

Primena i realizacija Ćukovog DC/DC energetskeg pretvarača u praćenju tačke maksimalne snage solarnog panela

Željko V. Despotović, Boban Đorđević

Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Rezime - U radu je prikazana jedna moguća realizacija sistema solarni panel-Ćukov DC/DC energetski pretvarač sa implementacijom algoritma praćenja tačke maksimalne snage solarnog panela. Solarni panel se odlikuje izrazito nelinearnom I-U karakteristikom, dok se Ćukov DC/DC energetski pretvarač odlikuje širokim opsegom promene ulaznog napona. Iz ovih razloga sprega ova dva podsistema se pokazala kao zadovoljavajuće rešenje u „Off-Grid“ solarnim sistemima napajanja. U radu su predstavljene ključne karakteristike sistema kao i rezultati testiranja dobijeni pri različitim opterećenjima.

Ključne reči - Energetski pretvarač, obnovljivi izvori energije, DC/DC napajanje, Ćuk pretvarač, solarni panel

I UVOD

Porast potreba za električnom energijom je u mnogome uslovljen rastom industrijskog razvoja, a samim tim i porastom populacije. Ovaj oblik energije je jako pogodan, jer se lako može konvertovati u druge oblike (najčešće mehaničku), u zavisnosti od uređaja koji je koriste: u kućni aparati, domaćinstva, velike mašine i industrijska postrojenja. Ova energija se takođe može koristiti za pokretanje električnih motora u vozilima. Na osnovu ovoga može se konstatovati da je moderni svet u stvari usko povezan sa upotrebom električne energije.

Fosilna goriva, pre svega ugalj, su jedan od izvora koji omogućavaju proizvodnju električne energije. Fosilni izvori pružaju stabilnost elektroenergetskom sistemu, ali uz porast količine električne energije koja je potrebna za zadovoljavanje današnjih potreba stanovništva, negativan uticaj ovih izvora energije na okolinu se više postaje dominantan. Dodatno, poznato je da su ovi izvori neobnovljivi, tako da u ne tako dalekoj budućnosti, će biti prisutan scenario u kome dobijanje električne energije iz ovih izvora više neće biti prihvatljiva opcija.

Budućnost čovečanstva povezana je sa optimalnim korišćenjem resursa. Ako govorimo o obnovljivim izvorima energije (OIE), u pitanju je efikasno dobijanje električne energije iz ovih izvora i smanjenje gubitaka pri konverziji.

Solarna energija je, kao jedan od bitnih OIE, jako pogodna zbog brojnih prednosti koje nudi: čist oblik energije, dostupna svima, solarni paneli koji pretvaraju svetlosnu energiju u električnu rade bez buke i bez emisija, dok je njihovo održavanje jednostavno i što je takođe bitno, njihov životni vek relativno dug.

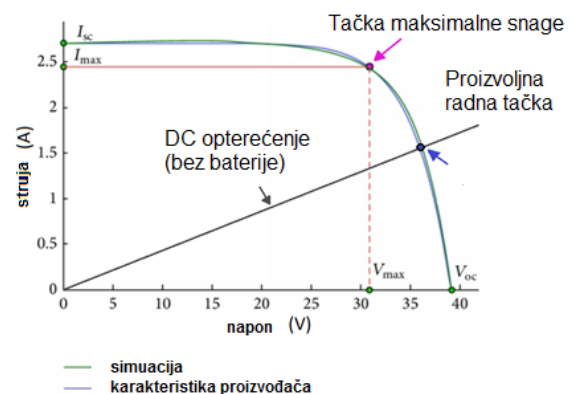
Najveći eksploatacioni problem solarnih panela je njihova efikasnost. Solarni paneli koji su trenutno dostupni imaju

efikasnost između 13 % i 18 %. To je glavni razlog zbog kojeg su potrebni DC/DC energetski pretvarači koji imaju relativno visoku energetske efikasnost, kao i MPPT algoritmi koji bi omogućili maksimalno iskorišćenje snage koju panel može da pruži [1-2]. U suprotnom, bez obzira na to što je solarna energija dostupna svima, što solarni paneli rade bez emisije i buke, investicije u solarne elektrane ne bi bile isplative.

Iz tog razloga je proistekla motivacija za istraživanjem u ovom radu. Tema ovog rada je projektovanje uređaja koji ima dovoljno visoku energetske efikasnost i koji uz implementaciju odgovarajućeg algoritma praćenja tačke maksimalne snage solarnog panela (tzv. „Maximum Power Point Tracking - MPPT“) može na optimalan način iskoristiti snagu koju solarni panel može da obezbedi.

II EKSPLOATACIONE KARAKTERISTIKE PV PANELA I MPPT ALGORITMI

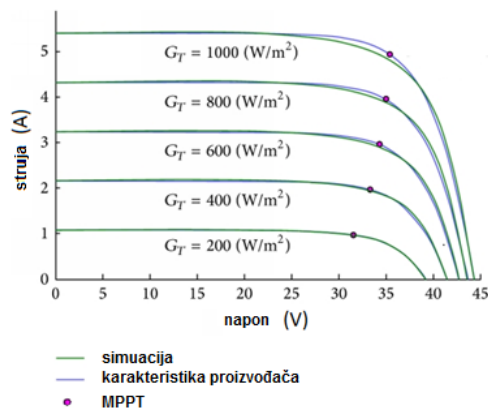
Solarni panel ili niz solarnih panela koji su izloženi sunčevom zračenju odgovarajućeg intenziteta ima strujno-naponsku karakteristiku (I-U) kao što je prikazano na Slici 1. Na grafiku se može uočiti jedinstvena tačka koja se naziva tačkom maksimalne snage, MPP (eng. „Maximum Power Point“). Kada se radna tačka niza panela nalazi u ovoj tački, ili u njenoj neposrednoj blizini, tada sistem radi sa najvećom efikasnošću i isporučuje maksimalnu snagu potrošaču [3-6].



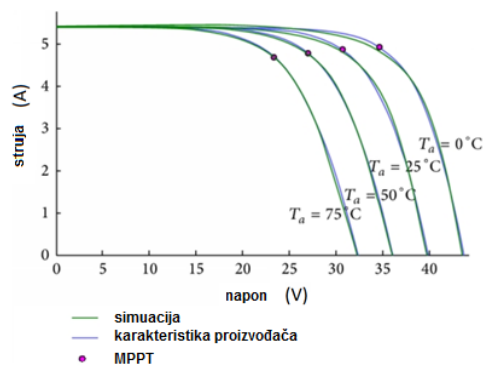
Slika 1. MPPT karakteristika tipičnog PV panela (simulaciona i realna karakteristika)

Ukoliko se na niz solarnih panela direktno poveže opterećenje, radna tačka niza biće u preseku krivih koje predstavljaju karakteristiku niza i karakteristiku opterećenja, kao što je prikazano na Slici 1.

U opštem slučaju, radna tačka niza solarnih panela, u ovakvom sistemu, ne poklapa se sa tačkom maksimalne snage. Posledica ovoga je upotreba dodatnih solarnih panela, ili niza solarnih panela, kako bi se opterećenju isporučila neophodna snaga. Kako bi se izbegli dodatni troškovi, rešenje ovog problema nalazi se u upotrebi energetskog DC/DC pretvarača (MPPT regulatora), koji se postavlja između sistema solarnih panela i opterećenja, a koji obezbeđuju da se radna tačka solarnih panela uvek nalazi u blizini tačke maksimalne snage. Ovi regulatori koriste neki od MPPT algoritama [1-3], kako bi obezbedili efikasno prenošenje snage od panela do opterećenja. Ukoliko se uspešno implementira, MPPT regulator uspeva da približi radnu tačku solarnog panela tački maksimalne snage. Tačka maksimalne snage nije prethodno poznata. Situaciju dodatno komplikuje činjenica da ona zavisi od intenziteta sunčevog zračenja, odnosno insolacije izražene u $[W/m^2]$, kao i od temperature kojima su solarni paneli izloženi. Ove vrednosti se menjaju u toku dana. Dodatno, treba imati u vidu da se pomenute vrednosti menjaju i tokom godine. Tako na primer, u zimskom periodu su temperature niže, a nagibni ugao Zemljine ose je pod drugačijim uglom, te je i intenzitet sunčevog zračenja slabiji. U letnjem periodu su temperature više, nagibni ugao je veći, a i intenzitet sunčevog zračenja je veći.



Slika 2. I-U karakteristike tipičnog PV panela (familija karakteristika u zavisnosti od intenziteta sunčevog $G [W/m^2]$ kao parametra)

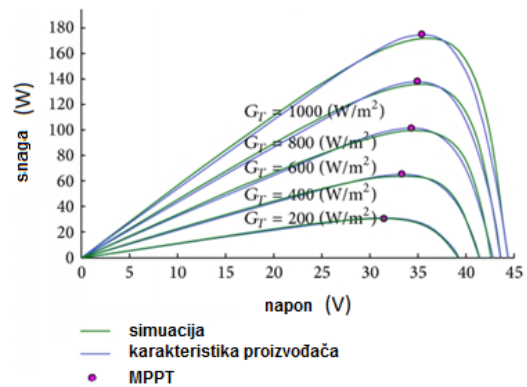


Slika 3. I-U karakteristike tipičnog PV panela (familija karakteristika u zavisnosti od temperature kao parametra)

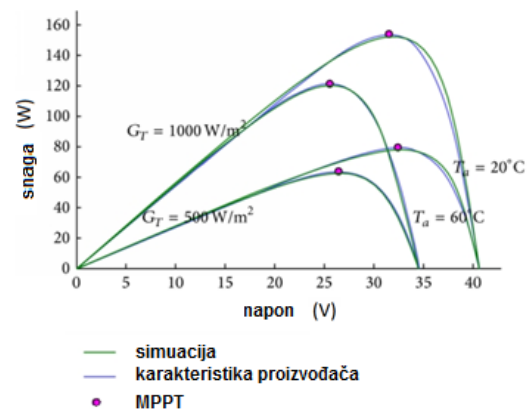
Na Slikama 2 i 3 su prikazane tipične familije I-U karakteristika u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja i temperature,

respektivno. Takođe na ovim familijama su označene MPPT radne tačke.

Na Slikama 4 i 5 su prikazane tipične familije karakteristika snage P/U u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja i temperature, respektivno. Takođe, na ovim familijama su označene MPPT radne tačke. Za praktičnu primenu i implementaciju u DC/DC naponskih i strujnih regulatora od ključnog interesa je karakteristika P/U prikazana na Slici 5.



Slika 4. P/U karakteristike tipičnog PV panela (u zavisnosti od intenziteta $G [W/m^2]$ kao parametra)



Slika 5. P/U karakteristike tipičnog PV panela (u zavisnosti od dva parametra: intenziteta i temperature)

Trenutno, postoji nekoliko popularnih i primenljivih MPPT algoritama koji se koriste za praćenje tačke maksimalne snage [7-13]. Zbog implementacije i jednostavnog hardvera koji zahtevaju, u ovom poglavlju su razmatrane sledeće metode:

- „Perturb and Observe“ algoritam (P&O)
- „Incremental conductance“ algoritam (INC)

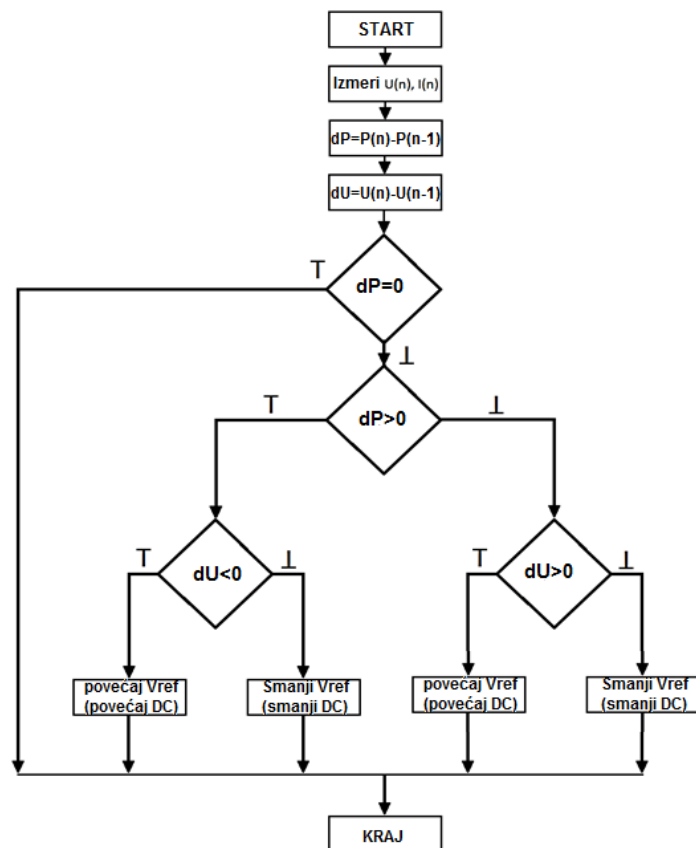
Oba algoritma spadaju u grupu koja određuje MPP tako što se „penju“ uz P/U krivu. Mana navedenih algoritama je to što ove metode ne mogu da uvek da „pogode“ MPP tačku, već krenu da osciluju oko nje. U ovim slučajevima realna MPP tačka vrlo blizu teorijske [14-15].

P&O algoritam se najčešće koristi u praksi zbog jednostavne implementacije. Prema Slici 4 se uočava da različitim intenzitetima sunčevog (pri konstantnoj temperaturi) odgovaraju različite MPP

tačke. Princip rada ovog algoritma u kontekstu primene DC/DC energetskeg pretvarača je sledeći: neka se u početnom stanju trenutna radna tačka na grafiku nalazi levo u odnosu na MPP. U trenutnom stanju, zapamte se vrednosti snage panela $P(n)$ i radnog napona panela $U(n)$. Izvrši se perturbacija radnog napona panela, preko promene referentnog napona, odnosno preko koeficijenta radnog režima („duty cycle“) DC/DC regulatora. U novom stanju, izmeri se trenutna snaga $P(n+1)$ pri novom radnom naponu $U(n+1)$. Na osnovu ovih vrednosti, vrši se proračun promene snage $\Delta P = P(n+1) - P(n)$.

Ukoliko je priraštaj snage pozitivan (znači da se radna tačka panela pomerila ka MPP tački), tada je potrebno obaviti perturbaciju u istom smeru, tako što se nastavlja sa porastom (inkrementiranjem) referentnog napona, odnosno koeficijenta radnog režima pretvarača, tzv. parametra „duty cycle“.

Ukoliko se ustanovi da je priraštaj snage bio negativan, a to znači da se radna tačka panela udaljila od MPPT tačke, tada je u sledećoj iteraciji potrebno promeniti smer perturbacije. Ukoliko je referentni napon, ili „duty cycle“ parametar bio inkrementiran, potrebno ga je smanjiti. Ukoliko je referentni napon ili „duty cycle“ parametar bio dekrementiran, potrebno ga je uvećati. Za konkretnu informaciju o smeru, pored promene snage panela, potrebno je pratiti i promenu radnog napona panela, kao što se vidi na dijagramu toka algoritma, koji je dat na Slici 6 [13].



Slika 6. Principski dijagram toka P&O algoritma

Iako se jednostavno implementira, mane ovog algoritma su ograničenja koja utiču na efikasnost pri pronalaženju MPPT tačke. Prvo takvo ograničenje se može uočiti na karakteristikama sa Slika 4 i 5. Pri manjem intenzitetu sunčevog zračenja,

karakteristika P/U postaje ravnija. Ovo znači da će se za veću promenu radnog napona solarnog panela, detektovati jako mala promena snage panela. Drugo ograničenje potiče od algoritma, jer je jako teško utvrditi da li je „pogođena“ tačka MPP. Umesto toga, doći će do oscilovanja radne tačke oko MPP tačke, uz promenu znaka perturbacije nakon svakog izmerenog priraštaja snage. Ovaj problem je najizraženiji u oblačnim danima, kada se oblaci pomeraju i uzrokuju da se intenzitet svetlosti koja dolazi do panela, neprestano menja.

Jedan predložen dodatak ovom algoritmu bila bi funkcija čekanja, koja bi se aktivirala, ukoliko bi se detektovala uzastopna promena znaka perturbacije, što bi bio indikator da je dostignuta MPP tačka. Ovo bi smanjilo oscilacije oko MPP tačke, ali bi zato usporilo algoritam i dodatno pogoršalo stanje u oblačnim danima.

Drugi predložen dodatak bi bio pamćenje stanja. Potrebno je zapamtiti par (U_1, P_1) , zatim par nakon perturbacije (U_2, P_2) i nakon toga ponovo podesiti radni napon solarnog panela na vrednost U_1 , kako bi se izmerila snaga panela P_x . Poređenjem P_x sa P_1 , se lako može zaključiti da li se menja intenzitet zračenja. Ovo ponovo usporava algoritam, zahteva pamćenje prethodnih stanja i povećava kompleksnost algoritma.

Metod inkrementalne konduktanse (INC) se zasniva na pronalaženju tačke maksimuma krive na osnovu određivanja izvoda karakteristike krive P/U :

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (1)$$

Daljim izvođenjem se dobija:

$$-\frac{I}{U} = \frac{dI}{dU} \quad (2)$$

Izraz sa leve strane jednakosti predstavlja suprotnu po znaku vrednost trenutne konduktanse solarnih panela. Sa desne strane jednakosti, nalazi se inkrementalna konduktansa. U MPP tački, ova dva izraza moraju imati isti intenzitet, samo suprotan znak. Ukoliko se radna tačka sistema ne poklapa sa MPP tačkom, moguće je izvesti set jednačina (3)-(5), koje određuju da li je trenutni radni napon sistema panela iznad ili ispod radnog napona MPP tačke:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} = 0 \right) \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} > 0 \right) \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} < 0 \right) \quad (5)$$

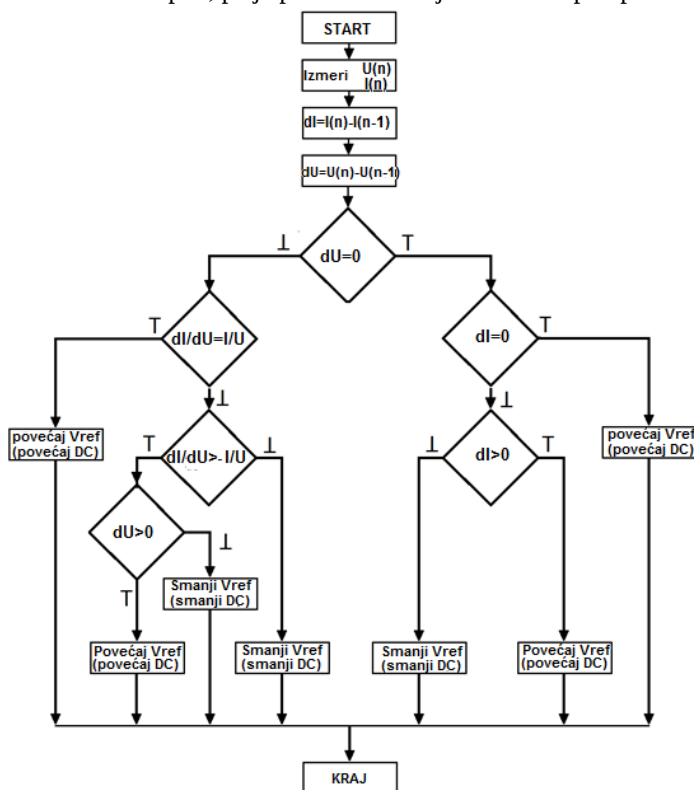
Jednačine (2) i (3)-(5) služe kao pokazatelj kog znaka bi perturbacija trebalo da bude, kako bi se radna tačka sistema pomerila ka MPP tački. Korake je potrebno ponavljati, sve dok jednačina (2) ne bude zadovoljena. Ukoliko se radna tačka poklapa sa MPP tačkom, sistem nastavlja da radi bez perturbacije, sve dok se ne promeni intenzitet sunčevog zračenja, što će izazvati promenu struje panela.

Na osnovu karakteristika na Slici 5, zaključuje se da će povećani intenzitet zračenja imati za posledicu pomeranje MPP tačke u desno. Ovo znači da bi trebalo povećati radni napon panela, kako

bi se pomerili ka MPP tački. Ukoliko se, pak, intenzitet smanji, to će rezultirati pomeranjem MPP tačke u levo, pa će biti potrebno smanjiti radni napon panela [13].

Na Slici 7 je prikazan dijagram toka INC algoritma. Trenutne i prethodne vrednosti struja i napona se koriste pri proračunu dI i dU . Pri ovome mogu nastupiti tri karakteristična slučaja:

- ako su obe promene dI i dU jednake nuli, atmosferski uslovi se nisu promenili i radna tačka je i dalje u MPP tački;
- ako je $dU=0$, a $dI>0$, došlo je do povećanja intenziteta sunčevog zračenja, što rezultira pomeranjem MPP tačke u desno, a samim tim i povećanjem radnog napona panela;
- ako je $dU=0$, a $dI<0$, intenzitet se smanjio, a sa njim i MPP napon, pa je potrebno smanjiti i radni napon panela.



Slika 7. Principski dijagram toka INC algoritma

Ukoliko postoje promene u struji i naponu panela, onda se na osnovu jednačina (4) i (5) može odrediti smer u kome je potrebno napraviti perturbaciju, kako bi se radna tačka približila MPP tački. Ukoliko važi jednačina (4), to znači da je radna tačka sistema sa leve strane MPP tačke, pa je potrebno povećati radni napon sistema panela. Ukoliko važi jednačina (5), radna tačka sistema je sa desne strane MPP tačke, pa je potrebno smanjiti radni napon sistema panela.

Ovo je suštinska prednost INC algoritma u odnosu na P&O algoritam, jer INC algoritam daje tačnu informaciju u kom smeru je potrebno napraviti perturbaciju, kako bi se radna tačka približila MPP tački. Dodatno, INC algoritam, za razliku od P&O algoritma, može da zaključi da se radna tačka sistema nalazi u MPP. Dodatno, u promenljivim atmosferskim uslovima, INC algoritam ne može da ode u pogrešnom smeru, kao što je to slučaj kod P&O algoritma. Iz ovog razloga je ovaj algoritam

usvojen za dalju razradu i praktičnu hardversku i softversku implementaciju u PV sistemu baziranom na Čukovom DC/DC energetsom pretvaraču. U nastavku je da detaljniji opis implementacije ovog pretvarača u solarnom sistemu sa praćenjem tačke maksimalne snage PV panela.

III TEHNIČKI OPIS REALIZOVANOG ENERGETSKOG PRETVARAČA

Topologija DC/DC koja je implementirana u MPPT solarnom sistemu je bazirana na Čukovom DC/DC pretvaraču. Električna šema realizovanog DC/DC pretvarača je data na Slici 8. Energetski pretvarač se sastoji od dva kalema L1A i L1B, od kojih se prvi nalazi na ulazu, a drugi na izlazu energetskog pretvarača, zatim kondenzatora u paralelnoj sprezi CS-IN1...5 koji služe za transfer energije i dva prekidačka elementa, MOSFET tranzistora M i prekidačke ultrabrze diode D.

Pošto se prekidački MOSFET M nalazi u analognom (energetskom) delu kola, potrebno je pobudno (drajversko) kolo, koje će obezbediti galvansku izolaciju između gejt MOSFET prekidača i digitalnog upravljačkog sklopa. U okviru projekta energetskog pretvarača je predviđeno standardno pobudno kolo IR2100 proizvodnje *International Rectifier-IRF* (videti električnu šemu na Slici 11). Ovom kolu je potrebno obezbediti analogno napajanje od 10 V, kako bi se obezbedilo efikasno uključanje i isključenje prekidačkog tranzistora preko PWM porta označenog sa M1PWM na električnoj šemi na Slici 8.

Senzor za merenje intenziteta ulazne i izlazne struje energetskog pretvarača je ACS712 (2 kom.). Ovaj senzor radi na principu Holovog efekta. Dobra osobina ovog senzora je izuzetno niska ulazna otpornost, što omogućava merenje struje, u oba smera, u opsegu $0 \div \pm 20$ A. Na svom izlazu, koji je opet galvanski odvojen od struje koju meri, senzor daje izlazni napon, sa korakom od 100 mV/1A. Pri ulaznoj struji od 0 A, izlaz senzora je 2,5 V. Ukoliko struja raste u pozitivnom smeru, raste i napon na izlazu senzora uz definisani korak, u odnosu na 2,5 V.

Ukoliko struja raste u negativnom smeru, napon na izlazu senzora opada u odnosu na referentnu vrednost od $V_{ref}=2,5$ V. Potrebno je obezbediti napajanje od 5 V za funkcionisanje senzora. Isti tip senzora se nalazi na ulazu i izlazu energetskog pretvarača, kako bi se merile ulazna i izlazna struja. Dodatno, na izlazu pretvarača je predviđeno rele RL1, koje će, ako su ispunjeni odgovarajući uslovi, prespojiti izlaz energetskog pretvarača sa baterijom. Uključivanjem i isključivanjem relea RL1, upravlja mikrokontroler koji upravlja radom pretvarača.

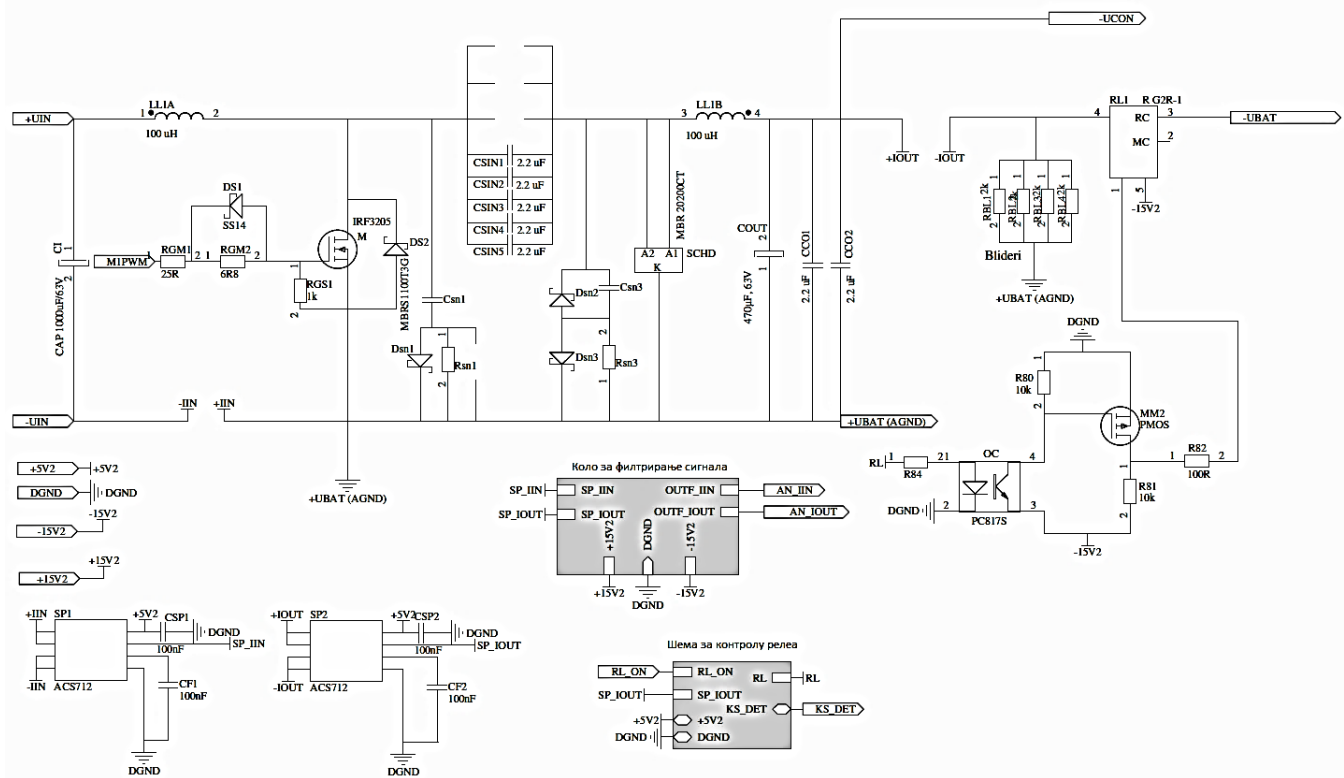
Senzori za merenje struja su zbog svog dizajna obezbeđuju galvansko odvajanje od energetskog dela kola. U okviru kola za filtriranje, izlazi senzora struja se samo propuštaju kroz filtre koji ublažavaju brze promene signala, u odnosu na očekivano sporije promene struja.

Kada su merenja napona u pitanju, svaki od signala „-UCON“, „-UBAT“ i „UIN“ se vodi (preko odgovarajućeg naponskog razdelnika) na izolacioni operacioni pojačavač HCPL7840 (na izlaz svakog HCPL7840 kola se povezuju kola sa operacionim pojačavačima, čija je namena pojačanje signala).

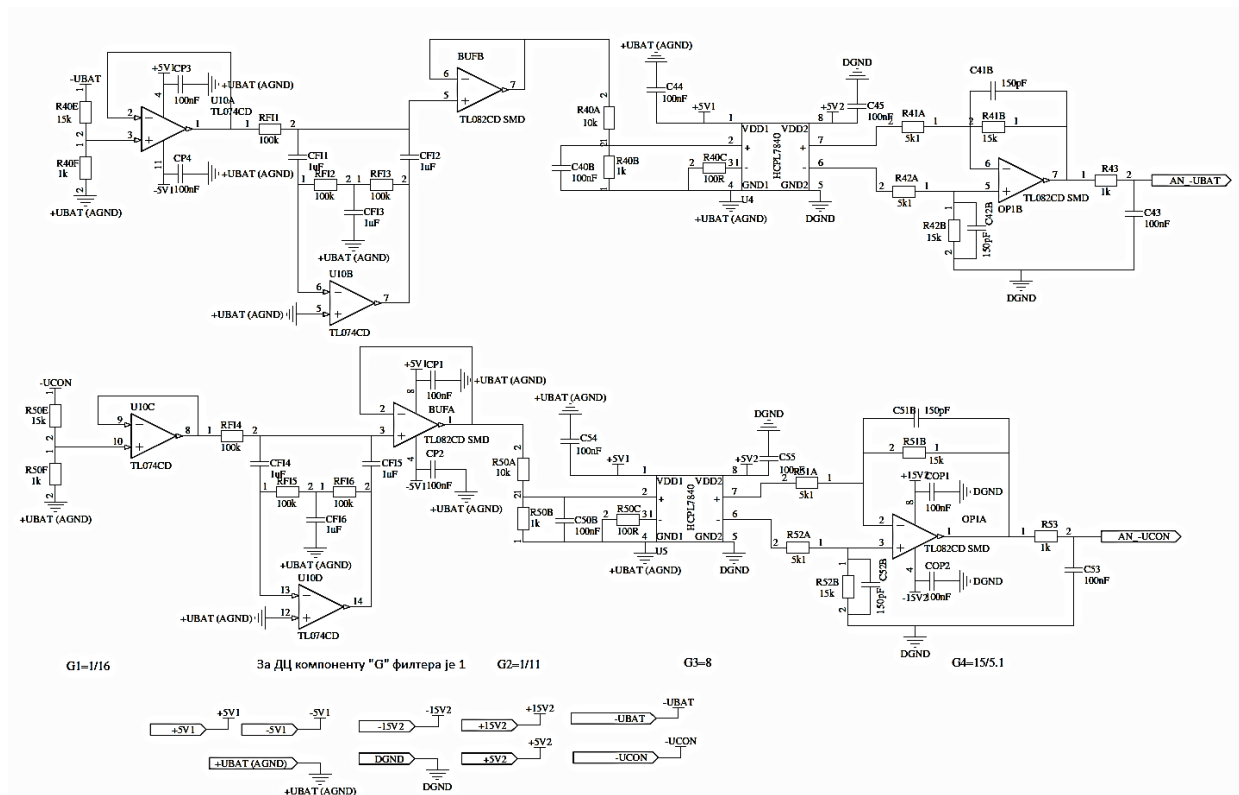
Električna šema mernog kola je data na Slici 9. Ovo kolo galvanski odvaja merene napone od veličina koje će biti njihovi

predstavnicu koji se dalje vode ka ulazima za merenje na mikrokontroleru. Na ovaj način je, uz razdvojeno napajanje,

osigurano potpuno galvanско раздвајanje kola за управљање (digitalni deo) од енергетског kola (analogni deo).

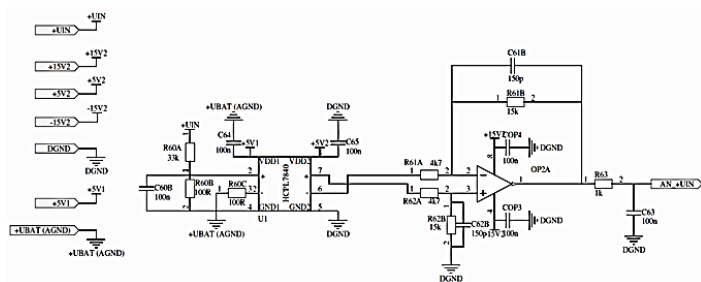


Slika 8. Električna šema realizovanog DC/DC Ćukovog energetskog pretvarača



Slika 9. Električna šema za merenje napona baterije i izlaznog napona

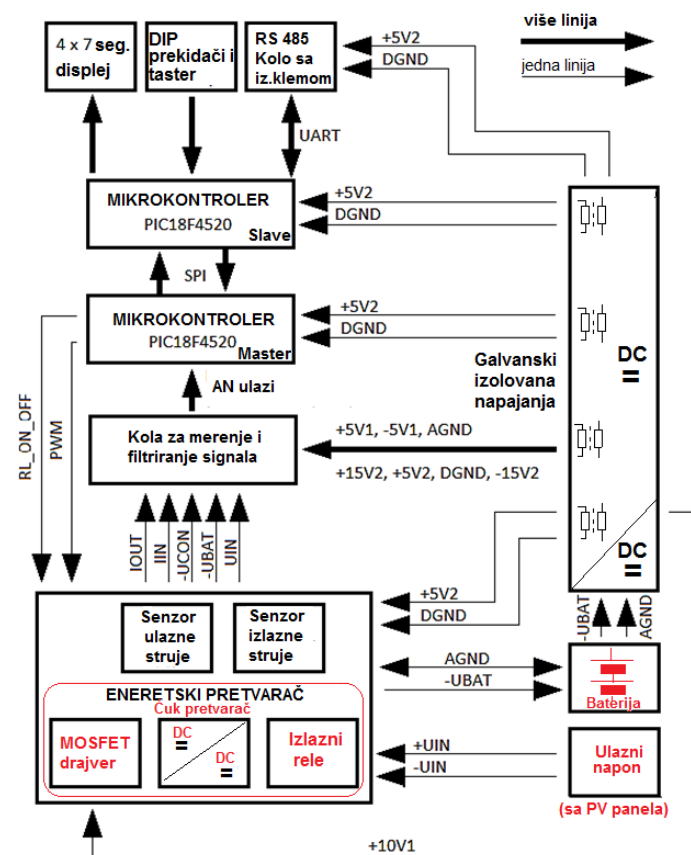
Električna šema koja se koristi kod merenja ulaznog napona energetskog pretvarača je data na Slici 10.



Slika 10. Električna šema za merenje ulaznog napona

IV UPRAVLJAČKI SISTEM

Upravljanje radom celokupnog uređaja realizovano je preko mikrokontrolera PIC18F4520 firme Microchip, u daljem tekstu MASTER kontroler. Konkretni mikrokontroler je izabran zbog jako dobrog odnosa cena/performance, kao i zbog periferija koje poseduje. Blok šema upravljanja sistemom je data na Slici 11. Električna šema mikrokontrolerske ploče i drajverskog dela prekidačkog MOSFET-a je data na Slici 12.



Slika 11. Blok šema upravljačkog dela sistema

Periferije potrebne za realizaciju uređaja su: (1) Analogni ulazi za AD konverziju, (2) PWM izlaz, (3) SPI port, (4) UART port, (5) digitalni ulazno-izlazni portovi. Premda ima samo jedan AD konvertor, ovaj mikrokontroler ima mogućnost multipleksiranja analognih ulaza. Potrebno je samo pri svakom merenju obezbediti informaciju sa kog kanala se prosleđuje signal. Od

moćućih trinaest kanala, upotrebljeno je pet kanala ovog mikrokontrolera

MASTER mikrokontroler ima ugrađene PWM izlaze (impulsno širinska modulacija), čiji je rad automatizovan. Uloga korisnika je da ih podesi pri inicijalizaciji uređaja i da po potrebi (preko odgovarajućeg registra) menja dužinu trajanja impulsa („duty cycle“), preko kojeg se vrši upravljanje.

Dok upravlja radom uređaja, MASTER kontroler povremeno šalje informacije o stanju uređaja SLAVE kontroleru, preko SPI porta. Istovremeno, zbog prirode SPI komunikacije, može da dobija informacije o korigovanju rada.

Dodatni PIC18F4520 mikrokontroler je predviđen kao SLAVE i koristi se za komunikacije sa periferijama. Ideja za ovu primenu je bila da SLAVE kontroler preko SPI porta razmenjuje informacije

sa master kontrolerom i da ih po potrebi može proslediti preko svog UART porta. Na UART slejva povezan je odgovarajući hardver koji omogućuje komunikaciju sa spoljnim svetom realizovanu preko RS-485 intefrejsa, što daje mogućnost za implementaciju MODBUS protokola.

U okviru sistema je predviđen DIP prekidač, kojim se mogu izvršiti podešavanje rada uređaja (da radi kao punjač baterije, ili kao izvor napajanja, uz modifikaciju u kojoj ne postoji rele, pri čemu bi bilo moguće izabrati neke standardne vrednosti napona) koje SLAVE kontroler prosleđuje MASTER kontroleru. Dodatno, predviđeno je i postojanje četiri sedmosegmentna displeja preko kojih se prikazuje neka od merenih veličina, čiji prikaz korisnik tasterom može izabrati.

SLAVE kontroler, sedmosegmentni displeji, taster i prekidači se nalaze na posebnoj „piggy-back“ pločici, koja nije neophodna za rad uređaja. U slučaju izostajanja ove pločice, predviđen je poseban režim rada uređaja u kome bi on samo punio bateriju.

V MERENJA I LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

U ovom poglavlju su dati rezultati testiranja efikasnosti energetskog pretvarača i verifikacija implementiranog P&O algoritma. Pri ovim testovima je korišćena sledeća merna oprema:

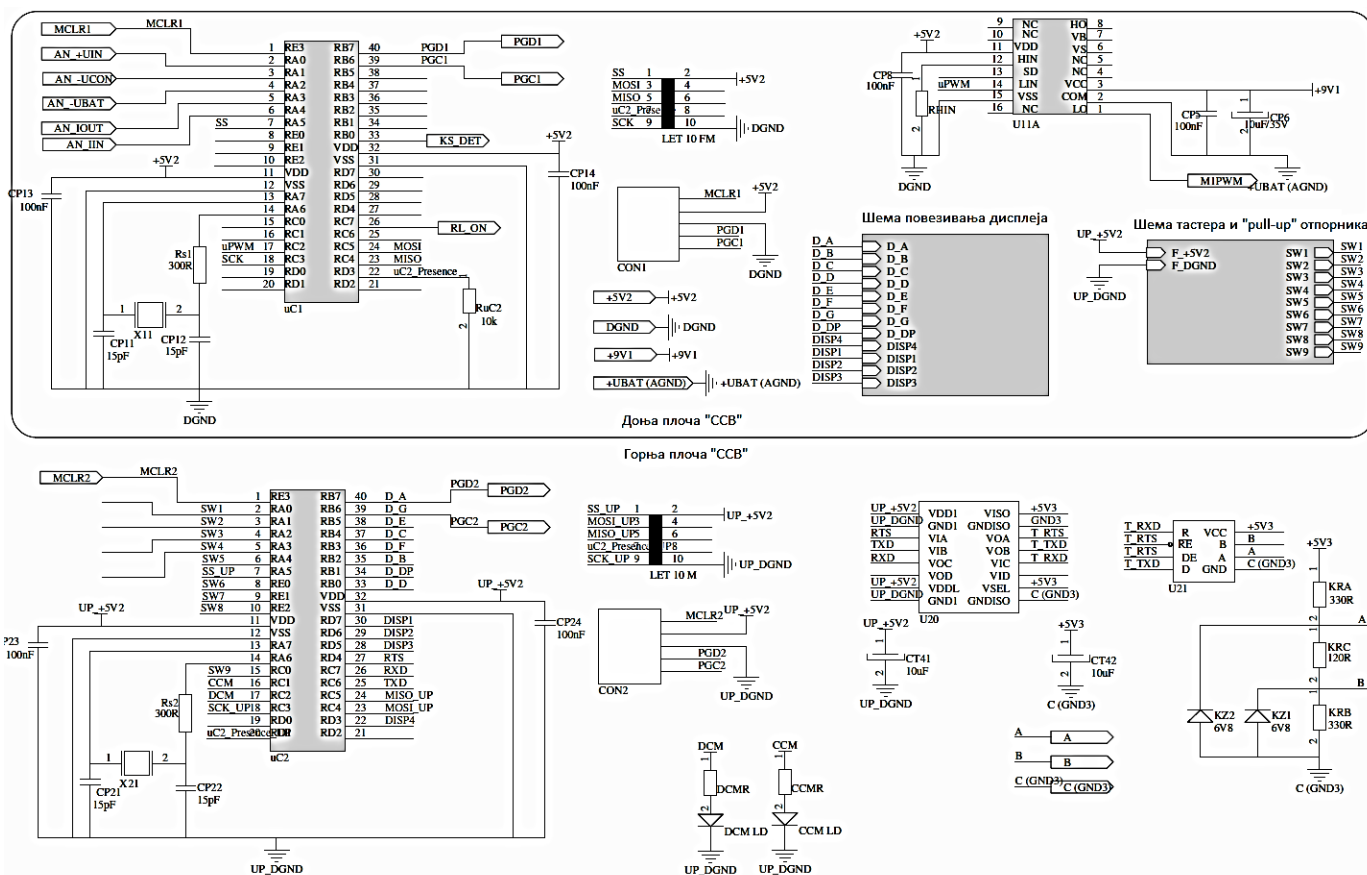
- multimetar EXTECH EX330 i opsezi napona koji su korišćeni pri merenju napona: opseg 0÷4 V, rezolucija 0,01 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$; opseg 0 V - 40 V, rezolucija 0,1 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$; opseg 0 V - 400 V, rezolucija 1 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$,
- strujna klešta FLUKE i30 korišćena za merenje ulazne i izlazne struje, Opseg 5 mA – 30 A DC, 100 mV/A, preciznost $\pm 1\%$ očitavanja $\pm 2 \text{ mA}$,
- osciloskop INSTRUSTAR ISD205A: Rezolucija 8 bita, vertikalno odstupanje 10 mV/div – 10 V/div u 10 koraka, horizontalno odstupanje 10 ns/div – 1 s/div u 27 koraka.

Merenje efikasnosti energetskog pretvarača

Merenja su dobijena pri podešenom ulaznom naponu od 40.7 V, odnosno 12 V respektivno, i pri različitim opterećenjima na izlazu DC/DC pretvarača. Kao opterećenje su korišćeni otpornici nazivnih vrednosti 30 Ω , 24 Ω , 12 Ω snage 10 W, tolerancije

10%, a ekvivalentna otpornost je dobijana kombinacijom njihove paralelne sprege. U Tabeli 1 su data merenja za konfiguraciju

spuštača napona, dok su u Tabeli 2 data merenja za konfiguraciju podizača napona.



Slika 12. Električna šema mikrokontrolera MASTER i drajverskog sklop za pobudu prekidačkog tranzistora

Tabela 1. Merenja za konfiguraciju spuštača napona

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	U_{CC} [V]	I_{CC} [A]	P_{IN} [W]	$P_{OUT}+P_{RBL}$ [W]	η [%]	R_{LOAD} [Ω]
40,70	0,62	14,24	1,46	25,23	21,15	83,85	10,00
40,70	1,09	14,24	2,62	44,36	37,67	84,93	5,45
40,70	1,57	14,23	3,79	63,89	54,30	84,98	3,75
40,70	1,80	14,23	4,37	73,26	62,55	85,39	3,24
40,60	2,05	14,23	4,93	83,23	70,52	84,70	2,85
40,60	2,25	14,20	5,39	91,35	76,90	84,18	2,60
40,60	2,44	14,20	5,86	99,06	83,58	84,36	2,34

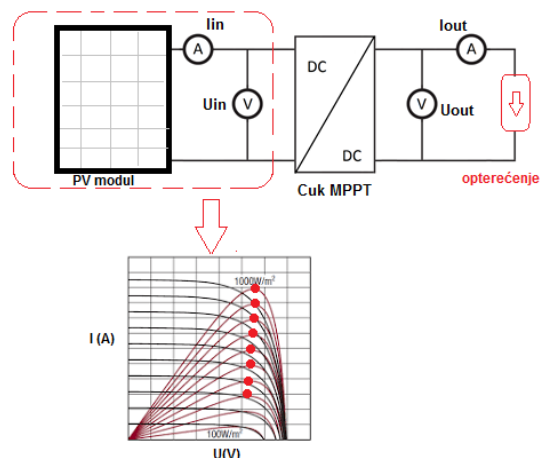
Tabela 2. Merenja za konfiguraciju podizača napona

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	U_{CC} [V]	I_{CC} [A]	P_{IN} [W]	$P_{OUT}+P_{RBL}$ [W]	η [%]	R_{LOAD} [Ω]
12,02	0,72	14,19	0,52	8,59	7,67	89,59	30,00
12,00	1,37	14,20	0,99	16,38	14,49	88,45	15,00
11,99	2,01	14,20	1,47	24,10	21,19	87,93	10,00
11,97	2,83	14,20	2,06	33,87	29,61	87,42	7,10
11,96	3,68	14,20	2,64	44,10	37,85	86,00	5,45
11,90	5,34	14,20	3,80	63,55	54,32	85,48	3,75

Verifikacija MPPT algoritma

U cilju verifikacije MPPT algoritma je formirana laboratorijska postavka čija je blok šema prikazana na Slici 13. Testiranje je

izvršeno za jedan PV 18 V/80 W i za rednu vezu dva takva panela.



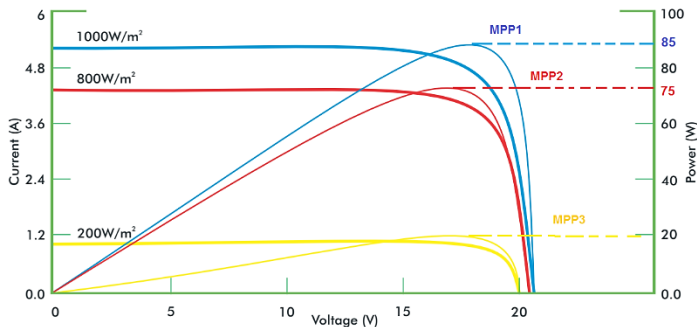
Slika 13. Principski prikaz laboratorijskog setapa za verifikaciju implementiranog MPPT algoritma

U eksperimentu su mereni ulazni napon i ulazna struja u tački maksimalne snage i izlazni napon i izlazna struja opterećenja. U Tabeli 3 su dati eksperimentalni rezultati za slučaj primene INC

algoritma, za komercijalni solarni panel CENTSYS nominalnog napona 18V i nominalne snage 80 W, čiji su detaljni tehnički podaci dati na linku:

<https://www.centsys.com.au/pdf/Solar/0.07.B.0133%2080W%20Solar%20Panel%20Specifications%20sheet-29062015-NG.pdf>

Sva merenja su vršena u toku tipičnog letnjeg dana počev od maksimalne insolacije 850 W/m² (podne) do minimalne vrednosti 200 W/m² (suton). Na Slici 14 su date katalogske karakteristike I - U i P - U korišćenog solarnog panela.



Slika 14. Karakteristike solarnog panela CENTSYS 18V/80W

Izlazni napon na opterećenju je održavan posredstvom Ćukovog DC/DC pretvarača na vrednost 14,2 V. Ovo je tipična vrednost napona koja se koristi u primenama sa solarnim baterijama.

Tabela 3. Verifikacija MPPT algoritma za solarni panel CENTSYS 18V/80W

Red. br	$U_{MPPT\ MES}$ [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]
1	17,50	1,10	19,25	14,20	1,10	15,48
2	17,60	1,40	24,64	14,10	1,43	20,20
3	17,80	2,40	42,72	14,20	2,56	36,30
4	17,90	3,60	64,44	14,30	3,83	54,77
5	18,00	4,40	79,20	14,20	5,00	70,10

U Tabeli 4 su date izmerene vrednosti za sistem sa dva redno vezana solarna panle CENTSYS nominalnog napona 18V i nominalne snage 80W.

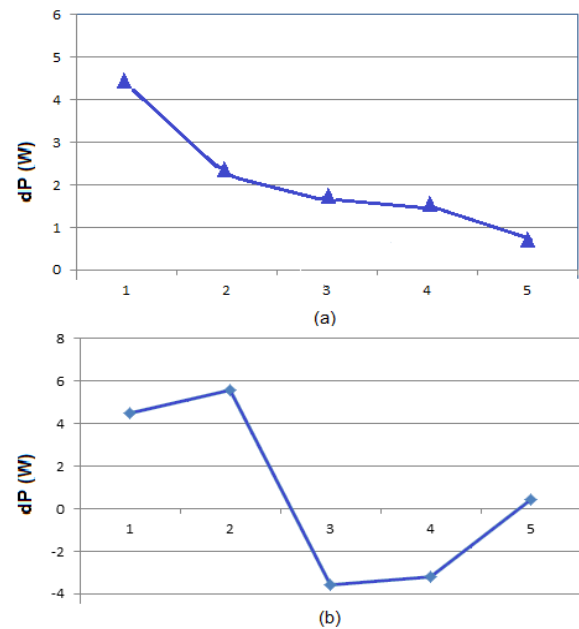
Tabela 4. Verifikacija MPPT algoritma za solarni modul sačinjen od 2x CENTSYS 18V/80W

Red. br	$U_{MPPT\ MES}$ [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]
1	35,80	4,40	157,52	14,40	9,30	134
2	35,70	3,30	117,84	14,30	7,00	100,00
3	35,60	2,50	89,00	14,20	5,20	73,87
4	35,60	1,25	44,50	14,10	2,62	37,00
5	35,20	1,00	35,20	14,20	2,03	28,80

Na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih u Tabelama 3 i 4, koje su dobijene nakon implementacije MPPT INC algoritma, se vidi da izmerene vrednosti maksimalnih snaga solarnih panela sa odgovaraju vrednostima tačaka maksimalnih snaga koje su date na I - U karakteristici. Na Slici 15 su prikazana odstupanja izmerenih vrednosti maksimalnih snaga u odnosu na katalogske vrednosti (koje su date na Slici 14).

Na Slici 15(a) je data srednja vrednost odstupanja izmerenih

vrednosti u odnosu na katalogske vrednosti, za slučaj jednog solarnog panela, dok je na Slici 15(b) data srednja vrednost odstupanja za slučaj dva redno vezana solarna panela (solarni modul snage 160W).



Slika 15. Srednja vrednost odstupanja MPPT snage; (a) PV panel CENTSYS 18V/80W, (b) redna veza dva PV panela

Testiranje DC/DC pretvarača u ustaljenom i prelaznim režimima

U ovom delu su dati rezultati testiranja DC/DC pretvarača u stacionarnom stanju i u dinamičkom režimu, pri naglim promenama opterećenja (verifikacija funkcije „load regulation“).

Na Slici 16 je prikazan osciloskopski snimak izlaznog napona DC/DC pretvarača, pri ulaznom naponu 36V i opterećenju od 30W, pri podešenom izlaznom naponu od 14.2 V kada je energetski pretvarač radio u režimu naponskog izvora, kao spuštač napona.



Slika 16. Talasni oblik izlaznog napona pri opterećenju 30 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

Na Slici 17 je prikazan osciloskopski snimak pri ulaznom naponu 36 V i opterećenju od 140W, pri podešenom izlaznom naponu od 14.2 V. Male oscilacije u talasnom obliku napona su posledica PID regulacije.



Slika 17. Talasni oblik izlaznog napona pri opterećenju 140 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

Na Slici 18 je prikazan talasni oblik odziva izlaznog napona, pri ulaznom naponu od 36 V i nagloj promeni opterećenja sa 30W na 140 W. Izlazni napon je iznosio 1,2 V. Na snimku se može uočiti efekat nagle promene opterećenja na kratkotrajni propad izlaznog napona, kao i efekat regulacije ovog poremećaja (tzv. „load regulation“). Ovaj prelazni režim je trajao oko 100 ms.



Slika 18. Talasni oblik izlaznog napona pri promeni opterećenja sa 30W na 140W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

Na Slici 19 je prikazan prikazan talasni oblik izlaznog napona, pri ulaznom naponu od 36 V i naglom rasterećenju na izlazu sa 140W na 30W, pri podešenom izlaznom naponu od 14,2 V. Na snimku se može uočiti očekivan porast izlaznog napona, dok se stabilizacija izlaznog napona ostvaruje u intervalu od 100 ms.



Slika 19. Talasni oblik izlaznog napona pri rasterećenju sa 140 W na 30 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

VI ZAKLJUČAK

U radu je prikazana praktična realizacija Ćukovog DC/DC

pretvarača, koji je primenjen u solarnom MPPT sistemu i za široki raspon ulaznih napona od 10 V do 40 V, maksimalne ulazne struje 4A, izlaznog napona u opsegu 12 V do 15V za punjenje solarnih baterija AGM VRLA i maksimalne izlazne struje 10 A. U ovoj aplikaciji je implementiran relativno jednostavan i praktičan INC algoritam u cilju praćenja tačke maksimalne snage solarnih panela. INC algoritam je detaljno objašnjen i prikazan dijagramom toka. Ograničenja sistema u primeni naprednijih MPPT algoritama je pre svega bila sama arhitektura primenjenog mikrokontrolera, koji je osmobicitan i dizajniran za rad sa celim brojevima. Iz ovih razloga bi implementacija složenijih algoritama bila neefikasna i neprecizna. Nakon izvršenih testiranja i merenja utvrđeno je da je realna efikasnost Ćukovog DC/DC energetskog pretvarača primenjenog u MPPT solarnom sistemu oko 87% (režim spuštača napona), pri nominalno opterećenom izlazu pretvarača od 140W i pri izlaznom naponu 14.4V. Pri naglim promenama opterećenja (opseg 20W-140W), softverskom implementacijom i primenom PID algoritma u sklopu naponskog regulatora je postignuta zadovoljavajuća stabilizacija izlaznog napona.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zeman, M., Solar Cells, Chapter 1: Introduction to photovoltaic solar energy, Chapter 3: Semiconductor materials for solar cells, Chapter 4: Operational principles, Chapter 5: Solar cell conversion efficiency limits. <https://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/Solar-Cells-Miro-Zeman.pdf> [pristupljeno 24.03.2024]
- [2] Jakhran, A.Q., Samo, S., Kamboh, S.A., Labadin, J. An improved mathematical model for computing power output of solar photovoltaic modules, International Journal of Photoenergy, 2014, 346704, 9 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/346704>
- [3] Belkaid, A., Colak, I., Kayisli, K., Bayindir, R. Design and implementation of a cuk converter controlled by a direct duty cycle inc-mppt in pv battery system, International Journal of Smart Grid, Vol.3, No.1, 2019. <https://www.ijsmartgrid.org/index.php/ijsmartgridnew/article/view/37/pdf> [pristupljeno 24.03.2024]
- [4] Putri, R.I., Wibowo, S. Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method, Energy procedia, Vol. 68, pp. 22-30, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.228>
- [5] Rivera-Espinosa, M.R., Alejandre-López, A.Y., Pedraza-Barrón, J.E., García-Vite, P.M., Robles-Campos, H.R. A high step-up DC-DC converter with MPPT for PV application, in Proc. 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, pp. 1-6, 08-10 November 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8261610> [pristupljeno 24.03.2024]
- [6] Ghassami, A.A., Sadeghzadeh, S.M., Soleimani, A. A high performance maximum power point tracker for PV Systems, Electric Power Energy Systems, Vol. 53, pp. 237-243, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.04.017>
- [7] Mukerjee, A.K., Dasgupta, N. DC power supply used as photovoltaic simulator for testing MPPT algorithms, Renewable Energy, Vol. 32, No. 4, pp. 587-592, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.010>
- [8] Veerachary, M. Power tracking for nonlinear PV sources with coupled inductor SEPIC converter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 41, pp. 1019-1029, 2005. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1541446> [pristupljeno 24.03.2024]
- [9] Safari, A., Mekhilef, S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using Cuk converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No.4,

- pp. 1154-1161, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5456214> [pristupljeno 24.03.2024]
- [10] Majstorović, M., Mršević, D., Đurić, B., Milešević, M., Stević, Z., Despotović, Ž.V. Implementation of MPPT Methods with SEPIC Converter, in Proc. *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9066296> [pristupljeno 24.03.2024]
- [11] Chung, T.M., Daniyal, H., Sulaiman, M.H., Bakar, M.S. Comparative study of P&O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking, in Proc. *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-15 November 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1300>
- [12] Patel, A., Tiwari, H. Implementation of INC-PMPPT and its comparison with INC MPPT by direct duty cycle control for solar photovoltaics employing zeta converter, in Proc. *2017 International Conference on Information, Communication Instrumentation and Control (ICICIC)*, Indore, India, pp. 1-6, 17-19 August 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8279173> [pristupljeno 24.03.2024]
- [13] Djordjevic, B., Despotović, Ž.V. Digital Implementation of MPPT Algorithm in Cuk DC/DC Power Converter Based on PIC18F4520 Microcontroller, in Proc. *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 16-18 March 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751278> [pristupljeno 24.03.2024]
- [14] Lekić, A., Aroudi, A.E., Stipanović, D. Polytopic Control of a PV-Fed SEPIC DC-DC Converter, in Proc. *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Sapporo, Japan, pp. 1-5, 26-29 May 2019. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702076>
- [15] Esram, T., Chapman, P.L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V. Despotović, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
Boban Đorđević - master strukovnih studija, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, boban.djordjevic@pupin.rs, ORCID [0009-0006-6093-8406](https://orcid.org/0009-0006-6093-8406)

Application and Realization of Ćuk DC/DC Power Converter in MPPT of the Photovoltaic Panel

Abstract – The paper presents one possible realisation of the solar panel-Ćuk DC/DC power converter system with the implementation of the algorithm for the maximum power point tracking (MPPT) of the solar panel. The solar panel is characterized by a highly nonlinear I-U characteristic, while Ćuk's DC/DC power converter is characterized by a wide range of input voltage. For these reasons, the coupling of these two subsystems proved to be a satisfactory solution in off-grid solar power supply systems. The paper presents the key characteristics of the proposed system as well as the test results obtained at different loads.

Index terms – Power converter, RES, DC/DC power, Ćuk converter, PV module