

Zvonimir Klaić
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
zvonimir.klaic@ferit.hr

Damir Šljivac
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
damir.sljivac@ferit.hr

Matej Žnidarec
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
matej.znidarec@ferit.hr

Dario Došen
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih
tehnologija Osijek
dario.dosen@ferit.hr

ANALIZA VIŠIH HARMONIKA FOTONAPONSKE ELEKTRANE NA TEMELJU TRAJNOG NADZORA KVALITETE ELEKTRIČNE ENERGIJE

SAŽETAK

Očekivano povećanje broja fotonaponskih (PV) sustava integriranih u mrežu moglo bi izazvati probleme u pogledu zaštite, sigurnosti sustava i kvalitete električne energije. Stoga su važna dosadašnja iskustva vezana za utjecaj fotonaponskih elektrana na pokazatelje kvalitete električne energije u distribucijskoj mreži.

Premda su iskustva autora općenito pozitivna, ona se većinom temelje na kratkotrajnim mjerenjima trajanja 7 dana. U ovom radu će se analizirati rezultati dugotrajnog mjerenja kvalitete električne energije (6 mjeseci) na fotonaponskoj elektrani snage 10 kWp. Razmatrat će se struje viših harmonika i njihova ovisnost o jačini Sučevog zračenja te o temperaturi okoliša.

Ključne riječi: fotonaponska elektrana, nadzor kvalitete električne energije, viši harmonici, osunčanost, temperatura okoliša

HARMONIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANT BASED ON THE POWER QUALITY MONITORING DATA

SUMMARY

The expected increase in the number of photovoltaic (PV) systems integrated into the power grid could cause problems in terms of protection, system security and power quality. Therefore, the experiences related to the influence of photovoltaic power plants on power quality indices in the distribution network are very important.

Although the authors' experiences are generally positive, they are mostly based on short-term measurements of 7 days. This paper will analyze the results of a long-term measurement of the quality of electricity (6 months) on a photovoltaic power plant of 10 kWp. Harmonic currents and their dependence on solar irradiance and ambient temperature will be discussed.

Key words: photovoltaic power plant, power quality monitoring, harmonics, solar irradiation, ambient temperature

1. UVOD

Premda se posljednjih godina naglo razvijaju različite vrste obnovljivih izvora energije (OIE), fotonaponski (FN) sustavi mogu se smatrati jednom od najperspektivnijih tehnologija. Glavni razlozi za ovu činjenicu su neprestana smanjivanja troškova proizvodnje PV modula te također i stalna povećavanja učinkovitosti solarnih ćelija. Tome su naravno doprinijele i politike poticaja i okviri koje su razvile vlade širom svijeta. Kontinuiranim rastom došlo se do globalnog instaliranog kapaciteta PV sustava od 402 GW na kraju 2017. [1].

Fotonaponske elektrane spajaju se na elektroenergetsku mrežu preko elektroničkih pretvarača (izmjenjivača) koji pretvaraju istosmjernu struju iz fotonaponskih modula u izmjeničnu. Izmjenjivač kontrolira funkciju fotonaponskog pravca, odnosno podešava struje i napone u cilju maksimalnog prinosa električne energije iz fotonaponskih modula, s obzirom da se tijekom dana mijenja jačina Sunčevog zračenja i temperatura okoliša. S gledišta kvalitete električne energije, izmjenjivač je najvažniji dio FN elektrane jer zbog energetske elektronike, od koje se sastoji, njegova izlazna struja nije čisti sinusoidni val, već izobličena struja koja sadrži više harmonike, [2]. Posljedica struja viših harmonika su harmonička izobličenja napona, koji mogu izazivati probleme u radu, pogotovo u dijelu distribucijske mreže s velikim brojem FN elektrana, a s malom potrošnjom (mala struja kratkog spoja), [3].

Stoga se u radu prikazuju rezultati dugotrajnog mjerenja meteoroloških veličina, odnosno jačine Sunčevog zračenja i temperature u okolini FN elektrane, kao i strujnih harmonika te se analizom spomenutih podataka utvrđuje razina ovisnosti električnih veličina o meteorološkim veličinama.

2. MJERENJA ELEKTRIČNIH I METEOROLOŠKIH VELIČINA

2.1. Fotonaponska elektrana ETFOS1

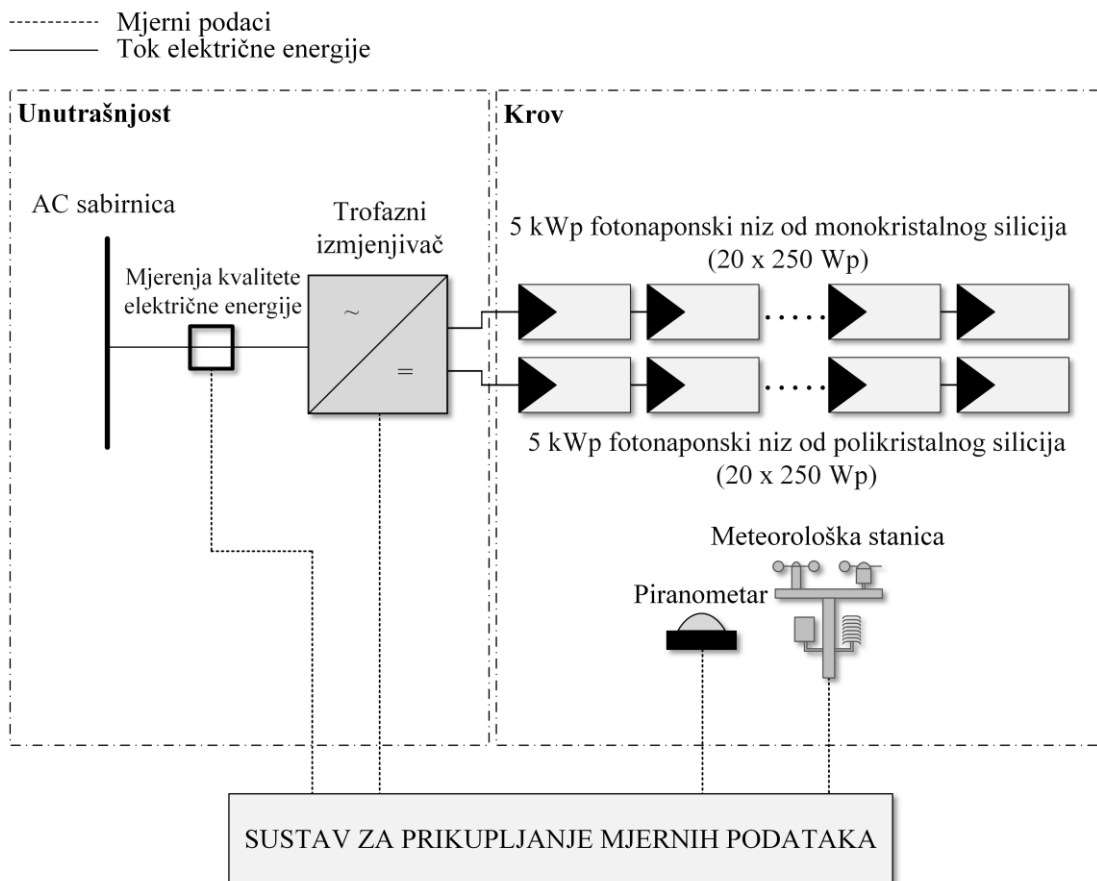
Fotonaponska elektrana ETFOS1 vanjski je dio Laboratorija za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija (FERIT) u Osijeku. Osijek je smješten u istočnom dijelu Hrvatske (zemljopisna širina $45^{\circ}33'24''N$, zemljopisna dužina $18^{\circ}41'44''$) gdje prevladava europska umjerena kontinentalna klima [4]. FN postrojenje instalirano je na krovu zgrade FERIT Osijek s nagibom od 7° . Sastoji se od dva niza, svaki snage 5 kWp, koji su spojeni na trofazni mrežni pretvarač koji je dalje spojen na elektrodistribucijsku mrežu 230 V AC, 50 Hz preko Glavnog razvodnog ormara zgrade FERIT-a. Svaki niz sastoji se od 20 serijski povezanih modula, a snaga svakog modula je 250 Wp FN. Prvi se niz sastoji od modula od monokristalnog silicija, dok se drugi sastoji od modula od polikristalnog silicija. Tehničke karakteristike trofaznog izmjenjivača FN elektrane prikazane su u tablici 1, [5].

Tablica 1. Tehničke karakteristike izmjenjivača FN elektrane ETFOS1, [5]

| | |
|--|---|
| Proizvođač | Kaco |
| Model | Powador 12.0 TL3 |
| Dizajn kruga | 6-pulse transformerless IGBT ¹ |
| DC strana | |
| Parametar | Vrijednost |
| Maksimalna ulazna snaga generatora [kW] | 12 |
| Raspon napona pri točki maksimalne snage [V] | 280 -800 |
| Početni napon [V] | 250 |
| Maksimalni napon praznog hoda [V] | 1000 |
| Broj ulaza za nizove | 2 |
| Maksimalna struja kratkog spoja [A] | 22,4 |
| AC strana | |
| Nazivna snaga [kW] | 10 |
| Nazivna struja [A] | 14,5 |
| Mrežni napon [V] | 400/230 |
| Koeficijent izobličenja [%] | 22,2 |
| Maksimalna iskoristivost [%] | 98 |
| Europska iskoristivost [%] | 97,5 |

2.2. Postupak mjerenja

Rezultati mjerenja dobivaju se iz sustava za prikupljanje podataka koji je razvijen u Laboratoriju za obnovljive izvore energije FERIT-a Osijek. Sustav za prikupljanje podataka istovremeno i kontinuirano mjeri, analizira i pohranjuje električne i meteorološke podatke na mjestu ispitivanja u lokalnu bazu podataka i oblake [6]. U ovom radu koriste se mjerenja sunčevog zračenja, temperature okoliša i kvalitete električne energije. Sunčevo zračenje mjeri se Kipp & Zonnen SMP3 piranometrom, dok se temperatura okoline mjeri vremenskom stanicom koja koristi digitalni termometar DB18B20. Kvaliteta električne energije mjeri se mrežnim analizatorom točnosti klase A Fluke 1760, u skladu s IEC 61000-4-30 standardom [7]. Sunčevo zračenje i temperatura okoline bilježe se i pohranjuju svake sekunde, a naknadno se u sustavu za prikupljanje podataka računaju usrednjene 10-minutne vrijednosti. Na slici 1 prikazana je shema 10 kWp FN elektrane i dio sustava za prikupljanje podataka koji se koristi za električna i meteorološka mjerenja, dok su na slici 2 prikazane fotografije opreme koja se koristi za mjerenja i analizu (moduli FN elektrane, izmjenjivač Kaco, piranometar i analizator kvalitete električne energije). U ovom radu, analiziraju se mjerenja iz razdoblja od jedne godine (1. siječnja 2018. do 31. prosinca 2018.). Svaka izmjerena vrijednost predstavlja 10-minutnu usrednjenu vrijednost izmjenjenog parametra.



Slika 1. Shema 10 kWp FN elektrane i dio sustava za prikupljanje podataka

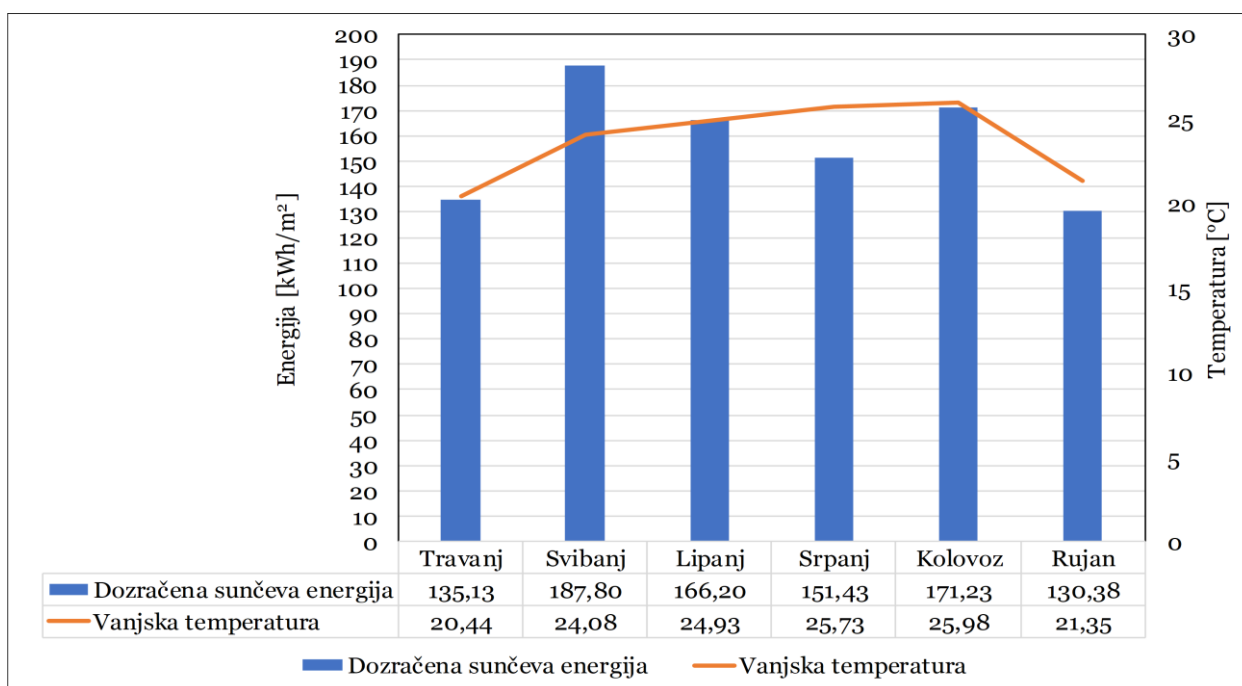


Slika 2. Oprema za mjerenja: (a) Moduli FN elektrane; (b) Piranometar Kipp&Zonnen SMP3; (c) Izmjenjivač Kaco Powador 12.0 TL3; (d) Mrežni analizator Fluke 1760

3. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

3.1 Rezultati mjerenja meteoroloških veličina

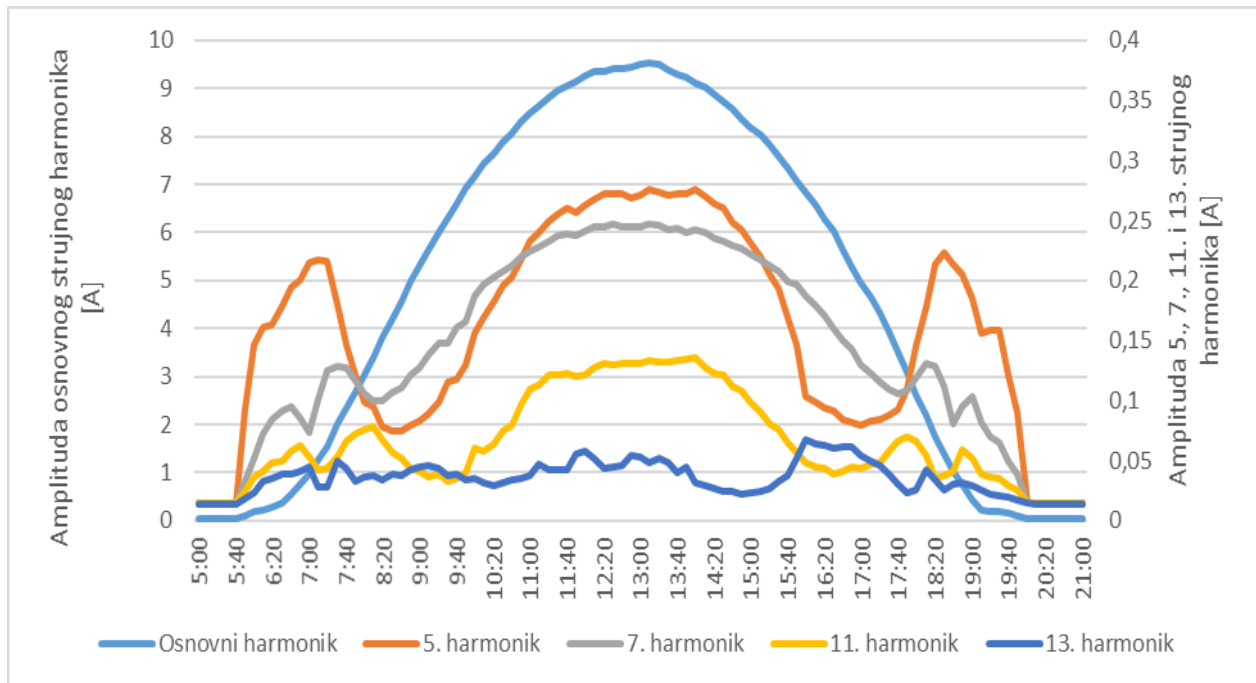
U ovom se dijelu izvodi analiza izmjerenih meteoroloških podataka. Mjesečne srednje vrijednosti Sunčevog zračenja i temperature okoline tijekom 2018. godine prikazane su na slici 3. Analiza rezultata pokazuje veće sunčevo zračenje i temperaturu okoline tijekom ljetnih mjeseci što je očekivano obilježje europske vlažne kontinentalne klime.



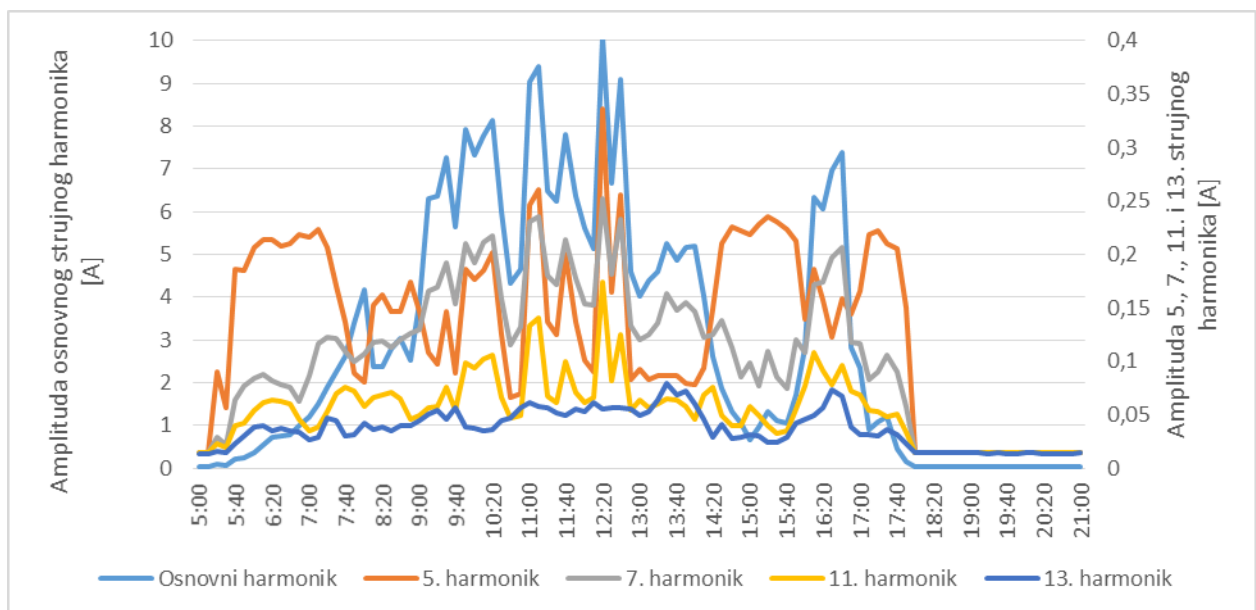
Slika 3. Srednje mjesečne vrijednosti sunčevog zračenja i temperature okoline u 2018. godini.

3.2 Analiza rezultata mjerenja kvalitete električne energije

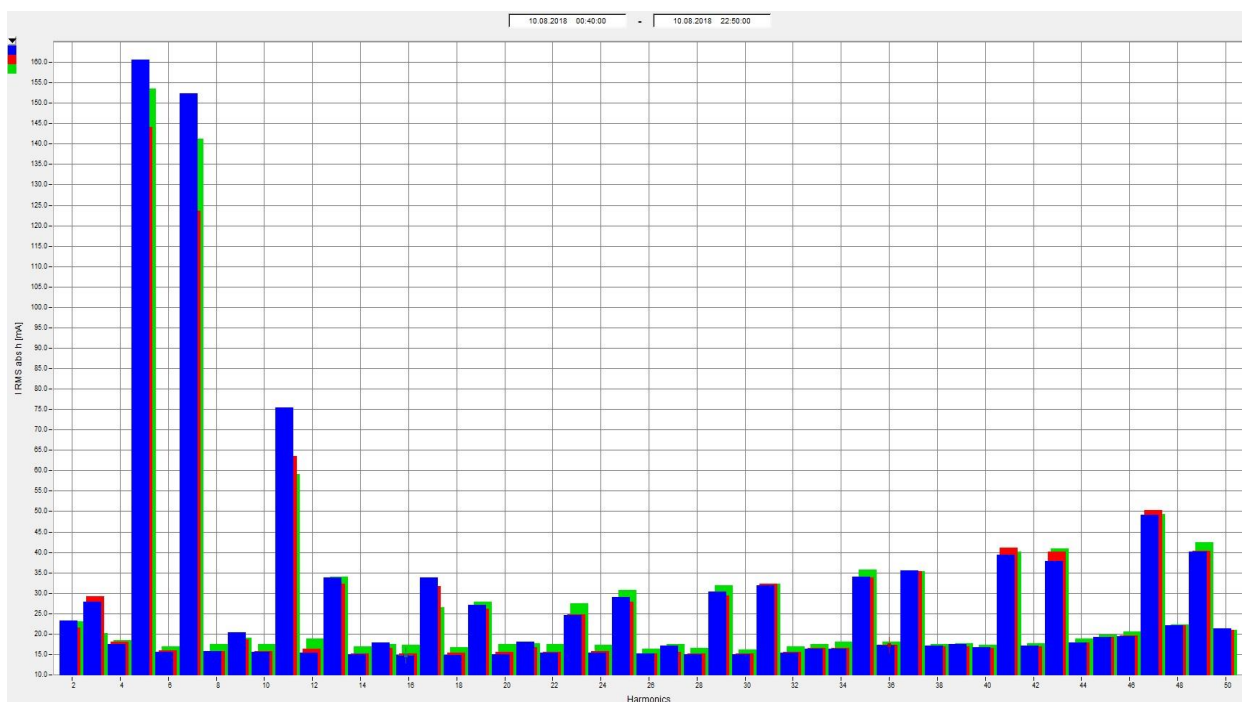
Mjerenja kvalitete električne energije izvedena su na priključnoj točki izmjenjivača FN elektrane na niskonaponsku mrežu. Slijedi analiza 1., 5., 7., 11. i 13. harmonika u dva odabrana dana (sunčan i djelomično oblačan dan). jer pretvarač sa 6 impulsa stvara trenutne harmonike reda $6k \pm 1$ gdje k predstavlja cjelobrojne vrijednosti [8]. Na slici 4. prikazani su 1., 5., 7., 11. i 13. harmonici snimljeni 10. kolovoza 2018. (sunčan dan), dok slika 5 prikazuje iste harmonike snimljene 27. srpnja 2018. (djelomično oblačno vrijeme). Na slici 4 vidljivo je da postoji određeni obrazac vrijednosti harmonika tijekom sunčanog dana, dok na slici 5 (djelomično oblačno vrijeme) takav obrazac ne postoji zbog isprekidanog sunčevog zračenja.



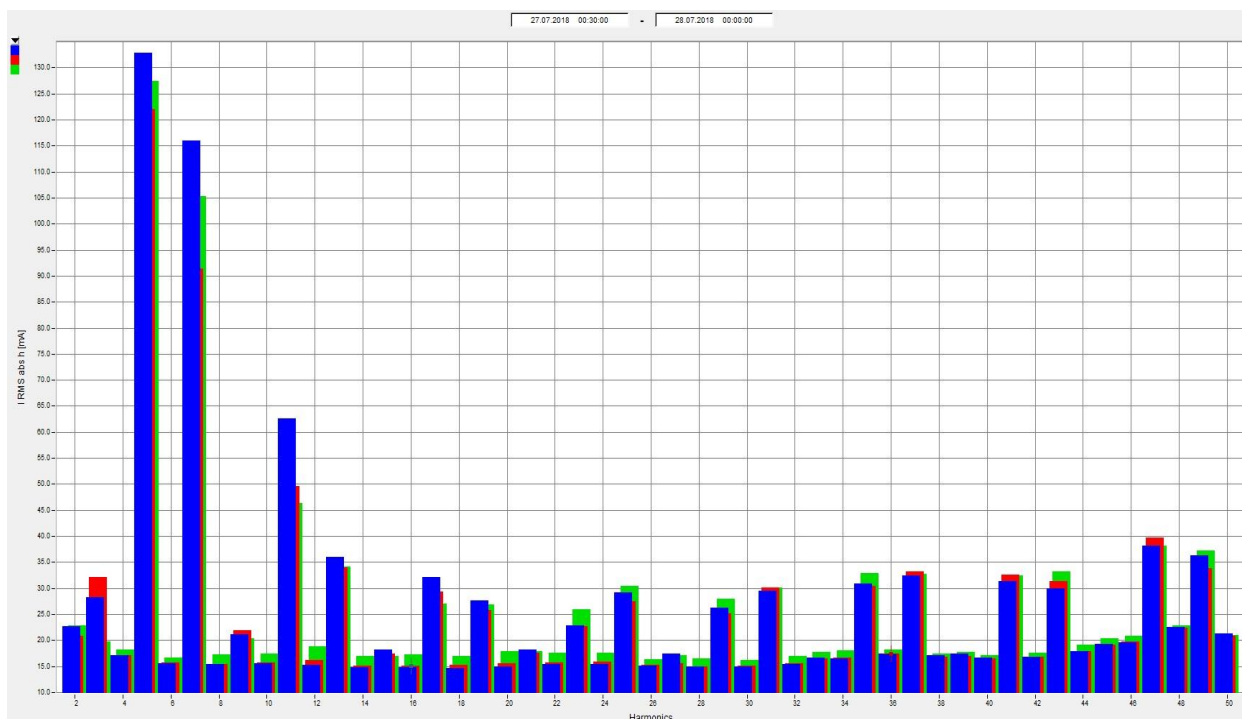
Slika 4. Efektivne vrijednosti 1., 5., 7., 11. i 13. harmonika tijekom sunčanog dana.



Slika 5. Efektivne vrijednosti 1., 5., 7., 11. i 13. harmonika tijekom djelomično oblačnog dana.



Slika 6. Harmonički spektar tijekom sunčanog dana.



Slika 7. Harmonički spektar tijekom djelomično oblačnog dana.

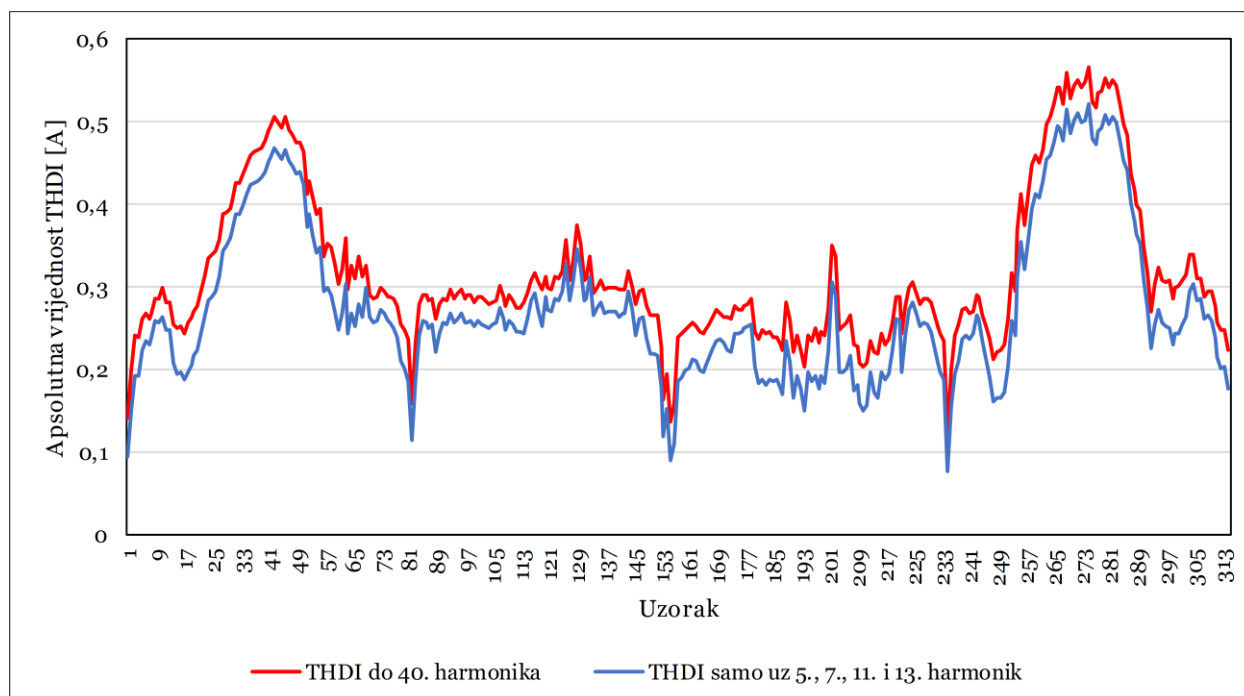
Slika 6 prikazuje usporedbu harmonijskog spektra za sunčan dan, a slika 7 za djelomično oblačan dan. Iako se vrijednosti harmonika razlikuju, vidljivo je da dva uspoređena dana imaju sličan obrazac gdje 5., 7. i 11. harmonici imaju najviše vrijednosti, a ističe se i 13. harmonik.

Na slici 8 prikazana je usporedba ukupnog harmoničkog izobličenja struje THDI/ za koji su u izračunu obuhvaćeni svi harmonici od 2. do 40., jednadžba (1) i THDI/ za koji su u izračunu obuhvaćeni samo 5., 7., 11. i 13. strujni harmonici, jednadžba (2). U izrazima (1) i (2) slovo i predstavlja red harmonika, a I_i predstavlja efektivnu struju harmonijskog reda i .

$$THDI_{total} = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} I_i^2} \quad (1)$$

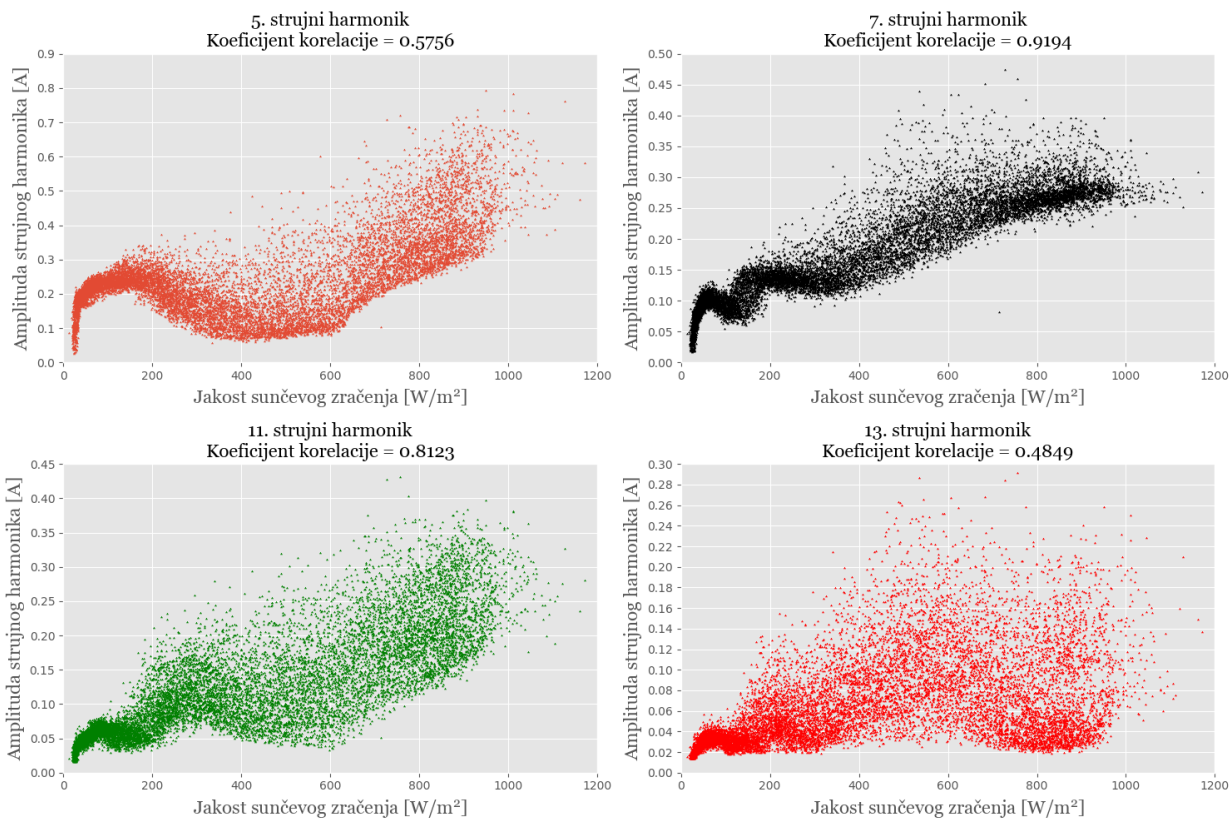
$$THDI_{5-13} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} \quad (2)$$

Odnos spomenuta 2 THDI/ koeficijenta dan je za razdoblje od 25. kolovoza 2018. do 28. kolovoza 2018. Vidljivo je da 5., 7., 11. i 13. harmonik generiraju većinu koeficijenta THDI. Godišnji udio THDI za koji su u izračunu obuhvaćeni samo 5., 7., 11. i 13. strujni harmonici, prema izrazu (2), u odnosu na THDI za koji su u izračunu obuhvaćeni svi harmonici od 2. do 40., prema izrazu (1), je 82,04 %. U obzir su uzeta samo razdoblja dnevnog svjetla, kada je FN elektrana u pogonu.

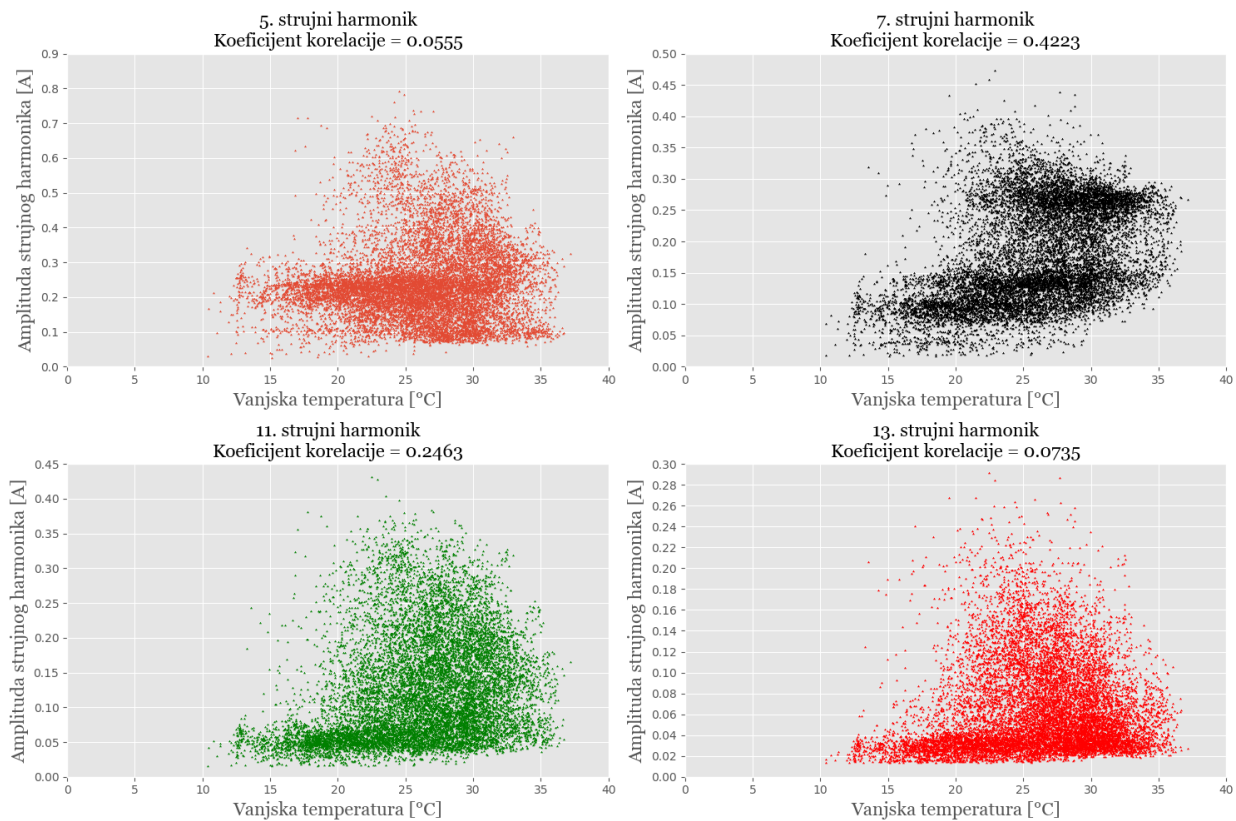


Slika 8. THDI/ za koji su u izračunu obuhvaćeni svi harmonici od 2. do 40., i THDI/ za koji su u izračunu obuhvaćeni samo 5., 7., 11. i 13. strujni harmonici

Slike 9 i 10 daju ovisnost 5., 7., 11. i 13. strujnih harmonika o dvije meteorološke veličine tijekom 2018. godine, tj. Sunčevom zračenju i temperaturi okoline. Svaka točka na plohamu raspršenja predstavlja 10-minutnu usrednjenu vrijednost određenog parametra izmjenjenog u isto vrijeme. Dijagrami raspršenja prikazani na slici 9 i 10 pokazuju veliku disperziju strujnih harmonika, posebno u ovisnosti o temperaturi okoline. Ova disperzija se također može potvrditi, i za sliku 9 i sliku 10, pomoću koeficijenta korelacije R . Koeficijent korelacije u ovom slučaju predstavlja korelaciju svakog iznosa strujnog harmonika s meteorološkim parametrom (sunčevo zračenje i temperatura okoline). Što je koeficijent korelacije R jači, to je jača ovisnost iznosa strujnog harmonika o meteorološkom parametru. Može se primijetiti da su koeficijenti korelacije R za ovisnost iznosa strujnih harmonika u odnosu na sunčevo zračenje veći nego u odnosu na temperaturu okoline. Nadalje, može se vidjeti kako su najveći koeficijenti korelacije R za iznos 7. strujnog harmonika u odnosu na Sunčevo zračenje.



Slika 9. iznosi 5., 7., 11. i 13. strujnih harmonika u odnosu na Sunčevo zračenje



Slika 10. iznosi 5., 7., 11. i 13. strujnih harmonika u odnosu na temperaturu okoline

4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati dugotrajnog mjerenja (1 godina) električnih i meteoroloških veličina vezanih za fotonaponsku elektranu ETFOS1 snage 10 kWp. Elektrana je vanjski dio Laboratorija za obnovljive izvore na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Spomenute veličine se mjere, prikupljaju i obrađuju u okviru sustava za prikupljanje podataka spomenutog laboratorija.

Tijekom 2018. godine mjereno je Sunčevo zračenje i temperatura okoline te kvaliteta električne energije. Kako izlazna struja izmjenjivača fotonaponske elektrane nije čisti sinusoidni val, već izobličena struja koja sadrži više harmonike, mjerenjima i analizom željela se utvrditi razina utjecaja jačine Sunčevog zračenja te temperature okoline na strujne harmonike. Rezultati pokazuju veliku disperziju strujnih harmonika, koja je posebno naglašena u ovisnosti strujnih harmonika o temperaturi okoline. Također može se primijetiti da su koeficijenti korelacije za ovisnost iznosa strujnih harmonika o sunčevom zračenju veći nego koeficijenti korelacije za ovisnost o temperaturi okoline. Najveći koeficijent korelacije imaju vrijednosti 7. strujnog harmonika u odnosu na Sunčevo zračenje. Opći zaključak je da promatrani strujni harmonici imaju visoku disperziju mjernih podataka, što se očituje velikim standardnim odstupanjem i velikim koeficijentom varijacije.

5. LITERATURA

- [1] REN21 Renewables 2018 Global Status Report; REN21 Secretariat: Paris, France, 2018; ISBN 9783981891133.
- [2] Fekete, K.; Klaic, Z.; Majdandzic, L. Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid. *Renew. Energy* 2012, 43, 140–148.
- [3] Molina-García, A.; Honrubia-Escribano, A.; García-Sánchez, T.; Gómez-Lázaro, E.; Muljadi, E. Power quality surveys of photovoltaic power plants: characterisation and analysis of grid-code requirements. *IET Renew. Power Gener.* 2015, 9, 466–473.
- [4] Državni hidrometeorološki zavod Klima Hrvatske: <http://klima.hr/klima.php?id=k1#pog1> (pristup 30.01.2018.).
- [5] KACO new energy GmbH Operating Instructions Powador 12.0 TL3-20.0 TL3; 2016;
- [6] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek Laboratorij za obnovljive izvore: <http://reslab.ferit.hr/> (pristup 13.10.2018.)
- [7] IEC 61000-4-30 Electromagnetic Compatibility - Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods 2015.
- [8] De La rosa, F. Harmonics and Power Systems; Electric Power Engineering Series; CRC Press, 2006; Vol. 13; ISBN 978-0-8493-3016-2.