

Uslovi razvoja hibridne energetske mikromreže u regionu Južnog Banata primenom obnovljivih izvora energije i skladištenja toplote i biogasa

Dorđe Lazović, Matej Mićović, Miloš Stojanović,
Željko Đurišić

Katedra za elektroenergetske sisteme

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

lazovic@etf.rs; micovicmatej@gmail.com;
stojanovic.milos1996@gmail.com; djurisic@etf.rs

Milica Aščerić

Go2Power

Beograd, Srbija

milica.asceric@go2power.eu

Sažetak—U ovom radu je prikazan model energetske samoodržive mikromreže za naselje Kačarevo u regionu Južnog Banata. Prikazana je struktura i razvijen je matematički model za dimenzionisanje kapaciteta za proizvodnju i skladištenje energije u mikromreži u cilju minimizacije troškova proizvodnje električne i toplotne energije iz resursa obnovljivih izvora energije (OIE) koje čine solarna elektrana (SE), vetroelektrana (VE) i biogazna elektrana. Predviđeno je i centralno skladište tople vode za potrebe snabdevanja potrošača sanitarne tople vode i grejanja domaćinstava zimi. Za procenu potrošnje električne energije korišćeni su realni merni podaci iz TS Kačarevo. U rezultatima su prikazane dobijene instalisane snage elektrana, njihovi profili proizvodnje, razmena energije sa mrežom, promena temperature tople vode u rezervoaru kao i godišnji bilans toplotne i električne energije unutar mikromreže.

Ključne riječi—centralizovano skladište tople vode; optimizacija; biogazna elektrana; mikromreža; OIE

I. UVOD

Iscrpljenost fosilnih goriva i problemi ekološkog zagađenja izazvanog njihovim sagorevanjem su uzrokovali energetske tranzicije globalnog energetskeg sistema. Energetska nezavisnost i ekološka neutralnost predstavljaju glavni strateški cilj tranzicije svakog energetskeg sistema. Razvoj energetske samoodržive mikromreže predstavlja jedan od pristupa razvoju energetske nezavisnog sistema koji se bazira na decentralizovanoj proizvodnji električne i toplotne energije u skladu sa potrebama lokalne potrošnje. U ovom radu analizirano je naselje Kačarevo u Južnom Banatu kao fizički sistem koji je potrebno energetske obezbediti iz lokalne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije. Za procenu energetske potrebe ovog naselja korišćeni su realni podaci o potrošnji električne energije iz napojne transformatorske stanice 110/20 kV sa satnom rezolucijom zapisa. Energetske potrebe za toplotnom energijom su procenjene na osnovu broja domaćinstava i tipičnih potreba. S obzirom na to da se ovo naselje nalazi u regionu sa dobrim potencijalom energije vetra i poljoprivredne biomase, kao primarni izvori energije su pretpostavljeni: vetar, solarno zračenje i biomasa.

Vetroelektrana (VE) je pretpostavljena kao centralizovani izvor koji je lociran van naselja, na prihvatljivoj udaljenosti, a njen priključak je predviđen na postojeći srednjenaponski 20 kV fider. Proizvodnja električne energije iz solarnog zračenja je predviđena da bude distribuirana izgradnjom fotonaponskih (PV) panela po krovovima objekata u ovom naselju. Proizvodnja iz biomase je predviđena da bude realizovana kroz lokalnu proizvodnju biogasa koji bi napajao pogonske SUS motore za proizvodnju električne i toplotne energije. Njen priključak je predviđen na srednjenaponsku 20 kV mrežu. U radu je razvijen matematički model za optimizaciju kapaciteta proizvodnih jedinica i sistema za skladištenje tople vode i biogasa. Za optimizaciju su korišćeni realni desetominutni merni podaci o brzini vetra na visini od 60 m i podaci o insolaciji koji su izmereni za višegodišnji period u ciljnom regionu.

II. ESTIMACIJA ENERGETSKIH PARAMETARA I KOMPONENTE ENERGETSKI SAMOODRŽIVE MIKROMREŽE

A. Idejno rešenje za ekološki održivu mikromrežu

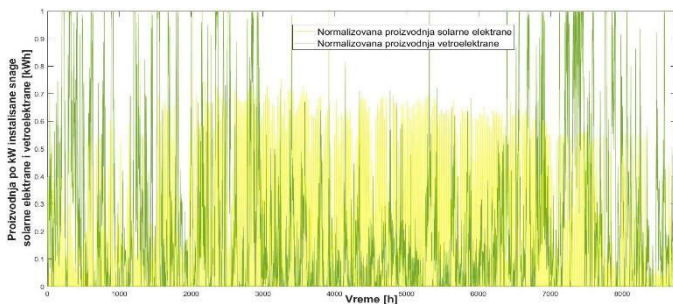
S obzirom na to da se ovo naselje nalazi u regionu sa dobrim potencijalom energije vetra i poljoprivredne biomase, kao primarni izvori energije su pretpostavljeni: vetar, solarno zračenje i biomasa. Pored proizvodnih jedinica, zbog intermitentnosti i neupravljivosti proizvodnje VE i SE, potrebno je predvideti energetska skladišta. U sistemu je predviđeno centralizovano skladištenje tople vode. Pretpostavljeno je da sva domaćinstva budu povezana na toplovodni sistem koji će obezbeđivati snabdevanje toplom vodom domaćinstava. Unutar domaćinstava je pretpostavljeno da se nalaze klasični električni bojleri koji će po potrebi dogrevati vodu. Topla voda će biti korišćena za grejanje prostorija i za rad sanitarnih uređaja u svim domaćinstvima. Biogazna elektrana (BE) će obezbeđivati nedostajuću električnu energiju i po potrebi dogrevati vodu u centralnom rezervoaru.

B. Fotonaponska elektrana

Fotonaponski sistemi su predviđeni da budu postavljeni na krovovima objekata domaćinstava. Za procenu proizvodnje električne energije iz SE korišćen je profesionalni softverski alat PVsyst u kojem su učitani mereni desetominutni podaci solarne iradijacije koji su sprovedeni u blizini naselja Kačarevo.

C. Vetrolektrana

Za kreiranje dijagrama proizvodnje VE korišćeni su mereni višegodišnji desetominutni podaci o brzini vetra u blizini naselja Kačarevo koji su mereni na više mernih visina. Usvojena vetroturbina je instalisane snage 500kW, proizvođača Vestas, tip V39. Na Sl. 1 je prikazana proizvodnja po kW instalisane snage solarne elektrane i vetrolektrane.



Slika 1. Proizvodnja po kW instalisane snage solarne i vetrolektrane

D. Biogasna elektrana

VE i SE su varijabilni izvori energije čija se proizvodnja ne može planirati. Da bi mikromreža mogla stabilno funkcionisati neophodno je predvideti i upravljive OIE. U ciljnom regionu pogodno je izgraditi BE, s obzirom na raspoloživi resurs biomase. BE ujedno proizvode i sagorevaju biogas. Dobijeni biogas se zatim uvodi u SUS motor, koji zatim pokreće sinhroni generator koji vrši proizvodnju električne energije [1]. Važno je istaći da su investicioni i eksploatacioni troškovi BE relativno visoki. Primera radi, za BE snage 1MWe, potrebno je izdvojiti oko 3-3.5 miliona eura kao vrednost investicije, dok su eksploatacioni troškovi od 600000 do 1000000 eura. Ovakva elektrana godišnje može proizvesti oko 8 000 MWh električne energije i 8 700 MWh toplotne energije. U Srbiji su u 2019. godini u pogonu bila 22 biogasna postrojenja ukupne instalisane snage 21.21MW [2].

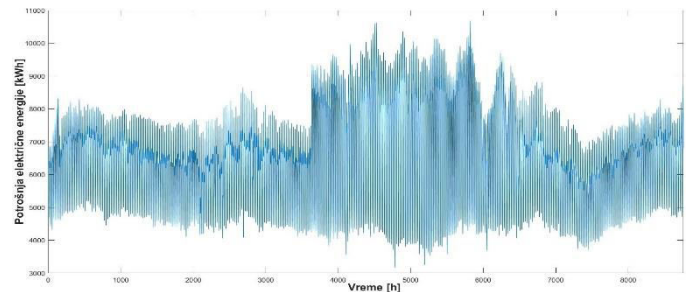
E. Rezervoar za skladištenje tople vode

Rezervoar bi bio ukopan u zemlju i smešten u blizini BE tako da bi koristio otpadnu toplotu iz proizvodnje električne energije u ovoj elektrani. Rezervoar tople vode bi, pored toplotnog izmenjivača, sadržao i električne grejače na kojima bi se trošili viškovi proizvedene električne energije iz VE i SE. Usvojeno je da je u svakom satu temperatura tople vode unutar rezervoara u opsegu od 80°C do 90°C. Rezervoar se po potrebi dogreva tako da se u svakom satu temperatura vode održava u definisanom opsegu. Rezervoar je sfernog oblika, ukopan je u zemlju i toplotno izolovan. Pretpostavljena je ista temperatura vode po celoj zapremini rezervoara, sa istom uniformnom raspodelom gubitaka u svim pravcima i sa koeficijentom prenosa toplote od 0.702W/m²K [3]. Predviđeno je da se na godišnjem nivou koristi toplotna energija iz rezervoara za

potrebe snabdevanja sanitarnom toplom vodom i grejanje domaćinstava tokom zimskih meseci.

F. Potrošnja električne energije

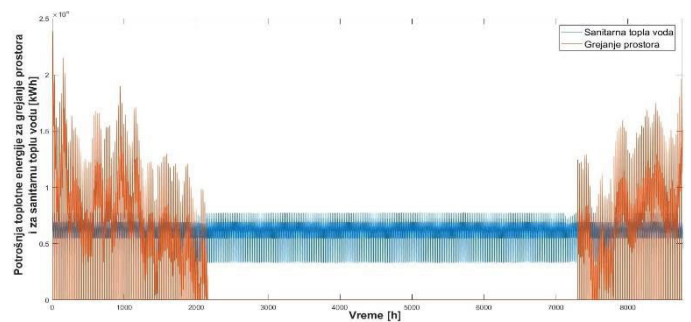
Za potrebe generisanja satnih vrednosti potrošnje električne energije, korišćeni su mereni podaci iz TS Kačarevo 110/21/10.5 kV, instalisane snage 31.5 MVA. Merene vrednosti su redukovane za električnu energiju koja se troši na grejanje tokom zimskih meseci i za pripremu sanitarne tople vode, uz uvažavanje faktora jednovremenosti domaćinstava. Pretpostavljeno je da su sva domaćinstva opremljena klima uređajima, te je izvršen proračun potrebne električne energije koju treba dodati ukupnim satnim vrednostima na račun hlađenja domaćinstava leti. Na Sl. 2 je prikazana potrošnja električne energije posmatrane regije Južnog Banata.



Slika 2. Potrošnja električne energije posmatranog regiona Južnog Banata

G. Potrošnja toplotne energije

Potrebe za toplotnom energijom uslovljene su korišćenjem sanitarne tople vode i energijom potrebnom za grejanje domaćinstava. Za svih 5000 domaćinstava proračunate su ukupne vrednosti potrebne toplotne energije za grejanje prostora, na satnom nivou u zimskim mesecima, prema ASHRAE priručniku [4]. Metodologija i parametri koji utiču na proračun vrednosti energije za grejanje prostora, opisani su u radu [5]. Toplotna provodnost zidova je 0.833W/m²K, a prozora 3.19W/m²K [4]. Unutrašnja temperatura je 21°C. Vrednosti korišćene za formiranje dijagrama potrošnje sanitarne tople vode su preuzete iz rada [5], u kojem su iskorišćene merene satne vrednosti utrošene toplotne energije domaćinstava priključenih na gradske toplovođe u Hrvatskoj [6]. U ciljnom regionu prosečne porodice su tročlane, te je ukupna dnevna potreba za sanitarnom toplom vodom svakog od domaćinstava 120 l, odnosno 40l po članu domaćinstva [7] na temperaturi od 50°C [8]. Tako dobijeni satni podaci su umnoženi sa 5000, odnosno sa ukupnim brojem domaćinstava. Na Sl. 3 je prikazana potrošnja toplotne energije za sanitarnu toplu vodu i za grejanje prostora svih domaćinstava.



Slika 3. Potrošnja toplotne energije

III. MATEMATIČKI MODEL ZA OPTIMIZACIJU KAPACITETA RESURSA ENERGETSKI SAMOODRŽIVE MIKROMREŽE

Ulazne veličine:

- $i, \Delta t$ - vremenski indeks i trajanje vremenskog intervala [h]
 $c_{pv}^{inv}, c_{wind}^{inv}, c_{bio}^{inv}, c_{tan k}^{inv}$ - spec. investicioni trošak [€/MW] u: SE, VE, BE i rezervoar za skladištenje tople vode, respektivno
 $c_{pv}^{exp}, c_{wind}^{exp}, c_{tan k}^{exp}$ - godišnji eksploatacioni trošak: SE, VE i rezervoara za skladištenje tople vode, respektivno, izražen u [r.j.] u odnosu na odgovarajući investicioni trošak
 $c_{bio}^{exp, fix}, c_{bio}^{exp, var}$ - fiskalni godišnji eksploatacioni trošak BE [€] i spec. trošak biogasnog goriva [€/MWh], respektivno
 $P_{pv}^{(1)}, P_{wind}^{(1)}, P_{bio}^{(1)}$ - instalirana snaga bloka: SE, VE i BE [MW]
 $P_{pv, i}, P_{wind, i}$ - proizvodnja aktivne snage bloka SE i VE [MW]
 $P_{dem, i}$ - potrošnja aktivne snage konzuma tokom intervala i [MW]
 W_{bio} - energetska vrednost biogasa koja može biti proizvedena tokom godine [MWh]
 S_{sub}, W_{grid} - maksimalna aktivna snaga preuzeta iz DM [MW] i maksimalna razmena el. en. sa DM [MWh]
 $Q_{heat, i}$ - prosečna snaga potrošnje topl.en. za zagrevanje objekta tokom interval i [MW]
 $V_{water, i}$ - zapremina utrošene tople vode za sanitarne potrebe [m³]
 \bar{P}_{heat} - naznačena snaga grejača za zagrevanje tople vode [MW]
 c_{water} - specifični toplotni kapacitet vode [kWh/kg·K]
 V_{tank}, S_{tank} - zapremina [m³] i površina omotača [m²] rezervoara za skladištenje tople vode
 α - koef. odvođenja toplote omotača rezervoara [MW/m²·K]
 $\underline{\theta}_{tank}, \bar{\theta}_{tank}$ - min. i maks. temperatura vode u rezervoaru [°C]

Promenljive stanja i zavisne promenljive:

- N_{pv}, N_{wind} - optimalan broj blokova PV sistema i VE
 $P_{heat, i}$ - snaga zagrevanja rezervoara pomoću grejača tokom intervala i [MW]
 $P_{to grid, i}, P_{from grid, i}$ - snaga preuzeta iz DM i snaga predana DM [MW]
 t_i, f_i - binarne promenljive koje definišu smer snage razmene sa DM tokom intervala i ($t_i=1$ – ka mreži, $f_i=1$ – od mreže)
 $P_{curt, i}$ - odsečena snaga proizvodnje iz vetra i sunca [MW]
 $P_{bio, i}$ - proizvodnja BE tokom intervala i [MW]
 $\Delta Q_{tank, i}$ - promena prosečne toplotne snage u rezervoaru [MW]
 $Q_{hot_w, i}, Q_{cold_w, i}$ - prosečna toplotna snaga utrošene sanitarne tople vode i dodate hladne vode u rezervoar [MW]
 $Q_{curt, i}$ - odsečena toplotna snaga proizvodnje BE [MW]
 $\theta_{tank, i}$ - temperatura vode u rezervoaru na kraju intervala i [°C]

Matematički model kojim će se opisati promena svih relevantnih fizičkih veličina za sagledavanje potrebnih

kapaciteta energetskih resursa neophodnih za samoodrživ rad mikromreže baziran je na linearnom programiranju [9].

Kriterijumska funkcija u predloženom matematičkom modelu svodi se na minimizaciju troškova proizvodnje 1 MWh energije, što se svodi na minimizaciju ukupnih (investicionih i eksploatacionih) troškova resursa za proizvodnju i skladištenje električne i toplotne energije svedenih na početni trenutak eksploatacije projekta:

$$\min \{ T_{pv} + T_{wind} + T_{biogas} + T_{tan k} \} \quad (1)$$

Svedeni troškovi SE, kao i VE mogu se iskazati u zavisnosti od broja blokova N_{pv} i N_{wind} jediničnog kapaciteta:

$$T_{pv} = c_{pv}^{inv} P_{pv}^{(1)} N_{pv} \left[1 + c_{pv}^{exp} \cdot PWF \right] \quad (2)$$

$$T_{wind} = c_{wind}^{inv} P_{wind}^{(1)} N_{wind} \left[1 + c_{wind}^{exp} \cdot PWF \right] \quad (3)$$

Svedeni trošak BE računa se na osnovu zbirne instalirane snage svih agregata ovog tipa, kao i fiksnih i varijabilnih eksploatacionih troškova:

$$T_{bio} = c_{bio}^{inv} P_{bio}^{(1)} N_{bio} + \left[c_{bio}^{exp, fix} + c_{tan k}^{exp, var} \cdot P_{bio, i} \cdot \Delta t \right] PWF \quad (4)$$

Na kraju, svedeni trošak rezervoara za skladištenje tople vode iskazan je u funkciji zapremine rezervoara:

$$T_{tan k} = c_{tan k}^{inv} V_{tan k} \left[1 + c_{tan k}^{exp} \cdot PWF \right] \quad (5)$$

U relacijama (2), (3) i (5) usvojeno je da su godišnji eksploatacioni troškovi fiksnih i izraženi kao procentualni deo odgovarajućih investicionih troškova. Koficijent PWF predstavlja faktor anuiteta kojim se perspektivni eksploatacioni troškovi svode na početni trenutak investicije:

$$PWF = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} \quad (6)$$

gde je i interesna stopa, a n životni vek projekta.

A. Ograničenja vezana za tokove električne energije

Balansna jednačina aktivnih snaga podrazumeva jednakost ukupne proizvodnje i bruto potrošnje unutar mikromreže:

$$P_{dem, i} + P_{heat, i} = P_{grid, i} + N_{pv} \cdot P_{pv, i} + N_{wind} \cdot P_{wind, i} + 0.9 \cdot P_{bio, i} - P_{curt, i} \quad (7)$$

U jednačini (7) snaga BE je pomnožena faktorom 0.9 jer 10% od dobijene električne energije ide na sopstvene potrebe elektrane. Proizvodnja BE kada je u pogonu mora biti između tehničkog minimuma jednog agregata (usvojena je vrednost od 30%) i zbirne instalirane snage svih agregata:

$$0.3 P_{bio}^{(1)} \cdot b_i \leq P_{bio, i} \leq P_{bio}^{(1)} N_{bio} \cdot b_i \quad (8)$$

U relaciji (8) promenljiva b_i uzima vrednost 1 ukoliko je bar jedan agregat biogasne elektrane u pogonu, dok uzima vrednost 0 kada nijedan agregat nije sinhronizovan na mrežu što se može javiti u periodu izrazito visoke proizvodnje iz vetra i sunca. Dodatno, proizvedena godišnja električna energija BE može se ograničiti na očekivanu korisnu energetsku vrednost biogasa koji će tokom godine biti proizveden u procesu razgradnje biomase:

$$\sum_{i=1}^{Nt} P_{bio, i} \cdot \Delta t \leq W_{bio} \quad (9)$$

Zbirna instalirana snaga svih lokalno instaliranih PV sistema priključenih na postojeće kućne instalacije objekata, ograničena je brojem objekata (5000) i snagom odobrenog kućnog priključka (17.25 kW):

$$0 \leq P_{pv}^{(1)} \cdot N_{pv} \leq 5000 \cdot 0.0175 \quad (10)$$

Sa druge strane, maksimalna instalisana snaga VE određena je raspoloživošću i potencijalom okolnog prostora za instaliranje vetroagregata (30 MW):

$$0 \leq P_{wind}^{(1)} N_{wind} \leq 30 \quad (11)$$

Električna snaga kojom se dogreva rezervoar usvojeno je da bude kontinualna veličina koja je sa gornje strane ograničena električnom snagom grejača:

$$0 \leq P_{heat,i} \leq \bar{P}_{heat} \quad (12)$$

Kontinualna snaga grejača može se postići napajanjem grejača preko tiristorski kontrolisanog konvertora. Kontinualna promena snage grejača povećava fleksibilnost mikromreže i omogućava pokrivanje debalansa u proizvodnji varijabilnih OIE. U razmatranom modelu usvojeno je da se dodatno napajanje mikromreže može obezbediti iz DM koja bi pružala podršku u tranzijentnim periodima ili havarijskim režimima, kao i u periodima izrazito niske proizvodnje OIE. S tim u vezi, usvojeno je da je ukupna godišnja razmena energije sa DM ograničena na predefinisano vrednost:

$$\sum_{i=1}^{N_t} |P_{grid,i} \cdot \Delta t| \leq W_{grid} \quad (13)$$

Prethodna jednačina može se linearizovati uvođenjem pozitivnih kontinualnih promenljivih $P_{togrid,i}$ i $P_{fromgrid,i}$ koje ukazuju na smer snage razmene sa mrežom, kao i binarnih promenljivih t_i i f_i koje uzimaju vrednosti 1 ukoliko su prethodno navedene snage veće od 0, respektivno. Usvajajući da je maksimalna snaga razmene jednaka nominalnoj snazi priključne TS S_{sub} , izraz (13) se može iskazati preko (14)-(17):

$$0 \leq P_{togrid,i} \leq t_i \cdot S_{sub} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{fromgrid,i} \leq f_i \cdot S_{sub} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{N_t} (P_{togrid,i} + P_{fromgrid,i}) \cdot \Delta t \leq W_{grid} \quad (16)$$

$$0 \leq t_i + f_i \leq 1 \quad (17)$$

Poslednja relacija onemogućava da promenljive $P_{togrid,i}$ i $P_{fromgrid,i}$ istovremeno budu veće od 0. Kumulativna energija razmene mikromreže i nadređene DM na godišnjem horizontu treba da bude jednaka nuli:

$$\sum_{i=1}^{N_t} (P_{togrid,i} - P_{fromgrid,i}) \Delta t = 0 \quad (18)$$

Limitiranje proizvodnje SE i VE se posmatra zbirno i potrebno je kada energija iz ovih izvora nema gde da se plasira:

$$0 \leq P_{curt,i} \leq N_{pv} \cdot P_{pv,i} + N_{wind,i} \cdot P_{wind,i} \quad (19)$$

B. Ograničenja vezana za bilans toplotne energije

Kako bi se odredila promena temperature tople vode u rezervoaru, neophodno je poznavati balans toplotnih energija u određenom vremenskom periodu:

$$(1.08 \cdot 0.75 P_{bio,i} - Q_{curt,i}) + P_{heat,i} - (Q_{hot,w,i} - Q_{cold,w,i}) - Q_{heat,i} - \alpha S_{tank} (\theta_{tank,i} - 15^\circ C) = \Delta Q_{tank,i} \quad (20)$$

Toplotna snaga, odnosno toplotna satna energija koja se proizvede u BE je oko 8% veća od električne energije (faktor 1.08), dok je 25% proizvedene toplotne energije potrebno za sopstvene potrebe elektrane (faktor 0.75). U toplotnoj balansnoj jednačini uvažena je mogućnost redukcije proizvedene toplotne energije iz BE, kao i dogrevanja vode putem električnih grejača. Takođe, uvažena je potrošnja energije na pripremu sanitarne tople vode, grejanje objekata,

kao i gubici u rezervoaru usled odvođenja toplotne ka okolnoj zemlji. Usvojeno je da temperatura okolne zemlje iznosi 15 °C. Deo proizvedene toplotne energije BE može se po potrebi disipirati. Za ovu promenljivu važi:

$$0 \leq Q_{curt,i} \leq 1.08 \cdot 0.75 P_{bio,i} \quad (21)$$

Gubitak energije iz rezervoara prilikom potrošnje sanitarne tople vode zapremine $V_{water,i}$, a uz pretpostavku da je hladna voda koja se dopunjuje prosečne temperature 15°C [10], može se opisati sa:

$$(Q_{hot,w,i} - Q_{cold,w,i}) = 1000 \cdot V_{water,i} \cdot c_{water} (\theta_{tank,i} - 15) \quad (22)$$

Promena temperature tople vode u rezervoaru data je sa:

$$\theta_{tank,i} = \theta_{tank,i-1} + \frac{\Delta Q_{tank,i} \cdot \Delta t}{1000 \cdot V_{tank} \cdot c_{water}} \quad (23)$$

Dodatno, temperatura vode unutar rezervoara uvek mora biti unutar definisanih granica:

$$\underline{\theta}_{tank} \leq \theta_{tank,i} \leq \bar{\theta}_{tank} \quad (24)$$

C. Optimizacioni model

Prethodno opisani matematički model može se primeniti za određivanje optimalnog kapaciteta energetskih resursa za samoodrživ rad mikromreže minimizacijom (1) uz ograničenja (7)-(12), (14)-(21) i (23)-(24). Da bi se zadovoljila matematička forma linearnog programiranja, zapremina rezervoara V_{tank} kao i broj agregata jediničnog kapaciteta BE N_{bio} mora biti unapred poznat. Ukoliko je potrebno sagledati veći broj varijantnih rešenja sa aspekta kapaciteta BE i zapremine skladišta, ove parametre je potrebno varirati sa diskretnim koracima u određenom opsegu. S obzirom na veliku dimenzionalnost optimizacionog problema koji se rešava, u radu je predložena dvokoračna optimizacija. Prvi korak podrazumeva da se optimalno rešenje traži sa dnevnom rezolucijom. U drugom koraku vrši se optimizacija sa manjom vremenskom rezolucijom pri čemu se opseg po instalisanoj snazi SE (14) i VE (15) sužava oko vrednosti koja je dobijena u prvom koraku optimizacije. Na ovaj način se poboljšavaju performanse algoritma uz zadržavanje zahtevanog nivoa tačnosti matematičkog modela.

IV. REZULTATI

Kako bi se testirao predloženi koncept i razvijeni matematički model energetski samoodržive mikromreže, u ovom poglavlju su prikazani rezultati dobijeni simulacijama na osnovu dijagrama proizvodnje varijabilnih OIE i potrošnje električne i toplotne energije, detaljno izloženih u poglavlju II rada. Pregled usvojenih ulaznih parametara dat je u tabeli I. Usvojena je godišnja razmena energije (u oba smera) sa DM od maksimalno 18 GWh, što znači da će oko 15 % električne energije konzuma biti obezbeđeno iz DM u kritičnim vremenskim periodima. Ta energija će biti u potpunosti vraćena DM kada su povoljni uslovi proizvodnje. Očekivana godišnja korisna električna energija koja se može dobiti iz biogazne elektrane iznosi 30 GWh, čime se može podmiriti oko 50% konzuma za električnom energijom. Investicioni i eksploatacioni troškovi predstavljeni u Tabeli I odgovaraju trenutnim uslovima na tržištu OIE u Republici Srbiji.

TABELA I. PREGLED ULAZNIH PARAMETARA

$c_{pv}^{inv}(\text{€/MWp})$	1 000 000	$c_{tank}^{inv}(\text{€/m}^3)$	100
$c_{pv}^{eksp}(\%/god)$	1.5	$c_{tank}^{eksp}(\%/god)$	5
$P_{pv}^{(I)}(\text{MWp})$	0.05	$\alpha(\text{MW}/(\text{m}^2\text{K}))$	$0.7 \cdot 10^{-6}$
$c_{wind}^{inv}(\text{€/MW})$	1 400 000	$\theta_{tank}(\text{°C})$	90
$c_{wind}^{eksp}(\%/god)$	2	$\theta_{tank,0}(\text{°C})$	80
$P_{wind}^{(I)}(\text{MW})$	0.5	$\theta_{tank,0}(\text{°C})$	85
$c_{bio}^{inv}(\text{€/MW})$	3 250 000	$P_{heat}(\text{MW})$	15
$c_{bio}^{eksp,fix}(\text{€/god})$	200 000	$W_{grid}(\text{MWh})$	18 000
$c_{bio}^{eksp,var}(\text{€/MWh})$	25	$S_{sub}(\text{MVA})$	20
$P_{bio}^{(I)}(\text{MW})$	1	$i(\%)$	6
$W_{bio}(\text{MWh})$	30 000	$n(\text{god})$	20
$c_{water}(\text{kWh}/\text{kg K})$	0.00107		

U prvom koraku optimizacije usvojena je vremenska rezolucija od jednog dana, a u drugom od 3h. Ukupan broj nepoznatih promenljivih stanja u drugom slučaju iznosi 32122, dok je ukupan broj ograničenja tipa jednakosti i nejednakosti 29203. Za usvojene ulazne podatke, analize su pokazale da optimizacioni problem ima fizički izvodljivo rešenje ukoliko je zapremina centralnog rezervoara tople vode veća od 6000 m^3 . Kako bi se sagledao širi skup mogućih varijantnih rešenja, rađena je analiza osetljivosti u kojoj je zapremina rezervoara varirana od 6000 do 12000 m^3 (sa korakom od 2000 m^3), a instalisana snaga BE od 4 do 8 MW (sa korakom od 1 MW). Za svaki uređeni par: zapremina rezervoara i instalisana snaga BE, prikazane su optimalne vrednosti ukupnih svedenih troškova (Tabela II). Svedeni trošak projekta je najveći za instalisanu snagu BE od 4 MW, jer se tada javlja potreba za značajnim predimenzionisanjem instalisanih kapaciteta iz OIE. Povećanjem zapremine rezervoara svedeni troškovi opadaju zbog veće termičke inercije skladišta čime se omogućava povećanje instalisane snage VE, a obaranje instalisane snage SE čiji je specifični trošak proizvodnje veći.

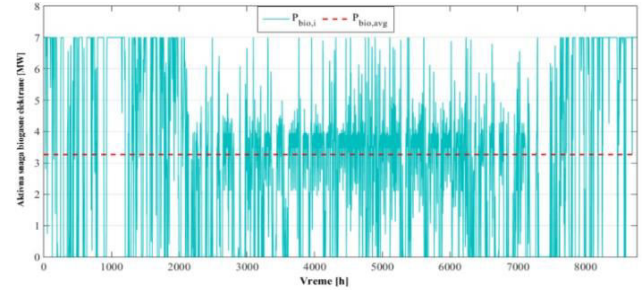
TABELA II. VREDNOSTI SVEDENIH TROŠKOVA ZA SVAKO V_{TANK} I P_{BIO}

	$P_{bio}^{(I)}$ =4 MW	$P_{bio}^{(I)}$ =5 MW	$P_{bio}^{(I)}$ =6 MW	$P_{bio}^{(I)}$ =7 MW	$P_{bio}^{(I)}$ =8MW
$V_{tank}=6000\text{m}^3$	148.13	95.82	92.73	90.13	88.14
$V_{tank}=8000\text{m}^3$	135.41	91.42	91.43	88.93	86.44
$V_{tank}=10000\text{m}^3$	129.61	88.224	87.43	85.33	86.84
$V_{tank}=12000\text{m}^3$	124.31	86.32	85.43	83.55	84.34

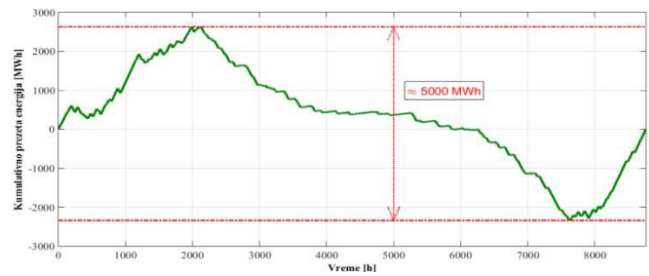
Optimalno rešenje podrazumeva instalisanu snagu BE od 7 MW, kao i toplotno skladište zapremine 12000 m^3 (2400 litara po jednom domaćinstvu). Treba napomenuti da se potrebna zapremina skladišta može linearno smanjiti ukoliko se dozvoli veća dubina hlađenja vode u odnosu na pretpostavljeni limit. Optimalna instalisana snaga VE iznosi 25 MW (god. proizvodnja od oko 50.4 GWh), a SE 5 MWp (god. proizvodnja od oko 1.9 GWh). Za razmatrano rešenje se ne dešava potreba za limitiranjem toplotne i električne snage. Ukupni svedeni trošak projekta iznosi 83.5 miliona eura, pa je svedeni trošak po jednom prosečnom domaćinstvu oko 16700 eura. Svedeni trošak proizvedene električne/toplotne energije (*Levelized Cost of Energy, LCOE*) jednak je 68€/MWh. Dobijeni rezultati idu na stranu sigurnosti s obzirom da je za BE usvojeno da se specifični investicioni troškovi ne menjaju sa naznačenom snagom, kao i da je životni vek projekta 20 god.

Dijagram proizvodnje BE sa trosatnom rezolucijom dat je na Sl. 4. Može se zaključiti da BE ima veću potrebu za proizvodnjom tokom zimskog perioda. Broj sati rada sa

nominalnom snagom iznosi 1791 h godišnje, dok je srednja aktivna snaga proizvodnje 3.27 MW, odnosno oko 28.6 GWh električne energije se godišnje proizvede u biogasnoj elektrani. Integraljenjem razlike profila proizvodnje i prosečne snage biogasne elektrane, može se dobiti dijagram kumulativno preuzete energije iz skladišta biogasa (Sl. 5). Korisna energetska vrednost skladišta biogasa treba da iznosi bar 5000 MWh. Sezonski gledano, skladište biogasa se dominantno prazni tokom zimskog perioda, a puni tokom ostatka godine. Zapremina skladišta može biti redukovana kroz izgradnju proizvodnog sistema biogasa većeg kapaciteta koji bi bio forsiran tokom zimskih meseci.

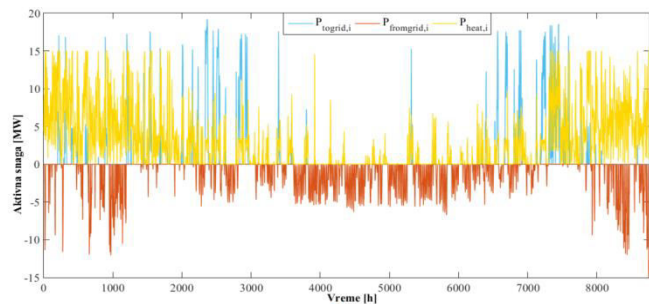


Slika 4. Dijagram proizvodnje biogasne elektrane



Slika 5. Kumulativno preuzeta energetska vrednost biogasa iz skladišta

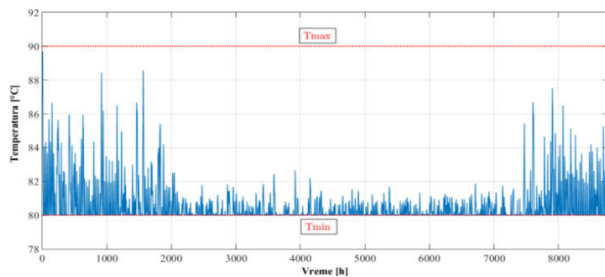
Dijagrami razmene električne energije mikromreže i DM, kao i profil rada električnog grejača u rezervoaru dati su na Sl. 6. Može se zaključiti da se električna energija iz DM preuzima tokom cele godine, dok mikromreža najčešće izvozi energiju u periodima visoke proizvodnje iz vetra. Električni grejač ima važnu ulogu tokom grejne sezone, kada se potrošnja toplotne energije udvostručuje.



Slika 6. Razmena električne energije i profil rada električnog grejača

Promena temperature tople vode u rezervoaru (Sl. 7) posledica je bilansa proizvodnje i potrošnje toplotne energije. Može se zaključiti da je ona uvek u dozvoljenom radnom opsegu. Razlog zbog čega se temperatura vode kreće blizu donje referentne vrednosti je taj što se na ovaj način redukuju gubici usled odvođenja toplotne energije iz rezervoara. Veće fluktuacije

temperature se očekuju u zimskom periodu, kada su potrebe, kao i proizvodnja toplotne energije veća. Efikasnost rezervoara tople vode, koja predstavlja odnos predate i preuzete toplotne energije, na godišnjem nivou iznosi 97.9 %, odnosno svega 2,1% uskladištene toplotne energije se disipira u okolnu zemlju.



Slika 7. Dijagram promene temperature tople vode u rezervoaru

Tabelarni pregled godišnjeg bilansa toplotne i električne energije u razmatranoj mikromreži prikazan je u tabelama III - VI. Gubici energije u mikromreži posledica su sopstvene potrošnje BE, kao i gubitaka usled disipacije toplote u rezervoaru tople vode. Faktor iskorišćenja proizvodnih kapaciteta mikromreže iznosi 26.15%.

TABELA III. GODIŠNJI BILANS ENERGIJE IZRAŽEN U GWh

Proizvedena el. en.	Proizvedena topl. en.	El. en. utrošena za dobijanje topl.en.	Preuzeta el.en. iz DM
84.773	23.169	24.644	9.0

TABELA IV. GODIŠNJI BILANS ENERGIJE IZRAŽEN U GWh

Predata el. en. u DM	Ukupna potrošnja el. en.	Ukupna potrošnja topl.en.
9.0	57.268	46.801

TABELA V. GODIŠNJI BILANS TOPLOTNE ENERGIJE IZRAŽEN U GWh

El.en.predata skladištu tople vode	Topl.en. predata skladištu tople vode	Topl. en. koju je predalo skladište sistemu	Ukupna disipirana topl.en. skladišta
24.644	23.169	46.801	1.012

TABELA VI. GODIŠNJI BILANS PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Tip izvora	Instalisana snaga [MW]	God. proizvodnja el.en. [GWh]	Faktor iskorišćenja kapaciteta [%]
PV	5	5.772	13.18
VE	25	50.397	23.01
VE	7	28.604	46.65
Ukupno	37	84.773	26.15

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je predlog koncepta energetski samoodržive mikromreže za naselje Kačarevo u Južnom Banatu i razvijen je matematički model kojim se vrši optimalno dimenzionisanje proizvodnih i skladišnih resursa potrebnih za snabdevanje potrošača električnom i toplotnom energijom. Osnovne komponente predloženog rešenja su: PV sistemi, VE, BE, rezervoar za skladištenje toplotne energije i električni grejači za zagrevanje vode u rezervoaru. Takođe, usvojeno je da se dodatno napajanje mikromreže može obezbediti iz DM koja bi pružala podršku u tranzijentnim režimima, kao i u periodima izrazito niske proizvodnje iz OIE. Kao rezultat optimizacije dobijaju se optimalni kapaciteti svih proizvodnih jedinica i skladišta, profili optimalne proizvodnje BE i rada električnog grejača, profili preuzete, predate i odsećene električne energije, estimacija viškova toplotne energije i dijagram promene temperature u rezervoaru. Dobijeni rezultati u radu ukazuju na ekonomsku opravdanost projekta sa aspekta

usluga korisnika za snabdevanjem električnom i toplotnom energijom. Raznovrsni energetski portfolio mikromreže omogućava lokalno pokrivanje aktivne snage unutar mikromreže u iznosu od preko 85%, dok je za preostalih 15% korišćena podrška iz javne DM. Optimizovana struktura analizirane mikromreže obezbeđuje da svedeni troškovi energije u ovom sistemu budu 68€/MWh, što je ispod troškova koje domaćinstva trenutno plaćaju za obezbeđivanje energije. Time je pokazana ekonomska opravdanost ovakvog rešenja. Pored toga, redukcija razmene energije sa elektroenergetskim sistemom smanjuje gubitke u prenosu električne energije, povećava *hosting capacity* sistema, i omogućuje JP EPS veći izvoz na tržište električne energije.

LITERATURA

- [1] Biogas Srbija, Republika Srbija Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede "Biogasne elektrane Vodič za investiranje" Avgust 2020.
- [2] Đ. Đatkov, M. Višković, M. Martinov, A. Nesterović, S. Bojić, T. Venus, M. Effenberger "Mala biogas postrojenja" Mart 2021.
- [3] Yakai Bai, Zhifeng Wang, Jianhua Fan, Ming Yang, Xiaoxia Li, Longfei Chen, Guofeng Juan, Junfeng Yang, "Numerical and experimental study of an underground water pit for seasonal heat storage" Renewable Energy, Volume 150, May 2020, Pages 487-508.
- [4] ASHRAE, (1997), *ASHRAE Handbook-Fundamentals*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [5] Miloš Stojanović, Milica Aščerić, Matej Mićović, Đorđe Lazović, Željko Đurišić, "Koncept i matematički model energetski samoodrživog domaćinstva" 21 th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 16-18 March 2022.
- [6] <https://data.open-power-system-data.org/when2heat/2019-08-06>
- [7] Soteris A. Kalogirou Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition, Elsevier2014.
- [8] <https://www.gov.uk/government/publications/measurement-of-domestic-hot-water-consumption-in-dwellings>
- [9] The MOSEK Optimization Tools Version 9.2. Dostupno: <http://www.mosek.com>.
- [10] <https://doi.org/10.3390/w12041049>

ABSTRACT

This paper presents a model and concept of an energy self-sustainable microgrid for the village of Kačarevo in the South Banat region. A mathematical model for dimensioning the energy production and storage capacity in the microgrid is developed in order to minimize the costs of electricity and heat production from renewable energy resources consisting of solar power plants, wind power plants, and biogas power plants. A central hot water storage facility is planned to supply consumers with sanitary hot water and heat households in winter. Real measurement data from TS Kačarevo were used to estimate electricity consumption. The results show the obtained installed power of the power plants, their production profiles, energy exchange with the distributive network, the change in the temperature of the hot water in the tank, and the annual balance of heat and electricity within the microgrid.

CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF A HYBRID ENERGY MICROGRID IN THE SOUTH BANAT REGION USING RENEWABLE ENERGY SOURCES, HEAT AND BIOGAS STORAGE

Đorđe Lazović, Milica Aščerić, Matej Mićović, Miloš Stojanović, Željko Đurišić