odpraviti.

## 2.2 DC/DC presmernik

Ustrezno galvansko ločitev izhodnega tokokroga od napajalnega omrežja smo zagotovili z dodatnim galvansko ločenim DC/DC presmernikom, ki je priključen na izhodno napetost PFC usmerniškega vezja. Poleg varnega upravljanja naprave (industrijski procesi) nam galvanska ločitev bremenskega tokokroga omogoča modularnost in s tem možnost vzporedne/zaporedne vezave večjega števila modulov. Dodatna vloga DC/DC presmernika je prilagoditev napetostnih nivojev med enosmernim vmesnim tokokrogom ( $U_{PFC} = 400$  V) in bremenskim tokokrogom ( $U_{out,max} = 40$  V). Topologijo DC/DC presmernika kaže slika 6. Zaradi nizkoohmske obremenitve in posledično velikih amplitud bremenskega toka se na polprevodniških stikalih sekundarnega tokokroga sprošča znaten delež moči, kar vpliva na izkoristek napajalne stopnje. Zato smo načrtovanje sekundarnega tokokroga podredili zahtevi po minimalnem številu PN-spojev, ki v danem trenutku prevajajo električni tok, in izbrali topologijo tokovnega podvojevalnega vezja (current doubler) [9]. Sestavljajo ga dve usmerniški diodi D+, D- in dve filtrski dušilki (L+, L-), skozi

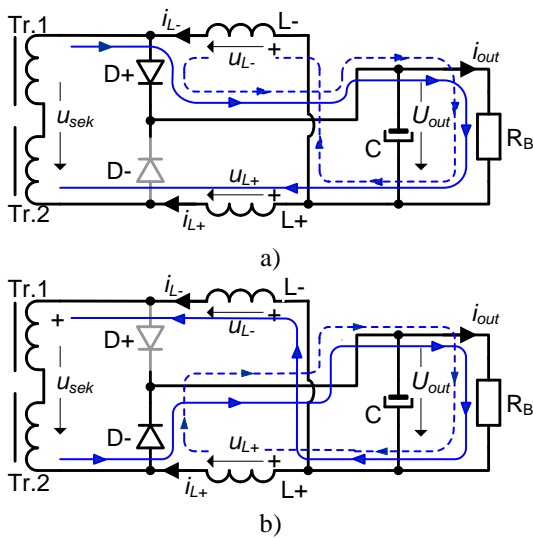
kateri teče polovična vrednost bremenskega toka. Z izbiro sekundarnega vezja se je skrčil tudi nabor primernih topologij primarnega tokokroga, izmed katerih smo se odločili za mostično (full bridge) vezavo.



Slika 6: Predlagana topologija DC/DC presmernika

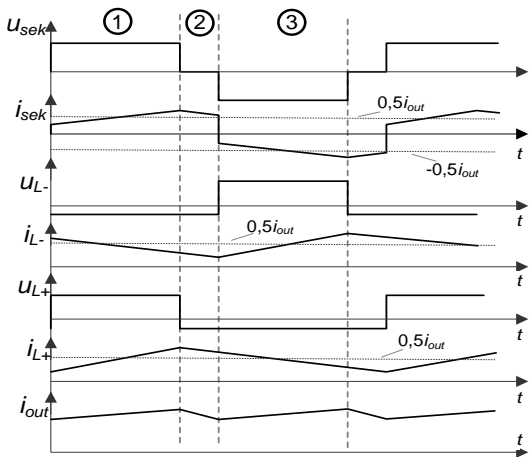
Prednost izbranih (pretvorniških) sklopov je, da ne pogojujeta ločilnega transformatorja s srednjim odcepom, zato je gradnja le-tega manj zahtevna. Uporabili smo identična transformatorja z vzporedno vezanima primarnima navitjema, medtem ko sta njuni sekundarni navitji povezani v serijo. Tako smo dosegli enake magnetne razmere v jedrih, sekundarni navitji pa lahko obravnavamo kot eno samo navitje. Pristop nam med drugim omogoča tudi večjo preneseno moč in ugodnejšo razporeditev elementov v vezju. S prestavo transformatorja imamo možnost ustrezne prilagoditve nivoja izhodne napetosti  $U_{out}$ .

Preden analiziramo delovanje presmernika, ponovno predpostavimo idealizirane elemente vezja in ustaljeno obratovalno stanje. V nadaljevanju bosta sekundarni navitji transformatorja obravnavani kot eno samo navitje. Pri analizi nam bosta v pomoč sliki 7 in 8, ki opisujeta delovanje in karakteristične veličine sekundarnega tokokroga. Preklopni cikel stikal v mostiču je časovno razdeljen na dva aktivna intervala, ki sovpadata s prevajanjem stikal ene od diagonal mostiča, in na kratkotrajen prostotečni interval, ko stikala mostiča niso prožena. Diagonali v mostiču sta proženi izmenično, zato dobimo na primarnih navitjih transformatorjev pravokotno izmenično napetost amplitude  $U_{PFC}$ . Za začetek predpostavimo prevajanje diagonalnih stikal  $Q_A$  in  $Q_D$ , kar ustreza intervalu »1« na sliki 8. V sekundarnem navitju se inducira za prestavo transformatorja nižja pozitivna napetost  $u_{sek}$ , ki požene tok skozi diodo D+, breme  $R_B$  in dušilko L+. Napetost  $u_{L+}$  je pozitivna, zato tok  $i_{L+}$  skozi dušilko enakomerno narašča. Dioda D- je v tem intervalu zaporno polarizirana. Iz prejšnjega intervala nakopičena magnetna energija dušilke L- še naprej vzdržuje tok  $i_{L-}$  skozi breme, ki upada in se zaključuje mimo sekundarnega navitja.



Slika 7: Tokovi v sekundarnem tokokrogu: a) aktivni interval »1«, b) aktivni interval »3«

Skupni bremenski tok ( $i_{out}$ ) je torej enak vsoti tokov skozi posamezno dušilko ( $i_{L+} + i_{L-}$ ), medtem ko teče skozi sekundarno navitje zgolj polovična vrednost tega toka. Sledi prostotečni interval (»2«), ko so iz preventivnih razlogov vsa diagonalna stikala izklopljena. Sekundarna napetost  $u_{sek}$  je enaka nič, kar ustreza prostotečnim razmeram v sekundarnem tokokrogu. Napetost na dušilkah je negativna, zato tokova  $i_{L+}$  in  $i_{L-}$  upadata in se mimo navitja transformatorja zaključujeta skozi diodi in breme.



Slika 8: Karakteristične veličine DC/DC presmernika s tokovnim podvojevalnim vezjem

Ob vklopu stikal nasprotne diagonale mostiča (interval »3«) se na sekundarni strani transformatorja inducira negativna napetost. To povzroči izklop diode D+, dioda D- pa postane prevodno polarizirana. Skozi sekundarno navitje steče negativen tok, ki se zaključuje skozi dušilko L- diodo D- in breme. Amplituda sekundarnega

toka je enaka toku, ki je pred tem tekel skozi dušilko L-. Na dušilki L+ se inducira negativna napetost, ki povzroči upadanje toka  $i_{L+}$  v tokokrogu L+, D- in breme. Strmini tokov v posamezni dušilki ( $i_{L+}$ ,  $i_{L-}$ ) sta si po predznaku nasprotni, zato se valovitost skupnega toka zmanjša glede na valovitost delnih tokov. To je dodatna prednost tokovnega podvojevalnega vezja.

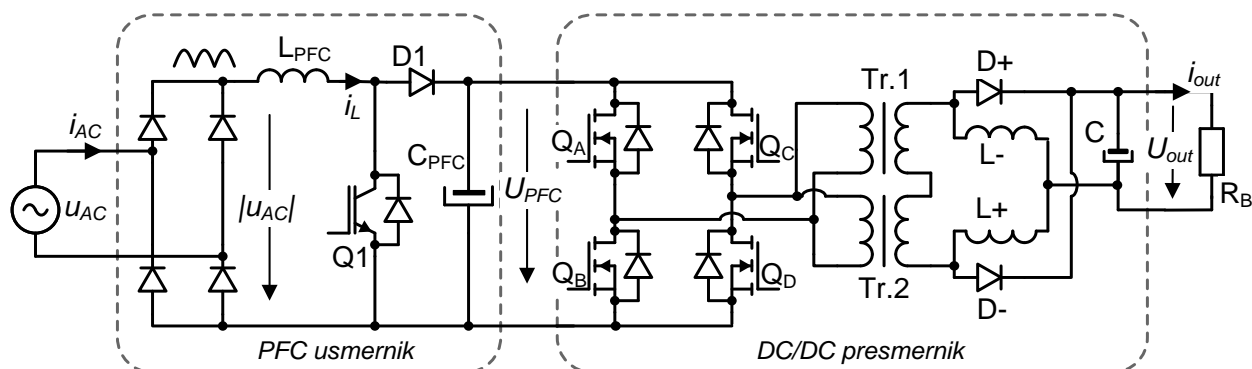
### 2.2.1 Regulacijska shema DC/DC presmernika

Regulacijsko vezje DC/DC presmernika mora poleg konstantne izhodne napetosti zagotoviti enakomerno porazdelitev tokov v izhodnih dušilkah, kot tudi preprečiti enosmerno napetost na primarnih priključnih sponkah. Glede na izbrano mostično topologijo DC/DC presmernika in navedene zahteve smo se odločili za regulacijsko metodo, ki temelji na tokovnem regulacijskem principu (current mode PWM). Zato je regulacijska shema DC/DC presmernika zasnovana kaskadno. V podrejeni tokovni regulacijski zanki je regulacija toka izvedena po metodi vrhnje vrednosti [10], v vlogi regulatorja napetosti pa je uporabljen PI člen. Na trgu je mogoče zaslediti številna namenska integrirana vezja, ki vsebujejo zahtevane sklope za realizacijo »current mode« načina regulacije izhodne napetosti. V našem primeru smo za regulacijo izhodne napetosti DC/DC presmernika uporabili vezje izdelovalca Texas Instruments z oznako UC3856.

Med obratovanjem DC/DC presmernika smo predvideli izrazito impulzni značaj obremenitve z visokimi strminami in velikimi amplitudami bremenskega toka. To se odraža v večjih dinamičnih odstopanjih regulirane napetosti, kar otežuje optimiziranje regulatorjev. Z dodajanjem gladilnih kondenzatorjev na izhodu presmernika smo poleg ugodnejše obremenitve le-teh (izmenična komponenta toka) zmanjšali dinamično napako in posledično »dinamično razbremenili« regulator.

## 3 EKSPERIMENTALNI MODEL NAPAJALNEGA MODULA

V Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko smo izdelali nizkonapetostni napajalni modul z galvansko ločitvijo in enofazno PFC stopnjo (slika 9). Namenjen je napajanju pretvornika za generiranje tokovnih impulzov [11] (elektrokemija), katerih amplituda znaša 300 A (kratkotrajno 600 A), pričakovana napetost na galvanski kopeli pa ne presega 6 V. Iz teh podatkov smo na podlagi ocene izkoristkov posamezne pretvorniške stopnje določili potrebno vhodno moč usmerniškega modula. Ta je skupaj s preostalimi zahtevami PFC usmernika in DC/DC presmernika razvidna iz tabele 1. Magnetne komponente (transformatorja, filterni dušilki) so izdelane iz feritnih jeder z oznako E55/28/21.



Slika 9: Eksperimentalni model predlaganega napajalnega modula

V vlogi polprevodniških stikal so bili uporabljeni MOSFet tranzistorji z oznakami W45NM60 (PFC) oz. STW45NM60 (DC/DC), v sekundarnem tokokrogu pa sta bili uporabljeni diodi z oznako STPS80170. Skupna kapacitivnost na izhodu napajalne stopnje znaša približno 53 mF ( $24 \times 2200 \mu\text{F}$ ).

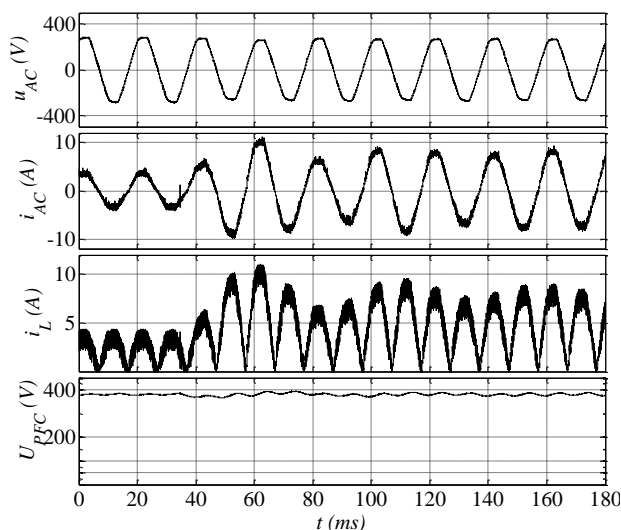
Tabela 1

Priključna moč	$P = 1,6 \text{ kW}$
Nazivna napetost	$U_{AC} = 230 \text{ V}$
Faktor delavnosti	$\cos \varphi > 0,9$
Stikalna frekvenca PFC	$f_{PFC} = 50 \text{ kHz}$
Valovitost vhodnega toka	$\Delta i_{AC} < 2 \text{ A}$
Napetost vmesnega tokokroga	$U_{PFC} = 400 \text{ V}$
Izhodna napetost	$U_{out,max} = 40 \text{ V}$
Izhodni tok	$I_{out,max} = 40 \text{ A}$
Stikalna frekvenca DC/DC	$f_{DC/DC} = 55 \text{ kHz}$

#### 4 MERITVE NA EKSPERIMENTALNEM MODELU

Meritve so bile opravljene ločeno za posamezno pretvorniško stopnjo, z izjemo opazovanja dinamike izhodne napetosti, kjer je bil DC/DC pretvornik napajan iz PFC usmerniškega vezja. V nadaljevanju so predstavljeni eksperimentalni rezultati, ki prikazujejo karakteristične veličine omenjenih sklopov. Rezultati podajajo različna obratovalna stanja, kar nam omogoča natančen vpogled v delovanje posameznih sklopov in kritično presojo primernosti predlagane topologije.

Slika 10 kaže poteke karakterističnih veličin PFC usmerniškega vezja pri skočni obremenitvi. Ta se je v trenutku  $t = 35 \text{ ms}$  skočno povečala s  $500 \text{ W}$  na  $1100 \text{ W}$ , zato je prišlo do odstopanja izhodne napetosti. Regulacijska zanka je nastali pogrešek odpravila v času treh period omrežnega toka. V izhodni napetosti PFC usmerniškega vezja ( $U_{PFC}$ ) je opazna izmenična komponenta ( $100 \text{ Hz}$ ), ki se z obremenitvijo povečuje. V ustaljenem obratovanju lahko iz primerjave oblik vhodne napetosti ( $u_{AC}$ ) in vhodnega toka ( $i_{AC}$ ) sklepamo na visok faktor delavnosti. Vrednost THD faktorja



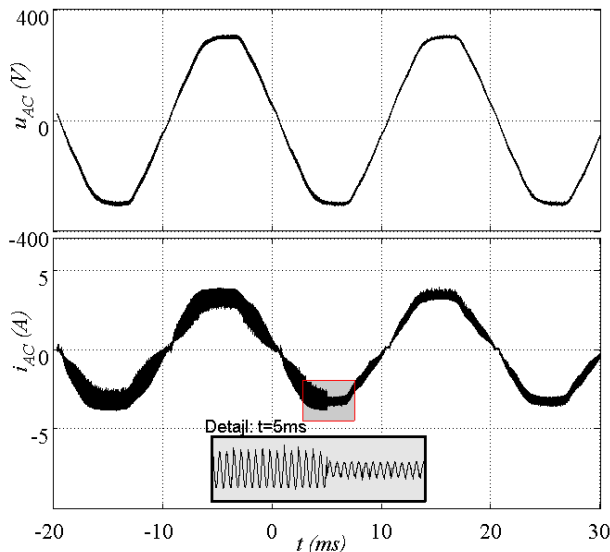
Slika 10: Karakteristične veličine usmerniškega vezja med prehodnim pojavom – skočna obremenitev

vhodnega toka se tako rekoč ni razlikoval od THD vrednosti omrežne napetosti, za katero smo (do dvajsetega harmonika) izmerili  $\text{THD} = 2,89 \%$ .

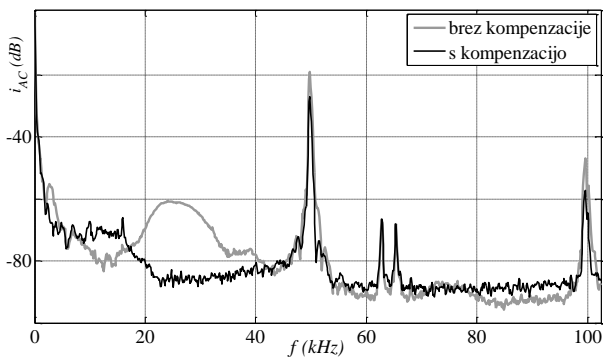
Še bolj nazorno primerjavo vhodnih veličin PFC usmerniškega vezja nam omogoča slika 11, kjer smo med drugim opazovali vpliv delovanja kompenzacijskega vezja na valovitost vhodnega toka. Ta se je v primeru uporabljenega kompenzacijskega vezja preplovala.

Vpliv kompenzacijskega vezja smo ovrednotili tudi s stališča višjiharmonskih komponent, ki jih usmerniško vezje s svojim delovanjem »injicira« v omrežje. Na sliki 12 sta prikazani frekvenčni spektra omrežnega toka brez (svetla sled) in z dodanim (temna sled) kompenzacijskim vezjem. Poleg harmonikov stikalne in večkratnika stikalne frekvence se je do  $-20 \text{ dB}$  zmanjšal delež višjiharmonskih komponent omrežnega toka v celotnem frekvenčnem območju merjenja.





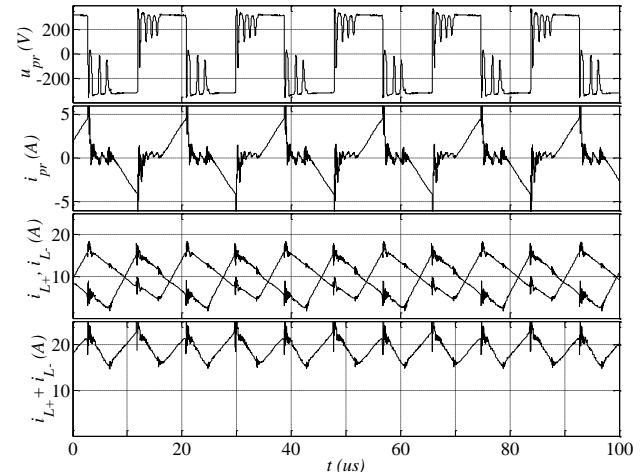
Slika 11: Valovitost vhodnega toka brez kompenzacijskega vezja in z dodanim kompenzacijskim vezjem



Slika 12: Vpliv kompenzacijskega vezja na frekvenčni spekter omrežnega toka

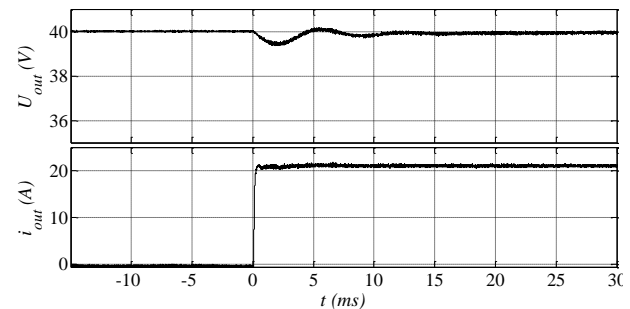
Na sliki 13 so zbrani poteki karakterističnih veličin DC/DC presmernika. Vklonno razmerje stikal v posamezni diagonali je znašalo 35 %. V poteku primarnega toka so vidni intervali obratovanja mostiča znotraj enega preklopnega cikla diagonalnih tranzistorjev. Prvemu aktivnemu intervalu – tok  $i_{pr}$  skozi primarno navitje narašča, sledi prostotečni interval s tokom  $i_{pr} = 0$ , nakar sledi drugi aktivni interval s spremembo smeri in ponovnim naraščanjem primarnega toka. Ob vsakokratnem nastopu prostotečnega intervala – izklop vseh stikal v mostiču – prihaja do prerazporeditve naboja na medelektrodnih kapacitivnostih ( $C_{DS}$ ) posameznih tranzistorjev. To se v kombinaciji s stresanimi in parazitnimi induktivnostmi primarnega tokokroga kaže v oscilacijah napetosti na primarnem navitju, ki ob ponovnem nastopu aktivnega intervala izzvenijo. Pojav na pravilnost delovanja presmernika ne vpliva, kar lahko sklepamo iz simetričnega poteka primarnega toka ( $i_{pr}$ ) in tokov v sekundarnem tokokrogu ( $i_{L+}$ ,  $i_{L-}$ ). Zaradi prepletenosti (faznega zamika) tokov skozi posamezno dušilko se

valovitost skupnega toka na izhodu tokovnega podvojevalnega vezja ( $i_{L+} + i_{L-}$ ) zmanjša. Minimalno razliko v amplitudah toka  $i_{L+}$  in  $i_{L-}$  lahko pripišemo konstrukcijskim odstopanjem dušilk in nesimetriji močnostnih povezav v izhodni stopnji vezja.



Slika 13: Potek karakterističnih veličin DC/DC presmernika

Slika 14 kaže potek izhodne napetosti DC/DC presmernika (dinamiko regulacijske zanke) pri skočni spremembi obremenitve. Izbiro parametrov napetostnega regulatorja DC/DC presmernika smo podredili dinamiki PFC usmerniškega vezja in tako preprečili možnost neželenega vpliva na delovanje omenjenih pretvornikov. Velika izhodna kapacitivnost (53 mF) DC/DC presmernika in ustrezno nastavljeni parametri napetostnega regulatorja so nam omogočili kratke regulacijske čase ob minimalni dinamični napaki regulirane veličine.



Slika 14: Dinamika regulirane napetosti  $U_{out}$  pri skočni obremenitvi napajalnega modula

## 5 SKLEP

V prispevku smo predstavili nizkonapetostni napajalni modul z galvansko ločitvijo in enofazno PFC stopnjo, ki je bil uporabljen v procesnem tokovnem viru za elektrokemijsko bakrenje tiskanih vezij. Vloga napajalnega modula sta poleg zagotavljanja električne energije zahtevanih parametrov tudi ustrezna galvanska ločitev in zagotavljanje ustreznega faktorja delavnosti. Omenjene zahteve smo izpolnili v dveh korakih, zato smo napajalni modul zasnovali dvostopenjsko. Zahteve

direktive EN 61000-3-2 smo izpolnili z vhodno stopnjo, ki jo tvori PFC usmerniško vezje z ustreznim krmiljenjem. Osrednji del vezja je od pretvornika navzgor. Podrobneje smo analizirali njegovo delovanje in podali ključne ugotovitve, ki se nanašajo predvsem na omejeno dinamiko in pulzirajoč pretok energije. Iz meritev, ki smo jih opravili na eksperimentalnem modelu, se je kot smiseln izkazal tudi ukrep zmanjševanja valovitosti vhodnega toka z dodatnim kompenzacijskim vezjem. Pri njem igrata bistveno vlogo načrtovanje in pravilna gradnja magnetno sklopljenih navitij. Za gradnjo druge stopnje napajalnega modula smo uporabili mostično izvedbo pretvornika s pripadajočim visokofrekvenčnim transformatorjem – DC/DC presmernikom. Poleg zahteve po galvanski ločitvi smo izvedbo prilagodili tudi izkoristku presmernika, zato smo v sekundarni tokokrog umestili topologijo tokovnega podvojevalnega vezja. Pravilnost izbire primarne in sekundarne topologije pretvornika se je pokazala že v fazi gradnje presmernika, saj so navitja transformatorja izvedena brez dodatnih odcepov. Ne nazadnje smo pravilnost izbrane topologije potrdili tudi z meritvami na eksperimentalnem modelu. Te smo opravili ločeno za posamezno stopnjo, preverili pa smo tudi skupno delovanje PFC usmerniškega vezja in DC/DC presmernika ter morebitne medsebojne vplive.

## LITERATURA

- [1] W. M. Grady, R. J. Gilleskie, "Harmonics and How They Relate to Power Factor", Proc. Of the EPRI power Quality&Opportunities Conf., Nov. 1993.
- [2] S.S.Varghese, S. George, "Analysis of AC-DC Converter Based on Power Factor and THD", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No 2, Feb. 2013.
- [3] Harmonic Current Emissions Guidelines to the standard EN 61000-3-2, European power supply manufacturers association, Revision date 2010.
- [4] A. Leban, D. Vončina, C. Zevnik, J. Fister "Elektrokemijsko impulzno nanašanje bakra v procesu izdelave tiskanih vezij", *Informacije Midem*, N34, V3, 2004.
- [5] N. Mohan, First Course on Power Electronics and Drives, Minneapolis: Mnpere, 2003.
- [6] K. P. Louganski, "Generalized Average Current Mode Control of Single Phase AC-DC Boost Converters with Power Factor Correction", Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, April, 2007.
- [7] M. Chen, J. Sun, "Feedforward Current Control of Boost Single-Phase PFC Converters", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 21, No. 2, March 2006.
- [8] S. ostrožnik, P. Bajec, P. Zajec, "A study of a Hybrid Filter", *IEEE on Industrial Electronics*, Vol. 57, No.3, March 2010.
- [9] L. Balogh, "The Current-Doubler Rectifier: An Alternative Rectification", Unitrode design note, DN-63, 1999.
- [10] T. Sunito, "Analysis and modeling of peak-current-mode-controlled buck converter in DICM," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 48, no 1, pp 127–135, February, 2001.
- [11] A. Leban, D. Vončina, "Procesni vir za impulzno bakrenje tiskanih vezij", *Elektrotehniški vestnik*, Vol. 75, No. 3, pp.105–110, 2008.

**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.

**Danijel Vončina** je diplomiral leta 1989, magistriral leta 1992 in doktoriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je od leta 2009 redni profesor. Njegovo pedagoško in raziskovalno delo vključuje področja energetske elektronike, regulacijske tehnike, informacijske elektronike, materialov v elektrotehniko in področje gorivnih ter elektroliznih celic.

**Peter Zajec** je diplomiral leta 1994, magistriral leta 1997 in leta 1999 zagovarjal doktorsko disertacijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je zdaj zaposlen kot izredni profesor. Težišče njegovega raziskovalnega dela je na področju statičnih pretvornikov in pripadajočih merilnih senzorjev in sistemov.