

**TOK SNAGE IZMEĐU KANALA IZOLOVANOG VIŠEKANALNOG PRETVARAČA
CHANNEL POWER EXCHANGE IN ISOLATED MULTIPOINT CONVERTERS**Vukašin Bukvić, Ivan Todorović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – Rad se bavi naprednim pretvaračima energetske elektronike, koji će predstavljati značajnu gradivnu jedinicu modernih elektroenergetskih sistema. Višekanalni jednosmerni pretvarači omogućavaju jednostavnu integraciju više izvora električne energije, skladišnih sistema i potrošača. Ovi pretvarači, realizovani sa galvanskom izolacijom, pružaju i druge značajne funkcionalnosti (povećana sigurnost i pouzdanost). U radu je prikazan detaljan analitički postupak dobijanja opšte formule za razmenu snage između bilo koja dva kanala pretvarača. Ovaj izraz je od velike važnosti kako za razumevanje rada pretvarača, tako i za razvoj upravljačkih struktura, koje upravljaju tokom snage u pretvaraču, a samim tim i tokom snage u sistemu kojem pretvarač pripada.

Ključne reči: *Obnovljivi izvori energije, višekanalni pretvarači, tok snage*

Abstract *The paper deals with advanced power electronics converters, which will represent a significant building block of modern power systems. Multipoint dc-dc converters enable the simple integration of multiple energy sources, storage systems, and consumers. These converters, implemented with galvanic isolation, also provide other important functionalities (increased safety and reliability). The paper presents a detailed analytical procedure for deriving a general formula for power exchange between any two channels of the converter. This expression is of great importance both for understanding the operation of the converter and for the development of control structures, which manage the power flow in the converter and consequently the power flow in the system to which the converter belongs.*

Keywords: *Renewable sources of energy, multipoint converters, power flow*

1. UVOD

Konvencionalne distributivne elektroenergetske mreže, koje napajaju električnom energijom veliki broj potrošača i služe kao glavna energetska infrastruktura, čime se u velikoj meri omogućava svakodnevni život ljudi, prilikom rada moraju da obezbede stabilnosti napajanja, pouzdanost i robusnost (na spoljašnje čimioce u vidu vremenskih prilika ili prirodnih katastrofa) u radu [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Ivan Todorović, vanr. prof.

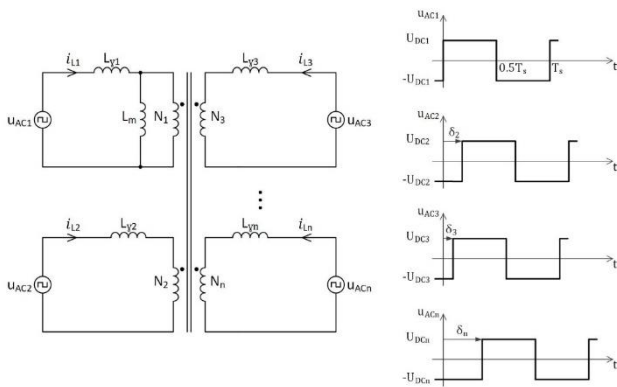
U svrhu smanjenja emisije štetnih gasova i energetske održivosti, u sve većoj meri koriste se obnovljivi izvori energije i energetska skladišta, te se ovi sistemi integrišu u već postojeće elektroenergetske mreže. Kako obnovljive izvore energije karakterišu brze i stalne promene u količini proizvodnje električne energije usled uticaja vremenskih prilika (količina vetra, vode, osvetljaja, itd.), javljaju se novi tehnički problemi balansiranja proizvodnje i potrošnje i regulacije napona na mestima na kojima su priključeni pomenuti izvori. Višak snage predstavlja velik problem sa kojim se konvencionalna mreža bori tako što smanjuje proizvodnju električne energije. Međutim, tada se ne koristi pun potencijal elektrane, u smislu moguće maksimalne proizvedene energije, te se u neku ruku ona može smatrati izgubljenom.

Sa razvojem obnovljivih izvora energije, došao je i razvoj novih konfiguracija pretvarača energetske elektronike. Većina novoistraženih izvora i energetske skladišta su po prirodi jednosmerna, što DC mreže malih ili velikih razmera postavlja na visoko mesto kandidata za buduću arhitekturu elektroenergetskih distributivnih mreža. Fleksibilnost i jednostavnost primene komponenata energetske elektronike, kao i korišćenje odgovarajućih postojećih naprednih zaštitnih tehnologija, predstavlja osnovne razloge koji favorizuju sve učestalije korišćenje modernih mreža [2].

Čitav niz pretvarača je predložen za integraciju obnovljivih izvora i skladišnih sistema u poslednjih nekoliko decenija. Jedan od najpoznatijih je dvostrani aktivni most (DAB – *Dual Active Bridge*). Ipak, u svetlu nedostataka koje poseduje (ograničenosti integracionih kapaciteta), u skorije vreme dolazi do razvoja višekanalnih pretvarača energetske elektronike. Veći broj kanala omogućuje raznovrsniji tok snaga između kanala pretvarača, odnosno integrisanih sistema koji su na kanale pretvarača povezani. Sa druge strane, upravljanje se višestruko usložnjava sa povećanjem broja kanala, u poređenju sa relativno jednostavnim upravljanjem kod dvostranog aktivnog mosta. Stoga je sledeće poglavlje posvećeno pravo izvođenju izraza na kojima se bazira upravljanje tokom snage između kanala razmatranog pretvarača.

2. ANALIZA TOKOVA SNAGA

U okviru rada, pristup analizi razmene snaga između kanala započet je pojednostavljenjima vezanim za električno kolo u potpunosti izolovanog višekanalnog pretvarača, a zatim nastavljen izvođenjem izraza za razmenjenu snagu između bilo koja dva kanala višekanalnog pretvarača. Polazeći od poznatih definicionih obrazaca koji opisuju prostiranje struje kroz prigušnicu



Slika 1. Zamenska predstava višekanalnog pretvarača i odzivi napona kanala.

usled nametnutog napona na njenim krajevima, a implementirajući odgovarajuće matematičke operacije, došlo se do konačnog oblika jednačine za proračun razmenjene snage između dva kanala. Rezultat sam po sebi nije od velikog značaja, međutim iskorišćen je za dobijanje uopštene formule kojom se računa snaga razmenjena između proizvoljna dva kanala, a koja će važiti za pretvarač sa arbitrarnim brojem kanala.

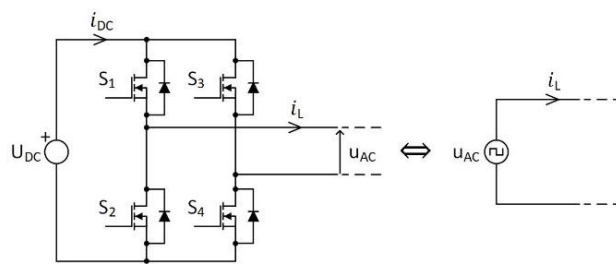
Niz jednačina i šema priloženi su kako bi se oformio što jednostavniji model izolovanog višekanalnog pretvarača. Rezultat jeste pretvarač koji se nalazi u otvorenoj sprezi, a koji upravljanjem faznih pomeraja između generisanih signala na krajevima sprežnih induktivnosti utiče na vrednost razmenjene snage. Daljim razvijanjem kontrolnih struktura moguće je ostvariti zatvorenu povratnu spregu po snazi, odnosno regulaciju snage putem mikrokontrolera, koji utiče na vrednosti faznih pomeraja. Upravljanje tokom snage u zatvorenoj petlji nije dalje razmatrano u radu.

Odabrana je topologija višekanalnog pretvarača prikazana na slici 1. Ostvarenje željenog toka snage između kanala postiže se posredstvom induktivnosti rasipanja namotaja visokofrekventnog transformatora kao medijuma za prenos. Svakom od kanala pripada tranzistorski pretvarač u vidu H-mosta, čiji je zadatak da proizvede impulse napona faktora ispunje 50%, što se i postiže pravougaonom modulacijom, odnosno generisanjem upravljačkih signala za poluprovodničke elemente. Promenom faznog stava napona na izlazu iz pretvarača svakog od kanala, a samim tim i faznog pomeraja između talasnih oblika napona na izlazu iz pretvarača, utiče se na vrednost razmenjene snage između kanala.

2.1. Izvođenje pojednostavljene šeme za analizu tokova snaga

Ako se na svaki H-most primeni pravougaona modulacija, opravdano je iste ekvivalentirati sa idealnim naponskim izvorima signala pravougaonih talasnih oblika (slika 2). Pod pravougaonom modulacijom podrazumeva se upravljanje stanjima prekidača tako da su istovremeno aktivni ili isključeni dijagonalni poluprovodnički uređaji S_1 i S_4 , odnosno S_2 i S_3 i to polovinu prekidačkog perioda. Rezultat jeste generisanje naizmeničnih visokofrekventnih pravougaonih signala naponskih nivoa određenih od strane jednosmernog kola (U_{DC}), koji se dalje nameću krajevima namotaja transformatora.

Na slici 3 prikazan je pojednostavljen u potpunosti izolovan višekanalni pretvarač sa n kanala, gde su



Slika 2. Zamenska predstava H-mosta.

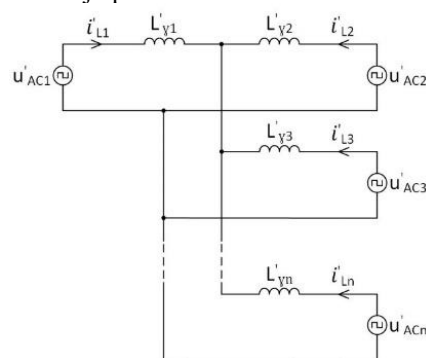
H-mostovi zamenjeni sa idealnim naponskim generatorima pravougaonih signala, a visokofrekventni višenamotajni transformator preko rasipnih induktivnosti namotaja $L_{\gamma 1}, L_{\gamma 2}, L_{\gamma 3}, \dots, L_{\gamma n}$, broja navojaka namotaja $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ i induktivnosti magnetenja L_m . Rezultat pravougaone modulacije jesu priloženi talasni oblici koji polovinu vremena prekidačkog perioda T_s iznose pozitivnu vrednost pripadajućih napona jednosmernog kola ili izvora kanala, dok drugu polovinu trenutna vrednost napona poprima istu apsolutnu vrednost sa promenjenim predznakom. Pored spomenutog, ovim načinom upravljanja stanjima uključenosti prekidača realizuje se i fazni pomeraj između signala generisanih na različitim kanalima čime se postiže željeni kontrolisani tok snage između kanala. Sa δ je označen fazni pomeraj svakog signala, a sa indeksom je označen kanal na koji se taj fazni pomeraj odnosi. Signal koji se generiše na prvom kanalu uzet je kao referentni. Fazni pomeraj bilo kog signala se posmatra u odnosu na uzlaznu ivicu referentnog. Prema tome, δ_1 nije obeležen na slici jer će uvek iznositi nula, dok su redom obeleženi $\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ kao fazni pomeraji generisanih talasnih oblika na drugom, trećem i tako redom do n -tog kanala respektivno. Fazni pomeraji se kreću u opsegu $[-\pi, \pi]$.

U nastavku se ekvivalentna šema pretvarača dodatno pojednostavljuje prebacivanjem veličina i parametara, pomoću odgovarajućih transformacijskih odnosa za svaki od kanala, na primarnu stranu transformatora, čime se eliminišu transformatori iz električnog kola (slika 4). Transformacijski odnosi za transformisanje veličina na primarnu stranu su sledeći:

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2}, n_3 = \frac{N_1}{N_3}, \dots, n_n = \frac{N_1}{N_n}, \quad (1)$$

gde se sa n_2 transformišu veličine i parametri drugog kanala, sa n_3 trećeg, i tako redom sve do veličina i parametara n -tog kanala.

Na osnovu definisanih prenosnih odnosa (1) sada se može pristupiti svođenju parametara i veličina na sledeći način:



Slika 3 Uprošćena šema u izolovanog višekanalnog pretvarača, čiji su parametri i veličine svedene na primar transformatora.

$$L'_{\gamma 2} = n_2^2 L_{\gamma 2}, L'_{\gamma 3} = n_3^2 L_{\gamma 3}, \dots, L'_{\gamma n} = n_n^2 L_{\gamma n},$$

$$u'_{AC2} = n_2 u_{AC2}, u'_{AC3} = n_3 u_{AC3}, \dots, u'_{ACn} = n_n u_{ACn}, \quad (2)$$

$$i'_{L2} = i_{L2}/n_2, i'_{L3} = i_{L3}/n_3, \dots, i'_{Ln} = i_{Ln}/n_n,$$

$$L'_{\gamma 1} = L_{\gamma 1}, u'_{AC1} = u_{AC1}, i'_{L1} = i_{L1},$$

gde su $L'_{\gamma 2}, L'_{\gamma 3}, \dots, L'_{\gamma n}$ induktivnosti rasipanja, $u'_{AC2}, u'_{AC3}, \dots, u'_{ACn}$ naponi idealnih naponskih generatora pravougaonih talasnih oblika i $i'_{L2}, i'_{L3}, \dots, i'_{Ln}$ struje kroz namotaje transformatora svedene na primarnu stranu, dok veličine i parametri na naponskom nivou primara ostaju jednakih vrednosti.

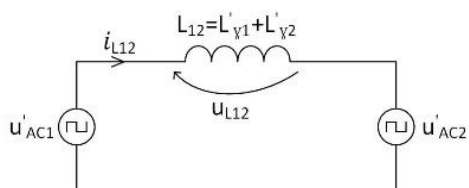
2.2 Razmena snage između dva kanala

Za izvođenje analitičkih izraza za prenos snage u višekanalnom pretvaraču, kao polazna tačka koristi se izraz za dvokanalni pretvarač. Ovakva konfiguracija se postiže tako što se svi kanali osim dva ostave u praznom hodu, čime se unutar višekanalnog izdvoji dvokanalni pretvarač. Bez obzira na to koja dva kanala su odabrana da čine novonastali dvokanalni pretvarač, u nastavku će veličine i parametri koji opisuju prvi biti označeni sa indeksom jedan, dok će oni vezani za drugi biti označeni sa indeksom dva. To znači da sada indeksi neće označavati redni broj originalnih kanala višekanalnog pretvarača, jer je moguće dvokanalni dobiti od bilo koje kombinacije kanala višekanalnog.

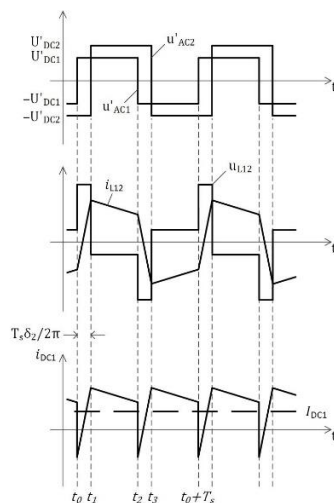
Uprošćeno električno kolo dvokanalnog pretvarača (slika 4), kod koga su sve veličine i parametri svedeni na naponski nivo jednog kanala (što je naznačeno apostrofima) pomoću jednačina (2), se sastoji od dva idealna naponska generatora pravougaonih signala spregnutih putem induktivnosti L_{12} koja predstavlja sumu rasipnih induktivnosti kanala višekanalnog pretvarača koji nisu ostavljeni u praznom hodu. Sada je jasno da sprežna sumarna induktivnost igra glavnu ulogu u prenosu aktivne snage između dva kanala.

Razlika napona $u_{L12} = u'_{AC1} - u'_{AC2}$ diktira talasni oblik struje induktivnosti i_{L12} . Kada pretvarač dostigne stabilno odnosno stacionarno stanje, tada je struja induktivnosti i_{L12} naizmjenična veličina. Kontrolom prekidača mosnog pretvarača na primarnoj i sekundarnoj strani, ova naizmjenična struja se prevodi u jednosmerne struje kanala (struja i_{DC} naznačena na slici 5).

Imajući na umu da pretvarač svakog kanala generiše naponski signal pravougaonog talasnog oblika sa fiksnim faktorom ispunje od 50%, uz uvaženje mogućih različitih naponskih nivoa u jednosmernom kolu svakog kanala i primenom drugog Kirhofovog zakona i definicionog obrasca za struju koja protekne kroz prigušnicu usled nametnutog napona na njenim krajevima, talasni oblik struje kroz rezultantnu sprežnu induktivnost između dva kanala ilustrovan je na slici 5. Prikazani odzivi važe u slučaju kada napon u'_{AC1} prednjači naponu u'_{AC2} za ugao δ_2 .



Slika 4. Uprošćena šema novoformiranog dvokanalnog pretvarača za izučavanje prenosa snage između dva kanala



Slika 5 Idealizovani talasni oblici struja i napona dvokanalnog pretvarača.

U nastavku se pristupa izvođenju analitičkog izraza struje prigušnice, odnosno dobijanju izraza za vrednosti koje struja poseduje u karakterističnim vremenima prekidanja kao i vremenske zavisnosti struje ovisno od odabranog intervala.

$$u'_{AC1}(t) - u'_{AC2}(t) = L_{12} \frac{di_{L12}(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i_{L12}(t) = \frac{u'_{AC1}(t) - u'_{AC2}(t)}{L_{12}}(t - t_i) + i_{L12}(t_i); t_i \leq t \leq t_j;$$

gde su t_i i t_j početno i krajnje vreme posmatranog perioda prekidanja, $i_{L12}(t_i)$ vrednost struje između dva kanala u početnom trenutku datog perioda, L_{12} sprežna induktivnost između dva kanala, $u'_{AC1}(t)$ i $u'_{AC2}(t)$ naponski signali na izlazu pretvarača za oba kanala.

o Za $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$i_{L12}(t) = \frac{U'_{DC1} - U'_{DC2}}{L_{12}}(t - t_1) + i_{L12}(t_1) \quad (4)$$

gde je $t_2 = t_0 + \frac{T_s}{2}$.

o Za $t_2 \leq t \leq t_3$:

$$i_{L12}(t) = \frac{-U'_{DC1} - U'_{DC2}}{L_{12}}(t - t_2) + i_{L12}(t_2) \quad (5)$$

gde je $t_3 = t_2 + \frac{\delta_2 T_s}{2\pi}$.

o Za $t_3 \leq t \leq t_0 + T_s$:

$$i_{L12}(t) = \frac{-U'_{DC1} + U'_{DC2}}{L_{12}}(t - t_3) + i_{L12}(t_3) \quad (6)$$

Zbog simetrije talasnog oblika $i_{L12}(t)$ sledi:

$$i_{L12}(t_2) = i_{L12}\left(t_0 + \frac{T_s}{2}\right) = -i_{L12}(t_0), \quad (7)$$

$$i_{L12}(t_3) = i_{L12}\left(t_1 + \frac{T_s}{2}\right) = -i_{L12}(t_1) \quad (8)$$

Na osnovu izraza (4), (7) i vremena prekidanja sledi:

$$i_{L12}(t_0) = -i_{L12}(t_2) = -\frac{(U'_{DC1} - U'_{DC2})(\pi - \delta_2)}{2\pi L_{12} f_{sw}} - i_{L12}(t_1) \quad (9)$$

gde je $f_{sw} = 1/T_s$ prekidačka frekvencija pretvarača. Na osnovu relacija (5), (8) i vremena prekidanja sledi:

$$i_{L_{12}}(t_1) = -i_{L_{12}}(t_3) = \frac{U'_{DC1} + U'_{DC2}}{2\pi L_{12} f_{sw}} \delta_2 - i_{L_{12}}(t_2) \quad (10)$$

Sabiranjem jednačina (9) i (10) dobija se:

$$i_{L_{12}}(t_1) = -i_{L_{12}}(t_3) = \frac{(U'_{DC2} - U'_{DC1})\pi + 2U'_{DC1}\delta_2}{4\pi L_{12} f_{sw}} \quad (11)$$

Zamena (11) u (9) rezultuje u:

$$i_{L_{12}}(t_0) = -i_{L_{12}}(t_2) = -\frac{(U'_{DC1} - U'_{DC2})\pi + 2U'_{DC2}\delta_2}{4\pi L_{12} f_{sw}} \quad (12)$$

Sada se na osnovu dobijenih jednačina konačno može pristupiti izvođenju izraza za razmenjenu snagu između bilo koja dva kanala uz zanemarenje gubitaka pretvarača, počevši od definicionog integrala za pronalaženje srednje vrednosti koji se primenjuje na trenutnu vrednost snage:

$$P_{12} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{DC1}(t) i_{DC1}(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_{DC2}(t) i_{DC2}(t) dt \quad (13)$$

gde je P_{12} srednja snaga koja se razmenjuje između prvog i drugog kanala, $u_{DC}(t)$ trenutna vrednost napona koji se ima na jednosmernoj strani pretvarača u datim granicama i $i_{DC}(t)$ trenutna vrednost struje na jednosmernoj strani.

$$\begin{aligned} P_{12} &= U'_{DC1} \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+T_s} i_{DC1}(t) dt \\ &= U'_{DC1} \frac{2}{T_s} \left(\int_{t_0}^{t_1} i_{L_{12}}(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} i_{L_{12}}(t) dt \right) \\ &= U'_{DC1} \frac{2}{T_s} \frac{U'_{DC2} (2\pi\delta_2 - 2\delta_2^2)}{8\pi^2 L_{12} f_{sw}^2} \\ &= \frac{\delta_2(\pi - \delta_2) U'_{DC1} U'_{DC2}}{2\pi^2 L_{12} f_{sw}} \quad (14) \end{aligned}$$

U prethodnim razmatranjima, smatra se da je fazor napona kojeg generiše prvi kanal poklopljen sa referentnom osom, što rezultuje nultoj faznoj smaknutosti ($\delta_1 = 0$). U opštem slučaju postoji fazna smaknutost oba kanala u odnosu na referentni, te se stoga prirodno nameće nadogradnja izraza (14) na sledeći način:

$$P_{xy} = \frac{(\delta_y - \delta_x)(\pi - |\delta_y - \delta_x|) U'_{DCx} U'_{DCy}}{2\pi^2 L_{xy} f_{sw}} \quad (15)$$

gde su $x, y = 1, 2, 3, \dots, n$; indeksi kanala, a n ukupan broj kanala višekanalnog pretvarača, P_{xy} razmenjena snaga između dva određena kanala, δ_x, δ_y fazni pomeraji naponskih signala na izlazu iz pretvarača kanala x i y respektivno, U'_{DCx}, U'_{DCy} vrednosti napona jednosmernog izvora kanala x i y svedene na primar visokofrekventnog višenamotajnog transformatora, L_{xy} sprežna induktivnost između kanala x i y , f_{sw} frekvencija prekidanja poluprovodničkih elemenata H-mostova.

Jednačina (15) predstavlja konačan opšti izraz za proračun vrednosti razmenjene snage između bilo koja dva kanala u potpunosti izolovanog višekanalnog pretvarača. Na osnovu izraza se stiče uvid na to da isključivo vrednosti faznih pomeraja generisanih napona na izlazu iz pretvarača određuju smer toka snage između kanala, ali i količinu razmenjene snage.

Ovim izrazom se omogućava korišćenje kapaciteta izvora i skladišta električne energije, a spram potreba samog elektroenergetskog sistema na koji pretvarač može biti povezan (jedan kanal pretvarača je povezan na distributivnu mrežu, posredstvom još jednog pretvarača).

Dodatno, kako energija može da se razmenjuje između bilo kojih kanala, omogućen je i nezavisan rad, bez prisustva električne mreže.

3. ZAKLJUČAK

S obzirom na prednosti koje pružaju moderne električne mreže sa integrisanim obnovljivim izvorima i skladišnim sistemima, poželjno je omogućiti njihov stabilan i pouzdan rad. Ovo je moguće ostvariti kroz razvijanje novih topologija pretvarača energetske elektronike i konstruisanje novih sistema za pretvaranje energije. Topologija pretvarača koja iziskuje posebnu pažnju u ovom kontekstu jeste izolovani višekanalni jednosmerni pretvarač. Ovaj pretvarač, uz pravilno razvijenu kontrolu, doprinosi željenom toku snage između priključaka. U radu je pokazano da pravougaono modulirani H-mostovi mogu da generišu smaknute pravougaone talasne oblike na svojim izlazima, kojima se realizuje željena razmena snage. Konkretno, kontrolom faznog pomeraja između pravougaonih signala se utiče na vrednost razmenjene snage i smer toka snage. Izvedena je opšta jednačina za izračunavanje količine razmenjene snage između proizvoljnih kanala, u funkciji faznih pomeraja.

4. LITERATURA

- [1] Y. Kado, D. Shichijo, K. Wada, and K. Iwatsuki, 'Multiport power router and its impact on future smart grids', *Radio Science*, vol. 51, no. 7, pp. 1234–1246, Jul. 2016, doi: 10.1002/2016RS006041.
- [2] Y.-K. Tran and D. Dujic, 'A multiport isolated DC-DC converter', in 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA: IEEE, Mar. 2016, pp. 156–162. doi: 10.1109/APEC.2016.7467867.
- [3] H. Wu, P. Xu, H. Hu, Z. Zhou, and Y. Xing, 'Multiport Converters Based on Integration of Full-Bridge and Bidirectional DC-DC Topologies for Renewable Generation Systems', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 2, pp. 856–869, Feb. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2254096.
- [4] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, 'Family of multiport bidirectional DC-DC converters', *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, vol. 153, no. 3, p. 451, 2006, doi: 10.1049/ip-epa:20050362.
- [5] N. Swaminathan and Y. Cao, 'An Overview of High-Conversion High-Voltage DC-DC Converters for Electrified Aviation Power Distribution System', *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 6, no. 4, pp. 1740–1754, Dec. 2020, doi: 10.1109/TTE.2020.3009152.
- [6] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, 'A Soft-Switched Three-Port Bidirectional Converter for Fuel Cell and Supercapacitor Applications', in *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists, 2005.*, Aachen, Germany: IEEE, 2005, pp. 2487–2493. doi: 10.1109/PESC.2005.1581982.

Kratka biografija:

Vukašin Bukvić rođen je u Novom Sadu 2000. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine, odbranio je 2024.god.

Ivan Todorović radi na Fakultetu tehničkih nauka od 2014. godine. Trenutno je u zvanju vanrednog profesora. Oblast istraživanja su mu pretvarači energetske elektronike.