

Razmatranje slučaja ako snaga solarnih panela premašuje snagu potrošnje u niskonaponskoj mreži

Siniša Spremić, Aleksandar Antonić

Elektro distribucija Srbije d.o.o. Beograd – DP Novi Sad, Bulevar oslobođenja 100, Novi Sad

Rezime - Tehnički gubici električne energije su gubici u distribuciji električne energije od transformatora do potrošača u elektrodistributivnoj opremi. Najveći deo gubitaka je u niskonaponskim nadzemnim vodovima. Solarni paneli ugrađeni kod potrošača mogu uticati na smanjenje gubitaka smanjenjem protoka električne struje, tj. električne energije kroz niskonaponske vodove do trenutka kad je snaga solarnih panela jednaka snazi potrošača. Daljim povećanjima snage solarnih panela dolazi do povećanja gubitaka. Dat je prikaz pretpostavljenog dnevnog dijagrama simetričnog opterećenja niskonaponskog voda sa proračunom gubitaka po satima bez uticaja solarnih panela te sa različitim stepenima uticaja solarnih panela bez skladištenja električne energije i primer 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. Razmatraju se mogući negativni uticaji ukoliko snaga solarnih panela prevazilazi potrošnju.

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

I UVOD

Solarni paneli za proizvodnju električne energije se već duže vreme koriste u pojedinim zemljama za sopstvene potrebe i/ili za isporuku u elektrodistributivnu ili prenosnu mrežu. U Srbiji je u poslednjih nekoliko godina značajano porasla upotreba solarnih panela u proizvodnji električne energije malih snaga za male potrošače, srednjih snaga za veće potrošače (poslovni potrošači) ali su izgrađene i solarne elektrane većih snaga. Različiti proračuni pokazuju da priključenje solarnih elektrana na elektrodistributivnu mrežu ima povoljan uticaj na smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži [1]. Ukoliko snaga solarnih panela u domaćinstvima i kod malih poslovnih potrošača ne prekoračuje snagu niskonaponskog (u daljem tekstu: NN) voda gubici u NN mreži će se smanjiti [2]. Dodatno smanjenje gubitaka se može ostvariti korišćenjem skladištenja električne energije i korišćenjem prilikom vršnih opterećenja [3]. Povećanje gubitaka se može očekivati samo kad solarni paneli imaju veću snagu proizvodnje 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, a u jednom primeru i 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 greške može da se sagledaju promene koje uzrokuje proizvodnja solarnih panela na NN izvodima koja prekoračuje potrošnju bez skladišta električne energije – baterija i u jednom primeru sa skladištenjem električne energije.

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 [5].

Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna:

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

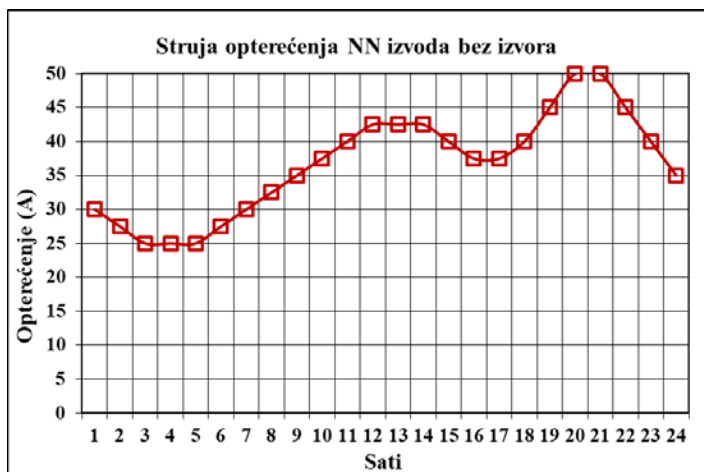
- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [6],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju od faznog 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 [7], 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 najvećim delom priključena na NN nadzemnu mrežu češće izvedenu golim provodnicima ili ređe samonosivim kablovskim snopom. U manjem delu su priključena na NN kablovsku (podzemnu) mrežu. U proračun su ubačeni podaci o NN nadzemnom vodu sa presekom aluminijumskog provodnika od 50 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 vrednosti 1.

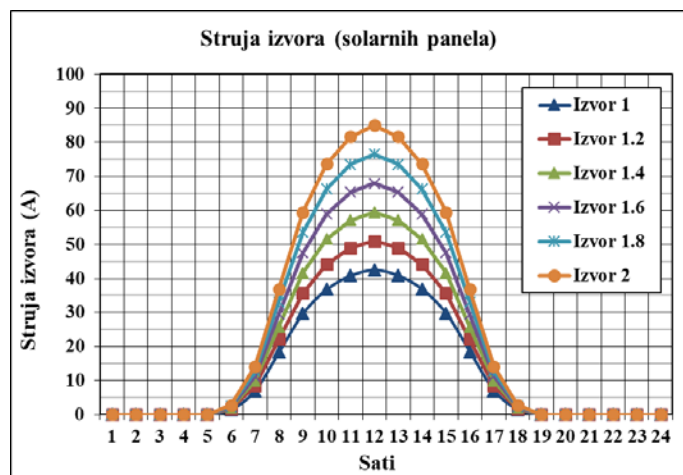
Na slici 1 je prikazan pretpostavljeni prosečan dijagram simetričnog opterećenja NN izvoda bez izvora, tj. solarnih panela isto kao u [2]. Maksimalna struja opterećenja je 50 A u večernjim satima, a minimalna 25 A u posleponoćnim satima.



Slika 1. Dijagram struje NN izvoda bez izvora

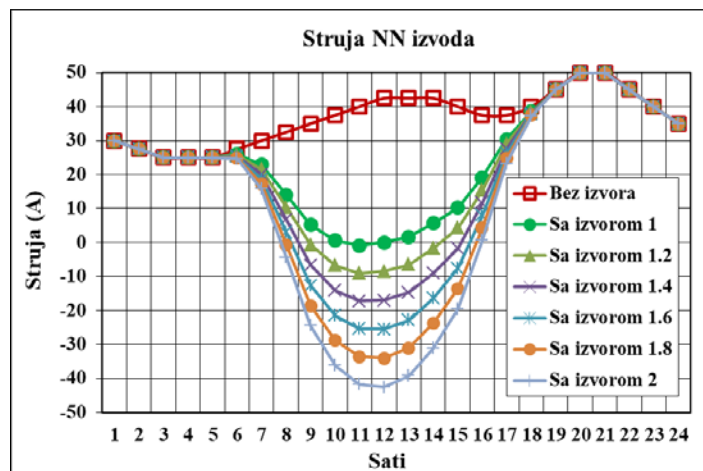
Na slici 2 su prikazane pretpostavljene krive simetričnih struja izvora (solarnih panela) sa faktorom snage jednakim 1. Vidi se da proizvodnja solarnih panela postoji 13 sati. Struje solarnih

panela su za sve krive veće od struja potrošača u jednom razdoblju proizvodnje solarnih panela. Struje izvora su odabrane tako da je najniža vrednost (plava linija sa trouglovima) jednaka najvišoj vrednosti struje potrošača bez izvora (42.5 A) u razdoblju kada postoji proizvodnja izvora i označena na slici 2 i u narednim slikama sa oznakom 1. Ostale struje se srazmerno povećavaju za 20% pa sledeća struja (tamno smeđa linija sa kvadratićima) ima oznaku 1.2 (51 A) i to se nastavlja do oznake 2 (85 A) na slici 2 i u narednim slikama.



Slika 2. Dijagram krivih struje izvora (solarnih panela)

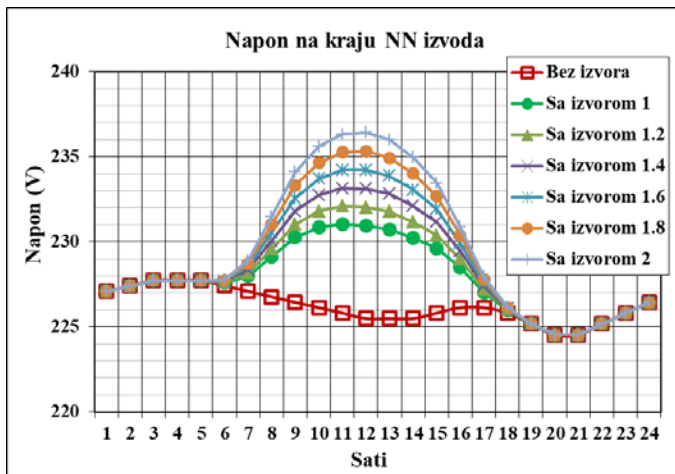
Na slici 3 je prikazan dijagram sa strujom potrošača na NN izvodu bez izvora i zajednička struja potrošača sa različitim vrednostima struja izvora.



Slika 3. Dijagram struja sa strujom potrošača bez izvora i zajedničkom strujom potrošača sa izvorom

U toku proizvodnje izvora će u nekom razdoblju struja izvora biti veća od struje potrošača tako da će doći do toka struje sa izvoda preko transformatora u srednjenaponsku mrežu.

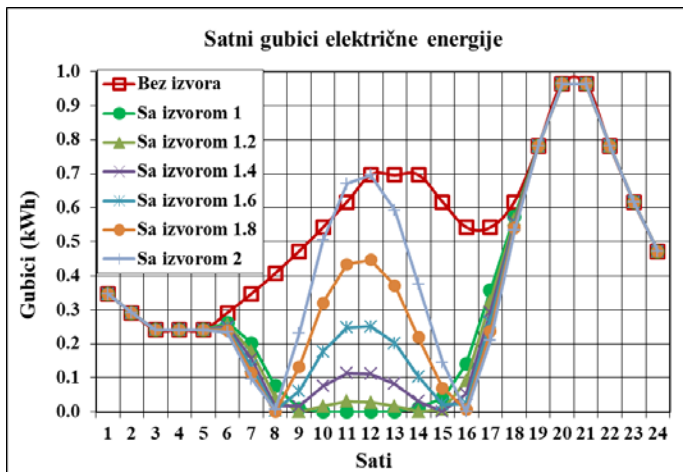
Na slici 4 je prikazan dijagram vrednosti napona na kraju izvoda u toku 24 sata. U razdoblju kada izvor daje struju (snagu) u NN mrežu u trenutku proizvodnje dolazi do osetnog povećanja vrednosti napona. U vreme kada su najveća opterećenja na NN izvodu i time najniži naponi izvor ne može da utiče na poboljšanje napona.



Slika 4. Dijagram napona na kraju NN izvoda bez izvora i sa izvorom

U svim proračunima se uzima da je vrednost napona na početku NN izvoda $400/\sqrt{3}$ V (230,94 V) bez obzira na opterećenje i uticaj izvora - solarnih panela. S obzirom da je pad napona u transformatoru $x/0,4$ kV i SN mreži prilikom rada izvora značajno manji nego u slučaju kada izvora nema može se očekivati da bi naponi na kraju NN izvoda mogli biti veći od prikazanih za nekoliko Volta što uglavnom zavisi od opterećenja i faktora snage. Takođe i zbog rada automatske regulacije napona i promene položaja regulacione sklopke pod opterećenjem na transformatoru $110/x$ kV.

Na slici 5 je prikazan dijagram satnih gubitaka električne energije na NN izvodu u toku 24 sata.

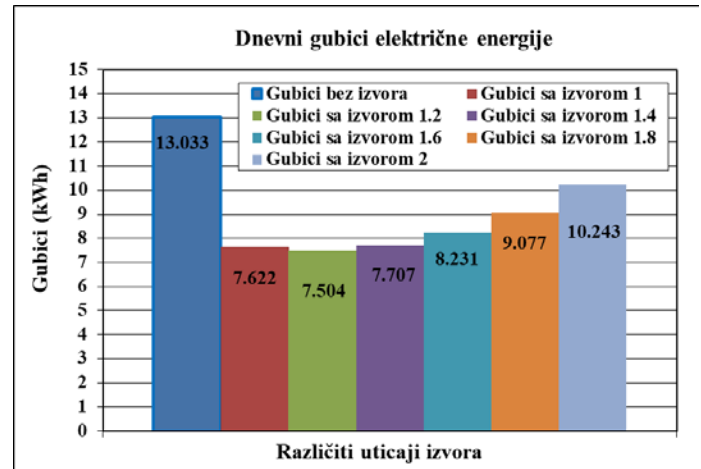


Slika 5. Dijagram gubitaka električne energije NN izvoda

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 5 i 6. 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

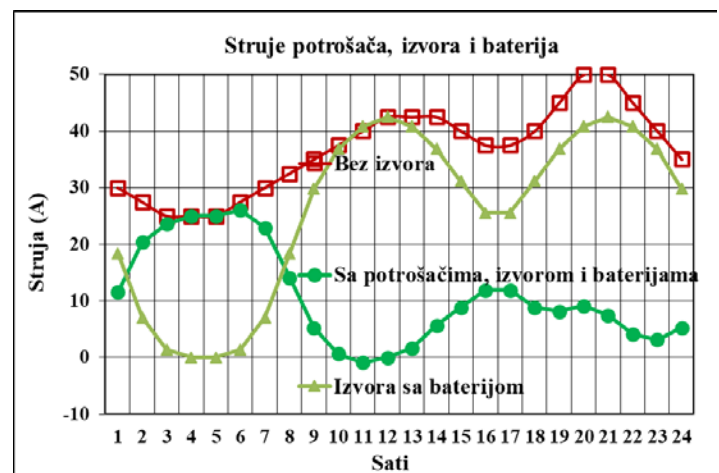
kraju NN izvoda su značajno manji od ovde prikazanih i u određenim razdobljima odstupaju od dozvoljenih prema standardu.

Na slici 6 su prikazane vrednosti dnevnih gubitaka električne energije NN izvoda za prethodne proračune slučajeva kad su prisutni samo potrošači i potrošači sa izvorom.



Slika 6. Dnevni gubici električne energije na NN izvodu bez izvora i sa izvorom

Dnevni gubici električne energije na NN nadzemnom izvodu bez izvora (solarnih panela) iznose 13,033 kWh po danu što je 2,2% protoka električne energije na NN vodu. Gubici električne energije sa izvorom 1 se značajno smanjuju za oko 42%. Vidi se da su za uzete pretpostavke gubici električne energije na NN vodu značajno manji čak i u slučaju da struja izvora u nekim razdobljima prekoračuje struju potrošnje za 2 puta. Za date parametre i pretpostavke proračuna približno jednaki gubici bez izvora i sa izvorom kod vrednosti struje izvora od približno 2,35 maksimalne struje potrošača u razdoblju kada izvor proizvodi električnu energiju. Na stvarnim NN vodovima se mogu očekivati veći gubici električne energije od ovde prikazanih, čak značajno veći. Priključenjem solarnih panela u domaćinstvima može se ostvariti velika ušteda na gubicima električne energije.

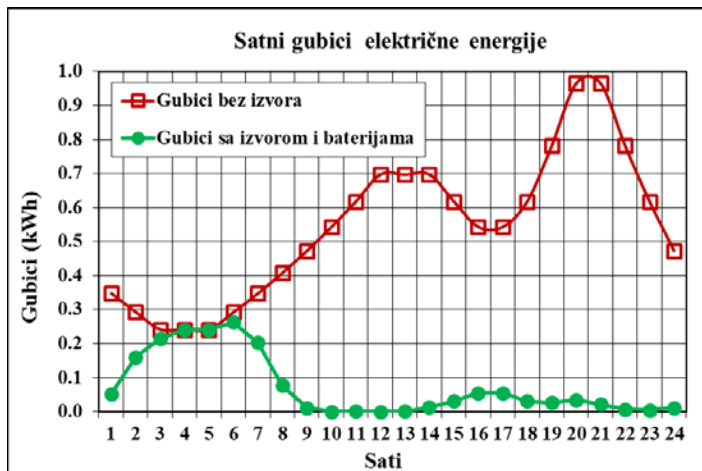


Slika 7. Dijagram struja

Korišćenje skladištenja električne energije (baterije) na nekom od prikazanih primera daje još značajnije smanjenje gubitaka

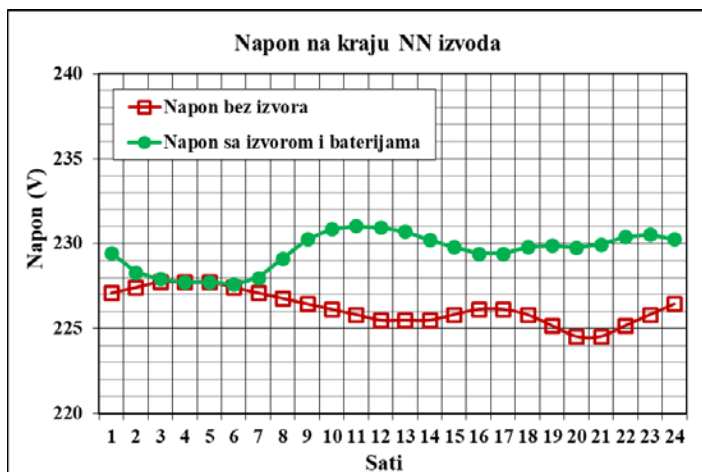
električne energije. Uzećemo primer izvora 2 gde će se polovina snage (struje) preraspodeliti u vreme vršnog opterećenja kao da imamo dva izvora 1 od kojih jedan započinje u 6 sati, a drugi (baterije) započinje u 15 sati. Na slici 7 je prikazan ovaj slučaj.

Na slici 8 je prikazan dijagram satnih gubitaka električne energije.



Slika 8. Dijagram satnih gubitaka električne energije bez izvora i sa izvorom i baterijama

Na slici 9 je prikazan dijagram napona na kraju NN izvoda baz izvora i sa izvorom i baterijama.



Slika 9. Dijagram napona na kraju voda bez izvora i sa izvorom i baterijama

Na slici 10 je prikazan dijagram dnevnih gubitaka električne energije.

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 poboljšava napon u vreme vršnih opterećenja potrošača i doprinosi ujednačavanju vrednosti napona tokom dana.

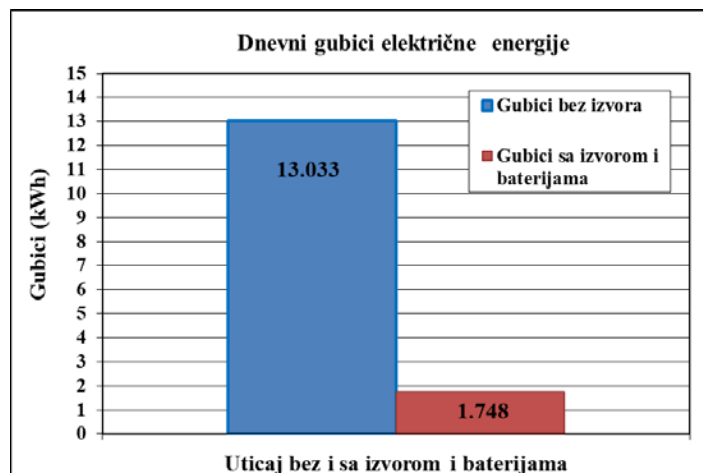
Smanjenje gubitaka električne energije je više nego značajno (oko 7,5 puta).

Ako se solarni paneli koriste samo u jednom prostornom delu jedne nadređene TS 110/x kV značajan uticaj solarnih panela u

smislu unosa snage u distributivni sistem može uticati da se kod automatskih regulatora napona sa visoko podešenim parametrom kompenzacije pada napona na vodu (strujni uticaj), zbog smanjenog opterećenja transformatora sa regulacionom sklopkom pod opterećenjem, na drugom prostornom delu mreže neželjeno smanji napon. Kod velikog uticaja solarnih panela i drugih obnovljivih izvora električne energije može se dogoditi da je tok snage iz distributivne u prenosnu mrežu preko transformatora 110/x kV. Tada se takođe može dogoditi da se na sredjenaponskoj strani transformatora dobijaju niže vrednosti napona koje u nekom delu mreže mogu dovesti do preniskih napona. Uticaj malih izvora se ne uvodi u automatski regulator napona.

Kod sredjenaponskih izvoda sa distribuiranom proizvodnjom iz solarne ili vetro energije postoji mogućnost da se u uređaj automatske regulacije napona na više načina uvede uticaj distribuirane proizvodnje, direktno ili daljinski komunikacijom. U slučaju malih izvora kao što su solarni paneli kod „malih“ potrošača je moguće da se njihovi podaci mogu komunikacijom preneti u elektrodistribuciju, a obradom bi se dobili podaci o uticaju izvora koji bi se mogli iskoristiti za automatsku regulaciju napona. Postoji mogućnost da se izvede dinamička promena parametara automatske regulacije napona, sa odgovarajućim algoritmom, kako bi se na osnovu poznatih podataka o opterećenjima menjali parametri automatske regulacije napona.

U slučaju da postoje delovi mreže koji su osetljivi na jači uticaj distribuiranih izvora može se u parametrisanju napraviti kompromis. Drugo rešenje za delove distributivne mreže je da se koriste distributivni transformatori sa regulacijom pod opterećenjem. Treće rešenje je da se slično prognozi snage u elektroenergetskom sistemu na osnovu vremenske prognoze i dana u nedelji napravi prognoza opterećenja i da se taj podatak unosi u automatski regulator napona. Podrazumeva se da je neophodno da se (i sa „pametnih brojlara“) prikupljaju i analiziraju barem podaci o vrednostima napona.



Slika 10. Dijagram dnevnih gubitaka električne energije

Razvijanje pametne mreže (*smart grid*) u pravcu prikupljanja, obrade i analize podataka o potrošnji i distribuiranoj proizvodnji solarnih panela bi pomoglo u regulaciji napona, praćenju stanja i analize u cilju dobijanja boljih pokazatelja elektrodistributivne mreže kao što su gubici i vrednosti napona.

IV ZAKLJUČAK

Priključenje solarnih panela čija snaga premašuje snagu potrošnje u vreme kada solarni paneli proizvode 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 smanjenjem i uravnoteženjem vrednosti struja (snaga) na NNvodu.

Ukoliko se koriste baterije za skladištenje električne energije u razdobljima kada proizvodnja fotonaponskih panela premašuje potrošnju mogu da se dobiju značajno bolji rezultati korišćenjem uskladištene električne energije u doba vršnih opterećenja posebno, ali i u drugim razdobljima.

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

Potrebno je da se detaljno sagleda uticaj fotonaponskih panela ugrađenih na niskonaponskoj mreži na automatsku regulaciju napona i naponske prilike na niskonaponskoj mreži.

Korišćenje solarnih panela znači izbegavanje korišćenja fosilnih goriva i time povoljan uticaj na životnu sredinu.

LITERATURA

- [1] 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.org/10.46793/EEE22-1.81S>
- [2] 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>
- [3] Spremić, S., Antonić, A. Uticaj solarnih panela i skladišta električne enegije na gubitke u niskonaponskoj mreži, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 1, pp. 80-84, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.80S>
- [4] Vuković, M., Ostojić, B. Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvima, in *Proc. 36. Savetovanje Energetika 2021*, Zlatibor, Srbija, 22-25 Jun 2021.
- [5] J.P. Elektrovojvodina. Paket računarskih programa za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.
- [6] 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.
- [7] Spremić, S., Obradović, D. Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.68S>

AUTORI

Siniša Spremić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd – DP Novi Sad, sinisa.spremic@es.rs, ORCID [0000-0003-3669-3999](https://orcid.org/0000-0003-3669-3999)

Aleksandar Antonić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd – DP Novi Sad, aleksandar.antonc@es.rs, ORCID [0009-0003-0633-8926](https://orcid.org/0009-0003-0633-8926)

Case Consideration if Solar Panels Power Exceeds Consumption in the Low-Voltage Network

Abstract – Technical losses of electricity are losses in the distribution of electricity from transformers to consumers in electrical distribution equipment. Majority of the losses are in low-voltage overhead lines. Solar panels installed by consumers can affect the reduction of losses by reducing the flow of electric current, i.e. electricity through low-voltage lines until the moment when the power of the solar panels is equal to the power of the consumer. Further increases in the power of solar panels lead to an increase in losses. The presentation of the assumed daily diagram of the symmetrical load of the low-voltage line with the calculation of losses per hour without the influence of solar panels and with different degrees of influence of solar panels without electricity storage and example with electricity storage is given. 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. Possible negative impacts are considered if the power of the solar panels exceeds the consumption.

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