

Vetroelektrana sa toplotnim skladištem energije

Kristina Džodić, Đorđe Lazović, Željko Đurišić
Katedra za elektroenergetske sisteme
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
kristinadz@etf.rs, lazovic@etf.rs, djurisic@etf.rs

Milica Aščerić
Go2Power
Beograd, Srbija
milica.asceric@go2power.eu

Sažetak— U radu je predstavljen model hibridne vetroelektrane sa toplotnim skladištem za apsorbovanje viškova električne energije. Predloženi sistem je demonstriran na primeru vetroelektrane Bela Anta koja se sastoji od 20 vetroagregata. Odobrena snaga injektiranja u elektroenergetski sistem (EES) ove elektrane je 120,8 MW. Ukoliko bi se elektrana realizovala sa 20 vetroagregata V162-7.2 viškovi električne energije, koji se ne mogu plasirati u EES zbog limitiranja snage, bi bili oko 4,12 GWh/god, dok bi se plasman električne energije u EES povećao za 12,1 GWh, što je za oko 3,7% veća proizvodnja u odnosu na rešenje sa vetroagregatima V162-6.2. Ovakav pristup u realizaciji elektrane obezbeđuje bolje iskorišćenje energije vetra, lokalno generisanje toplotne energije za snabdevanje domaćinstava u selu Dolovu, čime se smanjuje korišćenje malih ložišta i unapređuje kvalitet vazduha u zimskim mesecima.

Ključne riječi- vetroelektrana; limitiranje snage; toplotno skladište; ekonomski proračun.

I. UVOD

U ovom radu je analiziran hibridni energetski sistem koji se sastoji od vjetroelektrane i jamskog skladišta tople vode koje se može tretirati kao upravljiva potrošnja na strani elektrane. Uloga jamskog skladišta je da apsorbuje viškove električne energije koje proizvodi vetroelektrana iznad snage koja je prihvatljiva za injektiranje u elektroenergetski sistem (EES). Time se može u potpunosti eliminisati potreba za limitiranjem snage proizvodnje vetroelektrane koju nameće operator prenosnog ili distributivnog sistema na koji je priključena vetroelektrana. Ovakav pristup omogućava investitorima da planiraju izgradnju vetroelektrane veće instalisane snage i poboljšaju ekonomske parametre elektrane. Dodatno, toplotno skladište može bitno smanjiti grešku u prognozi snage injektiranja u tački priključenja i na taj način smanjiti troškove balansiranja proizvodnje vetroelektrane. Akumulisana toplotna energija se predaje toplotnom konzumu, koji može biti industrija, ali i domaćinstva koja mogu koristiti toplu vodu za zagrevanje prostorija i obezbeđivanje sanitarne tople vode.

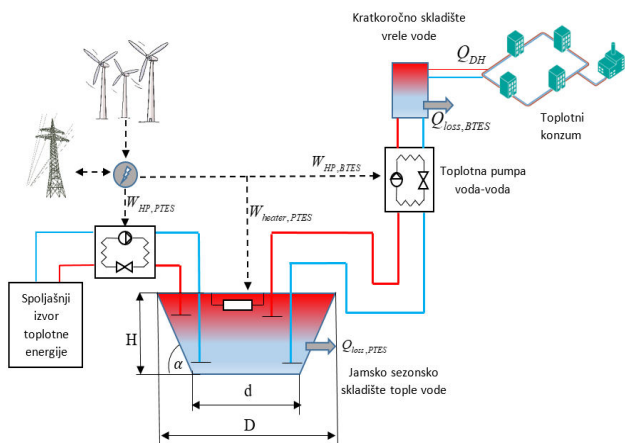
Koncept ovakvog energetskog postrojenja je demonstriran na primeru realnog projekta vetroelektrane Bela Anta u Južnom Banatu. Projekat ove elektrane je iniciran još 2008. godine [1]. Kasnije je započet njegov razvoj i ovaj projekat je pred izgradnjom, gde je, prema razvijenoj projektnoj dokumentaciji, predviđeno da se sastoji od 20 agregata. Odobrena snaga injektiranja u prenosnu 110 kV mrežu je 120,8 MW. Elektrana se može realizovati sa vetroagregatima različite jedinične instalisane snage. Zahtev operatora prenosnog sistema je da u tački priključenja snaga ne sme preći odobrenu vrednost. Postavlja se pitanje kolika je optimalna jedinična snaga agregata koja će vlasniku obezbediti najveći profit uz zadovoljenje ograničenja po broju agregata, njegovim gabaritima i maksimalnoj snazi injektiranja u tački priključenja.

U ovom radu su analizirana dva varijantna rešenja vetroelektrane Bela Anta sa vetroagregatima istih gabarita ali različite instalisane snage vetrogeneratora. Sagledani su energetski i ekonomski efekti izgradnje toplotnog skladišta koje bi prihvatilo viškove proizvodnje vetroelektrane koji mogu nastati usled limitiranja snage injektiranja u varijanti kada je zbirna instalisana snaga vetroagregata veća od odobrene snage injektiranja u EES. Dobijena toplotna energija je planirana za obezbeđivanje grejanja i sanitarne tople vode za naselje Dolovo.

II. KONCEPT HIBRIDNE VETROELEKTRANE SA TOPLOTNIM SKLADIŠTEM

Koncept kogenarativnog postrojenja za dobijanje električne i toplotne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE) predstavlja moderan pristup koji ima za cilj efikasno korišćenje resursa OIE i lokalno snabdevanje konzuma toplotnom energijom, čime se može značajno unaprediti životna sredina u regionu izgradnje vetroelektrane. Na Sl. 1 prikazano je idejno rešenje vetroelektrane sa jamskim toplotnim skladištem.

Pri jakim vetrovima, kada ukupna snaga proizvodnje vetroelektrane u tački priključenja na EES dostigne dozvoljenu vrednost, aktivira se sistem za limitiranje snage elektrane koji održava snagu injecciona u prenosnu mrežu na dozvoljenu vrednost, a viškove snage plasira prema toplotnom skladištu. Ovu funkciju realizuje SCADA sistem elektrane koji prikuplja merne signale i šalje komande energetskom usmerivaču koji upravlja energetskim pretvaračima koji napajaju sisteme toplotnih pumpi i otporničkih grejača u



Slika 1. Tehnološka šema vetroelektrane sa jamskim toplotnim skladištem

sezonskom toplotnom skladištu. Otpornički grejači imaju mogućnost fine regulacije, a toplotne pumpe imaju diskretne nivoe snage. Energetski usmerivač zadaje reference pretvaračima električnih grejača i vrši kontrolu rada toplotnih pumpi tako da se celokupan višak energije plasira u toplotno skladište. Na ovaj način se postiže da svi vetroagregati u vetroelektrani rade sa optimalnim iskorišćenjem snage vetra, odnosno prema optimalnoj krivoj snage. U periodima kada nema viškova električne energije iz vetra, omogućeno je napajanje sistema za zagrevanje iz lokalne distributivne mreže.

Toplotno skladište je realizovano kao dvostepeno. Prvi stepen je jamsko skladište tople vode velikog kapaciteta čija temperatura se optimizuje tako da godišnji gubici budu na prihvatljivoj vrednosti. Generalno, prosečna temperatura vode u ovom skladištu je 30 – 60°C. Skladište se obično realizuje tako što se iskopa jama u obliku obrnute zarubljene piramide. Površine formirane jame se prekrivaju sa termoizolacionim i vodonepropusnim folijama, tako da se formira rezervoar koji se napuni vodom. Na gornjoj površini formirane akumulacije se postavljaju pontonski nosači koji se prekrivaju termoizolacionim slojem. Varijantna rešenja toplotnih skladišta i detalji njihovih konstrukcija se mogu naći u literaturi [2-6].

Voda u sezonskom toplotnom skladištu se greje pomoću toplotnih pumpi i otporničkih grejača. U zavisnosti od medijuma iz kojeg toplotna pumpa preuzima toplotu zavisi i efikasnost ovakvog grejanja. Generalno, industrijske toplotne pumpe „voda-voda” mogu postići visok stepen konverzije, npr. pri uslovima velike razlike u temperaturama zahvata i plasmana toplote, gde koeficijent performansi (COP) može ići i

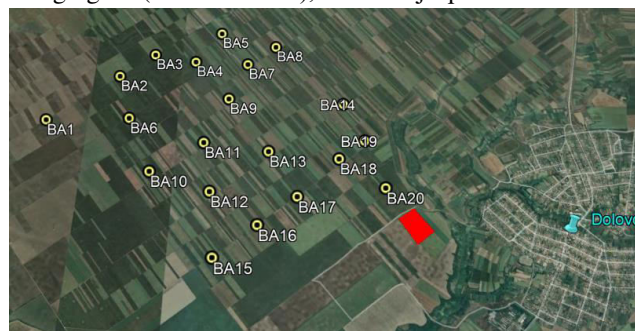
preko 3 [7]. To znači da se od 1 MWh uložene električne energije za pokretanje kompresora dobije oko 3 MWh toplote energije u toplotnom skladištu.

Drugi stepen toplotnog skladišta je akumulacija vruće vode čija temperatura treba da odgovara temperaturi koju zahteva konzum. Generalno, temperatura u ovom skladištu je 80 – 90°C. Kapacitet ovog skladišta treba da podmiri dnevne ili nedeljne potrebe toplotnog konzuma za najkritičniji period. Temperatura u njemu se održava na približno konstantnoj vrednosti pomoću toplotnih pumpi „voda-voda” koje vrše transfer toplote iz sezonskog u bafer skladište. Efikasnost rada ovih toplotnih pumpi je visoka zbog male razlike u temperaturama vode u skladištima [7]. Napajanje ovih pumpi se vrši isključivo iz lokalne distributivne mreže, s obzirom da se tokom transfera toplote iz sezonskog u bafer skladište ne generiše dodatna energija (toplota energija preuzeta iz sezonskog skladišta + električni rad kompresora toplote pumpe = energija koja se preda kratkoročnom skladištu). S druge strane, višak energije iz vetra u najvećoj mogućoj meri treba utrošiti na napajanje toplotnih pumpi u sezonskom skladištu, s obzirom da se u tom procesu uvodi toplota energija preuzeta iz spoljašnjeg izvora. Bafer skladište može biti realizovano kao podzemni ili nadzemni boiler sa dobrom toplotnom izolacijom. U bafer skladištu se nalazi površinski izmenjivač toplote kroz koji struji voda iz sekundarne konture koja napaja toplotni konzum. Dakle, ceo toplotni sistem je raspregnut, tako da se imaju nezavisni fluidi u sva tri toplotna podsistema: sezonsko skladište, kratkoročno skladište i toplovodni sistem konzuma.

U ovom radu prikazan je koncept ovakvog energetskog postrojenja na primeru realnog projekta vetroelektrane Bela Anta (VE BA) čija izgradnja je planirana na teritoriji opštine Pančevo, na uzdignutom platou pored naselja Dolovo. Na Sl. 2 prikazana je dispozicija stubnih mesta vetroagregata u VE BA i predložena lokacija toplotnog skladišta na satelitskoj mapi terena. Teren pogoduje izgradnji toplotnog skladišta jer su geološka istraživanja terena pokazala da su podzemne vode na dubinama većim od 20 m, što je bitno za efikasnost jamskog skladištenja tople vode. Osim toga, lokacija toplotnog skladišta se nalazi na udaljenosti od svega 1 km od oboda naselja Dolovo, koje je planirani toplotni konzum, čime se smanjuje investicija za izgradnju toplovodnog sistema i smanjuju gubici u prenosu toplote energije od skladišta do konzuma.

III. ANALIZA VREMENSKOG DIJAGRAMA PROIZVODNJE VETROELEKTRANE BELA ANTA

Vetroelektrana Bela Anta je planirana da se realizuje sa 20 vetroagregata (BA1 – BA20), kao što je prikazano na Sl. 2.



Slika 2. Tehnološka šema vetroelektrane sa jamskim toplotnim skladištem

Dispozicija stubnih mesta omogućava instalaciju vetroagregata maksimalnog prečnika rotora od oko 160 m. U tabeli I dati su podaci o vetroagregatima za dva analizirana varijantna rešenja.

TABELA I. ANALIZIRANA VARIJANTNA REŠENJA VETROELEKTRANE BA

Rešenje	Broj agregata	Model vetroagregata	Visina stuba (m)	Ukupna instalisana snaga (MW)	Odobrena snaga u tački priključenja (MW)
1	20	Vestas V162 – 6,2	125	124	120,8
2	20	Vestas V162 – 7,2	125	144	120,8

Proračun vremenskih dijagrama raspoložive snage u tački priključenja VE BA je izvršen na osnovu relacije 3.1. U ovoj relaciji V_{eff} je efektivna brzina vetra na visini gondole vetroagregata (125 m) u satu i , dok je N broj vetroagregata u vetroelektrani, a $P_{powercurve}(i)$ je bruto snaga proizvodnje vetroelektrane u satu i , koja obuhvata samo gubitke usled efekta zavetrine. Koeficijent k je koeficijent skaliranja izmerene brzine vetra preko kojeg se uvažava redukcija proizvodnje vetroelektrane zbog efekta zavetrine. Ovaj koeficijent se proračunava iterativno u softveru MATLAB, tako da bude zadovoljena relacija 3.2. W_{Σ} je bruto godišnja električna energija koju proizvedu vetroagregati uz uvažavanje efekta zavetrine.

$$P_{\Sigma}(i) = N \cdot P_{powercurve}(V_{eff}), \quad V_{eff} = kV(i) \quad (3.1)$$

$$\int_0^{8760} P_{\Sigma} dt \cong \sum_{i=1}^{8760} P_{\Sigma}(i) \Delta t = \sum_{i=1}^{8760} N \cdot P_{powercurve}(V_{eff}) \Delta t = W_{\Sigma} \quad (3.2)$$

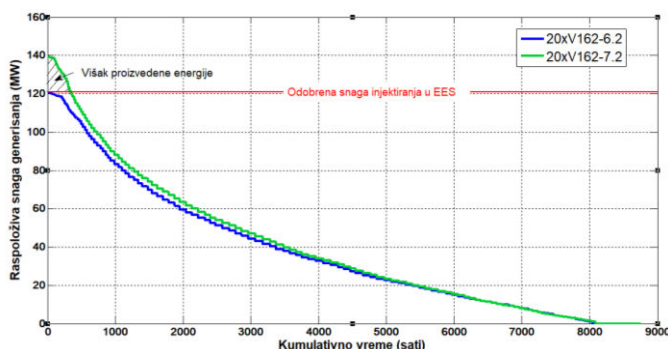
Proračun snage gubitaka u internoj kablovskoj mreži u satu i - $P_{\gamma}(i)$ je vršen primenom ekvivalentne otpornosti na kojoj se disipira ukupna godišnja energija gubitaka. Konačno, raspoloživa snaga generisanja vetroelektrane (P_{VE}) u satu i u tački priključenja vetroelektrane na EES je računata prema relaciji:

$$P_{VE}(i) = P_{\Sigma}(i) - P_{\gamma}(i) \quad (3.3)$$

Električna snaga koja se predaje toplotnom skladištu (P_{TSe}), odnosno napaja toplotne pumpe i otporničke grejače, je definisana relacijom (3.4) u kojoj je $P_{odobreno}$ odobrena snaga injektiranja vetroelektrane u tački priključenja na EES:

$$P_{TSe}(i) = \begin{cases} 0 & P_{VE}(i) \leq P_{odobreno} \\ P_{VE}(i) - P_{odobreno} & P_{VE}(i) > P_{odobreno} \end{cases} \quad (3.4)$$

Za analizirani projekat VE BA proračuni su izvršeni za period od 6 godina (2014 – 2019). Na Sl.3 prikazani su uporedno histogrami raspoložive snage proizvodnje (P_{VE}) za 2017. god, koja je odabrana kao godina sa prosečnim vetroenergetskim potencijalom u analiziranom šestogodišnjem periodu.



Slika 3. Histogrami raspoložive snage proizvodnje VE BA u tački priključenja na EES za analizirana varijantna rešenja

U tabeli II prikazani su rezultati proračuna ukupne proizvodnje i viškova električne energije za prosečnu godinu. Kao što je i očekivano, u prvom varijantnom rešenju ne postoje viškovi snage, dok u drugom rešenju višak proizvodnje na godišnjem nivou iznosi 4,12 GWh. Ova energija bi morala biti prosuta ukoliko ne bi postojalo interno skladište koje će akumulirati viškove. U ovom radu je pretpostavljeno da tu ulogu vrši jamsko toplotno skladište.

TABELA II. PRORAČUN ENERGETSKOG BILANSA ZA ANALIZIRANA VARIJANTNA REŠENJA VETROELEKTRANE BELA ANTA

Varijantno rešenje	Maks. raspoloživa snaga generisanja u tački priključenja (MW)	Maks. višak snage (MW)	Raspoloživa godišnja energija u tački priključenja (GWh)	Ukupna godišnja energija viškova proizvodnje nakon limitiranja snage (GWh)	Električna energija plasirana u EES (GWh)
1	120,47	0	327,17	0	327,17
2	138,59	17,79	343,39	4,12	339,27

Dakle, zaključak prethodne analize je da se upotrebom vetroagregata od 7,2 MW, umesto 6,2 MW, postiže veći godišnji plasman energije u EES za 12,1 GWh, odnosno 3,7%, i višak električne energije koji je raspoloživ za plasman u toplotno skladište od 4,12 GWh.

IV. MATEMATIČKI I UPRAVLJAČKI MODEL VETROELEKTRANE SA TOPLOTNIM SKLADIŠTEM

U ovom poglavlju je opisan način upravljanja sistemom prikazanim na Sl.1 i definisan je odgovarajući matematički model. Pregled skaraćenica i promenljivih stanja koje se koriste je dat u tabeli III.

TABELA III. PREGLED SKARAĆENICA I PROMENLJIVIH STANJA KOJE SE KORISTE U MATEMATIČKOM MODELU

Skraćenice
PTES - Pit Thermal Energy Storage, jamsko toplotno skladište
BTES - Buffer Thermal Energy Storage, kratkoročno toplotno skladište
HP - Heat Pump, toplotna pumpa
COP - Coefficient of Performance, koeficijent performansi
DH - District Heating, daljinsko grejanje + zagrevanje sanitarne tople vode
Promenljive stanja i parametri
$\Delta Q = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta \theta$ - promena toplotne energije skladišta
W_{heater} - električna energija koja se troši na grejaču
W_{HP} - električna energija koja se ulaže u rad toplotne pumpe
Q_{loss} - energija toplotnih gubitaka
θ_{TES} - prosečna temperatura vode u toplotnom skladištu
θ_{air} - ambijentalna temperatura
θ_{ground} - prosečna temperatura zemlje u koju je ukopano toplotno skladište
$\alpha_{cover} \cdot S_{cover}$ - koeficijent odvođenja toplote, površina zaptivača
$\alpha_{wall} \cdot S_{wall}$ - koeficijent odvođenja toplote, površina zidova i dna

Voda u sezonskom toplotnom skladištu se zagreva pomoću otporničkih grejača i/ili toplotnih pumpi koje prenose toplotu od spoljašnjeg izvora ka skladištu. Hlađenje skladišta je

posledica toplotnih gubitaka i odvođenja toplote usled rada toplotne pumpe koja povezuje sezonsko i kratkoročno toplotno skladište. Promena toplotne energije sezonskog toplotnog skladišta data je izrazom 4.1.

$$\Delta Q_{PTES} = W_{heater, PTES} + W_{HP, PTES} \cdot COP_{PTES} - Q_{loss, PTES} - W_{HP, PTES} \cdot (COP_{PTES} - 1) \quad (4.1)$$

Kratkoročno toplotno skladište se zagreva pomoću toplotnih pumpi koje povezuju dva toplotna skladišta. Hlađenje skladišta je posledica toplotnih gubitaka i odvođenja toplote usled potrošnje toplotnog konzuma. Promena toplotne energije kratkoročnog toplotnog skladišta data je izrazom 4.2.

$$\Delta Q_{HTES} = W_{HP, HTES} \cdot COP_{HTES} - Q_{loss, HTES} - Q_{DH} \quad (4.2)$$

Gubici usled odvođenja toplote iz skladišta se aproksimativno mogu iskazati relacijom 4.3, uz pretpostavku da je temperatura vode u skladištu homogena, [10].

$$Q_{loss} = U_{cover} \cdot S_{cover} \cdot (\theta_{TES} - \theta_{air}) + U_{walls} \cdot S_{walls} \cdot (\theta_{TES} - \theta_{ground}) \quad (4.3)$$

Za predloženi tip termoizolacionog skladišta, usvojene su sledeće vrednosti koeficijenata odvođenja toplote: $U_{cover} = 0.15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ i $U_{wall} = 0.3 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, [11].

U radu [12] je izvršeno detaljno modelovanje koeficijenta performansi (COP) industrijskih toplotnih pumpi velike snage. Ovaj koeficijent u najvećoj meri zavisi od razlike temperatura medijuma za zahvat i plasmana toplote (ΔT_{lift}), i može se iskazati eksponencijalnom relacijom 4.4.

$$COP = ae^{b \cdot \Delta T_{lift}}, \quad a = 10, 204, \quad b = -0, 023347 \quad (4.4)$$

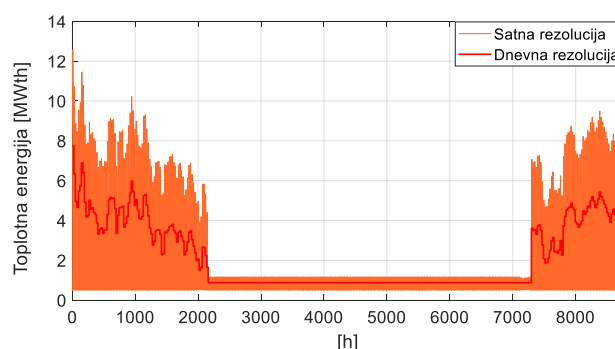
Vrednosti promenljivih stanja matematičkog modela definisanog izrazima (4.1)-(4.4) u najvećoj meri zavise od upravljačke strategije rada toplotnih pumpi i električnih grejača, kao i referentnog opsega temperature u toplotnim skladištima. U radu je usvojen sledeći upravljački model:

- Referentna temperatura vode u kratkoročnom toplotnom skladištu održava se u opsegu 85-90°C.
- Opterećenje toplotnih pumpi koje povezuju sezonsko i kratkoročno toplotno skladište treba da prati dijagram potrošnje toplotnog konzuma, uz termostatsku regulaciju temperature vode u skladištu.
- Referentna temperatura vode u sezonskom toplotnom skladištu održava se u opsegu 30-50°C u režimima bez viškova električne energije iz vetra. U periodima kada su prisutni viškovi električne energije, dozvoljeno je povećanje temperature vode do 70°C.
- Opterećenje toplotnih pumpi koje povezuju spoljašnji izvor toplote i sezonsko toplotno skladište u režimima bez viškova električne energije određeno je termostatskom regulacijom temperature vode u skladištu. U periodima kada su viškovi električne energije prisutni, toplotne pumpe je potrebno opteretiti sa maksimalnom snagom.
- Električni grejači u sezonskom toplotnom skladištu rade samo u periodima kada se javlja višak električne energije iz vetroelektrane. Snaga grejača se kontinualno menja, tako da je zbirno opterećenje grejača i toplotnih pumpi jednako višku proizvodnje iz vetra.

V. DIMENZIONISANJE SKLADIŠTA I SIMULACIJA KOGENERACIJE ELEKTRIČNE I TOPLOTNE ENERGIJE

Za proračun potrebne zapreminu jamskog toplotnog skladišta potrebno je poznavati, pored vremenskog dijagrama viškova električne energije i vremenski dijagram toplotnog konzuma koji će koristiti energiju iz toplotnog skladišta. U ovoj analizi pretpostavljeno je da će toplotno skladište eksploatisati stanovnici sela Dolovo u čijem ataru se planira izgradnja VE BA. U naselju Dolovo ima 2119 domaćinstava, a prosečan broj članova po domaćinstvu je 3,23. Pretpostavljeno je da domaćinstva koriste toplu vodu za grejanje stambenih objekata i za grejanje sanitarne tople vode u bojlerima. Potrošnja tople vode je pretpostavljena na osnovu istraživanja koja su predstavljena u literaturi [10,12]. Na Sl. 4 je prikazan vremenski dijagram toplotnog konzuma sa satnom i dnevnom rezolucijom. Godišnje potrebe toplotnog konzuma iznose oko 18,8 GWh.

Osnovni kriterijum za proračun kapaciteta sezonskog toplotnog skladišta je da ono može apsorbovati celokupne viškove električne energije od vetroelektrane, a da pri tom prosečna temperatura vode u njemu ne pređe 70°C. Na osnovu

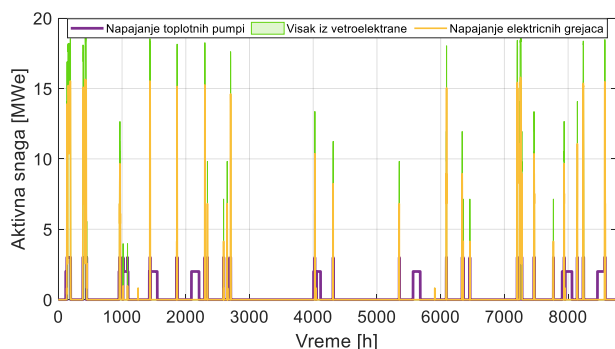


Slika 4. Vremenski dijagram potreba za toplotnom energijom konzuma

ove pretpostavke proračunat je potreban zapremenski kapacitet jamskog toplotnog skladišta i on iznosi 40000 m³, što je ekvivalentan energetska kapacitet od oko 930 MWh.

Potreban kapacitet kratkoročnog toplotnog skladišta određuje dozvoljena varijacija temperature vode kojom se napaja konzum, što za predloženo rešenje iznosi 1500 m³. Instalirana električna snaga toplotnih pumpi koje vrše transfer energije iz jamskog u kratkoročno toplotno skladište zavisi od vršne potrošnje toplotnog konzuma, i za predloženi model iznosi 2,4 MWe (3 pumpe od po 0,8 MWe). Optimalan odnos instalirane snage otporničkih grejača i toplotnih pumpi za grejanje sezonskog toplotnog skladišta rezultat je ekonomske optimizacije. Usvojena je instalirana snaga grejača od 15 MW, a toplotnih pumpi od 3 MWe (3 pumpe od po 1 MWe).

Dijagram utrošenih viškova električne energije iz vetroelektrane prikazan je na Sl. 5. Za razliku od otporničkih

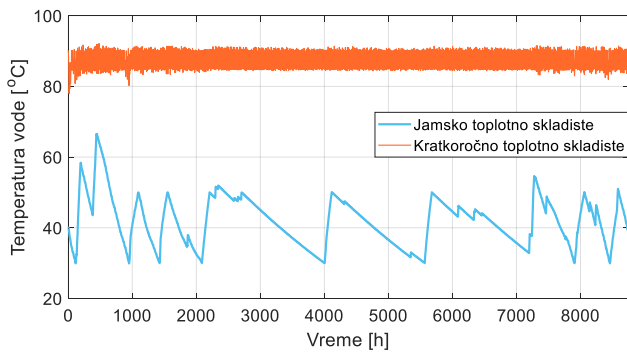


Slika 5. Viškovi električne energije iz VE BA i dijagrami rada toplotnih pumpi i grejača u sezonskom toplotnom skladištu

grejača, toplotne pumpe se napajaju i iz lokalne distributivne mreže, u periodima kada nema viškova energije iz vetra.

Na Sl. 6. prikazana je promena temperature vode u sezonskom i kratkotočnom toplotnom skladištu. U periodima vršne potrošnje konzuma, temperatura u bafer skladištu povremeno ispada iz referentnog opsega za najviše 6°C. Dijagram temperature vode u sezonskom skladištu prati histerezijsno upravljanje tokom većeg dela godine, osim u periodima viškova električne energije iz vetroelektrane.

U tabeli IV dat je pregled godišnjih energetskih pokazatelja analiziranog rešenja VE BA i integrisanog sistema za grejanje naselja Dolovo. Ekvivalentni COP celog sistema dobija se kao odnos konzuma predate toplotne i uložene električne energije, i iznosi 1,7. Toplotni gubici su 5,3% od ukupnog toplotnog konzuma, što je značajno niže u odnosu na rešenja toplotnih skladišta sa solarnim kolektorima. Osnovni razlozi za to su bolja sezonska usklađenost dijagrama proizvodnje vetroelektrane i toplotnog konzuma, kao i to što se ima dvostepeno skladištenje toplote.



Slika 6. Temperatura vode u sezonskom i kratkotočnom toplotnom skladištu

TABELA IV. PREGLED GODIŠNJIH ENERGETSKIH POKAZATELJA OD INTERESA

El. energija utrošena na rad toplotnih pumpe za zagrevanje vode u sezonskom skladištu	2,63 GWhe
El. energija utrošena na rad toplotnih pumpe za zagrevanje vode u kratkoročnom skladištu	5,34 GWhe
El. energija utrošena na rad električnih grejača	3,16 GWhe
Ukupno utrošena električna energija	11,13 GWhe
Preuzeta električna energija iz distributivne mreže	7,01 GWhe
Gubici usled odvođenja toplote u sezonskom skladištu	0.95 GWth
Gubici usled odvođenja toplote u kratkoročnom skladištu	0.1 GWth
Potrošnja toplotnog konzuma	18,83 GWth
Sezonska efikasnost skladišta	94,7 %

VI. ANALIZA USLOVA EKONOMSKE OPRAVDANOSTI VETROELEKTRANE SA TOPLOTNIM SKLADIŠTEM

Kao reprezentativan finansijski pokazatelj predloženog rešenja, koristi se ekvivalentni trošak proizvedene toplotne energije, (eng. *Levelized Cost of Heat*), koji je definisan izrazom 6.1.

$$LCOH = \frac{\Delta C_{WPP} + C_{TES} + \sum_{i=1}^n \frac{(T_{el, god} + T_{O\&M, god} - \Delta P_{el, god})}{(1+i)^n}}{\sum_{i=1}^n \frac{W_{god}}{(1+i)^n}} \quad (6.1)$$

gde su: ΔC_{WPP} - troškovi investiranja u vetroaggregate veće snage,

C_{TES} - investicioni troškovi toplotnog skladišta koji uključuju investiciju u: toplotne pumpe, otporničke grejače, izgradnje sezonskog i kratkoročnog skladišta,

$T_{el, god}$ - godišnji troškovi preuzimanje el. energije iz distributivne mreže za potrebe rada toplotnih pumpi i grejača,

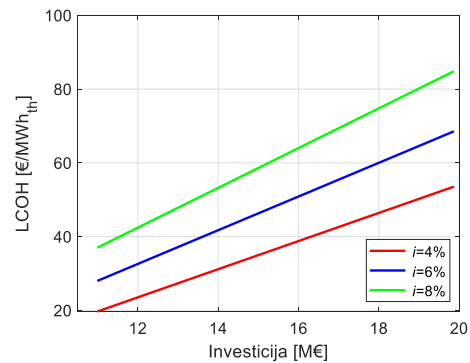
$T_{O\&M, god}$ - godišnji troškovi održavanja sistema za grejanje,

$\Delta P_{el, god}$ - prihod ostvaren prodajom el. energije koja se dobija na osnovu povećanja instalisane snage VE,

W_{god} - godišnji toplotni konzum,

n - eksploatacioni vek projekta,

i - stopa aktualizacije.



Slika 7. LCOH za različite vrednosti investicije i stope aktualizacije

Pokazatelj *LCOH* daje procenu koliki je, gledano iz ugla Investitora, ekvivalentni trošak proizvodnje 1 MWh toplotne energije. Ako bi se zanemario trošak distribuiranja toplotne energije, onda ova vrednost predstavlja i minimalnu prodajnu cenu toplotne energije koja se isporučuje krajnjim potrošačima za koju Investitor ne bi imao ni gubitak ni zaradu. Iz ugla krajnjih korisnika, ova vrednost se može smatrati merodavnom za poređenje sa troškovima alternativnih metoda obezbeđivanja toplotne energije [14]. Ulazni podaci za proračun preuzeti su iz relevantne literature [15-17] i na osnovu informacija dobijenih od konsultanata sa iskustvom u datim oblastima.

Pokazuje se da na vrednost *LCOH* dominantno utiče trošak investicije, dok je aktualizovani godišnji novčani ekvivalent (poslednji član brojica u izrazu za *LCOH*) za dva reda veličine manji. Za rešenje sistema za daljinsko grejanje koje je predloženo u prethodnim poglavljima, proračunata je vrednost *LCOH* pokazatelja za opseg vrednosti investicije i različite stope aktualizacije, rezultati su prikazani na Sl. 7.

Može se videti da se procenjena *LCOH* kreće u opsegu od 20-85 €/MWh. Usvojanje gornje granične vrednosti kao reprezentativne je opravdano jer u analizu nije uključen trošak gubitaka kroz toplotovod do krajnjih korisnika. Kako se godišnja potrošnja toplotne energije za prosečno domaćinstvo u Dolovu

procenjuje na oko 9 MWh, što bi značilo da bi trošak snabdevanja toplotnom energijom iz predloženog sistema bio najviše 700-800 €/god po prosečnom domaćinstvu. Osim, toga, sprovedena analiza je pokazala da se na godišnjem nivou očekuje pozitivan finansijski bilans, odnosno da će procenjeni prihod ostvaren prodajom dodatne el. energije (1,1 M€) biti veći nego troškovi održavanja sistema za grejanje (0,1 M€) i troška preuzimanja el. energije iz mreže (0,7 M€).

VII. ZAKLJUČAK

Predloženi koncept hibridne VE sa toplotnim skladištem predstavlja integrisanje elektroenergetskog i termoenergetskog sektora koji suštinski može unaprediti fleksibilnost elektroenergetskog sistema, sa jedne strane, uz dobijanje toplotne energije iz OIE, sa druge. U analiziranoj hibridnoj vetroelektrani BA pokazalo se da bi instalacijom vetroagregata V162-7.2 umesto V162-6.2 bili ostvareni viškovi el. energije na godišnjem nivou od oko 4,12 GWh, što je oko 1,2% ukupne očekivane godišnje proizvodnje analizirane VE, dok bi se plasman el. energije u EES povećao za 12,1 GWh, što je za oko 3,7% veća proizvodnja u odnosu na rešenje sa vetroagregatima V162-6.2. Viškovi el. energije bi obezbedili preko 8 GWh toplotne energije koja bi se skladištila u jamskom toplotnom skladištu zapremine 40000 m³. Ovo toplotno skladište bi obezbeđivalo toplotnu energiju za grejanje i sanitarnu toplu vodu za oko 2100 domaćinstava u naselju Dolovo. Osim toga, godišnji neto bilans energije vetroelektrane veće instalisane snage je veći za 5,2 GWh, čak i uz preuzimanje energije za potrebe rada sistema za daljinsko grejanje.

Ekonomska analiza je pokazala da je očekivani opseg *LCOH* 20-85 €/MWh, pri čemu nisu uračunati benefiti koje bi VE imala zbog smanjene potrebe za balansnom rezervom. Uzevši u obzir da prosečno domaćinstvo na godišnjem nivou potrošnja toplotne energije košta 1000-1500 €, predloženi koncept bi omogućio značajno smanjenje ovog troška za krajnje korisnike. U ekološkom smislu, glavna prednost predloženog rešenja se ogleda u prelasku domaćinstava sa malih ložišta na sistem daljinskog grejanja iz OIE, čime bi se unapredio lokalni kvalitet vazduha i smanjila seča šuma. Dodatna proizvedena el. energija rezultuje i smanjenjem proizvodnje elektrana na fosilna goriva, samim tim i emisije gasova staklene bašte. Toplotno skladište predstavlja i sistem rezervnog plasmana energije za VE, tako da u slučaju da elektrana ne plasira energiju na tržište, ona može deo ili svu energiju plasirati skladištu, ali bi ga, u tom slučaju, trebalo dimenzionisati da može da prihvati i ovakve viškove energije.

LITERATURA

- [1] Ž. Đurišić, M. Zindović, Uslovi razvoja projekta perspektivne vetroelektrane u južnobanatskom regionu, Energetičar, Izdavač: Savez energetičara Republike Srpske, br. XIV, 2009. str. 9 -18.
- [2] Xiang, Y., Xie, Z., Furbo, S., Wang, D., Gao, M & Fan, J 2022, 'A comprehensive review on pit thermal energy storage: Technical elements, numerical approaches and recent applications', Journal of Energy Storage, vol. 55, 105716, pp. 1-30.
- [3] F. Mauthner, S. Herkel, in: Technology and Demonstrators - Technical Report Subtask C - Part C1, 2016.
- [4] AndersenJD, BødkerL, JensenMV. Large thermal energy storage at Marstal district heating. In: Proceeding of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, (2013).

- [5] C. Chang, B. Nie, G. Leng, C. Li, X. She, X. Peng, et al., Influences of the key characteristic parameters on the thermal performance of a water pit seasonal thermal storage, Energy Procedia 142 (2017) 495–500.
- [6] F. Ochs, J. Nußbicker, R. Marx, H. Koch, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen, Solar assisted district heating system with seasonal thermal energy storage in Eggenstein-Leopoldshafen, EuroSun, Lisboa, 2008.
- [7] Siemens Energy, Tehnička brošura: 1x SHP-C600 Heat Pump SCOPE OF SUPPLY "Standard configuration", Document No. VP1205372E
- [8] Ž. Đurišić, J. Mikulović, Assessment of the Wind Energy Resource in the South Banat Region, Serbia, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 16 (2012), pp. 3014-3023, (ISSN 1364-0321)
- [9] A. Đorđević, Ž. Đurišić, General mathematical model for the calculation of economic cross sections of cables for wind farms collector systems, IET Renewable Power Generation, 12 (2018), doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0420, pp.901-909, (ISSN 1752-1416) IF 3.605.
- [10] Đ. Lazović, M. Aščerić, M. Mićović, M. Stojanović, Ž. Đurišić, Uslovi razvoja hibridne energetske mikromreže u regionu Južnog Banata primenom obnovljivih izvora energije i skladištenja toplote i biogasa, XXII Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, pp. 92 - 97, Jahorina, Mart, 2023
- [11] Tosatto, Alice, Abdulrahman Dahash, and Fabian Ochs. "Simulation-based performance evaluation of large-scale thermal energy storage coupled with heat pump in district heating systems." Journal of Energy Storage 61 (2023): 106721.
- [12] Ž. Đurišić, D. Kotur, N. Šijaković, A. Sretenović, Hibridni solarnoelektrični sistemi za unapređenje energetske efikasnosti u pripremi i korišćenju sanitarne tople vode u domaćinstvima, INFOTEH-JAHORINA, mart 2018.
- [13] Jesper, Mateo, et al. "Large-scale heat pumps: Uptake and performance modelling of market-available devices." Renewable and Sustainable Energy Reviews 137 (2021): 110646.
- [14] Fallahnejad, Mostafa, et al. "The economic potential of district heating under climate neutrality: The case of Austria." Energy 259 (2022).
- [15] GROSSE, Robert, et al. "Long term projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU." (2017).
- [16] Tian, Zhiyong, et al. "Large-scale solar district heating plants in Danish smart thermal grid: Developments and recent trends." Energy conversion and management 189 (2019).
- [17] Soysal, Emilie Rosenlund, et al. "Electric boilers in district heating systems: a comparative study of the Scandinavian market conditions." Swedish Association for Energy Economics Conference 2016. (2016).

ABSTRACT

The paper presents a model of hybrid wind power plant (WPP) with thermal storage for exploiting more electricity under strong wind conditions. Proposed system was demonstrated on WPP Bela Anta, which consists of 20 wind turbines. The approved power in point of connection (PoC) is 120,8 MW. For WPP realized with 20 wind turbines V162-7.2, the excess electricity which cannot be injected to the grid, would be about 4,12 GWh/year, which is about 1,2% of total expected annual yield, while electricity injected into the grid would increase by 12,1 GWh, which is about 3,7% higher production compared to the WPP with V162-6.2. This approach ensures better utilization of wind energy, and local generation of thermal energy for households in Dolovo, which reduces the use of individual fireplaces and improves air quality during the winter. It is shown that this approach can improve the WPP flexibility and provide better economic parameters compared to traditional one of choosing wind turbine in accordance with approved power in PoC.

WIND POWER PLANT WITH INTEGRATED THERMAL ENERGY STORAGE

Kristina Džodić, Đorđe Lazović, Milica Aščerić, Željko Đurišić