

UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

ČORBA ZOLTAN

**NOVI METOD ANALIZE RADA
FOTONAPONSKOG SISTEMA U
USLOVIMA VARIJACIJE
SUNČEVOG ZRAČENJA**

DOKTORSKA TEZA

Mentor: *Prof. dr. Vladimir Katić*

Kandidat: *mr Čorba Zoltan*



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Чорба Золтан
Ментор, МН:	Владимир Катић
Наслов рада, НР:	Нови метод анализе рада фотонапонског система у условима варијације сунчевог зрачења
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски
Земља публикавања, ЗП:	Р. Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина, Нови Сад
Година, ГО:	2016.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	ФТН, Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/цитата/табела/слика/графика/прилога)	8/192/111/24/84/10
Научна област, НО:	Електротехника и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Електроенергетика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Фотонапонско претварање, фотонапонски панел, инвертор, сенчење, производња електричне енергије
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Рад се бави проблемом смањења производње електричне енергије фотонапонске електране у условима променљивог зрачења. Предлаже се нови метод анализе рада у условима сенчења путем макро- и микрореконфигурације ФН поља, која повећава производњу електричне енергије.
Датум прихватања теме, ДП:	
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Борислав Јефтенић, ред. проф.
	Члан: др Бранка Накомчић Смарагдакис, ванр. проф.
	Члан: др Веран Васић, ред. проф.
	Члан: др Борис Думнић, доцент
Ментор:	др Владимир Катић, ред. проф.
	Потпис ментора



UNIVERSITY OF NOVI SAD ● FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	Ph.D. thesis
Author, AU :	Corba Zoltan
Mentor, MN :	Vladimir Katic
Title, TI :	A new method of analyzing the photovoltaic power plant works under variation of solar radiation
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina, Novi Sad
Publication year, PY :	2016.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	FTS, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	8/192/111/24/84/10
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Electrical power engineering
Subject/Key words, S/KW :	Photovoltaic conversion, PV module, inverter, shading, energy production
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Science, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	The paper presents the problem of reducing electricity production of PV power plant under variation of solar radiation conditions. The author proposed a new method of analysis PV power plant works under partial shading condition trough micro- and macroconfiguration of PV array.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Borislav Jeftenic, Ph. D., professor
Member:	Branka Nakomcic Smaragdakis, Ph. D., associate. prof.
Member:	Veran Vasic, Ph. D., professor
Member:	Boris Dumnic, assistant professor
Member, Mentor:	Vladimir Katic, Ph. D., professor
	Mentor's sign

Zahvalnica

Zahvaljujem se roditeljima na ljubavi, podršci i svemu što su mi pružili tokom obrazovanja, mladosti i nakon zasnivanja porodice!

Zahvaljujem se supruzi i deci na dugogodišnjoj podršci i razumevanju da slobodno vreme, umesto sa njima, provedem na izradi ove disertacije!

Zahvaljujem se mentoru Vladimiru Katiću na korisnim savetima, pomoći i podršci, da do kraja istrajem u izradi disertacije.

Zahvaljujem se članovima komisije na uloženom trudu i vremenu koji su posvetili ovoj disertaciji!

Zahvaljujem se kolegama Banetu Popadiću, Josifu Tomiću, Marini Katić, Petru Gajiću i studentima strukovnih studija, koji su mi pomogli u raznim fazama izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se kolegamicama Maji Kondić i Snežani Bojanić na ljubaznosti i pomoći oko sprovođenja postupka za sticanje zvanja doktora nauka!

Čorba Zoltan

Sadržaj

PREDGOVOR	1
1. UVOD	3
1.1. FOTONAPONSKO PRETVARANJE – OD FOTONA DO ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
1.2. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA	7
1.3. METOD ANALIZE RADA	9
1.4. PREGLED POSTOJEĆE LITERATURE IZ OBLASTI RADA FOTONAPONSKE ELEKTRANE U USLOVIMA VARIJACIJE SUNČEVOG ZRAČENJA	11
1.4.1. Model fotonaponske ćelije/panela	11
1.4.2. Senčenje FN panela	13
1.4.3. Razni načini smanjenja uticaja senčenja na FN panel.....	14
1.4.4. Rekombinacione metode fotonaponskog polja	17
1.5. KRATAK PREGLED TEZE PO POGLAVLJIMA.....	20
2. FN ELEKTRANA I UTICAJ PROMENE ZRAČENJA NA PROIZVODNJU	23
2.1. OPREMA FN ELEKTRANE	23
2.1.1. Funkcionalna celina za konverziju energije.....	23
2.1.2. Jednosmerna razvodna oprema.....	24
2.1.3. Fotonaponski invertor	25
2.1.4. Razvodna oprema na izlaznoj strani invertora.....	27
2.1.5. Transformatorska stanica	27
2.1.6. Mesto priključenja fotonaponske elektrane na DEM	28
2.2. UTICAJ PROMENE ZRAČENJA NA PROIZVODNJU FN ELEKTRANE.....	29
2.2.1. Promenljivo zračenje.....	30
2.2.2. Uticaj bliskog senčenja na karakteristike FN panela.....	34
2.2.3. Senčenje i proizvodnja električne energije FN elektrane.....	37
2.3. SMANJENJE UTICAJA SENČENJA NA PROIZVODNJU FN ELEKTRANE	39
2.3.1. Makrokonfiguracija, električno povezivanje FN panela.....	41
2.3.2. Mikrorekonfiguracija, električno prevezivanje FN panela	42
3. MODEL FN PANELA	43
3.1. NAJČEŠĆE KORIŠĆENI MODELI FN ĆELIJE	43
3.2. JEDNAČINE EKVALENTNE ŠEME JEDNO-DIODNOG MODELA FN PANELA SA FABRIČKIM PARAMETRIMA	44
3.3. MODEL FN PANELA U MATLAB/SIMULINK PROGRAMU	48
4. MAKROKONFIGURACIJA FN POLJA	53

4.1.	PVSYST SOFTVER.....	55
4.1.1.	Verifikacija PVsyst softvera.....	55
4.1.2.	Simulacija FN sistema spojenog sa DEM.....	57
4.1.3.	Meteorološki podaci.....	58
4.1.4.	Blok šeme FN elektrana analiziranih u PVsyst-u.....	62
4.1.5.	Opis FN panela i invertora korišćenih tokom simulacije makrokonfiguracije... 64	
4.1.5.1.	FN panel.....	64
4.1.5.2.	FN Invertor.....	67
4.1.6.	Struktura razmatranih gubitaka PVsyst softvera.....	69
4.2.	ANALIZIRANE SITUACIJE U PVSYST SOFTVERU.....	71
4.2.1.	FN elektrana sa različitim položajem prepreke.....	72
4.2.2.	Položaj prepreka u elektrani FTN Novi Sad.....	74
4.3.	OZRAČENJE FN PANELA ZA ANALIZIRANE SLUČAJEVE.....	75
4.3.1.	Ozračenje bez prepreka.....	75
4.3.2.	Ozračenje sa preprekom.....	79
4.4.	REZULTATI SIMULACIJE MAKROKONFIGURACIJE FN ELEKTRANE SA RAZLIČITIM POLOŽAJEM PREPREKA.....	82
4.4.1.	Konfiguracija FN niza i invertora.....	82
4.4.2.	Rezultati makrokonfiguracije na dnevnom nivou.....	84
4.4.3.	Rezultati makrokonfiguracije na godišnjem nivou.....	91
4.4.3.1.	Položaj prepreke DOLE – pozicija jugo-istok, jugo-zapad.....	91
4.4.3.2.	Položaj prepreke GORE – pozicija severo-istok, severo-zapad.....	94
4.4.3.3.	Položaj prepreke JUG.....	97
4.5.	MAKROKONFIGURACIJA U FN ELEKTRANI FTN-NS.....	100
4.5.1.	Gubici ozračenja.....	100
4.5.2.	Rezultati makrokonfiguracije na dnevnom nivou.....	102
4.5.3.	Rezultati makrokonfiguracije na godišnjem nivou.....	107
4.6.	ANALIZA REZULTATA MAKROKONFIGURACIJE.....	109
4.6.1.	Makrokonfiguracija sa različitim položajem prepreka.....	109
4.6.2.	Makrokonfiguracija u FN elektrani FTN-NS.....	111
5.	MIKROREKONFIGURACIJA FN NIZA.....	113
5.1.	PROBLEM NEGATIVNOG UTICAJA SENČENJA KOJI SE MOŽE REŠITI MIKROREKONFIGURACIJOM FN POLJA.....	113
5.2.	PRINCIP MIKROREKONFIGURACIJE FN POLJA.....	115
5.3.	OPŠTI SLUČAJ MIKROREKONFIGURACIJE FN NIZA.....	117
5.3.1.	Minimalni broj FN panela u FN nizu.....	120
5.4.	MIKROREKONFIGURACIJA FN NIZA U ELEKTRANI FTN NOVI SAD.....	122
5.4.1.	Mikrorekonfiguraciono kolo FN niza.....	123
5.4.2.	Simulacioni rezultati ponašanja FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja.....	126
5.4.3.	Eksperimentalni rezultati ponašanja FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja.....	128
5.4.4.	Uporedna analiza simulacionih i izmerenih vrednosti FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja.....	135
5.5.	UTICAJ MIKROREKONFIGURACIJE FN NIZA NA PROIZVODNJU ELEKTRANE.....	137
5.5.1.	Promene vrednosti električnih veličina na ulazu invertora.....	137

5.5.2.	Promene vrednosti električnih veličina na izlazu invertora.....	141
5.5.3.	Povećanje proizvodnje električne energije u intervalu izvođenja mikrorekonfiguracije	144
5.5.4.	Povećanje proizvodnje električne energije na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou.....	153
5.6.	ANALIZA REZULTATA MIKROREKONFIGURACIJE	157
6.	ZAKLJUČAK.....	161
7.	LITERATURA.....	167
8.	PRILOG.....	175

Lista simbola

SOLARNE VELIČINE

- θ – upadni ugao sunčevih zraka,
 λ – talasna dužina svetlosti,
 Φ – fluks fotona,
 E_f – energija fotona,
 $E_{idealno}$ – energija proizvedena od strane FN panela pod idealnim uslovima,
 E_{EDS} – električna energija predata u elektrodistributivni sistem,
 F_f – spektralno zračenje fotona,
 G – gustina snage zračenja svetlosnog izvora,
 G_f – gustina snage fotona,
 G_{sunca} – gustina snage zračenja Sunca po Stefan-Boltzmanovoj jednačini,
 G_h – zračenje koje dospe na horizontalnu zemljinu površinu,
 G_{FNP} – zračenje koje dospe na fotonaponski panel,
 H – gustina snage fotona,
 H_g – globalna energija zračenja (globalno ozračenje) FN panela,
 H_{gh} – ozračenje horizontalno postavljenog FN panela,
 H_{gnu} – povećanje ozračenja usled nagnutosti FN panela,
 H_{gds} – gubitak ozračenja usled dalekog senčenja,
 H_{gbs} – gubitak ozračenja usled bliskog senčenja,
 H_{glAM} – gubici ozračenja nastali usled refleksije,
 H_{geff} – globalno ozračenje koju FN paneli pretvaraju u električnu energiju,
 R – rastojanje između Zemlje i Sunca,
 T_S – prosečna temperatura površine Sunca.

SIMULACIJE

- γ – faktor idealnosti PN spoja,

Lista simbola

D_p	– difuziona konstanta šupljina,
D_n	– difuziona konstanta elektrona,
G_{ref}	– zračenje definisano za referentne uslove,
L_p	– difuziona dužina šupljina,
L_n	– difuziona dužina elektrona,
M	– broj FN panela u nizu pri simulaciji,
n	– broj FN panela u senci pri simulaciji,
N	– broj osunčanih FN panela pri simulaciji,
n_p	– koncentracija manjinskih nosilaca, elektrona, u P tipu poluprovodnika,
p_n	– koncentracija manjinskih nosilaca, šupljina, u N tipu poluprovodnika,
P_r	– snaga FN panela pri referentnim uslovima,
R_S	– redna otpornost FN panela,
R_p	– paralelna otpornost FN panela,
T_r	– temperatura definisana za referentne uslove,
T	– temperatura FN ćelije.

FN PANEL

γ_p	– temperaturni koeficijent snage FN panela,
η_{STC}	– stepen korisnog dejstva FN panela pri STC,
I_m	– struja FN panela u tački maksimalne snage,
I_{ks}	– struja kratkog spoja FN panela,
I_{STC}	– struja FN panela pri standardnim uslovima testiranja,
I_{fs}	– fotostruja FN panela,
I_p	– struja kroz paralelni otpor FN panela,
I_d	– struja diode u jedno-diodnom modelu FN panela,
I	– struja FN panela,
I_0	– inverzna struja zasićenja diode,
U_d	– napon diode u jedno-diodnom modelu FN panela,
U_t	– termalni napon diode,
U_m	– napon FN panela u tački maksimalne snage,
U_{ph}	– napon praznog hoda FN panela,
U	– napon FN panela,
U_{STC}	– napon FN panela pri standardnim uslovima testiranja (STC).

FN NIZ/POLJE

E_n	– nominalna energija koju razvija FN polje,
N	– broj instalisanih FN panela u nizu,
N_i	– ukupan broj FN panela u FN polju bez izvođenja

Lista simbola

mikrorekonfiguracije,

N_n	– ukupan broj FN panela u nepromenljivom FN polju,
N_p	– ukupan broj FN panela koji učestvuju u mikrorekonfiguraciji,
N_{minA}	– proračunata vrednos apsolutno minimalnog broja FN panela u nizu,
N_{maxA}	– proračunata vrednos apsolutno maksimalnog broja FN panela u nizu,
S_{FNP}	– površina instalisanih FN panela,
$U_{FNNmin}(T_{max})$	– minimalni napon FN niza pri maksimalnoj temperaturi panela,
$U_{FNNmax}(T_{min})$	– maksimalni napon FN niza pri minimalnoj temperaturi panela,
U_{FNPmin}	– minimalni napon FN panela,
U_{FNPmax}	– maksimalni napon FN panela,
$U_{FNN}(T)$	– napon FN niza pri temperaturi T.

INVERTOR

P_{DCmaks}	– maksimalno dozvoljena snaga na ulazu invertora,
P_{ACnom}	– nominalna izlazna snaga invertora,
$U_{iTMSmin}$	– minimalni napon pri kom invertor još nalazi tačku maksimalne snage,
$U_{iTMSmax}$	– maksimalni napon pri kom invertor nalazi tačku maksimalne snage,
U_{imin}	– minimalni napon pri kome se invertor uključuje,
U_{imax}	– apsolutno maksimalni ulazni napon koji invertor trpi bez oštećenja.

MAKROKONFIGURACIJA

a	– dužina FN polja,
b	– širina FN polja,
P_i	– oznaka podpolja, i-to podpolje FN polja,
S_i	– oznaka FN niza u podpolju, i-ti FN niz,
X	– broj podpolja u FN polju,
Y	– broj FN nizova u FN podpolju.

KONSTANTE

σ	– Stefan-Boltzmanova konstanta,
c	– brzina svetlosti,
G_0	– ekstraterestrialno zračenje,
G_{STC}	– zračenje FN panela pri STC jednaka 1000W/m ² ,
k	– Boltzmanova konstanta,
K	– korekcionni faktor translacije U-I krive FN panela,
h	– Plankova konstanta,
R_{sunca}	– prečnik Sunca,

Lista simbola

- T_{STC} – temperatura FN panela pri STC jednaka 25°C,
 q – jedinično naelektrisanje.

Predgovor

Doktorska teza započinje početnim mislima i pitanjem iz magistarske teze autora ovog rada, a koja je aktuelna od početka razvoja civilizacije, bili mi svesni toga ili ne:

Sunce je Zemlji najbliža zvezda, koja našoj planeti obezbeđuje energiju za opstanak života na njoj. Moglo bi se reći da od Sunca zavisi život na planeti. Da li je zaista tako?

Dugoročno gledano da, kratkoročno ne! Budućnost čovečanstva zavisi od njegovog daljeg ophođenja prema prirodnom okruženju i samom sebi!

Direktno ili indirektno Sunce obezbeđuje svu energiju koja je danas čovečanstvu na raspolaganju. Dosadašnji razvoj čovečanstva (trka za profitom, korišćenje energetske resursa) je dovela ovu civilizaciju na ivicu propasti. Trka sa vremenom radi opstanka čovečanstva je započela davno, kada toga nismo ni bili svesni.

Alarmantna upozorenja naučnika se čuju skoro svaki dan; kroz nekoliko godina klimatske promene se više neće moći zaustaviti! Za 20-tak godina nestaće led sa Arktika, otopiće se glečeri, doći će do povećanja nivoa mora što će ugroziti blizu 800.000.000 ljudi. Usled povećanja prosečne temperature mora i vazduha, promeniće se globalni vetrovi, koji će dublje prodirati ka Zemljinoj severnoj hemisferi, pri čemu će prouzrokovati velike suše. Posledica suša su požari, umanjeni prinosi. Na drugim mestima će se javljati prekomerne padavine, koje će prouzrokovati poplave, uništene objekte i prinose. Koje su posledice? Zaključak neka donese čitalac ovih redova!

Korišćenje obnovljivih izvora energije je jedna od malih šansi za zaustavljanje klimatskih promena. Razvoj novih tehnologija u svim sferama ljudske delatnosti omogućava sve efikasnije korišćenje obnovljivih izvora energije. Među ove izvore

spada i solarna energija, koja se prvenstveno koristiti za pretvaranje u toplotnu i/ili električnu energiju. Treći vid korišćenja solarne energije je bez transformacije energije, pri čemu se primenjuje usmeravanje svetlosti.

Ova doktorska teza se u širem smislu bavi pretvaranjem solarne energije u električnu, koju nazivamo fotonaponsko (FN) pretvaranje energije. Zbog toga će nadalje ukratko biti opisano trenutno stanje u FN industriji na svetskom nivou i u Evropi.

Kraj prve i početak druge dekade ovog veka je doneo procvat u primeni FN tehnologije. Ovo se prvenstveno može tumačiti drastičnim padom cene FN ćelija, panela. U zadnjih šest do sedam godina cena se smanjila desetostruko! Samo u 2012. godini cena se smanjila za 50% [1]. Pored pada cena poklopile su se i druge okolnosti. U nekim zemljama je cena električne energije dobijena iz individualnih FN sistema postala jeftinija od cene električne energije koja važi na tržištu (primer Nemačke). Zemlje u ubrzanom razvoju, kao što su Indija i Kina, takođe doprinose značajnom povećanju kapaciteta instalisane snage FN sistema.

Za analiziran vremenski interval potrošnja silicijuma (osnovni materijal za izradu FN ćelija) se povećao 10 puta, tako da je početkom 2012. godine iznosio 201.000 tona. Nasuprot ukupnoj potrošnji, specifična potrošnja (težina po instalisanoj snazi, t/MW) se smanjila za oko 9 puta. 2012-te godine ukupni kapacitet fabrika koji proizvode FN ćelije je iznosio oko 310.250 tona.

U 2014. godini prvih deset fabrika rangiranih na osnovu prodaje FN ćelija, panela su redom: TRINA SOLAR (Kina), YINGLI SOLAR (Kina), CANADIAN SOLAR (Kina), HANWHA SOLAR (Kina), JINKO SOLAR (Kina), JA SOLAR (Kina), SCHARP (Japan), RENESOLAR (Kina), FIRST SOLAR (Sad) i KYOCERA (Japan).

Ukupna instalisana snaga FN elektrana na svetu, koje su po današnjim kriterijumima na kraju svog životnog veka (instalisan daleke 1995. godine) iznosi oko 600MW. Sve do 2005. godine ukupna instalisana snaga FN elektrana sporo raste na godišnjem nivou. Na kraju te godine ukupna instalisana snaga na svetskom nivou dostiže vrednost od oko 5.400 MW. Posle toga počinje period naglog porasta instalisanih kapaciteta, iz gore opisanih razloga. Krajem 2014. godine procenjen kapacitet instalisane snage FN elektrana je 178.000 MW [2].

Do početka 2015. godine u Evropi su instalisani kapaciteti FN elektrana dostigli snagu od 89GW, s tim da su predviđanja da će do kraja 2019. godine instalisana snaga FN elektrana dostići vrednost od blizu 160GW [103]. Po procenama u Evropi je trenutno instalisano minimalno oko 3.000.000 FN elektrana na stambenim objektima, što podrazumeva snagu elektrane do 10kW.

1. Uvod

1.1. Fotonaponsko pretvaranje – od fotona do električne energije

Sunčeva svetlost je elektromagnetno zračenje. Vidljiva svetlost koju čovekovo oko detektuje je veoma uski deo elektromagnetnog spektra. Elektromagnetni spektar sa delom vidljivog spektra je prikazan na slici 1.1. Elektromagnetni spektar opisuje sunčevu svetlost kao talase koji imaju sopstvenu talasnu dužinu, odnosno frekvenciju. Pored talasne prirode savremena kvantna mehanika sunčevoj svetlosti pridodaje i korpuskularnu prirodu. U kvantnoj mehanici svetlos se posmatra kao paket energije koji se naziva foton i ima značaj kao svaka kvantno-mehanička čestica (elektron, proton, ...).

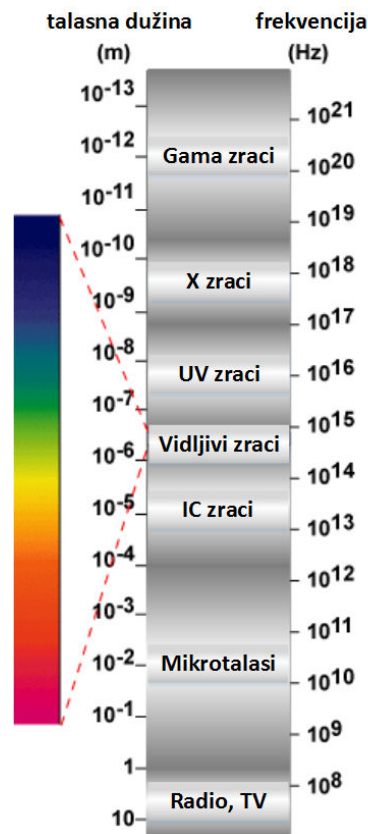
Foton se kao talas opisuje svojom talasnom dužinom λ ili energijom E_f kao čestica. Relacija između talasne dužine i energije fotona je data izrazom

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

pri čemu je h Plankova konstanta koja iznosi $6,626 \times 10^{-34}$ Js ili $4,135 \times 10^{-15}$ eVs, c brzina svetlosti u vakuumu jednaka sa $2,998 \times 10^8$ m/s.

Energija fotona i njegova talasna dužina su obrnuto proporcionalni. Ovo znači da svetlost sa manjom talasnom dužinom, odnosno većom frekvencijom ima veću energiju. Energija fotona se izražava u elektron-voltima [eV] i često se koristi sledeća formula za njeno izračunavanje

$$E_f [eV] = \frac{1,24}{\lambda[\mu]} \quad (1.2)$$



Slika 1.1 – Elektromagnetni spektar

Pored energije i broj fotona je važan faktor pri stvaranju elektrona, odnosno generisanja struje fotonaponske ćelije. S toga se definiše fluks fotona Φ kao broj fotona u jedinici vremena na jediničnoj površini. Fluks fotona ne daje informaciju o energiji fotona. Iz tog razloga se definiše gustina snage fotona G_f kao proizvod fluksa fotona i njegove energije.

$$G_f = \Phi \cdot E_f = \Phi \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3)$$

Prilikom analize osetljivosti fotonaponske ćelije na razne talasne dužine svetlosti koristi se veličina nazvana spektralno zračenje. Spektralno zračenje F_f definiše gustinu snage fotona za određenu talasnu dužinu:

$$F_f = G_f \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} = \Phi \cdot E_f \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} \quad \left[\frac{W}{m^2} \cdot m^{-1} \right] \quad (1.4)$$

Ukupna gustina snage zračenja koju emituje svetlosni izvor se dobija integracijom spektralnog zračenja na svim talasnim dužinama zračenja:

$$G = \int_0^\infty F_f d\lambda \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.5)$$

Sunce je direktni i indirektni izvor energije na Zemlji. Zahvaljujući nuklearnoj fuziji koja se odvija u središtu Sunca, vodonik se pretvara u helijum pri čemu se

oslobađa ogromna količina energije. Snaga koju emituje Sunce iznosi $9,5 \times 10^{25}$ W što se dobija množenjem ukupne gustine snage zračenja koje Sunce emituje i njene površine.

Samo mali deo snage sunčevog zračenja dospe do gornjih slojeva Zemljine atmosfere. Gustina snage zračenja G_0 koja dospe do gornjih slojeva Zemljine atmosfere se računa kao

$$G_0 = \frac{R_{sunca}}{R} \cdot G_{sunca} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.6)$$

pri čemu je R_{sunca} prečnik sunčeve sfere a R rastojanje Zemlje od Sunca.

G_{sunca} je gustina snage zračenja Sunca računata na osnovu Stefan-Boltzmanove jednačine crnog tela:

$$G_{sunca} = \sigma \cdot T_S^4 \quad (1.7)$$

pri čemu je σ Stefan-Boltzmanova konstanta $5,6704 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ a T prosečna temperatura površine Sunca.

Prosečna gustina snage zračenja na vrhu zemljine atmosfere (ekstraterestrično zračenje) iznosi 1367 W/m^2 po Svetskoj meteorološkoj organizaciji (WMO), odnosno 1353 W/m^2 po Američkoj nacionalnoj svemirskoj agenciji (NASA). Ono se menja za oko 1% zbog promene sunčeve aktivnosti i do 7% zbog promene razdaljine Sunce-Zemlja.

Solarno zračenje na vrhu atmosfere je prilično konstantno. Kao što je bilo rečeno, ono prvenstveno zavisi od međusobnog položaja Sunce-Zemlja ali i od aktivnosti Sunca. Zračenje koje dospe na zemljinu površinu, odnosno na površinu solarnog konvertora energije, veoma je promenljivo. Promena se ogleda u varijaciji intenziteta zračenja tokom vremena na nekoj lokaciji. Istovremeno, zračenje se menja u zavisnosti od mesta do mesta na zemljinoj površini. Na prvom mestu, ovo promenljivo zračenje posledica je zemljine atmosfere i dešavanja u njoj. Pored zemljine atmosfere, koja deluje kao prirodni filter na sunčeve zrake, na veličinu zračenja koja dospe na solarni konvertor utiču neki prirodni faktori kao i čovekova aktivnost.

Slika 1.2 prikazuje put sunčevih zraka od Sunca do površine solarnog konvertora, fotonaponskog panela (FNP), koji vrši fotonaponsko pretvaranje solarne u električnu energiju.



Slika 1.2 – Od fotona do električne energije

Od Sunca do Zemlje slabljenje gustine zračenja je obrnuto proporcionalno sa rastojanjem posmatrane tačke i Sunca, jednačina (1.6). U slučaju Zemlje posmatrana tačka je vrh atmosfere, gde je prosečna vrednost gustine zračenja, ekstraterestričnog zračenja označenog sa G_0 , 1367 W/m^2 . Usled uticaja atmosfere (ponaša se kao filter) u proseku 50% zračenja koje se meri na vrhu atmosfere dospe do zemljine površine. Dospelo zračenja na zemljinu površinu se definiše kao gustina zračenja na

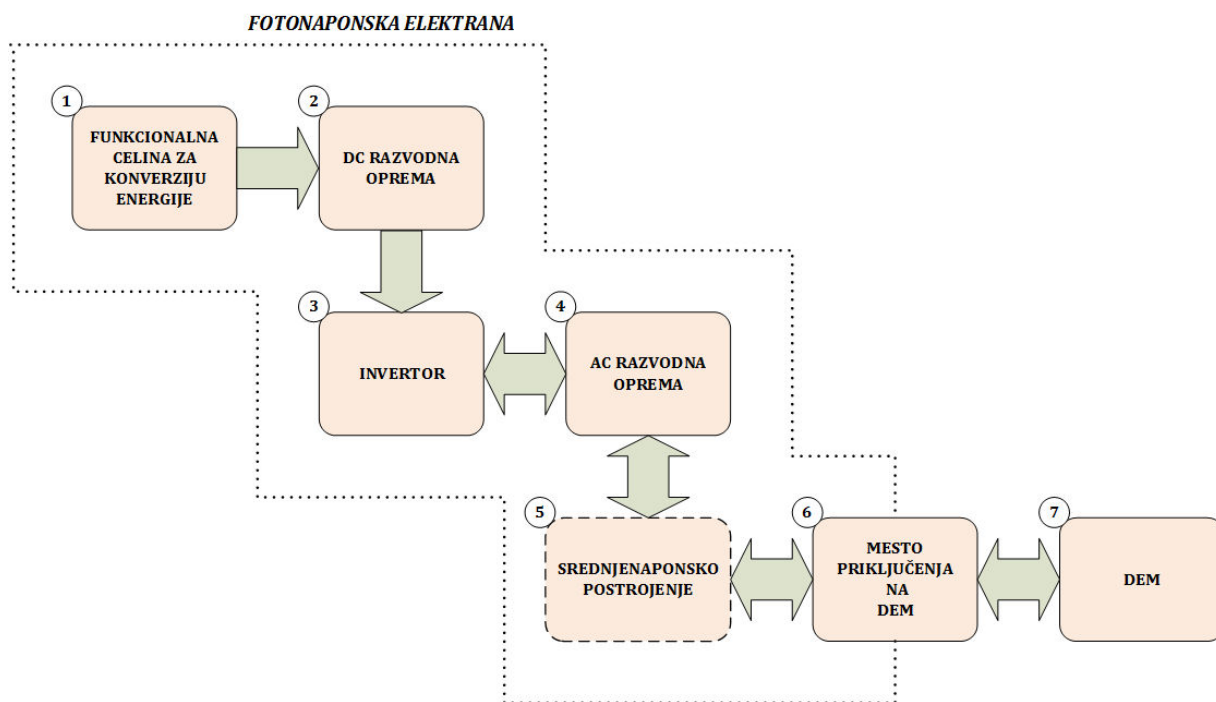
horizontalnu površinu i na slici 1.2 je označeno sa G_h . Ovo zračenje pored uticaja atmosfere zavisi i od geografske lokacije (geografska širina i dužina), upadnog sunčevog ugla, zagađenja vazduha. U zavisnosti od prirodnog okruženja, lokacije i noseće konstrukcije FNP (načina postavljanja FNP) gustina zračenja G_{FNP} koja dospe na FN panel je jednaka ili veća od gustine zračenja na horizontalnu površ G_h . Kao što je rečeno FN panel konvertuje solarnu energiju u električnu energiju. Efikasnost konverzije zavisi od stepena korisnog dejstva FN panel, kao i od okruženja u kom se nalazi fotonaponski panel. U idealnom okruženju fotonaponski paneli proizvedu određenu količinu jednosmerne električne energije, koja se naziva idealna električna energija FN panela, na slici 1.2 označena sa $E_{idealno}$. U distributivnu električnu mrežu se isporuči električna energija količine E_{EDS} . Za koliko će biti isporučena energija manja od idealne proizvodnje zavisi od ukupnih električnih gubitaka u FN elektrani. Ovi gubici zavise od koncepcije izgradnje FN elektrane, kvaliteta i efikasnosti ugrađenih komponenti, međusobne usaglašenosti komponenti, okruženja u kome se komponente nalaze (senčenje, zaprljanost FN panela, temperatura okoline, itd.) i kvaliteta projektovanja.

1.2. Predmet i cilj istraživanja

Prethodno podpoglavlje u najširem smislu ukratko opisuje jednu relativno novu oblast, fotonaponsko pretvaranje energije. Predmet istraživanja doktorske teze je jedan mali deo iz ove oblasti.

Pravac istraživanja je donekle definisan samim naslovom. Donekle, zato što je **fotonaponski sistem** (FNS) kompleksan elektroenergetski objekat sačinjen od više međusobno zavisnih blokova. Pomenuti blokovi se sastoje od više samostalnih funkcionalnih celina, čije su karakteristike i radne funkcije u okviru jednog bloka međusobno usklađene. Funkcionalne celine u okviru međusobno zavisnih blokova su prikazane na slici 1.3, dok će njihov detaljan opis biti prikazan u narednom poglavlju. Fotonaponski sistem, odnosno fotonaponska elektrana se sastoji iz sledećih funkcionalnih celina:

- ① funkcionalna celina za konverziju energije (FN paneli),
- ② DC razvodna oprema,
- ③ inverter za fotonaponske sisteme,
- ④ AC razvodna oprema,
- ⑤ srednjenaponsko postrojenje,
- ⑥ mesto priključenja na električnu mrežu,
- ⑦ električna mreža.



Slika 1.3 – Funkcionalne celine fotonaponske elektrane

Ovaj rad se ponajviše fokusira na jednu funkcionalnu jedinicu, fotonaponske panele (FNP).

Fotonaponski sistem, kao postrojenje za generisanje električne energije iz solarne energije je umnogome zavistan i istovremeno veoma osetljiv na uticaje okruženja. Kada se govori o spoljnim uticajima okruženja i predmetu istraživanja ovog rada, prvenstveno se misli na uticaj prirode, mada se ne mogu zanemariti ni uticaji čiji je uzročnik čovekova aktivnost. Svi ovi uticaji se na neki način moraju “integrisati” u blokove FN sistema, odnosno funkcionalne jedinice. Integracija znači njihovo razmatranje, uzimanje u obzir prilikom planiranja, projektovanja, izvođenja i analize rada FN sistema. Jedan od tih uticaja je sadržan i u naslovu rada i glasi; *varijacija sunčevog zračenja*.

Predmet istraživanja ovog rada u širem smislu je uticaj spoljne sredine na funkcionalnu jedinicu FN sistema, odnosno istražuje se uticaj promenljivog zračenja na rad FNS.

Zašto se istražuje uticaj promenljivog zračenja i uopšte zračenja na rad FNS? Odgovor je veoma jednostavan! Svako energetsko postrojenje ima ulazni resurs, energent koji troši, radi pretvaranja u korisnu energiju potrebnu za svakodnevnu ljudsku aktivnost. Energent koji troši FNS je solarne energija, odnosno sunčevo zračenje. Solarne energije se javlja periodično, stohastički, sa promenljivim intenzitetom i ne može se skladištiti. Pošto solarne energije nema karakter konstantnog izvora energije, javlja se potreba za ublažavanjem uticaja nabrojanih

faktora na rad FNS. S toga ovaj rad istražuje uticaj solarnog zračenja kao promenljivog izvora energije na rad FNS.

Cilj istraživanja ovog rada je smanjenje uticaja promenljivog zračenja na rad FNS. Zbog toga se predlaže nova metoda analize rada FNS u uslovima promenljivog zračenja.

Predmet i cilj istraživanja je dosad razmatran sa tehničkog aspekta. Rezultat istraživanja sa tehničkog aspekta treba da bude smanjenje gubitaka snage u razmatranom funkcionalnom delu FNS, a samim tim i smanjenje gubitaka snage u celom FNS. Smanjenje gubitaka snage čak i za nekoliko procenata, za rezultat ima povećanje faktora performanse FNS, što je i dalje tehničko pitanje. Međutim, zbog načina definisanja faktora performanse FNS, njegovo povećanje znači i povećanje ekonomske dobiti za investitora. Ako se zna, za razliku od države, da se investitor opredelio za izgradnju FNS najverovatnije iz čisto ekonomskih razloga, onda svako istraživanje u cilju povećanja faktora performanse FNS nije samo čisto tehničkog karaktera! Tim pre, pošto izgradnja FNS zahteva velika ulaganja, pa se prilikom projektovanja mora voditi računa o međusobnom uticaju blokova, funkcionalnih jedinica i spoljašnjih uticaja, da bi sistem optimalno funkcionisao. Optimalno funkcionisanje znači minimiziranje gubitaka u svim delovima FNS, što automatski dovodi do maksimiziranja profitabilnosti postrojenja.

1.3. Metod analize rada

Metod je u teoriji saznanja sistematski, objektivan način dolaska do nedvosmislenog odgovora na postavljene hipoteze. Naučna metoda označava proces kojim naučnici dolaze do spoznaja o određenim fenomenima putem postavljanja pretpostavki te njihovog proveravanja kroz eksperimente [3–4]. Da bi imao naučni karakter, istraživački metod mora biti zasnovan na prikupljanju primetne, empirijske i merljive evidencije [5]. Naučni metod je: „metod postupaka koji su osobeni za prirodne nauke od 17. veka, i koji se sastoje od sistematskih posmatranja, merenja i eksperimenta, kao i formulacije, testiranja i menjanja hipoteza“ [6].

Sistemska analiza (grčki *ανάλυση* – rastvoriti) je metodološki postupak dekompozicije nekog sistema na podsisteme (komponente) sa ciljem da se prouči njihov međusobni uticaj i rad.

Dakle metod analize rada FNS drugim rečima je postavljanje teorijske pretpostavke (hipoteze), pri čemu se do nedvosmislenog rešenja dolazi sistematski uz dekompoziciju sistema na jednostavnije sastavne delove. Sistematsko rešenje podrazumena posmatranje, identifikaciju problema, merenje, eksperimente,

formulacije i testiranja. Po potrebi moguća je i korekcija hipoteze radi postavljanja teorije.

Hipoteza:

Moguće je izraditi adekvatan metod analize rada FNE u uslovima varijacije sunčevog zračenja radi smanjenja gubitaka u elektrani, odnosno povećanja faktora performanse FNS.

Postavljena hipoteza će biti odbranjena metodološki i sistemskom analizom jednog dela FNS (dekompozicija sistema):

- ***posmatranje problema:* dosadašnje iskustvo u projektovanju i izvođenju FNS,**
- ***identifikacija problema:* uticaj varijacije sunčevog zračenja na rad FNS,**
- ***proučavanje problema:* korišćenje simulacije i proučavanje dobijenih rezultata i upoređivanje sa realnim stanjem,**
- ***merenje:* merenja u FN elektrani na FTN sa profesionalnim uređajem za ispitivanje karakteristika FN panela, uređajem za merenje kvaliteta električne energije, i samostalno izrađenim uređajem,**
- ***eksperiment i testiranje:* hardver za merenje i smanjenje uticaja varijacije sunčevog zračenja i ispitivanje u realnim uslovima na "živom" sistemu,**

Posebni ciljevi i zadaci istraživanja:

1. Definisane koncepta smanjenja uticaja sunčeve varijacije putem električnog povezivanja FN panela bez naknadnog prevezivanja istih (makrokonfiguracija), i povezivanja sa naknadnim prevezivanjem (mikrorekonfiguracija);
2. Predlaganje mogućih načina makrokonfiguracije u zavisnosti od položaja prepreka koji izazivaju varijacije sunčevog zračenja;
3. Utvrđivanje mogućnosti smanjenja uticaja varijacije sunčevog zračenja na rad fotonaponske elektrane sa string invertorom putem makrokonfiguracije;
4. Istražiti mogućnosti smanjenja uticaja varijacije sunčevog zračenja putem mikrorekonfiguracije;
5. Predložiti nov način mikrorekonfigurisanja u cilju povećanja proizvodnje FN elektrane.

1.4. Pregled postojeće literature iz oblasti rada fotonaponske elektrane u uslovima varijacije sunčevog zračenja

Od 80-tih godina prošlog veka započinje ubrzan razvoj fotonaponske industrije. Od tog trenutka, pa sve do danas, istražuju se i stalno se poboljšavaju performanse svih funkcionalnih celina FN elektrane. Neki postavljeni principi na početku ubrzanog razvoja, važe i danas. U svakom slučaju, krajnji rezultat svih istraživanja doprinosi povećanju proizvodnje FN sistema. Kao što će se u narednim poglavljima videti, jedan od velikih problema u radu FN elektrana predstavlja varijacija dospelog sunčevog zračenja na površinu fotonaponskog panela [7]. Ovo poglavlje opisuje jedan mali ali noviji deo literature, koji se odnosi na pređašnje spomenuti problem.

1.4.1. Model fotonaponske ćelije/panela

Dosad razvijeni modeli, odnosno ekvivalentne šeme FN ćelija su prikazane u tabeli 3.1. Prikazane su ekvivalentne šeme FN ćelija koje su bazirane na poluprovodničkom PN spoju. Detaljan model fotonaponske ćelije, odnosno panela koji se koristi u ovom radu je prikazan u 3. poglavlju.

Idealni model FN ćelije ima najjednostavniju ekvivalentnu šemu [8], [9], [102]. Elementi šeme su strujni izvor i poluprovodnička dioda. Strujni izvor, čija je struja srazmerna solarnom zračenju, generiše struju samo kada je FN ćelija osvetljena. Dioda u ekvivalentnoj šemi definiše FN ćeliju sačinjenu od PN poluprovodničkog spoja. Idealni model FN ćelije ima tri nepoznata parametra koje treba proračunati. Ovaj model se ne koristi pri istraživanjima jer ima malu tačnost rezultata.

Svi naredni modeli koji su prikazani u tabeli 3.1 pored elemenata idealnog modela imaju dodatne elemente. U zavisnosti od modela, to su redna otpornost, paralelna otpornost, kapacitivnost diode, dodatna dioda i efektivna otpornost. Najbolji model, što se tačnosti tiče, je dvo-diodni model sa 7 nepoznatih parametara [10], [11], [12], [13], [14]. Ovaj model je i najteži za analizu, s obzirom na broj nepoznatih. Prilikom istraživanja dinamičkih karakteristika FN ćelija, koristi se jedno-diodni dinamički model [15], [16]. Ubedljivo najviše primenjivana ekvivalentna šema FN ćelije za modelovanje je jedno-diodni model [10], [17], [18], [19], [20]. Jedno-diodni model uvažava postojanje redne i paralelne otpornosti FN ćelije.

Tabela 3.1 – Postojeće ekvivalentne šeme fotonaponske ćelije

Model FN ćelije	Ekvivalentna šema	Broj parametara	Tačnost
Idealni model		3	mala
Model sa rednim otporom		4	dobra
Jedno-diodni model		5	vrlo dobra
Jedno-diodni dinamički model		6	vrlo dobra
Dvo-diodni model		7	odlična
Efektivni model		4	dobra

Jedno-diodni matematički model fotonaponske ćelije ili panela je opisan nelinearnom, transcendentnom funkcijom. U jednačini jednodiodnog modela figuriše 5 nepoznatih parametara; fotostruja generisana usled insolacije ćelije, inverzna struja zasićenja, faktor idealnosti FN ćelije, redna i paralelna otpornost. Pošto ne postoji eksplicitno analitičko rešenje jednačine koja opisuje FN ćeliju, do nepoznatih parametara se dolazi na različite načine; primenom numeričke metode, optimizacionim metodama, ekstrapolacijom ili kombinacijom navedenih metoda [10], [21], [22]. Najčešće primenjivana numerička metoda je Newton-ova metoda [15].

Ekstrapolacija krive podrazumeva određivanje parametara modela tako da se strujno naponska karakteristika (I-U karakteristika) ćelije poklapa u tri tačke sa karakteristikom dobijenim ispitivanjem, odnosno merenjima [23], [24]. Tačke poklapanja na I-U karakteristici su struja kratkog spoja ($0, I_{ks}$), tačka maksimalne snage (U_m, I_m) i napon praznog hoda ($U_{ph}, 0$).

U nekim situacijama, bez obzira na koji način se rešavaju nepoznati parametri, prilikom njihovog određivanja koriste se fabrički podaci FN ćelije, odnosno panela, koji su dobijeni merenjem. Merene vrednosti su napon praznog hoda, struja kratkog spoja, napon pri maksimalnoj snazi i struja pri maksimalnoj snazi [25], [26].

Zanemarivanje paralelne otpornosti FN panela je čest slučaj pri određivanju vrednosti nepoznatih parametara. Daljim uvođenjem novih koeficijenata u jednačinu FN panela i zanemarivanjem odgovarajućih veličina, lako se nalaze novo uvedeni koeficijenti [27].

Fotostruja generisana usled insolacije ćelije je praktično jednaka sa strujom kratkog spoja. Izraz za inverznu struju zasićenja je takođe poznat. Na osnovu merenja je utvrđeno da faktor idealnosti 1,35 za silicijumske ćelije je najodgovarajuća vrednost [24]. Znajući struju kratkog spoja, inverznu struju zasićenja i faktor idealnosti može se odrediti redna i paralelna otpornost FN ćelije, panela [28].

Karakteristika FN panela izrazito zavisi od insolacije i temperature. Najbitnija izlazna veličina FN panela je snaga. Snaga je proporcionalna sa zračenjem. Sa porastom temperature snaga se smanjuje i obrnuto. Da bi se istražila dinamička promena karakteristike FN ćelije pri realnim uslovima, potrebno je sve izraze napisati u funkciji zračenja i temperature. Ovi izrazi su inverzna struja zasićenja, struja kratkog spoja i napon praznog hoda [9], [29], [30].

Drugi način dobijanja dinamičke karakteristike FN ćelije, panela je putem translacije karakteristike [27], [31]. Translira se karakteristika čiji su parametri određeni pri referentnim uslovima. Ti referentni uslovi su najčešće jednaki sa standardnim uslovima testiranja FN panela, pri čemu važi da je zračenje $1000\text{W}/\text{m}^2$, temperatura ćelije 25°C i indeks prelamanja svetlosti kroz atmosferu $AM=1,5$. Translacija se izvodi pomoću nekoliko jednačina, koje definišu karakteristične tačke translirane krive; tačku kratkog spoja, tačku praznog hoda, tačku maksimalne snage i bilo koju tačku (U, I) na krivi.

1.4.2. Senčenje FN panela

Negativan uticaja senčenja FN polja je možda najveći problem koji se javlja pri radu FN elektrane. Pojava senke na FN panelima drastično smanjuje njihovu snagu. Što se duže javlja senčenje to su veći gubici u proizvodnji elektrane. Pored uticaja na

FN panele, veličina senčenja može imati uticaj i na izbor invertora, odnosno na količnik snage FN panela i izlazne snage invertora [32].

Senčenje FN panela, odnosno FN polja menja izlaznu karakteristiku FN panela. Javlja se više maksimuma na karakteristici [33]. Broj maksimuma zavisi od složenosti senke, odnosno od broja različitog nivoa zračenja na FN panelima. Sa promenom karakteristike FN panela, menja se napon praznog hoda i struja kratkog spoja [34]. Uticaj senčenja na FN polje nije linearno, što otežava predikciju proizvodnje FN elektrane [35]. Pored smanjenja snage FN polja, senčenje izaziva i termalni stres kod FN ćelija [36], koji se u velikoj meri sprečava ugradnjom bajpas dioda.

Poznato je da izlazna snaga FN panela linearno zavisi od zračenja. Istovremeno snaga FN panela zavisi i od temperature panela. Jednačina koja opisuje ove zavisnosti glasi

$$P = P_r \cdot \frac{G}{G_r} \cdot [1 + \gamma(T - T_r)/100] \quad (1.8)$$

Pri čemu su P_r , G_r i T_r redom snaga, zračenje i temperatura pri nekim uslovima, najčešće referentnim, koje nazivamo standardni uslovi testiranja FN panela. γ je temperaturni koeficijent snage, izražen u $W/^\circ C$. Pri senčenju izraz 1.8 se modifikuje, do čega se došlo empirijski [37].

Problem senčenja je najčešći kod FN elektrana u urbanim sredinama zbog prepreka kao što su okolne zgrade, drveće, kablovi, antene, dimnjaci, stubovi i slično [38]. Nasuprot ovome, kod elektrana velikih snaga ove prepreke ne postoje ili su beznačajne. Ovakve elektrane se prostiru na velikim površinama i kod njih uticaj promenljivog zračenja se javlja usled oblačnosti [39].

1.4.3. Razni načini smanjenja uticaja senčenja na FN panel

Smanjenje uticaja varijacije sunčevog zračenja na proizvodnju FN elektrane se istražuje od samog početka razvoja fotonaponskog pretvaranja energije. Istraživanja se sprovode kako kod FN sistema koji su spojeni na mrežu, tako i kod samostalnih FN sistema [40]. Postoje razni načini smanjenja uticaja senčenja.

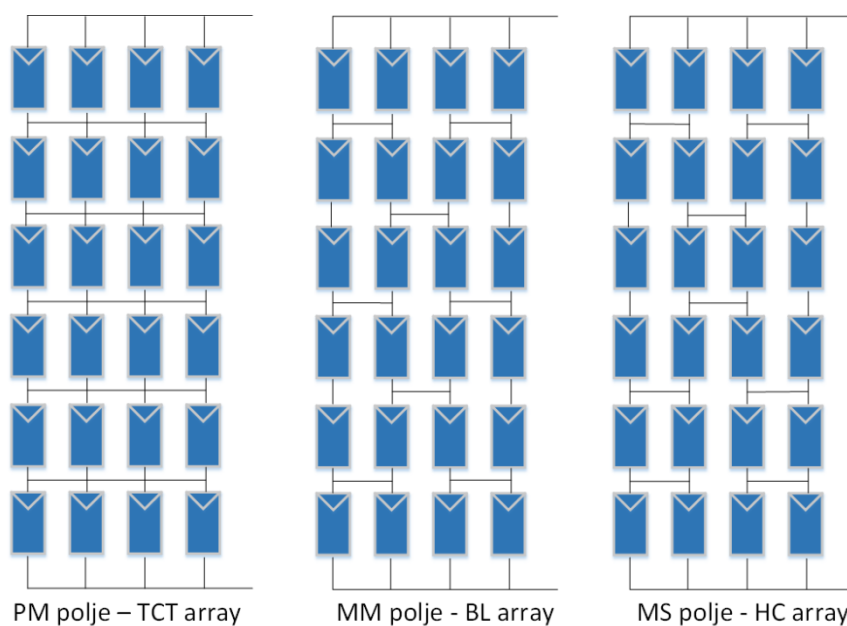
Smanjenje uticaja senčenja na FN sistem počinje već prilikom proizvodnje FN panela, tako što se ugrađuju bajpas diode. U zavisnosti od snage panela standardno se ugrađuje od 3 do 4 bajpas diode. Različiti broj i način povezivanja bajpas diode unutar FN panela omogućavaju manji uticaj senčenja i istovremeno štite FN ćelije u panelu [40], [41], [42].

Najjeftiniji način smanjenja uticaja senčenja na rad FN elektrane je ako se optimalno izaberu, projektuju, fizički postave i povežu glavne komponente FN sistema; FN paneli i invertori [42]. Dobar razmeštaj FN panela na za to predviđenom prostoru, naročito ako postoji problem sa senčenjem, je preduslov za zadovoljavajuću proizvodnju. Izbor odgovarajućeg tipa invertora je takođe veoma bitan. Problem

senčenja se može ublažiti izborom invertora. Najčešće je to sa invertorom takozvane string koncepcije, koji po pravilu imaju nekoliko nezavisnih jednosmernih ulaznih kola, takozvanih MPPT ulaza (engl. Maximum Power Point Tracking). Od nedavno su se na tržištu pojavili i mikroinvertori kod kojih je koncept povezivanja jedan inverter jedan FN panel. Ovaj koncept omogućava da invertori čiji paneli nisu u senci rade sa maksimalnom snagom koja je definisana trenutnim ambijentalnim uslovima.

FN polje se stvara na način da se prvo formira redna veza FN panela (FN string). Zatim se, u zavisnosti od ulazne struje DC/AC pretvarača, dva ili više stringa povezuju paralelno. Na ovaj način se dobija takozvano redno-paralelno (RP) polje. Puno radova je objavljeno na temu uticaja senčenja na RP polje [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51]. Kada FN polje radi u nepovoljnim uslovima (postoji senčenje), formiranjem međuveza između FN panela u polju, moguće je smanjiti nepovoljan uticaj senčenja. Postoji nekoliko načina formiranja međuveza, a tri najzastupljenije su prikazane na slici 1.4 [52]. Polje sa potpunom međuvezom (PM polje) je prikazano na levoj strani slike 1.4. Engleski naziv ovog načina spajanja je Total Cross-Tied (TCT). Polje sa mostnom međuvezom (MM polje) se vidi u sredini pomenute slike (engl. Bridge-Linked (BL). FN polje takozvano medno saće (MS polje) ili na engleskom Honey-comb (HC) je vidljivo sa desne strane slike 1.4. Pored tri osnovne vrste polja (PM, MM i MS) postoje i razne modifikacije ovih polja [53].

Efekti smanjenja uticaja senčenja se mogu ostvariti i putem invertora, raznim hardverskim rešenjima [54]. Sa jedne strane razvijaju se različite topologije DC/DC i DC/AC pretvarača, koji se nalaze u samom invertoru. S druge strane razni načini grupisanja invertora sa odgovarajućim upravljanjem takođe mogu povećati efikasnost celog sistema.



Slika 1.4 – Tri osnovna polja sa međuvezama

Jedan od načina grupisanja invertora je takozvani TEAM koncept [55]. Ovaj koncept se sprovodi ako u FN sistemu postoji više invertora. U zavisnosti od trenutne raspoložive snage grupe FN panela, oni se prevezuju na odgovarajuće invertore, tako da invertori rade sa najvećom efikasnošću.

Postoji i softversko smanjenje uticaja senčenja. To je danas standard kod svih DC/AC solarnih pretvarača. Naime, između FN polja i invertora se integriše DC/DC pretvarač kojim se softverski upravlja tako. Tako se za bilo koje ambijentalne uslove crpi maksimalna snaga FN panela. Ovaj proces se naziva nalaženje tačke maksimalne snage (MPPT) i koristi se kako kod sistema spojenih na mrežu, tako i kod samostalnih sistema [28].

Postoje razni algoritmi nalaženja tačke maksimalne snage FN panela, polja. Generalno mogu se podeliti u dve grupe [56]; indirektni MPPT algoritam i direktni MPPT algoritam. Indirektni MPPT algoritam radi na principu nalaženja napona pri maksimalnoj snazi FN polja, dok direktni MPPT algoritam se zasniva na nalaženju tačke maksimalne snage merenjem struje FN polja. Slede nazivi i njihove skraćenice MPPT algoritama, koji će biti nabrojani na engleskom:

- *Perturb & Observe MPPT* (57), [58], [59],
- *Incremental Conductance MPPT (IC MPTT)*, [58], [59], [56],
- *A sliding-mode current based MPPT*, [58],
- *Analog MPPT*, [58],
- *Artificial Intelligence-Based MPPT*, [56],
- *Constant voltage (current) MPPT*, [56],
- *Parasitic Capacity MPPT (PC MPPT)*, [56],
- *Short-Current Pulse Method MPPT*, [60],
- *Open Voltage Method MPPT*, [60],
- *Temperature method MPPT*, [60].

Proizvođači invertora stalno unapređuju metode nalaženja tačke maksimalne snage. U najnovijim inverterima firme SMA Solar Technology MPPT algoritam nalazi stvarni maksimum snage, čak i pri senčenju, kada postoji više maksimuma. Ovaj metod nazivaju OptiTrac Global Peak [61], [62].

Kao što je bilo rečeno u DC/AC solarnim pretvaračima ulazna jedinica je DC/DC pretvarač. Uticaj senčenja se može smanjiti koristeći više i na razne načine povezane DC/DC pretvarače, kome se pridružuje FN polje sa određenim brojem FN panela. Jedan način međusobnog povezivanja je redna veza FN panela, pri čemu se svakom ili grupi panela paralelno vezuje DC/DC pretvarač [45]. Princip rada se zasniva na uravnotežavanju struje (engl. Current Balancing System, CBS) i primena se predlaže kod FN sistema koji se integrišu u zgrade (engl. Building Integrated Photovoltaic, BIPV).

Neki autori, radi smanjenja uticaja senčenja, predlažu stalnu promenu broja FN panela koji se vezuju na DC/DC pretvarače. U sistemu postoji unapred definisan

broj DC/DC pretvarača, dok se prekidačkom matricom ostvaruje pridruživanje različitog broja FN panela ovim pretvaračima [63], [64].

1.4.4. Rekombinacione metode fotonaponskog polja

Rekombinacione metode FN niza/polja su jedan od načina smanjenja negativnog uticaja promjenljivog zračenja, senčenja, na FN polje. Ovaj rad se upravo bavi ovim načinom smanjenja negativnog uticaja senčenja na proizvodnju električne energije. Rekombinacione metode, po autoru ove teze, su podjeljene u dve grupe: makrokonfiguracija i mikrorekonfiguracija. U literaturi se u 90% slučajeva istražuju mikrorekonfiguracione metode, dok se ova teza bavi sa obe metode.

Slika 1.5 prikazuje blok šemu i princip makrokonfiguracije. Makrokonfiguracija podrazumeva da se tokom instalacije FN polja fotonaponski paneli povezuju na način da senčenje ima najmanji negativan uticaj na proizvodnju električne energije. Dakle, varijante makrokonfiguracije se istražuju pre instalacije FN panela i na jedan način povezani FN paneli se više ne prevezuju.

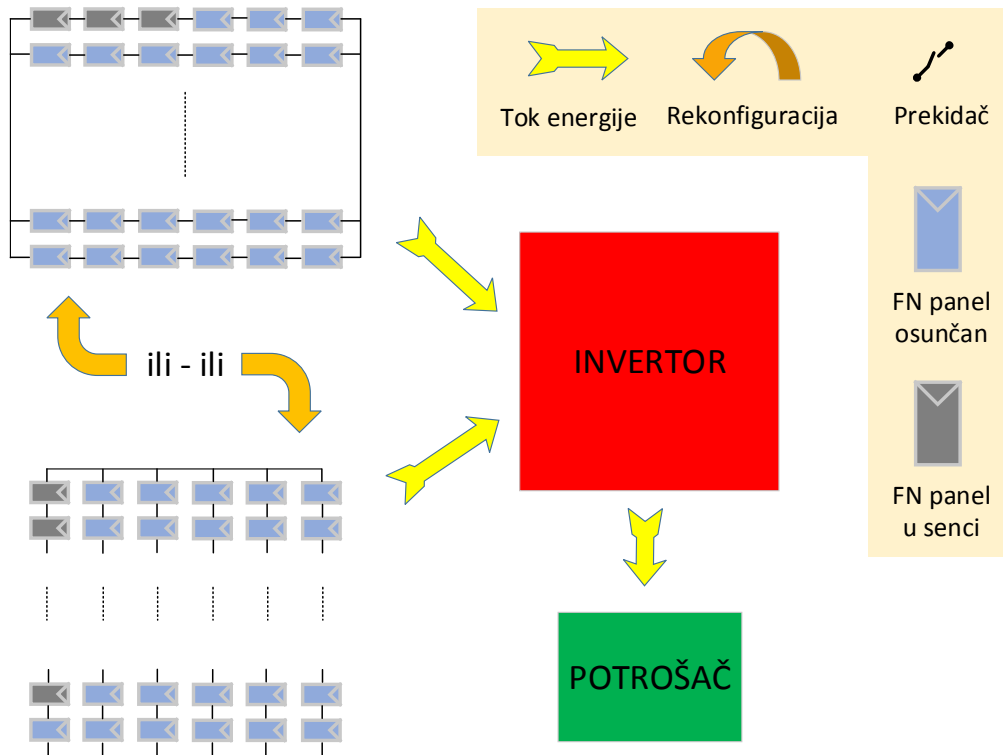
Princip rada i blok šema osnovnih elemenata mikrorekonfiguracije se vidi na slici 1.6. Da bi se ostvarila mikrorekonfiguracija potrebno je formiranje prekidačke matrice. Prekidačka matrica se upravlja odgovarajućim algoritmom. Prekidačka matrica sa algoritmom omogućava prevezivanje, ubacivanje i/ili izbacivanje FN panela iz FN niza/polja, pri čemu se navedene radnje obavljaju tokom rada FN elektrane.

Postoje razni načini rekombinacionih metoda, koji se razlikuju kako po načinu hardverskog rešenja rekombinacije, po principu nalaženja optimalne konfiguracije, tako i po načinu softverskog upravljanja. Najznačajniji hardverski i softverski načini mikrorekombinacionih metoda su prikazani u tabeli 3.2.

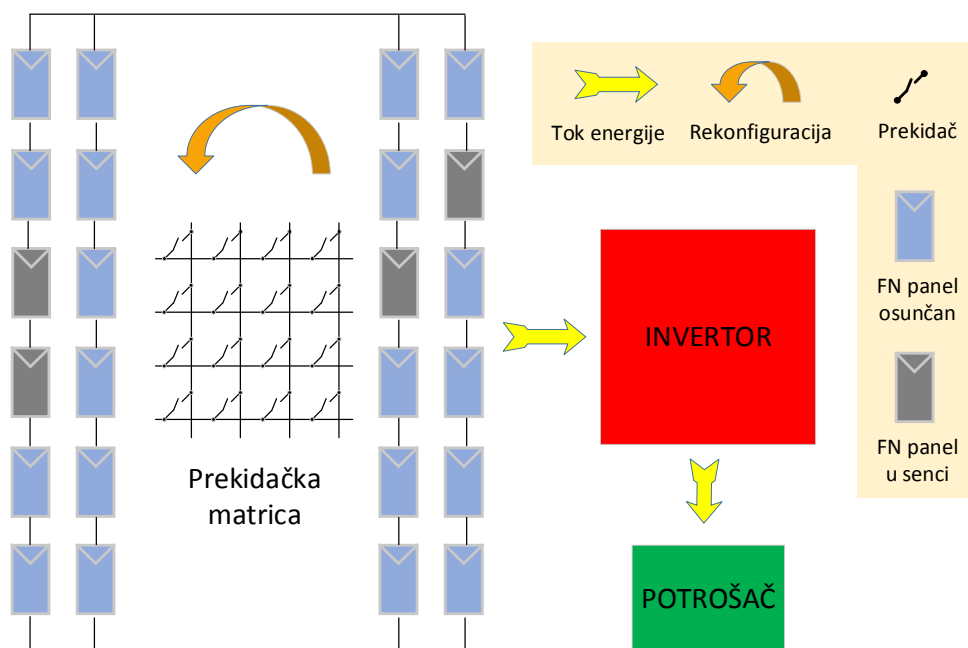
Hardverska podela mikrorekonfiguracije podrazumeva različite načine povezivanja FN panela i formiranja prekidačke matrice. Postoje tri osnovna načina povezivanja FN panela: rekonfigurabilni FN niz (Reconfigurable String, RST), rekonfigurabilno serijsko-paralelno polje (Reconfigurable Serial-Parallel, RSP) i rekonfigurabilno polje sa potpunom međuvezom (Reconfigurable Total Cross-Tied, RTCT). Prekidačke matrice se dele po tipu sklopki na: poluprovodničke, mehaničke i ručne. Svaki način međusobnog povezivanja FN panela se može ostvariti sa bilo kojim tipom prekidačke matrice, odnosno sklopkom.

Algoritam upravljanja sklopkama (poluprovodnička ili mehanička) prekidačke matrice spada u softversku podelu mikrorekonfiguracije. U tabeli 3.3 su date skraćenice za razne algoritme upravljanja koje su podjeljene na osnovu digitalnog ili analognog upravljanja, brzine rada, složenosti algoritma, osobina načina izbora najbolje konfiguracije. PRA algoritam (Programmed Reconfiguration Algorithms)

karakteriše potreba za poznavanjem stanja FN polja u odnosu na senčenje i obično su stanja sklopki predefinisani tabelarno (engl. lookup table) [65].



Slika 1.5 – Princip makrokonfiguracije sa blok šemom osnovnih elemenata



Slika 1.6 – Blok šema osnovnih elemenata mikrrekonfiguracionog kola

Tabela 3.2 – Hardverska i softverska podela mikrorekonfiguracije

HARDVER		SOFTVER
Način povezivanja FN panela	Prekidačka matrica	
rekonfigurabilni FN niz (RST*)	poluprovodnička sklopka	MOSFET
		pol. prov. prekidač
rekonfigurabilno serijsko-paralelno FN polje (RSP*)	mehanička sklopka	kontaktor
		relej
rekonfigurabilno FN polje sa potpunom međuvezom (RTCT*)	ručna sklopka	preklopni
		redni

* skraćena na engleskom, objašnjena u tekstu

ERA algoritam (Exhaustive Evaluation Reconfiguration Algorithms) omogućava formiranje svih mogućih načina rekombinacije FN polja. U nekim slučajevima, da bi se skratilo vreme nalaženja optimalne rekonfiguracije, onemogućene su identične rekombinacione situacije [63]. SRA algoritam (Sorting Reconfiguration Algorithms) se zasniva na principu sortiranja FN panela sa istom primljenom količinom solarnog zračenja. Na ovaj način se smanjuje neusaglašenost među FN panelima, koji nastaje zbog senčenja [66], [67]. DRA algoritam (Distributed Reconfiguration Algorithms) karakteriše veliki broj upravljačkih jedinica. Naime, svakom FN panelu je pridružena jedna upravljačka jedinica [68]. COA algoritam (Classical Optimization Algorithms) je baziran na matematičkoj teoriji optimizacije [69]. CIA algoritam (Computational Intelligence Algorithms) se zasniva na najsavremenijim softverskim upravljanjima, kao što je fuzzy logika, neuralna mreža, evolucioni pristup i slično [70], [71].

Jedan mogući princip rekombinacije je da se svaka FN ćelija, panel može povezati svaki sa svakim [72], [73]. U navedenim radovima rekombinacija je prikazana sa matricom FN ćelija 4x4. Na ovaj način se mogu formirati polja koja su vezana paralelno a zatim redno, s tim da u paralelnim vezama postoji mogućnost vezivanja različitog broja FN panela. Ovo je moguće samo onda ako algoritam za nalaženje optimalne rekonfiguracije može da poveže panele tako da struja svake paralelne veze bude jednaka.

Princip mogućnosti rekonfiguracije svakog FN panela sa svakim se često koristi. Razlike nastaju u algoritmima koji optimiziraju način rekonfiguracije. Neki autori se odlučuju za princip izjednačavanja zračenja [74], [66], [75], [76], [77]. Kod ovakvog načina rekonfiguracije određuje se zračenje svakog FN panela, a njihovo međusobno povezivanje je takvo da svaka paralelna grana u zbiru ima isto zračenje.

Istraživanja na polju rekonfiguracije se izvode i kod samostalnih FN sistema. Kod ovih sistema FN paneli se vezuju na regulator punjenja. Uglavnom kod ovih sistema je broj FN panela znatno manji nego kod sistema koji se direktno povezuju sa distributivnom električnom mrežom. Iz ovog razloga moguće je ostvariti rekombinaciju samo rednom, samo paralelnom ili kombinovanom vezom FN panela [78], [65]. Kod ovakvog načina povezivanja moguće je znatno smanjivanje broja prekidačkih komponenti, koji se koriste pri rekombinaciji.

Jedan od pristupa izvođenju rekombinacije je podela FN polja na dve grupe. U prvoj grupi se nalaze FN paneli koji nisu problematični sa stanovišta senčenja, dok se u drugoj grupi nalaze FN paneli koji se povremeno senče [77], [79], [80]. Na ovaj način se u startu smanjuje broj prekidačkih komponenti. Algoritam nalaženja optimalne rekonfiguracije se bazira na određivanju napona paralelnih grana ili struje svih FN panela. Za optimizaciju rekonfiguracije sa podeljenim FN poljem neki autori koriste neuralne mreže [81], [82].

Rekonfiguracija FN polja sa više invertora (slično TEAM konceptu povezivanja invertora) daje još veću mogućnost za maksimiziranje proizvodnje [67], [83].

Pomoću RST algoritma (engl. Rough Set Theory), koji je razvio poljski naučnik Pawlak, moguće je formiranje dekoderskog logičkog kola, koji ima ulogu upravljanja rekonfiguracionim procesom [84].

1.5. Kratak pregled teze po poglavljima

Predmet i cilj istraživanja, kao i metod rada je objašnjen u podpoglavljima 1.2 i 1.3 ovog uvodnog poglavlja. Nadalje se u kratkim crtama opisuje sadržaj pojedinih poglavlja ove teze.

Drugo poglavlje razrađuje blok šemu FN elektrane, koja je data u uvodnom poglavlju 1.2. Svaka od šest funkcionalnih celina FN elektrane je detaljno opisana. Na ovaj način čitalac se upoznaje sa najosnovnijim celinama FN elektrane. U okviru opisa posebno su istaknuti oni delovi FN elektrane koji imaju dodirnih tačaka sa ovom doktorskom tezom. U nastavku drugog poglavlja razrađuje se problematika senčenja i mogući načini smanjenja negativnog uticaja pojave senke na FN panelima.

Treće poglavlje opisuje sve do sad razvijene modele FN ćelije, odnosno panela. Detaljno se opisuje matematički model koji se koristi u ovoj tezi, a to je jedno-diodni model FN ćelije sa rednim i paralelnim otporom. Prikazan je razvijen model u Matlab simulacionom softveru za potrebe ove teze.

Pošto je metod analize rada elektrane u uslovima varijacije sunčevog zračenja usmeren u pravcu izučavanja različitih načina električnog prevezivanja FN panela, autor je definisao dva osnovna načina prevezivanja:

- **makrokonfiguracija**, koja omogućava povezivanje velikog broja FN nizova (redno-paralelna veza FN panela) bez naknadnog prevezivanja i
- **mikrorekonfiguracija**, koja omogućava povezivanje i naknadno prevezivanje FN panela unutar FN niza.

Četvrto poglavlje razmatra princip i mogućnosti makrokonfiguracije U FN elektrani. Ukratko je opisan softver za predikciju proizvodnje FN sistema, koji je nazvan PVSyst. Date su blok šeme FN sistema koji su analizirani, odnosno na kome je izvedena makrokonfiguracija u PVSyst softveru. Detaljno su opisani rezultati dobijeni simulacijom. Na kraju poglavlja se mogu naći komentari i zaključci u vezi dobijenih rezultata makrokonfiguracije.

Peto poglavlje se bavi mikrorekonfiguracijom. Mikrorekonfiguracija je izvedena na izgrađenoj elektrani FTN-a. Opisuje se problematika senčenja na predmetnoj elektrani, način rešavanja problema, princip mikrorekonfiguracije. Upoređuju se rezultati simulacije i merenja na FN nizu. Prikazani su rezultati mikrorekonfiguracije i dat je komentar na dobijene rezultate.

Šesto poglavlje čini zaključak. U ovom poglavlju se komentarišu dobijeni rezultati ove doktorske teze. Istovremeno se komentarišu i neki radovi koji se bave istom problematikom, a vezano za dobijene rezultate ove teze. Na kraju se daju mogući pravci daljeg istraživanja.

U sedmom poglavlju se nalazi spisak svih radova koji su čitani i analizirani za potrebe ove doktorske teze.

U poslednjem, osmom poglavlju se mogu naći prilozi koji su vezani za pojedina poglavlja teze.

2. FN elektrana i uticaj promene zračenja na proizvodnju

2.1. Oprema FN elektrane

U prethodnom poglavlju prikazana je blok šema FN elektrane sa funkcionalnim celinama (slika 1.3). U ovom poglavlju se detaljnije opisuju te funkcionalne celine, odnosno osnovna oprema FN elektrane. Delovi na nekim slikama ovog poglavlja, koji prikazuju funkcionalne celine FN elektrane, obojeni su različito od sivog. Različito obojeni delovi ukazuju da se u ovom radu upravo razmatraju ti delovi FN elektrane.

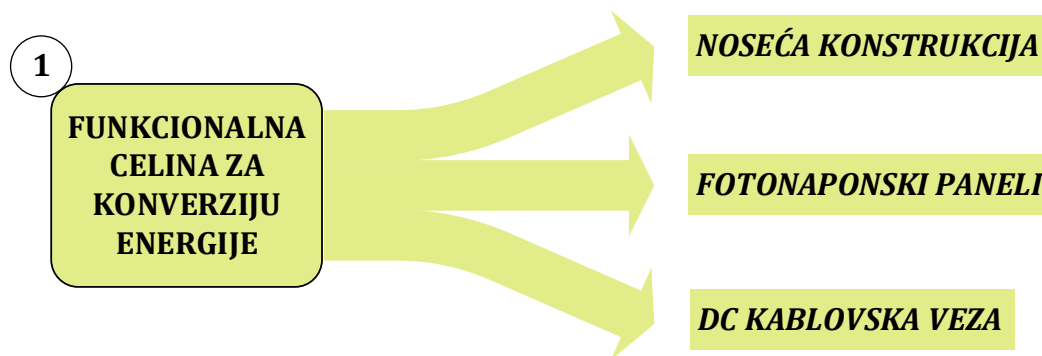
2.1.1. Funkcionalna celina za konverziju energije

Funkcionalna celina za konverziju energije ima zadatak da sa što manje gubitaka prihvati i izvrši konverziju solarne energije u električnu energiju. Slika 2.1 prikazuje sastavne delove ove funkcionalne celine, u koje spadaju:

- noseća konstrukcija FN panela,
- fotonaponski paneli i
- DC kablovska veza za međusobno povezivanje FN panela.

U fotonaponskoj elektrani FN paneli se postavljaju na različite noseće sisteme za montažu, takozvane noseće konstrukcije FN panela. Noseće konstrukcije se postavljaju na zemlju ili na zgrade (krov, fasada). Od vrste noseće konstrukcije direktno zavisi upadna količina solarnog zračenja na FN panel. Naime, pomoću noseće konstrukcije se definiše nagibni ugao FN panela. Između ostalog, od nagibnog ugla

zavisi kolika će biti proizvedena količina električne energije od strane fotonaponske elektrane. Nagibni ugao može biti nepromenljiv ili promenljiv. U prvom slučaju je reč o fiksnoj, a u drugom slučaju o rotirajućoj nosećoj konstrukciji FN panela.



Slika 2.1 – Funkcionalna celina za konverziju energije

Proces pretvaranja sunčeve svetlosti, odnosno energije sunčevog zračenja u električnu energiju se naziva fotonaponsko pretvaranje energije. Ovaj proces zahteva materijale koji imaju mogućnost upijanja sunčevih zraka, koji zatim treba da predaju dovoljno energije elektronima da se oni mogu kretati ka i kroz priključeni potrošač. Potencijalno postoji više materijala koji omogućavaju fotonaponsko pretvaranje energije. Fotonaponsko pretvaranje energije se obavlja u fotonaponskim ćelijama, panelima. Danas se u svetu u 80% slučajeva koriste FN paneli koji su izrađeni od kristalnog silicijuma (poli –ili monokristalni) [85]. Preostali deo otpada na treću generaciju FN panela; tankoslojne FN panele.

U proseku stepen korisnog dejstva najčešće korišćenih FN panela iznosi svega oko 15%. Zbog ove male efikasnosti potrebno je minimizirati gubitke koji nastaju u pojedinim funkcionalnim celinama fotonaponske elektrane. Uglavnom su to električni gubici. Međutim, postoji i druga vrsta gubitaka, kao što su gubici usled senčenja. Gubici usled senčenja se upravo javljaju na FN panelima.

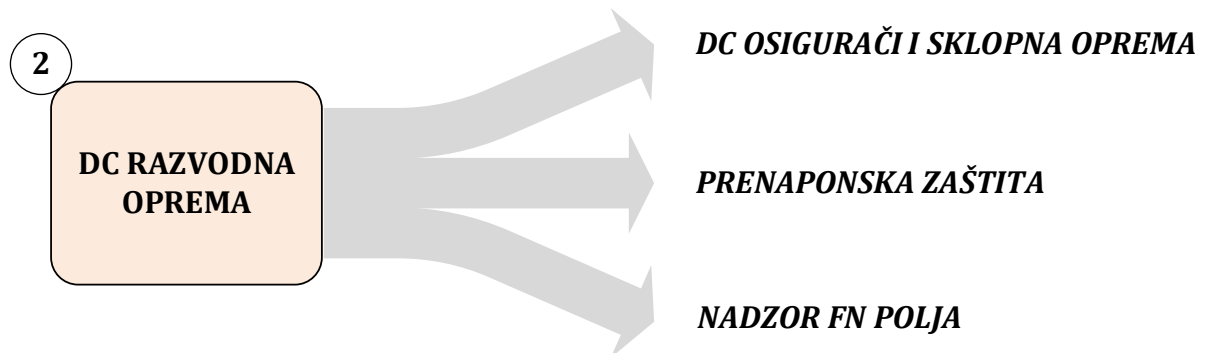
FN paneli se međusobno povezuju sa DC kablovima. Pošto su mesto i uslovi primene FN panela specifični, samim tim su karakteristike DC kablova specifične. Neretko, dužina DC kablova pomoću kojih se formira fotonaponski niz iznosi nekoliko desetina metara. Zbog velikih dužina postoji mogućnost znatnog povećanja električnih gubitaka u DC kablovima. Zbog toga su definisana pravila za izbor preseka DC provodnika u FN sistemima sa stanovišta dozvoljenih električnih gubitaka.

2.1.2. Jednosmerna razvodna oprema

Jednosmerna razvodna oprema u fotonaponskoj elektrani prvenstveno ima ulogu zaštite FN panela. Takođe, ova oprema treba da omogućí galvansko odvajanje

FN polja od DC/AC pretvarača, invertora. Slika 2.2 prikazuje sastavne delove ove funkcionalne celine:

- DC osigurači i sklopna oprema,
- prenaponska zaštita i
- nadzor FN polja.



Slika 2.2 – Jednosmerna razvodna oprema

Kada se više od dva FN niza veže paralelno, neophodna je zaštita FN panela od struje kvara. Istovremeno se štite i DC kablovi, koji povezuju FN panele. Zaštita se ostvaruje DC osiguračima, namenjenim za fotonaponske sisteme. Po pravilu, štite se oba kraja FN niza, pozitivan i negativan. Sklopnu opremu čine prekidači namenjeni za prekidanje jednosmerne struje. Njihova uloga je odvajanje FN polja od ostatka dela elektrane. Deo za nadzor FN polja ne spada u obaveznu opremu FN elektrane. Njegovo postojanje omogućava stalni nadzor FN stringova i brzu intervenciju u slučaju bilo kakvog otkaza opreme na DC strani.

2.1.3. Fotonaponski invertor

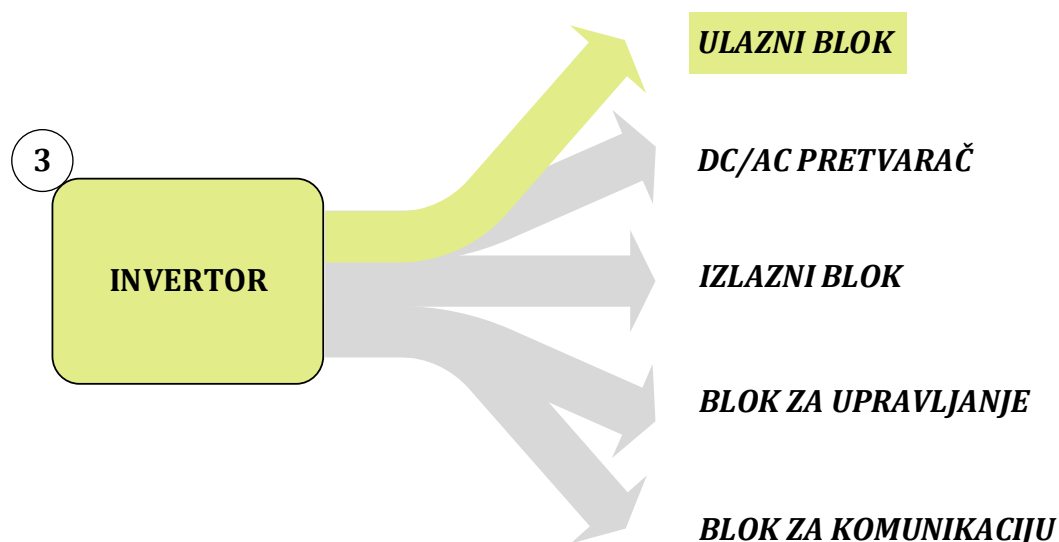
Fotonaponski invertor je “srce” fotonaponskog sistema. Bez njega prestaje konvertovanje jednosmerne energije u naizmeničnu i predaja u distributivnu električnu mrežu. Slika 2.3 prikazuje najosnovnije celine fotonaponskog invertora, u šta spadaju:

- ulazni blok,
- DC/AC pretvarač,
- izlazni blok,
- blok za upravljanje i
- blok za komunikaciju.

Broj različitih podsklopova u ulaznom bloku invertora se razlikuje od invertora do invertora, u zavisnosti od proizvođača. U svakom slučaju svaki invertor u

svom ulaznom bloku poseduje DC/DC pretvarač. Uloga ovog pretvarača je nalaženje tačke maksimalne snage (TMS) FN panela u svakom trenutku (engl. Maximal Power Point Tracking - MPPT), bez obzira na ambijentalne uslove u kojima funkcioniše FN panel [86], [87]. Kod današnjih invertora, u zavisnosti od snage, broj MPPT jedinica se kreće između 1 i 4.

DC/AC pretvarač je manje više klasičan monofazni ili trofazni H most sačinjen od IGBT tranzistora. Naravno, zbog specifične primene, postoje razne modifikacije H mostne konfiguracije, a sve radi poboljšanja karakteristike celokupnog invertora [88]. Savremeni fotonaponski invertori imaju veoma velik maksimalni stepen korisnog dejstva, koji je po pravilu iznad 95% (dostiže i 98%). Stvarni stepen korisnog dejstva (pri eksploataciji) je u proseku za 1% do 2% manji i varira u zavisnosti od uslova rada u kojima se nalaze FN paneli.



Slika 2.3 – Invertor za fotonaponske elektrane

Izlazni blok FN invertora poseduje razne zaštite, koji su u funkciji bezbednog rada samog uređaja, kao i bezbednog rukovanja od strane korisnika. Najvažniji podsklop u izlaznom bloku je deo za sinhronizaciju i sprečavanje ostrvskog režima rada elektrane.

Blok za upravljanje je mikroprocesorska jedinica sa integrisanim, delimično pristupačnim softverom, koji sinhronizovano upravlja sa svim energetskim i elektronskim podsklopovima.

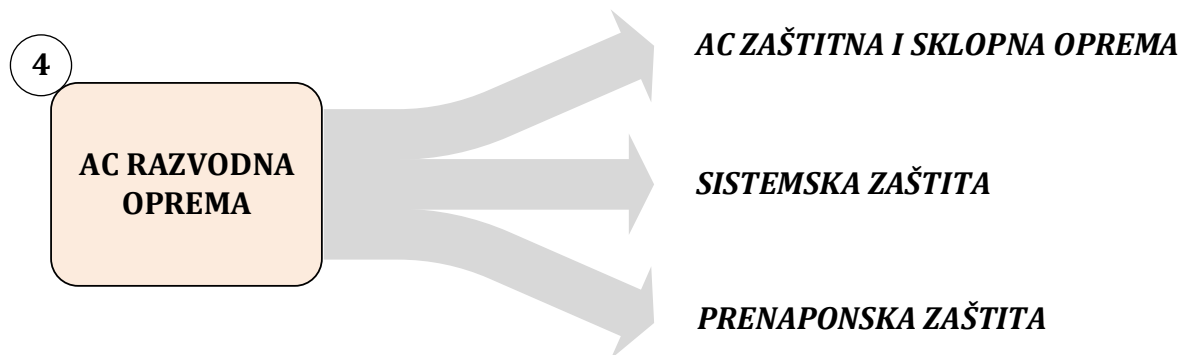
Blok za komunikaciju omogućava kontrolu, nadzor i upravljanje invertorom. Standardne komunikacione linije su najčešće žičane sa najrazličitijim protokolima, a sve češće bezžične.

2.1.4. Razvodna oprema na izlaznoj strani invertora

Razvodna oprema na izlaznoj strani invertora, odnosno naizmjenična razvodna oprema, po pravilu rada distributivnog sistema, ima ulogu zaštite generatora i priključnog voda elektrane od mogućih havarija i oštećenja usled kvarova i poremećaja u distributivnoj električnoj mreži (DEM) [89]. Pored toga, AC razvodna oprema omogućava galvansko odvajanje elektrane od DEM. Slika 2.4 prikazuje osnovne celine AC razvodne opreme:

- sklopna oprema,
- zaštitna oprema,
- sistemska zaštita i
- prenaponska zaštita.

Osnovna funkcija sklopne opreme je razdvajanje FN elektrane od DEM. Zaštitnu opremu čine osigurači ili sklopna oprema koja ima integrisanu zaštitnu funkciju. Sistemska zaštita ima ulogu da reaguje u slučaju poremećaja ravnoteže između proizvodnje i potrošnje aktivne, odnosno reaktivne energije. Sistemska zaštita se sastoji od naponske i frekventne zaštite. Prenaponska zaštita u naizmjeničnoj razvodnoj opremi je standardna i ne razlikuje se od prenaponske zaštite za uobičajne naizmjenične niskonaponske mreže.



Slika 2.4 – AC razvodna oprema

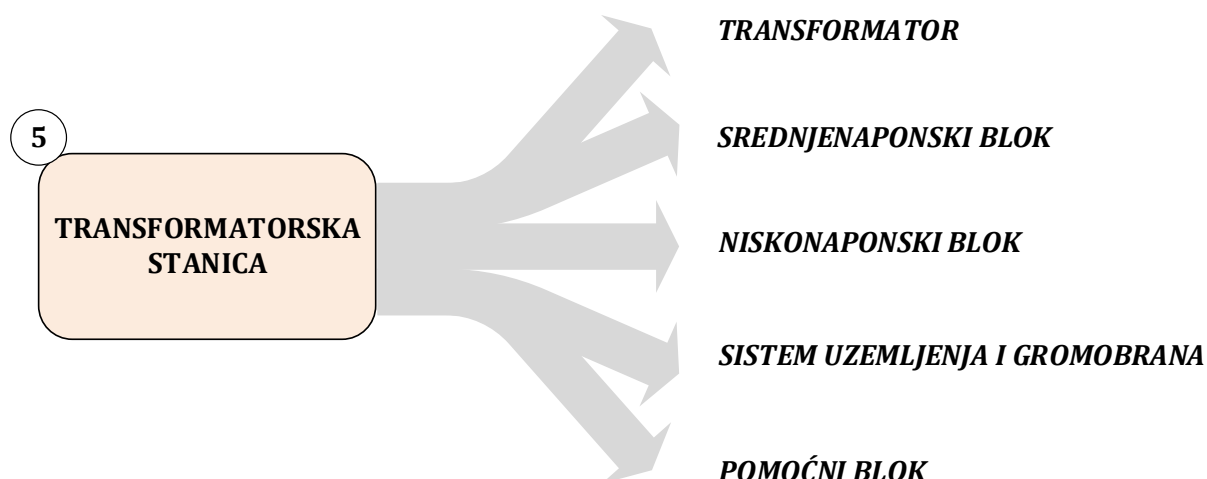
2.1.5. Transformatorska stanica

Transformatorska stanica sa najosnovnijim standardnim delovima je prikazana na slici 2.5, koja se sastoji iz:

- transformatora,
- srednjenaponskog bloka,
- niskonaponskog bloka,
- sistem uzemljenja i gromobrana i

- pomoćnog bloka.

Transformatorska stanica nije sastavni deo svih FN elektrana. Da li će biti potrebna, zavisi od snage elektrane, ali i od karakteristike distributivne mreže u tački priključenja elektrane. U svakom slučaju kada se FN elektrana priključuje na srednjenaponski nivo potrebna je transformatorska stanica. Transformatorska stanica može biti stubna ili smeštena u posebni građevinski objekat.



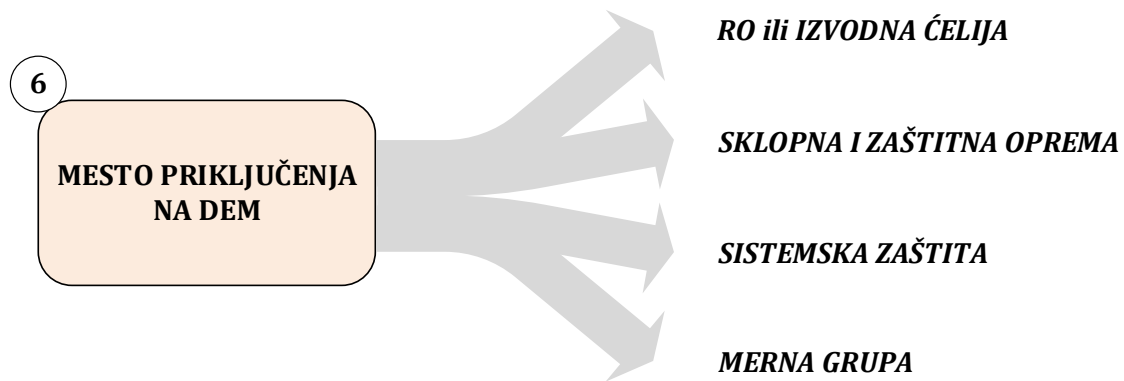
Slika 2.5 – Transformatorska stanica

Transformatorska stanica prirodno sadrži transformator, koji može biti uljni ili suvi. Snage se kreću u rasponu od 50kVA do 1000kVA, ako se radi o malim elektranama. Srednjenaponski blok sadrži običan ili učinski rastavljač, odvodnike prenapona i priključke za nadzemnu mrežu. Niskonaponski blok sadrži pored ostalog prekidač, osigurače, opremu za merenje i zaštitu. U pomoćni blok spada jednosmerni razvod sa napajanjem, osvetljenje, klimatizacija i slično.

2.1.6. Mesto priključenja fotonaponske elektrane na DEM

Mesto priključenja FN elektrane na DEM je mesto gde se razgraničava nadležnost između vlasnika elektrane i operatera distributivne mreže. Slika 2.6 prikazuje osnovnu opremu, koja se nalazi na mestu priključenja elektrane na DEM i sadrži sledeće:

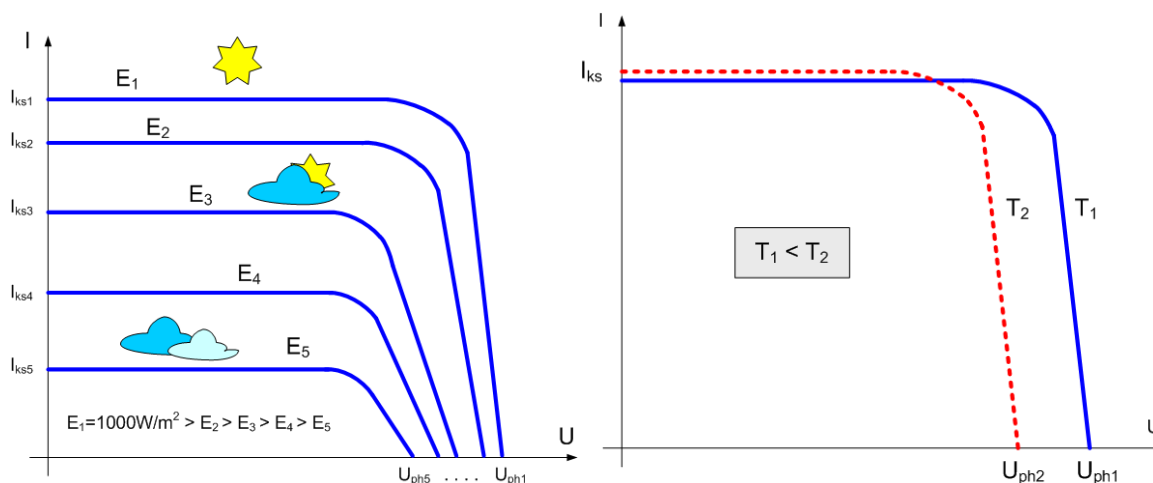
- razvodni ormar ili izvodna ćelija,
- sklopna i zaštitna oprema,
- sistemska zaštita i
- merna grupa.



Slika 2.6 – Mesto priključenja elektrane na DEM

2.2. Uticaj promene zračenja na proizvodnju FN elektrane

Mnogi faktori utiču na količinu električne energije koju proizvede fotonaponska elektrana. Sa jedne strane tu je ljudski faktor. Naime, projektom se definiše oprema FN elektrane. Od tehničkih karakteristika izabrane opreme će delom zavisiti buduća proizvodnja električne energije. Međutim, sve komponente, odnosno njihove karakteristike je potrebno uskladiti, optimizirati. Samo na taj način se može maksimizirati proizvodnja električne energije dobijena od strane elektrane. Sa druge strane, prirodni faktori u velikoj meri utiču na proizvodnju električne energije. Solarna energija, kao ulazni energent FN elektrane, nije konstantan tokom vremena. Po svojim karakteristikama između ostalog, solarna energija je periodična, a po intenzitetu stohastična. Karakteristike FN panela kao konvertora energije ponajviše zavise od intenziteta solarnog zračenja i temperature. Izlazna snaga elektrane zavisi od snage FN panela, koja je direktno srazmerna sa sunčevim zračenjem. Uzrok promene snage FN panela je u promeni struje, dok se napon neznatno menja sa promenom zračenja. Pored zračenja velik uticaj na izlaznu snagu FN panela ima i temperatura okoline, odnosno temperatura FN panela. Temperatura ima najveći uticaj na napon FN panela, dok se struja neznatno menja sa promenom temperature [90]. Slika 2.7 prikazuje uticaj promene zračenja i temperature na karakteristiku fotonaponskog panela.



Slika 2.7 – Uticaj zračenja i temperature na karakteristiku FN panela

2.2.1. Promenljivo zračenje

Senka nastaje u delu prostora gde svetlost ne dopire do posmatrane površine, zbog postojanja prepreke. Usled postojanja prepreke stvara se projekcija iste na posmatranu površinu, zbog blokade prostiranja svetlosti. Sa povećanjem rastojanja prepreke od objekta senčenja, povećava se i veličina projekcije senke.

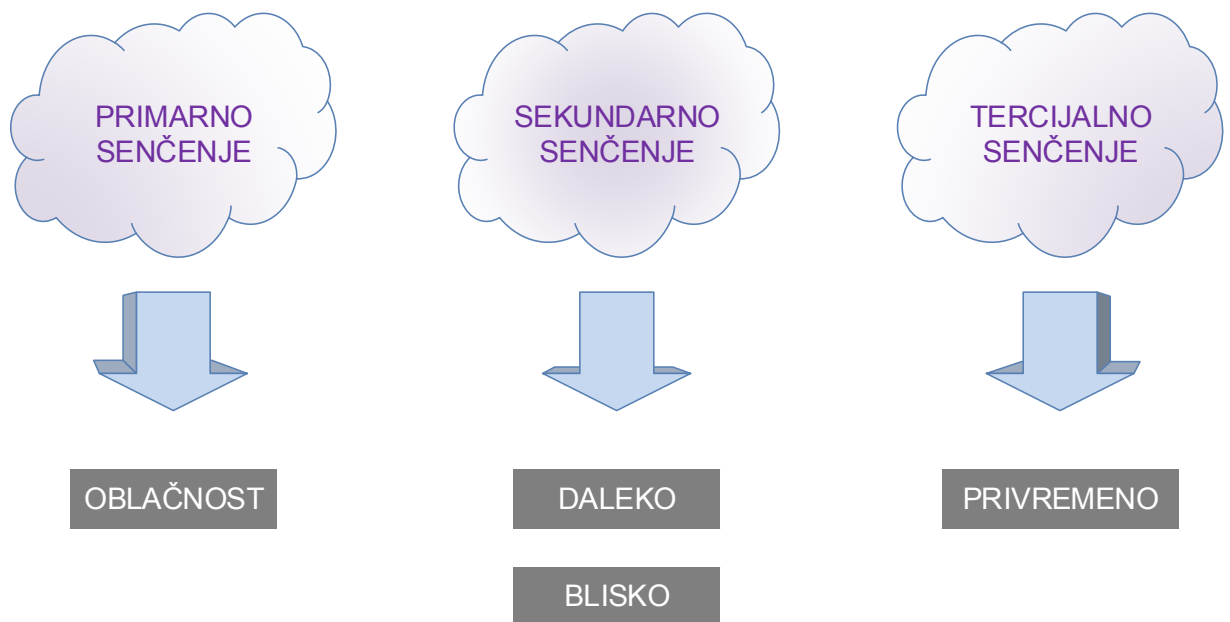
Sa stanovišta FN sistema, odnosno FN panela, svaka prepreka koja se nađe na putanji sunčevih zraka ka FN panelima je uzrok senčenja. Zbog kretanja prepreke (oblaci), pomeranja sunca ili pojave oba događaja istovremeno, menja se izlazna snaga FN panela. Pošto se sa promenom zračenja takođe menja izlazna snaga FN panela, može se smatrati da je pojava promene senke na FN panelima isto što i promenljivo zračenje.

Najčešći uzročnik pojave promenljivog zračenja je oblačnost na nebu, pri čemu su u ovom slučaju oblaci prepreka sunčevim zracima na njihovom putu do FN panela. Oblačnost, u zavisnosti od vrste, najčešće prouzrokuje brze promene zračenja. Postoje meteorološke pojave i kombinovane pojave (meteorološke sa zagađenjem vazduha) koje prouzrokuju spore promene zračenja tokom dana, kao što su magla i smog.

Promenljivo zračenje, sa stanovišta FN panela, se prema gornjoj definiciji može javiti i za vreme vedrog dana. Naime, razne prepreke čije se senke kreću, zahvaljujući kretanju Sunca, prouzrokuju promenljivo zračenje. Ova vrsta promenljivog zračenja je tema ove doktorske disertacije.

Senčenje, kao negativnu pojavu na FN panele, možemo podeliti na tri osnovne grupe; primarno, sekundarno i tercijalno senčenje. Slika 2.8 prikazuje podelu senčenja na osnovne grupe.

Primarno senčenje obuhvata prvenstveno oblačnost, mada se tu može svrstati i svaka pojava u atmosferi, koja doprinosi smanjenju sunčevog zračenja. Razne baze podataka sadrže podatke, bilo o horizontalnom zračenju, bilo o zračenju na neku nagnutu površinu. Ove baze u sebi već imaju integrisano slabljenje usled uticaja meteoroloških pojava u atmosferi, pa tako i slabljenja usled oblačnosti [91]. Pošto su ove meteorološke baze podataka polazna osnova za softvere, koji procenjuju proizvodnju električne energije FN elektrana, opravdano je da oblačnost bude svrstana u grupu primarnog senčenja.



Slika 2.8 – Podela senčenja

Sekundarno senčenje potencijalno može da ima najveći uticaj na proizvodnju električne energije FN elektrane. Koliki će biti uticaj sekundarnog senčenja zavisi od lokacije gde je FN elektrana izgrađena, odnosno od okolnih prepreka, bližih i daljih. Na osnovu prethodno rečenog, sekundarno senčenje obuhvata daleko i blisko senčenje:

- *Daleko senčenje* uzima u obzir uticaj izgleda horizonta. Uticaj je definisan u odnosu na vidljivost Sunca od strane FN panela za određen trenutak. Postoje dva slučaja; FN paneli su u senci (FN paneli ne vide Sunce) ili su FN paneli bez senke (FN paneli vide Sunce).
- *Blisko senčenje* je delimično senčenje FN panela od strane prepreka koji se nalaze u bližem okruženju elektrane. Zbog delimičnog senčenja moguće je definisati količnik površine FN panela koji je osunčan i ukupne površine FN panela. Ovaj količnik se naziva faktor senčenja. Kada su svi FN paneli u senci

faktor senčenja je 0, a kada nema senčenja ni jednog FN panela faktor senčenja je jednak sa 1.

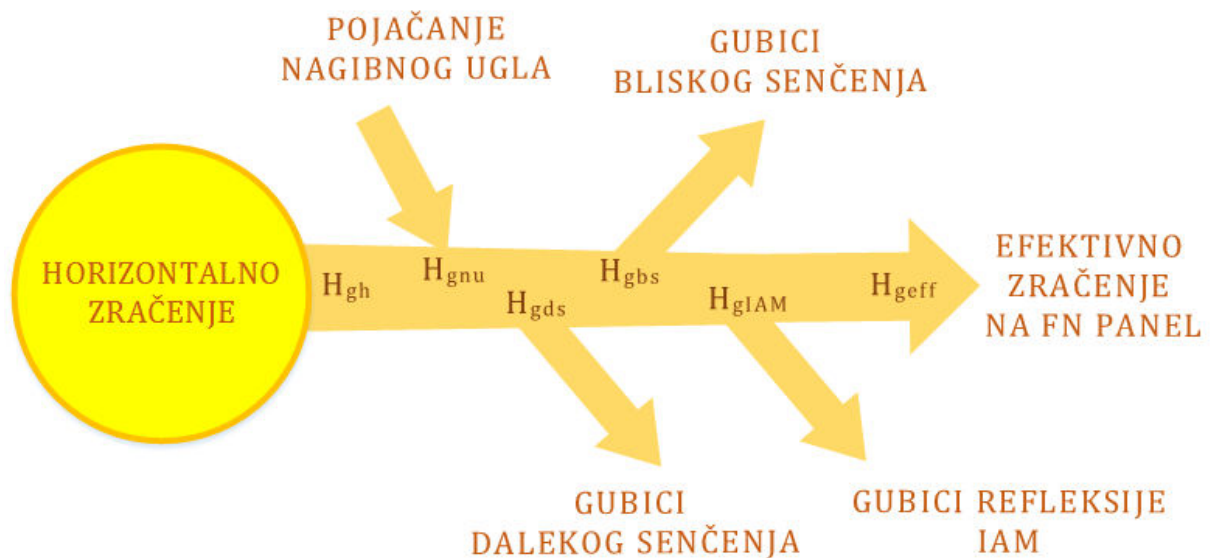
Dakle, pod dalekim senčenjem se podrazumeva izgled horizonta, odnosno hrapavost terena. U brdsko-planinskim područjima dolazi do izražaja daleko senčenje. U ovakvim slučajevima potrebno je utvrditi izgled horizonta. Izgled horizonta se mora utvrditi po pravcima azimutnog ugla koje Sunce može imati tokom cele godine. Drugim rečima, treba odrediti visinski ugao dalekih prepreka (brda i planina) po azimutnom uglu koje Sunce zauzima tokom najdužeg dana u godini. Blisko senčenje potiče od prepreka koji se nalaze u neposrednoj blizini FN panela. Ovo senčenje se veoma često javlja u FN elektranama koji se nalaze u naseljenim mestima. U blisko senčenje spada i senčenje koje nastaje zbog načina formiranja redova noseće konstrukcije za FN panela. Ovo senčenje se naziva međusobno senčenje FN panela. Za razliku od dalekog senčenja gde je najčešće FN polje u potpunosti u senci ili van senke, kod bliskog senčenja su samo delovi FN polja, FN niza a neretko i samo deo FN panela u senci.

Slika 2.9 prikazuje opšti dijagram toka solarne insolacije usled uticaja sekundarnog senčenja. Osnovna ulazna veličina, prilikom analize FN sistema, je horizontalno zračenje (H_{gh}). Ako je FN panel postavljen pod nekim nagibnim uglom, koji je različit od horizontalnog, on prima veću količinu zračenja (H_{gnu}). Dakle, može se smatrati da postoji pojačanje zračenja zbog nagibnog ugla FN panela, koje je nazvano pojačanje nagibnog ugla FN panela. Posmatrajući dijagram toka solarne insolacije, uočavaju se gubici dalekog i bliskog senčenja.

Gubici dalekog senčenja ne postoje uvek (H_{gds}). Javljaju se u brdsko-planinskim oblastima. U budućim analizama ovog rada ovi gubici neće postojati. Gubici bliskog senčenja u realnim situacijama gotovo uvek postoje (H_{gbs}). Prihvatljive vrednosti su do nekoliko procenata, a preporučena maksimalna vrednost je 5%. Međutim, primer elektrane FTN-FNE pokazuje, da iako su gubici bliskog senčenja za nekoliko procenata veći od maksimalno preporučene vrednosti, elektrana može imati velik faktor performanse (FP), (engl. Performace Ratio, PR). FP je veličina za merilo kvaliteta FN elektrana izgrađenih na različitim lokacijama.

$$FP = \frac{E_{EDS}}{E_{idealno}} \quad (2.1)$$

pri čemu je E_{EDS} isporučena električna energija u DES od strane FN elektrane, a $E_{idealno}$ je ukupna maksimalno moguća proizvodnja elektrane pri idealnim uslovima rada.



Slika 2.9 – Dijagram toka solarne insolacije

Zbog postojanja prozirnog zaštitnog sloja koji se nalazi iznad FN ćelije, javljaju se optički gubici, čiji stepen definiše faktor slabljenja (eng. IAM factor). Prozirni zaštitni sloj se sastoji od kaljenog stakla sa niskim sadržajem gvožđa, obično debljine 4mm i omotača FN ćelija (engl. encapsulant) izrađenog najčešće od EVA folije, debljine oko 0,5mm. Optički gubici su posledica prostiranja i refleksije sunčevih zraka kroz pomenute materijale različitih optičkih karakteristika. Dakle, IAM je veličina koja predstavlja optičke gubitke (H_{gIAM}) koji se javljaju zbog postojanja zaštitnog prozirnog sloja i kazuje nam za koliko je manje zračenje koje dospe do same površine FN ćelije, zbog upadnog ugla zraka koji je različit od okomitog. Ovi optički gubici podležu Fresnelovom zakonu prostiranja i refleksije talasa. Za određivanje spomenutih optičkih gubitaka u praksi se koristi izraz sa jednim parametrom (standardizovan u ASHRAE, Američka organizacija za hlađenje, grejanje u građevinarstvu i industriji):

$$IAM = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2.2)$$

pri čemu je θ upadni ugao sunčevih zraka. Za FN panele b_0 ima malu vrednost zbog osobine materijala koji štite FN ćeliju i iznosi 0,05 [92].

Na osnovu prethodnog opisa toka insolacije sa slike 2.9, može se napisati izraz za insolaciju koja se pretvara u električnu energiju putem FN ćelija i koja se naziva globalna efektivna insolacija ili energija zračenja:

$$H_{geff} = (H_{gh} + H_{gnu}) - (H_{gds} + H_{gbs}) - H_{gIAM} \quad (2.3)$$

Sve vrednosti razmatranih insolacija u ovom radu su zbir insolacije na godišnjem nivou. Vrednosti globalne horizontalne insolacije H_{gh} u sebi sadrži uticaj primarnog senčenja. Veličina globalne insolacije nagibnog ugla H_{gnu} je posledica pojačanja

insolacije zbog nagibnog ugla FN panela različitog od nule. Pored nagibnog ugla, H_{gnu} zavisi od geografske širine i međusobnog rastojanja redova noseće konstrukcije. Kao što je ranije bilo rečeno, u simulacijama nije bilo prepreka na horizontu pa ne postoje gubici dalekog senčenja:

$$H_{gds} = 0 \quad (2.4)$$

Tercijalno senčenje se javlja povremeno, pri čemu je uzrok senčenja prepreka koja se nalazi neposredno na površini FN panela. Ova prepreka se fizički može ukloniti sa površine FN panela i zbog toga se ova vrsta senke, koju prepreka izaziva, naziva privremeno senčenje. U privremeno senčenje spadaju:

- sneg ili inje,
- jutarnja rosa,
- prašina,
- ptičji izmet i
- opalo lišće.

2.2.2. *Uticaj bliskog senčenja na karakteristike FN panela*

Svako stanje koje prouzrokuje generisanje različite struje i/ili napona FN panela u jednom FN nizu ili polju se naziva neusklađenost električnih parametara FN panela. Kada FN niz ili polje rade u uslovima koji dovode do neusklađenosti FN panela (engl. mismatch condition), mogu se javiti značajniji gubici u FN nizu [94]. Razlog tome je promena oblika I-U, odnosno P-U karakteristike, uz pojavu dve ili više tačaka maksimalne snage. Istovremeno, značajno se smanjuje vrednost TMS. Neusklađenost FN panela nastaje i tokom senčenja delova FN niza/polja.

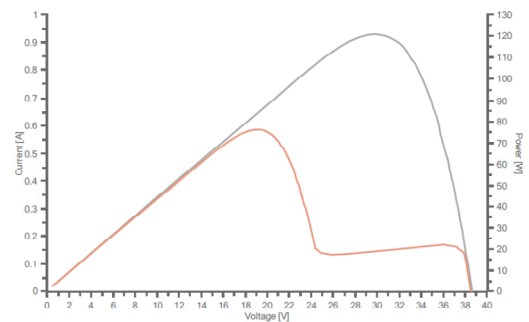
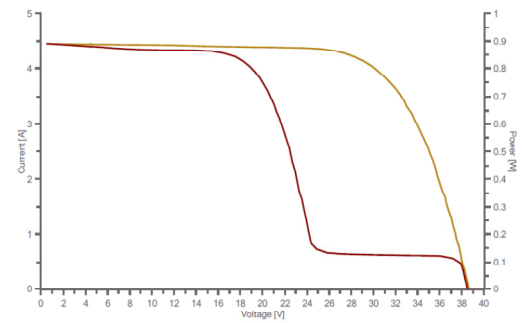
Kod većine FN elektrana blisko senčenje je najveći uzrok gubitaka usled senčenja. Da bi se smanjio uticaj senčenja na FN panele u njih se ugrađuju bajpas diode. Svi komercionalno upotrebljavani FN paneli, u zavisnosti od nominalne snage, imaju ugrađene 3 ili 4 bajpas diode. Bajpas diode obično premošćavaju 18 ili 20 FN ćelija. Ove diode smanjuju mogućnost oštećenja FN panela usled pojave nehomogenog zračenja na površini FN panela [93]. Istovremeno povećavaju izlaznu snagu panela u odnosu na panel u kom ne postoji ugrađena bajpas dioda.

Na slikama 2.10, 2.11 i 2.12 prikazane su fotografije panela sa tri različita nivoa senčenja i odgovarajući grafici sa karakteristikama FN panela; struja-napon (I-U) i snaga-napon (P-U). Na svim graficima su prikazane dve krive. Karakteristika FN panela bez senčenja je prikazana na gornjoj krivi (pravilna linija), dok se karakteristika panela u senci vidi na donjoj krivi (izobličena linija).

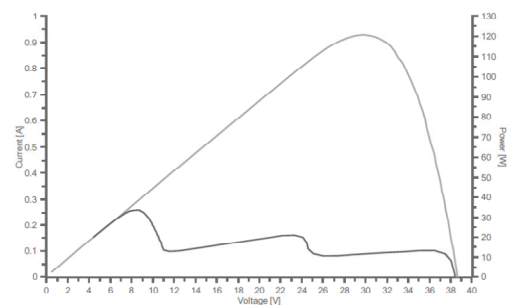
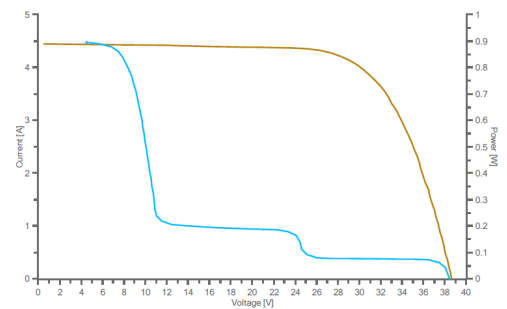
FN elektrana i uticaj promene zračenja na proizvodnju

Grupu FN ćelija (18 ili 20) koje su premošćene jednom bajpas diodom nazvaćemo jedna zona FN panela. Za panele sa razmatranih slika važi da u FN panelu postoji isti broj zona i ugrađenih bajpas dioda.

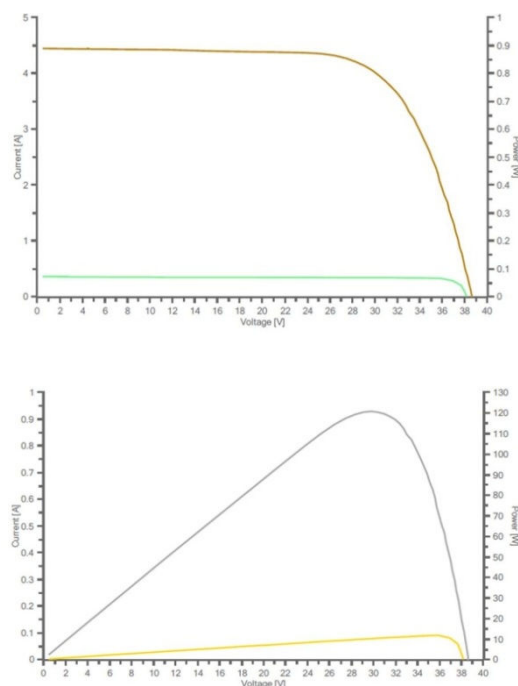
Na slici 2.13 se vidi deo FN niza sa 8 redno vezanih panela koji je senčen od drveta. Senka delimično zahvata dva FN panela, preciznije 5 zona FN panela. Pošto je



Slika 2.10 – Senčenje jedne zone FN panela



Slika 2.11 – Senčenje dve zone FN panela

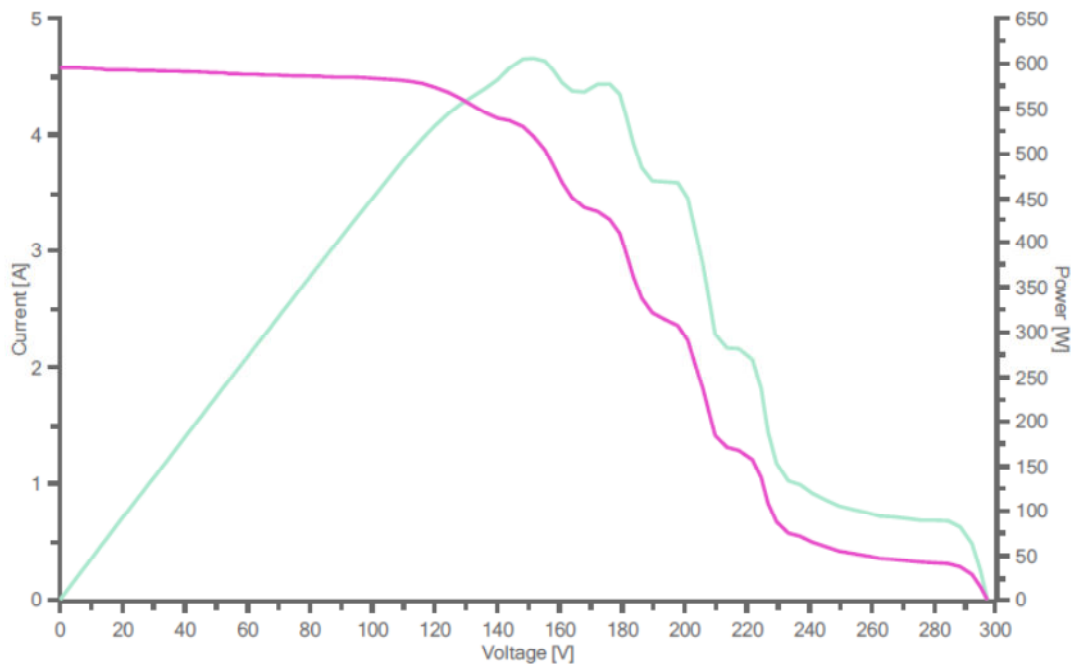


Slika 2.12 – Senčenje tri zone FN panela

nivo zračenja svake zone različito, dobija se veoma nepravilna I-U i P-U karakteristika FN niza. Karakteristično za ovakvu vrstu senčenja je pojava većeg broja maksimuma snage na P-U karakteristici FN niza. Na slici 4.14 istovremeno su prikazane obe karakteristike FN niza, gde se vidi da na P-U karakteristici postoji 5 maksimuma snage. Broj ovih maksimuma snage direktno zavisi od broja senčenih panela (zona) i nivoa zračenja pojedinih zona.



Slika 2.13 – Senka drveta na FN nizu



Slika 2.14 – I-U i P-U karakteristika FN niza sa nehomogenim zračenjem

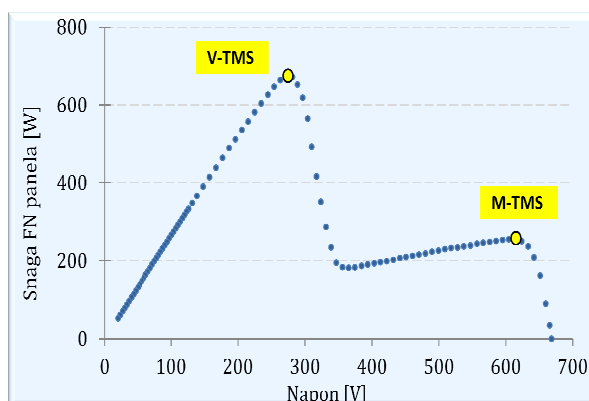
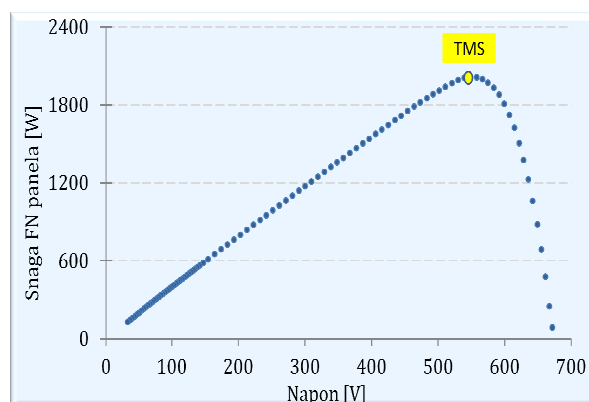
2.2.3. Senčenje i proizvodnja električne energije FN elektrane

Pošto senčenje FN panela, FN niza ili FN polja utiče na smanjenje izlazne snage istih, ono za posledicu ima i smanjenje izlazne snage invertora. Na ovaj način se smanjuje proizvodnja električne energije. Što je to senčenje duže to su i gubici u proizvodnji veći. U urbanim sredinama se najviše pojavljuje blisko senčenje, kao posledica obližnjih objekata, različitih predmeta, drveća, baš kao što se vidi na slici 2.15. U prethodnom poglavlju je prikazano kako senka menja karakteristiku FN panela. Zbog inače male efikasnosti FN panela, invertor mora da ima veliku efikasnost. Istovremeno, postoji potreba da se u svakom trenutku koristi maksimalna snaga panela, radi maksimizacije proizvodnje električne energije. Za to je u invertoru zadužen DC/DC pretvarač sa algoritmom za nalaženje tačke maksimalne snage. Kod FN panela koji nije u senci postoji samo jedna tačka maksimalne snage, koja je na slici 2.16 levo označena sa TMS. Kao što je rečeno, karakteristika FN panela zavisi od trenutne temperature i solarnog zračenja. Zbog toga se TMS panela stalno menja. U situaciji bez senke, nalaženje TMS od strane invertora, bez obzira na stalne promene, ne predstavlja problem. Kada se FN panel nađe u senci najčešće se pojavljuju dva izražena maksimuma snage. Ova situacija je prikazana na slici 2.16, desno.



Slika 2.15 – Česta situacija u urbanim sredinama – senka na FN panelima

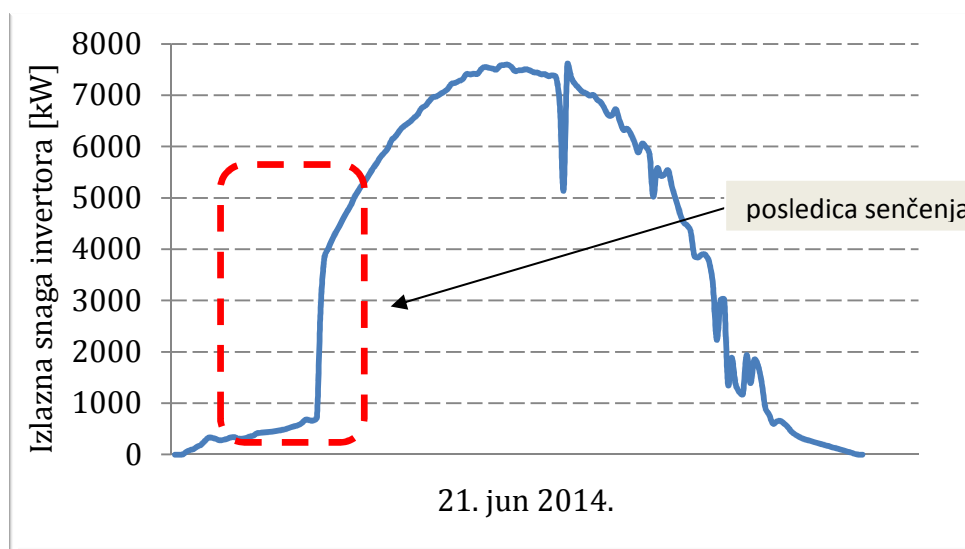
Zbog pojave dva različita nivoa zračenja na FN nizu (jedan deo je u senci, drugi je na suncu, slika 2.15), P-U karakteristika ima dva maksimuma. Po pravilu, broj maksimuma karakteristike FN niza se poklapa sa brojem različitog nivoa senčenja FN niza [95].



Slika 2.16 – P-U karakteristika FN niza bez senke (levo) i sa senkom (desno)

U svakom slučaju, među maksimumima postoji jedan koji je najveći. Na slici ovaj maksimum je obeležen sa V-TMS i naziva se veća tačka maksimalne snage (engl. GMPP, Global Maximup Power Point). Manja tačka maksimalne snage je obeležena sa M-TMS (engl. LMPP, Local Maximum Power Point) [96]. U zavisnosti od algoritma za nalaženje TMS inverter će naći ili V-TMS ili M-TMS. Naravno, bilo bi poželjno da inverter nalazi V-TMS. Međutim postoje situacije senčenja kada i najsofisticiraniji algoritam nalazi M-TMS.

Uticaj senčenja na izlaznu snagu invertora, a samim tim i na proizvodnju električne energije, je prikazan na slici 2.17. Na slici se vidi promena izlazne snage invertora tokom jednog dana, sa relativno malo oblačnosti. Uokvireni deo sa isprekidanom linijom na slici je prikaz delovanja senke na FN panele. Vidi se da izlazna snaga invertora od trenutka uključenja stalno raste, ali je mala. U jednom trenutku snaga naglo raste i dostiže vrednost od oko 4kW. To je trenutak izlaska celog FN niza iz senke.



Slika 2.17 – Uticaj senčenja na izlaznu snagu FN elektrane

2.3. Smanjenje uticaja senčenja na proizvodnju FN elektrane

Postoji nekoliko načina, metoda, smanjenja uticaja varijacije sunčevog zračenja (senčenja) na rad fotonaponskog sistema. Ove metode se mogu podeliti na pasivne i aktivne metode smanjenja uticaja senčenja. Pasivne metode smanjivanja uticaja senčenja podrazumevaju aktivnosti koje se obavljaju pre puštanja FN elektrane u rad, pri čemu je predmet aktivnosti najčešće FN panel. Aktivne metode smanjivanja uticaja senčenja podrazumevaju aktivnosti koje se obavljaju tokom rada elektrane. Uglavnom su u pitanju softverske aktivnosti unutar invertora ili kombinacija hardversko-softverske aktivnosti (FN niz/polje).

U pasivne metode spadaju:

- ugradnja bajpas diode u FN panel,
- izbor FN panela na osnovu tehnologije izrade (osnovni materijal izrade),
- različiti načini povezivanja fotonaponskih ćelija unutar FN panela;

U aktivne metode spadaju:

- pridruživanje DC/DC pretvarača svakom FN panelu ili grupi FN panela;
- ugradnja algoritma u DC/AC pretvarače za nalaženje tačke maksimalne snage;
- odabir odgovarajućeg DC/AC pretvarača (raspodeljen MPPT, višestepeni MPPT inverter);
- rekonfiguracija FN niza, polja (mikrorekonfiguracija).

Kao što se iz nabrojanih načina smanjenja uticaja senčenja na rad FN sistema može videti, ono se sprovodi u nekoj samostalnoj funkcionalnoj celini FN sistema. Najpovoljnije je ako se smanjenje uticaja senčenja može sprovesti istovremeno u nekoliko samostalnih funkcionalnih celina.

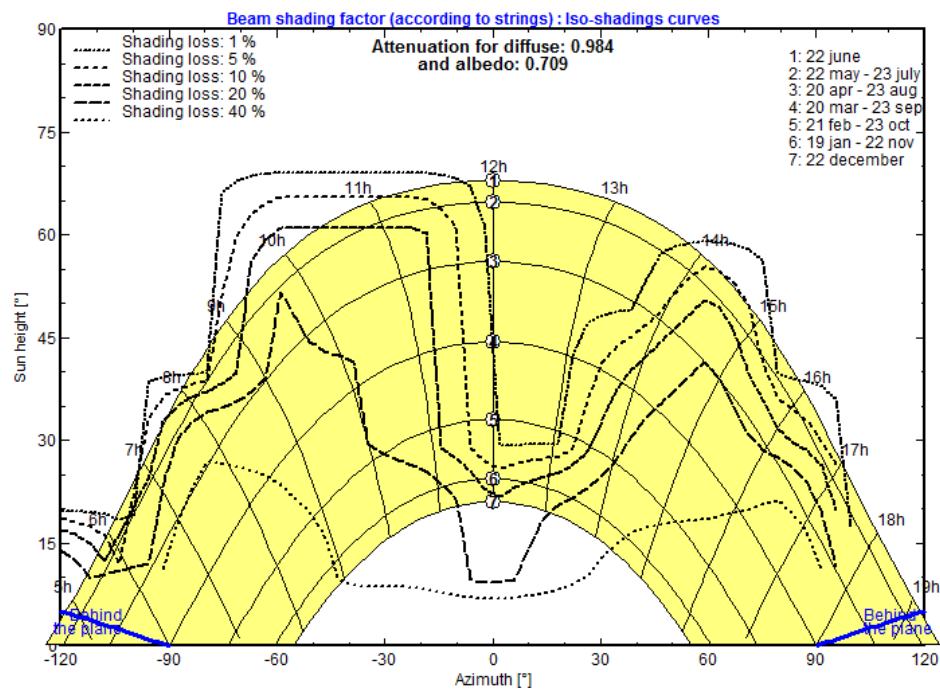
Nabrojani načini smanjenja uticaja senčenja na FN sisteme spadaju u rešenja koja se ostvaruju električnim putem. Ovo podrazumeva korišćenje elektronskih komponenti i uređaja i prevezivanje provodnika za međusobno spajanje FN panela. Pored rešenja koji se ostvaruju električnim putem, postoje načini smanjenja uticaja senčenja na rad FN sistema koji se ostvaruju na drugi način, prvenstveno tokom projektovanja FN sistema. Istina, neka od električnih rešenja smanjenja uticaja senčenja se mogu rešiti tokom projektovanja. U ovom radu rešenja smanjenja uticaja senčenja neelektričnim putem će se nazivati projektantska rešenja.

U projektantska rešenja smanjenja uticaja senčenja na rad FN sistema spadaju:

- izbor najpovoljnijeg mesta za postavljanje FN panela na lokaciji;
- optimalan razmeštaj FN panela na izabranom mestu;
- odgovarajući izbor koeficijenta pokrivenosti tla;

Projektantsko rešenje smanjenja uticaja senčenja na rad FN sistema praktično znači nalaženje optimalnog mesta FN panela na izabranoj lokaciji u odnosu na okolne prepreke koji dovode do pojave senke na FN panelima.

Kombinovana metoda koja se ostvaruje tokom projektovanja putem odgovarajućeg električnog povezivanja FN nizova bi bila makrokonfiguracija. Da bi se ova metoda, ali i neke druge uspešno realizovale, potrebno je poznavanje kretanja senke nad FN panelima. Položaj senke na FN panelima u svakom trenutku tokom godine prikazuje dijagram kretanja sunca sa unetim gubicima senčenja. Primer pomenutog dijagrama se vidi na slici 3.18.



Slika 2.18 – Dijagram kretanja sunca sa naznačenim gubicima bliskog senčenja

2.3.1. Makrokonfiguracija, električno povezivanje FN panela

Jedna od pasivnih metoda smanjenja uticaja senčenja koja se obavlja pre puštanja FN elektrane u rad je međusobno električno povezivanje FN panela, takozvana makrokonfiguracija. Da bi makrokonfiguracija bila izvedena uspešno potrebno je poznavanje kretanja senke nad FN panelima. Radi smanjenja uticaja neusklađenosti FN panela na gubitke, FN nizovi/polja se vezuju na različite načine. Najprostiji način vezivanja FN panela je njihova redna veza, pri čemu se formira FN niz (engl. PV string). Radi postizanja većih snaga, FN nizovi se međusobno vezuju paralelno. Na taj način se dobija FN polje (engl. PV array). Pošto se FN niz formira kao redna veza FN panela ova konfiguracije se naziva redno-paralelna veza (engl. Series-Parallel, SP). Da bi se smanjio uticaj senčenja SP veza se dopunjuje međuvezama i tako se dobijaju različite poboljšane varijante SP veze (slika 1.4). Jedna varijanta je serijsko-paralelno unakrsno vezivanje (engl. Total Cross-Tied, TCT). U literaturi se spominje i mostna veza (engl. Bridge-Linked, BL) i povezivanje u obliku saća (engl. Honey-Comb, HB). TCT konfiguracija, kao način međusobnog vezivanja FN panela je interesantna za primenu kada je profil neusklađenosti unapred nepoznat ili nije stalan.

2.3.2. Mikrorekonfiguracija, električno prevezivanje FN panela

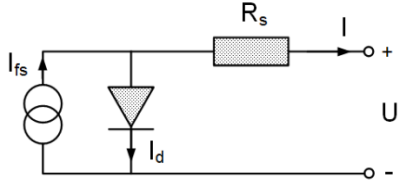
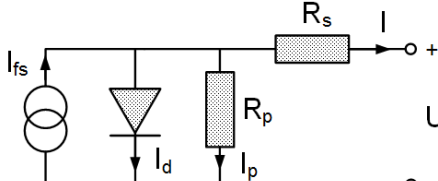
Jedna od aktivnih metoda smanjenja uticaja senčenja koja se obavlja tokom rada FN elektrane je međusobno električno prevezivanje FN panela, takozvana mikrorekonfiguracija. Da bi makrorekonfiguracija bila izvedena uspešno nije neophodno poznavanje kretanja senke nad FN panelima. Odgovarajuće softversko upravljanje sa hardverom može prepoznati neusklađenost FN panela. Kao rezultat toga se izvodi mikrorekonfiguracija FN niza/polja pri čemu se otklanja ili se minimizuje neusklađenost. Poznavanje položaja senke može pojednostaviti i ubrzati proces mikrorekonfiguracije. Iz teksta se jasno vidi da se mikrorekonfiguracija ostvaruje odgovarajućim upravljanjem hardvera, odnosno sklopnim uređajima.

3. Model FN panela

3.1. Najčešće korišćeni modeli FN ćelije

U uvodnom poglavlju su prikazani svi do sada razvijeni modeli FN ćelija. Tabela 3.1 prikazuje dva najčešće korišćena modela, koji se koriste prilikom različitih simulacija. Oba prikazana modela koriste parametre FN ćelije, koji su definisani na mikronivou i tiču se poluprovodničkih materijala i fizike fotonaponskog pretvaranja energije. Ovi parametri se ne mogu naći u fabričkim katalozima FN ćelija i stoga se često, uz odgovarajuća opravdana zanemarivanja, zamenjuju sa parametrima datim od strane proizvođača.

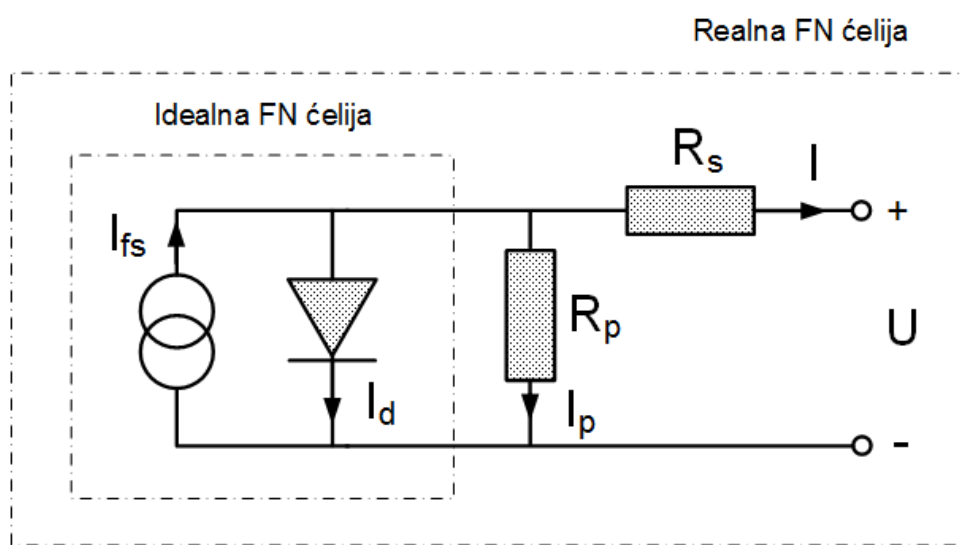
Tabela 3.1 – Najčešće korišćene ekvivalentne šeme fotonaponske ćelije

Model FN ćelije	Ekvivalentna šema	Broj parametara	Tačnost
Model sa rednim otporom		4	dobro
Jedno-diodni model		5	vrlo dobro

U ovom radu makrokonfiguracija, kao što će se videti u poglavlju 4, je istraživana u programskom paketu PVsyst. Ovaj program takođe koristi jedno-diodni model FN panela ali sa parametrima koji se tiču poluprovodničkih materijala i fizike fotonaponskog pretvaranja energije. Prilikom analize mikrореkonfiguracije autor ovog rada polazi od jedno-diodnog modela sa fabričkim parametrima. Ovaj model je implementiran u Matlab/Simulink softverskom paketu. Sam model je opisan u ovom poglavlju, a rezultati simulacije su prikazani u poglavlju 5.

3.2. Jednačine ekvivalentne šeme jedno-diodnog modela FN panela sa fabričkim parametrima

Jedno-diodni model FN ćelije je zasnovan na teoriji toka struje kroz poluprovodničke materijale i fotonaponskog pretvaranja energije. Slika 3.1 prikazuje ekvivalentnu šemu jedno-diodnog modela, koji uvažava osobine FN ćelije slične poluprovodničkoj diodi i postojanje električnih gubitaka unutar FN ćelije, koji figurišu preko redne i paralelne otpornosti, označene redom sa R_s i R_p .



Slika 3.1 – Ekvivalentna šema jedno-diodnog modela fotonaponske ćelije

Po prvom Kirkohofom zakonu za čvorište prikazano na slici 3.1 važi jednačina

$$I_{fs} - I_d - I_p - I = 0 \quad (3.1)$$

Fotostruja I_{fs} postoji samo kada je intenzitet solarnog zračenja dovoljno velik za generisanje paraova elektron-šupljina unutar PN spoja. Struja I_p prolazi kroz paralelni otpor R_p FN ćelije i degradira karakteristiku ćelije. Struja diode I_d u FN ćeliji se menja po istoj funkciji kao u poluprovodničkom PN spoju klasične diode i piše se kao

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qU_d}{\gamma kT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

U teoriji poluprovodnika koji proučava PN spoj od kristalnog silicijuma, inverzna struja zasićenja diode I_0 je definisana kao [97]

$$I_0 = q \frac{D_p p_n}{L_p} + q \frac{D_n n_p}{L_n} \quad (3.3)$$

Inverzna struja zasićenja diode I_0 , funkcija je veličina koje zavise od fizičkih osobina poluprovodnika, kao što su koncentracija manjinskih nosilaca u poluprovodniku, difuziona konstanta šupljina i elektrona i difuziona dužina elektrona i šupljina.

Deo izraza u eksponentu jednačine (3.2) je dobro poznati termalni napon diode, koji glasi

$$U_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (3.4)$$

i po definiciji je napon (potencijalna razlika) koji može zaustaviti naelektrisanu česticu sa prosečnom termičkom kinetičkom energijom [97].

Parametar γ u jednačini (3.2), (3.4) je faktor idealnosti PN spoja diode. U realnim uslovima njegova vrednost se menja u granicama između 1 i 2.

Struja I_p zavisi od veličine paralelne otpornosti FN ćelije i doprinosi smanjenju izlazne struje FN ćelije. Izlazni napon FN ćelije U se smanjuje zbog postojanja redne otpornosti FN ćelije R_s . Struja kroz paralelnu otpornost se može izraziti kao

$$I_p = \frac{U_d}{R_p} = \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (3.5)$$

Zamenjujući izraze (3.2) i (3.5) u izraz (3.1) dobija se konačan oblik izlazne struje FN ćelije I u zavisnosti od izlaznog napona FN ćelije U , kao

$$I = I_{fs} - I_0 \left(e^{\frac{q(U+IR_s)}{\gamma kT}} - 1 \right) + \frac{U+IR_s}{R_p} \quad (3.6)$$

U jednačini (3.6) figurišu sledeće veličine koje ranije nisu definisane: naelektrisanje elektrona $q=1.602176 \cdot 10^{-19}C$, Boltsmanova konstanta $k=1.380648 \cdot 10^{-23}J/K$ i temperatura FN ćelije T izražena u Kelvinima. Izraz (3.6) definiše dobro poznat izgled krive FN ćelije i predstavlja jedno-diodni model sa pet nepoznatih parametara I_{fs} , I_0 , γ , R_s i R_p . Dat je u implicitnom obliku, i zbog velikog broja nepoznatih parametara nije jednostavan za rešavanje.

U ovom radu se umesto pet nepoznatih parametara iz jednačine (3.6) koriste podaci dati od strane proizvođača, što iziskuje preuređivanje spomenute jednačine. Pre preuređivanja jednačine (3.6), što je preduslov za korišćenje fabričkih parametara FN panela, potrebno je dati neka pojašnjenja.

Izraz (3.3) za inverznu struju zasićenja se koristi u domenu poluprovodničke teorije PN spoja. Kao takav, nije pogodan za modelovanje FN ćelije, pa se koristi zamenski izraz

$$I_0 = I_{0\ ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{\frac{qE_g}{\gamma k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)} \quad (3.7)$$

pri čemu je potrebno poznavati inverznu struju zasićenja pri referentnim uslovima, $I_{0\ ref}$ [15]. Ova struja ostaje nepoznata, jer je proizvođači FN ćelija ne zadaju. Na taj način u modelu dalje ostaje 5 nepoznatih, koje treba izračunati.

Foto struja FN ćelije je veoma približno srazmerna solarnom zračenju G , pa se koristi sledeći izraz za proračun, do koga se došlo poluempirijskom metodom

$$I_{fs} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot [I_{fs\ ref} + \alpha(T - T_{ref})] \quad (3.8)$$

Vidi se da je fotostruja zavisna od temperature FN ćelije T . Veličine indeksirane sa *ref* se odnose za referentne uslove rada FN ćelije. Referentnu fotostruju I_{ref} proizvođači FN panela takođe ne zadaju, pa nadalje ostaje nepoznata fotostruja.

Nadalje se uvodi zamena nepoznatih parametara sa fabričkim podacima. Da bi se ovo ostvarilo potrebno je uvesti određena zanemarivanja.

Za FN ćelije važi da je $R_p \gg R_s$, pa se za slučaj kratkog spoja $I=I_{ks}$ ($U=0$) iz jednačine (3.6) može zaključiti da je $I_{fs} \approx I_{ks}$. Iz istog razloga se može zanemariti i struja kroz paralelni otpor. Struja paralelne otpornosti je manja od 1,5% od stuje u tački maksimalne snage pri STC uslovima, koja je radna tačka pri radu FN elektrane. Ovo je utvrđeno proračunom, pri čemu su korišćeni poznati parametri FN panela koji daje softver PVsyst [24]. Uzimajući u obzir gornja razmatranja, jednačina (3.6) se može pisati u sledećem obliku

$$I = I_{ks} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U+IR_s)}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (3.9)$$

Pa se jedno-diodni model svodi na model FN ćelije sa rednim otporom.

Ekvivalentne šeme modela koje su prikazane u tabeli 3.1 su prvenstveno razvijene za FN ćeliju. Međutim, pošto je FN panel sačinjen od redno vezanih ćelija i uz pretpostavku da su sve ćelije identične, prikazane ekvivalentne šeme se mogu koristiti kao model FN panela napravljenog od kristalnog silicijuma [10].

Da bi se koristili fabrički podaci izraz (3.9) se po [44] preuređuje kao

$$I = I_{ks} \left[1 - A \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{B \cdot U_{ph}}\right) - 1 \right) \right] \quad (3.10)$$

pri čemu su A i B novi nepoznati koeficijenti, koje treba odrediti. Ovi koeficijenti se nalaze pomoću jednačine (3.10) u tački praznog hoda ($U_{ph}, 0$) i pri tački maksimalne snage (U_m, I_m).

Kada je struja FN panel jednaka nuli, napon je maksimalan i jednak je sa naponom praznog hoda FN panela U_{ph} . Zamenjujući par tačaka ($U_{ph}, 0$) u jednačinu (3.10) može se pisati da je

$$0 = I_{ks} \left[1 - A \cdot \left(\exp\left(\frac{1}{B}\right) - 1 \right) \right] \quad (3.11)$$

Kada FN panel dostigne maksimalnu snagu na karakteristici je radna tačka definisana sa uređenim parom (U_m, I_m), i jednačina (3.10) poprima sledeći oblik

$$I_m = I_{ks} \left[1 - A \cdot \left(\exp\left(\frac{U_m}{B \cdot U_{ph}}\right) - 1 \right) \right] \quad (3.12)$$

U obe jednačine (3.11) i (3.12) može se zanemariti jedinica, koja se nalazi u zagradi sa eksponentom. Na taj način se lako nalaze nepoznati koeficijenti A i B [44], koji se mogu izračunati na osnovu poznatih fabričkih veličina

$$A = \left(1 - \frac{I_m}{I_{ks}} \right) \cdot \exp\left(-\frac{U_m}{B \cdot U_{ph}}\right) \quad (3.13)$$

$$B = \left(\frac{U_m}{U_{ph}} - 1 \right) / \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{ks}} \right) \quad (3.14)$$

Pri čemu su I_m struja u tački maksimalne snage, U_m napon u tački maksimalne snage, I_{ks} struja kratkog spoja i U_{ph} napon praznog hoda FN panela. Koeficijenti A i B , kao što se iz izraza (3.13) i (3.14) vidi, isključivo zavise od parametara koje zadaje proizvođač FN panela. Kada se ove konstante uvrste u izraz za struju FN panela (3.10) lako se nalazi struja FN panela u funkciji napona. Odnosno, pomoću izraza (3.10), (3.13) i (3.14) mogu se iscrtati I-U i P-U karakteristike FN panela pri standardnim uslovima testiranja (engl. Standard Test Conditions, STC). Upravo ove jednačine su osnova za simulacioni model, koji se koristi u ovom radu.

Pošto se STC uslovi u praksi skoro nikad ne postižu, potrebno je u model integrisati parametre ambijentalnih veličina, kao što su temperatura FN panela i solarno zračenje. Naime, struja, napon, pa samim tim i snaga FN panela se menja sa promenom temperature i zračenja koje dospe na panel. Uticaj promene temperature i zračenja na panel će se uzeti u obzir preko jednačina za translaciju I-U krive.

Prve jednačine za translaciju su publikovane daleke 1967 [31] i još se i danas koriste u nešto izmenjenoj formi. Procedura translacije krivi je prvenstveno razvijena

da se I-U krive, dobijene merenjem pri nekim ambijentalnim uslovima, prevedu na STC uslove. Obično se koriste dve procedure za translaciju. Obe su definisane standardom IEC-60891 [98]. Prva metoda po standardu je uglavnom više empirijska, dok je druga polu-empirijska metoda. Ovde će se primeniti empirijska metoda, koja koristi sledeće jednačine za translaciju

$$I_2 = I_1 + I_{ks1} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.15)$$

$$U_2 = U_1 - R_s \cdot (I_2 - I_1) - K \cdot I_2 (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.16)$$

Struja FN panela I_1 , struja kratkog spoja I_{ks1} i napon FN panela U_1 su tačke na I-U karakteristici koje su dobijene merenjem pri zračenju G_1 i temperaturi T_1 . Skup tačka (I_2, U_2) su translirane tačke na I-U krivi FN panela pri zračenju G_2 i temperaturi T_2 . $\alpha > 0$ i $\beta < 0$ su redom temperaturni koeficijenti struje kratkog spoja i napona praznog hoda FN panela. Konstanta K je korekcionni faktor translacije i za polikristalne silicijumske FN panele tipična vrednost iznosi $1.25 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$ [99].

Nadalje se koriste korigovane jednačine za translaciju u odnosu na jednačine date izrazima (3.15) i (3.16). Sve veličine obeležene sa 1 nadalje će se odnositi na STC uslove. Pošto je temperaturni efekat na struju zavistan i od zračenja [31], [98] važi da je

$$I = I_{STC} + I_{ks} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1 \right) + \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (3.17)$$

$$U = U_{STC} - R_s \cdot \Delta I - K \cdot I \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T \quad (3.18)$$

pri čemu je

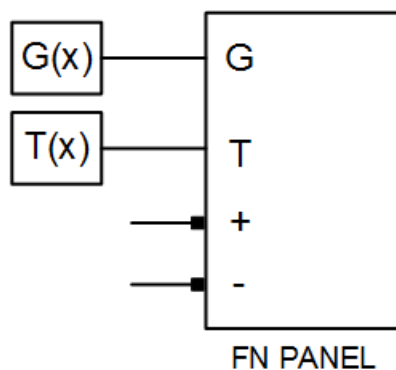
$$\Delta T = T - T_{STC} \quad i \quad \Delta I = I - I_{STC} \quad (3.19)$$

Struja I i napon U FN panela u jednačinama (3.17) i (3.18) su transliran par tačaka I-U karakteristike koje se dobijaju pri nekom zračenju G i temperaturi T .

3.3. Model FN panela u Matlab/Simulink programu

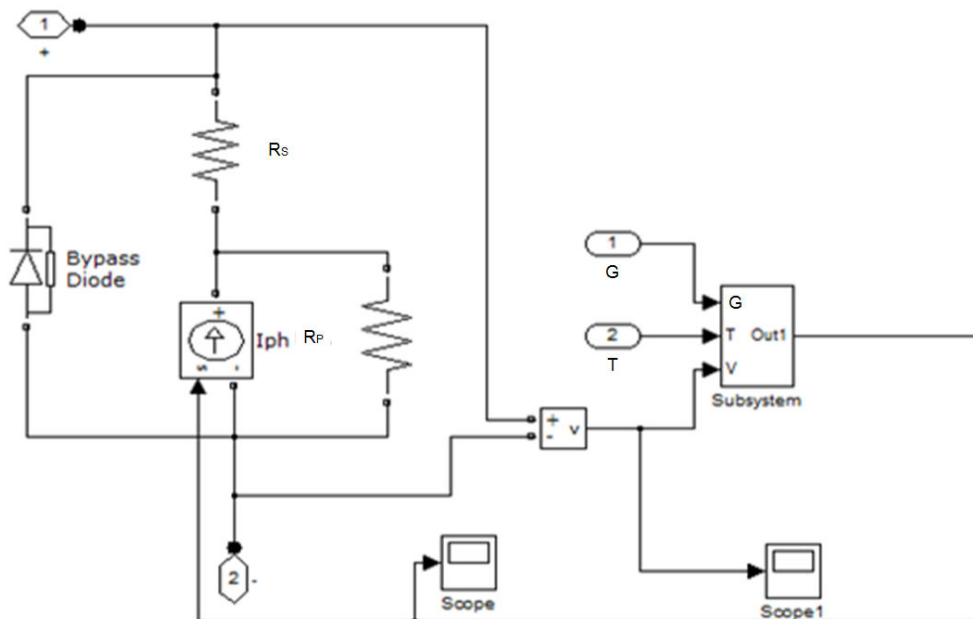
Nadalje se opisuje razvijen model FN panela i stringa u Matlab-Simulink softveru, koji je baziran na poznavanju fabričkih parametara FN panela, pri standardnim uslovima testiranja (upadni ugao solarnih zraka $AM=1.5$, solarno zračenje $1000\text{W}/\text{m}^2$ i temperatura ćelije 25°C).

Blok FN panela sa ulaznim parametrima solarnog zračenja $G(x)$ i temperature panela $T(x)$ je prikazano na slici 3.2, pri čemu promenljiva x u opštem slučaju definiše broj redno vezanih blokova FN panela. Detaljnije objašnjenje će kasnije biti dato, kod opisa FN niza.



Slika 3.2 – Matlab/Simulink blok FN panela

Potpuni model FN panela (sadržaj bloka FN panela), sa rednom R_s i paralelnom R_p otpornošću, kao i integrisanom bajpas diodom prikazana je na slici 3.3. U podsistemu označenim sa “STRUJA FN PANELA” integrisane su jednačine (3.10), (3.13), (3.14), (3.17) i (3.18), pomoću kojih se računa struja FN panela tokom simulacije. Na izlaznim priključcima panela (+ i -) se meri napon, koji je posledica izlazne stuje iz podsistema “STRUJA FN PANELA”.



Slika 3.3 – Model FN panela

Model FN niza se formira prostom rednom vezom blokova FN panela 3.2. Promena broja FN panela u nizu modela postiže se jednostavnim prevezivanjem, a samim tim i eliminacijom određenog broja blokova FN panela. Na slici 3.4 je prikazan model FN niza sa $x=M$ blokova, odnosno FN panela. Da bi se dobile karakteristike FN niza pri različitim ambijentalnim uslovima, postoji naponski izvor na čiji ulazu se dovodi napon. Napon se linearno povećava pri startu simulacije do približno očekivanog napona na FN nizu. Blokovi I, U i P na slici 3.4 omogućavaju merenje

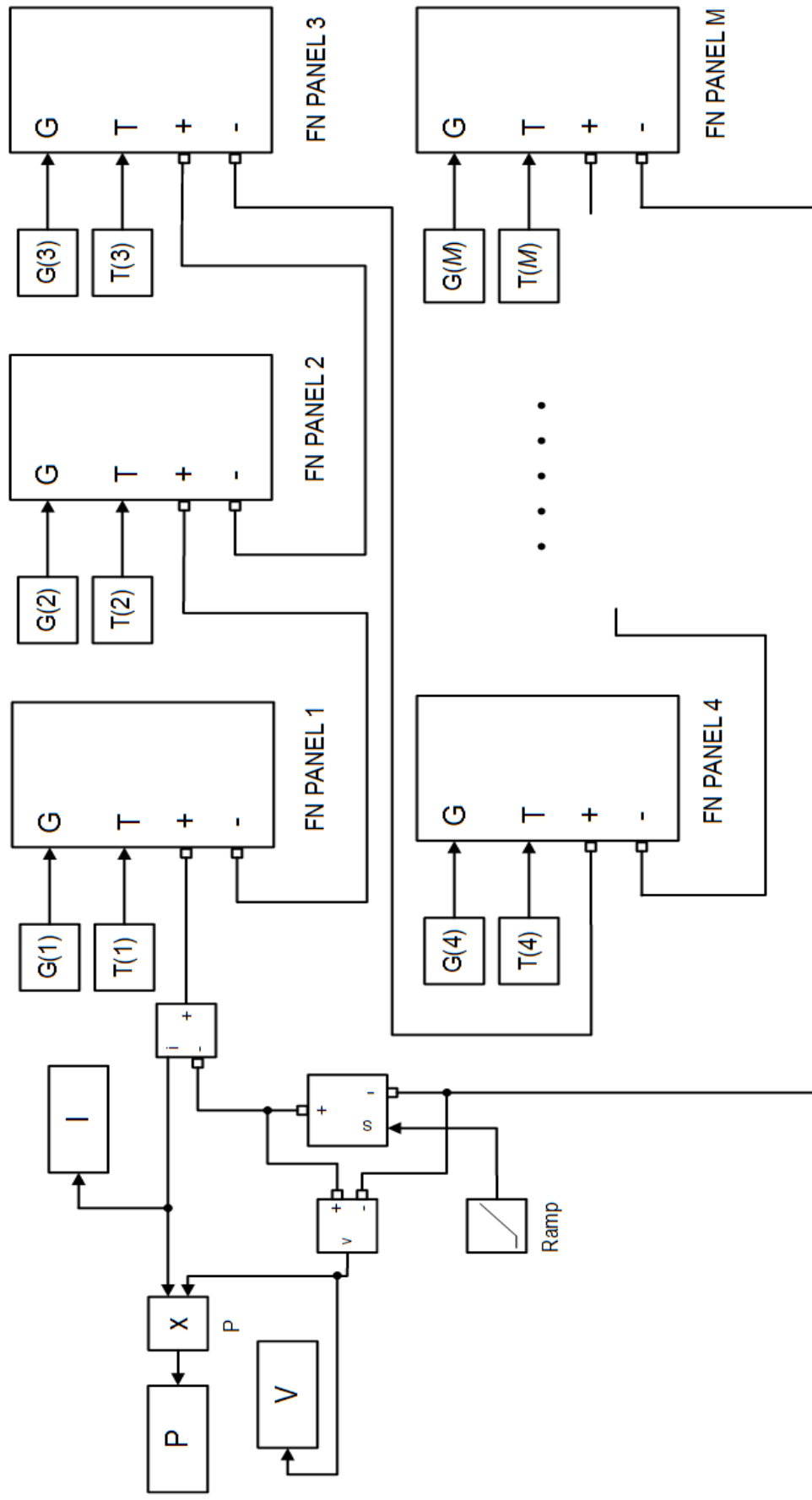
struje, napona i snage FN niza, pomoću čega se dobijaju želejne I-U i P-U krive FN niza u funkciji temperature i solarnog zračenja.

Ranije u tekstu je napomenuto da razvijeni model omogućava simulaciju ponašanja FN niza i u nehomogenim ambijentalnim uslovima. Ovo znači da se za svaki FN panel u nizu može definisati različito solarno zračenje i temperatura, mada je u praksi najčešći slučaj nehomogenog zračenja situacija sa dva različita para ambijentalnih uslova: $[G(1), T(1)]$ i $[G(2), T(2)]$. Ako AU označava broj uređenih parova solarnog zračenja i temperature panela $[G(x), T(x)]$, kojih ima beskonačno, tada za model FN niza sa slike 3.4 važi da je $1 \leq AU \leq M$. Ako je FN niz pod homogenim uslovima zračenja tada važi da je $AU=1$ i svi ulazi za zračenje i temperaturu u blok FN panela su jednaki: $G(1)=G(2)=\dots=G(M)$ i $T(1)=T(2)=\dots=T(M)$. U slučaju nehomogenog zračenja važi da je $AU \neq 1$ i maksimalan broj različito uređenih parova za prikazani model FN niza je $AU=M$.

U radu su analizirane dve situacije. U slučaju homogenog zračenja menjao se broj FN panela u nizu od minimalne vrednosti $M=10$ do maksimalne vrednosti $M=20$. Za svaki broj FN panela u nizu vršena je simulacija pri čemu je $AU=1$. Za nehomogeno solarno zračenje sa $AU=2$ (slučaj sa dva para zračenja i temperature $[G(1), T(1)]$ i $[G(2), T(2)]$) broj FN panela u nizu je konstantan i iznosi $M=20$. Za slučaj nehomogenog zračenja svi FN paneli u senci imaju isto zračenje i temperaturu, na primer $[G(1), T(1)]$, dok FN paneli izloženi sunčevim zracima imaju drugi uređen par, na primer $[G(2), T(2)]$. Da bi simulacioni rezultati bili uporedljivi sa merenim vrednostima, koji su se obavljali u letnjem periodu, važi da je $G(1)=60\text{W/m}^2$ a $T(1)=19^\circ\text{C}$.

Pošto se u slučaju simulacije sa nehomogenim zračenjem menja broj senčenih i osunčanih panela, uvode se dve nove promenljive. U ovom slučaju je ukupan broj FN panela u nizu konstantan i iznosi 20, od čega je n u senci a $N=20-n$ je osunčano.

Vrednosti redne i paralelne otpornosti FN panela korišćenih u simulaciji su određeni pomoću softvera PVsyst. Redna otpornosti ne zavisi od jačine zračenja pa se smatra da je konstanta sa vrednošću od $127\text{m}\Omega$. Paraleni otpor se menja sa zračenjem, te za panele u senci ima vrednost od 700Ω , dok je za osunčane FN panele ova vrednost 250Ω [24].



Slika 3.4 – Ekvivalentna šema jedno-diodnog modela fotonaponske ćelije

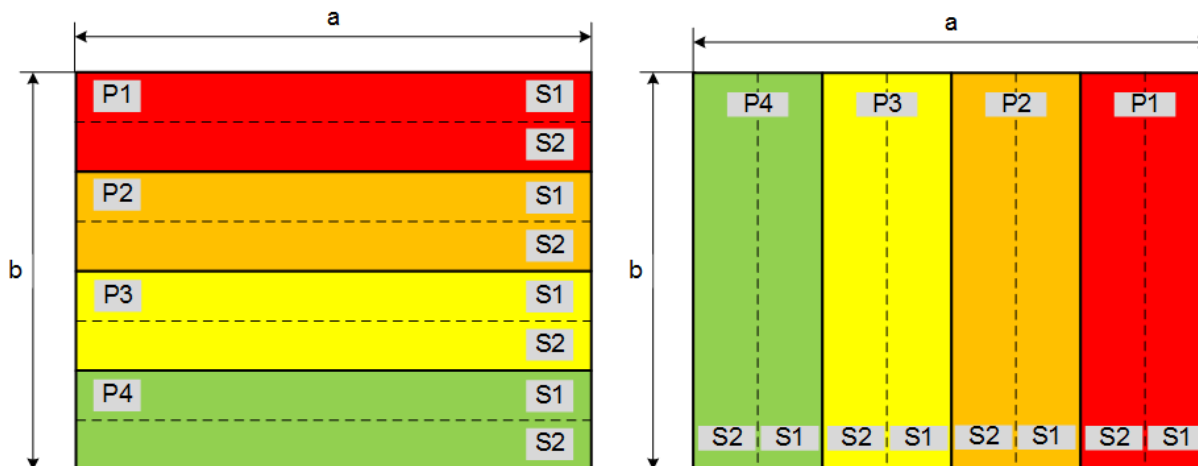
4. Makrokonfiguracija FN polja

Po nepisanom pravilu, međusobno električno povezivanje FN panela (formiranje fotonaponskog niza) u FN elektranama se izvodi po pravcu istok-zapad. Ovaj način povezivanja je posledica pravca prostiranja noseće konstrukcije FN panela i formiranja redova FN panela na nosećoj konstrukciji. Elektrane velikih snaga se izgrađuju na terenima gde je problem senčenja u najvećem broju slučajeva minimalan. Gubici senčenja su skoro isključivo posledica međusobnog senčenja noseće konstrukcije FN panela. U urbanim sredinama FN elektrane, odnosno FN paneli se postavljaju najčešće na krovove, fasade zgrada. Zbog obližnjih zgrada, drveća, dimnjaka, ventilacionih otvora i raznih drugih prepreka, javlja se senčenje FN panela. Ovo senčenje može biti znatno veće u odnosu na elektrane na zemlji velikih snaga. Bez obzira na izbor noseće konstrukcije i njenog pravca prostiranja, a radi smanjenja gubitaka izazvanih senčenjem, moguće je primeniti makrokonfiguraciju FN polja.

Makrokonfiguracija FN polja podrazumeva grupisanje i povezivanje većeg broja FN panela u zavisnosti od senčenja. Ono se izvodi, ne fizičkim pomeranjem FN panela, nego odgovarajućim povezivanjem DC kablova FN panela. Prilikom grupisanja formira se FN podpolje, manje-više pravilnog geometrijskog oblika, čiji pravac prostiranja zavisi od položaja senke nad FN panelima. Princip makrokonfiguracije je prikazan na slici 4.1. FN polje dimenzije $a \times b$ se sastoji iz X podpolja, u konkretnom primeru obeleženih sa $P1$, $P2$, $P3$ i $P4$. U svakom podpolju može biti Y FN niza (na prikazanom primeru svakom podpolju pripadaju dva FN niza; $S1$ i $S2$). Na slici 4.1 levo je prikazano uobičajeno formiranje FN polja i FN redova, po pravcu istok-zapad. Na slici 4.1 desno je prikazan izgled FN polja posle makrokonfiguracije, formiran po pravcu sever-jug.

Makrokonfiguracija se izvodi po određenim kriterijumima, a radi povećanja proizvodnje električne energije FN polja:

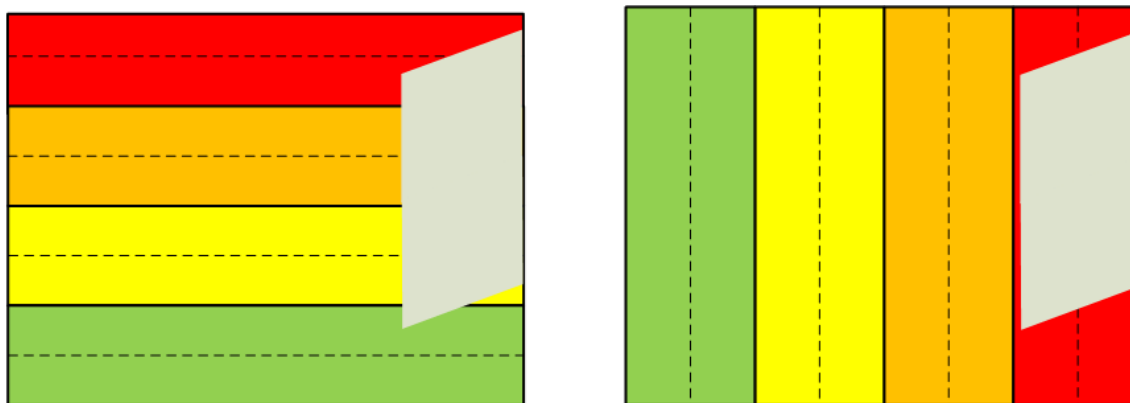
- minimizacija uticaja senčenja FN polja,
- nepromenljivost FN niza,
- što pravilniji geometrijski oblik FN polja.



Slika 4.1 – Princip makrokonfiguracije

Osnovni kriterijum makrokonfiguracije je minimizacija uticaja senčenja FN panela, odnosno maksimalno moguće povećanje proizvodnje električne energije FN polja. Slika 4.2 prikazuje položaj senke nad FN poljem, pre i posle makrokonfiguracije. Položaj senke nad FN poljem je isti za oba slučaja. Međutim, posmatrano u odnosu na FN podpolja i FN nizove, uticaj senčenja je različit. Ovo za posledicu ima različite karakteristike FN nizova, odnosno FN polja.

Pod nepromenljivošću FN niza se smatra zadržavanje istog broja FN panela u nizu, pre i posle makrokonfiguracije, bez obzira na način izvođenja makrokonfiguracije. Formiranje geometrijskog oblika FN polja posle makrokonfiguracije treba da bude što pravilnijeg oblika, zbog jednostavnog, brzog i jeftinog povezivanja FN panela.



Slika 4.2 – Senka nad FN poljem

4.1. PVsyst softver

U softveru PVsyst, koji je razvijen za simulaciju fotonaponskih sistema, urađena je simulacija makrokonfiguracije FN nizova za potrebe doktorske teze. PVsyst su počeli razvijati 1992. godine autor i osnivač dr André Mermouda i Michel Villozia. Tokom izrade teze korišćena je najnovija verzija PVsyst V6 u probnom modu. Ovaj mod se može koristiti punim kapacitetom 30 dana, posle čega ulazi u demo mod sa ograničenim mogućnostima korišćenja (neupotrebljiv za istraživanja).

PVsyst omogućava simulaciju fotonaponskih sistema sa FN panelima, invertorima i drugim sastavnim komponentama sistema, čiji su parametri identični sa odgovarajućim fabričkim proizvodima. Moguća je simulacija sledećih sistema:

- FN sistem spojen sa distributivnom električnom mrežom (DEM),
- samostalni fotonaponski sistem,
- FN sistem za navodnjavanje,
- Sistem sa DC mrežom.

Pored simulacije navedenih FN sistema postoji i deo sa alatkama. Ove alatke omogućavaju rad sa bazom meteoroloških podataka i komponenti FN sistema. U ovoj doktorskoj tezi je korišćen alat za rad sa bazom meteoroloških podataka i deo za simulaciju FN sistema spojenog sa distributivnom električnom mrežom.

4.1.1. Verifikacija PVsyst softvera

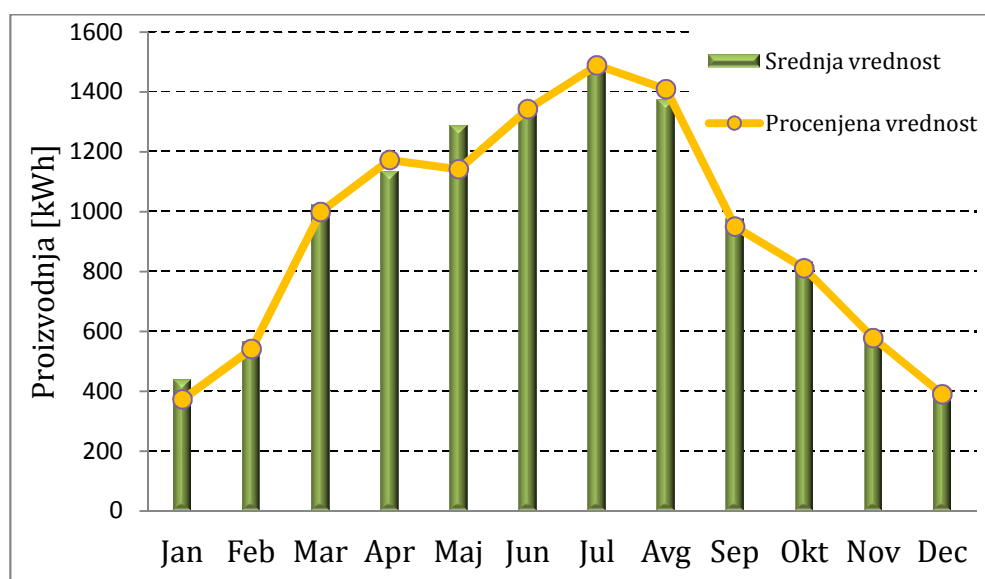
PVsyst je jedan od retkih softvera koji omogućava kompletnu simulaciju FN sistema sa uticajem dalekog i bliskog senčenja. Prilikom modeliranja glavnih komponenti sistema, FN panela i invertora, koriste se fabrički podaci o proizvodu. Istovremeno, što će biti prikazano u narednim poglavljima, koriste se meteorološki podaci zasnovani na izmerenim vrednostima. Softver uzima u obzir i sve moguće gubitke koji nastaju u jednom FN sistemu. Zbog karaktera ulaznih veličina može se reći, da je PVsyst softverski emulator za FN sisteme. Naime, najbitnija izlazna veličina, procena proizvodnje električne energije, je veoma precizna. Ovo potvrđuje i simulacija proizvodnje električne energije FN elektrane na Fakultetu tehničkih nauka, koja je upoređena sa stvarnim vrednostima.

Tabela 4.1 sadrži pregled mesečne proizvodnje električne energije po godinama od kada je elektrana puštena u rad, njihovu srednju vrednost proizvodnje i procenjenu proizvodnju putem PVsysta za FN elektranu na Fakultetu Tehničkih Nauka (FNE-FTN). Elektrana je puštena u rad krajem oktobra 2011. godine. Uporedni grafički prikaz srednje i procenjene vrednosti proizvodnje električne energije elektrane za FNE-FTN se vidi na slici 4.3.

Tabela 4.1 – Proizvodnja električne energije FNE-FTN na mesečnom nivou

	Mesečna proizvodnja električne energije [kWh]						
	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	Sr. vrednost	Procena
Jan		499,25	400,21	371,15	481,7	438,08	373,18
Feb		552,68	427,02	656,1	629,5	566,33	541,52
Mar		1300,39	794,76	1026,9	973,8	1023,96	999,32
Apr		1118,2	1227,57	1035,3	1156,7	1134,44	1172,89
Maj		1307,1	1262,39	1246,7	1333,6	1287,45	1142,23
Jun		1542,8	1182,58	1315,5	1382,90	1355,95	1342,98
Jul		1485,17	1595,89	1353,5	1476,3	1477,72	1489,05
Avg		1522,98	1385,3	1319,6	1268,8	1374,17	1409,45
Sep		1113,56	944,76	874,0	974,9	976,81	950,44
Okt		824,29	916,55	822,7	759,4	830,74	811,28
Nov	484,22	658,65	552,64	542,3	694,0	586,4	578,01
Dec	388,79	292,23	486,8	491,5	362,5	404,4	390,29
Godišnje	949,5	12217,3	11176,5	11055,3	11494,1	11456,4	11200,6

I sa ovim relativno malim brojem podataka, vidi se dobro poklapanje stvarne i procenjene proizvodnje električne energije.



Slika 4.3 – Uporedni prikaz usrednjene i procenjene proizvodnje FNE-FTN

Usrednjavanje stvarne proizvodnje je izvršeno za protekle četiri godine rada elektrane, što je relativno malo u odnosu na vremenski interval usrednjavanja meteoroloških podataka (minimum deset godina). U svakom slučaju na godišnjem nivou relativna razlika između procenjene i stvarne usrednjene proizvodnje iznosi -3,4%. Negativan predznak znači da je proizvodnja bila veća od procenjene, što je dobro sa stanovišta investitora. Relative razlike u proizvodnji na mesečnom nivou su prikazane u tabeli 4.2.

Tabela 4.2 – Relativan razlika u proizvodnji na mesečnom nivou za FNE-FTN

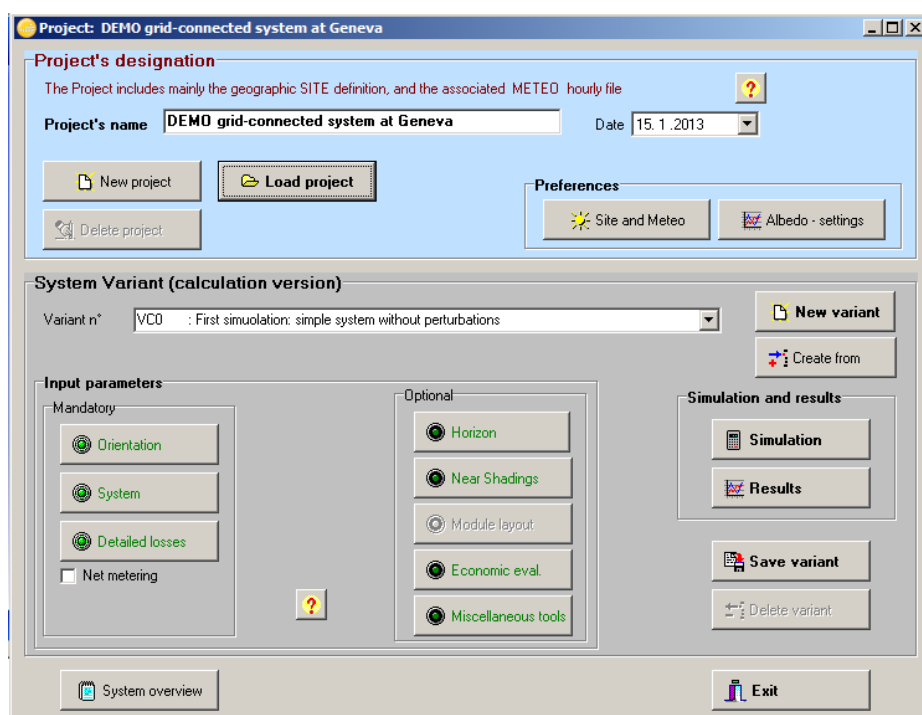
<i>Relativan razlika između procenjene i usrednje proizvodnje</i>							
<i>Mesec</i>	<i>Jan</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Apr</i>	<i>Maj</i>	<i>Jun</i>	
<i>Relativna razlika [%]</i>	-17,39	-4,58	-2,46	3,28	-12,71	-0,96	
<i>Mesec</i>	<i>Jul</i>	<i>Avg</i>	<i>Sep</i>	<i>Okt</i>	<i>Nov</i>	<i>Dec</i>	<i>Godišnje</i>
<i>Relativna razlika [%]</i>	0,76	2,50	-2,77	-2,40	-1,44	-3,60	-3,39

4.1.2. Simulacija FN sistema spojenog sa DEM

Sledi kratak opis postupaka i podešavanja parametara koji se izvode pre početka simulacije. Slika 4.4 prikazuje izgled početnog prozora softvera za simulaciju FN sistema spojenog sa DEM. Da bi se omogućila simulacija potrebno je pravilno izabrati i podesiti ponuđene opcije, u suprotnom simulacija će biti onemogućena. Ovo je potrebno uraditi u nekoliko koraka.

Prvo je potrebno definisati novi projekat ili učitati postojeći. Posle toga se unose meteorološki podaci za odabranu lokaciju. U slučaju nedostatka meteoroloških podataka izabranog mesta u softveru, postoji alat za unos ovih vrednosti. Ovi meteorološki podaci se mogu uneti iz različitih baza podataka, od kojih su neki besplatni, a neki se naplaćuju. Neki od poznatijih meteoroloških baza podataka su PVGIS, SolarGIS, NASA-SSE, WRDC, Meteonorm, Helioclim i SolarGIS. Nakon unosa meteoroloških podataka pristupa se odabiru tehničkih parametara FN sistema. Prvo se definiše tip noseće konstrukcije (fiksna konstrukcija ili razni rotatorski sistemi), nagibni ugao, kao i ostali zahtevani parametri. Ako postoji daleko senčenje mora se definisati izgled horizonta. Nakon toga, ako postoje, definišu se prepreke koje prouzrokuju blisko senčenje. Za to je razvijen poseban softver za trodimenzionalno crtanje. Pomoću ovog softvera se definiše položaj i razmeštaj FN panela i okolnih prepreka. Pre izbora tipa FN panela i invertora, potrebno je pokrenuti alat koji računa nivo senčenja za razne azimutne i visinske uglove Sunca. Posle određivanja nivoa senčenja definišu se komponente sistema, FN paneli i invertori. U bazi podataka komponenti FN sistema prisutni su svi značajni svetski proizvođači FN panela i invertora, kao i njihovi ostali proizvodi. U slučaju pojavljivanja novog FN panela ili

invertora na tržištu, baza podataka PVsysta se lako može nadograditi sa sajta PHOTON, koja je najveća baza podataka komponenti FN sistema [100]. Za slučajeve sa problematičnim lokacijama u smislu senčenja, postoji poseban alat koji omogućava proizvoljno pozicioniranje FN panela i njihovo međusobno povezivanje, odnosno formiranje FN nizova. Ovo omogućava da način formiranja FN nizova u softveru bude identičan sa onim na terenu. Time se može postići optimizacija razmeštanja FN panela i formiranja FN nizova na lokaciji. Cilj optimizacije je smanjenje gubitaka u sistemu. Svi gubici koji se javljaju u FN sistemu su predefinisani i podešeni na realne, očekivane vrednosti. Upravo ovaj alat je iskorišćen za proveru efikasnosti makrokonfiguracije. Poseban alat za najrazličitije gubitke omogućava korisniku unos sopstvenih vrednosti. Samo kada su svi parametri pravilno odabrani, podešeni i usaglašeni omogućava se simulacija. Glavni rezultat simulacije je procena proizvodnje električne energije na mesečnom i godišnjem nivou. Pored toga prikazuje se i dijagram gubitaka koji se javlja u FN sistemu, na osnovu čega se može doneti zaključak o kvalitetu optimizacije i projektovanja elektrane.



Slika 4.4 – Izgled prozora programa za simulaciju FN sistema spojenog na DEM

4.1.3. Meteorološki podaci

Svi modeli koji su razvijeni za potrebe ove teze simulirani su za lokaciju Novog Sada. Shodno tome, svi prezentovani meteorološki podaci se odnose za širu okolinu Novog Sada.

Za simulaciju je izabrana postojeća meteorološka baza podataka u softveru nazvana Meteororm. Meteororm koristi podatke sa oko 8300 meteoroloških stanica širom sveta, od kojih se 1856 nalazi u Evropi. Pored toga, izvor podataka je Svetska meteorološka organizacija i Švajcarski meteorološki zavod. U bazi podataka Meteororma za klimatološki period 1961-1990 i 2000-2009 dostupni su podaci o temperaturi, vlažnosti vazduha, brzini vetra i padavinama. Podaci o zračenju se odnose za klimatološki period 1981-1990 i 1986-2005. Svi podaci koji se nalaze u bazi podataka Meteororma su pažljivo provereni pre njihovog unosa. Razni projekti i istraživački rad garantuju kvalitet podataka koji se nalaze u meteorološkoj bazi [101].

Na osnovu meteorološke baze Meteororma za lokaciju Novog Sada, a pomoću PVsyst alata, generisane su časovne meteorološke vrednosti. Ove časovne vrednosti se koriste prilikom simulacije rada FN elektrane. Tabela 4.3 prikazuje najosnovnije podatke koji se nalaze u meteorološkoj bazi Meteororma za lokaciju Novog Sada. U poslednjem redu tabele prikazane su sume zračenja na godišnjem nivou (Sum.) i usrednjene vrednosti prikazanih veličina (Sr.)

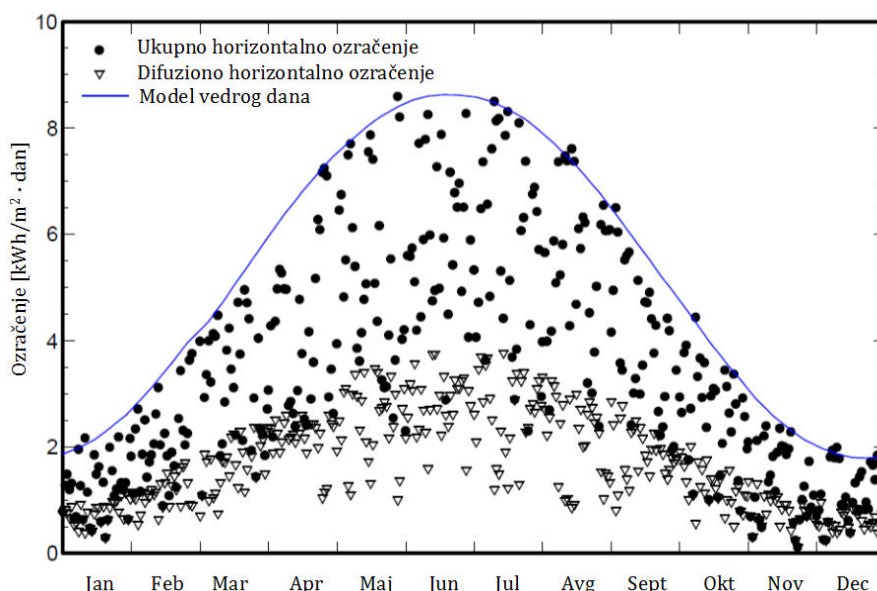
Tabela 4.3 – Najznačajniji parametri Meteororm baze podataka za lokaciju Novi Sad

	<i>Ukupno horizontalno zračenje</i>	<i>Difuziono horizontalno zračenje</i>	<i>Ekstraterestrijalno zračenje</i>	<i>Prosečni indeks prozračnosti atmosfere</i>	<i>Prosečna temperatura vazduha</i>	<i>Prosečna brzina vetra</i>
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]		[°C]	[m/s]
Jan	37,9	23,0	104,2	0,364	0,0	2,7
Feb	59,1	31,8	138,7	0,426	1,7	2,8
Mar	98,9	51,4	216,1	0,458	6,4	3,3
Apr	125,3	65,3	276,8	0,453	11,8	3,2
Maj	179,5	75,4	337,0	0,488	17,7	2,6
Jun	174,2	84,3	348,1	0,501	20,7	2,3
Jul	180,0	82,6	349,9	0,515	21,7	2,3
Avg	165,9	67,9	308,5	0,538	21,9	2,1
Sep	118,8	56,9	236,6	0,502	16,5	2,2
Okt	81,1	38,7	175,8	0,461	12,1	2,5
Nov	40,3	23,5	113,9	0,354	6,7	2,8
Dec	35,7	18,7	90,7	0,394	0,9	2,6
Godišnje	Sum.: 1281,9	Sum.: 621,4	Sum.: 2696,2	Sr.: 0,475	Sr.: 11,5	Sr.: 2,6

Sledećih nekoliko slika prikazuje grafike različitih meteoroloških veličina, kao što su zračenje, temperatura vazduha i brzina vetra. Ovi grafici predstavljaju

generisane jednočasovne vrednosti pomoću softvera PVsyst, a koji su dobijeni iz Meteororm baze podataka. Sve vrednosti koje su prikazane na graficima su srednje vrednosti za vremenski interval koji je naveden na početku ovog poglavlja.

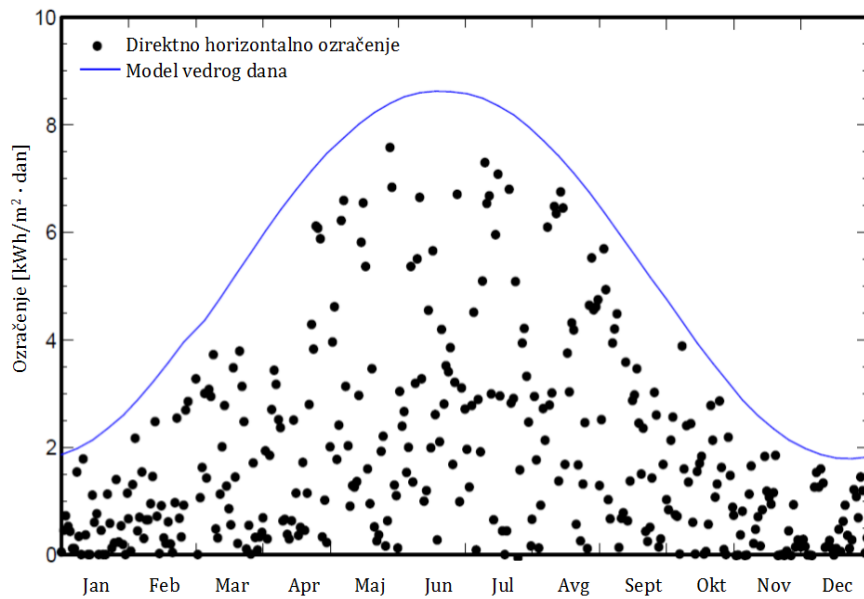
Polazna osnova prilikom procene proizvodnje električne energije nekog FN sistema je horizontalno ozračenje (energija zračenja). Slika 4.5 prikazuje promenu horizontalnog ozračenja tokom godine za šire područje Novog Sada. Punom linijom je predstavljeno ukupno horizontalno ozračenje modela vedrog dana. U stvarnosti se veoma retko dešava situacija da tokom dana nema oblačnosti, pa se proračunava ozračenje za potpuno vedar dan. Ono se naziva model vedrog dana i predstavlja teoretske maksimalne vrednosti ozračenja. Ukupno horizontalno ozračenje na dnevnom nivou za tipičan meteorološki dan je prikazano kružićima na slici, dok se trouglovi odnose na vrednosti difuzionog horizontalnog ozračenja, takođe za tipičan meteorološki dan. Tipičan meteorološki dan predstavlja realno stanje, gde su uzete u obzir sve situacije koje dovode do slabljenja ozračenja.



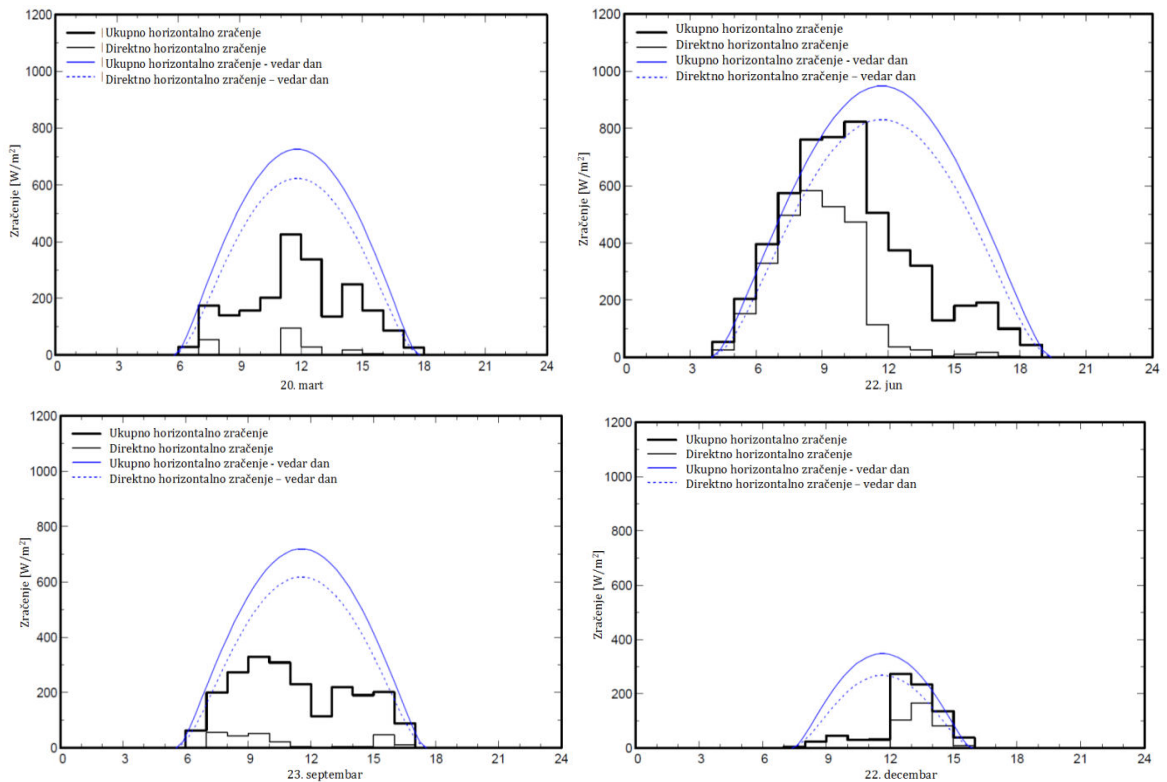
Slika 4.5 – Promene vrednosti ukupnog i difuzionog horizontalnog ozračenja

Promene vrednosti direktnog horizontalnog ozračenja za tipičan meteorološki dan se vide na slici 4.6.

Prilikom generisanja jednočasovnih meteoroloških vrednosti iz Meteororm baze podataka, formira se tok promene zračenja za svaki dan u godini. Ova promena zračenja je generisana na način da statističko standardno odstupanje bude minimalno u odnosu na višegodišnje srednje vrednosti. Na slici 4.7 su prikazane promene ukupnog i direktnog horizontalnog zračenja, kako za tipičan, tako i za vedar dan. Sa aspekta solarne geometrije, prikazana su četiri karakteristična dana u godini; ravnodnevnic (20. mart i 23. septembar), letnja dugodnevnic (22. jun) i zimska kratkodnevnic (22. decembar).

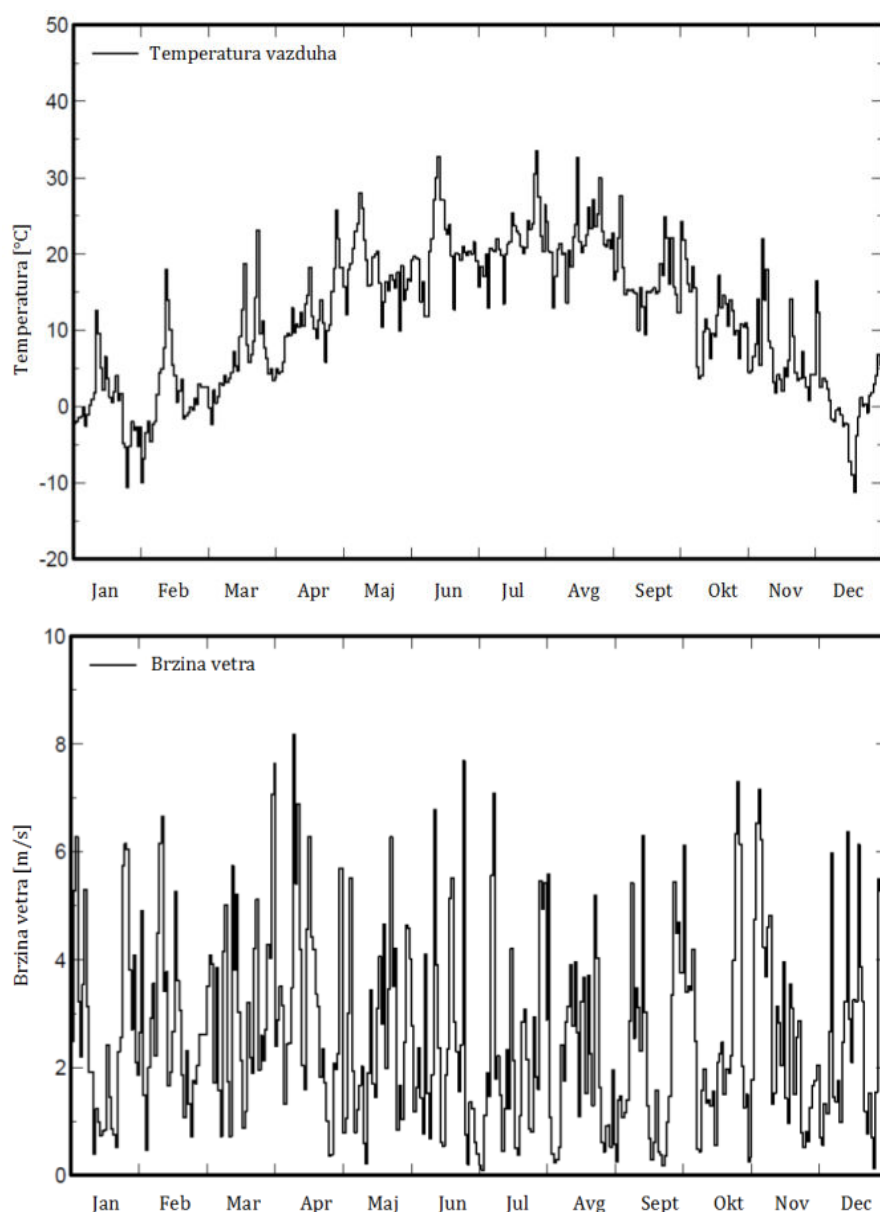


Slika 4.6 – Promene vrednosti direktnog horizontalnog ozračenja tokom godine



Slika 4.7 – Promena dnevnog horizontalnog zračenja za karakteristične dane u godini

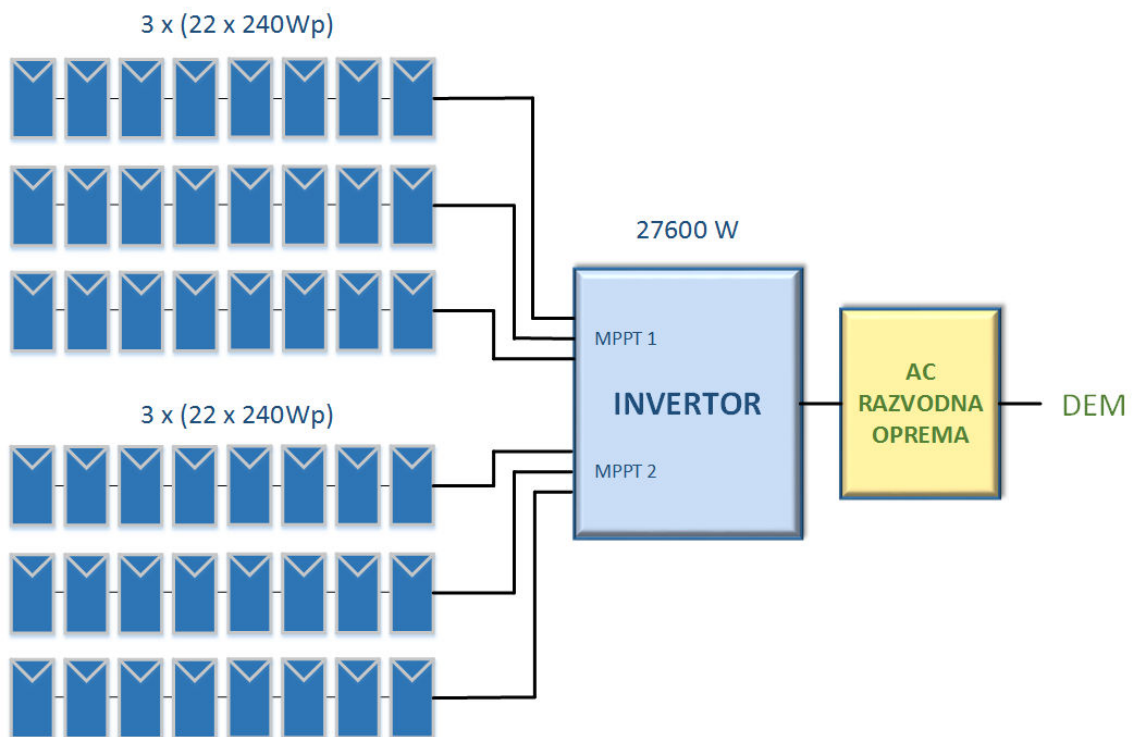
Na sličan način, odgovarajućim algoritmima za ambijentalne uslove, dobijeni su jednočasovni podaci za prosečnu temperaturu vazduha i brzinu vetra. Slika 4.8 prikazuje srednje vrednosti promene temperature vazduha i brzine vetra na godišnjem nivou za širu lokaciju Novog Sada.



Slika 4.8 – Promena temperature i brzine vetra tokom godine za lokaciju Novog Sada

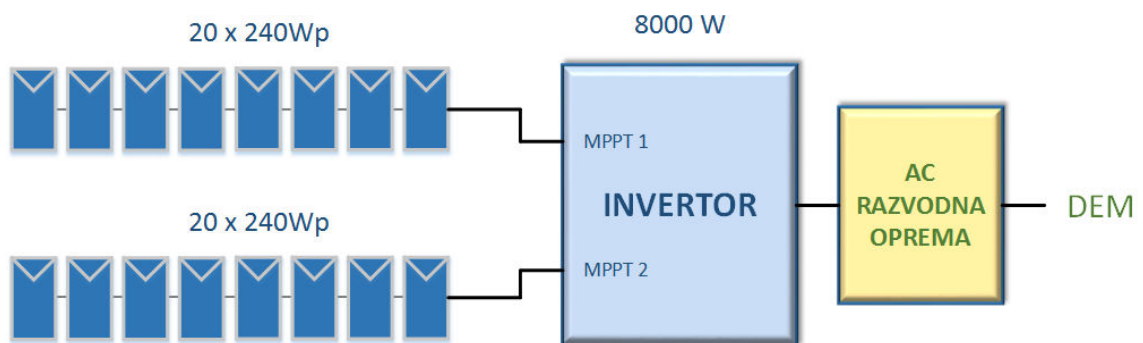
4.1.4. Blok šeme FN elektrana analiziranih u PVsyst-u

Na slikama 4.9 i 4.10 su prikazane blok šeme FN elektrane za koje su rađene simulacije u softveru PVsyst. Na slici 4.9 se vidi blok šema elektrane za koju je istraživana uticaj senčenja na proizvodnju u zavisnosti od različitog položaja prepreka oko elektrane. Izabran je inverter nominalne snage 27,6kW (maksimalna snaga 30kW) sa dva nezavisna MPPT ulaza (MPPT1 i MPPT2). Na svaki ulaz invertora se vezuju paralelno po tri FN niza. Svaki niz se sastoji od 22 FN panela pojedinačne snage 240Wp. Ukupna snaga FN panela je 31,68kWp.



Slika 4.9 – Blok šema FN elektrane za simulaciju uticaja senčenja sa različitim položajem prepreka

Slika 4.10 prikazuje blok šemu elektrane FTN Novi Sad. U PVsyst-u je istraživana makrokonfiguracija, dok je mikrokonfiguracija rađena tokom eksploatacije elektrane uporedo sa simulacijom u Matlab/Simulink softveru.



Slika 4.10 – Blok šema FN elektrane sagrađene na Fakultetu tehničkih nauka

FN elektrana sadrži inverter nominalne snage 8 kW, sa dva nezavisna MPPT ulaza (MPPT1 i MPPT2). Na svaki ulaz su vezana po 20 FN panela pojedinačne nominalne snage 240Wp. Ukupna snaga FN panela je 9600kW.

4.1.5. Opis FN panela i invertora korišćenih tokom simulacije makrokonfiguracije

Izbor ključne opreme u softveru za potrebe simulacije je izabran na osnovu opreme koja se nalazi u postojećoj FN elektrani, i one koja se može nabaviti na tržištu Srbije. Izabran je tip FN panela koji se koristi u postojećoj elektrani. Što se tiče invertora, u modelu su korišćeni podaci invertora postojeće elektrane, kao i one koja se može nabaviti na tržištu Srbije.

4.1.5.1. FN panel

Izabrani FN panel je izrađen od polikristalnog silicijuma (eng. multicrystalline silicon, mc-Si). FN panel je sačinjen od 60 pojedinačnih ćelija, čija je ukupna nominalna snaga 240Wp. FN panel nosi oznaku JKM240P-60. Osnovne karakteristike FN panela su date u prilogu ovog rada.

Proračunati parametri jedno-diodnog modela FN panela tipa JKM240P-60 u PVsystu su prikazani u tabeli 4.4.

Tabela 4.4 – Proračunati parametri modela FN panela

Proračunati parametri modela	Vrednosti
Fotostruja – I_{fs}	8,099 A
Inverzna struja – I_0	$2 \cdot 10^{-9}$ A
Faktor idealnosti – γ	1,1
Redni otpor – R_R	0,27 Ω
Paralelni otpor – R_P	250 Ω

Tabela 4.5 prikazuje karakteristične veličine FN panela koji zadaje proizvođač pri standardnim uslovima testiranja (engl. Standard Test Condition, STC). Ove veličine se koriste prilikom izbora DC kablova (proračun strujne nosivosti i gubitaka) i usaglašavanja FN panela i invertora. U istoj tabeli su prikazane odgovarajuće veličine koje su proračunate na osnovu jedno-diodnog modela u PVsystu, takođe pri STC uslovima. Upoređivanjem fabričkih karakteristika FN panela sa vrednostima jedno-diodnog modela vidi se da je najveća relativna razlika u struji pri maksimalnoj snazi FN panela, koja iznosi 0,5%. Razlika struje do vrednosi 2,1% zadovoljava, jer proizvođač FN panela garantuje toleranciju u opsegu od $\pm 3\%$. Dakle, može se zaključiti da su parametri modela FN panela identični sa stvarnim proizvođačkim karakteristikama.

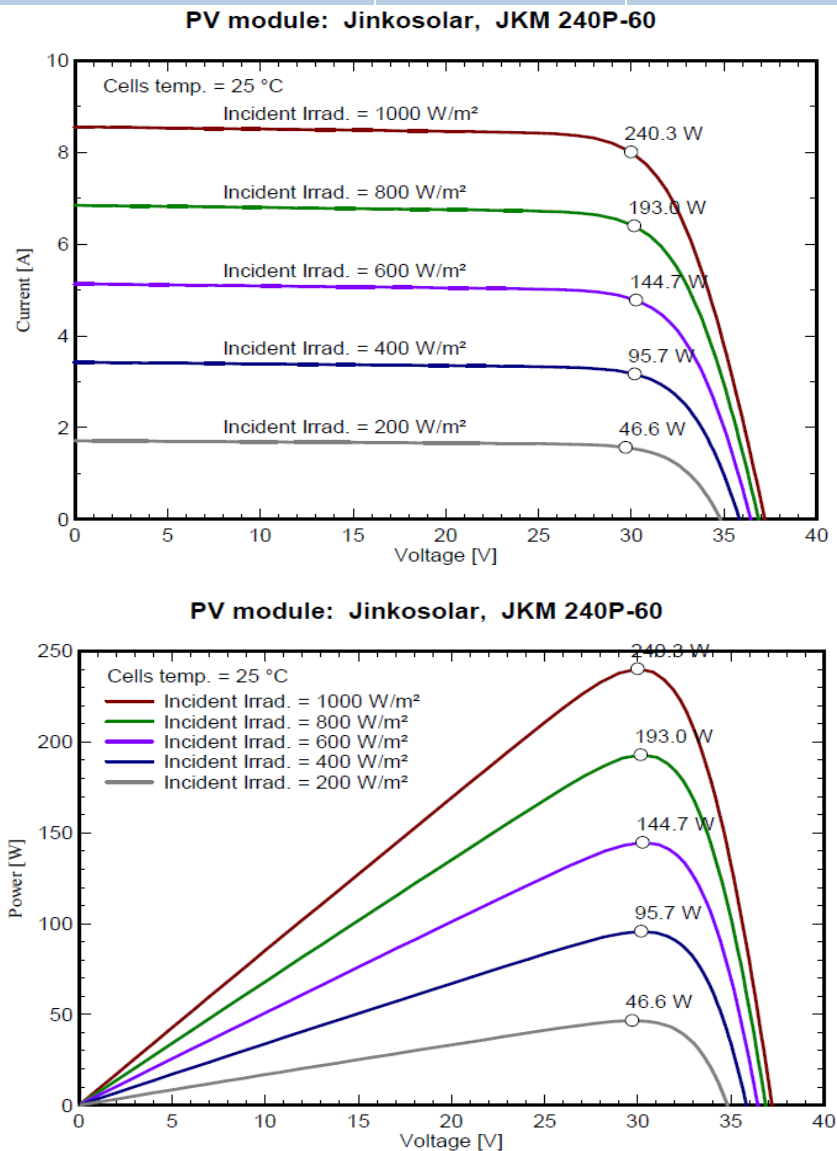
Slika 4.11 prikazuje simulacione rezultate karakteristike FN panela u Pvsystu, pri konstantnoj temperaturi ćelije od 25°C i različitim nivoima zračenja.

Makrokonfiguracija FN polja

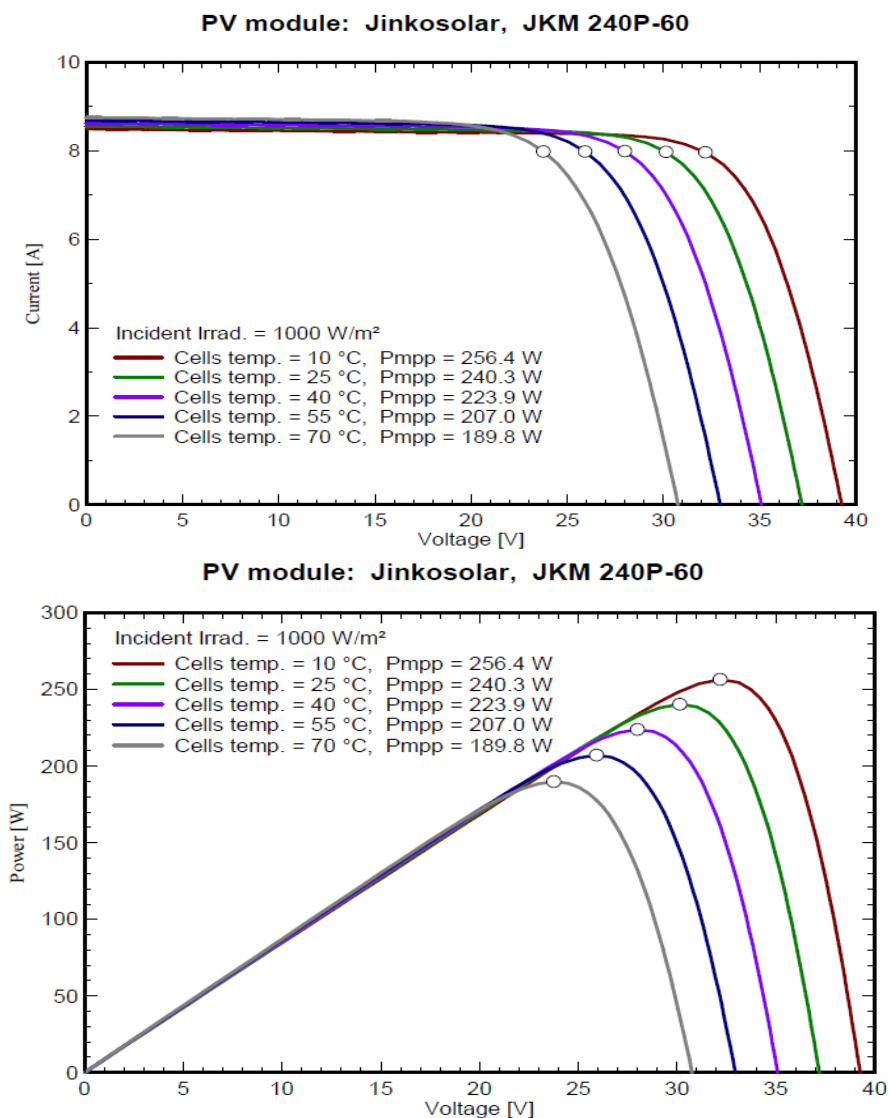
Karakteristike FN panela pri različitim temperaturama i konstantnom zračenju od 1000W/m^2 je prikazano na slici 4.12.

Tabela 4.5 – Fabrički i proračunati parametri FN panela

Osnovni parametri FN panela	Fabrički podaci	Jedno-diodni model u PVsystu
Nominalna snaga [Wp]	240	240,3
Napon pri maksimalnoj snazi [V]	30,0	30,1
Struja pri maksimalnoj snazi [A]	8,01	7,97
Napon praznog hoda [V]	37,2	37,2
Struja kratkog spoja [A]	8,56	8,56
Efikasnost [%]	14,68	14,66



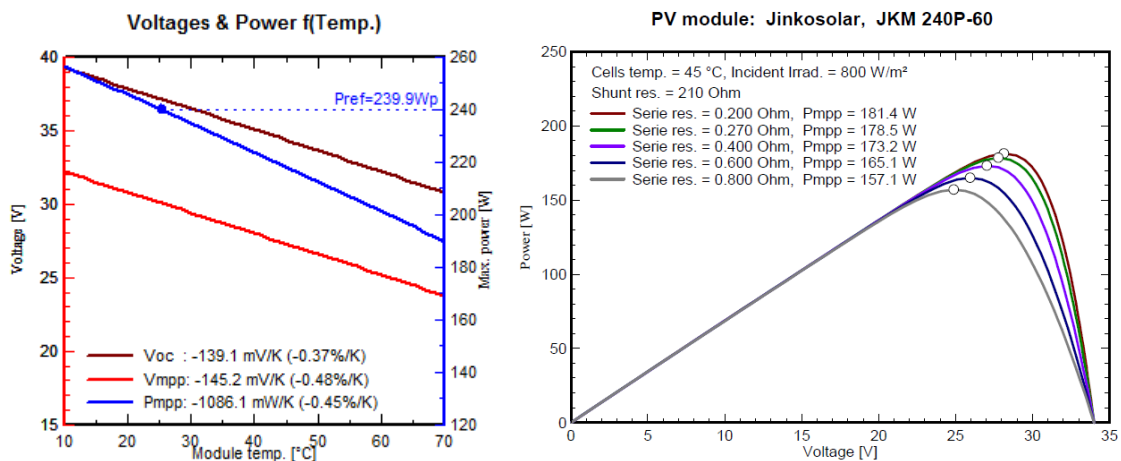
Slika 4.11 – Simulacioni rezultati I-U i P-U karakteristike FN panela JKM240P-60



Slika 4.12 – Promena struje i snage panela u funkciji napona, pri zračenju od 1000W/m²

Na karakteristikama FN panela na slikama 4.12 i 4.13 naznačene su tačke maksimalne snage (TMS) FN panela, pa se tako vidi kako se menjaju sa promenom zračenja, odnosno temperature.

Promena temperaturnih koeficijenata napona (TKU) i snage (TKP) FN panela u funkciji temperature je prikazana na slici 4.13, levo. Na istoj slici desno se vidi uticaj serijske otpornosti FN panela na snagu FN panela, što znači da je veoma bitno što približnije određivanje serijske otpornosti. Krive su prikazane za nominalne uslove rada FN panela (engl. Nominal Operating Cell Temperature, NOCT). Pri nominalnim uslovima rada FN panela predefinisani nivo solarnog zračenja iznosi 800W/m², temperatura vazduha 20°C (temperatura FN panela 45°C) i brzina vetra 1m/s. Pretpostavlja se da je FN panel postavljen na slobodnostojeću konstrukciju sa dovoljnim vazдушnim strujanjem.



Slika 4.13 – Promena TKU i TKP od temperature (levo) i promena snage FN panela u funkciji redne otpornosti (desno)

4.1.5.2. FN Invertor

Tokom simulacije u PVsyst softveru, korišćena su dva invertora. U elektrani FNE-FTN se nalazi string invertor firme SMA oznake STP 8000-TL, pa je iz tih razloga isti korišćen u simulaciji. Drugi invertor je odabran iz razloga što je u trenutku izrade teze, na tržištu ovo bio string invertor sa najvećom izlaznom snagom. Njegova snaga omogućava dovoljno veliku površinu za razmeštaj FN panela, radi proučavanja uticaja senčenja. Ovaj invertor, proizvođača POWER ONE (od 2014. godine ABB), ima oznaku TRIO 27.6-TL-OUTD.

Tabela 4.6 – Osnovni tehnički podaci korišćenih invertora

Karakteristične veličine	TRIO 27.6-TL-OUTD	STP 8000-TL
Broj nezavisnih MPPT ulaza	2	2
Maksimalni ulazni jednosmerni napon	1000 V	1000 V
Nominalni ulazni jednosmerni napon	620 V	600 V
Minimalni ulazni jednosmerni napon	175 V	150 V
MPPT ulazni jednosmerni naponski opseg	200 V ... 950 V	320 V ... 800 V
Nominalna ulazna struja po MPPT ulazu	32 A	11A / 22A
Nominalna izlazna snaga na 230 V, 50Hz	27600 W	8000 W
Maksimalna prividna snaga	30000 VA	8000 VA
Nominalni napon mreže	3/N/PE, 230V/400 V	3/N/PE, 230V/400 V
Maksimalna izlazna struja	45 A	16A
Efikasnost maksimalna/EURO	98,2% / 98 %	98,1 % / 97,5 %

Nadalje će se razmotriti tehničke karakteristike invertora, koje PVsyst usvaja prilikom simulacije. Zahvaljujući karakteristikama koje su implementirani u softver,

izlazna veličina iz modela invertora, a to je proizvedena količina električne energije, će biti najbliža izlaznoj veličini stvarnog invertora. Tabela 4.6 prikazuje najosnovnije tehničke podatke koje koristi PVsyst softver. Inače, ovi tehnički podaci se koriste i prilikom projektovanaj FN elektrane.

Osnovni zadatak FN invertora je da jednosmernu snagu FN panela na svom ulazu pretvori u naizmeničnu na svom izlazu, sa što manjim električnim gubicima. Kao što se vidi iz tabele 4.6, efikasnost odabranih invertora je velika, iznad 97%. Naravno, ova efikasnost je promenljiva i zavisi od trenutnih uslova rada, kao i od usaglašenosti FN niza i invertora. Prikazani naponski nivoi u tabeli 4.6 su ulazni podaci za softver, koji se koriste pri simulaciji rada invertora.

Što se tiče ulaznog dela, savremeni string invertori poseduju od jedan do tri nezavisna MPPT ulaza. Da bi inverter maksimalno iskoristio trenutnu raspoloživu snagu FN niza, FN polja, ulazni naponski nivo treba da je u određenom opsegu (između $U_{iTMSmin}$ i $U_{iTMSmax}$). U zavisnosti od uslova rada, kada se premaši napon $U_{iTMSmax}$, kao kod većine invertora, PVsyst ulazi u mod "limitacija napona". Napon se setuje na maksimalnu vredost jednaku $U_{iTMSmax}$. Poznato je da efikasnost invertora zavisi između ostalog i od ulaznog jednosmernog napona. Za svaki napon U_{mpp} u tački maksimalne snage FN stringa, računa se efikasnost i na osnovu ulazne snage se nalazi izlazna snaga invertora [24].

Što se tiče minimalnog ulaznog napona, PVsyst ga ne računa i analizira. Ovaj napon je praktično nezavisan od zračenja. Kod većine komercijalnih invertora minimalni ulazni napon se dostiže pri minimalnom zračenju. Invertori se uključuju i pri potpuno oblačnom vremenu, kada zračenje ne premašuje vrednosti od 30 do 50 W/m². U softveru je podešeno da pri zračenju od 5 W/m² inverter raspolaže sa snagom koja je jednaka sa 0,5% nominalne izlazne snage [24].

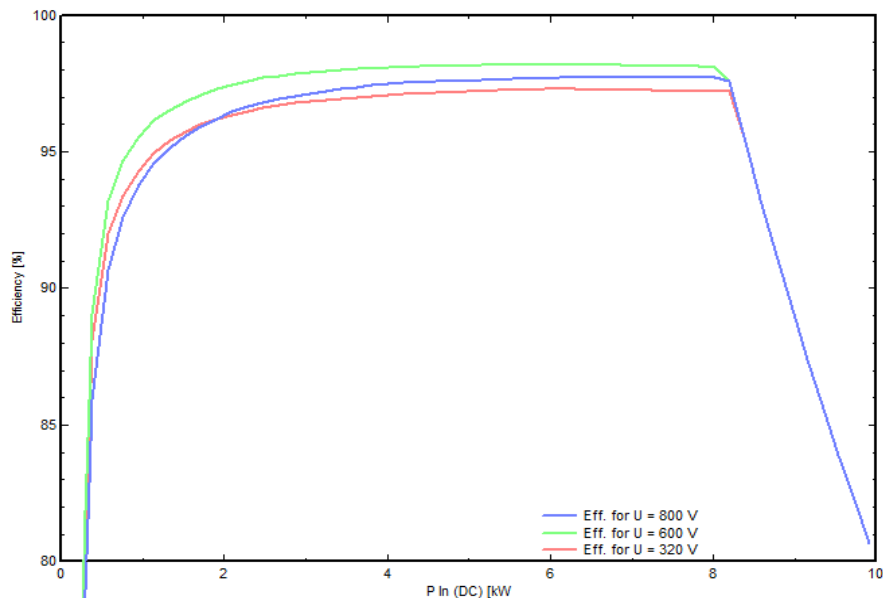
Ako je snaga FN niza u TMS veća od maksimalno dozvoljene jednosmerne snage na ulazu invertora P_{DCmaks} , dolazi do limitiranja ulazne snage. Ulazna jednosmerna snaga je tako limitirana, da je izlazna snaga invertora jednaka nominalnoj izlaznoj snazi. MPPT regulator ulazni napon povećava dok se ne dostigne P_{DCmaks} . U ovom modu se ne povećava disipacija invertora. Jednostavno dolazi do limitiranja ulazne jednosmerne snage. U slučajevima da MPPT regulator ima potrebu da poveća ulazni napon iznad $U_{iTMSmax}$, radi dostizanja P_{DCmaks} , dolazi do značajnih gubitak u invertoru [24].

Glavni parametar, koji karakteriše inverter na izlazu je nominalna izlazna snaga P_{ACnom} . Neki proizvođači zadaju i maksimalnu izlaznu snagu invertora. Ovu snagu inverter razvija uz ograničenja, što su najčešće vremenski interval rada u zavisnosti od temperatura vazduha, odnosno radne temperature invertora. Pri temperaturama koji prelaze dozvoljene maksimalne vrednosti, inverter prelazi u

režim redukcije izlazne snage. PVsyst ne uzima u obzir slučaj redukcije izlazne snage zbog porasta radne temperature iznad dozvoljene granice. Ovo nije nedostatak softvera jer kod dobro projektovanog FN sistema ova situacija se nikad ne javlja [24].

Gubici u kablju, koji povezuje elektranu sa mrežom, se proračunavaju. Gubici se određuju na osnovu naponskog nivoa mreže. Model mreže u PVsystu ne postoji, tako da se uticaj mreže na rad elektrane ne razmatra.

Pored ulaznih i izlaznih parametara invertora, PVsyst razmatra i krivu efikasnosti. Kao što i proizvođači najčešće zadaju tri krive efikasnosti za različite vrednosti jednosmernog ulaznog napona, tako i simulacija uzima u obzir ove tri krive. Tokom simulacije se sprovodi kvadratna interpolacija triju krivi efikasnosti. Slika 4.14 prikazuje krivu efikasnost invertora STP 8000-TL koju koristi softver PVsyst.



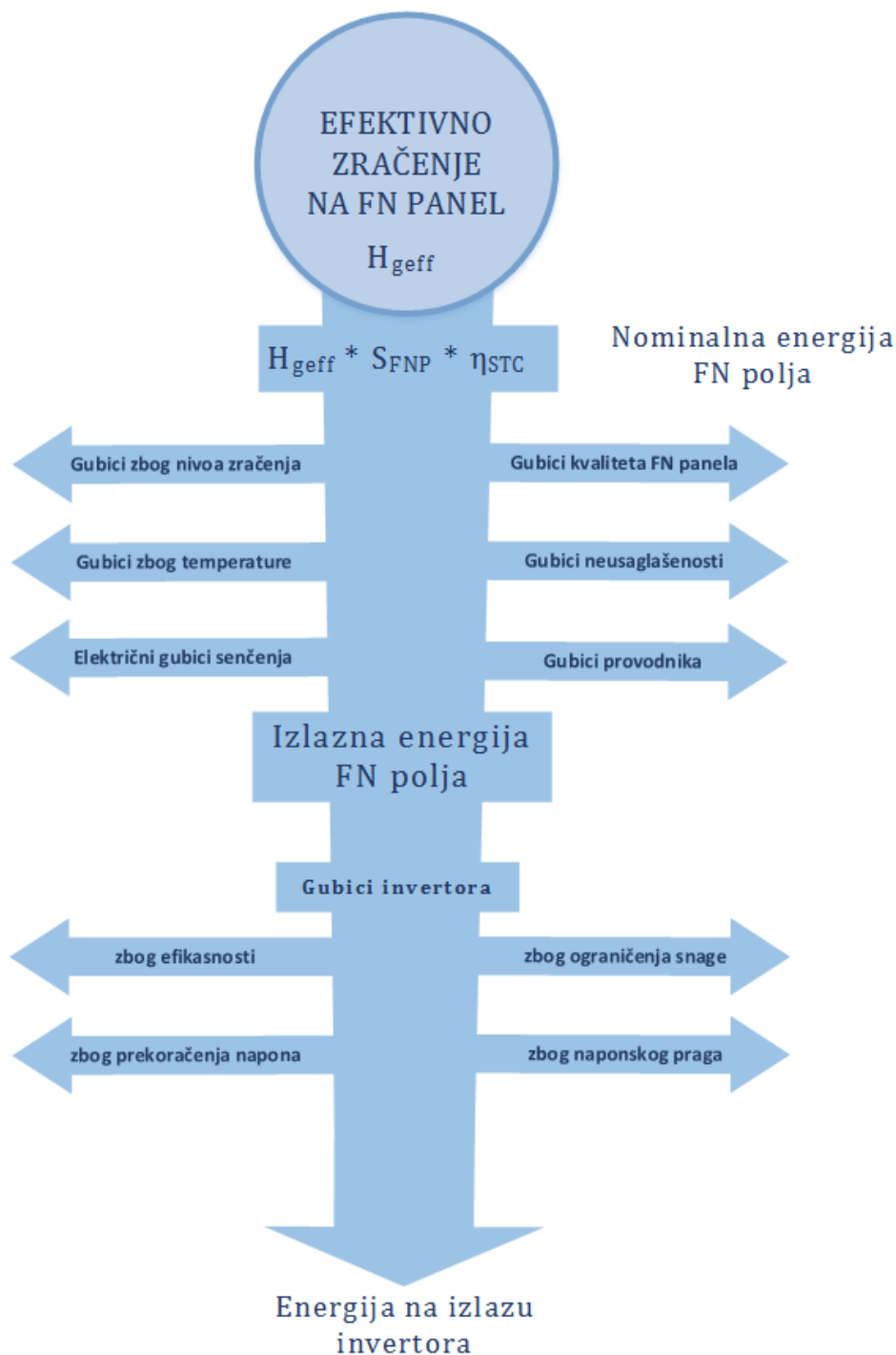
Slika 4.14 – Izgled krive efikasnosti za SMA inverter STP 8000-TL u Pvsystu

4.1.6. Struktura razmatranih gubitaka PVsyst softvera

Do sada su opisani ulazni parametri u softver PVsyst (meteorološki parametri), kao i osnovne komponente elektrane (FN panel i inverter), koji definišu prenosnu karakteristiku simulacionog procesa. Pored navedenih činilaca postoji još nekoliko predefinisanih parametara, koji utiču na izlazni rezultat, odnosno na proizvedenu električnu energiju FN elektrane.

U ovom poglavlju će biti razmotrena struktura gubitaka koju PVsyst uzima u obzir i na taj način od raspoloživog solarnog zračenja, koje dospe na površinu FN panela, dolazi se do energije koja se predaje u DEM. Struktura gubitaka koje softver PVsysta uzima u obzir se vidi na slici 4.15.

Ulazni meteorološki parametar je nivo ukupnog solarnog zračenja koji dospe na FN panele, koji su pozicionirani pod određenim nagibnim i azimutnim uglom. Ovo zračenje je nazvano efektivno (H_{geff}) i rezultat je proizvoda ukupnog horizontalnog zračenja i pojačanja zračenja koje se dobija kao posledica različitog položaja FN panela u odnosu na horizontalan položaj.



Slika 4.15 – Dijagram gubitaka koje uzima u obzir PVsyst

Nominalna električna energija FN polja E_n se dobija iz izraza

$$E_n = H_{geff} \cdot S_{FNP} \cdot \eta_{STC} \quad (5.2)$$

pri čemu su S_{FNP} ukupna površina FN polja i η_{STC} stepen korisnog dejstva FN panela pri standardnim uslovima testiranja.

Izlazna energija FN polja se dobija usvajanjem svih spoljašnjih uticaja, gubitaka nad FN poljem, koji su sledeći:

- gubici usled promene nivoa zračenja,
- gubici kvaliteta FN panela,
- gubici usled temperaturnih promena FN panela,
- gubici neusaglašenosti FN panela,
- električni gubici senčenja i
- gubici provodnika za povezivanje FN panela.

Gubici zbog promene nivoa zračenja nastaju jer se menja efikasnost FN panela sa promenom zračenja. Pri malim nivoima zračenja (manje od 200W/m²) efikasnost FN panela značajnije opada. Gubici kvaliteta FN panela ocenjuju različitost vrednosti parametara korišćenih FN panela u odnosu na fabričke zadate vrednosti. Gubitke usled promene temperature FN panela ne treba posebno opisivati, dobro su poznati i već su bili opisani u ovom radu. Gubici neusaglašenosti FN panela su posledica neidealnosti FN panela. Naime, svaki FN panel ima svoju prenosnu karakteristiku, koje nisu identične. Pri formiranju FN polja, dolazi do gubitaka zbog različitosti u karakteristikama. Pri senčenju dolazi do promene izgleda karakteristike FN panela. Senčene i nesenčene oblasti istog FN polja dovode do električnih gubitaka. FN polje se formira međusobnim povezivanjem FN panela i nizova, koji iziskuje velike dužine kablova. Električni gubici koji nastaju u tim kablovima se uzimaju u obzir u PVsyst softveru.

Izlazna energija FN polja je energija koja se pojavljuje na ulazu invertora. Usvajajući moguće gubitke invertora, na kraju se dolazi do energije koja se predaje u DEM. Kod dobro projektovanog sistema ne javljaju se svi gubici koje softver uzima u obzir, a to su gubici zbog promene efikasnosti invertora, gubici limitiranja izlazne snage invertora, zbog prekoračenja MPPT naponskog opsega i naponskog praga.

4.2. Analizirane situacije u PVsyst softveru

U prethodnom poglavlju su ukratko opisane mogućnosti softvera PVsyst i oprema (FN paneli i invertori) koji su se koristili tokom simulacije. Nadalje će biti opisane situacije senčenja koje su analizirane za slučaj makrokonfiguracije.

U gradskim sredinama se najčešće javlja problem senčenja zbog najrazličitijih obližnjih prepreka, pri čemu je raspoloživa površina za postavljanje FN panela najčešće prostorno ograničena. Iz ovog razloga je jedna analiza urađena sa invertorom nominalne snage 27,6kW, koji je u trenutku pisanja teksta string invertor sa najvećom snagom na tržištu. U drugoj situaciji je analizirana FN elektrana FTN Novi Sad.

4.2.1. FN elektrana sa različitim položajem prepreke

Slika 4.16 prikazuje FN polje koje pripada invertoru nominalne snage 27,6kW sa istovremenim prikazom svih analiziranih prepreka. Snaga FN panela je prilagođena snazi invertora i iznosi 31,7kWp, tako da je faktor dimenzionisanja invertora (*FDI*) 1,15. Invertor ima dva nezavisna MPPT ulaza i na svaki od njih se vezuju po 3 FN niza. Kao što se sa slike 4.16 vidi, FN paneli su raspoređeni u 6 redova na konstrukciji. Na konstrukciji su FN paneli postavljeni u dva reda sa horizontalnom orijentacijom (engl. landscape direction). Nagibni ugao panela je promenljiv u simulacijama. Izabrane su vrednosti od 0°, 10°, 20°, 25°, 30°, 35° i 40°.

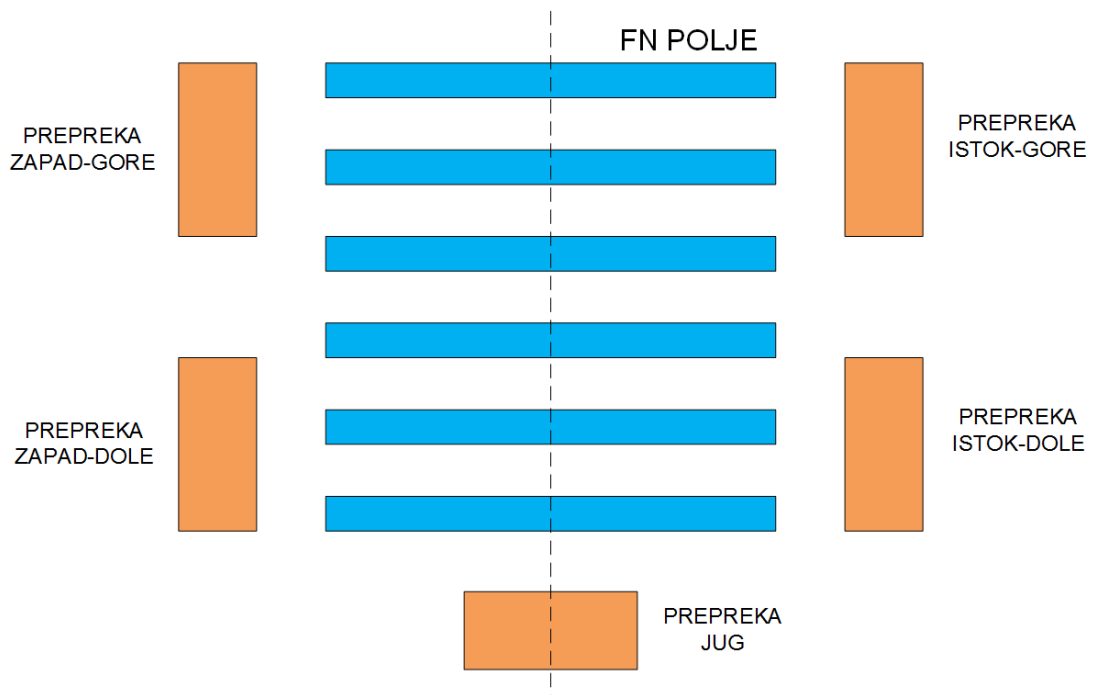
Što se prepreka tiče, od pet prikazanih na slici 4.16 (prepreka istok-dole, prepreka istok-gore, prepreka jug, prepreka zapad-dole i prepreka zapad-gore), u svakoj simulaciji postoji samo jedna prepreka. Tokom simulacije je korišćeno solarno vreme, što znači da u podne sunce dostiže svoj najveći visinski ugao (zenit) i azimutni ugao sunca je 0° (jug). Ovo znači, što se senke tiče, da se poklapa smer juga sa osom simetrije FN polja. Dakle, oblik i veličina senke koja potiče od prepreke, koja je simetrično raspoređena sa istočne i zapadne strane u odnosu na smer jug, je isti. Jedina razlika je u vremenu pojavljivanja senki. Ako je prepreka sa istočne strane FN polja (prepreka istok- dole ili prepreka istok-gore) senka nad FN poljem se javlja u jutarnjim satima. U drugom slučaju kada je prepreka sa zapadne strane FN polja (prepreka zapad- dole ili prepreka zapad-gore) senka nad FN poljem se javlja u večernjim satima.

Iz prethodnog razmatranja sledi da je:

- situacija PREPREKA ZAPAD-GORE = situacija PREPREKA ISTOK-GORE = situacija GORE i
- situacija PREPREKA ZAPAD-DOLE = situacija PREPREKA ISTOK-DOLE = situacija DOLE

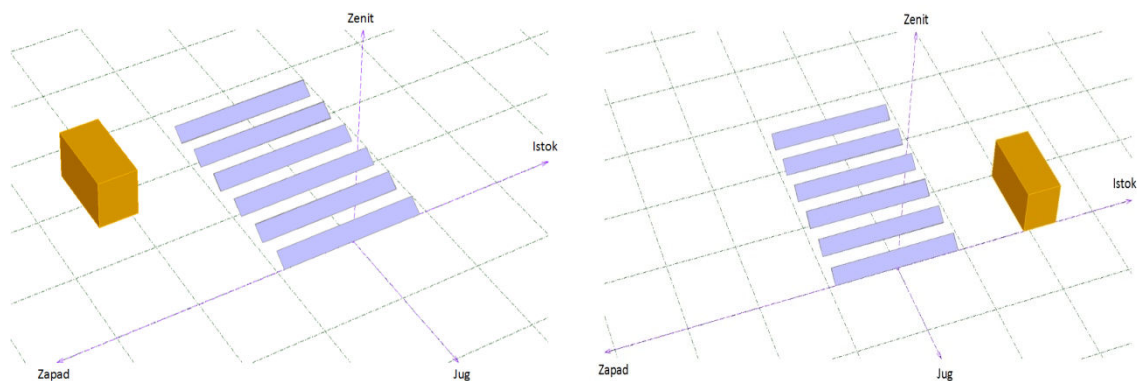
U skladu sa ovim, simulirane situacije u PVsystu su prikazane na slikama 4.17 i 4.18. Na njima se vidi trodimenzionalan položaj prepreka sa FN poljem napravljen u softveru PVsyst. Naravno, urađena je provera i upoređivanje rezultata simetričnih

situacija i potvrđeno je prethodno razmatranje uticaja senčenja u zavisnosti od položaja prepreke.



Slika 4.16 – Izgled FN polja sa istovremenim prikazom svih analiziranih prepreka

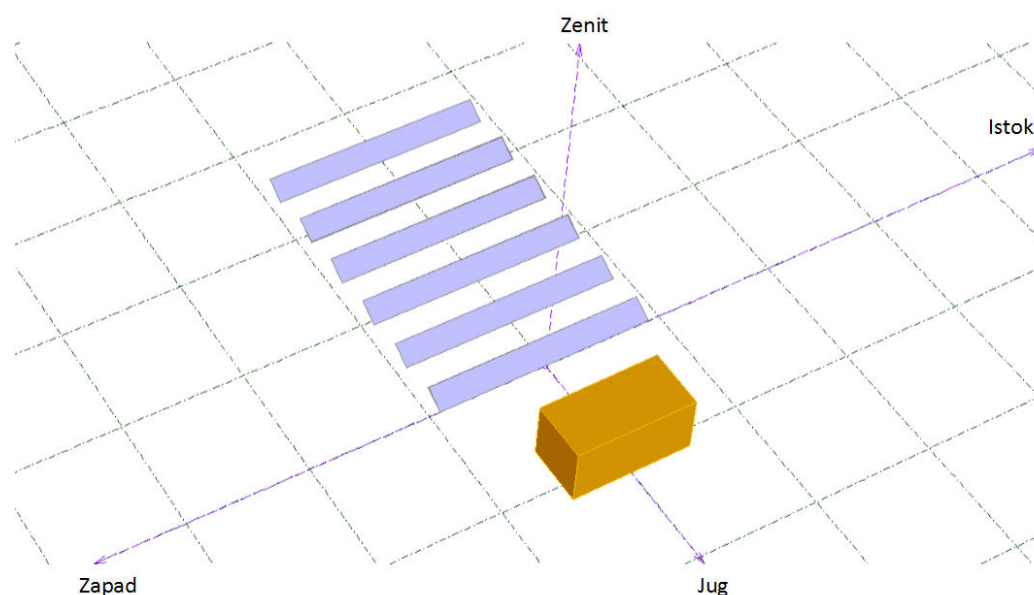
NAPOMENA: Optimalno rastojanje redova FN panela je proračunato za nagibni ugao panela od 30°. Tokom simulacija rastojanje se nije menjalo sa promenom nagibnog ugla panela. To znači da je koeficijent pokrivenosti tla (KPT^*) konstantan i ima vrednost 0,22 sa zaštitnom zonom od 5m.



Slika 4.17 – Izgled FN polja sa preprekom GORE (levo) i sa preprekom DOLE (desno)

* KPT je količnik ukupne površine FN panela i ukupne površine zemljišta, krova, koje je potrebno za razmeštaj noseće konstrukcije FN panela. U površinu zemljišta se

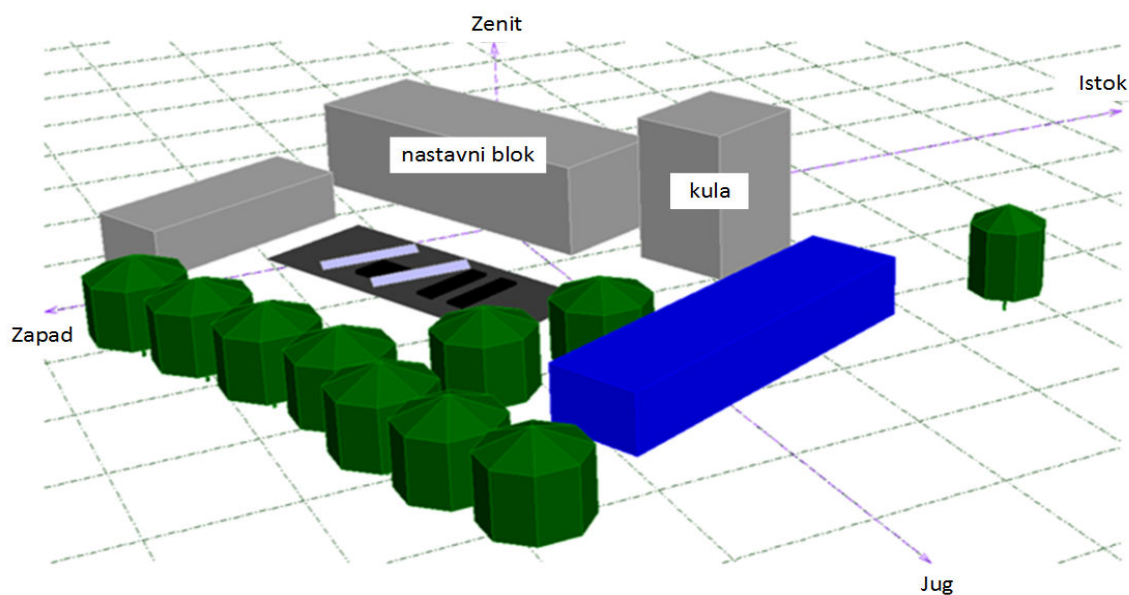
uračunava i zaštitna zona koji čini pojas slobodnog prostora oko elektrane širine između 5m i 10m.



Slika 4.18 – Izgled FN polja sa preprekom sa južne strane – prepreka JUG

4.2.2. Položaj prepreka u elektrani FTN Novi Sad

Slika trodimenzionalnog modela okruženja elektrane FTN Novi Sad urađena u softveru Pvsyst je prikazana na slici 4.19. Objekti nastavnog bloka i kule su prepreke sa istočne strane FN polja, koji predstavljaju ozbiljan problem zbog senčenja.



Slika 4.19 – 3D model bliskog okruženja elektrane FTN Novi Sad

Slika 4.20 prikazuje tabelu faktora senčenja (FS) za FN elektranu FTN Novi Sad. Vrednosti FS se računaju u funkciji visinskog i azimutnog ugla, tako da tabela prikazuje nivo senčenja FN polja tokom cele godine. FS je broj koji kazuje koliki deo FN polja se nalazi pod senkom. Ako za neku poziciju sunca nema senčenja tada je $FS=0$. Nasuprot ovome, kada je $FS=1$ to znači da je celo FN polje u senci.

Shading factor table according to strings, for the beam component

Azimuth	-180°	-160°	-140°	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
90°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40°	0.000	0.000	0.000	0.111	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30°	0.000	0.111	0.500	0.667	0.667	0.472	0.139	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20°	0.194	0.889	1.000	1.000	1.000	1.000	0.806	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.250	0.333	0.194
10°	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.806	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.778	1.000	1.000	0.778
2°	0.778	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.667	0.611	0.639	0.639	0.083	0.167	0.806	1.000	1.000	0.778

Shading factor for diffuse: **0.094** and for albedo: **0.000**

Slika 4.20 – Tabela faktora senčenja za elektranu na FTN

4.3. Ozračenje FN panela za analizirane slučajeve

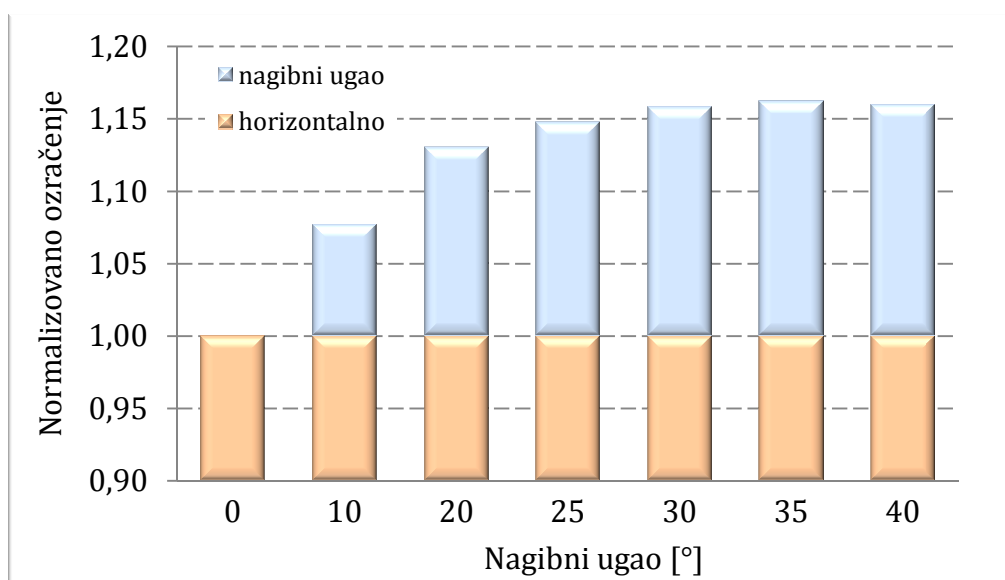
4.3.1. Ozračenje bez prepreka

U poglavlju 4.1.2 prikazani su osnovni meteorološki podaci koji koristi PVSyst prilikom simulacije. Sa horizontalnim ozračenjem je definisan energetski potencijal geografske lokacije, što se tiče solarne energije. Ovo ozračenje je prirodna pojava i čovek na nju nema uticaj, sem možda preko zagađenja vazduha.

Ozračenje na ravnu ploču se može povećati menjajući njen položaj u odnosu na sunčeve zrake. Najveće ozračenje površine se postiže kada sunčevi zraci padaju okomito na nju. Pošto se razmatra FN sistem, iz prethodnog proizilazi zaključak da FN panel treba da prati položaj Sunca. Tada bi se proizvodila najveća količina električne energije. Međutim, većina FN sistema je izgrađena sa nepokretnim FN panelima, pri čemu se oni montiraju na fiksnu noseću konstrukciju. Kod FN sistema sa nepokretnim FN panelima optimalna orijentacija panela je prema jugu, na severnoj zemljinoj hemisferi. Ova situacija se razmatra i u ovom radu.

Grafik na slici 4.21 prikazuje uticaj promene nagibnog ugla FN panela na ozračenje. Za svaki nagibni ugao je prikazano normalizovano horizontalno ozračenje (na slici obeleženo sa *horizontalno*) i normalizovano ozračenje koja je posledica promene nagibnog ugla FN panela (na slici obeleženo sa *nagibni ugao*). Vidi se da je za svaki nagibni ugao različit od 0°, ozračenje veće u odnosu na horizontalno

ozračenje. Dakle, promena nagibnog ugao pojačava solarno zračenje koje dospe na površinu FN panela. Pošto je na slici 4.21 ozračenje normalizovano u odnosu na horizontalno ozračenje, slika prikazuje pojačanje ozračenja za nagibne uglove od 10, 20, 25, 30, 35 i 40 stepeni. Ove vrednosti nagibnih uglova će se javljati i na svim narednim graficima ovog poglavlja, a koji prikazuju zavisnost neke veličine od nagiba FN panela. Najveće pojačanje ozračenja je pri nagibu FN panela od 35° i iznosi 1,162. Odnosno, za 16,2% se poveća ozračenje u odnosu na horizontalu, pri uglu FN panela od 35°.



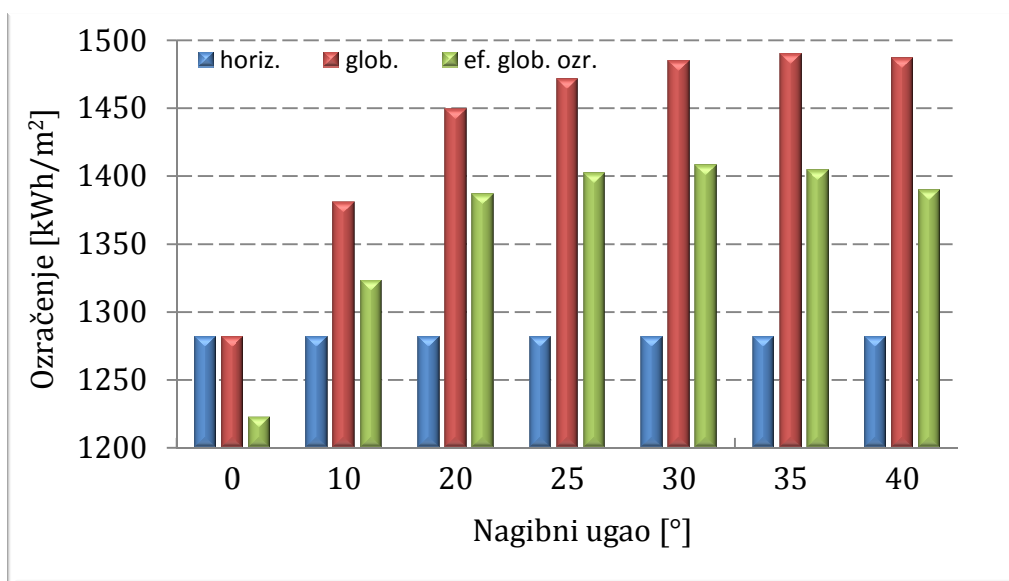
Slika 4.21 – Normalizovano pojačanje ozračenja u zavisnosti od nagibnog ugla FN panela

Proizvod horizontalnog ozračenja i pojačanja ozračenja daje ukupno raspoloživo ozračenje na površinu FN panela i nazvano je globalno ozračenje nagnutog FN panela H_g . Ovako globalno ozračenje nagnutog FN panela je po definiciji količina solarnog zračenja koju u jedinici vremena prikupi usamljeni nagnuti FN panel površine 1m². U realnim uslovima do samih ćelija FN panela obično stiže manja količina ozračenja od globalnog ozračenja nagnutog FN panela. Količina ozračenja koja stigne do površine FN ćelije i koja se potom pretvara u električnu energiju, naziva se efektivno globalno ozračenje nagnutog FN panela H_{geff} . Dakle, efektivno globalno ozračenje nagnutog FN panela je uvek manje od globalnog ozračenja nagnutog FN panela, zbog:

- postojanja dalekog senčenja,
- postojanja redova FN panela koji senče,
- postojanja prepreka koji senče,
- postojanja refleksije zaštitnog sloja FN ćelija.

Od gore navedenih faktora smanjenja globalnog ozračenja FN panela, samo je refleksija zaštitnog sloja ona koja se uvek javlja. Pojava ostalih navedenih faktora zavisi od okruženja elektrane i načina montaže FN panela, odnosno konstrukcije.

Slika 4.22 prikazuje količinu horizontalnog ozračenja, globalnog ozračenja nagnutog FN panela i efektivnog globalnog ozračenja nagnutog FN panela za lokaciju Novog Sada (na grafiku redom označeni sa horiz., glob., i ef. glob.), za prikazane nagibne uglove. Od nabrojanih faktora smanjenja globalnog zračenja FN panela, postoji međusobni uticaj FN redova i refleksija zaštitnog sloja.



Slika 4.22 – Horizontalno, globalno i efektivno globalno ozračenje nagnutog FN panela

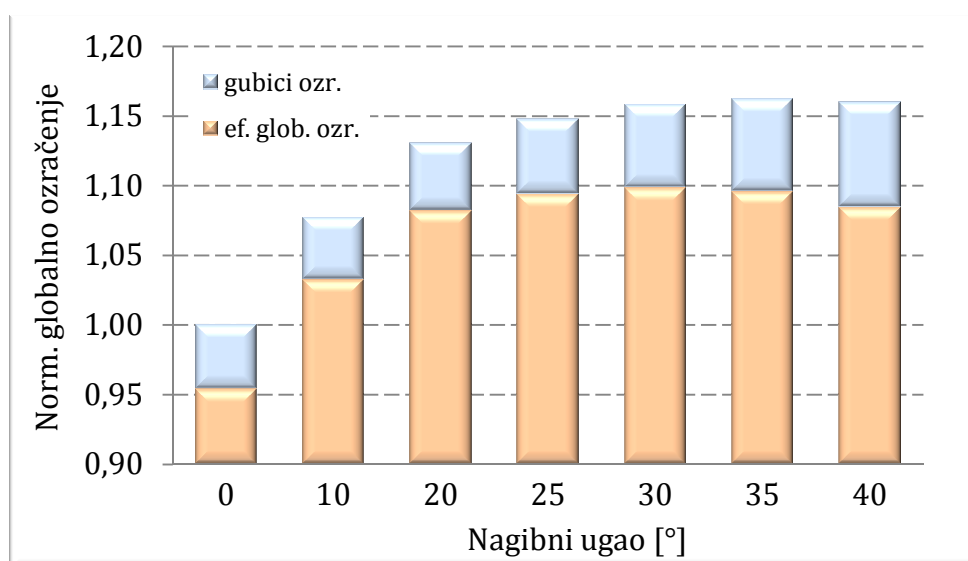
Polje FN panela je formirano od šest redova FN panela. Međusobno rastojanje FN panela je po određenim pravilima proračunato za nagib FN panela od 30°. Za sve ostale nagibne uglove rastojanje redova FN panela se ne menja.

Horizontalno ozračenje za okolinu Novog Sada iznosi 1281,9 kWh/m². Globalno ozračenje nagnutog FN panela je najveće pri nagibnom uglu FN panela od 35° i iznosi 1489,9 kWh/m². Maksimum efektivnog globalnog ozračenja iznosi 1408 kWh/m². Ono se postiže za nagibni ugao FN panela od 30°.

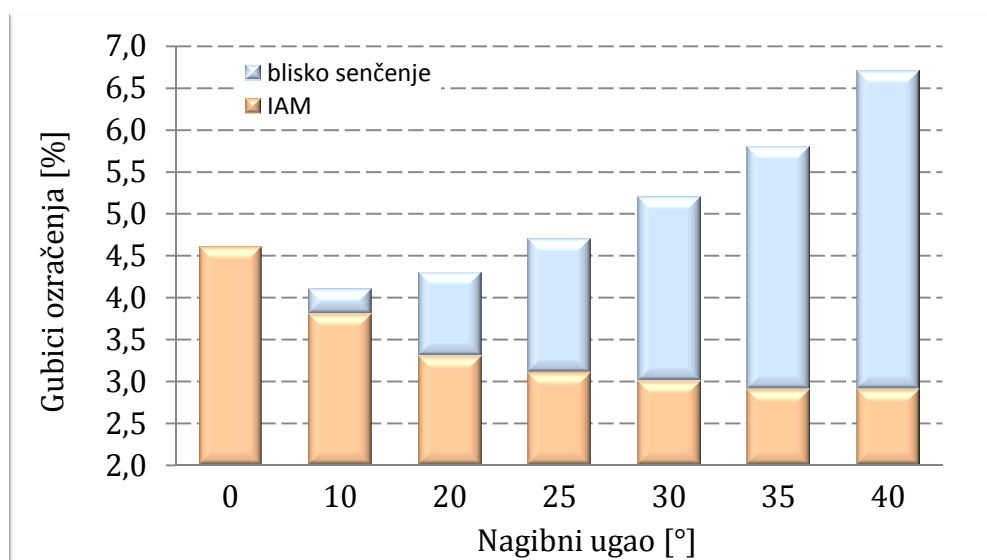
Grafik na slici 4.23 prikazuje normalizovanu vrednost globalnog ozračenja na nagnuti FN panel u odnosu na horizontalno ozračenje, koje se sastoji od gubitaka ozračenja i efektivnog globalnog ozračenja nagnutog FN panela (na grafiku redom označeni sa: *gubici ozr.* i *ef. glob. ozr.*). Zbog međusobnog senčenja redova FN panela i refleksije zaštitnog sloja, koja štiti FN ćeliju, nastaju gubici ozračenja. Nadalje se analiziraju gubici ozračenja.

Gubici ozračenja bez prepreka u zavisnosti od nagibnog ugla FN panela su prikazani na slici 4.24. Gubici ozračenja se sastoje iz gubitaka bliskog senčenja i

optičkih gubitaka (IAM) (na slici označeni redom sa *blisko senčenje* i *IAM*). Optički gubici se smanjuju sa povećanjem nagibnog ugla panela. Najveći su za horizontalno postavljen FN panel. U opsegu nagibnih uglova od 25° do 40° IAM se menja za svega 0,2%. Zbog pojave međusobnog senčenja FN panela javljaju se gubici bliskog senčenja. Gubici bliskog senčenja za analizirani slučaj rastu sa porastom nagibnog ugla FN panela na način kako je prikazano na slici 4.25. Porast gubitaka je posledica konstantnog KPT-a. Sa istovremenim povećanjem nagibnog ugla potrebno je povećati KPT, pa gubici bliskog senčenja mogu biti konstantni, odnosno čak se mogu i smanjiti. Ovo međutim iziskuje potrebu za povećanjem površine zemljišta što je u praksi često nemoguće.



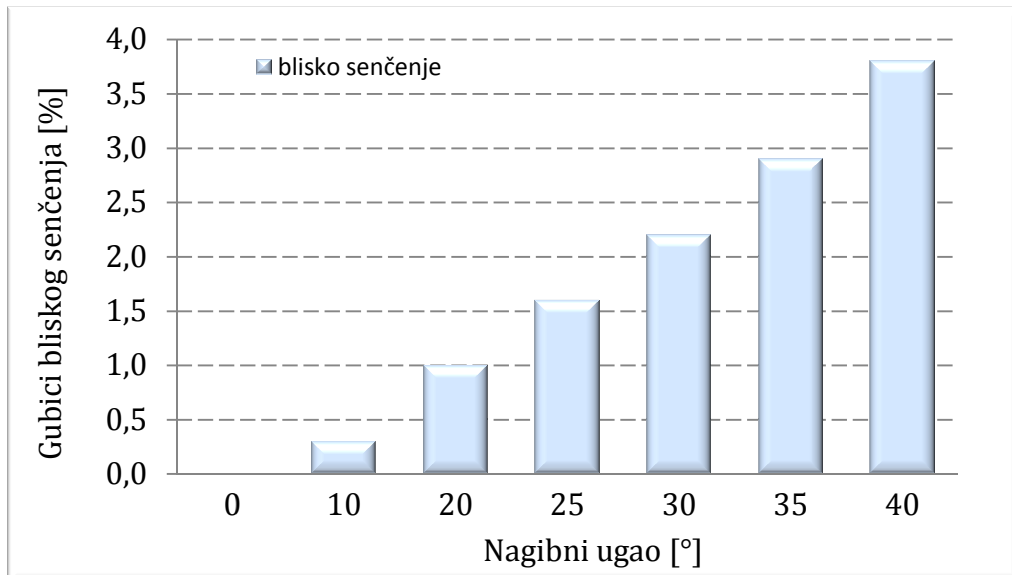
Slika 4.23 – Globalno ozračenje prikazano kao zbir efektivnog globalnog ozračenja i nastalih gubitaka ozračenja



Slika 4.24 – Gubici ozračenja za različite nagibne uglove FN panela

Veličina gubitka bliskog senčenja za nagibni ugao od 30°, za koje je računato optimalno rastojanje redova, iznosi 2,2 procenta.

Maksimalni gubitak senčenja za analizirane slučajeve se postiže pri nagibnom uglu FN panela od 40°, i ono iznosi 3,8 procenta.



Slika 4.25 – Gubici bliskog senčenja

4.3.2. Ozračenje sa preprekom

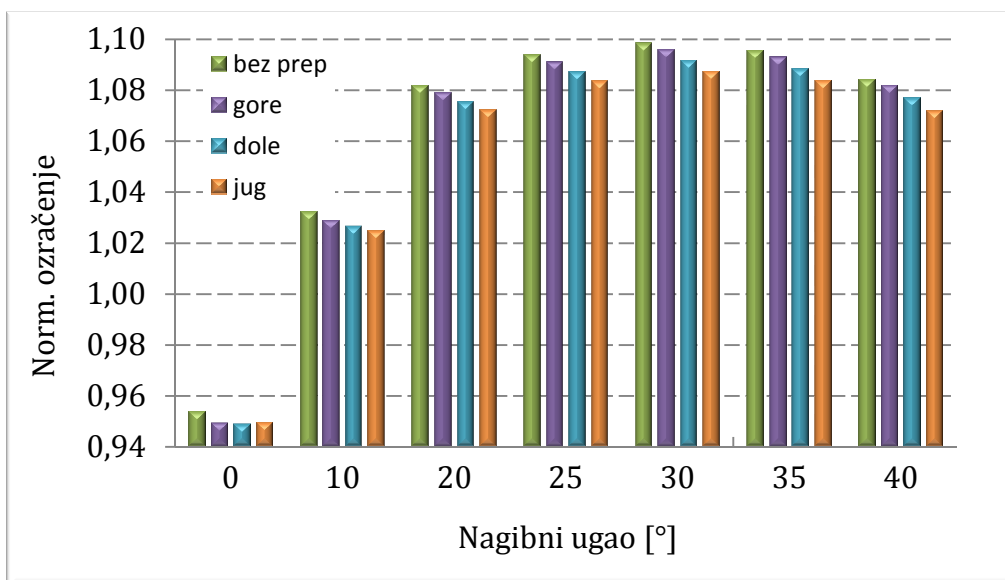
U poglavlju 4.3.1 je analizirano ozračenje nad FN poljem bez prepreka. Uporedni prikaz nivoa ozračenja bez i sa preprekama se vidi u tabeli 4.7. Grafički prikaz vrednosti ozračenja iz date tabele se vidi na slici 4.26.

Tabela 4.7 – Ozračenje FN panela sa preprekama za različite nagibne uglove

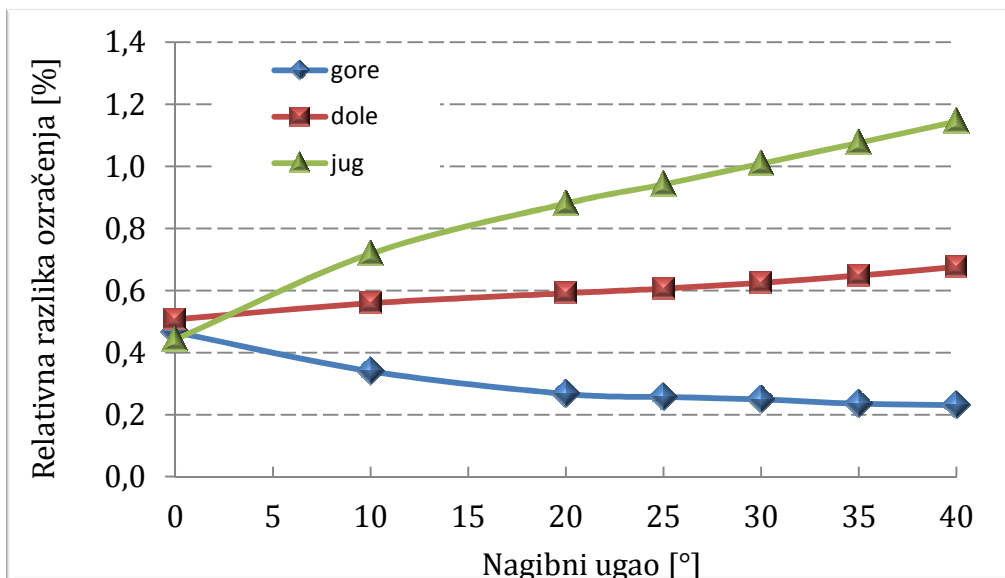
Nagibni ugao FN panela [°]	OZRAČENJE [kWh/m ²]					
	Horizontalno	Globalno	Efektivno = blisko + IAM			
			Bez prepreke	Prepreka gore	Prepreka dole	Prepreka jug
0	1281,9	1281,9	1222,7	1217,0	1216,5	1217,3
10	1281,9	1380,7	1323,3	1318,8	1315,9	1313,8
20	1281,9	1449,2	1386,6	1382,9	1378,4	1374,4
25	1281,9	1471,3	1402,1	1398,5	1393,6	1388,9
30	1281,9	1484,8	1408,0	1404,5	1399,2	1393,8
35	1281,9	1489,9	1404,2	1400,9	1395,1	1389,1
40	1281,9	1486,7	1389,8	1386,6	1380,4	1373,9

Za odabranu poziciju prepreka, iz tabele i sa slike se jasno vidi, da je najveći uticaj prepreke na smanjenje ozračenja kada se ona nalazi sa južne strane FN polja.

Najmanje je smanjenje ozračenja kada je prepreka na zapadu ili istoku, gore. Inače, trend promene ozračenja sa preprekama u funkciji nagibnog ugla prati trend ozračenja u funkciji nagibnog ugla bez prepreka. Razlika u ozračenju za sve pozicije prepreka u odnosu na ozračenje bez prepreka se kreće unutar granica od 1,5%. Slika 4.27 prikazuje procentualnu razliku u ozračenju. Najmanja promena ozračenja u funkciji nagibnog ugla je za prepreku DOLE, dok je najveća za prepreku JUG.



Slika 4.26 – Normalizovano efektivno ozračenje u odnosu na horizontalno ozračenje

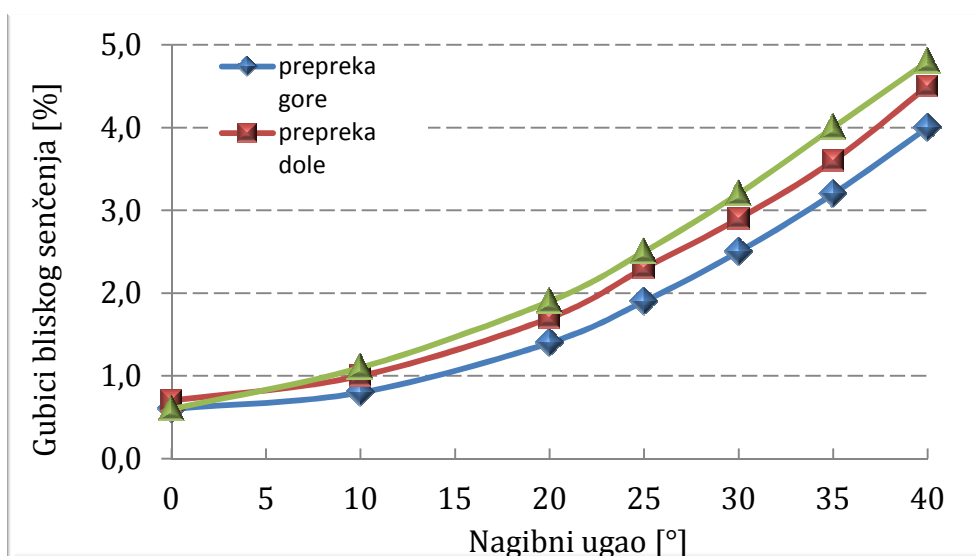


Slika 4.27 – Relativna razlika ozračenja bez i sa preprekom

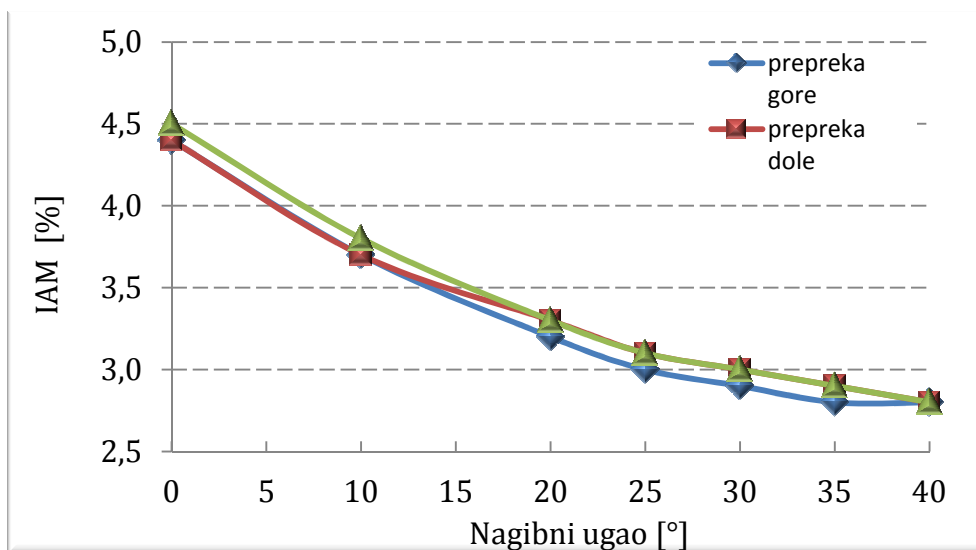
Slika 4.28 prikazuje gubitke bliskog senčenja sa analiziranim preprekama. Bez obzira na položaj prepreke, gubici bliskog senčenja imaju tendenciju rasta sa povećanjem nagibnog ugla. Ova tendencija je očekivana, naime optimalno rastojanje

FN redova se ne menja sa promenom nagibnog ugla FN panela. Najveći uticaj bliskog senčenja je za situaciju položaja prepreke JUG, dok je najmanji za položaj prepreke GORE.

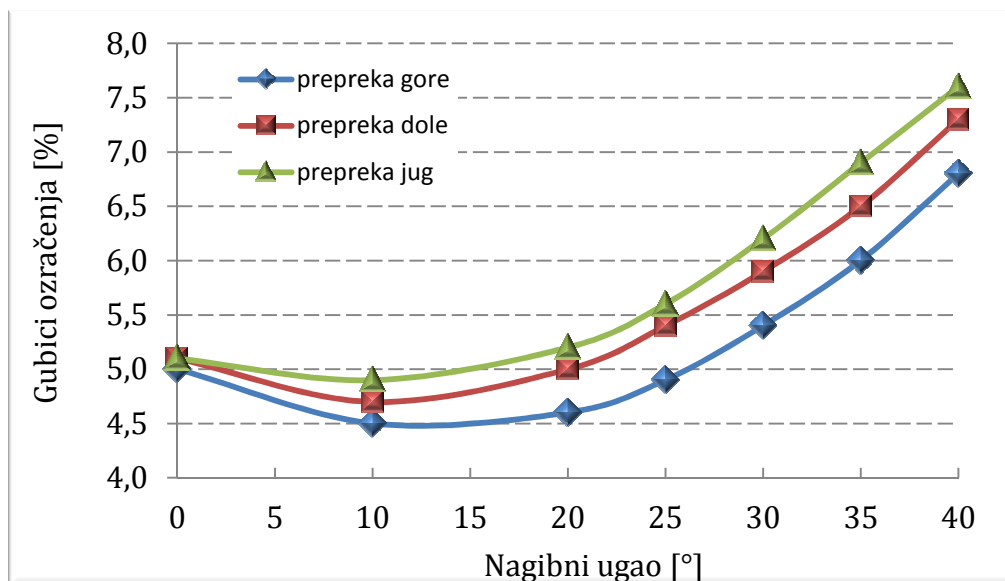
Razlika IAM gubitaka za različite položaje prepreka je veoma mala, a u nekim situacijama čak i jednaka. Kao što se na slici 4.29 vidi gubici nastali zbog refleksije se konstantno smanjuju sa povećanjem nagibnog ugla. Zbir gubitaka bliskog senčenja i IAM gubitaka daje ukupne gubitke ozračenja, što se vidi na slici 4.30. Zbog neznatne razlike u IAM gubicima, ukuni gubici ozračenja ostaju najveći za položaj prepreke JUG, a najmanji za položaj prepreke GORE. Tok krive gubitaka ozračenja je kombinacija porasta gubitaka senčenja i smanjenja IAM gubitaka. Tako, ukupni gubici se smanjuju sa porastom nagibnog ugla FN panela do oko 10°. Iza toga, sa daljim porastom nagibnog ugla rastu i ukupni gubici ozračenja.



Slika 4.28 – Gubici bliskog senčenja sa preprekom



Slika 4.29 – IAM gubici sa preprekom



Slika 4.30 – Ukupni gubici ozračenja sa preprekom

4.4. Rezultati simulacije makrokonfiguracije FN elektrane sa različitim položajem prepreka

Rezultati makrokonfiguracije FN polja se prikazuju za dva vremenska intervala. Jedan vremenski interval je na dnevnom nivou, dok je drugi na godišnjem nivou. Razlog ovakvog načina analize će biti objašnjen nakon prikazanih rezultata simulacije, u delu posvećenom analizi rezultata.

U ovom poglavlju se prikazuju rezultati simulacija za različite položaje prepreka oko FN polja čiji su položaji prikazani na slikama 4.17 i 4.18. Da bi se razumele osnovne konfiguracije FN niza i invertora koje su korišćene tokom simulacije, kao i način obeležavanja kod prikaza rezultata, sledi njihovo pojašnjenje.

4.4.1. Konfiguracija FN niza i invertora

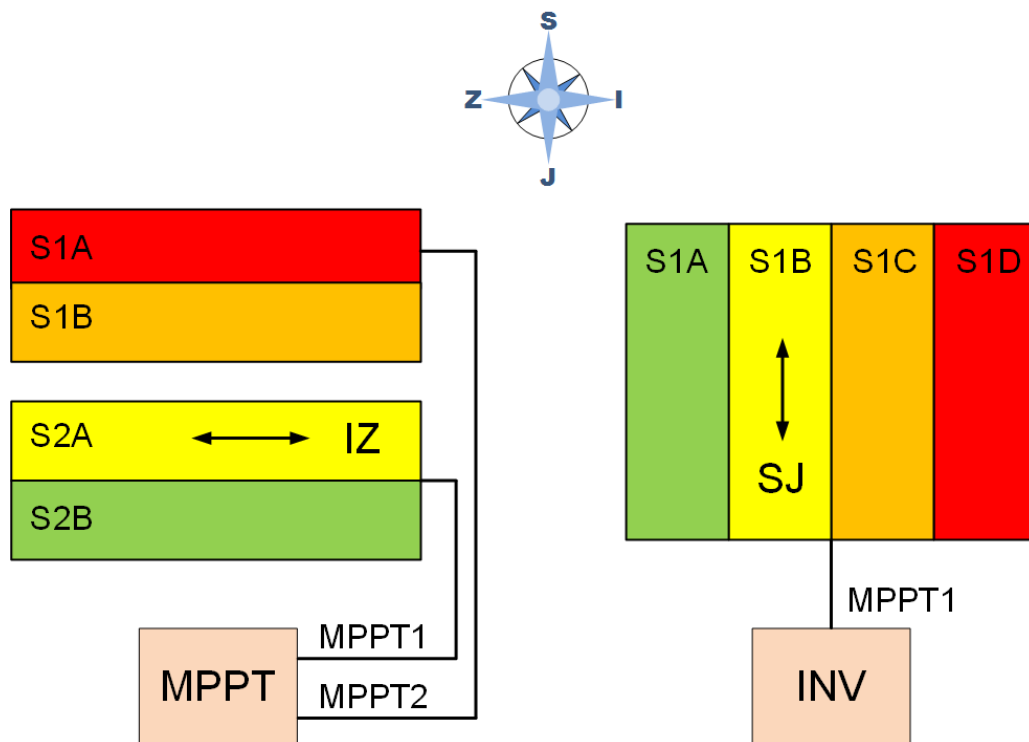
Konfiguracija FN niza i invertora se objašnjava uz pomoć slike 4.31. Na početku poglavlja je prikazan princip makrokonfiguracije. U skladu sa time su raspoređeni FN nizovi u FN polju prilikom izvođenja simulacija. Na slici 4.31 sa "Sxx" su obeleženi FN redovi. Slučaj kada se FN redovi prostiru po pravcu istok-zapad su obeleženi sa IZ (slika 4.31 levo), dok je kod prostiranja redova po pravcu sever-jug oznaka SJ (slika 4.31 desno). Pod prostiranjem FN redova se podrazumeva međusobno povezivanje FN panela sa kablovima, a ne njihovo fizičko pomeranje.

String invertori imaju od 1 do 3 nezavisna MPPT ulaza. Kod nekih invertora sa 2 ili 3 nezavisna MPPT ulaza omogućena je paralelna veza MPPT ulaza i tada se inverter ponaša kao jednoulazni MPPT. Takođe, kod invertora većih snaga FN nizovi

Makrokonfiguracija FN polja

se povezuju paralelno na jedan MPPT ulaz. Ovi načini povezivanja invertora, odnosno inverter sa jednim MPPT ulazom je u simulacijama obeležen sa INV (slika 4.31 desno). Sva četiri FN niza S1A, S1B, S1C i S1D su vezana na jedan ulaz invertora. Na pomenutoj slici levo, vidi se povezivanje dva nezavisna FN niza S1A, S1B i S2A, S2B na inverter sa dva nezavisna MPPT ulaza. Za ovaj slučaj inverter u analizama je obeležen sa MPPT.

Prilikom simulacije korišćene su kombinacije prethodno opisanih načina povezivanja FN niza i tipa invertora.



Slika 4.31 – Orjentacija FN niza i oznake tipova invertora korišćenih tokom simulacija

Četiri moguće kombinacije su simulirane. Na graficima i u tekstu su obeležene na sledeći način:

- **IZ mppt**, FN niz sa pravcem prostiranja istok-zapad priključen na inverter sa dva MPPT ulaza,
- **IZ inv**, FN niz sa pravcem prostiranja istok-zapad priključen na inverter sa jednim MPPT ulazom,
- **SJ mppt**, FN niz sa pravcem prostiranja sever-jug priključen na inverter sa dva MPPT ulaza,
- **SJ inv**, FN niz sa pravcem prostiranja sever-jug priključen na inverter sa jednim MPPT ulazom.

4.4.2. Rezultati makrokonfiguracije na dnevnom nivou

Simulacija makrokonfiguracije sa različitim preprekama je prvo urađena na dnevnom nivou. Za sva tri položaja prepreke (GORE, DOLE, JUG), simulacija je sprovedena za sve četiri kombinacije načina povezivanja FN niza i tipa invertora, pri čemu je u svim slučajevima nagibni ugao FN panela 30°. Za svaki položaj prepreke odabran je jedan, najkritičniji dan, za analizu. Najkritičniji dan podrazumeva najgori slučaj što se senčenja FN polja tiče. Najkritičniji dan je odabran na osnovu analize položaja senke nad FN poljem i tabele faktora senčenja. Tabele faktora senčenja za tri položaja prepreka se vide na slici 4.32.

Značenje brojnih vrednosti koje se vide u tabelama za faktor senčenja su objašnjeni u poglavlju 4.2.2. Nivoi senčenja su u tabelama ilustrovani bojama. Što je tamnija boja polja to je veći nivo senčenja. Polja sa nulom prikazuju položaj Sunca kada se FN polje ne senči. Sa 'IZA' su obeležena polja koja označavaju da je Sunce iza FN panela, tako da oni nisu obasjani.

Za položaj prepreke DOLE i JUG najkritičniji dan je 21. decembar. Ovog dana je visina Sunca tokom godine najmanja i istovremeno Sunce izlazi i zalazi ispred pravca istok-zapada. Za položaj prepreke GORE najkritičniji dan je 21. jun, iz razloga što se prepreka u odnosu na FN polje nalazi na severo-istoku ili severo-zapadu, a Sunce tog dana izlazi, odnosno zalazi (mali visinski ugao) najsevernije u odnosu na istok, to jest zapad.

Tabela 4.8 prikazuje proizvodnju električne energije FN elektrane za različitu poziciju prepreke, ali samo za vremenski interval kada se FN polje nalazi u senci. Izvan intervala senčenja, za iste situacije, proizvodnja je ista i stoga se ne razmatra. U skladu sa slikom 2.16 iz drugog poglavlja, gde se prikazuju tačke maksimalne snage FN niza, izvršeno je obeležavanje ispitivanih situacija sa i bez prepreka u tabeli 4.8 (TMS, V-TMS i M-TMS). Ovakav način obeležavanja je urađen iz razloga jer se proizvodnja računa tako da bez prepreka inverter prati TMS, a sa preprekom prati ili V-TMS ili M-TMS. Situacija bez prepreke kad inverter prati TMS (postoji samo međusobno senčenje redova FN panela) se prikazuje da bi se stekao osećaj o veličini uticaja senčenja za različite položaje prepreka.

Istovremeno, situacija bez prepreke služi za ocenu ponašanja različitih situacija makrokonfiguracija u zavisnosti od položaja prepreke. Pošto se u tabeli 4.8 prikazuje proizvodnja električne energije samo tokom senčenja, veća razlika u proizvodnji situacije bez prepreke i sa preprekom znači i da je vremenski interval senčenja duži. Tako na primer za položaj prepreke JUG se dobijaju najveće razlike u proizvodnji, iz razloga što je 21. decembra FN polje celog dana delimično pod senkom. Interval senčenja za ovaj slučaj se može videti na slici 4.37.

Makrokonfiguracija FN polja

Azimu t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Visina	180°	160°	140°	120°	100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	
90°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20°	IZA	0.00	0.00	0.16	0.33	0.33	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA
10°	IZA	IZA	IZA	0.33	0.33	0.41	0.66	0.66	0.41	0.41	0.41	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA
2°	IZA	IZA	IZA	0.33	0.33	0.50	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA	IZA

a) Položaj prepreke DOLE istočno

Azimu t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Visina	180°	160°	140°	120°	100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	
90°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20°	IZA	0.00	0.00	0.50	0.41	0.33	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA
10°	IZA	IZA	IZA	1.00	0.41	0.33	0.16	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA
2°	IZA	IZA	IZA	0.41	0.33	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA	IZA

b) Položaj prepreke GORE istočno

Azimu t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Visina	180°	160°	140°	120°	100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	
90°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20°	IZA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.16	0.16	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA
10°	IZA	IZA	IZA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.75	0.83	0.75	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA
2°	IZA	IZA	IZA	0.00	0.00	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.83	0.00	0.00	IZA	IZA	IZA	IZA	IZA

c) Položaj prepreke JUG

Slika 4.32 – Tabele faktora senčenja za položaj prepreke DOLE, GORE i JUG

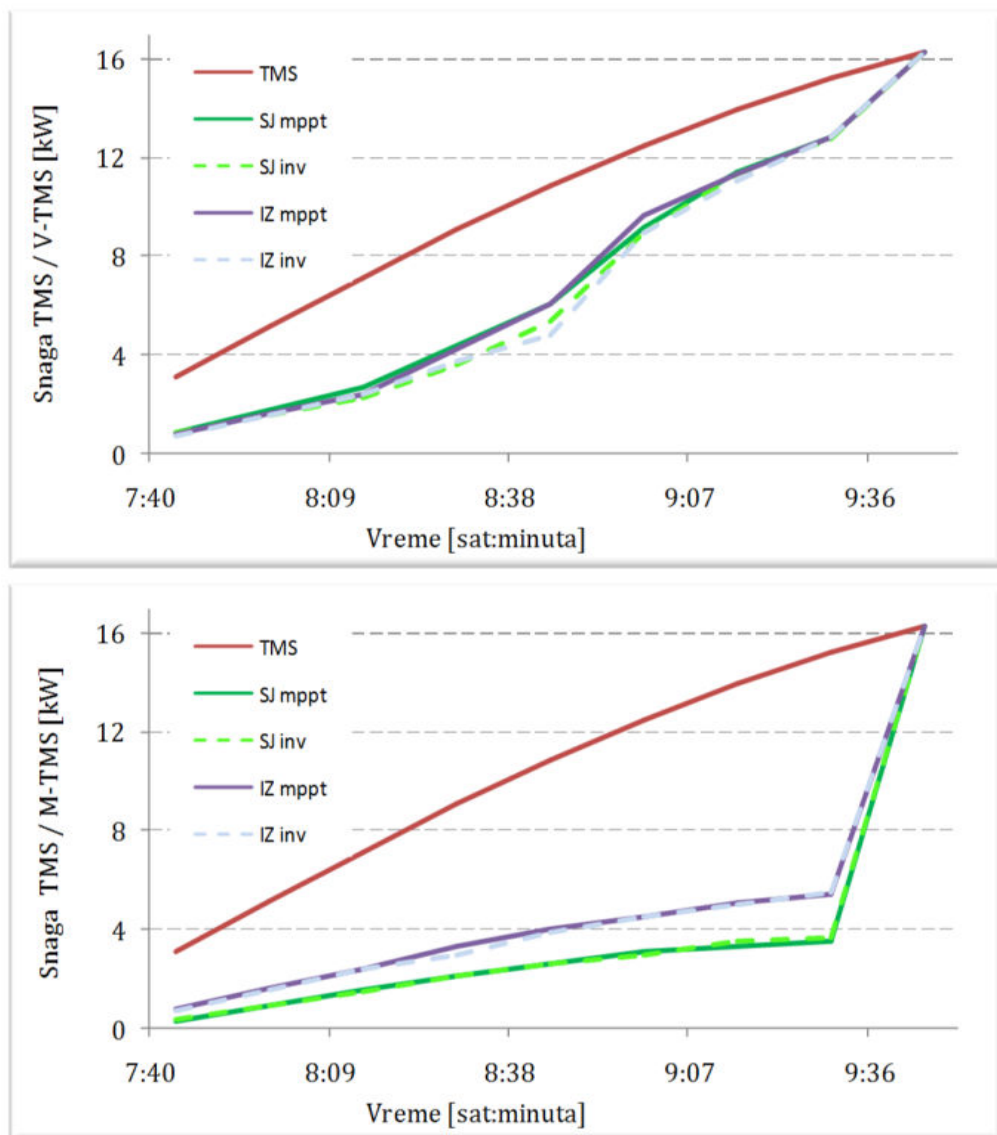
Tabela 4.8 – Proizvodnja električne energije FN elektrane u intervalu senčenja

ELEKTRIČNA ENERGIJA [kWh]					
PREPREKA DOLE – 21. decembar		<i>SJ mppt</i>	<i>SJ inv</i>	<i>IZ mppt</i>	<i>IZ inv</i>
<i>bez prepreke</i>	<i>TMS</i>	19,26	19,26	19,26	19,26
<i>sa preprekom</i>	<i>V-TMS</i>	12,32	11,68	12,23	11,55
	<i>M-TMS</i>	4,35	4,41	6,78	6,66
PREPREKA JUG – 21. decembar		<i>SJ mppt</i>	<i>SJ inv</i>	<i>IZ mppt</i>	<i>IZ inv</i>
<i>bez prepreke</i>	<i>TMS</i>	113,81	113,81	113,81	113,81
<i>sa preprekom</i>	<i>V-TMS</i>	87,22	81,77	91,02	90,05
	<i>M-TMS</i>	74,70	74,10	74,06	72,95
PREPREKA GORE – 21. jun		<i>SJ mppt</i>	<i>SJ inv</i>	<i>IZ mppt</i>	<i>IZ inv</i>
<i>bez prepreke</i>	<i>TMS</i>	8,34	8,34	8,34	8,34
<i>sa preprekom</i>	<i>V-TMS</i>	7,82	7,76	7,89	7,73
	<i>M-TMS</i>	7,78	7,76	7,48	7,73

Slike 4.33, 4.35 i 4.37 prikazuju kretanje tačke maksimalne snage FN polja tokom senčenja, redom za prepreku DOLE, GORE i JUG. Sa TMS je obeležena tačka maksimalne snage FN polja bez senčenja, a sa SJmppt, SJinv, IZmppt i IZinv tačke maksimalne snage FN polja pri senčenju, kada inverter prati V-TMS ili M-TMS. Na pređašnje spomenutim slikama gore je prikazano kretanje TMS i V-TMS, dok se dole vidi kretanje TMS i M-TMS.

Slike 4.34, 4.36 i 4.38 prikazuju procentualno smanjenje proizvodnje za razmatrane slučajeve. Razmotreno je relativno smanjenje proizvodnje V-TMS i M-TMS u odnosu na TMS. Zašto se razmatra veća, odnosno manja tačka maksimalne snage? Prvo, senčeno FN polje sa dva različita nivoa senčenja poseduje dve tačke maksimuma. Drugo, u zavisnosti od okolnosti, inverter nalazi jednu od razmatranih maksimuma.

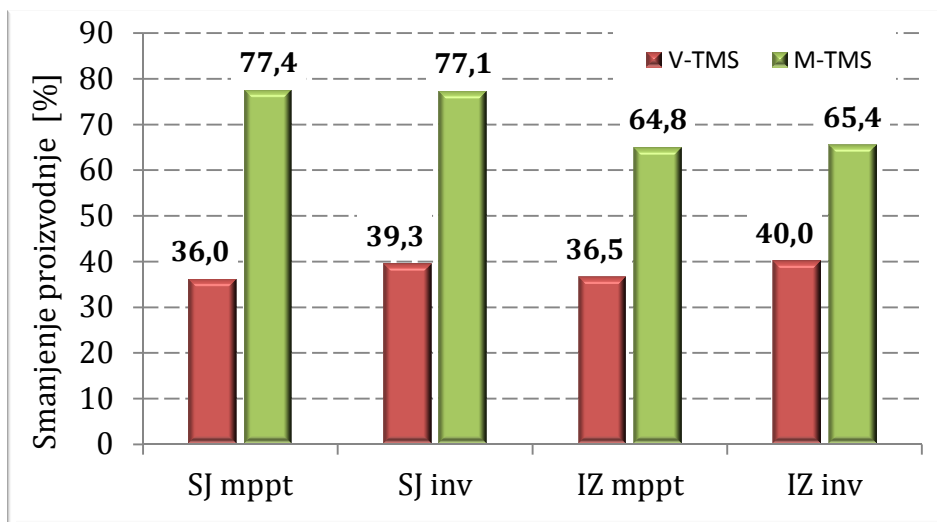
Kada se sa slike 4.33 uporedi kretanje V-TMS i M-TMS u odnosu na TMS vidi se da je povoljnije po proizvodnju da inverter prati V-TMS. Ova povoljnost se lako može zaključiti iz razloga jel je trajektorija kretanja V-TMS znatno bliža trajektoriji kretanja TMS nego trajektorija kretanja M-TMS. Na osnovu kretanja trajektorije je proračunata proizvodnja električne energije. Da podsetimo, opisana situacija se odnosi na prepreku koja se nalazi pozicionirana više prema jugu sa bočne strane FN polja (DOLE) i najveći negativan uticaj na proizvodnju ima 21. decembra.



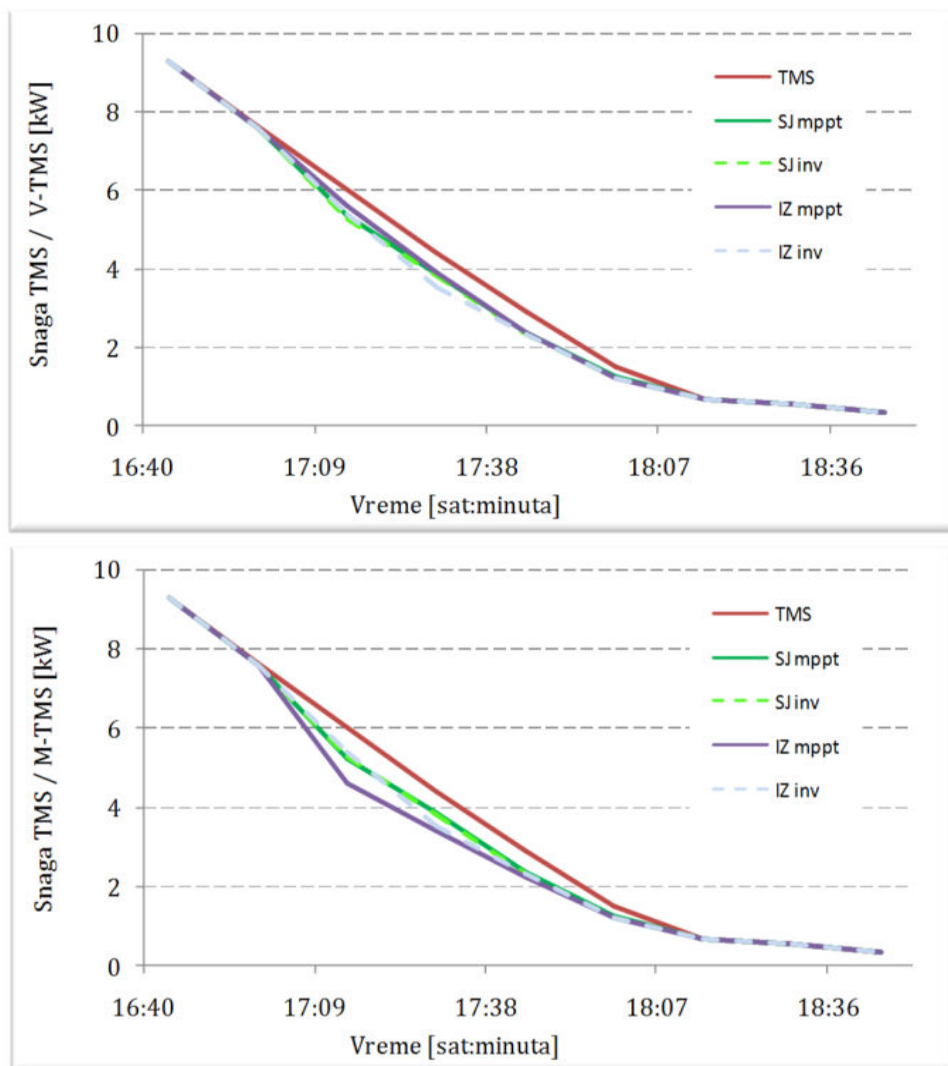
Slika 4.33 – Uporedni prikaz kretanja maksimuma snage FN polja TMS i V-TMS (gore) i TMS i M-TMS (desno) za položaj prepreke DOLE

Slika 4.34 prikazuje procentualno smanjenje proizvodnje invertora, u vreme senčenja za dva slučaja, kada inverter nalazi V-TMS, odnosno M-TMS, za situaciju prepreka DOLE. Kada inverter nalazi V-TMS, bez obzira na kombinaciju povezivanja FN niza i tipa invertora, smanjenje proizvodnje se ne razlikuje za više od 4%. U slučaju nalaženja M-TMS manja je razlika u proizvodnji kada se nizovi prostiru po pravcu IZ za oko 12% u odnosu na prostiranje SJ. U okviru jednog pravca prostiranja, može se reći da praktično nema razlike što se tiče tipa invertora.

Za prepreku GORE, slika 4.35, veoma je mala razlika u kretanju V-TMS i M-TMS u odnosu na TMS. Najbitniji razlog tome leži u činjenici da se analiza vrši za letnji period, kada sunce ima veće visinske uglove u odnosu na zimski period. Shodno tome se dobijaju i male razlike u proizvodnji za pojedine slučajeve.

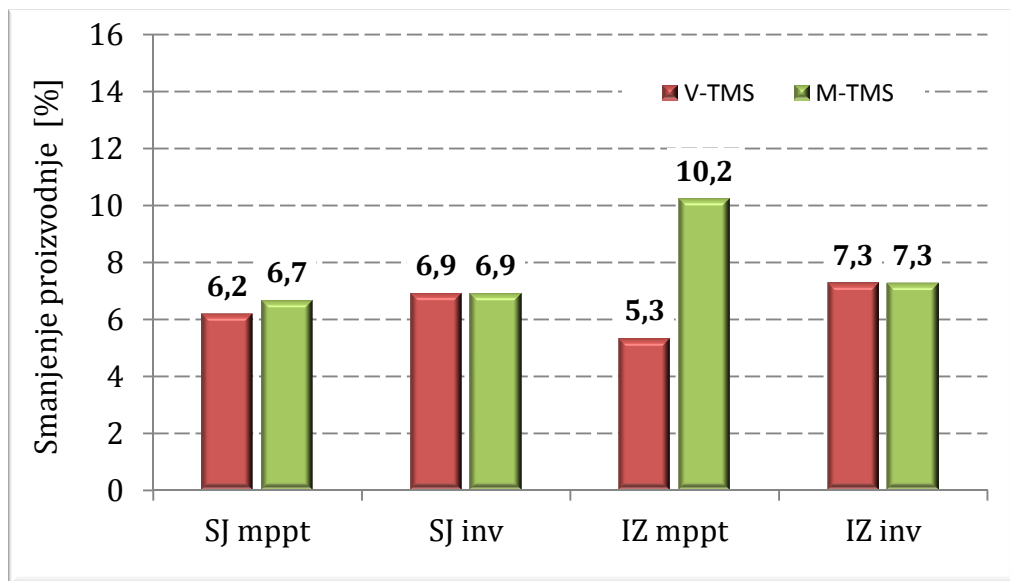


Slika 4.34 – Smanjenje proizvodnje u odnosu na TMS za položaj prepreke DOLE



Slika 4.35 – Uporedni prikaz kretanja maksimuma snage FN polja TMS i V-TMS (gore) i TMS i M-TMS (dole) za položaj prepreke GORE

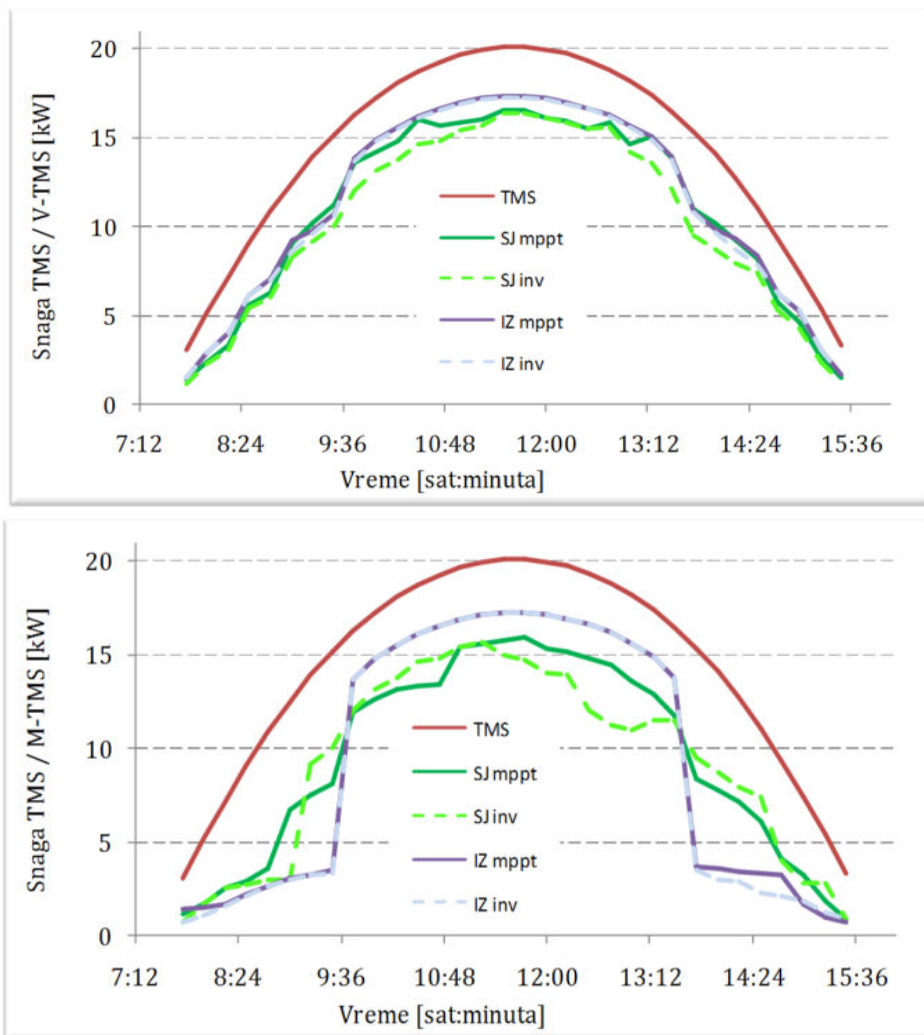
Te male razlike u proizvodnji potvrđuje i slika 4.36, gde je prikazano procentualno smanjenje proizvodnje invertora, tokom senčenja za dva slučaja, kada inverter nalazi V-TMS, odnosno M-TMS, za situaciju prepreka GORE. Vidi se da je za sve kombinacije smanjenje proizvodnje relativno izjednačeno. Ipak, najmanje je smanjenje za kombinaciju IZmppt (prostiranje IZ i inverter sa dva MPPT ulaza), pri čemu inverter nalazi V-TMS. Posle ove kombinacije prednost ima prostiranje po pravcu SJ i to praktično bez obzira na tip invertora i na vrstu maksimalne snage FN polja. Najveće smanjenje proizvodnje se dobija takođe za kombinaciju IZmppt, međutim za slučaj kada inverter nalazi M-TMS.



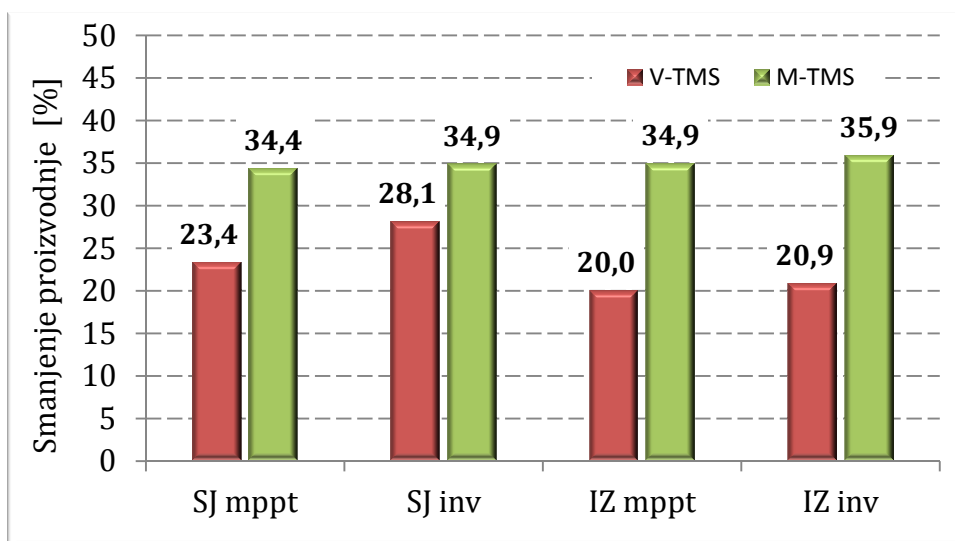
Slika 4.36 – Smanjenje proizvodnje u odnosu na TMS za položaj prepreke GORE

Za prepreku JUG, slika 4.37, razlika u kretanju TMS u odnosu na V-TMS ili M-TMS je nešto veća nego za prethodni slučaj. Kada se međusobno uporede trajektorije kretanja V-TMS i M-TMS ta razlika postaje manja. Ipak nešto veće razlike se pojavljuju pri M-TMS za različite razmatrane kombinacije, tako da ukupno gledajući bolja je situacija ako inverter nalazi V-TMS. Da podsetimo, opisana situacija se odnosi na prepreku koja se nalazi sa južne strane FN polja, i pošto se analizira najnepovoljniji dan u godini (21. decembar) kada je najmanja visina sunca tokom dana, FN niz je tokom celog dana pod delimičnom senkom.

Slika 4.38 prikazuje procentualno smanjenje proizvodnje invertora, tokom senčenja za dva slučaja, kada inverter nalazi V-TMS, odnosno M-TMS, za situaciju prepreka JUG. Kada inverter nalazi V-TMS, smanjenje je nešto manje za pravac prostiranja IZ i veoma se malo razlikuje s obzirom na izbor tipa invertora. U slučaju nalaženja M-TMS smanjenje proizvodnje je ujednačeno za sve kombinacije i razlika u smanjenju proizvodnje se kreće u granici od 2%.



Slika 4.37 – Uporedni prikaz kretanja maksimuma snage FN polja TMS i V-TMS (gore) i TMS i M-TMS (dole) za položaj prepreke JUG



Slika 4.38 – Smanjenje proizvodnje u odnosu na TMS za položaj prepreke JUG

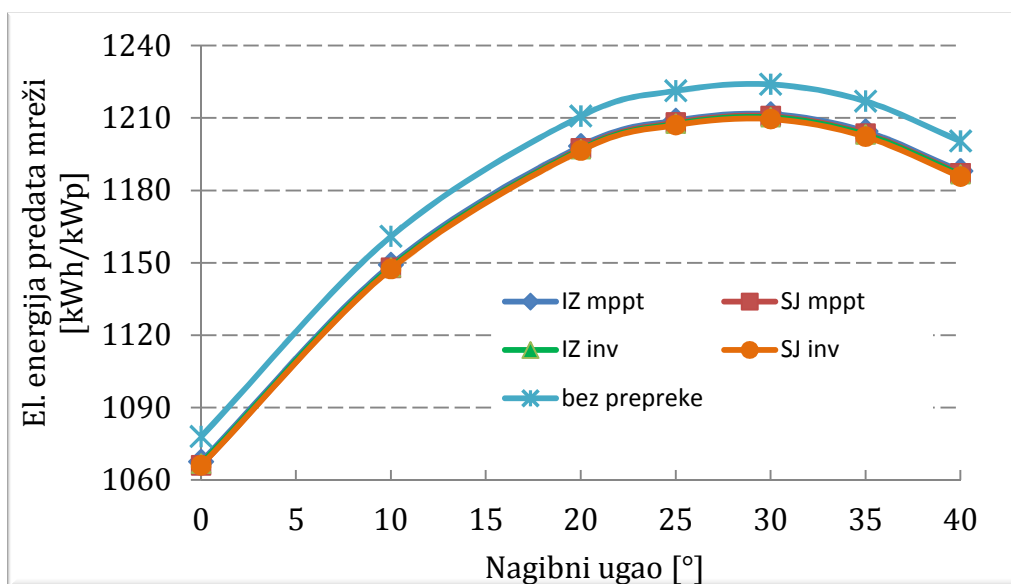
4.4.3. Rezultati makrokonfiguracije na godišnjem nivou

Nadalje se razmatra procenjena proizvodnja električne energije za već tri ranije razmatrane situacije sa preprekama na godišnjem nivou. Procenjena proizvodnja se razmatra u funkciji načina povezivanja FN nizova sa inverterom, kao i raspoloživog broja MPPT ulaza u inverter, a sve u skladu sa slikom 4.31. **Treba napomenuti da softver rezultate na godišnjem nivou daje za situaciju kada inverter prati višu tačku maksimalne snage FN polja, odnosno V-TMS.**

4.4.3.1. Položaj prepreke DOLE – pozicija jugo-istok, jugo-zapad

Slika 4.39 prikazuje procenjenju specifičnu proizvodnju FN elektrane bez prepreke i sa preprekom DOLE za četiri kombinacije povezivanja invertora i FN niza. Specifična proizvodnja (SP) je mera proizvedene električne energije FN elektrane na godišnjem nivou po 1kWp instalisane snage FN panela.

Slika 4.39 ukazuje na to da postoji mala razlika u specifičnoj proizvodnji između analizirane četiri kombinacije. Razmotrimo, koliko iznose te razlike? Vrednosti proizvodnje SP za razmatrane kombinacije su prikazane u tabeli 4.9.



Slika 4.39 – Procenjena specifična proizvodnja električne energije – prepreka DOLE

Razlike se bolje uočavaju na slici 4.40, koja prikazuje relativnu razliku proizvodnje bez prepreke i sa preprekom, za četiri razmatrana slučaja. Pošto se proizvodnja četiri slučaja upoređuje sa situacijom bez senčenja, kada je najveća proizvodnja, FN sistem ima veću proizvodnju što je manja relativna razlika.

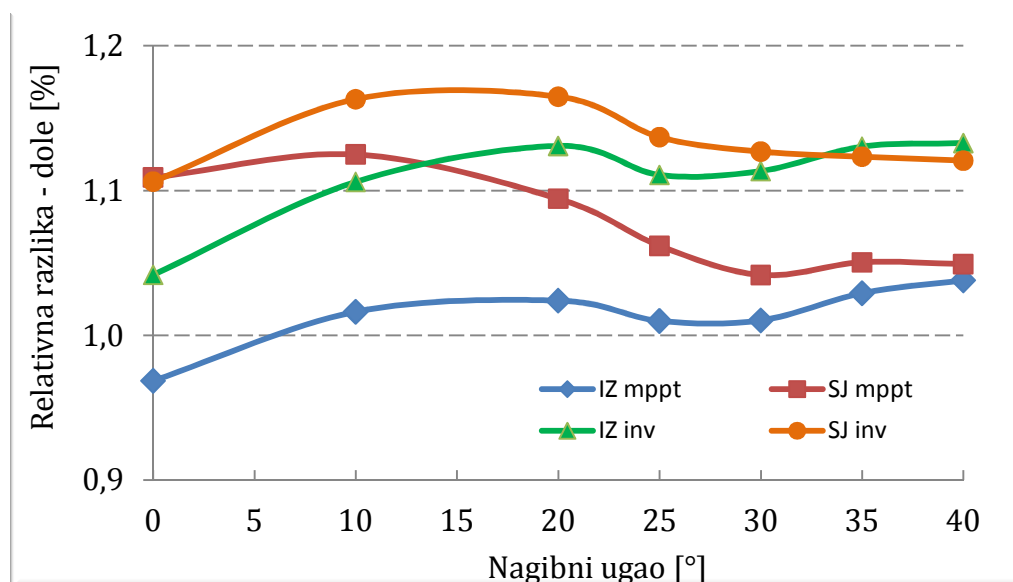
Na početku, uporedimo situaciju IZmppt i IZinv, što znači da se FN polje prostire po pravcu istok-zapad (najčešći slučaj u praksi). Sa slike se vidi da je

promena razlike proizvodnje u zavisnosti od nagibnog ugla ista, a da inverter sa dva MPPT ulaza postiže veću proizvodnju. Upoređujući situacije SJmppt i SJinv (FN polje

Tabela 4.9 – Specifična proizvodnja za različite nagibne uglove

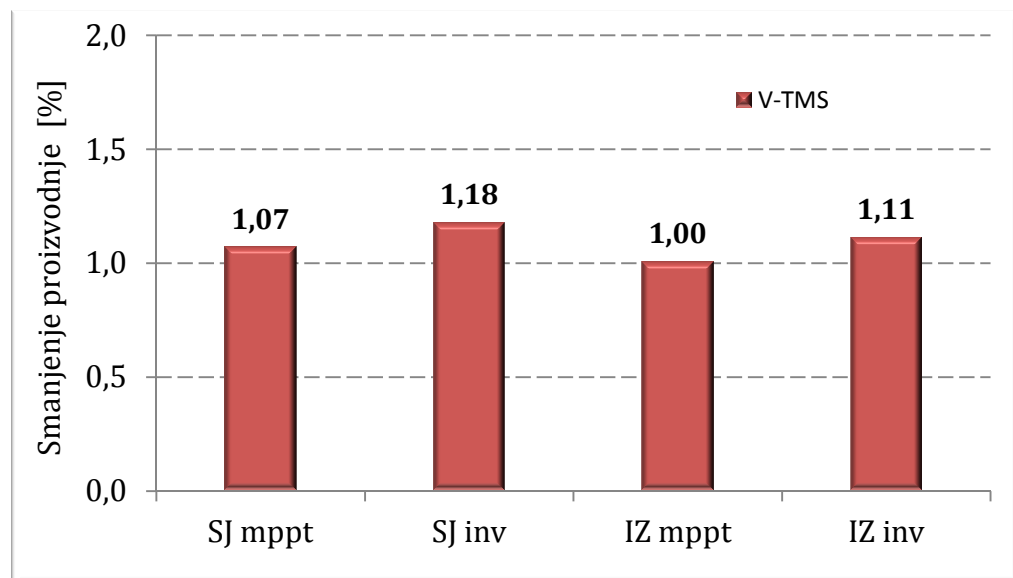
Specifična proizvodnja [kWh/kWp]					
Nagibni ugao FN panela [°]	bez prepreke	za položaj prepreke DOLE			
		IZ-MPPT	SJ-MPPT	IZ-INV	SJ-INV
0	1078,0	1067,6	1066,1	1066,8	1066,1
10	1160,9	1149,1	1147,9	1148,1	1147,4
20	1210,8	1198,4	1197,4	1197,0	1196,5
25	1221,3	1208,9	1208,1	1207,6	1207,0
30	1223,9	1211,6	1210,8	1210,3	1209,5
35	1217,0	1204,4	1203,5	1203,1	1202,2
40	1200,4	1188,0	1187,1	1186,7	1185,7

se prostire po pravcu sever-jug), vidi se da sa porastom nagibnog ugla raste razlika u proizvodnji. Razlika ne postoji kada su FN paneli postavljeni horizontalno, odnosno kada nema međusobnog senčenja redova. Sem za horizontalno postavljen FN panel proizvodnja će biti veća ako se izabere inverter sa dva MPPT ulaza.



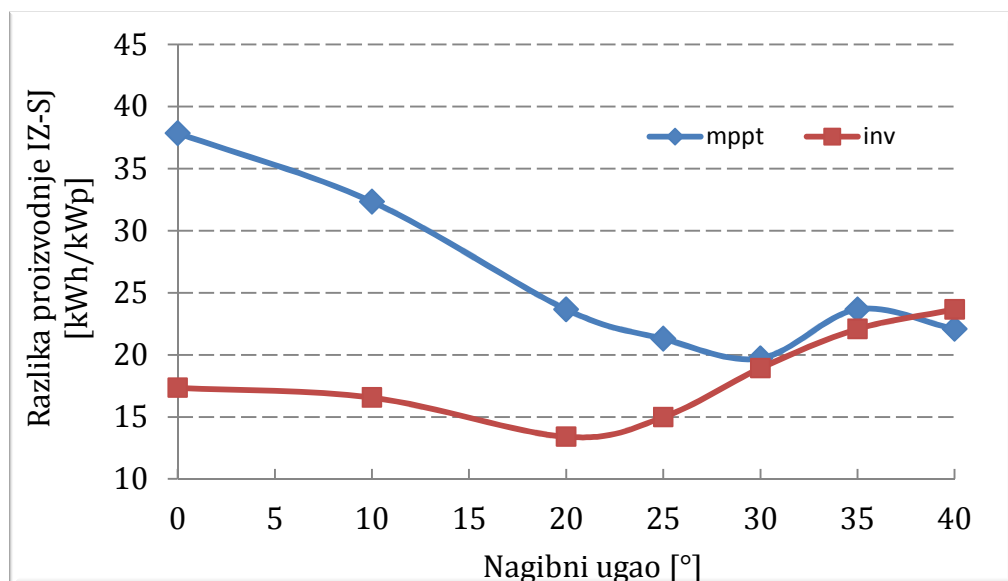
Slika 4.40 – Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Najmanje smanjenje proizvodnje se ostvaruje kada se redovi prostiru po pravcu istok-zapad, dok inverter ima dva MPPT ulaza (slučaj IZmppt). Ovo se vidi na slici 4.41. Tada je smanjenje proizvodnje 1% u odnosu na situaciju bez senčenja. Najgora situacija je za slučaj SJinv.



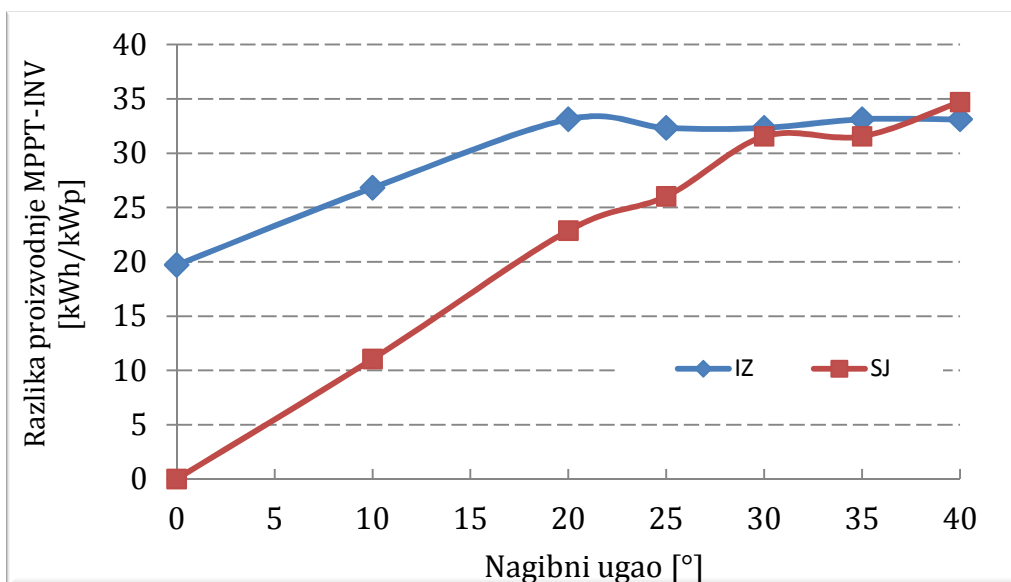
Slika 4.41 –Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Razlika SP koja se javlja za različite pravce prostiranja FN niza (IZ-SJ) i za različit broj MPPT ulaza u inverter (MPPT-INV) je prikazano na slikama 4.42 i 4.43, redom. **Prikazana razlika SP se ostvaruje tokom 25-to godišnjeg rada FN elektrane, dakle na kraju životnog veka.** Kada se posmatra razlika proizvodnje između različitih prostiranja FN polja (slika 4.42), vidi se da inverter sa dva ulaza (mppt na slici) u odnosu na inverter sa jednim MPPT ulazom (inv na slici) ima veću razliku u proizvodnji. Razlika proizvodnje se smanjuje sa povećanjem nagibnog ugla. Pri nagibnom uglu od 30°, što je inače približno optimalni nagibni ugao FN panela, proizvodnja se izjednačava i nadalje ostaje u granicama od 5 kWh/kWp.



Slika 4.42 –Razlika specifične proizvodnje između položaja FN niza IZ i SJ

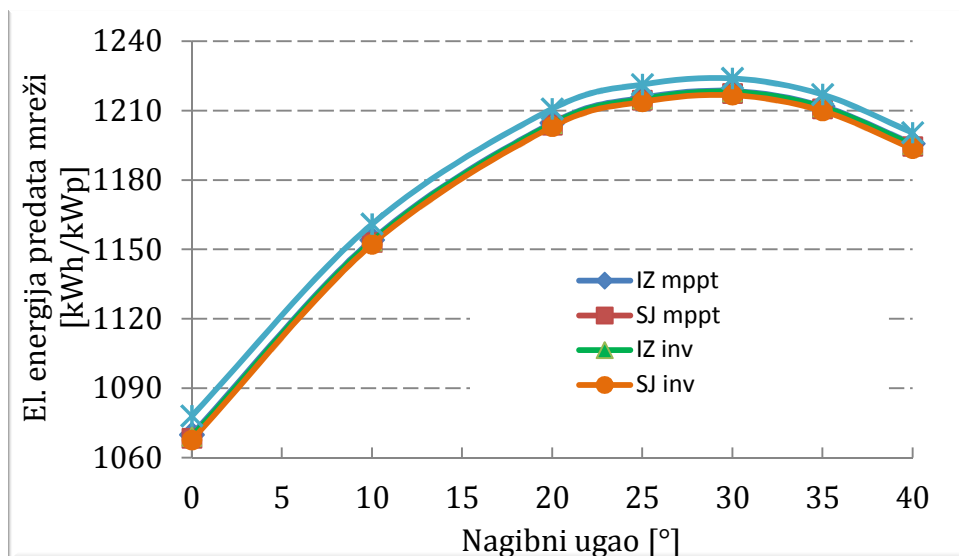
Kada se posmatra razlika proizvodnje između invertora sa različitim brojem MPPT ulaza, pri čemu je pravac prostiranja FN polja isti (slika 4.43), vidi se da je za pravac prostiranja istok-zapad (IZ) veća razlika u proizvodnji u odnosu na pravac prostiranja sever-jug (SJ) do nagibnog ugla panela od 30°. Pri nagibnom uglu od 30°, što je inače približno optimalni nagibni ugao FN panela, proizvodnja se izjednačava i nadalje ostaje približno jednaka.



Slika 4.43 – Razlika specifične proizvodnje između tipa invertora MPPT i INV

4.4.3.2. Položaj prepreke GORE – pozicija severo-istok, severo-zapad

Kao i u predhodnom slučaju za položaj prepreke DOLE, slika 4.44 ukazuje na to da postoji mala razlika u specifičnoj proizvodnji između analizirane četiri kombinacije za položaj prepreke GORE. U tabeli 4.10 se može videti SP za položaj prepreke GORE.

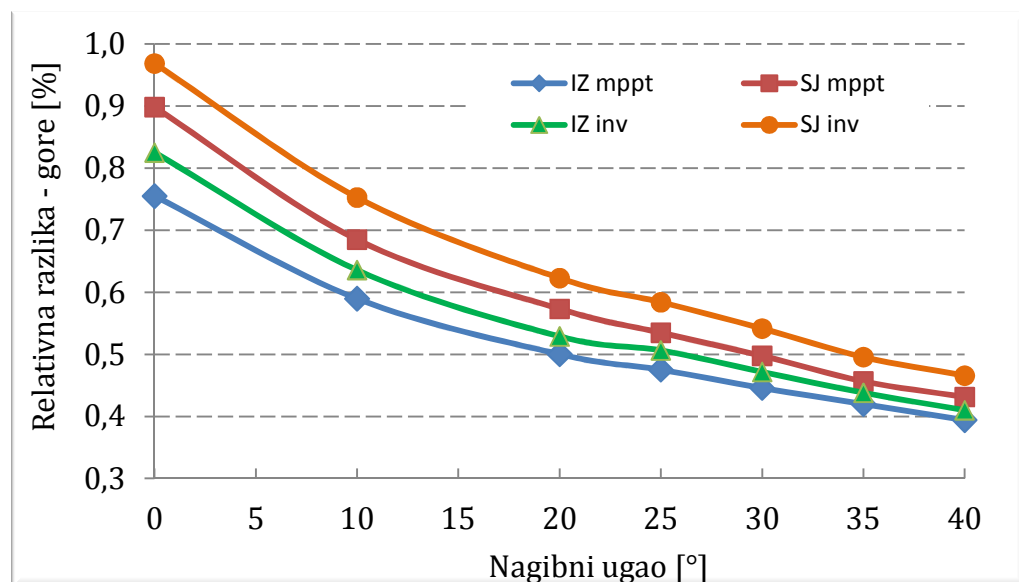


Slika 4.44 – Procenjena specifična proizvodnja električne energije za slučaj GORE

Tabela 4.10 – Specifična proizvodnja sa preprekama za različite nagibne uglove

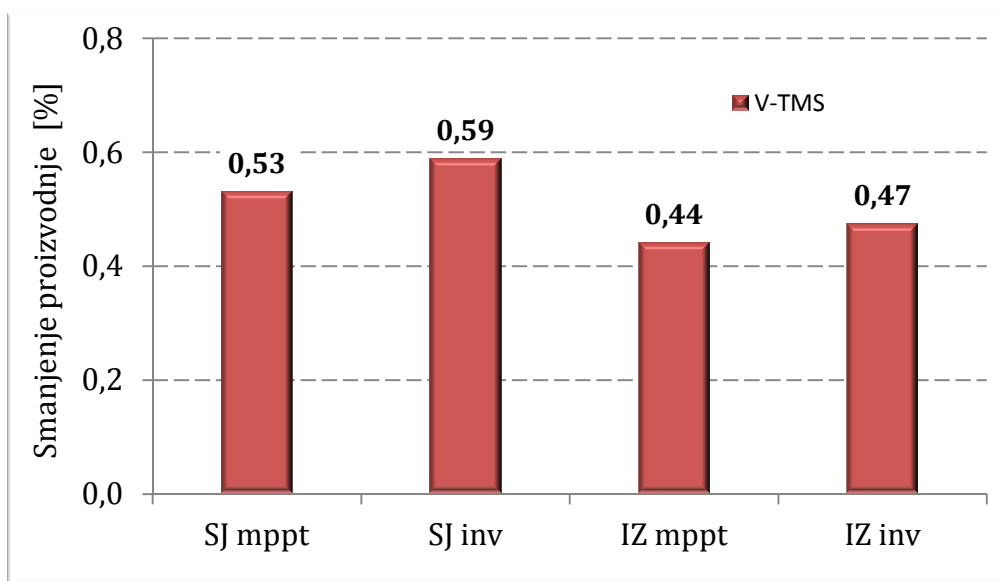
Specifična proizvodnja [kWh/kWp]					
Nagibni ugao FN panela [°]	bez prepreke	za položaj prepreke GORE			
		IZ-MPPT	SJ-MPPT	IZ-INV	SJ-INV
0	1078,0	1069,9	1068,3	1069,1	1067,6
10	1160,9	1154,1	1153,0	1153,5	1152,2
20	1210,8	1204,7	1203,7	1204,3	1203,1
25	1221,3	1215,5	1214,5	1215,0	1213,8
30	1223,9	1218,5	1217,4	1218,1	1216,7
35	1217,0	1211,9	1210,7	1211,5	1209,9
40	1200,4	1195,7	1194,5	1195,3	1193,6

Slika 4.45 prikazuje relativnu razliku za posmatrane situacije bez prepreke u odnosu na situaciju sa preprekom. Tok promene relativne razlike je isti za sva četiri razmatrana slučaja i opada sa porastom nagibnog ugla. Posmatrajući krive IZ-MPPT i IZ-INV vidi se da veći doprinos proizvodnji daje inverter sa dva MPPT ulaza. Upoređujući krive SJ-MPPT i SJ-INV, što znači da je promenjen pravac prostiranja FN niza, dolazi se do zaključka da je takođe bolja situacija sa inverterom sa dva MPPT ulaza. Kad se uporede moguće četiri situacije redosled od najveće do najmanje proizvodnje bi bio; IZ-MPPT, IZ-INV, SJ-MPPT i SJ-INV.



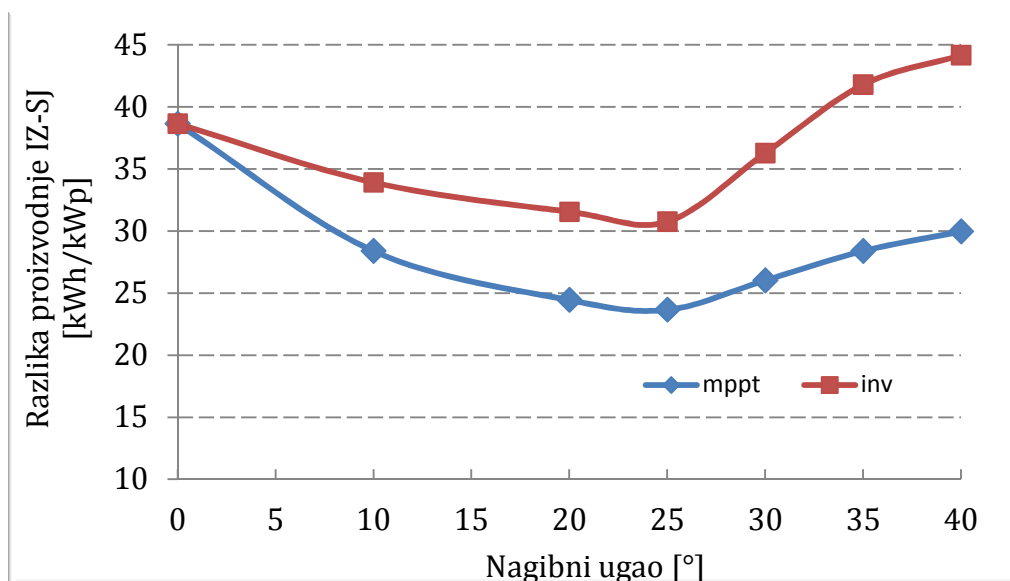
Slika 4.45 – Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Slika 4.46 prikazuje procentualno smanjenje proizvodnje po razmatranim slučajevima. Najpovoljnija situacija je IZmppt, a najgora SJinv.



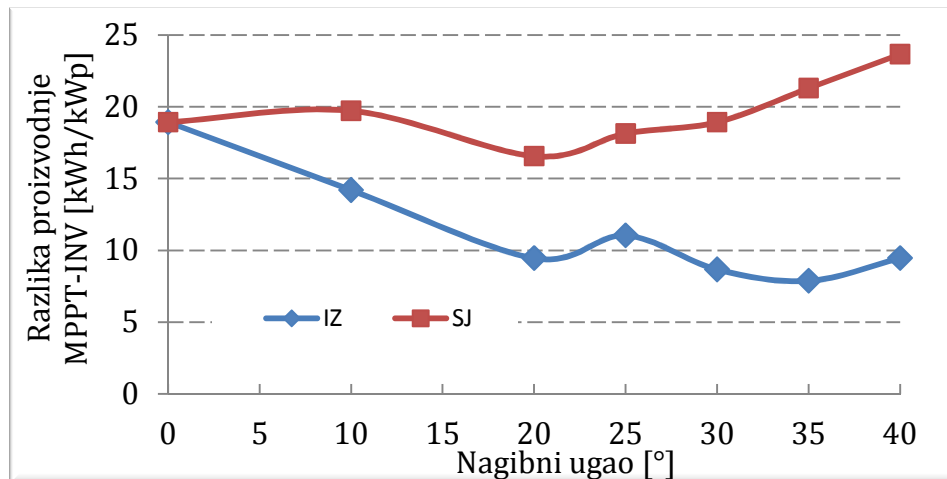
Slika 4.46 –Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Razlika SP koja se javlja za različite pravce prostiranja FN niza (IZ-SJ) i za različit broj MPPT ulaza u inverter (MPPT-INV) je prikazano na slikama 4.47 i 4.48, redom. Prikazana razlika SP se ostvaruje tokom 25-to godišnjeg rada FN elektrane, dakle na kraju životnog veka. Kada se posmatra razlika proizvodnje između različitih prostiranja FN polja (slika 4.47), vidi se da inverter sa jednim ulazom (INV) u odnosu na inverter sa dva MPPT ulaza (MPPT) ima veću razliku u proizvodnji. Razlika u proizvodnji se smanjuje sa povećanjem nagibnog ugla, do vrednosti ugla od 25°. Posle te vrednosti nagibnog ugla razlika proizvodnje se povećava, što znači da više dolazi do izražaja prednost kombinacije IZ-MPPT kada je rastojanje redova blizu ili manje od optimalnog.



Slika 4.47 –Razlika specifične proizvodnje između položaja FN niza IZ i SJ

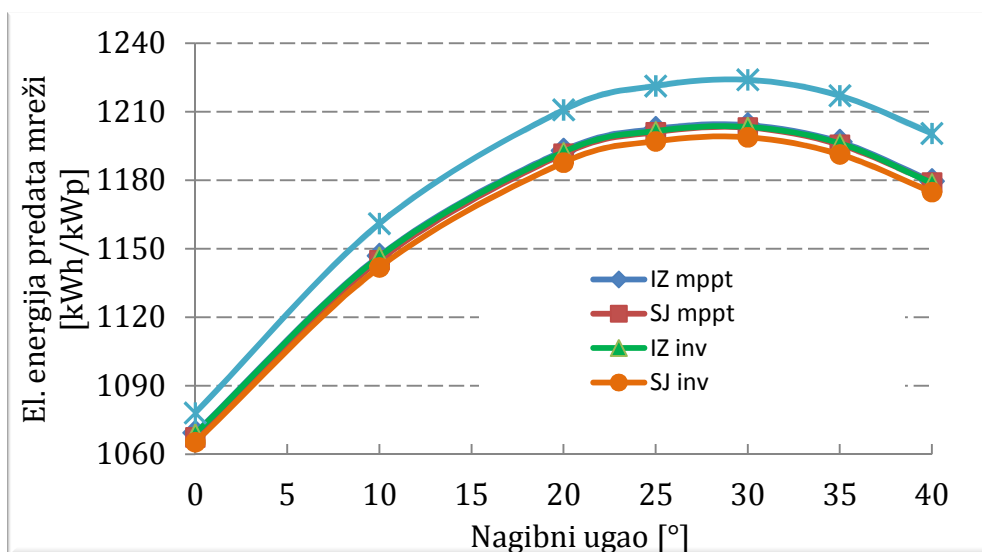
Kada se posmatra razlika proizvodnje između invertora sa različitim brojem MPPT ulaza, pri čemu je pravac prostiranja FN polja isti (slika 4.48), vidi se da je za pravac prostiranja sever-jug (SJ) veća razlika u proizvodnji u odnosu na pravac prostiranja istok-zapad (IZ). Tok krive je različit za različite pravce prostiranja. Za pravac prostiranja SJ postoji minimum razlike proizvodnje između MPPT i INV i ono se dostiže pri nagibnom uglu od 20°. Za pravac prostiranja IZ minimalna razlika se dostiže pri nagibnom uglu od 35°.



Slika 4.48 – Razlika specifične proizvodnje između tipa invertora MPPT i INV

4.4.3.3. Položaj prepreke JUG

Slika 4.49 ukazuje na to da postoji mala razlika u specifičnoj proizvodnji između analizirane četiri kombinacije. Ipak, za razliku od položaja prepreke DOLE i GORE, nešto više je izdvojena kriva za kombinaciju SJinv. Preciznije, nešto je manja specifična proizvodnja za navedenu kombinaciju.



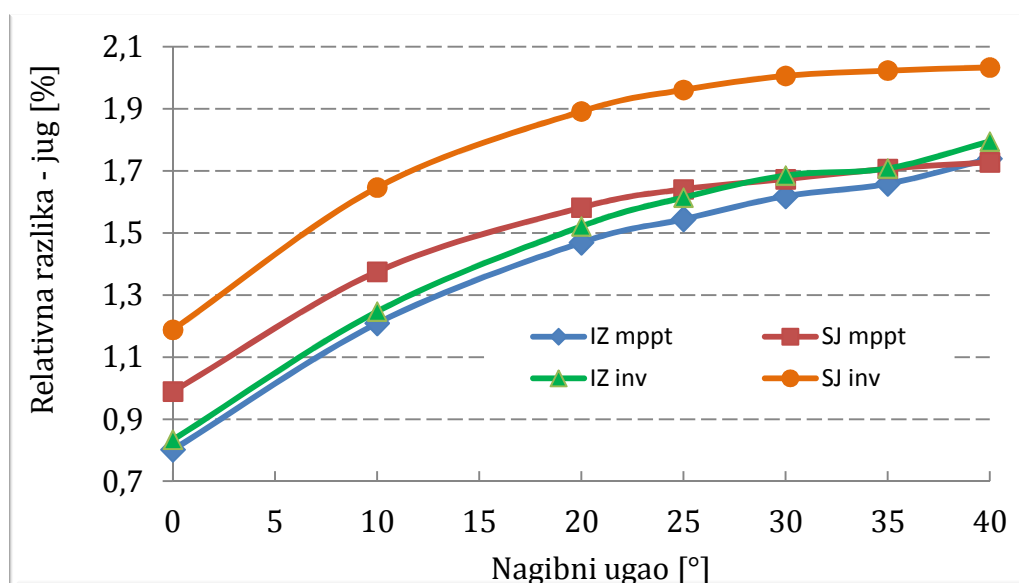
Slika 4.49 – Procenjena specifična proizvodnja električne energije

U tabeli 4.11 su prikazane vrednosti SP za položaj prepreke JUG, pri različitim nagibnim uglovina FN panela.

Tabela 4.11 – Specifična proizvodnja za položaj prepreke JUG

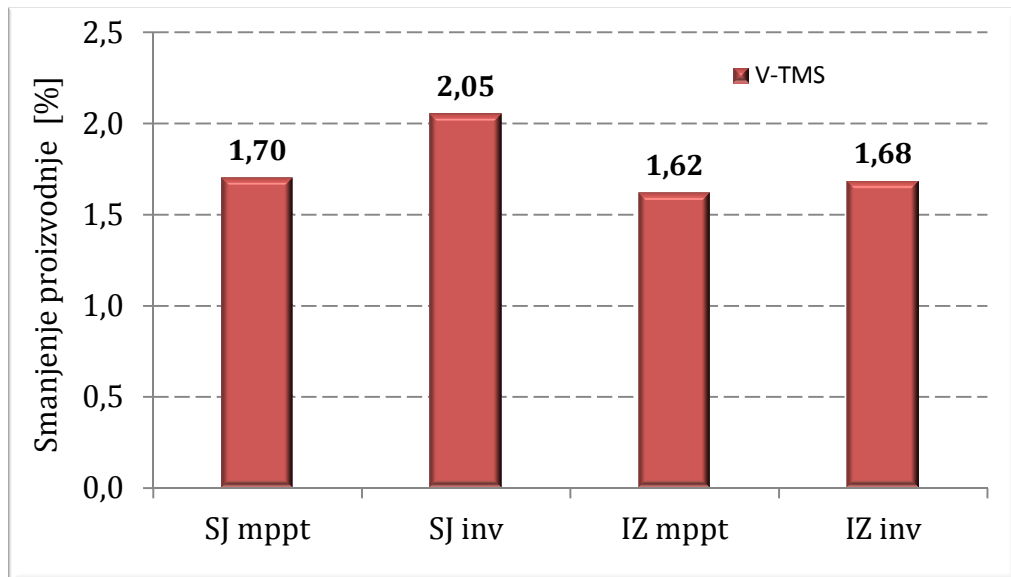
Specifična proizvodnja [kWh/kWp]					
Nagibni ugao FN panela [°]	bez prepreke	za položaj prepreke JUG			
		IZ-MPPT	SJ-MPPT	IZ-INV	SJ-INV
0	1078,0	1069,4	1067,4	1069,0	1065,2
10	1160,9	1146,9	1145,0	1146,4	1141,8
20	1210,8	1193,0	1191,5	1192,3	1187,7
25	1221,3	1202,4	1201,0	1201,5	1197,0
30	1223,9	1204,1	1203,1	1203,3	1198,8
35	1217,0	1196,8	1195,5	1196,1	1191,3
40	1200,4	1179,6	1179,0	1178,7	1174,8

Slika 4.50 prikazuje relativnu razliku bez prepreke i sa preprekom, za razmatrane kombinacije. Tok promene relativne razlike je isti za sva četiri razmatrana slučaja i raste sa porastom nagibnog ugla. Posmatrajući krive IZ-MPPT i IZ-INV vidi se da veći doprinos proizvodnji daje inverter sa dva MPPT ulaza. Upoređujući krive SJ-MPPT i SJ-INV, što znači da je promenjen pravac prostiranja FN niza, dolazi se do zaključka da je takođe bolja situacija sa inverterom sa dva MPPT ulaza. Kad se uporede moguće četiri situacije pravac prostiranja IZ ima prednost. Od nagibnog ugla od 25° kombinacije IZ-INV i SJ-MPPT se izjednačavaju po pitanju proizvodnje.



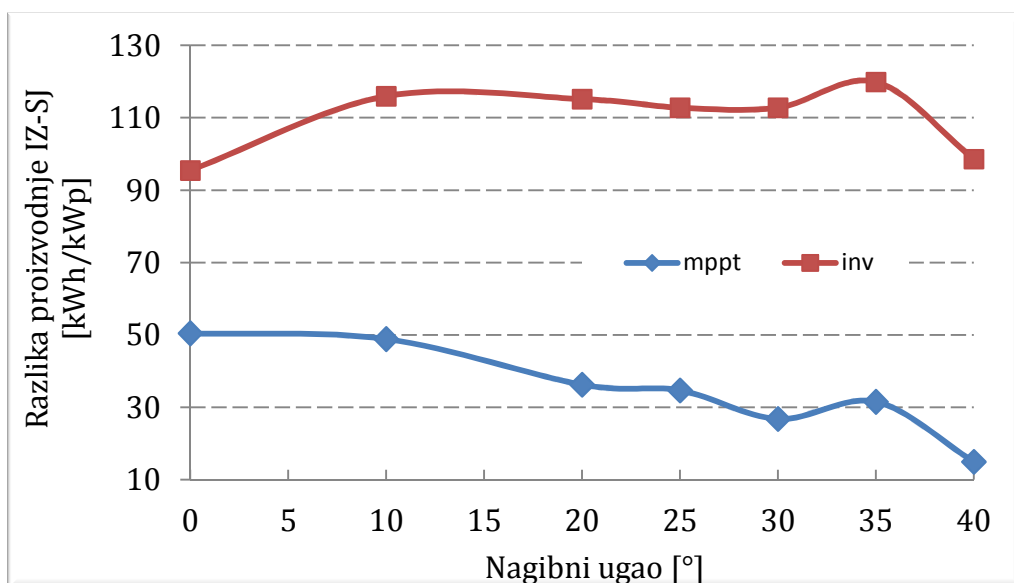
Slika 4.50 – Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Slika 4.51 ukazuje na to da je najpovoljniji slučaj za položaj prepreke JUG da se izabere situacija IZmppt.



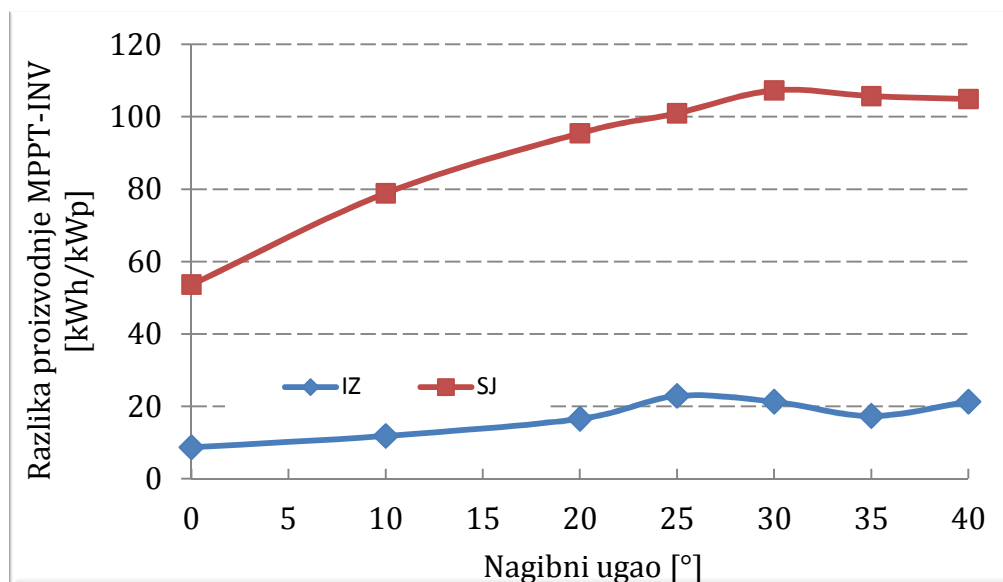
Slika 4.51 –Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri razmatrane situacije

Razlika SP koja se javlja za različite pravce prostiranja FN niza (IZ-SJ) i za različit broj MPPT ulaza u inverter (MPPT-INV) je prikazano na slikama 4.52 i 4.53. Prikazana razlika SP se ostvaruje tokom 25-to godišnjeg rada FN elektrane, dakle na kraju životnog veka. Kada se posmatra razlika proizvodnje između različitih prostiranja FN polja (slika 4.52), vidi se da inverter sa dva ulaza (MPPT) u odnosu na inverter sa jednim MPPT ulazom (INV) ima veću razliku u proizvodnji. Razlika proizvodnje se smanjuje sa povećanjem nagibnog ugla za MPPT, dok je razlika približno ista za sve uglove za slučaj INV.



Slika 4.52 –Razlika specifične proizvodnje između položaja FN niza IZ i SJ

Kada se posmatra razlika proizvodnje između invertora sa različitim brojem MPPT ulaza, pri čemu je pravac prostiranja FN polja isti (slika 4.53), vidi se da je za pravac prostiranja sever-jug (SJ) veća razlika u proizvodnji u odnosu na pravac prostiranja istok-zapad (IZ). Tok krive je različit za različite pravce prostiranja. Kod pravca prostiranja SJ razlika raste do 30° posle čega postaje konstantna. Za pravac prostiranja IZ rast razlike je nešto blaži i od 25° nagibnog ugla se ustaljuje.



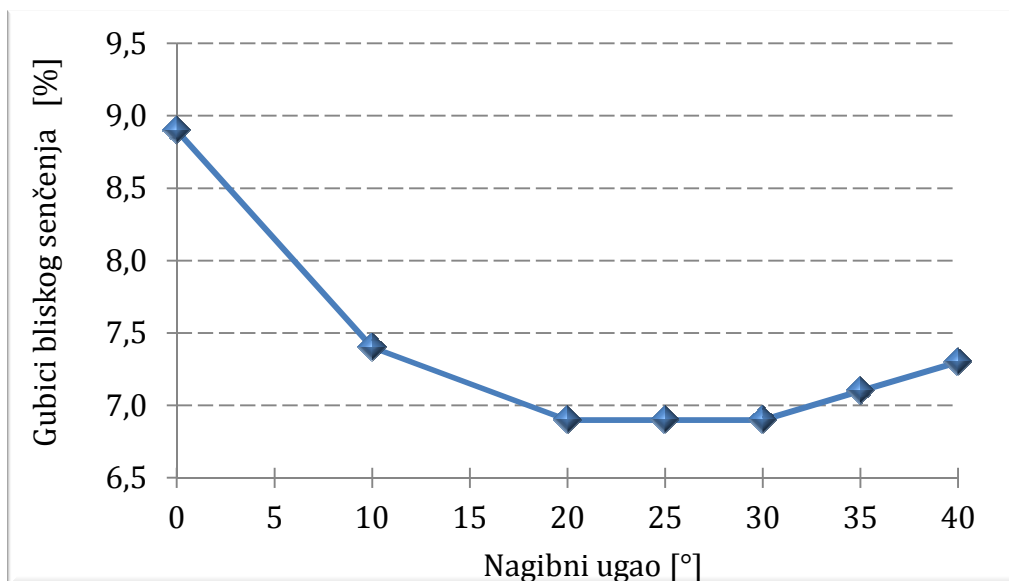
Slika 4.53 – Razlika specifične proizvodnje između tipa invertora MPPT i INV

4.5. Makrokonfiguracija u FN elektrani FTN-NS

Položaj FN nizova i prepreka za elektranu FTN-NS je prikazana na slici 4.19. Softverska makrokonfiguracija za elektranu FTN-NS je sprovedena sa istom kombinacijom prostiranja FN niza i tipa invertora, kao u slučaju makrokonfiguracije sa različitim položajem prepreka. I u ovom slučaju, rezultati makrokonfiguracije FN polja su prikazni za dva vremenska intervala, na dnevnom i na godišnjem nivou.

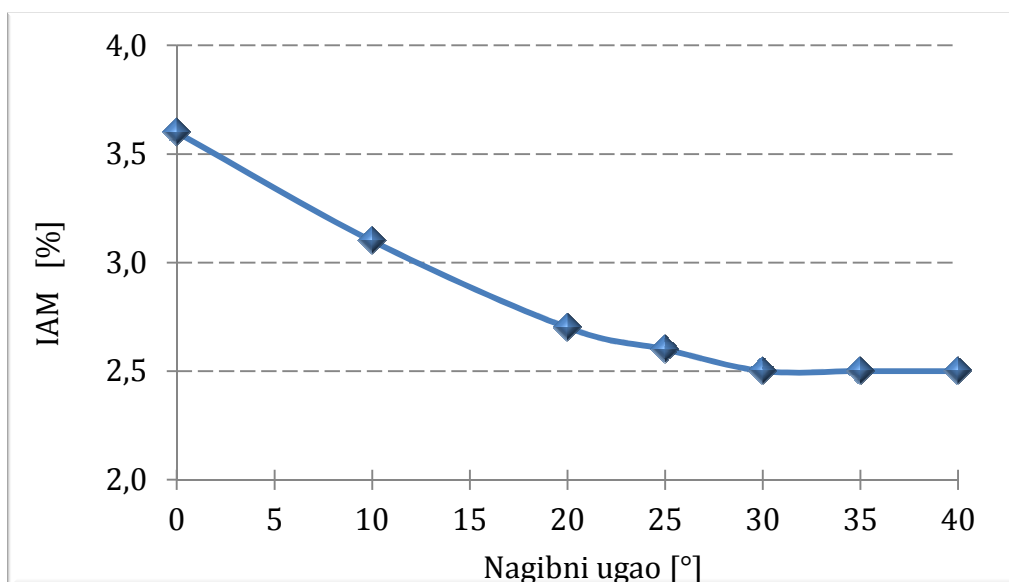
4.5.1. Gubici ozračenja

Kao što se sa slike 4.54 vidi gubici bliskog senčenja imaju svoj maksimum pri nagibnom uglu FN panela od 0°. Minimalni su gubici pri nagibnim uglovima između 20° i 30°. Ovde treba napomenuti da zbog velikog rastojanja redova noseće konstrukcije, gubici bliskog senčenja ne sadrže gubitke međusobnog senčenja FN panela. Gubici bliskog senčenja opadaju do nagibnog ugla od 20°, dok se neznatno povećavaju iznad nagibnog ugla od 30°.

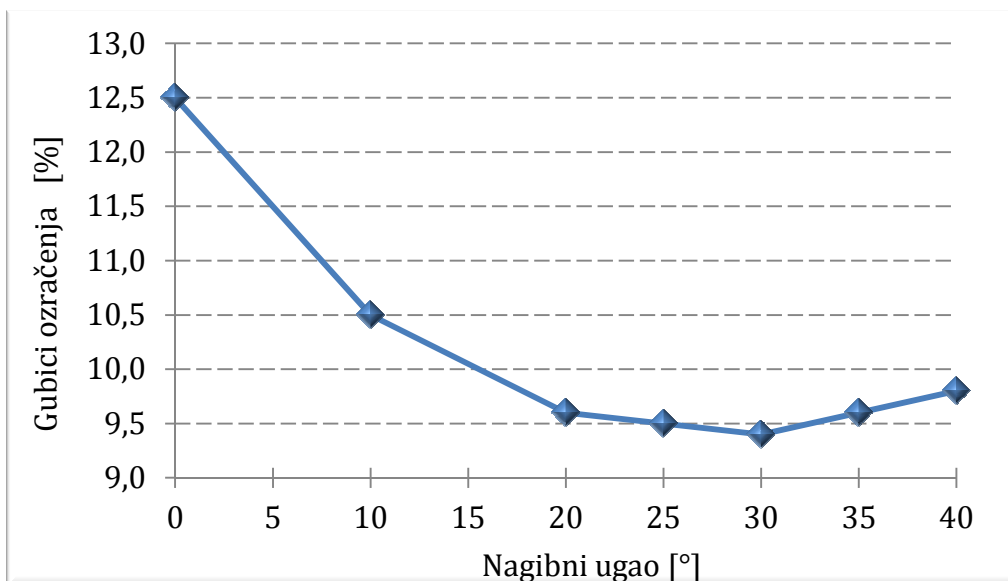


Slika 4.54 – Gubici nastali usled senčenja okolnih zgrada

Gubici IAM u zavisnosti od nagibnog ugla su u granicama od 2,5% do 3,6%, i imaju tendenciju smanjenja sa porastom nagibnog ugla (slika 4.55). Kombinacija krive gubitaka bliskog senčenja sa slike 4.54 i IAM gubitaka sa slike 4.55 daju ukupne gubitke ozračenja koja je prikazana na slici 4.56. Kao što se sa slike vidi minimum gubitaka ozračenja se dostiže za nagibni ugao FN panela od 30°.



Slika 4.55 – IAM gubici sa preprekom



Slika 4.56 – Ukupni gubici ozračenja

4.5.2. Rezultati makrokonfiguracije na dnevnom nivou

Simulacija makrokonfiguracije na dnevnom nivou je sprovedena za sve četiri kombinacije načina povezivanja FN niza i tipa invertora, pri čemu je u svim slučajevima nagibni ugao FN panela 30°. Rezultati makrokonfiguracije se prikazuju za dva karakteristična dana u godini, najkraći i najduži dan u godini. Tabela faktora senčenja za elektranu FTN-NS je prikazana na slici 4.57. Kodiranje bojama je identično kao na prethodnim slikama tabele faktora senčenja.

Azimu t Visina	-	-	-	-	-	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	
90°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40°	0.00	0.00	0.03	0.15	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30°	0.00	0.15	0.49	0.66	0.63	0.42	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20°	0.16	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.23	0.16	0.00
10°	0.71	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	1.00	1.00	0.71	0.00
2°	0.71	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64	0.33	0.40	0.49	0.02	0.06	0.78	1.00	1.00	0.71	0.00	0.00

Slika 4.57 – Tabela faktora senčenja

Tabela 4.12 prikazuje proizvodnju električne energije FN elektrane za najduži (LETO) i najkraći dan u godini (ZIMA,) u vremenskom intervalu kada se FN polje

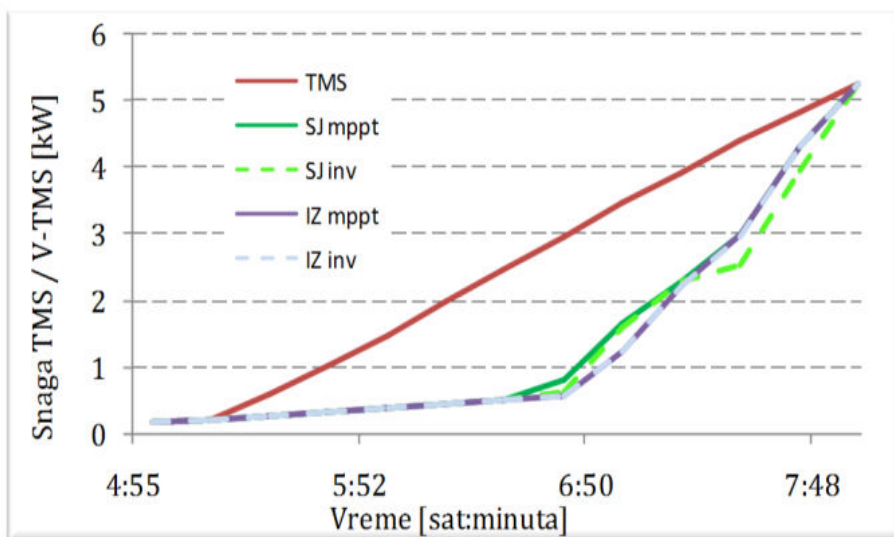
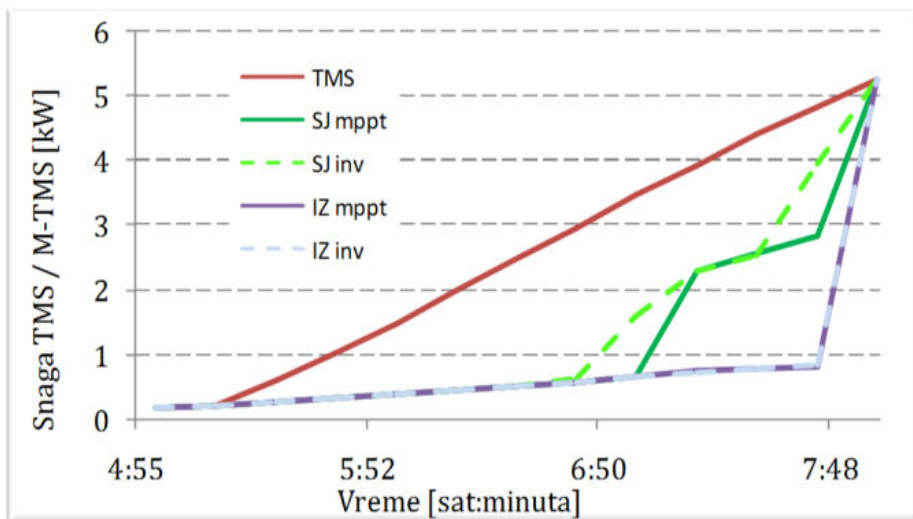
nalazi u senci tokom pre podneva. Izvan intervala senčenja, za iste situacije, proizvodnja je ista i stoga se ne razmatra (nema međusobnog senčenja redova FN panela). U skladu sa slikom 2.16 iz drugog poglavlja, gde se prikazuju tačke maksimalne snage FN niza, izvršeno je obeležavanje ispitivanih situacija sa i bez prepreke u tabeli 4.12 (TMS, V-TMS i M-TMS). Za sve vrednosti prikazane u tabeli važi da je proizvodnja električne energije veća za LETO, što je posledica dužeg izlaska FN niza iz senke (uporediti vreme trajanja senčenja sa slike 4.58 i 4.61) i većeg zračenja.

Tabela 4.12 – Proizvodnja električne energije elektrane FTN-NS u intervalu senčenja

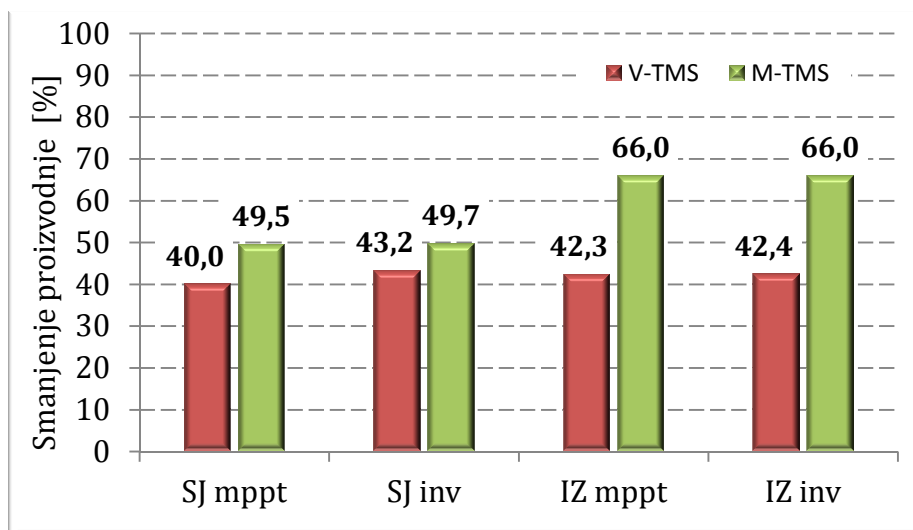
ELEKTRIČNA ENERGIJA [kWh]					
LETO		<i>SJ mppt</i>	<i>SJ inv</i>	<i>IZ mppt</i>	<i>IZ inv</i>
<i>bez prepreke</i>	<i>TMS</i>	8,21	8,21	8,21	8,21
<i>sa preprekom</i>	<i>V-TMS</i>	4,92	4,67	4,74	4,73
	<i>M-TMS</i>	4,15	4,13	2,80	2,80
ZIMA		<i>SJ mppt</i>	<i>SJ inv</i>	<i>IZ mppt</i>	<i>IZ inv</i>
<i>bez prepreke</i>	<i>TMS</i>	2,67	2,67	2,67	2,67
<i>sa preprekom</i>	<i>V-TMS</i>	1,32	1,19	1,14	1,14
	<i>M-TMS</i>	1,24	1,15	1,14	1,14

Slika 4.58 gore prikazuje kretanje tačke maksimalne snage FN polja sa i bez senčenja za najduži dan u godini. Sa TMS je obeležena tačka maksimalne snage FN polja bez senčenja, a sa SJmppt, SJinv, IZmppt i IZinv tačke maksimalne snage FN polja pri senčenju, gde su oznake u skladu sa objašnjenim načinom kombinacije ispitivanih slučajeva. Na gornjem grafiku je prikazano kretanje TMS i M-TMS, dok se na donjem grafiku vidi kretanje TMS i V-TMS tokom senčenja. Kada inverter nalazi V-TMS, vidi se da je trajektorija tačaka maltene ista, slika 4.58 dole. Pri nalaženju M-TMS (slika 4.55 gore) prednost ima prostiranje FN niza SJ za oba tipa invertora (SJmppt i SJ inv).

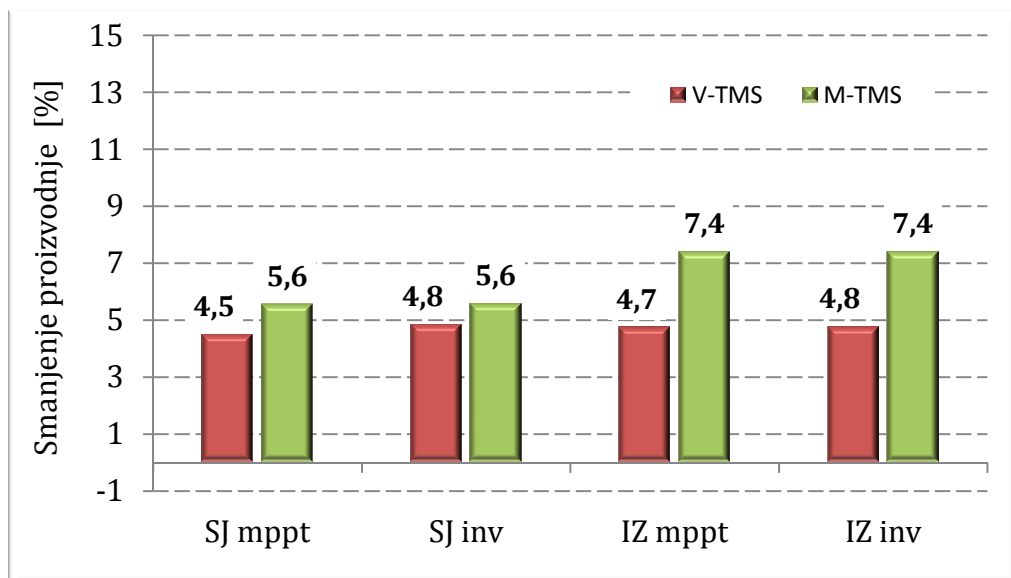
Na slikama 4.59 i 4.60 prikazuje se procentualno smanjenje proizvodnje u odnosu na situaciju bez senčenja, redom za senčenje tokom jutra i za ceo dan. Kao što se iz kretanja tačke maksimalne snage da zaključiti, smanjenje proizvodnje je približno isto za V-TMS, dok je za M-TMS ono najmanje za pravac prostiranja FN niza sever-jug sa višeulaznim MPPT inverterom (slika 4.59). Situacija, što se tiče međusobnog odnosa pojedinih slučajeva, se ne menja, kada se posmatra smanjenje proizvodnje za ceo dan. Ove situacije su prikazane na slici 4.60. Upoređujući proizvodnju u intervalu senčenja sa proizvodnjom na celodnevnom nivou vidi se značajna razlika u nivou smanjenja proizvodnje. Na dnevnom nivou smanjenje proizvodnje je u proseku deset puta manje nego u jutarnjem intervalu.



Slika 4.58 – Promena M-TMS (levo), V-TMS (desno) i TMS za letnji period

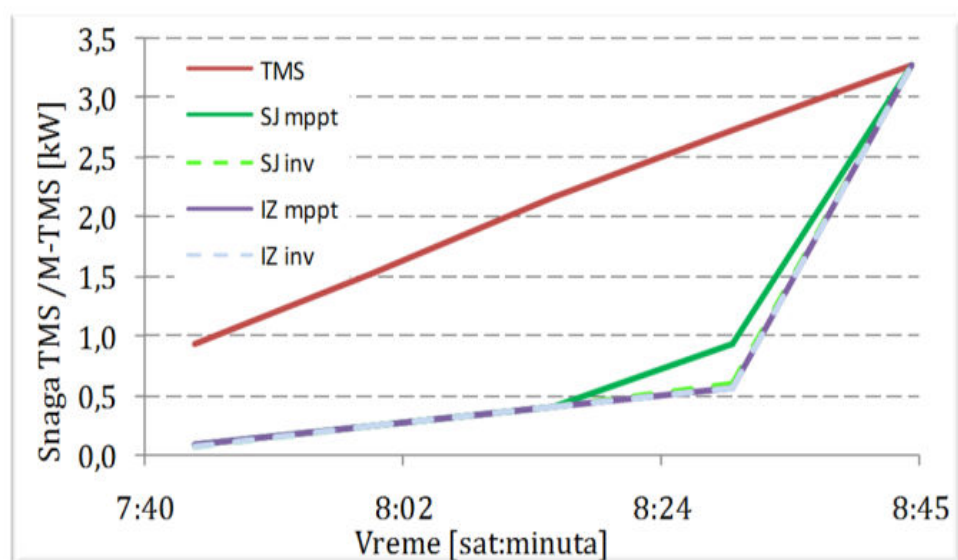


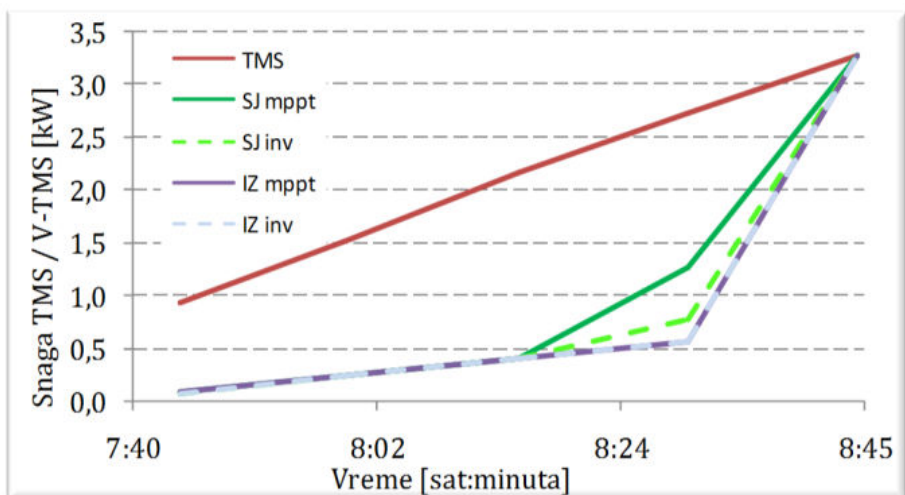
Slika 4.59 – Smanjenje proizvodnje u periodu senčenja, leto



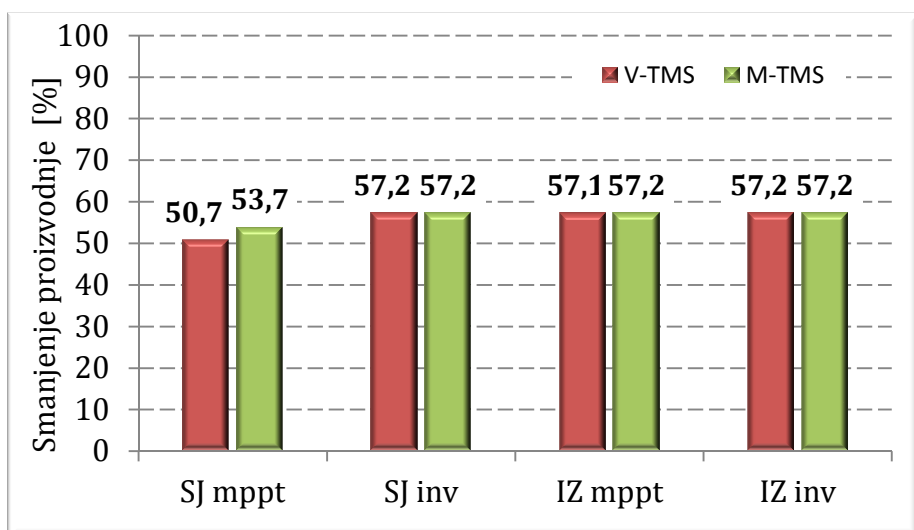
Slika 4.60 – Smanjenje proizvodnje za ceo dan, leto

Slika 4.61 prikazuje kretanje tačke maksimalne snage FN polja tokom senčenja za najkraći dan u godini. Kao što se vidi sa slike, trajektorije V-TMS i M-TMS su veoma slične za sve četiri kombinacije. Ovo potvrđuju i slike 4.62 i 4.63, koje prikazuju razliku u proizvodnji za razmatrane situacije pri senčenju, a u odnosu na situaciju bez senčenja (TMS). U svakom slučaju makrokonfiguracija SJmppt, kao i za najduži dan u godini, ima najmanje smanjenje proizvodnje. Tako se na osnovu analize proizvodnje u intervalu izlaska FN nizova iz senke i na dnevnom nivou može zaključiti da ja za elektranu na FTN najbolje prostiranje redova po pravcu sever-jug uz korišćenje invertora sa više MPPT ulaza.

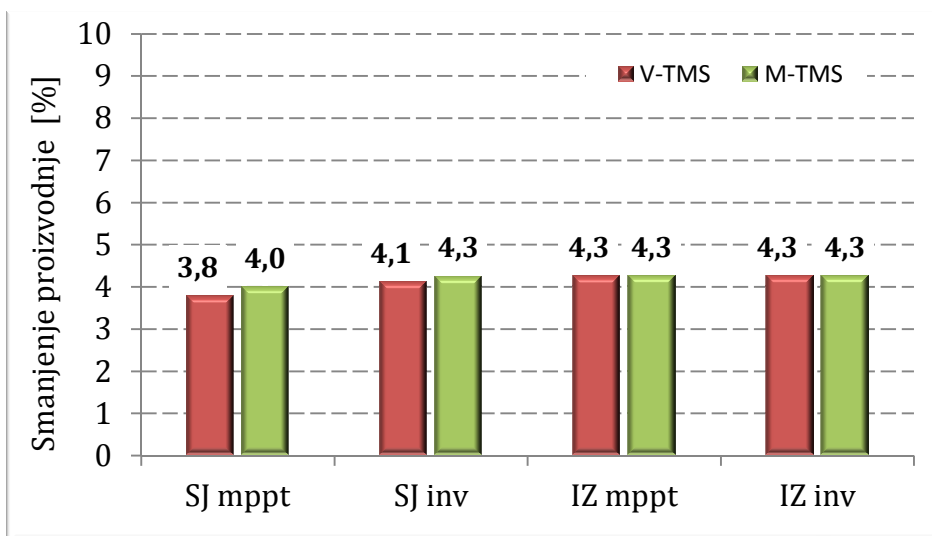




Slika 4.61 – Promena M-TMS (gore), V-TMS (dole) i TMS za zimski period



Slika 4.62 – Smanjenje proizvodnje u periodu senčenja, zima



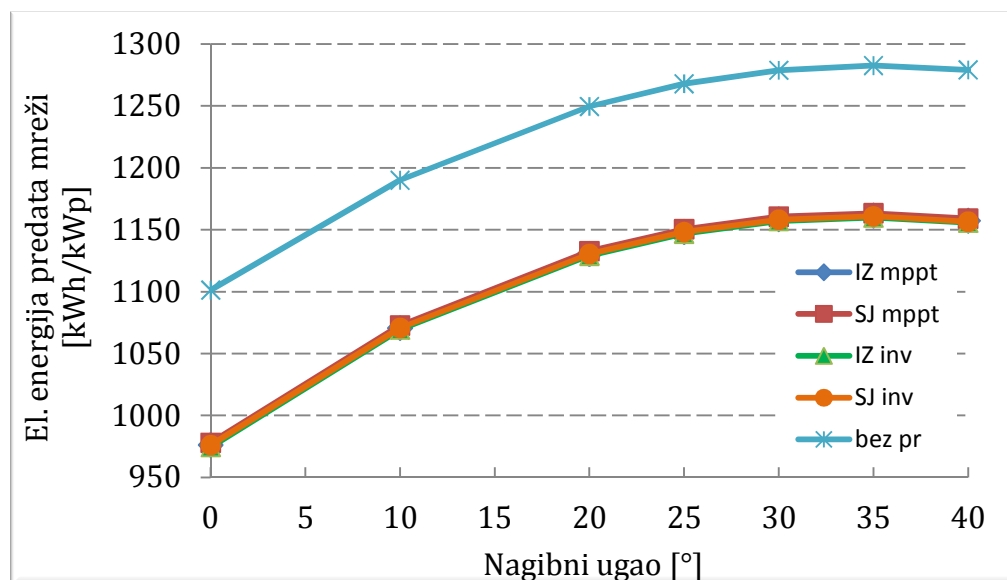
Slika 4.63 – Smanjenje proizvodnje za ceo dan, zima

4.5.3. Rezultati makrokonfiguracije na godišnjem nivou

Nadalje je razmatrana procenjena proizvodnja električne energije na godišnjem nivou, za četiri kombinacije načina prostiranja FN niza i tipa invertora u elektrani FTN-NS. Kao i za različite položaje prepreka, i u ovom slučaju je ukupna specifična proizvodnja za različite kombinacije na godišnjem nivou veoma bliska. Ovo potvrđuje slika 4.64, gde se vidi promena specifične proizvodnje za različite nagibne uglove.

Tabela 4.11 – Specifična proizvodnja za elektranu FTN-NS

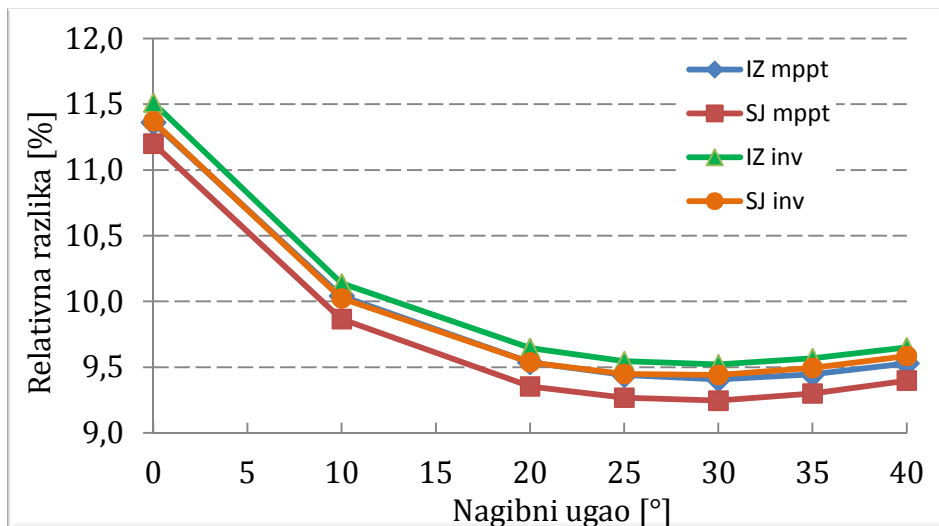
Specifična proizvodnja [kWh/kWp]					
Nagibni ugao FN panela [°]	bez prepreke	IZ-MPPT	SJ-MPPT	IZ-INV	SJ-INV
		0	1101,25	976,15	977,92
10	1190,00	1070,52	1072,60	1069,38	1070,73
20	1249,58	1130,42	1132,71	1129,06	1130,42
25	1267,92	1148,23	1150,42	1146,88	1148,13
30	1278,85	1158,54	1160,63	1157,08	1158,13
35	1282,60	1161,46	1163,33	1159,90	1160,83
40	1279,17	1157,29	1158,96	1155,73	1156,56



Slika 4.64 – Procenjena specifična proizvodnja električne energije na godišnjem nivou

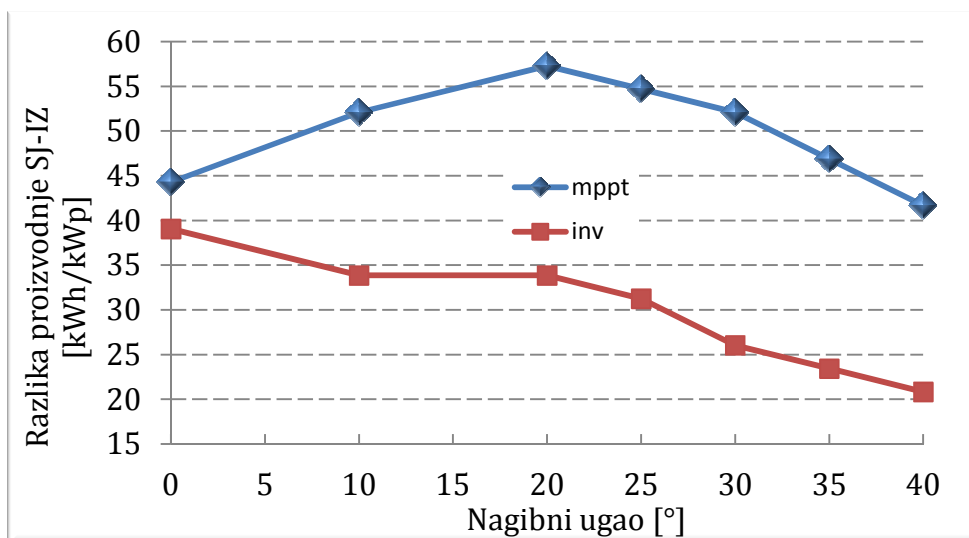
Slika 4.65 prikazuje relativnu razliku SP bez prepreke i sa preprekom, za razmatrane kombinacije. Tok promene relativne razlike je isti za sva četiri razmatrana slučaja i opada sa porastom nagibnog ugla do 30° posle čega neznatno raste. Najmanja razlika se postiže za kombinaciju SJmppt, dok je najveća razlika za

kombinaciju IZinv. Za sve četiri razmatrane kombinacije najmanja razlika SP se postiže pri nagibnom uglu od 30°, što predstavlja optimalni nagibni ugao za elektranu FTN-NS.



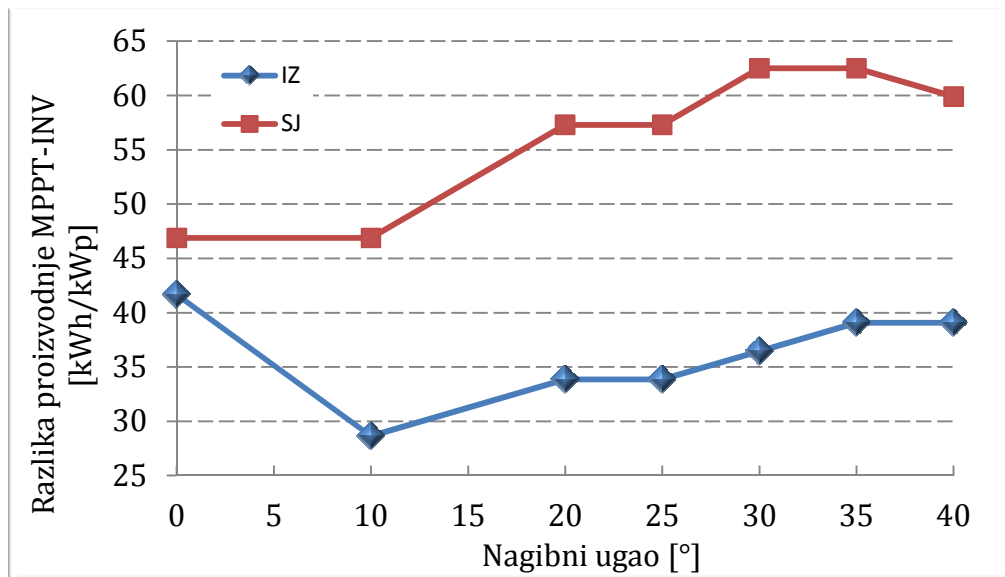
Slika 4.65 – Relativna razlika specifične proizvodnje za četiri kombinacije

Razlika SP koja se javlja za različite pravce prostiranja FN niza (IZ-SJ) i za različit broj MPPT ulaza u inverter (MPPT-INV) je prikazano na slikama 4.66 i 4.67, redom. Prikazana razlika SP se ostvaruje tokom 25-to godišnjeg rada FN elektrane, dakle na kraju životnog veka. Kada se posmatra razlika proizvodnje između različitih prostiranja FN polja, pri čemu inverter ima isti broj MPPT ulaza (slika 4.66) vidi se da inverter sa jednim ulazom (INV) u odnosu na inverter sa dva MPPT ulaza (MPPT) ima manju razliku u proizvodnji. Ovo znači da inverter sa više MPPT ulaza ima bolje performanse.



Slika 4.66 – Razlika specifične proizvodnje između položaja FN niza IZ i SJ

Kada se posmatra razlika proizvodnje između invertora sa različitim brojem MPPT ulaza, pri čemu je pravac prostiranja FN polja isti (slika 4.67), vidi se da je za pravac prostiranja sever-jug (SJ) veća razlika u proizvodnji u odnosu na pravac prostiranja istok-zapad (IZ). Dakle za elektranu FTN-NS, što se tiče proizvodnje, bolji je pravac prostiranja SJ.



Slika 4.67 – Razlika specifične proizvodnje između tipa invertora MPPT i INV

4.6. Analiza rezultata makrokonfiguracije

Posle prikaza rezultata makrokonfiguracije urađene u PVsyst softveru za slučajeve sa različitim položajem prepreka i situaciju za elektranu na FTN-NS, sledi analiza dobijenih rezultata.

4.6.1. Makrokonfiguracija sa različitim položajem prepreka

Analiza rezultata se započinje na dnevnom nivou za slučaj različitog položaja prepreke u odnosu na FN polje.

Za slučaj prepreke DOLE i JUG kod svih razmatranih slučajeva (SJ mppt, SJ inv, IZ mppt, IZ inv) vidljiva je razlika između kretanja TMS (nema senčenja) u odnosu na V-TMS i M-TMS (senčenje). Ova razlika je veoma mala za položaj prepreke GORE za sve slučajeve. **Dakle, razni slučajevi makrokonfiguracije imaju zanemarljiv uticaj na proizvodnju elektrane kada se prepreka nalazi više prema severu u odnosu na položaj FN panela (slučaj prepreke GORE). Za ovaj slučaj razlika proizvodnje je zanemarljiva, bez obzira na to koju tačku maksimalne snage nađe inverter (M-TMS ili V-TMS). Ipak, blagu prednost daje izbor makrokonfiguracije IZmppt.**

Upoređujući položaje prepreka DOLE i JUG proizvodnja je u svim situacijama bolja kada inverter nalazi V-TMS, pri čemu je veća razlika u proizvodnji između V-TMS i M-TMS za slučaj prepreke DOLE. Za prepreku DOLE kada se nalazi V-TMS najmanje smanjenje proizvodnje je kada inverter ima više MPPT ulaza, dok je uticaj pravca prostiranja nizova zanemarljiv. Za prepreku JUG veći je uticaj na proizvodnju pravac prostiranja u odnosu na broj MPPT ulaza. **Dakle, pozitivan uticaj makrokonfiguracije je najveći kada se prepreka nalazi DOLE. Za ovu situaciju najbolji slučaj makrokonfiguracije je Smppt ili Zmppt. Kada se radi o položaju prepreke JUG najbolji izbor je Zmppt ili ZInv.**

Sledi analiza makrokonfiguracije za analizirane slučajeve na godišnjem nivou.

Posmatrajući razliku proizvodnje bez i sa preprekom zapaža se različit uticaj položaja prepreka i nagibnog ugla na makrokonfiguraciju. Za položaj prepreke DOLE za sva četiri slučaja konfigurisanja različit je uticaj. Sa povećanjem nagibnog ugla izjednačava se razlika u proizvodnji između pravca prostiranja IZ i SJ. Za prepreku GORE negativan uticaj senčenja se smanjuje za sve četiri vrste konfigurisanja sa porastom nagibnog ugla FN panela. Suprotna je situacija za prepreku JUG, gde se sa porastom nagibnog ugla povećava negativan uticaj senčenja za sve situacije. Za prepreku GORE i JUG sa povećanjem nagibnog ugla se takođe smanjuje razlika u proizvodnji između pravca prostiranja IZ i SJ, s napomenom da situacija SInv u oba slučaja je najnepovoljnija.

Upoređujući proizvodnju, odnosno specifičnu proizvodnju na godišnjem nivou za različit položaj prepreka dolazi se do sledećih zaključaka:

- **tok promene godišnje proizvodnje u funkciji ugla je isti za sve razmatrane položaje, slike 4.39, 4.44 i 4.49,**
- **maksimalna proizvodnja se postiže za nagibni ugao FN panela od 30°, bez obzira na izbor makrokonfigurisanja,**
- **najmanji negativan uticaj prepreke je za položaj prepreke GORE, a najveći za položaj prepreke JUG,**
- **Za prepreku GORE povoljniji je što veći nagibni ugao, nasuprot preciji JUG gde je povoljnija situacija što manji nagibni ugao,**
- **maksimalna razlika u proizvodnji sa i bez prepreke, za bilo koji razmatran slučaj nije veće od 2,1%, i zavisi od položaja prepreke i nagibnog ugla FN panela. Ova razlika zavisi od nivoa senčenja FN polja.**
- **bez obzira na položaj prepreke najmanja razlika u proizvodnji između situacije bez senčenja i sa senčenjem je za konfiguraciju IZ mppt, što ujedno znači i najbolji način makrokonfigurisanja,**
- **maksimalna razlika specifične proizvodnje tokom životnog veka elektrane dobijena upoređivanjem IZ/SJ ili mppt/inv iznosi 120kWh/kWp.**

Za analiziranu elektranu (31,68kWp) iz poslednjeg zaključka se dolazi do podatka da maksimalna razlika u proizvodnji za analizirane slučajeve nije veća od

3,8MWh u životnom veku elektrane. Posmatrajući pojedinačne elektrane sa ekonomskog aspekta, može se zaključiti da različito izvođenje makrokonfiguracije nema naročitog značaja za investitora. Ako se posmatra velik broj FN elektrana sa aspekta zaštite životne sredine, makrorekonfiguracija ima značaj. Naime, za maksimalnu razliku proizvodnje razmatranih slučajeva razlika u emisiji ugljen-dioksida jedne elektrane u periodu eksploatacije elektrane je približno 5700 kg.

4.6.2. Makrokonfiguracija u FN elektrani FTN-NS

Sledi analiza rezultata za slučaj elektrane na FTN na dnevnom nivou.

Analiza je rađena za dva različita dana u godini, letnja dugodnevica i zimska kratkodnevica. Upoređujući pozitivan uticaj konfiguracije FN polja na kretanje tačke maksimalne snage vidi se da je on najveći u letnjem periodu za situaciju kada se FN nizovi prostiru po pravcu sever-jug. U slučaju da inverter nalazi M-TMS tokom cele godine povoljnija je makrokonfiguracija SJ, dok je u slučaju nalaženja V-TMS skoro svejedno koja se vrsta makrokonfiguracije bira. Trend promene proizvodnje je isti za sve situacije bez obzira da li se posmatra samo vremenski interval tokom senčenja ili ceo dan. **Uzimajući u obzir i letnji i zimski period, a nezavisno koju tačku maksimalne snage inverter nalazi, ipak prednost ima makrokonfiguracija SJmppt.**

Slučaj makrokonfiguracije elektrane na FTN je kombinacija analiziranih položaja prepreka GORE i DOLE, sa napomenom da se prepreke kontinualno pružaju duž istočne strane FN polja. **Dobijeni zaključci analize oba slučaja (različit položaj prepreka i elektrana FTN) nisu u koliziji i potvrđuju da je pozitivan uticaj makrokonfiguracije, posmatrano na dnevnom nivou, veći kada se prepreka nalazi u situaciji DOLE.**

Posmatrajući proizvodnju električne energije odnosno SP na godišnjem nivou u funkciji promene nagibnog ugla za elektranu FTN-NS vidi se da je manje izražen maksimum proizvodnje u odnosu na slučajeve sa različitim preprekama. Za nagibne uglove između 20° i 40° za sve konfiguracije relativna razlika u proizvodnji bez i sa senčenjem se skoro ne menja i nije veće od 0,15%. **Ovo znači da se KPT može menjati i prilagođavati potrebama bez bitnijeg smanjenja proizvodnje.**

Upoređujući međusobne slučajeve makrokonfigurisanja, bez obzira na male razlike, prednost ima slučaj SJmppt. Najveća procentualna razlika za neki nagibni ugao između najbolje i najlošije makrokonfiguracije je 0,3%.

5. Mikrorekonfiguracija FN niza

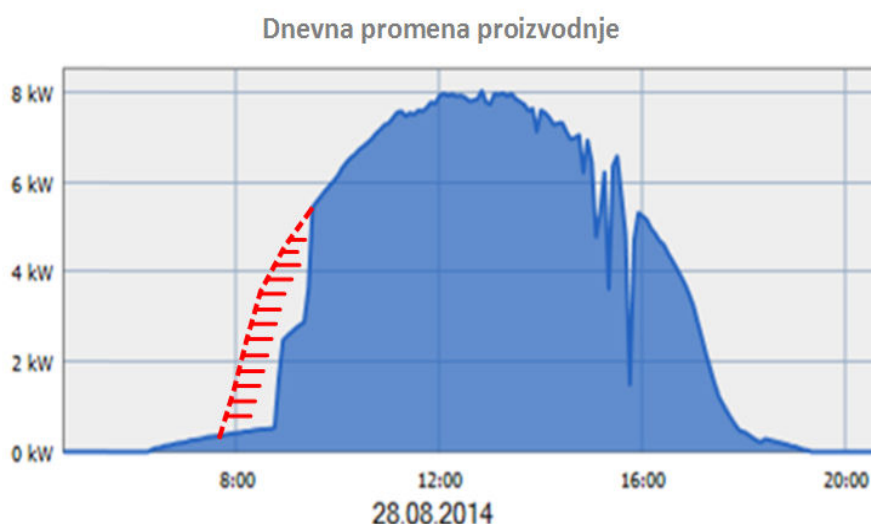
Razlog izvođenja mikrorekonfiguracije je isti kao kod makrorekonfiguracije, smanjenja negativnog uticaja senčenja na proizvodnju FN elektrane. Sem razlike u načinu realizacije konfigurisanja, ove dve vrste konfigurisanja FN polja se razlikuju i po vremenu njihovog ostvarivanja. Makrorekonfiguracija se planira tokom projektovanja elektrane i izvodi se pre njenog puštanja u rad. Mikrorekonfiguracija se izvodi popularno rečeno "online". Ovo znači da se električno prevezivanje FN panela ostvaruje tokom rada FN elektrane, bez njenog isključivanja kada predaje generisanu električnu energiju DEM.

5.1. Problem negativnog uticaja senčenja koji se može rešiti mikrorekonfiguracijom FN polja

Problem negativnog uticaja senčenja koji se može rešiti mikrorekonfiguracijom FN polja se objašnjava na primeru senčenja FN polja koji se dešava u jutarnjim satima. U trenucima kad sunčevi zraci počinju obasjavati FN polje inverter, odnosno njegov algoritam za nalaženje tačke maksimalne snage, bez problema nalazi maksimalnu snagu FN polja, jer postoji samo jedna tačka maksimalne snage, TMS. TMS se stalno menja u zavisnosti od ambijentalnih uslova. Slična je situacija i kada je u jutarnjim satima FN polje u senci, grafik karakteristike FN polja takođe ima jednu TMS koja je znatno manja od one kada je FN polje bez senke. Inverter ovu TMS isto tako lako nalazi. Međutim, od trenutka izlaska FN polja iz senke dolazi do diskontinuiteta grafika karakteristike FN polja, pojavljuju se dva ili više

maksimuma (V-TMS i M-TMS). Zbog veličine napona FN niza kojoj je pridružena V-TMS, inverter je u nemogućnosti da detektuje veći maksimum. Radna tačka invertora ostaje u M-TMS jer je napon ovog maksimuma blizak naponu TMS kada je FN niz bio potpuno senčen.

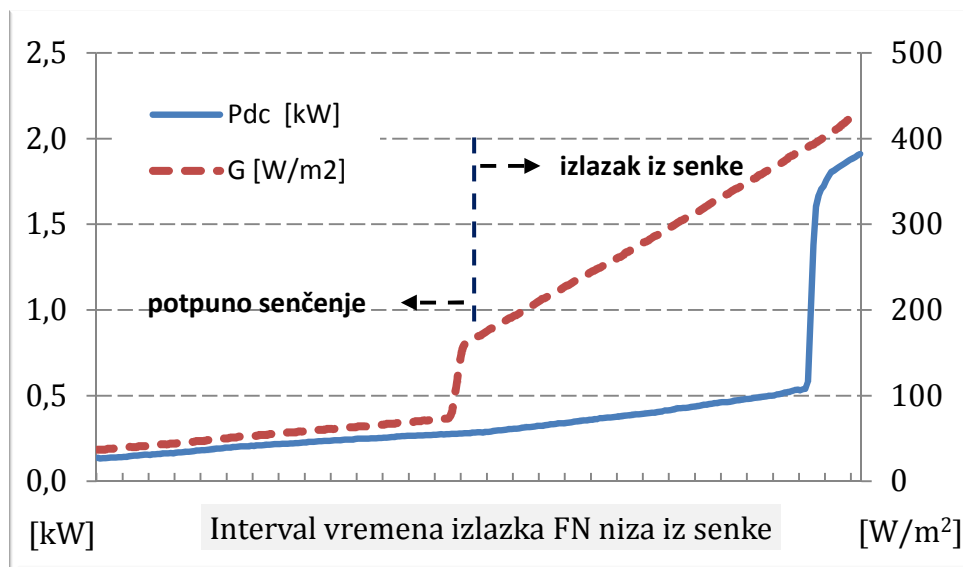
Ovu opisanu situaciju jutarnjeg senčenja FN polja, koja je direktna posledica načina rada algoritma invertora koji nalazi tačku maksimalne snage, prikazuje grafik na slici 5.1. Isprekidanom linijom je prikazano kretanje TMS za slučaj kada FN polje ne bi bilo senčeno. Puna linija predstavlja praćenje M-TMS od strane algoritma invertora za praćenje maksimalne snage FN polja. Lako se uočava uticaj senke na FN polje, odnosno nastali gubici u jutarnjim i prepodnevnim satima.



Slika 5.1 – Uticaj senčenja na izlaznu snagu invertora

Na slici 5.2 grafik prikazuje promenu snage FN niza (P_{dc}) spojenog na inverter i solarno zračenje (G), za vremenski interval dok je FN niz u senci, odnosno izlazi iz senke. Prikazani grafik je rezultat merenja koji je obavljen na elektrani FTN-NS. Na kraju prikazanog vremenskog intervala postoji nagli porast snage FN niza sa 0,5kW na oko 1,8kW. Uzrok ove nagle promene je potpun izlazak FN niza iz senke. Nagli porast zračenja na sredini prikazanog intervala sa slike 5.11 (isprekidana linija) je trenutak kada počinje izlazak FN niza iz senke. Senzor zračenja je pozicioniran tako da se detektuje početak izlaska FN niza iz senke. Dakle, u vremenskom intervalu kada je sve manje FN panela senčeno, pri čemu stalno raste zračenje, snaga FN niza se ne povećava srazmerno sa porastom zračenja. Naprotiv, snaga FN niza ostaje srazmerna nivou zračenja koji se beleži u senci.

Radi povećanja proizvodnje elektrane u intervalu izlaska FN polja iz senke, ideja je da se sprovede mikrorekonfiguracija FN panela sa početnim smanjenjem broja FN panela u odnosu na ukupan broj u FN nizu.



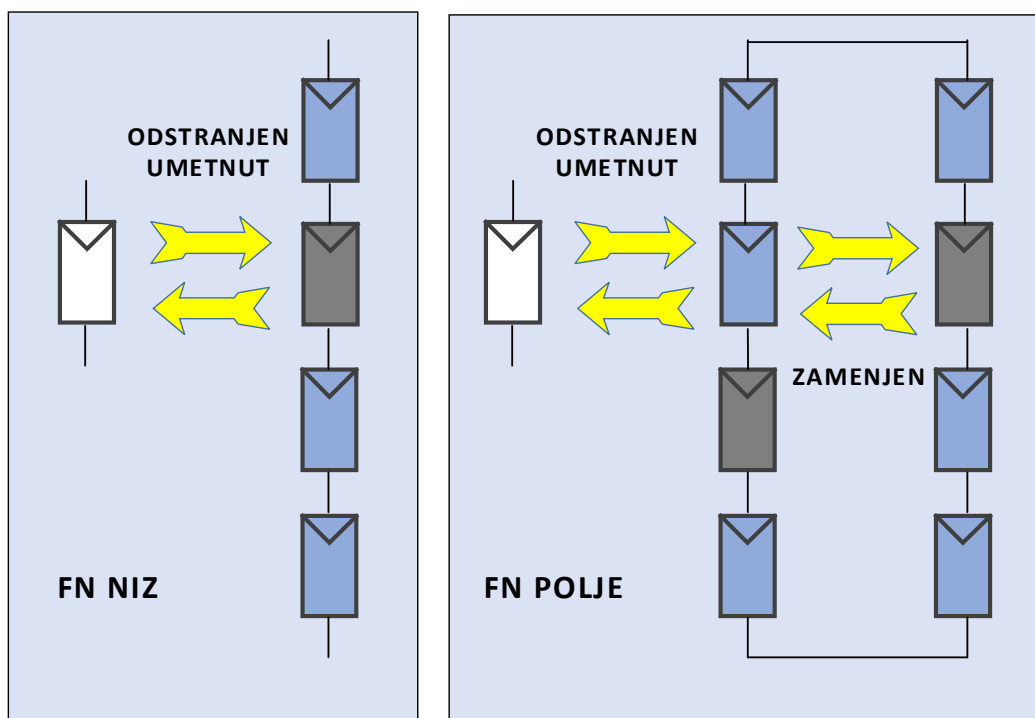
Slika 5.2 – Snaga FN niza i solarno zračenje u jutarnjim satima

5.2. Princip mikrorekonfiguracije FN polja

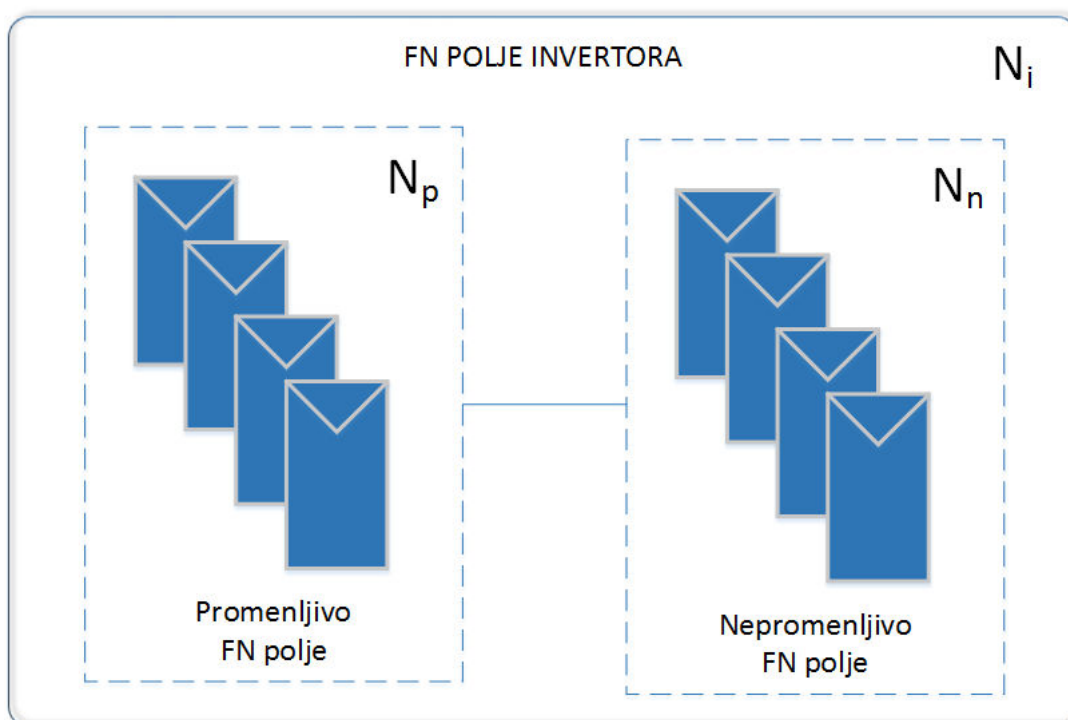
Mikrorekonfiguracija znači električno prevezivanje FN panela unutar FN polja. Električno prevezivanje FN panela podrazumeva fizičko odspajanje/spajanje krajeva FN panela (+ i – kraj) od/na FN polje, pri čemu se FN paneli fizički ne pomeraju sa noseće konstrukcije. Tokom mikrorekonfiguracije putem prevezivanja FN paneli mogu biti odstranjeni, zamenjeni ili ubačeni novi u FN polju, kao što je prikazano na slici 5.3. Prevezivanje se izvodi mehaničkim ili poluprovodničkim sklopkama. Da bi se izvela željena mikrorekonfiguracija potreban je i odgovarajući algoritam za upravljanje sklopkama.

U opštem slučaju FN polje, slika 5.4, se deli na dva podpolja. Jedno je nazvano nepromenljivo FN polje i u ovom polju se ne vrši električno prevezivanje FN panela. U nepromenljivom FN polju se nalaze FN paneli koji nisu senčeni ili je njihovo senčenje neznatno. Drugo podpolje je nazvano promenljivo FN polje. U ovom polju se vrši mikrorekonfiguracija, odnosno električno prevezivanje FN panela. Promenljivo FN polje je skup FN panela koji su u različitim intervalima dana u senci.

Na slici 5.4 je sa N_i obeležen broj FN panela, koji su vezani na inverter bez, odnosno pre izvođenja mikrorekonfiguracije. N_n je broj FN panela u nepromenljivom FN polju i za bilo koju konfiguraciju FN polja važi da je $N_n = const$. N_p je broj FN panela koji se koristi za mikrorekonfiguraciju u promenljivom FN polju.



Slika 5.3 – Princip mikrorekonfiguracije FN polja



Slika 5.4 – Opšta blok šema FN polja za mikrorekonfiguraciju

Što se tiče broja FN panela u FN polju mogu postojati tri situacije tokom mikrorekonfiguracije:

$$N_i = N_p + N_n \quad (5.1)$$

što znači da u promenljivom polju broj FN panela nije povećan tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na početni broj u FN polju.

$$N_i < N_p + N_n \quad (5.2)$$

znači da je u promenljivom polju broj FN panela povećan tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na početni broj pre mikrorekonfiguracije.

$$N_i > N_p + N_n \quad (5.3)$$

je slučaj smanjenja broja FN panela u promenljivom polju tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na ukupan broj u invertorskom polju.

Dakle, mikrorekonfiguracija FN panela može biti izvedena na tri načina:

- zadržavanjem broja FN panela tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na instalisani broj, što se ostvaruje zamenom FN panela električnim prevezivanjem,
- povećanjem broja FN panela tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na instalisani broj, što znači da se dodaju novi FN paneli u FN polje i zamenjuju,
- smanjenjem broja FN panela tokom mikrorekonfiguracije u odnosu na instalisani broj, pri čemu se neki FN paneli odstranjuju električnim odvezivanjem i zamenjuju.

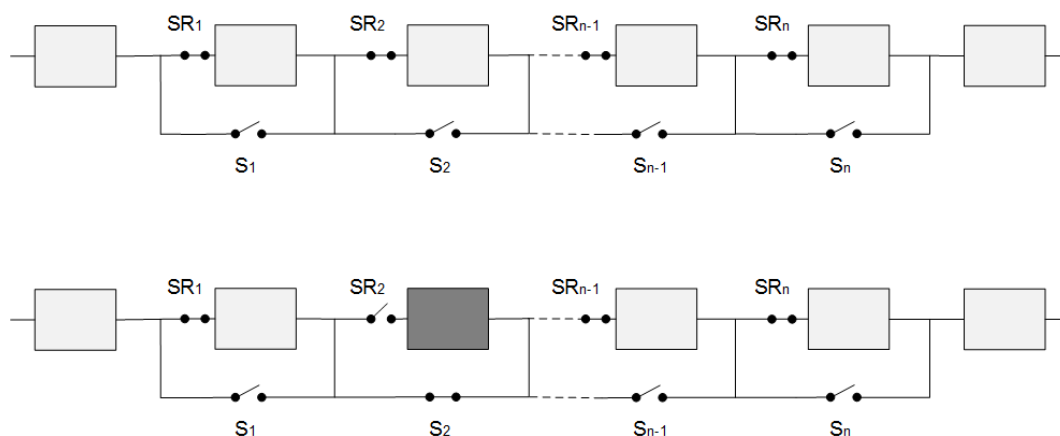
5.3. Opšti slučaj mikrorekonfiguracije FN niza

U uvodnom delu ovog poglavlja je rečeno da se mikrorekonfiguracija FN polja može ostvariti mehaničkim ili poluprovodničkim sklopkama. Bez obzira o kojoj vrsti sklopke se radi, o kom broju FN panela je reč u FN polju, potrebno je minimizirati broj sklopnih jedinica. Kada se FN polje sastoji od više paralelnih veza FN nizova po pravilu se koristi matrični spoj sklopnih jedinica. Zbog veličine FN polja u ogromnom broju slučajeva broj sklopnih jedinica matričnog polja je velik. Smanjivanje broja sklopnih jedinica je moguće izvesti prethodnom analizom položaja senke nad FN poljem.

Kod rekonfiguracije FN niza, broj potrebnih sklopnih jedinica u nizu je znatno manji u odnosu na matrično polje sklopki, što je posledica znatno manjeg broja FN panela u nizu. Prilikom rekonfiguracije FN niza treba ispoštovati određena tehnička pravila. Ova pravila direktno utiču na broj sklopki koje se koriste pri rekonfiguraciji. Jedno pravilo je da se ni u jednom trenutku ne sme dozvoliti odspajanje FN niza od ulaza invertora. Zbog toga se pri rekonfiguraciji mora izvršiti kratko spajanje FN panela. Na donjoj šemi slike 5.5 tamniji pravougaonik predstavlja FN panel u senci, koji je u prikazanoj situaciji odspojen od FN niza. Da bi se došlo do ove opisane

situacije treba poći od gornje šeme sa slike 5.5, gde su svi paneli vezani u FN niz. Da bi se senčeni panel eliminisao iz FN niza, potrebno je prvo uključiti sklopku S2. Na ovaj način se kratko spaja FN panel, pri čemu FN niz ostaje priključen na inverter. Potom se isključuje sklopka SR2, vezana na red sa panelom. Broj potrebnih sklopnih jedinica po FN panelu je dva, što znači da je ukupan broj sklopnih jedinica duplo veći od broja FN panela koji učestvuju u rekonfiguraciji. Zbog načina povezivanja sklopki rekonfiguraciono kolo sa slike 5.5 se može nazvati redno-paralelno sklopno rekonfiguraciono kolo (RP-SRK). Ova konfiguracija se koristila tokom istraživanja uticaja privremenog senčenja u samostalnom FN sistemu. Ovaj eksperiment je dao ideju da se ispita mogućnost povećanja proizvodnje tokom senčenja FN polja tokom jutarnjih sati u FN elektrani FTN-NS. Dakle, da bi se ispoštovalo pravilo neodspajanja FN niza od invertora, mora se vršiti kratko spajanje FN panela. Iz ovoga proizilazi drugo pravilo o struji kratkog spoja FN panela.

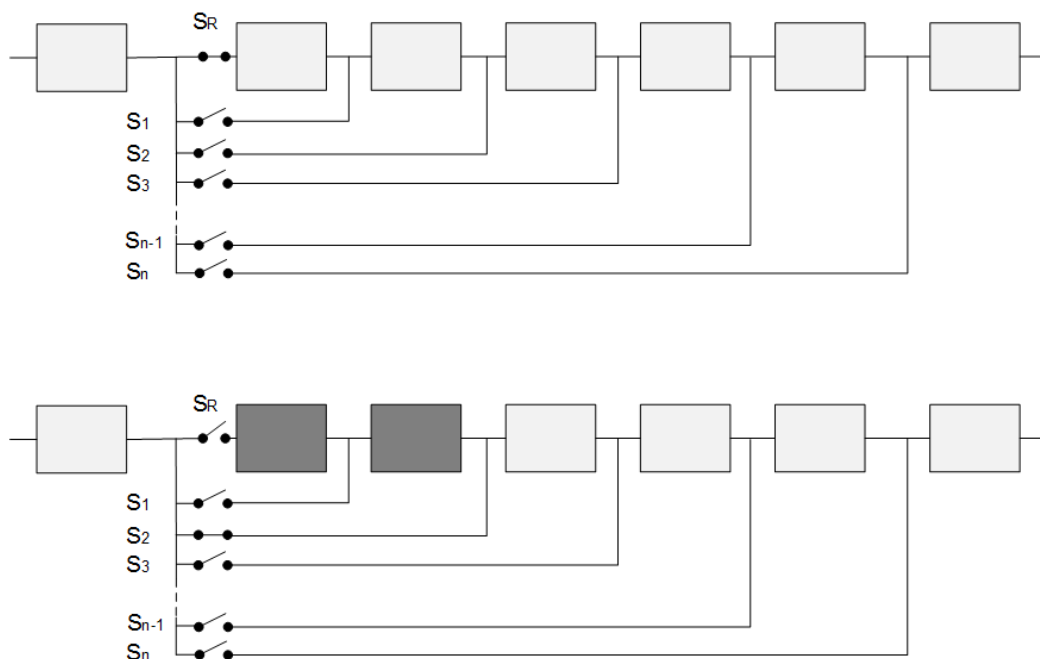
Poznato je da je struja kratkog spoja FN panela za oko 15% veća od nominalne struje, odnosno struje pri maksimalnoj snazi pri standardnim uslovima testiranja. Ovu struju FN panel bez problema trpi. Naime po standardu za testiranje FN paneli se testiraju sa 25% većom strujom od struje kratkog spoja, koju panel mora da izdrži minimum 3 sata. Ipak, proizvođači FN panela ne preporučuju kratko spajanje FN panela, naročito ne veći broj FN panela. Naime, poznato je da se električni luk koji nastaje prilikom razdvajanja kontakata kroz koji teče jednosmerna struja veoma teško prekida. Naročito je opasno razdvajanje konektora za međusobno spajanje FN panela, zbog pojave električnog luka, koji može povrediti rukovaoca. Tako se posebno obeležavaju prefabrikovani kablovi FN panela sa instalisanim konektorima, na kojima piše da je zabranjeno razdvajanje konektora FN panela pri opterećenju. I mehanički i elektronski sklopni uređaji imaju ograničenja, što se tiče prekidanja nivoa jednosmernog napona i struje. Sa porastom mogućnosti prekidanja jednosmernog naponskog nivoa raste i cena sklopki. Dakle, zbog tehničkih i ekonomskih razloga potrebno je prekidati struju kratkog spoja što manjeg broja FN panela. Šema rekonfiguracionog kola prikazana na slici 5.6 ispunjava sve zahteve što se tiče navedenih pravila koje je potrebno ispuniti tokom rekonfiguracije FN niza. Istovremeno smanjen je broj sklopnih jedinica u odnosu na RP-SRK. Način veze sklopki za kratko spajanje FN panela i algoritam rekonfiguracije, omogućavaju prekidanje malog jednosmernog napona, napona samo jednog FN panela. Prilikom rekonfiguracije po jedan FN panel se kratko spaja, na kratko vreme. Ovo kratko spajanje FN panela daje mogućnost za određivanje trenutka priključenja FN panela koji izlazi iz senke FN nizu.



Slika 5.5 – FN niz sa redno-paralelnim sklopno rekonfiguracionim kolom (RP-SRK)

Zbog izgleda načina povezivanja sklopnih jedinica na šemama, rekonfiguraciono kolo na slici 5.6 je dobilo naziv lepezasto sklopno rekonfiguraciono kolo (L-SRK).

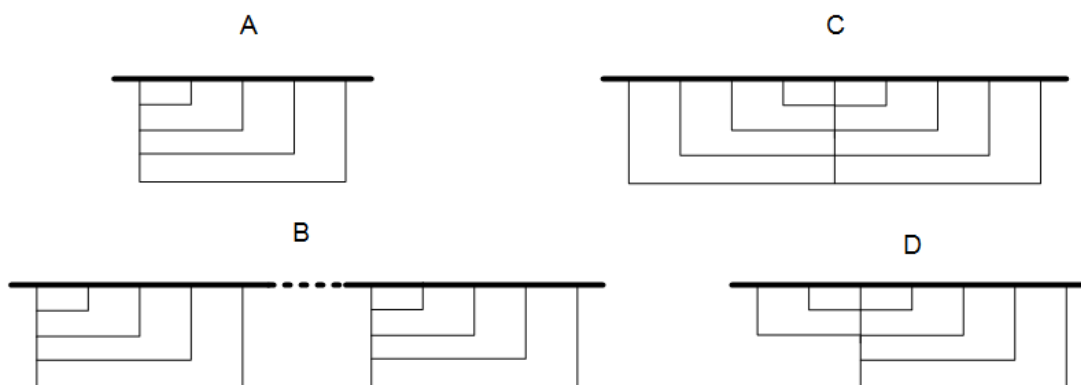
Na slici 5.6 gore se vidi pozicija sklopnih jedinica L-SRK sa FN panelima kada ne postoji senčenje. U slučaju senčenja pri izvođenju rekonfiguracije, odnosno spajanja i odspajanja FN panela, istovremeno su uključene dve sklopne jedinice. U mirnom stanju, kada se ne vrši promena broja FN panela u nizu, samo je jedna sklopna jedinica u funkciji. Jedna takva situacija je prikazana na slici 5.6 dole, gde su dva FN panela u senci (tamno obojeni pravougaonici) odspojena od FN niza



Slika 5.6 – Šema FN niza sa lepezastim sklopno rekonfiguracionim kolom (L-SRK)

zahvaljujući isključenoj SR i uključenoj S2 sklopki. Smanjivanje broja uključenih sklopki u mirnom stanju još je jedna prednost L-SRK u odnosu na RP-SRK.

Bilo je rečeno da je potrebna analiza položaja senke nad FN poljem, radi optimizacije rekonfiguracionog kola. Način pomeranja senke nad FN panelima određuje vrstu lepezasto sklopnog rekonfiguracionog kola. Slika 5.7 prikazuje mogućnosti integracije L-SRK u FN niz. Pozicija A na slici 5.7 je lepezasta struktura čija je detaljna šema predstavljena na slici 5.6. Ostale pozicije B, C i D su kombinacija pozicije A. Pozicija B predstavlja integraciju L-SRK u FN niz na dva mesta. Ova situacija se može javiti kada se FN niz senči na dva različita mesta, ili kada je senčenje na jednom mestu ali način montaže i povezivanje FN panela na konstrukciji zahteva poziciju B. Pozicija C je simetrična struktura, dok je pozicija D nesimetrična struktura L-SRK.



Slika 5.7 – Razne vrste L-SRK

5.3.1. Minimalni broj FN panela u FN nizu

Nešto ranije u tekstu je napomenuto da će biti razmotreni naponski nivoi FN niza i invertora. Spomenuti naponski nivoi direktno utiču na rekonfiguraciju, odnosno na minimalan broj FN panela u nizu. Slika 5.23 prikazuje opseg radnog napona invertora i FN niza. Karakteristični naponski nivoi invertora su:

U_{imin} – minimalni napon pri kome se inverter uključuje,

$U_{iTMSmin}$ – minimalni napon pri kome inverter još traži TMS,

$U_{iTMSmax}$ – maksimalni napon pri kome inverter još traži TMS,

U_{imax} – apsolutno maksimalni ulazni napon koji inverter trpi bez oštećenja.

Karakteristični naponski nivoi FN niza:

$U_{FNNmin}(T_{max})$ – minimalni napon FN niza pri maksimalnoj temperaturi panela,

$U_{FNNmax}(T_{min})$ – maksimalni napon FN niza pri minimalnoj temperaturi panela,

U_{FNPmin} – minimalni napon FN panela,

U_{FNPmax} – maksimalni napon FN panela,

Pored naponskih nivoa, na slici 5.8 se može videti kao jedan od činilaca proizvoda N_{minA} i N_{maxA} , koji su redom apsolutno minimalno mogući broj FN panela u FN nizu i apsolutno maksimalno mogući broj FN panela u FN nizu. Osnovno pravilo prilikom usaglašavanja naponskih nivoa invertora i FN niza je da pri bilo kojoj temperaturi okoline, odnosno FN panela bude ispunjen sledeći uslov

$$U_{imin} \leq U_{FNN}(T) \leq U_{imax} \quad (5.4)$$

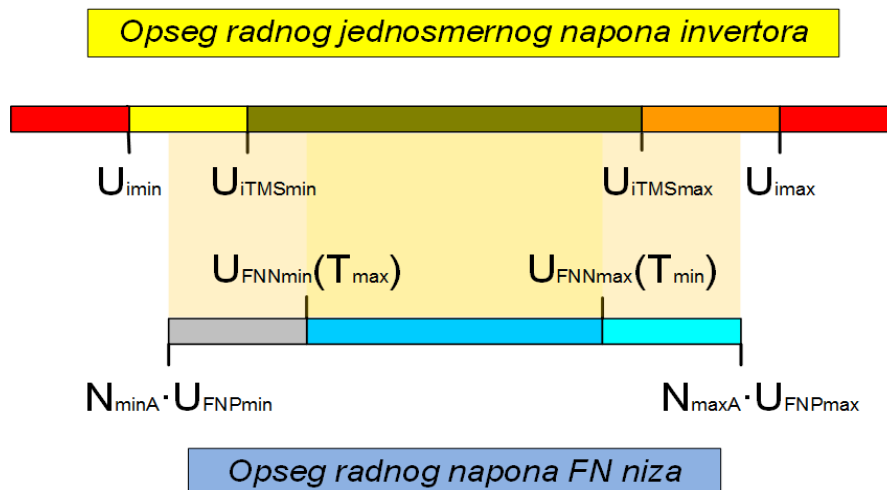
pri čemu je $U_{FNN}(T)$ napon FN niza pri radnoj temperaturi FN panela, T . Pošto je FN niz sačinjen od redne veze FN panela mora biti zadovoljen izraz

$$N_{minA} \cdot U_{FNP}(T) \geq U_{imin} \quad (5.5)$$

Izraz (5.5) nam govori da proizvod apsolutno minimalnog broja FN panela i napona FN panela pri najgorim temperaturnim uslovima nikad ne sme biti manji od minimalnog napona invertora. U suprotnom, inverter će prestati sa radom. Takođe mora biti ispunjen i sledeći uslov

$$N_{maxA} \cdot U_{FNP}(T) < U_{imax} \quad (5.6)$$

Uslov iz izraza (5.6) znači da proizvod apsolutno maksimalnog broja FN panela i napona FN panela pri najgorim temperaturnim uslovima nikad ne sme biti veći od maksimalnog ulaznog napona invertora. U suprotnom, ulazno kolo invertora će biti uništeno.



Slika 5.8 – Naponski nivoi invertora i FN niza

Najgori temperaturni uslovi FN panela su maksimalna i minimalna radna temperatura. Pri maksimalnoj radnoj temperaturi FN panela napon panela je minimalan i obrnuto, za minimalnu temperaturu FN panela napon panela je

maksimalan. Upravo ovi naponi pri datim temperaturama se koriste za određivanje apsolutno minimalnog i maksimalnog broja FN panela u nizu

$$U_{FNP}(T) = \begin{cases} U_{FNPmin} \text{ za } T_{max} \\ U_{FNPmax} \text{ za } T_{min} \end{cases} \quad (5.7)$$

Ispunjenje uslova iz izraza (5.4) obezbeđuje siguran rad invertora. Međutim, još je bolje da naponski nivo FN niza i pri minimalnoj i pri maksimalnoj temperaturi ne izlazi iz opsega napona invertora $U_{iTMSmin}$ i $U_{iTMSmax}$. Naime, između ovih naponskih nivoa inverter stalno nalazi tačku maksimalne snage FN niza. Da bi inverter nalazio TMS u svakom trenutku tokom rada, potrebno je ispuniti sledeće uslove

$$U_{FNNmin}(T_{max}) \geq U_{iTMSmin} \quad (5.8)$$

$$U_{FNNmax}(T_{min}) < U_{iTMSmax} \quad (5.9)$$

Ako se sa N obeleži broj instalisanih FN panela u nizu, tada se može definisati minimalni i maksimalni broj FN panela, tako da budu ispunjeni uslovi dati izrazima (5.8) i (5.9). Dakle broj panela u FN nizu je u granicama

$$N \in [N_{min}, N_{max}] \quad (5.10)$$

Koliki će biti stvaran broj FN panela u nizu zavisi od više faktora. Neki od njih su optimalni napon pri čemu je efikasnost invertora najveća, napon praznog hoda pojedinačnog FN panela, broj nezavisnih ulaza invertora, maksimalna ulazna snaga po nezavisnom ulazu i mogućnost razmeštanja FN panela na predviđenu površinu.

Polazeći od izraza (5.8), (5.9), (5.11) i (5.12), određuje se minimalni i maksimalni broj FN panela u nizu, koji je dat izrazima (5.13) i (5.14).

$$U_{FNNmin}(T_{max}) = N_{min} \cdot U_{FNPmin} \quad (5.11)$$

$$U_{FNNmax}(T_{min}) = N_{max} \cdot U_{FNPmax} \quad (5.12)$$

$$N_{min} \geq \frac{U_{iTMSmin}}{U_{FNPmin}} \quad (5.13)$$

$$N_{max} \geq \frac{U_{iTMSmax}}{U_{FNPmax}} \quad (5.14)$$

5.4. Mikrorekonfiguracija FN niza u elektrani FTN Novi Sad

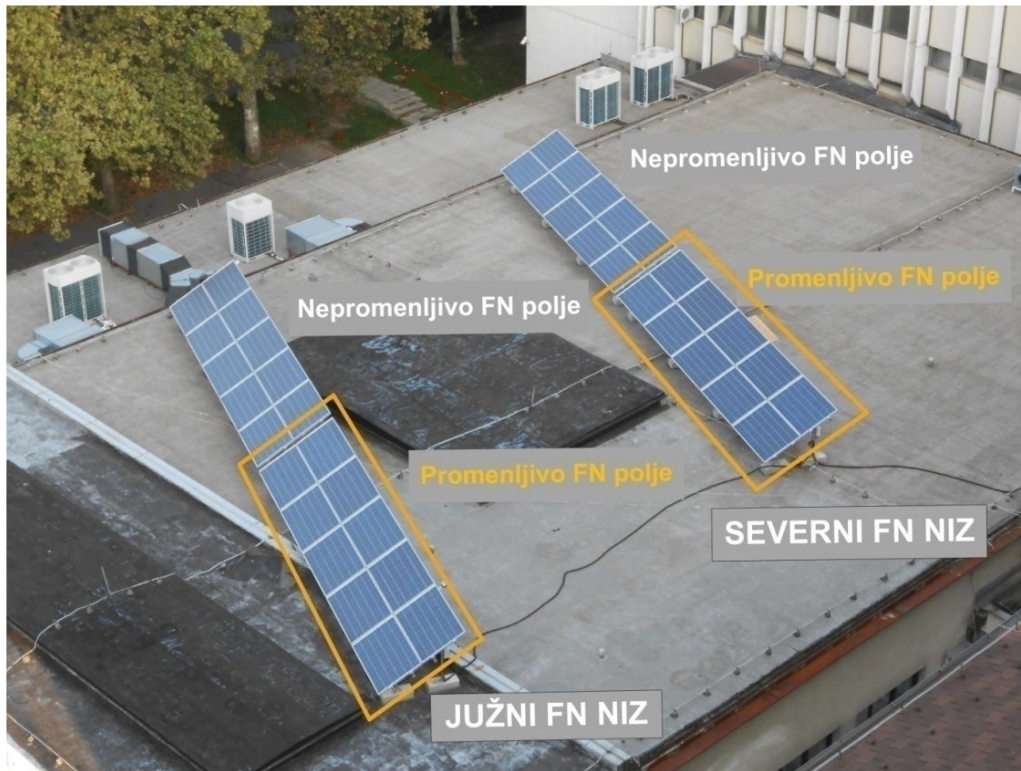
Poznate su različite metode mikrorekonfiguracije paralelno vezanih FN stringova, radi smanjenja uticaja senčenja. Veoma malo se istražuje mikrorekonfiguracija nad jednim FN nizom, ponajviše zbog jednostavnosti i relativno

malih snaga, koja se mogu ostvariti ovim načinom vezivanja FN panela. Ipak, na krov porodično-stambenog objekta se u proseku može postaviti snaga od 5 do 10kWp FN panela, što odgovara snazi jedno do dva FN niza. Ako se zna da u Evropi oko 30% instalacija čine upravo FN elektrane pomenute snage, onda ima smisla istraživanja usmeriti u pravcu rekonfiguracije FN nizova. Kao što je već spomenuto, istražujući uticaj senčenja na jedan string kod invertora u samostalnom FN sistemu, a na osnovu dobijenih rezultata i zapažanja, došlo se na ideju da se istraži mogućnost povećanja proizvodnje trofaznog invertora u elektrani FTN Novi Sad.

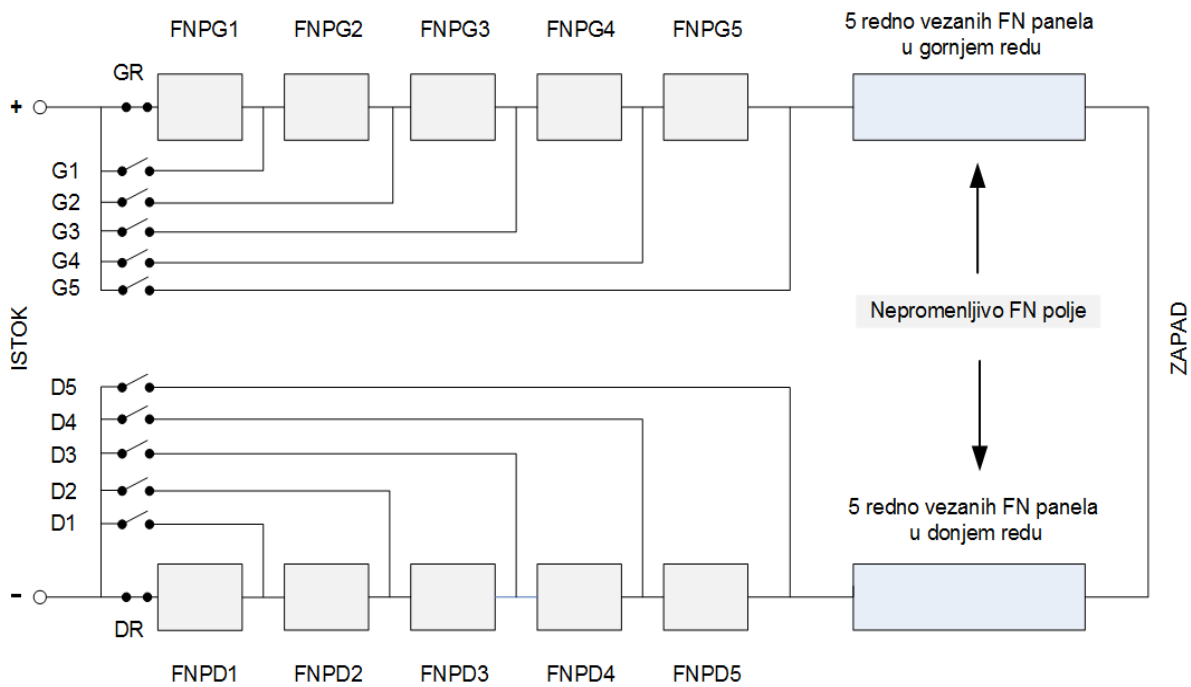
5.4.1. Mikrorekonfiguraciono kolo FN niza

Posle opisa dve varijante mikrorekonfiguracionog kola FN niza (slika 5.5 i 5.6), nadalje se razmatra rekonfiguraciono kolo koje se koristilo u elektrani na FTN. U četvrtom poglavlju ovog rada je data blok šema FN elektrane (slika 4.10). Vidi se da su na inverter vezana dva FN niza, stringa, koja sadrže po 20 FN panela. Izgled FN niza sa pozicijom na krovu su prikazani na slici 5.9. Kao što se sa slike vidi, dva FN niza se nalaze jedno iza drugog, obeleženi sa JUŽNI FN NIZ i SEVERNI FN NIZ, i usmereni su prema jugu. Njihovo međusobno rastojanje je dovoljno veliko, tako da međusobno senčenje FN panela ne postoji. Na slici su takođe označeni delovi FN niza nad kojima se ne vrši rekonfiguracija (nepromenljivo FN polje) i koji se rekombinuju (promenljivo FN polje). Kako u južnom tako i u severnom FN nizu, nepromenljivo i promenljivo polje sadrže isti broj FN panela, po 10 komada. Fizički raspored obeleženih FN panela na rekombinacionoj šemi sa slike 5.9 je dat u osmom poglavlju, prilozi. Na slikama 8.5 i 8.6 priloga vidi se da su FN paneli na konstrukciji postavljeni u dva reda. Gornji FN paneli na konstrukciji su obeleženi sa FNPG, dok su donji paneli obeleženi sa FNPD. Gledano sa juga na konstrukciju, FN paneli montirani krajnje levo su obeleženi brojem 1. Ovi FN paneli poslednji izlaze iz senke u oba FN niza (FNPG1, FNPD1) i zbog toga se oni zadnji priključuju na FN niz tokom izvođenja rekonfiguracije. Inače, na početku rekonfiguracije FN paneli označeni brojem 5 se prvi priključuju na FN niz (FNPG5, FNPD5).

Šema rekonfiguracionog kola jednog FN niza je prikazana na slici 5.10. Način povezivanja FN niza sa sklopnim jedinicama je L-SRK, sa pozicijom B sa slike 5.7. Ova vrsta rekonfiguracionog kola je najpogodnija za konkretnu situaciju zbog prirode povlačenja senke sa FN panela (od zapada ka istoku), načina montaže FN panela na konstrukciju (horizontalni u dva reda) i načina međusobnog povezivanja FN panela sa kablovima (smanjenje uticaja prenapona usled udara groma). Rekonfiguraciono kolo oba postojeća FN niza je identično. Pozicija FN panela na šemi se podudara sa položajem FN panela na konstrukciji.



Slika 5.9 – Položaj FN nizova na krovu



Slika 5.10 – Šema rekonfiguracionog kola jednog FN niza

Tako, na konstrukciju postavljeni FN paneli u gornjem redu su na šemi obeleženi redom sa FNPG1, FNPG2 sve do FNPG5, dok su FN paneli u donjem redu na šemi obeleženi sa FNPD1, FNPD2 sve do FNPD5. Slika 5.10 prikazuje položaj sklopnih

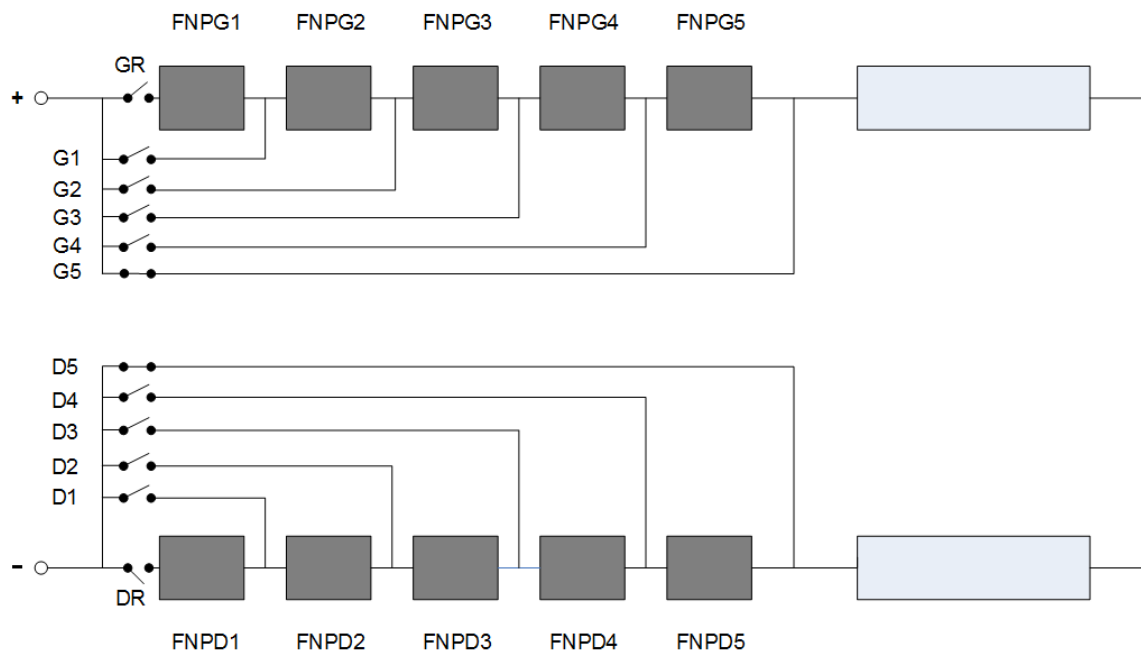
naprava kada su svi FN paneli osunčani. Na slici su pojedinačno prikazani samo oni FN paneli koji se rekonfiguriraju. FN paneli koji se ne rekonfiguriraju, njih 10 ukupno u jednom FN nizu, na slici su prikazani kao pravougaonici.

Broj panela koji učestvuju u rekonfiguraciji je određen na osnovu minimalno mogućeg broja FN panela u nizu. Za instalisane FN panele i odabrani inverter minimalan broj FN panela u nizu je 10. Pošto oba FN niza sačinjavaju po 20 FN panela rekonfiguriraju se po 10 FN panela u nizu. Broj FN panela koji učestvuju u rekonfiguraciji određuju ukupan broj sklopnih jedinica. Na taj način rekonfiguracija jednog FN niza se ostvaruje sa ukupno 12 sklopnih jedinica, po šest sklopnih komponenti za 5 gornjih i 5 donjih FN panela. Sklopne jedinice su obeležene sa GR, G1, G2, ..., G5 za gornji red FN panela i DR, D1, D2, ..., D5 za donji red FN panela. GR i DR sklopne jedinice su nazvane rednom sklopkom, dok se sve ostale naznačene na slici 5.28 nazivaju paralelnom sklopkom. Konfiguracija prikazana na slici 5.10 obezbeđuje priključenje svih 20 FN panela na inverter. Po algoritmu rekonfiguracije redne sklopke se isključuju tek nakon uključenja bar jedne paralelne sklopke. Na ovaj način se obezbeđuje bezprekidno priključenje FN niza na inverter.

Slika 5.11 prikazuje šemu kola rekonfiguracije sa stanjima sklopki pre početka rekonfiguracije. Ova situacija važi za oba FN niza, gde su pojedinačni FN paneli predstavljeni tamnijim pravougaonikom zbog toga što su pre početka rekonfiguracije u senci. Dva pravougaonika svetlije obojena predstavljaju 10 FN panela koji su priključeni na inverter i pošto su svi izašli iz senke inverter nalazi jednu postojeću tačku maksimalne snage koja je obeležena u ovom radu sa TMS. Ova snaga je srazmerna sa trenutnim zračenjem koje dospe na površinu FN panela i istovremeno zavisi od trenutne temperature FN panela. Kao što je rečeno, po 5 FN panela u gornjem i donjem redu, koji inače učestvuju u rekonfiguraciji, nalaze se u senci. Kako se senka povlači od panela označenih sa 5 ka panelima označenim sa 1, tako se priključuju FN paneli na niz. Priključenje panela se obavlja sa desna na levo, ako se posmatra slika 5.11, odnosno sa zapada ka istoku, ako se posmatra fizički razmeštaj na konstrukciji. Redosled priključenja je FNPG5, FNPG4, FNPG3, FNPG2 i FNPG1 za gornji red. Isti redosled priključenja važi i za donji red FN panela.

Kako se vrši rekonfiguracija? Mikrorekonfiguracija započinje tokom izlaska FN panela pod rednim brojem 5 iz senke. U zavisnosti od pozicije senke nad panelima, priključenje FN panela 5, bilo gornjeg ili donjeg, može se vršiti istovremeno ili jedan za drugim. Prvi korak je uključenje odgovarajuće sklopke označene brojem 4. Pošto je istovremeno uključena i sklopka 5, FN panel 5 je kratko spojen. Ovo stanje traje veoma kratko, nakon čega se sklopka 5 isključuje. Na ovaj način je FN panel 5 priključen na FN niz, pri čemu su svi paneli u nizu osunčani. Na opisan način se vrši priključenje svih preostalih FN panela, s tim da se na kraju rekonfiguracije zadnja

uključuje redna sklopka, GR i/ili DR. Svaki FN panel se priključuje na niz tokom izlaska panela iz senke.



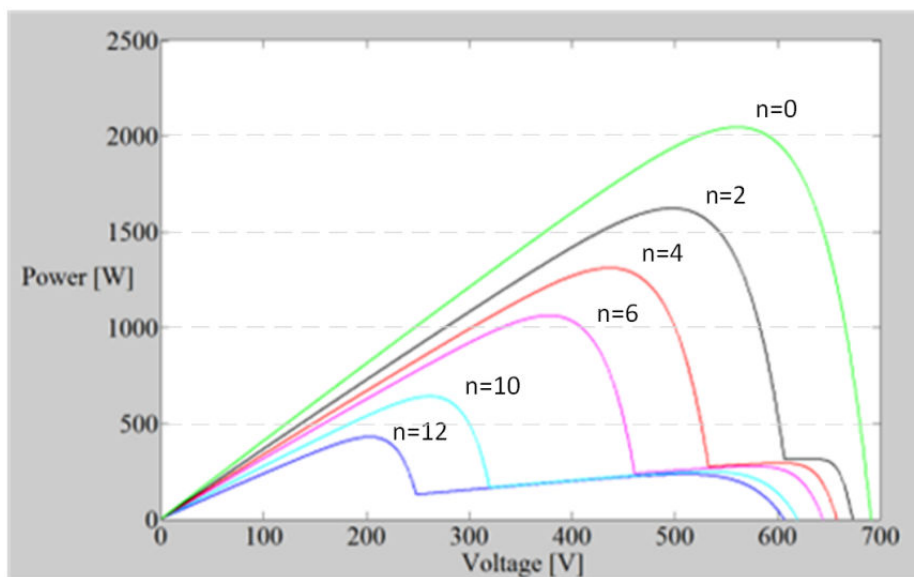
Slika 5.11 – Situacija neposredno pre početka mikrorekonfiguracije

5.4.2. Simulacioni rezultati ponašanja FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja

U trećem poglavlju su date jednačine, na osnovu kojih je razvijen model FN panela, odnosno FN niza. Detaljno su opisani pojedini elementi, koji omogućavaju simulaciju FN niza sa i bez rekonfiguracije, koja se podudara sa hardverskim načinom rekonfiguracije. Nadalje se prikazuju rezultati simulacije u Matlab-Simulink okruženju.

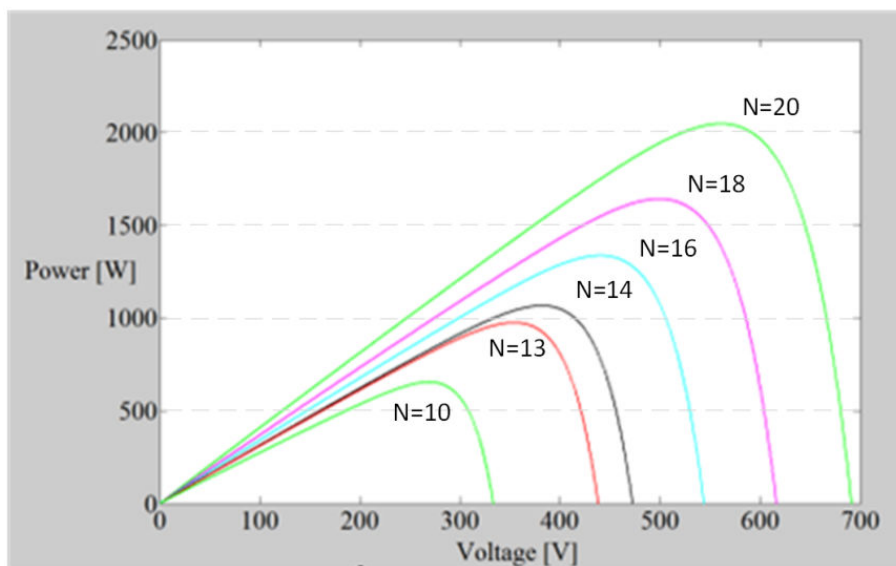
Prvo se prikazuju dobijeni rezultati bez rekonfiguracije, kada FN niz čini svih 20 FN panela, koji postepeno izlaze iz senke. Na slici 5.12 je prikazana P-U karakteristika senčenog niza sa 20 FN panela, pri čemu se krive odnose na $n=0, 2, 4, 6, 10, 12$ senčenih panela u nizu. Dakle $n=0$ znači da su svi paneli osunčani pa odgovarajuća kriva sa slike 5.12 ima samo jednu tačku maksimalne snage. Kao što se očekuje na osnovu senčenja FN niza, na ostalim krivima postoje dva maksimuma snage, V-TMS i N-TMS. Jako je bitno uočiti da, što je veći broj senčenih panela V-TMS i N-TMS su sve udaljeniji, ako se posmatraju naponi u spomenutim tačkama maksimalne snage. Ovo je od presudnog značaja za ponašanje invertora, koji se uključuje kada su FN paneli u senci, nakon čega FN paneli postepeno izlaze iz senke. Više tačke maksimuma V-TMS u zavisnosti od broja senčenih panela pokrivaju znatno

širi opseg snage u odnosu na M-TMS, gde je promena snage u funkciji senčenih panela veoma mala.



Slika 5.12 – P-U karakteristike FN niza sa različitim brojem senčenih FN panela

Na slici 5.13 je prikazana P-U karakteristika rekonfigurisanih FN nizova bez senke. Krive su prikazne za $N=10, 13, 14, 16, 18$ i 20 FN panela u stringu, pri čemu su svi paneli osunčani. Zbog toga na svim prikazanim karakteristikama postoji samo jedna tačka maksimalne snage (TMS). Za razliku od krivi sa senčenjem FN niza, naponi praznog hoda FN nizova bez senke pokrivaju znatno širi naponski opseg. Pošto inverter poseduje softverski upravljani DC/DC pretvarač za nalaženje tačke maksimalne snage u svakom trenutku, bez obzira na ambijentalne uslove, od značaja za analizu su pri rekonfigurisanju TMS, a bez rekonfigurisanja V-TMS i N-TMS.



Slika 5.13 – P-U karakteristike FN niza sa različitim brojem FN panela u nizu sa MRK

Vrednosti ovih tačka, koji su dobijeni simulacijom, biće prikazani u poglavlju posle upoznavanja sa rezultatima merenja na FN nizu u elektrani fakulteta. Merenje karakteristika FN niza bez rekonfigurisanja i sa rekonfiguracijom su vršena na jedan jedini mogući način, kada su FN nizovi odspojeni od invertora.

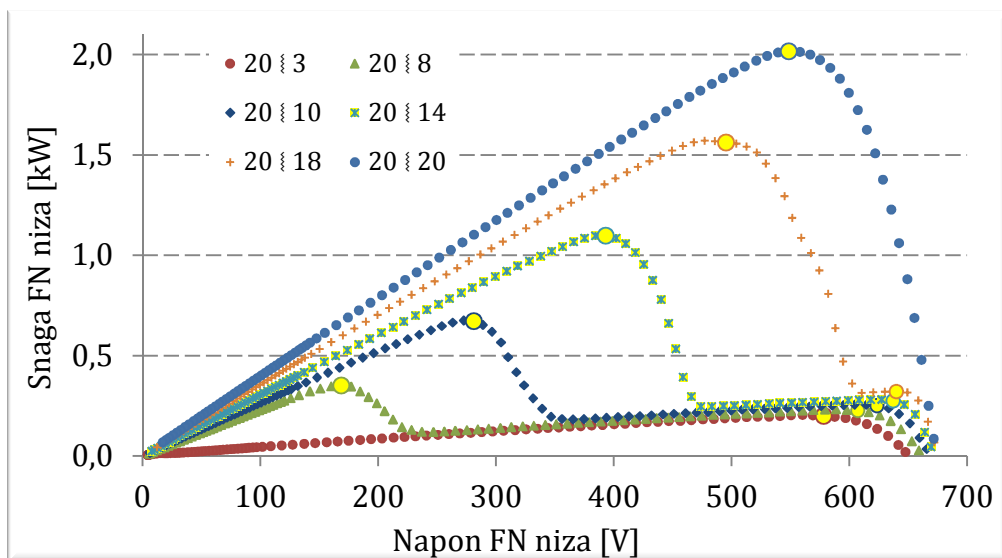
5.4.3. Eksperimentalni rezultati ponašanja FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja

Karakteristike FN niza su merene sa profesionalnim uređajem naziva Solar I-V. Osnovne informacije o ovom uređaju su date u prilogu. Merenje karakteristike FN niza su vršena u paru, prvo bez rekonfigurisanog FN niza, a odmah zatim sa rekonfigurisanim FN nizom. Ovo znači da je u najkraćem mogućem vremenskom intervalu prvo merena karakteristika PV stringa sa 20 panela, pri čemu je n panela u senci (FN niz bez rekonfiguracije). Odmah nakon izvršenog merenja izvršena je rekonfiguracija FN niza i merena je karakteristika PV stringa sa $20-n$ panela, pri čemu su svi osunčani. Razlog ovakvog načina merenja je taj da ambijentalni uslovi budu što približniji za jedan par merenja.

U jutarnjim satima, dok FN niz izlazi iz senke, na slici 5.14 prikazan je izgled P-U karakteristike za FN niz sa 20 panela. Grafici su dobijeni spomenutim merenjem FN niza. Prikazano je šest merenih situacija:

- od 20 FN panela osunčana 3 panela (17 u senci), na crtežu označeno sa 20:3,
- od 20 FN panela osunčano 8 panela (u senci 12), na crtežu označeno sa 20:8,
- od 20 FN panela osunčano 10 panela (u senci 10), na crtežu označeno sa 20:10,
- od 20 FN panela osunčano 14 panela (u senci 6), na crtežu označeno sa 20:14,
- od 20 FN panela osunčano 18 panela (u senci 2), na crtežu označeno sa 20:18,
- svih 20 FN panela je osunčano (u senci 0 panela), na crtežu označeno sa 20:20,

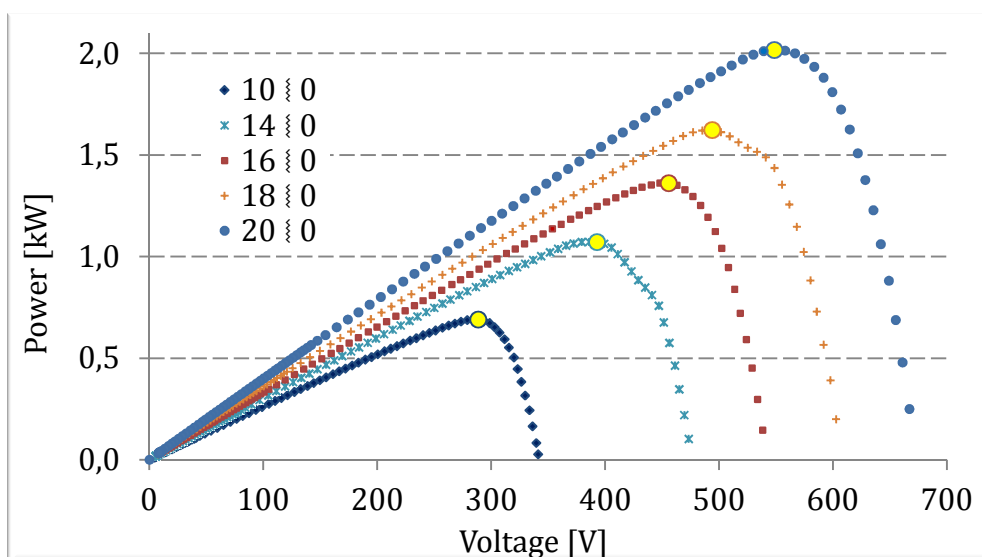
Na svakoj karakteristici su obeleženi maksimumi, V-TMS i M-TMS. Razlika u snazi između pojedinih V-TMS je znatno veći nego između M-TMS. Oblici karakteristika FN niza dobijeni merenjem se poklapaju sa dobijenim simulacionim rezultatima FN niza. Upoređujući rezultate simulacije i merenja sa ponašanjem invertora u jutarnjim satima, nameće se zaključak da invertor sve do izlaska FN niza iz senke prati M-TMS FN niza u senci.



Slika 5.14 – Promena P-U karakteristike FN niza u elektrani tokom izlaska niza iz senke

Jedan od rezultata početnih istraživanja mikrorekonfiguracije kod samostalnog FN sistema je da je snaga FN niza bez senke i sa manjim brojem panela veća od snage FN niza koji je delimično pod senkom, pri čemu ima veći broj panela. Imajući ovaj rezultat u vidu, postavlja se pitanje da li se sa rekonfiguracijom FN niza elektrane FTN Novi Sad može postići povećanje snage FN niza u jutarnjim satima? Da bi se dao odgovor na postavljeno pitanje, paralelno je merena karakteristika FN niza odspojenog od invertora sa rekonfiguracijom.

P-U karakteristike rekonfigurisanog niza sa obeleženim maksimumima snage TMS se vide na slici 5.15. Prikazane su karakteristike FN niza sa 10, 14, 16, 18 i 20 FN panela u stringu, pri čemu za sve situacije važi da su svi osunčani.



Slika 5.15 – P-U karakteristike rekonfigurisanog FN niza sa različitim brojem panela u nizu

Pošto nema senčenih panela na svim karakteristikama postoji samo jedna tačka maksimalne snage. Oznake na slici od 10:0 pa do 20:0 redom znače da u nizu ima 10 odnosno 20 FN panela, pri čemu 0 obeležava da u nizu nema senčenih panela.

Kako se senka povlačila sa FN niza tako je vršena rekonfiguracija i merenje, odnosno spajani su FN paneli koji su izlazili iz senke na niz. Pošto su za ovo istraživanje važne tačke maksimuma karakteristike FN niza, nadalje će se tabelarno prikazati dobijeni rezultati merenja maksimuma (TMS, V-TMS i M-TMS).

U tabela 5.1 se mogu naći osnovni podaci o FN nizu pri izvođenju rekonfiguracije i vrednost maksimalnih snaga, bitnih za dalje analize. Simbol u tabeli “○” označava broj osunčanih panela, a nasuprot tome, simbol “●” označava broj senčenih FN panela u nizu. Pored ukupnog broja FN panela, senčenih i nesenčenih panela, u tabeli su prikazane vrednosti maksimalne snage niza (TMS), struja i napon pri maksimalnoj snazi, kao i ambijentalni uslovi koji su vladali prilikom merenja, solarno zračenje i temperatura FN niza. U tabeli 5.2 su prikazane najbitnije brojne vrednosti za slučaj merenja karakteristike FN niza bez rekonfiguracije, čiji se grafici vide na slici 5.14. Pošto se u ovom slučaju u FN nizu nalaze i senčeni paneli, postoje dva maksimuma snage. Oba maksimuma, V-TMS i M-TMS, su prikazani u tabeli. Podaci za napon i struju su dati za M-TMS. U tabeli nije prikazano, međutim treba istaći da se tokom izvođenja merenja zračenje senčenih panela kretalo u granicama od 50W/m² do 70W/m². Temperatura FN panela u senci je na početku merenja iznosila 18°C, dok se na kraju merenja povećala za 2°C i dostigla je vrednost od 20°C. Kod prvog merenja temperatura osunčanog FN panela je iznosila 29,4°C i dostigla je vrednost od 40,4°C kod poslednjeg merenja. Minimalno zračenje osunčanog FN panela je bilo 285W/m², dok je maksimalno dostignuto zračenje na kraju merenja iznosilo 480W/m².

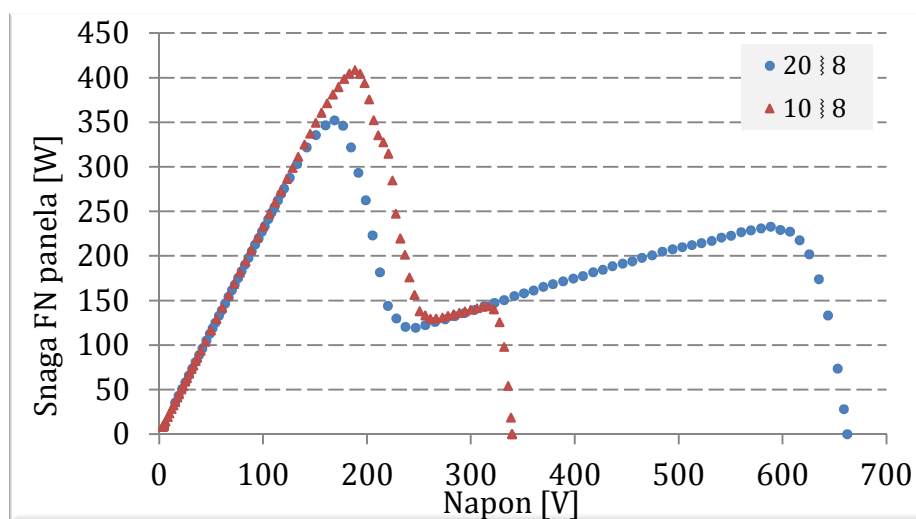
Tabela 5.1 – Osnovni podaci o FN nizu pri rekonfiguraciji (FN niz bez senčenja)

PROMENLJIV BROJ FN PANELA U NIZU ZBOG REKONFIGURACIJE							
Br. FNP u nizu	○	●	TMS [W]	U [V]	I [mA]	G [W/m²]	T [°C]
10	10	0	690,8	283,9	2433	325	32,4
13	13	0	986,7	359,2	2747	366	35,2
14	14	0	1071,9	386,0	2777	371	35,8
16	16	0	1360,7	448,2	3036	402	37,2
18	18	0	1621,6	494,0	3283	434	38,8
20	20	0	2016,1	548,6	3675	480	40,4

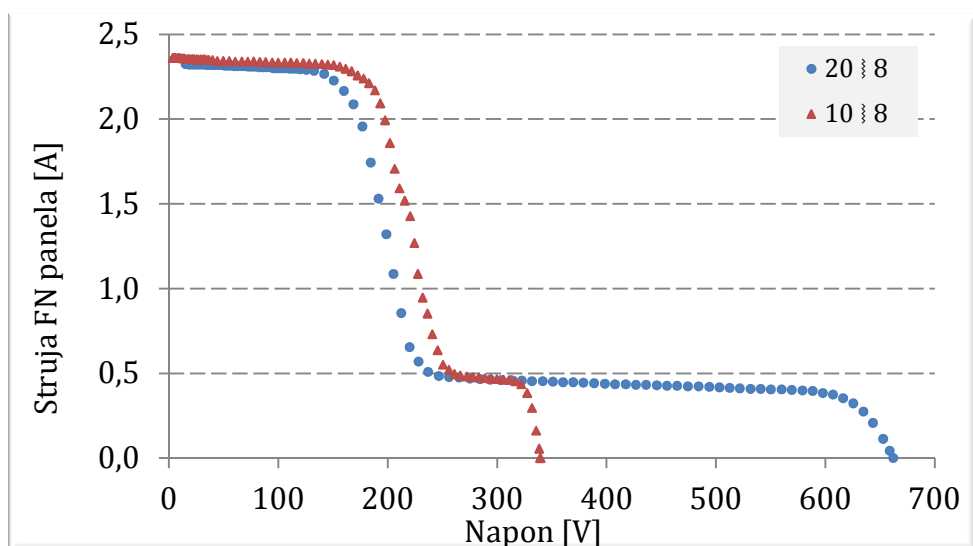
Tabela 5.2 – Osnovni podaci o FN nizu bez rekonfiguracije (FN niz sa senčenjem)

KONSTANTAN BROJ FN PANELA U NIZU SA DELIMIČNIM SENČENJEM								
Br. FNP u nizu			V-TMS [W]	M-TMS [W]	U_M [V]	I_M [mA]	G [W/m²]	T [°C]
20	8	12	352	233	588,4	395	285	29,4
20	10	10	675	256	604,3	423	328	32,7
20	13,5	6,5	927	276	616,9	447	361	34,9
20	14	6	1098	281	627,2	447	374	35,9
20	16	4	1297	295	628,9	468	398	36,8
20	18	2	1570	321	639,8	502	431	38,6
20	20	0	2016	2016	548,6	3675	480	40,4

Na slikama 5.16, 5.17, 5.18 i 5.19 prikazane su U-I i P-U karakteristike FN niza. Na istoj slici se vide karakteristike za slučaj sa rekombinacijom i bez nje. P-U karakteristike na slici 5.16 i I-U karakteristike na slici 5.17 prikazuju dve različite situacije FN niza: slučaj bez rekonfiguracije sa 20 FN panela u nizu, pri čemu je potpuno osunčano 8 panela (20:8), što znači 12 panela u senci i slučaj sa rekonfiguracijom ali sa senčenjem, kada u nizu ima 10 FN panela, pri čemu je 8 panela ozračeno (2 su u senci). Dakle u oba slučaja je isti broj osunčanih FN panela, ali zbog različitog ukupnog broja panela u nizu, broj senčenih panela je različit. Kada je manji broj panela u nizu (10:8) V-TMS je veći u odnosu na slučaj sa većim brojem FN panela (20:8). Ipak, ovo ne znači da će invertor naći V-TMS, zbog malog napona FN niza u ovoj tački maksimalne snage. Nešto kasnije će biti razmotren minimalni broj FN panela u nizu koji trpi invertor, a sve u vezi minimalnog ulaznog napona u invertor, koji obezbeđuje uključivanje invertora, odnosno rad u opsegu gde radi algoritam nalaženja tačke maksimalne snage.

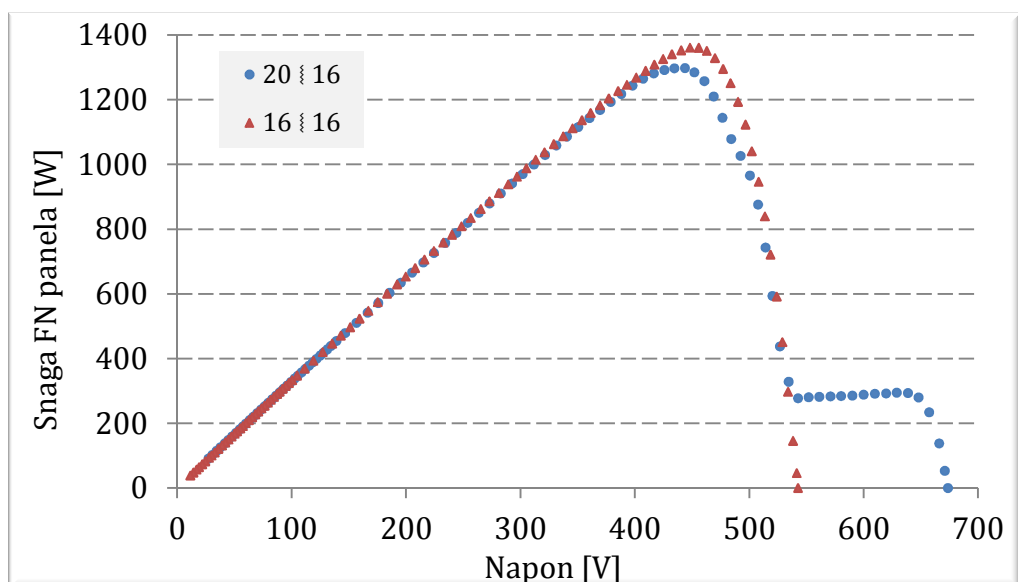


Slika 5.16 – P-U karakteristika FN niza bez rekonfiguracije (20:8) i sa rekonfiguracijom (10:8)

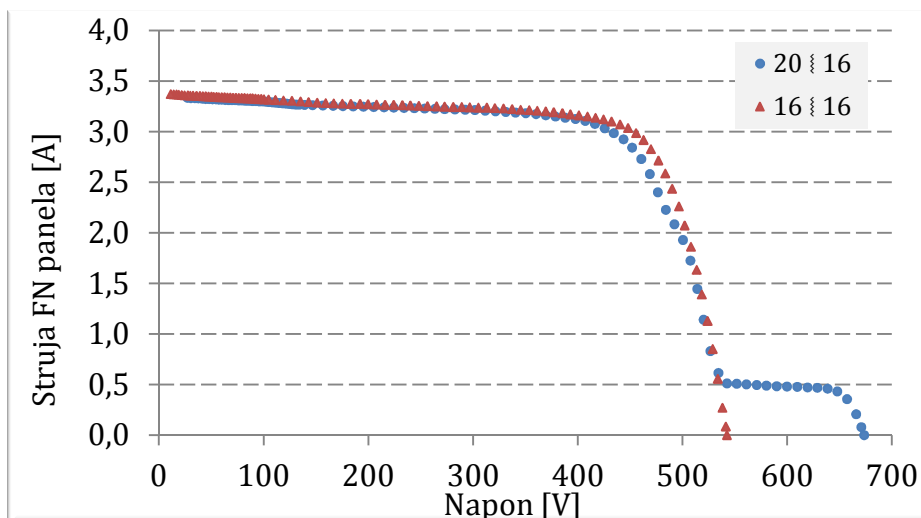


Slika 5.17 – I-U kk FN niza bez rekonfiguracije (20:8) i sa rekonfiguracijom (10:8)

Izgled karakteristike FN niza za 16 osunčanih FN panela, sa i bez rekonfiguracije, vidi se na slikama 5.18 i 5.19. Upoređujući P-U karakteristiku (slika 5.18) FN niza bez rekonfiguracije, niz sa 20 panela od čega je 16 osunčano (20:16) i sa rekonfiguracijom, niz sa 16 panela pri čemu su svi osunčani (16:16), vidi se da je V-TMS FN niza sa 20 panela nešto veća od TMS za FN niz sa 16 panela. Međutim, pošto u jutarnjim satima inverter nalazi M-TMS senčenog niza, maksimum snage rekonfigurisanog niza (TMS) je znatno veći od nerekonfigurisanog. Slika 5.19 prikazuje promenu struje FN stringa u zavisnosti od napona za prethodno opisanu situaciju.



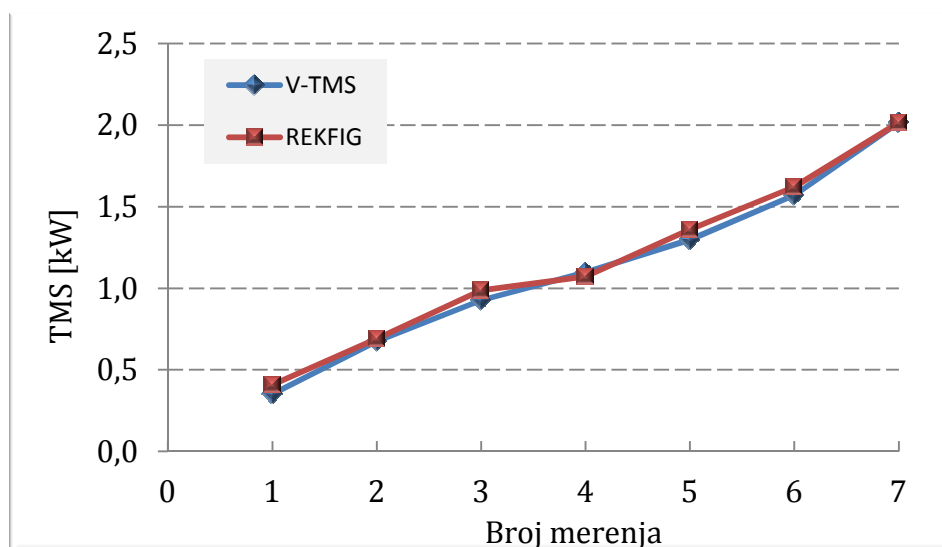
Slika 5.18 – P-U kk FN niza bez rekonfiguracije (20:16) i sa rekonfiguracijom (16:16)



Slika 5.19 – I-U kk FN niza bez rekonfiguracije (20÷16) i sa rekonfiguracijom (16÷16)

S obzirom da u svakom trenutku inverter na P-U karakteristici nalazi neku od tačaka maksimalne snage, nadalje će biti razmotrene ove tačke maksimuma za ispitivane slučajeve koji su prikazane u tabelama 5.1 i 5.2. Još jednom treba napomenuti da FN niz sa senkom ima dve tačke maksimuma obeleženi sa V-TMS i M-TMS, dok FN niz bez senke poseduje samo jedan maksimum, obeležen sa TMS.

Kada se merene tačke maksimuma slože redom po vremenu izvođenja, dobija se kriva koja predstavlja kretanje tačke maksimalne snage koju inverter nalazi. Slika 5.20 prikazuje kretanje TMS FN niza za slučaj rekonfiguracije (na slici grafik obeležen sa REKFIG) i V-TMS FN niza za slučaj bez rekonfiguracije. Za svaki prikazani par tačaka maksimalne snage važi da je broj osunčanih panela u nizu isti, bez obzira da li se radi o rekonfiguraciji ili ne. Prema dobijenim merenjima vidi se neznata razlika između prikazanih tačaka maksimalne snage FN niza.

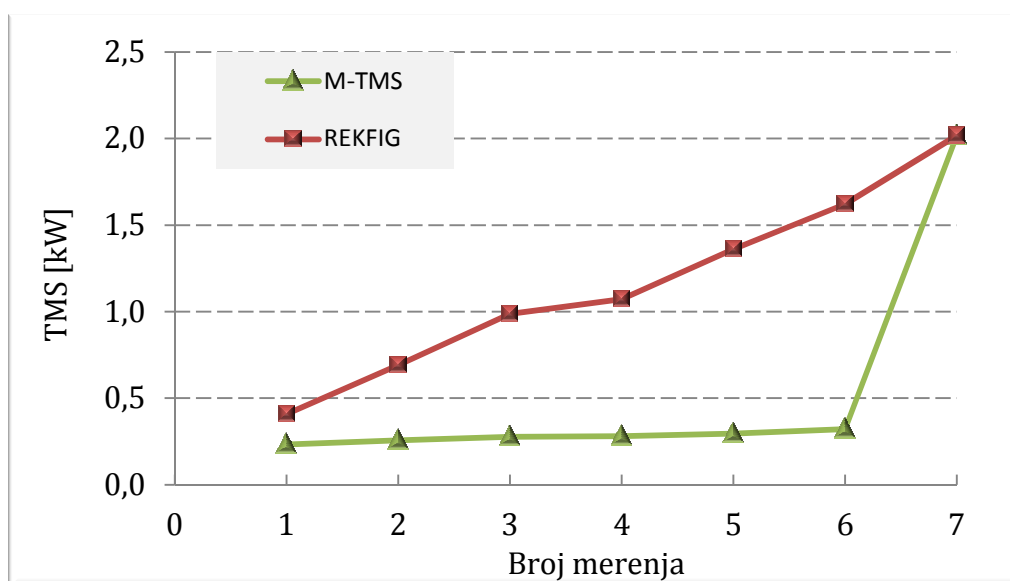


Slika 5.20 – TMS rekonfigurisanog i V-TMS nerekonfigurisanog FN niza

Dakle, može se zaključiti da kada bi inverter nalazio V-TMS senčenog FN niza ne bi imalo smisla vršiti rekonfiguraciju. Međutim, kao što je objašnjeno na početku poglavlja i prikazano na slici 5.1, invertro nije sposoban da nađe V-TMS, nego nalazi M-TMS.

Slučaj koji je prikazan na slici 5.21 prikazuje kretanje TMS FN niza za slučaj rekonfiguracije i M-TMS FN niza za slučaj bez rekonfiguracije. Upoređujući kretanje izlazne snage invertora sa kretanjem tačaka maksimuma FN niza u senci sa slike 5.21, vidi se da inverter do izlaska iz senke prati M-TMS FN niza.

Trajektorija kretanja TMS za slučaj rekonfiguracije sa slike 5.21 je ista kao trajektorija TMS sa slike 5.20. Kao i u prethodnom slučaju, za svaki prikazani par tačaka maksimalne snage važi da je broj osunčanih panela u nizu isti, bez obzira da li se radi o rekonfiguraciji ili ne. Na slici 5.21 se vidi znatna razlika u trajektorijama TMS (na slici obeležene sa REKFIG) i M-TMS, koje predstavljaju maksimume snaga FN niza. Znajući ponašanje invertora u jutarnjim satima i na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja FN niza, nameće se zaključak da rekonfiguracija FN niza može doprineti povećanju proizvodnje električne energije FN elektrane. Ova pretpostavka, tvrdnja će biti potvrđena merenjima na ulaznoj i izlaznoj strani invertora, kada su FN nizovi priključeni na inverter.

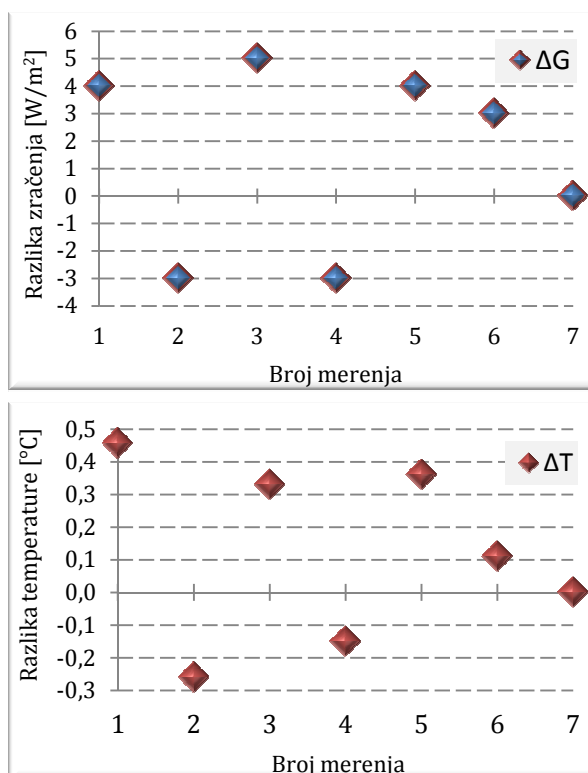


Slika 5.21 – TMS rekonfigurisanog i M-TMS nerekonfigurisanog FN niza

Merenje karakteristike FN niza sa i bez rekonfiguracije, pri čemu je u oba slučaja isti broj osunčanih panela u FN nizu, obavljeno je jedno za drugim. Bez obzira na malu vremensku razliku između dva merenja ambijentalni uslovi su se ipak malo promenili. Pod ambijentalnim uslovima se misli na solarno zračenje i temperaturu FN panela. Slika 5.22 prikazuje razliku u zračenju i temperaturi prilikom merenja bez i sa

rekonfiguracijom. Nadalje se razmatra uticaj ambijentalnih uslova na TMS dobijen rekonfiguracijom i M-TMS bez rekonfiguracije.

Temperatura i zračenje se nisu bitno menjali u intervalu merenja jednog para. Po apsolutnoj vrednosti najveće odstupanje temperature je bilo 0,45 °C, što znači promenu snage od svega 0,2%. Zračenje je odstupalo 5W/m² (promena snage je 1,4%). Najveći kombinovan uticaj promene zračenja i temperature je kod trećeg merenja. Ukupna promena snage iznosi 1,54%. Ovo znači da se u senčenom nizu merena snaga M-TMS od 276W povećava na 280W, ako se izvrši korekcija snage usled razlike ambijentalnih uslova. Obe M-TMS, izmerena i sa korekcijom, su značajno manje od TMS sa rekonfiguracijom, koja za treće merenje iznosi 987W. Ove vrednosti tačaka maksimalne snage su bitne za upoređivanje, jer bez rekonfiguracije niza inverter nalazi M-TMS, a sa rekonfiguracijom niza TMS. Na osnovu razmotrenog najgoreg slučaja zaključuje se, da ambijentalne razlike pri izvršenim merenjima praktično nemaju nikakav uticaj na dobijene rezultate.



Slika 5.22 – Razlike u ambijentalnim uslovima pri merenju rekonfigurisanog i nerekonfigurisanog FN niza

5.4.4. Uporedna analiza simulacionih i izmerenih vrednosti FN niza sa i bez mikrorekonfiguracije u uslovima delimičnog senčenja

Naredne dve tabele, 5.3 i 5.4 redom sadrže podatke o snazi FN niza pri V-TMS i M-TMS za slučaj bez rekonfiguracije i TMS za slučaj sa rekonfiguracijom. Upoređuju

se vrednosti maksimalne snage dobijene simulacijom i merenjem. U obe tabele, u prve dve kolone se nalaze vrednosti ambijentalnih uslova; zračenje i temperatura FN panela na suncu.

Tabela 5.3 sadrži podatke o V-TMS i M-TMS za slučaj kada senčen FN niz sadrži 20 FN panela. U trećoj koloni tabele je prikazan broj panela na suncu / u senci, tokom izvođenja simulacije, odnosno merenja. Relativna razlika snaga merenih i simuliranih vrednosti se kreću u granicama +5,1% do -3,3%.

Tabela 5.3 – Vrednosti tačaka maksimalne snage FN niza bez rekonfiguracije

G [W/m ²]	T [°C]	Broj FN panela ○ / ●	V-TMS [W]		$\Delta P / P$ [%]	M-TMS [W]		$\Delta P / P$ [%]
			Simul.	Mer.		Simul.	Mer.	
328	32,7	10 / 10	641	675	5,1	247	256	3,6
374	35,9	14 / 6	1062	1098	3,3	275	280	1,7
398	36,8	16 / 4	1311	1297	-1,1	292	295	0,8
431	38,6	18 / 2	1622	1570	-3,3	313	321	2,5
480	40,4	20 / 0	2046	2016	-1,5	2046	2016	-1,5

Tabela 5.4 sadrži podatke o TMS za slučaj kada se vrši rekonfiguracija. FN niz sadrži različit broj panela, pri čemu su svi FN paneli osunčani. U trećoj koloni je prikazan broj panela u FN nizu. Relativna razlika snage između merenih i simuliranih vrednosti za rekonfiguraciju je u granicama +5,5% i -1,5%.

Treba napomenuti da je tolerancija snage FN panela prema proizvođačkoj specifikaciji $\pm 3\%$, u trenutku merenja FN paneli su stari tri godine, merenja su vršena u jutarnjim satima kada je zračenje manje od preporučenog za merni uređaj i nesigurnost uređaja pri merenju snage je $\pm 1\%$ rdg + 6dgt.

Tabela 5.4 – Vrednosti TMS FN niza sa rekonfiguracijom (FN niz bez senčenja)

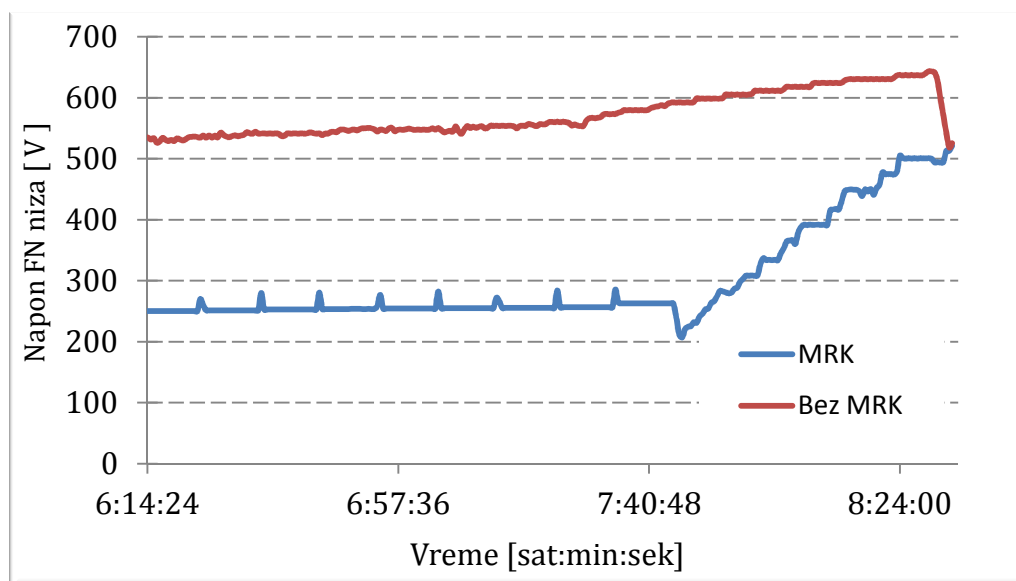
G [W/m ²]	T [°C]	Broj FN panela ○	TMS [W]		$\Delta P / P$ [%]
			Simulink	Mereno	
325	32,4	10	653	691	5,5
371	35,8	14	1066	1072	0,6
402	37,2	16	1336	1361	1,9
434	38,8	18	1641	1622	-1,2
480	40,4	20	2046	2016	-1,5

5.5. Uticaj mikrorekonfiguracije FN niza na proizvodnju elektrane

Posle analize ponašanja FN niza tokom izlaska iz senke bez mikrorekonfiguracije i sa mikrorekonfiguracijom, sledi prikaz rezultata merenja na ulaznoj jednosmernoj i izlaznoj naizmeničnoj strani invertora, kada su FN nizovi priključeni na inverter. Tokom rekonfiguracije inverter je bio priključen na DEM. Merenja bez i sa rekonfiguracijom su vršena različitim danima. Koliko je dana proteklo između merenja sa i bez rekonfiguracije određivali su vremenski uslovi, tačnije oblačnost. Sva merenja su rađena kada je jutro bilo vedro. U svakom slučaju zbog različitih ambijentalnih uslova vršena je korekcija merenih rezultata. Ove korekcije su uzete u obzir prilikom računanja proizvodnje električne energije.

5.5.1. Promene vrednosti električnih veličina na ulazu invertora

U ovom i narednom podpoglavlju prikazani rezultati merenja su vršeni bez mikrorekonfiguracije 21. jula (na slikama obeleženo sa Bez MRK), dok je mikrorekonfigurisanje FN nizova vršeno dan ranije, 20. jula (na slikama obeleženo sa MRK). Na ulaznoj, jednosmernoj strani invertora se analizira napon, struja i snaga jednog FN niza. Na slici 5.23 se vidi promena napona FN niza. Bez MRK napon FN niza, dok je bar i jedan panel iz niza u senci, postepeno raste. U trenutku izlaska svih panela iz senke dolazi do naglog pada napona. Sa MRK (10 FN panela čini jedan FN niz) napon se manje menja ($\Delta U \approx 10V$), sve dok paneli ne izađu iz senke. Napon FN niza je u granicama između 248V i 262V, što je manje od 320V, koja je donja granica napona za nalaženja tačke maksimalne snage ovog invertora.

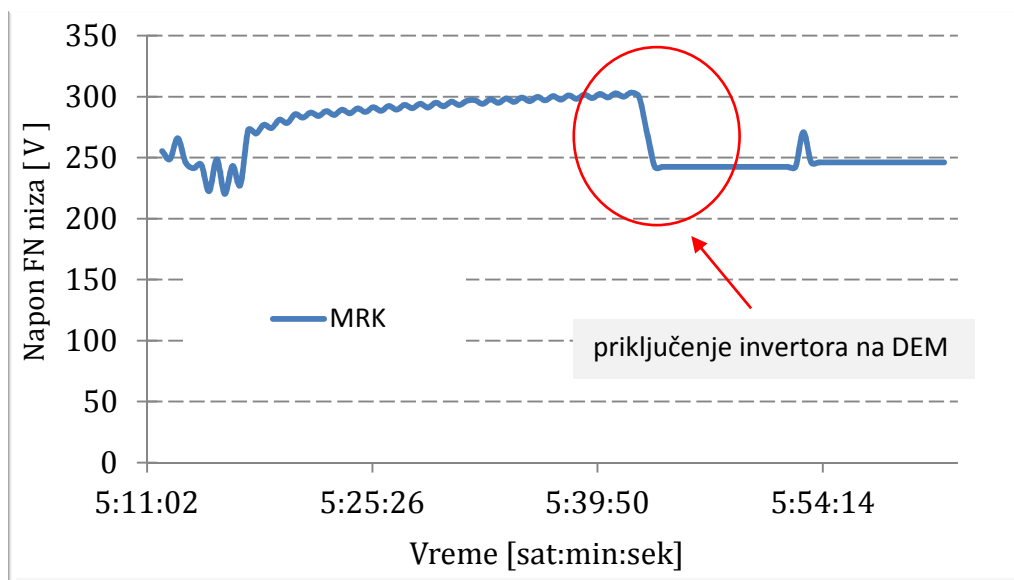


Slika 5.23 – Promena napona FN niza bez i sa MRK

S toga, inverter svakih 10 minuta uključuje algoritam nalaženja TMS i proverava naponski nivo. Ovo se jasno može uočiti na slici 5.23, kao periodično ponavljanje pikova napona. Inače, inverter nalazi TMS kada je ulazni napon (napon FN niza) u granicama 320V – 800V. Kada svih 10 FN panela izađe iz senke dolazi do pada napona, posle čega počinje rekonfiguracija (povećanje broja FN panela u FN nizu). Kao posledica priključenja FN panela koji su izašli iz senke, dolazi do skokovitog rasta napona, sve do završetka MRK.

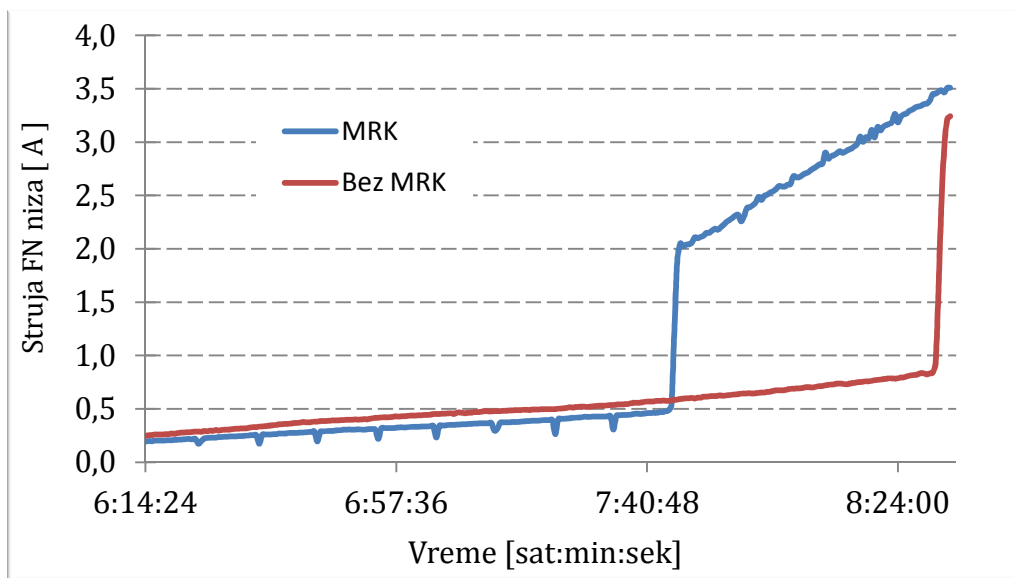
Interval promene napona FN niza sa 10 FN panela, koji obuhvata i trenutak uključjenja invertora vidi se na slici 5.24. Minimalni napon uključjenja invertora je 150V, što znači da napon FN niza nije prepreka za njegovo uključjenje.

Na slici 5.25 prikazana je promena struje FN niza. Za razliku od napona, struje sa i bez MRK se ne razlikuju značajnije, sve do trenutka početka MRK. Prikazana razlika nastaje zbog različitih ambijentalnih uslova u kome se nalaze FN paneli (zračenje i temperatura).



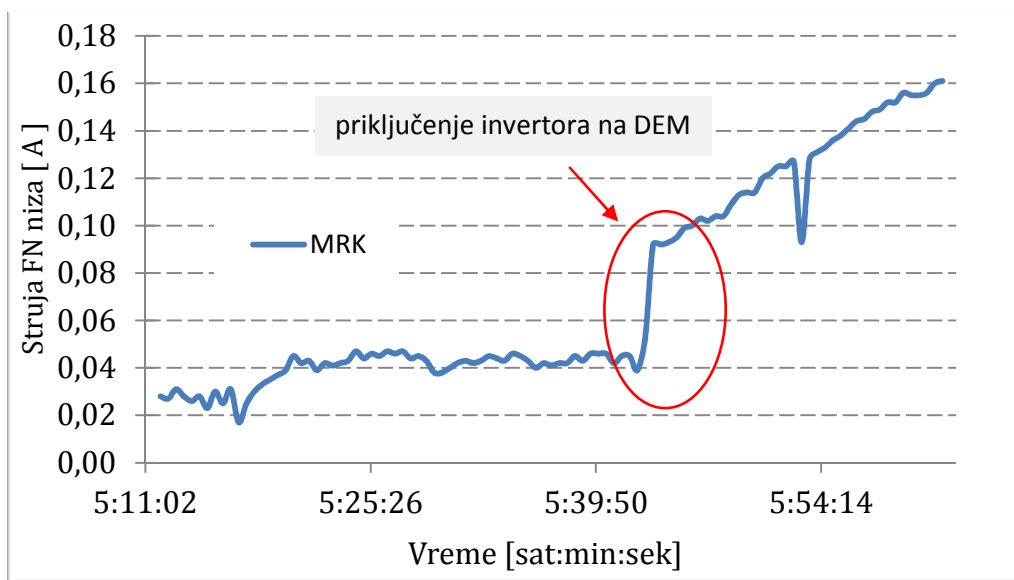
Slika 5.24 – Promena napona FN niza sa MRK tokom uključjenja invertora

U trenutku kada svih 10 FN panela izađe iz senke dolazi do naglog povećanja struje FN niza, posle čega se izvodi MRK. Posledica mikrorekonfiguracije je dalje linearno povećanje struje, srazmerno sa povećanjem solarnog zračenja. Bez MRK stuja FN niza ostaje mala i srazmerno se povećava sa povećanjem zračenja u senci. Tek nakon izlaska svih 20 FN panela iz senke dolazi do naglog povećanja struje FN niza.



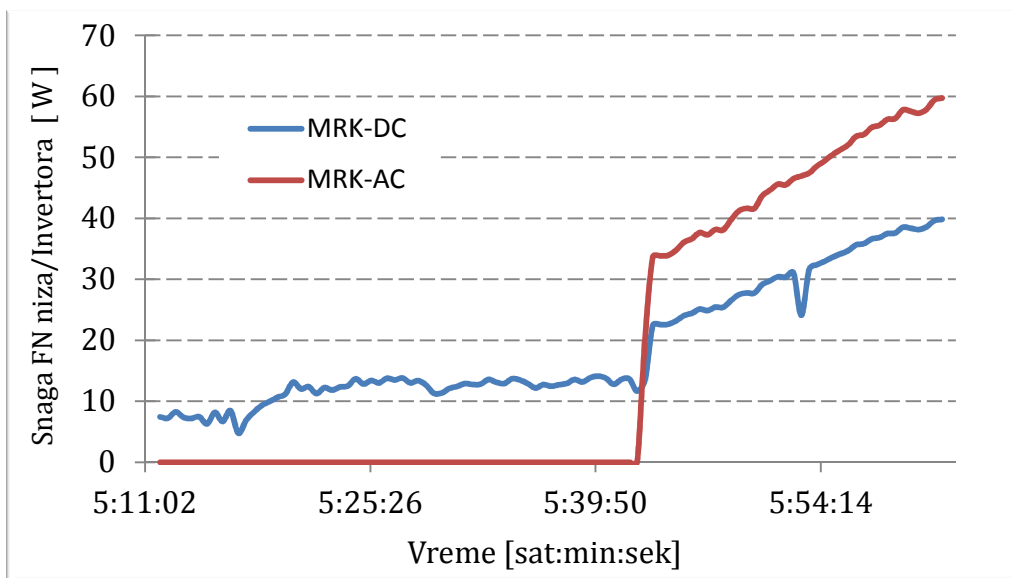
Slika 5.25 – Promena struje FN niza bez i sa MRK

Interval promene struje FN niza sa 10 FN panela, koji obuhvata i trenutak uključenja invertora vidi se na slici 5.26. U trenutku priključenja invertora na DEM (sklopka na izlaznoj, naizmjeničnoj strani unutar invertora se uključuje) dolazi do povećanja struje FN niza i nadalje je struja direktno srazmerna sa solarnim zračenjem u senci. Pre priključenja invertora na DEM struja FN niza je praktično zanemarljiva.



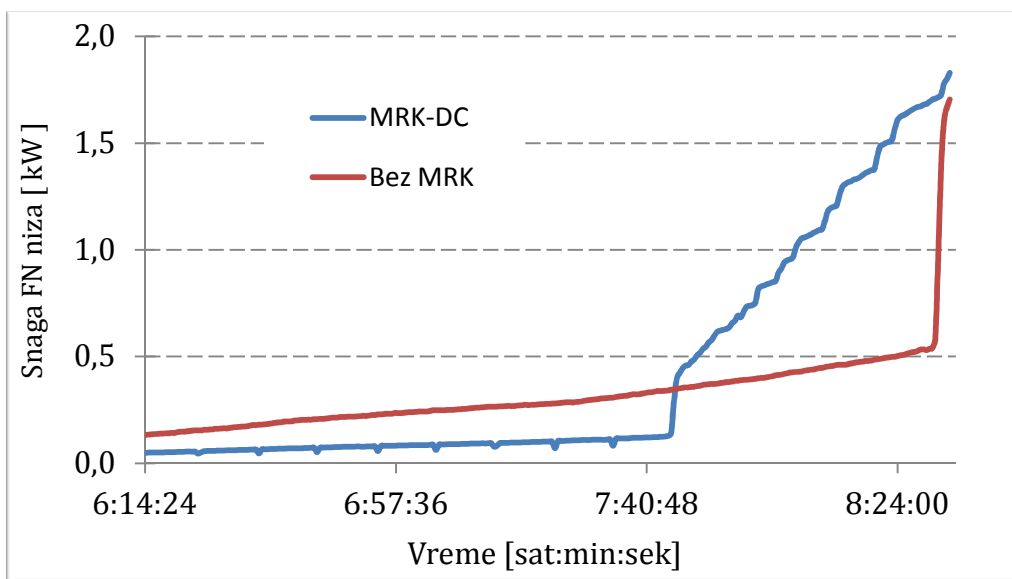
Slika 5.26 – Promena struje FN niza sa MRK tokom uključenja invertora

Trenutak početka predaje energije u DEM (MRK-AC) i snaga jednog FN niza u ranim jutarnjim satima (MRK-DC) su prikazani na slici 5.27. Invertor se priključuje na DEM kada ukupna snaga FN panela dostigne vrednost od oko 30W.



Slika 5.27 – Promena izlazne snage FN niza/invertora sa MRK, tokom uključenja invertora

Slika 5.28 prikazuje promenu snage jednog FN niza tokom jutarnjih sati, za slučaj bez MRK i sa MRK. U trenutku kada svih 10 FN panela izađe iz senke dolazi do skoka snage FN niza, posle čega se izvodi MRK. Posledica mikrorekonfiguracije je dalje povećanje snage. Bez MRK snaga FN niza se povećava srazmerno povećanju zračenja u senci, sve dok svi FN paneli u nizu ne izađu iz senke. Tek tada dolazi do naglog povećanja snage FN niza, i ona se nadalje menja u zavisnosti od nivoa zračenja koje dospe na FN niz.



Slika 5.28 – Promena snage FN niza bez i sa MRK

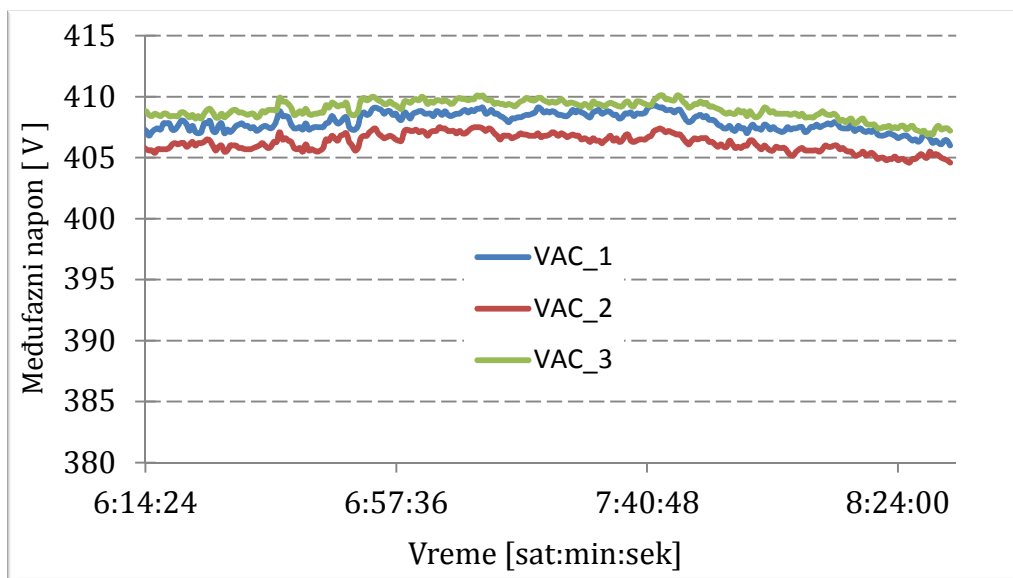
U vremenskom intervalu do početka MRK, izlazna snaga FN niza je manja u odnosu na snagu bez MRK. Ovo nije samo posledica različitih ambijentalnih uslova,

kao što su zračenje i temperatura. Manja snaga u danu sa MRK je prvenstveno posledica smanjenog napona FN niza. Da podsetimo, razlog smanjenog napona je početni broj FN panela u nizu (10), kada se izvodi mikrorekonfiguracija.

5.5.2. Promene vrednosti električnih veličina na izlazu invertora

Na izlaznoj, naizmeničnoj strani invertora analizira se napon, struja i izlazna snaga invertora.

Slika 5.29 prikazuje promenu međufaznih napona na mestu priključenja invertora na DEM, čije su promene diktirane uslovima koji vladaju u mreži. U prikazanom vremenskom intervalu, sve do završetka MRK, nivoi međufaznih napona se neznatno razlikuju i kreću se u granicama definisani pravilom o radu distributivne mreže.

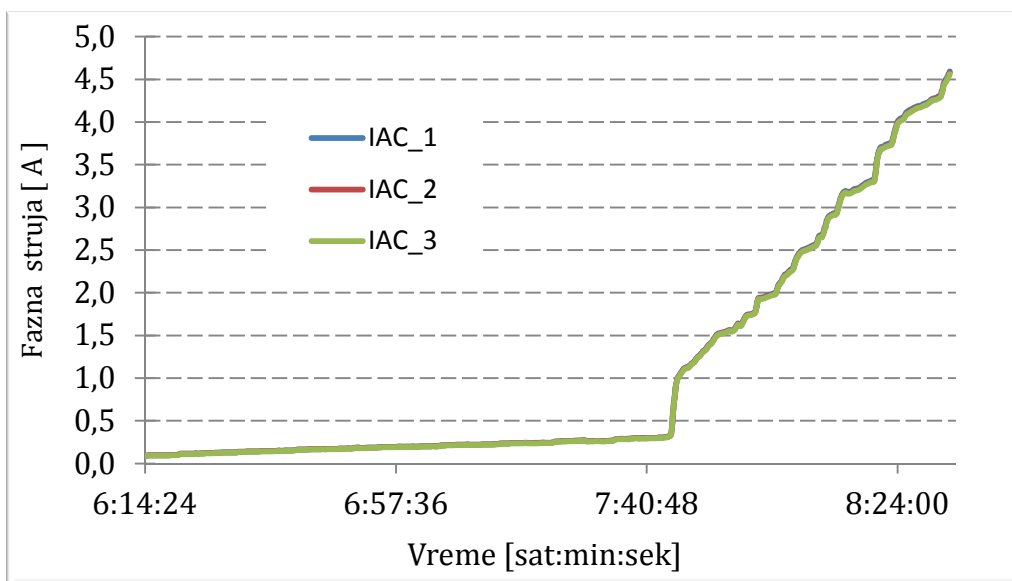


Slika 5.29 – Napon u DEM na dan izvođenja MRK

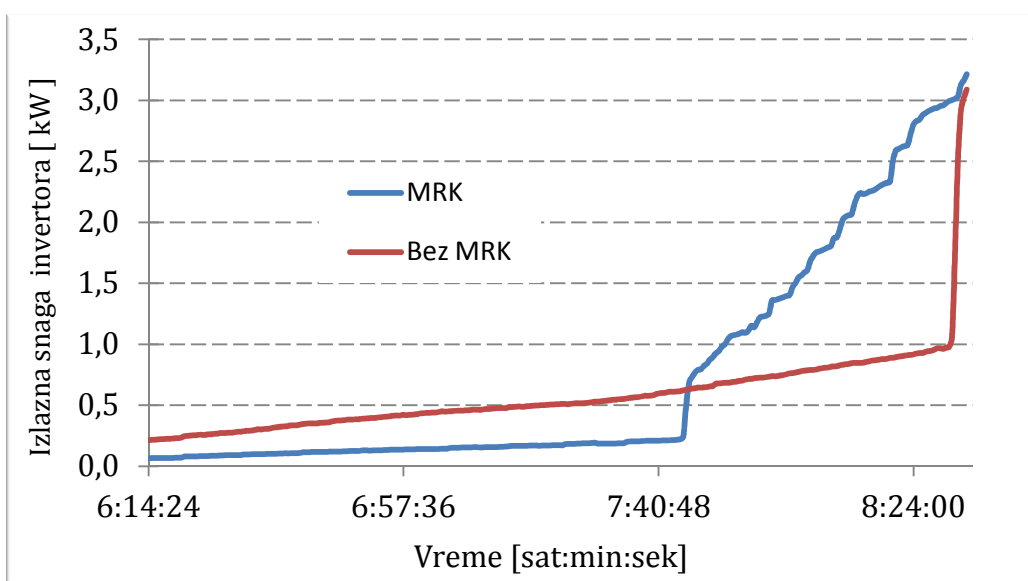
Slika 5.30 prikazuje promenu izlazne struje invertora kada je izvođena mikrorekonfiguracija. Prikazane struje sve tri faze se poklapaju, odnosno imaju iste vrednosti. Promene vrednosti izlaznih struja invertora u funkciji vremena su iste kao promene struje u FN nizovima, pri izvođenju mikrorekonfiguracije. Izlazno kolo invertora se ponaša na isti način i bez mikrorekonfiguracije. Jedina razlika je u tome da se skok, povećanje struje javlja kasnije kada se ne izvodi MRK.

Pošto se promena izlazne snage invertora praktično preslikava sa njegove jednosmerne strane, tok promene izlazne snage invertora prikazane na slici 5.31 je isti kao promena snage FN niza, koja se vidi na slici 5.28. Sa slike 5.31 se jasno vidi da se zahvaljujući MRK izlazna snaga povećava, pa samim tim i predata električna energija u DEM. Nedostatak MRK-a je da se zbog smanjenja napona, a pre izvođenja

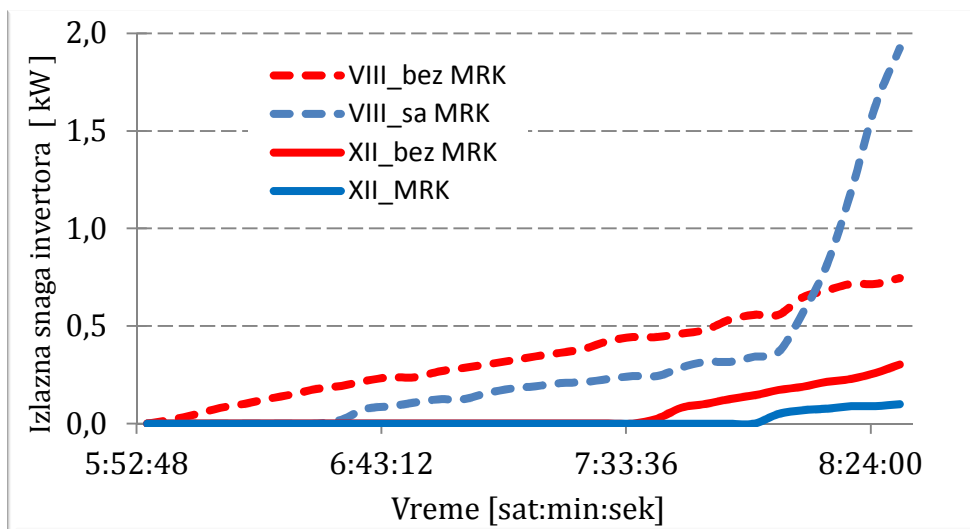
rekombinacije, smanjuje snagu u odnosu na snagu kada nema rekombinacije. Ovo smanjenje snage donekle anulira povećanje snage zbog MRK. Još jedan nedostatak smanjenja napona FN niza je i kasnije priključenje invertora na DEM, što se jasno vidi sa slike 5.32. Na slici su prikazani grafici sa i bez MRK za dva meseca, avgust i decembar. Bez obzira na doba godine, uvek postoji kašnjenje u uključenju invertora kada se izvodi MRK. Maksimalno kašnjenje iznosi oko 30 minuta. Zbog veoma male izlazne snage invertora u trenucima priključenja na DEM, mali su gubici u predatoj energiji u intervalu od pola sata, zbog kasnijeg uključenja invertora.



Slika 5.30 – Izlazna struja invertora na dan izvođenja MRK

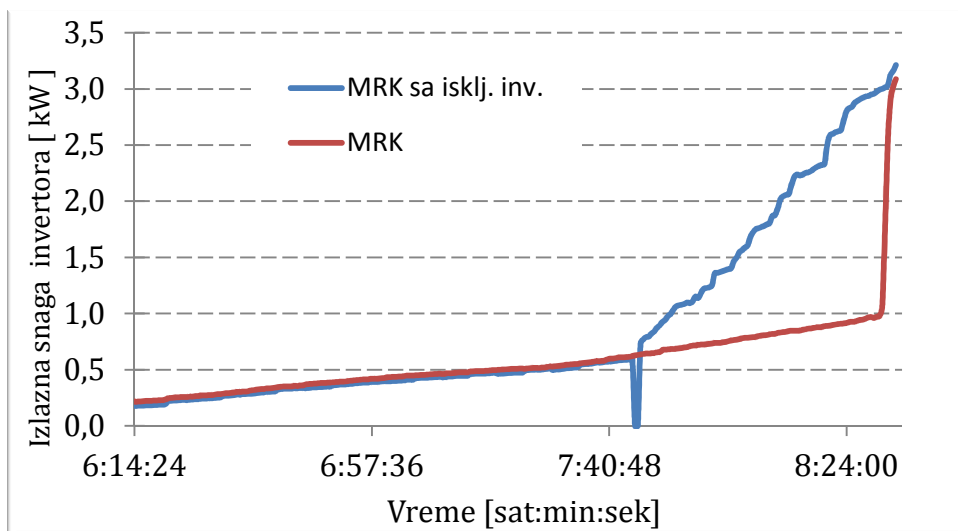


Slika 5.31 – Izlazna snaga invertora sa i bez izvođenja MRK



Slika 5.32 – Izlazna snaga invertora sa i bez izvođenja MRK neposredno nakon uključjenja invertora

Smanjenje napona, koja za posledicu ima smanjenje izlazne snage invertora na dan rekombinacije, se može izbeći. Ovo zahteva isključenje invertora neposredno pre početka izvođenja mikrorekonfiguracije. Ova situacija je prikazana na slici 5.33. Do trenutka isključenja invertora FN niz je kompletan (20 FN panela u nizu), što znači da nema smanjenja napona. Kada prvih 10 od 20 FN panela izađe iz senke, inverter se isključuje na kratko. Rekombinacijom se isključuju paneli u senci, tako da u nizu ostaje 10 FN panela koji su van senke. Inverter se uključuje i izvodi se MRK onom dinamikom kako pojedini FN paneli izlaze iz senke.



Slika 5.33 – Izlazna snaga invertora bez MRK i sa isključivanjem invertora pre MRK

5.5.3. Povećanje proizvodnje električne energije u intervalu izvođenja mikrorekonfiguracije

Nadalje sledi analiza proizvodnje električne energije FN elektrane, odnosno analiza povećanja te proizvodnje kao posledica izvođenja mikrorekonfiguracije. Analizira se povećanje proizvodnje električne energije za tri vremenska intervala. O ovom podpoglavlju se analizira najkraći vremenski interval proizvodnje, a to je u intervalu od trenutka uključanja invertora pa do kraja MRK. U narednim podpoglavljima sledi analiza vremenskog intervala na dnevnom nivou, gde se utvrđuje povećanje proizvodnje usled mikrorekonfiguracije u odnosu na ceo dan. Na kraju se prikazuje doprinos povećanju proizvodnje MRK na godišnjem nivou.











Pre detaljne analize proizvodnje električne energije treba ukazati na način izlaska FN nizova iz senke. Između ostalog i od načina povlačenja senke sa panela zavisi povećanje proizvodnje električne energije tokom MRK. Postoje dva načina izlaska FN nizova iz senke:

- paralelan izlazak iz senke, što znači da je broj senčenih panela u oba FN niza uvek isti, tokom povlačenja senke (u prikazanim tabelama označeno sa \square) i
- nepravilan izlazak iz senke, što znači da je broj senčenih panela različit u FN nizovima, tokom povlačenja senke (u prikazanim tabelama označeno sa \square).

Godišnja promena načina izlaska FN nizova iz senke za analiziranu elektranu je prikazana u tabeli 5.5. Tokom godine postoji osam promena načina izlaska FN nizova iz senke, što se može videti iz priložene tabele. Način izlaska FN nizova iz senke je direktna posledica pozicioniranja FN niza u odnosu na bliske prepreke, koji onemogućavaju osunčavanje FN panela u jutarnjim satima. Dužina intervala izlaska FN niza iz senke i broj ponavljanja načina izlaska iz senke utiču na doprinos MRK povećanju proizvodnje elektrane. Posmatrajući način izlaska FN nizova iz senke na godišnjem nivou vidi se da je znatno veći broj dana (218) kada nizovi pravilno izlaze iz senke. Ovaj način izlaska iz senke se javlja u 60% vremena tokom godine. Nepravilan izlazak FN nizova iz senke se dešava tokom 147 dana, što čini 40% vremena posmatrajući na godišnjem nivou.

Pošto način povlačenja senke sa FN polja direktno utiče na upravljanje i rezultat mikrorekonfiguracije, o ovome će još biti reči prilikom analize rezultata proizvodnje i algoritma upravljanja MRK.

Tabela 5.5 – Godišnja promena načina izlaska FN nizova iz senke

Vremenski interval	Način izlaska iz senke	Broj dana u intervalu
26. januar – 8. mart		41
9. mart – 1. april		23
2. april – 3. maj		32
4. maj – 10 avgust.		99
11. avgust – 17. septembar		37
18. septembar – 6. oktobar		24
7. oktobar – 14. novembar		37
15. novembar – 25. januar		72
UKUPNO:		218
		147

Sledi prikaz rezultata mikrorekonfiguracije koja je izvođena bar jednom mesečno tokom 2014. i 2015. godine. Krajnji rezultat MRK, koji je od najvećeg značaja, je proizvodnja električne energije elektrane. Rezultati proizvodnje električne energije u intervalu od uključenja invertora pa do završetka izvođenja MRK su prikazani u tabeli 5.6. Rezultati u tabeli su prikazani za tri slučaja:

- bez izvođenja mikrorekonfiguracije (BEZ MRK),
- sa mikrorekonfiguracijom (MRK) i
- sa mikrorekonfiguracijom uz isključivanje invertora (MRK SA ISKLJUČENJEM INVERTORA).

Da podsetimo, bez mikrorekonfiguracije FN nizovi imaju malu snagu sve dok i poslednji FN panel ne napusti senku, usled čega je i izlazna snaga invertora veoma mala. U drugom slučaju izvođenje mikrorekonfiguracije se ostvaruje na način da je u trenutku uključenja invertora na njegovom ulazu spojen minimalan potreban broj FN panela (definisani minimalnim ulaznim naponom invertora). MRK započinje kada minimalno potreban broj panela izađe iz senke, nakon čega se na niz povezuju paneli redosledom kako izaze iz senke. U trećem slučaju MRK sa isključenjem invertora se izvodi na način da se neposredno pre početka izvođenja MRK invertor isključi, potom

se smanji broj FN panela u nizu na minimalan potreban, invertor se uključi i pristupa se izvođenju MRK, dok svi paneli ne izađu iz senke.

Slučaj bez MRK ima dve varijante (tabela 5.6). U varijanti "merene vrednosti" podaci su dobijeni na osnovu merenja u elektrani, dok varijanta "korekcija" sadrži korigovane vrednosti merenih veličina. Korekcija je potrebna jer su merenja bez i sa rekonfiguracijom rađeni različitim danima, kada se ambijentalni uslovi pod kojima FN paneli rade ne poklapaju.

Tabela 5.6 – Proizvodnja električne energije do završetka MRK za različite situacije

PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE [Wh]									
mesec	Način izl. iz senke	BEZ MRK				MRK		MRK SA ISKLJUČENJEM INVERTORA	
		merene vrednosti		korekcija		merene vrednosti		DC	AC
		DC	AC	DC	AC	DC	AC		
Jan		1443,2	1056,3	940,4	727,5	1012,9	634,3	1175,4	803,3
Feb		2256,8	1739,3	2207,8	1693,9	2810,6	2288,7	2951,0	2393,0
Mar		2230,8	1788,5	1808,9	1407,5	2535,2	1994,8	2906,8	2365,6
Apr		3669,8	3045,3	3694,9	3049,2	4739,8	4048,3	4981,6	4733,3
Maj		1899,3	1432,8	1192,3	1016,5	2941,2	2439,8	2995,9	2862,0
Jun		1973,6	1569,5	2206,6	1778,7	2522,0	2084,7	2930,6	2514,9
Jul		1977,1	1561,6	1969,8	1519,9	2439,5	1996,4	2710,2	2549,7
Avg		3524,3	3005,8	3544,0	3067,5	4994,0	4366,6	5341,3	4718,8
Sept		3105,9	2681,4	2630,0	2234,0	3158,6	2610,5	3287,2	2726,5
Okt		2528,8	2090,1	2413,5	1967,5	2653,3	2168,5	2939,0	2430,0
Nov		1847,8	1446,1	1786,6	1403,4	2140,1	1701,3	2239,0	1856,0
Dec		761,1	405,6	721,4	396,0	801,7	345,8	913,0	462,7
prosek		2214,1	1752,4	2094,5	1652,4	2729,1	2223,3	2943,1	2530,9

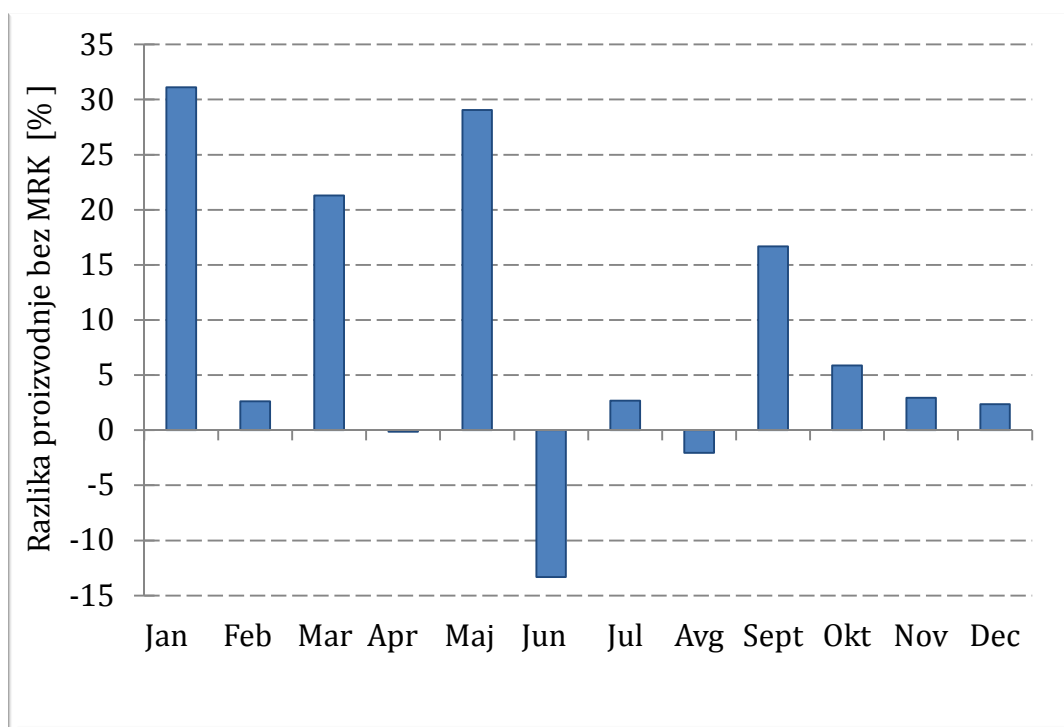
Naime, kao što je poznato izlazna snaga FN panela zavisi od intenziteta solarnog zračenja koje dospe na FN panele i temperature FN panela. Korekcija je izvršena u odnosu na ambijentalne uslove koji su važili na dan izvođenja MRK. Na ovaj način se izjednačavaju ambijentalni uslovi tokom izvođenja MRK i bez MRK, što znači eliminaciju greške zbog različitih uslova pod kojim FN paneli proizvode električnu energiju.

U tabeli 5.6 vrednosti za slučaj sa MRK su dobijene na osnovu merenja i oni se kasnije upoređuju sa korigovanim vrednostima bez MRK. Kao što je u poglavlju analize uticaja mikrorekonfiguracije na proizvodnju elektrane bilo rečeno, tokom MRK se pojavljuju i neželjeni efekti. Ovi neželjeni efekti se izbegavaju isključenjem invertora, neposredno pre početka MRK. Upravo situacija “MRK sa isključenjem invertora” prikazuje proizvodnju elektrane kada se inverter isključuje. Rezultati ove situacije su dobijeni kao kombinacija korigovanih merenih vrednosti u intervalu pre MRK i merenih vrednosti tokom izvođenja MRK, odnosno nije bilo stvarnog isključenja invertora. Međutim, rekombinacija je nekoliko puta sprovedena i sa isključenjem invertora, da bi se potvrdila ispravnost prikazanih rezultata trećeg slučaja (slika 5.33).

Za svaku situaciju proizvodnja električne energije je prikazana i na ulaznoj strani invertora (u tabeli obeleženo sa DC) i na izlaznoj strani invertora (u tabeli prikazano sa AC).

Na slici 5.34 prikazana je razlika proizvodnje na izlazu invertora između merenih i korigovanih vrednosti bez MRK. Pozitivna vrednost razlike znači da je posle korekcije proizvodnja manja u odnosu na merene vrednosti. U 75% prikazanih vrednosti razlika je pozitivna, što ne znači da bi se ova situacija ponovila kada bi se ponovila merenja. Vidi se da u nekim mesecima postoji značajna razlika. Najveće razlike se javljaju u januaru i maju i iznose 31%, odnosno 29%. Ove razlike pokazuju da postoji velika verovatnoća donošenja pogrešnog zaključka što se tiče doprinosa MRK, bez izjednačavanja ambijentalnih uslova.

Razlike u proizvodnji nastaju zbog meteoroloških prilika koje se javljaju u jutarnjim satima i donekle od dužine izlaska FN nizova iz senke. U trenutku uključenja invertora svi FN paneli su pod senkom. U ovom slučaju je temperatura FN panela približno jednaka temperaturi vazduha. Tokom izvođenja MRK deo FN niza je u senci a deo je osunčan. Za senčeni deo važi zaključak iz prethodne rečenice, dok je temperatura osunčanih panela znatno veća od temperature vazduha, naročito leti. Najveća temperaturna razlika tokom merenja za slučaj bez i sa MRK je iznosila 8°C, što za instalisane panele znači promenu snage od 3,6%. Jutarnje atmosferske prilike, prvenstveno prozračnost atmosfere, ima najveći uticaj na zračenje senčenih i osunčanih FN panela. Ujutro je najveća koncentracija vodene pare u vazduhu, što se menja iz dana u dan. U većini slučajeva zračenja u senci su bliska za oba merenja, sa i bez MRK. Više se razlikuju nivoi zračenja bez senčenja.

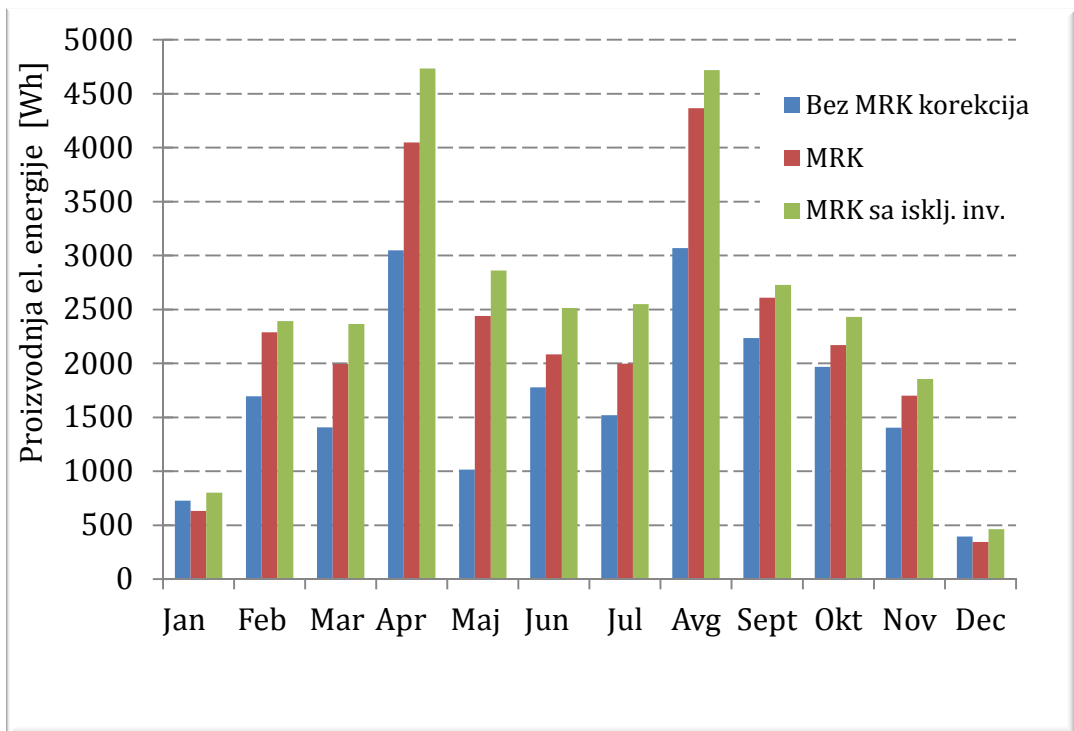


Slika 5.34 – Razlika proizvodnje merenih i korigovanih vrednosti u intervalu do završetka MRK

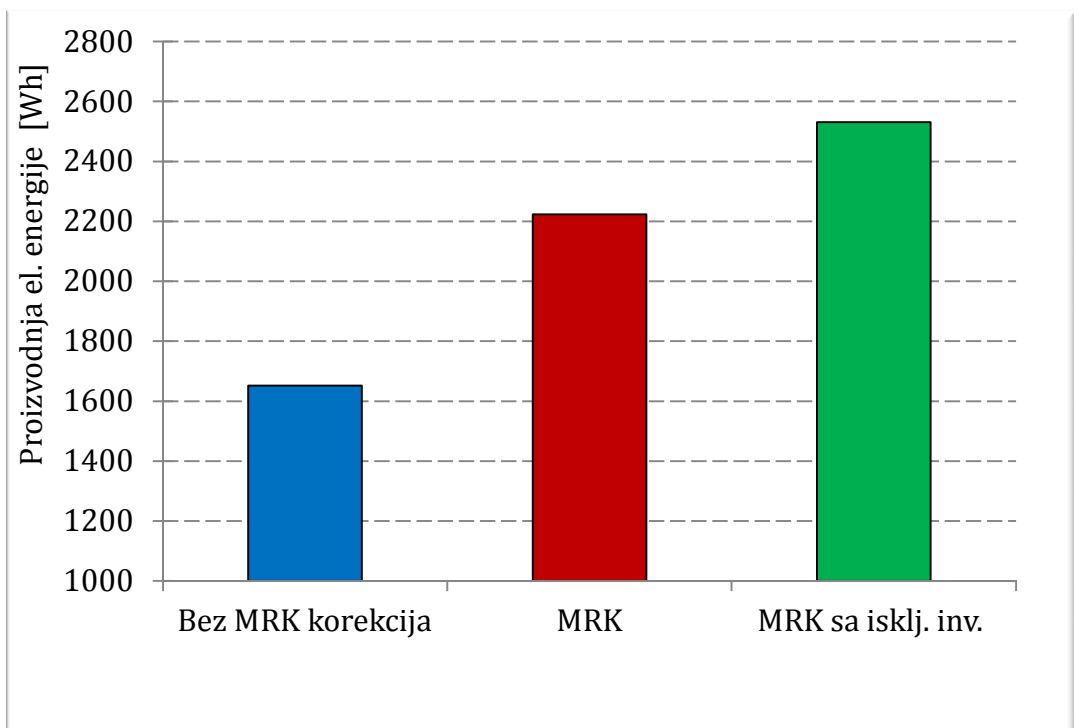
Grafički prikaz vrednosti proizvedene električne energije iz tabele 5.6 se vidi na slici 5.35. Jasno se vidi da bez isključenja invertora izvođenje mikrorekonfiguracije u decembru i januaru smanjuje proizvodnju. Razlog smanjenja proizvodnje leži u kratkom trajanju rekonfiguracije zbog načina izlaska FN panela iz senke. I jedno i drugo su posledica načina senčenja FN niza u ovim mesecima. Takođe, ukupno vreme od trenutka uključenja invertora do kraja završetka rekonfiguracije je najkraće u spomenutim mesecima, zbog kasnog izlaska sunca. U svim ostalim mesecima mikrorekonfiguracija bez isključenja invertora povećava proizvodnju elektrane. U svim mesecima kada je izvođen eksperiment MRK sa isključenjem invertora, proizvodnja se povećava u odnosu bez MRK.

U mesecu aprilu i avgustu proizvodnja u intervalu do završetka MRK odskakače od ostalih meseci. Razlog je sa jedne strane način izlaska FN niza iz senke, koji je u trenutku merenja bio nepravilan i povoljni ambijentalni uslovi. Za FN panel povoljni ambijentalni uslov su istovremena pojava što niže temperature i što većeg zračenja.

Srednja vrednost proizvodnje električne energije na godišnjem nivou u intervalu do završetka MRK je prikazana na slici 5.36.



Slika 5.35 – Uporedni prikaz proizvodnje električne energije u intervalu do završetka MRK



Slika 5.36 – Uporedni prikaz srednje vrednosti proizvodnje električne energije u intervalu do završetka MRK

Tabela 5.7 prikazuje procentualnu razliku proizvodnje električne energije sa MRK/MRK sa isključenjem invertora u odnosu na proizvodnju bez MRK. U oba slučaja procentualne razlike se prikazuju na izlaznoj (AC) strani invertora sa merenim podacima, bez korekcije i sa korekcijom ambijentalnih uslova. Ova tabela će biti detaljnije analizirana, pošto se iz nje jasno vidi pozitivan doprinos mikrorekonfiguracije na proizvodnju električne energije FN elektrane.

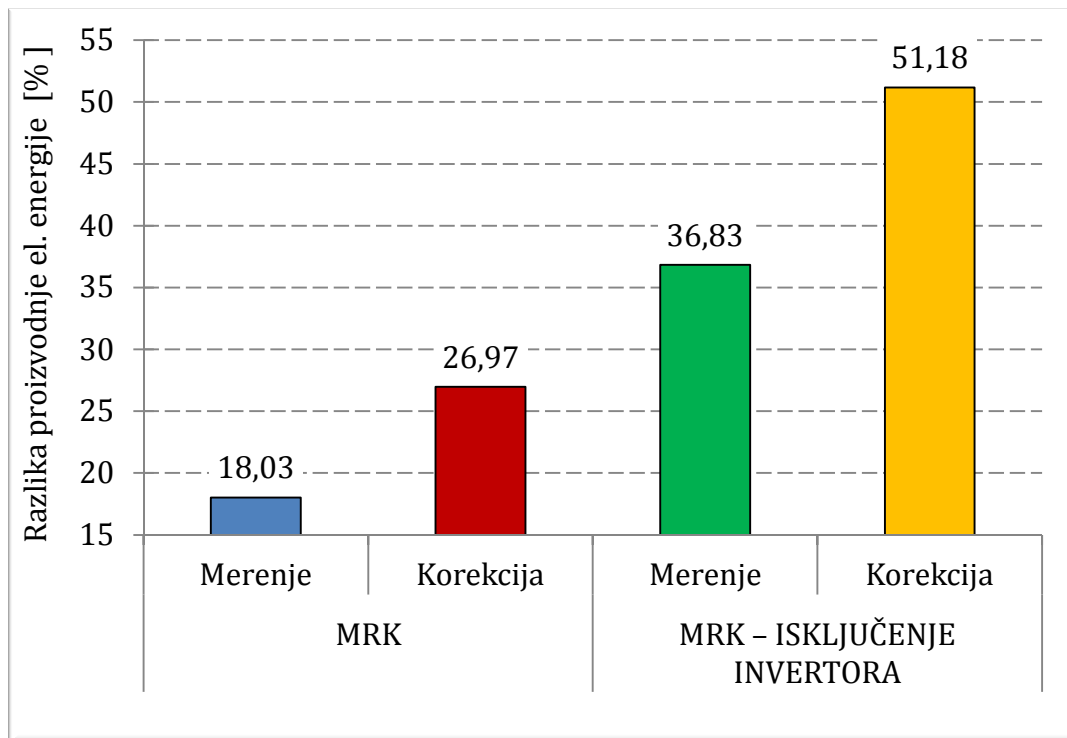
Tabela 5.7 – Procentualna razlika proizvodnje el. energije do vremena završetka MRK

RAZLIKA PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE [%]				
Mesec	MRK		MRK ISKLUČENJE INVERTORA	
	AC			
	Merenje	Korekcija	Merenje	Korekcija
Januar	-39,95	-52,47	-23,95	10,42
Februar	31,59	35,11	37,58	41,27
Mart	11,53	41,73	32,27	68,07
April	32,94	32,76	55,43	55,23
Maj	70,28	140,02	55,43	55,23
Jun	32,82	17,20	60,24	41,39
Jul	27,85	31,35	63,28	67,75
Avgust	45,27	42,35	56,99	53,83
Septembar	-2,64	16,85	1,68	22,04
Oktoobar	3,75	10,22	16,26	23,51
Novembar	17,65	21,23	28,35	32,25
Decembar	-14,75	-12,69	14,08	16,83
Prosek	18,03	26,97	36,83	51,18

Negativan predznak ispred vrednosti u tabeli 5.7 znači da MRK ne doprinosi povećanju proizvodnje elektrane, šta više, smanjuje proizvodnju. U nekim situacijama proizvodnja invertora je manja sa MRK, što je već bilo objašnjeno.

U svakom slučaju bez korekcije merenih vrednosti MRK sa dovoljno dugim intervalom rekonfiguracije bez isključenja invertora na izlaznoj strani invertora u proseku povećava proizvodnju za oko 18%, dok sa isključenjem invertora ovo povećanje je duplo i iznosi 36%. Još jednom treba napomenuti da su ovo rezultati povećanja proizvodnje od trenutka uključenja invertora pa do završetka mikrorekonfiguracije. Rezultati dobijeni korekcijom ambijentalnih uslova su još povoljniji; mikrorekonfiguracija bez isključenja invertora doprinosi povećanju

proizvodnje od 27%, dok MRK sa isključenjem invertora povećava proizvodnju za čak 51%. Predočeni procentualni doprinos povećanju proizvodnje od strane mikrorekonfiguracije grafički je prikazan na slici 5.37.



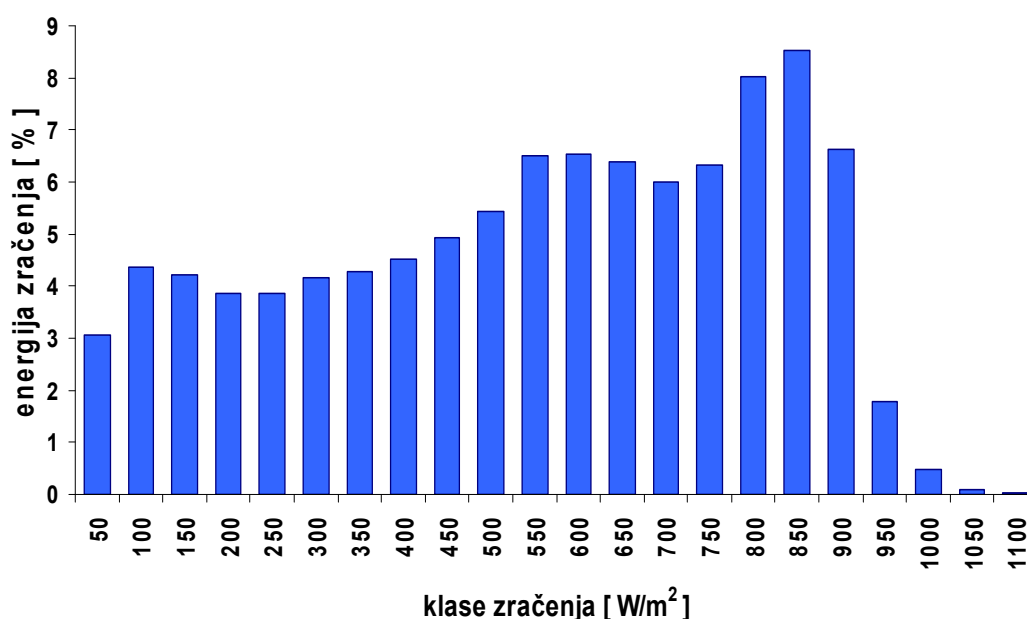
Slika 5.37 – Doprinos povećanju proizvodnje u intervalu do završetka MRK

Analizirajući gore dobijene rezultate sa sličnim rezultatima dobijenim u eksperimentima drugih autora [74, 76, 77], dolazi se do zaključka da su rezultati poboljšanja proizvodnje upoređivi po vrednosti ili su veći. Značajno je istaći da se u ogromnoj većini literature rezultati analiziraju u intervalu rekonfiguracije, eventualno na dnevnom nivou. U ovoj tezi se rezultati analiziraju i na dnevnom i godišnjem nivou.

Pored proizvodnje električne energije analiziran je i stepen korisnog dejstva invertora. Po fabričkim podacima maksimalna efikasnost invertora je 98,1%, dok je evropska efikasnost 97,5%. Evropska efikasnost je definisana sledećim izrazom

$$\eta_{\text{euro}} = 0,03 \eta_{5\%} + 0,06 \eta_{10\%} + 0,13 \eta_{20\%} + 0,1 \eta_{30\%} + 0,48 \eta_{50\%} + 0,2 \eta_{100\%} \quad (5.15)$$

Pošto stepen korisnog dejstva zavisi od solarnog zračenja, odnosno raspodela klase energije zračenja, definiše se stepen korisnog dejstva za određen region [102]. Na osnovu ove raspodele za Srednju Evropu definisana je evropska efikasnost. Za okolinu Novog Sada raspodela klase energije zračenja je prikazana na slici 5.38. Ova raspodela se poklapa sa raspodelom za širi region za koju je definisana evropska efikasnost.



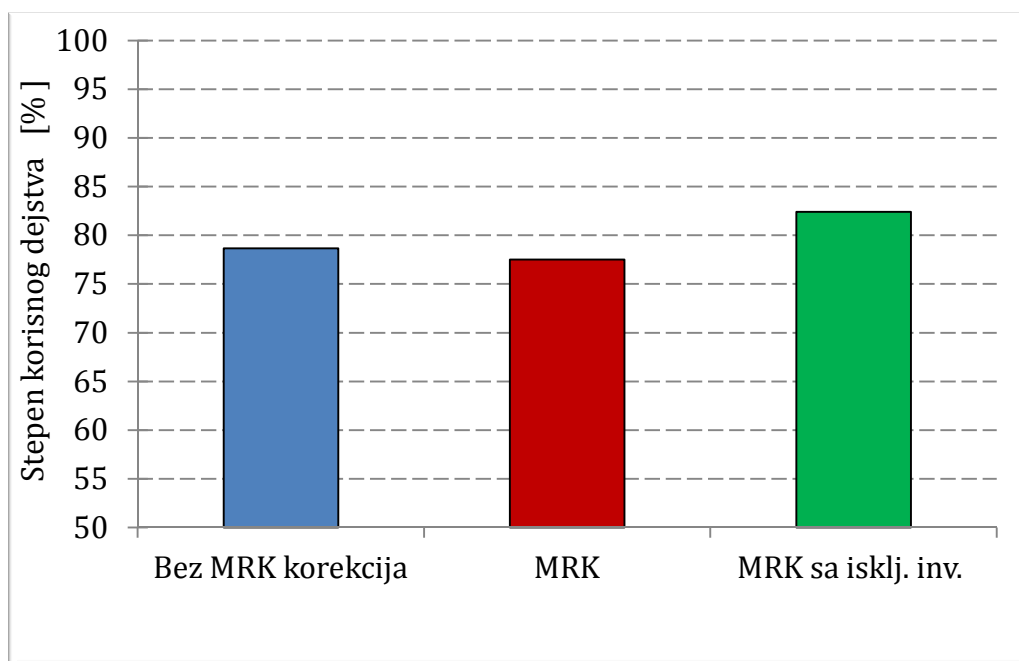
Slika 5.38 – Raspodela klase enegije zračenja za širu okolinu Novog Sada

Tabela 5.8 prikazuje stepen korisnog dejstva invertora u intervalu od vremena uključenja invertora pa do kraja MRK. Stepenn korisnog dejstva je prikazan za tri slučaja; bez MRK, ali sa korekcijom ambijentalnih uslova, sa MRK i sa MRK uz isključenje invertora.

Tabela 5.8 – Stepenn korisnog dejstva u intervalu do kraja izvođenja MRK

Mesec	STEPEN KORISNOG DEJSTVA [%]		
	Bez MRK sa korekcijom	MRK	MRK sa isključenjem invertora
Januar	77,4	62,6	68,3
Februar	76,7	81,4	81,1
Mart	77,8	78,7	81,4
April	82,5	85,4	95,0
Maj	85,3	83,0	95,5
Jun	80,6	82,7	85,8
Jul	77,2	81,8	94,1
Avgust	86,6	87,4	88,3
Septembar	84,9	82,6	82,9
Oktobar	81,5	81,7	82,7
Novembar	78,6	79,5	82,9
Decembar	54,9	43,1	50,7
Prosek:	78,66	77,50	82,40

Analizirajući stepen korisnog dejstva za tri slučaja po mesecima i srednje vrednosti, vidi se da je u odnosu na nominalne vrednosti efikasnost dosta manja. Jedan od razloga je i specifičan način definisanja efikasnosti invertora koji se koriste u FN sistemima (jednačina 5.15). Drugi razlog leži u malom zračenju pre i tokom izvođenja MRK, naime efikasnost invertora zavisi od izlazne snage invertora. I na kraju ne može se zanemariti i sniženje napona FN niza. Efikasnost invertora takođe zavisi i od ulaznog napona, odnosno napona FN niza. Na godišnjem nivou srednja vrednost efikasnosti invertora je nešto veća bez MRK u odnosu na MRK bez isključenja invertora. Ovome doprinosi znatno manja efikasnost invertora pri rekonfiguraciji u decembru i januaru. Prosečna efikasnost invertora na godišnjem nivou sa isključenjem invertora je za 4,75% veća u odnosu na slučaj bez MRK. Prosečna vrednost stepena korisnog dejstva invertora je grafički prikazana na slici 5.39.



Slika 5.39 – Usporedni prikaz srednje vrednosti stepena korisnog dejstva invertora

5.5.4. Povećanje proizvodnje električne energije na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou

Mikrorekonfiguracija je izvođena pri vedrim jutarnjim satima, tokom izlaska FN nizova iz senke. Svi rezultati povećanja proizvodnje su dati za vedro nebo u jutarnjim satima. Na osnovu broja vedrih jutara određen je i doprinos povećanju proizvodnje električne energije na godišnjem nivou. Za protekle četiri godine rada fotonaponske elektrane tabela 5.9 prikazuje broj vedrih jutara po mesecima. Istovremeno je prikazan zbir vedrih dana na godišnjem nivou. Za četiri godine rada elektrane prosečna suma vedrih dana na godišnjem nivou iznosi 151,5 dana. Ovaj broj

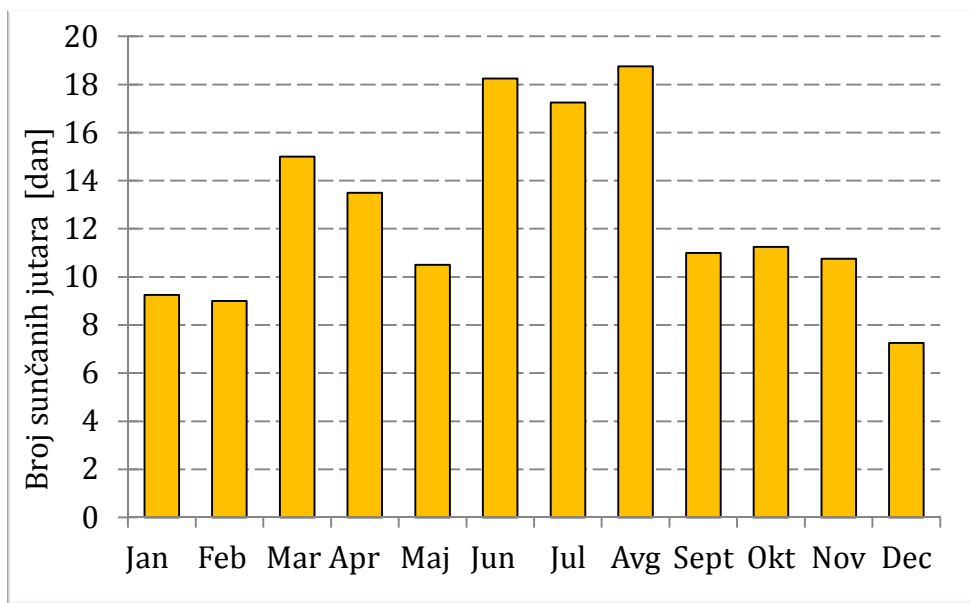
označava minimalni broj rekonfiguracija koji se izvodi tokom godine, što znači da prikazani rezultati ove disertacije su minimalne vrednosti koje mogu biti i veće.

U ovoj tezi nisu razmatrani niti analizirani slučajevi sa promenljivo oblačnim jutrima, kada je takođe moguća rekonfiguracija. Pri potpuno oblačnom danu rekonfiguracija nema smisla jer na FN panela pada samo difuziono zračenje, koje u suštini za posledicu ima uniformno zračenje malog intenziteta.

Tabela 5.9 – Broj sunčanih jutara pogodnih za MRK od početka rada FN elektrane

BROJ SUNČANIH JUTARA [dana]					
Mesec	Godina				Godišnji prosek
	2012.	2013.	2014.	2015.	
Januar	17	11	4	5	9,25
Februar	10	10	7	9	9
Mart	22	11	14	13	15
April	15	18	8	13	13,5
Maj	13	8	13	8	10,5
Jun	23	17	17	16	18,25
Jul	20	21	12	16	17,25
Avgust	24	17	15	19	18,75
Septembar	17	11	6	10	11
Oktobar	13	11	12	9	11,25
Novembar	12	9	8	14	10,75
Decembar	9	10	2	8	7,25
Godišnje	195	154	118	139	151,5

Grafički prikaz prosečnog broja sunčanih sati po mesecima od početka rada FN elektrane se vidi na slici 5.40. Pored takozvanih letnjih meseci (jun, jul avgust) najveći broj vedrih dana se pojavljuje još u martu i aprilu.



Slika 5.40 – Četvorogodišnja usrednjena vrednost broja sunčanih jutara

Za utvrđivanje vrednosti procentualnog povećanja električne energije na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou potrebno je poznavanje ukupne proizvodnje na dnevnom nivou. Ako bi za analizu poslužila proizvodnja za dan kada je izvođena mikrorekonfiguracija mogli bi se doći do pogrešnih rezultata. Naime, posle izvođenja MRK dan može biti i sunčan i oblačan, pa bi se dobio veoma mali ili veliki doprinos povećanju energije. Zbog toga se dnevna proizvodnja za svaki mesec izračunava na osnovu stvarne prosečne proizvodnje po mesecima koja je prikazana u tabeli 4.1 četvrtog poglavlja. Tako su dobijene vrednosti prosečne dnevne proizvodnje (tabela 5.10) koje su poslužile kao osnova za analizu.

Izračunate vrednosti prosečne dnevne proizvodnje bez MRK, dobijene na osnovu ostvarene proizvodnje FN elektrane, prikazane su u prvoj koloni tabele 5.10. Tok promene dnevne proizvodnje tokom godine se poklapa sa slikom 4.3, tako da je najmanja proizvodnja u decembru i januaru. Najveća proizvodnja se postiže tokom juna, jula i avgusta. U drugoj koloni tabele 5.10 nalaze se vrednosti povećanja proizvodnje električne energije ostvarene u periodu do završetka MRK sa isključenjem invertora. Povećanje proizvodnje na mesečnom nivou u intervalu do završetka MRK je prikazana u poslednjoj koloni. Povećanje mesečne proizvodnje u intervalu do završetka MRK je izračunata tako da je dnevna prosečna proizvodnja povećana za proizvodnju u intervalu do završetka MRK pomnožena sa brojem sunčanih jutara za odgovarajući mesec. Na godišnjem nivou prosečna dnevna proizvodnja je 31,32kWh, dok je doprinos MRK povećanju proizvodnje dnevno u proseku 846W. Godišnje proizvodnja se poveća za 141,6 kWh, što na mesečnom nivou u proseku znači povećanje za 11,8kWh.

Tabela 5.10 – Proizvodnja električne energije FN elektrane usled izvođenja MRK

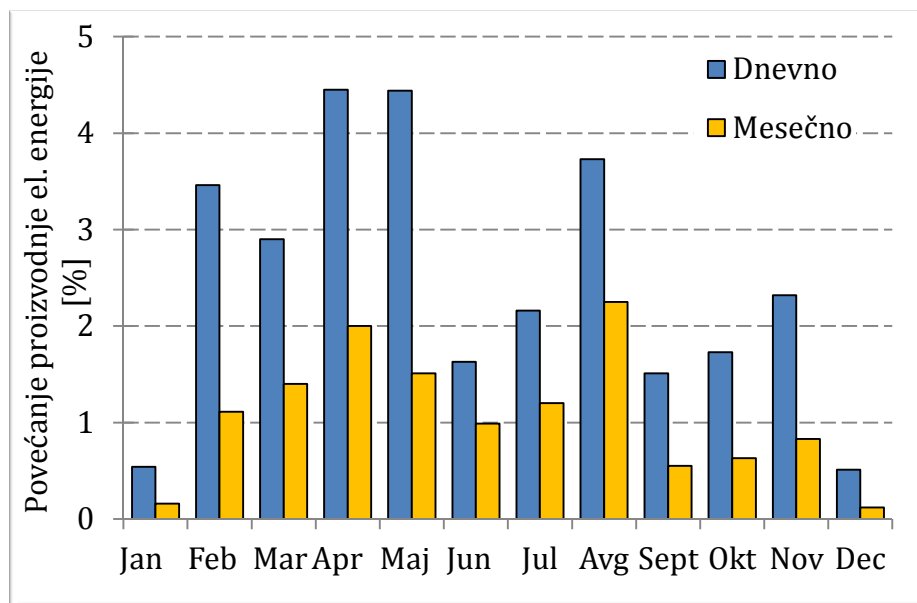
PROIZVODNJA EL. ENERGIJE [kWh]			
Mesec	Prosečna dnevna	Povećanje dnevno u intervalu MRK	Povećanje mesečno u intervalu MRK
Januar	14,13	0,076	0,70
Februar	20,23	0,699	6,29
Mart	33,03	0,958	14,37
April	37,81	1,684	22,74
Maj	41,53	1,846	19,38
Jun	45,20	0,736	13,44
Jul	47,67	1,030	17,76
Avgust	44,33	1,651	30,96
Septembar	32,56	0,492	5,42
Oktobar	26,80	0,463	5,20
Novembar	19,55	0,453	4,87
Decembar	13,05	0,067	0,48
Sr. vrednost:	31,32	0,846	11,80

Procentualno povećanje proizvodnje usled izvođenja MRK je prikazano u tabeli 5.11, dok se na slici 5.41 vidi grafički prikaz tabelarnih vrednosti.

Ono što je uočljivo kada se upoređuje doprinos mikrorekonfiguracije do kraja intervala i na dnevnom nivou, je drastična razlika u povećanju proizvodnje električne energije. Dok je u proseku povećanje proizvodnje u intervalu do kraja MRK 51%, dotle je na dnevnom nivou to svega 2,45%, kada se posmatra MRK sa isključenjem invertora. Ovaj doprinos povećanju proizvodnje se dalje smanjuje posmatrajući situaciju na godišnjem nivou, ali ne tako drastično. Doprinos MRK povećanju proizvodnje na godišnjem nivou iznosi 1,06%. Ova cifra nije značajna ali je merljiva sa rezultatima proizvođača invertora, koji istražuju načine poboljšanja performansi svojih invertora. Tako, svetski najveća fabrika za proizvodnju invertora SMA Solar poboljšanjem softvera za nalaženje tačke maksimalne snage FN niza postiže povećanje proizvodnje na godišnjem nivou od 1,5% [62]. Dakle i ovako mala povećanja proizvodnje su za oblast korišćenja fotonaponskog pretvaranja energije značajna.

Tabela 5.11 – Proizvodnja električne energije FN elektrane usled izvođenja MRK

POVEĆANJE PROIZVODNJE EL. ENERGIJE [%]		
Mesec	Dnevno	Mesečno
Januar	0,54	0,16
Februar	3,46	1,11
Mart	2,90	1,40
April	4,45	2,00
Maj	4,44	1,51
Jun	1,63	0,99
Jul	2,16	1,20
Avgust	3,73	2,25
Septembar	1,51	0,55
Oktoabar	1,73	0,63
Novembar	2,32	0,83
Decembar	0,51	0,12
Sr. vrednost:	2,45	1,06



Slika 5.41 – Povećanje proizvodnje električne energije na dnevnom i mesečnom nivou u intervalu do kraja MRK

5.6. Analiza rezultata mikrorekonfiguracije

Rezultati simulacije su potvrdili zamisao autora da se može iskoristiti veća snaga FN panela kada se umesto projektovanog punog broja FN panela u nizu, koji su

pod nehomogenim uslovima senčenja, koristi smanjen broj FN panela u nizu, pri čemu su svi izloženi sunčevom zračenju. Pošto se mikrorekonfiguracijom FN niza formira niz koji je homogeno ozračen, karakteristika FN niza poseduje samo jedan maksimum, što invertor bez problema nalazi i na taj način se snaga elektrane povećava u odnosu na slučaj kada su paneli u nizu nehomogeno ozračeni.

Eksperiment izveden na elektrani Fakulteta tehničkih nauka je potvrdio predloženu ideju i teoretsko razmatranje. Tokom eksperimenta su se uočili i nedostaci mikrorekonfiguracije, kao što je kasnije uključenje invertora zbog smanjenog napona, koja je posledica smanjenog broja FN panela. Tokom eksperimenta su ti nedostaci otklonjeni modifikacijom algoritma upravljanja, što je dovelo do povećanja efikasnosti mikrorekonfiguracije.

Prvi rezultati mikrorekonfiguracije su bili iznenađujuće dobri. Rezultati su analizirani samo u periodu do završetka MRK, kao u većini literature koja se bavi sličnom tematikom. Povećanje proizvodnje u proseku je 27% sa MRK bez isključenja invertora, odnosno 51% uz isključenje invertora. Razlog ove razlike je u činjenici da je bez isključenja invertora, zbog smanjenog napona, snaga FN niza manja, uključenje invertora je kasnije i kraće je vreme generisanja energije. Uz to invertor sa smanjenim naponom ima manju efikasnost u intervalu do početka izvođenja MRK. To potvrđuje i efikasnost invertora, koja je nešto niža kada se izvodi MRK bez isključenja invertora u odnosu bez MRK, dok je za nepunih 5% veća kada je MRK sa isključenjem invertora.

Dalja analiza rezultata na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou daje realniju i jasniju sliku o uticaju MRK na proizvodnju električne energije. Na dnevnom nivou kada se analiziraju pojedini meseci dobijaju se značajno različite vrednosti. Ista je situacija i sa rezultatima na mesečnom nivou. Razlog ovih razlika može biti i objektivna i subjektivna. U svakom slučaju prosečne vrednosti nam kazuju da je doprinos relativno mali. Prosečno na dnevnom nivou povećanje proizvodnje je nepunih 2,5%, dok je na godišnjem nivou ono 1%. Međutim da li su ovi procenti zaista značajni? Da bi se dao odgovor na ovo pitanje potrebno je razmotriti instalisane kapacitete FN elektrana.

Na kraju 2014. godine ukupna instalisana snaga FN elektrana u svetu je bila 178GW, s tim da se predviđa godišnje povećanje instalacija u proseku između 40 i 50GW se do 2020. godine. U Evropi do kraja 2014. godine je instalisano 89GW, a predviđa se da će do 2020. godine instalisana snaga dostići vrednost između 121GW i 158GW. Od ukupne instalisane snage FN elektrana u evropskim zemljama sa najvećim kapacitetom instalacija, oko 30% čine male elektrane sa instalacijom na krovu, sa snagama do 10kW [103]. Ovo znači da je ukupna instalisana snaga malih elektrana, koja je po snazi predmet ove teze, oko 26700MW. Uzimajući u obzir prosečnu snagu FN elektrane dolazi se do minimalnog broja instalisanih elektrana od oko 2,7 miliona. Ako se u samo 10% elektrana javlja problem senčenja (iskustvo

autora ovog rada govori da je to znatno veći procenat) jasno se može zaključiti da, zbirno gledano rezultat povećanja proizvodnje usled MRK od 1% je veoma velik doprinos.

6. Zaključak

Sada je više nego jasno da industrijalizacija u prošlosti danas najrazvijenijih zemalja i sadašnja ubrzana industrijalizacija zemalja u razvoju, koja za posledicu ima sve veću potrošnju energije, je kriva za sve veće klimatske promene. Dok je još pre desetak godina bilo sumnje da li čovek izaziva klimatske promene, sada se svi slažu da ubrzanim klimatskim promenama najviše doprinosi ljudski nemar za očuvanje životne sredine. Da bi se ublažile posledice koje klimatske promene izazivaju, krajem 2015. godine je održana konferencija o klimatskim promenama pod pokroviteljstvom UN, uz učešće od 195 zemalja. Kao rezultat konferencije ističe se dogovor koje su zemlje učesnice postigle, da se globalni porast temperature ograniči na 2°C u poređenju sa temperaturom pre početka industrijalizacije. Da bi se ovo ostvarilo zemlje učesnice konferencije su sačinile sveobuhvatni nacionalni plan o klimatskom delovanju. Između ostalih, to je uradila i Srbija. Da li će se ostvariti zacrtani planovi, ostaje da se vidi. U svakom slučaju ova doktorska teza daje mali teoretski i praktičan doprinos u usporavanju klimatskih promena.

Istraživanja iz oblasti fotonaponskog pretvaranja energije se stalno sprovode u cilju povećanja efikasnosti svih njenih elemenata, koji za krajnji produkt imaju proizvodnju električne energije. Počevši od istraživanja novih materijala za fotonaponsko pretvaranje energije, pa preko razvoja efikasnijih FN panela, invertora, pametnih delova elektrana, i sve do integracije elektrana u pametne distribuirane mreže sa mogućnošću skladištenja električne energije, su oblast istraživačke i razvojne mogućnosti. Jedna od aktuelnih oblasti istraživanja je i električno prevezivanje FN panela, radi smanjenja negativnog uticaja promenljivog, nehomogenog zračenja na proizvodnju električne energije. U uvodnom delu rada su ukratko predstavljena trenutna dostignuća i rezultati istraživanja iz ove oblasti, koja se u užoj stručnoj javnosti naziva rekonfiguracija FN panela. Tema ove doktorske teze

je upravo istraživanje novih metoda i analize rada tokom izvođenja rekonfiguracije FN panela, pri čemu se proizvedena električna energija od strane FN elektrane predaje u distributivnu električnu mrežu. Slede zaključci koji su izvedeni na osnovu simulacionih i eksperimentalnih rezultata.

Pre analize uticaja makrokonfiguracije na proizvodnju električne energije u zavisnosti od položaja prepreka nad FN poljem, istražen je uticaj položaja prepreke u zavisnosti od nagibnog ugla FN panela na gubitke ozračenja FN polja. Za sva tri analizirana slučaja prepreka, gubici ozračenja imaju isti tok promene u funkciji nagibnog ugla (slika 4.30). Gubici ozračenja imaju blag pad do nagibnog ugla od 15°, posle čega linearno rastu. Najmanji su gubici ozračenja za položaj prepreke GORE, najveći za položaj prepreke JUG, dok se između nalaze za položaj prepreke DOLE.

Analiza uticaja makrokonfiguracije je vršena na dnevnom, godišnjem nivou i u životnom veku elektrane. Kada se uporede dobijeni rezultati, zaključuje se da se realna slika načina izvođenja makrokonfiguracije u zavisnosti od položaja prepreke nad FN poljem dobija kada se analiza vrši na godišnjem nivou ili u životnom veku elektrane. Ovo je bitno istaći jer se u literaturi koja istražuje rekonfiguraciju FN panela analize u većini slučajeva izvode samo za interval dok traje rekonfiguracija ili eventualno na dnevnom nivou. Razlike u rezultatima makrokonfigurisanja na godišnjem nivou su veoma male, pa se analiza proširila i na duži vremenski interval, a to je pretpostavljen vek trajanja elektrane od 25 godina.

Iz analize proizvodnje na dnevnom nivou zaključuje se da položaj prepreke ima uticaj na kretanje tačke maksimalne snage FN polja (V-TMS i M-TMS), što je i logično, jer kako se menja položaj i nivo senčenja tako se menja i izlazna karakteristika FN polja. Povećanje proizvodnje u zavisnosti od načina izvođenja makrokonfiguracije je u funkciji položaja prepreka. Drugim rečima položaj prepreke u odnosu na FN polje ima uticaj na način makrokonfigurisanja. Što je veći nivo senčenja FN polja to je pozitivan uticaj makrokonfiguracije na povećanje proizvodnje električne energije veći. Najveći uticaj prepreke na smanjenje proizvodnje je ako se ona nalazi južno u odnosu na FN polje. Ovo je u saglasnosti sa gubicima ozračenja koji su za ovu situaciju najveći. Pošto različite varijante makrokonfiguracije različito doprinose povećanju proizvodnje u zavisnosti od godišnjeg doba (najveća međusobna razlika 12%), simulacija se proširila na godišnji nivo.

Kod analize na godišnjem nivou za svaki položaj prepreke i sva četiri načina makrokonfigurisanja menjan je i nagibni ugao FN panela. Treba istaći da je nagibni ugao menjan, ali nije menjan koeficijent pokrivenosti tla, što znači da je površina potrebna za instalaciju FN panela uvek ista. Razlog ovakvog načina analize leži u činjenici da je površina za instalaciju FN panela najčešći ograničavajući faktor za povećanje snage FN elektrane. Razmatrajući uticaj nagibnog ugla zaključuje se da bez obzira na položaj prepreke i način izvođenja makrokonfiguracije najveća proizvodnja

postiže za nagibni ugao od 30°. Ipak, posmatrajući uticaj nagibnog ugla na proizvodnju elektrane za različite konfiguracije invertora (više ili jednoulazni MPPT) ili pravce prostiranja FN niza (IZ ili SJ) uočavaju se male razlike.

Kada se razmotre rezultati makrokonfiguracije za elektranu na fakultetu, potvrđuje se pretpostavka o povećanju pozitivnog uticaja načina izvođenja makrokonfiguracije sa povećanjem nivoa senčenja. Tako za slučaj elektrane na fakultetu najbolji način makrokonfiguracije je inverter sa višeulaznim MPPT i pravcem prostiranja FN niza sever-jug.

Generalno gledano za svaku elektranu treba sprovesti analizu da bi se utvrdila svrsishodnost primene makrokonfiguracije. Naime u nekim slučajevima makrokonfiguracija zahteva dodatna ulaganja u opremu za međusobno spajanje FN panela. Opšti je zaključak da makrokonfiguracija doprinosi povećanju proizvodnje, ali ne značajno. Ipak, ovaj zaključak je relativan. Sve zavisi da li se posmatra interes pojedinca ili šire zajednice. Da nema podsticajnih sredstava investitori ne bi ulagali u izgradnju energana koji koriste obnovljive izvore energije, jer ne nalaze interes u tome. Države, globalno gledano svetska zajednica, imaju interes da uspore klimatske promene, pa daju razne podsticaje.

Tako sa stanovišta investitora različiti načini makrokonfigurisanja praktično ne doprinose bitno povećanju proizvodnje, a samim tim ni povećanju profita. Za ispitivani opšti slučaj najbolji način makrokonfigurisanja sa inverterom sa više MPPT ulaza i pravcu prostiranja FN nizova istok-zapad (IZmppt) u odnosu na druge načine, povećava proizvodnju za maksimalnih 0,5% na godišnjem nivou. Za elektranu na FTN ovo povećanje za višeulazni MPPT inverter i sa pravcem prostiranja FN nizova sever-jug (SJmppt) ovo povećanje je 0,3%. Međutim, globalno gledano zbog brojnosti FN elektrana svaki mali doprinos povećanju proizvodnje je značajan. Ovo će biti pojašnjeno tokom razmatranja zaključaka o mikrorekonfiguraciji.

Slično kao za makrokonfiguraciju i kod mikrorekonfiguracije se javlja značajna razlika u doprinosu povećanja proizvodnje električne energije u zavisnosti od intervala vremena u kom je sprovedena analiza. Zbog toga se u ovom zaključku neće razmatrati rezultati postignuti u intervalu do završetka mikrorekonfiguracije.

Povećanje proizvodnje u odnosu na dnevni nivo zbog izvođenja mikrorekonfiguracije, prvenstveno zavisi od ukupne energije zračenja za razmatrani dan. Zbog toga je analiza urađena za stvarnu prosečnu dnevnu proizvodnju, za svaki mesec ponaosob. Tako su dobijeni realniji rezultati doprinosa povećanju energije na dnevnom nivou. Ono što je uočljivo kada se upoređuju dnevni doprinosi (slika 5.41), je to, da se po mesecima gledano vrednosti dosta razlikuju. Jedan od razloga je i taj da je mikrorekonfiguracija rađena jednom ili dva puta tokom svakog meseca. Uslovi pod kojima je mikrorekonfiguracija izvođena su mogli biti značajno različiti. Na primer, atmosferski uslovi se leti više razlikuju u ranim jutarnjim satima nego tokom dana,

kao i od jutra do jutra, pa na primer povećana vlažnost vazduha u jutarnjim satima prouzrokuje rosu na FN panelima, koja smanjuje prodiranje sunčevih zraka. Ipak, tako postignuta proizvodnja električne energije sa izvedenom mikrorekonfiguracijom se uzimaju za osnov za dalje proračune na mesečnom i godišnjem nivou. Razlog leži u činjenici da se može uočiti uticaj načina izlaženja FN nizova iz senke na rezultate makrorekonfiguracije. Istovremeno broj sunčanih jutara koji je jedan od činioca proizvoda za dobijanje proizvodnje na mesečnom nivou, je znatno veći od činioca koji predstavlja doprinos povećanja proizvodnje. Razlika između dve vrste činioca se kreće u granicama između 10 i 100 puta. Na taj način značaj uticaja broja sunčanih jutara postaje dominantan. Kada se izvrši usrednjavanje mesečnih povećanja proizvodnje energije na godišnjem nivou, dolazi se do vrednosti od je 1%. Ova vrednost je nešto veća u odnosu na makrokonfiguraciju (0,5%) ali je uporedljiva sa dobijenim rezultatima.

Sledi pojašnjenje o značaju dobijenih rezultata čije su vrednosti relativno male. U radu je već bilo spomenuto da je ukupna instalisana snaga malih elektrana na teritoriji Evrope, koja je po nivou snage predmet ove teze, oko 26.700MW. Ako se problem senčenja javlja u samo 10% elektrana tada se barata sa snagom od 2,67GW. Prosečna specifična potrošnja za razmatrane zemlje je minimalno 1.050kWh/kWp, tako da razmatrane elektrane proizvode godišnje minimalno oko 2.804GWh električne energije. Jednoprocentno povećanje proizvodnje znači plus 28GWh električne energije na godišnjem nivou. Ako se zna da se za svaki kWh proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora emituje za oko 1,5kg ugljen-dioksida manje u atmosferu, onda se lako dolazi do podatka o smanjenju emisije usled izvođenja mikrorekonfiguracije. Na godišnjem nivou bi se emitovalo minimalno za oko 42.000 tone ugljen-dioksida manje. U životnom veku ovih elektrana to znači minimum 1.000.000 tona manje CO₂.

Još jedna značajna potvrda da relativno mali procenti poboljšanja i nisu tako mali je i ta da najrenomiraniji svetski proizvođač invertora SMA Solar ističe povećanje proizvodnje na godišnjem nivou od 1,5%, usled poboljšanja softvera za nalaženje tačke maksimalne snage FN niza.

Dalji mogući pravci istraživanja koji su sprovedeni u ovom radu bili bi:

- istraživanje značaja istovremenog izvođenja makrokonfiguracije i mikrorekonfiguracije. U vezi ovoga se može zaključiti na osnovu dosad sprovedenih istraživanja da ova međusobna kombinacija nema značaj u zimskom periodu,
- razvijanje hardvera za automatsko izvođenje mikrorekonfiguracije sa minimalnim brojem senzora. U ovom radu mikrorekonfiguracije je rađena ručno. Predložen hardver i algoritam mikrorekonfiguracije omogućava detekciju trenutka rekombinacije bez upotrebe senzora zračenja,

- razvoj softvera sa najnovijim algoritmima za upravljanje kao što su fuzzy logika ili primena neuralnih mreža,
- integracija hardvera i softvera mikrorekonfiguracije u sisteme pametnih kuća sa mogućnošću skladištenja električne energije,
- proširenje mikrorekonfiguracije na FN polja.

7. *Literatura*

- [1] RENI, "PV power plants 2013", Solarpraxis AG.
- [2] IEA, "2014 Snapshot of Global PV Markets", PVPS, 2015.
- [3] Max Born, "Natural Philosophy of Cause and Chance", Oxford University Press, 1949.
- [4] Alfred Scharff Goldhaber, Michael Martin Nieto, "Photon and graviton mass limits", American Physical Society, DOI:10.1103, January–March 2010.
- [5] Stanford Encyclopedia of Philosophy, "Newton's Philosophy", 2014, <http://plato.stanford.edu/entries/newton-philosophy/>.
- [6] <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/science>.
- [7] C. Deline, "Partially Shaded Operation of a Grid-Tied PV System", National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [8] Tyson Den Herder, "Design and Simulation of Photovoltaic Super System Using Simulink", 2006.
- [9] M. Abdulkadir, A. S. Samosir, A. H. M. Yatim, "Modeling and simulation based approach of photovoltaic system in simulink model", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 7, No 5, 2012.
- [10] M.R. AlRashidi, M.F. AlHajri, K.M. El-Naggar, A.K. Al-Othman, "A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells", Solar Energy 85, pp. 1543-1550, 2011.
- [11] Kashif Ishaque, Zainal Salam, Hamed Taheri, Syafaruddin, "Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model", Simulation Modelling Practice and Theory 19, pp. 1613–1626, 2011.
- [12] Sushen Narkhede, Rajpritam, "Modeling Of Photovoltaic Array", Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, 2004.

- [13] A. Metatla, N. Talbi, "On the modelling of photovoltaic generators: a Comparative Study", Eight International Conference and Exhibition on Ecological and Renewable Energies, 2013.
- [14] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models", 7th International ELECTRIMACS Congress, Montreal, 2002.
- [15] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE transactions on power electronics, VOL. 24, pp. 1198-1208, 2009.
- [16] M. D. Di Piazza, A. Raggusa, M. Luna, G. Vitale, "A Dinamic Model of a Photovoltaic Generator Based on Experimental Data", ICREPQ, Granada, 2010.
- [17] R. Ramaprabha, B. L. Mathur, "Impact of Partial Shading on Solar PV Module Containing Series Connected Cells", International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 7, 2009.
- [18] Clifford W. Hansen^{1a}, Amanda Luketa-Hanlin², Joshua S. Stein^{1b} "Sensitivity of single diode models for photovoltaic modules to method used for parameter estimation", 2013.
- [19] Tarak Salmi, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli, Ahmed Masmoudi, "MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell", International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 2, No. 3, 2012.
- [20] Eduardo Román, Ricardo Alonso, Pedro Ibañez, Member, Sabino Elorduizapatarietxe, Damián Goitia, "Intelligent PV module for grid-connected PV systems", IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 4, 2006.
- [21] Jennifer Luoma, Jan Kleissl, Keenan Murray, „Optimal inverter sizing considering cloud enhancement”, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, San Diego, United States, 2011.
- [22] M. Petkov, D. Markova, St. Platikanov, "Modelling of electrical characteristics of photovoltaic power supply sources", Renewable Energy Sources, II-2, pp. 171-177, 2011.
- [23] Ahmed A. El Tayyan, "PV system behavior based on datasheet", Journal of Electron Devices, Vol. 9, pp. 335-341, 2012.
- [24] PVsyst SA Svajcarska, Softver PVsyst V. 5.74.
- [25] De Soto, S. A. Klein, W. A. Beckman "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy 80, pp. 78-88, 2006.
- [26] Fabrizio Olita, "Advanced control and condition monitoring pv systems", Master Thesis, pp. 1-51, 2012.
- [27] Ahmed A. ElTayyan, "A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system", Turkish Journal of Physics 37, pp. 121-131, 2013.
- [28] Geoff Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model", AUPEC 2000, pp. 138-143, 2000.

- [29] F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, A. M. L. Lanzolla, M. Spadavecchia, "Parameters Estimation for a Model of Photovoltaic Panels", XIX IMECO World Congress, Portugal, 2009.
- [30] Chiou-Jye Huang, Mao-Ting Huang, Chung-Cheng "A Novel Power Output Model for Photovoltaic Systems", International Journal of Smart Grid and Clean Energy, Vol. 2, No. 2, pp. 139-147, 2013.
- [31] A. J. Anderson, "Photovoltaic translation Equations: A New Approach Final Subcontract Report", NRLE/TP-411-20279, 1996.
- [32] V. A. Katić, Z. Čorba, D. Milićević, B. Dumnić, B. Popadić "Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu", Tehnika, god. 70, Br.4, 2015, pp. 655-662.
- [33] E. Čorba, V. Katić, Z. Čorba, "Rad fotonaponskih sistema pri delimičnom senčenju", Zbornik radova FTN, 2013.
- [34] A. Ibrahim, "Effect of Shadow and Dust on the Performance of Silicon Solar Cell", Journal of Basic and Applied Scientific Research 3, pp. 222-230, 2011.
- [35] Jayanta Deb Mondol, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton, "The Effect of Low Insolation Conditions and Inverter Oversizing on the Long-Term Performance of a Grid-Connected Photovoltaic System", Progress in Photovoltaics, Research and Applications, 15 . pp. 353-368. 2007.
- [36] R. E. Hanitsch, Detlef Schulz, Udo Siegfried, "Shading Effects on Output Power of Grid Connected Photovoltaic Generator Systems", Power Engineering, pp. 93-99, 2001.
- [37] F. Martinez-Moreno, J. Muñoz, E. Lorenzo, "Experimental model to estimate shading losses on PV arrays", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 94, Issue 12, pp. 2298–2303, 2010.
- [38] Md. Nazmul Alam, "Shadow Effect On 3D City Modelling For Photovoltaic Cells", PhD Research, 2011.
- [39] Annalisa Di Piazza, Maria Carmela Di Piazza, Gianpaolo Vitale, "A Kriging-Based Partial Shading Analysis in a Large Photovoltaic Field for Energy Forecast", ICREPQ'09, 2009.
- [40] Eloy Díaz-Dorado, Andrés Suárez-García, Camilo Carrillo, José Cidrás, "Influence of the PV modules layout in the power", EPE Conference, 2013.
- [41] V. Di Dio, D. La Cascia, C. Rando, G. Ricco Galluzzo, "A new control system prototype for the energy production maximization of a unequally irradiated PV system", EVER 2011, Monaco, Palermo, 2011.
- [42] Achim Voyte, Johan Nijs, Ronnie Belmans, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results", Solar Energy 74, pp. 217-233, 2003.
- [43] Hiren Patel, Vivek Agarwal, "MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics" , IEEE Transactions on energy conversion, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, 2008.

- [44] Kun Ding, XinGao Bian, HaiHao Liu, "Matlab-simulink based modeling to study the influence of nonuniform insolation photovoltaic array", APPEEC 2011, pp. 1-4, 2011.
- [45] Paula dos Santos, Eduardo M.Vicente, Enio R. Ribeiro, "Relationship between the shading position and the output power of a photovoltaic panel", cobep 2011, Publisher IEEE, pp. 876-681, 2011.
- [46] Hadj Bourdoucen , Adel Gastli, "Tuning of PV array layout configurations for maximum power delivery", World Academy of Science, Engineering and Technology 46, pp. 753-759, 2008.
- [47] A. Driesse, B. Harris, "A Real-World Performance Comparion Between Parallel-Only And Series/Parallel Array Configurations Under Non-Uniform Conditions", 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2009.
- [48] Lijun Gao, Roger A. Dougal, Shengyi Liu and Albena P. Iotova, "Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions", IEEE Tansactions on Industrial Electronics, VOL. 56, NO. 5, pp. 1548-1556, 2009.
- [49] Dzung D. Nguyen, Brad Lehman, "Modeling and Simulation of Solar PV Arrays under Changing Illumination Conditions", 2006 IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, pp. 295-299, 2006.
- [50] AnssiMaki, Seppo Valkealahti, "Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, No. 1, pp. 173-183, 2002.
- [51] Rajiv Gandhi Salai, Badrilal Mathur, Rajiv Gandhi Salai, "Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules Ramaprabha Ramabadran", CCSE, Vol. 3, No.10, 2009.
- [52] R. Ramaprabha, B. L. Mathur, "A comprehensive review and analysis of solar photovoltaic array configurations under partial shaded conditions", International Journal of photoenergy, 2012.
- [53] R. Ramaprabha, Badrilal Mathur, Madhuri Murthy, S.Madhumitha, "New configuration of solar photo voltaic array to address partial shaded conditions", Third International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, pp. 328-333, 2010.
- [54] D. Picault, B. Raison, S. Bacha, J. de la Casa, J. Aguilera, "Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses", Solar Energy 84, pp. 1301-1309, 2010.
- [55] Alessandro Marmo, Guillermo Velasco Quesada, "Experimental Validation of TEAM Concept in PV Grid-Connected Systems" , Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [56] Nevzat Onat, "Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems", International Journal of Photoenergy, Vol. 2010, Article ID 245316, doi:10.1155/2010/245316

- [57] Gerd Bettenwort, Wilfried Groote, Ralf Juchem, Christian Kühnel, Joachim Laschinski, Gerald Leonhardt, "PV inverter integrated active shadow tracking guarantees maximum energy yield", 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia, Spain.
- [58] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Optimal control of photovoltaic arrays", *Mathematics and Computers in Simulation*, 2012.
- [59] Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea, "Practical Guide to Implementing Solar Panel MPPT Algorithms", Microcip Technology inc., Application example AN1521, 2012.
- [60] Roberto Faranda, Sonia Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems", *WSEAS Transactions on Power Systems*, Issue 6, Vol. 3, 2008.
- [61] SMA Solar Technology AG, "Shade management", Technical Information, www.sma.de/en/
- [62] SMA Solar Technology AG, "OptiTrac", Technical Information, www.sma.de/en/
- [63] Jonathan Storey, Peter R. Wilson, "The Optimized-String Dynamic Photovoltaic Array", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1768-1776, 2014.
- [64] Jen-Hung Huang, Ye Zhao, Brad Lehman, "Fast Switching Reconfigurable Photovoltaic Modules Integrated Within DC-DC Converters", *Control and Modeling for Power Electronics*, IEEE 14th Workshop, 2013.
- [65] Ziyad M. Salameh, Fouad Dagher, "The effect of electrical array reconfiguration water pump on the performance of a pv-powered volumetric", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 5, no. 4, pp. 653-658, 1990.
- [66] J. P. Storey, P. R. Wilson, and D. Bagnall, "Improved optimization strategy for irradiance equalization in dynamic photovoltaic arrays", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 6, pp. 2946-2956, June 2013.
- [67] M. Alahmada,, M. A. Chaabanb, S. kit Lau, J. Shi, J. Neal, "An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time" *Solar Energy*, Vol. 86, No. 3, pp. 951- 963, 2012.
- [68] V. Vaidya and D. Wilson, "Maximum power tracking in solar cell arrays using time-based reconfiguration", *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 74- 81, 2013.
- [69] M. Z. S. El-Dein, M. Kazerani, and M. M. A. Salama, "Optimal photovoltaic array reconfiguration to reduce partial shading losses", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 145-153, 2013.
- [70] Y. Auttawaitkul, B. Pungsiri, K. Chammongthai, and M. Okuda, "A method of appropriate electrical array reconfiguration management for photovoltaic powered car", *Proc. IEEE Asia-Pacific Conf. Circuits and Systems—APCCAS*, pp. 201-204, 1998.
- [71] R. Sherif, K. Boutros. (2002, Feb. 26). "Solar module array with reconfigurable tile", U.S. patent 6,350,944. Available: <http://www.google.com/patents/US6350944>.

- [72] G. Spagnuolo, G. Petrone, B. Lehman, R. Paja, Y. Zhao, O. Gutierrez, "Control of Photovoltaic Arrays: Dynamical reconfiguration for fighting mismatched conditions and meeting load requests", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, issue 1, pp. 62-76, 2015.
- [73] Xue Lin, Yanzhi Wang, Siyu Yue, Donghwa Shin, Naehyuck Chang, Massoud Pedram, „Near-Optimal, Dynamic Module Reconfiguration in a Photovoltaic System to Combat Partial Shading Effects”, *Proceedings of the 49th Annual Design Automation Conference*, pp. 516-521, 2012.
- [74] P. Romano, R. Candela, M. Cardinale, V. Li Vigni, D. Musso, E. Riva Sanseverino, "Optimization of photovoltaic energy production through an efficient switching matrix", *Journal of Sustainable Development of Energy*, Vol. 1, Issue 3, pp 227-236, 2013.
- [75] Jonathan Storey, Peter R. Wilson, Darren Bagnall, "Simulation Platform for Dynamic Photovoltaic Arrays", *Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE*, 2013.
- [76] Guillermo Velasco-Quesada, Francisco Guinjoan-Gispert, Robert Piqué-López, Manuel Román-Lumbreras, Alfonso Conesa-Roca, „Electrical PV Array Reconfiguration Strategy for Energy Extraction Improvement in Grid-Connected PV Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, 2009.
- [77] Guillermo Velasco, Francesc Guinjoan, Robert Piqué, "Grid-connected PV systems energy extraction improvement by means of an electric array reconfiguration (EAR) Strategy: Operating principle and experimental results", *Power Electronics Specialists Conference, IEEE*, pp. 1983–1988, 2008.
- [78] Ye Zhao, Ling Yang, Brad Lehman, "Reconfigurable Solar Photovoltaic Battery Charger Using a Switch Matrix" *34th IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1-7, 2012.
- [79] Dzung Nguyen, Brad Lehman "A Reconfigurable Solar Photovoltaic Array Under Shadow Conditions", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE*, pp. 980–986, 2008.
- [80] Dzung Nguyen, Brad Lehman, "An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 55, Issue 7, pp. 2644-2654, 2008.
- [81] Dzung D. Nguyen, Brad Lehman, Sagar Kamarthi, "Performance Evaluation of Solar Photovoltaic Arrays Including Shadow Effects Using Neural Network", *Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE 2009*, pp. 3357-3362, 2009.
- [82] Dung Duc Nguyen, "Modeling and reconfiguration of solar photovoltaic arrays under non-uniform shadow conditions", *Electrical Engineering Dissertation, Northeastern University, Boston*, 2008.
- [83] M. A. Chaaban, "Adaptive photovoltaic configurations for decreasing the electrical mismatching losses", *University of Nebraska – Lincoln, Dissertation*, 2011.

- [84] Paula dos Santos, Eduardo M. Vicente, Enio R. Ribeiro, "Reconfiguration methodology of shaded photovoltaic panels to maximize the produced energy", Power Electronics Conference, Brasil, pp. 700-706, 2011.
- [85] Renewable Insight, "PV Power Plants 2013", Industry Guide, 2013.
- [86] Bruno Burger, Ricardo Riithe, "Site-Dependent System Performance And Optimal Inverter Sizing of Grid-Connected PV Systems", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems SE, 2005.
- [87] G. Velasco, R. Piqué, F. Guinjoan, F. Casellas, J. de la Hoz, "Power sizing factor design of central inverter PV grid-connected systems: a simulation approach", 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010.
- [88] S. Baekhoej, J. Pedersen, F. Blaabjerg, "Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules", Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, pp. 782 - 788 vol. 2, 2002.
- [89] EPS, "Pravila o radu distributivnog sistema", Verzija V1, 2010.
- [90] E. Skoplaki, J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations", Solar Energy 83, pp. 614-624. 2009.
- [91] Gracia Amillo A., Huld T., Müller R., "A New Database of Global and Direct Solar Radiation Using the Eastern Meteosat Satellite, Models and Validation", Remote Sensing 6, pp. 8165-8189, 2014.
- [92] André Mermoud, Bruno Wittmer, "PVsyst User's Manual", 2014.
- [93] Díaz-Dorado, E. Suárez-García, A. Carrillo, C. Cidrás, J, "Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes", Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), pp. 134-139, 2010.
- [94] Vijayalekshmy S., Bindu G. R., S. Rama Iyer, "Estimation of Power Losses in Photovoltaic Array Configurations under Passing Cloud Conditions", Proceedings of the World Congress on Engineering 2014, Vol. I, 2014.
- [95] Yi-Hua Liu, Jing-Hsiao Chen, Jia-Wei Huang, Global "Global maximum power point tracking Algorithm for PV systems under partially shaded conditions using the segmentation search method", Solar Energy, Volume 103, pp. 350-363, 2014.
- [96] SMA Solar Technology AG: "Shade management", UEN101210
- [97] Vojin Cvekić, "Elektronika I – Poluprovodnički elementi", Naučna Knjiga, 1983.
- [98] International Electrotechnical Commission: "Measurement principles for terrestrial photovoltaic solar devices with reference spectral irradiance data", 2nd edition, No. 60904-3, 2008.
- [99] Indian Standard, "Procedures ,for temperature and irradiance corrections to measured i-v characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices", 2005.
- [100] <http://www.photon.info>.

- [101] <http://meteonorm.com>.
- [102] The German Energy Society, "Planning and Installing Photovoltaic Systems", 2012.
- [103] Solar Power Europe, "Global Market Outlook 2015-2019", EPIA, 2015.
- [104] J. Marcos, L. Marroyo, E. Lorenzo, M. García, „Power output fluctuations in large PV plants”, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Instituto de Energía Solar, Grupo de Sistemas, ETSI Telecomunicación, 2012.
- [105] G. Velasco, J.J. Negroni, F. Guinjoan, R. Piqu, Irradiance equalization method for output power optimization in plant oriented grid-connected PV generators”, Technological Metropolitan University, Polytechnic University of Catalonia-Barcelona Spain, 2005.
- [106] Luiz Fernando Lavado Villa, Tien Phu Ho, Jean-Christophe Crebier and Bertrand Raison, "A power electronics equalizer application for partially shaded photovoltaic modules" , Grenoble Electrical Engineering Laboratory Saint-Martin d'Hères, France, 2012.
- [107] L.M. Ayompe, A. Duffy, S.J. McCormack, M. Conlon, "Validated real-time energy models for small-scale grid-connected PV-systems" , Department of Civil and Structural Engineering, School of Civil and Building Services, Dublin Institute of Technology, Bolton Street, Dublin 1, Ireland, Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland, School of Electrical Engineering Systems, Dublin Institute of Technology, Kevin St, Dublin 8, Ireland, 2010.
- [108] G. Notton, V. Lazaro, L. Stoyanov, "Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations", Sofia, Bulgaria, 2009.
- [109] Niket Thakkar, Daniel Cormode, Vincent P.A. Lonij, Steve Pulver and Alexander D. Cronin, „A Simple Non-Linear Model For The Effect Of Partial Shade On PV Systems”, University of Arizona, Tucson, USA, 2010
- [110] Woojoo Lee, Younghyun Kim, Yanzhi Wang, Naehyuck Chang, Massoud Pedram, and Soohee Han, „Versatile High-Fidelity Photovoltaic Module Emulation System”, University of Southern California, CA, USA; Seoul National University, Korea, Konkuk University, Korea, 2011
- [111] Achim Woytea , Johan Nijss, Ronnie Belmans, „Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results”, Katholieke Universiteit Leuven, Department of Electrical Engineering, 2003

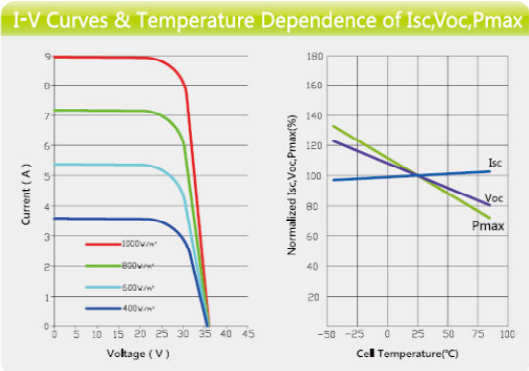
8. Prilog

1. Fabrički podaci FN panela proizvođača Jinko Solar, oznake JKM240P-60,
2. Fabrički podaci invertora proizvođača SMA, oznake STP 8000-TL,
3. Fabrički podaci invertora proizvođača ABB, oznake TRIO 27.6-TL,
4. Fabrički podaci instrumenta za ispitivanje FN panela i FN sistema proizvođača HT Italia, oznake Solar I-V,
5. Fabrički podaci instrumenta za merenje parametara kvaliteta električne energije proizvođača Chauvin Arnoux, oznake C.A 8332B QUALISTAR,
6. Fabrički podaci logera proizvođača NATIONAL INSTRUMENTS, oznake NI USB-6009,
7. Prilagodna U/I kartica za logger NI USB-6009,
8. Prikaz obeleženih FN panela FN nizova,
9. Slike senčenih FN nizova i priključenih mernih instrumenata,
10. Grafički prikaz dnevne promene izlazne snage invertora sa i bez MRK.

1. Fabrički podaci FN panela proizvođača Jinko Solar, oznake JKM240P-60

SPECIFICATIONS						
Module Type	JKM-220P	JKM-225P	JKM-230P	JKM-235P	JKM-240P	JKM-245P
Maximum Power (Pmax)	220Wp	225Wp	230Wp	235Wp	240Wp	245Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	29.2V	29.4V	29.6V	29.8V	30V	30.2V
Maximum Power Current (Imp)	7.53A	7.65A	7.78A	7.89A	8.01A	8.12A
Open-circuit Voltage (Voc)	36.6V	36.7V	36.8V	36.9V	37.2V	37.4V
Short-circuit Current (Isc)	8.10A	8.25A	8.35A	8.47A	8.56A	8.69A
Cell Efficiency(%)	15.50%	15.75%	16.00%	16.50%	17.00%	17.25%
Module Efficiency(%)	13.44%	13.74%	14.05%	14.35%	14.66%	14.97%
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C					
Maximum system voltage	600V (UL) /1000V (IEC) DC					
Maximum rated current series	15A					
Power tolerance	±3%					
Temperature coefficients of Pmax	-0.48%/°C					
Temperature coefficients of Voc	-0.33%/°C					
Temperature coefficients of Isc	0.04%/°C					
Nominal operating cell temperature (NOCT)	48±2°C					

STC: Irradiance 1000W/m² Module Temperature 25°C AM=1.5

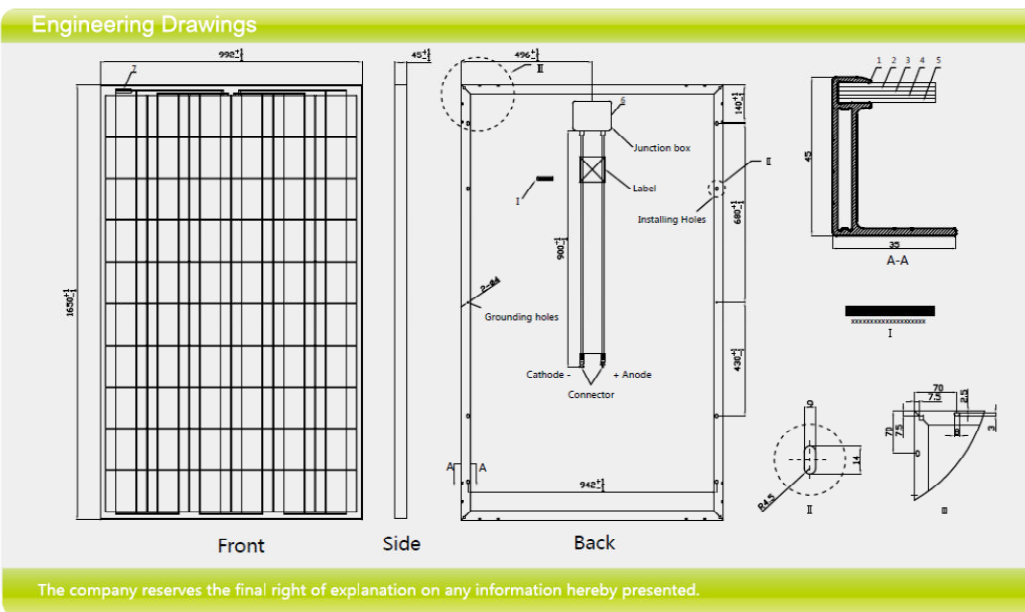


Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline 156×156mm (6 inch)
No. of cells	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×45mm (65.00×39.05×1.77 inch)
Weight	19.0kg (41.9 lbs.)
Front Glass	3.2mm , High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP65 Rated
Output Cables	TÜV 1×4.0mm ² / UL 12AWG, Length:900mm

Packaging Configuration

Quantity/Pallet , Quantity/40'HQ Container	24pcs/pallet ,672 pcs/40'HQ
Quantity/Pallet , Quantity/20'ft Container	20 pcs/pallet ,240pcs/20'ft



2. Fabrički podaci invertora proizvođača SMA, oznake STP 8000-TL

Technical Data	Sunny Tripower 8000TL	Sunny Tripower 10000TL
Input (DC)		
Max. DC power (@ cos φ=1)	8200 W	10200 W
Max. input voltage	1000 V	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	320 V - 800 V / 600 V	320 V - 800 V / 600 V
Min. input voltage / initial input voltage	150 V / 188 V	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	22 A / 11 A	22 A / 11 A
Max. input current per string input A** / input B**	33 A / 12.5 A	33 A / 12.5 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:4; B:1	2 / A:4; B:1
Output (AC)		
Rated power (@ 230 V, 50 Hz)	8000 W	10000 W
Max. apparent AC power	8000 VA	10000 VA
Nominal AC voltage	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V
Nominal AC voltage range	160 V - 280 V	160 V - 280 V
AC power frequency / range	50 Hz, 60Hz / -6 Hz ... +5 Hz	50 Hz, 60Hz / -6 Hz ... +5 Hz
Rated grid frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Max. output current	16 A	16 A
Power factor at rated power	1	1
Adjustable displacement factor	0.8 overexcited... 0.8 underexcited	0.8 overexcited... 0.8 underexcited
Phase conductors / connection phases	3 / 3	3 / 3
Efficiency		
Max. efficiency / European efficiency	98.1 % / 97.5 %	98.1 % / 97.7 %
Protection		
Input-side disconnection device	●	●
Ground-fault monitoring / grid monitoring	● / ●	● / ●
DC surge arrester Type II, can be integrated	○	○
DC reverse-polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -	● / ● / -
All-pole sensitive residual current monitoring unit	●	●
Protection class (according to IEC 62103) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III	I / III
General Data		
Dimensions (W / H / D)	665 / 690 / 265 mm (26.2 / 27.2 / 10.4 in)	665 / 690 / 265 mm (26.2 / 27.2 / 10.4 in)
Weight	64 kg / 141.1 lb	64 kg / 141.1 lb
Operating temperature range	-25 °C ... +60 °C / -13 °F ... +140 °F	-25 °C ... +60 °C / -13 °F ... +140 °F
Noise emission (typical)	51 dB(A)	51 dB(A)
Self-consumption at night	1 W	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / OptiCool	Transformerless / OptiCool
Degree of protection / degree of protection of connection area (according to IEC 60529)	IP65 / IP54	IP65 / IP54
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100 %	100 %
Features		
DC terminal	SUNCLIX	SUNCLIX
AC terminal	Spring-type terminal	Spring-type terminal
Display	Graphic	Graphic
Interface: RS485 / Bluetooth	○ / ●	○ / ●
Warranty: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 years	● / ○ / ○ / ○ / ○	● / ○ / ○ / ○ / ○
Multi-function relay	●	●
Certificates and approvals (more available on request)	CE, VDE0126-1-1, G83/1-1, RD 1633/2000, RD 661/2007, G59/2, PPC, AS4777, EN 50438*, C10/11, PPDS	IEC 61727, ENEL-Guida, UTE C15-712-1
Type designation	STP 8000TL-10	STP 10000TL-10

3. Fabrički podaci invertora proizvođača ABB, oznake TRIO 27.6-TL

Additional highlights

- Integrated string combiner with different options of configuration which include DC and AC disconnect switch in compliance with international standards (-S2, -S2F and -S2X versions)
- Natural convection cooling for maximum reliability
- Outdoor enclosure for unrestricted use under any environmental conditions
- Capability to connect external sensors for monitoring environmental conditions
- Availability of auxiliary DC output voltage (24V, 300mA)



Technical data and types

Type code	TRIO-20.0-TL-OUTD	TRIO-27.6-TL-OUTD
Input side		
Absolute maximum DC input voltage ($V_{max,abs}$)	1000 V	
Start-up DC input voltage (V_{start})	360 V (adj. 250...500 V)	
Operating DC input voltage range ($V_{domin...V_{domax}}$)	0.7 x V_{start} ...950 V	
Rated DC input voltage (V_{dc})	620 V	
Rated DC input power (P_{dc})	20750 W	28600 W
Number of independent MPPT	2	
Maximum DC input power for each MPPT ($P_{MPPT,max}$)	12000 W	16000 W
DC input voltage range with parallel configuration of MPPT at P_{dc}	440...800 V	500...800 V
DC power limitation with parallel configuration of MPPT	Linear derating from max to null [800V< V_{MPPT} <950V]	
DC power limitation for each MPPT with independent configuration of MPPT at P_{dc} , max unbalance example	12000 W [480V< V_{MPPT} <800V] the other channel: P_{dc} -12000W [350V< V_{MPPT} <800V]	16000 W [500V< V_{MPPT} <800V] the other channel: P_{dc} -16000W [400V< V_{MPPT} <800V]
Maximum DC input current ($I_{dc,max}$) / for each MPPT ($I_{MPPT,max}$)	50.0 A / 25.0 A	64.0 A / 32.0 A
Maximum input short circuit current for each MPPT	30.0 A	
Number of DC inputs pairs for each MPPT	1 (4 in -S2X and -S2F Versions)	1 (5 in -S2X and -S2F Versions)
DC connection type	Tool Free PV connector WM / MC4 (Screw terminal block on standard and -S2 versions)	
Input protection		
Reverse polarity protection	Inverter protection only, from limited current source, for standard and -S2 versions, and for fused versions when max 2 strings are connected	
Input over voltage protection for each MPPT - varistor	2	
Input over voltage protection for each MPPT - plug in modular surge arrester (-S2X version)	3 (Class II)	
Photovoltaic array isolation control	According to local standard	
DC switch rating for each MPPT (version with DC switch)	40 A / 1000 V	
Fuse rating (versions with fuses)	15 A / 1000 V	
Output side		
AC grid connection type	Three phase 3W or 4W+PE	
Rated AC power (P_{ac} @ $\cos\phi=1$)	20000 W	27600 W
Maximum AC output power ($P_{ac,max}$ @ $\cos\phi=1$)	22000 W ⁽⁸⁾	30000 W ⁽⁴⁾
Maximum apparent power (S_{max})	22200 VA	30000 VA
Rated AC grid voltage ($V_{ac,r}$)	400 V	
AC voltage range	320...480 V ⁽¹⁾	
Maximum AC output current ($I_{ac,max}$)	33.0 A	45.0 A
Contributory fault current	35.0 A	46.0 A
Rated output frequency (f_r)	50 Hz / 60 Hz	
Output frequency range ($f_{min...f_{max}}$)	47...53 Hz / 57...63 Hz ⁽²⁾	
Nominal power factor and adjustable range	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{ac}=20.0$ kW, ± 0.8 with max 22.2 kVA	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{ac}=27.6$ kW, ± 0.8 with max 30 kVA
Total current harmonic distortion	< 3%	
AC connection type	Screw terminal block, cable gland PG36	
Output protection		
Anti-islanding protection	According to local standard	
Maximum AC overcurrent protection	34.0 A	46.0 A
Output overvoltage protection - varistor	4	
Output overvoltage protection - plug in modular surge arrester (-S2X version)	4 (Class II)	
Operating performance		
Maximum efficiency (η_{max})	98.2%	
Weighted efficiency (EURO/CEC)	98.0% / 98.0%	
Feed in power threshold	40 W	
Stand-by consumption	< 8W	

2 ABB solar inverters | Product flyer for TRIO-20.0/27.6-TL-OUTD

4. Fabrički podaci instrumenta za ispitivanje FN panela i FN sistema proizvođača HT Italia, oznake Solar I-V

1. SOLAR I-V MAIN FEATURES

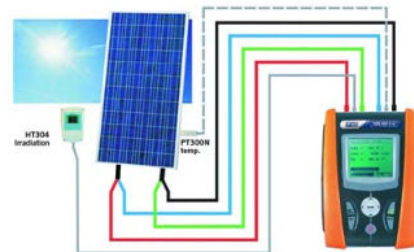


SOLAR I-V: use as PV certifier

SOLAR I-V performs all tests on Single phase PV plants by using of SOLAR-02 remote unit which, after a preliminary synchronisation, save in independent way the values of irradiance and temperature. Only at the end of test the remote unit should be connected via wireless RF with the master to download the recorded data

SOLAR I-V: use as I-V curve checker

SOLAR I-V allows the on field measurement of I-V curve as well as of the main parameters of a single module and of a whole photovoltaic system up to a maximum of 1000V and 10A



With SOLAR-02 remote unit the irradiance and temperature measured values are shown at display also in independent mode (ideal solution during a pre-test on installation) besides test/recording with SOLAR I-V

The HT304N reference cell permits to performs solar irradiance measurements both on PV modules in Monocrystalline and Polycrystalline silicon material



5. Fabrički podaci instrumenta za merenje parametara kvaliteta električne energije proizvođača Chauvin Arnoux, oznake C.A 8332B QUALISTAR

PRESENTATION

Designed for Electrical Energy departments and Maintenance services in industrial and administrative buildings, the Qualistar C.A 8332 and C.A 8334 give an instantaneous image of the main characteristics of the quality of your electrical network.

These instruments also provide numerous calculated values and processing functions in compliance with standards in use (EN 50160, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7).

Principal parameters measured:

- TRMS AC+DC voltage: single voltage up to 480 V ; phase-phase voltage up to 830 V.
- TRMS AC, AC+DC current up to 6500 A (according to sensors used).
- Peak voltage and current.
- Frequency from 40 to 70 Hz.
- Active, reactive and apparent power per phase and their aggregate.
- Active, reactive, consumed and produced energy.
- Harmonics for voltage, current, or power up to the 50^m order.

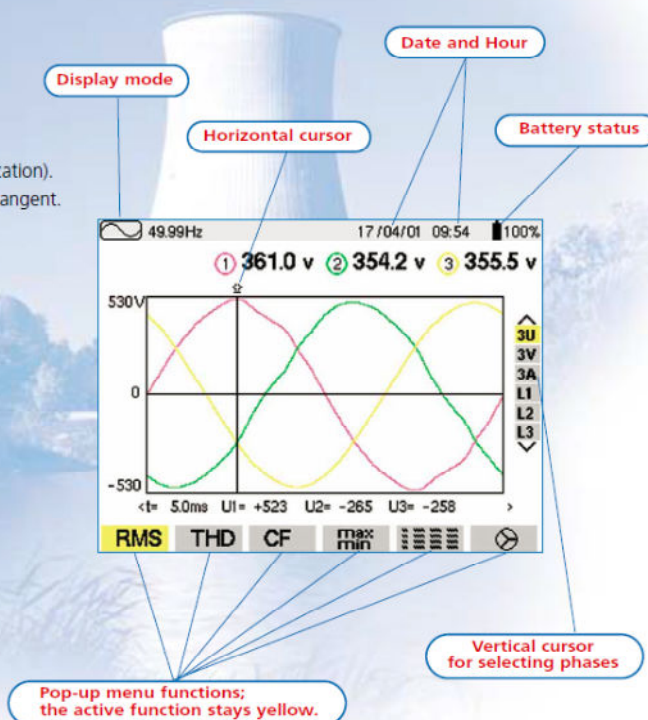
Additional functions:

- Graphic data processing.
- Alarms, transients.
- Recording, dating and characteristics of disturbances (swells, dips and interruptions, etc.)
- Data storage.
- Immediate screen printout to printer.
- Screen storage.
- Optical link communication.

Principal values computed:

- Neutral current.
- Crest factors for current and voltage.
- K factors for current (transformer application).
- Power factor, displacement factor and tangent.
- Short-term voltage flicker.
- Voltage and current unbalance.
- Total harmonic distortion.
- Average, min and max values of any computed value.

Regardless of the screen, the synergy between the display and the keyboard is very efficient.



6. Fabrički podaci logera proizvođača NATIONAL INSTRUMENTS, oznake NI USB-6009,



Technical Sales

(866) 531-6285
orders@ni.com

[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#)
For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2014-11-06 07:14:12.0

Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB 12- or 14-Bit, Up to 48 kS/s, 8 Analog Inputs



- 8 analog inputs at 12 or 14 bits, up to 48 kS/s
- 2 analog outputs at 12 bits, software-timed
- 12 TTL/CMOS digital I/O lines
- One 32-bit, 5 MHz counter
- Digital triggering
- Bus-powered
- 1-year warranty

Overview

With recent bandwidth improvements and new innovations from National Instruments, USB has evolved into a core bus of choice for measurement applications. The NI USB-6008 and USB-6009 are low-cost DAQ devices with easy screw connectivity and a small form factor. With plug-and-play USB connectivity, these devices are simple enough for quick measurements but versatile enough for more complex measurement applications.

[Back to Top](#)

Requirements and Compatibility

OS Information

- Mac OS X
- Windows 2000/XP
- Windows 7
- Windows CE
- Windows Mobile
- Windows Vista 32-bit
- Windows Vista 64-bit

Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-DAQmx Base

Software Compatibility

- ANSI C/C++
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic .NET
- Visual C#

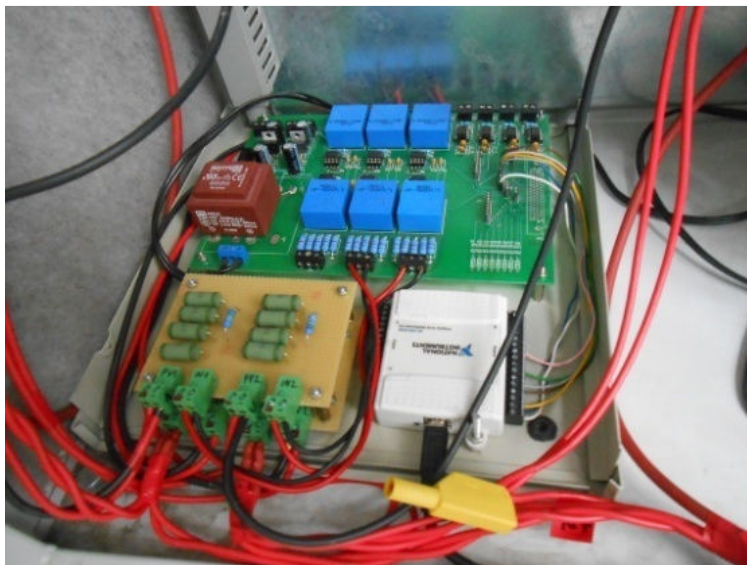
[Back to Top](#)

Comparison Tables

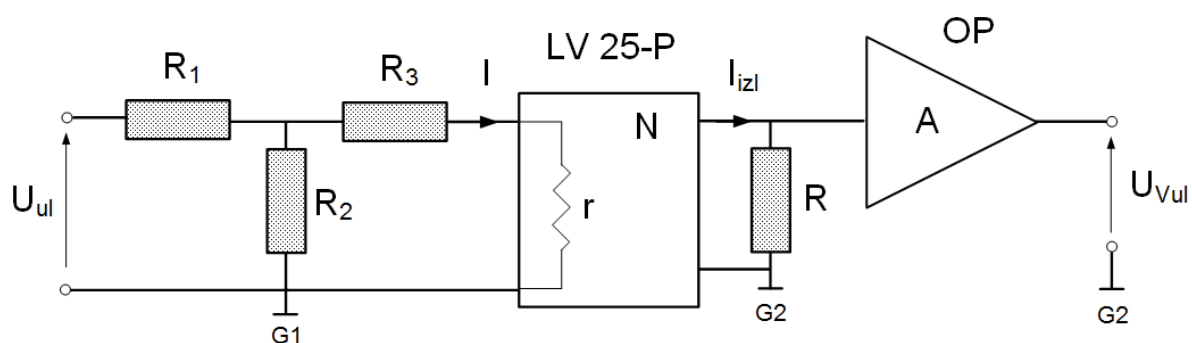
Product	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate (kS/s)	Analog Outputs	Output Resolution	Output Rate (Hz)	Digital I/O Lines	32-Bit Counter	Triggering
USB-6008	8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital
USB-6009	8 single-ended/4 differential	14	48	2	12	150	12	1	Digital

[Back to Top](#)

7. Prilagodna U/I kartica logera NI USB-6009 za merenje električnih parametara FN niza



Slika 8.1 – Izgled prilagodne kartice za merenje parametara FN niza



Slika 8.2 – Električna šema prilagodne kartice za merenje napona

U jednačinama od (8.1) do (8.7) su date osnovne jednačine koje karakterišu deo prilagodne kartice koja meri napon FN niza. Sve promenljive u jednačinama obeležene su na slici 8.2.

$$U_{Vul} = A \cdot R \cdot N \cdot I \quad (8.1)$$

$$I = G_e \cdot U_{ul} \quad (8.2)$$

$$G_e = \frac{1}{R_3+r} \cdot \frac{R_2 \parallel (R_3+r)}{R_1 + [R_2 \parallel (R_3+r)]} \quad (8.3)$$

$$N = \frac{I_{izl}}{I} \quad (8.4)$$

Proračunate vrednosti komponenti i parametara električne šeme date su na slici 8.2:

$$R_1 = 39,9 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 148,8 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 25,4 \text{ k}\Omega$$

$$r = 0,23 \text{ k}\Omega$$

$$R = 100 \text{ }\Omega$$

$$N = 2,5$$

$$A = 3,7$$

$$U_{Vul} = 925 \cdot I \quad (8.5)$$

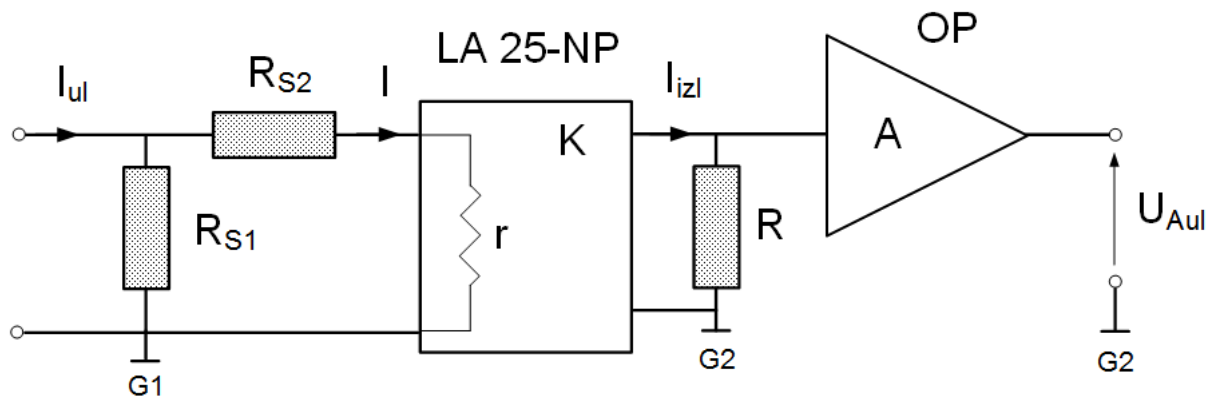
$$I = \frac{U_{ul}}{72403} \quad (8.6)$$

$$U_{Vul} = 0,012776 \cdot U_{ul} \quad (8.7)$$

Opseg ulaznog i izlaznog napona prilagodne kartice:

$$U_{ul} \in [0V; 783V]$$

$$U_{Vul} \in [0V; 10V]$$



Slika 8.3 – Električna šema prilagodne kartice za merenje struje

U jednačinama od (8.8) do (8.14) su date osnovne jednačine koje karakterišu deo prilagodne kartice koja meri struju FN niza. Sve promenljive u jednačinama obeležene su na slici 8.2.

$$U_{Aul} = A \cdot R \cdot K \cdot I \quad (8.8)$$

$$I = X \cdot I_{ul} \quad (8.9)$$

$$X = \frac{R_{S1}}{R_{S1} + (R_{S2} + r)} \quad (8.10)$$

$$K = \frac{I_{izl}}{I_{ul}} \quad (8.11)$$

Proračunate vrednosti komponenti i parametara električne šeme date na slici 8.3:

$$R_{S1} = 0,1 \, \Omega$$

$$R_{S2} = 0,1 \, \Omega$$

$$r = 6,3 \, \text{m}\Omega$$

$$R = 100 \, \Omega$$

$$K = 5/1000$$

$$A = 3,7$$

$$U_{Aul} = 1,85 \cdot I \quad (8.12)$$

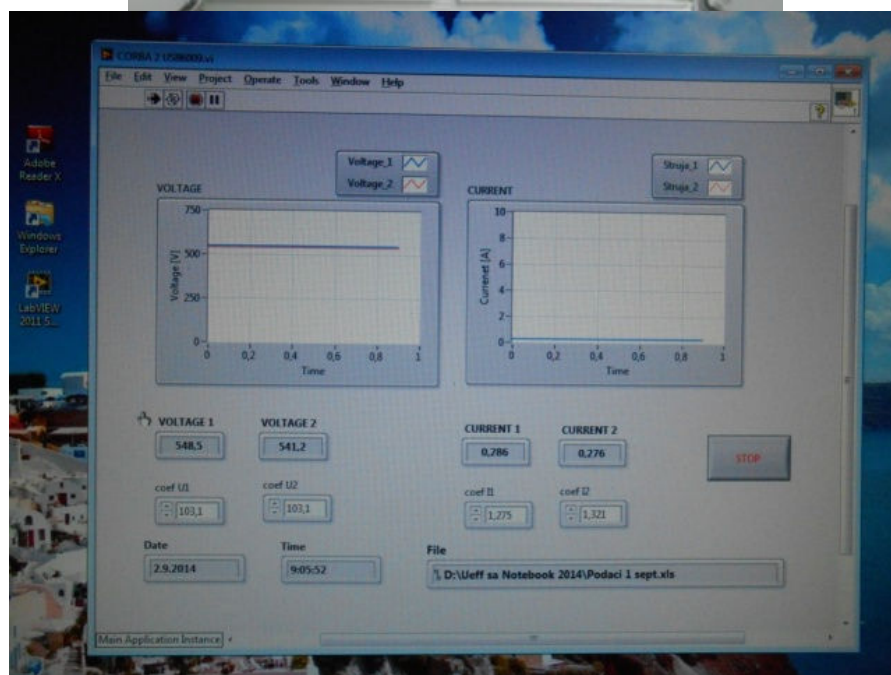
$$I = 0,4847 \cdot I_{ul} \quad (8.13)$$

$$U_{Aul} = 0,8967 \cdot I_{ul} \quad (8.14)$$

Opseg ulazne struje i izlaznog napona prilagodne kartice:

$$I_{ul} \in [0\text{A}; 11,17\text{A}]$$

$$U_{Aul} \in [0\text{V}; 10\text{V}]$$



Slika 8.4 – Razvodni ormar elektrane sa priključenim hardverom za merenje električnih veličina FN nizova (gore) i prikaz softvera LabView za praćenje i skladištenje merenih vrednosti na ekranu monitora (dole)

8. Prikaz obeleženih FN panela FN nizova

Na slikama 8.5 i 8.6 se vidi deo južnog i severnog FN niza FN elektrane FTN-NS. Vidljiv je deo koji se rekonfiguriše, pri čemu su obeleženi FN paneli koji su u skladu sa električnom šemom koja je prikazana na slici 5.10 i 5.11 petog poglavlja, gde se opisuju mikrorekonfiguracija.



Slika 8.5 – Obeleženi FN paneli promenljivog, rekonfigurabilnog južnog FN niza



Slika 8.6 – Obeleženi FN paneli promenljivog, rekonfigurabilnog severnog FN niza

9. Slike senčenih FN nizova i priključenih mernih instrumenata



Slika 8.7 – Delimično senčenje južnog FN niza u prepodnevnim satima u elektrani FTN-NS



Slika 8.8 – Izlazak iz senke poslednjih panela severnog FN niza



Slika 8.9 – Trenutak pojavljivanja sunca iza prepreke



Slika 8.10 – Senzor zračenja postavljen na južnom FN nizu

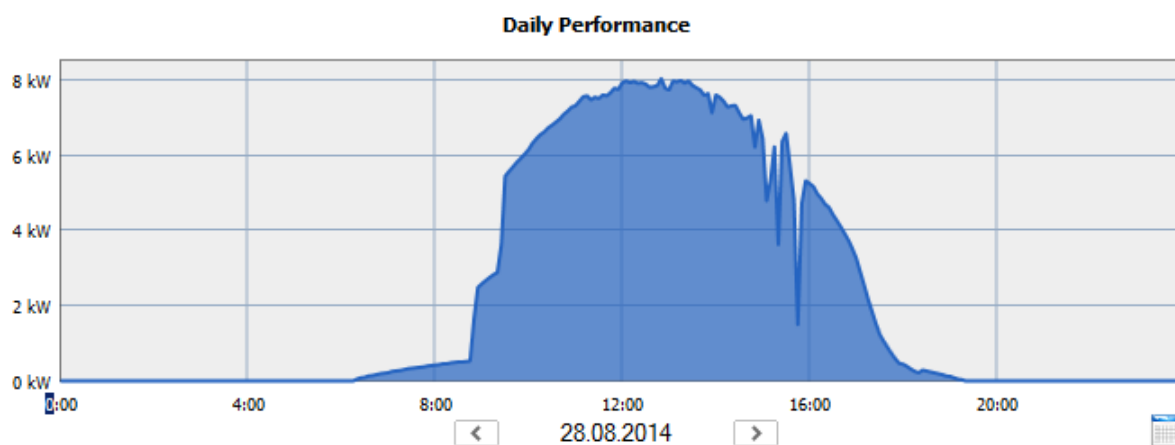


Slika 8.11 – Hardver postavljen ispod FN niza za izvođenje mikrorekonfiguracije

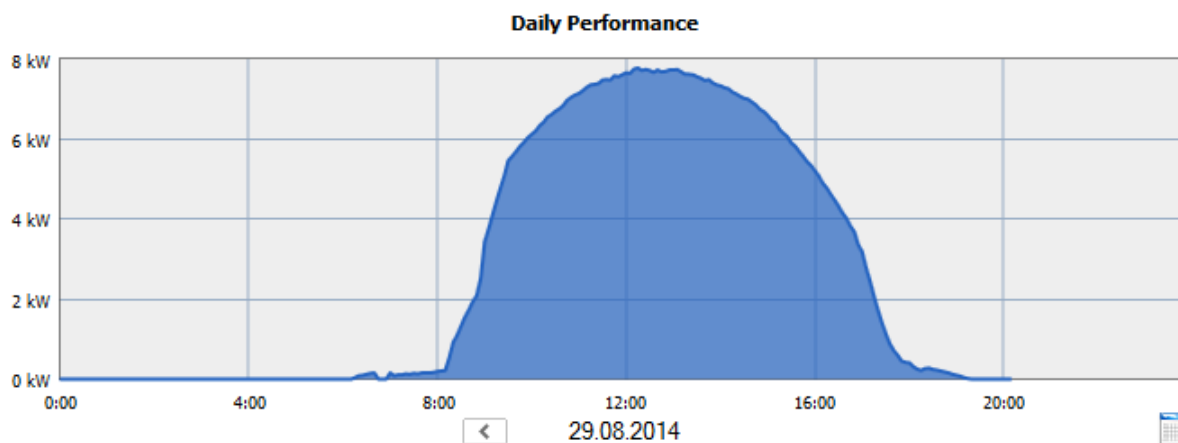


Slika 8.12 – Merenje parametara FN niza sa uređajem Solar I-V

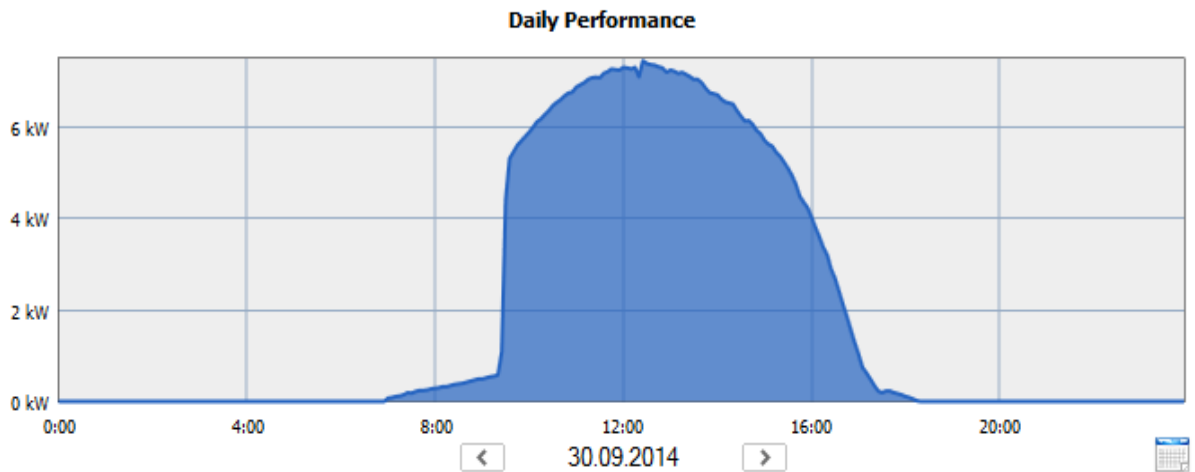
10. Grafički prikaz dnevne promene izlazne snage invertora sa i bez MRK



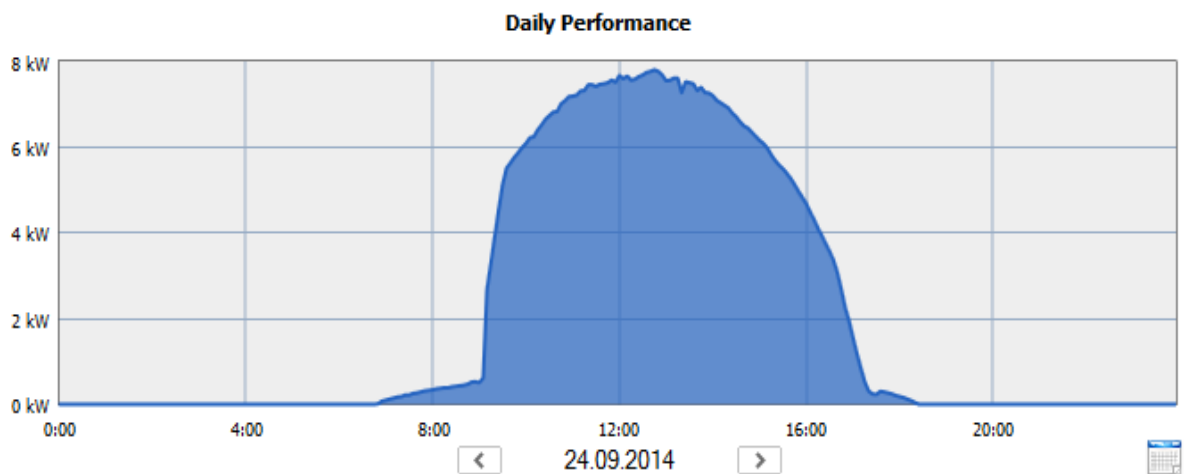
Slika 8.13 – Promena izlazne snage invertora bez MRK krajem avgusta



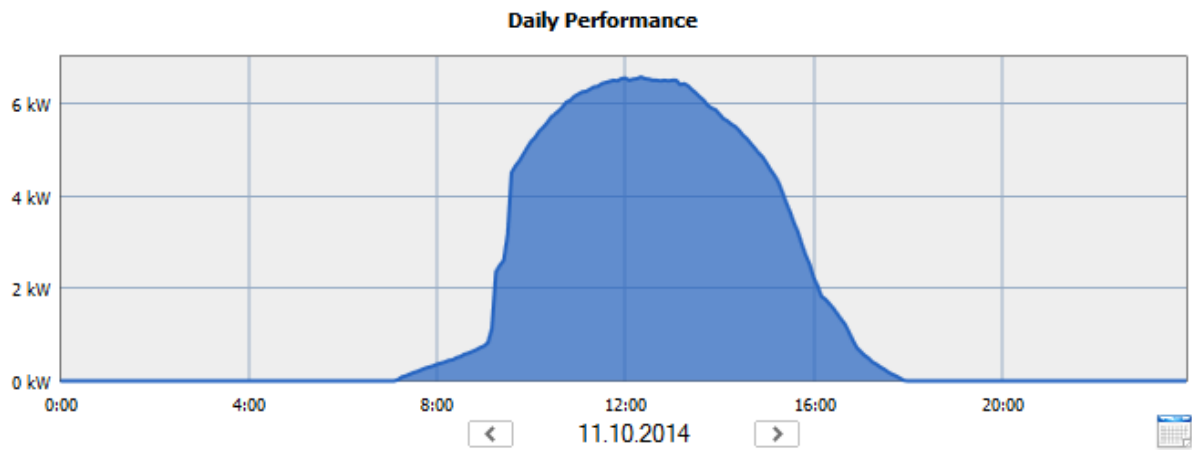
Slika 8.14 – Promena izlazne snage invertora sa MRK krajem avgusta



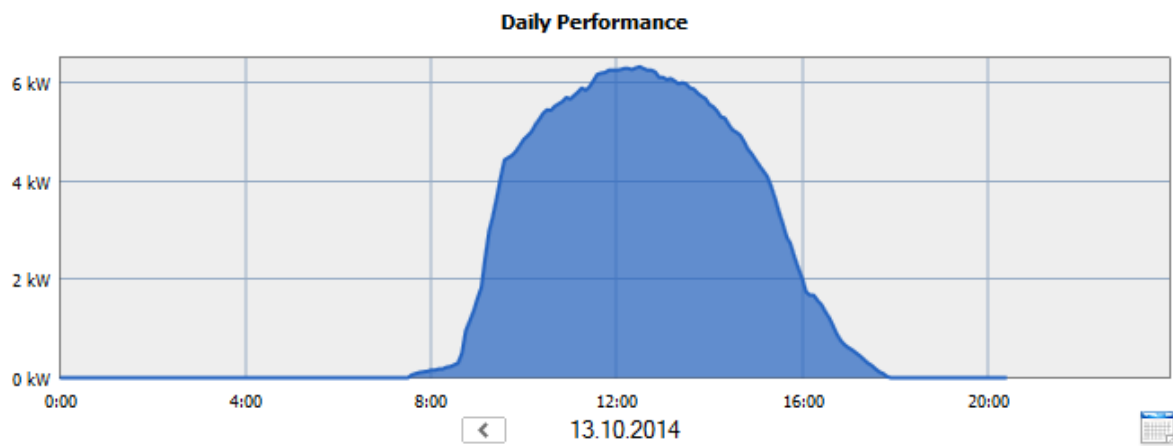
Slika 8.15 – Promena izlazne snage invertora bez MRK krajem septembra



Slika 8.16 – Promena izlazne snage invertora sa MRK krajem septembra



Slika 8.17 – Promena izlazne snage invertora bez MRK početkom oktobra



Slika 8.18 – Promena izlazne snage invertora sa MRK početkom oktobra