

KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE GENERISANE IZ KROVNE PV ELEKTRANE STAMBENOG OBJEKTA U VRANJU

Aleksandra GRUJIĆ*, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu, Srbija
Srđan TODOROVIĆ**, JP EPS, Tehnički centar Vranje, Srbija

KRATAK SADŽAJ

Kvalitet potrošača sa aspekta elektrodistributivnog preduzeća je uglavnom vezan za kvalitet struje u priključnom vodu potrošača. Nivo harmonika koji neki potrošač na određenom naponskom nivou sme injektirati u distributivnu mrežu zavisi od krutosti mreže u tački priključenja potrošača. Zbog varijacije snage i karaktera potrošnje, za pravilno sagledavanje parametara kvaliteta električne energije nekog potrošača potrebno je vršiti kontinuirana merenja pokazatelja kvaliteta električne energije na priključnom mestu u dužem vremenskom periodu.

U ovom radu su predstavljena merenja i analiza svih relevantnih parametara kvaliteta električne energije u tački primopredaje energije iz fotonaponske elektrane (PV elektrane) u elektrodistributivnu mrežu. PV elektrana se nalazi na krovnoj površini stambenog objekta u Vranju instalisane snage 29,89 kWp sa planiranom godišnjom proizvodnjom električne energije od 33 MWh koja bi se isključivo injektirala u elektrodistributivnu mrežu. PV elektrana je na elektrodistributivnu mrežu priključena preko transformatorske stanice 10/0,4 kV/kV. PV elektrana se sastoji iz 122 PV panela, koji je svaki snage od po 245 Wp i to raspodeljen na dve strane krova. Na jednoj strani krova grupisano je 60 PV panela sa ukupnom instalisanom snagom od 14,7 kWp, dok je na drugoj strani krova grupisano 62 PV panela sa ukupnom instalisanom snagom od 15,19 kWp. Instalirana su dva invertora instalisanih snaga 15 kW i 12 kW. Kao merni sistem za merenje parametara kvaliteta električne energije upotrebljavani su mrežni analizatori CVM-NG proizvođača Cirkutor. Merni period obuhvatio je sedam dana neprekidnog merenja. Prikazani su mereni rezultati i izvršena je obrada i analiza dobijenih parametara kvaliteta električne energije iz PV elektrane.

Ključne reči: kvalitet električne energije, PV elektrana, mrežni analizator, inverter

SUMMARY

The quality of the electricity in distribution electricity network is mainly related to the quality of the electricity in the supply point. The harmonics that a consumer may inject into the distribution electricity network depends on the stiffness of the distribution electricity network at the point of connection of the consumer. Due to the variation of the electrical power, for the proper understanding of the quality parameters of the electrical power of a consumer it is necessary to be carried out continuous measurements of the electricity quality indicators at the connection point in a longer period.

This paper presents measurements and analysis of all relevant parameters of the quality power in the point of connection from the photovoltaic power plant (PV power plant) into the electricity distribution network. The PV power plant with 29.89 kWp is located on the roof of a residential building in Vranje with the planned annual production of electricity of 33MWh which would be only injected into the electricity distribution network. The PV power plant is connected to the electricity distribution network through a transformer station 10/0.4 kV/kV. The PV power plant consists of 122 PV panels, each with a power of 245Wp and placed on two sides of the roof. On one side of the roof are installed 60 PV panels with a total installed power of 14.7 kWp, while on the other side of the roof are installed 62 PV panels with a total installed power of 15.19 kWp. Two inverters of installed power of 15 kW and 12 kW were installed. Network measurement analyzers CVM-NG manufactured by Cirkutor were used as measuring system for measuring electrical power quality parameters. The measuring period encompassed seven days of continuous measurement. Measured results are presented and the processing and analysis of the obtained parameters of the quality of electricity from the PV power plant was performed.

Key words: quality of electrical power, PV power plan, network measurement analyzer, inverter

*aleksandrag@viser.edu.rs; ** srdjan.todorovic@eps.rs

1. UVOD

Zbog nekontinualnog postojanja Sunčevog zračenja kao izvora primarne energije pri konverziji u električnu, posredstvom fotonaponskog efekta, mogu se javiti problemi vezani za kvalitet električne energije dobijene iz fotonaponskog sistema. Fotonaponski sistemi povezani sa elektrodistributivnom mrežom (grid-connected) koriste distributivnu mrežu [1] kao rezervni izvor energije. Ovakvi fotonaponski sistemi rade paralelno sa elektrodistributivnom mrežom i ne sadrže akumulatorske baterije. Kada se radi o fotonaponskim sistemima u naseljenim mestima oni se često instaliraju na krovovima i fasadama zgrada i imaju priključak na distributivnu mrežu. Noću kada nema izvora Sunčeve energije potrošnja se prebacuje na distributivnu mrežu. Invertor ima bezbednosnu ulogu u smislu da gasi sistem kada dođe do nestanka napajanja električne energije iz distributivnog sistema kao i ulogu ponovnog uspostavljanja konekcije kada dođe do ponovnog generisanja električne energije iz distributivnog sistema. Električno kolo fotonaponskog sistema je veoma jednostavno. Najvažniji deo je invertor za konvertovanje jednosmerne struje DC u naizmeničnu struju AC.

2. OPIS FOTONAPONSKE KROVNE ELEKTRANE U VRANJU

Fotonaponski (PV) paneli od kojih je izgrađena elektrana se sastoje od grupe fotonaponskih ćelija koje su izrađene od polikristalnog silicijuma. Sastavljeni su od 60 (6x10) PV ćelija i oznake modela su UP-M245P čije su dimenzije 1840 mm x 902 mm x 40 mm sa težinom od 19 kg. PV paneli su sledećih karakteristika: maksimalna električna snaga $P_m = 245 \text{ Wp}$, struja kratko spojenog kola $I_{sc} = 8,45 \text{ A}$, napon otvorenog kola $V_{oc} = 37,8 \text{ V}$, struja maksimalne snage $I_m = 8,06 \text{ A}$, napon maksimalne snage $V_m = 30,4 \text{ V}$, efikasnost PV panela je 15,1 %, maksimalni sistemski napon 1000 V. Za pretvaranje jednosmerne u naizmeničnu struju korišćena su dva invertora snage 15 kW i 12 kW proizvođača SMA Solar Tehnology sa maksimalnom efikasnošću iznad 98% i dva nezavisna MPPT elementa. Na slici 2.1 a) je prikazan stambeni objekat sa krovnom površinom prekrivenom PV panelima, a na slici 2.1 b) jedan od odabranih invertora u sklopu PV elektrane.



a)

b)

Slika 2.1. Zgrada na kojoj su instalirani PV paneli (a) i invertor montiran u garaži objekta (b)

Koncept realizovane PV elektrane je sa invertorom za niz PV panela (string inverter), kome su prilagođene ostale glavne komponente, kao što su noseća metalna konstrukcija i PV paneli. U takvom konceptu mogu postojati jedan ili više nizova (string) sa većim brojem serijski vezanih PV panela u zavisnosti od mogućnosti odabranog invertora. Preko DC raskolopne opreme ovi nizovi su povezani na posebne ulaze invertora, što omogućava [2] njegovu maksimalnu efikasnost. Predstavljen je slučaj sa povezana tri stringa po invertoru za određeni broj redno vezanih PV panela.

Svaki invertor ima povezan određen broj stringova [3]:

- invertor 1 (15 kW) ima povezano ukupno 3 stringa: G1.1-1 x 22, G1.2-1 x 22, G1.3-1 x 22 sa ukupno 66 PV panela
- invetor 2 (12 kW) ima povezano ukupno 3 stringa: G2.1-1 x 20, G2.2-1 x 20, G2.3-1 x 16 sa ukupno 56 PV panela

Invertori su povezani na glavni razvodni orman (GRO_{PV}). Invertor 1 na tri automatska osigurača od 25A, a invertor 2 na tri automatska osigurača od 20A. U GRO_{PV} PV elektrane se nalaze AC zaštitni uređaji i sklopne

naprave: kontaktori, glavni pekidač, odvodnici prenapona, nadzorni rele i prekidač za isključenje elektrane sa mreže. Odvodnici prenapona su enegetskim kablom, vezani na zajednički uzemljivač objekta a montirani su u priključnom prostoru GRO_{PV} . Sa glavnog prekidača je preko automatskih osigurača od 50A ($I_j = 43,06 A$) u postojećem mernom razvodnom ormanu (MRO), PV elektrana priključena na trofazno višefunkcijsko brojilo, odnosno distributivnu mrežu gde je izvršena primopredaja i merenje isporučene električne energije. Na slici 2.2 a) je prikazan glavni razvodni orman (GRO_{PV}) PV elektrane dok je na slici 2.2 b) prikazan merno razvodni orman (MRO) u holu objekta.



a)

b)

Slika 2.2. Glavni razvodni orman PV elektrane u podrumu zgrade i postojeći merni razvodni orman u holu objekta

3. MERENJE PARAMETARA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE GENERISANE IZ FOTONAPONSKE PV KROVNE ELEKTRANE

Merenje parametara kvaliteta električne energije generisanih iz PV elektrane je izvršeno u postojećem MRO-u koji se nalazi u prizemlju objekta, na priključcima energetskeg kabla pomoću mernog sistema, koji se koristio u elektrodistribuciji Vranje u TS 10/0,4 kV/kV radi praćenja potrošnje el. energije. Merenjima na PV elektrani su prikazani i memorisani sledeći parametri električne energije:

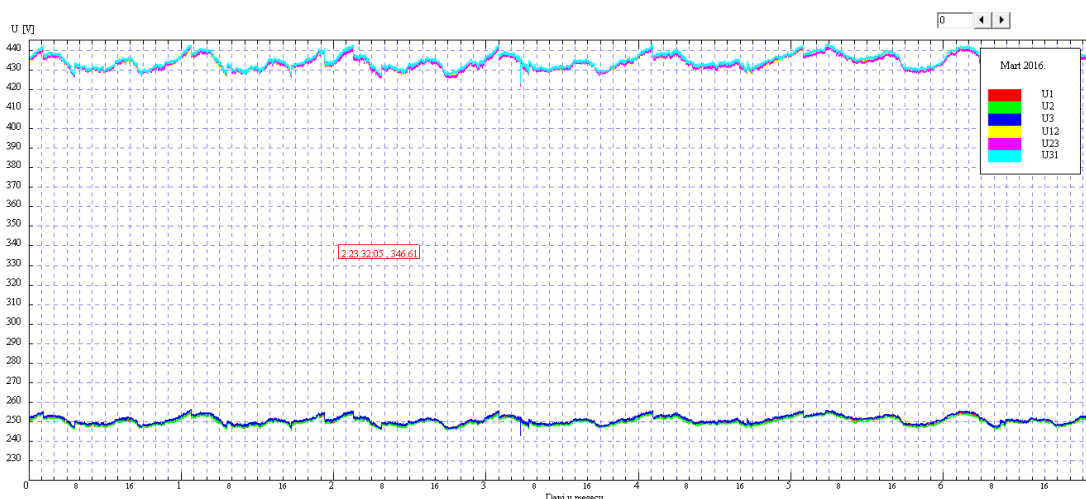
- Frekvencija osnovnog harmonika napona
- Ukupna i pojedinačna aktivna, reaktivna (induktivna i kapacitivna) i prividna snaga
- Eneacija aktivna, reaktivna (induktivna i kapacitivna) i prividna
- Ukupni i pojedinačni faktor snage
- Efektivne vrednosti faznih i linijskih napona
- Efektivne vrednosti faznih struja
- Ukupna srednja vrednost struje
- Pojedinačni harmonijski faktori za sve više harmonike faznog napona i struje do reda 15
- Harmonijsko izobličenje faznog napona i fazne struje
- Struja neutralnog provodnika
- Ukupna i pojedinačna asimetrija struje i asimetrija napona

Merni sistem koji je korišćen za merenje je CVM-NG proizvođača Cirkutor (4). Osnovna funkcija mernog sistema jeste kontinuirano praćenje i arhiviranje svih relevantnih parametara potrošnje (produkcije) električne energije. Merni sistem se sastoji od hardverskog dela sistema i namenskog softvera koji ima zadatak da koordinira rad svih elemenata i upravlja akvizicijom, arhiviranjem i prenosom podataka o parametrima potrošnje (produkcije). Hardver mernog sistema se sastoji od tri grupe elemenata od kojih jedna predstavlja merni deo sistema, druga informacioni, a treća upravljački. Merni deo sistema se sastoji od mernog modula, na kome se prate parametri potrošnje (produkcije). Informacije o trenutnoj vrednosti struje u svakoj fazi uzimaju se sa sekundarnih priključaka strujnih mernih transformatora odgovarajućeg prenosnog odnosa. Naponski signali se uvode direktno u merni modul ostvarivanjem galvanske veze između niskonaponskih sabirnica i odgovarajućih naponskih ulaza. Merni deo sistema sadrži još i blok za napajanje mernog modula. Strujni merni transformatori koji se koriste su sa demontažnim jezgom. Pored mogućnosti merenja, merni modul omogućava i prenos podataka o izmerenim veličinama na računar u digitalnom obliku. Upravljački modul ima određeni broj relejnih izlaza pomoću kojih se može upravljati radom neke od prekidačkih, alarmnih ili signalnih komponenti.

Softver za pregled arhiviranih podataka omogućava jednostavan grafički ili tabelarni pregeled dijagrama promene svih arhiviranih veličina na dnevnom, mesečnom ili godišnjem nivou. Omogućen je jednostavan izbor grafika koji se prikazuje, izbor dana za koji se posmatra promena, izbor prikaza faznih vrednosti posmatrane veličine zajedno sa njihovom srednjom ili ukupnom vrednošću, izbor broja tačaka koji se prikazuju na ekranu. Omogućeno je i numeričko uvećanje dela grafika, kao i uvećanje dela grafika selektovanog mišem. Softver omogućava i jednostavna preračunavanja arhiviranih podataka kojima se mogu eliminisati greške koje mogu nastati prilikom instaliranja sistema (npr. pogrešan smer struje kroz bilo koji od strujnih transformatora). Softver za pregled arhiviranih podataka zajedno sa programom omogućava jednostavnu analizu snimljenih dijagrama.

4. ANALIZA IZMERENIH VREDNOSTI PARAMETARA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom istraživanju predstavljeni su pojedini rezultati merenja koji opisuju kvalitet električne energije dobijene iz PV elektrane. Analiza je izvršena tako što je uzet interval merenja električne energije sa izlaznog piključka PV elektrane u MRO-u za period od 01.03.2016. do 07.03.2016. godine, a zatim su rezultati upoređivani sa parametrima iz međunarodnih standarda za kvalitet električne energije: SRPS EN 50160 [5] i IEEE 519 [6]. Tehničkom preporukom broj 16 [7] su definisani uslovi piključenja PV elektrane na distributivni sistem. Na slici 4.1 prikazan je grafik faznih i međufaznih napona PV elektrane u periodu od 01.03.2016. do 07.03.2016, a u tabeli 1 minimalne i maksimalne vrednosti faznih vrednosti napona na dnevnom nivou za pomenuti period.



Slika 4.1. Vremenska promena efektivne fazne i međufazne vrednosti napona u periodu od 01.03.2016. do 07.03.2016. godine

TABELA 1 – Efektivne vrednosti faznih napona u periodu 01.03.2016. do 07.03.2016

Fazni Naponi									
D...	Min U1	Avg U1	Max U1	Min U2	Avg U2	Max U2	Min U3	Avg U3	Max U3
1	246.30 (07:08:10)	249.97	255.50 (02:15:20)	246.10 (07:08:10)	249.69	254.80 (02:15:08)	246.90 (07:08:10)	250.66	255.40 (02:15:20)
2	245.80 (17:21:25)	250.44	254.90 (01:20:15)	245.70 (17:19:25)	250.15	254.80 (01:29:03)	246.90 (17:21:01)	251.16	256.50 (01:33:51)
3	246.30 (17:39:11)	249.86	255.50 (02:58:29)	245.70 (07:28:30)	249.44	254.50 (02:44:28)	246.30 (18:16:13)	250.29	255.70 (02:48:40)
4	246.50 (06:39:49)	250.07	255.50 (01:58:36)	246.10 (05:23:09)	249.71	254.60 (02:01:00)	243.00 (05:23:09)	250.67	255.90 (01:58:36)
5	246.70 (17:05:05)	250.91	255.40 (02:16:46)	246.70 (17:42:55)	250.45	255.10 (02:16:58)	248.20 (17:42:43)	251.47	255.80 (02:16:34)
6	247.70 (20:58:14)	251.74	255.70 (01:59:55)	246.80 (19:48:46)	251.14	255.00 (01:59:55)	247.80 (20:05:47)	252.17	256.00 (05:47:06)
7	246.60 (09:00:36)	251.06	255.10 (04:09:58)	245.80 (09:00:24)	250.44	254.40 (02:47:54)	246.70 (08:27:23)	251.42	255.60 (02:41:42)
M...	Min U1	Avg U1	Max U1	Min U2	Avg U2	Max U2	Min U3	Avg U3	Max U3
C...	246.30 (17:39:11)	250.56	255.70 (dan 6)	245.70 (17:19:25)	250.12	255.10 (dan 5)	243.00 (dan 4)	251.08	256.50 (dan 2)

Standardom SRPS EN 50160 [5] su definisani uslovi kvaliteta za distributivni napon na mestu predaje potrošaču, u javnim distributivnim niskonaponskim i sredjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uslovima. Svrha ovog standarda je da utvrdi i opiše glavna obeležja distributivnog napona u pogledu: frekvencije, efektivne vrednosti, talasnog oblika signala i simetrije faze. Sve ove karakteristike se za vreme normalnog pogona menjaju zbog kolebanja opterećenja, smetnji i kvarova u određenim postrojenjima koji su pretežno izazvani spoljašnjim uticajima. Karakteristike napona su slučajne prirode. Nominalni napon za niskonaponske trofazne mreže sa četiri provodnika je $U_n = 230$ V između faznih provodnika i nultog provodnika i za trofazne mreže sa tri povodnika je $U_n = 400$ V između faznih provodnika. Pri normalnim pogonskim uslovima, bez uzimanja u obzir prekide napajanja, 95% desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona napajanja svakog nedeljnog intervala (bilo kojeg) mora biti u opsegu $U_n \pm 10$ % (tj. maksimalno 253 V i minimalno 207 V) dok preostalih 5%

desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona napajanja svakog nedeljnog intervala (bilo kojeg) mora biti u opsegu $U_n \pm 10 \% / - 15 \%$ (tj. maksimalno 253 V i minimalno 199,5 V) prema [5].

Posmatrajući vrednosti napona iz tabele 1 primetno je da su minimalne, srednje i maksimalne vrednosti povećane u svim fazama, a da su maksimalne vrednosti napona stalno na samoj gornjoj granici ili je prelaze. Izmerena su trajanja napona po fazama van dozvoljenog opsega prema SRPS EN 50160 [5]:

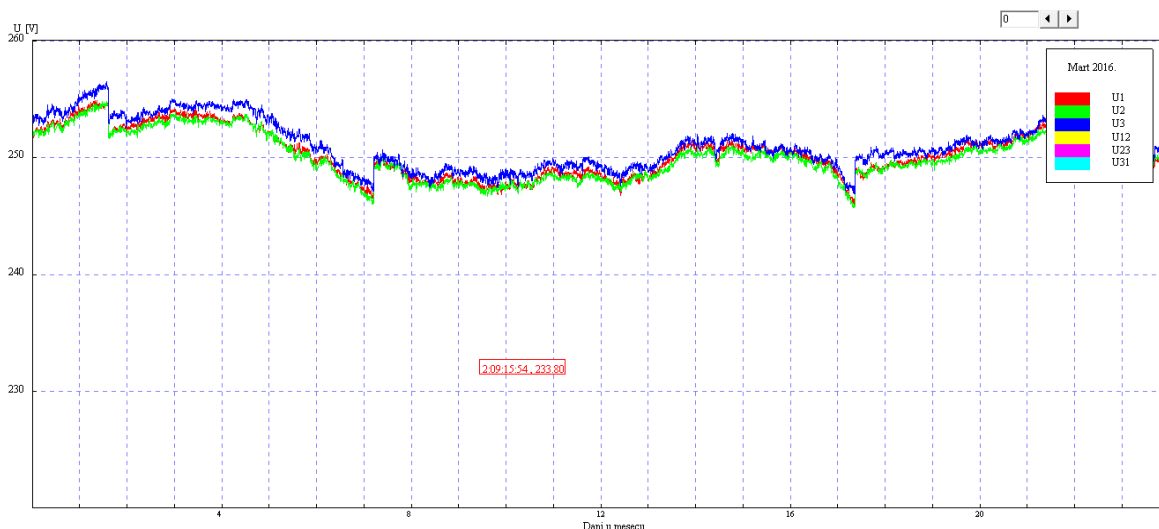
- za fazu 1 ukupno 10:00:39 min. (4.018%),
- za fazu 2 ukupno 03:10:58 min. (1.277%),
- za fazu 3 ukupno 20:54:00 min. (8.389%).

Uzrok navedenog povećanja napona zahtevao je analizu vremenske promene napona i u prethodnom vremenskom periodu da bi se eventualno došlo do uzroka i zaključka. Na slici 4.2 je prikazana vremenska promena efektivne fazne i međufazne vrednosti napona za period 12.02.2016. - 29.02.2016. godine. Sa slike 4.2 se uočava da postoji pravilna periodičnost napona, dok su fazni i međufazni naponi u granicama dozvoljenih vrednosti od 221,7 V do 232,8 V i od 385,3 V do 401,9 V za period 12.02.2016. - 24.02.2016.godine. Nakon jednog dugog prekida napona koji je zabeležen 24.02.2016.god. u 14:30:44, koji je trajao ukupno 21:49:16 (21 sat, 49 minuta, 16 sekundi), dolazi do povišenog napona koji je u takvim granicama i ostao do kraja merenja. U tom periodu se javljaju još dva duga prekida napona (duža od 3 minuta) dana 26.02.2016. godine u 05:07:24 sa trajanjem 35:42 (35 minuta, 42 sekundi) i u 10:19:55 sa trajanjem 03:35 (03 minuta, 35 sekundi). Uzroci poremećaja napona mogu biti od strane isporučioaca električne energije ili od strane potrošača tj. distribuirane proizvodnje. Radi otkrivanja uzroka, preuzeti su izveštaji (tabelarni i dijagramski) o prekidu u napajanju od operatora distributivnog sistema iz područnog dispečerskog centra Vranje (PDC Vranje) za period 01.02.2016 00:00 - 29.02.2016 00:00, distributivnih naponskih nivoa 110 kV, 35 kV, 10 kV, 10/0,4 kV/kV gde je uočeno da nije bilo nikakvih vrsta planiranih ili neplaniranih ispada u mreži koji bi uticali na ove događaje.



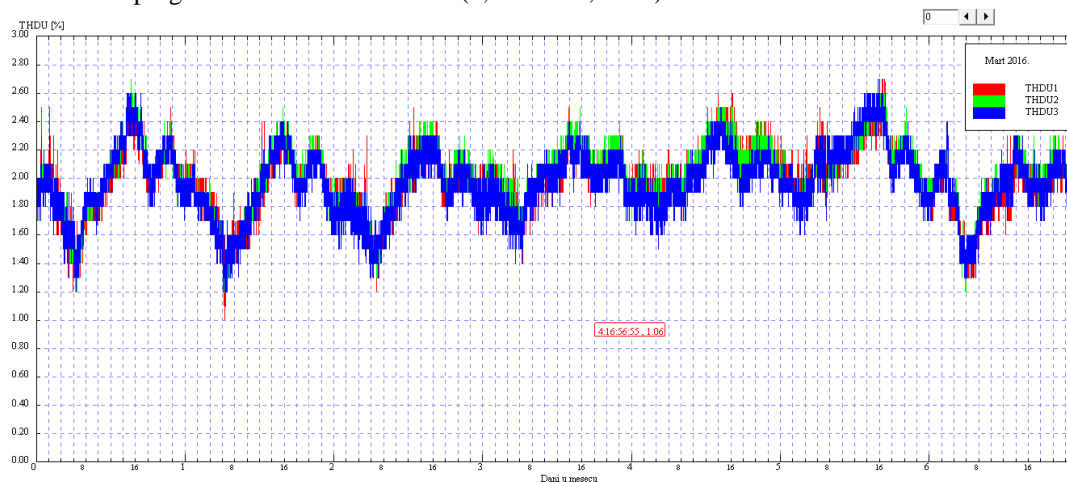
Slika 4.2. Vremenska promena efektivne fazne i međufazne vrednosti napona za period 12.02.2016. – 29.02.2016. godine

Pojedine pojave koje utiču na distributivni napon su potpuno nepredvidive, tako da za određena obeležja napona nije moguće navesti čvrste dokaze. Brze promene napona su uglavnom izazvane promenama opterećenja u postrojenjima potrošača ili manipulacijom rasklopne opreme u mreži. Pri normalnim pogonskim uslovima brza promena po pravilu ne prelazi 5% nazivnog napona [5]. Međutim, pod određenim okolnostima mogu se više puta dnevno pojaviti kratkotajne brze promene napona do 10 % U_n [5]. Propadi napona nastaju pretežno zbog kvarova u postrojenjima potrošača ili u javnoj mreži. Propadi napona praktično su nepredvidivi, izrazito slučajni događaji i njihov godišnji broj može biti od nekoliko desetina do hiljadu. Većina propada napona kraća je od 1 s, a dubine propada manje su od 60 % U_c [5]. Međutim pojedini propadi mogu biti dužeg trajanja i veće dubine propada. Na slici 4.3 je uveličan talasni oblik napona jednog dana 02.03.2016. godine radi analize brze promene napona. Mogu se uočiti nagle varijacije koje odgovaraju opisanim pojavama brzih promena napona. Tokom merenja pojavljuju se četiri ovakve promene napona u toku jednog dana. PV elektrana u vreme tih pojava nije proizvodila električnu energiju pa se samim tim isključuje mogućnost da ih je uzrokovala. Može se izvesti zaključak da su brze promene napona uzrokovane verovatno manipulacijama rasklopne opreme u blizini tačke merenja parametara kvaliteta električne energije.

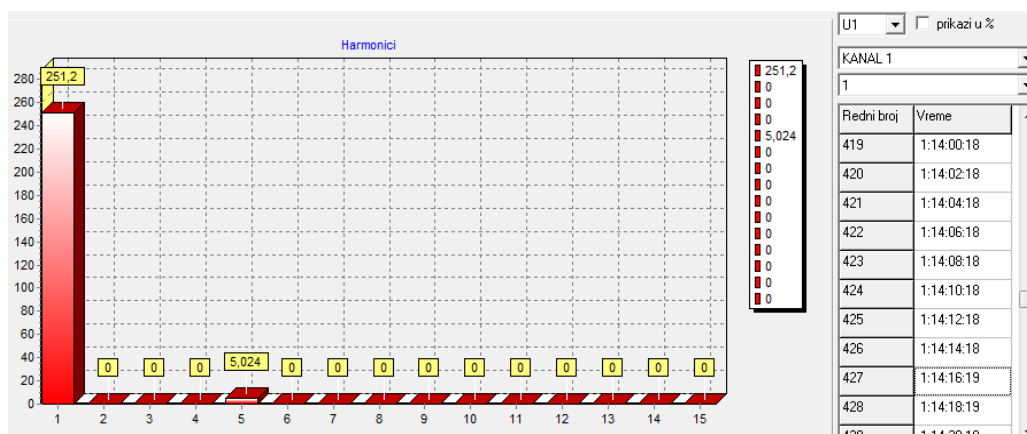


Slika 4.3. Vremenska promena efektivne fazne vrednosti napona za 02.03.2016. godine

Odstupanje talasnog oblika od sinusnog se manifestuje višim harmonicima [8]. Parametri kojima se iskazuje nivo viših harmonika su ukupno harmonijsko izobličenje (THD, Total Harmonic Distortion) i pojedinačna harmonijska izobličenja (HD, Harmonic Distortion) [8]. Harmonijskom analizom talasnih oblika napona i struje dobijaju se pored vrednosti ukupne harmonijske distorzije i vrednost distorzije pojedinačnih harmonika napona i struje (HD_U , HD_I), odnosno harmonijski spektar napona i struje [8]. Na slici 4.4 je prikazana izmerena zavisnost THD_U za analizirani period 01.03.2016. - 07.03.2016.godine. Sa slike 4.4 se može zaključiti da su izmerene niske vrednosti THD_U , koji se nalaze u opsegu od 1 % do 2,7 %. Pojedinačno harmonijsko izobličenje napona HD_U prikazano je na slici 4.5 i takođe je nisko i analizom rezultata je zabeležena zastupljenost samo 5 - tog harmonika i to u opsegu vrednosti od 1% do 2% (2,430V – 5,044V).



Slika 4.4. Harmonijsko izobličenje napona za period 01.03.2016. – 07.03.2016. godine



Slika 4.5. Pojedinačni harmonici napona HD_U za period 01.03.2016. – 07.03.2016. godine

Standardom SRPS EN 50160 [5], propisuje se da je u mreži dozvoljen nivo ukupne harmonijske distorzije napona (uz uzimanje u obzir svih viših harmonika do 40-og), manji od 8% U_n ($THD_{U \leq 8\%}$), a da 95% desetominutnih srednjih efektivnih vrednosti napona svakog pojedinog višeg harmonika (HD_U) ne sme ni u jednom nedeljnom intervalu prelaziti vrednosti iz tabele 3. Analiziranjem izmerenih rezultata (slike 4.4 i 4.5) može se zaključiti da su pojedinačni harmonici napona HD_U kao i ukupna distorzija napona THD_U daleko ispod datih limita, odnosno da ni u jednom slučaju ne premašuju propisane maksimalne vrednosti prema [5].

TABELA 3 – Propisane vrednosti viših harmonika napona (SRPS EN 50160)

Neparni harmonici				Parni harmonici	
Nedeljivi sa 3		Deljivi sa 3			
R.br. harmonika	% U_n	R.br. harmonika	% U_n	R.br. harmonika	% U_n
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 do 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Standard IEEE 519 [6] propisuje dozvoljene harmonike struja i to u zavisnosti od naponskog nivoa i od snage kratkog spoja na mestu priključka, čije su vrednosti prikazane u tabeli 4.

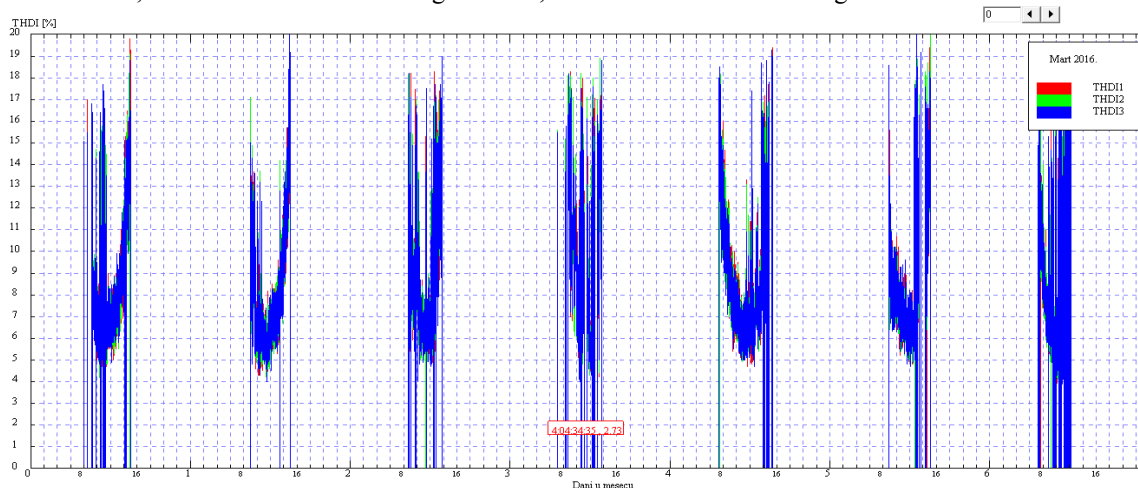
TABELA 4 – Granične vrednosti strujnih harmonika za naponske nivoe od 120V do 69kV (IEEE 519)

I_{ks} / I_{avmax}	$h < 11$ (%)	$11 \leq h < 17$ (%)	$17 \leq h < 23$ (%)	$23 \leq h < 35$ (%)	$35 < h$ (%)	$THD_{I_{max}}$ (%)
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 – 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 – 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 – 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Veličine u tabeli 4 imaju značenje: h – red pojedinačnih neparnih harmonika, I_{ks} - struja kratkog spoja na mestu priključenja potrošača, I_{avmax} – prosečna maksimalna struja potrošača (komponenta osnovnog harmonika) na mestu priključenja potrošača, $THD_{I_{max}}$ – maksimalno dozvoljena harmonijsko izobličenje struje.

Na slici 4.6 je crvenom bojom predstavljena promena THD_1 prve faze, zelenom bojom THD_1 druge faze i plavom bojom THD_1 treće faze za analizirani period 01.03.2016. – 07.03.2016. godine. Analizom tabelarnog prikaza podataka za THD_1 došlo se do najvećih i najmanjih zabeleženih vrednosti za:

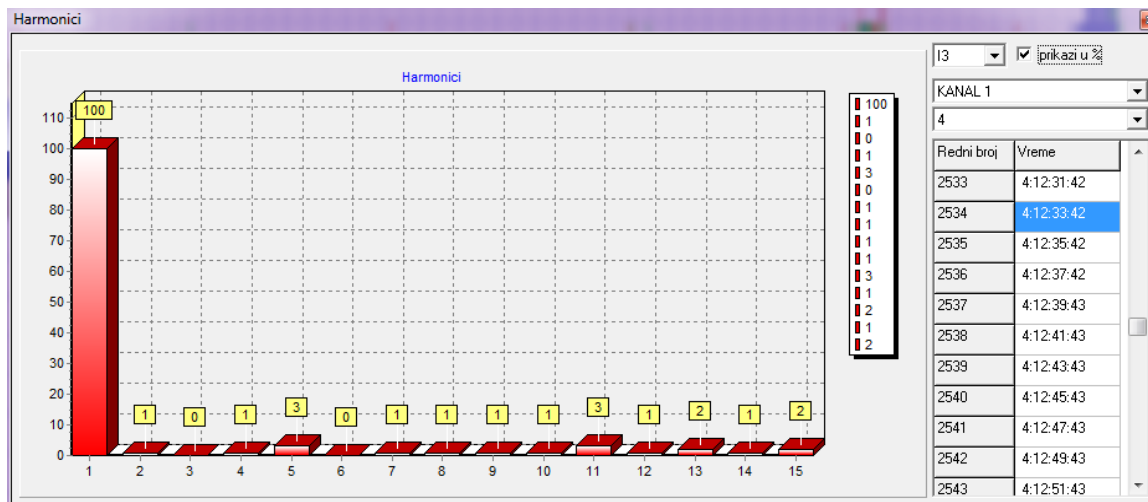
- prvu fazu 19,8 % u 14:56 h 01.03.2016. godine i 3,9 % u 10:04 h 07.03.2016. godine
- drugu fazu 20,2 % u 15:06 h 06.03.2016. godine i 4,1 % u 10:32 h 04.03.2016. godine
- treću fazu 20,2 % u 13:02 h 06.03.2016. godine i 3,7 % u 12:34 h 04.03.2016. godine.



Slika 4.6. Harmonijsko izobličenje struje za period 01.03.2016. – 07.03.2016. godine

Sa slike 4.6 se može zaključiti da THD_1 pokazuje veliko kolebanje u trenucima promenljivog izvora Sunčeve energije (periodi izlaska i zalaska Sunca). U trenucima kada je generisana energija u porastu primećuje se opadanje THD_1 kao i individualnih harmonika. Npr. primećuje se približno granična dozvoljena vrednost THD_1 svakog dana pri zalasku sunca odnosno pri prestanku proizvodnje električne energije iz distribuiranog izvora (PV elektrane).

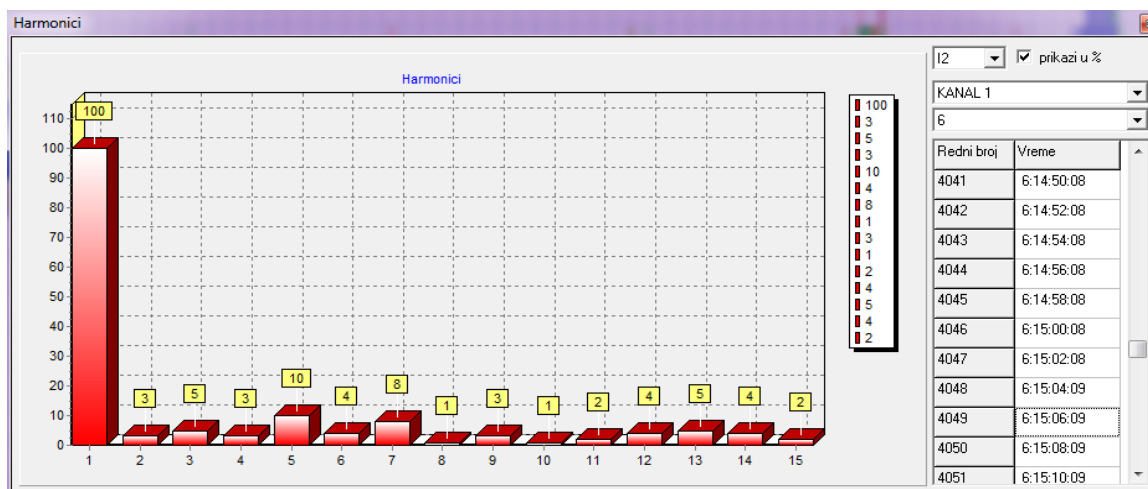
Na slici 4.7 su prikazani pojedinačni viši harmonici struja za vremenski period zabeleženih minimalnih vrednosti THD_1 .



Slika 4.7. Pojedinačni harmonici struje u vreme minimalnih izmerenih THD_1 od 3,7 % - 04.03.2016.godine

Sa slike 4.7 se može zaključiti da pojedinačni harmonici struja ne prelaze vrednosti koje su propisane standardom IEEE-519 [6], a koje su prikazane u tabeli 4.

Na slici 4.8 su prikazani pojedinačni harmonici struja za period maksimalno zabeleženih THD_1 .



Slika 4.8. Pojedinačni harmonici struje u vreme maksimalnih izmerenih THD_1 od 20,2 % - 06.03.2016.godine

Sa slike 4.8 se može zaključiti da su dominantni harmonici 5-ti (10%) i 7-mi (8%) harmonik koji imaju granične vrednosti za HD_1 za odnos struja I_{ks} / I_{avmax} između 50 i 100 na gornjoj granici dozvoljenih vrednosti. Interesantno je uočiti da su i 12, 13 i 14 harmonik nešto većih vrednosti, ali da je samo 13-ti harmonik iznad dozvoljene vrednosti (4.5%). Iz svega navedenog se može zaključiti da iako THD_1 prevazilazi u manjoj meri dozvoljenu vrednost od 20% ipak se radi o trenutno izmerenoj vrednosti, a da u većini vremena (95%) se i THD_1 nalazi u dozvoljenim, standardom propisanim vrednostima prema [6].

5. ZAKLJUČAK

Rad PV elektane zavisi od klimatskih uslova (temperatura, solarno zračenje i efekat zasenčenja), doba dana, vedrosti dana, oblačnosti, koji ograničavaju vremenski interval rada tokom dana i značajno utiču na nivo generisane snage i izgled talasnog oblika napona i struje. Na kvalitet talasnog oblika struje PV invertora dosta utiče intenzitet Sunčevog zračenja. Varijacije solarnog zračenja su prisutne tokom jednog dana. Na ukupnu efikasnost PV sistema utiču izabrani PV paneli i invertori, dve najvažnije komponente PV elektrane. Invertor može jednostavno da popravi napon na kome radi PV elektana. Step en efikasnosti invertora je definisana kao odnos njegove izlazne i ulazne snage, dok se kvalitet posmatra kroz ukupno harmonijsko izobličenje struje. Kako je ulazna snaga invertora pre svega određena solarnom iradijacijom ona nije konstantna, pa se zato efikasnost kao funkcija ulazne snage ne smatra konstantnom. Maksimalna efikasnost može se postići praćenjem DC izlaza, odnosno praćenjem tačke maksimalne snage u zavisnosti od uslova rada celokupnog solarnog sistema. MPPT (Maximum power point tracker) je sistem koji kontinuirano podešava radnu tačku na DC strani za dobijanje maksimalne snage PV panela u svakom trenutku. Pri $THD_1 = 0$ invertor daje struju idealnog sinusnog oblika. Za mrežno-povezani invertor talasni oblik izlaznog napona je sinhronizovan sa talasnim oblikom mrežnog napona, pa je potrebno imati što manje THD_1 . Osim toga, talasni oblik struje je pod uticajem harmonijske distorzije napona u tački konekcije. Važno je da svaki invertor, kao sistem koji je povezan na mrežu ni na koji značajan način ne degradira kvalitet snabdevanja električnom energijom u tački konekcije. Bitno je razviti najbolje rešenje invertora, jer njegove loše karakteristike su osnovni razlog slabih performansi PV sistema u pogledu kvaliteta električne energije. Povećanjem izlazne snage PV invertora, relativne vrednosti harmonika struje opadaju, što znači da su apsolutne vrednosti tih harmonika male u odnosu na vrednosti struje osnovnog harmonika koji je u porastu i teži nominalnoj vrednosti.

Merenjem i analizom parametara kvaliteta električne energije generisanih iz PV elektrane, dobijene su vrednosti unutar propisanih, standardom dozvoljenih vrednosti.

6. LITERATURA

- [1] Kusko A., Thompson M. T., 2007., "Power Quality in Electrical Systems", McGraw-Hill
- [2] Vladimir A.Katić, Zoltan J. Čorba, Dragan M. Milićević, Boris P. Dumnić, Bane P. Popadić, 2015, "Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu", Tehnika, 64(4)
- [3] Uputstva za rad i održavanje mikrofotovoltažne elektane (MFE) "MFE Branemark", 2014.
- [4] TC Vranje, 2016., "Zahtev za priznavanje tehničkog rešenja merno-informacioni sistemi za kontrolu potrošnje električne energije u elektrodistributivnim mrežama", 2010., "Istraživačko-razvojni centar Alfatec Niš".
- [5] Standard SRPS EN 50160, 2012., "Institut za standardizaciju Srbije", Beograd.
- [6] Standard IEEE 519, 2014., "Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power and Energy Society".
- [7] Tehnička preporuka br. 16, 2011., "JP EPS Direkcija za distribuciju električne energije Srbije", Beograd.
- [8] R.C.Dugan, M.F.McGranaghan, S.Santoso, H.W.Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw Hill, 2002.