

Projektovanje mrežno povezanog fotonaponskog sistema male snage

Aleksandar D. Panić
Katedra za Elektroniku
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
aleksandar.panic@elfak.ni.ac.rs
ORCID: 0009-0001-1876-6413

Igor D. Jovanović
Katedra za Elektroniku
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
igor.jovanovic@elfak.ni.ac.rs
ORCID: 0000-0001-7912-9154

Dragan D. Mančić
Katedra za Elektroniku
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
Niš, Srbija
dragan.mancic@elfak.ni.ac.rs
ORCID: 0000-0001-9713-8337

Abstract—U ovom radu prikazan je postupak projektovanja mrežnog fotonaponskog sistema male snage za domaćinstvo, kao i simulacija sistema u softverskom paketu PV*SOL. Glavni ciljevi simulacije su procena isplativosti i analiza performansi sistema. Sistem je dimenzionisan na osnovu godišnje potrošnje domaćinstva i čine ga 12 PV panela CS3L-370M snage 370 W i jedan inverter MOD 4000TL3-XH snage 4 kW. Na osnovu analize performansi sistema procenjena je isplativost ulaganja i izračunat je period otplate sistema od 6,5 godina.

Ključne reči—obnovljivi izvori energije, PV sistemi male snage, mrežno povezani PV sistemi

I. UVOD

Fotonaponski (PV) sistemi su sistemi koji konvertuju Sunčevu energiju u električnu energiju. U osnovi svakog PV sistema nalaze se PV paneli i inverter. PV paneli vrše konverziju Sunčeve energije u jednosmernu električnu energiju koja se dovodi na ulaz invertora, koji jednosmernu električnu energiju pretvara u naizmennu. U zavisnosti od toga da li je sistem povezan na distributivnu mrežu, PV sistemi se dele na autonomne, mrežne i hibridne.

Autonomni PV sistemi nisu povezani na distributivnu mrežu i najčešće se realizuju na područjima gde nema pristupa mreži. Ovi sistemi koriste baterije za skladištenje energije, pa je samim tim inicijalno ulaganje u ovakve sisteme izuzetno veliko. Takođe, u autonomnim sistemima su često zastupljeni i dizel agregati koji se koriste za dobijanje energije u slučajevima kada se baterije isprazne usled smanjene proizvodnje ili povećane potrošnje energije u sistemu. Za razliku od autonomnih, mrežno povezani PV sistemi koriste distributivnu mrežu za skladištenje viška proizvedene energije i za snabdevanje energijom u situacijama kada proizvodnja sistema ne zadovoljava potrebe potrošača. Ova vrsta sistema je najzastupljenija zbog prihvatljive visine inicijalnog ulaganja i postojanja sigurnog snabdevanja energijom u dugim periodima oblačnosti. Hibridni sistemi su kombinacija prethodno opisanih sistema - povezani su na distributivnu mrežu, ali su pored toga u sistem uključene i baterije. Cilj realizacije ovakvih sistema je da se optimizuje iskorišćenost proizvedene energije, a da se energija iz mreže uzima samo kada je to neophodno. Zbog visoke cene, ovakvi sistemi nisu zastupljeni u Republici Srbiji. U Republici Srbiji su najzastupljeniji mrežno povezani PV sistemi čiji se proizvodni kapacitet znatno uvećao od 2022. godine [1].

Usvajanjem Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije u aprilu 2021. godine [2], krajnjim korisnicima je

ponuđena mogućnost sticanja statusa kupac-proizvođač. Kupac-proizvođač je krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije, pri čemu se proizvedena električna energija koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a višak proizvedene električne energije isporučuje u prenosni sistem, distributivni sistem, odnosno zatvoreni distributivni sistem [2]. Porast broja kupaca-proizvođača je u velikoj meri izazvan time što je veliki broj lokalnih samouprava od 2022. godine počeo sa objavljivanjem javnih poziva za sufinansiranje mera energetske sanacije porodičnih kuća i stanova, u okviru kojih je jedna od mera sufinansiranja izgradnja PV elektrane snage do 10,8 kW [3]. Predviđeni iznos bespovratnih sredstava za ovu meru je do 50% ukupne vrednosti projekta, pri čemu je maksimalni predviđeni iznos 420 000 dinara [3]. Korisnicima je u okviru javnog poziva ponuđen spisak kompanija koje uglavnom vrše sve što je potrebno da korisnik postane kupac-proizvođač, što obuhvata: proveru uslova i potencijala, ponudu opreme, izvođenje radova i pripremu i slanje celokupne potrebne dokumentacije. Navedene mere treba da omogućće izgradnju PV sistema većem broju korisnika.

U ovom radu prikazan je postupak projektovanja i simulacije mrežno povezanog PV sistema za domaćinstvo u softverskom alatu PV*SOL [4]. Izvršena je tehno-ekonomska analiza, pri čemu su u analizu uključena i sredstva koja se dodeljuju pomenutim javnim pozivima.

II. PROJEKTOVANJE PV SISTEMA

Prvi korak prilikom projektovanja PV sistema je provera potencijala objekta za postavljanje sistema. U ovoj fazi je potrebno utvrditi stanje, orijentaciju i površinu krova, ali i eventualne izvore senki. Najbolja orijentacija krova je ka jugu, a odličan potencijal imaju i objekti sa velikom površinom krova orijentisanom ka istoku i zapadu. Površina krova praktično određuje maksimalnu moguću snagu solarne elektrane. Kao inicijalna procena maksimalne snage elektrane može se usvojiti jedna petina snage koju bi generisali PV paneli postavljeni na horizontalnoj površini ekvivalentnoj ukupnoj površini krova, pod pretpostavkom da je efikasnost PV panela 20%.

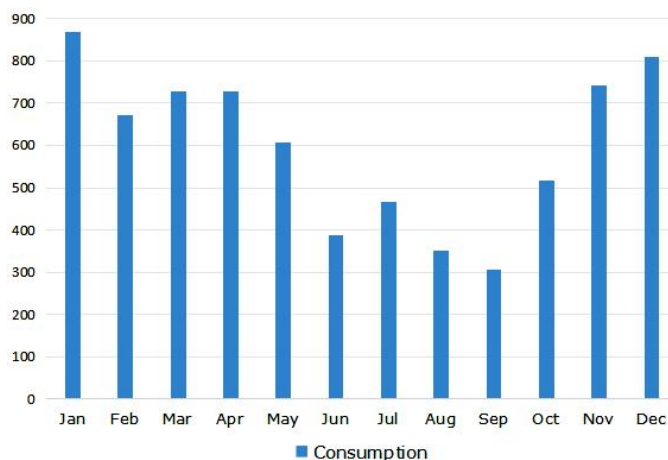
Domaćinstvo za koje je projektovana elektrana u ovom radu nalazi se u Pirotu (na lokaciji N43,15°, E22,58°) ima odličan potencijal za ugradnju sistema, jer je deo krova površine 54 m² orijentisan jugoistočno, sa azimutnim uglom od -10° i nagibom od 29°. Na navedenoj površini krova moguće je montirati PV

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije [broj granta 451-03-137/2025-03/200102].



panele ukupne maksimalne snage od 10,8 kW. Takođe, okolni objekti i prepreke ne prave senku na posmatranoj strani krova.

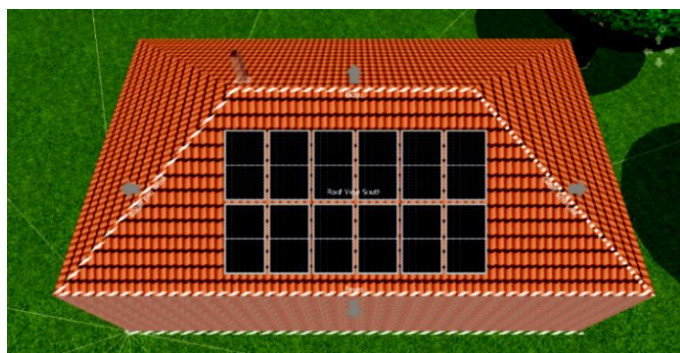
Naredni korak je dimenzionisanje PV sistema na osnovu podataka o potrošnji električne energije posmatranog domaćinstva. Podaci o godišnjoj potrošnji električne energije u domaćinstvu u 2023. godini po mesecima prikazani su na Sl. 1.



Sl. 1. Godišnja potrošnja električne energije u domaćinstvu u 2023. godini prikazana po mesecima

Za dimenzionisanje PV sistema u ovom slučaju korišćen je solarni kalkulator [5], kojim je na osnovu podataka o mesečnoj potrošnji, geografskoj lokaciji i orijentaciji krova dobijena procena snage PV sistema od 4,2 kW. S obzirom na to da izabrana strana krova pruža mogućnost montaže PV panela maksimalne snage 10,8 kW, može se zaključiti da su potrebni uslovi za montažu panela zadovoljeni.

Sledeći korak je izbor invertora i PV panela. Prilikom odabira PV panela, treba naglasiti da se u praksi bira broj panela čija je ukupna snaga koja je specificirana u katalogu do 25% veća od izračunate potrebne snage PV sistema. Glavni razlozi za to su manja proizvodnja energije u realnim uslovima u odnosu na standardne uslove pri kojima se vrši merenje karakteristika panela, usled veće temperature panela, razlike u karakteristikama panela i zbog neminovnih omskih gubitaka u sistemu. Za potrebe ovog sistema izabrani su monokristalni paneli CS3L-370M snage 370 W, proizvođača CanadianSolar [6]. Raspored panela na krovu objekta prikazan je na Sl. 2. [4].

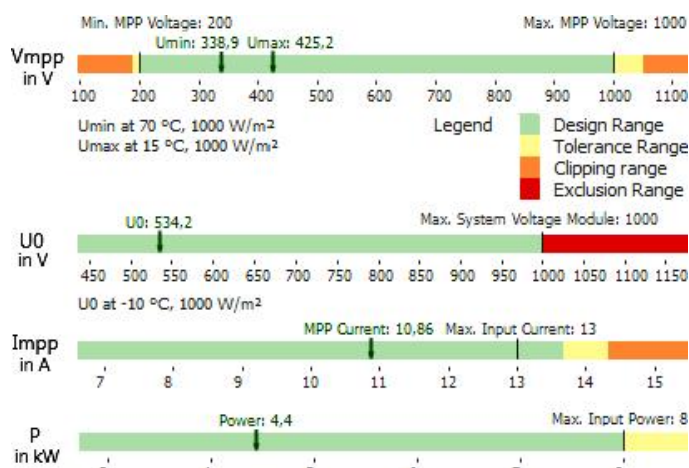


Sl. 2. Raspored panela na krovu objekta [4]

Pored panela, druga komponenta sistema koju treba odabrati u ovom koraku je inverter. Prilikom odabira invertora treba voditi računa o broju izlaznih faza i izlaznoj snazi koja treba da bude jednaka ili manja od procenjene snage sistema. Takođe, treba voditi računa o maksimalnim vrednostima ulaznog napona i struje invertora, jer maksimalni DC napon određuje maksimalan broj panela koje je moguće povezati redno, a maksimalna DC struja određuje maksimalan broj panela ili stringova koje je moguće povezati paralelno.

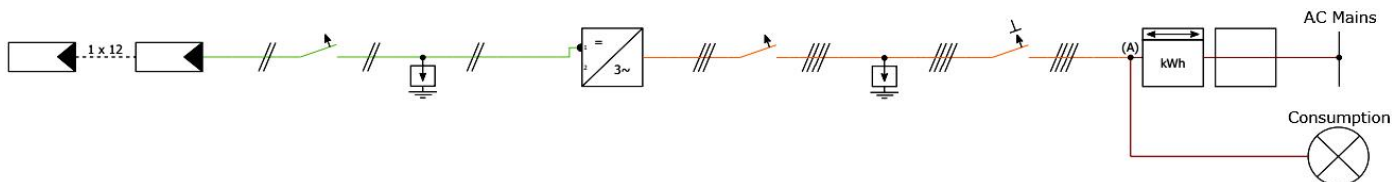
S obzirom na to da se uslovi u kojima paneli rade neprekidno menjaju, neprekidno se menja i snaga na njihovom izlazu. Da bi se u svim uslovima u kojima paneli rade dobila maksimalna snaga, invertori koriste MPPT (Maximum Power Point Tracking) uređaje. Ovi uređaji imaju svoja ograničenja koja se odnose na naponski opseg u okviru kog mogu da daju maksimalnu snagu na izlazu i maksimalnu ulaznu struju. Navedena ograničenja treba razmotriti prilikom projektovanja sistema da bi sistem radio optimalno. U ovom koraku neophodno je proceniti vrednosti struje i napona u toku zimskog dana bez oblačnosti.

Za potrebe ovog sistema izabran je inverter MOD 4000TL3-XH proizvođača Growatt [7]. Sa ciljem da se ispoštuju sva prethodno navedena ograničenja invertora i MPPT uređaja, dvanaest panela je povezano redno na ulaz jednog MPPT uređaja. Nakon povezivanja panela, softverski alat je generisao prozor prikazan na Sl. 3. [4], koji potvrđuje da su ograničenja MPPT uređaja ispunjena.



Sl. 3. Provera ispunjenosti ograničenja MPPT uređaja [4]

Poslednji korak u procesu projektovanja PV sistema je projektovanje električnih instalacija u skladu sa opštim uslovima za priključenje PV modula na unutrašnje instalacije postojećeg objekta [8]. PV paneli su međusobno povezani bakarnim kablovima površine poprečnog preseka 6 mm², koji se takođe koriste za povezivanje niza redno povezanih PV panela (PV string) na ulaz invertora. Pre povezivanja na ulaz invertora, izlaz PV stringa se povezuje na automatske osigurače i odvodnik prenapona. Izlaz invertora se povezuje na automatske osigurače, potom na odvodnike prenapona i zaštitni uređaj diferencijalne struje koji predstavlja i spojni prekidač. Jednopolna šema PV sistema prikazana je na Sl. 4. [4].

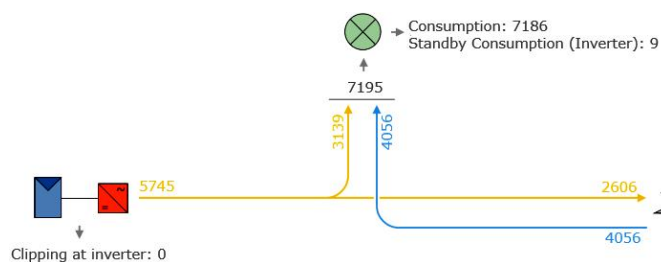


Sl. 4. Jednopolna šema PV sistema [4]

III. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PV SISTEMA

Nakon uspešne konfiguracije sistema, potrebno je postaviti određene parametre simulacije koji se odnose na gubitke u sistemu. Pre simulacije uneti su procentualni gubici usled starenja PV panela [6], gubici usled zaprljanosti PV panela [9], gubici usled razlike u karakteristikama PV panela i gubici u kablovima [10]. Alat je na osnovu podataka iz baze samostalno postavio vrednosti gubitaka usled neslaganja u spektru Sunčevog zračenja na unetoj geografskoj lokaciji i spektru AM1.5 koji se koristi pri standardnim uslovima testiranja, kao i gubitke u invertoru i gubitke usled odstupanja temperature PV panela u radnim uslovima u odnosu na standardne. Na osnovu 3D nacrtu sistema prikazanog na Sl. 2, alat je procenio i gubitke usled senčenja panela.

Na Sl. 5. prikazan je celokupan pregled toka električne energije između PV sistema, potrošača u domaćinstvu i distributivne mreže [4]. Sa slike se može uočiti da se od 5745 kWh koje PV sistem proizvodi u prvoj godini upotrebe, 3139 kWh direktno potroši u domaćinstvu, što je 54,64% ukupne proizvodnje, dok se kao višak mreži predaje 2606 kWh, odnosno 45,36% ukupne proizvodnje. Za napajanje potrošača se iz mreže uzima 4056 kWh. Treba napomenuti da su navedene vrednosti procenjene, s obzirom da u softverski alat nisu uneti precizni podaci o aktivnosti električnih potrošača u domaćinstvu. Za dobijanje preciznijih rezultata, korisnik ima mogućnost da za individualne potrošače unese podatke o potrošnji za svaki sat na dnevnom nivou, kao i za svaki dan na mesečnom i godišnjem nivou.



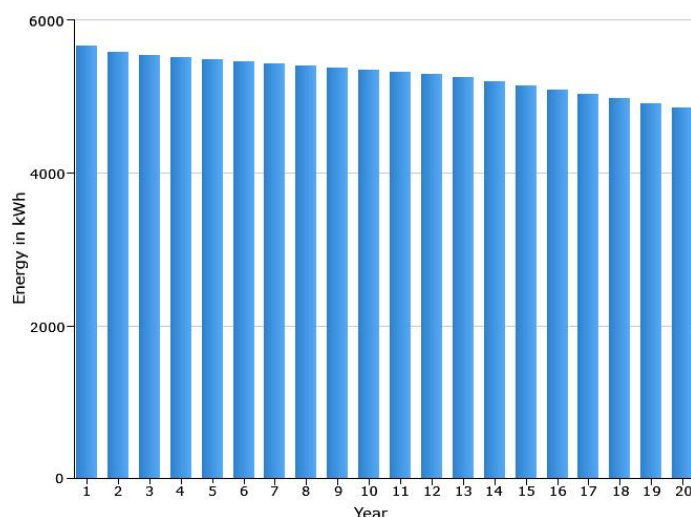
Sl. 5. Tok energije između PV sistema, potrošača i distributivne mreže [4]

Usled starenja PV panela dolazi do degradiranja njihovih performansi [6], što rezultuje padom proizvodnje energije u sistemu. Na osnovu podataka sa grafika sa Sl. 6. koji ilustruje godišnju proizvodnju električne energije u sistemu u periodu od 20 godina, sistem u prvoj godini upotrebe generiše 5745 kWh, a u poslednjoj 4853 kWh, što je za 15,53% manje u odnosu na proizvodnju sistema u prvoj godini [4].

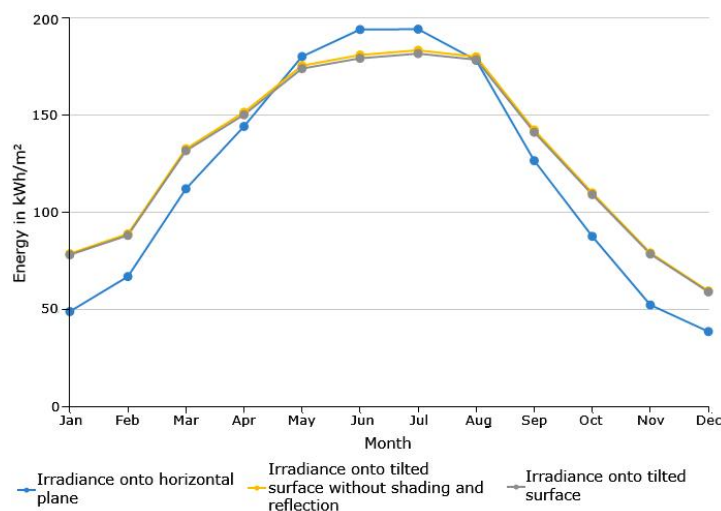
Na Sl. 7-8. prikazani su grafici koji ilustruju mesečnu količinu Sunčeve energije koja pada na jedinicu površine krova objekta, kao i prosečne ambijentalne temperature i temperature PV panela na mesečnom nivou, respektivno [4]. Na Sl. 7.

uočava se da su kriva koja uzima u obzir uticaj senčenja i refleksije (označena sivom bojom) i kriva koja zanemaruje ove uticaje (označena žutom bojom) gotovo identične, što znači da se uticaj ovih pojava u daljoj analizi može zanemariti.

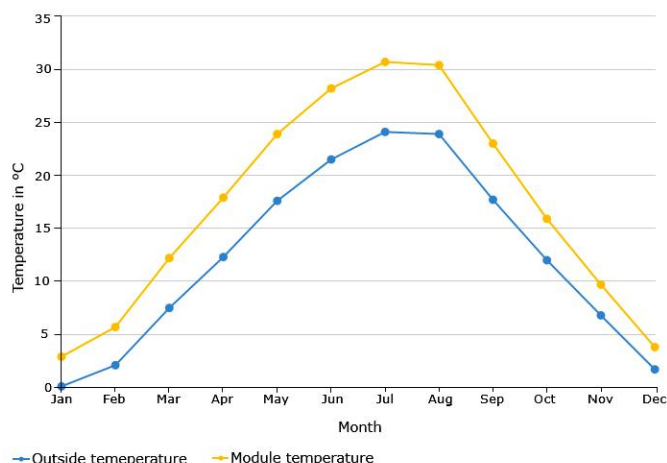
Grafik sa Sl. 8. pokazuje da je tokom većeg dela godine prosečna temperatura PV panela niža od 25°C, odnosno niža od definisane temperature PV panela pri standardnim uslovima testiranja. Na osnovu toga, izvodi se zaključak da su uslovi za rad PV panela na krovu objekta povoljni sa stanovišta temperature, jer snaga PV panela opada sa povećanjem temperature.



Sl. 6. Opadanje proizvodnje energije sa godinama usled starenja panela [4]

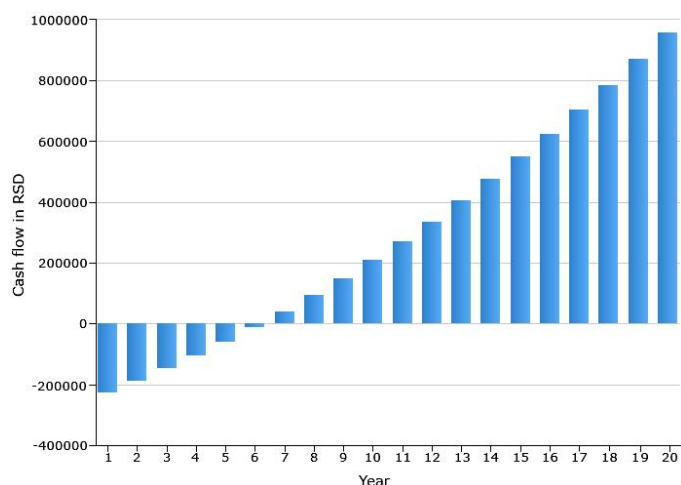


Sl. 7. Količina svetlosne energije po jedinici površine koja pada na horizontalnu površinu, na površinu pod nagibom (krov) sa zanemarivanjem senčenja i refleksija i na površinu pod nagibom bez zanemarivanja senčenja i refleksije na mesečnom nivou [4]



Sl. 8. Prosečna ambijentalna temperatura i proračunata temperatura PV panela na mesečnom nivou [4]

Pored performansi PV sistema, u izveštaju koji program generiše nakon simulacije nalaze se i podaci o finansijskoj isplativosti sistema. Upotrebom aproksimacije cene od 1000 evra po ugrađenom kW za PV sisteme male snage [11], procenjena vrednost inicijalnog ulaganja u sistem iznosi 523 920 dinara. S obzirom na to da korisnik može da ostvari pravo na subvencije, subvencijom je moguće pokriti 50% inicijalnog ulaganja [3], što investiciju umanjuje za 261 960 dinara. Na osnovu cene i perioda garancija izabranih PV panela [12] i invertora [13], izračunato je da je za kupovinu novih PV panela i invertora po isteku garancije neophodno izdvojiti 61 163 dinara godišnje, u najnepovoljnijem slučaju. Za obračun cene električne energije uneti su podaci o cenama po kWh po tarifama koje pored osnovnih cena uključuju i naknadu za podsticaj povlašćenih proizvođača električne energije, naknadu za unapređenje energetske efikasnosti, akcizu i porez na dodatu vrednost. Na osnovu cena električne energije iz 2013. godine [14] i 2025. godine [15], izračunata prosečna stopa inflacije cene električne energije u periodu od 12 godina iznosi 3,5% godišnje, pa je ova vrednost uzeta i za predviđenu godišnju stopu inflacije prilikom proračuna u simulaciji. Na osnovu navedenih podataka, dobijen je kumulativni tok novca za period od 20 godina prikazan na Sl. 9. [4].



Sl. 9. Kumulativni tok novca za period od 20 godina [4]

Period otplate PV sistema je u posmatranom slučaju 6,5 godina, što je blizu donje granice opsega otplate sistema koji u praksi iznosi od 6 do 8 godina za PV sisteme male snage [16].

ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak projektovanja mrežnog PV sistema instalisane snage 4,44 kW za domaćinstvo u Pirotu i simulacija rada sistema u programskom paketu PV*SOL. Finansijski izveštaj pokazuje da je ugradnja PV sistema na objektima sa sličnim karakteristikama dobra investicija. S obzirom na predviđanja da će cene električne energije nastaviti da rastu, isplativost PV sistema će vremenom biti veća, odnosno biće kraći period otplate investicije.

Pored povećanja energetske efikasnosti domaćinstava i smanjenja troškova električne energije, ugradnjom PV sistema smanjuje se i opterećenje na postojeću energetska infrastrukturu, što doprinosi stabilnosti energetskog sistema i smanjuje rizik od prekida lokalnog snabdevanja energijom. Iz navedenog se može zaključiti da će PV sistemi imati značajnu ulogu u održivom energetskom razvoju.

LITERATURA

- [1] Elektro distribucija Srbije, Registar kupaca-proizvođača, <https://elektrodistribucija.rs/pdf/DOMACINSTVA.pdf> (pristupljeno 18.4.2025.)
- [2] Pravno informacioni sistem Republike Srbije, Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/40/2/reg> (pristupljeno 18.4.2025.)
- [3] Grad Pirot, Javni poziv za učešće krajnjih korisnika (domaćinstava) za sufinansiranje mera energetske sanacije porodičnih kuća i stanova na teritoriji grada Pirota za 2024. godinu, <https://www.pirots.rs/index.php/loksamouprava/2014-07-10-11-35-01/konkursi-i-javni-pozivi-2/7679-javni-poziv-za-ucescje-krajnjih-korisnika-domacinstava-za-sufinansiranje-mera-energetske-sanacije-porodicnih-kuca-i-stanova-na-teritoriji-grada-pirota-za-2024-godinu-2> (pristupljeno 18.4.2025.)
- [4] PV*SOL, <https://pvsol.software/en/>
- [5] Solarni kalkulator, <https://solarnikalkulator.rs/> (pristupljeno 19.4.2025.)
- [6] CanadianSolar, HiKu CS3L-MS (1000V & 1500V), https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3L-MS_EN.pdf (pristupljeno 19.4.2025.)
- [7] Growatt, Inverter Growatt MOD 4000TL3-XH BP, https://growatt.tech/wp-content/uploads/2023/02/MOD-3000_10000TL3-XH-Datasheet.pdf (pristupljeno 19.4.2025.)
- [8] Elektro distribucija Srbije, Opšti uslovi za priključenje fotonaponskih modula na unutrašnje instalacije postojećeg objekta, <https://elektrodistribucija.rs/pdf/Opsti%20uslovi.pdf> (pristupljeno 19.4.2025.)
- [9] J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouge, J. Carretero, P. Bernaola, P. Carpena, L. Mora-López, M. Sidrach-de-Cardona, "Analysis of dust losses in photovoltaic modules", World Renewable Energy Congress - Sweden, May 8-13, 2011, Linköping University Electronic Press, Linköping, Sweden, Nov. 2011, pp. 2985-2992, <https://doi.org/10.3384/ecp110572985>.
- [10] S. Ekici, M. A. Köprü, "Investigation of PV System Cable Losses", International Journal of Renewable Energy Research, vol. 7, no. 2, 2017.
- [11] Prozjumeri, Koliko košta izgradnja solarne elektrane, <https://prozjumeri.rs/koliko-kosta-izgradnja-solarne-elektrane/> (pristupljeno 20.4.2025.)
- [12] Solar-shop, Solarni panel Canadian Solar HiKu CS3L-370M 370W Mono Half Cut, <https://www.solar-shop.rs/kupi/solarni-panel-canadian-solar-hiku-cs3l-370m-370w-mono-half-cut-765> (pristupljeno 19.4.2025.)

- [13] Solar-shop, Solarni on-grid pretvarač GROWATT MOD 4000TL3-X, <https://www.solar-shop.rs/kupi/solarni-on-grid-pretvarac-growatt-mod-4000tl3-x-778> (pristupljeno 19.4.2025.)
- [14] Centar potrošača Srbije, Cene struje, <https://www.ceps.rs/vesti/item/276-cena-struje> (pristupljeno 20.4.2025.)
- [15] Elektroprivreda Srbije, Odluka o regulisanoj ceni za garantovano snabdevanje, https://www.eps.rs/cir/snabdevanje/Documents/20230926_Odluka%20Skup%C5%A1tine%20EPS%20AD_Cena%20EE%20za%20garantovano%20snabdevanje.pdf (pristupljeno 20.4.2025.)
- [16] BALKAN GREEN ENERGY NEWS, U Srbiji sve lakše korišćenje solarne energije – šta treba da znate ukoliko želite da sami proizvodite struju?, <https://balkangreenenergynews.com/rs/u-srbiji-sve-lakse-koriscenje-solarne-energije-sta-treba-da-znate-ukoliko-zelite-da-sami-proizvodite-struju/> (pristupljeno 20.4.2025.)

ABSTRACT

This paper presents the design process of a low power on-grid photovoltaic system for household and the simulation of the system using the PV*SOL software. The main goal of the simulation is to evaluate the cost-effectiveness of the system and analyze the performance of the system. The system is sized based on the annual consumption of the specified household and consists of twelve 370 W CS3L-370M PV panels and one 4 kW MOD 4000TL3-XH inverter. Based on the performance analysis of the system, the profitability of the investment was estimated with calculated system payback period of 6.5 years.

Design of a grid-connected low-power photovoltaic system

Aleksandar Panić, Igor Jovanović and Dragan Mančić