

ELEKTRIČNI HRANILNIKI ENERGIJE IN TRENUTNO STANJE ELEKTRIČNIH HRANILNIKOV V NEMČIJI

Primož SUKIČ, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

V zadnjem letu se je začela nova doba investicij v obnovljive vire. Zaradi tehničnih potreb po shranjevanju energije in regulaciji omrežja ter zaradi subvencij so se v Nemčiji začeli graditi hranilniki energije za osebno uporabo ter v komercialne namene. Trenutno imajo hranilniki energije na bazi litijevih celic izkoristek ~ 86 % , cene na instalirano moč pa se gibljejo ~1 €/W/Wh in se še nižajo. Pričakuje se, da bo leto 2016 prelomno za električne hranilnike energije, saj se predvideva, da bi naj takrat v Nemčiji cena električne energije iz sončne elektrarne in hranilnika, skupaj s subvencijo, dosegla ceno električne energije iz električnega omrežja. V prispevku je prikazano trenutno tehnično in ekonomsko stanje hranilnikov energije za različne potrebe.

ABSTRACT

New era of investment in renewables began in the last year. Due to technical needs for energy storage and network regulation, as well as government grants, Germany began developing energy storage systems for personal use and commercial purposes. Current battery storage systems based on lithium cells have efficiency of ~ 86%, with price per unit of installed power capacity ~1 €/W/Wh, and dropping. Year 2016 is expected to be a landmark year for electrical energy storage systems, as it is assumed that prices of electricity from solar power and energy storage system (with grant included) will reach the price of electricity from the electric grid. This paper presents current technical and economic state of energy storage systems for various needs.

1. UVOD

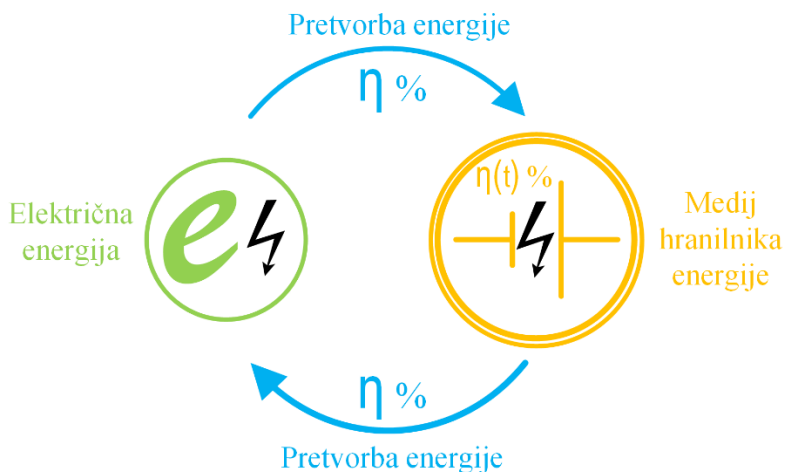
Z večanjem števila obnovljivih virov v omrežju, kot so sončne elektrarne in vetrne elektrarne, so se začele pojavljati težave z vzdrževanjem napetostnega profila in frekvence. Prav tako se vsakodnevno dogaja, da prihaja do presežkov v proizvedeni električni moči in tudi do pomanjkanja električne moči. Hranilniki električne energije lahko pomagajo premostiti te težave in pozitivno vplivajo na električno omrežje. Pri hipnih spremembah proizvodnje električne energije, kot jo poznamo pri vetrnih in sončnih elektrarnah, lahko s hranilniki električne energije gladimo moč s katero oddajamo. Z električnimi hranilniki energije lahko tudi časovno prestavimo oddajanje proizvedene električne energije v električno

omrežje na čas, ko obstaja večja potreba po električni energiji in ko so tudi prodajne cene električne energije višje.

V zadnjih letih je tehnologija hranilnikov električne energije zelo napredovala, prav tako so se cene nekaterih električnih hranilnikov energije zelo znižale. Ker se cene nekaterih električnih hranilnikov energije še vedno nižajo je v prihodnjih letih pričakovati porast postavitev električnih hranilnikov energije.

2. ELEKTRIČNI HRANILNIK ENERGIJE

Električni hranilniki energije so naprave, ki pretvarjajo električno energijo v drugo obliko energije, jo shranijo in nato pretvorijo nazaj v električno energijo. Medij hranilnika energije je lahko različnih vrst, zato se glede na tip medija lahko energijo shrani v mehansko, potencialno, kinetično, kemično, toplotno in magnetno obliko energije. Pri pretvorbi električne energije v neko drugo obliko energije in nato nazaj v električno energijo, nastanejo izgube, kot kaže slika 1. Kakšnega reda so izgube, je odvisno od tehnologije in procesa pretvorbe. Različne vrste električnih hranilnikov energije imajo različno časovno zmožnost shranjevanja energije, saj ima večina hranilnikov energije tako imenovano samo-praznjenje. To je tudi razlog, da pri teh hranilnikih energije na izkoristek procesa vpliva še časovna komponenta, koliko časa je bila energija shranjena [1] [2].



Slika 1: Električni hranilnik energije

Zato je za izkoristek sistema hranilnika pomemben celoten cikel procesa, obe energijski pretvorbi in izgube pri shranjevanju, kar se v angleškem jeziku imenuje RTE (Round Trip Efficiency). Ker se električni hranilniki uporabljajo za različne namene imajo tudi različno pomembne parametre, kot so moč [kW], kapaciteta shranjene energije [kWh], izkoristek RTE [%], lastnosti polnjenja in praznjenja, cena investicije na enoto moči [€/kW], cena investicije na enoti shranjene energije [€/kWh], obratovalni strošek enote odvzete energije iz hranilnika [€/kWh] in obremenitev okolja [1].

3. PREDNOSTI ELEKTRIČNIH HRANILNIKOV ENERGIJE

Električne hranilnike energije uporabljamo v različne namene, da bi z njimi pridobili neko tehnično ali ekonomsko korist. V nadaljevanju bodo na kratko predstavljene tehnične in ekonomske prednosti, ki jih lahko pridobimo z električnimi hranilniki energije [1] [3].

- **Časovna premaknitev (Time-shifting)**

Električni hranilniki energije omogočajo, da lahko proizvedeno ali shranjeno električno energijo porabimo ali oddamo v električno omrežje ob drugem času, kot se jo je proizvedlo.

Sončne elektrarne večino energije proizvedejo čez dan, ko je večina ljudi v službah. Z električnimi hranilniki energije se lahko to proizvedeno energijo shrani in se jo porablja popoldan in zvečer, ko jo porabnik potrebuje in ko ni dovoljše proizvodnje električne energije s sončnimi elektrarnami. Prav tako lahko električno energijo, ki jo ponoči proizvedejo vetrne elektrarne, z električnimi hranilniki shranimo in to energijo uporabimo čez dan.

Časovna premaknitev omogoča tudi doseganje boljših prodajnih cen električne energije na način, da se električno energijo oddaja v omrežje ob dnevnih konicah, ko je cena električne energije najvišja.

Veliki porabniki, kot so tovarne, ki kupujejo električno energijo na borzi, se ob dnevnih konicah lahko izognejo najvišjim cenam električne energije, če imajo nameščene hranilnike energije.

- **Zasilno otočno obratovanje**

Električni hranilniki energije lahko omogočajo napajanje objektov ali delov omrežja. V primeru izpada oskrbe z električno energijo iz omrežja se lahko nekaj časa zagotovi otočno napaja iz električnih hranilnikov energije. Potrebno je le izbrati takšen električni hranilnik energije, ki je sposoben odreagirati v zelo kratkem času. Ta funkcionalnost je lahko kompatibilna z ostalimi funkcionalnostmi, ki jih zahtevamo od hranilnika električne energije, le sistem je potrebno ustrezno dimenzionirati.

- **Otočno obratovanje**

Če se želi z obnovljivimi viri energije doseči samozadostnost oskrbe z električno energijo, da je lahko uporabnik ali del omrežja popolnoma neodvisen od zunanjega omrežja, je potrebno vključiti električne hranilnike energije. Večina obnovljivih virov ne more proizvodnje električne energije zmeraj prilagajati trenutni porabi. Kadar ni sonca, vetra ali drugega obnovljivega vira energije, proizvodnji viri ne morejo zagotavljati popolnoma enake količine električne energije, kot bi jo porabniki potrebovali. Zato je nujno vključiti hranilnik električne energije, ki viške v proizvodnji električne energije shranjuje in jih uporablja, ko proizvodnja ne more zadostiti porabi.

- **Stabilizacija frekvence omrežja**

Obnovljivi viri energije, kot sta veter in sonce, s svojim načinom obratovanja povzročata motnje v omrežje. Kadar pride oblak nad veliko sončno elektrarno, se v zelo kratkem času bistveno zniža proizvodnja električne energije. Podobno se dogaja tudi pri vetrnih elektrarnah, kadar se za trenutek bistveno zniža moč vetra, ali še huje, zaradi prevelike proizvodnje ali hitrosti vetra, zaščita izklopi vetrno elektrarno. Tako velikim spremembam v proizvodnji električne energije se klasične elektrarne z generatorji ne morejo dovolj hitro prilagoditi, da bi nadomestili nastalo razliko. Posledica tega je sprememba frekvence omrežja.

Električni hranilniki energije, ki so narejeni za regulacijo frekvence, imajo sposobnost odzivanja v zelo kratkem času ob spremembi frekvence.

- **Stabilizacija napetosti**

Kadar je napetost zaradi velike porabe v nekem delu omrežja prenizka, lahko električni hranilniki energije oddajajo električno energijo v ta del omrežja in s tem dvigujejo napetost. Kadar je napetost znotraj določenih mej, na primer ponoči, se hranilnik električne energije počasi polni. V trenutkih, ko pa je napetost prenizka, pa shranjeno energijo oddaja v omrežje.

Lahko deluje tudi obratno, če je zaradi obnovljivih virov napetost občasno previsoka se lahko hranilnik energije takrat polni in služi kot dodatno breme in s tem niža napetost v točki priključitve, ter ob najboljših tehničnih ali ekonomskih razmerah to energijo vrne v omrežje.

- **Večja gostota obnovljivih virov**

Vetrne in sončne elektrarne s svojim delovanjem trenutno tudi negativno vplivajo na napetostni profil. Pri povečani proizvodnji električne energije se lahko v delih omrežja, ki niso ustrezno dimenzionirani, napetost poviša. Ta vrednost napetosti lahko tudi preseže dovoljene meje, zato v takih delih omrežja posplošeno rečeno ni mogoče namestiti dodatnih večjih razpršenih virov. Če se v takšen del omrežja namesti električni hranilnik energije, se lahko takrat hranilnik polni in s tem znižuje napetost v omrežju, da le-ta ni presežena. S tem se omogoča večja koncentracija obnovljivih virov v nekem delu omrežja, saj električni hranilnik energije uspešno rešuje težavo s trenutnimi presežki energije in s tem povezanimi težavami.

- **Glajenje izhodne moči obnovljivih virov**

Vetrne in sončne elektrarne zaradi svojega načina delovanja zelo pogosto v kratkem času spreminjajo izhodno moč. Kadar pride oblak nad sončno elektrarno, ali se zelo zniža moč vetra, se izhodna moč elektrarne v zelo kratkem času bistveno zmanjša. Prav tako se zgodi hitra sprememba v obratnem primeru, ko močnejše zapiha veter, ali se oblak umakne, se v zelo kratkem času poveča izhodna moč vetrne ali sončne

elektrarne. Takšna nenadna nihanja za omrežje niso ugodna, saj negativno vplivajo na napetostni profil in prav tako otežujejo napovedovanje proizvodnje.

Hranilniki imajo sposobnost glajenja takšnih hitrih sprememb v izhodni moči obnovljivih virov. Kadar pride do nenadnega zmanjšanja proizvodnje električne energije, začne hranilnik električne energije takoj oddajati električno energijo s takšno močjo, da se ne opazi nenadne spremembe proizvodnje električne energije. Nato začne postopoma po določeni funkciji zmanjševati oddano moč. Podobno deluje tudi v obratni smeri, kadar pride do nenadnega povečanja proizvodnje električne energije, se hranilnik električne energije, z razliko povečanja moči, polni in nato postopoma zmanjšuje polnjenje hranilnika, kar se navzven odraža kot počasna sprememba.

- **Ojačitev dela omrežja**

V delih omrežja, kjer je poraba električne energije dosegla ali preseгла začetno dimenzioniranje distribucijskega omrežja, se lahko pojavljajo težave ob konični porabi električne energije. Takrat se lahko napetost preveč sesede. Ena izmed možnih rešitev predstavlja ojačitev omrežja z močnejšim transformatorjem in vodniki večjega prereza, ki se lahko izkaže za precej drago. Druga možnost je namestitev električnega hranilnika energije. Glede na to, da traja na dnevni ravni konica zgolj uro ali dve, v tem času lahko manko električne energije zagotavlja električni hranilnik energije, ki je lahko precej cenejši od menjave transformatorja in vodov.

4. VRSTE ELEKTRIČNIH HRANILNIKOV ENERGIJE

Obstajajo različne vrste električnih hranilnikov energije, ki se v osnovi razlikujejo glede na tehnologijo in na namembnost. Različni električni hranilniki energije imajo različne cene investicije na instalirano moč in kapaciteto hranilnika, prav tako pa imajo tudi različne izkoristke celotnega procesa. V tem poglavju bodo na kratko opisane glavne značilnosti različnih električnih hranilnikov energije [1] [3].

- **Črpalne hidro elektrarne**

Črpalna hidro elektrarna črpa vodo iz spodnjega bazena na višje ležeč bazen, nato se vodo spušča na vodno turbino, na katero je vezan generator, ki proizvaja električno energijo. Tehnologija turbine in generatorja je enaka ostalim vodnim elektrarnam z velikim padcem.

Sistemi so lahko velikih moči in velikih energijskih kapacitet. Trenutno je v svetu 99 % vseh električnih hranilnikov energije prav črpalnih hidroelektrarn.

Gradnja črpalne hidroelektrarne je mogoča samo tam, kjer se lahko postavi dva dovolj velika bazena na dovolj veliki višinski razliki, kar pomeni, da je potrebno hribovito področje. Prav tako pa predstavlja velik poseg v okolje.

- **Hranilnik energije na stisnjen zrak**

Je sestavljen iz kompresorja, ki stiska zrak in ga shranjuje v rezervoar. Stisnjen zrak se nato spušča na visokotlačne turbine. Preden se ga spusti na turbine se ga ponavadi ogreje.

Večinoma je stisnjen zrak pri velikih sistemih shranjen pod zemljo v podzemnih jamah naravnega ali umetnega izvora kot so stari rudniki in vrtine kjer se je pridobival zemeljski plin. Pri manjših sistemih se stisnjen zrak shrani v cevi, z enako tehnologijo kot se jih uporablja za prenos stisnjenega zemeljskega plina. Takšne cevi so ponavadi zložene pod zemljo.

Težava hranilnikov energije na stisnjen zrak je segrevanje zraka ob stiskanju zraka in ohlajanje ob vstopu na turbino, kar znižuje izkoristek sistema. Če toploto, ki nastane ob stiskanju zraka shranimo in z njo segrejemo zrak pred vstopom na turbino se lahko doseže izkoristek sistema 60 – 70 %. Če se omenjene toplote ne shrani je izkoristek celotnega sistema še precej nižji ~40 %.

- **Hranilnik energije z vztrajnikom**

Električni hranilnik energije z vztrajnikom je sestavljen iz vztrajnika, magnetnih ležajev, motorja/generatorja in vakuumske komore. Sistem deluje na način da motor pospešuje vztrajnik in z višanjem hitrosti se zvišuje shranjena energija. To shranjeno energijo se vrne, ko motor preide v generatorski režim in začne odjemati kinetično energijo, ki je shranjena v vztrajniku.

Najsodobnejši sistemi lahko dosegajo precej dobre izkoristke celotnega procesa, ki so lahko viši od 90 % in ima tudi hitro odzivnost sistema (~ 4 ms) a s to pomanjkljivostjo, da ima vztrajnik precejšnje samo-praznjenje, zato se ga uporablja v aplikacijah, kjer je bistven kratek interval polnjenja in praznjenja, na primer za glajenje hitrih sprememb pri oddani moči obnovljivih virov in pri stabilizaciji frekvence, kjer je potrebno imeti v kratkem času veliko razpoložljivo moč. Sistem električnega hranilnika energije z vztrajnikom ima dolgo življenjsko dobo.

- **Elektrokemični baterijski hranilniki energije**

Elektrokemični baterijski hranilniki energije so sestavljeni iz dveh elektrod (anode in katode) ter elektrolita. Kemijska reakcija med elektrodama in elektrolitom povzroči gibanje elektronov, kar predstavlja električni tok.

Obstajajo različne kemične sestave kemičnih hranilnikov energije. Najbolj znani so svinčeni, nikelj-kadmij (NiCad), litij-ionski (Li-ion), Cink-Brom (Zn/Br), vandanijski redox, nikelj-železove (Ni-MH) in drugi.

V zadnjem obdobju so selo napredovale baterije na osnovi litija. Temu je zelo pripomogel razvoj baterij za pametne telefone in električne avtomobile.

Baterijski hranilniki energije so lahko vseh moči od malih reda nekaj kW do 500 MW ali več saj se jih preprosto skupaj sestavlja. Večina baterijskih hranilnikov energije ima kratek reakcijski čas.

- **Super kondenzatorji**

Super kondenzatorji so sposobni shraniti precej več energije kot klasični kondenzatorji a še zmeraj ohranjajo lastnost veliko tokovno moč in zelo hitro odzivnost. Zato se super kondenzatorje uporablja tam, kjer je potrebna velika moč v zelo kratkem času na primer za glajenje hitrih sprememb pri oddani moči obnovljivih virov in pri stabilizaciji frekvence.

Super kondenzatorji dosegajo zelo dobre izkoristke celotnega procesa vse do ~95 %

- **Električni hranilniki energije na vodik**

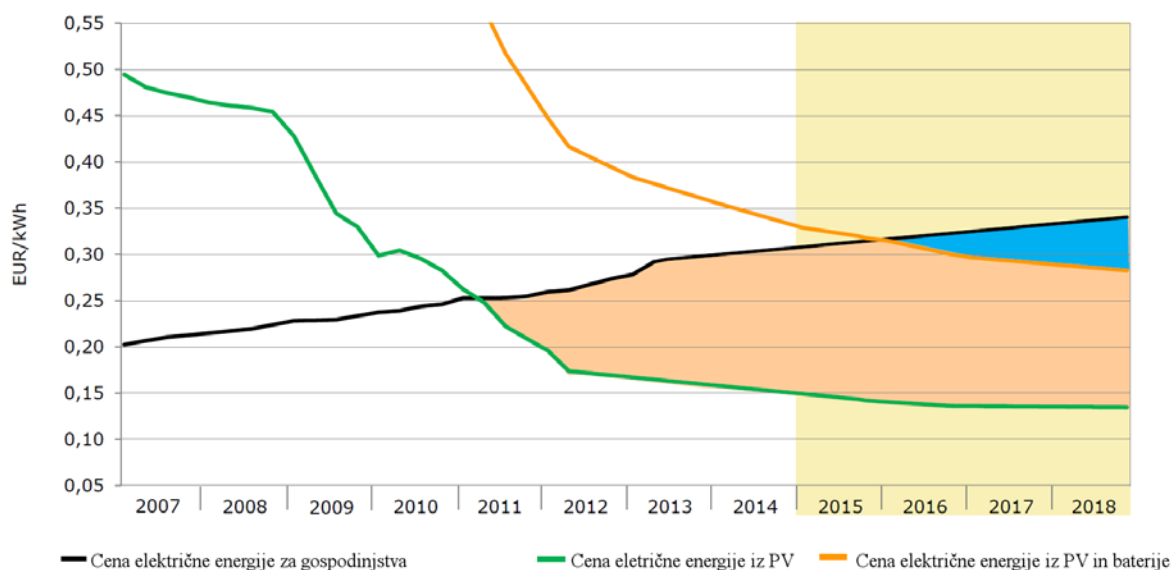
Z elektrolizo se loči molekulo vode na vodik in kisik, ki se ju shrani v ločenih hranilnikih. Nato se s pomočjo gorivne celice kemična energija vodika in kisika pretvori v električno energijo.

Električni hranilniki na vodik imajo dokaj slab izkoristek celotnega sistema ~45 % in imajo dolgi odzivni čas (nekaj sekund). Sistemi električnih hranilnikov energije so lahko vseh velikostnih razredov.

5. TRENUTNO STANJE ELEKTRIČNIH HRANILNIKOV ENERGIJE V NEMČIJI

Nemčija je ena izmed vodilnih držav v svetu na področju uporabe obnovljivih virov energije. Trenutno proizvedejo z obnovljivimi viri energije kar 30 % vse proizvedene električne energije in imajo načrt, da do leta 2050 proizvedejo z obnovljivimi viri kar 80 % vse električne energije. Da jim bi to lahko uspelo, bodo električni hranilniki energije dobili zelo pomembno vlogo [4].

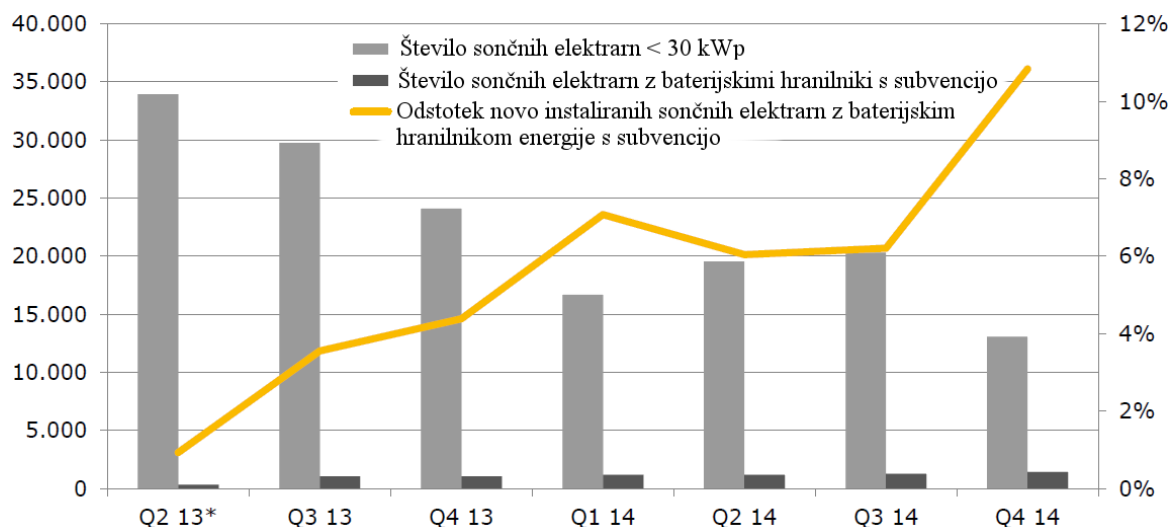
Trenutno je v Nemčiji že instaliranih med 15.000 in 16.000 baterijskih hranilnikov energije, ki so povezani s sončnimi elektrarnami za gospodinjstvo in komercialno uporabo. Zaradi nižanja cen baterijskih hranilnikov energije se v letu 2016 predvideva, da bo cena električne energije iz sončne elektrarne v kombinaciji z baterijskim hranilnikom energije nižja od električne energije iz omrežja, kot kaže slika 2. Zato se pričakuje bistveno povečanje investicij v baterijske hranilnike energije. [5].



Slika 2: Časovno gibanje cen električne energije iz omrežja, sončne elektrarne in kombinacije sončne elektrarne z baterijskim hranilnikom energije [4].

Slika 2 kaže časovni potek cen električne energije v Nemčiji za gospodinjstva (Črna) v primerjavi z ceno električne energije iz sončne elektrarne s subvencijo (zelena) ter kombinacije sončne elektrarne z baterijskim hranilnikom energije s subvencijo (oranžna). Za izračun stroška baterijskega hranilnika energije je bil vzet litij-ionski baterijski hranilnik energije s 87 % izkoristkom celotnega procesa in življenjsko dobo 5000 ciklov (najnovejši litij-ionski baterijski hranilniki energije dosegajo tudi do 12 000 ciklov) [4].

Slika 3 kaže koliko sončnih elektrarn in sončnih elektrarn z baterijskim hranilnikom energije se je v letu 2013-14 instaliralo. Graf kaže, da se zmeraj manj postavlja samo sončnih elektrarn in zmeraj več sončnih elektrarn v kombinaciji z baterijskimi hranilniki energije. Na koncu leta 2014 je že ~11 % vseh na novo instaliranih sončnih elektrarn imelo tudi instaliran baterijski hranilnik energije. Do leta 2018 se v Nemčiji pričakuje 100 000 instaliranih sistemov električnih hranilnikov energije [4] [5].



Slika 3: Časovna postavitev sončnih elektrarn in sončnih elektrarn z baterijskim hranilnikom [4]

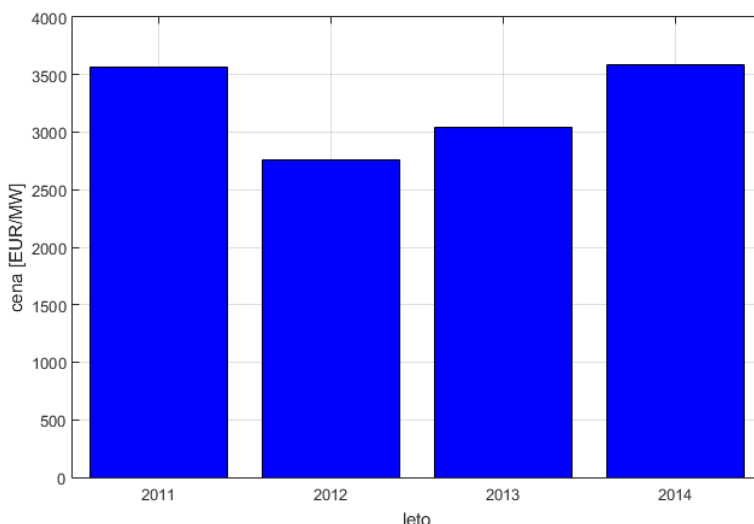
Za pospeševanje zanimanja za električne hranilnike energije zagotavlja Nemčija finančno podporo preko državne banke KfW in enako poimenovanega programa. KfW program finančno s subvencijami in nepovratnimi sredstvi spodbuja postavitev električnih hranilnikov energije kot posamezno enoto ali v kombinaciji s sončnimi elektrarnami. Velikost finančne vzpodbude je odvisna od velikosti sistema in cene električnega hranilnika energije. Maksimalna višina nepovratnih sredstev je 50 % cene investicije.

Da bo lahko Nemčija do leta 2050 dosegla 80 % proizvodnjo električne energije iz obnovljivih virov imajo namen sezonsko shranjevati električno energijo. Poleti ko so presežki v proizvedeni energiji bi te shranjevali za zimski čas, ko imajo primanjkljaje v proizvodnji električne energije z obnovljivimi viri. Baterijski hranilniki energije za sezonsko shranjevanje presežkov električne energije niso ustrezni, zato za ta namen pospešeno razvijajo tehnologijo shranjevanja električne energije z vodikom. Tehnologija hranilnikov energije na vodik ima nizko ceno hranjenja energije in visoko gostoto energije na kilogram 120 MJ/kg zato je kot takšen primeren za sezonsko shranjevanje energije. Trenutno je le težava v tem, da je izkoristek celotnega sistema precej nizek ~50 % in tudi investicija celotnega sistema na instalirano moč in kapaciteto je višja od ostalih vrst električnih hranilnikov energije.

5.1 Stabilizacija napetosti in frekvence

Zaradi visokega odstotka obnovljivih virov v Nemčiji imajo precejšnje težave z napetostnim profilom in s stabilnostjo frekvence. Največje težave jim povzročajo vetrna polja na severu države. Frekvenca že dolgo časa ni bila tako nestabilna kot je sedaj. Zato želijo to težavo reševati z električnimi hranilniki energije, ki so sposobni v zelo kratkem času odreagirati in regulirati omrežje.

Cene za primarno in sekundarno regulacijo so v Nemčiji dokaj visoke (Slika 4) zato se ob zniževanju cen električnih hranilnikov energije zdijo ti zmeraj bolj primerni za regulacijo omrežja. Cena investicije se lahko povrne v zelo kratkem času.



Slika 4: Povprečna tedenska cena primarne regulacije na MW v Nemčiji [4]

6. SKLEP

Električni hranilniki energije predstavljajo v bodoče eno izmed vodilnih tehnologij v prihodnjih letih. Zaradi koristi, ki jih lahko pričakujemo od električnih hranilnikov energije se lahko pričakuje intenzivna vlaganja v to tehnologijo. Električni hranilniki energije lahko v veliki meri rešujejo težave, ki jih zaradi hitrih sprememb v proizvodnji povzročajo obnovljivi viri. Prav tako nam omogočajo večjo neodvisnost od električnega omrežja.

Z nižanjem cen električnih hranilnikov energije in finančnim spodbudami, kot so nepovratna sredstva in subvencije, se v Nemčiji zmeraj več investorjev odloči za postavitev električnega hranilnika energije saj so ti vedno bolj rentabilni in poganjajo nemško in svetovno gospodarstvo. Dokler bodo obstajale velike razlike v ceni električne energije na dnevni ravni, se bo dalo z energijo iz električnih hranilnikov energije tudi trgovati in s tem hitreje povrniti investicijo.

7. VIRI

- [1] P. Medina, A. Bizuayehu, J. Catalão, E. Rodrigues in J. Contreras, „Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis,“ v *System Sciences (HICSS)*, 2014 47th Hawaii International Conference, Hawaii , 6-9 Jan. 2014.

- [2] H. Chen, „Progress in electrical energy storage system: A critical review,“ *Progress in Natural Science*, 2009.
- [3] J. Eyer in G. Corey, *Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide*, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550., 2010.
- [4] Tobias Rothacher; Germany Trade & Invest, „The stationary energy storage market in Europe: The drivers behind the boom,“ v *HANNOVER MESSE 2015*, 2015.
- [5] „Germany Trade & Invest,“ April 2015. Available: <http://www.gtai.de>.

NASLOV AVTORJEV

Primož Sukič, mag. inž. el.

primoz.sukic@um.si

red. prof. dr. Štumberger Gorazd, univ. dipl. inž. el.

gorazd.stumberger@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija