

# Analiza uticaja masovnog korišćenja solarnih panela na gubitke električne energije u niskonaponskoj mreži

Dragan Đorđević

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"  
Beograd, Srbija  
[dragan.djordjevic@ieent.org](mailto:dragan.djordjevic@ieent.org)

Miloš Anđelković

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"  
Beograd, Srbija  
[milos.andjelkovic@ieent.org](mailto:milos.andjelkovic@ieent.org)

*Sadržaj* — U radu je prikazana analiza uticaja masovnog korišćenja krovno integrisanih solarnih panela na gubitke električne energije u niskonaponskoj mreži. Analiza je vršena na detaljnom modelu dela mreže koju napaja jedna transformatorska stanica (TS) 35/10 kV, koji uključuje mrežu naponskog nivoa 0,4 kV, mrežu naponskog nivoa 10 kV i samu TS 35/10 kV zaključno sa 35 kV sabirnicama. Odabran je deo mreže sa domaćinstvima kao dominantnom kategorijom potrošnje. Modelovanje snage potrošača je vršeno uz pomoć podataka o dnevnom dijagramu potrošnje i mesečne utrošene električne energije. Modelovanje proizvodnje iz solarnih panela vršeno je pomoću izmerenih vrednosti iradijacije na bliskoj lokaciji i raspoložive površine krovova. Proračuni tokova snaga, odnosno gubitaka, su vršeni pomoću programskog alata PowerFactory za slučajeve sa i bez prisustva solarnih panela. Dat je prikaz efekta prisustva solarnih panela na gubitke.

*Ključne reči* - gubici električne energije; niskonaponska mreža; solarni panel; DIGSILENT PowerFactory;

## I. UVOD

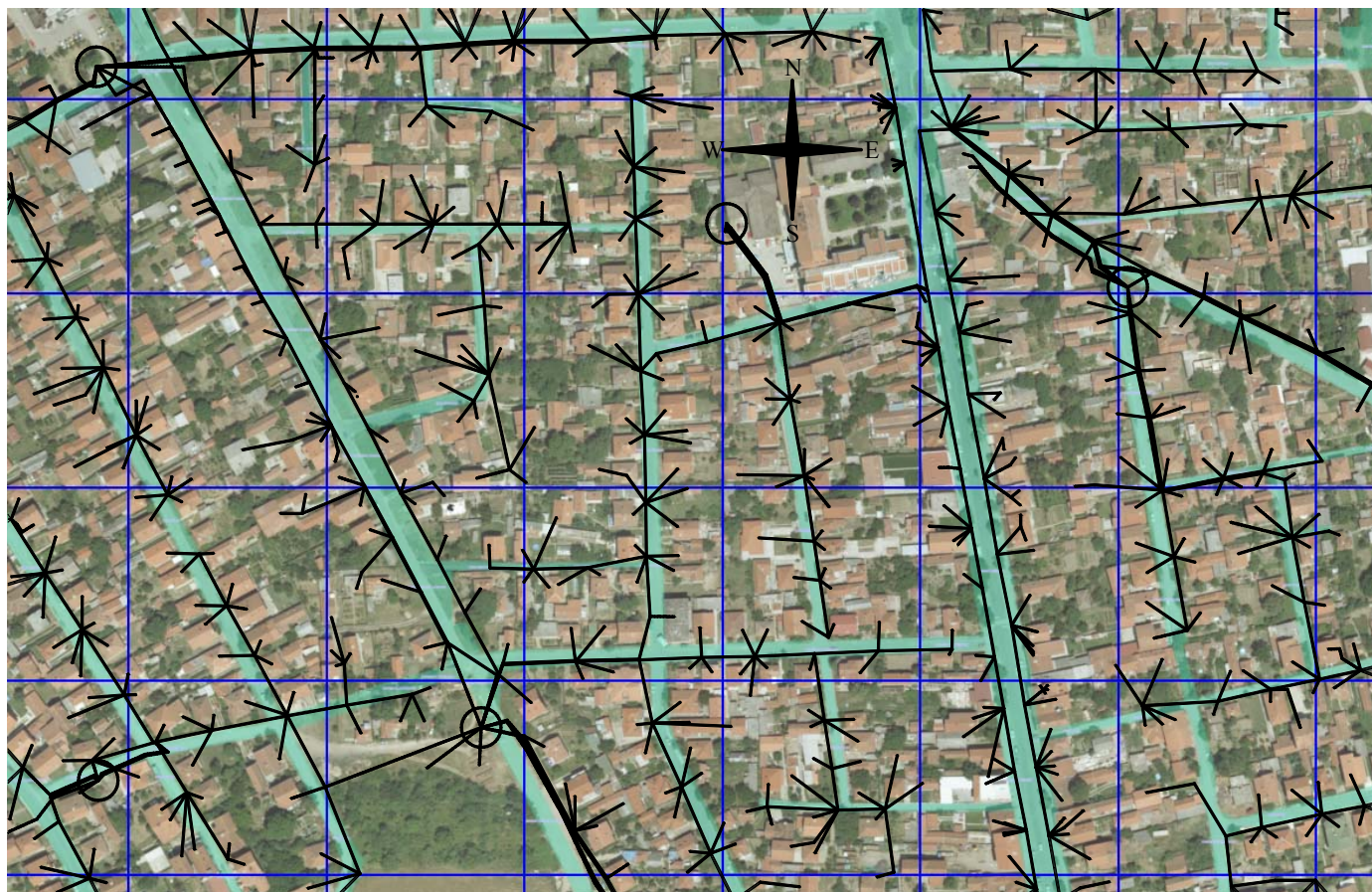
U radu je analiziran uticaj disperzovanih fotonaponskih sistema u niskonaponskoj mreži na gubitke aktivne snage. Gubici su nelinearna funkcija tokova snaga, pa je za proračun gubitaka u niskonaponskoj distributivnoj mreži neophodno posedovati detaljan model te mreže, koji će sadržati sve elemente počevši od TS 10/0,4 kV pa do samih mernih mesta za merenje potrošnje električne energije (brojila korisnika). Problem je što model niskonaponske mreže najčešće ne poseduju ni distributivna preduzeća kojima te mreže pripadaju. Razlog je što nije redovno, ili nije uopšte vršeno ažuriranje dokumentacije o niskonaponskoj mreži (trase vodova i kablova, kao i njihove karakteristike u pogledu tipa i preseka) ni u papirnom ni u elektronskom obliku, a "snimanje" trenutnog stanja mreže u elektronski oblik od nule je dugotrajan, i veoma zametan posao. Kada bi distributivna preduzeća imala adekvatan model pripadajuće niskonaponske mreže, tada bi mogao da se analizira njen rad i da se po potrebi izvrše preventivne i korektivne aktivnosti u cilju smanjenja tehničkih i netehničkih gubitaka, odnosno u cilju efikasnijeg poslovanja. Imajući u vidu ove probleme, za procenu uticaja potrošača i distribuiranih izvora na gubitke često se koriste statistički modeli [1]-[2], koji imaju određene nesigurnosti i ograničenja.

Ipak, postoje malobrojna distributivna preduzeća koja su se odlučila za korak dokumentovanja mreže u elektronskom obliku, što je omogućilo formiranje detaljnog modela niskonaponske mreže. Kao posledica toga, autori su došli do ideje da se jedna takva mreža iskoristi kao podloga za precizniju analizu uticaja masovnog korišćenja solarnih panela na gubitke električne energije u niskonaponskoj mreži. Težilo se odabiru takvog dela mreže koji će predstavljati konzum sačinjen dominantno od domaćinstava. Pri tome raspoložive površine krovova domaćinstava treba da budu okrenute što više ka jugu, što je optimalno sa gledišta korišćenja tih površina za instalaciju solarnih panela na severnoj zemljinoj hemisferi. Birana su domaćinstva zbog toga što se za njih može odrediti dnevni dijagram potrošnje vrlo blizak stvarnom. U nastavku je dat prikaz modela niskonaponske mreže, modelovanje potrošnje i proizvodnje iz solarnih panela.

## II. MODEL MREŽE

### A. Prikaz razmatrane mreže

Posmatra se deo mreže koji pripada jednoj TS 35/10 kV, čiji se konzum, kao što je već rečeno, sastoji dominantno od domaćinstava sa što južnije orijentisanim raspoloživim površinama krovova. Sabirnice 35 kV u napojnoj TS 35/10 kV se ovde smatraju krutom tačkom sa stanovišta napona. Ova trafostanica sadrži dva transformatora 35/10 kV, pri čemu je svaki snage 8 MVA. Prema tome, u pitanju je snažna trafostanica, koja je dimenzionisana da pored domaćinstava, električnom energijom snabdeva i obližnje industrijske objekte. Kako se pomenuti industrijski objekti napajaju direktno, sa posebnih 10 kV izvoda, a pritom uglavnom i ne rade, mogu se posmatrati samo 10 kV izvodi koji napajaju 10 kV mrežu sa domaćinstvima. Dalje, sa 10 kV sabirnice TS 35/10 kV, tri izvoda napajaju ukupno dvanaest trafostanica TS 10/0,4 kV. U pitanju su dve trafostanice snage 1000 kVA, devet trafostanica snage 630 kVA i jedna trafostanica snage 400 kVA. Mreža naponskog nivoa 10 kV je u potpunosti kablovska, a sačinjavaju je dva tipa kablova. To su IPO13 Al 150 mm<sup>2</sup> i PP Cu 95 mm<sup>2</sup>, sa približno jednakim učešćem u ukupnoj dužini posmatrane 10 kV mreže, koja iznosi oko 6,7 km.



Slika 1. Prikaz dela razmatrane niskonaponske mreže preko georeferencijalne podloge

Niskonaponska mreža, koja se napaja iz pomenutih dvanaest TS 10/0,4 kV, prikazana je na Sl. 1 zajedno sa georeferenciranom podlogom koja prikazuje objekte koji čine konzum. Ukupan broj potrošača koji čine konzum u razmatranoj mreži iznosi 1254. Sa Sl. 1 se može videti da je orijentacija krovova velikog broja objekata pod uglom do  $10^\circ$  u odnosu na pravac sever-jug, tako da odabrani deo konzuma poseduje dobre preduslove za instalaciju fotonaponskih sistema na krovovima stambenih objekata. Lokacije trafostanica TS 10/0,4 kV na Sl. 1 označene su crnim krugovima. Na Sl. 1 se mogu uočiti pet trafostanica, dok se preostalih sedam nalazi u njihovoj okolini.

Ukupna dužina razmatrane niskonaponske distributivne mreže je 39 km. Struktura niskonaponske mreže u pogledu kablova i nadzemnih vodova koji je sačinjavaju, kao i procenat njihovog učešća u ukupnoj dužini razmatranog dela niskonaponske mreže, dati su u okviru Tabele I.

Iz Tabele I se može videti da je mreža dominantno sačinjena od samonosivih kablova (oko 75%) i podzemnih kablova (oko 20%).

Model razmatranog dela 10 kV mreže i 0,4 kV mreže je formiran u programskom alatu DIGSILENT PowerFactory. U okviru ovog programa omogućeno je formiranje više posebnih prikaza mreža, za koje se potom, nakon izvršenih proračuna, mogu zasebno prikazati rezultati. Te mreže, sa druge strane, mogu da budu povezane i da rade kao jedna celina. Ovo je

pogodno budući da se mogu razdvojiti prikazi srednjenaponske i niskonaponske mreže, kao i rezultati proračuna gubitaka u svakoj od tih mreža. Ovde je pažnja posvećena gubicima u niskonaponskoj mreži.

TABELA I. TIPOVI KABLOVA I NADZEMNIH VODOVA U SASTAVU POSMATRANE NISKONAPONSKE MREŽE

Kablovi i nadzemni vodovi	
Tip i presek	Procenat učešća u mreži
PP 00-A 4x150 mm <sup>2</sup>	6%
PP 00-A 4x70 mm <sup>2</sup>	2%
PP 00 4x50 mm <sup>2</sup>	3%
PP 00 4x10 mm <sup>2</sup>	2%
PP 00 4x6 mm <sup>2</sup>	7%
X00/-A 4x70 mm <sup>2</sup>	33%
X00/-A 4x16 mm <sup>2</sup>	42%
Al/Fe 4x50 mm <sup>2</sup>	4%
Ostali kablovi preseka manjeg od 6 mm <sup>2</sup>	1%

U pogledu pogonske simetrije pretpostavljeno je da su i srednjenaponska i niskonaponska mreža trofazne uravnotežene mreže. Ova pretpostavka je sasvim opravdana s obzirom na zanemarljiv broj monofaznih priključaka u razmatranoj niskonaponskoj mreži.

### B. Modelovanje potrošnje

Za potrebe analize u okviru ovog rada potrošači su modelovani preko modela konstantne snage, odnosno pretpostavljeno je da se snaga potrošača ne menja sa promenom napona. Snaga potrošnje se, sa druge strane, menja u vremenu u zavisnosti od toga koliko je uređaja u domaćinstvu uključeno u datom trenutku. Zbog toga je potrebno na neki način odrediti ili usvojiti pravilnost promene te snage u vremenu. Kako je cilj rada analiza gubitaka, potrebno je na ovom mestu napomenuti da će se za analizu posmatrati jedan prosečan dan u mesecu. Za ovu svrhu odabran je mesec maj zbog dostupnih podataka za taj mesec.

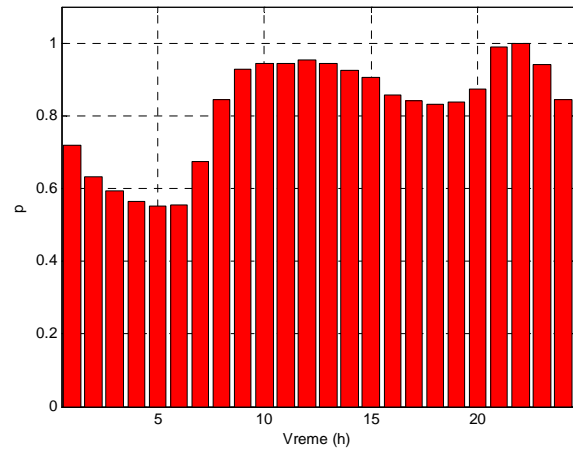
Najtačniji pristup bi bio korišćenje merenih vrednosti snage u toku vremena (obično srednjih petnaestominutnih), međutim ovakvo merenje potrošnje nije omogućeno u razmatranoj mreži. Prema tome, potrebno je na neki drugi način odrediti dnevni dijagram potrošnje domaćinstva. To je urađeno na način koji sadrži pretpostavku o istovetnom ponašanju svih potrošača razmatrane mreže, odnosno usvojeno je da je oblik dnevnog dijagrama potrošnje kod svih potrošača isti. Pri tome se vrednosti srednjih satnih snaga u vremenu razlikuju među potrošačima srazmerno razlikama u njihovoj mesečnoj potrošnji energije. Oblik dnevnog dijagrama potrošnje je određen uz pomoć SCADA merenja petnaestominutne snage na 35 kV izvodu trafostanice TS 110/35 kV, koja napaja posmatrani konzum. Postupljeno je tako što je dnevni dijagram potrošnje određen prosečno na nivou meseca sa srednjim satnim vrednostima snage potrošnje i potom normalizovan, tako da vršna vrednost snage odgovara jedinici. Na ovaj način dobijena su relativna učešća pojedinih sati u toku dana u utrošenoj dnevnoj energiji (označena sa  $p$ ). Sl. 2 prikazuje dobijeni oblik dnevnog dijagrama potrošnje domaćinstva razmatrane mreže. Srednje satne vrednosti snage konkretnog potrošača u toku dana se potom proračunavaju prema dnevnoj energiji potrošnje (mesečna podeljena sa brojem dana u mesecu) i učešću datog sata u toj energiji. Drugim rečima:

$$P_i = p_i \frac{W_d}{(p_1 + p_2 + \dots + p_{24})}, \quad (1)$$

gde su:

- $P_i$  – srednja snaga u  $i$ -tom satu,  $i=1,2,\dots,24$ ;
- $p_i$  – relativno učešće  $i$ -tog sata u dnevnoj energiji;
- $W_d = W_{mes}/31$  – dnevna potrošnja energije.

Učinjena pretpostavka unosi određenu grešku u analizu, međutim na osnovu dostupnih podataka se nije mogla dobiti bolja procena raspodele snage potrošnje u vremenu.

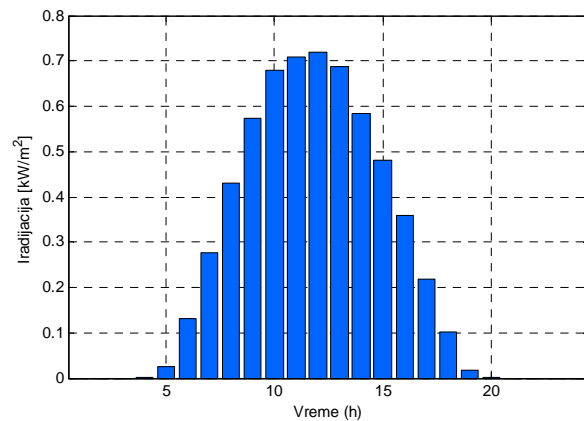


Slika 2. Dobijeni oblik dnevnog dijagrama potrošnje domaćinstva

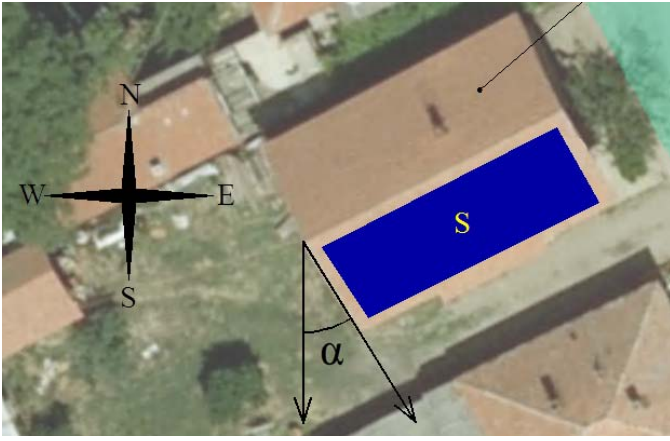
### C. Modelovanje proizvodnje iz solarnih panela

Za potrebe modelovanja proizvodnje iz solarnih panela korišćena su merenja horizontalne iradijacije na lokaciji bliskoj lokaciji razmatrane mreže. U pitanju su merenja srednjih desetominutnih vrednosti iradijacije i temperature vazduha u toku celokupnog meseca maja. Na osnovu tih vrednosti određen je dijagram koji pokazuje promene srednjih satnih vrednosti horizontalne iradijacije za prosečan dan u mesecu (Sl. 3). Takođe je određen dijagram srednjih satnih vrednosti temperature vazduha tokom dana, ali on ovde neće biti prikazan.

Da bi se odredili dijagrami proizvodnje pojedinačnih solarnih panela, koji bi se postavljali na krovove kuća posmatranih potrošača, potrebno je utvrditi koja je raspoloživa površina krova kuće pogodna za postavljanje solarnih panela, kao i koja je orijentacija krova kuće. Sl. 4 prikazuje način na koji su pomenuti faktori određivani sa georeferencirane podloge.



Slika 3. Srednje satne vrednosti horizontalne iradijacije za prosečan dan u mesecu maju



Slika 4. Prikaz određivanja raspoložive površine i orijentacije krova

Na Sl. 4 se može videti jedna kuća na čijem krovu je označena raspoloživa površina za postavljanje solarnih panela (S). Takođe se vidi i ugao orijentacije krova kuće u odnosu na pravac sever-jug ( $\alpha$ ). Pretpostavljeno je da sve kuće imaju površine krova pod uglom od  $45^\circ$  u odnosu na tlo.

Da bi se od raspoložive površine krova, određene na prethodno opisan način, dobila realna raspoloživa površina krova, potrebno je uvažiti dimenzije solarnih panela koji će se koristiti. Za potrebe ove analize usvojeno je da su svi paneli istog tipa (*Kyocera KC158G*, dimenzija 1,29 x 0,99 m i efikasnosti 12,4%). Na taj način je utvrđeno koliko panela može da bude postavljeno na krov i prema tome sračunata realna raspoloživa površina. Da bi se sračunata raspoloživa površina umanjila za deo površine koji nije moguće iskoristiti zbog ivica panela i slično, usvojen je dodatni koeficijent  $k_p=0,9$ . Tako je dobijeno da se u posmatranu mrežu mogu instalirati solarni paneli ukupne nominalne DC snage 890 kW.

Za invertore, koji proizvedenu energiju iz solarnih panela dopremaju u mrežu, pretpostavljeno je da su istog tipa kod svih potrošača (*Xantrex PV10*, čija je maksimalna efikasnost 95%). Uvedene su dodatne pretpostavke da je efikasnost invertora konstantna u okviru celokupnog radnog opsega i da se koristi uređaj za optimizaciju radne tačke (*Maximum Power Point Tracker*).

Postupak određivanja dnevnih dijagrama proizvodnje pojedinačnih solarnih panela je tekao na sledeći način. Prvo je određena ukupna solarna iradijacija na panel za svaki sat u toku dana imajući u vidu orijentaciju panela u odnosu na jug. Ovo uključuje razdvajanje direktne i difuzione horizontalne iradijacije uz pomoć *Liu-Jourdan*-ove formule [3], zatim upotrebu satnih uglova sunca i satnih vrednosti faktora kosine za određivanje direktne i difuzione iradijacije na panel i potom konačne ukupne iradijacije na panel (u okviru [3]-[5] ovaj postupak je detaljno izložen). Nakon toga, srednja satna vrednost snage koja se dobija na izlazu iz invertora jednaka je proizvodu ukupne srednje satne iradijacije na panel, površine panela i koeficijenta koji čine tzv. faktor konverzije, odnosno:

$$P_{invi} = I_{ui} \cdot S_{sp} \cdot K_{fki} \quad (2)$$

gde su:

- $P_{invi}$  – srednja snaga invertora u  $i$ -tom satu,  $i=1, \dots, 24$ ;
- $I_{ui}$  – ukupna srednja iradijacija na panel u  $i$ -tom satu;
- $S_{sp}$  – realna površina solarnog panela;
- $K_{fki}$  – faktor konverzije u toku  $i$ -tog sata.

Faktor konverzije  $K_{fki}$  se računa prema sledećem izrazu:

$$K_{fki} = \eta_{sp} \cdot \eta_{inv} \cdot N \cdot Z \cdot (1 - \Delta P / 100) \cdot (T_{spi} - 25) \quad (3)$$

gde su:

- $\eta_{sp}$  – efikasnost solarnog panela ( $\eta_{sp}=0.124$ );
- $\eta_{inv}$  – efikasnost invertora ( $\eta_{inv}=0.95$ );
- $N$  – faktor koji uvažava neuparenost modula u sastavu solarnih panela, usvojen kao  $N=0.97$ ;
- $Z$  – faktor koji uvažava zaprljanje solarnih panela, usvojen kao  $Z=0.96$ ;
- $\Delta P$  – procentualno smanjenje snage sa promenom temperature solarnog panela ( $\Delta P=0.5\%/^\circ C$ );
- $T_{spi}$  – temperatura solarnog panela u  $i$ -tom satu.

Temperatura solarnih panela je računata na osnovu raspoloživih mernih podataka o ambijentalnoj temperaturi shodno metodologiji opisanoj u [3]-[5].

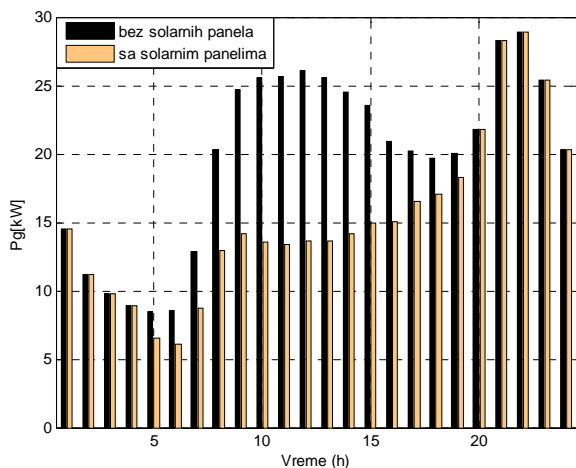
Na posletku, izraz (4) pokazuje kako se uvođenjem ekvivalentne snage potrošnje  $P_{ekvi}$  snaga na izlazu iz invertora uklapa sa snagom potrošača (domaćinstva) u modelu u  $i$ -tom satu:

$$P_{ekvi} = \begin{cases} P_i & , \text{ bez panela} \\ P_i - P_{invi} & , \text{ sa panelima} \end{cases} \quad (4)$$

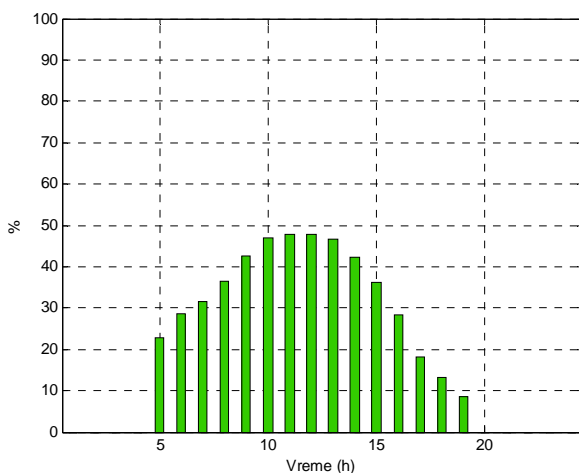
### III. REZULTATI ANALIZE

Prethodno opisan model mreže implementiran je u okviru programskog alata *DiGSILENT PowerFactory* uz pomoć koga su vršeni proračuni tokova snaga u cilju određivanja gubitaka u niskonaponskoj mreži. Proračun je vršen za svaki sat u toku dana za slučajeve sa i bez prisutnih solarnih panela. Rezultati proračuna grafički su prikazani na Sl. 5 i tabelarno sumirani u Tabeli II. Treba naglasiti da pri analizi rezultata proračuna tokova snaga u slučaju sa prisutnim solarnim panelima nisu primećena nedozvoljena naponska radna stanja u celokupnoj analiziranoj mreži.

Kao što je i očekivano, prisustvo solarnih panela je povoljno uticalo na gubitke u niskonaponskoj mreži. Sa Sl. 6 i iz Tabele II se može videti da se u periodu od 5h do 20h ostvaruje smanjenje gubitaka po satima od 8% do gotovo 48%. Gledano za celokupan dan, gubici električne energije za slučaj bez prisutnih solarnih panela iznose oko 476 kWh, dok za slučaj sa solarnim panelima iznose oko 368 kWh. Smanjenje gubitaka je oko 108 kWh, odnosno 22,7%. Ovo smanjenje gubitaka predstavlja oko 2,5% dnevne proizvodnje iz solarnih panela.



Slika 5. Srednje satne snage gubitaka u niskonaponskoj mreži za prosečan dan u toku meseca maja



Slika 6. Procentualno smanjenje gubitaka po satima

Kada se pogleda na mesečnom horizontu, smanjenje gubitaka električne energije iznosi oko 3348 kWh. Treba imati u vidu da su navedene vrednosti dobijene za analizirani deo mreže koji obuhvata konzum od 1254 potrošača. Što se tiče procene smanjenja gubitaka na godišnjem nivou, treba reći da iz prikazanih rezultata nije moguće izvesti dovoljno precizan zaključak. Da bi se taj zaključak izveo, potrebno je posedovati podatke o potrošnji električne energije i merenoj horizontalnoj iradijaciji za svaki mesec u godini. Sa takvim podacima je za svaki od meseci u godini potrebno izvršiti analizu koja je prezentovana u okviru ovog rada, i tako dobijene rezultate sumirati.

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza uticaja masovnog korišćenja solarnih panela na gubitke električne energije u niskonaponskoj mreži. Analiza se zasnivala na detaljnom modelu dela srednjenaponske i niskonaponske mreže, koji obuhvata konzum od 1254 potrošača. Korišćeni su modeli srednjih satnih vrednosti snage proizvodnje solarnih panela i potrošnje

domaćinstava, proračunati na osnovu merenja iradijacije, odnosno procenjenog dnevnog dijagrama i mesečne potrošnje električne energije domaćinstava. Pokazano je da se na posmatranom delu mreže ostvaruje smanjenje gubitaka energije od oko 23% u slučaju prisustva solarnih panela u poređenju sa slučajem bez njih. Prema tome, jasno je da masovna upotreba solarnih panela povoljno utiče na smanjenje gubitaka u niskonaponskoj mreži.

TABELA II. POREĐENJE GUBITAKA U NISKONAPONSKOJ MREŽI SA I BEZ SOLARNIH PANELA TOKOM DANA

Gubici električne energije u niskonaponskoj mreži			
sat	Bez solarnih panela (kWh)	Sa solarnim panelima (kWh)	Procentualno smanjenje gubitaka
1	14,56	14,56	0%
2	11,2	11,2	0%
3	9,79	9,79	0%
4	8,88	8,88	0%
5	8,47	6,53	22,9%
6	8,52	6,07	28,8%
7	12,81	8,76	31,6%
8	20,3	12,92	36,4%
9	24,73	14,19	42,6%
10	25,55	13,57	46,9%
11	25,68	13,37	47,9%
12	26,13	13,63	47,8%
13	25,6	13,67	46,6%
14	24,55	14,19	42,2%
15	23,52	14,98	36,3%
16	20,92	15,02	28,2%
17	20,22	16,53	18,2%
18	19,66	17,04	13,3%
19	20,02	18,32	8,4%
20	21,81	21,81	0%
21	28,28	28,28	0%
22	28,89	28,89	0%
23	25,4	25,4	0%
24	20,31	20,31	0%
<b>Ukupno</b>			
-	475,8	367,9	22,7%

#### ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora”, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] J. Trifunovic, J. Mikulovic, Ž. Đurišić, M. Kostic, "Reductions in electricity losses in the distribution power system in case of the mass use of compact fluorescent lamps", *Electric Power Systems Research*, 81 (2011), pp. 465-477
- [2] I. Babić, Ž. Đurišić, J. Mikulović, "Uticaj disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke u distributivnoj mreži", *Zbornik radova 31 savetovanja CIGRE, Ref. C6-1, Zlatibor 2013*.
- [3] Gilbert Master, "Renewable and Efficient Electric Power Systems", Stanford University, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
- [4] S. Zekai, "Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy", Springer-Verlag, London, 2008.
- [5] Ž. Đurišić, "Obnovljivi izvori energije – projektovanje fotonaponskih sistema", Skripta, Beograd, 2009.
- [6] N. Rajaković, D. Tasić, "Distributivne i industrijske mreže", *Akademski misao*, Beograd, 2008.
- [7] G. Radović i dr., "Perspektivni dugoročni razvoj električnih mreža naponskog nivoa 110 kV i 35 kV na području PD "Centar" d.o.o. Kragujevac", Studija, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2013.

## ABSTRACT

The paper presents the analysis of the impact of massive use of roof integrated solar panels on the electrical energy losses in the low voltage network. Analysis was performed on part of the detailed network model supplied from 35/10 kV substation, which includes 0.4 kV network, 10 kV network and 35/10 kV substation. Network part where households are dominant energy consumers is selected. Consumers power modeling was conducted using daily diagrams and monthly electricity consumption. Solar panels production modeling was estimated using the measured values of irradiation on the close location and available roof surfaces. Calculations of power flows and losses, were carried out using the software tool PowerFactory for cases with and without the presence of solar panels. An overview of the impact of solar panels on the losses is given.

### **Analysis of the Impact of Massive Use of Solar Panels on the Electrical Energy Losses in the Low Voltage Network**

Dragan Djordjevic  
Milos Andjelkovic