

SKLADIŠTENJE ENERGIJE KAO PODRŠKA INTEGRACIJI VETROELEKTRANA U ELEKTROENERGETSKI SISTEM

J. STANOJEVIĆ, Global Substation Solutions, Srbija
Ž. ĐURIŠIĆ, Elektrotehnički fakultet Beograd, Srbija
M. MITROVIĆ, WSP | Parsons Brinckerhoff, Srbija
A. ĐORĐEVIĆ, Global Substation Solutions, Srbija

UVOD

Iskorišćavanje energije vetra je najbrže rastući segment proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Kako udeo energije proizvedene iz vetroelektrana nastavlja da raste, tako će varijabilna proizvodnja vetroelektrana imati sve veći uticaj na elektroenergetski sistem. Nemogućnost planiranja proizvodnje električne energije u vetroelektranama ograničava njihovo maksimalno procentualno učešće u proizvodnji nekog EES-a i zahteva povećanje regulacione rezerve u EES-u.

Sistemi za skladištenje električne energije mogu biti značajan izvor fleksibilnosti koji olakšavaju integraciju vetroelektrana (VE) u elektroenergetski sistem i mogu naći primenu u širokom spektru aplikacija. Iako integracija obnovljivih izvora energije u EES može biti olakšana na različite načine, spoj vetroelektrana i sistema za skladištenje električne energije je veoma privlačna strategija, pogotovo tamo gde je penetracija vetra velika, a prenosni kapacitet mreže ograničen.

U ovom radu izvršena je ekonomska analiza rada vetroelektrane u kombinaciji sa sistemom za skladištenje energije CAES (*Compressed Air Energy Storage*). Cilj analize je da se kroz proračun, u kojem su korišćeni realni podaci o brzinama vetra, pokaže opravdanost primene ovakvih hibridnih sistema. Kriterijum optimizacije je maksimizacija ekonomske dobiti pri plasmanu električne energije iz VE na slobodnom tržištu.

SISTEM ZA SKLADIŠTENJE ENERGIJE SA KOMPRIMOVANIM VAZDUHOM

Postoji veliki broj tehnologija za skladištenje električne enrgije, ali veliki sistemi za skladištenje su u najvećoj meri ograničeni na pumpno-akumulacione hidroelektrane i CAES. Uopšteno govoreći, CAES je visoko efikasan sistem za skladištenje energije baziran na tehnologiji gasnih turbina. Princip rada je sledeći: tokom perioda niskih opterećenja višak električne energije pokreće reverzibilnu motor/generatorsku jedinicu koja pogoni lanac kompresora i vazduh se injektira u prostor za skladištenje; kao skladište se mogu koristiti podzemna pećina ili nadzemni tankovi. Energija se skladišti kao vazduh pod pritiskom. Kada potražnja električne energije nadmašuje proizvodnju, uskladišteni vazduh

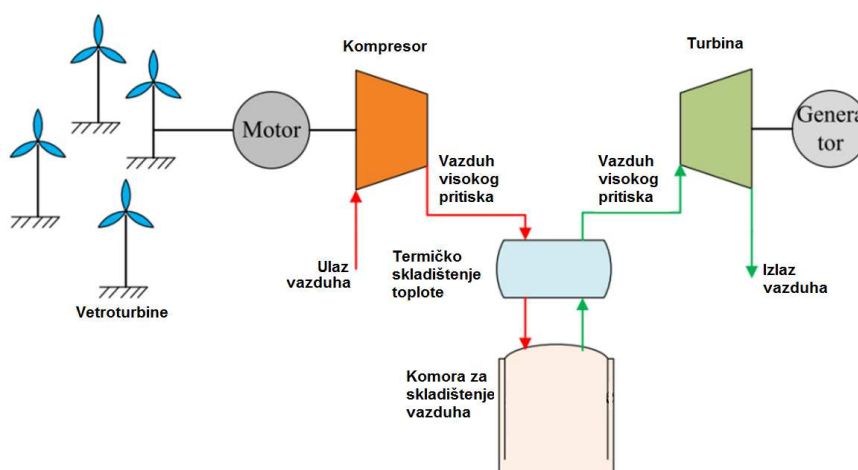
Jelena Stanojević, Milentija Popovića 9, Beograd, jelena.stanojevic@gss.eu.com
Željko Đurišić, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, djurisic@etf.rs
Miloš Mitrović, Kneza Miloša 3, Beograd milos.mitrovic@pbworld.com
Ana Đorđević, Milentija Popovića 9, Beograd, ana.djordjevic@gss.eu.com

pod pritiskom se osloboda i greje pomoću izvora toplote. Toplota za zagrevanje vazduha se može dobiti sagorevanjem fosilnih goriva ili rekuperacijom iz procesa kompresije. Ovako zagrejan komprimovani vazduh ekspandira u turbini.

Tehnologije CAES postoje u različitim oblicima i veličinama, sa mogućnošću dugog skladištenja, umerene brzine odziva i dobrih performansi. CAES elektrane velikih kapaciteta se koriste kod mrežnih aplikacija upravljanja dijagramom proizvodnje, pokrivanje pikova potrošnje, kao i za frekvencijsku i naponsku kontrolu. CAES tehnologije se mogu koristiti i u kombinaciji sa intermitentnim obnovljivim izvorima energije, posebno sa energijom vetra, u cilju 'peglanja' izlazne snage ovih izvora.

U poređenju sa klasičnim CAES sistemima, AA-CAES (*Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*) ne zahteva gorivo, a samim ti i ne zagađuje okolinu. Ova tehnologija koristi termičko skladištenje energije (*Thermal Energy Storage - TES*) koje služi da zameni komoru za sagorevanje kod klasičnih gasnih elektrana: toplotna energija oslobođena tokom procesa komprimovanja vazduha se čuva i skladišti u TES, a zatim se ova energija ponovo koristi za zagrevanje komprimovanog vazduha tokom procesa ekspanzije u gasnoj turbini. Na ovaj način, eliminiše se potreba za gorivom i nema zagađenja okoline.

Izgled sistema, koji se sastoji od vetroturbine i AA-CAES tehnologije je prikazan na slici 1.



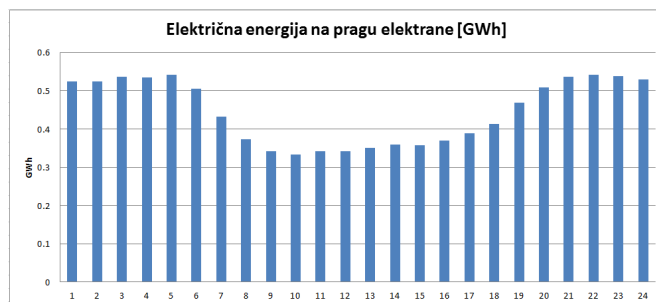
Slika 1 – Kombinacija vetroelektrane i AA-CAES sistema

EKONOMSKA ANALIZA ZAJEDNIČKOG RADA VETROELEKTRANE I SISTEMA ZA SKLADIŠTENJE

Rad sistema za skladištenje energije će u ovom radu biti analiziran na primeru konkretne vetroelektrane. Vetroelektrana se sastoji od jednog vetroagregata Vestas V126 snage 3.3 MW za koji je pretpostavljeno da se nalazi na određenoj mikrolokaciji u Vojvodini na nadmorskoj visini od 150m. Na ovoj lokaciji su izvršena merenja smera i brzine vetra (na visinama 20 m i 40 m) kao i temperature vazduha u periodu od godinu dana. Na osnovu ovih podataka, upotrebom programskog paketa MATLAB izračunat je profil proizvodnje vetroelektrane za period od godinu dana.

Analiza dobijenih rezultata

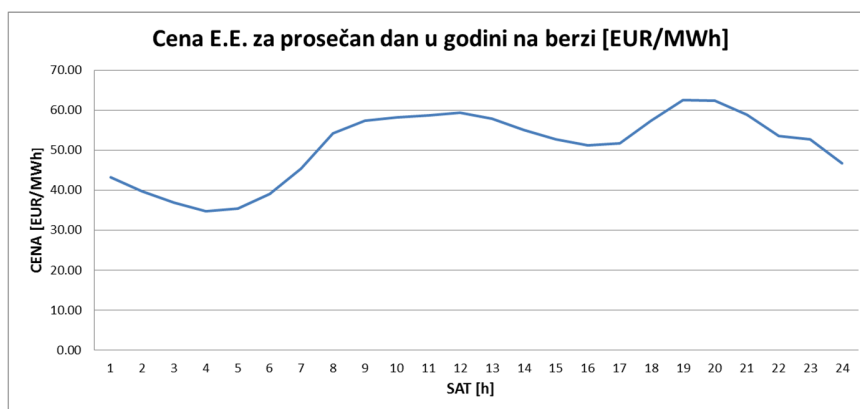
Proizvodnja analizirane vetroelektrane je intermitentne prirode i menja se, kako na dnevnom, tako i na sezonskom nivou. Slika 2 prikazuje prosečnu energiju koju vetroelektrana injektira u mrežu na godišnjem nivou za svaki sat posebno. Jasno se vidi da vetroelektrane proizvode energiju pretežno u noćnim časovima (21-06h) dok je tokom dnevnih časova proizvodnja u proseku manja i do 50%.



Slika 2 – Električna energija na pragu elektrane [GWh]

Sa ekonomskog stanovišta najpogodnije bi bilo kada bi se tipični profil proizvodnje vetroelektrane pokalapao sa profilom potrošnje u elektroenergetskom sistemu. Naime, u uslovima slobodnog tržišta cena električne energije se menja na satnom nivou i prati dijagram potrošnje, pa je i za vetroelektranu najisplativije ukoliko bi postojao visok stepen korelacije između proizvodnje vetroelektrane i potrošnje u sistemu (tj. cene na tržištu).

Na slici 3 prikazana je cena električne energije na evropskoj berzi za prosečan dan u 2011. godini.

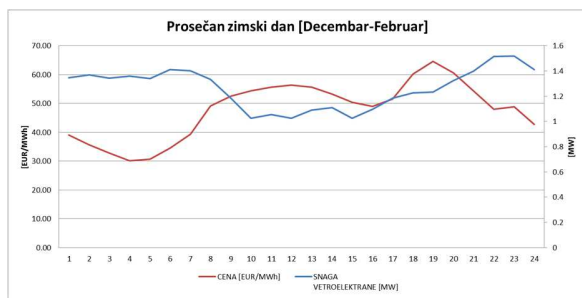


Slika 3– Cena električne energije za prosečan dan u godini na berzi u 2011. [EUR/MWh]

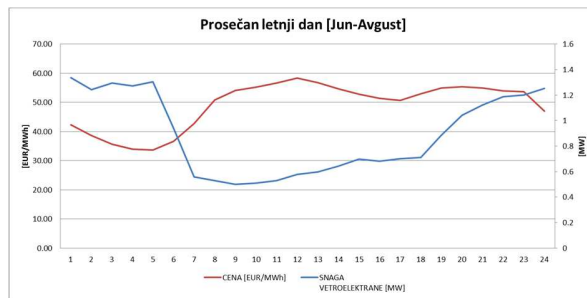
Vidimo da je cena električne energije najviša u večernjim, dok je najniža u jutranjim časovima. Ovo pokazuje da se dijagrami proizvodnje vetroelektrane i cene na berzi ne podudaraju u velikoj meri. U noćnim satima, kada vetroelektrane proizvode najviše energije, cena na tržištu je mala, dok je tokom dnevnih časova cena na tržištu veća, ali vetroelektrane u analiziranom regionu proizvode manje energije.

Pošto proizvodnja vetroelektrana varira na sezonskom nivou, a kako se i cena električne energije menja u zavisnosti od perioda godine, posmatračemo cene električne energije i proizvodnju vetroelektrane za prosečan letnji i zimski dan (Slike 4 i 5).

U zimskom periodu, cena električne energije je najviša u ranim večernjim časovima (cena za prosečan zimski dan od 18-19h je oko 65 EUR/MWh), dok je najniža u ranim jutarnjim časovima (od 03-04h je oko 30 EUR/MWh). Ako posmatramo vetroelektrane, one najviše energije proizvode u periodima sa niskom cenom električne energije – tokom kasnih večernjih i ranih jutarnjih časova.



Slika 4 – Cena električne energije [EUR/MWh] i proizvodnje vetroelektrane [MW] za prosečan zimski dan [Decembar-Februar]



Slika 5 – Cena električne energije [EUR/MWh] i proizvodnje vetroelektrane [MW] za prosečan letnji dan [Jun-Avgust]

Tokom leta, električna energija je najskuplja u podne, jer je u tom periodu i potrošnja najviša (uslovljena velikim brojem klima uređaja). Cena električne energije ne varira puno tokom dana, dok u kasnim večernjim i ranim jutarnjim časovima opada. Takođe, treba primetiti da razlika između maksimalne i minimalne cene nije toliko velika kao u zimskom periodu. S druge strane, VE najviše energije proizvode tokom noći (kada je cena električne energije mala) dok tokom dana proizvode dosta manje energije.

Na osnovu ova dva dijagrama, jasno je da sistem za skladištenje energije može imati pozitivne efekte ukoliko bi se energija skladištila tokom noći, kada je cena energije niska, a plasirala na tržište u periodu sa najvišom cenom. Takođe, može se videti da je cena električne energije genaralno viša u zimskom periodu kada i vetroelektrane proizvode više energije.

Analiza zajedničkog rada vetroelektrane i sistema za skladištenje

Na osnovu prethodnog razmatranja, izvršena je analiza rada hibridnog sistema koji se sastoji od vetroelektrane snage 3.3 MW i skladišta električne energije na principu AA CAES tehnologije. Snaga kompresora je takođe 3.3 MW (što znači da se u periodima sa velikim vetrovima kompletna snaga iz vetroelektrane može skladištiti), kao i snaga gasne turbine. Efikasnost konverzije AA CAES sistema je 70% (tj gubuci usled akumulacije su 30%).

Princip rada ovog sistema se zasniva na tome da se energija u jutarnjim časovima skladišti, a zatim prodaje u vreme kada je cena električne energije na berzi najviša. Cilj je ostvariti što veći novčani profit.

Analiza je rađena za period od godinu dana, pojedinačno za svaki dan u mesecu. Razmatrana su dva slučaja:

- Slučaj 1 - Energija iz VE se skladišti u periodu 00-06h
- Slučaj 2 - Energija iz VE se skladišti u periodu 02-05h

Energija je skladištena isključivo u periodu od 00-06h za slučaj 1 (tj od 02-05h za slučaj 2). Uskladištena energija (umanjena za 30% gubitaka) se prodaje u satu, odnosno satima, sa najvišom cenom na berzi, u zavisnosti od količine uskladištene energije.

Rezultati analize su predstavljeni u tabelama 1 i 2. U prvoj koloni prikazana je ukupna novčana dobit koja bi se ostvarila kada bi vetroelektrana direktno plasirala proizvedenu električnu energiju na tržište. U drugoj kolini prikazana je zarada koja bi se ostvarila ako se ta energija skladišti, a zatim prodaje u periodu sa najvišom cenom na tržištu u toku tog istog dana. Treća kolona pokazuje ostvarenu razliku u profitu.

Najveća razlika u profitu ostvarena je u jesenjem i zimskom periodu (septembar-januar), dok je tokom letnjih i prolećnih dana ta razlika dosta manja, kao posledica manje razlike u ceni električne energije tokom dana. Ukupna ostvarena dobit na račun akumulacije u prvom slučaju je 21,910 €/god, dok je u drugom oćekivano manja i iznosi 16,969 €/god. Uporedna analiza rezultata ostvarenogbruto prihoda za VE bez i sa sklaštenjem energije je prikazana u tabelama 1 i 2. Pri proračunu ostvarene dobiti korišćeni su podaci o satnim cenama električne energije na evropskoj berzi,

TABELA 1 - Slučaj 1: Ostvarena dobit

Slučaj 1	Bez skladišta [EUR]	Sa skladištem [EUR]	Razlika	
			[EUR]	[%]
Januar	8480.3	10614.1	2133.8	25%
Februar	9500.3	10463.4	963.1	10%
Mart	14805.3	15297.2	491.9	3%
April	13344.0	14006.6	662.7	5%
Maj	11303.0	11875.7	572.7	5%
Jun	11324.1	12411.8	1087.8	10%
Jul	6499.0	7265.7	766.6	12%
Avgust	7331.3	8927.0	1595.6	22%
Septembar	8691.4	11057.6	2366.2	27%
Oktobar	13368.8	17307.5	3938.7	29%
Novembar	10741.3	14808.7	4067.4	38%
Decembar	7664.4	10927.9	3263.5	43%
Ukupno	€ 123,053	€ 144,963	€ 21,910	18%

TABELA 2 - Slučaj 2: Ostvarena dobit

Slučaj 2	Bez skladišta [EUR]	Sa skladištem [EUR]	Razlika	
			[EUR]	[%]
Januar	3590.6	5069.7	1479.0	41%
Februar	4535.3	5292.9	757.6	17%
Mart	7200.6	7863.1	662.5	9%
April	6470.8	7267.9	797.1	12%
Maj	5787.6	6441.0	653.5	11%
Jun	5600.4	6623.7	1023.3	18%
Jul	3096.3	3673.1	576.7	19%
Avgust	3635.5	4849.2	1213.7	33%
Septembar	3986.1	5813.4	1827.3	46%
Oktobar	6020.9	8981.2	2960.3	49%
Novembar	5213.8	8040.7	2826.8	54%
Decembar	3611.2	5802.3	2191.1	61%
Ukupno	€ 58,749	€ 75,718	€ 16,969	29%

Najmanja dobit je ostvarena u periodu Mart-Maj kao posledica toga što je u nekim danima tokom ovih meseci cena električne energije praktično ujednačena, pa se i ne isplati da se električna energija skladišti. Tokom ovih dana imamo gubitke u profitu ako se energija striktno skladišti u periodu od 00-06h, odnosno 02-05h, iako se nakon toga prodaje po najvišoj dnevnoj ceni. Ukoliko se tokom ovih dana električna energija ne skladišti, ili se skladišti u nekom drugom, pogodnijem, periodu, može se poboljšati doprinos sistema za skladištenje.

Analiza optimalnog skladištenja u toku jedne sedmice

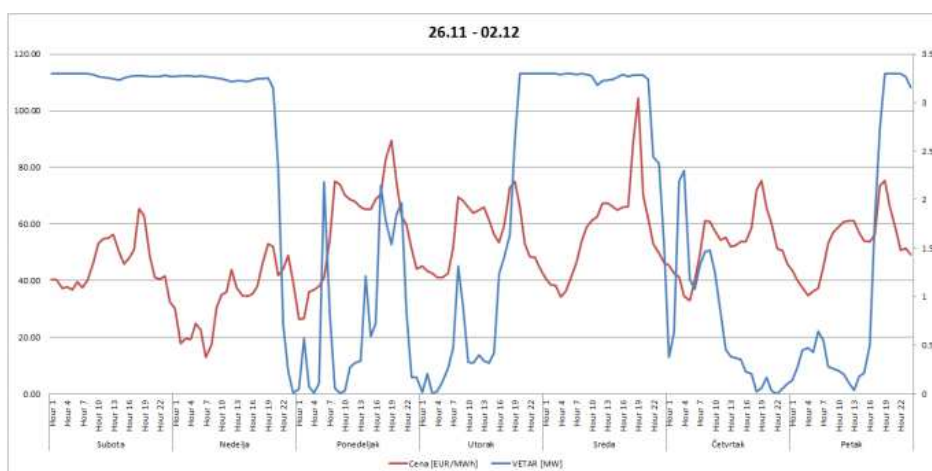
Prethodna analiza odrađena je za svaki dan pojedinačno. To znači da se sva energija koja se skladišti u toku jednog dana proda na berzi u toku istog tog dana, odnosno imamo sistem skladištenja sa dnevnim ravnanjem. Međutim, ukoliko bi se period optimizacije skladištenja produžio na više dana mogao bi se ostvariti dodatni profit. Cena električne energije tokom vikenda je niža nego radnim danima, što znači da bi se vikendom električna energija mogla skladištiti tokom većeg dela dana, a kasnije prodavati radnim danima u, za to, najpovoljnijim trenucima. Za ovu dodatnu analizu posmatraćemo period od sedam dana (nedeljno ravnanje).

Za analizu optimalnog sedmičnog skladištenja posmatran je period od 26.novembra do 02.decembra. Izabrani period počinje u subotu a završava se u petak. Ovakav način skladištenja daje najveći prihod. Naime, električna energija će se tokom vikenda, kada su cene na berzi niske, većim delom skladištiti, a zatim prodavati pod najpovoljnijim uslovima tokom narednih pet dana.

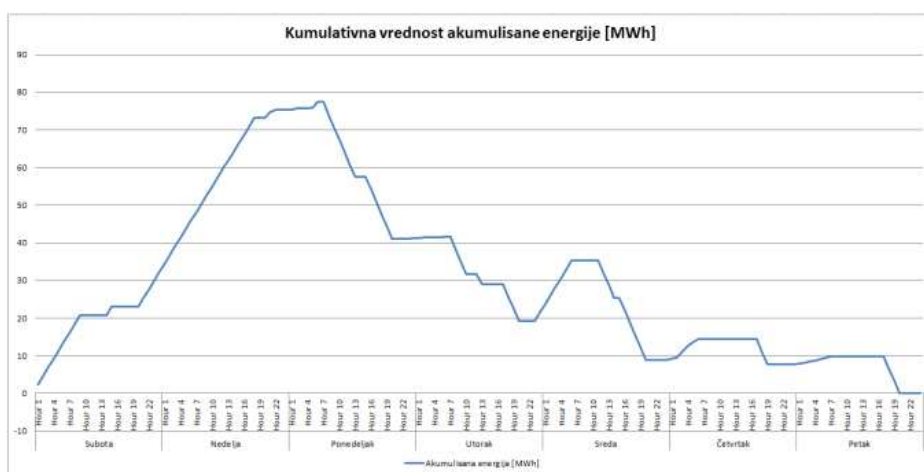
Error! Reference source not found.Slika 6 prikazuje cenu električne energije i proizvodnju vetroelektrane tokom perioda od 7 dana. Može se videti da je cena energije tokom vikenda dosta manja nego radnim danima. Takođe, proizvodnja vetroelektrane u ovom periodu je dosta velika i tokom celog vikenda iznosi preko 3 MW. Iz tog razloga, proizvodnja iz vetroelektrane će se u najvećoj meri skladištiti, dok će se samo manji deo prodati direktno na berzi. Velika količina skladištene energije će omogućiti prodaju u najvišim časovima tokom narednih dana.

Rezultati su pokazali da je optimalno da se od 48 sati tokom vikenda, čak 35 sati skladišti energija, dok se ostalih 13 sati ona prodaje direktno na berzi. Skladištena energija će se prvi put prodati na berzi tokom ponedeljka (deo u dnevnom peak-u, a deo u večernjem).

Električna energija će se skladištiti i u periodu ponedeljak – petak, ali mnogo manje nego tokom vikenda (samo 34h od ukupno 120 h). Slika 7 prikazuje trenutnu vrednost akumulisane energije tokom cele nedelje. Na slici se jasno vide periodi u kojima je energija akumulisana, kao i periodi kada se ova energija koristila za pokretanje gasne turbine.



Slika 6 – Cena električne energije [EUR/MWh] (crvena boja) i proizvodnja vetroelektrane [MW] (plava boja) za period subota – petak



Slika 7 – Količina akumulisane energije [MWh] u periodu 06.11 – 02.12.

Error! Reference source not found. Tabela 3 prikazuje ostvarenu dobit u analiziranom periodu (26.11. – 02.12.) za slučaj sa i bez skladišta energije. U tabeli su takođe prikazani i rezultati za prva dva načina skladištenja kako bi se napravila uporedna analiza.

TABELA 3 – Ostvarena dobit za različite slučajeve skladištenja

	Broj časova tokom kojih se energija akumulira [h]	Cena na evropskoj berzi električne energije			
		Bez skladišta [EUR]	Sa skladištem [EUR]	Razlika	
				[EUR]	[%]
Optimalno skladištenje	69	5,161.8	7,384.9	2,223.2	43%
Slučaj 1	42	2,487.3	3,394.2	906.9	36 %
Slučaj 2	21	1,206.8	1,849.1	624.3	53%

Očigledno je da skladištenje na sedmičnom nivou dovodi do povećane dobiti. Za posmatranu nedelju, skladištenjem na ovaj način ostvaren je dodatni prihod od 2 223 €, dok je dobit pri optimizaciji na dnevnom nivou dosta niža (906.9 €, odnosno 634.2 €).

Za analizirane slučajeve dat je prikaz ukupne sedmične zarade vetroelektrane u slučaju sa i bez skladištenja.

TABELA 4 - Ukupna nedeljna zarada od prodaje električne energije

	Optimalno skladištenje	Slučaj 1	Slučaj 2
Ukupna nedeljna zarade VE bez skladišta [EUR]	15,469.6 €	15,469.6 €	15,469.6 €
Ukupna nedeljna zarade VE sa skladištem [EUR]	17,692.7 €	16,376.5 €	16,093.9 €
Profit na računa skladišta	2,223.2 €	906.9 €	624.3 €
Prihod od skladišta [%]	14.4%	5.9%	4.0%

U slučaju optimalnog sedmičnog skladištenja, ukupan dodatni prihod na sedmičnom nivou je 14.4 %, što je mnogo više nego za slučaj 1 i 2 (5.9 % i 4.0 %, respektivno). Međutim, mora se naglasiti da je ovako odabran period za analizu u velikoj meri pogodio skladištenje; tokom vikenda (u periodu niskih cena) vetroelektrana je radila sa skoro nominlanom snagom što je omogućilo da se velike količine električne energije skladište i potom prodaju tokom narednih dana, a pored toga, cene električne energije na berzi su bile nešto više u ovom periodu nego inače. Tako da, i pored očigledne prednosti koja se ima pri ovom principu optimizacije rada skladišta, može se očekivati da će procentualni prihod od skladištenja na godišnjem nivou, ili u slučaju da se posmatra neki drugi period, biti manji. To se može videti i za slučaj sedmičnog skladištenja po principu jedan i dva, kada je nedeljni prihod (u procentualnim vrednostima), veći nego na godišnjem nivou, upravo zahvaljujući izabranom periodu.

ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su tržišni efekti zajedničkog rada vetroelektrane i sistema za skladištenje električne energije.

Primena sistema za skladištenje pruža dosta prednosti radu vetroelektrane, između ostalog povećanje ukupnog prihoda koji se ostvaruje plasmanom proizvedene električne energije na slobodnom tržištu. Međutim, za ozbiljniju procenu isplativosti primene ovih sistema neophodno je izvršiti detaljnu ekonomsku analizu koja bi uzela u obzir i kapitalne investicije, troškove održavanja i pogona, životni vek postrojenja.

Poseban ekonomski efekat koji u perspektivi mogu pružiti vetroelektrane sa skladištenjem energije je vezan za obezbeđivanje regulacione rezerve u sistemu. Ove systemske usluge postaju sve potrebnije u elektroenergetskim sistemima sa velikim stepenom penetracije obnovljivih intermitentnih izvora. Takođe, skladištenje električne energije iz vetra omogućava vlasniku vetroelektrane bolje pozicioniranje na berzi jer može garantovati satne proizvodnje električne energije i time postići bolju poziciju na tržištu u odnosu na vetroelektrane koje se oslanjaju samo na prlogozu vetra.

Treba imati na umu i da ova tema nudi dosta mogućnosti za dalje i dublje analize: variranjem parametara, primenom drugih optimizacionih kriterijuma, korišćenjem neke druge tehnologije za skladištenje. Ali jedno je sigurno, sistemi za skladištenje su tehnologija koja obećava, posebno u periodu koji tek dolazi.

LITERATURA

1. Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke: *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied Energy 137 (2015) 511–536*
2. Hao Sun, Xing Luo, Jihong Wang: *Feasibility study of a hybrid wind turbine system – Integration with compressed air energy storage, Applied Energy 137 (2015) 617–628*
3. Yuan Zhang, Ke Yang, Xuemei Li, Jianzhong Xu: *Thermodynamic analysis of energy conversion and transfer in hybrid system consisting of wind turbine and advanced adiabatic compressed air energy storage, Energy 77 (2014) 460-477*
4. Samir Succar, David C. Denkenberger, Robert H. Williams: *Optimization of specific rating for wind turbine arrays coupled to compressed air energy storage, Applied Energy 96 (2012) 222–234*

5. Nor Shahida Hasan, Mohammad Yusri Hassan, Md Shah Majid, Hasimah Abdul Rahman: *Review of storage schemes for wind energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 237–247*
6. Milenko B. Đurić, Željko R. Đurišić, Aleksandar R. Čukarić, Veselin Ilić: *Elektrane*, 2010 Beograd
7. Željko Đurišić, *Vetroelektrane*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Katedra za Elektroenergetske sisteme, Beograd 2012
8. European Commission: *EU energy in figures*, Pocketbook 2014
9. U.S. Energy Information Administration: *Annual Energy Outlook 2015*
10. General Specification V126–3.3 MW 50 Hz
11. Global Wind Energy Council: *Global Wind Statistics 2014*. Brussels, Belgium 2015.