

Efekat djelimičnog osunčanja solarnog niza i predložena metoda njegove eliminacije

Miodrag Forcan

Istočno Sarajevo, BiH

miodrag.forcan@live.com

Sadržaj—U ovom radu je izvršena detaljna analiza uticaja efekta djelimičnog osunčanja niza solarnih panela na smanjenje njihove izlazne snage. Realizovan je jednodiodni model solarne ćelije, na osnovu koga je realizovan i model PV panela uz simulaciju uticaja efekta djelimičnog osunčanja na solarni niz sastavljen od tri panela. Zatim je data analiza pretvarača EE koji se koriste za povećanje efikasnosti cijelog solarnog niza. Razmotren je kriterijum za odabir komponenti pretvarača sa ciljem postizanja što većeg stepena minimizacije gubitaka aktivne snage.

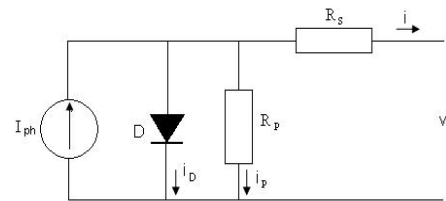
Ključne riječi- PV panel; integrisani pretvarač(MIC); solarni niz;

I. UVOD

Zadnjih godina prošlog vijeka došlo je do nagle ekspanzije primjene fotonaponskih modula u dijelovima fasada zgrada, poslovnih objekata i sl. Ovakva primjena je otvorila nove koncepte u iskorištenju, distribuciji i potrošnji solarne energije. Novi koncepti postavljanja fotonaponskih modula su doveli do toga da paneli u nizu, zbog prostornog razmještanja, nisu jednako osunčani, pa se kao osnovni problem pojavio efekat djelimičnog osunčanja solarnog niza. Sva istraživanja su vodila ka primjeni pretvarača energetske elektronike sa sposobnošću praćenja tačke maksimalne snage PV panela (MPPT), koji se postavljaju paralelno panelima i povećavaju njihovu efikasnost. Jedna od novijih solucija je upotreba integrisanih pretvarača, što je upravo i glavna tema ovog rada.

II. MODELOVANJE PV PANELA

Za potrebe simulacije uticaja efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza, prvo je izgrađen model PV ćelije, a zatim i PV panela. Prema svojoj prirodi solarni panel se ponaša kao strujni izvor. Osnovni problem prisutan kod modelovanja panela je velika osjetljivost strujno-naponske karakteristike pri malim promjenama u sunčevoj iradijaciji i temperaturi. Zbog jednostavnosti matematičke analize, za osnovu pri modelovanju odabran je jednodiodni model solarne ćelije prikazan na Sl. 1. Osnovu modela predstavlja paralelna veza idealnog strujnog izvora i diode. Pri razmatranju se takođe moraju uzeti u obzir gubici snage u samoj ćeliji, koji su pri modelovanju koncentrisani u ekvivalentnim otporima. Pomoću više povezanih jednodiodnih modela u serijsku vezu realizuje se model kompletnog PV panela.



Slika 1. Jednodiodni model PV ćelije.

Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije je data narednom relacijom:

$$i = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v+iR_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{v+iR_s}{R_p} \quad (1)$$

Parametri iz gornje jednačine su:

I_{ph} – fotostruja PV panela,

I_0 – tamna struja zasićenja PV panela,

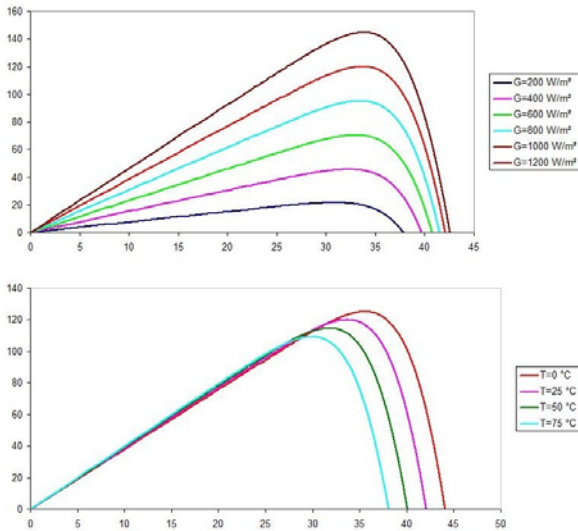
R_s – ekvivalentni serijski otpor PV panela,

R_p – ekvivalentni paralelni otpor PV panela,

V_t – naponski ekvivalent temperature,

n_s – konstanta tehnike izrade (za n solarnih ćelija u PV panelu ima vrijednost n).

Fotostruja i tamna struja zasićenja PV ćelije zavise od uslova osunčanja i temperature. Metod za određivanje ove zavisnosti preuzet je iz [1]. Kao rezultat razmatrane matematičke analize napravljen je model PV panela u programu “MATLAB”, koji na osnovu parametara datih od strane proizvođača definiše strujno-naponsku karakteristiku datu sa (1). Dati model se može koristiti za analizu strujno-naponske karakteristike PV panela pri promjenama temperature i insolacije. Takođe je izvršeno prilagođenje modela u svrhu mogućnosti vezivanja panela sa ostalim elementima električnih kola pri simulaciji. Na Sl. 2 je prikazana I-V karakteristika panela “BP MSX 120” za četiri različite temperature i šest različitih nivoa insolacije (sunčeve iradijacije). Model je upotrebljiv za bilo koji tip PV panela.



Slika 2. P-V karakteristika panela "BP MSX 120" za šest različitih nivoa insolacije (gore) i četiri različite temperature (dole).

Sa porastom temperature ili opadanjem nivoa insolacije dolazi do smanjenja snage PV panela. Dominantan uticaj na redukovanje snage ima nivo insolacije.

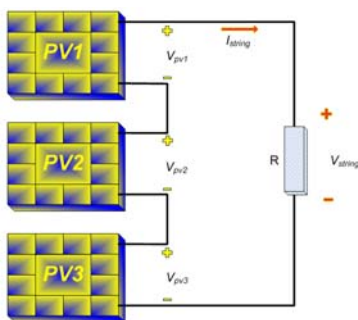
III. SIMULACIONA ANALIZA EFEKTA DJELIMIČNOG OSUNČANJA SOLARNOG NIZA

Postoje dva poznata efekta koja se dešavaju pri djelimičnom osunčanju solarnog niza. Ovim efektima se objašnjava pad u proizvodnoj snazi niza.[3]

a) "Inercija" osjenčenih panela.

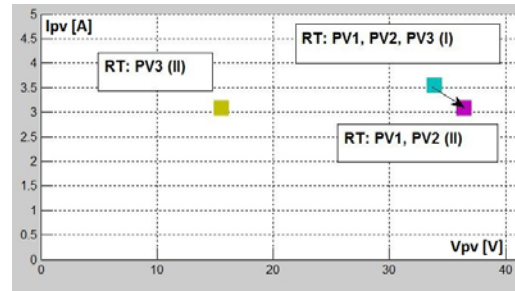
Pretpostavimo da je dio solarnog niza osjenčen. Grupa osjenčenih ćelija teži da zadrži postojeću vrijednost struje koja je umanjena i srazmjerna uslovima radijacije. Zbog serijske veze solarnih panela, neosjenčene solarne ćelije ostalih panela u nizu dolaze pod uticaj osjenčenih ćelija. Ćelije pod sjenom pokušavaju da dovedu ćelije ostatka solarnog niza u režim manje struje. Struja solarnog niza je u ovom slučaju ograničena strujom najslabije osunčanog panela u nizu.

Sa ciljem verifikacije prethodnog teoretskog razmatranja izvršena je simulaciona analiza šeme sa Sl.3.



Slika 3. Simulaciona šema za ispitivanje efekta djelimičnog osunčanja niza od tri panela pri trostrukom opterećenju koje odgovara MPP PV panela.

Rezultati simulacije su prikazani na Sl. 4 i u tabeli I.



Slika 4. Grafički rezultati simulacije efekta "inercije" osjenčenih panela.

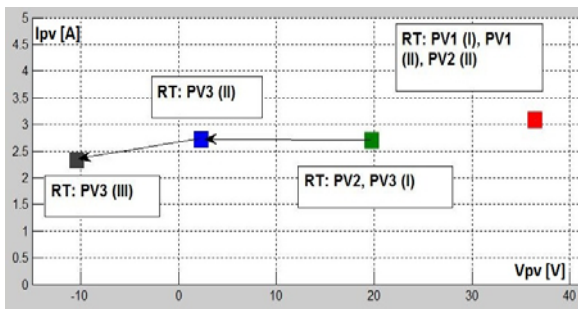
TABELA I. ANALITIČKI REZULTATI SIMULACIJE EFEKTA "INERCIJE" OSJENČENIH PANELA

Red. br. slučaja	Struja [A]	Napon [V]	Snaga [W]	Snaga [%Pmax]
I	3.54	101.58	359.59	99.89
II	3.08	88.46	272.46	75.68

Sl. 4 prikazuje položaje radnih tačaka solarnih panela u I-V ravni. Prvobitno je razmotren slučaj ravnomjernog osunčanja sva tri solarna panela nivoom sunčeve iradijacije od 1000 W/m². Radna temperatura niza PV panela je 25°C. Dakle, paneli su izloženi standardnim testnim uslovima. Ovaj slučaj je označen sa "I" na Sl.4.U svim daljim razmatranjima neće biti promjena uslova temperature, jer se smatra da je uticaj takvih promjena na rad solarnog niza mnogo manji od uticaja izazvanog promjenama sunčeve iradijacije. Drugi slučaj ("II")simulacione analize je izvršen pri padu nivoa sunčeve iradijacije na panelu PV3 usljed pojave sjene. Pretpostavka je da sjena obuhvata radnu površinu panela PV3 relativno malim dijelom, te je nivo osunčanja smanjen na 800 W/m². Ostatak solarnog niza nije obuhvaćen sjenom.Paneli PV1 i PV2 rade u režimu manje struje koji je uzrokovan pojavom sjene na panelu PV3 čija radna tačka je takođe značajno pomjerena u oblast nižih napona. Uspostavljanje režima manje struje kroz priključke optimalno osunčanih panela PV1 i PV2 direktna je posljedica efekta „inercije“ osjenčenog panela PV3. Analitički rezultati, prikazani u tabeli I, islustruju uticaj efekta "inercije" osjenčenih panela na redukovanje snage solarnog niza. Crnom bojom su označeni električni parametri niza za slučaj "I", a crvenom za slučaj "II".

b) "Inercija" neosjenčenih panela.

Neosjenčene ćelije će pokušati da dovedu osjenčene u režim rada većih struja. Paneli koji nisu pod sjenom teže da uspostave veću struju u skladu sa uslovima sunčeve iradijacije kojoj su izloženi, te na taj način utiču na radne tačke panela pod sjenom. Jedini način da PV solarna ćelija radi u režimu struja većih od sopstvene vrijednosti struje kratkog spoja, je da se njena radna tačka nađe u oblasti negativnog napona. Na ovaj način panel pod uticajem efekta „inercije“ neosjenčenih panela smanjuje ukupni napon solarnog niza.Simulaciona šema je ista kao i za prethodnu analizu "inercije" osjenčenih panela sa Sl. 3. Rezultati simulacije su prikazani na Sl. 5 i u tabeli II.



Slika 5. Grafički rezultati simulacije efekta "inercije" neosjenjenih panela.

TABELA II. ANALITIČKI REZULTATI SIMULACIJE EFEKTA "INERCIJE" NEOSJENJENIH PANELA

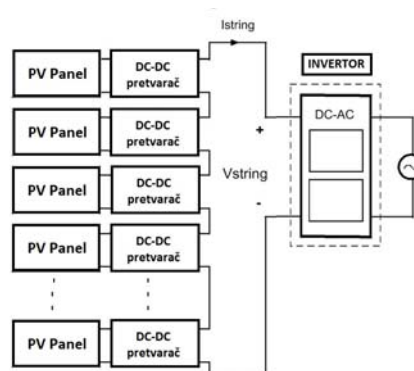
Red. br. slučaja	Struja [A]	Napon [V]	Snaga [W]	Snaga [%Pmax]
I	2.69	77.25	207.80	57.72
II	2.71	77.64	210.40	58.44
III	2.3	66.81	155.67	43.24

U slučaju označenom sa "I" na Sl. 5 jedan panel PV1 je pod uticajem sunčeve iradijacije od 1000 W/m^2 , dok su preostala dva panela PV2 i PV3 osunčana sunčevom radijacijom od 700 W/m^2 . Njihov uticaj na smanjenje struje stringa je skoro potpuno isti kao u slučaju kada bi samo jedan panel bio manje osunčan. Razlog leži u činjenici da je struja solarnog niza ograničena najmanje osunčanim PV panelom. Analitički rezultati prvog slučaja su označeni crnom bojom u tabeli II. Za slučaj "II" uvodi se pretpostavka da dolazi do povećanja insolacije panela PV2 na 1000 W/m^2 , čime jedino panel PV3 ostaje pod uticajem sjene. Povećanje sunčeve iradijacije na panelu PV2 utiče na mali porast struje solarnog niza. Ova konstatacija se primijeti na grafiku sa Sl. 5, pomjeranjem radne tačke panela PV1 i PV2 u oblast nešto manjih napona. Kao najzanimljiviji detalj analize je drastično pomijeranje radne tačke solarnog panela PV3 u oblast niskih napona po cijeni malog povećanja struje kroz njegove priključke. Upravo je ova činjenica glavni pokazatelj efekta „inercije“ neosjenjenih panela. Paneli PV1 i PV2 „nameću“ panelu PV3 veći intenzitet struje u odnosu na odgovarajuće uslove osunčanja na njegovoj radnoj površini. Analitički rezultati slučaja "II" su u gornjoj tabeli predstavljeni crvenom bojom.

U slučaju kada je jedan panel u nizu pod velikim uticajem sjene, a preostala dva su van uticaja, dolazi do pojave zvane jako osjenčenje (heavy shading). Pomenuta pojava predstavlja ekstreman slučaj efekta „inercije“ neosjenjenih panela i analizirana je u slučaju "III" pri smanjenju insolacije panela PV3 na 600 W/m^2 . Radna tačka datog panela prelazi u oblast negativnih napona. U tabeli II je izvršena ilustracija analitičkih rezultata trećeg slučaja (plava boja). Pri efektu jakog osjenčenja PV panel je potrebno prespojiti diodom u cilju omogućavanja neometanog rada ostatka niza. Struja stringa u ovom slučaju protiče kroz diodu. Tip diode se bira sa ciljem minimizacija gubitaka pri vođenju. Karakteristična je upotreba Šotkijeve diode.

IV. PREDNOSTI PRIMJENE INTEGRISANIH PRETVARAČA U SOLARNOM NIZU

Kada se radi o fotonaponskim modulima integrisanim u objekte, neophodan je razvoj tzv. "pametnog" PV panela, čime bi efikasno bio riješen problem djelimičnog osunčanja. Ovo se postiže vezivanjem DC-DC pretvarača sa sposobnošću praćenja tačke maksimalne snage (MPPT) u kaskadnu vezu sa svakim panelom solarnog niza. Ova relativno nova tehnika je prikazana na Sl. 6.



Slika 6. Upotreba integrisanih pretvarača u radu solarnog niza.

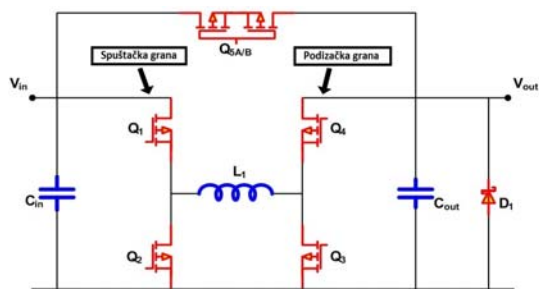
Ovakvi pretvarači se još nazivaju MIC (*Module Integrated Converters*). Ovaj pristup efikasno izoluje rad svakog PV panela od ostatka niza.

Pretvarač ima dva osnovna zadatka: obezbjeđivanje rada PV panela u MPP i prilagođenje izlaznog napona u cilju održavanja konstantnog napona solarnog niza. Ovo je jedino moguće postići upotrebom pretvarača koji ima karakteristike spuštača-podizača. Da bi se postigla maksimalna efikasnost, uvodi se dodatni mod rada pri nominalnim uslovima osunčanja i temperature. Riječ je o modu propuštanja. Propuštanje napona se odvija direktnim spajanjem izlaza PV panela i izlaza pretvarača. Na ovaj način su spriječeni prekidački gubici u pretvaraču, tj. prekidački dio pretvarača se prespaja.

MPPT funkcija svakog pretvarača radi nezavisno od promjena struje niza, što znači da se solarni paneli ponašaju kao izvori snage, zavisne jedino od uslova sopstvenog osunčanja i temperature, čime je spriječen efekat djelimičnog osunčanja solarnog niza. Na ovaj način napon i struja solarnog niza postaju prilagodljivi. Moguće je postići konstantan napon niza pri promjenama struje niza. Sa konstantnim izlaznim naponom nizovi postaju modularni i mogu se povezivati u paralelne konstrukcije u cilju postizanja većih snaga. Kao rezultat ovakvog koncepta centralni DC-DC pretvarač, koji je nekada bio korišćen, gubi svoj smisao i izlazi iz upotrebe. [3]

V. TOPOLOGIJA I UPRAVLJANJE PO MODOVIMA RADA INTEGRISANOG PRETVARAČA

U realnim uslovima rada solarnog sistema sa Sl. 6, potrebno je koristiti topologiju spuštač-podizač sa Sl. 7.



Slika 7. Topologija spuštač-podizač sa modom propuštanja.

Topologiju sa Sl. 7 čine:

- prigušnica velike snage L_1 ,
- prekidači Q_1 i Q_2 spuštačke grane,
- prekidači Q_3 i Q_4 podizačke grane,
- prekidač moda propuštanja $Q_{5A/B}$,
- ulazni i izlazni filterski kondenzatori C_{in} i C_{out} ,
- izlazna premosna dioda D_1 .

U cilju minimizacije gubitaka aktivne snage predlaže se upravljanje po nezavisnim modovima rada. Odgovarajući kontroler vrši izbor trenutnog moda rada u zavisnosti od odnosa struje PV panela (I_{PV}) i struje solarnog niza (I_{string}), što je prikazano na Sl. 8. Postoje ukupno tri moda rada:

a) *Spuštački mod rada* ($I_{PV} < I_{string}$).

Aktivni su prekidači spuštačke grane (Q_1 i Q_2), prekidač Q_3 je stalno isključen, dok je prekidač Q_4 stalno uključen.

b) *Podizački mod rada* ($I_{PV} > I_{string}$).

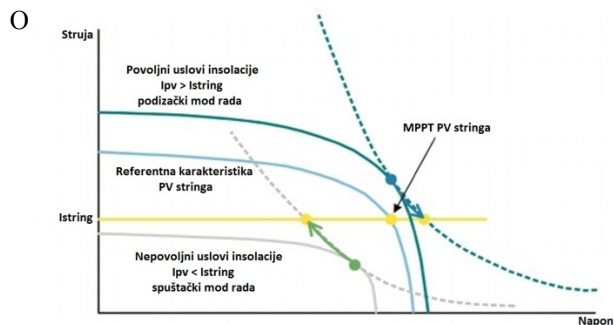
Aktivni su prekidači podizačke grane (Q_3 i Q_4), prekidač Q_2 je stalno isključen, dok je prekidač Q_1 stalno uključen.

c) *Mod propuštanja* ($I_{PV} = I_{string}$).

Aktivan je prekidač $Q_{5A/B}$. Svi ostali prekidači su isključeni.

U slučaju pojave jakog osjenčenja PV panela, automatski će provesti dioda D_1 i prespojiti pretvarač.

Opisana topologija se često naziva pretvarač za optimizovanje snage PV panela (Power Optimizer). Potreba za topologijom spuštač-podizač proizilazi iz činjenice da svi pretvarači u solarnom nizu dijele istu izlaznu struju. Ukoliko PV panel ima bolje uslove osunčanja od ostalih panela, on je u stanju da proizvede veću struju na svojim izlaznim priključcima u odnosu na struju solarnog niza, koja zavisi od zbirnog uticaja svih panela. Tada je neophodno koristiti mod podizanja napona sa ciljem prilagođenja struje izlaznoj struji solarnog niza. U drugom slučaju, ako PV panel ima lošije uslove osunčanja od ostalih panela, neophodna je upotreba spuštačkog moda rada, da bi vrijednost struje porasla na trenutnu vrijednost koju ima struja solarnog niza. Treći slučaj opisuje situaciju u kojoj su svi paneli jednako osunčani, nema efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza. Tada se primjenjuje mod propuštanja, jer vrijednost struje PV panela odgovara vrijednosti izlazne struje solarnog niza.



Slika 8. Topologija spuštač-podizač sa modom propuštanja.

VI. ODABIR KOMPONENTI PRETVARAČA ZA OPTIMIZOVANJE SNAGE PV PANELA

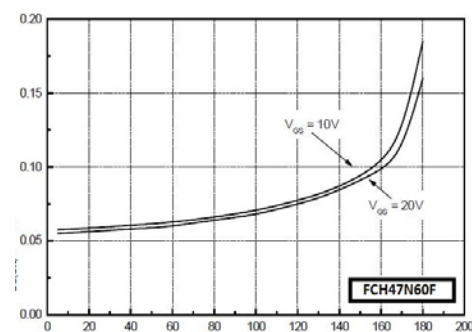
Detaljan matematički proračun za odabir komponenti preuzet je iz [2] pri nazivnoj frekvenciji pretvarača od 50 kHz i maksimalnoj ulaznoj snazi od 120 W. U ovom radu biće razmotreni tipovi konkretnih komponenti u svrhu minimizacije gubitaka aktivne snage.

a) *Odabir MOSFET prekidača.*

Odabrana komponenta je "FCH47N60F" iz serije "SuperFET", proizvođača "Semiconductor". Osnovni nazivni podaci su:

- maksimalna temperatura : $T_f = 150 \text{ }^\circ\text{C}$,
- otpor pri vođenju: $R_{DS(on)} = 0.058 \text{ } \Omega$,
- nazivna struja drejna: $I_D = 47 \text{ A}$,
- probojni napon: $BV = 600 \text{ V}$,
- naboj punjenja gejta: $Q_g = 210 \text{ nC}$.

Data komponenta je odabrana zbog ultra niskih otpora vođenja i naboja punjenja gejta, čime su značajno redukovani gubici aktivne snage. Na Sl. 9 je prikazana zavisnost otpora pri vođenju ($R_{DS(on)}$ [Ω]) od vrijednosti struje drejna (I_D [A]).



Slika 9. Zavisnost $R_{DS(on)}$ od I_D MOSFET-prekidača "FCH47N60F".

Karakteristika je veoma povoljna u oblasti tipičnih struja PV panela.

b) *Odabir prigušnice velike snage.*

Odabrana prigušnica je "JA4487-AL", proizvođača "Coilcraft". Dati model je specijalno dizajniran za primjenu u integrisanim pretvaračima za PV sisteme. Upotrebljava se za

panele nazivnog napona od 30 do 100 V. Odlikuje se vrlo malim DC otporom i velikom nazivnom strujom. U [2] je opisan postupak određivanja vrijednosti za induktivnost prigušnice u zavisnosti od željenog ograničenja ripla struje prigušnice.

c) *Odabir ulaznih i izlaznih filterskih kondenzatora.*

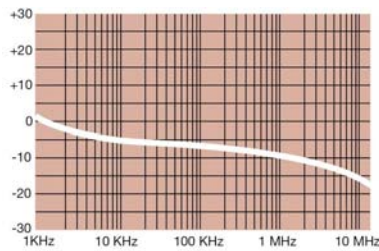
Obavezna je upotreba keramičkih kondenzatora zbog dužeg vijeka trajanja. Na ulaz i izlaz pretvarača se veže više kondenzatora u paralelu sa ciljem postizanja veće kapacitivnosti.

Proračun potrebne vrijednosti za kapacitivnosti na ulazu i izlazu u zavisnosti od željenog ograničenja ripla, dat je u [2]. Odabrani su kondenzatori klase "X7R" proizvođača "AVX" zbog stabilne vrijednosti kapaciteta u širokom opsegu promjena radne temperature i frekvencije. Na Sl. 10 je prikazano procentualno variranje kapacitivnosti pri porastu frekvencije.

d) *Odabir "bypass" diode.*

Proizvođač "Texas Instruments" je projektovao specijalnu "pametnu" diodu koja ima manje gubitke pri vođenju od klasične Šotkijeve diode. Radi se o komponenti sa oznakom "SM74611". Osnovne osobine su:

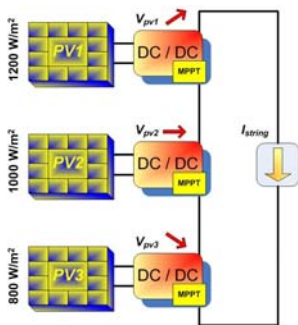
- maksimalni inverzni napon: $V_R = 30\text{ V}$,
- maksimalna direktna struja: $I_D = 15\text{ A}$,
- otpor pri vođenju (pri I_D od 8A): $R_D = 0.325\text{ m}\Omega$.



Slika 10. Zavisnost kapaciteta kondenzatora klase "X7R" od frekvencije.

VII. MODELOVANJE PRIMJENE PRETVARAČA ZA OPTIMIZACIJU SNAGE PV PANELE U SOLARNOM NIZU

Sl. 11 prikazuje razmatranu simulacionu šemu.



Slika 11. Simulaciona šema upotrebe integrisanih pretvarača sa MPPT u solarnom nizu.

Sa Sl. 11 je primjetno da se radi o nizu od tri solarna panela označena sa: PV1, PV2 i PV3. Tip panela je "BP MSX 120", koji je u radu ranije modelovan. Njihova osunčanja su respektivno: 1200 W/m², 1000 W/m² i 800 W/m².

Pri simulaciji je smatrano da je struja solarnog niza konstantna. Ovim je izbjegnuto realizovanje elektronske kontrole za individualno razdvajanje funkcionalnih blokova MPPT svakog pretvarača. Za intenzitet struje uzeta je vrijednost od 3.56 A, koja ujedno predstavlja i intenzitet nominalne struje modelovanog panela "BP MSX 120".

Na osnovu ranije izložene teorije prvi pretvarač bi trebalo da radi u podizačkom modu, drugi u modu propuštanja, a treći u spuštačkom modu. Obavljene su dvije simulacije, jedna sa upotrebom integrisanih pretvarača, a druga bez njihove upotrebe. Analitički rezultati simulacije su dati u narednoj tabeli.

TABELA III. ANALITIČKI REZULTATI SIMULACIJE RADA SOLARNOG NIZA SA SL. 11

Snaga solarnog niza [W]	Bez pretvarača	273.1
	Sa pretvaračima	357.7
Mod rada pretvarača	PV1	Podizač (D=0.2)
	PV2	Propuštanje
	PV3	Spuštač (D=0.8)

Iz gornje tabele se jasno vidi simulaciona verifikacija odgovarajućih modova rada pretvarača. Dobit u izlaznoj snazi je takođe očigledan.

VIII. ZAKLJUČAK

U cilju što boljeg razumijevanja efekta djelimičnog osunčanja solarnog niza urađena je simulaciona analiza kao verifikacija teorijskom razmatranju. Za potrebe simulacije, izvršeno je modelovanje PV panela. Iz priloženih rezultata jasno su uočljivi negativni efekti djelimičnog osunčanja solarnog niza. Potom je predložen sistem upotrebe integrisanih pretvarača sa sposobnošću MPPT kao optimalno rješenje. Izvršeno je modelovanje predložene topologije integrisanog pretvarača uz odabir odgovarajućih komponenti u svrhu minimizacije gubitaka aktivne snage. Razmotren je slučaj solarnog niza od tri PV panela sa različitim uslovima insolacije zbog uticaja efekta djelimičnog osunčanja. Opisani sistem je modelovan. Rezultati simulacije su jasno pokazali dobit u proizvodnji aktivne snage niza sa upotrebom pretvarača u odnosu na slučaj bez upotrebe pretvarača.

LITERATURA

- [1] Marko Lalović, Slobodan Lubura, „Model PV panela baziran na specifikacijama koje daje proizvođač“, INFOTEH, Jahorina, mart 2010.
- [2] Miodrag Forcan, Jovana Tuševljak, Slobodan Lubura, Milomir Šoja "Analyzing and Modeling the PO for Boosting Efficiency of PV Panel", INDEL, Banja Luka, novembar 2012.
- [3] Leonor L. Linares, "Design and implementation of module integrated converters for series connected photovoltaic strings", University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.

ABSTRACT

In this paper effect of partial shading of solar string is analyzed. Usage of module integrated converters (MIC) is proposed. Models of PV Panel and Power Optimizer are designed. Detailed component selection for Power Optimizer is made. Through analysis it was concluded that usage of MIC contributes to greater amount of output power production of solar string, under shading conditions.

**Effect of Partial Shading of Solar String and Proposed
Method for Its Elimination**
Miodrag Forcan