

UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE U TOČCI PRIKLJUČENJA NA DISTRIBUTIVNU MREŽU

INFLUENCE OF PV PLANT CONNECTION ON POWER QUALITY IN POINT OF COMMON COUPLING IN DISTRIBUTION NETWORK

Ivan Ramljak¹

Sažetak: U posljednjih deset do dvadeset godina pojavilo se značajno zanimanje za priključenjem proizvodnih objekata na distribucijsku mrežu. Ova je namjera poznata kao distribuirana proizvodnja električne energije. Fotonaponske (solarne) elektrane jedan su od vidova obnovljivih izvora energije koji u posljednje vrijeme doživljavaju značajan razvoj. Međutim, te fotonaponske elektrane mijenjaju klasičnu distribucijsku mrežu na način da ta mreža više nije pasivna mreža. Utjecaj fotonaponskih elektrana na distributivnu mrežu predstavlja se kroz pitanja promjene kvalitete električne energije, električne zaštite, tokova snaga, gubitaka električne energije i dr. Potrebno je analiziranje stanja u mreži prije i nakon puštanja bilo koje fotonaponske elektrane na mrežu, što mora biti uvjetovano određenim normama. U ovom radu kroz primjer jedne fotonaponske elektrane bit će opisani utjecaji te elektrane na samu električnu mrežu na koju je spojena, po pitanju kvalitete električne energije a prema EN 50160 i prema proračunima tehničkih mogućnosti priključenja fotonaponske elektrane na mrežu. Određeni bitni parametri kvalitete električne energije koji nisu strogo definirani u EN 50160 također će biti analizirani prema drugim normama.

Ključne riječi: fotonaponska (solarna) elektrana, kvaliteta električne energije, niskonaponska distributivna mreža

Abstract: Considerable interest in connecting the power plants to the distribution network has emerged in the last ten to twenty years. This intention is known as distributed generation. Photovoltaic (solar) power plants are one of the forms of renewable energy which have experienced a significant development in the recent years. However, photovoltaic power plants are changing the classical distribution network so that the network is no longer radial network. Impact of photovoltaic power plants to the distribution network is presented through the issues of power quality changes, electrical protection, power flow, energy losses, etc. There is a need to analyse the electrical network before and after connecting any photovoltaic power plant to the network, which must be conditioned by certain standards. In this work, through an example of a photovoltaic plant, we will describe the impact of that plant on electric network where that plant is connected in terms of power quality according to EN 50160 and calculations of technical possibilities of connecting photovoltaic plant on electrical network. Certain important parameters of power quality, not strictly defined in EN 50160, will also be analysed in terms of some other standards.

Keywords: photovoltaic (solar) power plant, power quality, low voltage distribution network

UVOD

Suvremeni elektroenergetski sustavi uglavnom su razvijeni tijekom posljednjih 50 godina. Razvoj je slijedio ideju vodilju prema kojoj su veliki središnji generatori preko transformatora injektirali električnu snagu u visokonaponsku prijenosnu mrežu. Zatim je prijenosni sustav korišten za transport snage, često i na velikim udaljenostima. Na kraju, snaga je iz prijenosnog sustava preko serije

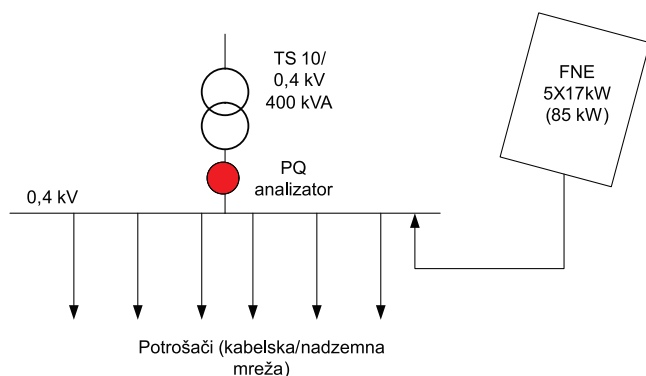
distribucijskih transformatora usmjeravana kroz srednjenaponsku i niskonaponsku distribucijsku mrežu prema potrošačima na nižem naponu. Međutim, odnedavno se ponovno pojavilo značajno zanimanje za priključenjem proizvodnih objekata na distribucijsku mrežu. Ova je namjera poznata kao distribuirana proizvodnja električne energije [1]. Obnovljive izvore energije čine izvori koji vremenom ne mogu nestati i koji ne zagađuju okoliš. To im je prednost pred konvencionalnim izvorima energije. Danas je to jako bitno jer je zaštita okoliša postala bitan faktor opstojnosti čovjeka na Zemlji. Najeksplozivniji obnovljivi izvori energije su iz vjetra (vjetroelektrane), sunca (FNE) i biomase (elektrane na biomasu). Naravno, na

¹ J.P. "Elektroprivreda HZ-HB" d.d. Mostar,
Bosna i Hercegovina
ivanramljak1985@gmail.com
Rad dostavljen: 19.08.2014.; Rad prihvaćen: 24.09.2014.

neki način se i sve hidroelektrane mogu svrstati u obnovljive izvore energije. Stanje u BiH po pitanju implementacije obnovljivih izvora dosta je loše. Hidropotencijal Bosne i Hercegovine znatno je visok, ali je malo izgrađenih proizvodnih objekata obnovljivih izvora energije (male hidroelektrane, vjetroelektrane, solarne elektrane i dr.). Više se o stanju obnovljivih izvora energije može naći u [2]. Ciljevi Europske Unije su da se konstantno povećava udio dobijene energije iz obnovljivih izvora. Prema tome, pred nama u BiH je jako velik izazov. Valja napomenuti da obnovljivi izvori ipak donose promjene u cjelokupni režim rada elektroenergetskog sustava (zaštita, tokovi snaga, kvaliteta električne energije i dr.) [3]. U ovom radu bit će analizirani rezultati mjerenja parametara kvalitete električne energije na sabirnicama niskog napona gdje je priključena sama fotonaponska elektrana (FNE), prije i nakon priključenja FNE uz usporedbu tih rezultata s proračunom tehničkih mogućnosti priključenja FNE na navedenu niskonaponsku mrežu (NNM).

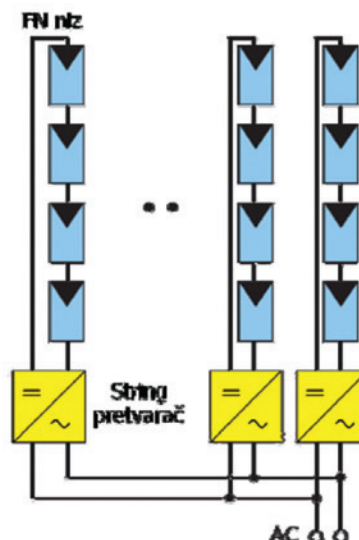
1. SMJEŠTAJ I NAČIN PRIKLJUČENJA FNE NA NNM

FNE koja je predmet proučavanja smještena je na zgradu (krov i fasadu), te je preko pretvarača povezana na transformatorsku stanicu (TS) a time i niskonaponsku mrežu prema Slici 1. Snaga FNE je 85 kW (5 pretvarača po 17 kW). Sama NNM je urbanog tipa i napaja stambene i jednu poslovnu zgradu, javnu rasvjetu i jedno industrijsko postrojenje.



Slika 1: Smještaj i priključenje FNE sa NNM

Važno je još za solarnu elektranu istaknuti da je površina solarnih panela na objektu 505 m², predviđena energija dobijena od 1 kWp godišnje je 1.175 kWh, ozračenost lokacije na kojoj se nalazi FNE 1.392 kWh/m². FNE je na mrežu povezana putem pretvarača za niz FN modula-string pretvarači, njih ukupno 5 (Slika 2). Za NNM na koju je spojena FNE važno je reći da je vrijednost snage tro-polnog kratkog spoja na mjestu priključenja FNE na NNM 11 MVA.



Slika 2: Pretvarač za niz FN modula – string pretvarač

2. TEHNIČKE MOGUĆNOSTI PRIKLJUČENJA FNE NA DISTRIBUTIVNU MREŽU

Postoji više uvjeta za priključenje FNE na distributivnu mrežu. Potreba da se određeni uvjeti po pitanju priključenja FNE ispune javlja se zbog svojstava koje FNE ima kada se nalazi u paralelnom radu s mrežom. FNE svojim radom između ostalog mogu bitno utjecati na iznos napona u stacionarnom stanju (injektiranje proizvedene električne energije u distribucijsku mrežu), na izobličenje valnog oblika napona (postojanje energetskog pretvarača), te mogu uzrokovati smetnje prijemnicima mrežnog tonfrekventnog upravljanja. To su samo neki od utjecaja FNE na kvalitetu električne energije. Također, FNE utječe na mrežu po pitanju zaštite (mreže više nisu pasivne uplivom FNE) te se tokovi snaga mijenjaju u samoj mreži. Bitno je još napomenuti utjecaj FNE na gubitke u mreži. Sve navedeno je samo mali dio od mogućih utjecaja FNE na mrežu. Osnovni proračuni koji trebaju potvrditi mogućnost/nemogućnost priključenja FNE na neki čvor u mreži, po pitanju kvalitete električne energije, su analitički računi koji su opisani u velikom broju literaturu [4]-[10]. Prema navedenoj literaturi postoje 4 osnovna kriterija priključenja FNE na mrežu koja moraju biti ispunjena da bi se FNE priključila na mrežu po pitanju kvalitete električne energije:

- kriterij dozvoljenog odstupanja napona (kriterij dozvoljenje snage),
- kriterij snage kratkog spoja,
- kriterij flikera,
- kriterij dozvoljenih struja viših harmonika.

Kriterij snage kratkog spoja je od interesa za opremu ugrađenu u mrežu i provjerava se samo za FNE instalirane snage preko 1 MVA, jer se smatra da elektrane manje snage ne pridonose povećanju snage kratkog spoja u mreži [6].

FNE se može priključiti na elektrodistributivnu mrežu bez štetnih utjecaja po pitanju odstupanja napona ako je ispunjeno:

$$S_{ngm} \leq \frac{S_{ks}}{500} \quad (1)$$

Ukoliko taj uvjet nije ispunjen potrebno je provjeriti uvjet:

$$\Delta u_m \leq k_{i,max} \cdot \frac{S_{ngm}}{S_{ks}} \quad (2)$$

Analiza viših harmonika radi se uz pomoć podataka proizvođača pretvarača o harmonijskoj struji pretvarača, uz izraz:

$$I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} \cdot S_{ks} \quad (3)$$

Kriterij utjecaja flikera može se provjeriti pomoću faktora smetnji (A_{lt}) kojeg uzrokuju dugotrajni flikeri, iz izraza:

$$A_{lt} = (c_f \cdot \frac{S_{ngm}}{S_{ks}})^3 \leq 0,1 \quad (4)$$

gdje je:

S_{ngm} - nazivna snaga pretvarača FNE (MVA)

S_{ks} - nazivna snaga kratkog spoja mreže gdje se priključuje FNE (MVA),

Δu_m - promjena napona (%),

$k_{i,max}$ - koeficijent dobijen kao količnik struje uključenja i nazivne struje pretvarača FNE i iznosi ovdje 1,

I_{vhdoz} - dozvoljena vrijednost struje višeg harmonika na naponskom nivou pretvarača (A/MVA). Ove vrijednosti su dane u literaturi [4],

$I_{vhs,v,\mu}$ - vrijednost struje višeg harmonika koja je svedena na snagu kratkog spoja na mjestu priključenja FNE na distributivnu mrežu DM (A). Ove su vrijednosti uzete iz kataloških podataka o pretvaraču,

c_f - koeficijent flikera. Označava osobinu FNE da proizvodi flikere. Maksimalna vrijednost ovog koeficijenta, koja se uzima za FNE ako se ne zna točna vrijednost koju daje proizvođač pretvarača, je 40.

Uzimajući vrijednosti iznad i uzimajući u obzir vrijednosti date u poglavlju 1, proračunom se dobije da se po svim kriterijima FNE može priključiti na DM. To je činjenica koja je ponajprije uvjetovana snagom trolnog kratkog spoja na mjestu priključenja FNE i samom snagom FNE. U ovom slučaju, pošto se FNE spaja na same niskonaponske sabirnice TS u pitanju je velika snaga trolnog kratkog spoja mreže u točki priključenja FNE, a i sama snaga FNE nije velika za ovaj slučaj. Sve to dovodi do toga da je proračunom moguće sigurno utvrditi da nema smetnji za priključenje ove FNE na DM. Ovi izračuni trebaju biti uspoređeni sa rezultatima mjerenja kvalitete električne energije, prije i nakon priključenja FNE.

3. EUROPSKA NORMA EN 50160 I MJERENJE KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

3.1. Europska norma EN 50160

S obzirom da je povezivanje (stalna veza) BiH s europskim elektroenergetskim sistemom nužnost, nužno je i

prilagođavanje naše zakonske regulative i normizacije u tom području sa zakonskim regulativima EU. Budući da će europska norma o kvaliteti električne energije u elektrodistribucijskom sustavu - EN 50160 2016. godine biti prihvaćena i u BiH, potrebno se upoznati s tom normom i analizirati što ona donosi.

Ova norma definira i opisuje bitne značajke razdjelnog napona na mjestu predaje potrošaču u javnim NN i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. Svrha je norme EN 50160 utvrditi i opisati obilježja razdjelnog napona glede:

- frekvencije,
- veličine,
- oblika krivulje,
- simetrije triju napona faznih vodiča.

Tehnički parametri električne energije, tj. napona koji se promatraju su: frekvencija, promjene napona, treperenje napona, propadi napona, kratkotrajni prekidi napona, duži prekidi napona, privremeni mrežni prenaponi između faznih vodiča i zemlje, impulsni prenaponi između faznih vodiča i zemlje, nesimetrija napona, naponi viših harmonika, naponi međuharmonika, signalni naponi. Izdavač norme je udruženje CENELEC (engl. European Committee for Electrotechnical Standardization, sjedište je u Bruxellesu), a službeno je u upotrebi od 1995. godine. Preporuka EN 50160 daje kvantitativne odlike kvalitete napona u slučaju normalnog pogonskog stanja. Svrha joj je opisati i utvrditi obilježja distributivnog napona pri čemu se ne opisuju prosječne vrijednosti promatranih parametara, već se definiraju najveća odstupanja pojedinih parametara koja se mogu očekivati u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži. Trajanje mjerenja kvalitete električne energije određeno preporukom EN 50160 dogovoreno je tjedan dana, bez prestanka. EN 50160 propisuje granice parametara koje moraju biti zadovoljene unutar 95% perioda mjerenja, dok su u ostalih 5% slučajeva granice parametara šire, ili čak nisu propisane. Granice i intervali mjerenja EN 50160 nalaze se u Tablici I [11].

3.2. Mjerenje parametara kvalitete električne energije prema EN 50160

EN 50160 definira stroge granice vrijednosti određenih naponskih parametara u određenim vremenskim intervalima mjerenja (prema Tablici I). Načini mjerenja parametara kvalitete električne energije iz norme EN 50160 su strogo definirani normom IEC 61000-4, gdje se opisuje način mjerenja pojedinih parametara kvalitete električne energije i dopuštene greške mjerenih parametara. Tako naprimjer norma IEC 61000-4-7 donosi kako se trebaju mjeriti flikeri, IEC 61000-4-15 opisuje mjerenje harmonika, a IEC 61000-4-30 opisuje dopuštene greške mjerenja. Prema IEC 61000-4-30 iz 2003. godine postoje dvije klase uređaja za mjerenje kvalitete električne energije s obzirom na greške pri mjerenju, a to su klasa A i

Tablica I: Parametri kvalitete električne energije prema EN 50160

Parametar	Granične vrijednosti		Mjerni i vrijednosni parametri			
	NN	SN	Osnovna veličina	Interval usrednjavanja	Promatrano razdoblje	Granice (%)
Frekvencija	49,5 do 50,5 Hz 47 - 52 Hz		Prosječna vrijednost	10 s	1 godina	99,5 100
Spore promjene napona	$Un \pm 10\%$ $Un + 10\%/-15\%$		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95 100
Brze promjene napona	5% max 10%	4% 6%	Efektivna vrijednost	10 ms	1 dan	100
Flikeri	Pst Plt<1		Algoritam flikera	10 min 2 h	1 tjedan	95
Padovi napona ≤ 1 min	Ispod 85% Un 10 do 100 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Kratki prekidi opskrbe ≤ 3 min	Ispod 1% Un 10 do 100 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Dulji prekidi opskrbe > 3 min	Ispod 1% Un 10 do 100 godišnje		Efektivna vrijednost	10 ms	1 godina	100
Povremeni prenaponi mrežne frekvencije	<1,5kV	1,7 do 2,0 Un	Efektivna vrijednost	10 ms	–	100
Nesimetrija napona	<2%		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Viši harmonici napona	THD $\leq 8\%$ (tablica do 40 harm.)		Efektivna vrijednost	10 min	1 tjedan	95
Signalni napon	Do 500 Hz: <9% 1-10 kHz: <5%		Efektivna vrijednost	3 s	1 dan	95

klasa B uređaja. Klasa A su uređaji koji su najstrožiji s obzirom na dopuštenu pogrešku mjerenja, tj. dopuštene su "male" pogreške koje su normom 61000-4-30 strogo definirane. Uređaji klase B dopuštaju veće pogreške u mjerenju u odnosu na uređaje klase A, te se dopušta proizvođačima da sami definiraju veličinu pogreške određenih parametara kvalitete električne energije. Međutim, u istoj normi iz 2008. god. uvodi se i klasa S, kao klasa manje zahtjevnost od klase A, a opet sa strogo definiranim greškama mjerenja i samim načinom mjerenja. Razlog uvođenju klase S je tržište koje je bilo preplavljeno raznim uređajima klase B s raznim klasama točnosti za određene parametre kvalitete električne energije što je onda stvaralo probleme tumačenju rezultata mjerenja kvalitete električne energije, zbog pogreške mjerenja koja je varirala od proizvođača do proizvođača uređaja za mjerenje kvalitete električne energije. Znači, najviše performanse glede točnosti moraju zadovoljiti uređaji klase A i oni se koriste za laboratorijska ispitivanja i praktično su "etalon" ostalim klasama uređaja. Uređaji klase S služe za statistička i dijagnostička ispitivanja gdje je dopuštena "malo manja" točnost nego kod uređaja klase A. Uređaji klase B su uređaji najmanje klase točnosti, te o proizvođaču i uređaju ovisi kolika je greška mjerenja. Tu postoje razni uređaji i razne klase točnosti za uređaje klase B (zbog toga se i uvela klasa S). Tako, prema [12], mjerenjima između određenih uređaja klase B i uređaja klase A kao referentnog, došlo se do rezultata da je značajna razlika dobivenih rezultata mjerenja prisutna samo u laboratoriju. S obzirom da su parametri kvalitete električne energije

prema normi EN 50160 određeni kao statistički prosjeci, osnovna značajka uređaja koji se mogu koristiti za određivanje parametara kvalitete napona jest da imaju sposobnost lokalne obrade izmjerenih vrijednosti, te mogućnost pohranjivanja podataka. Dobro je napomenuti da tijekom mjerenja dnevno odstupanje uređaja za ispitivanje kvalitete električne energije od stvarnog vremena je maksimalno dopuštenih 1 sekunda. Mjerenja prema normi IEC 61000-4 moraju se provoditi referentno prema normi za sve uređaje za ispitivanje kvalitete električne energije. Općenito, uređaji za mjerenje kvalitete električne energije krenuli su u nagli razvoj i masovnu primjenu razvojem mikroprocesorske tehnologije. Razvoj mikroprocesorske tehnologije doprinio je kompaktiranju više mjernih instrumenata u jedan uređaj, tako da se u istom kućištu uređaja mogu smjestiti instrumenti za mjerenje snaga, energija, napona, struja ali i svih drugih parametara kvalitete električne energije, sve prema IEC 61000-4. Veličine takvih uređaja danas su takve da uređaj stane i u ormari distributivnih stupnih transformatorskih stanica 10(20)/0,4 (STS). Razvoj mobilne telefonije i telekomunikacija u cjelini također je pridonio razvoju ovakvih uređaja, kako u tehničkom djelu, tako i po pitanju cijene (pojeftinjenje). Provjera kvalitete električne energije, prije razvoja uređaja za monitoring kvalitete električne energije, zasnivala se na praćenju veličine napona, tako da je bilo moguće samo pratiti i kontrolirati veličinu napona. Najvažnije ograničenje masovnoj implementaciji ovakvih uređaja je cijena, koja može biti dosta visoka. Dodatno ograničenje može biti nedovoljno prostora na mjestu gdje

se ovakvi uređaji žele postaviti (ormari STS), što može tražiti dodatna investiranja. Problemi postoje i iz područja telekomunikacija, a vezani su za načine rješavanja prijenosa podataka i cijenu istog. Uređaji za ispitivanje kvalitete električne energije mogu se jednostavno podijeliti na prenosne i na stacionarne uređaje. Detaljnije se o ovim uređajima može pročitati u [3]. Ovo mjerenje je rađeno uređajem (instrumentom) tipa Memobox 300. Memobox 300 smart je sofisticirani uređaj poduzeća LEM (FLUKE) koji služi za analizu kvalitete električne energije, otkrivanje smetnji na uređajima i strojevima i optimizaciju mreže na niskom i srednjem naponu. Postoji više verzija i tipova Memoboxa 300 smart, a korišteni uređaj je naprednog tipa i kao takav je analizator kompletne kvalitete električne energije. Ovaj uređaj spada u uređaje klase točnosti B, gdje su dopuštene veće pogreške mjerenja, nego kod uređaja klase A. Međutim, mjerna nesigurnost (pogreška mjerenja) koja se javlja kod uređaja Memobox 300 smart u industrijskoj praksi je zanemariva u odnosu na rezultate uređaja klase A [12]. Kod ovog uređaja proizvođač je dao dopuštenu mjernu nesigurnost za napon 0,1%; za struju 2%; za flikere 5%; za snagu 2%; za propade napona i prenapone 2% i za THDU(I) od 0,15% (2%) do 5% kod iznosa $THDU(I) > 3\%$.

4. REZULTATI MJERENJA UTJECAJA FNE NA DISTRIBUTIVNU MREŽU

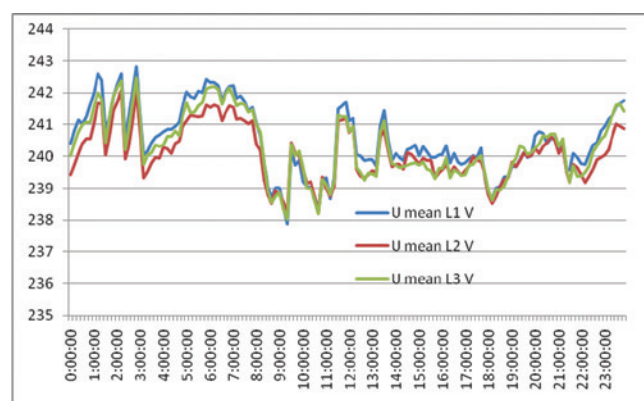
U ovom poglavlju opisan je utjecaj FNE na DM na način da su mjereni bitni parametri kvalitete električne energije prema EN 50160 prije i nakon priključenja FNE na mrežu. Rezultati su analizirani, a mjerenje je rađeno prema Slici 1 u točki priključenja FNE.

4.1. Električni napon

U Tablici II date su efektivne minimalne i maksimalne vrijednosti napona mjerene prema EN 50160 prije i nakon priključenja FNE na DM. Može se zaključiti da priključenjem FNE gotovo da i nema promjene napona (varijacije), odnosno da je ta varijacija zanemariva i daleko ispod graničnih vrijednosti norme prema Tablici I.

Na Slici 3 vide se vrijednosti napona (grafički prikaz) za jedan dan mjerenja. Radi preglednosti je uzet samo

jedan karakterističan dan, a graf naponskih vrijednosti sličan je i za ostale dane i prije i nakon priključenja FNE.



Slika 3: Grafički prikaz efektivne vrijednosti napona za jedan dan mjerenja

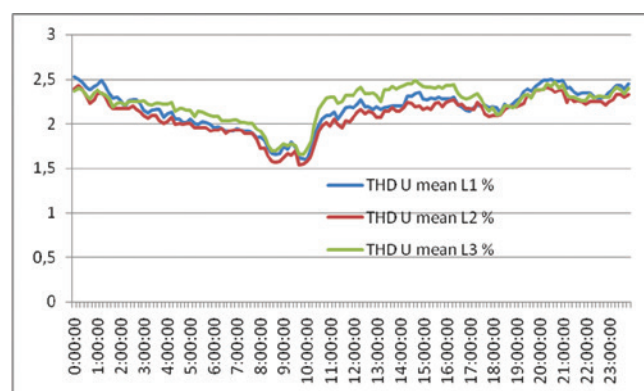
4.2. THDU

U Tablici III date su minimalne i maksimalne vrijednosti ukupne srednje harmonijske distorzije napona (THDU) mjerene prema EN 50160. Može se zaključiti da priključenjem FNE gotovo da i nema promjene THDU, te da je ta promjena zanemariva i daleko ispod graničnih vrijednosti norme od 8%.

Tablica III: Minimalne i maksimalne vrijednosti ukupne srednje vrijednosti THDU prije i nakon priključenja FNE na DM

Prije priključenja FNE:		
THDU (%)	L1 min / max	1,56 / 2,6
	L2 min / max	1,62 / 2,6
	L3 min / max	1,7 / 2,57
Nakon priključenja FNE:		
THDU (%)	L1 min / max	1,6 / 2,68
	L2 min / max	1,53 / 2,6
	L3 min / max	1,66 / 2,7

Na Slici 4 prikazan je THDU za jedan karakterističan dan. Prikazani je graf dosta sličan i za ostale dane. Može se reći da priključenjem FNE ne utječe na THDU.



Slika 4: Grafički prikaz srednje vrijednosti THDU za jedan dan mjerenja

Tablica II: Minimalne i maksimalne vrijednosti efektivne vrijednosti napona prije i nakon priključenja FNE na DM

Prije priključenja FNE:		
Napon (V)	L1 min / max	238,26 / 243,73
	L2 min / max	237,72 / 242,48
	L3 min / max	238,01 / 243,02
Nakon priključenja FNE:		
Napon (V)	L1 min / max	237,16 / 243,43
	L2 min / max	236,69 / 242,28
	L3 min / max	236,85 / 242,91

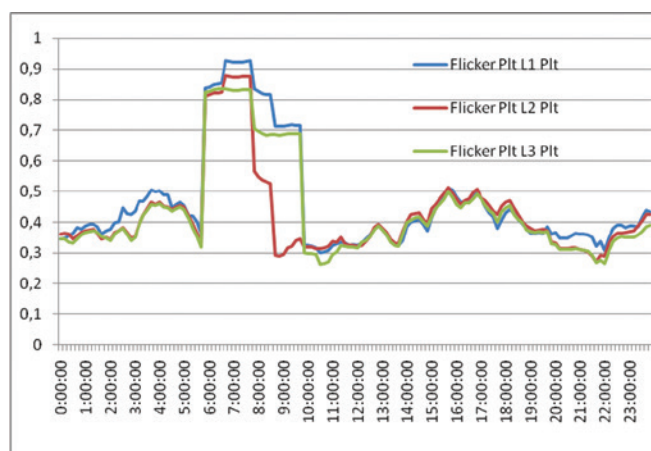
4.3. Flicker P_{LT}

Vrijednosti dugotrajnog flikera date su u Tablici IV. Vidi se da je priključenjem FNE smanjena vrijednost dugotrajnih flikera. Dakle, priključena FNE je poboljšala stanje na mjestu priključenja po pitanju flikera. Treba napomenuti da po apsolutnom iznosu i prije i nakon priključenja FNE, vrijednost dugotrajnih flikera nije prelazila graničnu vrijednost iz norme EN 50160.

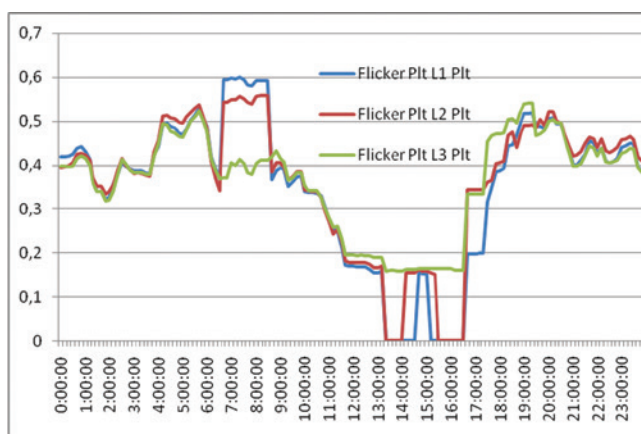
Tablica IV: Vrijednosti dugotrajnog flikera P_{LT} prije i nakon priključenja FNE na DM

Prije priključenja FNE:		
Flicker P_{LT}	L1	0,925
	L2	0,877
	L3	0,836
Nakon priključenja FNE:		
Flicker P_{LT}	L1	0,6
	L2	0,614
	L3	0,596

Vrijednosti flikera za jedan karakterističan dan prije i nakon priključenja FNE grafički su prikazane na Slici 5 i Slici 6 respektivno, gdje se vidi smanjenje vrijednosti dugotrajnih flikera nakon priključenja FNE.



Slika 5: Grafički prikaz dugotrajnog flikera P_{LT} prije priključenja FNE



Slika 6: Grafički prikaz dugotrajnog flikera P_{LT} nakon priključenja FNE

4.4. Nesimetrija

U Tablici V i date su vrijednosti nesimetrije napona prije i nakon priključenja FNE. Nesimetrija je u oba slučaja manja od normom EN 50160 propisanih 2%, a blago povećanje nesimetrije dogodilo se priključenjem FNE iako je to povećanje zanemarivo.

Tablica V: Vrijednosti nesimetrije prije i nakon priključenja FNE

Prije priključenja FNE:	
Nesimetrija (%)	0,54
Nakon priključenja FNE:	
Nesimetrija (%)	0,57

4.5. Viši harmonici napona

U Tablici VI date su maksimalne dopuštene postotne vrijednosti viših harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik.

U Tablici VII, Tablici VIII, Tablici IX i Tablici X prikazane su vrijednosti viših harmonika napona reda 3., 5., 7. i 9. respektivno. Prije i nakon priključenja FNE jedino je primjetno da su vrijednosti 7. harmonika napona povećane nakon priključenja FNE. Vrijednosti harmonika napona i prije i nakon priključenja FNE prema EN 50160 su u propisanim granicama.

Tablica VI: Maksimalne dopuštene postotne vrijednosti viših harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik.

Neparmi harmonici				Parmi harmonici	
Nisu višekratnici od 3		Višekratnici od 3			
Red h	Relativna amplituda	Red h	Relativna amplituda	Red h	Relativna amplituda
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... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Tablica VII: Postotne vrijednosti 3. harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik

Prije priključenja FNE:		
$U_{h3} (\%U_n)$	L1	0,53
	L2	0,42
	L3	0,68
Nakon priključenja FNE:		
$U_{h3} (\%U_n)$	L1	0,58
	L2	0,42
	L3	0,68

Tablica VIII: Postotne vrijednosti 5. harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik

Prije priključenja FNE:		
$U_{h5} (\%U_n)$	L1	2,36
	L2	2,35
	L3	2,3
Nakon priključenja FNE:		
$U_{h5} (\%U_n)$	L1	2,31
	L2	2,25
	L3	2,3

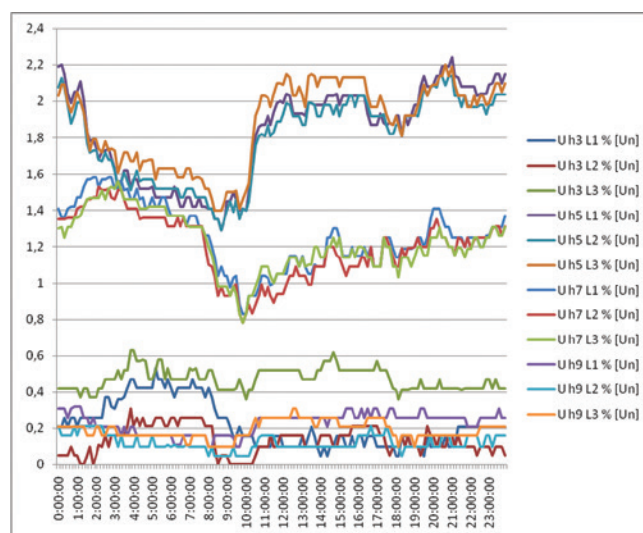
Tablica IX: Postotne vrijednosti 7. harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik

Prije priključenja FNE:		
$U_{h7} (\%U_n)$	L1	1,58
	L2	1,46
	L3	0,88
Nakon priključenja FNE:		
$U_{h7} (\%U_n)$	L1	1,77
	L2	1,72
	L3	1,72

Tablica X: Postotne vrijednosti 9. harmonika napona u odnosu na osnovni harmonik

Prije priključenja FNE:		
$U_{h9} (\%U_n)$	L1	0,32
	L2	0,21
	L3	0,31
Nakon priključenja FNE:		
$U_g (\%U_n)$	L1	0,37
	L2	0,21
	L3	0,32

Vrijednosti harmonika napona su prikazane na Slici 7 za jedan karakterističan dan.



Slika 7: Vrijednosti harmonika napona 3., 5., 7. i 9. za jedan karakterističan dan

5. REZULTATI MJERENJA PARAMETARA KOJE EN 50160 NE DEFINIRA

U ovom su poglavlju opisani parametri kvalitete električne energije koji su dosta bitni, a koje EN 50160 ne definira strogo. Ovi parametri su djelomično definirani Zakonom o električnoj energiji i pripadnim podzakonskim aktima pojedinih Elektroprivreda u BiH a tako i u okolini. S obzirom da EN 50160 ubrzo postaje važeća i u BiH, određeni parametri koje ova norma ne definira morat će ostati definirani nekim drugim aktom/normom. Ova problematika je detaljnije opisana u [3].

5.1. $\cos \phi$ i faktor snage PF

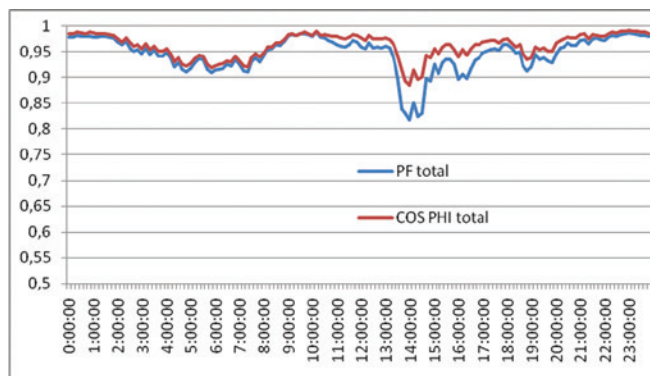
U Tablici XI i Tablici XII prikazana je vrijednost parametara $\cos \phi$ i PF (faktor snage) prije i nakon priključenja FNE. Faktor snage je faktor koji za razliku od $\cos \phi$ uzima u obzir i snagu distorzije D, snagu koju stvaraju viši harmonici koje pretvarači solarnih elektrana injektiraju u mrežu. Zbog toga općenito faktori snage PF imaju niže vrijednosti od $\cos \phi$. Može se primijetiti da je i za slučaj priključenja FNE, PF niži od $\cos \phi$ i da je priključenjem FNE, PF dosta niži (nepovoljniji) nego bez priključene FNE na mjestu mjerenja (u TS). Lošiji PF znači da je povećana prisutnost viših harmoničkih članova što čini da je i distorzijska snaga povećana. Takvo stanje utječe na povećanje tehničkih gubitaka i povećano opterećenje elemenata elektroenergetske mreže. Više o odnosima PF, $\cos \phi$ i samoj snazi distorzije može se naći u [13]-[22] gdje su odnosi snaga i faktora snage detaljno analizirani i objašnjeni sa i bez prisutstva snage distorzije. Tijekom rada FNE približno na nivou nazivne snage (sunčani period), potrošači koje napaja TS na koju je spojena FNE ne uzimaju radnu snagu iz mreže nego iz FNE. Međutim, potrebe za jalovom snagom ostaju iste što pogoršava $\cos \phi$ /PF tim više što je količnik $P_{\text{solara}}/P_{\text{potrošača}}$ veći. Štoviše, filteri viših harmonika koje posjeduje pretvarač uzimaju jalovu snagu čak i kada FNE ne radi. Povećana jalova snaga povećava

Tablica XI: Cos ϕ prije i nakon priključenja FNE

Prije priključenja FNE:		
Cos ϕ	L1 min / max	0,87 / 0,99
	L2 min / max	0,87 / 0,99
	L3 min / max	0,82 / 0,99
Nakon priključenja FNE:		
Cos ϕ	L1 min / max	0,81 / 0,99
	L2 min / max	0,73 / 0,99
	L3 min / max	0,83 / 0,99

gubitke i opterećuje mrežu. Iako PF nije definiran u EN 50160, Elektroprivredni akti Elektroprivreda u kojoj su prisutne FNE određuju da PF/cos ϕ mora biti uobičajno u granicama $\pm 0,8(0,85)$. Prema [23] PF mora biti veći od $\pm 0,8$ pri snazi FNE većoj od 10% nazivne snage. Jedini način uvođenja PF/cos ϕ u granice dane propisima je kompenzacija jalove snage. U Tablici XI i Tablici XII date su minimalne/maksimalne vrijednosti cos ϕ i PF, respektivno, što ne znači da na koncu mjeseca prema obračunu cos ϕ neće biti ukupno u granicama datim propisom.

Odnos PF i cos ϕ za jedan dan je prikazan na Slici 8.

Slika 8: Vrijednosti cos ϕ i PF za jedan karakterističan dan

5.2. THDI

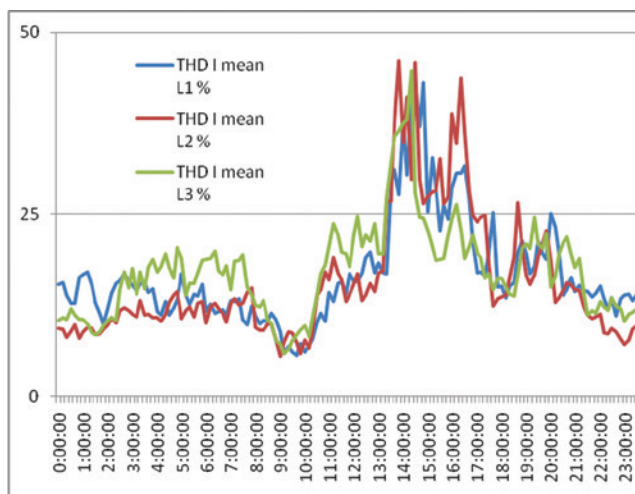
U Tablici XIII prikazane su vrijednosti THDI prije i nakon priključenja FNE. Vidi se da je priključenjem FNE THDI zamjetno povećan. To je na neki način i očekivani rezultat jer sami pretvarači generiraju više harmonike struje, što onda prema EN 50160 povećava THDI. Generiranje viših harmonika struje je posebno izraženo za vrijeme rada FNE sa mnogo manjom snagom od nazivne, dakle u slučajevima startanja pretvarača, nepovoljnih vremenskih uvjeta (oblaci) i djelomičnog zasjenjenja solarnih panela [24]–[28]. Iako je THDI dosta povećan priključenjem FNE i općenito dosta visok, mjerenjem je utvrđeno da vrijednosti pojedinih viših harmonika struje ne prelaze postotne vrijednosti dane u IEEE 519-1996 standardu. To je u skladu i sa činjenicom da je u ovom slučaju kod FNE zadovoljen kriterij dozvoljenih struja viših harmonika (poglavlje 2). Bitno je napomenuti i činjenicu da iako THDI može biti postotno visok, te visoke vrijednosti obično se

Tablica XII: PF prije i nakon priključenja FNE

Prije priključenja FNE:		
PF	L1 min / max	0,86 / 0,99
	L2 min / max	0,86 / 0,99
	L3 min / max	0,80 / 0,99
Nakon priključenja FNE:		
PF	L1 min / max	0,71 / 0,99
	L2 min / max	0,65 / 0,99
	L3 min / max	0,73 / 0,99

javljaju kada pretvarač radi s manjom snagom od nazivne pa su u biti te struje viših harmonika izražene u amperima dosta niske i ne mogu stvarati zamjetne padove napona, a time i povećane vrijednosti viših harmonika napona. Zbog toga se uvodi i tzv. TDDI parametar koji se razlikuje od THDI i jasnije opisuje stvarni utjecaj viših harmonika struje i njihove vrijednosti što se može detaljnije pogledati u [29].

Na Slici 9 prikazana je vrijednost THDI za jedan karakterističan dan nakon priključenja FNE. Povećani THDI prema definiciji iz EN 50160 znači da su povećani viši harmonici struje što dovodi do stvaranja snage distorzije, a time i gubitaka (što je praćeno smanjenim faktorom snage PF).



Slika 9: Vrijednosti THDI za jedan karakterističan dan

Tablica XIII: THDI prije i nakon priključenja FNE

Prije priključenja FNE:		
THDI (%)	L1 min / max	20,2
	L2 min / max	17,8
	L3 min / max	28,9
Nakon priključenja FNE:		
THDI (%)	L1 min / max	43,1
	L2 min / max	46,1
	L3 min / max	53

5.3. Propadi napona

U Tablici XIV prikazani su propadi napona definirani prema EN 50160 prije priključenja FNE. Vidi se da je bilo 30 propada u tjedan dana. Nakon priključenja FNE propada napona nije bilo.

Tablica XIV: Klasifikacija propada napona prema EN 50160 prije priključenja FNE u točki mjerenja

Propadi prije priključenja FNE:		
< 15%	20...<100 ms	12
	100...<500 ms	3
	0,5...<1 s	
...15 < 30%	20...<100 ms	3
	100...<500 ms	1
	0,5...<1 s	
...30 < 60%	20...<100 ms	6
	100...<500 ms	2
	0,5...<1 s	2
...60 < 100%	20...<100 ms	
	100...<500 ms	1
	0,5...<1 s	

Na osnovu toga neupitan je doprinos u ovom slučaju dinamičkoj potpore naponu mreže ove FNE. To znači da propadi koji su se stvarali nakon priključenja FNE, a koji bi bili zabilježeni na ovom mjestu mjerenja da nema FNE, u slučaju postojanja FNE nisu zabilježeni. Naime pretvarač je za vrijeme propada uspio proizvoditi i injektirati reaktivnu snagu što je dovoljno kompenziralo dubinu propada napona da prema EN 50160 ti propadi napona ne budu zabilježeni. Mogućnost dinamičke potpore FNE naponu mreže ovisi ponajviše o podešenju podnaponske zaštite pretvarača. Više o ovome može se naći u [30] i [31]. Potrebna su dodatna mjerenja i analize naponskih propada u točki priključenja FNE da se doista utvrdi utjecaj FNE na naponske propade u točki priključenja FNE.

6. ZAKLJUČAK

U radu je na primjeru jedne FNE analizirano stanje prije i nakon priključenja te FNE u točki priključenja po pitanju kvalitete električne energije. Prvo je analizirana tehnička mogućnost priključenja FNE na DM po pitanju kvalitete električne energije prema poznatim standardnim izrazima, gdje je potvrdno ustanovljena mogućnost priključenja FNE na DM. Ta mogućnost općenito ponajviše ovisi o snazi same FNE, ali i o mjestu priključenja FNE na DM. S obzirom da je ovdje u pitanju priključenje FNE na same niskonaponske sabirnice u distributivnoj transformatorskoj stanici (kruta mreža) i bilo je očekivati takav rezultat. Dalje, mjerena je kvaliteta električne energije prema EN 50160 na mjestu priključenja FNE prije i nakon priključenja FNE. Ustanovljeno je da sama FNE u skladu s pozitivnim tehničkim mogućnostima priključenja na DM ne

donosi neke bitne promjene u DM na koju je spojena po pitanju kvalitete električne energije. Dakle, kvaliteta električne energije nije smanjena nego je na razini od prije priključenja FNE. Tu u ovom slučaju veliku ulogu igra "kruta mreža". Ipak, bitno je napomenuti da je priključenjem FNE razina dugotrajnih flikera P_{LT} smanjena, da je vrijednost PF i $\cos\phi$ snižene, da je THDI povećan i da nije bilo pojava propada napona priključenjem FNE na DM. Dakle, neki parametri DM su poboljšani a neki sniženi priključenjem FNE na DM. Međutim, nema nekih posebnih zamjerki po pitanju kvalitete električne energije priključenjem ove FNE na DM, i nema odstupanja parametara kvalitete električne energije ni prije ni nakon priključenja FNE od graničnih vrijednosti iz propisanih normi. Bitno je također napomenuti da sve parametre kvalitete električne energije u ovom radu ne definira EN 50160. Stoga je potrebno uzeti u obzir i neke druge norme/propise kao što je to uzeto u ovom radu. Po pitanju propisa također je potrebno definirati strogo koje propise koristiti za određene parametre koje EN 50160 ne definira, a koji postaju važeći po pitanju kvalitete električne energije u BiH 2016. godine. Model analiziranja utjecaja FNE na NNM po pitanju kvalitete električne energije dat u ovom radu daje mogućnost za provjeru povratnog djelovanja FNE na DM u točki priključenja. Daljnje istraživanje treba se sastojati od detaljnijeg istraživanja mogućnosti dinamičke potpore FNE naponu DM na koju je spojena, proračuna gubitaka distorzije priključenjem FNE na DM zbog prisutnosti viših harmonika, proračuna utjecaja FNE na tehničke gubitke i naponske prilike u mreži u kojoj je FNE priključena (proračunom tokova snaga), proračunu nesimetrije i dr.

LITERATURA

- [1] N. Dizdarević, M. Majstrovic, S. Žutobradić: Distribuirana proizvodnja električne energije, Šesto savjetovanje HK CIGRE, Cavtat, Hrvatska, 2003.
- [2] M. Lešić, T. Konjić: Fotonaponski sistemi u distributivnoj mreži, Bosanskohercegovačka elektrotehnika, BiH, godište 7, prosinac 2013.
- [3] I. Ramljak, M. Sesar, M. Bakula: Kvaliteta električne energije prema EN 50160, Jedanaesto savjetovanje BHK Cigre, Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
- [4] Tehnička preporuka za priključenje distribuiranih izvora u Crnoj Gori, Elektroinštitut Milan Vidmar, Ljubljana, 2012.
- [5] N. Rajaković, D. Tasić: Distributivne i industrijske mreže, drugo izdanje, Akademski Misao, Beograd, 2008.
- [6] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić: Distribucija električne energije, Akademski Misao, Beograd, 2007.
- [7] N. Rahimić: Priključak distributivnih izvora električne energije - solarni sistemi, ETF Sarajevo, 2011.
- [8] A. Softić, Š. Gruhonjić Ferhatbegović, H. Salkić, I. Divković, H. Imamović: Analiza utjecaja solarne elektrane na distributivnu mrežu, Jedanaesto savjetovanje BHK Cigre, Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
- [9] S. Avdaković, E. Jamak: Distributivna mreža u uslovima povećane proizvodnje električne energije distribuiranih

- izvora, Osmo savjetovanje BHK Cigre, Neum, Bosna i Hercegovina, listopad 2013.
- [10] Tehnička preporuka br. 16: Osnovni tehnički zahtjevi za priključenje malih elektrana na distributivni sistem, Elektroprivreda Srbije, Srbija, 2003.
 - [11] Norma: EN 50160:2010, CENELEC, 2010.
 - [12] M.P. Donsion, A.L. Santiago: Power quality measurement. Comparison among three instruments of measure of different class, <http://www.icrepq.com>, zadnji put otvoreno: 17.11.2013.
 - [13] M. Dimitrijević, V. Litovski: Quantitative analysis of reactive power calculations for small non-linear loads, Proceedings of Small Systems Simulation Symposium, Niš, Serbia, 2012.
 - [14] M.E Balci, M.H Hocaoglu: Comparison of power definitions for reactive power compensation in nonsinusoidal conditions, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2004.
 - [15] M. Dimitrijević, M. Andrejević-Stošović, V. Litovski: Kvantitativna analiza reaktivne snage za nelinearna opterećenja, Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost 2013, Banja Luka, BiH, 2013.
 - [16] C. Cepisca, H. Andrei, S. Ganatsios, M. Veyssiere: Energy measurement techniques for non-sinusoidal situations, Acta Electrotechnica, volume 44, number 2, 2003.
 - [17] R. Sasdelli, A. Menchetti, G.C. Montanari: Power definitions for power-factor correction under nonsinusoidal conditions, Measurement 13, 1994.
 - [18] D. Stevanović, B. Jovanović, P. Petković: Identifikacija izvora harmonijskog zagađenja mjerenjem snage distorzije, Simpozijum INDEL, Banja Luka, BiH, 2010.
 - [19] Norma IEEE Std 1459-2000, IEEE, 2000.
 - [20] E. Králiková, O. Čičáková: Distortion power measurements in education, Proceedings of the 9th International Conference, Smolenice, Slovakia, 2013.
 - [21] L.S. Czarnecki: Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 34, no. 3, 1985.
 - [22] A.E Emanuel: Summary of IEEE standard 1459: definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, IEEE transactions on industry applications, vol. 40, no. 3, 2004.
 - [23] Norma IEEE Std 929-2000, IEEE, 2000.
 - [24] I. T. Papaioannou et. al.: Harmonic impact of small photovoltaic systems connected to the LV distribution network, 5th International Conference on European Electricity Market, Lisboa, Portugal, 2008.
 - [25] V. Barbu, G. Chicco, F. Corona, N. Golovanov, F. Spertino: Impact of a photovoltaic plant connected to the MV network on harmonic distortion: an experimental assessment, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 75, Iss. 4, 2013.
 - [26] G. Chicco, J. Schlabbach, F. Spertino: Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations, Solar Energy 83, 2009.
 - [27] M. Patsalides: The effect of solar irradiance on the power quality behaviour of grid connected photovoltaic systems, www.icrepq.com, zadnji put otvoreno: 11.10.2013.
 - [28] J. Osorio, J. Montana: Comparison between active power filter with selective control and conventional control for harmonic in power systems, ICREPQ 2013, Bilbao, Spain, 2013.
 - [29] T. Garma, I. Vlahović, D. Mučić: Utjecaj malih solarnih elektrana na parametre kvalitete električne energije, četvrto savjetovanje HO CIRED, Trogir, Hrvatska, 2014.
 - [30] T. Garma, I. Vlahović, D. Mučić: Dinamička potpora napunu mreže pomoću solarnih elektrana, četvrto savjetovanje HO CIRED, Trogir, Hrvatska, 2014.
 - [31] B. Renders et. al.: Distributed generation for mitigating voltage dips in low - voltage distribution grids, IEEE transactions on power delivery, vol. 23, no. 3, July 2008.

BIOGRAFIJA

Ivan Ramljak rođen je u Mostaru (BiH). Diplomirao je elektrotehniku na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu 2009. godine, Smjer elektroenergetski. Od 2009. godine radi u Elektroprivredi HZ HB d.d Mostar, poslovnica Elektro-Široki Brijeg, trenutno kao rukovoditelj poslovnice. Od 2011. godine radi i kao predavač na Visokoj školi Logos Mostar. Područje zanimanja: zaštita u elektroenergetskim mrežama, kvaliteta električne energije, obnovljivi izvori energije, upravljanje i ušteda u javnoj rasvjeti, planiranje upravljanje i održavanje distributivnih mreža, uzemljivači sustavi i dr. Autor je 6 znanstvenih i stručnih članaka. Trenutno radi na izradi doktorske disertacije iz područja zaštite elektroenergetskih mreža u tržišnim uvjetima. Individualni je član IEEE organizacije i BH K CIGRE.