

Definisanje optimalnog proizvodnog miksa u dekarbonizovanom energetskom sistemu

Definition of the Optimal Generation Mix in Decarbonized Power System

Vladan Ristić^{*,***}, Miljan Žikić^{*}, Dragana Vujanović^{**}, Ivan Trkulja^{*}, Ognjen Mijušković^{*}

^{*} Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“, Kneza Miloša 11, 11000 Beograd, Srbija

^{**} Resalta d.o.o. Beograd, Braće Baruh 24, 11000 Beograd, Srbija

^{***} Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Rezime - Značajan napredak u ekološkoj svesti široke javnosti u prethodnoj deceniji je doveo do promene načina na koji se sagledava perspektiva elektroenergetskih sistema, pri čemu je najveća prilagodavanja pretrpeo sektor proizvodnje energije, u kome su ulogu koju su držale termoelektre preuzeli obnovljivi izvori energije. Tu se, prevashodno, ističu solarne elektrane i vetroelektrane. Međutim, ovaj zaokret je dočekan sa velikom dozom skepticizma, gde je, kao argument protiv masovne integracije obnovljivih izvora, često naglašavana varijabilnost njihove snage generisanja, te oscilacije prisutne u njihovom dnevnom dijagramu proizvodnje. Ono što je, pak, zanemarivano u tim izlaganjima jeste činjenica da dnevni dijagram proizvodnje zavisi od tipa izvora, te da, na primer, vetroelektrane i solarne elektrane nemaju identičan dnevni dijagram. Prema tome, do dnevnih maksimuma i minimuma proizvodnje ovih izvora ne dolazi u istom trenutku, te je jasno da bi objedinjeni dijagram na kome bi se u obzir uzela oba tipa elektrana imao daleko manje varijacija snage od pojedinačnih grafika proizvodnje svake od elektrana. Pritom bi stepen smanjenja varijacija, između ostalog, zavisio i od odnosa instaliranih snaga ovih elektrana. Shodno tome, u radu će se sprovesti analiza na test sistemu koji se napaja isključivo iz vetroelektrana i solarnih elektrana, uz uzimanje u obzir dva tipa solarnih panela – monofacijalnih i bifacijalnih. Smatraće se da je zbir instaliranih snaga ovih izvora konstantan, dok će procenat sa kojim svaka od elektrana učestvuje u toj snazi biti variran sa ciljem definisanja onog odnosa instaliranih snaga pri kome dolazi do najmanjih varijacija zbirne snage proizvodnje u periodu od godinu dana, sa satnom rezolucijom. Kao indikator smanjenja varijacija će se koristiti minimalna srednja vrednost kvadrata odstupanja satnih vrednosti ukupne snage generisanja iz opisanih elektrana od prosečne vrednosti snage njihove sumirane proizvodnje na godišnjem nivou.

Ključne reči - Balansiranje sistema, Vetroelektrane, Solarne elektrane, Bifacijalni paneli, Statistička analiza

Abstract - The development of the environmental tendencies in the previous decade led to the alteration of the way in which the perspective of the power systems is seen, where the largest number of adaptations was made to the sector of energy production, in which the role that was occupied by the thermal

plants was taken over by the wind and solar plants. However, this change was met with a dose of scepticism, where the variability of the generation power of these plants and the oscillations in their daily production diagram were commonly listed as the arguments against the massive integration of these sources. What was neglected, nonetheless, is the fact that the daily production diagram depends on the type of the source, so the diagrams of the wind and solar plants, for instance, are not identical. Hence, the daily minimums and maximums of generation power of these units would not occur simultaneously, so the unified diagram of both plants would show less oscillations than their individual diagrams. The level of the variations' reduction would depend on the ratio of the installed capacities of the plants. Therefore, the paper will contain analysis of the test system supplied from the wind and solar plants, with two types of solar panels (monofacial and bifacial) considered. The total installed capacity of these sources will be kept constant, but their share in this amount will be varied in order to define the ratio of the individual installed capacities for which the variations of the total production power on a yearly level is minimal. As the indicator of the variations' reduction, the minimal mean square deviation of the total hourly production powers from their yearly average will be selected.

Index Terms - System balancing, Wind plants, Solar plants, Bifacial panels, Statistical analysis

I UVOD

Održivost trenutnog sagledavanja koncepta elektroenergetskih sistema je, kao što je već i poznato, postala predmet velikog broja kako stručnih, tako i laičkih diskusija, u skladu sa čime su i zaključci takvih razmatranja, prema interesovanjima i interesima samih učesnika, izraženo raznoliki. Ipak, ukoliko bi se potražila jedna stavka oko koje postoji makar koliki konsenzus, to bi skoro zasigurno bila želja za postepenim gašenjem termoelektrana, čiji se uticaj na efekat staklene bašte i na globalno zagrevanje smatra veoma značajnim, te okretanje ka drugim vidovima proizvodnje električne energije, gde bi se, prema trenutnom stepenu razvoja, na prvo mesto mogle staviti vetroelektrane i solarne elektrane.

Naravno, kao što je kroz istoriju i bio slučaj sa većinom noviteta, i prilikom inicijalnih pokušaja široke implementacije obnovljivih

izvora se vodio veliki broj polemika o svemu od sposobnosti tog tipa izvora za održavanje stabilne proizvodnje, pa do posledica koje bi rasprostranjenija primena tih generatora imala na ostatak elektroenergetskog sistema. Neke od strepnji koje su se javljale u široj javnosti pre nego što su ovi izvori postali opšteprihvaćeni su na pregledan način sumirane u [1]. Mora se napomenuti da ovaj članak ni na koji način ne predstavlja naučni rad, ali da zbog toga i predstavlja odličan način da se stekne uvid u način razmišljanja populacije suočene sa prethodno nepoznatom tehnologijom.

U argumentovanim raspravama na temu integracije obnovljivih izvora u sisteme, kao jedan od osnovnih razloga za zabrinutost u vezi sa prelaskom na ovaj tip generatora je veoma često isticana njihova varijabilnost, kao i nemogućnost da se snaga proizvodnje ovih izvora na adekvatan način predvidi za vremenske periode koji bi mogli biti relevantni za normalno funkcionisanje sistema. Taj problem se, pre svega, može povezati sa naglim oscilacijama primarnih energenata koje ovakvi kapaciteti koriste, to jest, sa promenama brzine vetra i jačine sunčevog zračenja na lokaciji na kojoj se nalazi elektrana čiju je proizvodnju potrebno predvideti. U skladu sa ovime, prvu grupu radova koji bi se mogli smatrati važnim za temu o kojoj će biti reči u narednim poglavljima čine radovi koji su se bavili razvojem različitih metoda namenjenih što preciznijem i pouzdanijem predviđanju proizvodnji solarnih elektrana i vetroelektrana. Kao odgovarajući primeri ovih radova bi se mogli navesti radovi [2] i [3], pri čemu su, u prvom od njih, autori razvijali probabilističku tehniku predviđanja generisanja vetroelektrane, baziranu na numeričkim prognozama klimatskih pokazatelja, dok je drugi rad posvećen ispitivanju uticaja koji bi uvažavanje istih ovih vremenskih prognoza imalo na preciznost kratkoročne prognoze snage generisanja solarne elektrane. Pored ova dva rada, treba istaći i rad [4], u kome je prikazan pregled najznačajnijih metoda namenjenih opisanim zadacima.

Naravno, samo pitanje varijabilnosti snage proizvodnje energije u obnovljivim izvorima pokrenulo je i drugo, možda čak i bitnije pitanje, a to je pitanje uticaja koji bi takvo ponašanje generatora moglo imati na ostatak sistema, pri čemu su tu, na prvom mestu, navođeni potrošači čija bi pouzdanost napajanja energijom mogla biti ugrožena ukoliko se ne bi preduzele izvesne mere kojima bi se moglo delovati preventivno i izbeći pomenute posledice. Kada su diskusije na ovu temu uznapredovale, počela je i daleko češća upotreba termina „fleksibilnost elektroenergetskog sistema”, što je dovelo do nastanka nezanemarljivog broja radova koji su se i bavili problemima fleksibilnosti sistema u uslovima diktiranim intenzivnom integracijom obnovljivih izvora električne energije. Takvi su, između ostalih, i radovi [5-8], pri čemu bi rad [7] bilo moguće izdvojiti kao odličnu osnovu za dalja razmišljanja na ovu temu, te ga i preporučiti nekome ko nije prethodno imao kontakta sa pojmom fleksibilnosti sistema, a želeo bi da stekne uvid u ovu izazovnu, ali i jako aktuelnu tematiku. Kao opšte pravilo kog su se, skoro nezavisno od konkretnog razmatranog slučaja, držali radovi koji su se bavili ovim problemima, može se navesti to da su, kao potencijalni izvori fleksibilnosti u elektroenergetskim sistemima, gotovo svaki put pominjani mehanizmi za upravljanje potrošnjom, podizanje sistema za skladištenje električne energije i izgradnja novih interkonektivnih vodova.

Što se, primera radi, sistema za skladištenje električne energije tiče, njihova komplementarnost sa obnovljivim izvorima bi se, u

neku ruku, mogla smatrati i prirodnom. Naime, osnovni problem sa kojim bi se konzum koji bi se energijom napajao isključivo iz obnovljivih izvora suočio bi bila mogućnost da vetra ili sunčevog zračenja naglo nestane, te da snaga proizvodnje tih izvora padne na nultu vrednost. Nasuprot tome, obnovljivi izvori bi mogli biti stavljeni u situaciju da, u slučaju u kom bi njihova proizvodnja bila veća od snage potrošnje u sistemu, nemaju gde da plasiraju generisanu energiju, što bi, sa stanovišta investitora u elektranu, predstavljalo finansijski gubitak. Da bi se ovo izbeglo, sistemi za skladištenje daju opciju da se, u trenucima u kojima proizvodnja nadmašuje potrošnju, višak energije uskladišti kako bi se mogao iskoristiti onda kada potrebe potrošnje prevazilaze raspoloživu snagu generisanja. Time bi se mogli rešiti problemi kako jedne, tako i druge strane, zbog čega je i tema zajedničkog rada sistema za skladištenje i obnovljivih izvora energije takođe uvek aktuelna među autorima istraživanja, kao što su ona opisana u [9-11].

Iako je čvrsto vezan za radove citirane u prošlim pasusima, ovaj rad, ipak, neće biti baziran na istim postulatima kao oni, gde bi se, kao osnovna razlika između njih, moglo naglasiti to što su ti radovi bili zasnovani na saniranju posledica masovne integracije obnovljivih izvora u sistem, dok je ovaj rad formiran na temelju preispitivanja pretpostavke po kojoj bi se za nivelisanje dnevnih dijagrama proizvodnje obnovljivih izvora morale aktivirati neke od eksternih mera. Naime, uzimajući u obzir to da vetroelektrane i solarne elektrane ne koriste isti tip energenta, moglo bi se doći do zaključka da i njihovo ponašanje u toku dana ni u kom slučaju neće biti identično. Shodno tome, moglo bi se zaključiti i to da bi ukupni dijagram proizvodnje ovih elektrana, zavisno od razmere njihovih instalisanih snaga, mogao imati daleko manje varijacije od njihovih pojedinačnih dijagrama, zbog čega temu ovog rada predstavlja definisanje optimalnog odnosa instalisanih snaga tri tipa elektrana (vetroelektrane, monofacijalne i bifacijalne solarne elektrane), tako da se u što većoj meri umanje odstupanja zbirne snage njihove proizvodnje od godišnje prosečne vrednosti. Iako ovo nije prvi rad koji se bavi definisanjem optimalnih odnosa tih elektrana [12-14], autorima nije poznato da je ovakav postupak prethodno sproveden za područje Srednjeg Banata, i to na osnovu podataka merenih na realnoj lokaciji u ovom regionu.

Poglavlje II je posvećeno izlaganju pretpostavki na osnovu kojih je ovaj rad urađen, pri čemu se prvi deo ovog poglavlja odnosi na tipove elektrana čije su snage bile varirane u sklopu sprovedenih analiza, dok se drugi deo odnosi na lokaciju na kojoj su izvršena merenja brzine vetra i jačine sunčevog zračenja koja su korišćena za dalje proračune. Poglavlje III do detalja izlaže metodologiju koja je primenjena pri obavljanju proračuna, počev od estimacije snaga generisanja elektrana koje pripadaju svakom od prethodno opisanih tipova, pa sve do statističke evaluacije odstupanja snaga proizvodnje različitih kombinacija ovih tipova izvora od srednjih godišnjih vrednosti ovih snaga. U nastavku ovoga, Poglavlje IV sadrži prikaz rezultata sprovedenih analiza, dat kako u grafičkoj, tako i u numeričkoj formi, radi veće čitljivosti i jednostavnijeg tumačenja istih, dok je Poglavlje V zapravo poglavlje u kome su navedeni zaključci sprovedenih proračuna, ali je, pored ovoga, napomenuta i namera autora da unaprede urađeno istraživanje, te da takvu nadogradnju implementiraju u neki od narednih radova.

II ULAZNE PRETPOSTAVKE

Kao što je u uvodnom delu rada i napomenuto, ovo poglavlje će

se prevashodno baviti skupom pretpostavki koje su morale biti usvojene pre nego što se krenulo sa vršenjem proračuna čiji će se rezultati razmatrati u nastavku rada i na osnovu kojih će se doći do zaključaka koji će biti predstavljeni u završnom delu teksta. U skladu sa time, za početak je potrebno još jedanput naglasiti koje su tehnologije za proizvodnju električne energije iz obnovljivih energenata obuhvaćene ovim analizama – generisanje električne energije korišćenjem energije vetra i energije sunčevog zračenja.

Naravno, pažljivom čitaocu ne bi promaklo da je u prethodnom delu rada bilo pominjanja tri individualna tipa elektrana, dok su u gornjem pasusu nabrojane svega dve tehnologije za proizvodnju električne energije, te bi se mogao zapitati da li je ovo posledica nepažnje autora ili je tu posredi, ipak, nešto kompleksnije. Tačan odgovor na ovo pitanje je druga od ovih opcija, za šta objašnjenje leži u tome da su, uz vetroelektrane, u nastavku rada razmatrana i čak dva tipa solarnih elektrana, odnosno, elektrane formirane od monofacijalnih i elektrane formirane od bifacijalnih panela. Kao što im samo ime i sugeriše, bifacijalni paneli generišu električnu energiju nezavisno od toga koja od njihove dve strane je izložena sunčevom zračenju. Iako su daleko manje zastupljeni u trenutnoj praksi od standardnih, monofacijalnih panela, ovi paneli pružaju brojne pogodnosti u poređenju sa njima, kao što su, primera radi, bolje korišćenje reflektovane komponente sunčevog zračenja ili, u velikom broju slučajeva, duže trajanje, uzrokovano time što su obe strane bifacijalnih panela otporne na ultraljubičasto zračenje. Tipičan izgled ova dva tipa panela (sa vertikalnim postavljanjem bifacijalnih panela) je dat na Slici 1.



(a)



(b)

Slika 1. Tipičan izgled monofacijalnih (a) i bifacijalnih (b) solarnih panela

Nakon što su tri tipa elektrana koja će biti razmatrana u nastavku rada definisana, može se preći i na pretpostavku načinjenu u vezi sa lokacijom na kojoj bi se ove fiktivne elektrane mogle podići, za šta je, za potrebe ovog rada, odabrana teritorija opštine Sečanj, u regionu Srednjeg Banata, u neposrednoj blizini državne granice Srbije i Rumunije. Ova lokacija, ni u kom slučaju, nije odabrana

nasumično, već na osnovu potencijala za integraciju obnovljivih izvora energije koji može ponuditi eventualnim investitorima, ali i zbog dostupnih merenih realnih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja. Naime, u ovoj oblasti su, od leta 2012. godine do leta 2013. godine, vršena merenja ova dva pokazatelja, i to sa desetominutnom vremenskom rezolucijom.

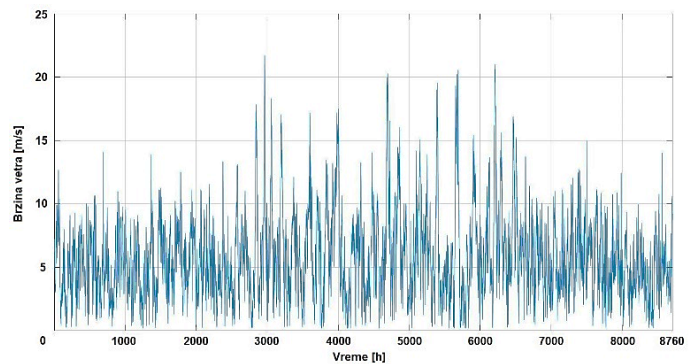
Za potrebe ovog rada je, ipak, smatrano da je dovoljno precizno raditi sa podacima koji imaju satnu vremensku rezoluciju, usled čega je sproveden proces određivanja prosečnih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja za svaki sat u toku posmatranog jednogodišnjeg intervala. Ovo je rađeno prema formuli (1).

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

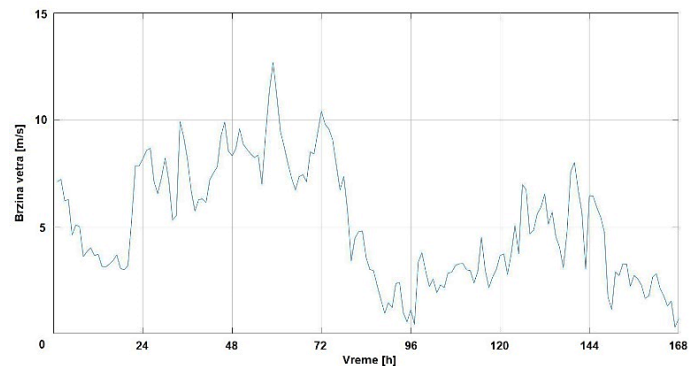
U ovoj formuli, oznake imaju sledeće značenje:

- X – veličina čija se satna prosečna vrednost traži;
- j – sat u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda;
- i – oznaka odbirka veličine X u toku sata j .

Primeru radi, merene brzine vetra, uprosečene na nivou svakog sata u predmetnom periodu, mogu se videti na Slici 2, čiji prvi deo obuhvata čitav ovaj period, dok drugi deo, radi preglednosti, prikazuje isključivo prvu sedmicu tog perioda.



(a)



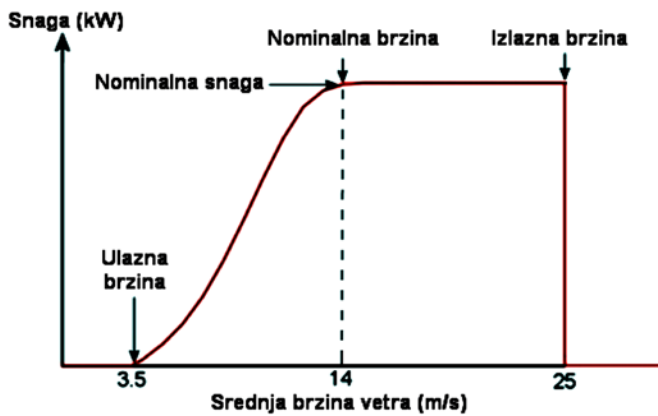
(b)

Slika 2. Uprosečene satne brzine vetra na godišnjem nivou (a) i na sedmičnom nivou (b)

III METODOLOGIJA ZA VRŠENJE PRORAČUNA

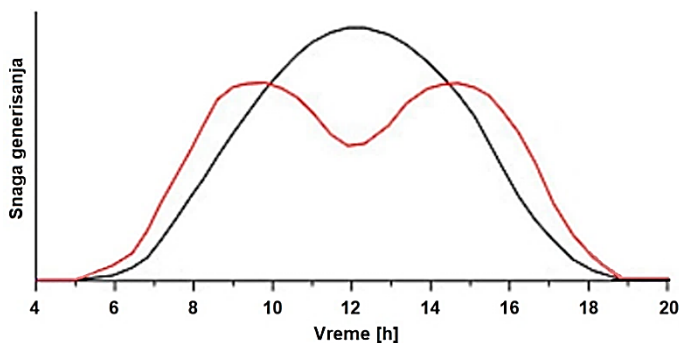
Nakon završetka prvog koraka u obavljanju analiza, opisanog u okviru prethodnog poglavlja, na raspolaganju su se nalazili tipovi

elektrana koje bi se mogle koristiti za predmetne proračune, kao i lokacija na kojoj bi ove elektrane mogle biti podignute, a, shodno tome, i uprosečene satne brzine vetra i jačine sunčevog zračenja na ovoj lokaciji. Naredna faza izrade potrebnih analiza je, stoga, mogla da otpočne konverzijom merenih vrednosti brzine vetra i jačine sunčevog zračenja u odgovarajuće vrednosti proizvodnje energije u pomenutim elektranama. Da bi se ovo moglo uraditi, bilo je potrebno podsetiti se zavisnosti vrednosti generisanja ovih elektrana od njihovih primarnih energenata. Na Slici 3 se, kao adekvatan primer ove zavisnosti, može videti promena vrednosti generisanja tipične vetroturbine sa varijacijama brzine vetra.



Slika 3. Tipični dijagram snage proizvodnje vetroturbine u zavisnosti od brzine vetra

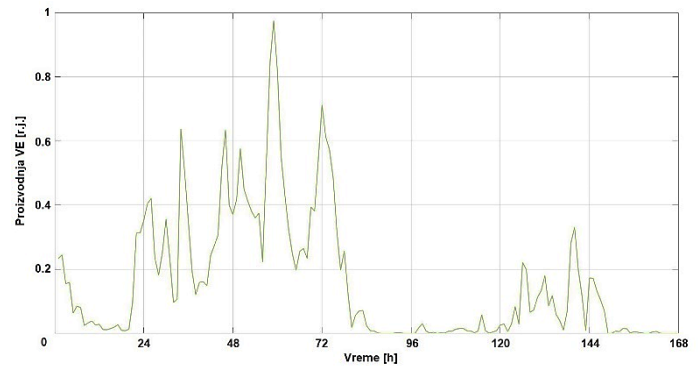
Što se tiče bifacijalnih solarnih panela, dijagram proizvodnje ovih izvora energije od sunčevog zračenja na odabranoj lokaciji zavisi, pre svega, od njihove orijentacije, odnosno, od načina na koji su ovi paneli postavljeni. Za potrebe ovog rada je usvojena pretpostavka da su paneli postavljeni vertikalno, i to tako da im je jedna strana okrenuta ka istoku, a druga ka zapadu. Dijagram proizvodnje tako okrenutih panela je karakterističan po tome što ima dva maksimuma, jedan pre, a drugi nakon podneva, kao što se i može videti na Slici 4, naznačeno crvenom bojom. Poređenje radi, na ovom dijagramu je crnom bojom označen dijagram koji bi odgovarao monofacijalnim panelima iste instalisane snage.



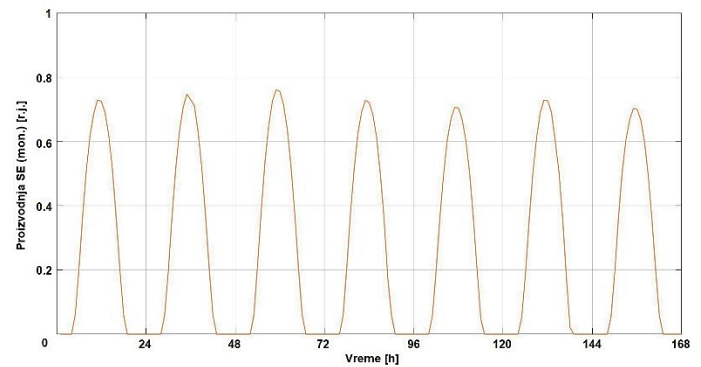
Slika 4. Tipični dijagram dnevne proizvodnje monofacijalnih i bifacijalnih solarnih panela

U skladu sa onim što je naglašeno kako u rezimeu, tako i u uvodu ovog rada, cilj istog je bilo definisanje optimalnog međusobnog odnosa instalisanih snaga razmatrane tri elektrane, što je značilo i da je ove snage bilo neophodno varirati u toku vršenja proračuna.

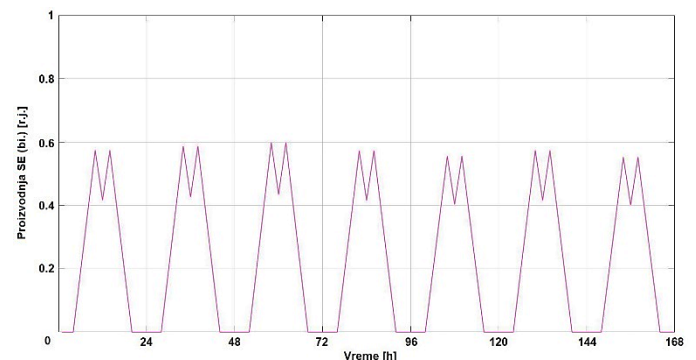
Kako bi se to što više olakšalo, na početku vršenja analiza je bilo potrebno definisati snage proizvodnje ovih elektrana za svaki sat u godini, pri čemu je uzeto da je instalisana snaga svake od njih jedinična, to jest, jednaka jednoj relativnoj jedinici. Na Slikama 5, 6 i 7 su, istim redom, dati iznosi snaga generisanja jedinične vetroelektrane, jedinične solarne elektrane sastavljene isključivo od monofacijalnih panela i jedinične solarne elektrane formirane isključivo od bifacijalnih panela, gde je, radi bolje preglednosti, posmatrana samo prva sedmica predmetne godine.



Slika 5. Snaga proizvodnje jedinične vetroelektrane u prvoj sedmici posmatranog perioda



Slika 6. Snaga proizvodnje jedinične solarne elektrane (mon.) u prvoj sedmici posmatranog perioda



Slika 7. Snaga proizvodnje jedinične solarne elektrane (bi.) u prvoj sedmici posmatranog perioda

Kada je izračunavanje jediničnih snaga proizvodnje bilo gotovo, moglo se otpočeti sa varijacijom instalisanih snaga razmatranih elektrana, pri čemu je usvojena još jedna pretpostavka, po kojoj je ukupan broj jedinica svih tipova bio, u svakom slučaju, jednak 100, dok je smatrano da je snaga jedne jedinice, ma kog tipa, bila

jednaka 10 kW. U skladu sa time, zbirna instalisana snaga sve tri elektrane je ostajala jednaka 1 MW, bez obzira na odnos njihovih instalisanih snaga. Zatim su isprobavane sve kombinacije brojeva jedinica po tipovima proizvodnih kapaciteta, tako da je na kraju bilo moguće odrediti onaj odnos proizvodnih kapaciteta pri kome je dolazilo do najmanjih odstupanja zbirne snage proizvodnje od njenog godišnjeg proseka. Za svaki sat, snaga proizvodnje svake elektrane je izračunata množenjem njoj odgovarajuće jedinične snage proizvodnje usvojenom instalisanom snagom proizvodne jedinice od 10 kW i brojem tih jedinica u sagledanoj kombinaciji. Zatim je zbirna satna vrednost generisanja određivana sabiranjem snaga proizvodnji sve tri elektrane u tom satu, da bi, nakon toga, godišnji prosek snaga proizvodnje za posmatranu kombinaciju bio određen u skladu sa obrascem (2).

$$P_{avg} = \frac{1}{8760} * \sum_{j=1}^{8760} P_{g,j} \quad (2)$$

U ovom obrascu, simboli imaju značenje dato ispod:

- P_{avg} – godišnji prosek zbirne snage proizvodnje [kW];
- j – sat u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda;
- $P_{g,j}$ – zbirna snaga proizvodnje u satu j [kW].

Konačno, za svaku od ovih kombinacija je bilo potrebno odrediti i statistički pokazatelj po kome su kombinacije bile ocenjivane, a potom i rangirane. To je, ovaj put, bila srednja vrednost kvadrata odstupanja satnih vrednosti ukupne snage generisanja iz opisanih elektrana od prosečne snage njihove sumirane proizvodnje na godišnjem nivou, izračunavana prema formuli (3).

$$\Delta = \frac{1}{8760} * \sum_{j=1}^{8760} (P_{g,j} - P_{avg})^2 \quad (3)$$

Upravo je ona kombinacija instalisanih snaga elektrana pri kojoj je dobijena minimalna vrednost pokazatelja definisanog izrazom (3) proglašena optimalnom sa aspekta urađene analize, o čemu će nešto više diskusije biti u narednom poglavlju.

IV DOBIJENI REZULTATI

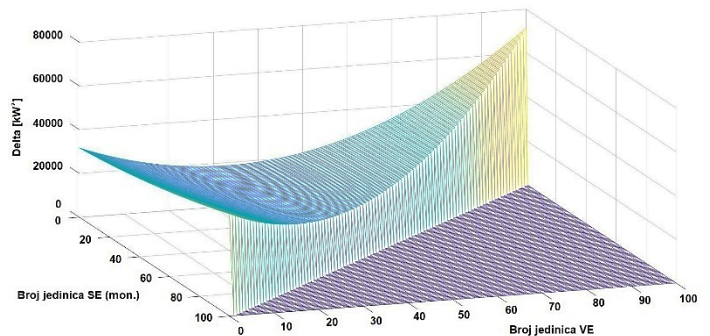
U Tabeli 1 i na Slici 8 se, tim redom, mogu videti kako tabelarni, tako i grafički prikaz rezultata dobijenih sprovedenom analizom, pri čemu Tabela 1 pruža uvid u numeričke vrednosti instalisanih snaga pri kojima bi, prema dobijenim rezultatima, dolazilo do minimalnog srednjeg odstupanja snage od godišnjeg proseka. Sa druge strane, Slika 8 ilustruje varijaciju ovog pokazatelja zavisno od odabrane kombinacije instalisanih snaga, pri čemu su na dve horizontalne ose date instalisane snage vetroelektrane i solarne elektrane formirane od monofacijalnih solarnih panela, gde bi se snaga preostale elektrane mogla lako odrediti na osnovu ove dve.

Tabela 1. Tabelarni prikaz optimalnih instalisanih kapaciteta

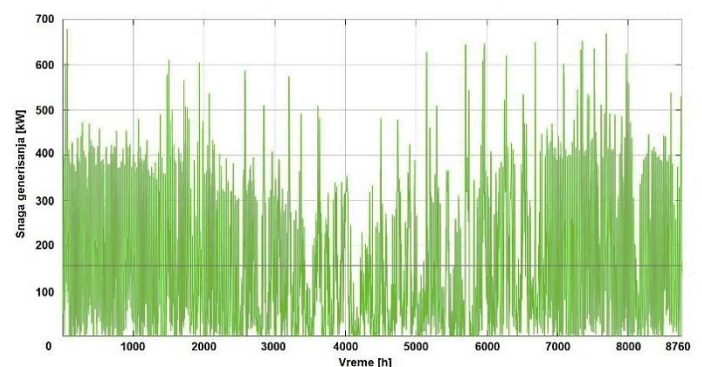
Tip elektrane	Instalisana snaga [kW]
Vetroelektrana	320
Solarna elektrana (mon.)	0
Solarna elektrana (bi.)	680

Kao što se može videti iz prikazanih rezultata, u ovom slučaju je dobijeno da optimalna kombinacija instalisanih snaga kapaciteta ne bi trebalo da sadrži monofacijalne solarne panele, pri čemu se

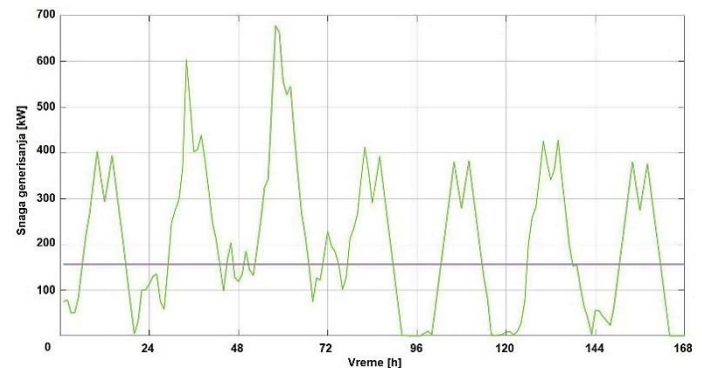
u toj varijanti dobija da je iznos pokazatelja Δ jednak 18614 kW². Mora se napomenuti da ove rezultate ne treba posmatrati kao bilo kakvo univerzalno pravilo, posebno ako se uzme u obzir njihova striktna povezanost sa usvojenim skupom ulaznih pretpostavki, ali da mogu biti protumačeni kao pokazatelj važnosti obavljanja prikazanih proračuna za realne situacije, sa preciznim merenim podacima u još dužim vremenskim intervalima. Slika 9 prikazuje zbirnu snagu proizvodnje pri optimalnoj kombinaciji instalisanih snaga. Gornji deo slike se odnosi na čitav jednogodišnji period, dok donji deo slike pokazuje prvu sedmicu tog perioda. Na oba dela ove slike je ljubičastom linijom označena prosečna vrednost godišnje snage proizvodnje, dobijena za optimalni odnos snaga.



Slika 8. Zavisnost godišnjeg odstupanja snage proizvodnje od kombinacije instalisanih kapaciteta



(a)



(b)

Slika 9. Optimalne snage proizvodnje energije na godišnjem nivou (a) i na sedmičnom nivou (b)

V ZAKLJUČAK

Kao što je u uvodnom delu i navedeno, ciljem ovog rada se može smatrati definisanje optimalnog odnosa instaliranih snaga tri tipa elektrana baziranih na obnovljivim energentima – vetroelektrane, monofacijalne solarne i bifacijalne solarne elektrane, tako da se u najvećoj mogućoj meri smanje oscilacije njihove kombinovane snage proizvodnje u toku jednogodišnjeg perioda. Naravno, da bi se ovo realizovalo, bilo je potrebno, pre bilo kog drugog koraka, usvojiti odgovarajući skup ulaznih pretpostavki, od kojih su se neke odnosile na samu lokaciju na kojoj bi ove fiktivne elektrane mogle biti podignute, dok su se druge pretpostavke odnosile na karakteristike analiziranih elektrana.

Nakon usvajanja neophodnih ulaznih pretpostavki, naredni korak je predstavljalo računanje satnih vrednosti proizvodnji jediničnih elektrana za svaki od tipova izvora obuhvaćenih ovim radom, što je urađeno kako bi se olakšalo određivanje satnih vrednosti snaga proizvodnji tih elektrana nakon što je otpočelo variranje njihovih instaliranih snaga. Upravo je predmetno variranje, u kombinaciji sa primenom odgovarajuće formule iz domena statistike, služilo za estimaciju optimalnog odnosa instaliranih snaga elektrana, pri čemu se još jednom mora naglasiti da su dobijeni rezultati validni isključivo za razmatrani skup ulaznih podataka, te da bi promena ovih podataka neizbežno dovela i do promene rezultata. Shodno tome, date rezultate ne treba shvatati doslovce, već kao indikator važnosti koju bi vršenje ovakvih proračuna potencijalno moglo imati za integraciju obnovljivih izvora energije u sisteme.

Ovaj rad se, pored toga što sadrži pomenutu statističku analizu, može smatrati i stabilnom osnovom za dalja istraživanja koja bi se mogla uraditi na teme slične ovoj, pri čemu je namera autora da prvi naredni rad bude baziran na proračunavanju optimalnog odnosa instaliranih snaga ovih proizvodnih kapaciteta tako da se kriva njihove zbirne proizvodnje na godišnjem nivou u što većoj meri poklopi sa promenama potrošnje, kako bi se još više istakao praktični značaj ovih i sličnih analiza za olakšano funkcionisanje elektroenergetskih sistema u budućnosti.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Tajne, P. The Dark Side of Renewable Energy: Negative Impacts of Renewables on the Environment, *Alternative Energy Magazine*, 2015. Dostupno na: <https://www.altenergymag.com/article/2015/08/the-dark-side-of-renewable-energy-negative-impacts-of-renewables-on-the-environment/20963/> [pristupljeno 17.03.2021].
- [2] Li M., Yang, M., Yu, Y., Li, P., Si, Z., Yang, J. 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)*, Jinan, China, pp. 619-624, 4-6. December 2020. <https://doi.org/10.1109/SCEMS48876.2020.9352362>
- [3] Zhong, Y.-J., Wu, Y.-K. Short-Term Solar Power Forecasts Considering Various Weather Variables, in Proc. *2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, Taichung City, Taiwan, pp. 432-435, 13-16. November 2020. <https://doi.org/10.1109/IS3C50286.2020.00117>
- [4] Prema, V., Bhaskar, M.S., Almakles, D., Gowtham, N., Rao, K.U. Critical Review of Data, Models and Performance Metrics for Wind and Solar Power Forecast, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 667-688, 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3137419>
- [5] Ginsberg, M., Goeta, S., Fthenakis, V. 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)*, Waikoloa, HI, USA, pp. 1402-

- 1405, 10-15. June 2018. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547842>
- [6] Pedersen, T.T., Victoria, M., Rasmussen, M.G., Andersen, G.B. Exploring flexibility of near-optimal solutions to highly renewable energy systems, in Proc. *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 387-391, 20-25. June 2021. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518745>
- [7] Wu, Y., Li, Y., Wu, Y. Overview of power system flexibility in a high penetration of renewable energy system, in Proc. *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, Chiba, Japan, pp. 1137-1140, 13-17. April 2018. <https://doi.org/10.1109/ICASI2018.8394484>
- [8] Xing, T., Caijuan, Q., Liang, Z., Pengjiang, G., Jianfeng, G., Panlong, J. 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)*, Chengdu, China, pp. 553-558, 20-23. September 2017. <https://doi.org/10.1109/ICPRE.2017.8390596>
- [9] Byers, C., Botterud, A. Additional Capacity Value From Synergy of Variable Renewable Energy and Energy Storage, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 1106-1109, 2020. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2940421>
- [10] Wang, Z. et al. 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)*, Beijing, China, pp. 1-5, 26-28. November 2017. <https://doi.org/10.1109/EI2.2017.8245403>
- [11] Shi, Z., Wang, W., Huang, Y., Li, P., Dong, L. 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, 2022. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.01470>
- [12] Vuc, G., Borlea, I., Barbulescu, C., Prostean, O., Jigoria-Oprea, D., Neaga, L. 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)*, Subotica, Serbia, pp. 129-132, 11-12. March 2011. <https://doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741806>
- [13] Nassar, M.E., Salama, M.M.A. 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)*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-4, 15-18. May 2016. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2016.7726803>
- [14] Waiwong, S., Damrongkulkamjorn, P. 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)*, Birmingham, UK, pp. 437-441, 20-23 November 2016. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884375>

AUTORI/AUTHORS

Vladan Ristić - master inženjer elektrotehnike i računarstva, šef Službe za planiranje razvoja prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, vladagenius.vr@gmail.com, ORCID [0000-0001-9571-3238](https://orcid.org/0000-0001-9571-3238);

Miljan Žikić - master inženjer elektrotehnike i računarstva, šef Službe za planiranje i praćenje realizacije investicionih planova u AD „Elektromreža Srbije“, miljan.zikic@ems.rs, ORCID [0000-0002-9189-5377](https://orcid.org/0000-0002-9189-5377)

Dragana Vujanović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, viši inženjer u Resalta d.o.o. Beograd, draganav.1995@gmail.com, ORCID [0000-0002-3516-4457](https://orcid.org/0000-0002-3516-4457)

Ivan Trkulja - diplomirani inženjer elektrotehnike, rukovodilac Sektora za razvoj prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, ivan.trkulja@ems.rs, ORCID [0000-0002-3584-7661](https://orcid.org/0000-0002-3584-7661)

Ognjen Mijušković - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, inženjer za planiranje razvoja prenosnog sistema u AD „Elektromreža Srbije“, ognjen.mijuskovic@ems.rs, ORCID [0000-0002-9742-391X](https://orcid.org/0000-0002-9742-391X)