

Izračunavanje kapaciteta skladišta energije potrebnog za ostrvski rad mikromreže

Calculation of the Needed Storage Capacity in the Island Microgrid

Vladan Ristić*, Nikola Rajaković**, Dragana Vujanović***

* Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“

** Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu i Savez energetičara

*** Brose d.o.o. Beograd – Palilula

Rezime - Intenzivna integracija obnovljivih izvora energije, poput, primera radi, vetroelektrana i solarnih elektrana, nametnula se kao jedini put prema uspešnoj dekarbonizaciji elektroenergetskog sektora. Međutim, sve veći udeo koji ovakvi izvori zauzimaju u proizvodnim kapacitetima sistema predstavlja izazov kako za operatore tih sistema, tako i za regulatore, pošto varijabilnost njihove proizvodnje u značajnoj meri otežava postizanje ravnoteže između generisane i potrošene energije u sistemima. U nekim situacijama, nesmotrena integracija prevelikih količina varijabilnih izvora može, samim tim, dovesti i do ozbiljnih narušavanja kriterijuma pouzdanog i bezbednog rada sistema. Kako osetljivost potrošača na odstupanja u pokazateljima kvaliteta električne energije konstantno raste, to je jasno da neprekidno napajanje ovih potrošača ne sme biti dovedeno u pitanje ni u kom slučaju. Odatle se može steći utisak o važnosti hitnog rešavanja gorepomenutog problema za pravilno funkcionisanje elektroenergetskih sistema u budućnosti. Kao jedno od perspektivnijih rešenja, sve češće se pominju kapaciteti za skladištenje električne energije. U skladu sa time, ovaj rad se bavi predstavljanjem metodologije za određivanje skladišnog kapaciteta neophodnog za neometani ostrvski rad mikromreže. Za potrebe rada, smatrano je da se konzum mikromreže energijom snabdeva iz distribuiranih izvora energije, pri čemu su izvršeni proračuni obuhvatali jednogodišnji vremenski period. Dobijeni rezultati su prikazani u analitičkom i grafičkom obliku.

Ključne reči - Autonomija mikromreža, Energetski balans, Obnovljivi izvori, Skladištenje energije

Abstract - The only way in which the decarbonisation of the power sector can be successfully achieved is via the extensive integration of renewable sources, such as the wind and solar plants. The integration of ever higher shares of variable renewable energy in the power systems brings challenges to operators and regulators, since the variability of these generation capacities makes the balancing of supply and demand rather difficult. These characteristics of the mentioned sources may lead to severe imbalance in the produced and required energy that can, further, compromise the security of energy supply. The criterion of reliability of supply should be met because of the sensitive loads in grid, making the solving of the power balancing problem one of the most important subjects in the process of integration of renewable sources in the systems, with

the installation of energy storages being one of the most promising solutions. Considering all of that, this paper deals with the development of methodology for determining a storage capacity necessary for the secure operation of the microgrid equipped with the distributed energy sources, working in an island mode. The results obtained from calculations covering a year-long period are shown both in the analytical and the graphical form.

Index Terms - Energy Storage, Microgrid Autonomy, Power Balance, Renewables

I UVOD

Elektroenergetski sistemi su, pod sve jačim uticajem savremenih ekoloških tendencija, pretrpeli značajne promene u prethodnim decenijama. Ove promene se odnose kako na operativni aspekt, tako i na metodologiju u skladu sa kojom se obavlja planiranje njihovog razvoja u narednom periodu. Očigledan primer ovakve evolucije se može uočiti u pritiscima da termoelektrane, koje su ne tako davno sagledavane kao oslonac stabilnog rada sistema, budu što hitnije isključene sa mreže. Opravdanje za ovakve inicijative se nalazi u velikoj koncentraciji gasova koji izazivaju efekte staklene bašte, pri čemu su termoelektrane označene kao jedan od najvećih krivaca za to. Njihov izlazak iz pogona mora biti praćen adekvatnom kompenzacijom u vidu energije kojom će se zadovoljiti potrebe potrošnje. Obnovljivi izvori se sagledavaju kao optimalni odgovor na ovaj zahtev.

Iako je veliki broj studija dokazao pozitivan uticaj ovakvog zaokreta u percepciji sistema za generisanje električne energije, ipak postoje i neke posledice na koje je neophodno ukazati. Jedna od poteškoća vezanih za predstavljenu problematiku i oslanjanje na varijabilne obnovljive izvore je otežano postizanje nivoa pouzdanosti rada elektroenergetskog sistema istovetnog onom koji su garantovale termoelektrane. Empirijskom metodom je pokazano da je ovaj zadatak daleko izazovniji i kompleksniji nego što su predviđale čak i najpesimističnije prognoze. Naime, do takvog zaključka se sa sigurnošću može doći, jer nijedno od predloženih rešenja nije u potpunosti opravdalo ono što se od njega očekivalo. Među najperspektivnijima se, ipak, ističu ona koja obuhvataju ugradnju velikih kapaciteta za skladištenje električne energije. Ovi kapaciteti bi se punili onda kada se u

sistemu pojavi višak energije, to jest, kada su proizvodne mogućnosti raspoloživih izvora veće od potrošnje. Sa druge strane, skladišta bi se praznila onda kada u sistemu dođe do nedostatka energije, čime bi se osigurala njegova izbalansiranost.

Shodno značaju razmatrane tematike, nije iznenađujuće to što se može pronaći veliki broj kvalitetnih naučnih radova posvećenih problemima srodnim onom izloženom u prethodnim pasusima. Neki od ovih radova su temi pristupili isključivo sa stanovišta pouzdanosti [1], dok su drugi bili usmereni ka identifikovanju najefikasnijih načina za upravljanje različitim aspektima rada mikromreža. Od takvih radova treba pomenuti [2], u kome se predlaže vid adaptivnog sekundarnog upravljanja mikromrežama, pri čemu se garantuje njihov ispravan rad u zadatim vremenskim okvirima. Takođe se ne sme izostaviti ni [3], koji prezentuje primenu kvadratnog programiranja radi ekonomske optimizacije plasmana energije iz obnovljivih izvora energije kako napajanje predefinisane potrošnje ne bi bilo ugroženo ni u jednom trenutku. U studiji [4] je predstavljena specijalizovana metoda optimizacije namenjena isključivo mikromrežama kojima se na raspolaganju nalaze veliki kapaciteti za skladištenje električne energije.

Pored toga, mora se naglasiti da se većina razvijenih upravljačkih mehanizama zasniva na principu praćenja stanja napunjenosti sistema za skladištenje i prilagođavanja odgovarajućih kontrolnih radnji vrednosti tog pokazatelja. Takva tehnika je, primera radi, izložena u [5], gde je načinjen prvi korak u ovom smeru, i to uvođenjem koncepta pseudo-stanja napunjenosti pomoću koga su poboljšane performanse mikromreže koja je analizirana. Kao logičan nastavak rada [5], rad [6] opisuje strategiju za integraciju upravljačkih metoda baziranih na praćenju stanja napunjenosti u mikromreže. Kako bi se obezbedila uravnoteženost mikromreža, korišćen je algoritam dinamičkog prosečnog konsenzusa.

Aktuelnost teme simbioze mikromreža i sistema za skladištenje električne energije nesumnjivo potvrđuju i različiti radovi koji potiču iz prethodnih nekoliko godina, zasnovani na određivanju veličine potrebnog kapaciteta ovih sistema. Na primer, [7] pruža sveobuhvatan pregled algoritama pomoću kojih bi se potrebni kapacitet skladišta mogao odrediti. Pritom su uvažavane promene koje se predviđaju za nastupajući period, poput potencijalnih varijacija snage potrošnje, pojeftinjenja sistema za skladištenje ili smanjenja emisije ugljen-dioksida. Rad [8] je posvećen sličnom tipu pregleda, ali uz izmeštanje fokusa na načine formulisanja problema i alate pomoću kojih se brzo i pouzdano može odrediti potreban kapacitet sistema za skladištenje energije. Što se tiče tehnika optimizacije koje bi se mogle primeniti na ovakav vid problema, iskoristivost nekih od njih je ispitana u [9], gde se optimizacija sivih vukova (eng. *Grey Wolf Optimization*) pokazala kao dobra u pogledu efikasnog i preciznog definisanja kapaciteta skladišta. Mora se naglasiti da su pritom ispitivane i neke od opšteprihvaćenih metoda optimizacije, kao što su optimizacija roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*), genetski algoritam (eng. *Genetic Algorithm*) i metoda veštačke kolonije pčela (eng. *Artificial Bee Colony*).

Iako se iscrpni metod pretraživanja, predstavljen u narednim poglavljima ovog rada, može, na prvi pogled, učiniti kao korak unazad u poređenju sa tehnikama objašnjenim u pomenutim radovima, mišljenje autora je da bi se isti pre mogao smatrati svojevrsnom alternativom za neke od njih. Ovo bi posebno

moglo doći do izražaja u slučajevima u kojima je dostupnost ulaznih podataka ograničena, jer izloženi metod zahteva samo karakteristike proizvodnih kapaciteta i konzuma domaćinstava i industrijskih opterećenja u regionu od interesa. To mu daje mogućnost prilagođavanja velikom broju praktičnih situacija i mikromrežama različitih osobina na koje bi se moglo naići. Ovo je postignuto bez izlaganja pouzdanosti ili efikasnosti izvršenih proračuna bilo kakvoj vrsti rizika, što je i potvrđeno rezultatima koji su numerički i grafički prikazani u nastavku ovog rada.

Što se koncepcije rada tiče, u okviru Poglavlja II je dat opis mikromreže koja je korišćena za sve proračune izvršene u toku pripreme rada, pri čemu je posebna pažnja data osobinama proizvodnih kapaciteta i tipova potrošnje prisutnih u mikromreži. Dalje, Poglavlje III sadrži skup ulaznih pretpostavki i podataka potrebnih za izradu ovih proračuna, praćen obrascima koji su pritom korišćeni. Dobijeni rezultati čine srž Poglavlja IV, pri čemu se poslednji deo ovog poglavlja bavi dodatnom analizom osetljivosti. U ovoj analizi je obrađena zavisnost potrebnih kapaciteta sistema za skladištenje energije od instaliranih snaga obnovljivih izvora u mikromreži. Rad se završava Zaključkom u okviru koga su sumirani rezultati rada, još jedanput naglašeni važni teorijski aspekti, istaknute pretpostavke usvojene prilikom proračuna i potvrđene prethodno izvedene konkluzije.

II KARAKTERISTIKE MIKROMREŽE

Osnovnu svrhu ovog rada predstavljala je izrada metodologije namenjene određivanju najmanjeg potrebnog kapaciteta sistema za skladištenje električne energije, lociranog uz mikromrežu koja radi u ostrvskom modu. Da bi se ovaj cilj ostvario, bilo je neophodno, pre svega, načiniti odgovarajuće pretpostavke vezane za karakteristike same mikromreže. Ove karakteristike, ipak, nisu usvajane nasumično, već su bazirane na poznatim osobinama primera postojećih mikromreža. Za početak, smatrano je da se energija za snabdevanje potrošnje mikromreže obezbeđuje iz tri osnovna kapaciteta za generisanje. To su:

- vetroelektrana;
- solarna elektrana;
- elektrana na biomasu.

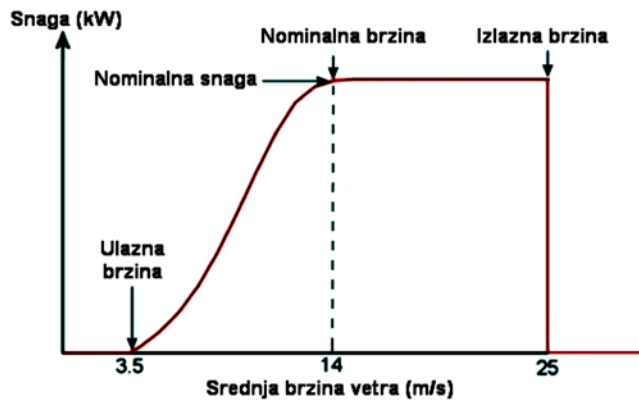
Takođe, uzeto je da se kompletan konzum mikromreže može svrstati u jednu od dve opšte kategorije:

- potrošnja domaćinstava;
- industrijska potrošnja.

Uz to, uvažena je i činjenica da se ne ponaša svaka industrijska potrošnja na identičan način, u skladu sa čime je i industrijska potrošnja mikromreže podeljena u dve potkategorije:

- industrijska potrošnja koja radi u jednoj smeni;
- industrijska potrošnja koja radi u tri smene.

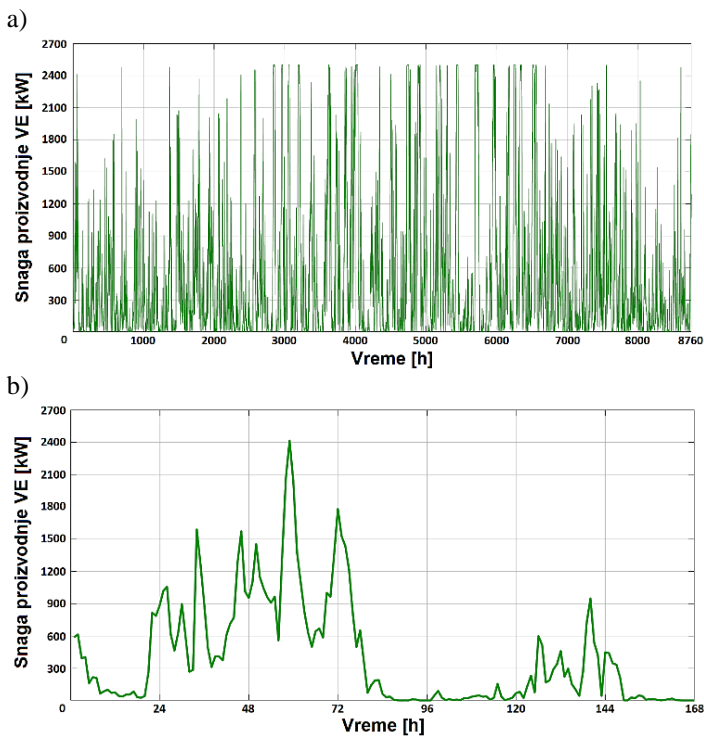
Prvi proizvodni kapacitet u kome će biti reči u sklopu ovog poglavlja je vetroelektrana. U cilju određivanja satnih vrednosti proizvodnje vetroelektrane u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda, bilo je potrebno definisati satne vrednosti brzine vetra na području na kome je pretpostavljeno da se čitava mikromreža nalazi. Pojašnjenje povezanosti trenutne brzine vetra na lokaciji na kojoj je vetroelektrana podignuta i snage kojom se energija proizvodi u njoj dato je grafičkim putem na dijagramu na Slici 1, prikazanom na početku naredne stranice.



Slika 1. Snaga proizvodnje vetroturbine u zavisnosti od brzine vetra

Satne vrednosti brzine vetra su dobijene iz merenja, sprovedenih na području Srednjeg Banata, u Vojvodini (severni deo Srbije), u periodu od početka jula 2012. godine do kraja juna 2013. godine. Ova merenja su rađena sa desetominutnom rezolucijom. Kako su analize sprovedene u okviru ovog rada kao referentni vremenski korak uzimale interval od jednog časa, bilo je neophodno prilagoditi izmerene brzine vetra takvom principu. Shodno tome, za svaki od sati posmatranih u radu, brzina vetra je definisana kao prosek brzina vetra izmerenih u toku tog sata.

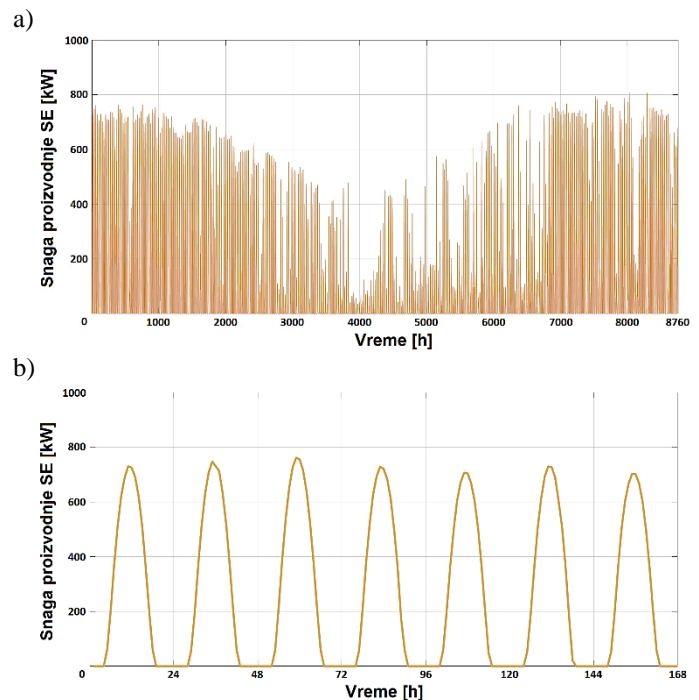
Za instalisanu snagu ove elektrane je uzeta vrednost od 2,5 MW. Dobijene snage proizvodnje elektrane su date na Slici 2, pri čemu se njen gornji deo (a) odnosi na čitav posmatrani jednogodišnji period, dok se njen donji deo (b), radi bolje preglednosti, odnosi isključivo na prvu sedmicu tog perioda.



Slika 2. Snaga proizvodnje vetroelektrane tokom a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda

Kao što je već naglašeno, deo Slike 2 označen sa (b) je dodat zbog poboljšanja čitljivosti prikazanih podataka, pošto su autori svesni da dijagram označen sa (a) na ovoj slici pruža dobar uvid u promenljivost snage proizvodnje energije u vetroelektrani, ali bi se mogao smatrati nepreglednim ukoliko bi se zahtevali tačni iznosi snaga kojima se ova proizvodnja vrši. Upravo je pomenuta promenljivost snage generisanja razlog zbog koga se sposobnost vetroelektrana da održavaju stabilnost sistema dovodi u pitanje, odakle se rađa potreba za sistemima za skladištenje energije.

Satne vrednosti proizvodnje solarne elektrane su određene primenom Geografskog informacionog sistema za fotonaponske panele (eng. *Photovoltaic Geographical Information System*), javno dostupnog na zvaničnoj internet stranici Evropske komisije [10]. Nakon što je uzeto da instalisana snaga solarne elektrane iznosi 1 MW, bilo je potrebno još definisati lokaciju na kojoj se ova elektrana nalazi, kao i vremenski raspon koji se posmatra. Time su dobijene satne vrednosti proizvodnje date na Slici 3, pri čemu se gornja polovina slike i ovaj put odnosi na čitavu godinu, dok je donji deo slike zasnovan na prvoj sedmici te godine.

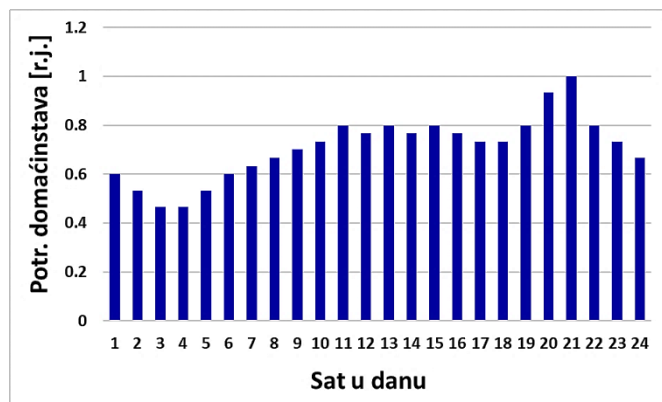


Slika 3. Snaga proizvodnje solarne elektrane tokom, a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda.

Kao što je i očekivano, varijabilnost proizvodnje, već uočena kod vetroelektrane, prisutna je i u vrednostima dobijenim za solarnu elektranu. Nesigurnost koju bi primena samo ova dva izvora za zadovoljenje potreba potrošača u mikromreži mogla izazvati je dovela do toga da je smatrano da, pored njih, u mikromreži mora postojati i dodatni generatorski kapacitet koji bi se aktivirao isključivo u slučajevima u kojima bi to bilo nužno. Za ovu ulogu je u radu odabrana elektrana na biomasu, namenjena očuvanju pouzdanosti mikromreže i neprekidnosti napajanja potrošnje. Kao njena instalisana snaga, usvojena je vrednost od 1,1 MW.

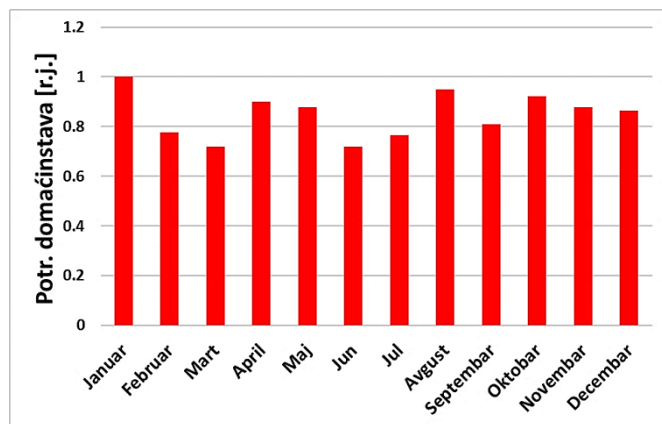
Prvi tip potrošnje prisutan u posmatranoj mikromreži koji će biti predstavljen na ovom mestu jeste potrošnja domaćinstava. Pošto

ova potrošnja nema konstantnu vrednost u toku dana, bilo je neophodno odrediti način na koji se ona menja u zavisnosti od toga koji se sat posmatra. U ove svrhe, korišćen je dijagram dat na Slici 4. Vrednosti na ovom dijagramu su normalizovane tako da dnevni maksimalni iznos potrošnje, do koga dolazi u dvadeset i prvom satu, odgovara jediničnoj vrednosti, dok su potrošnje u svim ostalim satima skalirane u odnosu na ovaj maksimum i odgovaraju relativnim vrednostima nižim od jedinice [11].



Slika 4. Tipični dijagram dnevne promene potrošnje domaćinstava

Takođe se mora napomenuti da vrednosti potrošnje domaćinstava ni u kom slučaju ne ostaju konstantne tokom različitih meseci u godini. Razlog za ovo se može naći u velikom broju faktora od kojih zavisi iznos snage konzuma, pri čemu je značajan procenat ovih faktora u direktnoj sprezi sa klimatskim uslovima koji vladaju u odgovarajućem mesecu. Da bi se i ovaj efekat uvažio, iskorišćen je dijagram mesečne varijacije maksimalne potrošnje, dat na Slici 5. Na ovom dijagramu su prikazane normalizovane vrednosti maksimalnih potrošnji za svaki od meseci, skalirane u odnosu na godišnji maksimum potrošnje. U skladu sa time, januaru, kao mesecu u kome je godišnji maksimum zabeležen, odgovara jedinična vrednost, dok su vrednosti za sve ostale mesece niže od jedinice. Ovaj dijagram je baziran na merenim vrednostima potrošnje u već pomenutoj oblasti Srednjeg Banata.



Slika 5. Tipični dijagram mesečne promene potrošnje domaćinstava

Da bi se ovi dijagrami preveli u apsolutne vrednosti potrošnje, bilo je potrebno usvojiti i godišnju maksimalnu vrednost iste, za šta je usvojen iznos od 550 kW.

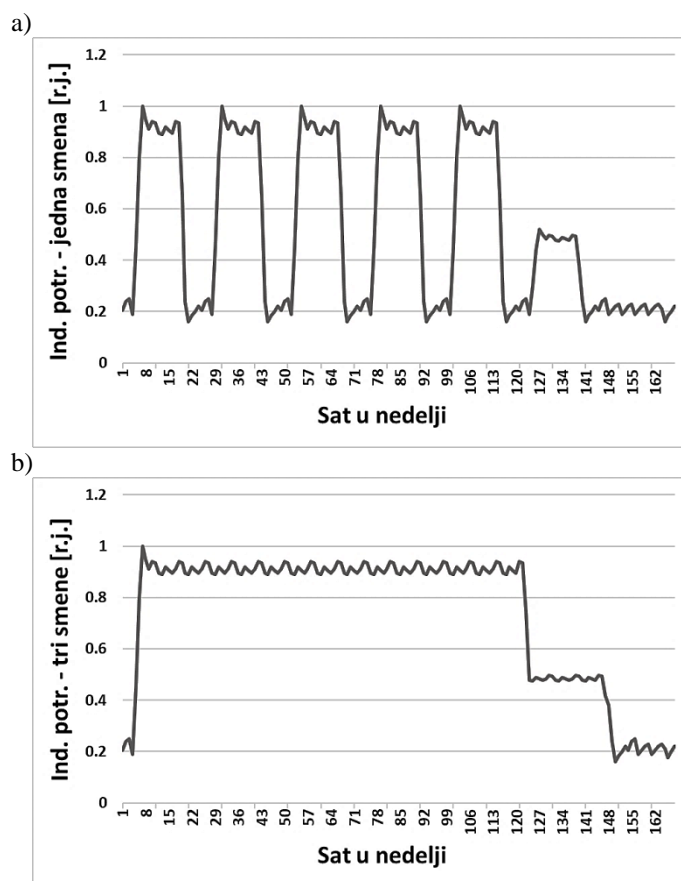
Do ove vrednosti dolazi u dvadeset i prvom satu januarskih dana. Međutim, moglo bi se postaviti pitanje određivanja vrednosti potrošnje u svakom od ostalih sati u toku godine. Ovaj korak je sproveden u delo korišćenjem obrasca (1).

$$P_{hj} = P_{h-max} \cdot \mu_{sj} \cdot \mu_{mj} \quad (1)$$

Ovde oznake imaju sledeće značenje:

- P_{hj} [kW] – vrednost snage potrošnje domaćinstava u mikromreži u satu j u toku godine;
- P_{h-max} [kW] – godišnji maksimum snage potrošnje domaćinstava u mikromreži, jednak 550 kW;
- μ_{sj} – koeficijent kojim se potrošnja skalira prema satu u toku dana, određen na osnovu Slike 4;
- μ_{mj} – koeficijent kojim se potrošnja skalira po mesecu u toku godine, određen na osnovu Slike 5.

Što se tiče industrijske potrošnje, pretpostavljeno je da njena promena zavisi samo od sata u toku dana i dana u toku nedelje, a ne od klimatskih uslova koji odgovaraju posmatranom trenutku. U skladu sa time, kreirani su nedeljni dijagrami potrošnje, dati na Slici 6, na kojoj se gornja polovina (označena sa (a)) odnosi na industrijsku potrošnju koja radi u jednoj smeni [12], dok donja polovina (obeležena slovom (b)) odgovara industrijskoj potrošnji koja radi u sve tri smene u toku dana.



Slika 6. Tipični nedeljni dijagrami promene potrošnje a) industrijskog konzuma koji radi u jednoj smeni, b) industrijskog konzuma koji radi u tri smene

Kao što se može videti, smatrano je da industrijski potrošači u mikromreži od interesa od ponedjeljka do petka uvek rade punim kapacitetom, da u subotu rade sa 40% kapaciteta, a da u nedelju nijedan od njih ne radi. Uz to, na ovim dijagramima su prikazani relativni iznosi snaga potrošnje, svedeni u odnosu na maksimalnu vrednost iste, u skladu sa čime se može doći do zaključka da je i ovde bilo neophodno usvojiti taj maksimum u cilju izračunavanja apsolutnih potrošnji koje bi odgovarale svakom od posmatranih sati. Shodno tome, i za industrijsku potrošnju koja radi u jednoj smeni, i za industrijsku potrošnju koja radi u sve tri smene je uzeta maksimalna vrednost snage jednaka 400 kW.

III METODOLOGIJA PRORAČUNA

Temu praktičnog dela ovog rada čini metodologija za određivanje kapaciteta sistema za skladištenje energije, lociranog u neposrednom okruženju fiktivne mikromreže. Da bi se to moglo realizovati, bilo je potrebno odrediti osnovni kriterijum ispravnog rada mikromreže. U te svrhe je odabrana neprekidnost napajanja potrošača u mikromreži. Da bi kreirana metodologija obezbedila zadovoljenje ovog kriterijuma, bilo je neophodno pratiti stanje napunjenosti kapaciteta za skladištenje, i to za svaki od sati u posmatranom jednogodišnjem vremenskom intervalu. Ovaj korak je realizovan primenom formule (2).

$$W_j = W_{init} + \sum_{i=1}^j \Delta W_i, \quad j = 1, 2 \dots 8760 \quad (2)$$

U ovoj formuli, simboli imaju sledeće značenje:

- W_j [kWh] – stanje napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije u satu j ;
- W_{init} [kWh] – početno stanje napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije, za koje je usvojen iznos od 80% instaliranih kapaciteta istog;
- ΔW_i [kWh] – promena stanja napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije u satu i .

Kako je već naglašeno, početno stanje napunjenosti sistema za skladištenje energije je smatrano konstantnom vrednošću, te nije bilo potrebe da se iznova proračunava svaki put kada bi se ovaj izraz koristio, to jest, za svaki od sati u toku godine. Ovo je, od potrebnih ulaznih podataka, ostavilo jedino promenu stanja napunjenosti u odgovarajućem satu kao nepoznatu vrednost. Za sat j , taj iznos je određivan u skladu sa izrazom (3).

$$\Delta W_j = (P_{wj} + P_{sj} - P_{hj} - P_{ij}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

U nastavku će biti data pojašnjenja svake od oznaka korišćenih u ovom obrascu, izuzev oznake P_{hj} , koja je već objašnjena u delu teksta koji je pratio formulu (1). Preostali simboli znače sledeće:

- P_{wj} [kW] – vrednost snage proizvodnje energije u vetroelektrani u satu j u toku godine;
- P_{sj} [kW] – vrednost snage proizvodnje energije u solarnoj elektrani u satu j u toku godine;
- P_{ij} [kW] – vrednost ukupne snage industrijske potrošnje u mikromreži u satu j u toku godine;
- Δt [h] – pretpostavljeni vremenski korak prema kome su rađeni proračuni, jednak jednom času.

Sama analiza je sprovedena tako što je, na njenom početku, bila pretpostavljena početna vrednost instaliranog kapaciteta sistema za skladištenje električne energije, nakon čega je, korišćenjem obrazaca (2) i (3), izračunavano stanje njegove napunjenosti za svaki sat u toku godine. Ovaj postupak je trajao sve dok stanje napunjenosti ne bi postalo negativno, što bi se, u praksi, odrazilo na pouzdanost rada sistema i dovelo do neizbežnih restrikcija isporuke energije potrošačima. Takvo stanje je nedopustivo, te je, u tom satu, aktivirana elektrana na biomasu, čime je stanje napunjenosti skladišta povećavano za vrednost instalirane snage ove elektrane. Ako bi se ovime rešio uočeni problem, to jest, ako bi stanje napunjenosti postalo veće od nule, proračuni bi bili nastavljani za sledeći sat u toku godine. U suprotnom, proces je obustavljan, nakon čega je instalirani kapacitet skladišta energije povećavan za odgovarajući predefinisani iznos. Proračuni su potom otpočinjani iznova, od prvog sata, prateći već pojašnjeni postupak naizmenične primene izraza (2) i (3). Iako bi se, na prvi pogled, moglo učiniti da bi se čitava problematika mogla svesti na jednostavan linearni sistem, neizvesnost aktivacije elektrane na biomasu je predstavljala otežavajući faktor zbog koga ovakav vid uproščavanja ipak nije bilo moguće primeniti.

Konačno, potrebno je posebno izdvojiti momenat u kome bi ceo ciklus bio prekinut i u kome bi se moglo smatrati da je dovoljni kapacitet sistema za skladištenje energije određen. Naime, nakon što bi proces proračunavanja stanja napunjenosti bio prekidan i ponovo pokretan dovoljan broj puta, došlo bi se do najmanje vrednosti ovog kapaciteta pri kojoj njegovo stanje napunjenosti, uz povremene intervencije elektrane na biomasu, ne bi padalo ispod nultog iznosa ni za jedan sat u toku godine. Upravo je taj instalirani kapacitet sistema za skladištenje električne energije proglašavan dovoljnim, jer bi pri njemu bio ispunjen navedeni uslov za pouzdano funkcionisanje razmatrane mikromreže.

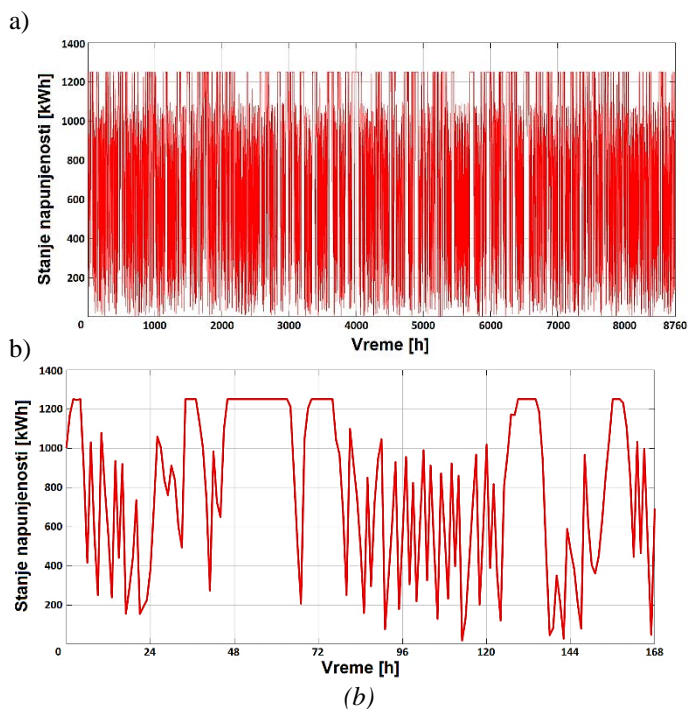
IV PRIKAZ REZULTATA ANALIZE

Da bi se ilustrovala mogućnost primene izložene metodologije na praktične primere mikromreža, sproveden je test-proračun. Ovaj proračun je rađen na mikromreži čije su karakteristike detaljno opisane u Poglavlju II ovog rada. U skladu sa koracima od kojih se proračun sastojao, bio je neophodno usvojiti još samo dve ulazne pretpostavke pre njegovog pokretanja – jednu vezanu za početnu vrednost kapaciteta sistema za skladištenje energije i jednu vezanu za veličinu koraka u kojima je ovaj kapacitet povećavan između dva susedna ciklusa proračuna. Posebna pažnja je morala biti posvećena veličini pomenutih koraka, jer bi preveliki koraci mogli dovesti do nepreciznosti u rezultatima i ugroziti pouzdanost proračuna, dok bi premala vrednost koraka bespotrebno produžila trajanje proračuna i negativno uticala na efikasnost čitavog postupka. Nakon određenog broja pokušaja, empirijskom metodom je utvrđeno da je veličina koraka koja zadovoljava oba prethodno nabrojana kriterijuma 50 kWh. Što se tiče inicijalne pretpostavljene vrednosti instaliranog kapaciteta sistema za skladištenje, usvojena je vrednost od 800 kWh.

Konačno, nakon što su razjašnjene i poslednje nepoznanice koje bi mogle sprečiti adekvatno obavljanje proračuna u skladu sa opisanom procedurom, prešlo se i na vršenje samih proračuna. Ovim postupkom je utvrđeno da bi kapacitet skladišta energije potreban za pouzdan rad mikromreže bio jednak 1250 kWh.

Važno je da se na ovom mestu naglasi i to da se dobijeni rezultat vezan za potrebni kapacitet sistema za skladištenje ni na koji način ne može svrstati u iracionalne ili praktično neostvarive. O ovome mogu posvedočiti i praktični primeri, poput postrojenja izgrađenog na ostrvu Porto Santo (Madeira, Portugal), koje broji oko 5500 stanovnika. Potrošači locirani na ovom ostrvu energiju dobijaju isključivo iz vetroelektrana i solarnih elektrana koje su postavljene širom ostrva. Ovo ih, shodno elaboraciji iz uvodnog dela ovog rada, čini podložnim problemima u vezi balansiranja proizvodnje i potrošnje. Da bi se ovakvi negativni efekti sprečili, odnosno, da bi se postigla povećana pouzdanost, na ostrvu je podignut i sistem za skladištenje energije instalisanog kapaciteta jednako 3 MWh [13]. Shodno tome, može se doći do zaključka da instalisani kapacitet od 1250 kWh, predložen u ovom radu, svakako spada u opseg koji se u praksi može postići. Time je, na određeni način, potvrđena i primenljivost izložene metodologije na eventualne praktične situacije sa kojima bi mogla biti suočena.

Satni dijagrami stanja napunjenosti sistema za skladištenje čija je implementacija sugerisana dobijenim rezultatima se mogu videti na Slici 7, na kojoj je, kao i u slučajevima koji su se odnosili na rad vetroelektrana i solarnih elektrana, gornja polovina, označena sa (a), posvećena prikazu stanja napunjenosti tokom cele godine, dok donja polovina, obeležena sa (b), za temu ima stanje tokom prve nedelje obuhvaćenog vremenskog perioda.



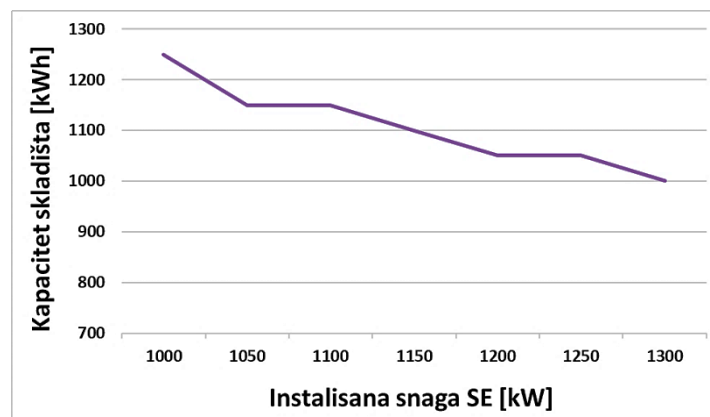
Slika 7. Satni dijagrami napunjenosti sistema za skladištenje tokom

a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda

Sa ovog dijagrama je evidentno da bi, ukoliko se poslušava savet dat u ovom radu i podigne sistem za skladištenje kapaciteta od 1250 kWh, njegovo stanje napunjenosti u nekim satima u godini moglo padati na vrednosti bliske nultoj, ali da ni u jednom satu ne bi došlo do negativnih iznosa ovog stanja, to jest, do prekida isporuke električne energije korisnicima u mikromreži.

U nastavku toga se može zaključiti da je primena metodologije objašnjene u nekim od prethodnih poglavlja dovela do odabira adekvatnog odgovora na postavljen problem, te da bi, u slučaju njegove praktične implementacije, i osnovni kriterijum ispravnog rada mikromreže bio ispunjen. Stoga, neprekidnost napajanja potrošnje mikromreže ne bi bila narušena ni u jednom satu u posmatranom vremenskom periodu, što je, po mišljenju autora, imperativ kojim se mora voditi pri planiranju rada mikromreža. Da bi se ovakav stav još više potkrepio praktičnim podlogama, dovoljno je podsetiti na to da se u elektroenergetskim sistemima sve češće javljaju i osetljivi elektronski potrošači, ali i potrošači povezani na mrežu preko poluprovodničkih komponenti. Prema tome, bilo kakav prekid napajanja ovih potrošača bi, ma koliko bio kratkotrajan, mogao dovesti do njihovog neispravnog rada, pa čak i trajnih kvarova. Ovo bi, dalje, moglo izazvati kako štetu materijalne prirode, tako i potencijalni rizik po život ljudi koji se u trenutku kvara nalaze u blizini predmetne potrošnje.

Poslednja analiza koja je izrađena u sklopu ovog rada se može sagledati kao dodatak dosadašnjim teoretskim razmatranjima i sprovedenim simulacijama. Ova analiza je predstavljala analizu osetljivosti u kojoj je praćen uticaj koji bi postepeno povećanje instalisanog kapaciteta solarne elektrane moglo imati na promenu potrebnog kapaciteta skladišta električne energije. U sklopu ove analize, instalisana snaga solarne elektrane je povećavana za po 50 kW u svakoj novoj iteraciji, nakon čega su iznova rađeni proračuni definisani obrascima (2) i (3). Za očekivati je bilo da će, u skladu sa povećanjem količine energije prisutne u sistemu, veća snaga solarne elektrane dovesti do smanjenja potrebnog sistema za skladištenje, bez ikakvog narušavanja neprekidnosti isporuke energije prema potrošačima. Rezultati izvršene analize osetljivosti se mogu videti na dijagramu, datom na Slici 8.



Slika 8. Rezultati dodatne analize osetljivosti

Kao što se sa prikazanog grafika može primetiti, snaga solarne elektrane od 1,3 MW bi dovela do pada kapaciteta potrebnog za skladištenje energije do vrednosti od 1 MWh. Takođe, mora se napomenuti da tendencija pada kapaciteta sistema za skladištenje ostaje relativno konstantna kako se povećava instalisana snaga solarne elektrane. Odatle je jasno da su očekivanja, izneta pre Slike 8, bila opravdana i da su unapred postavljene hipoteze bile potvrđene ovom analizom, čime je mogućnost primene razvijene metodologije za proračun kapaciteta skladišta električne energije na situacije slične onoj opisanoj u radu još jedanput dokazana.

V ZAKLJUČAK

Temu ovog rada činila je prezentacija kreirane metodologije za određivanje najmanjeg kapaciteta sistema za skladištenje energije pri kome ne bi došlo do ugrožavanja pouzdanosti napajanja konzuma mikromreže. Pretpostavljeno je da mikromreža nema veze sa ostatkom elektroenergetskog sistema, te da potrošači u njoj električnu energiju dobijaju iz solarne elektrane, elektrane na biomasu i vetroelektrane. Nakon usvajanja odgovarajućeg seta ulaznih podataka i pretpostavki, prešlo se na proračune koji su zahvatili vremenski period od godinu dana, gde je za pogodan vremenski korak proračuna usvojen interval od jednog sata, čime je garantovana dovoljna preciznost proračuna, bez ugrožavanja njihove efikasnosti. Naknadno je ispitan i način na koji bi se povećanjem instalisane snage solarne elektrane moglo uticati na potreban kapacitet sistema za skladištenje energije. Rezultati koji su ostvareni pri svim sprovedenim analizama su bili usklađeni sa postavljenim očekivanjima, čime je verifikovana njihova tačnost.

Sve navedeno ukazuje na to da je razvijena tehnika ne samo dobro prilagođena za rad sa test-sistemima, poput onog čije su karakteristike date u radu, već da bi jako lako mogla pronaći svoje mesto i u praktičnim slučajevima. Ovde se, prevashodno, misli na situacije u kojima se planira podizanje mikromreža u udaljenim područjima, namenjenih napajanju osetljive potrošnje, čije snabdevanje energijom ne sme biti prekinuto ni na trenutak. Primer za ovo se može pronaći u mrežama izgrađenim za potrebe malih rudarskih naseobina, gde je, pored industrijskog konzuma, prisutna i potrošnja baraka za stanovanje radnika, kao i ostalih propratnih objekata čije je postojanje u tim naseljima neophodno.

Takva podela potrošnje na dve kategorije bi se mogla smatrati pandanom one prikazane i obrađene u okviru ovog rada. Ovaj primer samo stavlja akcenat na već pomenutu važnost činjenice da ovakva metodologija odgovara nezamislivoj procentu praktičnih situacija, što bi moglo dovesti do njene šire primene u narednom periodu, u kome se očekuje intenzivna integracija mikromreža, kao jednog od izvora fleksibilnosti u sistemu.

Naravno, iako su mikromreže jedan od izvora fleksibilnosti od kojih se najviše očekuje u budućnosti, to nikako ne znači da su jedina opcija koji se razmatra. Primera radi, princip upravljanja potrošnjom (eng. *demand response*), baziran na dvosmernoj komunikaciji između operatora i potrošača, može uneti dodatnu fleksibilnost u sistem. Iako ovaj princip nije obuhvaćen u okviru ovog rada, to ne znači da ne bi bilo zanimljivo ispitati mogućnost kombinovanog uticaja koji bi se ostvario zbirnim dejstvom skladištenja energije i upravljanja potrošnjom. U skladu sa time, autori ovog rada imaju nameru da nastave sa istraživanjima, pri čemu rezultati ovog rada mogu poslužiti kao garancija značaja budućih radova koji će se baviti sličnim temama.

ZAHVALNICA

Autori bi ovom prilikom želeli da iskažu zahvalnost prema AD „Elektromreža Srbije”, operatoru prenosnog sistema Srbije, zbog dozvoljavanja pristupa nekim od podataka neophodnih za izradu ovog rada, kao i Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, zbog obezbeđivanja softverskih alata u kojima su izrađeni proračuni čiji se rezultati mogu videti u radu.

LITERATURA

- [1] Abdulgalil, M.A., Khalid, M., Alshehri, J. Microgrid Reliability Evaluation Using Distributed Energy Storage Systems, in Proc. *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, China, pp. 2837-2841, 2019. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8881068>
- [2] Rodrigues, Y.R., Monteiro, M.R., Zambroni de Souza, A.C., Riberiro, P.F., Wang, L., Eberle, W. Adaptive Secondary Control for Energy Storage in Island Microgrids, in Proc. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Portland, SAD, pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586228>
- [3] Wibowo, R.S., Firmansyah, K.R., Aryani, N.K., Soeprijanto, A. Dynamic economic dispatch of hybrid microgrid with energy storage using quadratic programming, in Proc. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, pp. 667-670, 2016. <https://doi.org/10.1109/tencon.2016.7848086>
- [4] Jo, H., Kim, J.-Y., Byeon G., Kim, S.-K. Optimal Scheduling Method of Community Microgrid with Customer-owned Distributed Energy Storage System, in Proc. *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Porto, Portugal, pp. 1-6, 2019. <https://doi.org/10.1109/sest.2019.8849149>
- [5] Nair V.V., Ilango, K. Microgrid control strategies for enhanced storage management, in Proc. *International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP)*, Kolam, Indija, pp. 1-5, 2017. <https://doi.org/10.1109/tapenergy.2017.8397356>
- [6] Li, C., Dragicevic, T., Plaza, M.G., Andrade, F., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M. Multiagent based distributed control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids, in Proc. *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2014*, Dalas, SAD, pp. 2180-2184, 2014. <https://doi.org/10.1109/iecon.2014.7048804>
- [7] Hannan, M.A., Faisala, M., Jern Kera, P., Begumb R.A., Dongd, Z.Y., Zhangd, C. Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 131, pp. 1-24, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110022>
- [8] Jayashree, S., Malarvizhi, K. Methodologies for Optimal Sizing of Battery Energy Storage in Microgrids: A Comprehensive Review, in Proc. *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI 2020)*, Koimbatore, India, pp. 1-5, 2020. <https://doi.org/10.1109/iccci48352.2020.9104131>
- [9] Sukumar, S., Marsadek, M., Ramasamy, A., Mokhlis, H. Grey Wolf Optimizer Based Battery Energy Storage System Sizing for Economic Operation of Microgrid, in Proc. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe 2018)*, Palermo, Italy, pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2018.8494501>
- [10] Photovoltaic geographical information system, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 03.11.2020].
- [11] Bailes, A. Electricity Demand and the Duck Curve, 2015. <https://www.energyvanguard.com> [pristupljeno 03.11.2020].
- [12] Tran-Quoc T., Le Pivert, X., Saheli, M., Beaudé, O. Stochastic approach to assess impacts of electric vehicles on the distribution network, in Proc. *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe 2012)*, Berlin, pp. 1-8, 2012. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01103833> [pristupljeno 03.11.2020].
- [13] Microgrid, Battery Energy Storage and Distributed Generation Solutions – Global Customer References, ABB, <https://library.abb.com> [pristupljeno 03.11.2020].

AUTORI

Vladan Ristić, AD „Elektromreža Srbije“ / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, vladan.ristic@ems.rs
dr Nikola Rajaković, Savez energetičara Srbije / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, rajakovic@etf.rs
Dragana Vujanović, Brose d.o.o. Beograd – Palilula, dragana.v1995@gmail.com