

Optimalno dimenzionisanje mikromreže sa obnovljivim izvorima energije u Srbiji

Optimal Sizing of the Microgrid with Renewable Energy Sources in Serbia

Vladimir Antonijević*, Lazar Mladenović**, Goran Dobrić*, Mileta Žarković*

* Elektrotehnički fakultet. Univerzitet u Beogradu

** Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o. - EKC

Rezime - U radu je izvršena analiza formiranja mikromreže u Južnom Banatu. Rad sadrži tri scenarija vezana za određivanje veličine konzuma dela elektroenergetskog sistema Srbije koji se potencijalno može napajati samo iz obnovljivih izvora energije. Na osnovu realnih podataka o proizvodnji četiri vetroelektrane u Srbiji (Čibuk, Kovačica, Alibunar i Košava) za period januar – jun 2019. godine, kao i realnih podataka o potrošnji, formiran je prvi scenario koji se odnosi na određivanje dela konzuma koji se može pokriti iz postojećih vetroelektrana. U ovom scenariju je, uz poštovanje kriterijuma besprekidnosti napajanja, za različite veličine konzuma određivano procentualno učešće energije iz elektroenergetske mreže. Kako bi se smanjio udeo energije iz elektroenergetske mreže, razmatran je novi scenario, koji se odnosi na dodavanje proizvodnih kapaciteta energije sunca. Analiza drugog scenarija pokazala je smanjenu zbirnu intermitentnost vetroelektrana i solarne elektrane u odnosu na prvi scenario. Komplementarna priroda sunca i vetra doprinosi boljoj korelisanosti potrošnje i proizvodnje. Treći scenario podrazumeva dodavanje skladišnog kapaciteta na drugi scenario. Primenjen je genetički algoritam za optimalno određivanje skladišnog kapaciteta za slučaj mikromreže u ostrvskom radu, kao i kada je priključena na elektroenergetsku mrežu. Za svaki scenario je formiran koeficijent korelacije proizvodnje i potrošnje. Kompletan analiza je izvršena u cilju sagledavanja mogućnosti formiranja mikromreže u delu elektroenergetskog sistema Srbije u blizini vetroelektrana. Ovakva analiza pokazuje smanjenje gubitaka u prenosu, smanjenje emisije CO₂ i bolje naponske prilike.

Ključne reči - mikromreža, vetroelektrana, obnovljivi izvori energije

Abstract - The paper analyzes the formation of the microgrid in South Banat. The paper contains three scenarios related to determining the size of the distribution area of the part of the electric power system of Serbia that can potentially be powered only from renewable energy sources. Based on real data on the production of four wind farms in Serbia (Čibuk, Kovačica, Alibunar and Košava) for the period January - June 2019 and real consumption data, the first scenario was formed which refers to determining the part of distribution area that can be covered from existing wind farms. In this scenario, with respect to the criteria

of uninterrupted power supply, the percentage share of energy from the electricity network was determined for different sizes of distribution area. In order to reduce the share of energy from the electricity network, a new scenario was considered, which refers to the addition of production capacities of solar energy. The analysis of the second scenario showed reduced cumulative intermittency of wind and solar power plants compared to the first scenario. The complementary nature of the sun and wind contributes to a better correlation between consumption and production. The third scenario involves adding storage capacity to the second scenario. A genetic algorithm was applied for the optimal determination of the storage capacity of a microgrid in both grid-connected and islanded modes. A correlation coefficient of production and consumption was formed for each scenario. A complete analysis was performed in order to consider the possibility of forming a microgrid in the part of the Serbian power system near wind farms. This analysis showed a reduction in transmission losses, a reduction in CO₂ emissions and better voltage conditions.

Index Terms - microgrid, wind farm, renewable energy sources

I UVOD

Poslednjih decenija koncepti razvoja energetike su se značajno promenili. U velikom broju zemalja trendovi izgradnje novih proizvodnih kapaciteta usmereni su ka obnovljivim, a sve manje ka konvencionalnim izvorima. Razlozi za ovakvu strategiju razvoja energetike su višestruki. Pre svega teži se ekološkoj proizvodnji električne energije kako bi se smanjilo zagađenje životne sredine. Pored toga, regulative Evropske Unije ograničavaju prekomernu emisiju gasova staklene bašte pa se kod planiranja izgradnje izvora ova činjenica mora uzeti u obzir. Investicioni troškovi u projektima izgradnje kapaciteta baziranih na obnovljivim izvorima su postali konkurentni troškovima izgradnje tradicionalnih izvora, što pre desetak godina nije bio slučaj. Sve ove faktore treba uzeti u obzir pri planiranju proizvodnih kapaciteta u jednom elektroenergetskom sistemu.

Najveći udeo u proizvodnji elektroenergetskog sistema Srbije je iz termoelektrana sa lignitom kao pogonskim gorivom, pa je dalji razvoj sistema veoma osetljiv na cene emisije CO₂. Planirani projekti u elektroenergetskom sistemu Srbije tokom naredne

decenije imaju za cilj povećanje sigurnosti snabdevanja, podršku integraciji obnovljivih izvora, povezivanje tržišta električne energije u regionu, kao i jačanje interkonektivnih veza između sistema i povećanje raspoloživih prenosnih kapaciteta. Trenutno i u daljem planu razvoja elektroenergetskog sistema Srbije, vetroelektrane su, u odnosu na ostale obnovljive izvore energije, najzastupljenije, pa je, prilikom planiranja rada EES-a potrebno na taj aspekt posebno obratiti pažnju [1].

Problem dimenzionisanja mikromreže je opisan u radovima primenom različitih optimizacionih metoda. U radu [2] je razmatrano optimalno dimenzionisanje skladišnog kapaciteta za mikromrežu u ostrvskom radu napajaju putem vetroenergije i solarne energije. Korišćen je stohastički metod optimizacije sa ograničenjem verovatnoće (chance-constraint method). U [3] je opisana metodologija planiranja mikromreže za optimizovanje tržišta sekundarnih usluga pomoću metaheurističke metode. Rad [4] se bavi problemom optimalnog dimenzionisanja hibridnog sistema sa obnovljivim izvorima energije primenom metode roja čestica (PSO). U [5] – [13] se mogu naći još neki aspekti formiranja i analize mikromreža.

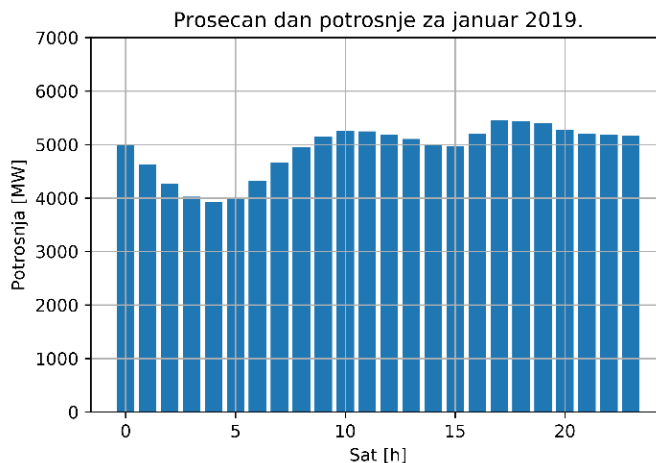
U ovom radu se analizira koji deo elektroenergetskog sistema Srbije bi mogao raditi samostalno, odnosno kao mikromreža. Korišćeni su realni podaci o proizvodnji četiri vetroparka u Srbiji za period januar – jun 2019. godine. Nakon razmatranja potrošnje u istom periodu, razvijena su tri scenarija formiranja mikromreže u okolini vetroparkova.

II VETROPARKOVI I KONZUM U SRBIJI

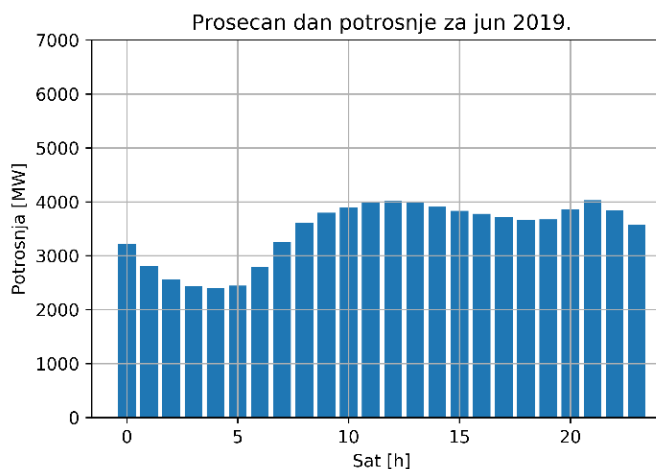
Region Banata je poznat kao izrazito vetrovito područje na kome su početkom druge decenije otpočeta merenja brzine i smera vetra na većem broju lokacija. Nakon toga usledila je izgradnja četiri vetroparka. Vetropark Kovačica instalisane snage 104,5 MW se nalazi u opštini Kovačica, AP Vojvodina, Republika Srbija. Vetropark Kovačica je priključen na sistem za prenos električne energije, JP "Elektromreža Srbije", na prenosnu mrežu naponskog nivoa 220 kV dalekovoda br. 254 Pančevo 2 - Zrenjanin 2, preko planirane trafo-stanice TS 35/220 kV "Kovačica". Vetropark Čibuk 1 je u 2019. godini sa 158 megavata (MW) kapaciteta, postao najveći komercijalni energetska projekat u domenu vetroenergije u Srbiji i na zapadnom Balkanu. Vetropark Alibunar ima ukupnu instalisanu snagu 42 MW i priključen je na sredjenaponsku 33 kV mrežu i preko transformacije 33/110kV na 110kV elektroenergetski sistem. Vetropark Košava je instalisane snage 69 MW i priključen je na elektroenergetski sistem u blizini Vršca. U cilju formiranja mikromreže, koja će okružiti elektroenergetski sistem Banata oko pomenutih vetroparkova, korišćene su satne vrednosti konzuma za teritoriju cele Srbije i ukupna satna proizvodnja iz vetroparkova za period januar-jun 2019. godine. Izvršena je detaljna analiza i vizualizacija prikupljenih podataka pomoću programskog jezika *Python* i njegovih biblioteka: *Pandas*, *NumPy*, *Matplotlib*. Programski jezik *Python* je odabran jer je u odnosu na neke druge inženjerske alate *open source* i besplatan. Takođe njegova prednost jeste u jednostavnosti sintakse, lakoći učenja, kao i sve više rastućoj popularnosti i rasprostranjenosti ovog programskog jezika.

Tabela 1. Podaci o konzumu

Mesec	Ukupna potrošnja [MWh]	Standardna devijacija [MWh]	Relativna devijacija [%]
Januar	3657547	534	10,86
Februar	3072340	524	11,47
Mart	2917851	553	14,08
April	2662744	564	15,26
Maj	2671617	571	15,90
Jun	2491853	605	17,49



Slika 1. Prosečan dan potrošnje za januar 2019.



Slika 2. Prosečan dan potrošnje za jun 2019.

Na osnovu raspoloživih podataka o ukupnom konzumu u Srbiji za period januar-jun 2019. godine sa satnom rezolucijom formirana je Tabela 1. Tabela 1 prikazuje ukupnu potrošnju po mesecima, kao i standardnu i relativnu standardnu devijaciju kao statističku meru uniformnosti potrošnje. Standardna devijacija skupa se računa kao:

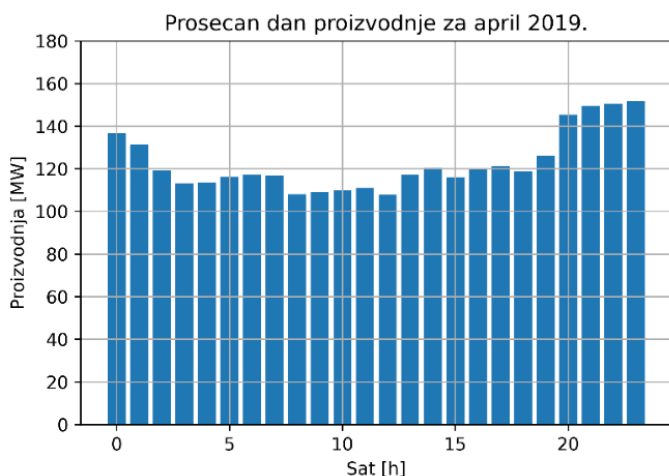
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

gde je N broj elemenata skupa (u ovom slučaju broj sati u posmatranom mesecu), a μ aritmetička sredina niza (srednja satna potrošnja u posmatranom mesecu). Na Slikama 1 i 2 prikazani su reprezentativno prosečni dani potrošnje u mesecu sa maksimumom i minimumom dnevnog konzuma. Vidimo da je oblik grafika potrošnje sličan u svakom mesecu; maksimum dostiže u večernjim satima (19-21h), a minimum je u ranim jutarnjim časovima (oko 4:00h), što je i za očekivati s obzirom na navike potrošača.

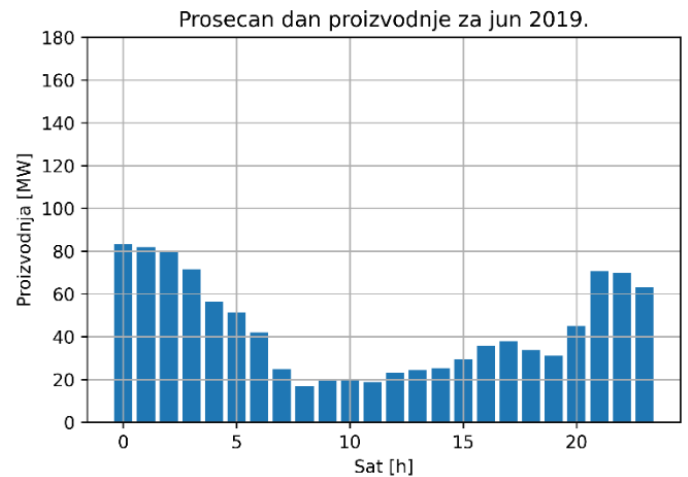
Tabela 2 predstavlja ukupne mesečne proizvodnje, kao i maksimalne i srednje vrednosti snaga četiri izgrađena vetroparka u Srbiji. Najveća proizvodnja iz vetroagregata bila je u aprilu, dok je najmanje proizvedeno u junu. U skladu sa tim na Slikama 3. i 4. prikazani su prosečni dani sumarne proizvodnje vetroparkova za ova dva meseca. Može se uočiti da je proizvodnja u proseku veća noću, što se i slaže sa činjenicom da je prosečna brzina vetra noću veća, te otuda i veća angažovanost vetroagregata. Ovakav dnevni profil brzine vetra nije nužno povoljan sa aspekta korelisanosti proizvodnje i potrošnje, jer se najveća potrošnja javlja danju, a noću je snižena. To dalje implicira na nemogućnost vetroenergije da pretežno samostalno (bez mnogo udela energije iz mreže ili velikih skladišnih kapaciteta) napaja određenu potrošnju.

Tabela 2. Ukupna proizvodnja iz vetrolektrana

Mesec	Ukupna proizvodnja [MWh]	Maksimalna snaga [MW]	Srednja snaga [MW]
Januar	53179	223	71,477
Februar	57447	249	85,487
Mart	67887	278	91,246
April	88428	293	122,814
Maj	55439	284	74,515
Jun	31680	241	44,0



Slika 3. Prosečan dan proizvodnje vetroparkova za april 2019.



Slika 4. Prosečan dan proizvodnje vetroparkova za jun 2019.

III FORMIRANJE MIKROMREŽE

Problem kojim se rad u osnovi bavi jeste koji deo konzuma Srbije može da se napaja iz postojećih instalisanih kapaciteta vetrolektrana, uz uslov neprekidnosti napajanja potrošnje. Praktično, koji deo potrošnje Srbije vetrolektrane mogu da zadovolje ako rade u formi mikromreže. Treba analizirati i slučaj kada se dozvoljava da se određena količina energije preuzima iz mreže. U tu svrhu, razvijen je algoritam koji proračunava koliki procenat ukupnog konzuma se može pokriti iz vetroenergije uz određeni procenat učešća energije iz mreže u ukupnom konzumu. Pretpostavlja se da potrošnja u mikromreži ima isti oblik kao ukupan konzum, samo skaliran za određeni procenat.

A Prvi scenario – vetroparkovi i skaliranje konzuma

Svaka satna vrednost konzuma skalirana je koeficijentom k . Razvijeni algoritam traga za maksimalnom vrednošću k takvom da skalirana potrošnja bude najveća moguća, a da nema prekida njenog napajanja. Takođe dodat je i uslov da određeni procenat te ukupne energije bude napajan iz mreže. Ovo predstavlja i optimizacioni problem, jer promenom koeficijenta skaliranja, isti procenat učešća energije predstavlja drugačiju ukupnu energiju nadoknađenu iz mreže. U cilju efikasnosti razvijenog algoritma korišćen je genetički algoritam. U Tabeli 3 su prikazani rezultati analize.

Tabela 3 Rezultati formiranja mikromreže na bazi energije iz vetroparkova

Ukupna potrošnja [MWh]	Učešće energije iz mreže [%]	Koeficijent skaliranja [%]	Vraćeno u mrežu [%]
1,67	5	$9 \cdot 10^{-6}$	99,99955
6005	10	0,03437	98,47333
24923	15	0,14263	94,01656
56146	20	0,32131	87,31374
98069	25	0,56123	79,22614
149390	30	0,85493	70,46440
211374	35	1,20965	61,19481
283417	40	1,62194	51,97101

370025	45	2,11758	42,51963
472619	50	2,70471	33,25683
597902	55	3,42168	24,00790
748459	60	4,28329	15,44219
923975	65	5,28773	8,66141
1136832	70	6,50587	3,67402
1401804	75	8,02225	1,01880

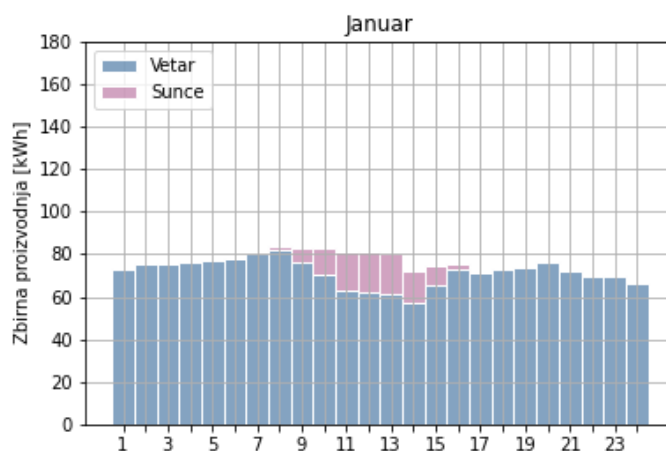
U prvom koloni data je ukupna potrošnja za period januar-jun 2019. koja se može zadovoljiti, uz uslov prikazan u drugoj koloni: koliki deo te ukupne potrošnje dolazi iz mreže. U trećoj koloni dat je koeficijent skaliranja u procentima, koji pokazuje koliki procenat ukupnog konzuma u Srbiji se može napajati pod datim uslovima. Osećaja radi, konzum Južnog Banata odgovara koeficijentu skaliranja $k = 4,36\%$. U poslednjoj, četvrtoj koloni, prikazano je koji deo ukupne energije iz vetroagregata je vraćen u mrežu, tačnije nije predat posmatranoj potrošnji. Rezultati pokazuju da nije moguće da vetroagregati potpuno samostalno napajaju bilo koji skalirani deo konzuma, jer dovoljno je da u jednom satu vetroelektrane ne proizvode energiju, pa da se ne ispuni uslov neprekidnosti napajanja potrošnje. Čak i sa 5% ukupnog učešća energije iz mreže, zanemarljiva je potrošnja koja se može pokriti. Kada 25% ukupne potrošnje se zadovolji iz mreže, vidimo da gotovo 80% proizvodnje vetroagregata se vraća u mrežu, tačnije ne odlazi na pokrivanje potrošnje. Da bi bar približno pola energije iz vetroagregata otišlo na pokrivanje posmatrane potrošnje i u tom smislu bilo iskorišćeno, potrebno je da iz mreže dođe 40% ukupne energije, i u tom slučaju se može pokriti 1.62% ukupnog konzuma u Srbiji. Ovi podaci ukazuju na izrazitu nekorelisanost proizvodnje iz vetroagregata i konzuma, i ukazuje na nemogućnost vetroenergije da pretežno samostalno napaja neki deo konzuma, što je pre svega posledica intermitentnosti proizvodnje iz obnovljivih izvora energije.

B Drugi scenario – vetroparkovi i solarna energija

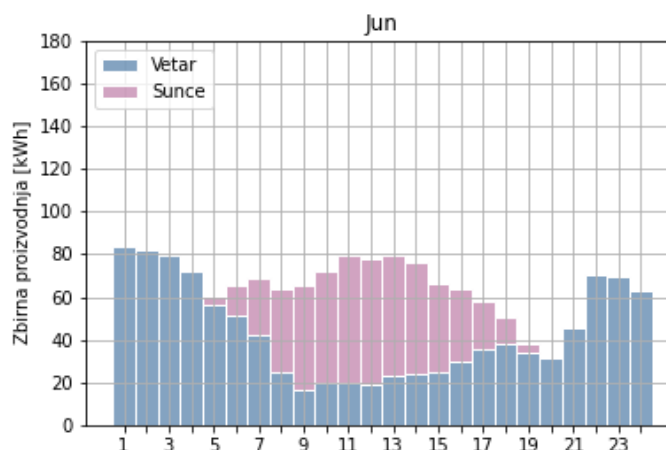
Da bi se popravio potencijal proizvodnje iz vetroparkova, u drugom scenariju se analizira dodavanje kapaciteta proizvodnje iz solarne energije, uz očekivanje da će komplementarna priroda intermitentnosti vetra i sunca doprineti boljoj korelisanosti proizvodnje i potrošnje. Za proračun proizvodnje iz dodatnih solarnih kapaciteta korišćeni su realni podaci o iradijaciji na teritoriji Srbije. U drugom scenariju proizvodnja iz obnovljivih izvora energije će predstavljati zbirnu proizvodnju iz sunca i vetra. Za potrebe analize, pretpostavljeno je da novoinstalirana snaga solarnih panela iznosi 100 MW. U Tabeli 4 i Slikama 5. i 6. su prikazani rezultati obrade podataka u skladu sa prikazom u prvom scenariju. U Tabeli 5 prikazani su rezultati istih proračuna rađenih u Tabeli 3, samo ovaj put je uzeta zbirna proizvodnja vetroagregata i solarnih panela. Primetno je da se sada proračun menja u pravcu bolje korelisanosti potrošnje i proizvodnje za iste odgovarajuće procenat udela energije iz mreže. Na primer, u slučaju kada je zbirna proizvodnja, za 30% učešća energije iz mreže, iskorišćenost proizvodnje iz obnovljivih izvora je 52.5% (47.5% se vraća u mrežu). Kada se posmatra samo proizvodnja iz vetroagregata, za 30% učešća energije iz mreže u potrošnji, iskorišćenost obnovljivih izvora je svega 29.5% (70.5% se vraća u mrežu). To je relativni napredak od 23%. Upravo ovaj primer je grafički prikazan na Slici 7.

Tabela 4 Zbirna mesečna proizvodnja iz vetroelektrana i dodatnih solarnih kapaciteta

Mesec	Ukupna proizvodnja [MWh]	Maksimalna snaga [MW]	Srednja snaga [%]
Januar	56361	223,16	75,75
Februar	63182	272,67	94,02
Mart	76769	297,28	103,18
April	103182	362,40	143,31
Maj	72498	338,19	97,44
Jun	47440	243,29	65,89



Slika 5. Prosečan dan zbirne proizvodnje za januar 2019.



Slika 6. Prosečan dan zbirne proizvodnje za jun 2019

Tabela 5 Rezultati formiranja mikromreže na bazi energije iz vetroparkova i solarne energije

Ukupna potrošnja [MWh]	Učešće energije iz mreže [%]	Koeficijent skaliranja [%]	Vraćeno u mrežu [%]
12692	5	0,07263	97,12538
54246	10	0,31044	88,36010
107942	15	0,61773	78,12496

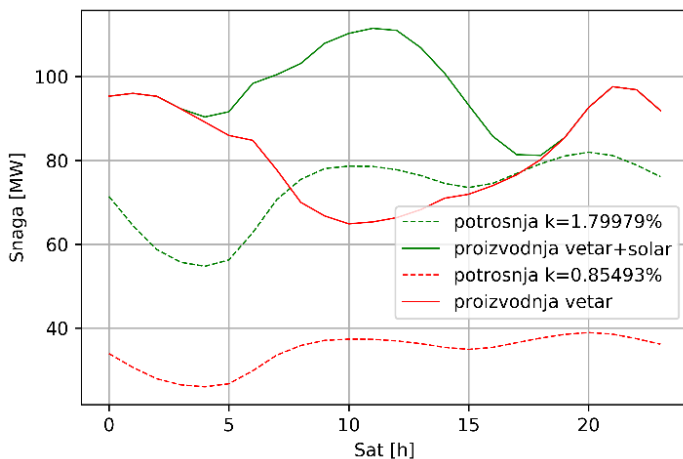
170134	20	0,97364	67,54965
241333	25	1,38111	56,84635
314495	30	1,79979	47,51323
389363	35	2,22825	39,65983
471900	40	2,70059	32,49449
566597	45	3,24253	25,70231
677998	50	3,88005	19,17667
808582	55	4,62736	13,24888
962380	60	5,50752	8,22065
1147065	65	6,56443	4,28185
1375766	70	7,87324	1,59801
1673929	75	9,57957	0,22648

C Treći scenario – vetroparkovi, solarna energija i skladište energije

U trećem scenariju analizirana je mogućnost dodavanja skladišnog sistema komplementarnog analiziranom sistemu sa obnovljivim izvorima energije. Razvijen je optimizacioni algoritam koji za prethodno analiziranu zbirnu proizvodnju iz obnovljivih izvora energije, za različite koeficijente skaliranja potrošnje i različite udele energije iz mreže daje optimalni skladišni kapacitet. Optimalni podrazumeva minimalni mogući tako da nema prekida napajanja i da postoji tačno određeni udeo energije iz mreže. Vrednosti učešća energije iz mreže su odabrane tako da je prikazana i teorijska donja, i praktična gornja granica vrednosti skladišnog kapaciteta.

Tabela 6 Rezultati formiranja mikromreže na bazi energije iz OIE, skaliranog konzuma i skladišnog kapaciteta

Koeficijent skaliranja [%]	Učešće energije iz mreže [%]	Optimalni skladišni kapacitet [MWh]
1	10	248,3
	20	3,4
2	10	3751,4
	20	828,6
	30	62,4
3	10	52364,3
	20	17721
	30	2797,1
	40	164,3
4	10	209629,8
	20	139734,7
	30	69838,1
	40	11401,9
	50	65,4



Slika 7. Poređenje za prosečan dan za period januar-jun

Na primeru prosečnog dana za period januar-jun 2019. prikazanom na Slici 7, jasno se vidi razlika u korelisanosti između režima sa proizvodnjom iz vetroagregata, i režima sa dodatnom solarnom proizvodnjom, za ukupno učešće energije iz mreže u potrošnji od 30%. Pojednostavljeno, zelene linije su međusobno sličnijeg oblika nego crvene. To znači da su razlike u proizvodnji i potrošnji u toku vremena manje, pa je i manja potreba za preuzimanjem energije iz mreže i veća je iskorišćenost obnovljivih izvora energije. Da bi se ovaj zaključak i matematički pokazao, biće izračunat faktor korelisanosti potrošnje i proizvodnje u ova dva slučaja. Korelisanost proizvodnje i potrošnje je faktor od bitnog uticaja na potencijal obnovljivih izvora energije da što efikasnije napajaju određenu potrošnju. Korelisanost proizvodnje i potrošnje može se definisati kao:

$$K = \frac{1}{N} \frac{\sum_{j=1}^N PO_j * PR_j}{PO_{avg} * PR_{avg}} \quad (2)$$

gde je PO_j satna potrošnja, a PR_j satna proizvodnja u satu j . N predstavlja ukupan broj sati posmatranog perioda.

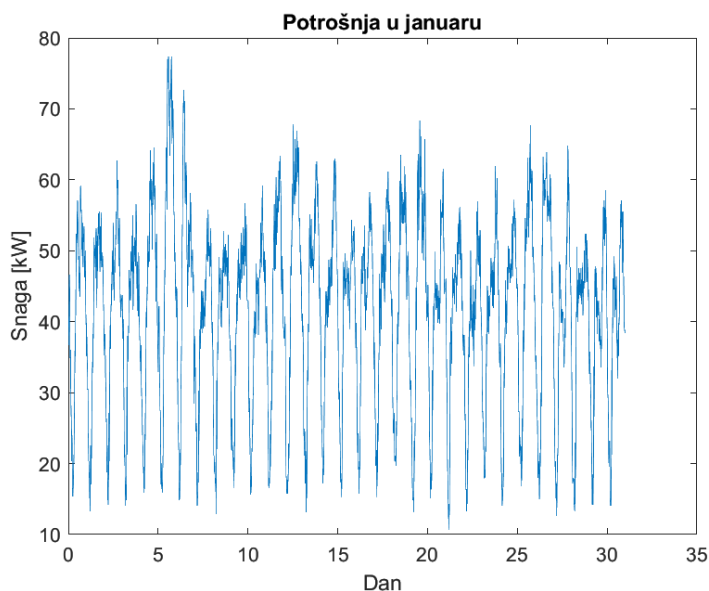
Za slučaj prikazan na Slici 7, faktor korelisanosti za proizvodnju iz vetrogeneratora iznosi $K_v = 0.9940$, dok je sa zbirnom proizvodnjom korelisanost zaista veća, $K_{v+s} = 1.0018$.

Slovenija je 2020. godine pustila u rad skladište električne energije proizvođača Tesla u vidu litijum-jonskih baterija skladišnog kapaciteta 22MWh i cene 16.5 miliona \$. Očigledno da su skladišni sistemi veoma skupi, posebno oni litijum-jonskog tipa koji su i najpogodniji za ovu primenu, te je njihov kapacitet u tom pogledu i ograničen. Stoga ovakva baza podataka može biti korisna projektantima mikromreže, jer ukazuje na to kakva potrošnja se može pokriti sa zdatom proizvodnjom i koliko efikasno za određene skladišne kapacitete. Očigledno da se svi režimi rada koji zahtevaju stotine ili hiljade MWh skladišnog kapaciteta u startu ne trebaju uzimati u razmatranje.

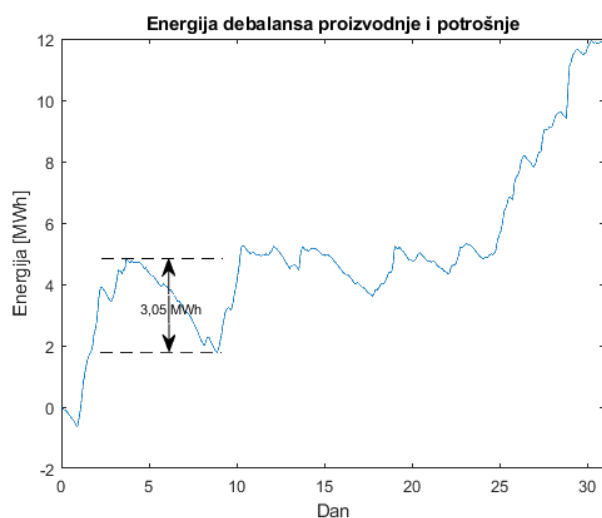
IV IZOLOVANA MIKROMREŽA

U ovom poglavlju daje se realni primer mikromreže sa hibridnim sistemom: vetroelektrana, solarna elektrana i skladište energije (baterije). U cilju formiranja mikromreže koja neće biti povezana sa ostalim delom elektroenergetskog sistema, uzet je u razmatranje deo karaktersitičnog konzuma. Raspolaže se sa desetominutnim podacima potrošnje za jednu godinu. Na osnovu analize podataka zaključuje se da se najveća mesečna potrošnja javlja u januaru. Maksimalna snaga potrošnje je 77,4 kW, dok srednja dnevna potrošnja u januaru iznosi 1000 kWh, a u avgustu

781,5 kWh. Ovakav konzum se pokriva iz solarne elektrane snage 512 kW i vetroelektrane snage 350 kW. Ovi instalisani kapaciteti su odabrani u cilju što boljeg popunjavanja dijagrama opterećenja konzuma, to jest što bolje korelisanosti. Na Slici 8 može se videti dijagram potrošnje za januar (najveća potrošnja).



Slika 8. Potrošnja u januaru

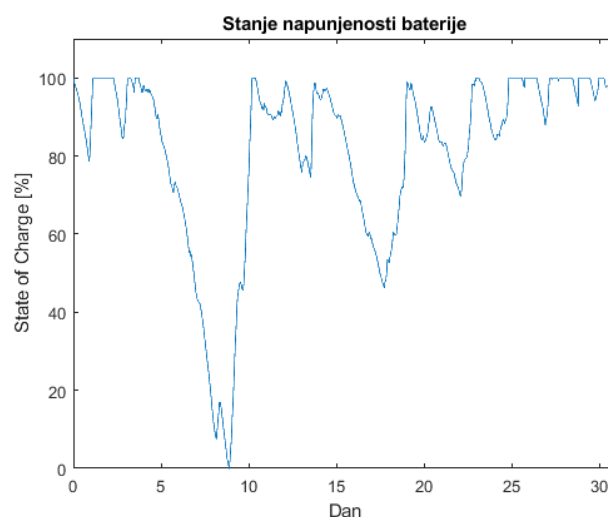


Slika 9. Kumulativna energija debalansa u avgustu

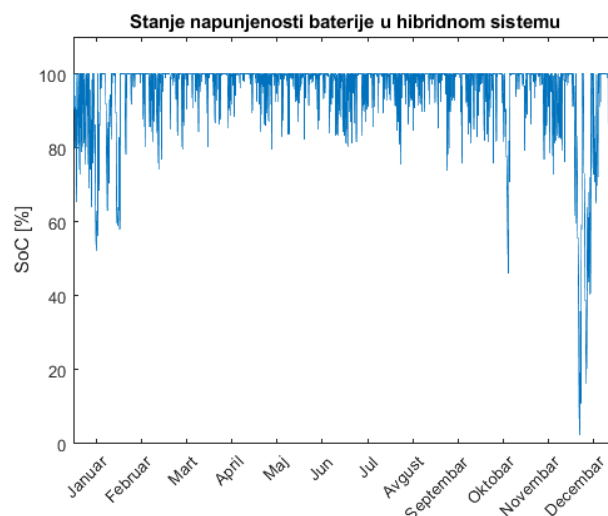
Posmatranjem grafika kumulativne energije debalansa (razlika proizvedene i potrošene energije, kumulativno za avgust) na Slici 9, dolazimo do zaključka da je potrebni kapacitet baterije 3,05 MWh. Budući da je proizvodnja veća od potrošnje, na kraju meseca imamo višak energije u iznosu te razlike (oko 12 MWh), i ta energija se neće iskoristiti. Potrebni kapacitet baterije je jednak najvećoj razlici lokalnog maksimuma i minimuma (koji se javlja nakon tog maksimuma), između kojih energija opada (potrošnja je veća od proizvodnje). U tom delu meseca baterija nadoknađuje debalans energije. Potvrda da je upravo to minimalni granični kapacitet može se videti na sledećem grafiku

(Slika 10). Slika 10 prikazuje stanje napunjenosti baterije (engl. SoC – *State of Charge*) kapaciteta 3,05 MWh. Može se uočiti da je u periodu od 4. do 9. avgusta generalno potrošnja veća od proizvodnje, pa se baterija prazni. Na kraju baterija se potpuno prazni u jednoj tački (jednom desetominutnom intervalu) i nakon toga vraća svoje stanje na maksimum.

Zaključak je da „predimenzionisanje“ proizvodnih jedinica mikromreže vodi do smanjenja potrebnog kapaciteta baterije, što navodi na optimalan odabir skladišnog i proizvodnog kapaciteta po ekonomskom kriterijumu. U ovom radu odabir je vršen po kriterijumu besprekidnosti napajanja. Na kraju, Slika 11 prikazuje stanje napunjenosti baterije za hibridni sistem tokom cele godine. Na ovom grafiku može se uočiti da SoC dostiže minimum u mesecima sa najvećom potrošnjom a najmanjom proizvodnjom, u zimskom periodu.



Slika 10. Stanje napunjenosti baterije graničnog kapaciteta u avgustu



Slika 11. Stanje napunjenosti baterije u hibridnom sistemu tokom cele godine

V ZAKLJUČAK

Intermitentnost obnovljivih izvora energije je glavna prepreka njihovom potencijalu da što više samostalno napajaju potrošače električne energije. Pokazano je da se komplementarnim odabirom proizvodnje iz vetroagregata i solarnih panela postiže veća korelisanost sa konzumom, i samim tim povećava iskorišćenost energije iz obnovljivih izvora energije.

U ovom radu analitički je obrađena velika baza podataka iz JP Elektroprivreda Srbije i prikazan je potencijal instalisanih vetroagregata da samostalno napajaju deo konzuma u Banatu. Sagledavajući realne podatke vezane za potencijal energije sunca na tom području formirana je komplementarna proizvodnja iz obnovljivih izvora energije. Cilj komplementarne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije je postizanje što bolje korelisanosti dijagrama. Za elektroenergetski sistem od izuzetne važnosti je pravilan odabir skladišnog kapaciteta. Trenutno baterije su jedan od najskupljih delova sistema, kapacitet veći od optimalnog donosi značajno veće investicione troškove. Prikazana metodologija za obradu podatka u vidu skaliranog konzuma i proizvodnje solarnih panela i vetroagregata za određeni vremenski period daje vrednost kapaciteta baterije tako da ona bude maksimalno iskorišćena, a da sistem uvek radi u optimalnom stanju sa minimalnim učešćem energije iz mreže.

Prikazani podaci i analize predstavljaju dobre inicijalne pretpostavke i orjentacione vrednosti pri dimenzionisanju mikromreže sa obnovljivim izvorima energije. Dalja istraživanja biće usmerena u cilju sagledavanja ekonomskih pokazatelja, proračuna tokova snaga i minimizaciji gubitaka i padova napona u formiranoj mikromreži.

LITERATURA

- [1] Trivunac, M. Plan razvoja prenosnog Sistema Republike Srbije za period 2017.-2026. (2031.), AD Elektromreža Srbije, Novembar 2016.
- [2] Geng, S., Vrakopoulou, M., Hiskens, I.A. Chance-constrained optimal capacity design for a renewable-only islanded microgrid, *Electric Power Systems Research*, Vol. 108, 106564, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106564>
- [3] Contreras, S., Cortes, C., Myrzik, J. Probabilistic multi-objective microgrid planning methodology for optimizing the ancillary services provision, *Electric Power Systems Research*, Vol. 189, 106633, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106633>
- [4] Sanchez, V., Ramirez, J., Arriaga, G. Optimal sizing of a hybrid renewable system, in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, 14-17. March 2010. <https://doi.org/10.1109/icit.2010.5472544>
- [5] Zhou, X., Guo, T., Ma, Y. An overview on microgrid technology, in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, China, 2-5. August 2015. <https://doi.org/10.1109/icma.2015.7237460>
- [6] Masters G.M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [7] Khalil, F.A., Anwar, S., Asif, M., ul Haq, S., Ahmad, N., Ashraf, M., Kamran, M., Khan, A., Arshad, M. Energy management strategy for integrating photovoltaic energy in AC microgrid, *Journal of Renewable Sustainable Energy*, Vol. 10, 065102, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5022507>
- [8] Smil, V. *Energy and Civilization*, MIT Press, 2018.
- [9] Yergin, D. *The Quest: Energy, Security, and the remaking of the modern world*, Penguin Books, 2012.
- [10] Hatziargyriou, N., Asano, H., Irvani, R., Marnay, C. *Microgrids*, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, Issue 4, pp.78-94, 2007.
- [11] Denholm, P., Ela, E., Kirby, B., Milligan, M. The role of energy storage with renewable electricity generation, *Technical Report*, National Renewable Energy Laboratory, 2010. <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>
- [12] Koutsoyopoulos, H., Hatzi, V., Tassioulas, L. Optimal energy storage control policies for the smart power grid, in *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Brussels, Belgium, pp. 475-480, 17-20. October 2011. <https://doi.org/10.1109/smartgridcomm.2011.6102369>

AUTORI

Vladimir Antonijević, mast. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet, antonijevic@etf.rs

Lazar Mladenović, mast. inž. el. i rač., Elektroenergetski koordinacioni centar d.o.o. - EKC, lazarmladenovic@ekc-ltd.com

dr Goran Dobrić - docent, Elektrotehnički fakultet - dobrić@etf.rs

dr Mileta Žarković - docent, Elektrotehnički fakultet - mileta@etf.rs