

Uticaj naponskog odziva potrošnje na naponske prilike i efikasnost potrošnje u aktivnim distributivnim mrežama

Dorđe Lazović, Kristina Džodić, Željko Đurišić

Katedra za elektroenergetske sisteme

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

lazovic@etf.rs; kristinadz@etf.rs; djurisic@etf.rs

Sažetak— Integracija PV sistema na krovovima stambenih objekata postaje sve više zastupljena. Deo električne energije proizvedene na ovaj način se troši na mestu proizvodnje, smanjujući time snagu potrošnje prema mreži. Ovo za posledicu ima to da će napon u tački priključenja porasti u periodima kada postoji proizvodnja iz PV sistema. Povećanje napona će uticati i na snagu potrošnje pojedinih uređaja u domaćinstvu i dovesti do promena u ukupnoj električnoj energiji koja se tokom dana potroši. Koliko će se razlikovati potrošnja energije od prvobitne zavisi od udela pojedinih vrsta uređaja u ukupnoj potrošnji domaćinstva, njihovih karakteristika i povećanja napona do kojeg dolazi usled PV proizvodnje, što je predmet istraživanja ovog rada. Takođe, biće sagledan i efekat naponskog odziva potrošnje na prigušenje naponskih udara pri intermitentnoj proizvodnji obnovljivih izvora.

Ključne reči -fotonaponski sistemi; statičke karakteristike potrošnje; ZIP model potrošnje

I. UVOD

Smanjenje cene instalacije PV sistema i finansijske podsticajne mere dovele su do toga da integracija PV sistema postane sve više zastupljena u potrošačkim područjima sa dominantnim udelom domaćinstava. Međutim, više instalisane snage u PV sistemima dovodi do značajnih promena u eksploataciji u upravljanju distributivnom mrežom. Jedna od najčešće analiziranih i najznačajnijih promena do koje dolazi jeste povećanje napona u mreži, jer tokom sunčanih sati dana snaga generisanja PV panela može prevazići snagu potrošnje što dovodi do kontra tokova snaga i povećanja napona u čvorištima distributivne mreže. Povećanje napona u mreži, dovešće ujedno i do povećanja snage potrošnje, jer snaga značajnog broja uređaja koji se koriste u domaćinstvima zavisi od napona napajanja. Posmatrajući agregisanu potrošnju skupa domaćinstava, ovaj efekat može dovesti do nezamisljivog porasta energije potrošnje, u poređenju sa slučajem kada nema PV sistema. Koliko će se razlikovati potrošnja energije od prvobitne zavisi od udela pojedinih vrsta uređaja u ukupnoj potrošnji domaćinstava, njihovih karakteristika i povećanja napona do kojeg dolazi usled PV proizvodnje. Porast snage potrošnje jednog uređaja sa porastom napona zavisi od osobina

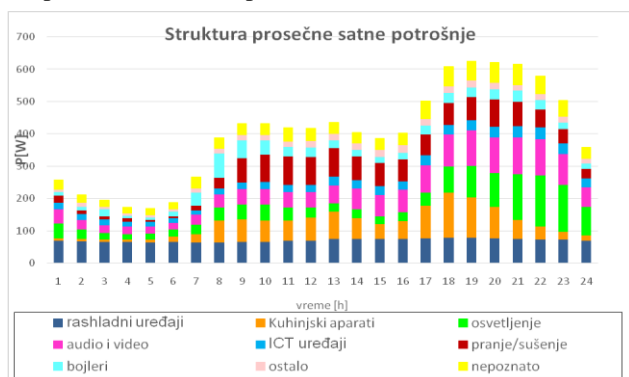
samog uređaja, i potrebno ga je sa zadovoljavajućom tačnošću modelovati. U ovom radu će biti analizirano u kojoj meri će efekat porasta potrošnje sa porastom napona uticati na efikasnost potrošnje u tipičnim domaćinstvima. Zavisnost snage potrošnje uređaja sa promenama napona će biti opisana polinomom drugog reda, odnosno ZIP modelom. Koeficijenti polinoma se razlikuju u zavisnosti od vrste uređaja, pa čak i od proizvođača. Postoje i uređaji, čija je namena takva da povećanje napona neće uticati značajno na ukupnu dnevnu potrošnju električne energije. Takođe će biti sagledan i efekat odziva potrošnje na prigušenja naponskih udara do kojih dolazi usled naglih promena proizvodnje PV panela koja se u realnosti dešava pri promenljivo oblačnom vremenu. Ovi efekti biće analizirani na modelu IEEE mreže sa 33 čvora.

II. STRUKTURA POTROŠNJE U SEKTORU DOMAĆINSTAVA

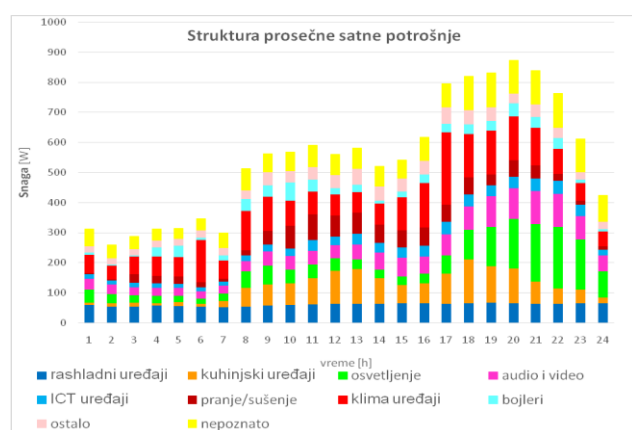
Za potrebe analize, potrebno je izvršiti procene udela različitih potrošača u ukupnoj potrošnji i definisati model kojim će svaki od njih biti predstavljen. Brojni algoritmi za dekompoziciju potrošnje baziraju se na iskustvu o strukturi potrošnje koje je sakupljeno bilo iscrpnim anketiranjem klijenata o tipu i broju instaliranih aparata kao i navikama u njihovom korišćenju, bilo merenjima snage u laboratorijskim uslovima, bilo realnim merenjima u domaćinstvu. Dobijeni podaci koriste se za razvoj detaljnijih modela različitih kategorija potrošnje. S obzirom na to da struktura potrošnje zavisi od raznih faktora i da ima stohastičku prirodu, za procenu udela potrošača važno je među sakupljenim podacima izuzeti ekstremne slučajeve i uzeti podatke koji se podudaraju sa opštim trendovima ustanovljenim različitim studijama. Svaku potrošnju koja se ne može identifikovati sa usvojenim kategorijama treba svrstati u klasu "ostalost". Moguće je, međutim, da pojedini potrošači budu zamaskirani u agregisanoj potrošnji u smislu da se ne mogu identifikovati nekom od metoda za dekompoziciju potrošnje. Takvi potrošači će biti klasifikovani kao "nepoznato", zajedno sa netehničkim gubicima, odnosno potrošnjom koja nije merenjem registrovana.

Rezultati studija o strukturi potrošnje u domaćinstvu obično su dijagrami potrošene električne energije tipično na mesečnom ili godišnjem horizontu. Međutim, pri merenju energije gubi se informacija o tome koji su potrošači u jednovremenom radu, odnosno stanje uključenosti potrošača. Od interesa su dnevni dijagrami energije sa satnom rezolucijom odnosno dijagrami srednje satne snage. Dnevni dijagrami potrošnje razlikuju se za radne i neradne dane u različitim sezonama godine. Često se daju rezultati za usrednjeni dnevni dijagram za celu sezonu ili godinu ali i kao takvi mogu poslužiti kao smernica ili okvir za detaljniju analizu nekog drugog konzuma. Naime, rezultati dekompozicije potrošnje su specifični za određeno područje. Devijacije između rezultata dobijenih u različitim delovima sveta su uslovljene različitim klimatskim uslovima i različitim socio-ekonomskim faktorima.

Analizirane su dve kategorije domaćinstava, sa i bez klima uređaja. U domaćinstvima u kojima postoje, klima uređaji imaju veliki udeo u ukupnoj potrošnji električne energije. Biće pokazano da ova kategorija potrošačima važan uticaj na efekat priraštaja potrošnje energije sa priraštajem napona koji se u ovom radu analizira. Na slici je prikazana struktura prosečne dnevne potrošnje za obe grupe domaćinstava, izračunate sa satnom rezolucijom za sve dane u godini, Sl.1 i Sl.2, pri nominalnom naponu [1].



Slika 1. Struktura prosečne dnevne potrošnje za domaćinstva bez klima uređaja



Slika 2. Struktura prosečne dnevne potrošnje za domaćinstva sa klima uređajima

Za potrebe analiza u ovom radu, svi kućni uređaji su svrstani u dve grupe: one na čiju satnu potrošnju utiču varijacije napona i na one za koje se smatra da promene napona ne dovode do promena aktivne energije koju ovi uređaji troše. Podela uređaja u domaćinstvu prema navedenom kriterijumu je definisana u Tabeli I.

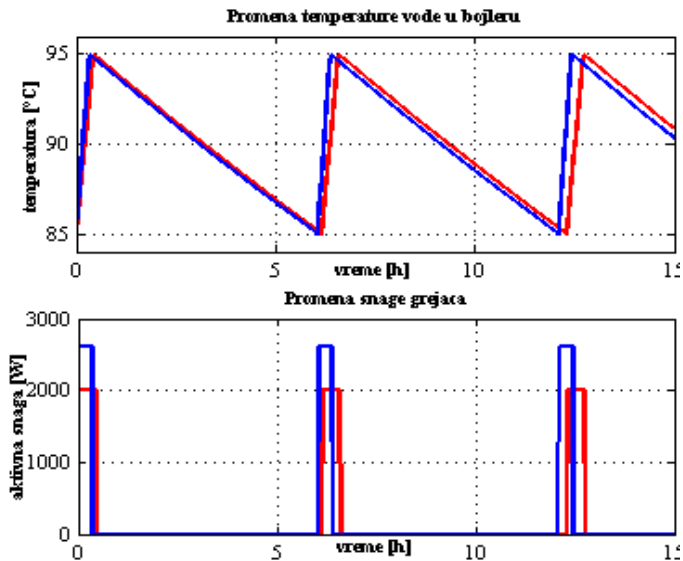
TABELA I. KLASIFIKACIJA UREĐAJA PREMA KRITERIJUM OSETLJIVOSTI DNEVNE SNAGE POTROŠNJE SA PORASTOM NAPONA

| Vrsta uređaja | Utrošena energija zavisi od promena napona (Grupa 1) | Utrošena energija ne zavisi od promena napona (Grupa 2) |
|---|--|---|
| Rashladni uređaji | + | |
| Kuhinjski uređaji | | + |
| Osvetljenje | + | |
| Audio i video | | + |
| ICT, Information and Communication Technology | | + |
| Pranje/sušenje | | + |
| Klima uređaji | + | |
| Bojlери | | + |
| Ostalo | + | |
| Nepoznato | | + |

U grupu uređaja čija je potrošnja osetljiva na promenu napona svrstani su: rashladni uređaji, klima uređaji, osvetljenje i ostala potrošnja. Frižideri, zamrzivači i klima uređaji rade po sličnom principu, tako što asinhroni motor pogoni kompresor koji dalje sabija rashladno sredstvo. Zbog krute mehaničke karakteristike asinhronog motora, promena napona neće dovesti do značajne promene brzine obrtanja od koje zavisi koristan rad kompresora. Stoga, usled povećanja napona, korisna snaga ove kategorije potrošača ostaje gotovo nepomenjena, dok je povećanje aktivne snage potrošnje posledica povećanja gubitaka u motoru. Efekat nekorisnog priraštaja snage izražen je i kod osvetljenja. Naime, sistem osvetljenja se projektuje tako da i pri minimalnom dozvoljenom naponu bude postignut zahtevani nivo osvetljenosti. Povećanjem napona dolazi do veće snage potrošnje sijalica, odnosno veće osvetljenosti, što, u većini slučajeva, nije bilo nužno, te se i ova dodatna potrošnja može kategorisati kao nekorisna, odnosno kao gubitak. Koliko će povećanje snage biti, zavisi od primenjene tehnologije sijalica. Svako povećanje snage ove grupe uređaja, dovešće do nepotrebnog povećanja energije potrošnje, za koju se u daljem tekstu uvodi pojam "nepotrebno utrošene" energije ("waste energy").

Za grupu uređaja koji su klasifikovani u grupu 2 u Tabeli I se ne može reći da se snaga potrošnje neće promeniti sa promenom napona, ali će utrošena dnevna energija biti praktično nezavisna od promena napona, s obzirom na to da je diktirana potrebama potrošača (npr. zagrevanje vode u bojleru, priprema hrane, termičko grejanje prostorija). Kod takvih uređaja povećanje snage uzrokovano povećanjem napona biće praćeno proporcionalnim smanjenjem trajanja njegovog rada, što će na nivou grupe domaćinstava biti zanemarljivo mala promena [2]. Pojašnjenje navedene pretpostavke biće pokazano na principu rada grejača bojlера prilikom dogrevanja vode različitim snagama, što je ilustrovano na Sl.3. U slučaju

veće snage grejača, vreme dogrevanja vode biće kraće nego u slučaju manje snage, ali će zato energije u ova dva slučaja biti međusobno jednake. Dakle, za ove grupe uređaja, nije da neće doći do promene aktivne snage sa naponom, ali se usled promena faktora jednovremenosti rada uređaja koji se menja onako kako se menja i njegova snaga, satne potrošnje, tj. sumarna satna energija neće promeniti.



Slika 3. Promena temperature vode u akumulacionom bojleru pri različitim snagama grejača uzrokovana promenom napona

III. ZIP MODEL POTROŠNJE

Treba naći odgovarajuću zavisnost potrošnje aktivne i reaktivne snage sa naponom za svaku kategoriju potrošača. Ovakve zavisnosti nazivaju se statičkim karakteristikama aktivne i reaktivne snage i tradicionalno se koriste dva modela: polinomijalni (poznatiji kao ZIP model) i eksponencijalni. Oba modela su pogodna za korišćenje pri naponima bliskim naznačenom, međutim eksponencijalni značajno gubi na tačnosti kada naponi dosta odstupaju od naznačenog. Iz tog razloga, u ovom radu potrošnja uređaja je predstavljena ZIP modelom [3]. ZIP modelom se svaki potrošač može predstaviti modelom konstantne impedanse, struje ili snage ili kombinacijom navedenih što se predstavlja polinomom drugog stepena sledećeg oblika:

$$P = P_0 [a_1 (V/V_0)^2 + a_2 (V/V_0) + a_3] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 [a_4 (V/V_0)^2 + a_5 (V/V_0) + a_6] \quad (2)$$

Gde su a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 i a_6 ZIP koeficijenti za koje mora da važi: $a_1 + a_2 + a_3 = a_4 + a_5 + a_6 = 1$, V_0 je nominalni napon mreže, a P_0 i Q_0 su aktivna i reaktivna snaga potrošnje pri naponu V_0 . Različite uređaje karakterišu različiti ZIP koeficijenti. U literaturi [3-5] postoje podaci kojima su definisane njihove vrednosti za različite uređaje, a usvojeni su oni prikazani u Tabeli II [5]. Za potrebe analize povećanja satnih energija

potrošnje uređaji iz grupe 2 predstavljeni su modelom konstantne snage, jer njihova satna snaga (energija) potrošnje ostaje nepromenjena. Kako su danas u upotrebi različite tehnologije osvetljenja, u tabeli su prikazani ekvivalentni ZIP koeficijenti za najčešće korišćene vrste osvetljenja u rezidencijalnom sektoru potrošnje. U analizama je pretpostavljeno da strukturu izvora osvetljenja čini 30% inkandescentno, 30% LED, 20% CFL (kompakt fluo sijalice) i 20% fluo cevi. Pojedinačni koeficijenti za različite tehnologije osvetljenja preuzeti su iz [3]. Za kategoriju "ostalo" pretpostavljeno je da je osetljiva na promene napona, i za nju su usvojene srednje vrednosti ZIP koeficijenata na nivou jednog domaćinstva. Za kategoriju potrošnje „nepoznato“ usvojen je model konstantne snage.

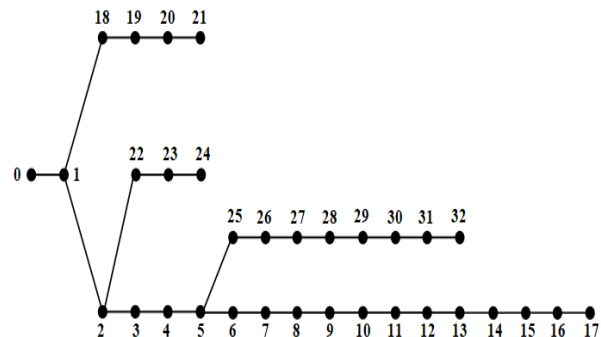
Faktor snage za sve vrste uređaja pri nominalnom naponu dat je u istoj tabeli, i na osnovu njega i poznatog udela aktivne snage svakog od njih u ukupnoj potrošnji, sračunat je karakterističan dijagram reaktivne snage, prvo za svaki uređaj, a onda i ukupne potrošnje.

TABELA II. ZIP KOEFICIJENTI

| Uređaj | $\cos\phi$ | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rashladni uređaji | 0.85 | 1.19 | -0.26 | 0.07 | 0.59 | 0.65 | -0.24 |
| Kuhinjski uređaji | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Osvetljenje | 0.94 | 0.40 | 0.11 | 0.48 | 1.47 | -1.47 | 1.00 |
| Audio i video | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| ICT | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Pranje/sušenje | 0.7 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Klima uređaji | 0.99 | 0.86 | -1.4 | 1.56 | 22.9 | -40.4 | 18.5 |
| Bojleri | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Ostalo | 0.99 | 1.17 | -1.83 | 1.66 | 2.97 | -4.33 | 2.36 |
| Nepoznato | 0.99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

IV. REZULTATI

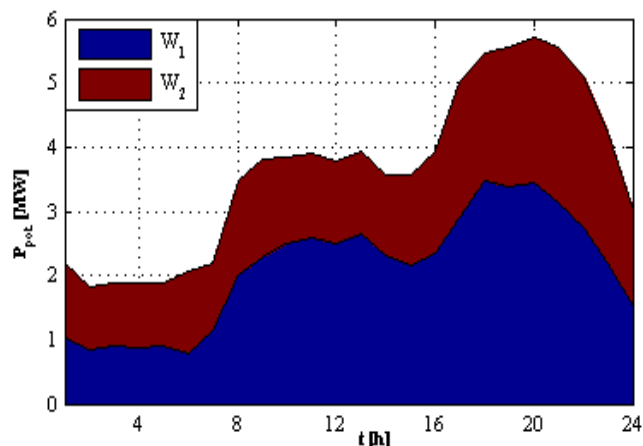
Efekat i kvantifikacija promene energije potrošnje sa promenom napona biće date za sredjenaponsku mrežu IEEE sa 33 čvora [6], prikazanu na Sl.4. U svakom čvoru potrošnju priključen je veći broj domaćinstava, pri čemu su u čvorovima 1-17 domaćinstva bez klima uređaja, dok su u ostalim čvorovima domaćinstva sa klima uređajima..



Slika 4. IEEE 33 distributivna mreža

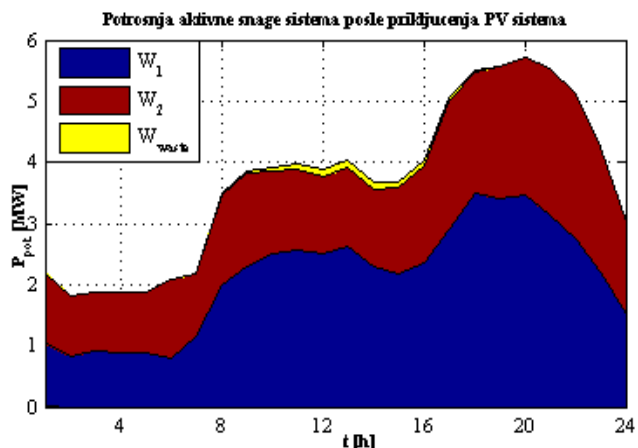
A. *Analiza efekata integracije PV sistema na gubitke u distributivnoj mreži i efikasnost potrošnje*

Analiziraju se dva slučaja, prvi kada ne postoji distribuirana proizvodnja i drugi, kada u svakom čvoru mreže postoje PV sistemi instalisane snage tri puta veće od maksimalne snage potrošnje u istom čvoru. Dijagram proizvodnje PV sistema formiran je na osnovu usrednjenih godišnjih podataka dobijenih iz [7]. Za pasivnu distributivnu mrežu, proračuni tokova snaga izvršeni su za svaki satu toku jednog dana, uz uvažavanje promena aktivnih i reaktivnih snaga potrošnje sa naponom. Agregisana potrošnja u celoj mreži je prikazana na Sl.5, gde površina W_1 (50.6 MWh) predstavlja dnevnu energiju potrošnje uređaja Grupe 2, dok je površina W_2 (36.74 MWh) ukupna energija potrošnje uređaja iz Grupe 1. Dnevni gubici aktivne snage u mreži u ovom slučaju su 3.84MWh.

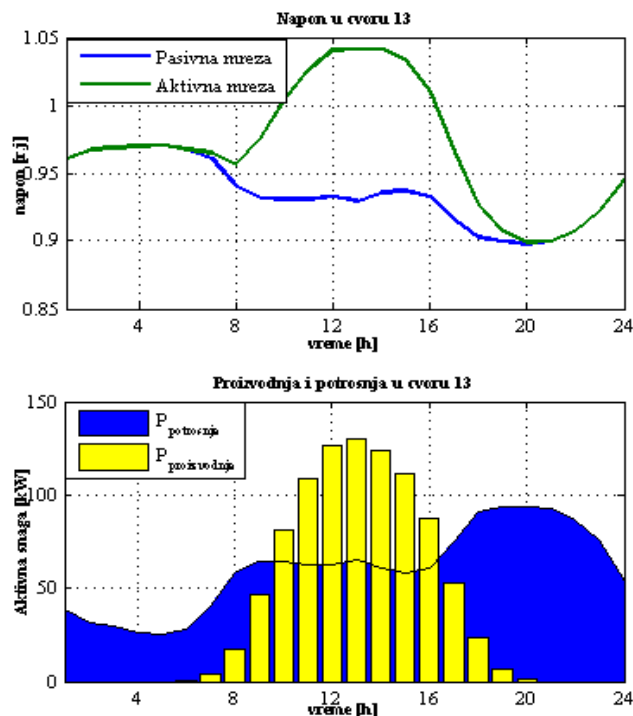


Slika 5. Ukupna potrošnja aktivne snage u test mreži bez instalisanih PV sistema

Za slučaj mreže sa distribuiranom proizvodnjom, dobijen je dijagram prikazan na Sl.6, gde je energija potrošnje grupe 2 ostala nepromenjena W_1 (50.6 MWh), što je i bilo očekivano jer su uređaji ove grupe predstavljeni modelom konstantne snage. Energiju potrošnje Grupe 1 čini zbir energije W_2 (36.74 MWh) dobijene u prethodnoj analizi i "nepotrebno" utrošene energije W_{waste} (0.84MWh). Gubici aktivne snage u sistemu su, u ovom slučaju, manji i iznose 2.81MWh.



Na osnovu sprovedene analize zaključuje se da je integracija fotonaponskih sistema dovela do smanjenja energije gubitaka u mreži za 1.03MWh (26.96%), ali i do povećanja ukupne energije koja se predaje potrošačima za 0.84MWh. Može se zaključiti da integracijom distribuiranog generisanja dolazi do smanjenja gubitaka u distributivnoj mreži, uzrokovanog strujnim rasterećenjem vodova, ali i do povećanja gubitaka na strani potrošnje uzrokovanog povećanjem napona u čvorovima sa distribuiranom proizvodnjom. Ovi efekti su prisutni tokom dana kada postoji proizvodnja iz sunca, dok tokom noći profil potrošnje ostaje nepromenjen. Na Sl.7 prikazana je promena napona, kao i dijagrami proizvodnje i potrošnje aktivne snage u čvoru 13 analizirane test mreže. Može se primetiti da postoji korelacija između dijagrama napona i proizvodnje aktivne snage.

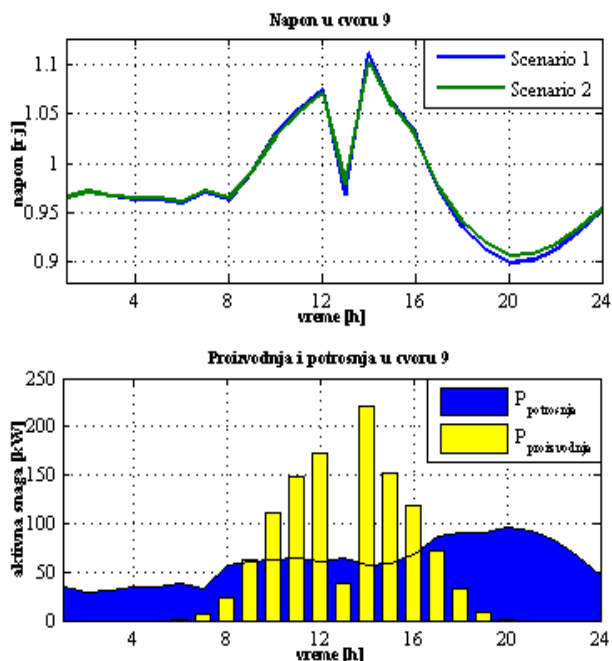


Slika 7. Promena napona, proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru 13

B. *Analiza efekata odziva potrošnje na prigušenje naponskih udara pri intermitentnoj proizvodnji PV sistema*

Kako bi se prikazao efekat prigušenja naponskih udara do kojih dolazi usled naglih promena proizvodnje, analizira se promenljivo oblačan dan tokom koga se tokom 13. sata proizvodnja PV sistema značajno smanjila, a zatim je u satu 14 došlo do naglog porasta proizvodnje iz PV sistema, što odgovara realnim uslovima niske temperature i visoke insolacije nakon prolaznog naoblačenja. Posmatra se promena napona u dva slučaja: prvi, kada potrošnji u svakom čvoru odgovara dijagram potrošnje sa Sl. 1, i drugi, kada se potrošnja u svakom čvoru opisuje preko dijagrama sa Sl.2, odnosno kada u mreži nema klima uređaja i kada ih ima u svakom čvoru. Na ovaj način postiže se da potrošnja, kada imamo klima uređaje, bude osetljivija na promene napona. S

tim u vezi, smanjenje proizvodnje dovešće do pada napona u mreži, zbog kog će se potrošnja u drugom slučaju više smanjiti, a kao posledica toga propad napona će biti manji. Važi i obrnuto, kada dođe do naglog porasta proizvodnje. Ovaj efekat samoregulacije potrošnje je pozitivan sa aspekta prigušenja naponskih udara do kojih dolazi pri skokovitim promenama proizvodnje. Opisana pojava prikazana je na S1.8 gde je ilustrovana promena napona u čvoru 9 za oba analizirana scenarija. Na slici se vidi da u drugom slučaju kriva promene napona manje odstupa od naznačenog napona mreže. Ovaj efekat bi bio znatno izraženiji ukoliko bi struktura potrošnje bila takva da je veći udeo uređaja kod kojih se dnevna potrošnja energije menja sa promenom napona.



Slika 8. Promena napona, proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru 9

ZAKLJUČAK

U radu je izvršena analiza uticaja integracije fotonaponskih sistema u rezidencijalnim objektima na gubitke snage i naponske prilike uz uvažavanje naponskog odziva potrošnje. Pokazano je da pozitivan efekat smanjenja gubitaka u distributivnoj mreži kroz distribuiranu proizvodnju iz fotonaponskih sistema biva značajno umanjen zbog smanjenja efikasnosti potrošnje uzrokovane porastom napona u potrošačkim čvorovima. Treba imati u vidu, da su ova dva efekta podeljena u pravnom pogledu, odnosno pozitivan efekat smanjenja gubitaka je na strani operatora distributivnog sistema, a negativan efekat smanjenja efikasnosti potrošnje, odnosno porasta gubitaka i nepotrebne snage potrošnje je na strani korisnika, odnosno domaćinstva. Uređaji koji su najveći uzročnici ovog efekta su klima uređaji i drugi rashladni, kod

kojih efekat priraštaja napona, neće dovesti do poboljšanja funkcije hlađenja, već do povećanja gubitaka u njima.

Naponski odziv potrošnje ima pozitivan efekat u pogledu prigušenja naponskih kolebanja izazvanih intermitentnom proizvodnjom fotonaponskih sistema pri promenljivo oblačnom danu. Ovaj efekat je više izražen u potrošačkim područjima u kojima je veći udeo uređaja čija se snaga više menja sa promenama napona.

ZAHVALNICA

Rezultati koji su predstavljeni u ovom radu su deo istraživanja na projektu III42009 koji finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] J.P. Zimmermann, M. Evans, J. Griggs, N. King, L. Harding, P. Roberts and C. Evans, "Household electricity survey: A study of domestic electrical product usage," Intertek Testing & Certification Ltd., 2012.
- [2] J. Descheemaeker, M. Van Lumig and J. Desmet, "Influence of the supply voltage on the performance of household appliances," 23rd International Conference on Electricity Distribution. CIRED, 2015.
- [3] A. Bichik, "Impact of Voltage Variation on Domestic and Commercial Loads," 2015.
- [4] F. Lamberti et al. "Estimating the load response to voltage changes at UK primary substations" Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013.
- [5] D. Ranamuka, A. P. Agalgaonkar, and K. M. Muttaqi, "Conservation voltage reduction and VAr management considering urban distribution system operation with solar-PV," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 105, 856-866, 2019.
- [6] A. Wazir and A. Naeem, "Analysis and optimization of IEEE 33 bus radial distributed system using optimization algorithm," Journal of Emerging Trends in Applied Engineering (ISSN 2518-4059) 1.2 (2016): 17-21.
- [7] <https://pvwatts.nrel.gov/>

ABSTRACT

Integration of rooftop PVs in residential networks is becoming more and more popular. One part of produced energy is locally consumed, thus load is being reduced and voltage is being increased during periods of the day with PV production. This impact on voltage profile will affect home appliances daily energy consumption. The distinction between original and new energy consumption depends on certain device portion in summary residential demand, its characteristics and voltage increase. In this paper, this phenomenon is being researched. Additionally, the impact of consumer voltage response to sudden voltage variations will be considered.

IMPACT OF CONSUMERS VOLTAGE RESPONSE ON VOLTAGE PROFILE AND LAOD EFFICIENCY IN ACTIVE DISTRIBUTIVE NETWORKS

Đorđe Lazović, Kristina Džodić, Željko Đurišić