

Uticaj solarne elektrane na kvalitet električne energije u niskonaponskoj distributivnoj mreži

Impact of solar power plant on power quality in low-voltage distribution network

Dr. sc. Hidajet Salkić, dipl.ing.el. *, Dr. sc. Amir Softić, dipl.ing.el. *, Amer Salkić, dipl.ing.el. **

* JP EPBiH Sarajevo, Elektrodistribucija Tuzla

** Spin d.o.o. Tuzla

Apstrakt- Elektroenergetski sistem kao jedan integralni sistem proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije predstavlja jedan od najsloženijih tehnokonomskih sistema današnjice. Na kvalitet napona elektroenergetske mreže utiču potrošači, s tim da i mreža, takođe, ima uticaj na potrošače. Svi poremećaji u mreži mogu narušiti rad mreže i uticati na rad potrošača, kao i smanjiti stepen efikasnosti i radni vijek ili čak ozbiljno oštetiti mrežu. Broj potrošača se svakodnevno povećava, a isto tako je sve veći udio potrošača koji generišu smetnje u mreži i istovremeno su osjetljivi na njih. Navedene okolnosti nameću potrebu za učestalim monitoringom mreže, te analiza kvaliteta električne energije nije neopravdan trošak, već izuzetno bitna i isplativa investicija. Kvalitet električne energije, kao dio ukupnog kvaliteta snabdijevanja potrošača električnom energijom, u deregulisanim uslovima liberalnog tržišta električne energije, postaje značajan regulacioni parametar za operatore mreže i značajan ugovorni parametar na tržištu električne energije. Operatori mreže dužni su uspostaviti sistem pojedinačnih mjerenja i sistem trajnog nadziranja parametara kvaliteta električne energije radi utvrđivanja stanja i poboljšanja parametara do normiranog nivoa. Tehnički parametri se određuju preporukama koje se donose na međunarodnom nivou i mogu, ali ne moraju, biti zakonski obavezujuće. Održavanje određenog nivoa kvaliteta napona u nekoj tački mreže je obaveza distributera električne energije. Ovaj zadatak distributer izvršava ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja proizvođača/potrošača na mrežu. Dakle, svaki proizvođač/potrošač električne energije je dužan svoja negativna povratna djelovanja (injektovanje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane, unaprijed dogovorene, granične vrijednosti. Postoje mnoge norme koje opisuju kvalitet električne energije, ali u Evropi je najpoznatija EN50160 (izdata od strane CENLEC-a). U ovom radu je predstavljen pristup mjerenju kvaliteta napona na mjestu predaje električne energije iz distribuiranog izvora u distributivnu mrežu sa aspekta ograničavanja negativnog povratnog uticaja distribuiranog izvora na kvalitet napona.

Ključne riječi- kvalitet električne energije, distribuirani izvor, tehnički parametri, solarna elektrana, EN50160

Abstract- The electric power system, as an integrated system for transmission, distribution and consumption of electricity, is one of the most complex technical and economic systems today. Customers affect on the voltage quality of power network, but the network also has an impact on customers. All disturbances in the network can disrupt operation of the network and affect on operation of the customers, as well as reduce the level of efficiency and operation life or even seriously damage network. Number of customers is increasing every day, as well as proportion of customers who generate disturbances in the network and, at the same time, are sensitive to them. These circumstances impose the need for frequent monitoring of the network, so the analysis of power quality is not unjustified cost but extremely important and profitable investment. The quality of electricity, as part of the overall quality supply of electricity customers in deregulated conditions of liberal electricity market becomes significant regulatory parameter for network operators and a significant contracting parameter on the electricity market. Network operators are obliged to establish a system of individual measurements and a system of permanent monitoring of power quality parameters to determine the state and improve the parameters to the standardized level. Technical parameters are determined by the recommendations made at the international level and may, but do not need, be legally binding. Maintaining a certain level of voltage quality at some point of the network is the responsibility of electricity distributor. This task distributor executes by limiting of negative effects of producer/customer to the network. Therefore, each electricity producer/customer is obliged to reduce own negative feedback effects (injection of higher harmonics, taking of reactive power, emissions of flickers and loads unbalances) to a prescribed, prearranged, limited values. There are many norms that describe the quality of electricity, but in Europe the best known is EN50160 (issued by CENLEC). This paper presents the approach to measuring the voltage quality at the point of electricity delivery from distributed source into distribution network from the

aspect of limiting the negative feedback of distributed source on the voltage quality.

Key words- electricity quality, distributed source, technical parameters, solar power plant, EN50160

I. UVOD

Električna energija je roba koja treba da zadovoljava određeni kvalitet. Nova filozofija u upravljanju i vođenju elektroenergetskog sistema u cilju postizanja određenog kvaliteta električne energije ima za posljedicu konstantan nadzor kvaliteta električne energije. Elektroenergetski sistem kao jedan integralni sistem proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije predstavlja jedan od najsloženijih tehnokonomskih sistema današnjice. Kako se svaki elektrodistributivni sistem sastoji od različitih elemenata koji su sve češće aktivni elementi, u tim mrežama se javljaju viši harmonici. Osim toga javljaju se i različiti poremećaji u isporuci električne energije: padovi, skokovi, propadi i prekidi napona, naponska izobličenja (nesimetrija), brze prelazne promjene (tranzijenti), te ostale nepoželjne pojave koje mogu izazvati teže posljedice kod posebno osjetljivih potrošača pa je proces reverzibilan. Potrošači utiču na kvalitetu napona mreže, a mreža, također, ima negativne posljedice po potrošače. Svi ti poremećaji u mreži mogu narušiti rad mreže i uticati na rad potrošača, kao i smanjiti stepen iskorištenja i radni vijek ili je čak ozbiljno oštetiti. Izvjesno je svakodnevno povećanje broja potrošača, a sve je veći udio potrošača koji generišu smetnje u mreži i istovremeno su osjetljivi na njih. Navedene okolnosti nameću potrebu za učestalim monitoringom mreže, te analiza kvaliteta električne energije nije neopravdan trošak, već izuzetno bitna i isplativa investicija. Kvalitet električne energije, kao dio ukupnog kvaliteta snabdijevanja potrošača električnom energijom, u dereguliranim uslovima liberaliziranog tržišta električne energije, postaje značajan regulacioni parametar za operatore mreže i značajan ugovorni parametar na tržištu električne energije. Operatori mreže dužni su uspostaviti sistem pojedinačnih mjerenja i sistem trajnog nadziranja parametara kvaliteta električne energije, radi utvrđivanja stanja i poboljšanja parametara do normiranog nivoa. Pitanje nadzora kvaliteta električne energije riješeno je kroz razvoj mjernih sistema za analizu kvaliteta električne energije. Mjerenje, obrada i analiza rezultata mjerenja su definisani normama i standardima. U Bosni i Hercegovini je trenutno u zamahu planiranje, projektovanje i izgradnja velikog broja fotonaponskih elektrana, ozakonjene su stimulatívne finansijske mjere za otkup u mrežu tako proizvedene električne energije, što omogućava snažan poticaj za njihovo sve veće korištenje i primjenu. Analiza njihovog uticaja na kvalitet električne energije obavezna je u postupku priključenja na mrežu i kao takva zahtijeva ozbiljan pristup, usklađen sa karakteristikama distribuiranog izvora za kojeg se vrši mjerenje i karakteristikama mjesta na koje se isti priključuje. Bez ovoga se teško može ocijeniti i izolovati uticaj pojedine fotonaponske elektrane na mrežu, jer kvalitet napona zavisi od ukupnog međudjelovanja svih korisnika mreže i elemenata mreže. Sam smisao provođenja ispitivanja povratnog djelovanja je činjenica da je mreža galvanski vezan sistem koji čini mnoštvo sudionika koji "dijele" istu mrežu i preko nje su praktično povezani. U radu je predstavljen pristup mjerenju kvaliteta napona

na mjestu predaje električne energije iz distribuiranog izvora u distributivnu mrežu sa stanovišta ograničavanja negativnog povratnog uticaja distribuiranog izvora na kvalitet napona. Rezultat istraživanja predstavlja integralnu cjelinu u pogledu procedura mjerenja kvaliteta električne energije i ocjene kvaliteta električne energije. Na osnovu same definicije kvaliteta električne energije i parametara koji se mjere i analiziraju u svrhu ocjene kvaliteta, te osvrta na norme i standarde, iz navedene problematike se može zaključiti da pojam kvaliteta električne energije predstavlja niz sveobuhvatnu aktivnosti po pitanju monitoringa elektroenergetskog sistema.

II. TEORETSKI ASPEKTI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Postoje mnoge norme koje opisuju kvalitet električne energije, a u Evropi je najpoznatija EN50160 (izdavač CENLEC). U BiH ta norma nije "zakon", ali se po uzoru na nju, donose pravilnici u kojima se daju upute za tretiranje parametara kvaliteta električne energije. Te pravilnike, kao podzakonske akte, donose regulatorna tijela, a što se tiče Elektroprivrede BiH, dva su pravilnika u kojima su navedeni parametri kvaliteta električne energije koji se moraju analizirati i regulisati, a to su: "Mrežna pravila J.P Elektroprivreda BiH" i "Opšti uslovi za isporuku električne energije", Regulatorne komisije za električnu energiju u Federacije BiH (FERK) od 2008.g. Ovu normu je prihvatio CENLEC 05.07.1994. godine, a u službenoj je upotrebi od maja 1995. godine. Norma EN50160 se primjenjuje u javnim distributivnim niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uslovima. Norma EN50160 "Karakteristike napona u javnim elektrodistributivnim mrežama" ima za cilj okarakterisati parametre napona napajanja u odnosu na talasni oblik, amplitudu, frekvenciju i simetriju kod trofazne mreže na mjestu primopredaje električne energije. Ove karakteristike su podložne stohastičkim promjenama tokom normalnog rada, a mogu ih uzrokovati promjene opterećenja, smetnje koje se generišu u opremi i vanjski uticaji. U električnim mrežama srednjeg i niskog napona kvarovi postrojenja mogu dovoditi do velikih smetnji. Kompletan ispad mreže se ne može opisati preko graničnih vrijednosti i nema smisla određivati stvarne granične vrijednosti, pa zbog toga ovaj standard fiksno postavlja samo one granične vrijednosti koje ne smiju biti premašene za vrijeme 95% trajanja monitoringa. Mjerenja se sprovode tokom mjernog perioda koji obuhvata najmanje sedam dana. Tokom mjernog perioda vrši se kontinuirano semplovanje i mjerenje mjernih veličina, a potom se vrši usrednjavanje na vremenski period 10 sekundi ili 10 minuta, zavisno od tipa mjerne veličine. Te usrednjene 10-minutne, odnosno 10-sekundne vrijednosti su relevantne za statističku obradu po normi EN50160. Cilj je postavljanje graničnih vrijednosti parametara napona kod normalnih radnih uslova, a ne primjenjuje se u specifičnim uslovima na koje distributer električne energije ne može uticati i u kojima neke karakteristike napona odstupaju od zadanih vrijednosti. Kako su promjene karakteristika vezane za stohastičke slučajeve, norma dozvoljava da definisane granice parametara mogu biti premašene u nekim slučajevima. U norma EN50160 opisane karakteristike napona nisu predviđene za upotrebu kao nivo elektromagnetne kompatibilnosti ili kao granične vrijednosti smetnji, koje se iz postrojenja potrošača prenose vodovima na mrežu. Njena uloga je samo da definiše vrijednosti glavnih

karakteristika električnog napona u mrežama niskog, srednjeg i visokog napona. Norma se odnosi na mjerenje i kontrolu vrijednosti osnovnih 9 parametara električnog napona na srednjenaponskoj ili niskonaponskoj mreži i to:

1. promjene napona (spore/brze promjene napona),
2. treperenje (fliker): kratkoročni (Pst) i dugoročni (Plt),
3. harmonici - od 2. do 25. harmonika,
4. THD – od 2. do 40. harmonika,
5. signalni naponi (ripple control – signalni upravljački naponi) i međuharmonici,
6. mrežna frekvencija,
7. nesimetričnost napona,
8. naponski propadi (privremeni/kratkotrajni/dugotrajni),
9. prekidi napajanja.

U tački primopredaje potrebno je neprekidno pratiti kvalitet električne energije u trajanju od najmanje 7 dana (168 sati).

III. TEHNIČKI OPIS FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Fotonaponska elektrana instalisane snage 23kWp je izgrađena na krovu objekta jedne humanitarne organizacije i napaja se električnom energijom sa niskonaponskog izlaza STS 10(20)/0,4 kV, 160kVA (visokonaponski osigurači postolja 160A sa topljivim umecima 125A), samonosivim kablovskim snopom tip XOO/0-A 3X70+71.5mm², dužine trase cca 90m do mjernog ormara na fasadi objekta (slika 1).



Slika 1. Principijelna šema izvedbe priključka fotonaponske elektrane na NN mrežu

Mjerni ormar je opremljen kompaktnom sklopkom 125A za odvajanje fotonaponske elektrane sa distributivne mreže, sa mogućnošću daljinskog nadzora i upravljanja, visokoučinskim osiguračima topljivih umetaka 35A i sa trofaznim multifunkcijskim brojiлом za mjerenje predate/preuzete električne energije fotonaponske elektrane. Lokacija fotonaponske elektrane se nalazi na geografskoj poziciji sa koordinatama 44° 44' 53" S i 18° 10' 36" I. Geodetske tačke fotonapske elektrane u Gauss-Krugerovim koordinatama su Y=5570990 i X=5982390, na nadmorskoj visini od 360m. Prosječna planirana proizvodnja fotonaponske elektrane iznosi 25.300kWh. Fotonaponski sistem predstavlja integrisani skup fotonaponskih modula i ostalih potrebnih komponenti. Projektovan je tako da prima Sunčevu energiju i izravno je pretvara u konačnu električnu energiju. Fotonaponska elektrana ima ukupno 92 fotonaponska modula (tip.RENOSOLA VIRTUS JC250M-24/Bbv), svaki snage 250W_p, podijeljenih u tri stringa svaki po 20 modula i dva stringa svaki po 16 modula. Moduli su dimenzija 1640mm² x 992mm², optimalne efikasnosti 15,37%, pokrivaju površinu od 150,67m², međusobno

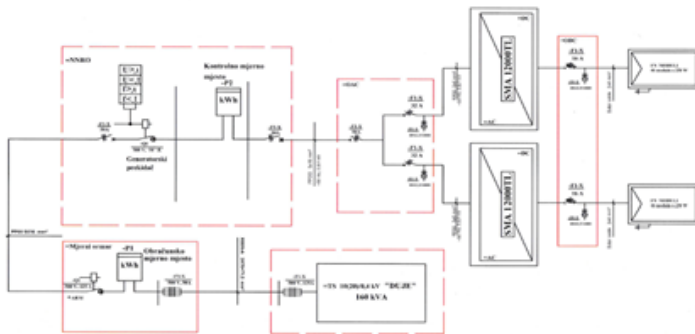
povezani sa fotonaponskim kablom (FlexiSun 1x6mm²) kablovskim završecima. Počeci i krajevi stringova se dovode preko DC (istosmjernog razvoda) ormara opremljenog sa istosmjernim odvodnicima napona i istosmjernim prekidačima na inverter koji je uzemljen. Fotonaponski invertori pretvaraju istosmjernu struju fotonaponskih modula u naizmjenični napon regularnog iznosa i frekvencije, sinhronizovanim sa naponom mreže. Da bi eventualni štetni uticaj fotonaponskog sistema na distributivnu mrežu bio što manji inverter mora ispunjavati zahtjeve propisane standardima EN61727 odnosno EN50438, da struja, napon i frekvencija fotonaponskog sistema budu u skladu sa parametrima distributivne mreže radi sinhronizovanog rada. Impedansa u priključnoj tački na izlazu invertora ne smije biti veća od 1,25Ω, jer bi to dovelo do automatskog prekida rada invertora. Fotonaponski sistem invertora ne smije prouzrokovati više harmonike (do 40) većih flikera, nego što ih propisuje standard EN61000-3-3 za sisteme sa strujom manjom od 16A, a EN61000-0-3-5 za sisteme sa strujom većom od 16A. Gornja dopuštena vrijednost struje koju inverter može slati u mrežu može da bude 1% veća od nazivne vrijednosti. Učešće svih viših harmonijskih komponenti u generisanoj struji mora da bude manje od 5%. U slučaju odstupanja svoje frekvencije od nominalne frekvencije mreže za vrijednost ±1Hz, inverter prestaje sa djelovanjem u vremenskom intervalu od 0,2s. Odabrana su dva trofazna invertora, jedan nazivne AC snage 15kW, tip SMA STP 15000 TL, i drugi nazivne AC snage 8kW, tip SMA STP 8000 TL. Nadzor fotonaponske elektrane se vrši preko monitoring uređaja Sunny WebBox, invertori su povezani u seriju preko RS485 veze (kabl LiYcY 2x2x0.2 mm²), maksimalne dužine 1.200m, prikuplja tekuće mjerne veličine na 50 invertora koje se automatski arhiviraju i moguće je njihov pregled na Internetu preko Sunny Portala-a. AC strana invertora je povezana na AC (naizmjenični razvod) ormar sa petožilnim kablom 5x6mm² uz naizmjenične odvodnike prenapona i naizmjenične automatske trolne osigurače. AC i DC razvodni ormari su fizički smješteni skupa u NN razvodni ormar, sa kontrolnim brojiлом električne energije. Preko energetskog kabla 5x10mm² fotonapska elektrana je povezana na priključni ormar elektrodistributivne mreže, gdje je smještena mjerna garnitura i 4-polna rastavljačka sklopka za potpuno odvajanje fotonaponske elektrane sa elektrodistributivne mreže (slika 2). DC/AC izmjenjivači zadovoljavaju tehničke uslove bitne za paralelni rad sa elektrodistributivnom mrežom. Invertori rade u režimu „mrežom upravljani invertori“ što znači da je nemoguć ostrvski rad elektrane. Zaštita od ostrvskog rada je ugrađena u sam inverter, u slučaju nestanka mrežnog napona elektrana se automatski isključuje sa mreže, a u slučaju ponovnog dolaska mrežnog napona inverter po određenom protokolu ispituje uslove za puštanje elektrane na mrežu. Tek kada su ispunjeni svi uslovi onda se dozvoljava automatsko uključanje elektrane na mrežu. Kratkospojna zaštita invertora je podešena na izlaznu struju invertora 24A i 16A, dok je podešenje zaštite od prekomjerne struje invertora 25,2A i 16,8A, respektivno. Zaštita distributivne mreže od prekomjerne struje i kratkoga spoja je izvedena automatskim osiguračima 35A. Invertori imaju ugrađenu naponsku i frekventnu zaštitu:

- Podešenje prenaponske zaštite na invertorima je 1,1U_{ng} uz vrijeme djelovanja zaštite invertora od 3s, a podnaponske

zaštite je $0,7U_{ng}$ uz vrijeme djelovanja zaštite invertora od 3s.

- Podešenje nadfrekventne zaštite na inverterima je 52Hz uz vrijeme djelovanja invertora od 1s, a podfrekventne zaštite je 48Hz uz vrijeme djelovanja invertora od 1s.
- Uključene su i zaštite od povratne snage, nesimetričnog opterećenja, injektovanja istosmjernje struje iz fotonaponske elektrane (1A DC, 200ms) i od ostrvskog rada fotonaponske elektrane.

Uzemljenje je izvedeno na način da se svi metalni djelovi (noseća konstrukcija: Fe i Al, moduli) međusobno povezani i povezani na Fe-Zn traku za uzemljenje (TN-S sistem). Duž cijelog TN-S sistema razdvojeni su neutralni i zaštitni vod. Za izjednačavanje potencijala koristi se jednopotencijalna sabirnica na kojoj se vrši međusobno galvansko povezivanje. Sva instalacija izvodi se petožilnim kablovima, gdje se peti vodič spaja na zaštitni kontakt za uzemljenje, a na drugom kraju na zaštitnu jednopolnu sabirnicu smještenu u niskonaponskom razvodnom ormaru, koji je galvanski povezan sa zajedničkim temeljnim uzemljivačem



Slika 2. Blok šema fotonaponske elektrane

IV. REZULTATI MJERENJA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE FOTONAPONSKOJE ELEKTRANE

U okviru standarda i normi koji definišu granične vrijednosti pokazatelja kvaliteta električne energije ili kvaliteta napona sreće se niz parametara. Uopšteno rečeno većina parametara se dobija na osnovu dvije analize (mjerenja): mjerenjem flikera i mjerenjem harmonika. Procedura mjerenja flikera je definisana standardom IEC61000-4-15, dok je procedura mjerenja harmonika i interharmonika definisana standardom IEC61000-4-7. Procedura mjerenja, te način obrade rezultata i postupci mjerenja su definisani standardom IEC61000-4-30. Ovaj standard je postavio veoma stroge kriterije po mjernu opremu. U skladu sa evropskom normom EN50160 izvršena su mjerenja kvaliteta električne energije u tački primopredaje sa fotonaponske elektrane na NN elektrodistributivnu mrežu. Mjerenja su obavljena u periodu probnog rada fotonaponske elektrane u dva ciklusa, svaki sa trajanjem po sedam dana i to:

1. Prvi ciklus mjerenja – prije priključenja fotonaponske elektrane na ED mrežu
2. Drugi ciklus mjerenja – nakon uključivanja fotonaponske elektrane na ED mrežu

Za mjerenja je korišten mrežni analizator, model MAVOWATT 70 (slika 3) koji vrši mjerenja u skladu sa IEC61000-4-30 Klase

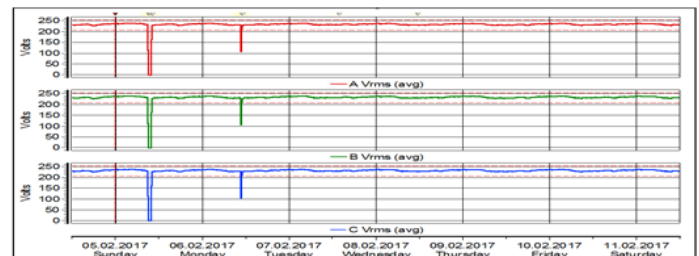
A/IEEE 1159/EN50160. Za obradu podataka je korišten licencirani softver DRAN-VIEW - 6 - Professional. Predstaviti ćemo drugi ciklus mjerenja priključene fotonaponske elektrane na ED mrežu.



Slika 3. MAVOWATT Power 70 Xplorer – šema spajanja

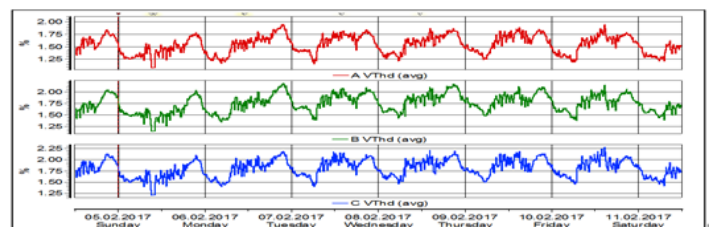
IV.1. Varijacije napona (kolebanje napona)

Slika. 4 prikazuje efektivne vrijednosti faza napona $V_{rms-avg}$ (usrednjenu vrijednost na 10-min segmentu). Crvene isprekidane linije prikazuju donju ($U_n-10\%$) i gornju ($U_n+10\%$) graničnu vrijednost napona po normi EN50160. S obzirom da se standardne granice ($U_n \pm 10\%$) ne prekoračuju u više od 5 % slučajeva na 7-dnevnom periodu vremena zaključujemo da je norma EN50160 - **zadovoljena**. U jednom trenutku je došlo do u 15,46 h, dok je u drugom trenutku u 11,55h došlo do kolebanja napona, odnosno pada na vrijednost 110 V.



Slika 4. Prikaz efektivnih vrijednosti faza napona usrednjenih na 10-min segmentu

IV.2. Faktor harmonijskog izobličenja napona (THD)



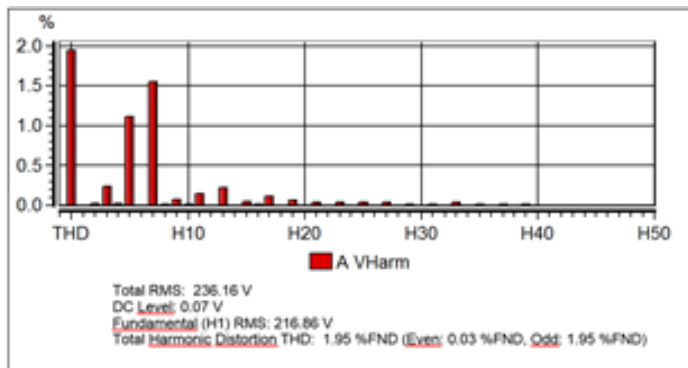
Slika 5. Prikaz faktora harmonijskog izobličenja napona (THD) po fazama

Slika 5 prikazuje vrijednosti THD-a napona po fazama tokom mjernog perioda, odnosno THD-avg (usrednjenu vrijednost na 10-min segmentu). Pri proračunu THD-a napona, u obzir su uzeti svi harmonici, uključujući 40-ti. Vrijednosti su svedene na procenete U_1 (u skladu sa BAS EN50160). Sa slike se vidi da vrijednosti

THD-a tokom mjernog perioda imaju približno identične vrijednosti u svakoj fazi. Vrijednosti THD-a se kreću u opsegu od 1,0% U_1 do 2,3% U_1 , odnosno nikad ne prekoračuju graničnu vrijednost od 8% U_1 , čime ostaju unutar graničnih vrijednosti definisanih normom EN50160 – **norma zadovoljena**.

IV.3. Učešće viših harmonika i THD napona

IV.3.1. Vrijednosti za fazu A



Slika 6. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze A

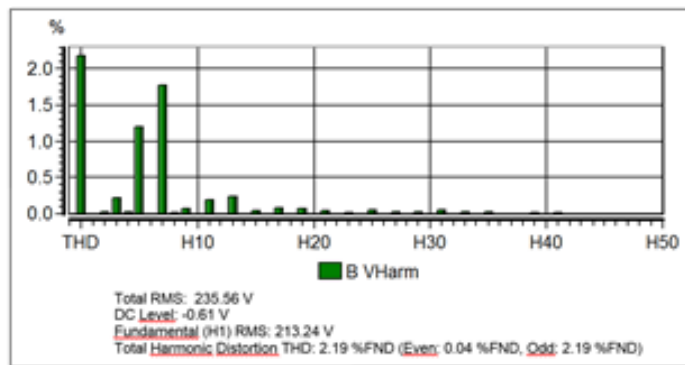
Slika 6 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procenete osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze A u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Sa slike se može vidjeti izraženo prisustvo neparanih harmonika, posebno petog i sedmog. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparanih harmonika 1,95 %, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,03 % osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 1,95 % osnovnog harmonika. Iz tabele 1 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 – **norma zadovoljena**.

Tabela 1. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi A

NEPARNI VIŠI HARMONICI						PARNI VIŠI HARMONICI		
Koји nisu djeljivi sa tri			Koји su djeljivi sa tri					
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard
5	1,08	<6,0 DA	3	0,33	<5,0 DA	2	0,03	<2,0 DA
7	1,44	<5,0 DA	9	0,14	<1,5 DA	4	0,04	<1,0 DA
11	0,40	<3,5 DA	15	0,09	<0,5 DA	6-24	≤0,03	<0,5 DA
13	0,21	<3,0 DA	21	0,05	<0,5 DA			
17	0,18	<2,0 DA						
19	0,10	<1,5 DA						
23	0,08	<1,5 DA						
25	0,05	<1,5 DA						

IV.3.2. Vrijednosti za fazu B

Slika 7 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procenete osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze B u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparanih harmonika 2,19 %, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,04% osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 2,19 % osnovnog harmonika. Iz tabele 2 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 – **norma zadovoljena**.



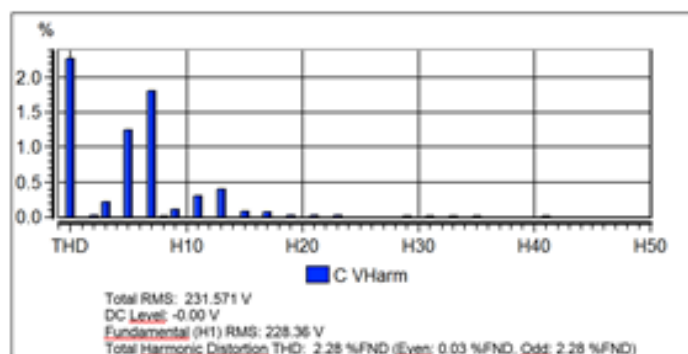
Slika 7. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze B

Tabela 2. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi B

NEPARNI VIŠI HARMONICI						PARNI VIŠI HARMONICI		
Koји nisu djeljivi sa tri			Koји su djeljivi sa tri					
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard
5	1,20	<6,0 DA	3	0,28	<5,0 DA	2	0,03	<2,0 DA
7	1,65	<5,0 DA	9	0,12	<1,5 DA	4	0,03	<1,0 DA
11	0,36	<3,5 DA	15	0,07	<0,5 DA	6-24	≤0,03	<0,5 DA
13	0,24	<3,0 DA	21	0,05	<0,5 DA			
17	0,20	<2,0 DA						
19	0,12	<1,5 DA						
23	0,10	<1,5 DA						
25	0,07	<1,5 DA						

IV.3.3. Vrijednosti za fazu C

Slika 8 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procenete osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze C u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparanih harmonika 2,28%, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,03% osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 2,28% osnovnog harmonika. Iz tabele 3 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 - **norma zadovoljena**.



Slika 8. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze C

Tabela 3. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi C

NEPARNI VIŠI HARMONICI						PARNI VIŠI HARMONICI		
Koји nisu djeljivi sa tri			Koји su djeljivi sa tri					
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard
5	1,25	<6,0 DA	3	0,30	<5,0 DA	2	0,03	<2,0 DA

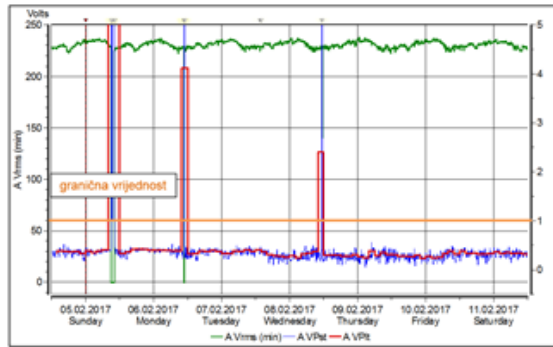
7	1,69	<5,0	DA	9	0,12	<1,5	DA	4	0,03	<1,0	DA
11	0,38	<3,5	DA	15	0,08	<0,5	DA	6-24	≤0,03	<0,5	DA
13	0,28	<3,0	DA	21	0,04	<0,5	DA				
17	0,16	<2,0	DA								
19	0,11	<1,5	DA								
23	0,08	<1,5	DA								
25	0,06	<1,5	DA								

flikera ispod granične vrijednosti koja iznosi 1, zaključuje se da je – **norma zadovoljena**.

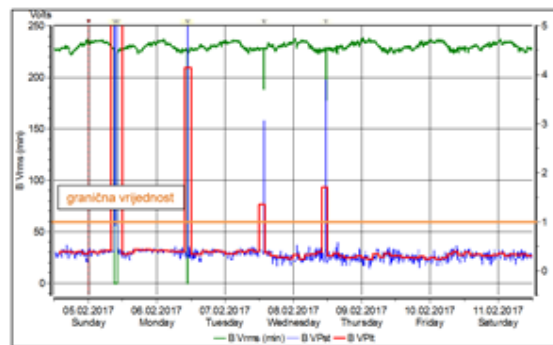
Flicker

Range	Threshold	Compliance:			
		CHA	CHB	CHC	
<1	95.0	100.0%	100.0%	100.0%	PASSED

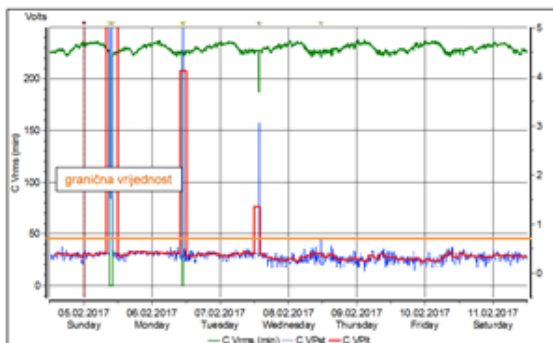
IV.4. Treperenje (flicker)



Slika 9. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu A



Slika 10. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu B

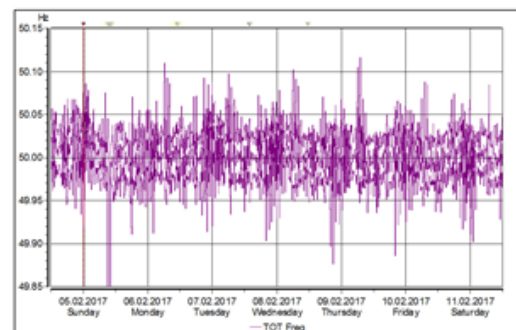


Slika 11. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu C

Na slikama 9, 10 i 11 su prikazane minimalne efektivne vrijednosti napona, te kratkotrajni i dugotrajni flikeri po fazama. Norma EN50160 dozvoljava da 5% vrijednosti dugotrajnog flikera – Plt prelazi graničnu vrijednost, koja iznosi 1, tokom mjernog perioda od 7 dana. Vrijednost flikera koja prelazi vrijednost 1 uzrokovana je naponskim propadima i prekidom napajanja. S obzirom da je tokom 95% vremena mjernog perioda vrijednost dugotrajnog

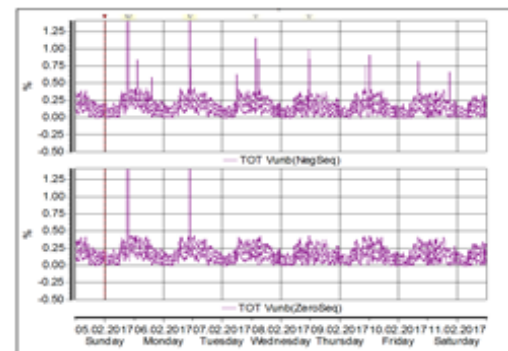
IV.5. Frekvencija napona napajanja

U periodu kada je zabilježen prelazni proces prekida i uspostavljanja napona napajanja, izmjerena je vrijednost frekvencije 47,02 Hz. Sa slike 12 se može uočiti da 100% vrijednosti frekvencije napona napajanja ostaje unutar granica 50Hz +4% /-6%, odnosno u granicama od 47Hz do 51Hz – **norma zadovoljena**.



Slika 12. Prikaz vrijednosti frekvencije napona napajanja

IV.6. Nesimetričnost napona napajanja



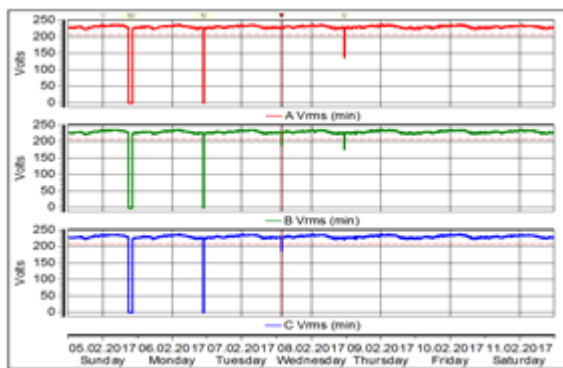
Slika 13. Prikaz nesimetričnosti napona napajanja tokom perioda mjerenja

Prvi dio slike 13 prikazuje efektivne vrijednosti inverzne komponente napona napajanja izražene kao procentualni udio prema vrijednostima direktne komponente, usrednjene na 10-minutnom intervalu, a drugi dio prikazuje efektivne vrijednosti nulte komponente napona napajanja izražene kao procentualni udio prema vrijednostima direktne komponente, usrednjene na 10-minutnom intervalu (informativno). Nesimetričnost je definisana na sljedeći način: Pri normalnim pogonskim uslovima rada 95% svih 10-minutnih usrednjenih efektivnih vrijednosti inverzne komponente napona moraju ostati unutar granice od 2% odgovarajuće direktne komponente. S obzirom da tokom 95% vremena mjernog perioda od sedam dana, vrijednosti svih 10-

minutnih usrednjenih efektivnih vrijednosti inverzne komponente ostaju unutar granice 2% odgovarajuće direktne komponente zaključuje se da je – **norma zadovoljena**.

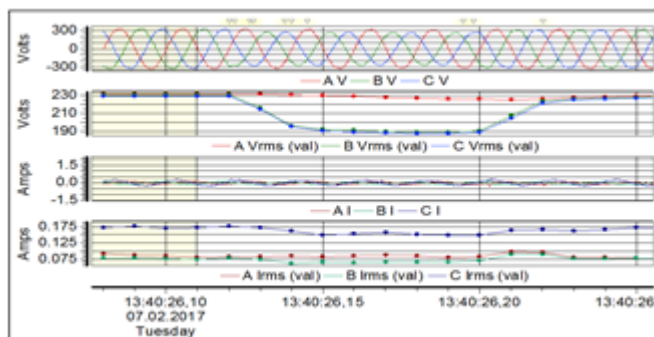
IV.7. Naponski propadi, prenaponi i prekidi napajanja

Tokom mjernog perioda od sedam dana zabilježena su **dva naponska propada**.

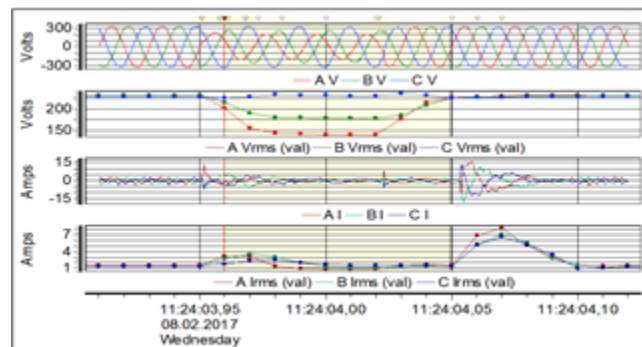


Slika 14. Minimalne vrijednosti efektivnih vrijednosti faza napona na 10-minutnom intervalu vremena

Slika 14 pokazuje minimalne iznose efektivnih vrijednosti faza napona na 10-minutnom intervalu vremena, gdje su efektivne vrijednosti napona računane svakih 10 ms. U jednom periodu u 13:40h zabilježen je naponski propad u fazama B i C, i trajao je 80,11ms. Preostali napon u fazi B iznosio je 189,0V (odnosno 82,17% nazivnog napona), a u fazi C 187,6V (odnosno 81,56% nazivnog napona). U drugom periodu u 11:24h zabilježen je naponski propad u fazama A i B, i trajao je 89,99ms. Preostali napon u fazi A iznosio je 140,3V (odnosno 61,0% nazivnog napona), a u fazi B 178,6V (odnosno 77,65% nazivnog napona). S obzirom na prikazane talasne oblike i efektivne vrijednosti struja i napona (slike 15 i 16), zaključujemo da su ovi naponski propadi došli iz mreže, odnosno da ih nije uzrokovala fotonaponska elektrana.

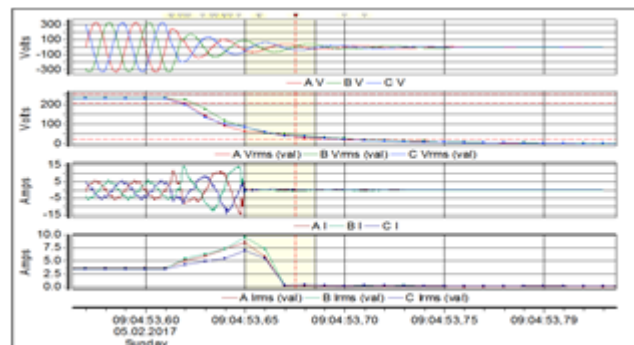


Slika 15. Naponski propad faza B i C

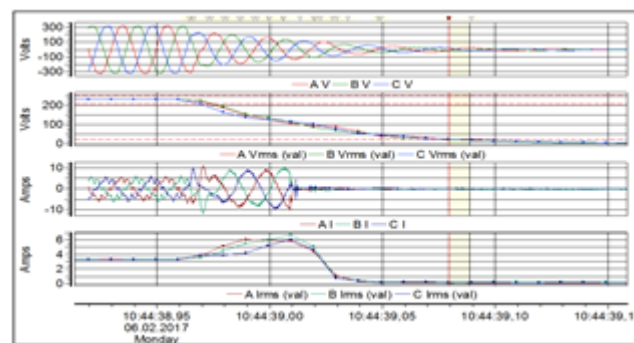


Slika 16. Naponski propad faza A i B

Tokom mjernog perioda sa priključenom solarnom elektranom na NN distributivnu mrežu, zabilježena su **dva prekida napajanja** (eng. interruptions). Prvi prekid napona napajanja zabilježen je u jednom periodu u 09:04h (slika 17). Prekid je trajao 57minuta i 52,8 sekundi. Drugi prekid napona napajanja zabilježen je u drugom periodu u 10:44h (slika 18). Prekid je trajao 6 minuta i 1,4 sekundi. Analogno sa prethodnim slikama, u normalnom režimu rada elektrane, dolazi do naponskog propada koji prelazi u prekid napajanja. Elektrana reaguje na način da u mrežu injektira veću vrijednost struje (zbog veće potencijalne razlike, između elektrane i mreže), a nakon izvjesnog vremena zaštita izbacuje elektranu sa mreže. Zaključujemo da elektrana nije izazvala ove prekide napajanja.



Slika 17. Prekid napona napajanja



Slika 18. Prekid napona napajanja

Prenaponi (eng. swells) se po standardu klasificiraju također po visini i vremenu trajanja, a nakon obrade mjernih rezultata nisu zabilježeni. Normom EN50160 nije određen granični broj propada napona, prekida napona napajanja, kao ni prenapona

tokom određenog perioda. To je predmet dogovora (ugovora) između kupca i isporučioaca električne energije.

IV.8. Tranzijentni prenaponi

Tokom mjernog perioda sa priključenom solarnom elektranom na NN distributivnu mrežu, registrovano je ukupno 86 tranzijentnih prenapona, čiji je iznos unutra granica od 160 do 200%. Norma EN50160 preporučuje da se broj tranzijenata daje **informativno**.

V. ZAKLJUČAK

Budućnost obnovljivih izvora energije u svijetu zagarantovana je potrebom država za održivim razvojem, zaštitom okoliša i energetske efikasnošću, zbog toga što obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida (CO₂) u atmosferu. Smanjenje emisije CO₂ u atmosferu je politika Evropske unije, pa tako i FBiH. Analiza uticaja elektrana na kvalitet električne energije obavezna je u postupku priključenja na mrežu i kao takva zahtijeva ozbiljan pristup. Kao kriterij za ocjenu kvaliteta električne energije u tački primopredaje korišteni su kriteriji standarda BAS EN50160, definisan graničnim vrijednostima parametara mrežnog napona koji se isporučuje krajnjim potrošačima. Shodno tome, u radu je obavljena detaljnija analiza svih važnih aspekata koji se tiču metrološkog obezbjeđenja propisanog nivoa kvaliteta isporučene energije, prvenstveno preko analize i pregleda osnovnih mjernih parametara i pokazatelja kvaliteta, važeće normative regulative, kao i uređaja za mjerenje i analizu standardizovanih parametara kvaliteta. Tokom mjernog perioda u tački priključenja solarne elektrane, bez priključene elektrane, registrovana su dva naponska propada, koji su praćeni povećanim vrijednostima flikera. Bez obzira na registrovane događaje, broj prekoračenja graničnih vrijednosti ostaje unutar dozvoljenog broja prekoračenja po standardu BAS EN50160, tako da je standard BAS EN50160 zadovoljen. Tokom mjernog perioda u tački priključenja solarne elektrane sa priključenom elektranom u probnom radu registrovana su dva naponska propada i dva prekida napona napajanja. Ovi događaji su praćeni povišenim vrijednostima flikera Pst i Plt. U analizi događaja je pokazano da uzročnik ovih događaja nije solarna elektrana. Pomenuti, kao i svi ostali parametri kvaliteta električne energije su unutar dozvoljenih vrijednosti standarda BAS EN50160. Imajući u vidu gore navedene činjenice i rezultate mjerenja kvaliteta električne energije zaključujemo da fotonaponska elektrana nema uticaja na kvalitet električne energijem u tački primopredaje električne energije u distributivnu mrežu.

LITERATURA

- [1] J. Stones, A. Collinson, "Power quality", Power Engineering Journal, vol. 15 (2), 2001, pp. 58-64.
- [2] R. Ghandehari, A. Jalilian, "Economical impacts of power quality in power systems", 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004) IEEE, vol 2, 6-8 September 2004, pp. 893-897.
- [3] A. Thapar, T.K. Saha, Y.D. Zhao, (2004). "Investigation of power quality categorisation and simulating its impact on sensitive electronic equipment", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, 6-10 June 2004, pp. 528-533.

- [4] R.C. Sermon, "An overview of power quality standards and guidelines from the end-user's point-of-view", IEEE Rural Electric Power Conference, 8-10 May 2005, B1/1-B1/5.
- [5] A. Bijedić, H. Salkić, "The Analysis of the Impact on Electrical Energy Quality of Small Solar Plant in Trial Period", IREE-International Review of Electrical Engineering, vol. 9, February 2014, pp.121-126.
- [6] A. Softić, Š. Gruhonjić Ferhatbegović, H. Salkić, I. Divković, H. Imamović, „Analiza uticaja solarne elektrane na distributivnu mrežu“, XI Savjetovanje BH CIGRE, 15- 19.9.2013, Neum, BiH, STK C5
- [7] J. Rivier, T. Gomez, "A conceptual framework for power quality regulation", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, vol. 2, 2000.
- [8] Z. Klaić, S. Nikolovski, "Kvaliteta elektricne energije - mjerenja prema normi EN50160", VI savjetovanje HR Cigre, Cavtat, 09. - 13. 11 2003.
- [9] H. Salkić, A. Bijedić, A. Softić, "Analiza uticaja solarne elektrane na kvalitet električne energije distributivne mreže", CIRED 2016 - X Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, 26. 09. - 30. 09. 2016, Vrnjačka Banja, Srbija
- [10] J. Saletović. H. Salkić, A .Softić, "Virtuelne elektrane – koncept, perspektive, izazovi", XIII Savjetovanje BH CIGRE, 17- 21.09.2017, Neum, BiH, STK C5
- [11] J. Saletović. H. Salkić, "Optimalni odnos nazivnih snaga fotonaponske elektrane", XIV Savjetovanje BH CIGRE, 20- 23.10.2019, Neum, BiH, STK C5
- [12] H. Salkić, T. Konjić, M. Stojkov, S. Maksumić, "Parameters of distribution network in connection point of solar measurement and analysis of power quality power plant", XII Savjetovanje BH CIGRE, 04- 08.10.2015, Neum, BiH, STK C5
- [13] EN 50160:2007, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks", CENELEC, September 2007
- [14] IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems, IEEE Std 1453-2004

AUTORI

Hidajet Salkić – doktor tehničkih nauka iz oblasti elektrotehnike, profesor – fakultet CEPS, Kiseljak, BiH

h.salkic@epbih.ba

Amir Softić – doktor tehničkih nauka iz oblasti elektrotehnike,

a.softic@epbih.ba

Amer Salkić – dipl. ing. el.,

salkicamer@gmail.com

Hidajet Salkić – h.salkic@epbih.ba , tel. +387-35-304-273