

Optimalno planiranje balansne rezerve za pokrivanje debalansa u proizvodnji vetroelektrana u Južnom Banatu

Optimal Planning of Reserve for Balancing Wind Power Production in South Banat

Milica Radovanović*, Željko Đurišić**

* Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“, Beograd, Srbija

** Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

Rezime - Problem balansiranja varijabilnih obnovljivih izvora energije predstavlja jedan od ključnih problema integracije obnovljivih izvora u elektroenergetski sistem. U radu je izvršena statistička analiza zavisnosti greške u predikciji proizvodnje vetroelektrana u regionu Južnog Banata od prognozirane snage. Na osnovu sprovedene analize utvrđeno je da postoji značajan prostor za optimizaciju planiranog nivoa balansne rezerve na gore i na dole u zavisnosti od relativne vrednosti prognozirane snage vetroelektrana. Osnovni doprinos rada je predlog metodologije za proračun potrebne balansne rezerve u elektroenergetskom sistemu Srbije za dan unapred za postojeće stanje instaliranih vetroelektrana koje su priključene na prenosnu mrežu. Praktični značaj i korist od predložene metodologije imaju sve zainteresovane strane, vlasnik vetroelektrane koji može planirati potrebni zakup balansnih kapaciteta, operator prenosnog sistema koji može planirati nesigurnosti u proizvodnji vetroelektrana i balansno odgovorna strana koja treba da planira balansne kapacitete.

Ključne reči - balansiranje, rezerva, varijabilni obnovljivi izvori

Abstract - Balancing of variable renewable energy sources is one of the main problems of integrating renewable energy sources into the power electricity system. This paper performs a statistical analysis of the dependence of the error in the prediction of wind farm production in the region of southern Banat, on the forecasted power. The main contribution of the paper is the proposal of the methodology for the calculation of the required balance reserve in the electric power system of Serbia for day ahead for the existing condition of the installed wind power plants that are connected to the transmission network. All stakeholders have practical significance and benefit from the proposed methodology, the wind farm owner who can plan the necessary lease of balancing capacities, the transmission system operator who can plan uncertainties in wind farm production and the balancing responsible party that should plan balancing capacities.

Index Terms - Balancing, Reserve, Variable renewable energy sources

I UVOD

Sunčeva energija i energija vetra su inherentno vremenski promenljivi izvori energije na skalama od minuta do godišnjeg doba. Stoga, integracija varijabilnih obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetski sistem (EES) predstavlja nove izazove u upravljanju elektroenergetskim sistemom i korišćenju skladištenja električne energije i/ili rezervne energije iz drugih izvora, a u cilju održavanja stabilnog i sigurnog snabdevanja energijom.

Operator prenosnog sistema treba da zna proizvodnju iz varijabilnih izvora energije u raznim vremenskim okvirima: od jednog do tri dana za dnevni plan rada i planiranje održavanja elemenata elektroenergetskog sistema, i od nekoliko minuta do nekoliko sati za planiranje pokretanja elektrana koje su u rezervi (od 5 minuta do 40 sati).

Prisustvo varijabilnih OIE u sistemu ima nekoliko kratkoročnih uticaja na EES: (1) povećanje rezerve; (2) smanjena efikasnost termalnih generatora; (3) zamena konvencionalnih termalnih generatora sa obnovljivim izvorima i (4) redukcija proizvodnje ili isključenje generatora na OIE usled snage proizvodnje koja prevazilazi određeni procenat [1].

Rezerva ima ulogu održavanja kratkoročnog balansa između proizvodnje i potrošnje. Debalans može biti posledica netačne prognoze (proizvodnje ili potrošnje) ili posledica nekog događaja (npr. ispada generatora sa mreže). Nezavisno od toga šta je debalans izazvalo, aktivira se rezerva, najpre primarna, a nakon toga i sekundarna i tercijarna. Minimalnu rezervu koju svaki operator treba da ima u rezervi određuju asocijacije poput ENTSO-e za Evropu [2] i NERC za SAD [3].

Precizno predviđanje proizvodnje iz intermitentnih OIE je od suštinskog značaja i za obezbeđivanje optimalnog upravljanja generatorskim jedinicama. Greške pri prognozi proizvodnje električne energije stvaraju veće troškove. Za ublažavanje nepredvidivih varijacija pri proizvodnji električne energije potrebno je koristiti skladištenje električne energije i rezervnu proizvodnju radi kompenzacije varijacija izlazne snage; rezervni generatori moraju često ostati uključeni kako bi bili u stanju da odreađuju brzo u cilju održavanja balansa između prognoze i

proizvodnje; potrebna su češća uključanja i isključenja jedinica na fosilna goriva, kao i češće promene izlazne snage; štaviše, ponekad je potrebno isključiti i varijabilne OIE kada njihova proizvodnja premaši određeni procenat globalne proizvodnje. Česta uključanja i isključenja i promene snage generatora utiču na njihovo habanje koje smanjuje efikasnost za oko 4% (od 0% do 9%) [4,5].

Ograničavanje proizvodnje iz vetroelektrana i solarnih elektrana, dovode do direktnih troškova (posebno kada su OIE povlašćeni proizvođači).

Greške u prognozi proizvodnje izazivaju dva negativna efekta: visoki iznosi penala usled netačne prognoze i korišćenje rezervnih generatora u cilju balansiranja potrošnje i proizvodnje.

Neka od rešenja koja ublažavaju posledice grešaka pri prognozi proizvodnje su korišćenje sistema za skladištenje električne energije (lokalno) i/ili kombinovanje nekoliko elektrana koje su široko rasprostranjene tako da su greške pri prognozi proizvodnje nezavisne, a ukupna greška obično redukovana (efekat agregacije) [6, 7].

U ovom radu su analizirane greške u predikciji proizvodnje vetroelektrana u Južnom Banatu na osnovu kojih je utvrđen potrebni balansni kapacitet koji može obezbediti pokrivanje balansne greške.

U drugom poglavlju rada je data statistička analiza grešaka pri prognozi proizvodnje vetroelektrana u Južnom Banatu za dan unapred. U trećem poglavlju su analizirane dnevne i sezonske varijacije izlazne snage, a u četvrtom analiza grešaka u zavisnosti od prognoziranog snage generisanja vetroelektrana. U petom poglavlju je data statistika potrebnih kapaciteta za balansiranje, a u šestom je izvršena optimizacija planiranja potrebnih balansnih kapaciteta. Na kraju, u sedmom poglavlju, je data analiza potrebne balansne energije za balansiranje proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za postojeće stanje.

II STATISTIČKA ANALIZA GREŠAKA PROGNOZE PROIZVODNJE VETROELEKTRANA U JUŽNOM BANATU

U cilju određivanja potrebnih balansnih kapaciteta za pokrivanje greške u proceni proizvodnje OIE za postojeće stanje analizira se 2020. godina. U toku te godine su na prenosnu mrežu Republike Srbije bile priključene četiri vetroelektrane: VE Čibuk 1 (158.46 MW), VE Kovačica (104.5 MW), VE Alibunar (42 MW) i VE Košava (69 MW). Ukupna instalirana snaga vetroelektrana priključenih na prenosnu mrežu je 373.96 MW. Na prenosnoj mreži nije bilo priključenih solarnih elektrana. Na distributivnoj mreži je bilo priključeno 25.32 MW u vetroelektranama i 11.53 MW u fotonaponskim elektranama.

Vetroelektrane koje su priključene na prenosnu mrežu su u obavezi da prijavljuju plan proizvodnje vetroelektrana operatoru prenosnog sistema EMS AD i JP EPS koje je balansno odgovorna strana svih vetroelektrana koje su do danas priključene. Na osnovu raspoloživih podataka o planiranoj proizvodnji vetroelektrana za dan unapred i ostvarenoj proizvodnji izvršena je statistička analiza grešaka prognoze proizvodnje. Ova analiza je osnov za procenu potrebnih

balansnih kapaciteta, odnosno balansne rezerve koju treba da obezbedi JP EPS.

Analiza je izvršena korišćenjem podataka za 2020. godinu u rezoluciji od jednog sata. Sati u kojima nedostaju podaci za neku od elektrana ili sati u kojima su podaci zamrznuti su izbačeni iz analize (takvih podataka je bilo oko 5%).

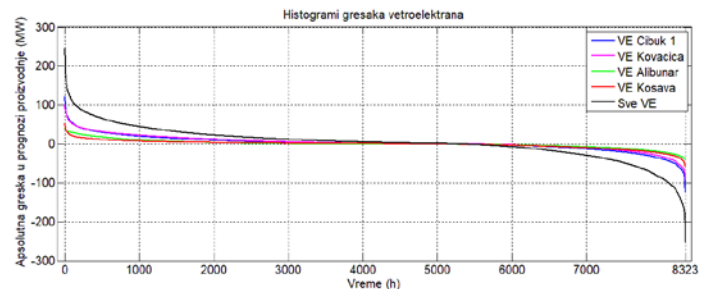
Za svaki sat u godini je izvršen proračun apsolutne i relativne greške koje su proračunate prema sledećim jednačinama:

$$\Delta P_i = P_{prog,i} - P_{ostv,i}, i=1,2,\dots,8760 \quad (1)$$

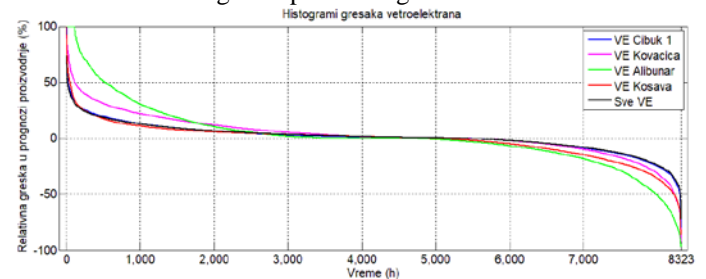
$$\Delta P_i(\%) = \frac{P_{prog,i} - P_{ostv,i}}{P_{n,i}} \cdot 100\%, i=1,2,\dots,8760 \quad (2)$$

U prethodnim jednačinama $P_{prog,i}$ i $P_{ostv,i}$ su respektivno prognozirana i ostvarena proizvodnja vetroelektrana u satu i , dok je $P_{n,i}$ prijavljena raspoloživa instalirana snaga vetroelektrane za sat i (ova snaga može da se razlikuje od instalirane snage vetroelektrane ako neki agregat nije raspoloživ u satu i).

Na slikama 1 i 2 su prikazani uređeni histogrami apsolutnih i relativnih grešaka u prognozi proizvodnje, za svaku vetroelektranu pojedinačno, kao i za sve vetroelektrane ukupno.



Slika 1. Histogram apsolutnih grešaka vetroelektrana



Slika 2. Histogram relativnih grešaka vetroelektrana

Sa slike 2 se može zaključiti da najveće greške pravi VE Alibunar. Najmanje pozitivne greške pravi VE Košava, a najmanje negativne VE Čibuk 1.

Za potrebe određivanja balansnih kapaciteta izvršen je proračun sledećih statističkih parametara:

- Srednja vrednost apsolutnih normalizovanih grešaka

$$\sigma = \frac{\sum_n \left| \frac{\Delta P_n}{P_{inst,n}} \right|}{N} \cdot 100\% \quad (3)$$

gde su n sati u kojima su postojali validni podaci o prognoziranju i ostvarenoj proizvodnji vetroelektrana, a N je ukupan broj sati u analiziranoj godini za koje su postojali validni podaci o prognozi i ostvarenju proizvodnje vetroelektrana;

- Srednja vrednost pozitivnih normalizovanih grešaka

$$\sigma_+ = \frac{\sum_i \frac{\Delta P_i}{P_{inst,i}}}{I} \cdot 100\% \quad (4)$$

gde su i sati u kojima je greška bila pozitivna, a I je ukupan broj sati u analiziranoj godini u kojoj je $\Delta P_i > 0$;

- Srednja vrednost negativnih normalizovanih grešaka

$$\sigma_- = \frac{\sum_j \frac{\Delta P_j}{P_{inst,j}}}{J} \cdot 100\% \quad (5)$$

gde su j sati u kojima je greška bila negativna, a J je ukupan broj sati u analiziranoj godini u kojoj je $\Delta P_j < 0$.

Srednja vrednost apsolutnih normalizovanih grešaka agregiranih vetroelektrana u 2020. godini je bila 8.28%. Srednja vrednost pozitivnih grešaka je 7.28%, a negativnih -10.06%.

U tabeli 1 prikazani su podaci o kumulativnom vremenu trajanja greške iznad određene procentualne vrednosti. Na osnovu tabele može se zaključiti da je najveća relativna greška bila oko 70%.

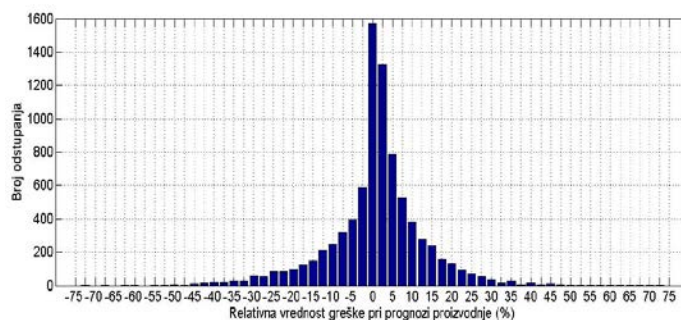
Tabela 1. Kumulativno vreme trajanja određenih nivoa pozitivnih i negativnih grešaka

| Nivo greške u odnosu na instalisanu snagu | Kumulativno vreme trajanja pozitivne greške (sati) | Kumulativno vreme trajanja negativne greške (sati) |
|---|--|--|
| 100% | 0 | 0 |
| >99% | 0 | 0 |
| >95% | 0 | 0 |
| >90% | 0 | 0 |
| >80% | 0 | 0 |
| >70% | 1 | 1 |
| >60% | 6 | 3 |
| >50% | 17 | 11 |
| >40% | 47 | 55 |
| >30% | 126 | 162 |
| >20% | 418 | 462 |
| >15% | 764 | 718 |
| >10% | 1347 | 1119 |
| >5% | 2437 | 1774 |
| >0% | 5310 | 3013 |

Na slici 3 je dat grafički prikaz kumulativnog vremena trajanja pozitivnih i negativnih grešaka u prognozi proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za dan unapred za 2020. godinu.

Srednje vrednosti apsolutnih, pozitivnih i negativnih normalizovanih grešaka svake vetroelektrane pojedinačno su

prikazane u tabeli 2.



Slika 3. Kumulativno vreme trajanja pozitivne i negativne greške u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine

Tabela 2. Srednje vrednosti apsolutnih, pozitivnih i negativnih grešaka za svaku vetroelektranu

| Vetroelektrana | σ_+ | σ_- | σ |
|--------------------|------------|------------|----------|
| VE Čibuk 1 | 7,99 | -10,74 | 8,83 |
| VE Kovačica | 14,04 | -13,27 | 12,24 |
| VE Alibunar | 25,09 | -18,73 | 20,20 |
| VE Košava | 7,38 | -15,27 | 10,50 |
| Sve vetroelektrane | 7,28 | -10,06 | 8,28 |

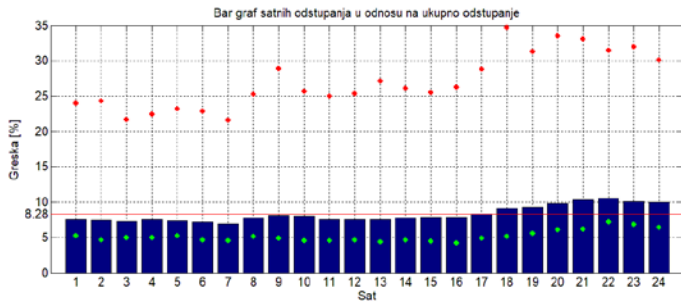
Iz tabele 2 se vidi da su greške agregiranih vetroelektrana manje od grešaka svake vetroelektrane pojedinačno iako se one nalaze u istom regionu, što govori o tome da se greške u određenoj meri delimično poništavaju [6].

III DNEVNE I SEZONSKE VARIJACIJE GREŠKE U PROCENI PROIZVODNJE VETROELEKTRANA U SRBIJI

S obzirom na to da je vetar posledica termalnih procesa u površinskom sloju atmosfere, on ima određene dnevne i sezonske periodičnosti, pa i greške u proceni proizvodnje vetroelektrana imaju određeni dnevni i sezonski hod. Kako bi se utvrdile određene zakonitosti sprovedene su analize dnevnih i sezonskih statističkih pokazatelja u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji u toku 2020. godine.

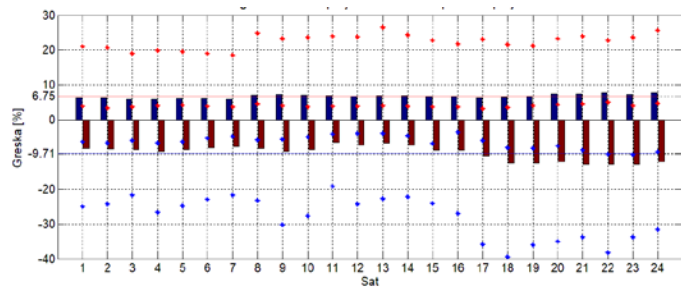
Na slici 4 je prikazan dnevni hod apsolutnih grešaka u proceni proizvodnje agregiranih vetroelektrana za dan unapred. Plavim stupcima su označene prosečne satne vrednosti grešaka, koje su dobijene usrednjavanjem odgovarajućih satnih grešaka na godišnjem nivou. Zelene i crvene tačke označavaju opseg u kojem se nalazila apsolutna greška u 50, odnosno 95% slučajeva u toku godine za svaki analizirani sat. Može se zaključiti da su greške u predikciji proizvodnje vetroelektrana u izvesnoj meri veće u toku večernjih sati, u periodu od 17-24 h. Ovo je najverovatnije posledica promene stabilnosti atmosfere. Naime, tokom dana atmosfera je obično nestabilna i nju karakteriše mali priraštaj brzine vetra sa visinom. U toku večernjih sati, pri vedrom vremenu, dolazi do promene stabilnosti atmosfere, sa nestabilne na stabilnu, što dovodi do značajnog povećanja visinskog gradijenta brzine vetra, pa je i prognoza proizvodnje vetroelektrane osjetljivija u večernjim satima kada je potrebno taj

efekat uvažiti [8].



Slika 4. Bar-graf prosečnog dnevnog dijagrama satnih apsolutnih odstupanja u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine

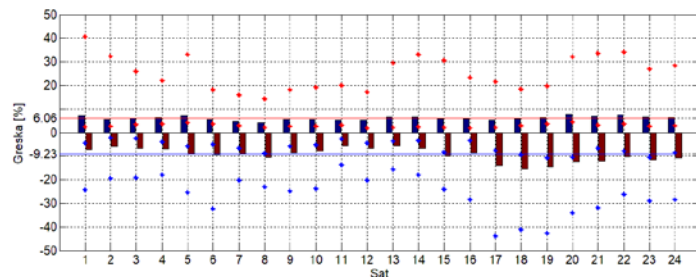
Na slici 5 su prikazane satne pozitivne i negativne relativne greške u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine. Plavi barovi označavaju prosečne pozitivne satne greške, dok braon barovi označavaju prosečne negativne satne greške. Crvene tačke označavaju granice u kojima se nalazi pozitivna greška u 95% i 50% slučajeva, a plave tačkice granice u kojima se nalazi negativna greška u 95% i 50% slučajeva u odgovarajućem satu. Na primer, u 1. satu (00:00 - 01:00) greška će u 95% slučajeva biti u granicama od -25% do +21%, dok će u 18. satu (17:00 - 18:00) greška u 95% slučajeva biti u granicama od -40% do +21%.



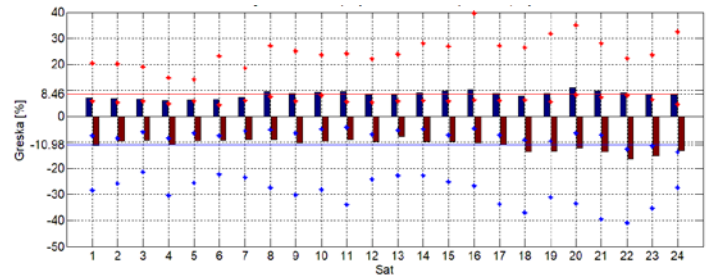
Slika 5. Bar-graf prosečnog dnevnog dijagrama satnih pozitivnih i negativnih odstupanja u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine

U cilju analize uticaja sezone na nivo greške izvršena je podela jednogodišnjeg perioda na četiri sezone: zimska sezona (decembar - februar), prolećna sezona (mart - maj), letnja sezona (jun-avgust) i jesenja sezona (septembar - novembar).

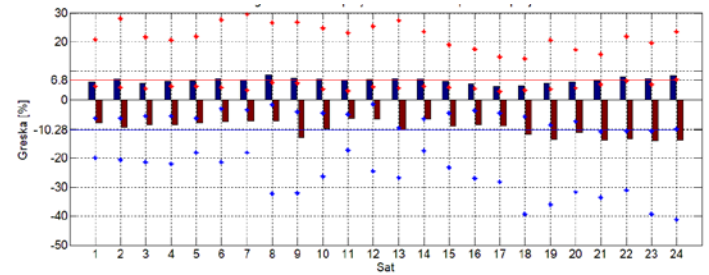
Za svaki od analiziranih perioda izvršen je proračun odgovarajućih statističkih pokazatelja za prosečan dan. Grafički prikaz rezultata je dat na slikama 6 - 9.



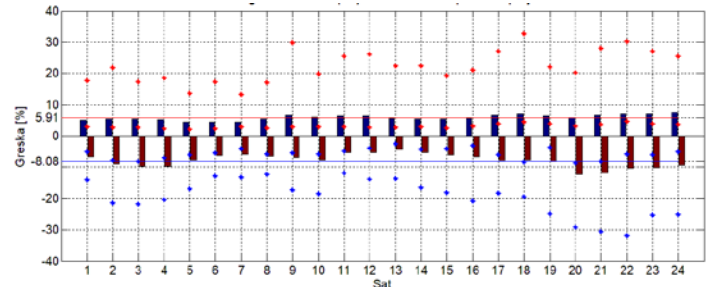
Slika 6. Bar-graf srednjih satnih pozitivnih/negativnih odstupanja - zimska sezona



Slika 7. Bar-graf srednjih satnih pozitivnih/negativnih odstupanja - prolećna sezona



Slika 8. Bar-graf srednjih satnih pozitivnih/negativnih odstupanja - letnja sezona



Slika 9. Bar-graf srednjih satnih pozitivnih/negativnih odstupanja - jesenja sezona

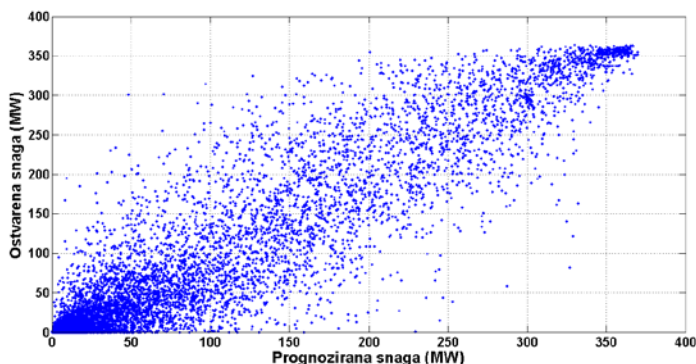
IV STATISTIČKA ANALIZA GREŠAKA PRI RAZLIČITIM PROGNOZIRANIM SNAGAMA GENERISANJA VETROELEKTRANA

Snaga proizvodnje vetroelektrana je nelinearna funkcija brzine vetra i definisana je krivom snage vetroagregata. Pri slabim i umerenim vetrovima snaga proizvodnje vetroelektrana je proporcionalna trećem stepenu brzine vetra, dok je pri jakim vetrovima ($V > 12$ m/s), snaga proizvodnje vetroelektrane konstantna i jednaka nominalnoj. Iz tog razloga, greška u proceni brzine vetra u opsegu umerenih vetrova unosi mnogo veću grešku u proceni snage vetroelektrane nego pri jakim vetrovima. Ova konstatacija se potvrđuje i na osnovu sagledavanja dispacije greške u proceni proizvodnje agregiranih vetroelektrana u Srbiji koja je prikazana na slici.10.

U narednoj analizi sproveden je proračun statističkih parametara greške u proceni proizvodnje za dan unapred za svaku od vetroelektrana u funkciji izmerene brzine vetra u ciljnom regionu na referentnom mernom stubu. U tabeli 3 dati su rezultati proračuna za agregirane vetroelektrane.

Kao što je i očekivano, na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da se najveća greška pravi u opsegu umerenih vetrova.

Pri slabim vetrovima prognoze su takođe nepouzdana, ali je tada proizvodnja vetroelektrana mala, pa je normalizovana greška relativno mala. Pri jakim vetrovima uticaj brzine vetra, kao najbitnijeg parametra u proceni proizvodnje, postaje manje izražen ili čak neuticajan pri vrlo jakim vetrovima, pa su relativna greške značajno manje.



Slika 10. Grafička interpretacija prognozirane i ostvarene snage proizvodnje vetroelektrana koje su priključene na prenosnu mrežu Srbije za postojeće stanje, 2020.

Tabela 3. Srednje vrednosti normalizovanih grešaka u proceni proizvodnje za dan unapred u zavisnosti od brzine vetra za agregirane vetroelektrane koje su priključene na prenosni sistem Srbije za postojeće stanje

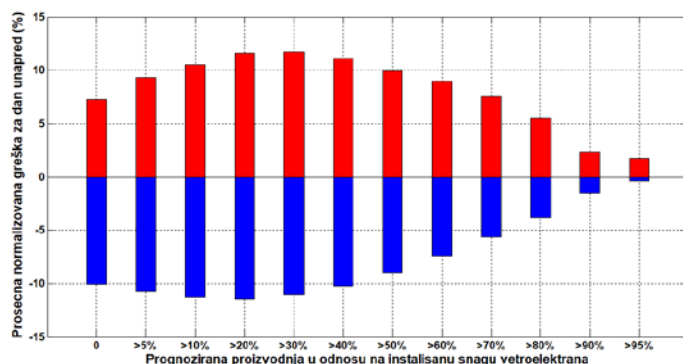
| Brzina vetra [m/s] | σ_+ | σ_- | $ \sigma $ |
|---------------------------------|------------|------------|------------|
| Male, $v < 7$ | 3,42 | -11,20 | 8,71 |
| Srednje, $v \geq 7$ i $v < 9,5$ | 10,38 | -15,63 | 13,60 |
| Velike, $v \geq 9,5$ | 7,16 | -6,04 | 6,88 |

Prethodna analiza dovodi do zaključka da u proces planiranja balansne rezerve može uključiti i prognozirana snaga proizvodnje agregiranih vetroelektrana. U tom cilju izvršena je analiza normalizovane greške u funkciji prognozirane snage proizvodnje vetroelektrana za dan unapred. Rezultati proračuna su prikazani u tabeli 4. i na slici 11.

Tabela 4. Prosečne normalizovane greške i kumulativno vreme trajanja u funkciji prognozirane snage proizvodnje svih vetroelektrana za dan unapred

| $P_{\text{prog}} (\%)$ Prognozirana snaga u procentima ukupne raspoložive instalisane snage svih vetroelektrana | σ_+ | σ_- | $ \sigma $ | T (sati) Ukupno godišnje vreme trajanja prognozirane snage proizvodnje |
|--|------------|------------|------------|---|
| =0 | - | - | - | - |
| >0 | 7,28 | -10,06 | 8,28 | 8323 |
| >5% | 9,35 | -10,74 | 9,93 | 6101 |
| >10% | 10,50 | -11,25 | 10,83 | 5075 |
| >20% | 11,61 | -11,44 | 11,53 | 3809 |
| >30% | 11,73 | -11,05 | 11,40 | 3022 |
| >40% | 11,09 | -10,23 | 10,65 | 2387 |
| >50% | 9,93 | -8,96 | 9,44 | 1843 |
| >60% | 8,97 | -7,44 | 8,19 | 1454 |
| >70% | 7,57 | -5,62 | 6,58 | 1048 |

| | | | | |
|-------|------|-------|------|-----|
| >80% | 5,49 | -3,78 | 4,65 | 685 |
| >90% | 2,31 | -1,52 | 2,00 | 335 |
| >95% | 1,73 | -0,36 | 1,47 | 161 |
| =100% | - | - | - | - |



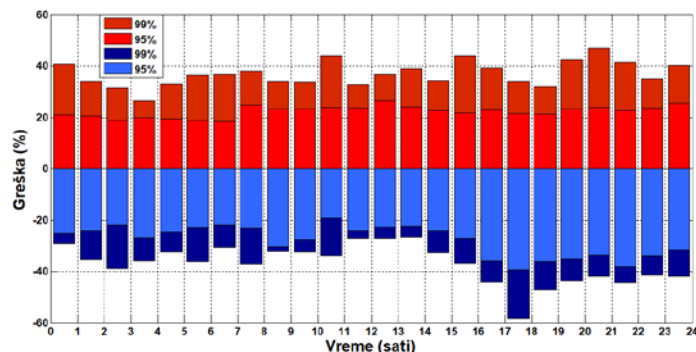
Slika 11. Grafička interpretacija prosečne normalizovane greške u funkciji prognozirane snage proizvodnje svih vetroelektrana za dan unapred

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da se može bitno unaprediti optimizacija potrebnih balansnih kapaciteta na osnovu nivoa prognozirane snage proizvodnje vetroelektrana za dan unapred.

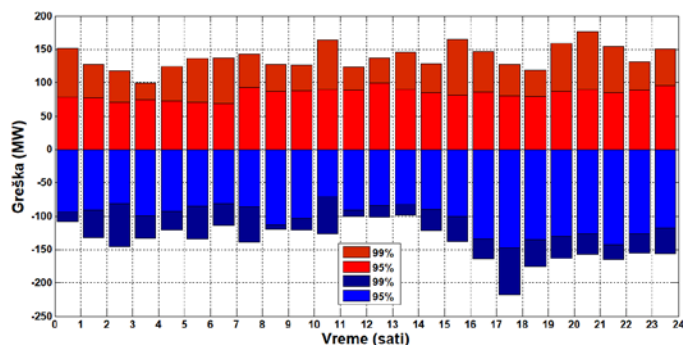
V STATISTIČKA ANALIZA POTREBNIH KAPACITETA ZA BALANSIRANJE PROIZVODNJE VETROELEKTRANA U SRBIJI

Balansni kapaciteti koje je potrebno planirati pri razvoju varijabilnih obnovljivih izvora su direktno vezani za grešku u proceni proizvodnje tih izvora. Za postojeće stanje na prenosnu mrežu su priključene samo vetroelektrane, dok je na distributivnu mrežu priključena zanemarljiva snaga varijabilnih izvora, pa ovi izvori nisu uzeti u obzir pri analizi potrebnih balansnih kapaciteta.

Na osnovu sprovedenih statističkih analiza mogu se odrediti potrebni balansni kapaciteti za kompenzaciju pozitivne i negativne greške koje je potrebno planirati za dan unapred kako bi se kompenzovala greška u prognozi proizvodnje agregiranih vetroelektrana u Srbiji. Rezultati proračuna relativne i apsolutne vrednosti balansnih kapaciteta za svaki sat u prosečnom danu su ilustrovani na slikama 12 i 13 i u tabelama 5 i 6.



Slika 12. Relativne vrednosti potrebnih balansnih kapaciteta, računatih u odnosu na agregiranu snagu vetroelektrana u EES Srbije za postojeće stanje



Slika 13. Vrednosti potrebnih kapaciteta za balansiranje vetroelektrana u EES Srbije za postojeće stanje

Ako je potrebno u potpunosti pokriti balansnu grešku za svaki sat, onda je teorijski potrebno imati balansnu rezervu koja odgovara ukupnoj instaliranoj snazi vetroelektrana. Ovakav teorijski scenario je praktično nerealan u sistemima sa većim brojem instaliranih vetroelektrana. U elektroenergetskom sistemu Srbije, u postojećem stanju, je instaliran relativno mali broj vetroelektrana i one se nalaze u regionu sa sličnim karakteristikama vetra, pa je ovakav scenario realno moguć ali je ipak vrlo malo verovatno.

U daljim analizama smatraće se da je za potpuno balansiranje proizvodnje vetroelektrana dovoljno obezbediti rezervu koja će pokriti sve slučajevne debalansa u 99% vremena u toku godine. Takođe, kao specifični pokazatelj biće uzeta i vrednost balansne rezerve koja će pokriti sve slučajevne debalansa u 95% vremena. U tabelama 5 i 6 prikazani su rezultati proračuna relativne i apsolutne vrednosti potrebnih balansnih kapaciteta za postojeće stanje.

Tabela 5. Relativne vrednosti potrebnih balansnih kapaciteta, računatih u odnosu na agregiranu instaliranu snagu vetroelektrana u EES-u Srbije za postojeće stanje

| Vreme (sat) | 99% pozitivna greška (%) | 95% pozitivna greška (%) | 99% negativna greška (%) | 95% negativna greška (%) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 40,62 | 21,00 | -29,04 | -24,99 |
| 2 | 34,15 | 20,67 | -35,38 | -24,26 |
| 3 | 31,44 | 18,98 | -38,91 | -21,72 |
| 4 | 26,58 | 19,87 | -35,73 | -26,69 |
| 5 | 33,12 | 19,46 | -32,36 | -24,67 |
| 6 | 36,53 | 18,96 | -35,95 | -22,86 |
| 7 | 36,69 | 18,43 | -30,45 | -21,69 |
| 8 | 38,06 | 24,80 | -37,15 | -23,17 |
| 9 | 34,10 | 23,29 | -32,13 | -30,20 |
| 10 | 33,85 | 23,55 | -32,35 | -27,68 |
| 11 | 43,92 | 23,91 | -33,78 | -19,08 |
| 12 | 32,96 | 23,74 | -26,96 | -24,24 |
| 13 | 36,76 | 26,58 | -27,03 | -22,65 |

| | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|
| 14 | 38,99 | 24,22 | -26,47 | -22,17 |
| 15 | 34,32 | 22,79 | -32,56 | -24,04 |
| 16 | 43,99 | 21,71 | -36,82 | -26,95 |
| 17 | 39,19 | 23,04 | -44,00 | -35,85 |
| 18 | 34,19 | 21,61 | -58,22 | -39,33 |
| 19 | 31,87 | 21,28 | -46,99 | -36,07 |
| 20 | 42,51 | 23,24 | -43,60 | -34,97 |
| 21 | 47,08 | 23,89 | -41,98 | -33,72 |
| 22 | 41,34 | 22,69 | -44,22 | -38,20 |
| 23 | 35,13 | 23,62 | -41,52 | -33,77 |
| 24 | 40,31 | 25,58 | -41,92 | -31,51 |

Tabela 6. Vrednosti potrebnih kapaciteta za balansiranje vetroelektrana u EES-u Srbije za postojeće stanje

| Vreme (sat) | 99% pozitivna greška (MW) | 95% pozitivna greška (MW) | 99% negativna greška (MW) | 95% negativna greška (MW) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 151,92 | 78,54 | -108,61 | -93,46 |
| 2 | 127,72 | 77,31 | -132,32 | -90,73 |
| 3 | 117,59 | 70,99 | -145,52 | -81,23 |
| 4 | 99,41 | 74,31 | -133,63 | -99,82 |
| 5 | 123,87 | 72,78 | -121,03 | -92,27 |
| 6 | 136,62 | 70,91 | -134,45 | -85,50 |
| 7 | 137,22 | 68,93 | -113,88 | -81,12 |
| 8 | 142,34 | 92,75 | -138,94 | -86,66 |
| 9 | 127,53 | 87,10 | -120,17 | -112,95 |
| 10 | 126,60 | 88,08 | -120,99 | -103,52 |
| 11 | 164,26 | 89,42 | -126,34 | -71,36 |
| 12 | 123,27 | 88,79 | -100,83 | -90,66 |
| 13 | 137,48 | 99,41 | -101,09 | -84,71 |
| 14 | 145,82 | 90,58 | -99,00 | -82,92 |
| 15 | 128,36 | 85,23 | -121,77 | -89,91 |
| 16 | 164,52 | 81,20 | -137,71 | -100,79 |
| 17 | 146,57 | 86,17 | -164,56 | -134,08 |
| 18 | 127,87 | 80,82 | -217,74 | -147,09 |
| 19 | 119,19 | 79,59 | -175,74 | -134,90 |
| 20 | 158,99 | 86,92 | -163,06 | -130,79 |
| 21 | 176,08 | 89,35 | -157,01 | -126,11 |
| 22 | 154,61 | 84,86 | -165,38 | -142,87 |
| 23 | 131,39 | 88,34 | -155,28 | -126,30 |
| 24 | 150,76 | 95,67 | -156,78 | -117,85 |

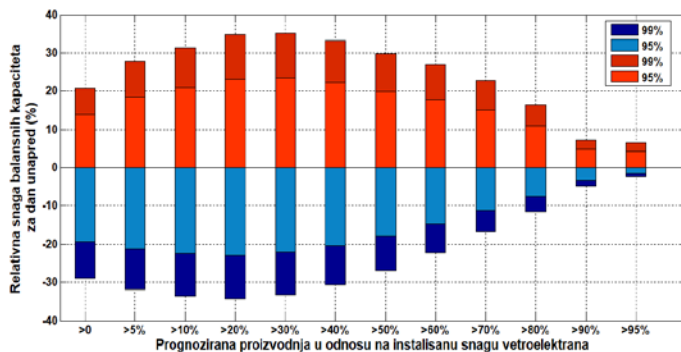
Na osnovu sprovedenih analiza može se zaključiti da je za postojeće stanje potrebno planirati oko 100 MW regulacionih

kapaciteta za regulaciju na gore i oko 150 MW regulacionih kapaciteta za regulaciju na dole da bi se u 95% slučajeva kompenzovala greška u predikciji proizvodnje vetroelektrana koje su priključene na prenosni sistem. Ukoliko se planira pokrivanje balansne greške u 99% slučajeva, onda je potrebno planirati oko 170 MW regulacionih kapaciteta za regulaciju na gore i oko 200 MW regulacionih kapaciteta za regulaciju na dole.

S obzirom na rezultate analiza sezonskih varijacija greške, može se zaključiti da ne postoje izražene razlike u sezonama, tako da se procenjeni nivo grešaka može smatrati potrebnom balansnom rezervom za svaki dan u godini.

VI OPTIMIZACIJA PLANIRANJA POTREBNIH KAPACITETA ZA BALANSIRANJE PROIZVODNJE VETROELEKTRANA ZA POSTOJEĆE STANJE

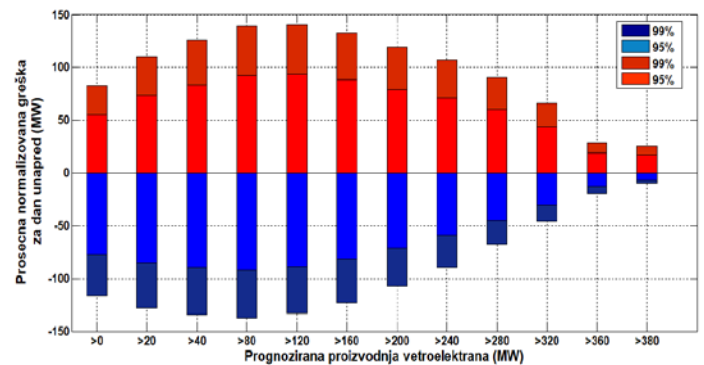
Imajući u vidu statističku analizu zavisnosti prosečne greške u funkciji prognozirane snage, koja je predstavljena u tabeli 4 i na slici 11, može se zaključiti da postoji značajan prostor za optimizaciju balansne rezerve na osnovu prognozirane snage proizvodnje. Generalno, ako su prognoze da će proizvodnja biti bliska nominalnoj raspoloživoj instalisanoj snazi vetroelektrana, npr. veća od 95% raspoložive instalisane snage, onda je očekivana greška mnogo manja nego u slučaju kada je prognoza proizvodnje oko prosečne vrednosti, koja iznosi oko 30% nazivne snage vetroelektrana.



Slika 14. Relativna snaga balansnih kapaciteta koje je potrebno planirati za dan unapred u funkciji prognozirane snage proizvodnje agregiranih vetroelektrana za postojeće stanje za različite verovatnoće pokrivenosti greške

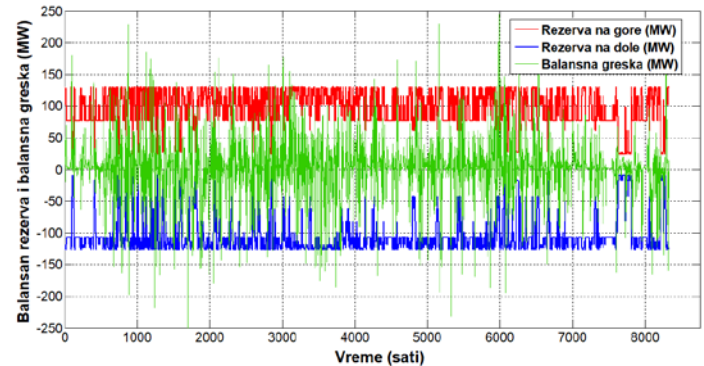
Na osnovu utvrđene statistike greške u prognozi proizvodnje za dan unapred utvrđen je i nivo potrebne balansne rezerve koja treba da pokrije utvrđeni nivo greške. S obzirom da je utvrđeno da greška zavisi od prognozirane proizvodnje, zaključuje se da će i potrebna balansna rezerva zavisiti od prognozirane snage proizvodnje. U tabeli 7 prikazani su podaci o balansnim kapacitetima koje je potrebno planirati za dan unapred u funkciji prognozirane snage proizvodnje agregiranih vetroelektrana za postojeće stanje, a na slici 14 i 15 su grafički interpretirani podaci. Pri proračunu 95% i 99% vrednosti korišćena je pretpostavka da se statistika grešaka može opisati Gausovom funkcijom gustine raspodele verovatnoće greške, pri čemu je standardna devijacija proračunata za svaki sat u prosečnom danu

na osnovu greške u proceni proizvodnje vetroelektrana za odgovarajući sat.



Slika 15. Balansni kapaciteti koje je potrebno planirati za dan unapred u funkciji prognozirane snage proizvodnje agregiranih vetroelektrana za postojeće stanje za različite verovatnoće pokrivenosti greške

Na osnovu sprovedenih statističkih analiza izvršena je analiza pokrivenosti snaga debalansa vetroelektrana priključenih na prenosni sistem Srbije za postojeće stanje uz pretpostavku da se balansni kapaciteti za dan unapred planiraju prema podacima datim u tabeli 7 za slučaj 99% pokrivenosti. Grafička interpretacija rezultata je prikazana na slici 16.



Slika 16. Planirana i aktivirana balansna rezerva za dan unapred za kompenzaciju greške debalansa vetroelektrana priključenih na prenosnu mrežu Srbije za postojeće stanje, 2020.

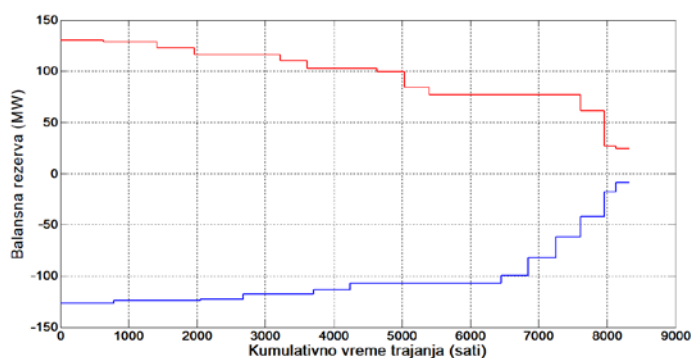
Može se zaključiti da predložena metodologija optimizacije balansne rezerve u dobroj meri pokriva stvarne debalanse snage uzrokovane greškom u proceni proizvodnje vetroelektrana u Srbiji za postojeće stanje. Ipak, u određenom broju slučajeva, odnosno u određenom broju sati u toku godine dolazilo je do probijanja planiranih balansnih kapaciteta. U analiziranoj godini ukupno 131 put je probijena gornja planirana rezerva, što iznosi oko 1.5% vremena u toku godine. Probijanje rezerve na dole je bilo ukupno 209 puta ili 2.4%. Najveća pozitivna greška u proceni proizvodnje vetroelektrana na satnom nivou za dan unapred je bila 245.2 MW, dok je najveća negativna greška bila -252.4 MW.

Tabela 7. Balansni kapaciteti koje je potrebno planirati za dan unapred u funkciji prognozirane snage proizvodnje agregiranih vetroelektrana za postojeće stanje

| P_{prog} (%) Prognozirana snaga u procentima ukupne raspoložive instalisane snage svih vetroelektrana | 99% pozitivna greška (%) | 99% negativna greška (%) | 95% pozitivna greška (%) | 95% negativna greška (%) | T (sati) Ukupno godišnje vreme trajanja prognozirane snage proizvodnje |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| =0 | - | - | - | - | - |
| >0 | 20,70 | -29,00 | 13,80 | -19,30 | 8323 |
| >5% | 27,70 | -31,90 | 18,50 | -21,30 | 6101 |
| >10% | 31,40 | -33,60 | 20,90 | -22,40 | 5075 |
| >20% | 34,80 | -34,30 | 23,20 | -22,90 | 3809 |
| >30% | 35,20 | -33,20 | 23,50 | -22,10 | 3022 |
| >40% | 33,20 | -30,70 | 22,20 | -20,40 | 2387 |
| >50% | 29,80 | -26,90 | 19,80 | -17,90 | 1843 |
| >60% | 26,90 | -22,30 | 17,90 | -14,80 | 1454 |
| >70% | 22,70 | -16,80 | 15,10 | -11,20 | 1048 |
| >80% | 16,50 | -11,40 | 11,00 | -7,60 | 685 |
| >90% | 7,20 | -4,80 | 4,80 | -3,20 | 335 |
| >95% | 6,50 | -2,40 | 4,30 | -1,60 | 161 |
| =100% | - | - | - | - | - |

Ukoliko bi se planiranje balansne rezerve vršilo prema opisanoj metodologiji, ukupna nepokrivena energija za balansiranje na gore za postojeće stanje bi bila oko 4.45 GWh, dok bi ukupna nepokrivena balansna energija za regulaciju na dole bila -4.21 GWh.

Vidi se da je probijanje planiranih balansnih rezervi nešto veće od matematičkog očekivanja koje se bazira na Gausovoj statistici. Dva su potencijalna razloga za to: prvi razlog je nedovoljan broj uzoraka za sprovođenje pouzdanije statistike, drugi je vezan za odstupanje stvarne statistike od Gausove raspodele. Ipak, može se konstatovati da predviđena metodologija planiranja rezerve, koja se bazira na Gausovoj funkciji gustine raspodele verovatnoće greške, obezbeđuje pokrivenost balansne greške u preko 95% vremena u realnosti.

**Slika 17.** Histogrami planirane rezerve na gore i na dole za postojeće stanje prema metodologiji koja je opisana u prethodnoj analizi

Na slici 17 je prikazan histogram planirane rezerve na gore i na dole za postojeće stanje prema metodologiji koja je opisana u prethodnoj analizi.

Treba napomenuti da utvrđena balansna rezerva se odnosi na ukupnu rezervu, odnosno na automatsku sekundarnu rezervu i direktnu tercijarnu rezervu. Koliki udeo pojedinih komponenti rezerve u ukupnoj rezervi je potrebno planirati zavisi od petnaestominutnog gradijenta snage generisanja vetroelektrana, što je predmet budućih istraživanja.

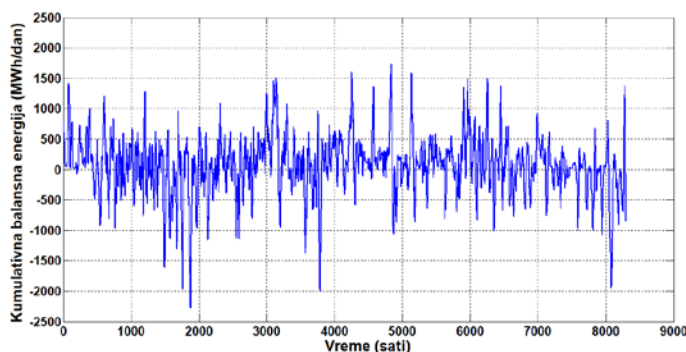
VII ANALIZA BALANSNE ENERGIJE POTREBNE ZA BALANSIRANJE PROIZVODNJE VETROELEKTRANA U SRBIJI ZA POSTOJEĆE STANJE

Za planiranje angažovanja elektrana za pokrivanje potrebnih balansnih kapaciteta od velikog značaja je sagledavanje prosečnih dnevnih varijacija greške u proceni proizvodnje OIE za dan unapred. Ukoliko je srednja dnevna greška u proceni proizvodnje bliska nuli, onda balansnu grešku mogu pokrivati u značajnoj meri i protočne hidroelektrane koje imaju mogućnost dnevnog ravnjanja. Takva elektrana je Đerdap 1 koja, u zavisnosti od dotoka, može biti planirana tako da pokrije određeni dio debalansa i energije OIE, a da pri tom zadrži dnevno ravnjanje voda. Na slici 18 je prikazana promena srednje dnevne energije debalansa u proceni proizvodnje agregiranih vetroelektrana za dan unapred u toku 2020. godine.

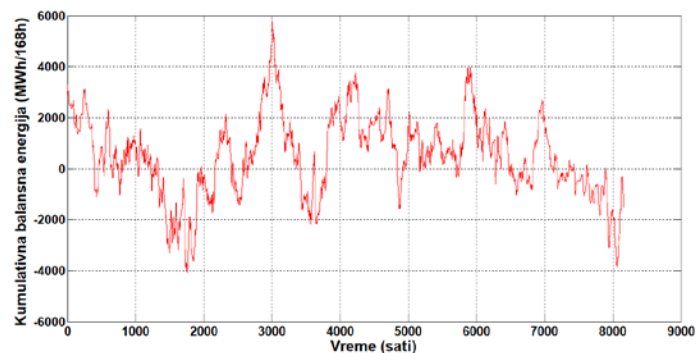
Na osnovu prikazanih podataka može se zaključiti da srednja dnevna snaga debalansa ne prelazi 20% instalisane snage vetroelektrana. Na osnovu datog dijagrama može se zaključiti da najveća dnevna energija debalansa iznosi oko 1,8 GWh, odnosno -2,2 GWh. Ako bi se vršilo nedeljno ravnjanje, onda se pokazuje da srednja nedeljna snaga debalansa ne prelazi 30 MW, odnosno oko 8% instalisane snage svih vetroelektrana. Dijagram kumulativne promene energije debalansa na horizontu od 7 dana (168 h) je prikazan na slici 19.

Prethodne analize pokazuju da ne postoji značajno kumulativno nagomilavanje angažovane balansne energije, odnosno da se najveći deo energije debalansa može sprovesti sa hidroelektranama sa dnevnim ravnjanjem voda. Ipak, u periodu

velikih voda, raspoloživa varijabilna energija u protočnim hidroelektranama je mala ili ne postoji, pa je potrebno planirati i druge izvore, odnosno akumulacione hidroelektrane i fleksibilne termoelektrane.



Slika 18. Promena prosečne dnevne energije debalansa agregiranih vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine



Slika 19. Promena prosečne nedeljne energije debalansa agregiranih vetroelektrana u Srbiji za dan unapred u toku 2020. godine

VIII ZAKLJUČAK

U radu je izvršeno više analiza koje pokazuju zavisnost greške pri prognozi proizvodnje iz vetroelektrana. Greške pri prognozi proizvodnje iz vetroelektrana su nešto više u večernjim satima (17-24) što je posledica promene stabilnosti atmosfere i priraštaja brzine vetra sa visinom. Na greške ne utiče posebno sezona, tj. vrednost grešaka je izjednačena tokom čitave godine i ne postoje bitne razlike. Zaključeno je da postoji značajnija zavisnost relativne greške od brzine vetra. Najveće greške su pri umerenim vetrovima, a dosta manje greške su pri malim brzinama vetra (prognoza brzine vetra je nesigurna, ali zbog normalizacije relativne greške u proceni proizvodnje vetroelektrana su niske) i pri velikim brzinama vetra (pri jakim vetrovima uticaj brzine na snagu je neznatan). Može se zaključiti da se potrebni balansni kapaciteti mogu optimizovati na osnovu nivoa prognozirane snage proizvodnje vetroelektrane.

Na osnovu podataka iz 2020. izračunata je potrebna balansna snaga koja pokriva debalans u 99 i 95% slučajeva i dobijeno je da će balansna rezerva od +100 MW/-150 MW da pokrivi

debalans u 95% slučajeva, a rezerva od +170 MW/-200 MW u 99% slučajeva. Zaključeno je da ovaliki nivo balansne rezerve nije neophodno planirati za svaki sat u godini. Glavni doprinos rada je u definisanju potrebnih balansnih rezervi u funkciji prognozirane snage proizvodnje za dan unapred na satnom nivou.

Predložena metodologija optimizacije balansne rezerve je pokazala da izračunata rezerva u dobroj meri pokriva stvarne debalansne snage uzrokovane greškom u proceni proizvodnje vetroelektrana. Pri izračunatoj rezervi koja treba da pokrije debalans u 99% slučajeva, probijena je gornja granica u 1.5% slučajeva, a donja u 2.4% slučajeva. Ukupna nepokrivena energija za balansiranje na gore je 4.45 GWh i -4.21 GWh na dole.

Na osnovu srednje dnevne greške može se planirati način balansiranja u elektroenergetskom sistemu. Ako je greška bliska nuli, onda balansiranje mogu vršiti protočne hidroelektrane sa dnevnim ravnanjem voda kakva je HE Đerdap 1.

Srednja dnevna snaga debalansa ne prelazi 20% instalisane snage vetroelektrana, a najveća dnevna energija debalansa iznosi oko 1,8 GWh, odnosno -2,2 GWh. Srednja nedeljna snaga debalansa ne prelazi 8% instalisane snage vetroelektrana, a srednja nedeljna apsolutna snaga debalansa je manja od 30 MW.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Brouwer A.S., Van den Broek M., Seebregts A., Faaij A. Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, pp. 443-466, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076>
- [2] Continental Europe. Synchronous Area Framework Agreement; P1 - Load-Frequency Control and Reserves, Brussels, ENTSO-e, <https://consultations.entsoe.eu/system-operations/synchronous-area-operational-agreement-policy-1-1o/> [pristupljeno 15.03.2022]
- [3] Reliability Guideline Operating Reserve Management V3, Atlanta, NERC, https://www.nerc.com/comm/RSTC_Reliability_Guidelines/Reliability_Guideline_Template_Operating_Reserve_Management_Version_3.pdf [pristupljeno 15.03.2022]
- [4] Notton G., Nivet M., Voyant C., Paoli C., Darras C., Motte F., Fouilloy A. Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 87, pp. 96-105, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.007>
- [5] Holttinen H. *The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system*, Helsinki University, Helsinki, 2004. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2004/P554.pdf> [pristupljeno 15.03.2022]
- [6] Koprivica M., Đurišić Ž, Analiza greške u prognozi proizvodnje vetroelektrana u Banatu, in Proc. 36. Međunarodno savetovanje Energetika 2021, Zlatibor, Srbija, 21-24. jun 2021.
- [7] Koprivica M., Đurišić Ž, Poboljšanje predikcije proizvodnje vetroelektrana u Južnom Banatu kombinovanjem pojedinačnih prognoza pomoću modela veštačke inteligencije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 54-60, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.54K>
- [8] Đurišić, Ž.R. *Vjetrolektrane*, Akademska misao, Beograd, 2019.

AUTORI/AUTHORS

msr Milica Radovanović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“, milica.radovanovic@ems.rs, ORCID [0000-0002-1875-6821](https://orcid.org/0000-0002-1875-6821)

dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)