

**ODREĐIVANJE OPTIMALNOG PROIZVODNOG MIKSA ZA NAPAJANJE
POTROŠNJE MIKRO-MREŽE****DEFINING THE OPTIMAL GENERATION MIX FOR SUPPLYING
THE MICRO-GRID'S DEMAND**

Vladan RISTIĆ, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” / Elektrotehnički fakultet
Univerziteta u Beogradu, Srbija

Miljan ŽIKIĆ, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije”, Srbija
Dragana VUJANOVIĆ, Resalta d.o.o., Beograd

Nebojša VUČINIĆ, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije”, Srbija

Ognjen MIJUŠKOVIĆ, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije”, Srbija

Stefan DESPOTOVIĆ, Elektroistok projektni biro d.o.o., Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Kao što događaji kojima svakodnevno svedočimo potvrđuju, elektroenergetika se svakako može smatrati jednom od grana industrije čiji se svaki korak pomno prati kroz prizmu ekoloških tendencija i potrebe za dugoročno održivim razvojem, bez narušavanja neprekidnosti i pouzdanosti napajanja potrošača. U skladu sa time, sve je prisutnije razmatranje rešenja koja istovremeno mogu doprineti izlasku iz pogona konvencionalnih termogeneratorskih jedinica, kao i njihovoj zameni distribuiranim proizvodnim kapacitetima baziranim na obnovljivim energentima i pružanju neophodne fleksibilnosti elektroenergetskim sistemima. Jedno od inovativnih rešenja čija bi masovnija implementacija mogla dovesti do poboljšanja po nabrojanim pitanjima jeste i razvoj mikro-mreža, koje, po definiciji, predstavljaju segmente sistema koji obično rade povezano sa ostatkom mreže, ali se, u zavisnosti od prilika u sistemu, mogu i odvojiti i funkcionisati samostalno. Naravno, kako bi se ovo omogućilo, mikro-mrežama je potrebno obezbediti dovoljnu količinu proizvodnih kapaciteta. Ovi kapaciteti se gotovo uvek baziraju ili na energiji vetra, ili na solarnoj energiji, uz odgovarajuća postrojenja za skladištenje električne energije. Jasno je da je proizvodni portfolio mreže potrebno planirati tako da njegova snaga proizvodnje u što većoj meri odgovara promenama snage potrošnje u mikro-mreži. Zato će ovaj rad će sadržati analizu funkcionisanja mikro-mreže čiji će profil potrošnje biti preuzet iz realnih merenja snage konzuma 110/x kV transformatorskih stanica, pri čemu će se, što se generatora tiče, razmatrati tri slučaja – kada se potrošnja napaja isključivo iz vetroelektrane, kada se potrošnja napaja isključivo iz solarne elektrane i kada se napajanje vrši iz oba pomenuta izvora simultano. Cilj rada će biti da se, za svaki od ova tri slučaja, odredi instalisana snaga proizvodnih kapaciteta pri kojoj je odstupanje snage proizvodnje energije tih elektrana od snage potrošnje minimalno. Kao vremenski horizont na kome se analize vrše će se uzeti jednogodišnji period, dok će rezolucija analiza biti jednočasovna. Kao indikator odstupanja će se koristiti godišnji prosek kvadrata razlike snage proizvodnje i snage potrošnje u svakom satu. Ovaj rad se može posmatrati kao osnova za dalja istraživanja, što predstavlja i nameru autora.

Ključne reči: vetroelektrane, solarne elektrane, mikro-mreže, statistička analiza, proizvodni miks

ABSTRACT

As the events that we witness on a daily basis can confirm, power engineering is definitely one of the industrial branches that are closely monitored through the magnifying glass of the environmental tendencies and needs for sustainable development, without putting the reliability of the energy supply to the demand at risk. In line with that, the solutions that may simultaneously contribute to the decommissioning of the conventional thermal units, their replacement by the renewable energy sources and securing the necessary amount of flexibility to the system emerge regularly. One of the novel solutions that potentially could, if globally implemented, bring benefits related to all of the aforementioned issues are the micro-grids. These grids, by definition, represent parts of the power system that usually operate connected to the remainder of the system, but are capable of separating from it and working individually, if there is need for that. Of course, for this to be achieved, the micro-grids need to

25
godina

13. SAVETOVANJE O ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA sa regionalnim učešćem
13th CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION with regional participation
12-16 / 09 / 2022, Kopaonik, Srbija



ZBORNİK RADOVA | PROCEEDINGS



contain the sufficient amount of production capacities. These generating units almost always belong to the group
of either

wind or solar plants, accompanied by the appropriate energy storage capacities. If all of that is considered, a conclusion could be reached that the operational state of the micro-grid would be better if the generation power of the built-in units could follow the power of the demand in the micro-grid. That is the reason for which this paper will deal with the analysis of the operation of the micro-grid in which the demand profile will be adapted to fit the real-life measurements of the demand of the 110/x kV substations. This demand will, depending on the selected out of the three cases, be supplied either by the wind power plant, the solar power plant, or by the combination of both of these sources. The aim of the work that will be presented in this paper will be the determination of the installed generation capacity for each of these cases, so that the deviation of the generation power from the demand power on a yearly level is minimal. The analyses will be done with the one-hour resolution. Hence, the indicator of the deviation will be the mean squared difference between the hourly production power and the hourly consumption power in the micro-grid. This paper can be seen as the foundation for the future research, which is the exact intention of the authors.

Key words: wind plants, solar plants, micro-grids, statistical analysis, generation mix

Kontakt informacije o autorima – kontakt osoba (prvi autor): Vladan Ristić, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija; e-mail adresa: vladan.ristic@ems.rs; broj telefona: +381 64 8358 231.

1. UVOD

Premda je održivost koncepta adekvatnosti elektroenergetskih sistema baziranog na centralizovanim elektranama na ugaj odavno predmet diskusija kako u stručnim krugovima, tako i, sve više, u relativno laičkoj široj javnosti, do ozbiljnijih inicijativa da se pronade alternativa ovakvom principu gotovo da i nije došlo sve do početka ovog veka. Shodno tome što su i učesnici u raspravama na ovu temu poprilično raznovrsni i po stepenu upućenosti u problematiku o kojoj daju sud, i po stručnoj spremi koja bi mogla dodati izvesnu težinu njihovom stavu, jasno je da i zaključci ovih diskusija mogu poprilično varirati, pre svega po pitanju toga koji bi to energent mogao služiti kao zamena termoelektranama, nepoželjnim usled nespornog uticaja na emisije gasova izazivača efekta staklene bašte. Ipak, takođe se mora naglasiti da, ako postoji stavka oko koje se skoro svi pomenuti stručnjaci i laici slažu, to je to da sistem za proizvodnju električne energije mora proći kroz značajne modifikacije u narednom periodu, gde se, zavisno od struje kojoj predlagači pripadaju, kao razlozi za to navode ili jako nepovoljan ekološki uticaj, ili prosti nestanak uglja zbog njegovog neplanskog i neobuzdanog trošenja. Naravno, bitna stavka bi ovde bio i ekonomski faktor, koji će prevashodno uticati na poskupljenje proizvodnje u termokapacitetima na ugaj nakon uvođenja najavljenih taksi na emisiju ugljen-dioksida, čime bi zemlje koje bi se, i posle svega, još uvek oslanjale na ovaj tip goriva bile praktično eliminisane sa međunarodnog tržišta električne energije.

Prema trenutnom stepenu tehničkog i tehnološkog razvoja, prihvaćenosti od strane stanovništva država u kojima je energetska tranzicija odmakla do svojih naprednijih stadijuma, te masovnosti i mogućnosti serijske produkcije, kao izraziti favorit za mesto temelja elektroenergetskih sistema budućnosti bi se, pre svih drugih, mogle izdvojiti vetroelektrane i solarne elektrane, bilo da se njihovo priključenje očekuje na naponskim nivoima koji odgovaraju prenosnom sistemu, bilo da se njihovo priključenje vrši na distributivnim naponskim nivoima. Ako bi sada fokus bio stavljen na pozitivne aspekte integracije ovakvih izvora u sisteme, pored onih očiglednih, poput potencijalnih smanjenja emisija gasova izazivača efekta staklene bašte ili redukcije zagađenja do kojeg dolazi usled iskopavanja uglja za potrebe termoelektrana, morali bi se napomenuti i neki od isključivo sistemskih benefita do kojih bi šira implementacija ovih generatora mogla dovesti, posebno ako se govori o onima postavljenim uz potrošnju, poput solarnih panela postavljenih na krovovima industrijskih objekata. Naime, uz korektno uređenje energetske politike, postavljanje generatorskih kapaciteta u blizini konzuma bi nesumnjivo značilo i otklanjanje potrebe za prenosom energije na velike udaljenosti, čime bi se smanjili gubici energije u sistemu, ali i potencijalno odložile potrebe za radovima na nekim elementima prenosnog i distributivnog sistema čije bi opterećenje tada bilo umanjeno. Time bi se ona sredstva koja bi, inače, morala biti uložena u te projekte mogla prerasporediti na druge aktivnosti koje bi u toj situaciji bile procenjene kao one sa većim prioritetom od drugih. Ipak, da ne bi ispalo da je ovaj rad namenjen neargumentovanoj glorifikaciji obnovljivih izvora energije, moraju se istaći i neki negativni aspekti do kojih bi njihova omasovljena integracija takođe mogla da dovede, posebno ako bi do nje dolazilo bez prethodno razrađenog plana koji bi uzeo u obzir tehničke, finansijske, ekološke i socijalne aspekte, poput, primera radi, uticaja podizanja vetroelektrana na sezonske selidbe ptica koje su prethodno koristile koridore na kojima se nalaze parcele na kojima su vetro turbine podignute ili smanjenja kvadrature potencijalno obradivog zemljišta radi zauzimanja iste površine fotonaponskim panelima. Shodno tome, strepnje koje su se javljale u javnosti pre nego što su obnovljivi izvori postali standardni su na pregledan

način sumirane u Tajne (1), što, iako nije naučni članak, ipak predstavlja jako dobar način da se stekne uvid u način razmišljanja ljudi suočenih sa tehnologijom sa kojom nisu imali kontakta.

Pored argumenata protiv masovne integracije obnovljivih izvora energije opisanih u (1), mora se navesti i jedan od neospornih tehničkih nedostataka koji je u značajnoj meri potkrepljivao skepticizam kojim je integracija ovih izvora u sistem bila praćena u nešto ranijim fazama tog procesa – varijabilnost proizvodnje, direktno uzrokovana nepredvidivošću kretanja njihovog primarnog energenta, bilo da je reč o brzini vetra ili o jačini sunčevog zračenja na mikrolokaciji koja je razmatrana za podizanje nove vetroelektrane ili postavljanje solarnih panela, respektivno. U skladu sa time, ovo je predstavljalo i prvu prepreku koju je bilo nužno koliko-toliko prevazići da bi se uopšte i moglo dalje diskutovati o masovnoj implementaciji ovih generatorskih kapaciteta u proizvodni portfolio nekog elektroenergetskog sistema. Shodno tome, i ne čudi što se kao jedna od najznačajnijih tema kojima su se u prethodnom periodu bavili radovi pisani u vezi sa integracijom obnovljivih izvora energije mogu istaći različite tehnike za što preciznije predviđanje kako atmosferskih pokazatelja relevantnih za ove generatorske kapacitete, tako i same snage proizvodnje ovih kapaciteta na osnovu prethodno definisanih klimatskih parametara. U takve radove bi se, primera radi, mogli svrstati i radovi Li et al. (2), Zhou et al. (3), Zhong i Wu (4) i Shanghavi et al. (5), gde bi pažnju trebalo skrenuti na radove (2) i (4), od kojih se prvi zasnivao na razvijanju probabilističke tehnike namenjene predikciji generisanja vetroelektrane, dok je drugi rad bio baziran na analizi osetljivosti i ispitivanju efekata koje bi ispravno uvažavanje istih ovih indikatora imalo na vrednost greške kratkoročne prognoze snage proizvodnje razmatrane solarne elektrane. Uz prethodno pomenute radove, bilo bi dobro istaći i rad Prema et al. (6), zamišljen kao pregledni prikaz nekih od metoda za suočavanje sa opisanim izazovima.

Normalno, zadatak predikcije snage proizvodnje u obnovljivim izvorima nije mogao ostati izolovan od drugih relativno sličnih tema, pri čemu je, pre svega, uočena čvrsta povezanost između opisane problematike i mogućeg uticaja koji bi greške u prognozi snage mogle imati na neprekidnost napajanja potrošača, gde se, kao poprilično zastrašujuć scenario, često isticala situacija u kojoj bi ove elektrane, usled varijacija u brzini vetra ili intenzitetu sunčevog zračenja, energiju proizvodile snagom daleko manjom od očekivane. Ovo bi za posledicu moglo imati čak i potrebe za isključenjem konzuma sa mreže radi očuvanja stabilnosti elektroenergetskog sistema, odakle je bilo sasvim jasno da je, ukoliko se već ide u smeru oslanjanja na obnovljive izvore energije, neophodno delovati preventivno i razviti odgovarajuće mere koje bi sprečile obistinjenje ovakvog scenarija. U pratećim diskusijama na tu temu je sve češće, kao potencijalna solucija, počeo da se koristi termin „fleksibilnosti sistema“, usled čega je došlo i do pisanja velikog broja radova koji su se upravo i bavili problemima postizanja što veće fleksibilnosti u uslovima nametnutim intenzivnom integracijom obnovljivih izvora energije, gde bi se primeri ovakvih radova mogli naći u tekstovima Ginsberg et al. (7), Pedersen et al. (8), Wu et al. (9) i Xing et al. (10). Zajednički imenilac svih tih radova bilo je često isticanje same potrošnje kao mogućeg izvora potrebne količine fleksibilnosti u sistemu, pre svega, kroz različite mehanizme upravljanja njom, ali i podvlačenje sistema za skladištenje električne energije kao resursa čija bi simbioza sa obnovljivim izvorima mogla otkloniti ili ublažiti neke od već opisanih negativnih aspekata njihovog prodora u sisteme. Da bi se ova hipoteza pojasnila, skrenuće se pažnja na dva potencijalna slučaja – slučaj u kome bi snaga proizvodnje energije u obnovljivim izvorima pala na nultu vrednost, što bi, bez odgovarajuće alternative, izazvalo prekid napajanja potrošača, i na slučaj u kome bi snaga proizvodnje bila veća od snage koju potrošnja zahteva, što bi moglo izazvati velike finansijske gubitke investitorima u elektrane. Kako bi se ti slučajevi izbegli, sistemi za skladištenje, kao što je i pojašnjeno u radovima Byers i Botterud (11), Wang et al. (12) i Shi et al. (13), mogu ponuditi izlaz kroz opciju preuzimanja energije iz izvora kada plasman iste u sistem nije moguć, te upumpavanje skupljene energije u mrežu onda kada bi potrošnja to mogla zahtevati. Ovo bi moglo redukovati kako gubitke prihoda koje bi ulagač u elektranu mogao očekivati u situaciji u kojoj sistema za skladištenje energije nema, tako i posledica koje bi potrošači mogli pretrpeti, što postaje sve značajnije kako raste i osetljivost potrošača na smetnje u snabdevanju električnom energijom odgovarajućeg kvaliteta. Evidentno je, na primer, da bi sistem sastavljen od poluprovodničkih komponenti i računarskih jedinica bio mnogo ugroženiji od standardnog domaćinstva u slučaju da do prekida napajanja dođe, što je faktor koji sve više treba uzimati u obzir kako dolazi do napredovanja industrije u smeru automatizacije i digitalizacije gde god je tako nešto moguće.

Iako je zasnovan na skoro identičnim inicijalnim postulatima kao radovi citirani u prethodnim pasusima, ovaj rad se, ipak, neće baviti potpuno istom temom kao i oni, pri čemu bi se, kao osnovna razlika, moglo istaći to što su ti radovi bili dominantno zasnovani na otklanjanju posledica integracije obnovljivih izvora energije u sisteme, dok će ovaj rad, u skladu sa njegovom temom, pomenutom u apstraktu, pokušati da u što većoj meri umanji posledice koje bi trebalo sanirati, što će se uraditi kroz dimenzionisanje instalisane snage proizvodnih kapaciteta tako da se dijagram generisanja energije iz njih što više prilagodi varijacijama snage konzuma na vremenskom horizontu od jedne godine. Pored razmatranja slučajeva u kojima se potrošači napajaju samo iz vetroelektrane ili isključivo iz solarne elektrane, biće analiziran i slučaj gde se, kao u radovima Vuc et al. (14), Nassar i Salama (15) i Waiwong

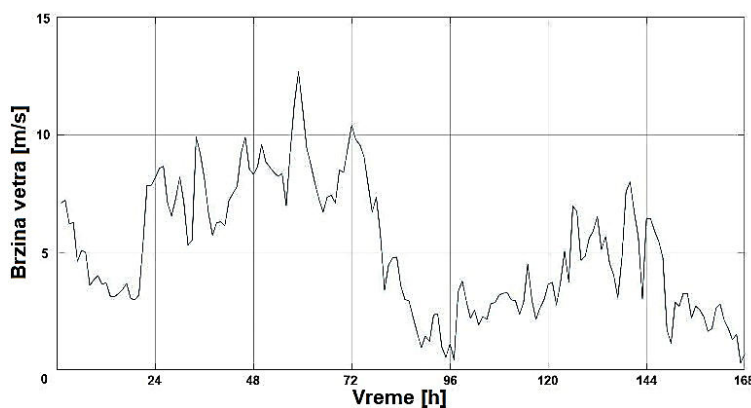
et al. (16), na raspolaganju nalaze oba pomenuta tipa generatorskih kapaciteta. Kako bi se ovaj zadatak izvršio na što efikasniji i jasniji način, drugo poglavlje rada je posvećeno detaljnom izlaganju ulaznih pretpostavki na osnovu kojih je preostali deo rada urađen, bilo da se pod time misli na kratak opis dve kategorije proizvodnih kapaciteta obuhvaćenih obavljenim proračunima, bilo da je u pitanju način na koji je aproksimirano ponašanje konzuma u razmatranoj fiktivnoj oblasti. Naredno poglavlje je zasnovano na pojašnjenjima vezanim za metodologiju koja je korišćena prilikom vršenja pomenutih proračuna, od načina na koji su klimatski pokazatelji konvertovani u snage proizvodnje, pa do formule po kojoj je izvršena evaluacija svakog od analiziranih rešenja, što je potom dozvolilo njihovo rangiranje i selekciju optimalne među njima. Sledeće poglavlje se nadovezuje na ovo, tako da pruža uvid u rezultate dobijene primenom razjašnjene metodologije, pri čemu su rezultati, radi njihove čitljivosti, prikazani i u grafičkoj formi, u vidu posebnih dijagrama. Na samom kraju rada se nalazi zaključak u kome su još jedanput pomenute osnovne pretpostavke rada i naglašeni neki od značajnijih ishoda sprovedenih analiza, kao i namere autora da nastave istraživanja na teme slične onoj obrađenoj u prethodnim poglavljima.

2. ULAZNE PRETPOSTAVKE

Nakon završetka uvoda u kome je opisana tema rada, kao i motivacija za istraživanja izvršena u sklopu njegove izrade, logičan naredni korak jeste prezentovanje skupa ulaznih pretpostavki korišćenih prilikom vršenja analiza čiji se tok i rezultati mogu naći u sledeća dva poglavlja, pri čemu bi se prvom od tih pretpostavki mogla smatrati ona koja se odnosi na lokaciju na kojoj se razmatrana mikro-mreža (to jest, skup generatora i potrošača) nalazi. U te svrhe je usvojena teritorija opštine Sečanj, u regionu Srednjeg Banata, u neposrednoj blizini srpsko-rumunske granice. Ova oblast je, pored izraženog potencijala za integraciju obnovljivih izvora energije, mogla da ponudi još jednu izuzetno značajnu pogodnost – precizna merenja brzine vetra i intenziteta sunčevog zračenja. Naime, na predmetnom području su od početka jula 2012. do kraja juna 2013. godine sprovedena detaljna merenja klimatskih pokazatelja od interesa, i to sa desetominutnom vremenskom rezolucijom. Kako je za potrebe ovog rada ipak uzet jednočasovni vremenski korak, za šta se rezonovanje može pronaći u maksimalnom povećanju efikasnosti vršenih proračuna bez neprihvatljivog ugrožavanja pouzdanosti istih, bilo je potrebno odrediti prosečne vrednosti brzine vetra i insolacije u svakom satu u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda. Ovo je rađeno po obrascu (f1).

$$X_j = \frac{1}{6} * \sum_{i=1}^6 X_{i,j} \quad (f1)$$

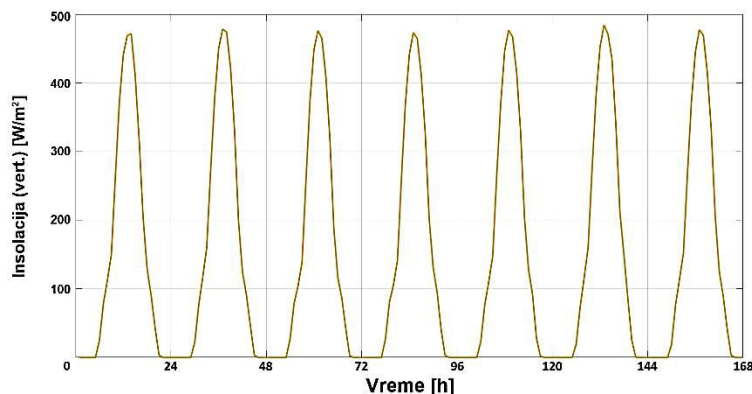
U ovoj formuli je sa X_j označena prosečna satna vrednost tražene vrednosti u satu j , dok je simbol i iskorišćen za obeležavanje indeksa svakog od šest odbiraka načinjenih u toku tog sata. Kako bi se rezultati dobijeni primenom ovog izraza ilustrovali, na Slici 1 se mogu videti dobijene prosečne brzine vetra za prvu sedmicu jednogodišnjeg perioda od interesa. Mora se naglasiti da su rezultati sasvim ravnopravno mogli biti prikazani i za čitav odabrani period, ali je odluka da se prikaže samo prva nedelja ovog intervala doneta kako bi se bar u izvesnoj meri povećala preglednost dijagrama predstavljenog na ovoj slici.



Slika 1. Brzine vetra u prvoj sedmici posmatranog perioda

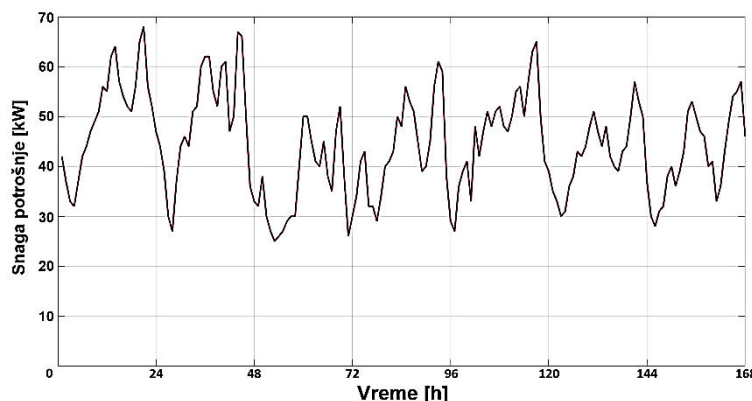
Slično postupku korišćenom za dobijanje prosečnih brzina vetra na satnom nivou, procedura za definisanje satnih vrednosti klimatskih parametara relevantnih za proizvodnju solarne elektrane je uključivala višestruko korišćenje obrasca (f1), pri čemu je, u skladu sa načinom na koji je vršeno merenje, ovde prvo bilo potrebno uprosečiti iznose horizontalne i vetrikalne komponente jačine sunčevog zračenja. Da bi se to demonstriralo na što adekvatniji način, Slika 2 pruža uvid u iznose uprosečenih vertikalnih komponenti jačine sunčevog zračenja,

pri čemu je, prateći istu logiku kao kod vetroelektrana, i ovde prikazana samo prva nedelja razmatranog jednogodišnjeg perioda.



Slika 2. Vertikalna komponenta insolacije u prvoj sedmici posmatranog perioda

Nakon što je usvojen odgovarajući skup ulaznih pretpostavki koje su se odnosile na parametre od interesa za deo sistema namenjen proizvodnji električne energije, bilo je potrebno pozabaviti se i odlikama onog dela sistema koji bi tu energiju trošio, odnosno, konzuma u razmatranoj fiktivnoj mikro-mreži. Mora se priznati da je ovde situacija bila nešto jednostavnija nego što je to bio slučaj kod proizvodnih kapaciteta, što posebno postaje očigledno ako se u obzir uzme to da ovde nije bilo potrebe za traženjem srednjih satnih vrednosti, već su odgovarajući satni iznosi snage konzuma dobijani direktno, skaliranjem merenih potrošnji u distributivnim transformatorskim stanicama u oblasti Srednjeg Banata tako da godišnji maksimum snage potrošnje iznosi 100 kW. Ova vrednost je usvojena iz praktičnih razloga, kako bi se što više olakšala uporedna analiza dobijenih vrednosti instalisanih snaga elektrana i maksimalne snage potrošnje. Za prvu nedelju posmatrane godine, dijagram satnih snaga konzuma je dat na Slici 3.



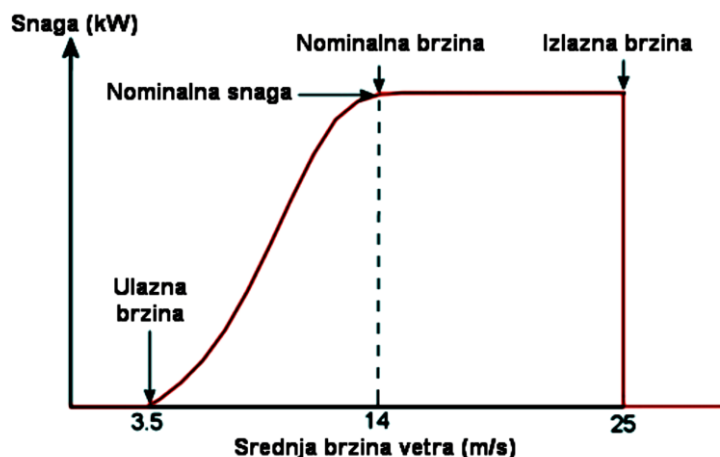
Slika 3. Snaga potrošnje u prvoj sedmici posmatranog perioda

Ovime je zaključen skup ulaznih pretpostavki neophodnih za izvršavanje predviđenih analiza, te se može preći i na specifikacije metodologije prema kojoj su proračuni urađeni. Ova metodologija će, u skladu sa organizacijom rada prikazanom u uvodnom delu, biti pojašnjena u narednom poglavlju.

3. OPIS METODOLOGIJE

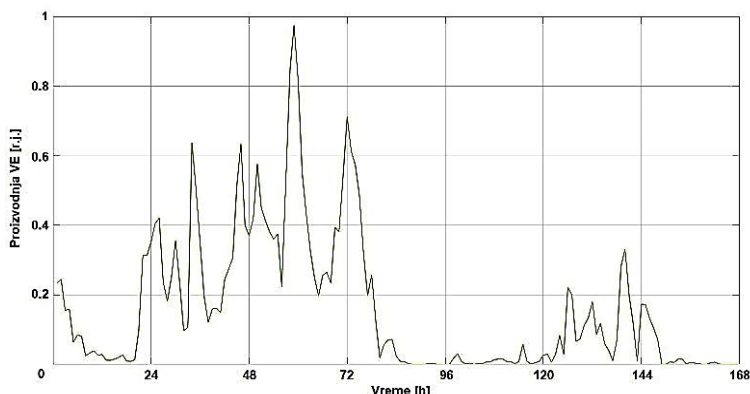
Kao što je na nekoliko mesta već isticano, osnovnu temu ovog rada čini definisanje instalisanih snaga određenih obnovljivih izvora energije tako da se, na godišnjem nivou, u što većoj meri redukuju odstupanja dijagrama snage proizvodnje iz ovih izvora od dijagrama snage potrošnje, direktno dobijenog postupkom opisanim iznad Slike 3. U radu su analizirana tri osnovna slučaja – kada se napajanje ove potrošnje vrši striktno pomoću vetroelektrane, kada se napajanje potrošnje obavlja isključivo korišćenjem fotonaponskih panela i kada se za napajanje potrošnje na raspolaganju nalaze oba razmatrana tipa generatorskih kapaciteta. Naravno, da bi se mogla izračunati vrednost satnih odstupanja snage proizvodnje od snage potrošnje za ova tri scenarija, pre svega je bilo neophodno odrediti satne snage proizvodnje iz razmatranih obnovljivih izvora, što je urađeno korišćenjem poznatih zavisnosti snaga generisanja ovih izvora od odgovarajućih klimatskih pokazatelja. Kao odgovarajući primer za takve zavisnosti bi se mogao izdvojiti tipični dijagram promene snage generisanja vetroelektrane (opskrbljene sistemom za zakretanje lopatica turbina, što je danas postalo gotovo podrazumevano) sa

varijacijama brzine vetra na mikrolokaciji na kojoj je vetroelektrana podignuta. Ovaj dijagram je prikazan i na Slici 4, datoj u nastavku.



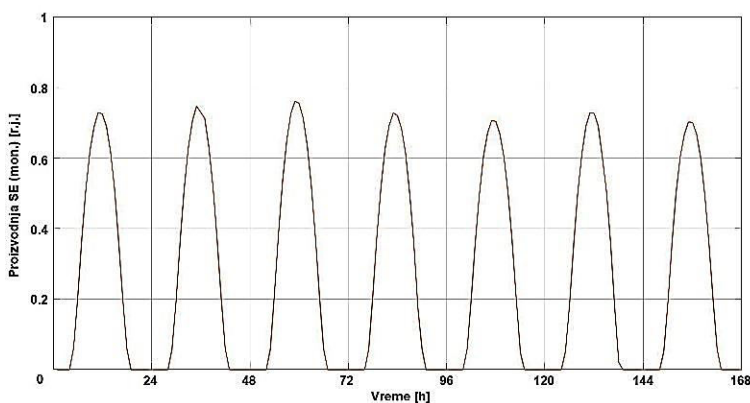
Slika 4. Zavisnost snage proizvodnje vetroelektrane od brzine vetra

Uparivanjem ovog dijagrama sa izračunatim satnim brzinama vetra na analiziranom području su dobijene satne vrednosti snage proizvodnje jedinične vetroelektrane (vetroelektrane instalisane snage od jedne relativne jedinice), za šta bi se kao razlog moglo istaći olakšavanje daljih proračuna o kojima će reći biti nešto niže. Za prvu sedmicu godine od interesa za ovaj rad, snage proizvodnje jedinične vetroelektrane se mogu videti na Slici 5.



Slika 5. Snage proizvodnje jedinične VE u prvoj sedmici posmatranog perioda

Analogno proračunima izvršenim u svrhe određivanja snage jedinične vetroelektrane, obavljene su i procene snage generisanja solarne elektrane jedinične instalisane snage, sprovedene na osnovu već pominjanih merenja potrebnih klimatskih pokazatelja. Za prvu sedmicu posmatranog perioda, ove snage generisanja se mogu videti na Slici 6.



Slika 6. Snage proizvodnje jedinične SE u prvoj sedmici posmatranog perioda

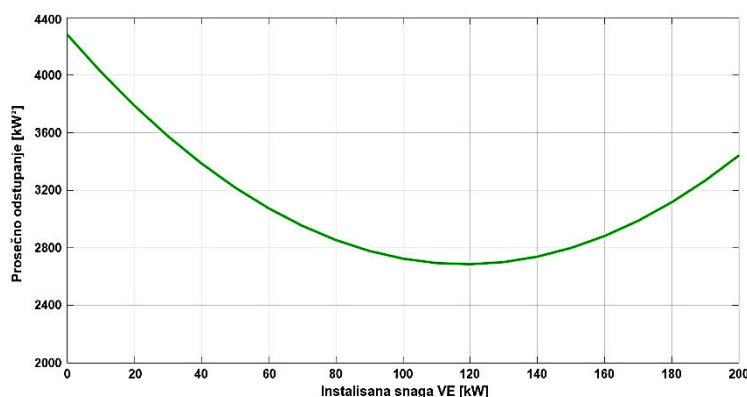
Nakon što je izračunavanje jediničnih snaga proizvodnje obe razmatrane elektrane bilo završeno, moglo se početi sa varijacijom njihovih instaliranih snaga kako bi se odredila ona pri kojoj je prilagođenost potrošnji maksimalna, pri čemu je usvojeno da se instalirane snage ovih elektrana mogu menjati u opsegu od nulte vrednosti do 200 kW, i to sa korakom od 10 kW. Shodno tome, za prva dva scenarija, pri kojima se napajanje konzuma odvija samo iz jedne od dve elektrane, razmatran je po 21 zaseban slučaj, dok je proračun za treći scenario, uz uvažavanje mogućih varijacija snaga obe elektrane u definisanom opsegu, obuhvatao čak 441 slučaj. Pri ovim slučajevima, satni iznosi snaga proizvodnje su računati jednostavnim množenjem odgovarajućih satnih vrednosti proizvodnje jediničnih elektrana razmatranom vrednošću instaliranih snaga tih elektrana. Nakon što bi se odredio niz snaga proizvodnje za neki slučaj koji bi se razmatrao u toj iteraciji, moglo bi se preći na njegovu evaluaciju, odnosno, na izračunavanje indikatora veličine odstupanja snage proizvodnje od snage konzuma, za šta je u ovom radu uzeta prosečna vrednost kvadrata odstupanja ove dve veličine na satnom nivou. Ovaj pokazatelj je određivan po formuli (f2).

$$\Delta = \frac{1}{8760} * \sum_{j=1}^{8760} (P_{g,j} - P_{p,j})^2 \quad (f2)$$

U ovom obrascu je sa j još jedanput označen redni broj razmatranog sata u toku godine, dok su simboli $P_{g,j}$ i $P_{p,j}$, tim redom, rezervisani za snagu proizvodnje generatorskih kapaciteta u sagledanoj mikro-mreži i snage potrošnje u njoj u satu j . Ukupne snage generisanja za treći scenario su računane kao sume snage proizvodnje vetroelektrane i solarne elektrane u razmatranom satu, nakon čega je ponovo bilo moguće iskoristiti izraz (f2) u njegovoj izvornoj formi. Kada su, za neki od scenarija, izračunate vrednosti izabranog indikatora za svaku od instaliranih snaga koje su obuhvaćene tim scenarijom, optimalnom instalisanom snagom izvora prisutnih u scenariju je proglašavana ona snaga pri kojoj je vrednost opisanog indikatora bila minimalna, što će se i videti u narednom poglavlju ovog rada.

4. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA

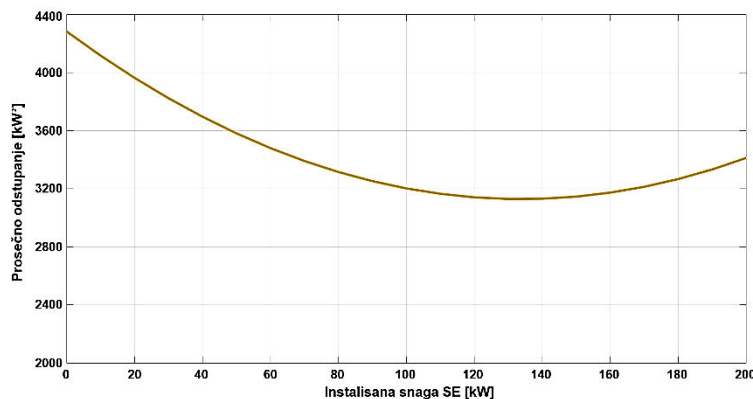
U skladu sa prethodno do detalja izloženom metodologijom, proračuni su sprovedeni za tri definisana slučaja, pri čemu je prvi od ovih slučajeva predstavljao scenario po kome se potrošnja kreirana prema dijagramima datim na Slici 3 napajala isključivo pomoću vetroelektrane. Rezultati za takvu situaciju se, predstavljeni grafičkim putem, mogu videti na dijagramu prikazanom na Slici 7, na kome zelena linija označava iznose odabranog pokazatelja, to jest, satnog kvadriranog odstupanja snage proizvodnje od snage potrošnje, uprosečenog na godišnjem nivou. Ako bi se sada sprovela analiza ovog dijagrama, moglo bi se doći do nekoliko zanimljivih zapažanja, od kojih bi se, na prvom mestu, moglo istaći to da bi se, ukoliko bi se razmatrani problem posmatrao kao optimizacioni zadatak, isti mogao svrstati u kategoriju problema sa jasno određenim globalnim minimumom prema kome potencijalna rešenja konvergiraju sa obe strane. Shodno tome, najveća vrednost prosečnog odstupanja na celom posmatranom domenu je dobijena za slučaj u kome elektrane uopšte i nema, gde iznosi gotovo 4400 kW², da bi se, potom, ovaj indikator smanjivao sve do dostizanja najmanje vrednosti u čitavom sagledanom rasponu instaliranih snaga. Ova vrednost, koja iznosi 2686,7 kW², dobijena je za instalisanu snagu vetroelektrane od 120 kW, to jest, za vrednost snage koja za 20% nadmašuje maksimalni iznos konzuma u posmatranoj mreži. Od tog optimuma se, zajedno sa iznosom instalirane snage elektrane, ponovo povećava i vrednost prosečnog kvadratnog odstupanja, pa se, prema tome, za maksimalnu analiziranu snagu elektrane od 200 kW, dobija odstupanje od približno 3500 kW².



Slika 7. Dobijeni rezultati – slučaj u kome postoji samo VE

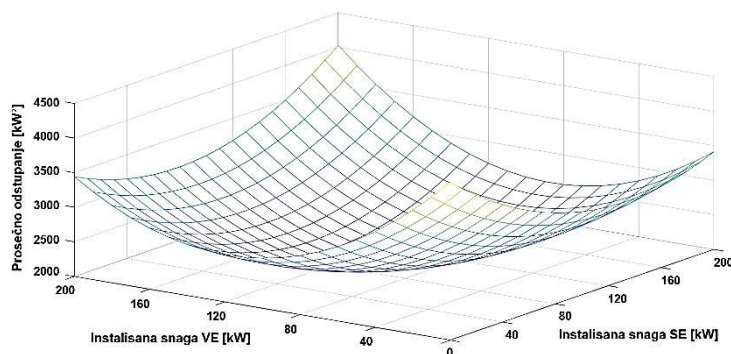
Prateći šablon ustanovljen na gornjoj slici, Slika 8 pruža prikaz identične klase rezultata, ali dobijene za slučaj u kome se kompletno napajanje potrošnje odvija pomoću solarne elektrane. Ovde je, u cilju lakšeg razlikovanja od prethodno analiziranog slučaja, za prikaz rezultata odabrana narandžasta boja linije. Slično situaciji u kojoj bi se

konzum napajao iz vetroelektrane, i ovde se može lako primetiti jasan globalni minimum razmatranog problema, pri čemu se, za razliku od prve situacije, gde je minimum dobijen za slučaj kada instalisana snaga vetroelektrane iznosi 120 kW, ovde optimalan režim rada zabeležen za slučaj u kome je instalisana snaga solarne elektrane bila jednaka 130 kW, odnosno, veća za 30% od maksimalne pretpostavljene snage potrošnje koja se napajala pomoću te elektrane. Od posebnog je značaja ovde naglasiti da je najmanja izračunata vrednost uprosečenog kvadratnog odstupanja snage generisanja od snage potrošnje nešto veća nego što je to bio slučaj u prethodnoj situaciji, kao i da ta vrednost ovde iznosi $3129,8 \text{ kW}^2$, što predstavlja povećanje od gotovo 17% u odnosu na slučaj ilustrovan na Slici 7. Takođe je vredno pomena i to da je, u ovom slučaju, skok odstupanja usled porasta instalisane snage iznad optimalnog nivoa malo manji, tako da je za instalisanu snagu solarne elektrane od 200 kW dobijen iznos odabranog indikatora od približno 3400 kW^2 , što se takođe može videti na dijagramu ispod.



Slika 8. Dobijeni rezultati – slučaj u kome postoji samo SE

Ipak, krunu praktičnog dela ovog rada nije predstavljala neka od situacija u kojima se napajanje specificiranog konzuma vrši uz pomoć jednog od dva tipa elektrana, već slučaj u kome se razmatra optimalna kombinacija ovih vrsta generatorskih kapaciteta. Rezultati za ovakvu situaciju su prikazani na Slici 9, na dijagramu koji, u skladu sa prirodom samog slučaja, ipak malo vizuelno odudara od dijagrama prikazanih na Slikama 7 i 8, pri čemu je glavna promena to što je ovaj put, za razliku od ta dva scenarija, bilo neophodno prikazati zavisnost konačnih rezultata od čak dve varijable – instalisane snage vetroelektrane i instalisane snage solarne elektrane. Prikazu vrednosti tih promenljivih je na ovoj slici posvećena horizontalna ravan, odnosno, ose x i y , od kojih prva precizira analiziranu vrednost instalisane snage solarne elektrane, a druga definiše razmatrani iznos instalisane snage vetroelektrane.



Slika 9. Dobijeni rezultati – slučaj u kome postoje VE i SE

Ako bi se analizirao dijagram prikazan na slici iznad, takođe bi se moglo doći do nekih stavki koje su uočene i za prethodno sagledane dve situacije, pri čemu je jedan određeni deo tih zaključaka ipak potrebno adaptirati tako da se može primeniti na situaciju u kojoj se variraju dve veličine. Konkretno, ovde se, pre svega, misli na to da se i ovaj put može jasno primetiti globalni optimum lociran blizu sredine optimizacionog domena, ali bi to moralo da se isprati i time da bi, u ovoj situaciji, odstupanje bilo koje od dve promenljive od optimalnih dobijenih vrednosti dovelo do porasta prosečnog kvadratnog odstupanja. Za ovaj slučaj, dobijeno je da se najmanje moguće prosečno odstupanje postiže pri iznosima instalisanih snaga elektrana od 100 kW (za vetroelektranu) i 110 kW (za solarnu elektranu), gde ovo odstupanje pada na vrednost od svega $2009,1 \text{ kW}^2$. Sada se, u nastavku toga, mora primetiti i to da je ova vrednost mnogo manja i od iznosa izračunatog za slučaj u kome se napajanje potrošnje odvija samo iz vetroelektrane, a pogotovo od iznosa ovog indikatora dobijenog za slučaj u kome ulogu snabdevača konzuma električnom energijom ima samo solarna elektrana. Shodno tome bi se moglo doći i do zaključka da bi optimalna

kombinacija dva predmetna vida elektrana zaista mogla generisati energiju daleko prilagođenije pretpostavljenim potrebama potrošnje, nego što bi to mogla ijedna od njih ako bi radila zasebno. Ipak, mora se skrenuti pažnja i na to da bi ovo zahtevalo nešto značajnija inicijalna ulaganja, pošto bi bilo potrebno izgraditi predviđene kapacitete odgovarajuće instalisane snage. Naravno, ovo ne bi trebalo uzimati kao otežavajuću okolnost, već isključivo kao napomenu o potrebnim aktivnostima kako bi se postiglo što povoljnije radno stanje sistema.

5. ZAKLJUČAK

Kao što je već naglašeno kako u apstraktu ovog rada, tako i u njegovom uvodnom delu, temu rada je sačinjavala analiza mogućnosti dimenzionisanja proizvodnih kapaciteta iz kojih se napaja konzum tako da snaga generisanja ovih jedinica bude u to većoj meri prilagođena potrebama tog konzuma. Da bi se tako nešto postiglo, na samom početku je bilo potrebno definisati odgovarajući skup ulaznih pretpostavki, te usvojiti neke zaključke izvedene iz ovih ulaznih pretpostavki. Te pretpostavke su se, pre svega, odnosile na lokaciju na kojoj se mikro-mreža nalazi, ali i na, primera radi, ponašanje potrošnje u ovoj mikro-mreži, čiji je profil na satnom nivou dobijen skaliranjem vrednosti snaga potrošnji merenih u distributivnim transformatorskim stanicama u posmatranoj oblasti. Kada je ovo bilo urađeno, bilo je neophodno odrediti i granice domena u kome će se varirati instalisane snage predmetnih elektrana, kao i slučajeve koji će se analizirati, pri čemu je zaključeno da bi najbolje bilo razmatrati tri odvojena scenarija – jedan u kome bi se potrošnja snabdevala samo iz vetroelektrane, drugi u kome bi se napajanje obavljalo isključivo iz solarne elektrane i treći u kome bi se oba tipa proizvodnih kapaciteta nalazila u pogonu.

Dobijeni rezultati su, za svaku od tri analizirane situacije, prikazani i preko numeričkih vrednosti (izraženi kako preko optimalne instalisane snage svake od obuhvaćenih elektrana za opisane slučajeve, tako i u formi najmanje dobijene vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja snaga proizvodnje i potrošnje na godišnjem nivou), i pomoću odgovarajućih dijagrama sa kojih se svaka od prethodno pomenutih vrednosti može očitati bez većeg napora. Uz to, jednom od namera autora prilikom pisanja ovog rada bi se mogla smatrati i analiza toga da li bi kombinacija vetroelektrane i solarne elektrane mogla generisati energiju na način prilagođeniji potrebama potrošača nego što bi to mogle ove elektrane pojedinačno, pri čemu je, kroz treći razmatrani scenario, ova hipoteza i dokazana.

Naravno, na ovom mestu je potrebno ograditi se i naglasiti to da su dobijeni rezultati validni isključivo za opisani skup ulaznih pretpostavki i podataka, te da ih, shodno ovome, i ne treba shvatati doslovce, već više ilustrativno, kao demonstraciju uticaja koji bi ispravno uparivanje vetroelektrana i solarnih elektrana moglo imati na prilike u sistemima. Ukoliko bi se, prema metodologiji izloženoj u za to određenoj sekciji ovog rada, sada želeo izračunati optimalni odnos instalisanih snaga elektrana za neki konkretan slučaj čiji parametri ne odgovaraju onima uzetim za potrebe ovog rada, bilo bi najbolje ponoviti čitav proračun, pri čemu bi se, prirodno, koristile realne vrednosti relevantnih veličina. Već je odavde evidentno koliko bi se različitih analiza i proračuna moglo izroditi iz opisane metode, shodno čemu je namera autora ovog rada da istraživanja u narednom periodu posvete modifikacijama ove teme, uz uvažavanje, primera radi, finansijskog aspekta, bilo sa tačke gledišta investitora u elektranu, bilo sa tačke gledišta potrošača u mreži, ili uz uzimanje u obzir drugih tipova proizvodnih kapaciteta, poput bifacijalnih solarnih elektrana ili elektrana na biomasu, koji bi time učestvovali u procesu optimizacije instalisanih snaga.

LITERATURA

- [1] Tajne P, 2015, „The Dark Side of Renewable Energy: Negative Impacts of Renewables on the Environment“, „Alternative Energy Magazine“. Članak je dostupan na sledećoj internet adresi: <https://www.altenergymag.com/article/2015/08/the-dark-side-of-renewable-energy-negative-impacts-of-renewables-on-the-environment/20963/> (pristupljeno 11.05.2021.).
- [2] Li M, Yang M, Yu Y, Li P, Si Z i Yang J, 2020, „Wind Power Probabilistic Forecasting Based on Wind Correction Using Weather Research and Forecasting Model“, in Proc. „2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)“, pp. 619-624.
- [3] Zhou B, Sun B, Gong X i Liu C, 2019, „Ultra-short-term prediction of wind power based on EMD and DLSTM“, in Proc. „2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications“, pp. 1909-1913.
- [4] Zhong Y-J i Wu Y-K, 2020, „Short-Term Solar Power Forecasts Considering Various Weather Variables“, in Proc. „2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)“, pp. 432-435.
- [5] Shanghavi S, Mack Grady W i Schwarz B, 2012, „Evaluating the impact of wind turbine shadows on an integrated wind and solar farm“, in Proc. „2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)“, pp. 1-6.
- [6] Prema V, Bhaskar MS, Almakhles D, Gowtham N i Rao KU, 2022, „Critical Review of Data, Models and Performance Metrics for Wind and Solar Power Forecast“, „IEEE Access“, „Vol. 10“, pp. 667-688.
- [7] Ginsberg M, Goeta S i Fthenakis V, 2018 „Grid Flexibility and the Cost of Integrating Variable Renewable Energy: Toward a Renewable Energy Integration Adder for San Diego Gas and Electric Service Territory

- and the California Electric Grid“, in Proc. „2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)“, pp. 1402-1405.
- [8] Pedersen TT, Victoria M, Rasmussen MG i Andersen GB, 2021, „Exploring flexibility of near-optimal solutions to highly renewable energy systems“, in Proc. „2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)“, pp. 387-391.
- [9] Wu YK, Li Y i Wu YZ, 2018, „Overview of power system flexibility in a high penetration of renewable energy system“, in Proc. „2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)“, pp. 1137-1140.
- [10] Xing T, Caijuan Q, Liang Z, Pengjiang G, Jianfeng G i Panlong J, 2017, „A comprehensive flexibility optimization strategy on power system with high-percentage renewable energy“, in Proc. „2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)“, pp. 553-558.
- [11] Byers C i Botterud A, 2020, „Additional Capacity Value From Synergy of Variable Renewable Energy and Energy Storage“, „IEEE Transactions on Sustainable Energy“, „Vol. 11“, „No. 2“, pp. 1106-1109.
- [12] Wang Z et al., 2017, „Research on the active power coordination control system for wind / photovoltaic / energy storage“, in Proc. „2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)“, pp. 1-5.
- [13] Shi Z, Wang W, Huang Y, Li P i Dong L, 2022 „Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control“, „CSEE Journal of Power and Energy Systems“, „Vol. 8“, „No. 1“, pp. 95-104.
- [14] Vuc G, Borlea I, Barbulescu C, Prostean O, Jigoria-Oprea D i Neaga L, 2011, „Optimal energy mix for a grid connected hybrid wind – Photovoltaic generation system“, in Proc. „2011 IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)“, pp. 129-132.
- [15] Nassar ME i Salama MMA, 2016, „Optimal sizing of wind/solar mix for supply security of active power distribution systems“, in Proc. „2016 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)“, pp. 1-4.
- [16] Waiwong S i Damrongkulkamjorn P, 2016, „Optimal sizing for stand alone power generating system with wind-PV-hydro storage by mixed-integer linear programming“, in Proc. „2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)“, pp. 437-441.