

Iskustva u izvođenju i eksploataciji fotonaponske elektrane instalisane snage 500 kW u fabrici „Gruner“ d.o.o-Vlasotince

Experiences in Realization and Exploitation of Photovoltaic Power Plant with 500 KW of Installed Power in “Gruner” Ltd. - Vlasotince

Miodrag Vuković*, Željko V. Despotović**, Bojan Simonović***

* CONSEKO d.o.o, Beograd

** Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu

*** GRUNER Serbian d.o.o, Vlasotince

Rezime - Osnovna namena fotonaponske elektrane (FNE), instalisane snage 500kW na krovu fabrike GRUNER Serbian d.o.o u Vlasotincu, je napajanje električnom energijom potrošača u fabrici. Sagledavajući dimenzije krova i dnevne i mesečne profile potrošnje električne energije u fabrici, početkom 2021 projektovana je FNE, koja ostvaruje paralelni rad za elektrodistributivnom mrežom, sa mogućnošću isporuke viška proizvedene električne energije u istu. FNE je izvedena od strane firme CONSEKO d.o.o., Beograd u periodu 15.07-15.10.2021 i puštena je u probni rad krajem septembra 2021., a upotrebna dozvola za rad je izdata 30.12.2021. Od tada je FNE zvanično u eksploatacionom radu. Fabrika GRUNER je 30.03.2022. zaključila sa JP EPS, Ogranak „EPS Snabdevanje“ ugovor o potpunom snabdevanju električnom energijom za period 01.04.2022 do 31.12.2023. U radu su data neka ključna iskustva sa izvođenja i eksploatacije FNE, koja bi mogla biti interesantna kako projektantima, tako i izvođačima i realizatorima solarnih elektrana. Realizacijom FNE je dat izvestan doprinos promociji obnovljivih izvora energije i korišćenju „zelene“ energije na teritoriji Republike Srbije.

Ključne reči – energetika, solarne elektrane, „on-grid“ sistemi, OIE, dekarbonizacija,

Abstract - The main purpose of the solar photovoltaic power plant (SPVPP), with installed power of 500 kW on the roof of the factory GRUNER Serbian Ltd in Vlasotince, is to electrical supply of consumers in the factory. Considering the geometric dimensions of the roof and the daily and monthly profiles of electricity consumption in the factory, at the beginning of 2021, SPVPP was designed. In this way It is achieves parallel operation with the electricity distribution network, with the possibility of delivering surplus electrical energy. SPVPP was performed by the company CONSEKO Ltd., Belgrade in the period 15.07-15.10.2021 and was put into trial operation at the end of September 2021, and the use permit of the plant for operation was issued on 30.12.2021. Since that date, SPVPP has been officially in exploitation operation. The GRUNER factory is on March 30, 2022 concluded with JP EPS, Branch "EPS Snabdevanje" concluded a contract for full supply of electricity

for the period 01.04.2022 to 31.12.2023. The paper presents some key experiences from the construction and operation of PVPP, which could be interesting for both designers and implementers. The realization of PVPP has made a certain contribution to the promotion of renewable energy sources and the use of "green" energy in the territory of the Republic of Serbia

Index Terms – Energy, PV plant, On-grid systems, RES, Decarbonisation

I UVOD

Solarno zračenje je u suštini besplatan resurs dostupan svuda na Zemlji, u većoj ili manjoj meri. Trenutno je kako na svetskom tako i na domaćem nivou veoma aktuelno pretvaranje sunčevog zračenja u električnu energiju putem fotonaponskih elektrana (FNE). U sadašnjoj eri globalnih klimatskih promena, fotonaponska (PV) tehnologija postaje prilika za zemlje i zajednice da transformišu ili razviju svoju energetske infrastrukturu i pojačaju energetske tranzicije ka dekarbonizaciji.

Tokom poslednje decenije, u oblasti fotonaponskih sistema je došlo značajnog pada troškova instalacije solarnih postrojenja, tako da se instalisani kapaciteti na globalnom nivou značajno povećavaju. Međunarodna agencija za obnovljive izvore energije (*International Renewable Energy Agency-IRENA*) daje neke značajne podatke koji se tiču pada cena fotonaponskih (PV) modula za oko 80% u poslednjoj deceniji, dok su instalisani kapaciteti solarnih postrojenja u istom periodu porasli sa oko 40GW na preko 600GW (ovi podaci su iz Juna 2020 godine). Ovi trendovi će se nastaviti sa novim globalnim porastom solarnih instalacija, ukupne snage od preko 200GW, koji se očekuju u narednom periodu.

U Republici Srbiji potencijal sunčeve energije predstavlja 15% od ukupno iskoristivog potencijala OIE. Energetski potencijal sunčevog zračenja u Srbiji je za oko 30% viši nego u Srednjoj Evropi.

Prosečna dnevna gustine energije globalnog zračenja za ravnu površinu u toku zimskog perioda kreće se između 1,1 kWh/m²

na severu i $1,7 \text{ kWh/m}^2$ na jugu, a u toku letnjeg perioda između $5,4 \text{ kWh/m}^2$ na severu i $6,9 \text{ kWh/m}^2$ na jugu Republike Srbije. Poređenja radi, prosečna vrednost globalnog godišnjeg zračenja za teritoriju Nemačke iznosi oko 1000 kWh/m^2 , dok je za Srbiju ta vrednost oko 1400 kWh/m^2 .

Prosečno sunčevo zračenje u Srbiji je nešto veće od evropskog proseka, ali i pored toga korišćenje sunčeve energije za proizvodnju električne energije daleko zaostaje za zemljama Evropske unije. Stvaranje uslova za razvoj i funkcionalnost održivog tržišta fotonaponskih sistema može biti od velikog značaja za ekonomiju i očuvanje prirodne sredine u Srbiji.

Oko 37% svetske energetske potražnje zadovoljava se proizvodnjom električne energije koja je u toku 2020. godine iznosila oko 26 823 TWh [1]. Ako bi se ova energija generisala sistemima koji energiju sunčevog zračenja pretvaraju u električnu, prosečne godišnje izlazne snage od 150 kWh/m^2 , neophodna bi bila površina od približno $(422 \times 422) \text{ km}^2$ za apsorpciju sunčeve energije. Veliki deo ove apsorpcione površine mogao bi se smestiti na krovovima i zidovima zgrada. Ovo ne bi zahtevalo dodatne površine na tlu.

Industrija EU je potrošač 36.4% električne energije, dok se potrošnja električne energije u industriji za poslednjih 10 godina smanjila za 15.7% [2].

Sistemi na krovu su mali u poređenju sa fotonaponskim elektranama postavljenim na zemljanim površinama i njihovi kapaciteti su u opsegu MW. Većina krovih PV elektrana u razvijenim zemljama su fotonaponski elektroenergetski sistemi povezani na mrežu [3].

Krovni PV sistemi na stambenim zgradama obično imaju kapacitet od oko 5 kW do 20 kW , dok oni postavljeni na komercijalnim zgradama često dostižu i do 100 kW , a maksimalno 1 MW . Na veoma velikim krovovima mogu se postaviti industrijski fotonaponski sistemi u rasponu od $0.5\text{--}10 \text{ MW}$.

U radu su predstavljena iskustva u projektovanju, izvođenju i problemi u eksploataciji FNE snage 0.5 MW , postavljene na krovu fabrike GRUNER. Osnovna namena solarne elektrane je napajanje električnom energijom potrošača u fabrici.

Sagledavajući slobodne površine na objektu i profil potrošnje električne energije, izabran je koncept fotonaponske elektrane koja ostvaruje paralelni rad za distributivnom mrežom za mogućnošću vraćanja viška proizvedene električne energije u elektroenergetsku mrežu.

II OČEKIVANA PROIZVODNJA ENERGIJE PV ELEKTRANE

Objekat fabrike „Gruner“, na čijem krovu se montiraju solarni paneli, se nalazi u mestu Vlasotinca, u ulici Marka Oreškovića bb, Objekat na Kp.br. 864/13, 864/18 KO Vlasotinca. GPS koordinate postojećeg objekta su $42^{\circ}96.53$ severne geografske širine, $22^{\circ}11.64$ istočne geografske dužine. Pozicija objekta na osnovu GPS koordinata je data na Slici 1.

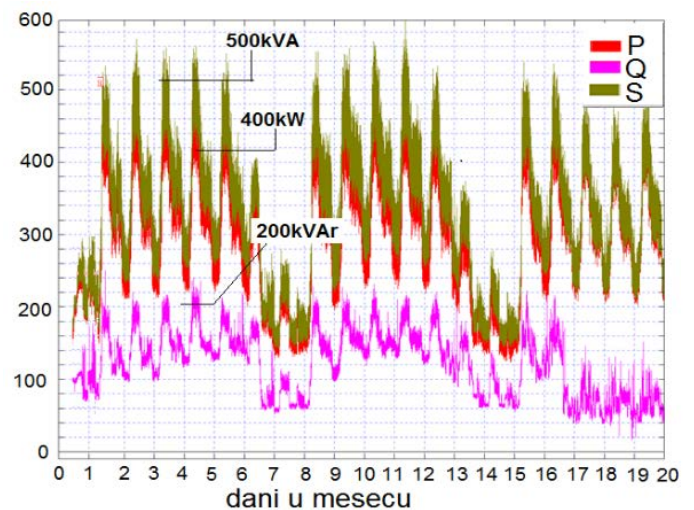
U okviru pomenutog objekta, nalaze se sledeći dominantni potrošači električne energije: (1) unutrašnja i spoljašnja rasveta,

(2) mašine za proizvodnju, (3) kancelarija se klima uređajima i računarima.



Slika 1. Pozicija objekta u okolini fabrike GRUNER i izgled krova fabrike na osnovu GPS koordinata

Godišnja potrošnja električne energije u fabrici GRUNER je oko $2.100.000 \text{ kWh}$. Srednja potrošnja energije tokom dana se kreće oko 240 kW , vikendom između 140 kW i 170 kW . Na dijagramu na Slici 2 je prikazan mesečni profil potrošnje električne energije iz distributivnog elektroenergetskog sistema izmerena u najnepovoljnijem slučaju koji se imao u mesecu Avgustu 2020. Na datom dijagramu su predstavljeni rezultati za izmerene prividnu [kVA], aktivnu [kW], i reaktivnu snagu [kVAr].

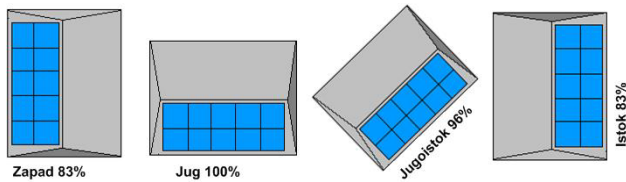


Slika 2. Profil potrošnje električne energije za avgust 2020.

Iz vrednosti maksigrafa, najveća vrednost jednovremene 15-min maksimalne snage u toku jednog meseca je bila u avgustu 2020. godine i iznosila je 505.5 kW (560 kVA prividne snage pri faktoru snage od 0.95). Maksimalna potrošnja reaktivne snage u istom mesecu nije prelazila 250 kVAr .

Uticao orijentacije solarnih modula i krova na iskorišćenje solarne energije je dat detaljno u referencama [4-7]. Na Slici 3 je dat uprošćen prikaz. Najbolji efekat (100%) se postiže pri orijentaciji krova, odnosno solarnih panela na njemu, ka južnoj strani. Takođe i orijentacija ka jugoistoku daje efekat

iskorišćenja od 96%, Ove činjenice direktno utiču i na ukupnu proizvodnju električne energije date solarne elektrane.



Slika 3. Uticaj orijentacije modula na iskorišćenje solarne energije

U slučaju fabrike GRUNER što se tiče orijentacije krovne konstrukcije na kojoj se smestaju solarni paneli, je izuzetno povoljan imajući u vidu konstrukciju dela krova koji je okrenut ka južnoj strani.

Na Slici 4 je prikazana krovna konstrukcija objekta fabrike za postavljanje solarnih panela koja je orijentisana ka južnoj strani. Sa slike se uočava da je kompletna krovna konstrukcija sastavljena od tri krovne konstrukcije na kojima bi se montirali solarni paneli. Konstrukcija I- hala 1 sa upravnom zgradom, konstrukcija II-hala 2, konstrukcija III-hala 3 i konstrukcije IV-nadstrešnice i V-zadnji krov.



(a)



(b)

(c)

Slika 4. Dispozicija krovne konstrukcije sa predviđenim prostorima za postavljanje panela,

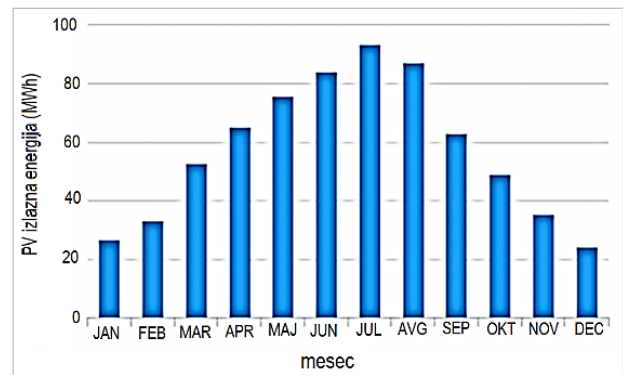
- celokupni predviđeni krovni prostor orijentisan ka jugu,
- dispozicije krovnog prostora iznad hala 2 i 3,
- dispozicija krovnog prostora nasteršnice i zadnji krov

Ukupna površina krovne konstrukcije za postavljanje solarnih panela je oko 6200 m². Izabrani su solarni paneli, svaki snage 370 W i dimenzija 1765 mm x1048 mm, odnosno površine od oko 1,852 m². Specifična proizvedena snaga jednog solarnog panela je oko 200 W/m². Uzimajući u obzir razmeštaj solarnih panela, njihove međusobne razmake, kao i efekte senke u analizi koja je sprovedena u Projektu za Građevinsku Dozvolu-PGD [7], dobija se korisna efektivna ukupna površina krova svedena na

površinu solarnih panela od oko 2800 m². Iz ovoga proizilazi da je ukupan broj potrebnih solarnih panela jednak 1511,8 solarnih panela. U projektu je usvojeno ukupno 1512 solarnih panela, snage 370W koji su postavljeni na krovove objekata iznad hala Faze II i Faze III, koji su prikazani na Slici 4. Instalirana snaga solarne elektrane je $P_{inst}=1512 \cdot 370W=559,4 \text{ kW}$ [8].

Na osnovu podataka o zadatoj geografskoj poziciji lokacije (Geografska pozicija: 42°96.53 severne geografske širine, 22°11.64 istočne geografske dužine), kao i orijentacije i nagiba solarnih panela 16°, putem kalkulatora „PVGIS“ je dobijen podatak o energiji sunčevog zračenja po jednom kvadratnom metru solarnih panela. Na osnovu planiranog rasporeda solarnih panela, uzet je u obzir nagib solarnih panela od 16° od u odnosu na horizontalnu površinu, na predviđenom krovu, dok je usmerenost panela u pravcu juga.

Podaci o očekivanoj godišnjoj proizvodnji po mesecima za datu lokaciju objekta su prikazani na dijagramu na Slici 5.



Slika 5. Očekivana godišnja proizvodnja solarne energije na lokaciji objekta fabrike GRUNER Serbian d.o.o, po mesecima

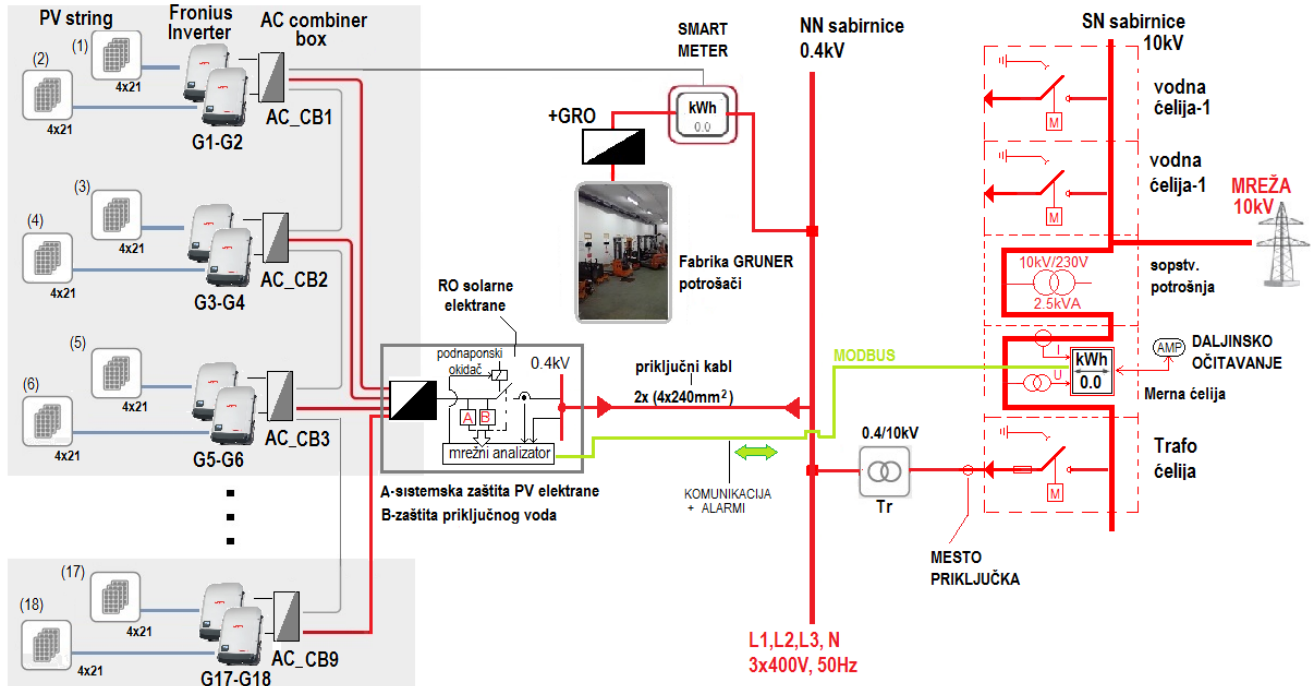
Za ukupnu instaliranu snagu od 559,4 kWp, očekivana godišnja proizvodnja sistema prema PVGIS kalkulatoru bi iznosila oko 689866kWh godišnje, odnosno mesečno u proseku od 57488kWh. Proizvodnja solarne energije iznad proseka se ima u periodu od aprila do septembra (maksimalna proizvodnja od oko 95MWh se ima za mesec jul, a za mesece april i septembar od oko 65MWh). Treba napomenuti da se i u mesecima jun i avgust takođe ima povoljna proizvodnja od oko 85MWh. Na zadatoj lokaciji, uzimajući u obzir gubitke energije koji postoje u sistemu, dobija se godišnja količina proizvedene električne energije od 1233 kWh po jednom instalisanom kW.

Emisija CO₂ po kWh električne energije na osnovu bilansa proizvodnje električne mreže u Srbiji u 2019. je iznosila oko 1,099 kg/kWh [9]. To znači da za godišnju proizvodnju električne energije od 689866 kWh, smanjenje emisije CO₂ bi iznosilo 758,16 tCO₂ godišnje.

III OPIS RADA SOLARNE PV ELEKTRANE

Na osnovu pravila o radu distributivnog sistema električne energije (DSEE)[10] na osnovu tehničkih preporuka[11-12], važećih u Republici Srbiji realizovan je paralelan rad solarne elektrane sa DSEE sa predajom energije u DSEE, pri čemu se proizvedena električna energija koristi za napajanje sopstvene

potrošnje, a višak proizvedene energije se predaje u električnu mrežu.



Slika 6. Principalska blok šema fotonaponske elektrane „GRUNER“

Realizovana solarna elektrana čija je principalska blok šema prikazana na Slici 6 [8], proizvodi električnu energiju za sopstvene potrebe, odnosno proizvedena električna energija se uglavnom koristi za potrošače u okviru objekta.

GRUNER Serbian d.o.o iz Vlasotinca je prva kompanija u Srbiji, čija solarna elektrana je priključena na osnovu Ugovora sa potpunim snabdevanjem električnom energijom sa neto obračunom. Na ovaj način je kompanija stekla status koji se u energetici popularno naziva kupac-proizvođač sa neto obračunom (tzv. „prozjumer“). Ugovor, u skladu sa novim Zakonom o OIE i pratećim uredbama koji uvode kategoriju kupac-proizvođač u energetiku Srbije, omogućuje fabrici GRUNER da višak proizvedene električne energije, koji nije potrošila predaje EPS Snabdevanju po ugovorenoj ceni. Ugovor o potpunom snabdevanju, na osnovu koga ova firma postaje komercijalni prozjumer, počeo je da važi od 1. aprila 2022. godine.

Koncept kupca proizvođača (tzv.„prozjumer“) sa neto obračunom, podrazumeva da se:

- (1) proizvedena električna energija koristi za sopstvenu potrošnju energije na potrošačima u fabrici, pri čemu se za tu utrošenu količinu energije manje energije preuzima iz distributivne mreže
- (2) u intervalima kada elektrana proizvodi manje energije od potrošnje električne energije u fabrici, nedostajuća električna energija preuzima iz distributivne mreže
- (3) u intervalima kada solarna elektrana proizvodi više električne energije od potrošnje fabrike, proizvedeni višak se vraća u distributivni sistem preko dvosmernog električnog brojila, pri čemu se energija koja je vraćena u

sistem obračunava po nižoj ceni u odnosu na preuzetu električnu energiju iz distributivnog sistema.

DC razvod

Na realizovanom solarnom postrojenju je ugrađeno 1512 monokristalnih solarnih panela tipa Ulica Solar UL-370M-120 *Haflicut*, monokristalni, snage 370 W. Gubici snage usled porasta temperature na površini panela su oko $-0,36\%/C^{\circ}$. Prema radnim uslovima, i prema kataloškim podacima proizvođača izabranih panela, gubici nastali usled radne temperature panela od $60^{\circ}C$ na datoj lokaciji, u odnosu na standardne uslove ispitivanja (STC), iznose oko 21%. Iz kataloških podataka su takođe usvojeni gubici od oko 3,2%, nastali usled efekata refleksije svetlosti na solarnim panelima.

Nizovi solarnih panela (popularno nazvani "stringovi") paralelno su povezani u DC razvodne kutije pre invertora u kojima su smeštene zaštitne komponente (zaštitni topivi gPV osigurači na vodovima, odvodnici prenapona i rastavljač). Solarni paneli su zaštićeni od moguće pojave inverzne struje, struja preopterećenja i kratkih spojeva sa gPV osiguračima.

Na svaki od invertora Fronius ECO 27.0.3-S sa implementiranim MPPT algoritmom praćenja tačke maksimalne snage (ukupno 18 invertora) su vezana četiri paralelna stringa. U okviru svakog stringa je vezan 21 panel na red. U tački maksimalne snage napon na jednom solarnom panelu je 34,1 V. Na ovaj način se dobija da je maksimalni napon stringa od 716.1 V pri maksimalnoj struji jednog stringa od 10,85 A (na $25^{\circ}C$). Napon otvorenog kola jednog solarnog panela je 41.4 V, tako da je napon otvorenog kola jednog stringa 870 V. Ovo je ujedno maksimalni DC ulazni napon svakog od invertora. Ukupna ulazna struja svakog od invertora je jednaka zbirnoj struji

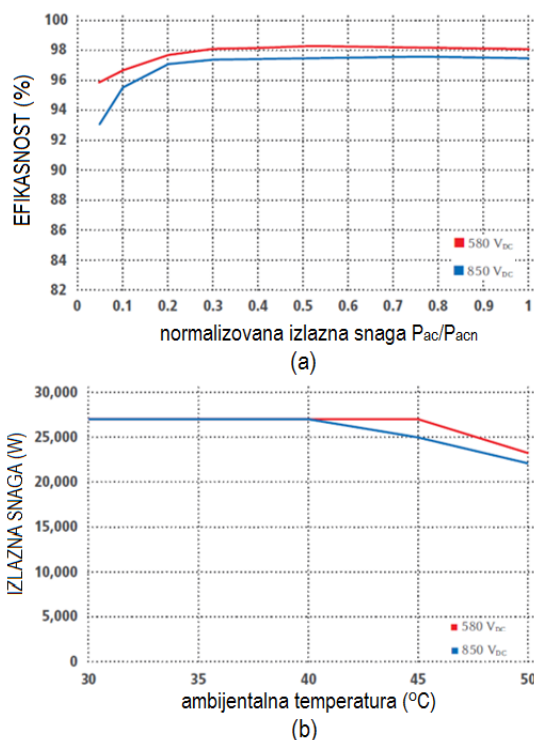
stringova, odnosno $4 \times 10,85 \text{ A} = 43,4 \text{ A}$. Razvod kablova na DC strani je ostvaren na nosačima kablova postavljenim ispod mehaničke konstrukcije solarnih panela. Od svakog stringa ka invertorima su položeni kablovi preseka 6 mm^2 , pri čemu je u proračunima projekta dobijen maksimalni gubitak od 2% u kablovima kod prenosa energije do ulaza invertora[8].

Na ulaznoj DC strani invertora postavljeni su dvopolni DC prekidači, radi razdvajanja instalacije pod naponom od 850 Vdc koji dolazi od redno vezanih solarnih panela (prema DIN VDE 0100-712). DC prekidači omogućuju bezbedno isključenje svakog stringa na ulazu invertora u toku rada. DC osigurači koji se nalaze u razvodnoj kutiji, omogućavaju da se izabrani niz fotonaponskih modula (PV string) isključi tako da preostali deo sistema može da nastavi da proizvodi električnu energiju.

Invertorski sistem

Mrežni ("on-grid") invertori napona proizvode trofaznu naizmeničnu struju napona 400 V, učestanosti 50 Hz i preko izlaznog razvodnog ormara solarne elektrane su priključeni preko NN sabirnice i transformatora 0.4/10 kV na trafo ćeliju kao što je prikazano na Slici 6.

Zahtevi koji se odnose na invertore preuzeti su iz DIN preporuka za projektovanje fotonaponskih sistema. Kako bi invertori obezbedili što efikasniji rad sistema, izabrani su invertori tipa Fronius ECO 27.0.3-S, izlazne snage od 27 kW, sa funkcijom „mirnog režima“ (engl. „standby“) za promenu režima rada tokom noći i sa malom potrošnjom energije. Efikasnost konverzije snage je iznad 95%. Na Slici 7 su prikazane osnovne karakteristike invertora Fronius ECO 27.0.3-S, za dve vrednosti ulaznog DC napona: 580Vdc i 850Vdc[8].



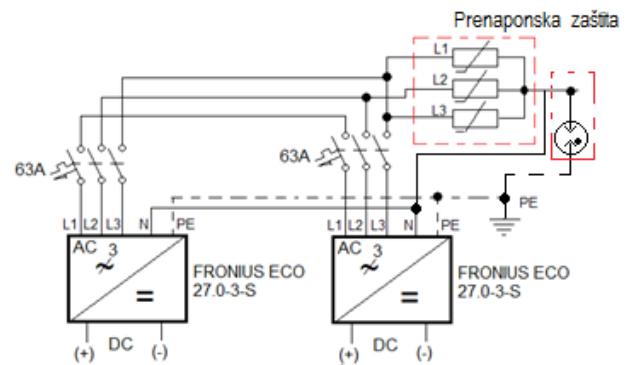
Slika 7. Karakteristike invertora Fronius Eco27.0-3-S
a) zavisnost efikasnosti od normalizovane izlazne snage,
b) izlazna snaga u zavisnosti od ambijentalne temperature

Na Slici 7.a prikazana je karakteristika efikasnosti invertora u (%) u zavisnosti od normalizovane izlazne snage. Na Slici 7.b prikazana je karakteristika slabljenja izlazne snage u zavisnosti od ambijentalne temperature. Sa karakteristike na Slici 7.a se uočava da je pri 90% opterećenja invertora i pri DC ulaznom naponu od 720Vdc (vrednost dobijena interpolacijom), njegova efikasnost oko 97%, odnosno da su njegovi gubici oko 3% ($\approx 810\text{W}$). Sa karakteristike na Slici 7.b se uočava da za DC ulazni napon 580 Vdc (850 Vdc) do ambijentalne temperature od 40°C (45°C) nema slabljenja izlazne snage. Za temperature okoline iznad 45°C i za DC napon od 720 Vdc se dobija maksimalno slabljenje snage solarnog panela od oko 4%. Sve pomenute karakteristike su bile veoma značajne pri dimenzionisanju AC razvoda solarne elektrane

U sistemu je obezbeđena je automatska međusobna sinhronizacija invertora, kao i sinhronizacija sa mrežom u vremenskom intervalu od minimalno 20 s, uz maksimalnu dopuštenu toleranciju: (1) razlika napona manja od $\pm 10\%$ nazivnog napona, (2) razlika frekvencije manja od $\pm 0,5\text{Hz}$ i (3) razlika faznog ugla manja od $\pm 10^\circ$.

AC razvod

Na naizmeničnoj AC strani invertora su postavljeni AC sabirni ormari (engl. „AC combiner box“), AC_CB1÷AC_CB9 sa IP65 zaštitom i zaštitom od UV zračenja. Način povezivanja jednog invertorskog para preko ovog sabirnog AC ormara je dat na Slici 8 [8]. Izlazna AC strana invertora je zaštićena je od preopterećenja i kratkih spojeva sa automatskim zaštitnim prekidačima.



Slika 8. Prikaz sabirnog invertorskog ormara (AC razvod)

U sabirnom ormanu svakog pojedinačnog para invertora se postavljaju automatski prekidači 63A za prekostrujnu zaštitu. U isti razvodni orman se postavlja AC prenaponska zaštita i trolpolni rastavljač sa nožastim osiguračima od 100A za prekostrujnu zaštitu priključnog kabla na podrazvodu. Od sabirnih ormara invertora, obrazuje se 9 podrazvoda koji vode do razvodnog ormara solarne elektrane. Devet kablovskih podrazvoda su izvedeni kablovima NYY $4 \times 35 \text{ mm}^2$ i provodnikom P/F 16 mm^2 , za uzemljenje. Najduži podrazvod na udaljenosti je oko 95m do razvodnog ormara, a najkraći na udaljenosti od 5m do razvodnog ormara solarne elektrane.

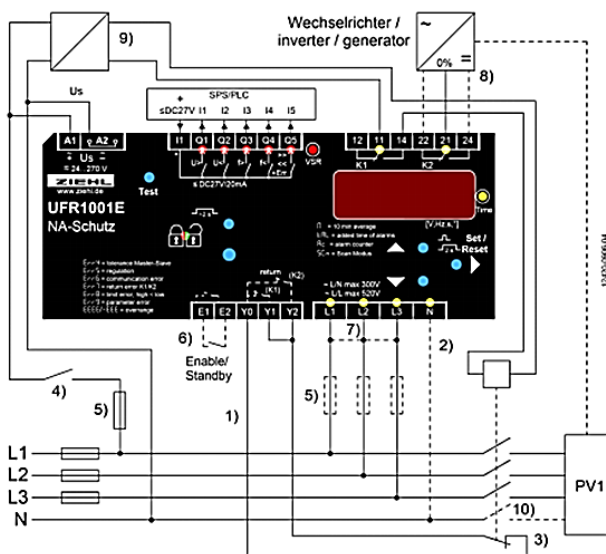
Razvodni orman (RO) solarne elektrane

U RO solarne elektrane, postavljeni su rastavljači sa NV00 nožastim osiguračima 100A, za svaki dolazni kabl sa sabirnog

ormana kod invertora. Iza nožastih osigurača postavljaju se odvodnici prenapona. Spojni prekidač solarne elektrane je tropolni (3P) kompakt prekidač MC4 za nominalnu struju od $I_n=800$ A, sa termičkom strujnom zaštitom opsega $(0.8\div 1)\times I_n$ i prekostrujnom zaštitom opsega $(2\div 12)\times I_n$ i podnaponskim okidačem. Ovaj spojni prekidač je smešten u odvodno polje RO solarne elektrane[8].

Pored ovog prekidača u spojnom polju je obezbeđeno merenje faznih i međufaznih napona, linijskih struja, aktivne i reaktivne snage, faktora snage kao i akvizicija digitalnih signala (alarma): detekcija uključenja glavnog prekidača, ispad usled prekostrujne zaštite, ispad automatike za komandna kola. U ovom delu je obezbeđeno i daljinsko uključenje i isključenje glavnog prekidača preko podnaponskog okidača. Svi ovi signali (analogni i digitalni) se daljinski šalju ka sistemu za daljinsko očitavanje u TS 10/0.4 kV. Informacije o analognim merenjima se ka ovom sistemu šalju preko komunikacionog UTP kabla (MODBUS komunikacija), dok se digitalni signali šalju preko višezilnog signalnog kabla $5\times 1,5$ mm².

U spojnim polju RO solarne elektrane su takođe postavljeni sistemska zaštita solarne elektrane koja obuhvata frekventnu i podnaponsku/nadnaponsku zaštitu, koje obezbeđuje kontroler Ziehl UFR 1001E[13], koji je prikazan na Slici 9. Pri ovome se obezbeđuje rad elektrane u definisanim granicama napona i frekvencije. Kao što pokazuje Slika 9, komandni signali iz kontrolera su povezani sa glavnim kontaktorom (nominalne struje 800A).



Slika 9. Povezivanje kontrolnog modula UFR1001E i sistemskih zaštita solarne elektrane[13]

Pozicija (1) predstavlja digitalni ulaz u kontroler na priključcima Y0-Y1 na koji se dovodi signal sa pomoćnog kontakta (3) glavnog kontaktora (10). Na ovom ulazu kontroler dobija informacije o statusu glavnog kontaktora na AC razvodu solarne elektrane. Kontrolni namotaj (špulna) kontaktora je dat na poziciji (2) i on je kontrolisan digitalnim izlazom kontrolera (relejnim izlazom) K1. Daljinsko isključenje postrojenja se ostvaruje prekidačem (4) koji preko osigurača (5) napaja kontroler preko priključaka A1-A2. Dozvola rada kontrolera se

ostvaruje digitalnim signalom („Enable/Standby“) koji se dovodi na digitalni ulaz (6) označen priključcima E1-E2. Kada je ovaj kontakt zatvoren kontroler je u režimu „stand-by“ i tada su oba digitalna izlaza K1 i K2 isključeni. Kada je ovaj kontakt otvoren (režim „Enable“) tada je digitalni izlaz K1 uključen i on obezbeđuje uključenje glavnog kontaktora solarne elektrane. Pozicija (9) prikazuje izvor napajanja digitalnih izlaza kontrolera kao i špulne glavnog kontaktora. Na poziciji (7) je prikazano kolo za monitoring mrežnih linijskih i faznih napona. Pozicija (8) prikazuje sistem za aktiviranje kontakta K2 na regulatoru. Ovaj kontakt služi za dodatno isključivanje postrojenja PV1. Putem ovog izlaza je obezbeđena jednostruka detekcija greške tzv. „single fault detection“). U okviru sistema kontrole solarne elektrane, su između ostalog i implementirani sistemi zaštita (pod naponske $U <$, prenaponske $U >$, pod frekventne $f <$, nad frekventne $f >$, prekostrujne, odnosno zaštite od preopterećenja $I >>$), čije se dejstvo ostvaruje na digitalnim ulazima Q1-Q5 kontrolera.

Od razvodnog ormana solarne elektrane, podzemnom kablovskom vezom sa provodnicima $2\times(4 \times 240$ mm²), ostvarena je veza između RO solarne elektrane i razvodnog postrojenja u transformatorskoj stanici 0,4/10 kV. Zaštita svakog od ova dva voda solarne elektrane ostvaruje se prekostrujnom zaštitom sa nožastim osiguračima od 400A, koji su postavljeni u RO solarne elektrane.

Inteligentni merač SM (tzv. „Smart Meter“), odnosno pametno dvosmerno brojilo 50kA-3 proizvodnje Fronius [14] i priključni vodovi solarne elektrane su povezani na NN bakarne sabirnice u postojećoj transformatorskoj stanici (TS), kao što je prikazano na Slici 6. SM uređaj omogućava efikasan rad sistema, kontroliše tokove električne energije ka potrošnji i ka mreži, pronalazi uzroke eventualnih grešaka i vrši kontrolu ukupne potrošnje električne energije u fabrici. Ovaj uređaj takođe obezbeđuje pametni energetske menadžment koji se tiče snaga (aktivne, reaktivne, prividne), faktora snage i energetske potrošnje fabrike.

Transformatorska stanica

Postojeća transformatorska stanica je naponskog prenosnog odnosa 0,4/10 kV snage 630 kVA. Solarna elektrana preko nje ostvaruje paralelan rad sa DSEE. Na osnovu dobijenih uslova za projektovanje i priključenje elektrane od EPS distribucije Niš, kao i Lokacijskih uslova izdatih od opštine Vlasotince, solarne elektrana je projektovana da ostvaruje maksimalnu izlaznu snagu od oko 486 kW (uzeti su u obzir ukupni gubici od 5 %). Ukupna snaga solarne elektrane je takva da bi u određenim režimima rada potrošnje u fabrici, mogla da zadovolji potrebe za električnom energijom koju koristi objekat i da predaje viškove električne energije u mrežu, ali da nikada ne prelazi maksimalnu snagu od 500 kW. Snaga solarne elektrane je manja od odobrene snage preuzimanja na mestu priključenja, koja iznosi 560 kW [8].

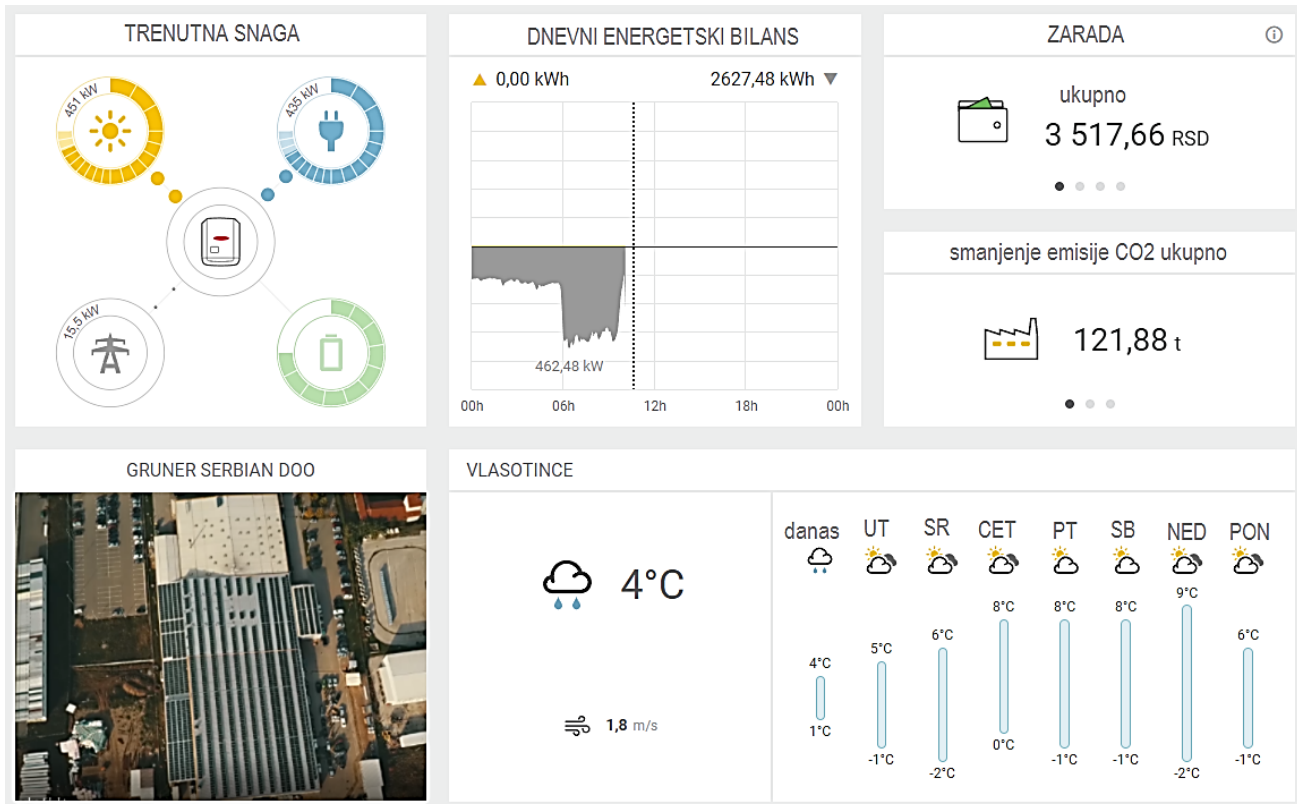
Merenje proizvedene električne energije je ostvareno na srednjem naponu od 10 kV. U objektu mesta priključenja (OMP) je postavljen novi merni uređaj za obračunsko merenje primopredaje električne energije.

Predviđena je mogućnost daljinskog nadzora parametara i mogućnost isključivanja solarne elektrane od strane operatora distributivnog sistema (ODS), u slučaju da parametri rada

elektrane odstupaju od utvrđenih kriterijuma. Proizvedenu električnu energiju elektrana će predati na priključku koji je izveden iza mernog mesta, na naponu od 10kV. Na taj način umanjuje se energija koju fabrika preuzima iz distributivnog sistema, dok se višak električne energije preko četvorokvadrantnog brojlara registruje prilikom predaje energije u mrežu.

Pre priključenja solarne elektrane na mrežu obezbeđena je sinhronizacija izlaznih faza invertora sa fazama mreže. Nakon

sinhronizacije, elektrana se priključuje i predaje energiju potrošačima i mreži. Ukoliko dođe do nestanka mrežnog napona (napona na priključnom kablju ka solarnoj elektrani), zaštita solarne elektrane otvara kontakte prema kablju, dvostruka zaštita od ostrvskog rada isključuje invertore, tako da elektrana ne može da predaje energiju ka sabirnicama na 0.4kV. U Tabeli 1 su dati osnovni podaci o projektovanoj solarnoj elektrani za proizvodnju električne energije, na osnovu odabrane snage invertora i broja solarnih panela.



Slika 10. Bilans i raspodela snaga i energija na dan 21.03.2022. na FNE „Gruner“

Tabela 1. Osnovni podaci o objektu za proizvodnju električne energije (fotonaponska elektrana „GRUNER“)

Maksimalna izlazna snaga elektrane	486 kW
Izlazni napon iz elektrane	0,4 kV
Odobrena snaga postojećeg priključka	560 kW
Način rada	Paralelno sa DSEE
Maksimalna snaga solarnih panela	559,4 kWp
Maksimalna snaga kojom se predaje energija u DSEE	486 kW
Očekivana godišnja proizvodnja elektrane	690000 kWh

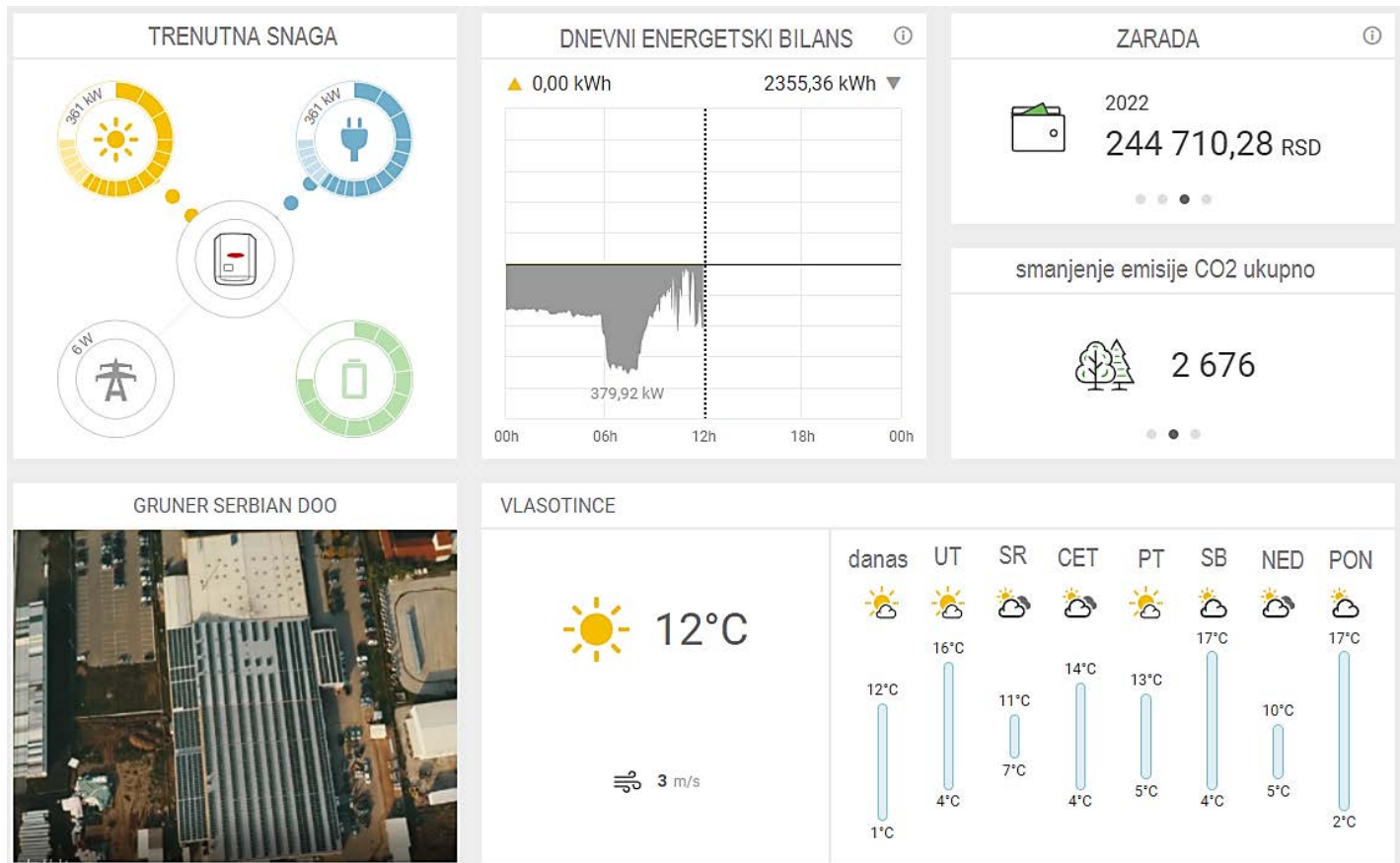
Napon na mestu priključenja na DSEE	10 kV
-------------------------------------	-------

III PRAĆENJE RADA FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Sistem nadzora solarne elektrane je projektovan da u realnom vremenu dostavlja informacije o stanju u sistemu, trenutnoj proizvodnji električne energije, sa mesečnim i godišnjim praćenjem proizvedene električne energije. Fronius Solar.web portal omogućuje korisniku da putem WEB sajta i aplikacija za Android i Apple mobilne telefone proverava status rada elektrane i količinu proizvedene električne energije. Za praćenje rada i komunikaciju putem interneta i pristup portalu predviđen je 3G/4G ruter TP-Link TL-MR3420 (Wireless Ruter 300Mbps 3G/4G) koji sadrži USB modem. Na Slici 10. je dat prikaz praćenja dnevne, nedeljne i godišnje proizvodnje preko Fronius Solar.web portala.

Na Slici 10 je dat prikaz raspodela snaga i bilans proizvedene električne energija na dan 21.03.2022., koja je dobijena sa Fronius Solar.web portala. Što se tiče raspodele aktivnih snaga uočava se da je snaga proizvedena iz solarnih panela FNE 451 kW, a da je potrošnja fabrike GRUNER iznosila 435 kW.

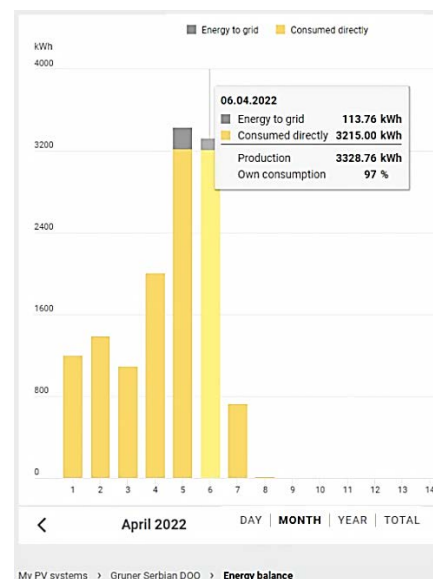
Razlika u snazi od 15,5 kW je bila isporučena DSEE-u. Što se tiče energetskeg bilansa uočava se da pri radu FNE u intervalu od oko 6 h proizvedena električna energija od oko 2628 kWh. Na pomenutom Web portalu je dat prikaz i meteoroloških podataka (temperatura ambijenta, brzina vetra, vlažnost i sl.)



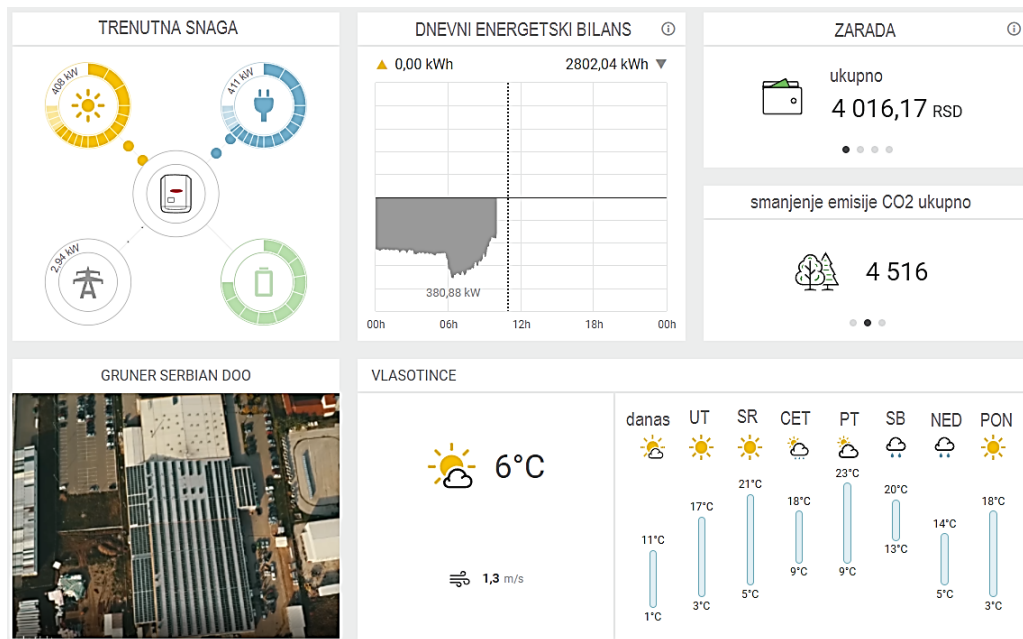
Slika 11. Eksploatacioni rad FNE „Gruner“ u režimu prilagođenja sopstvene potrošnja na dan 21.03.2022. na FNE

Na Slici 11 je prikazana raspodela snaga i bilans proizvedene električne energije iz FNE na dan 23.03.2022. U ovom delu je takođe izvršeno merenje aktivne snage, a kao rezultat merenja uočava se da je u režimu prilagođenja, pri sopstvenoj potrošnji, proizvodnja snage iz solarnih panela iznosila 361 kW, koliko je približno bilo potrebno za internu potrošnju fabrike (približne snage 351 kW). U tom momentu, elektrana je radila u režimu „sopstvene potrošnje“ bez predaje viškova energije u DSEE. Bilans dnevne raspodele energije je bio takav da je proizvedena energija u intervalu od 6 h do 13 h, iznosila oko 2355 kWh. Procenjeno smanjenje emisije i CO₂ je iznosilo oko 2,65 t tog dana.

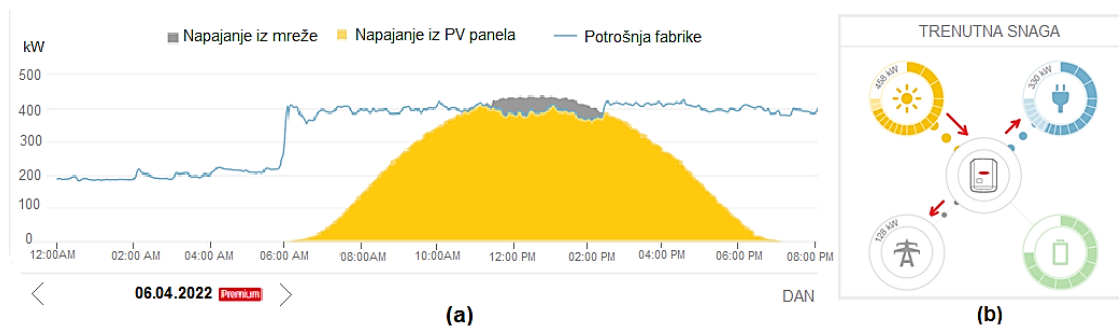
Na Slici 12 je prikazan „izlazak“ FNE na mrežu, odnosno dijagrami proizvedene energije koja se raspodeljuje na potrošače počev od 01.04.2022. do 07.04.2022. Uočava se da je maksimalna snaga proizvodnje iznosila 05.04.2022. oko 3328kWh, od toga je proizvedeno u DSEE oko 113,8 kWh. Takođe 04.04.2022., je izvezeno u mrežu oko 211 kWh, što je iznosilo 6% od ukupne proizvodnje iz solarne elektrane, dok je ostalih 94% proizvedene energije iz solarne elektrane iskorišćeno na internu potrošnju fabrike.



Slika 12. Prikličenje FNE na mrežu-detalj prikaza energetskeg bilansa



Slika 13. Eksploatacioni rad FNE „Gruner“ u režimu prilagođenja sopstvenoj potrošnji na dan 05.04.2022.



Slika 14. Energetski bilans proizvodnje i potrošnje električne energije solarne elektrane snimljen tokom sunčanog dana 06.04.2022, a) profil proizvodnje i potrošnje u vremenu, b) prikaz tokova snaga na Fronius Solar.web portalu

Na Slici 13 je prikazana raspodela snaga i bilans proizvedene električne energije iz FNE na dan 05.04.2022. U ovom delu je takođe izvršeno merenje aktivne snage, a kao rezultat merenja uočava se da je u režimu pri sopstvenoj potrošnji FNE, proizvodnja snage iz solarnih panela iznosila 408 kW, koliko je približno bilo potrebno za internu potrošnju fabrike (približna snaga od 411kW), a veoma mali, čak i neznatni deo električne energije (oko 3kW) je predat u DSEE. Ukupna proizvedena energija je iznosila 2802kWh.

Na Slici 14 je prikazan energetski bilans proizvodnje i potrošnje električne energije solarne elektrane snimljen tokom sunčanog dana 06.04.2022. Na Slici 14.a je prikazan dijagram sa profilom proizvodnje i potrošnje električne energije. Plava linija prikazuje profil potrošnje električne energije objekta, dok žuta oblast prikazuje proizvodnju električne energije iz solarne elektrane, a siva oblast deo električne energije koji je vraćen u distributivni sistem. Na Slici 14.b se vidi prikaz proizvodnje i tokova snaga u realnom vremenu, dobijen sa Fronius Sola.web portala. Uočava se da je u podne 06.04.2022. solarne elektrane proizvela više energije od potrošnje objekta i da je vratila 128 kW u distributivni sistem.

IV REALIZACIJA FOTONAPONSKE ELEKTRANE

U ovom poglavlju su dati neki rezultati realizacije instalacije solarne elektrane 500kW u fabrici „Gruner“ Serbian d.o.o. Izvođenje solarne elektrane je ostvareno u ulici Marka Oreškovića bb, na katastarskim parcelama 864/13 i 864/18, KO Vlasotince Varoš, grad Vlasotince. Investitor kompletnog postrojenja je bila firma „Gruner“- Serbian d.o.o. (Rešenje o građevinskoj dozvoli br. 03-351-6/2021., od 23.02.2021). Datum početka radova je bio 15.07.2021, a datum završetka radova 15.10.2021.

Na putu za dobijanje građevinske dozvole bilo je prvo neophodno dobiti uslove za projektovanje i priključenje od nadležne elektrodistribucije. Nakon toga je bilo potrebno izvršiti izradu idejnog rešenja (IDR) za dobijanje lokacijskih uslova i projekta za građevinsku dozvolu (PGD) u cilju dobijanja građevinske dozvole. FNE je izvedena od strane firme CONSEKO d.o.o., Beograd [15] u pomenutom periodu i puštena je u probni rad sredinom oktobra 2021., a upotrebna dozvola za rad je izdata 30.12.2021. Od tada je FNE zvanično u eksploatacionom radu. Fabrika GRUNER je 30.03.2022.

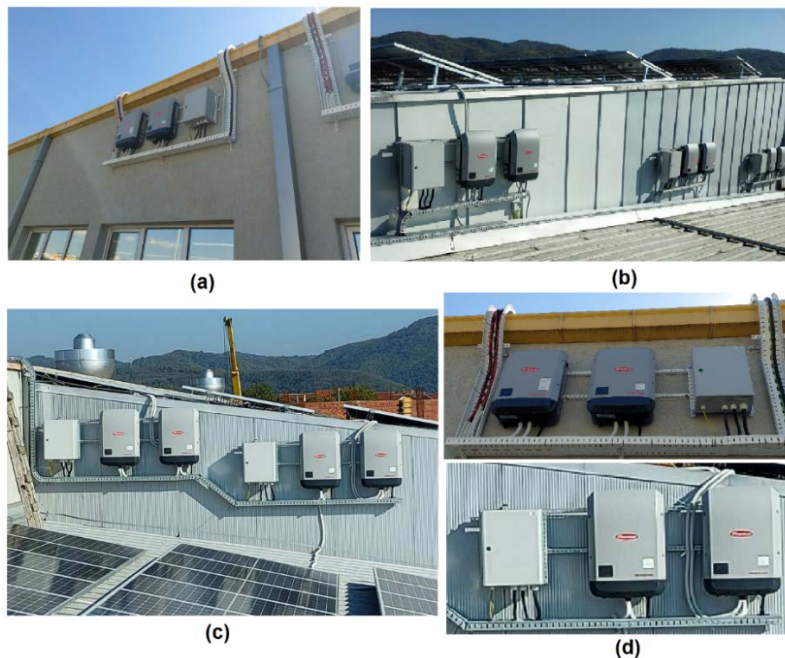
zaključila sa JP EPS, Ogranak „EPS Snabdevanje“ ugovor o potpunom snabdevanju električnom energijom za period 01.04.2022 do 31.12.2023. godine.

Na Slici 15 je prikazana dispozicija solarnih panela montiranih na krovu iznad hala 2 i 3 fabrike GRUNER. Za montažu solarnih panela su korišćene aluminijumske podkonstrukcije: (1) K2 Systems Triangle Nemačke proizvodnje, za solarne panele na velikom krovu, pored polja Solatube rasvete, kao što pokazuju sa dodatnim nagibom od 15° ka jugu, (2) K2 Systems Mini 5, Nemačke, sistem sertifikovan za solarne panele za montažu na trapezni lim, sa dodatnim nagibom na nadstrešnici i delu krova (za maksimalno iskorišćenje površine).

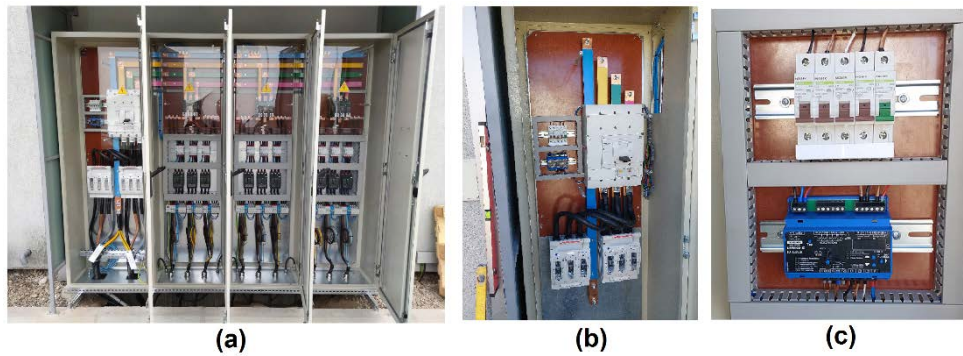
Na Slici 16 su prikazane pozicije na konstrukciji objekta fabrike na kojima su montirani invertorski parovi i pripadajući sabirni AC ormani (engl. „AC combiner box“). Kućišta invertora, kao i AC sabirni ormani su izvedeni u stepenu zaštite IP65 čime je onemogućen prodor prašine i vode u njihovu unutrašnjost. Na Slici 16(a) je prikazan detalj montaže invertora na zidu iznad ulaza u halu 3. Na Slici 16(b) je prikazana pozicija na bočnom zidu - prelaz između hale 1 i hale 2, dok je na Slici 16(c) prikazana pozicija na zidu iznad zadnjeg krova. Na Slici 16(d) su prikazani detalji montaže invertorskih parova i sabirnih kutija na zidu na prelazu između hale 1 i hale 2, odnosno na zidu ispod zadnjeg krova, zajedno sa kablovskim regalima na kojima su montirani priključni kablovi invertora i sabirnih AC ormara.



Slika 15. Dispozicija solarnih panela na krovu fabrike; a), b) Al podkonstrukcija K2 Systems Triangle na halama 2 i 3, c), d) Al podkonstrukcija K2 Systems Mini na delu krova i nadstrešnici



Slika 16. Dispozicija montaže invertora i pripadajućih sabirnih ormara; (a) pozicija na zidu iznad ulaza u halu 3, (b) pozicija na bočnom zidu-prelazu između hale 1 i hale 2, (c) pozicija na zidu iznad zadnjeg krova, (d) detalji montaže invertorskih parova i sabirnih AC ormara



Slika 17. Dispozicija GRO solarne elektrane na naponskom nivou 0.4kV

a) raspored polja energetske ormana, b) izgled spojnog polja RO solarne elektrane, c) montaža kontrolnog modula UFR 1001E

Na Slici 17 je dat izgled unutrašnjosti GRO solarne elektrane i raspored polja energetske ormana. Na Slici 17(a) su prikazani sa leva na desno: odvodno (spojno) polje sa glavnim prekidačem 800A i upravljačkom jedinicom, i kontaktorska polja 1, 2 i 3. Na Slici 17(b) je dat detalj prikaza spojnog polja sa glavnim kompaktnim prekidačem Na Slici 17(c) je dat detalj montaže upravljačkog modula UFR1001E.

V ZAKLJUČAK

U radu su predstavljena neka iskustva u eksploataciji i detalji izvođenja krovne fotonaponske elektrane (FNE) maksimalne snage 500kW, koja je montirana na krovu fabrike GRUNER Srbija u Vlasotincu. Na zadatoj lokaciji, uzimajući u obzir gubitke energije koji postoje u sistemu, prema projektu je procenjena proizvodnja električne energije od 1233kWh po jednom instalisanom kW godišnje, odnosno u ukupnom iznosu oko 690MWh. Sa stanovišta dekarbonizacije je data veoma bitna procena da je za godišnju proizvodnju električne energije od oko 690MWh, smanjenje emisije CO₂ oko 758.16 t godišnje. Predviđeni period za izvođenje solarne elektrane je bio od 15.07-15.10.2021. Fabrika GRUNER je 30.03.2022. zaključila sa JP EPS, Ogranak „EPS Snabdevanje“ zaključila ugovor o potpunom snabdevanju električnom energijom za period 01.04.2022 do 31.12.2023. Ovim je fabrika GRUNER postala prvi zvanični kupac-proizvođač (tzv. prozjumer) sa neto obračunom u Republici Srbiji.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Autori se najtoplije zahvaljuju kolegincima Maji Lepojević i Aleksandri Stojanović iz JP EPS-Ogranak EPS Snabdevanje, Niš, koje su u procesu finalne faze ovog projekta i dobijanja statusa prozjumer, svojim angažovanjem u mnogome doprineli na realizaciji pomenutog Ugovora i projekta u celini.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] *Statistical Review of World Energy*, 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> [pristupljeno 04.03.2022]
- [2] Primary and final energy consumption in Europe, 2021. EEA <https://www.eea.europa.eu/ims/primary-and-final-energy-consumption> [pristupljeno 04.03.2022]
- [3] Vuković, M., Jovanović, A. Projekti solarnih fotonaponskih sistema u industriji, in Proc. *Energetika 2020*, Zlatibor, Srbija, pp. 60-64, 21-24. jun 2020.

- [4] Luque, A., Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, A John Wiley and Sons, Ltd., United Kingdom, 2011.
- [5] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., Corkish, R. *Applied Photovoltaics*, Earthscan in the UK and USA, 2007.
- [6] *Guide to the Installation of Photovoltaic Systems*, Microgeneration Certification Scheme (MCS), London EC3M 3BE, 2012.
- [7] Despotović, Ž. V., Vuković, M. Projekat za građevinsku dozvolu (PGD)-Izgradnja fotonaponske elektrane za proizvodnju električne energije snage 500kW na krovu objekta fabrike za izradu releja i druge opreme „Gruner Serbian“, spratnost P, Marka Oreškovića bb, Vlasotince na k.p.864/13 i 864/18 K.O. Vlasotince, Januar 2021.
- [8] Vukovic, M., Despotovic, Z. V., Simonovic, B. Design and construction of a photovoltaic solar power plant of 500 kW on the roof of the factory "GRUNER" Serbian Ltd. -Vlasotince, in Proc. *Proceedings of International Symposium Power Plants 2021*, Belgrade, Serbia, 17-18 November, 2021.
- [9] Perspektiva razvoja malih biogas postrojenja na bazi stajnjaka i njen uticaj na proizvodnju energije, smanjenje emisije GESB i ruralni razvoj u Srbiji, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2019.
- [10] Elektrodistribucija Srbije, Pravila o radu distributivnog sistema električne energije (DSEE), 2017, https://www.epsdistribucija.rs/propisi/Pravila_o_Radu_20072017.pdf [pristupljeno 04.03.2022]
- [11] Elektrodistribucija Srbije, Pravila o radu Distributivnog sistema. http://epsdistribucija.rs/pdf/Nacrt_PravilaORaduDS.pdf [pristupljeno 04.03.2022]
- [12] Elektrodistribucija Srbije, Tehnička preporuka Elektrodistribucije Srbije TP-1a, 2000, https://www.epsdistribucija.rs/interni_standardi/preporuke/TP%201a.pdf [pristupljeno 04.03.2022]
- [13] JP EPS Direkcija za distribuciju električne energije Srbije Beograd. Tehnička preporuka br.16 - Osnovni tehnički zahtevi za priključenje malih elektrana na distributivni sistem, 2003, https://www.epsdistribucija.rs/interni_standardi/preporuke/TP%20-16.pdf [pristupljeno 04.03.2022]
- [14] User manual for controller Ziehl UFR 1001E, Victron, 2018, <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Ziehl-Voltage-&-Frequency-relay-UFR1001E.pdf> [pristupljeno 04.03.2022]
- [15] Manual for Smart Meter 50kA-3, Fronius, 2017, <https://ecoproduct.sk/product/21656/download/Manu%C3%A1l%20meter%20EN.pdf> [pristupljeno 04.03.2022]
- [16] Conseco. Solarne elektrane, <https://www.conseco.rs/solarne-elektrane> [pristupljeno 04.03.2022]

AUTORI/AUTHORS

dr Miodrag Vuković, CONSEKO d.o.o, Beograd, m.vukovic@conseco.rs, ORCID [0000-0003-0158-192X](https://orcid.org/0000-0003-0158-192X)
dr Željko V. Despotović, Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
msr Bojan Simonović, GRUNER Serbian d.o.o., Vlasotince, bojan.simonovic@gruner.de, ORCID [0000-0001-5138-8082](https://orcid.org/0000-0001-5138-8082)