

Josip Srdanović
HEP ODS d.o.o.
josip.srdanovic@hep.hr

Domagoj Milun
HEP ODS d.o.o.
domagoj.milun@hep.hr

Ante Čović
HEP ODS d.o.o.
ante.covic@hep.hr

ANALIZA UTJECAJA MALIH SOLARNIH ELEKTRANA NA NAPONSKE PRILIKE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI S IZRAŽENIM SEZONSKIM OPTEREĆENJEM

SAŽETAK

Ovaj rad analizira utjecaj sve većeg broja solarnih elektrana na distribucijsku mrežu u Republici Hrvatskoj, s posebnim naglaskom na priobalna područja, gdje je opterećenje mreže izrazito sezonskog karaktera zbog značajnog utjecaja turizma na gospodarsku strukturu. Rastući udio malih solarnih elektrana dovodi do problema s porastom napona u mreži, osobito tijekom sezonskih varijacija opterećenja. U radu su prikazana mjerenja provedena na jednoj problematičnoj lokaciji te je provedena analiza dobivenih rezultata. Predložene su mjere za sanaciju nepovoljnih naponskih uvjeta, kao i različite metode i tehnologije za poboljšanje kvalitete napona.

Ključne riječi: solarne elektrane, distribucijska mreža, kvaliteta napona, sezonska promjena opterećenja, naponi

ANALYSIS OF THE IMPACT OF SMALL SOLAR POWER PLANTS ON VOLTAGE CONDITIONS IN A DISTRIBUTION NETWORK WITH PRONOUNCED SEASONAL LOAD

SUMMARY

This paper analyzes the impact of the increasing number of solar power plants on the distribution network in the Republic of Croatia, particularly in coastal areas where the network load is highly seasonal due to the significant influence of tourism on the economic structure. The growing share of small-scale solar power production leads to issues with voltage rises in the network, especially during seasonal load variations. The paper presents measurements conducted at one problematic location and analyzes the obtained results. It proposes measures for the remediation of poor voltage conditions and explores various methods and technologies to improve voltage quality.

Key words: solar power plants, distribution network, voltage quality, seasonal load variation of the distribution network, voltages

1. UVOD

Europska unija je, u sklopu plana RepowerEU, predstavila inicijativu *Solar Rooftop Initiative* [1], procjenjujući da bi gotovo 25 % potrošnje električne energije moglo potjecati iz solarnih elektrana smještenih na krovovima, čime bi njihov udio premašio trenutni udio prirodnog plina. Ciljevi postavljeni za implementaciju malih solarnih elektrana predstavljaju značajan izazov za sve operatore distribucijskih sustava. Distribucijska mreža je opsežna i složena te često nepripremljena za prihvrat novih distribuiranih izvora energije. Trenutačno broj zahtjeva za priključenje distribuiranih izvora energije daleko premašuje realne mogućnosti modernizacije mreže. Ostvarenje plana RepowerEU uvelike će ovisiti o operatorima distribucijskih sustava i njihovoj sposobnosti modernizacije mreže unutar zadanih vremenskih okvira.

Republika Hrvatska je geografski i gospodarski podijeljena na dva dijela. Priobalno područje ima mediteransku klimu, a turizam predstavlja glavnu gospodarsku djelatnost, pri čemu se izražena sezonalnost posebno odražava na elektroenergetski sustav. U takvom gospodarskom okruženju planiranje distribucijske mreže predstavlja izazov, budući da vršna opterećenja elektroenergetskog sustava u određenim područjima tijekom nekoliko mjeseci godišnje mogu biti i do dvadeset puta veća u odnosu na ostatak godine.

Male solarne elektrane priključene na distribucijsku mrežu imaju i pozitivne i negativne učinke. Kada proizvodnja električne energije iz malih solarnih elektrana odgovara potrošačkoj potražnji, učinci su pozitivni jer pružaju potporu sustavu i smanjuju tehničke gubitke u distribucijskoj mreži [2]. Međutim, u situacijama kada je udio proizvodnje električne energije iz malih solarnih elektrana visok, a potrošnja niska, dolazi do porasta napona u tom dijelu distribucijske mreže. Promjene u tokovima snage mogu dovesti do prekoračenja toplinskih granica, pojave naponskog titranja (flickera), povećanja razine kratkog spoja te degradacije zaštitnih sustava [3]. Hrvatska je usvojila normu EN 50160:2022 (*Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*), koja definira parametre kvalitete električne energije u skladu s navedenim standardom.

1.1. EN 50160:2022

Norma definira i opisuje ključne značajke i karakteristike distribucijskog napona na mjestu isporuke električne energije krajnjim korisnicima u javnim niskonaponskim (NN) i sredjenaponskim (SN) mrežama u uvjetima normalnog pogona. Prema zakonskim propisima, operator distribucijskog sustava dužan je osigurati kvalitetu napona ograničavanjem negativnih povratnih učinaka opreme svih korisnika na mrežu. Kvaliteta napona na određenim točkama mreže ovisi o ukupnoj interakciji između proizvodnih jedinica, elemenata prijenosne i distribucijske mreže, kao i opterećenja potrošača i opreme priključene na elektroenergetsku mrežu.

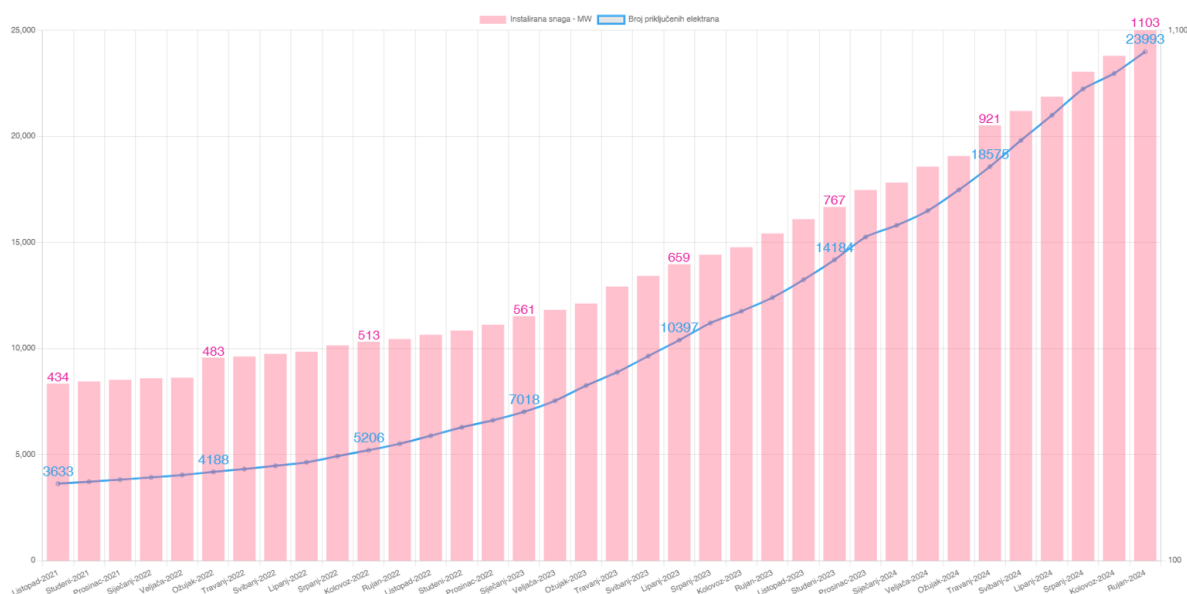
1.1.1. Spore promjene napona

Spore promjene napona predstavljaju postupna odstupanja vrijednosti napona od njegove nominalne vrijednosti. U uvjetima normalnog pogona, isključujući prekide napajanja, 95 % desetominutnih srednjih vrijednosti napona unutar bilo kojeg tjednog intervala mora se nalaziti unutar raspona $U_n \pm 10\%$ (tj. maksimalno 253 V, minimalno 207 V). Preostalih 5 % desetominutnih srednjih vrijednosti napona unutar bilo kojeg tjednog intervala mora se nalaziti unutar raspona $U_n +10\%$ / -15% (tj. maksimalno 253 V, minimalno 195,5 V). To znači da, za nominalni napon $U_n = 230$ V, od ukupno 1008 ($6 \times 24 \times 7$) desetominutnih srednjih vrijednosti napona izmjerenih tijekom jednog tjedna, 958 vrijednosti mora biti u rasponu 207–253 V, sukladno normi EN 50160. Preostalih 5 %, odnosno 50 desetominutnih srednjih vrijednosti napona, mora se nalaziti unutar raspona 195,5–253 V, kako bi bili zadovoljeni uvjeti norme EN 50160 [4].

1.1.2. Porast broja solarnih elektrana u Hrvatskoj

Republika Hrvatska u svojim priobalnim područjima prosječno bilježi 2.700 sunčanih sati godišnje, dok su i u unutrašnjosti prisutni iznadprosječni uvjeti insolacije. Njezin povoljan geografski položaj ističe značajan solarni potencijal, koji premašuje prosjek Europske unije. Iako podaci pokazuju da Hrvatska još uvijek nije u potpunosti iskoristila svoj solarni potencijal, promjene u stavovima i ponašanju građana postaju sve izraženije.

Prema podacima HEP ODS-a, tijekom 2024. godine na distribucijsku mrežu bilo je priključeno ukupno 10.672 solarne elektrane, s ukupnim instaliranim proizvodnim kapacitetom od 342,4 MW. Od tog broja, 8.897 solarnih elektrana s kapacitetom 68,3 MW pripada kategoriji kućanstava. U poslovnoj kategoriji bilo je 1.775 solarnih elektrana s kapacitetom 274,1 MW. Na dan 31. prosinca 2024. godine, distribucijska mreža HEP ODS-a imala je priključeno ukupno 26.257 solarnih elektrana, s ukupnim instaliranim proizvodnim kapacitetom od 804,9 MW. Od toga je u kategoriji kućanstava bilo 19.776 solarnih elektrana s kapacitetom 140,5 MW, pri čemu većina pripada kategoriji samopskrbe. U poslovnoj kategoriji bilo je 6.481 solarna elektrana, s instaliranim kapacitetom od 664,4 MW.



Slika 1. Porast broja solarnih elektrana i instalirane snage

1.1.3. Problem povišenog napona uzrokovan utjecajem solarnih elektrana

U Republici Hrvatskoj djeluje jedan operator distribucijskog sustava, koji je prema zemljopisnim kriterijima podijeljen na 21 distribucijsko područje. Od toga se sedam distribucijskih područja nalazi u priobalnom dijelu zemlje, a u daljnjoj analizi promatra se jedno od tih područja – Elektrodalmacija Split.

Trenutno je na promatranoj distribucijskoj mreži priključeno više od 2.000 solarnih elektrana. Problemi povišenog napona zabilježeni su kod oko 30 % ovih elektrana, pri čemu je kod svake od njih tijekom barem jednog 15-minutnog intervala u protekloj godini došlo do prekoračenja dopuštenih vrijednosti. Prema normi EN 50160, gornja dopuštena granica napona iznosi 253 V. Nekoliko najnepovoljnijih slučajeva prikazano je u Tablici 1.

Tablica 1. Najnepovoljniji slučajevi u DP Elektrodalmacija

OZNAKA OMM-a (UGRAĐENA SE)	MAKSIMALNI IZMJERENI NAPON	BROJ DANA >253V	PROMATRANI BROJ DANA
72338131	264.0	349	359
74862069	261.0	303	359
38260093	262.5	251	360
75018134	265.0	238	359
89255230	260.4	227	297
63337008	283.5	224	224
74859597	268.0	215	298
87759234	259.1	214	358
72734794	259.9	207	358
74862407	279.0	204	359
55709576	259.3	203	358
87747405	258.3	201	223
87759309	256.0	201	358

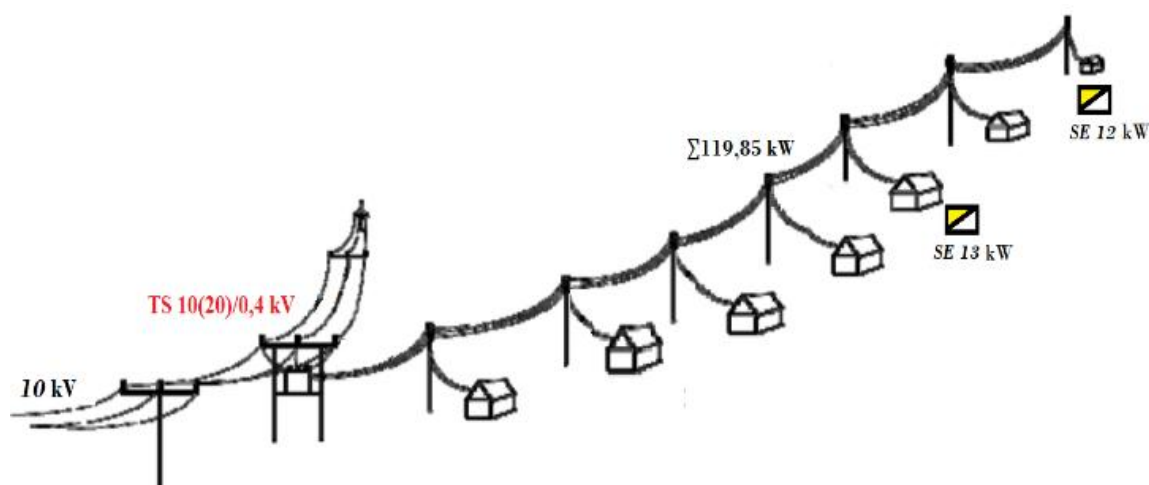
Većina ovih mjernih točaka nalazi se u turističkim zonama, koje su tijekom izvansezonskog razdoblja rijetko naseljene, što rezultira niskim opterećenjem u tom razdoblju. Problem je najizraženiji u proljeće i jesen, kada je osunčanost visoka, ali je potrošnja električne energije niska. U takvim uvjetima često dolazi do povišenih napona koji prelaze 253 V duž cijelog niskonaponskog izvoda, što dovodi do nekoliko nepoželjnih posljedica. Potrošači koji imaju instalirane solarne elektrane ne mogu proizvoditi električnu energiju jer im se inverteri isključuju zbog zaštitnih mehanizama. Osim toga, povišeni naponi u blizini određenih potrošača mogu uzrokovati oštećenja kućnih instalacija i električnih uređaja.

Broj novih potrošača svakodnevno raste, a sve veći udio njih istovremeno doprinosi poremećajima u mreži i osjetljiv je na njih. Ove okolnosti zahtijevaju kontinuirano praćenje stanja mreže. Stoga analiza kvalitete električne energije nije neopravdan trošak, već nužna i isplativa investicija. Kvaliteta električne energije, kao sastavni dio ukupne kvalitete opskrbe potrošača, postala je važan regulatorni parametar za operatore distribucijske mreže, ali i značajan ugovorni parametar na tržištu električne energije, u okviru reguliranih uvjeta liberaliziranog elektroenergetskog tržišta.

2. MJERENJA

Mjerenja su provedena na karakterističnom niskonaponskom izvodu, koji je tijekom ljetnih mjeseci preopterećen, dok je ostatak godine slabo opterećen. Na promatrani niskonaponski vod priključeno je ukupno 19 potrošača, od čega je 8 trofaznih priključaka s ukupno ugovorenom snagom od 119,85 kW, dok je 11 jednofaznih priključaka s ukupno ugovorenom snagom od 90,39 kW.

Dodatno, dva kupca imaju vlastitu proizvodnju električne energije putem solarnih elektrana s ukupno instaliranim kapacitetom od 25 kW. Mjerenje je provedeno na samom kraju voda, gdje je priključen jedan potrošač s vlastitom proizvodnjom. Istovremeno, mjerena su opterećenje cijelog voda i naponski uvjeti na kraju voda, kako bi se omogućila usporedba.



Slika 2. Skica promatranog niskonaponskog izvoda

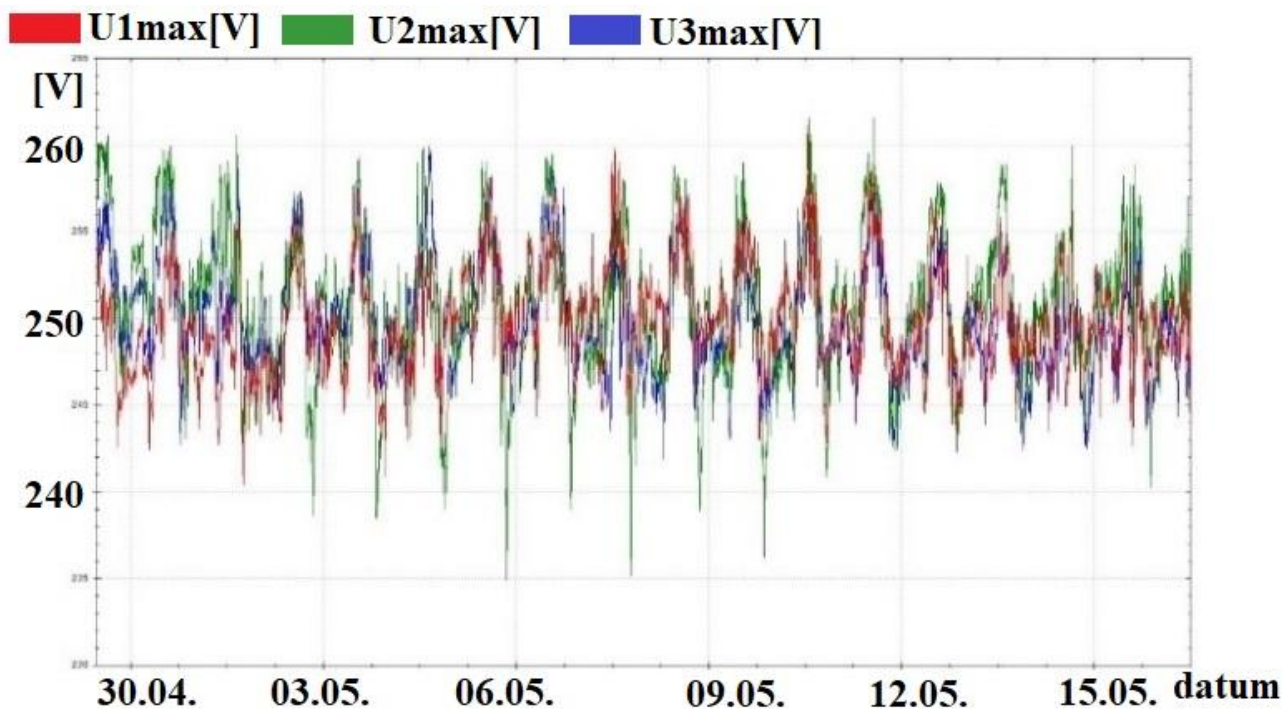
Mjerenje je ponovljeno više puta tijekom godine kako bi se dobili reprezentativniji rezultati. Također je analiziran utjecaj mrežnih uvjeta na rad solarnih elektrana, pri čemu su zabilježena značajna odstupanja od planirane proizvodnje uslijed naponskih problema u mreži.

2.1. Prvo mjerenje u proljeće – nisko opterećenje niskonaponskog izvoda uz visoku osunčanost

Kvaliteta električne energije prvo je mjerena u razdoblju od 25. travnja 2024. do 16. svibnja 2024. na mjestu mjerenja krajnjeg kupca (mjesto isporuke električne energije). Mjerenja su provedena pomoću instrumenta BRAVO 100.

Sukladno zahtjevima norme EN 50160:2022 o kvaliteti napona, analiza se temelji na 22-dnevnom periodu, počevši od 25. travnja 2024. u 11:30 h do 16. svibnja 2024. u 12:00 h. Kvaliteta napona na

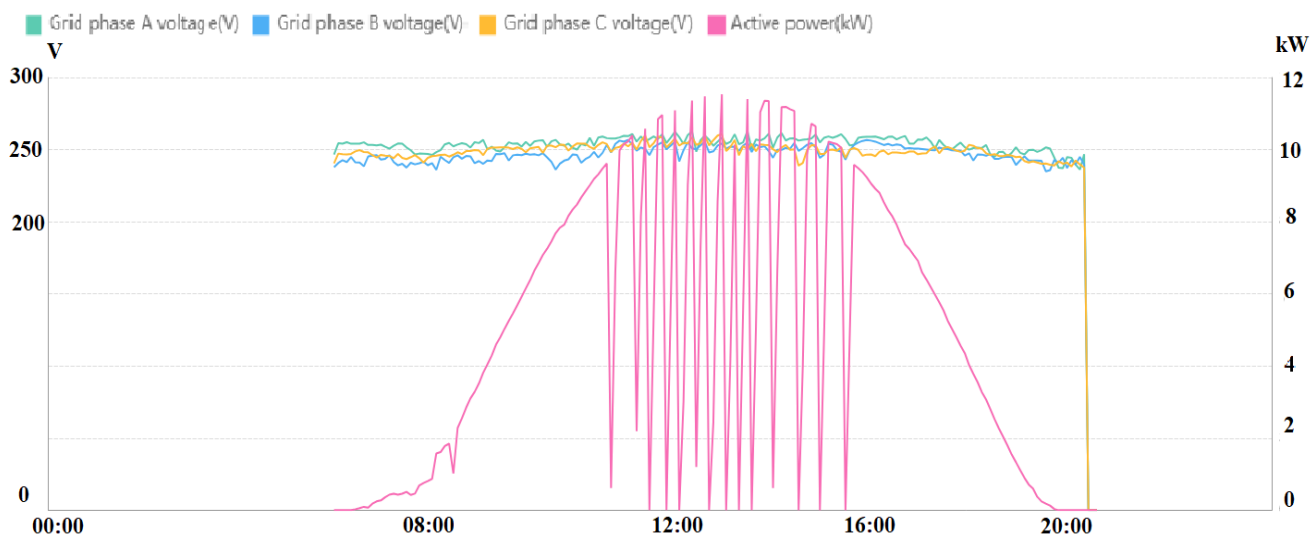
mjestu isporuke električne energije kupcu nije u svim parametrima zadovoljila normu EN 50160:2022, što je vidljivo iz rezultata mjerenja prikazanih u nastavku.



Slika 3. Izmjereni naponi

Na Slici 3. prikazani su naponi u svim fazama tijekom promatranog razdoblja. Jasno je vidljivo da napon svakodnevno prelazi dopuštene vrijednosti između približno 11:00 h i 15:00 h, kada je opterećenje niskonaponskog voda nisko, a solarna radijacija visoka. Ovu pojavu potvrđuju i dodatna mjerenja opterećenja niskonaponskog voda te analiza meteoroloških podataka.

Slika 4. prikazuje naponske vrijednosti i aktivnu energiju tijekom karakterističnog dana unutar ovog perioda, gdje je vidljivo da je zaštitni mehanizam fotonaponskog (PV) invertera isključio solarnu elektranu iz distribucijske mreže čak 12 puta. Posljedično, došlo je do značajno niže proizvodnje električne energije od planirane.

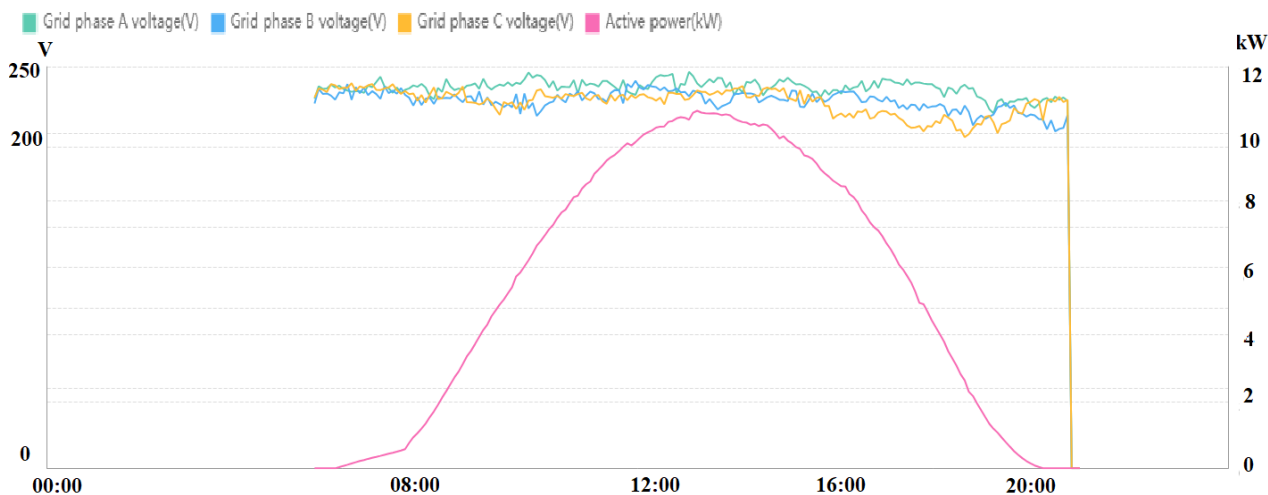


Slika 4. Prvo mjerenje 27.04.2024.

2.2. Drugo mjerenje u ljeto – visoko opterećenje niskonaponskog izvoda uz visoku osunčanost

Drugo mjerenje provedeno je 1. kolovoza 2024., kada je opterećenje niskonaponskog voda bilo visoko, a solarna radijacija na vrhuncu. Rezultati drugog mjerenja prikazani su na Slici 5.

Tijekom ovog mjerenja, vrijednosti napona bile su unutar dopuštenih granica, a solarna elektrana je radila punim kapacitetom.



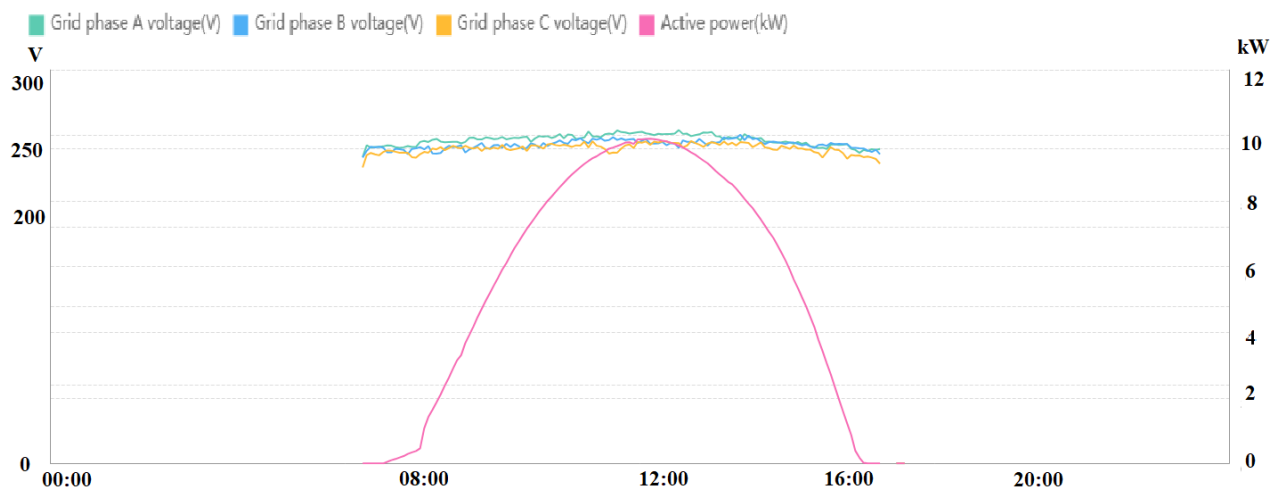
Slika 5. Drugo mjerenje 01.08.2024.

2.3. Treće mjerenje u jesen – nisko opterećenje niskonaponskog izvoda uz visoku osunčanost – izgrađen novi niskonaponski izvod

Treće mjerenje provedeno je 9. studenoga 2024., kada je opterećenje niskonaponskog voda bilo nisko, a solarna radijacija visoka. Usporedba opterećenja voda i meteoroloških podataka pokazuje da su uvjeti bili vrlo slični onima zabilježenima 27. travnja 2024.

Ključna razlika u odnosu na ranije mjerenje jest izgradnja novog niskonaponskog izvoda, koji je preuzeo polovicu potrošača i jednu solarnu elektranu.

Rezultati trećeg mjerenja prikazani su na Slici 6. Vrijednosti napona bile su unutar dopuštenih granica, a solarna elektrana je radila punim kapacitetom bez prekida u proizvodnji.



Slika 6. Treće mjerenje 09.11.2024.

Mjerenje je potvrdilo pretpostavku da kombinacija visoke solarne iradijacije, niskog opterećenja i velike duljine niskonaponskog izvoda dovodi do porasta napona i problema u radu solarne elektrane priključene na taj vod.

3. METODE ZA SANACIJU NEPOVOLJNIH NAPONSKIH UVJETA UZROKOVANIH MALIM SOLARNIM ELEKTRANAMA

Zbog gotovo eksponencijalnog rasta broja novih solarnih elektrana, ovaj problem postao je jedan od najvećih izazova za operatore distribucijskog sustava (ODS) u Republici Hrvatskoj. U ovom istraživanju, konkretan slučaj riješen je izgradnjom novog niskonaponskog voda. U nastavku su predstavljena potencijalna kvalitetna rješenja ovog problema, uz njihove prednosti i nedostatke.

3.1. Povećanje postojećih kapaciteta distribucijske mreže

Ovaj pristup uključuje zamjenu postojećih transformatora, izgradnju novih niskonaponskih vodova, primjenu regulacijskih kondenzatora za upravljanje jalovom snagom te zamjenu zastarjele opreme. Ove tradicionalne metode poboljšavaju naponske uvjete u distribucijskoj mreži, ali zahtijevaju značajne financijske i vremenske resurse za potpunu provedbu.

3.2. Korištenje transformatora s promjenjivim prijenosnim omjerom

Ovi transformatori prilagođavaju transformacijske omjere u realnom vremenu, kako bi održali napon unutar dopuštenih granica. Međutim, glavni nedostatak ove metode je visoka cijena.

3.3. Promjena položaja regulacijske preklapke na transformatorima

Ova metoda uključuje ručno podešavanje naponskog omjera transformatora, što zahtijeva kontinuirano praćenje napona u promatranom području. S obzirom na sezonalnost opterećenja, prilagodba položaja regulacijske preklapke mora se provoditi nekoliko puta godišnje.

3.4. Sustavi distribuirane pohrane energije

Ovi sustavi ne samo da poboljšavaju naponske uvjete, već donose i dodatne koristi distribucijskoj mreži s mogućnošću pohrane energije. Glavno ograničenje njihove primjene je visoka cijena, što otežava širu implementaciju.

3.5. Napredne tehnologije (upravljanje opterećenjem)

Ove tehnologije omogućuju fleksibilno prilagođavanje potrošnje električne energije u realnom vremenu, kako bi se uskladila s promjenama u proizvodnji. Iako se radi o učinkovitom rješenju, njegova brza implementacija predstavlja izazov.

3.6. Autotransformator

Autotransformatori se prvenstveno koriste za povećanje napona na vodovima, ali se mogu modificirati i za smanjenje napona. Slično pametnim regulatorima napona, glavni problem njihove primjene je ekonomska isplativost. [5].

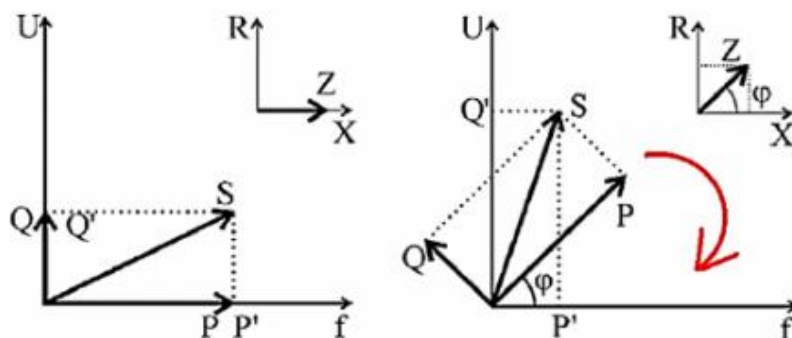
3.7. Primjena pametnih regulatora napona i jalove snage u realnom vremenu

Ova metoda može se relativno brzo implementirati, no trošak regulatora napona predstavlja značajnu prepreku široj primjeni, jer bi svaki niskonaponski izvod zahtijevao jedan takav regulator.

3.8. Generiranje jalove snage putem fotonaponskih invertera

Jedna studija [6] istraživala je mogućnost da PV inverteri generiraju jalovu snagu, čime bi pružali naponsku potporu sustavu. Ova metoda pokazala se učinkovitom i ekonomičnom, budući da ne zahtijeva dodatna ulaganja i ne dovodi do gubitka solarne energije. Kapaciteti fotonaponskih invertera često nisu u potpunosti iskorišteni, što omogućuje da se preostali kapacitet koristi za isporuku jalove snage u mrežu.

Međutim, uvođenje jalove snage putem PV invertera može dodatno opteretiti opremu i potencijalno skratiti njihov vijek trajanja. [7].



Slika 7. Pomicanje radne točke ovisno o naponu u mreži

Kroz proces odobrenja priključenja na elektroenergetski sustav, operator distribucijskog sustava (ODS) definira faktor snage (power factor) koji nove solarne elektrane moraju zadovoljiti. Trenutačno je faktor snage postavljen na 1. Predloženi pristup uključuje zahtjev da nove solarne elektrane, koje traže priključak na distribucijsku mrežu, instaliraju visokokvalitetne regulatore napona. Ovi regulatori bi automatski prilagođavali radnu točku, ovisno o naponu mreže, kako bi po potrebi radili u drugom kvadrantu, djelujući na način kapacitivnog režima rada. Time bi solarna elektrana funkcionirala kao kompenzator jalove snage, stabilizirajući naponske uvjete u distribucijskoj mreži.

Ova metoda zahtijevala bi povećanje početne investicije za vlasnike solarnih elektrana, no istovremeno bi omogućila ODS-u značajno poboljšanje naponskih uvjeta u mreži bez dodatnih kapitalnih ulaganja. Ovaj pristup predstavlja najbrže provedivo i ekonomski najisplativije rješenje za ODS.

4. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje potvrđuje da je rast broja solarnih elektrana u Republici Hrvatskoj uzrokovao značajne promjene u distribucijskom sustavu, što je dovelo do izazova povezanih s povišenim naponom u pojedinim područjima koja se odlikuju izraženim sezonskim varijacijama opterećenja. Potrebna su hitna rješenja koja uključuju modernizaciju mreže, implementaciju naprednih sustava za upravljanje energijom te razvoj novih tehnologija. Kompenzacija jalove snage putem fotonaponskih (PV) invertera identificirana je kao najučinkovitije rješenje.

Provedba ovih mjera ne samo da će poboljšati kvalitetu napona, već će i potaknuti održivost i energetske neovisnost, čime će se značajno doprinijeti ostvarenju ambicioznih ciljeva energetske strategije Hrvatske.

5. LITERATURA

- [1] European Commission 'EU Solar Energy Strategy' (Publisher, 2022), pp. 1-4
- [2] Sema, S., Voh, J., Voršič, J.: 'Influence of small solar power plants on power quality', Renewable Energy and Power Quality Journal, 2012.

- [3] Visser, R., Schuurmans, E.M.B., AlSkaif, T.A., et al.: 'Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic solar systems in an urban low voltage grid', International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022.
- [4] EN 50160:2022 'Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks', 2022.
- [5] Makinde, K., Akinyele, D., Agagu, O., et al., 'Voltage Rise Problem in Distribution Networks with Distributed Generation: A Review of Technologies, Impact and Mitigation Approaches', Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI), 2021.
- [6] Zeraati M., Golshan M. E. H., Guerrero J. M., 'Voltage Quality Improvement in Low Voltage Distribution Networks Using Reactive Power Capability of Single-Phase PV Inverters', IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 5057-5065
- [7] Baškarad, T., 'Possibilities of participation of photovoltaic power plants in the provision of auxiliary services to the system', PhD thesis, University of Zagreb Faculty of electrical engineering and computing, 2019..