

PREGLED SISTEMOV ZA SHRANJEVANJE ENERGIJE

Sebastijan SEME, Andrej ORGULAN, Jože VORŠIČ

POVZETEK

Vse večja potreba po energiji na eni strani in vse večja želja vključevanja enot za razpršeno proizvodnjo iz obnovljivih virov na drugi strani, so vzbudila razvoj sistemov za shranjevanje energije. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih virov, predvsem sončnih in vetrnih, je časovno dokaj neenakomerna in odvisna predvsem od trenutnih razmer ter brez možnosti proizvodnje na zalogo. Zato omenjeni viri zahtevajo ustrezno rezervo v konvencionalnih virih ali ustrezne sisteme za shranjevanje. Tako bo v delu podan pregled tehnologij in naprav za shranjevanje energije, ki v današnjem času največ obetajo.

ABSTRACT

The growing need for energy on the one hand and the growing desire for integrating the units for production from renewable sources, on the other hand, inspired the development of energy storage systems. Electric energy production from renewable sources such as solar and wind, primarily depends on the current conditions and there is no possibility of the production in stock. Therefore, the abovementioned sources require the reserve in conventional sources or appropriate energy storage systems. An overview of the technologies and devices for energy storage systems that are most promising nowadays will be presented in this work.

1. UVOD

Potreba po električni energiji v svetu in tudi pri nas narašča glede na raven in hitrost družbenogospodarskega razvoja. Po eni strani se razpoložljivi viri primarne energije, na osnovi katerih pridobivamo električno energijo, krčijo ali pa so že v veliki meri izkoriščeni. Po drugi strani pa so okoljske zahteve pri izgradnji naprav za proizvodnjo električne energije iz klasičnih virov vedno večje. Onesnaženost atmosfere s škodljivimi plini postaja globalni problem. Zanesljivost oskrbe z električno energijo pa vse resnejše vprašanje za nacionalna gospodarstva.

Za stabilno obratovanje elektroenergetskega sistema (EES) mora proizvodnja električne energije v vsakem trenutku zadostiti porabi. Proizvodnja električne energije se mora, zaradi raznovrstnih porabnikov, kot tudi različnih obratovalnih lastnosti proizvodnih enot, neprestano prilagajati spremenljivi porabi. Tudi ob bolj ali manj konstantni porabi imajo določene proizvodne enote spremenljive lastnosti, tako da se mora proizvodnja neprestano

spreminjat. Kljub zelo dobro razvitim tehnologijam in algoritmom, ki nam omogočajo stabilno obratovanje, se zgodi, da včasih pride do razpada EES. Do razpada sistema pride zaradi porušitve ravnovesja med razpoložljivo in potrebno močjo.

Električne energije namreč ni možno uvažati v neomejenih količinah, zato je visoka stopnja samozadostnosti nujno potrebna. Ena izmed rešitev je seveda boljše izkoriščenje obstoječih virov ter povečanje deleža energije proizvedene iz obnovljivih virov. Sledenji niso vedno na voljo. Razpoložljivost energije proizvedene iz obnovljivih virov pa je mogoče bistveno izboljšati, če obstaja možnost shranjevanja tako proizvedene energije. Torej potrebujemo hranilni sistem za shranjevanje električne energije v EES, ki bi usklajevala različne zmožnosti in potrebe med proizvodno in porabniško stranjo sistema.

Tako je želja po shranjevanju energije v dovolj velikih količinah vse bolj izražena. To je v zadnjih treh desetletjih intenziviralo razvoju na področju shranjevanja energije. Rezultati intenzivnega razvojnega dela so pripeljali do tega, da imamo sedaj na voljo več različnih tehnologij za shranjevanje energije, ki se še danes pojavljajo zgolj v pilotskih projektih. Najbolj obetavne od njih so predstavljene v pregledu sistemov za shranjevanje energije, ki je podan v tem delu.

2. PREGLED SISTEMOV ZA SHRANJEVANJE ENERGIJEJ

Električne energije ne moremo shranjevati v zelo velikih količinah, zato jo za potrebe shranjevanja pretvorimo v kakšno drugo obliko, kot na primer v kemično, mehansko v obliki potenciala, kinetično ali tlačno energijo in podobno. Naprave za shranjevanje energije razvrščamo v različne skupine in sicer glede na tehnologijo pretvorbe električne energije, glede na inštalirano moč, kapaciteto shranjene energije ter možnosti uporabe v elektroenergetskem sistemu. Glede na tehnologijo pretvarjanja, naprave za shranjevanje energije razvrščamo v tri skupine [1] - [4]: mehanske (črpalne hidroelektrarne, plinske turbine s hranilnikom v naprej stisnjenega zraka in vztrajniki), električne (superprevodni hranilniki, super kondenzatorji in ultra kondenzatorji) in elektrokemične (akumulatorji, baterije in pretočni akumulatorji). Pri tem so ključni podatki za primerjavo hranilnikov energije: energijska gostota (glede na maso ali volumen), izkoristek cikla, dovoljeno število ciklov praznjenja in polnjenja, življenjska doba, povratni in odzivni čas, optimalna izhodna moč, optimalna shranjena energija in zahteve postavitve. V nadaljevanju podajamo pregled tehnologij in naprav za shranjevanje energije, ki v današnjem času obetajo največ.

2.1 Črpalne hidroelektrarne

Črpalne hidroelektrarne izkoriščajo potencial vode. Voda se zbira v dveh ločenih zbiralnikih, ki sta postavljena na različnih nadmorskih višinah. Spodnji zbiralnik vode je navadno zajezena reka, zgornji pa umetno zgrajen hranilnik vode [5]. Črpalna hidroelektrarna črpa vodo ob presežkih električne energije v omrežju v zgornji akumulacijski bazen. Potencialna energija vode se potem uporablja za proizvodnjo električne energije v času primanjkljaja električne energije. Prednosti takega načina hranjenja so predvsem v velikih količinah shranjevanja energije, možnost hitrih in velikih sprememb moči in takojšen vklop

postroja. V Sloveniji imamo do zdaj zgrajeno eno črpalno hidroelektrarno, ki obratuje od decembra 2009, črpalna hidroelektrarna Avče (ČHE Avče). ČHE Avče črpa vodo iz zajezitve HE Doblar ($420 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ in ima zgornji zbiralnik 494 m višje velikosti $2,17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$).

Črpalne elektrarne so v svetu zaradi svoje preproste konstrukcije, relativno nizkih obratovalnih stroškov in podobnosti v načinu obratovanja s hidroelektrarnami, zdaleč najbolj uporabljan hranilnik energije. Izkoristek celotnega sistema je običajno pogojen z izkoristkom črpalk in turbine, delno pa na njega vplivajo tudi izgube v ceveh. Nekaj vode iz zgornjega bazena izhlapi, kar pa običajno kompenzirajo padavine.

Tipične lastnosti ČHE [6]:

- vključitev v sistem je izredno hitra (10 s pri pripravljenosti in 1 min iz stanja mirovanja),
- lokacija je omejena z geografskimi danostmi (zahtevajo dva velika rezervoarja z različno nadmorsko višino, kar je bolj pogosto na gorskih in hribovitih področjih, ki so bolj oddaljena od elektroenergetskega sistema),
- imajo velike stroške kapitala in nizke vzdrževalne stroške,
- značajan vpliv na okolje.

Možne variante črpalnih hidroelektrarn:

- Podzemne črpalne hidroelektrarne imajo spodnji bazen izkopen pod površino (do 300 m), kjer je nameščena tudi strojnica. V obratovanju črpajo vodo iz podzemnega rezervoarja v površinski rezervoar. Zaradi minimizacije izgub trenja so cevi speljane navpično. Običajno se izkoriščajo že obstoječi podzemni rezervoarji.
- Črpalne hidroelektrarne na morsko vodo uporabljajo za spodnji bazen morsko gladino, preostanek sistema pa je praktično identičen klasični konstrukciji. Prednost je v večji izbiri možnih geografskih lokacij.

Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 1. Pregled je sestavljen iz nekaj pomembnejših študij s področja hranilnikov energije, opravljenih med leti 2000 in 2010 [7] - [11]. Stroški so prikazani v ameriških \$, valoriziranih na vrednost v letu 2010.

Tabela 1: Pregled pomembnejših parametrov za črpalne elektrarne.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	75-78	-	70-85	-	72-85
Samopraznjenje (% energije na dan)	-	-	-	-	zelo malo
Dovoljeno št. ciklov	-	-	-	-	-
Življenjska doba (leta)	-	-	30	-	40-60
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	0,5-1,5
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	-
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	0,5-1,5

Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	-
Cena moči (\$/kW)	1190-1250	-	690	-	600-2000
Cena energije (\$/kWh)	12	-	0-23	-	5-100
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	-	-	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	4,8	-	že vklj.	-	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-letu)	3,0	-	4,4	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

2.2 Plinske turbine

Plinske turbine sestavljajo kompresor zraka, zgorevalna komora z gorilnikom ter turbina. Stisnjen zrak iz kompresorja dovajajo v zgorevalno komoro, kamor dovajajo tudi gorivo plinske turbine pod tlakom, ki pa mora biti višji od tlaka stisnjenega zraka. V zgorevalni komori se zrak pomeša z gorivom, ki se pri tem vžge. Nastali vroči zgorevalni plini ekspandirajo do atmosferskega zraka. Ustvarjena kinetična energija ekspandiranih plinov se na turbinskih lopaticah porablja za vrtenje turbine in generatorja ter proizvodnjo električne energije in za pogon kompresorja. Plinska turbina za svoje delovanje potrebuje kompresor, ki ustrezno poveča tlak vstopnega tlak, hkrati pa povzroča izgube, ki zmanjšujejo izkoristek plinske turbine. Temu se je mogoče izogniti, če v turbino dovajamo vnaprej stisnjen zrak, ki pa ga je treba ustrezno uskladiščiti. Na ta način dobimo plinske turbine s hranilnikom vnaprej stisnjenega zraka (PTSZ). Princip shranjevanja energije je podoben tistemu, ki ga uporabljamo pri črpalnih hidroelektrarnah. Ko je energije dovolj, s kompresorjem stiskamo zrak, ko je primanjkuje, stisnjen zrak dovajamo v zgorevalno komoro mimo kompresorja.

Za tako rešitev je potreben velik hranilnik stisnjenega zraka, za kar so primerne opuščene rudniške jame. Mogoči sta dve rešitvi: tlak zraka se v takem podzemnem hranilniku ne spreminja, za kar skrbi nadzemni rezervoar vode, in tlak zraka se s praznjenjem hranilnika postopoma zmanjšuje. Zato da je količina zraka v hranilniku čim večja, se zrak pred tem z ohlajanjem zgosti. Zaradi dodatnih izgub imajo taki postroji slabši izkoristek od navadnih plinskih postrojev. Prednosti pa se kažejo v elastičnosti obratovanja, veliki konični električni moči ter kratkem zagonskem času [12]. Ena izmed prednosti je tudi ta, da je delež toplote pri maksimalni moči v primerjavi z klasičnimi plinskimi elektrarnami 2 do 3 krat manjši. Trenutno obstajata dve možnosti: PTZS z diabatnim in adiabatnim ciklom. Prva je opisana zgoraj in je trenutno edina delujoča. Pri adiabatnem ciklu bi lahko shranili toploto, ki nastane pri kompresiji zraka in jo kasneje uporabili za njegovo ponovno segretje pri dekompresiji. S tem bi lahko bistveno znižali porabo goriva za obratovanje. Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 2.

Tabela 2: Pregled pomembnejših parametrov za PTSZ.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	73-79	65-85	57-64	-	70-80
Samopraznjenje (% energije na dan)	0	-	-	-	mala
Dovoljeno št. Ciklov	-	-	-	-	-
Življenjska doba (leta)	-	30	30	-	20-40
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	30-60
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	-
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	3-6
Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	0,5-2
Cena moči (\$/kW)	510-650	-	490-600	550	400-800
Cena energije (\$/kWh)	3,6-140	-	3,5-58	120	2-50
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	-	-	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	60	190	46-58	50	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-let)	3,0-12	23-29	1,6-4,3	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

2.3 Vztrajniki

Vztrajniki hranijo energijo v obliki vrtilne kinetične energije. Za potrebe hranjenja je vztrajnik sestavljen iz dveh glavnih elementov. Prvi element je vztrajnik, ki se vrti z visoko hitrostjo, drugi element pa integriran električni stroj, ki deluje kot motor ali kot generator. Ko električni stroj deluje v motorskem režimu, poganja vztrajnik ter s tem povečuje kinetično energijo vztrajnika, v generatorskem režimu pa oddaja v vztrajniku shranjeno energijo. Uporaba magnetnih ležajev in vakuumskih komor zmanjša izgube sistema. Uporaba vztrajnikov se je začela na področju avtomobilske industrije in sicer za doseganje daljših razdalj in s tem večjih izkoristkov električnih vozil. V zadnjem času pa se je razvoj vztrajnikov osredotočil tudi na izboljšanje kakovosti električne energije [13]. Ena izmed njihovih slabosti je znaten nivo samopraznjenja zaradi izgub v ležajih in visoki stroški izgradnje sistema. Ločimo vztrajnike, ki delujejo pri visokih in nizkih hitrostih. Ker je shranjena energija sorazmerna kvadratu kotne hitrosti vztrajnika ($W = \frac{1}{2} I \omega^2$), ima večanje hitrosti večji vpliv na količino shranjene energije, kakor večanje vztrajnostnega momenta. Velike obremenitve materialov pri visokih hitrostih lahko povzročijo njihovo utrujenost in s tem negativno vplivajo na zanesljivost, kljub vgradnji najnaprednejših rešitev. Vpliv na okolje med delovanjem je zanemarljiv. Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 3.

Tabela 3: Pregled pomembnejših parametrov za hranilnike energije z vztrajniki.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	90-95	70-80	88	-	90-95
Samopraznjenje (% energije na dan)	1,25	-	-	-	do 100
Dovoljeno št. Ciklov	-	100.000+	-	-	20.000+
Življenjska doba (leta)	16+	-	20	-	15
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	10-30
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	400-1500
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	20-80
Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	1000-2000
Cena moči (\$/kW)	360-400	-	400	300	250-350
Cena energije (\$/kWh)	1200- 150.000	-	580-29.000	1000	1000-5000
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	110-600	180	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	0	120	1200	0	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-letu)	6,0	22	8,6	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

2.4 Superprevodni hranilniki energije

Superprevodni hranilniki električno energije za potrebe hranjenja spreminjajo v magnetno. V magnetnem polju je moč hraniti energijo kot magnetno energijo polja, ki je sorazmerna prostornini polja in kvadratu gostote magnetnega pretoka, oz. če jo izrazimo z induktivnostjo $W = \frac{1}{2} LI^2$. Pri temperaturah, ki zagotavljajo superprevodne lastnosti lahko prevodniki dosegajo gostote toka do 300.000 A/cm^2 pri gostoti magnetnega pretoka okrog 5 T [6]. Raziskave na tem področju so še intenzivnejše, od kar so znanstveniki ugotovili, da je superprevodnost mogoča ne samo pri temperaturah blizu absolutne ničle, temveč tudi pri temperaturah do 150 K (-123.15 °C). Izgube, povezane z delovanjem hladilnega sistema, ki zagotavlja dovolj nizke temperature, so ena od glavnih pomanjkljivosti takih sistemov. Superprevodni hranilniki imajo zelo visoke izkoristke, izredno hiter odzivni čas in jih je mogoče izgraditi tudi za zelo velike energije. Razen hladilnega sistema so največji vir izgub pri teh hranilnikih energije pretvorniki, saj moramo električni tok najprej usmeriti za potrebe hranilnika, nato pa ga zopet razsmeriti, ko energijo spet potrebujemo. Pri oceni vpliva na okolje imajo največji prispevek velika magnetna polja, ki jih dosegamo v superprevodnih hranilnikih energije. Drugih neželenih učinkov je zelo malo. Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 4.

Tabela 4: Pregled pomembnejših parametrov za superprevodne hranilnike energije.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	90-95	90-95	90	-	95-98
Samopraznjenje (% energije na dan)	-	-	-	-	10-15
Dovoljeno št. Ciklov	-	-	-	-	100.000+
Življenjska doba (leta)	-	-	30	-	20+
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	0,5-5
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	500-2000
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	0,2-2,5
Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	1000-4000
Cena moči (\$/kW)	240	-	350	-	200-300
Cena energije (\$/kWh)	60.000	-	2300- 83.000	1000	1000- 10.000
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	140-650	140-180	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	-	60	1700- 12.000	-	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-letu)	12	17-26	9,2-30	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

2.5 Super in ultra kondenzatorji

Super in ultra kondenzatorji shranijo mnogo več naboja od klasičnih kondenzatorjev. Dosežejo lahko visoko energijsko in močnostno gostoto, vendar je moč kondenzatorja omejena z notranjo upornostjo. Odlikuje jih ogromna kapaciteta zaradi molekulske tankega dielektrika in veliki površini nanostrukturnih elektrod. Nanotehnologija omogoča izdelavo zelo majhnih super kondenzatorjev. Elektrokemični kondenzatorji so po strukturi zelo podobni baterijam, saj imajo dve elektrodi, med njima pa elektrolit. Bistvena razlika med baterijami in elektrokemičnimi kondenzatorji je, da ioni ne nastajajo zaradi kemične reakcije, temveč se samo prerazporejajo med polnjenjem in praznjenjem. Energija je še vedno shranjena v električnem polju elementa, tako kot pri kondenzatorjih in se zaradi tega elektrolit ne iztroši kot pri baterijah. Imajo kratek čas polnjenja, dolgo življenjsko dobo, zelo veliko število ciklov in delovanje pri nizkih temperaturah. Slabost tovrstnih sistemov za shranjevanje je majhna količina shranjene energije. Potencialne težave pri obratovanju takšnega sistema povzročajo relativno nizka napetost celice, ki je okrog 6 V zato potrebujemo za delovanje veliko zaporedno vezanih elementov. Do odpovedi elementov prihaja tipično pri odprtih sponkah, kar lahko pri mnogo zaporedno vezanih elementih vpliva na zanesljivost delovanja celotnega sistema. Pri konstrukciji celotnega sistema moramo biti pozorni tudi na pravilno

porazdelitev napetosti po posameznih elementih, saj so ti zelo občutljivi na prenapetosti. Delovanje in vzdrževanje sistema je zelo preprosto. Pozorni moramo biti le, da ohranimo delovno temperaturo znotraj predpisanih omejitev (običajno do 85°C). Negativni vplivi na okolje so zelo mali. Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 5.

Tabela 5: Pregled pomembnejših parametrov za superkondenzatorje kot hranilnike energije.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	95	-	90	-	90-98
Samopraznjenje (% energije na dan)	-	-	-	-	20-40
Dovoljeno št. Ciklov	-	-	10.000	-	100.000+
Življenjska doba (leta)	-	-	-	-	20+
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	2,5-15
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	500-5000
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	-
Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	100.000+
Cena moči (\$/kW)	360	-	350	350	100-300
Cena energije (\$/kWh)	36.000	-	94.000	500	300-2000
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	-	180	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	-	120	12.000	50	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-letno)	6,0	14-16	6,4	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

2.6 Sekundarne baterije (akumulatorji)

Sekundarne baterije pretvarjajo kemično energijo v električno. Vsak akumulator je sestavljen iz ene ali več galvanskih celic. V osnovi jih delimo glede na vrsto uporabljenega materiala za anodo, katodo in elektrolit. Tako v grobem poznamo: svinčene baterije, nikeljeve baterije (Nikelj – Kadmij (NiCd), Nikelj – metal – hibrid (NiMH), Nikelj – zinkovi (NiZn)), litij-ionske baterije, natrij-žveplove baterije in natrij-nikelj kloridne baterije.

2.7 Pretočni akumulatorji

Pretočni akumulatorji so akumulatorji, kjer se elektrolit zliva v celični blok v katerem poteka kemična reakcija. Kemična reakcija ne poteka med elektrolitom in elektrodo, kot je to pri navadnih akumulatorjih, temveč v celičnem bloku med dvema elektrolitoma, ki sta ločena z membrano. Sledenja prepušča samo ione, ne prepušča elektronov, ki morajo steči po

vodnikovih okoli membrane, s čimer nastane električni tok. Pri tem imamo pozitivno (reducent) in negativno (oksidant) nabit elektrolit. Elektrolita sta shranjena v ločenih tankih oziroma rezervoarjih. Bistvena razlika med gorivnimi celicami in celicami, uporabljenimi pri pretočnih akumulatorjih, je ta, da pri prvih ostaja elektrolit ves čas v celičnem bloku (reaktorju). V zadnjem pol desetletju so se 3 vrste pretočnih akumulatorjev razvile do stopnje komercialne uporabe. Pretočne akumulatorje razlikujemo predvsem po vrsti uporabljenega elektrolita [14]. Moč in količina shranjene energije sta pri pretočnih akumulatorjih medsebojno neodvisni. Moč definira število celičnih blokov, količino shranjene energije pa količina v rezervoarjih shranjenega elektrolita. Tako lahko pretočne akumulatorje gradimo neodvisno na moč in energijo. Pri tem v grobem ločimo tri vrste pretočnih akumulatorjev: cink-brom pretočni akumulatorji, polisulfidni-bromidni pretočni akumulatorji in vanadijevi pretočni akumulatorji. Tipični tehnološki in stroškovni parametri so podani v tabeli 6.

Tabela 6: Pregled pomembnejših parametrov za vanadijeve pretočne baterije.

Parameter	2003 [7]	2003 [8]	2004 [9]	2008 [10]	2009 [11]
Skupni izkoristek cikla (%)	70	60-75	67-81	-	75-85
Samopraznjenje (% energije na dan)	0,2	-	-	-	Malo
Dovoljeno št. Ciklov	-	14.000	-	-	12.000+
Življenjska doba (leta)	10	10-15	10	-	5-10
Energijska gostota (Wh/kg)	-	-	-	-	10-30
Gostota moči (W/kg)	-	-	-	-	-
Specifična energija (Wh/l)	-	-	-	-	16-33
Specifična moč (W/l)	-	-	-	-	-
Cena moči (\$/kW)	210	-	-	175	600-1500
Cena energije (\$/kWh)	710	-	200-220	350	150-1000
Stroški celotne pretvorbe energije (\$/kW)	120-600	370-610	270-580	-	-
Skupni stroški izgradnje (\$/kW)	36	120	-	30	-
Stroški obratovanja in vzdrž. (\$/kW-letno)	24	33-65	-	-	-

Simbol – v preglednici pomeni, da podatka ni smiselno prikazati za navedeno tehnologijo, ali pa ni ustrezno predstavljen v študiji.

3. VKLJUČEVANJE SISTEMOV ZA SHRANJEVANJE ENERGIJE V ELEKTROENERGETSKO OMREŽJE

Sistemi za shranjevanje energije morajo biti narejeni tako, da omogočajo neposredno priključevanje na prenosno ali distribucijsko omrežje, kot je to urejeno za enote razpršene proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov. Tako kot to velja za slednje, velja tudi za sisteme za shranjevanje energije, kjer je potrebna posebna pozornost pri načrtovanju, nadzoru, vodenju in zaščiti omrežja, ki ga moramo skrbno upoštevati. Pri tem ločimo statično in dinamično vlogo sistemov za shranjevanje pri vključevanju v omrežje.

Statična vloga sistemov za shranjevanje v omrežju predstavlja njegovo sodelovanje v običajnih delovnih stanjih omrežja. Že njegova sposobnost hranjenja energije v času viškov in sproščanje v času koničnih obremenitev pomeni razbremenitev proizvodnih zmogljivosti in včasih celo nadomeščanje novih proizvodnih enot. Nameščanje hranilnikov energije je posebej zaželeno, kadar kapaciteta jedrskih in velikih termoelektrarn presega osnovno pasovno porabo in kadar naraste uporaba trapeznih proizvodnih enot (sončnih elektrarn, vetrnih elektrarn) preko kapacitet rezerv sistema. Z uporabo sistemov za shranjevanje lahko to razmerje zmanjšamo in tako povečamo učinkovitost sistema. Takšna uporaba hranilnikov energije za »rezanje konične proizvodnje« je ekonomsko gledano smiselna, če je skupni izkoristek cikla hranilnika večji od razmerja med ceno energije pri polnjenju in ceno energije pri praznjenju.

Vzdrževanje vroče rezerve s pomočjo velikih termo- in jedrskih elektrarn zahteva porabo velikih količin goriva in tako znižuje skupni izkoristek sistema. Plinske elektrarne potrebujejo 5 – 17 min za sinhronizacijo v omrežje in doseganje nazivne proizvodnje, tako da ne morejo v celoti prevzeti te vloge. Tudi termoelektrarne lahko v roku nekaj sekund povečajo svojo proizvodnjo le za 3 do 5 %. Hranilniki energije so idealni za primer dinamičnega obratovanja, saj lahko spremenijo režim iz polnjenja v praznjenje v nekaj trenutkih in pokrijejo primanjkljaj ob nenadnem izpadu ali povečanju odjema. Vroča rezerva ima v sistemu vlogo regulacije frekvence oz pokrivanja potreb po hitro spremenljivi proizvodnji energije.

Hranilniki energije ne morejo nadomestiti nenačrtovanih izpadov velikih proizvodnih enot, vendar se v sistemih to dogaja le redko, lahko pa v tem primeru pokrijejo trenutno potrebo po velikih močeh za kratek čas, če so tako dimenzionirani, in s tem preprečijo razpad sistema, preden se vključijo konvencionalni rezervni viri.

4. ZAKLJUČEK

V delu so predstavljeni sistemi za shranjevanje električne energije, ki se vedno bolj uveljavljajo. Sistemi se razlikuje predvsem po uporabljeni tehnologiji in načinu pretvorbe električne energije v energijo primerno za shranjevanje. Predstavljeni so sistemi za shranjevanje vse od črpalnih hidroelektrarn, plinskih turbin s hranilnikom v naprej stisnjenega zraka pa do pretočnih akumulatorjev. Trenutno edini in uveljavljen način shranjevanja energije se kaže s pomočjo črpalnih hidroelektrarn, ki pa zahteva določene naravne danosti okolja. Nekaj upanja dajejo tudi pretočni akumulatorji, ki v določenih pilotskih izvedbah že dajejo spodbudne rezultate.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] A. Joseph, M. Shahidehpour, Battery Storage Systems in Electric Power Systems, IEEE, 2006.
- [2] A. Price, G. Thijssen, P. Symons, Electricity Storage, a Solution in Network Operation, Paper presented at Distributech Europe, 12 Oktober 2000.
- [3] www.electricitystorage.org, Electricity Storage Association (ESA).
- [4] J. Curk, VRB hranilnik električne energije, 16. Mednarodno posvetovanje Komunalna energetika, maj 2007.
- [5] A. Korak, *Zanesljivost vključitve črpalne hidroelektrarne Kozjak v Elektroenergetski sistem*, Magistrsko delo, UM FERi, Maribor, junij 2006.
- [6] K. Bradbury, *Energy Storage Technology Review*, 2010.
- [7] S. M. Schoenung and W. V. Hassenzahl, "Long-vs. Short-Term energy storage technologies analysis a Life-Cycle cost study a study for the DOE energy storage systems program," tech. rep., SAND2003-2783, Sandia National Laboratories, 2003.
- [8] EPRI, "EPRI-DOE handbook of energy storage for transmission and distribution applications," tech. rep., EPRI and U.S. Department of Energy, 2003.
- [9] A. Gonzalez, B. Gallachir, E. McKeogh, and K. Lynch, "Study of electricity storage technologies and their potential to address wind energy intermittency in ireland," tech. rep., Sustainable Energy Research Group, University College Cork, 2004.
- [10] S. Schoenung and J. Eyer, "Benefit/Cost framework for evaluating modular energy storagea study for the DOE energy storage system program," Sandia report SAND, vol. 978, 2008.
- [11] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," Progress in Natural Science, vol. 19, p. 291312, Mar. 2009.
- [12] A. Cavallo, Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage, Energy 32, pp. 120-127, 2007.
- [13] A. Rojas, Flywheel Energy Matrix Systems – Today's Technology, Tomorrow's Energy Storage Solution.
- [14] P. de Boer, J. Raadscelders, Flow batteries, Briefing Paper, Leonardo Energy, Junij 2007.

NASLOV AVTORJEV

Sebastijan Seme, univ. dipl. inž. el.
mag. Andrej Orgulan, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Jože Voršič

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 79

Fax: + 386 2 252 54 81

Elektronska pošta: sebastijan.seme@uni-mb.si