

# Uticaj solarnih panela i skladišta električne energije na gubitke u niskonaponskoj mreži

Siniša Spremić, Aleksandar Antonić

Elektro distribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad

**Rezime** - Najveći deo tehničkih gubitaka električne energije u distribuciji električne energije su tehnički gubici u niskonaponskim vodovima. Tehnički gubici električne energije su gubici koji nastaju u distribuciji električne energije od transformatora do potrošača u elektrodistributivnoj opremi. Komercijalni gubici obuhvataju neovlašćeno korišćenje električne energije i gubitke zbog grešaka merne opreme. Glavni izvor tehničkih gubitaka električne energije nastaje protokom električne struje kroz provodnike. Solarni paneli ugrađeni kod potrošača mogu uticati na smanjenje gubitaka smanjenjem protoka električne struje, tj. električne energije kroz niskonaponske vodove. Uvođenjem skladišta električne energije (u daljem tekstu: baterija) može se ostvariti dodatni uticaj na smanjenje gubitaka električne energije korišćenjem uskladištene električne energije u baterijama u vreme vršnih opterećenja. U radu je dat prikaz pretpostavljenog dnevnog dijagrama simetričnog opterećenja niskonaponskog voda sa proračunom gubitaka po satima bez uticaja solarnih panela te sa uticajem solarnih panela bez skladištenja električne energije i sa skladištenjem električne energije. Uticaji solarnih panela bez i sa skladištenjem električne energije su takođe prikazani dnevnim dijagramom, kao i vrednosti napona na kraju niskonaponskog voda. U proračunu se za niskonaponski vod koristi ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem.

**Ključne reči** - solarni panel, skladištenje električne energije, niskonaponski, nadzemni vod, opterećenje, tehnički gubici

## I UVOD

U svetu se već duže vreme koriste u većoj meri solarni paneli za proizvodnju električne energije i u manjoj meri termalni kolektori za zagrevanje za sopstvene potrebe i/ili za isporuku u elektrodistributivnu ili prenosnu mrežu. Zbog upotrebe invertora i uticaja na kvalitet električne energije obavljene su analize uticaja na kvalitet električne energije u elektrodistributivnoj mreži [1, 2] na više mesta u Srbiji. Prema proračunima priključenje solarnih elektrana na elektrodistributivnu mrežu ima povoljan uticaj na smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži [3]. Ukoliko snaga solarnih panela u domaćinstvima i kod malih poslovnih potrošača ne prelazi minimalnu snagu niskonaponskog (u daljem tekstu: NN) voda može se očekivati da će se gubici u NN mreži smanjiti. Povećanje gubitaka se može očekivati samo kad solarni paneli imaju veću proizvodnju snage od snage potrošnje na delu NN mreže. Domaćinstva i mali poslovni potrošači na NN distributivnoj mreži će zbog niže cene uglavnom koristiti sisteme na mreži (*on grid*). Sistemi na mreži rade paralelno sa mrežom i zavisni su od električne mreže.

Ovakve solarne elektrane čine 90 % tržišta kod privatnih, ali i poslovnih objekata [4].

U radu je dat pretpostavljeni dnevni dijagram simetričnog opterećenja pretpostavljenog prosečnog NN izvoda. Dati su pretpostavljeni dnevni dijagrami proizvodnje solarnih panela priključenih na NN izvod, dela koji se skladišti u baterijama i dela koji se koristi prilikom proizvodnje električne energije. Ovime se prave greške u odnosu na stvarno stanje. Sve prethodno navedene pretpostavke odudaraju od stvarnih parametara pojedinih NN izvoda, dijagrami opterećenja NN izvoda su različiti, postoji nesimetrija opterećenja, proizvodnja električne snage solarnih elektrana je zavisna od godišnjeg doba i o osunčanosti, tj. o vremenskim prilikama (oblačnost i magla) i atmosferskom stanju (zagađenost vazduha prašinom i dimom). Bez obzira na zanemarenja može da se sagleda mogućnost i proceni uticaj na smanjenje gubitaka električne snage i električne energije bez i sa prisustvom solarnih panela na NN izvodima sa i bez baterija.

Takođe treba da se detaljno sagledaju i vrednuju uticaji solarnih panela na smanjenje gubitaka električne energije na višim nivoima napajanja: transformatorima  $x/0.4$  kV,  $35/x$  kV i  $110/x$  i srednjenaponskim vodovima.

## II PRETPOSTAVKE, ZANEMARENJA I OPIS MODELA PRORAČUNA

Pretpostavke za izradu modela proračuna su sledeće:

- napon na početku voda ( $0.4$  kV sabirnice transformatorske stanice (u daljem tekstu: TS)) je simetričan i po fazi i po veličini,
- razmatraju se samo ustaljeni režimi bez kvarova.
- struja potrošača se zadaje sa faktorom snage, tj. faznim uglom struje potrošača u odnosu na početni napon na  $0.4$  kV sabirnicama TS  $x/0.4$  kV. Time je stvarni fazni ugao između napona i struje potrošača različit od zadatog i u proračunu se izračunava i prikazuje,
- neutralni provodnik je iste vrste provodnika i preseka kao fazni provodnici (što je stvarno stanje na najvećem delu mreže) i za gubitke je bitno u slučaju nesimetričnog opterećenja
- podaci o radnom otporu i induktivnom otporu provodnika su korišćeni iz fortranskih paketa računarskih programa za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.

Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna:

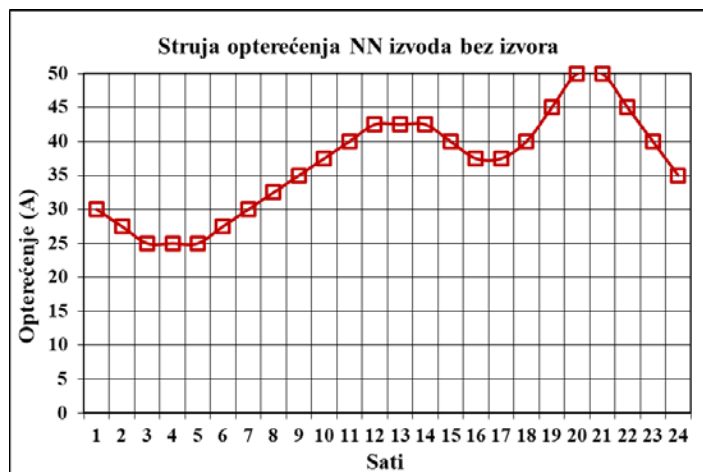
- zanemaruju se kapacitivnosti vodova zbog malog uticaja na rezultat proračuna,

- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [5],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju od faznog provodnika (posebno izvedenog) za javno osvetljenje koji je obično manjeg preseka od provodnika voda, a javno osvetljenje koristi nulti provodnik NN izvoda.

Model proračuna je prikazan u [6], s tim da se koristi jedna deonica, tj. ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem potrošača i punom satnom snagom proizvodnje solarnih panela za dnevni dijagram (24 sata).

### III PODACI I REZULTATI PRORAČUNA

Pretpostavka je da će se najveći broj solarnih panela napraviti u domaćinstvima tipa porodična kuća u gradu ili porodična kuća sa pomoćnim objektima na selu. Ova domaćinstva su češće priključena na NN nadzemnu mrežu izvedenu golim provodnicima ili ređe samonosivim kablovskim snopom. U najmanjem delu su priključena na NN kablovsku (podzemnu) mrežu. U proračun su ubačeni podaci o NN nadzemnom vodu sa presekom aluminijumskog provodnika od  $50 \text{ mm}^2$  i za fazne i za neutralni provodnik što je još uvek najčešća vrsta NN nadzemnog voda. Pretpostavljeni NN izvod je dužine 400 m (10 deonica po 40 m), a u proračun ulazi 200 m. Procenjeno je da je prosečna potrošnja električne energije pojedinačnog potrošača iz kategorije domaćinstvo (uvećano za uticaj potrošača iz kategorije ostala potrošnja) oko 500 kWh mesečno odnosno 6000 kWh godišnje. Maksimalna snaga svih potrošača je 34,6 kVA sa pretpostavljenim faktorom snage potrošača je 0,95. Maksimalna snaga solarnih panela je 20,8 kW.

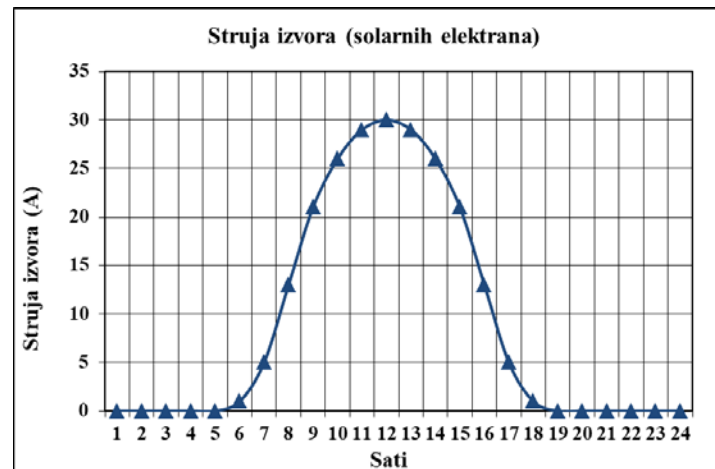


Slika 1. Dijagram struje NN izvoda bez izvora

Na slici 1 je prikazan pretpostavljeni prosečan dijagram simetričnog opterećenja NN izvoda bez izvora, tj. solarnih panela isto kao u [7]. Maksimalna struja opterećenja je 50 A u večernjim satima, a minimalna 25 A u posleponoćnim satima.

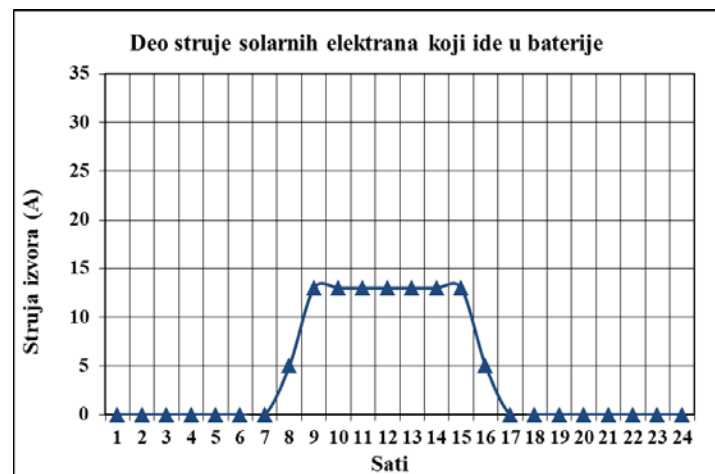
Na slici 2 je prikazan pretpostavljen dijagram simetričnih struja izvora (solarnih panela) sa faktorom snage jednakim 1. Vidi se

da proizvodnja solarnih panela postoji 13 sati. Isti dijagram je korišćen u [7].



Slika 2. Dijagram struje izvora (solarnih panela)

Na slici 3 je prikazan dijagram struje koju solarni paneli skladište u baterije i čini deo struje prikazane na slici 2. Satne struje su proizvoljno odabrane za uravnoteženije opterećenje NN izvoda.



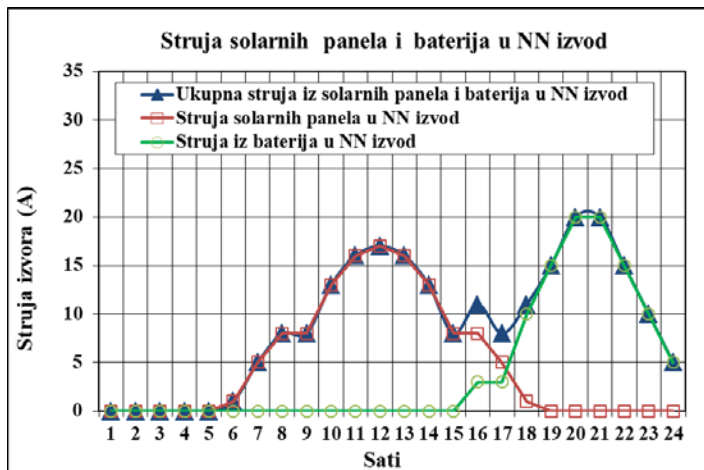
Slika 3. Dijagram struje koja se iz solarnih panela skladišti u baterijama

Struja solarnih panela koja ide u baterije je u većem delu dijagrama konstantna.

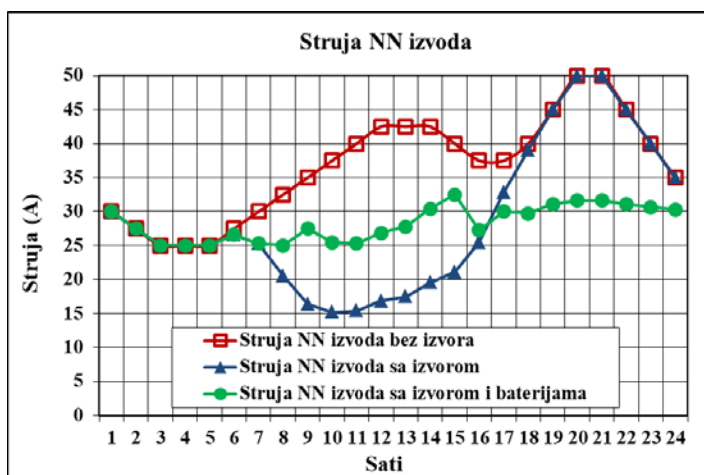
Na slici 4 je prikazan dijagram sa strujama koje daju u NN izvod solarni paneli i baterije i njihova zajednička struja. Jedan deo struje (snage) solarnih panela se koristi prilikom proizvodnje električne energije i taj deo je uglavnom promenljiv. Deo koji je uskladišten u baterijama se koristi u večernjim satima za pokrivanje vršnog opterećenja, a time za uravnoteženje opterećenja NN izvoda.

Na slici 5 je prikazan dijagram sa strujama na NN izvodu. Tu se nalaze struja NN izvoda bez izvora, struja NN izvoda sa svom strujom izvora bez baterija i struja NN izvoda sa izvorom i baterijama. Očigledno je da se odabirom struja (snaga) izvora i baterija dobila značajno ujednačenija vrednost struja (snaga) po satima. Moglo je da se uradi da struje po satima budu potpuno

jednake, ali ovako odabrano verovatno više odgovara nekim stvarnim uslovima. Da bi baterije mogle da pokriju struju od 20 A u 20. i 21. satu baterije moraju biti kapaciteta da daju izlaznu snagu od oko 13.9 kW.



Slika 4. Dijagram struja solarnih panela i baterija koju daju u NN izvod

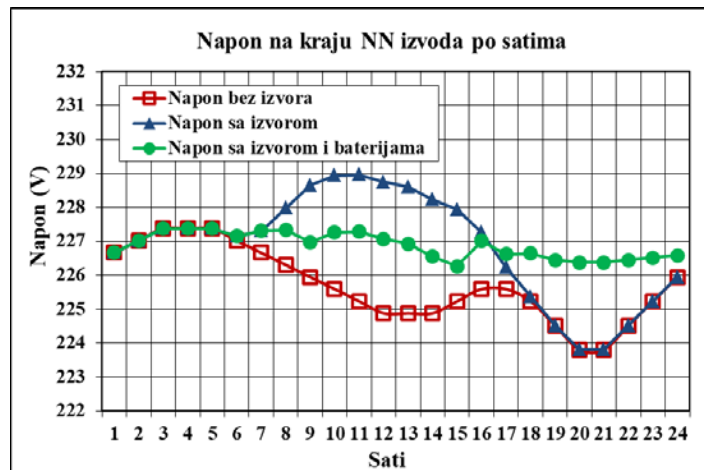


Slika 5. Dijagram struja NN izvoda bez izvora, sa izvorom bez baterija i sa izvorom sa baterijama

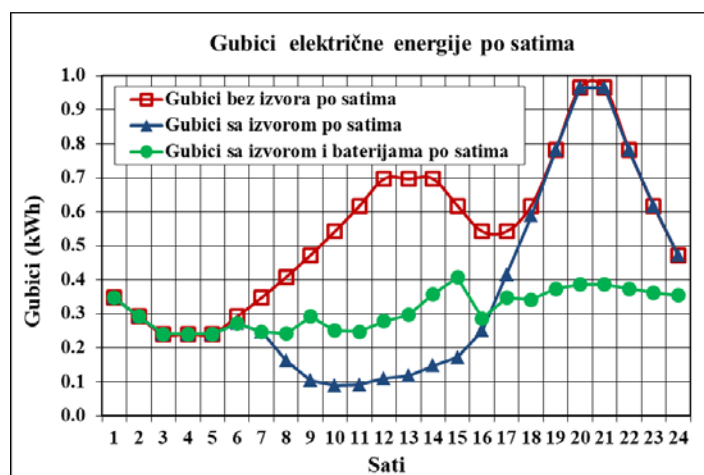
Na slikama 1 i 2 se vidi da je maksimalna struja izvora veća od minimalne struje potrošača. Maksimalna struja izvora i minimalna struja potrošača su u različitim vremenskim razdobljima tako da prema prikazanim dijagramima neće doći do toka struje (snage) sa NN izvoda u srednjenaponsku mrežu preko transformatora  $x/0.4$  kV. Na slici 6 je prikazan dijagram vrednosti napona na kraju NN izvoda u toku 24 sata.

U periodu kada izvor daje svu struju (snagu) u NN izvod u trenutku proizvodnje dolazi do osetnog smanjenja pada napona. U vreme kada su najveća opterećenja na NN izvodu i time najniži naponi izvor ne može da utiče na poboljšanje napona. Očigledno je da smanjenje korišćenja električne energije u trenutku proizvodnje solarnih panela i skladištenje dela i kasnije korišćenje tog dela proizvedene električne energije iz baterija smanjuje padove napona u vreme vršnih opterećenja potrošača i doprinosi ujednačavanju vrednosti napona tokom dana.

Na slici 7 je prikazan dijagram satnih gubitaka električne energije na NN izvodu u toku 24 sata. Ovaj dijagram je sličan dijagramu struje sa slike 5 jer su gubici snage i električne energije proporcionalni sa kvadratom struje.



Slika 6. Dijagram napona na kraju NN izvoda bez izvora i sa izvorom sa i bez baterija



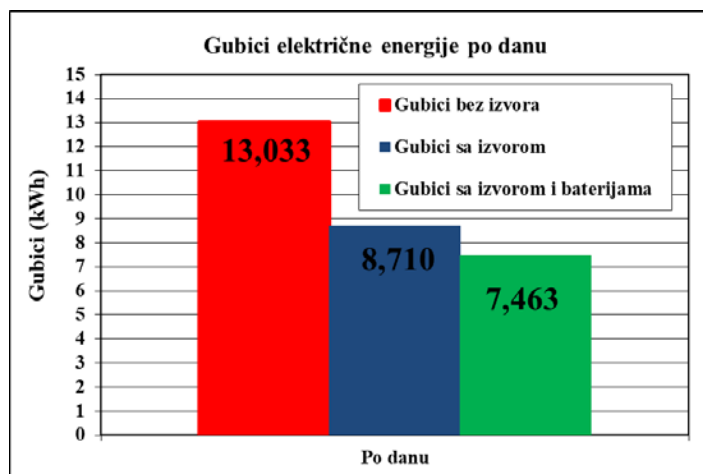
Slika 7. Dijagram gubitaka električne energije NN izvoda

S obzirom da su prethodno prikazani dijagrami za pretpostavljeno usrednjeno opterećenje pretpostavljenog prosečnog NN izvoda kod ovakvog NN izvoda bi bilo mnogo dana sa značajno većim opterećenjem. Time bi i gubici mogli biti značajno veći, a vrednosti napona značajno niže od onih prikazanih na slikama 6 i 7. Moguće je da bude i obrnuto, manja opterećenja, manji gubici i veće vrednosti napona. U stvarnosti postoji mnogo NN izvoda sa značajno većim dužinama i/ili sa značajno većim opterećenjima. Tada su gubici električne energije značajno veći od ovde prikazanih, a vrednosti napona duž i na kraju NN izvoda su značajno manji od ovde prikazanih i u određenim vremenskim razdobljima odstupaju od dozvoljenih prema standardu.

Proračun je obavljen sa zadatim naponom na početku NN izvoda vrednosti  $400/\sqrt{3}$  V. Napon na početku se stvarno menja zbog promene opterećenja i posledično padova napona u transformatoru  $x/0.4$  kV i SN mreži. Takođe i zbog rada

automatske regulacije napona i promene položaja regulacione sklopke pod opterećenjem na transformatoru 110/x kV. Priključenje solarnih panela na NN izvode treba da bude praćeno. U slučaju priključenja veće snage solarnih panela na TS x/0.4 kV treba prethodno proračunima, a kasnije merenjima proveriti potrebu promene položaja besteretnog menjača transformatora x/0.4 kV. Ukoliko se na nekom većem području koje napaja TS 110/x kV priključuje veća snaga solarnih panela moguće je da će se ukazati potreba za prepodešavanjem parametara automatske regulacije napona. U svakom slučaju je neophodno da odgovarajuće stručne službe prate uticaj solarnih panela na dnevne promene opterećenja i napona po radnim i neradnim danima i po sezonama. Neophodno je sagledati i uticaje vremenskih prilika i atmosferskog stanja.

Na slici 8 su prikazane vrednosti dnevnih gubitaka električne energije NN izvoda za prethodne proračune slučajeva kad nema izvora, sa izvorom bez baterija i sa izvorom sa baterijama.



**Slika 8.** Dnevni gubici električne energije na NN izvodu bez izvora i sa izvorom sa i bez baterija

Dnevni gubici električne energije na NN nadzemnom izvodu bez izvora (solarnih panela) iznose 13,033 kWh, sa izvorom bez baterija 8,71 kWh i sa izvorom sa baterijama 7,463 kWh. Smanjenje gubitaka sa izvorom iznosi 4,323 kWh, tj. gubici električne energije su manji za 33,17%. Smanjenje gubitaka sa izvorom i baterijama u odnosu na slučaj bez izvora je 42,74%. Korišćenje samo izvora, tj. solarnih panela daje veoma značajno smanjenje gubitaka električne energije u NN izvodima. Korišćenje izvora i baterija doprinosi još značajnijem smanjenju gubitaka električne energije. Procentualno najveći deo gubitaka u elektrodistributivnoj mreži je u NN nadzemnim vodovima tako da se priključenjem solarnih panela u domaćinstvima može ostvariti velika ušteda na gubicima električne energije.

Na području Elektrodistribucije Srbije ima oko 35.000 trafostanica x/0.4 kV, a od toga oko 24.000 (oko dve trećine) napaja gradska, prigradska i seoska područja sa NN nadzemnim izvodima. Svaka od tih trafostanica ima u proseku po tri NN izvoda. Prostim množenjem uštede gubitaka za jedan prosečan NN izvod sa opterećenjima i izvorom koji je ovde prikazan za slučaj bez baterija se dobije smanjenje gubitaka na NN izvodima od oko 114.000.000 kWh na godišnjem nivou.

Neophodno je detaljno sagledati mogućnosti skladištenja električne energije iz solarnih panela u vreme moguće veće proizvodnje solarnih panela od potrošnje na NN izvodima i korišćenje iste u vreme vršnih opterećenja. Ovo bi moglo imati dodatni značajan povoljan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje naponskih prilika. Zbog dodatnih troškova ulaganja u akumulatorske baterije potrebno je dodatno podstaći vlasnike solarnih panela. Predlog novog modela obračuna električne energije kupcima-proizvođačima je prikazan u [8].

Potrebno je ustanoviti način praćenja uticaja priključenih solarnih panela na čitavom elektrodistributivnom području na svim naponskim nivoima. Ovo se odnosi na veličine napona, tokove struja (snaga), veličine faktora snage, gubitke električne energije i parametre kvaliteta električne energije. Razvijanje pametne mreže (*smart grid*) u ovom pravcu bi pomoglo u mogućnosti praćenja i analize.

#### IV ZAKLJUČAK

Priključenje solarnih panela prema prikazanom proračunu ima značajan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje napona na NN izvodima elektrodistributivne mreže. Dodatni povoljan uticaj na smanjenje gubitaka i uravnoteženje vrednosti napona tokom dana imaju i baterije uravnoteženjem vrednosti struja (snaga) na NN vodu.

Određena sredstva se odvajaju kao podrška i podsticaj većem korišćenju solarnih panela, ali su ta sredstva do sada bila mala. Ako solarni paneli potrošača isporučuju električnu energiju u NN distributivnu mrežu kada je to povoljno u smislu smanjenja gubitaka i poboljšanja kvaliteta električne energije, posebno u doba vršnih opterećenja, neophodno je zbog koristi usled smanjenja gubitaka podstaći potrošače na priključenje solarnih panela uz ugradnju baterija za skladištenje električne energije.

S obzirom na visoku cenu baterija neophodno je sagledati koristi od ugrađivanja baterija i sagledati mogućnost da se tarifnim sistemom ili na drugi način podstaknu potrošači da ugrade baterije.

Korišćenje solarnih panela znači izbegavanje korišćenja fosilnih goriva i time povoljan uticaj na životnu sredinu. I to može biti razlog za odvajanje više sredstava za podsticaj ugradnje solarnih panela i ugradnju baterija.

#### LITERATURA/REFERENCES

- [1] Grujić, A., Todorović, S. Kvalitet električne energije generisane iz krovne PV elektrane stabenog objekta u Vranju, in Proc. XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija), Kopaonik, R-2.12, pp. 24-28. Septembar 2018.
- [2] Čorba, Z., Milićević, D., Dumnić, B., Katić, V., Popadić, B. Ispunjenje kriterijuma dozvoljenih struja viših harmonika pri priključenju fotonaponskih elektrana na distributivni sistem, in Proc. XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija), Kopaonik, R-2.13, pp. 24-28. Septembar 2018.
- [3] Simović, V., Žerajić, M. Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 81-83, 2022. <https://doi.ub.kg.ac.rs/2021/10-46793-eee22-1-81s/>
- [4] Vuković, M., Ostojić, B. Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvima, in Proc. 36. Savetovanje Energetika 2021, Zlatibor, Srbija, rad 46, 22-25 Jun 2021.

- [5] Ćirić, R., Ochoa, L.F., Feltrin, A.P., Nouri, H. Analiza kvarova u četverožičnim distributivnim mrežama, Elektrodistribucija: bilten o distribuciji električne energije, No. 1, pp. 34-42, 2006.
- [6] Spremić, S., Obradović, D. Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 68-73, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.68S>
- [7] Spremić, S., Antonić, A. Uticaj solarnih panela na gubitke u niskonaponskoj mreži, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 3, pp. 56-59, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.56S>
- [8] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Novi model obračuna električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 56-67, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.57G>

## AUTORI/AUTHORS

**Siniša Spremić** - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije - Tehnički centar Novi Sad, sinisa.spremic@ods.rs, ORCID [0000-0003-3669-3999](https://orcid.org/0000-0003-3669-3999)

**Aleksandar Antonić** - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije - Tehnički centar Novi Sad, aleksandar.antonc@ods.rs, ORCID [0009-0003-0633-8926](https://orcid.org/0009-0003-0633-8926)

## The Influence of Solar Panels and Electric Energy Storage on Losses in the Low-Voltage Network

**Abstract** – The largest part of technical losses of electricity in electricity distribution are technical losses in low-voltage lines. Technical losses of electricity are losses that occur in the distribution of electricity from transformers to consumers in electrical distribution equipment. Commercial losses include unauthorized use of electricity and losses due to errors in metering equipment. The main source of technical losses of electricity is caused by the flow of electric current through conductors. Solar panels installed by consumers can affect the reduction of losses by reducing the flow of electric current, i.e. of electricity through low-voltage lines. The introduction of electricity storage (batteries) can have an additional impact on the reduction of electricity losses by using the stored electricity in batteries at times of peak loads. The paper presents the assumed daily diagram of the symmetrical load of the low-voltage line with the calculation of hourly losses without the influence of solar panels and with the influence of solar panels without electricity storage and with electricity storage. The impacts of solar panels without and with electricity storage are also shown in a daily diagram, as well as the voltage values at the end of the low-voltage line. In the calculation, an equivalent line with half the length and full hourly load is used for the low-voltage line.

**Index Terms** – Solar panel, Electricity storage, Low voltage, Overhead line, Load, Technical losses