

# Razvoj fleksibilnog hardvera za trofazni invertor snage 11 kW priključen na mrežu

Nikola Đorđević, Uroš Radoman  
 Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu,  
 Beograd, Srbija  
 djnikola@etf.rs, uradoman@etf.rs

**Sažetak**— U radu je opisana hardverska i softverska realizacija upravljanja trofaznim, 3-level invertorom. Upravljačka štampana ploča poseduje i sistem kratkospojnika, kojima je omogućena hardverska rekonfiguracija u cilju primene različitih metoda upravljanja izlaznom strujom invertora. Na ovaj način je takođe omogućeno da 3-level invertor može da radi i u 2-level modu. U laboratoriji na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu je dugo radeno na razvoju i testiranju različitih algoritama upravljanja solarnim invertorom priključenim na mrežu, a razvoj novog hardvera je vršen sa ciljem proširenja primene invertora da radi kao aktivni filter. Koncept koji je primenjen pri projektovanju i realizaciji invertora omogućava njegovu primenu u istraživačkom radu, kao i za obrazovanje kroz laboratorijske vežbe i samostalni rad studenata Elektrotehničkog fakulteta. Kao kontroler je primenjen savremeni TMS320F28379D Delfino mikrokontroler.

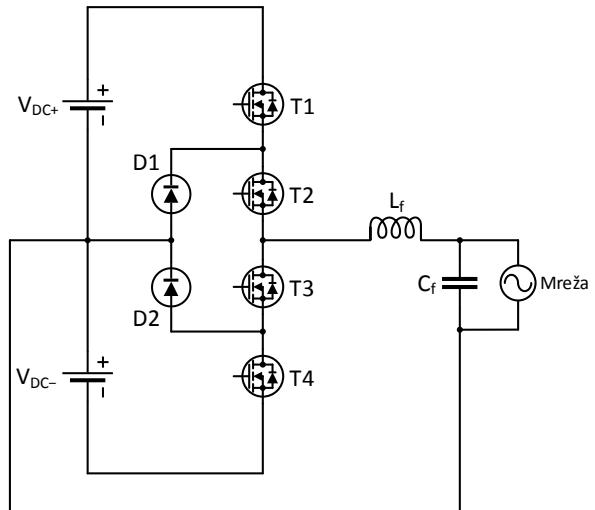
**Ključne riječi:** Trofazni 3-level invertor; Aktivni filter (APF); Mikrokontroler; Upravljanje strujom invertora

## I. UVOD

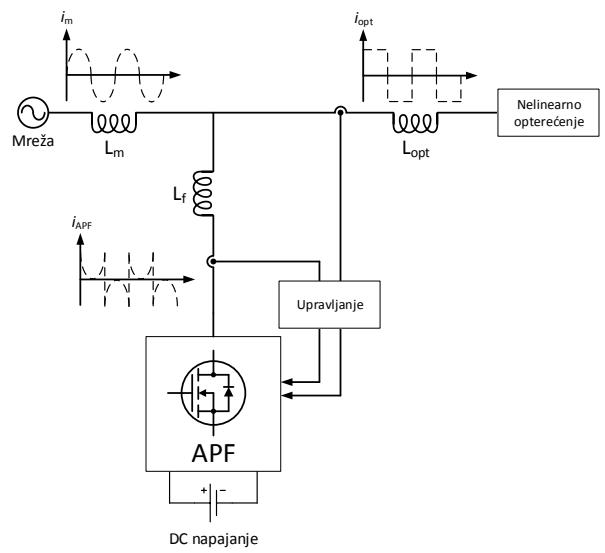
Poslednjih decenija svedoci smo dinamičnog razvoja energetske elektronike – kako savremenih tehnologija u izradi hardverskih komponenti, metoda upravljanja, tako i širenja oblasti primene. Poznavanje i primena savremenih trendova u oblasti energetske elektronike postalo je izuzetno važno za profesionalni i akademski razvoj inženjera iz različitih oblasti elektrotehnike, kako inženjera koji se bave razvojem u ovoj oblasti, tako i inženjera koji primenjuju uređaje energetske elektronike.

Na laboratorijskim vežbama na predmetu Projektovanje fotonaponskih sistema, na master akademskim studijama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, studenti već niz godina imaju prilike da se upoznaju sa upravljanjem invertora priključenog na mrežu. Ovaj rad prikazuje poslednji razvojni korak u laboratoriji, koji je orijentisan na uvođenje unapredene upravljačke ploče za upravljanje trofaznim invertorom. U odnosu na hardver koji je do sada korišćen u nastavi i za istraživanje i razvoj, novi hardver je napravljen tako da se, promenom položaja kratkospojnika može lako i brzo rekonfigurisati u cilju primene različitih metoda upravljanja. Time se dolazi do fleksibilnosti, koja je pogodna kako sa stanovišta obrazovanja studenata, tako i sa stanovišta istraživanja i razvoja. Trofazni invertor se sastoji od tri monofazna 3-level invertora, čija je topologija prikazana na Sl. 1. Planiran je rad na razvoju upravljanja invertorom tako da

može da radi i kao aktivni filter (Sl. 2), odnosno da može da generiše više harmonike struje zadate amplitude i odgovarajućeg faznog stava. Žbog toga je na novoj upravljačkoj ploči bilo važno predvideti dodatna tri senzora za merenje struje opterećenja ( $i_{opt}$ , kao na Sl. 2).



Slika 1. Principijelna šema monofaznog 3-level invertora



Slika 2. Principijelna šema aktivnog filtra

## II. OPŠTE O POSTOJEĆEM I NOVOM HARDVERU

Invertor je trofazni, 3-level NPC (eng. Neutral Point Clamp) snage 11 kW, a principijelna šema jedne faze data je na Sl. 1. Energetski deo hardvera nije menjan u odnosu na postojeću varijantu, čiji se opis može naći u našim prethodnim radovima [1]-[3], kao i u uputstvima postojećih laboratorijskih vežbi na predmetu Projektovanje fotonaponskih sistema [4]. Na postojećoj upravljačkoj ploči je implementiran hardver za upravljanje strujom invertora, isključivo pomoću histerezisnog regulatora struje. Upravljanje vrše TMS320F28027 Piccolo mikrokontroleri sa brzim 10-bitnim komparatorima, i to za svaku fazu posebno. Ova upravljačka ploča je koncipirana tako da su svi mikrokontroleri međusobno sinhronizovani i komuniciraju sa drugim mikrokontrolerima za upravljanje DC-DC ulaznim stepenima i mikrokontrolerom koji vrši globalni nadzor i upravljanje kompletnim „solarnim“ invertorom. Zbog opisane koncepcije globalnog upravljanja, primenjene u solarnim sistemima koji se priključuju na mrežu, ovi invertori se i zovu „solarni“ invertori.

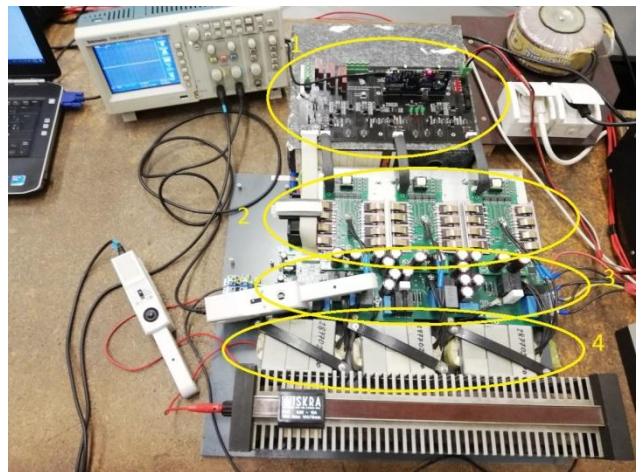
U osnovi, energetski deo hardvera predstavlja klasičan trofazni 3-level invertor, čija će namena, korišćenjem inovirane upravljačke ploče sa novim TMS320F28379D Delfino mikrokontrolerom daleko veće brzine procesora i velikog broja periferija visoke tačnosti, biti opšta, odnosno biće omogućena dalja istraživanja u oblasti kako solarnih sistema, tako i oblasti kvaliteta električne energije (za otočni aktivni filter, čija je principijelna šema data na Sl. 2, a metode upravljanja objašnjene u [5]-[7]), i drugim primenama u elektroenergetici.

U ovom trenutku, testiranje hardvera je u završnoj fazi, u sklopu kojeg su proverene osnovne funkcije mernih kola i periferija mikrokontrolera, nakon čega je testirano histerezisno upravljanje strujom invertora u 2-level i 3-level režimu rada, pri čisto otpornom opterećenju, u kratkom spoju i kada je invertor priključen na mrežu.

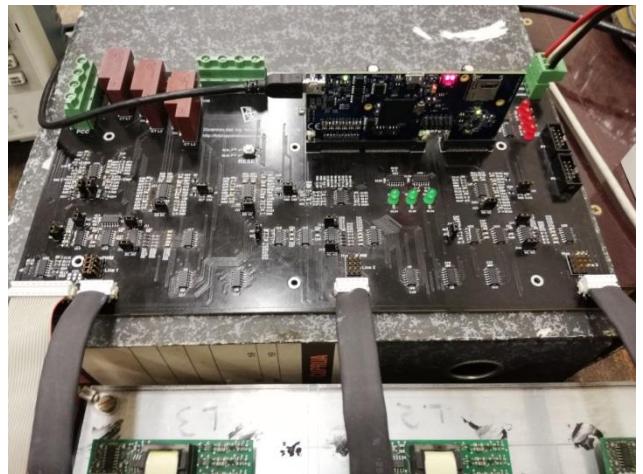
## III. OPIS HARDVERA

Na Sl. 3. naznačene su četiri hardverske celine – inovirana upravljačka ploča sa mikrokontrolerom (1), tri monofazna 3-level invertora (2), glavna energetska ploča (3) i izlazne prigušnice na AC strani invertora (4) (eng. Choke Inductance). Svaki od tri monofazna invertora povezan je sa upravljačkom pločom 10-žilnim flat kablom, preko kojeg se dovode signali na drajvere za uključenje/isključenje MOSFET tranzistora. Glavna energetska ploča služi za snabdevanje ulaza svakog od monofaznih invertora jednosmernim naponima (DC+ i DC-), a na njoj se takođe nalaze i izlazni filtri (LC filtri), releji i strujni senzori za merenje izlazne struje svake od faza invertora. Glavna energetska ploča je povezana sa upravljačkom pločom, preko 20-žilnog flat kabla, preko kojeg se šalju signali sa mernih kola, pomoću kojih se vrednosti naizmeničnih struja i napona svake od tri faze, kao i vrednosti DC napona, skaliraju i prilagođavaju prihvatljivom naponskom opsegu (0 do 3.3V) mikrokontrolera.

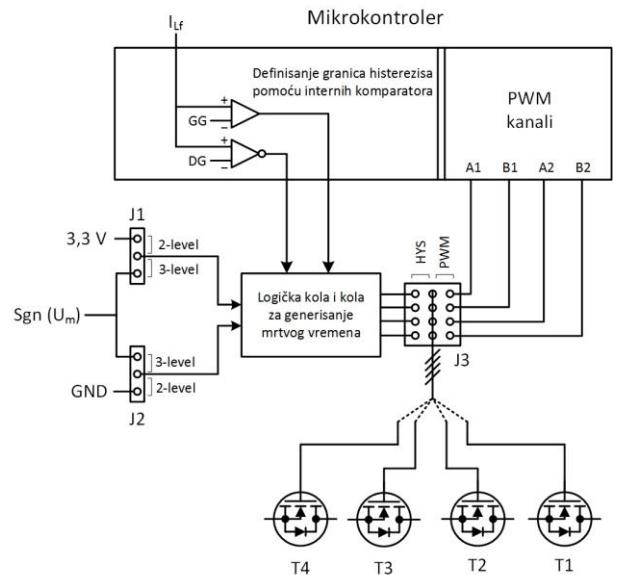
Upravljačka ploča (Sl. 4) na sebi ima ugrađen 180-pinski konektor za karticu sa mikrokontrolerom. Za kompletno upravljanje trofaznim invertorom se koristi 32-bitni Texas Instruments TMS320F28379D Delfino mikrokontroler, sa floating point aritmetikom, i frekvencijom takta procesora od



Slika 3. Hardver trofaznog, 3-level NPC invertora



Slika 4. Nova upravljačka ploča sa mikrokontrolerom



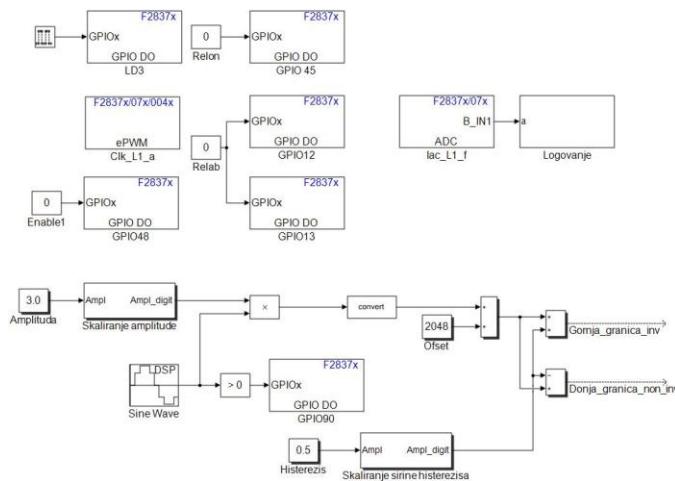
Slika 5. Rekonfiguracija upravljačke ploče pomoću kratkospojnika za jednu fazu invertora

200 MHz [8]. Osim što se radi o procesoru visokih performansi, glavni razlog zbog kojeg je baš on odabran je veliki broj periferija: PWM kanala, A/D konvertora, namenskih 32-bitnih brojača koji rade na frekvenciji rada procesora, velikog broja brzih analognih komparatora (čak 16) sa internim 12-bitnim D/A konvertorima, koji omogućavaju histerezisno upravljanje strujom sve tri faze invertora. Mikrokontroler poseduje dva USB konektora preko kojih je moguće povezivanje sa računarcem (jedan ulaz je galvanski izolovan pomoću optokaplera).

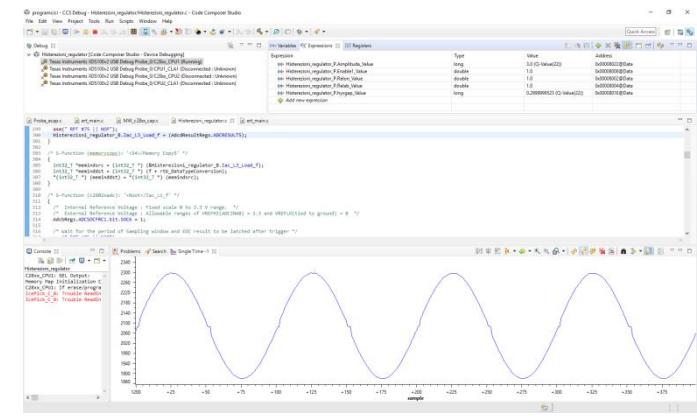
Na upravljačkoj ploči se nalaze kola za napajanje (3,3V i 5V) i generisanje precizne naponske reference (3,3V i 1,65V), kola za prenaponsku i prekostrujuću zaštitu i kola za prilagođenje i filtriranje merenih signala koji se dovode sa glavne energetske ploče. Kao što je prikazano na Sl. 5, kratkospojnicima je moguće lako rekonfigurisati upravljačku ploču za rad sa histerezisnim regulatorom struje ili nekom od metoda upravljanja pomoću PWM-a (na primer Average Current Mode Control (ACMC) ili Peak Current Mode Control (PCMC)), kao i promena režima rada sa 3-level na 2-level. Na Sl. 5 je prikazan princip promene režima rada jednog od monofaznih invertora pomoću sistema kratkospojnika (J1, J2 i J3). Izbor metode upravljanja (HYS / PWM) postiže se prevezivanjem pinova (njih 4) za uključenje/isključenje MOSFET tranzistora pomoću kratkospojnika J3. Pomoću kratkospojnika J1 i J2, u slučaju histerezisne regulacije, vrši se adaptacija ulaznih signala (tačnije, za 3-level se dovodi znak merenog napona, a za 2-level ovaj ulaz nije potreban) u blok logičkih kola koja na izlazu daju signale za uključenje/isključenje MOSFET tranzistora.

#### IV. PROGRAMIRANJE MIKROKONTROLERA

Za programiranje mikrokontrolera korišćen je Code Composer Studio (CCS) v6.2 integrisano razvojno okruženje. Postoji mogućnost automatskog generisanja CCS koda u programskom jeziku C korišćenjem Matlab/Simulinka za koji postoje predefinisane TI biblioteke (Sl. 6), što može značajno ubrzati proces razvoja i testiranja. Tokom rada je utvrđeno da za pojedine periferije ne postoje biblioteke u Simulinku. Zbog toga je iskorišćena opcija da se direktno u CCS editoru pišu delovi koda. Ovo je takođe i način za potencijalnu optimizaciju



Slika 6. Matlab/Simulink model na primeru histerezisne regulacije



Slika 7. Radno okruženje CSS IDE v6.2

koda generisanog iz Matlab/Simulinka. CCS omogućava i posmatranje vremenske promene signala (Sl. 7).

#### V. TESTIRANJE HARDVERA – TEST METODE I REZULTATI

Nakon vizuelne provere veza i kvaliteta lemove ručno zameđenih komponenti, pristupljeno je testiranju upravljačke ploče. Prvo je proveren kvalitet napona za napajanje integrisanih kola (5 V i 3,3 V) i precizne naponske reference (3,3 V i 1,65 V). Zatim su pomoću dva potenciometra na upravljačkoj ploči podešene prenaponska i prekostrujuća zaštita.

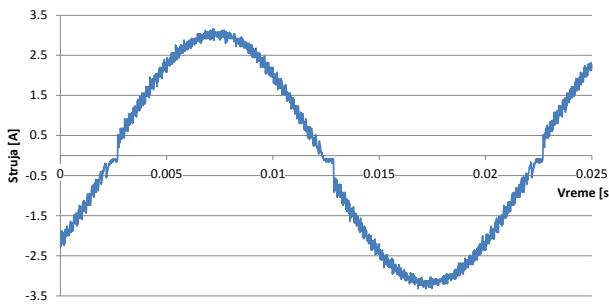
Zatim, upravljačka ploča je povezana sa ostatkom hardvera i testirana su (kalibrirana) merenja DC napona, AC napona i struja invertora (pri sinusnoj impulsno širinskoj modulaciji u otvorenoj sprezi, sa čisto otpornim opterećenjem na izlazu jedne faze invertora). Jednosmerni napon je doveden sa laboratorijskog dvokanalnog DC napajanja, koje u sebi ima ugrađenu prekostrujuću zaštitu.

Nakon što su primećene greške otklonjene i navedeni testovi uspešno obavljeni, invertor je pušten u rad u zatvorenoj povratnoj sprezi, odnosno primenjeno je histerezisno upravljanje strujom invertora u 2-level i 3-level režimu rada, pri čisto otpornom opterećenju (kao opterećenje je poslužio promenljivi otpornik maksimalne otpornosti  $3 \Omega$ ). Testovi su vršeni tako što je otpornik priključivan na jednu fazu invertora. Histerezisno upravljanje je vršeno u varijanti sa konstantnom širinom histerezisa.

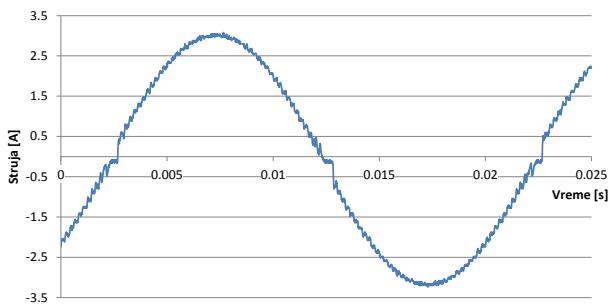
Za merenje nefiltrirane (kroz  $L_f$ ) i filtrirane struje invertora (kroz opterećenje, posle LC filtra) su korišćene strujne sonde čiji je propusni opseg 100 kHz (kao na Sl. 3).

Na Sl. 8. prikazani su (a) struja invertora, (b) struja opterećenja u 3-level režimu rada, sa histerezisnim upravljanjem strujom, pri zadatoj amplitudi od 3 A i širini histerezisa od 0,6 A, sa otpornim opterećenjem od  $3 \Omega$ .

Na Sl. 9 je prikazan frekvencijski spektar viših harmonika struje invertora i struje opterećenja, pri čemu date vrednosti predstavljaju procentualne vrednosti u odnosu na osnovni harmonik.

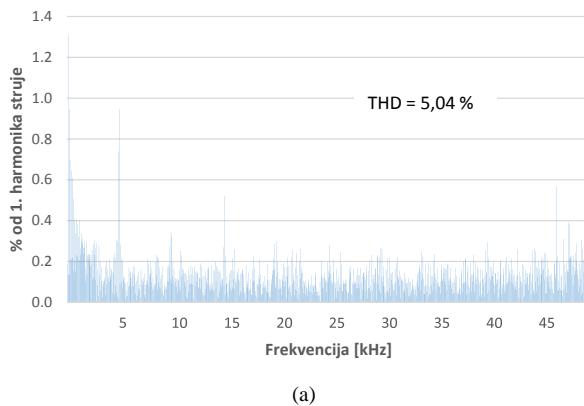


(a)

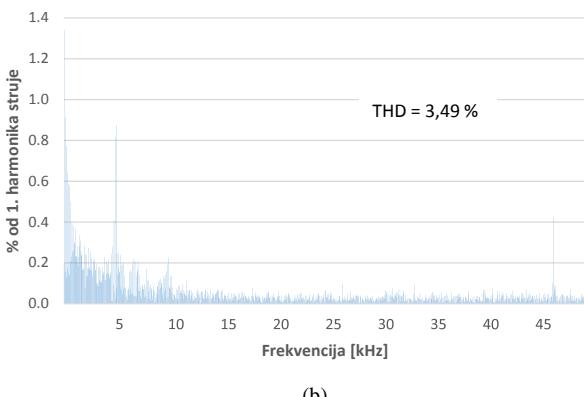


(b)

Slika 8. Struja invertora (a) i struja opterećenja (b) pri zadatoj amplitudi od 3 A i širini histerezisa od 0,6 A, pri otpornom opterećenju od  $3 \Omega$  u 3-level režimu rada

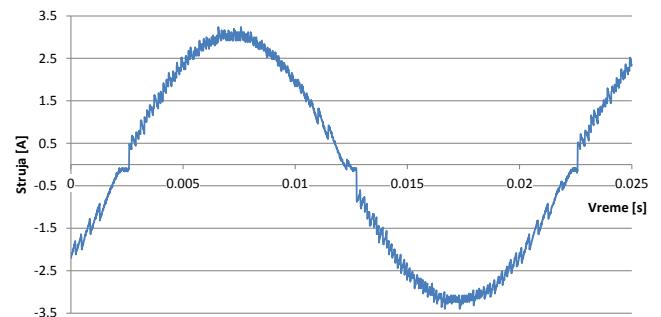


(a)

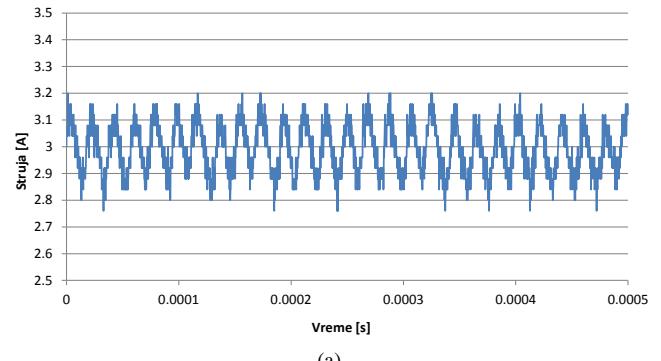


(b)

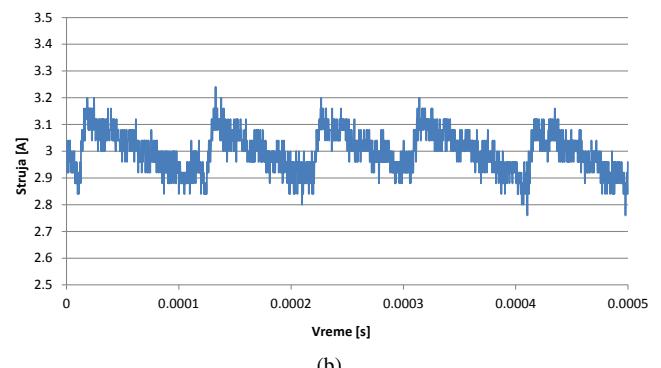
Slika 9. Frekvenčni spektar viših harmonika struje invertora (a) i struje opterećenja (b), pri zadatoj amplitudi od 3 A i širini histerezisa od 0,6 A, pri otpornom opterećenju ( $3 \Omega$ ) u 3-level režimu rada



Slika 10. Struja invertora pri zadatoj amplitudi od 3 A, širini histerezisa od 0,6 A, u režimu kratkog spoja u 3-level režimu rada



(a)



(b)

Slika 11. Struja invertora uveličana oko maksimalne vrednosti, pri amplitudi od 3 A, širini histerezisa od 0,6 A, u 3-level režimu, pri otpornom opterećenju od  $3 \Omega$  (a) i u kratkom spoju (b)

Na Sl. 10 je prikazana struja invertora čiji je izlaz u kratkom spoju (otpornik u položaju minimalnog otpora), u 3-level režimu rada, pri zadatoj amplitudi od 3 A i širinom histerezisa od 0,6 A.

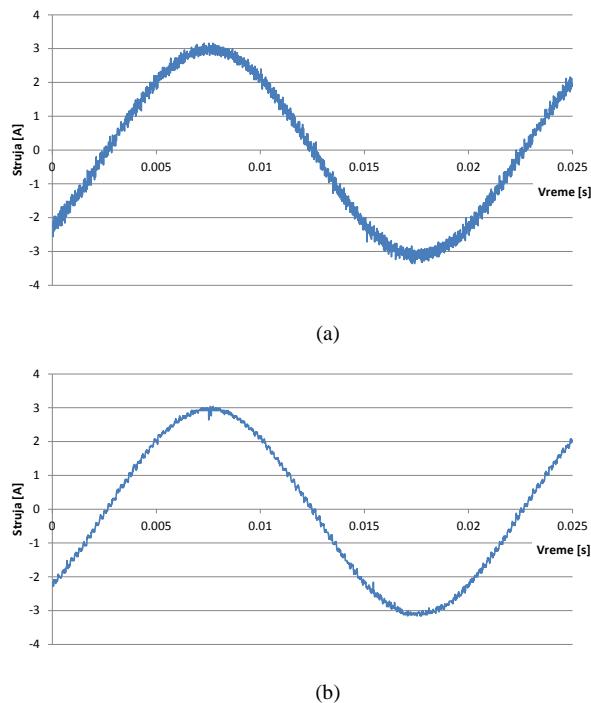
Na Sl. 11 je prikazana struja invertora uveličana oko maksimalne vrednosti, pri zadatoj amplitudi od 3 A, širini histerezisa 0,6 A, za 3-level režim, za slučajeve otpornog opterećenja od  $3 \Omega$  i kratkog spoja. Može se primetiti značajna razlika u frekvenčnosti prekidanja energetskih tranzistora (eng. Switching Frequency) u ova dva režima rada.

Frekvenčnost prekidanja energetskih tranzistora je u slučaju konstantne širine histerezisa promenljiva u toku jedne periode izlaznog AC napona (20 ms). Ona zavisi od ulaznog DC

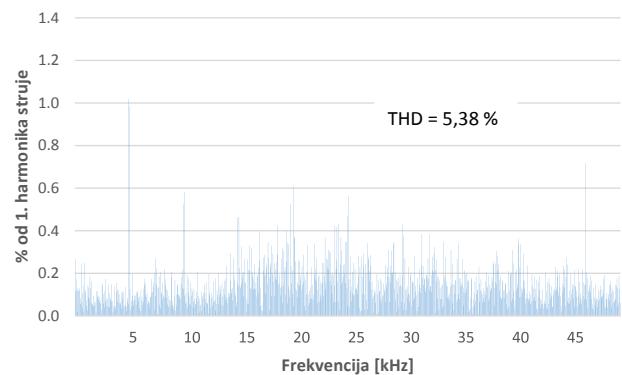
naponu, induktivnosti prigušnice  $L_f$  i izlaznog AC napona. S obzirom da je prilikom testiranja, na AC strani, umesto mrežnog napona korišćen otpornik promenljive otpornosti ( $3 \Omega$  ili kratak spoj), frekvencija prekidanja tranzistora se menja sa promenom otpornosti opterećenja.

Za slučaj 2-level režima rada (u kom su uvek istovremeno uključeni tranzistori T1 i T2, a T3 i T4 isključeni i obratno) na Sl. 12 su prikazani grafici struje invertora i struje opterećenja pri zadatoj amplitudi od 3 A i širini histerezisa od 0,6 A. Sa slike se zaključuje da u ovom slučaju ne postoji malo izobličenje struje oko nulte vrednosti, koje je karakteristično za 3-level režim rada invertora.

Na Sl. 13 prikazan je frekvencijski spektar struje invertora kada invertor radi u 2-level režimu rada. Poredenjem Sl. 9 a) i Sl. 13 može se zaključiti da su u slučaju 2-level režima rada invertora dominantne harmonijske komponente u opsegu viših učestanosti (od 14 do 40 kHz), dok su u 3-level režimu rada invertora dominante harmonijske komponente struje od 0 do 15 kHz, za istu zadatu širinu histerezisa u oba slučaja. Ova činjenica potiče od toga što je u 3-level režimu rada, minimalna frekvencija prekidanja energetskih prekidača teorijski 0 Hz, što se dešava oko nulte vrednosti struje, a što nije slučaj kod 2-level režima rada invertora.



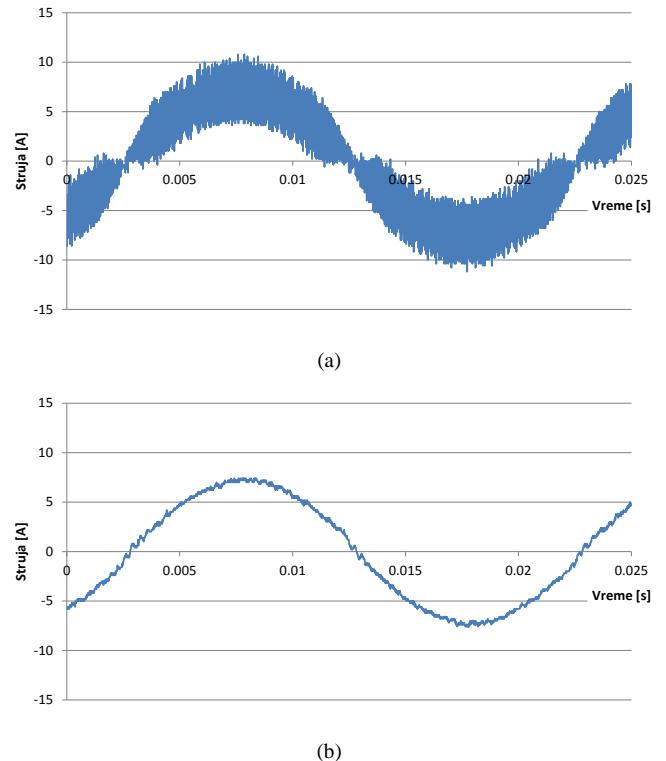
Slika 12. Struja invertora (a) i struja opterećenja (b) pri zadatoj amplitudi od 3 A, širini histerezisa od 0,6 A, pri otpornom opterećenju od  $3 \Omega$  u 2-level režimu rada



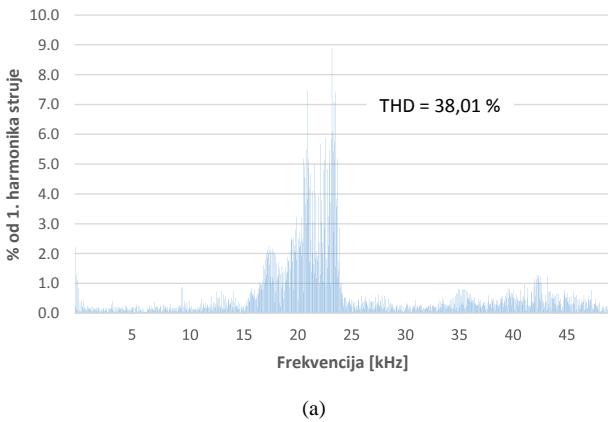
Slika 13. Frekvencijski spektar viših harmonika struje invertora, pri zadatoj amplitudi od 3 A i širini histerezisa od 0,6 A, pri otpornom opterećenju ( $3 \Omega$ ) u 2-level režimu rada

Na kraju, monofazni invertor je spojen na mrežu preko transformatora, prenosnog odnosa 513/220 V/V. Jednosmerni naponi na ulazu invertora su pomoću autotransformatora i ispravljača podešeni na  $\pm 400$  V, efektivna vrednost napona mreže na 180 V, a zadata vrednost amplitude izlazne struje invertora je 7 A. Za upravljanje izlaznom strujom invertora korišćen je histerezinski regulator struje sa promenljivom širinom histerezisa. Širina histerezisa je funkcija merenih napona DC kola i napona mreže, tako da se postiže približno konstantna frekvencija prekidanja MOSFET tranzistora (oko 20 kHz).

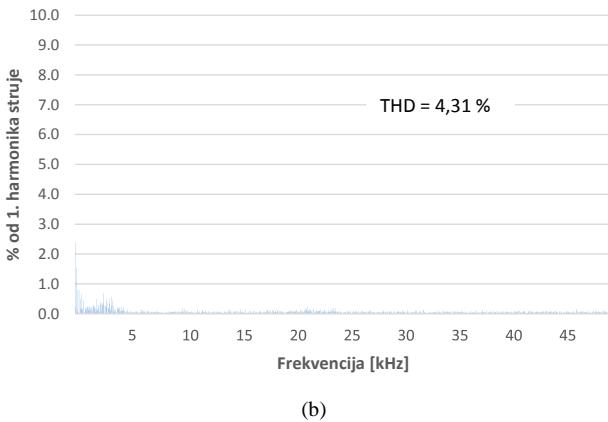
Na Sl. 14 prikazani su talasni oblici izlazne struje invertora i mrežne struje, a na Sl. 15 njihov frekvencijski spektar.



Slika 14. Struja invertora (a) i struja mreže (b) pri zadatoj amplitudi od 7 A i promenljivoj širini histerezisa ( $f_{sw} \approx 20$  kHz) u 3-level režimu rada



(a)



(b)

Slika 15. Frekvenčijski spektar viših harmonika struje invertora (a) i struje mreže (b), pri zadatoj amplitudi od 7 A i promenljivoj širini histerezisa ( $f_{sw} \approx 20 \text{ kHz}$ ) u 3-level režimu rada

## VI. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani osnovni koraci u razvoju fleksibilnog hardvera za upravljanje trofaznim, 3-level invertorom, snage 11 kW. Pomenute su mogućnosti različitih metoda upravljanja, kao i rezultati testiranja histerezisnog regulatora struje. Hardver koji je opisan u radu je razvijen na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, za potrebe nastave i istraživanja.

Autori, osim zadovoljstva što su učestvovali u procesu razvoja specijalnog hardvera, na osnovu dosadašnjih pozitivnih iskustava, izražavaju želju i nadu da će unapređena verzija hardvera u odnosu na onaj na kom su do sada razvijani algoritmi upravljanja solarnim invertorom doprineti daljem razvoju u ovoj oblasti, kao i novim dostignućima u oblasti aktivnih filtera, što predstavlja oblast planiranih daljih istraživanja. Značajan cilj je da se studentima Energetskog odseka Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu pruži mogućnost boljeg obrazovanja i samostalnog rada (kroz realizaciju različitih načina upravljanja pretvaračem) na Katedri za energetske pretvarače i pogone.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao deo istraživanja na projektu TR33024 podržanom od Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori se zahvaljuju docentu Milanu Bebiću i profesoru Zoranu Radakoviću za stručnu pomoć i podršku u toku ovih istraživanja i pisanja rada.

## LITERATURA

- [1] N. Đorđević, Z. Radaković, "Digitalna kontrola paralelnog rada invertora primenom Interleaving algoritma i histerezisnog regulatora struje," XVII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2018, pp. 27-32.
- [2] N. Đorđević, S. Srdić, Z. Radaković, "Realizacija detekcije ispada elektroistributivne mreže u sklopu digitalnog upravljanja solarnim invertorom," TEHNIKA - ELEKTROTEHNIKA, No. 5/2013, Oktobar 2013, pp. 910-916.
- [3] N. Đorđević, M. Kozomara, Z. Radaković, "Hardverska i softverska realizacija metode za detekciju ispada mreže na koju je priključen solarni inverter," 31. savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, Maj 2013.
- [4] <http://fotonaponskisistemi.etf.bg.ac.rs/>
- [5] C.-S. Lam, M.-C. Wong, Design and control of hybrid active power filters, Springer, 2014.
- [6] L. Wang, M.-C. Wong, C.-S. Lam, Adaptive Hybrid Active Power Filters, Springer, 2019.
- [7] A. Emadi, A. Nasiri, S.B. Bekiarov, Uninterruptible Power Supplies and Active Filters, CRC Press, 2005.
- [8] O. Vodyakho, C. C. Mi, "Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter in Three-Phase Three-Wire and Four-Wire Systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 5, pp. 1350-1363, May 2009.
- [9] <http://www.ti.com/product/TMS320F28379D>

## ABSTRACT

In the paper, the hardware and software realization of the three-phase, 3-level inverter control are described. The control board includes a jumper system, which provides possibility for the hardware reconfiguration enabling the application of different output inverter current control methods. The jumper system also enables that the 3-level inverter operates in 2-level mode. The laboratory at the Faculty of Electrical Engineering, the University of Belgrade has long-term experience on developing and testing various control algorithms for the network connected solar inverter. The motive for development of new hardware was enabling the application of the inverter as an active power filter. The concept that was applied in the design and implementation of inverter, allows its application in research work, as well as for education through laboratory exercises and independent work of students of the Faculty of Electrical Engineering. The modern TMS320F28379D Delfino microcontroller is used.

## THE DEVELOPMENT OF FLEXIBLE HARDWARE FOR A THREE-PHASE 11 KW NETWORK CONNECTED POWER INVERTER

Nikola Đorđević, Uroš Radoman