UNIVERZA V LJUBLJANI

EKONOMSKA FAKULTETA

MAGISTRSKO DELO

ANALIZA TEHNOLOŠKO-EKONOMSKIH VIDIKOV SHRANJEVANJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Ljubljana, april 2020

KLEMEN ŽUMER

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Klemen Žumer študent Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, avtor predloženega dela z naslovom Analiza tehnološko-ekonomskih vidikov shranjevanja električne energije, pripravljenega v sodelovanju s svetovalko prof. dr. Nevenko Hrovatin.

I Z J A V L J A M

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;

2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;

3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani;

4. da se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;

5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom;

6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;

7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

9. da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve predloženega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja predloženega dela na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani;

10. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi.

V Ljubljani, dne _____ Podpis študenta: _____

KAZALO

UVOD **1**

1 RAZLOGI ZA SHRANJEVANJE ENERGIJE IZ VIDIKA OBNOVLJIVIH VIROV **2**

1.1 Vpliv na okolje **3**

1.2 Tehnološke karakteristike **4**

1.3 Uvozna odvisnost **4**

1.4 Problematika prehitrega prehajanja na obnovljive vire energije **5**

1.5 Pregled klasičnih energetskih virov in ekonomska primerjava **5**

2 NAČINI SHRANJEVANJA ENERGIJE IN NJIHOVE LASTNOSTI **7**

2.1 Mehansko shranjevanje energije **9**

2.1.1 Črpalne hidroelektrarne 9

2.1.2 Shranjevanje energije s stiskanim zrakom 11

2.1.3 Shranjevanje energije z vztrajnikom 13

2.2 Elektrokemično shranjevanje energije **15**

2.2.1 Sekundarne baterije 15

2.2.2 Pretočne baterije 18

2.3 Kemično shranjevanje energije **19**

2.3.1 Vodik 19

2.3.2 Gorivne celice 21

2.3.3 Sintetični zemeljski plin 21

2.4 Električno shranjevanje energije **23**

2.4.1 Dvoslojni kondenzator 23

2.4.2 Superprevodna magnetna tuljava 24

2.5 Termalno shranjevanje energije **24**

2.6 Hibridno shranjevanje energije **27**

3 PRIMERJAVA HRANILNIH SISTEMOV **28**

3.1 Tehnična zrelost hranilnih sistemov **28**

3.2 Uporaba hranilnih sistemov glede na nazivno moč in čas praznjenja **29**

3.3 Stroški hranilnih sistemov **31**

3.4 Tehnična učinkovitost hranilnih sistemov **33**

3.5 Gostota energije in gostota moči hranilnih sistemov **34**

3.6 Življenjska doba hranilnih sistemov **35**

3.7 Vpliv hranilnih sistemov na okolje **35**

4 PREDNOSTI IN SLABOSTI HRANILNIKOV ENERGIJE IN TRENUTNO STANJE UPORABE ... 37
4.1 Področja in koristi uporabe hranilnikov energije ... 37
4.2 Slabosti hranilnikov energije ... 40
4.3 Vpeljevanje hranilnih sistemov in napovedi za prihodnost ... 41
5 ANALIZA IZBRANIH PRIMEROV ... 43
5.1 Vgradnja baterije Li-Ion v nizkonapetostno omrežje z veliko razpršene proizvodnje ... 43
5.1.1 Lastnosti in vloga Litij-ionske baterije ... 44
5.1.2 Vključevanje Litij-ionske baterije v omrežje in komunikacijska shema ... 45
5.1.3 Zaključek ... 46
5.2 Izboljšanje kakovosti električne energije v podeželski mreži s pomočjo hranilnikov energije ... 46
5.2.1 Lastnosti in vloga Litij-ionske baterije ... 46
5.2.2 Ugotovitve ... 47
5.2.3 Zaključek ... 48
5.3 Energetski problemi v Južni Avstraliji ... 48
5.3.1 Elektroenergetsko stanje Južne Avstralije ... 48
5.3.2 Septembrska energetska katastrofa 2016 ... 49
5.3.3 Vpeljava hranilnika energije ... 50
5.3.4 Zaključek ... 51
5.4 Shranjevanje energije s stisnjenim zrakom v Huntorfu ... 52
5.4.1 Predstavitev in vloga hranilnika v Huntorfu ... 52
5.4.2 Delovanje sistema in solne kaverne ... 53
5.4.4 Omejitve sistema v Huntorfu ... 54
5.4.5 Zaključek ... 54
SKLEP ... 55
LITERATURA IN VIRI ... 58

KAZALO TABEL

Tabela 1: Primerjava investicijskih stroškov in stroškov obratovanja tehnologij proizvajanja električne energije. 6
Tabela 2: Tehnične karakteristike hranilnih sistemov. 30
Tabela 3: Tehnične karakteristike hranilnih sistemov. 36

KAZALO SLIK

Slika 1: Razvrstitev tehnologij shranjevanja energije. 9
Slika 2: Princip delovanja črpalne hidroelektrarne. 10
Slika 3: Princip delovanja sistema za stiskanje zraka v solnih kavernah s povezovanjem vetrnih elektrarn. 12
Slika 4: Vrisane potencialne lokacije v Evropi in ZDA za CAES. 13
Slika 5: Struktura vztrajnika. 14
Slika 6: Čas praznjenja in kapaciteta shranjevanja energije. 22
Slika 7: Princip delovanja termalnega shranjevanja energije s tehnologijo staljene soli. 26
Slika 8: Primerjava hranilnih sistemov glede na tehnično zrelost. 29
Slika 9: Povprečni stroški energije v ciklu ob upoštevanju njegove učinkovitosti in življenjske dobe. 32
Slika 10: Primerjava investicijskih stroškov na enoto energije in letnih stroškov obratovanja ter vzdrževanja. 32
Slika 11: Tehnična učinkovitost sistemov shranjevanja energije. 33
Slika 12: Primerjava gostote moči in gostote energije hranilnih sistemov. 34
Slika 13: Uporaba tipa hranilnika glede na zahtevane storitve v omrežju. 38
Slika 14: Zrelost uporabe sistemov za shranjevanje energije glede na primernost tehnične učinkovitosti in stroškov. 42
Slika 15: Vrste uporabljenih hranilnikov energije v letu 2014. 42
Slika 16: Prikaz pretoka moči na TP Suha (modra), kjer proizvodna moč sončnih elektrarn ne pokriva največje porabe (oranžna). 44
Slika 17: Prikaz zmanjšanje nihanja moči v drugi fazi v 9-dnevnem obdobju, če je hranilni sistem deloval. 47
Slika 18: Prikaz delovanja hitre frekvenčne odzivnosti glede na motnjo avgusta 2018. 51
Slika 19: Prikaz rezanja koničnega odjema glede na potek delovanja sistema CAES. 53

SEZNAM KRATIC

angl. - angleško

EES (angl. Electrical Energy Storage); Shranjevanje električne energije

CO_2 Ogljikov dioksid

OVE Obnovljivi viri energije

ZDA Združene države Amerike

ČHE Črpalna hidroelektrarna

LCOE (angl. Levelized costs of electricity); Tehtani povprečni stroški električne energije v življenjski dobi hranilnika

UPS (angl. Uninterruptible power supply); Sistemi za neprekinjeno napajanje

CAES (angl. Compressed-air Energy Storage); Shranjevanje energije s stiskanim zrakom

LAES (angl. Liquid Air Energy Storage); Shranjevanje energije s tekočim zrakom

FESS (angl. Flywheel Energy Storage) Shranjevanje energije z vztrajnikom

NiCd (angl. Nickel-cadmium); Nikelj-kadmij

NiMH (angl. Nickel-metal-hydride); Nikelj-železo-vodik

Li-Ion Litij-Ion

NaS (angl. Sodium–sulfur); Natrij-žveplo

ZEBRA (angl. Sodium–nickel chloride battery with Zero Emissions); Baterija natrij-nikljev klorid z ničelnimi emisijami

ZBR (angl. Zinc-bromine flow battery); Cink-bromidna pretočna baterija

VRB (angl. Vanadium redox flow battery); Vanadijeva redoks pretočna baterija

SNG (angl. Synthetic Natural Gas); Sintetični zemeljski plin

SMES (angl. Superconducting Magnetic Energy Storage); Superprevodna magnetna tuljava

TES (angl. Thermal Energy Storage); Termalno shranjevanje energije

PCM (angl. Phase Change Materials); Latentno shranjevanje toplotne energije

TCS (angl. Thermochemical Storage); Termalno-kemično shranjevanje

UTES (angl. Underground Thermal Energy Storage); Shranjevanje toplotne energije pod zemljo

CES (angl. Cryogenic Energy Storage); Kriogeno shranjevanje energije

HEES (angl. Hybrid Electric Energy Storage); Hibridno shranjevanje energije

TP Transformatorska postaja

ARSO Agencija Republike Slovenije za okolje

SIPS (angl. System Integrity Protection Scheme); Shema zaščite integritete sistema

FFR (angl. Fast Frequency Response); Hitri frekvenčni odziv

UVOD

Rast števila prebivalcev pomeni tudi večjo porabo električne energije. Električni viri, ki temeljijo na fosilnih gorivih, povzročajo onesnaženje, hkrati pa so zaloge njihovih energentov omejene. Drugo vejo proizvajanja energije predstavljajo obnovljivi viri energije (v nadaljevanju OVE), ki jo proizvajajo na čist način. Imajo neomejeno energetsko zalogo, njihove slabosti pa so nizka učinkovitost, vremenska in tehnološka nestabilnost in manjša zmogljivost. OVE upraviteljem omrežja povzročajo velike izzive pri prenosu in distribuciji energije za zadovoljitev povpraševanja z nepredvidljivimi dnevnimi in sezonskimi variacijami. Sonce sveti le podnevi, konična poraba energije pa je zjutraj in zvečer, zato se ogromno vlaga v razvoj novih tehnologij, s katerimi bi v prihodnosti reševali te težave. Nedvomno je treba narediti napredek in se ne le oklepati klasičnih načinov proizvajanja energije, vendar pa so potrebni majhni, postopni in previdni koraki. Ubrati je treba pot s sočasno uporabo stabilnih klasičnih virov in potencialnih obnovljivih virov energije. Več kot ima država na voljo različnih virov energije, bolj je energetsko in politično samostojna. Z naraščanjem vpeljave obnovljivih virov energije v elektroenergetski sistem je glavni izziv zagotoviti trajnosten, varen in ekonomsko učinkovit način dobave energije končnim odjemalcem. Potreben je razvoj novih tehnologij, ki bodo to lahko omogočile. Tako elektroenergetski sistemi kot z njimi povezana področja bodo v prihodnje nedvomno zaznamovani z vključitvijo sistemov za shranjevanje energije.

Shranjevane električne energije (angl. Electrical Energy Storage, v nadaljevanju EES) bi danes širša javnost povezala s shranjevanjem energije v baterijah, ker so te prisotne v vsakdanjem življenju v manjših elektronskih aparatih. Hidroelektrarne so kot proizvajalec električne energije sicer poznane, vendar shranjevalne funkcije črpalnih hidroelektrarn večina ne pozna. Nedvomno je ozaveščenost o shranjevanju energije premajhna, da bi javnost lahko spodbudila večji vložek v razvoj hranilnih sistemov. Ne zavedamo se še, da shranjevanje energije predstavlja potencial pri soočanju z zmanjševanjem našega potrošniškega ravnanja.

Princip shranjevanja električne energije temelji na absorbiranju različnih tipov energije, ki se jo shrani in kasneje uporabi. To nam omogoča zapolnjevanje časovnih in geografskih vrzeli med ponudbo in povpraševanjem po električni energiji, tako za porazdeljene kot za centralizirane sisteme. V zadnjem času so hranilniki energije prišli v ospredje zaradi zavzemanja za razogljičenje nekaterih energetskih virov in posledične težnje po povečanju obnovljivih virov energije v omrežnem sistemu. Večina hranilnih sistemov je komercialno še nezrelih, zato potekajo raziskave za njihove tehnološke in ekonomske izboljšave ali za nove tehnološko uspešne in konkurenčne hranilne sisteme.

Namen dela je podati pregled nad razlogi za shranjevanje energije, nad vrstami hranilnikov električne energije in nad tehnološko in ekonomsko zrelostjo hranilnikov za vpeljavo v elektroenergetski sistem.

Prvi cilj magistrskega dela je preučiti vpliv obnovljivih virov na okolje, njihovo tehnološko učinkovitost, gospodarski pogled na njihovo povečano uporabo in učinke, ki jih ta povzroča v elektroenergetskem omrežju. Drugi cilj je tehnološko in ekonomsko preučiti načine mehanskega, elektrokemičnega, kemičnega, električnega, termalnega in hibridnega shranjevanja energije za komercialno rabo. Tehnološko stanje sistemov bom preveril z lastnostmi, kot so: tehnična zrelost, nazivna moč, čas praznjenja, učinkovitost, gostota energije, gostota moči, življenjska doba in vpliv na okolje. Za ekonomsko upravičenost bom analiziral investicijske stroške, povprečne stroške energije v ciklu oz. povprečne stroške energije med posameznim polnjenjem in stroške dolgoročnega shranjevanja. Tretji cilj dela je analizirati dejansko vpeljane hranilne sisteme, njihove tehnološke učinke v omrežju in ekonomičnost vpeljave.

Delo je sestavljeno iz petih poglavij. V prvem poglavju sta predstavljeni problematiki dokaj hitrega prehajanja na OVE in oklepanja le klasičnih virov energije. V drugem poglavju spoznamo vse osnovne načine shranjevanja energije. Predstavljeno je njihovo delovanje, tehnične karakteristike, tehnične prednosti in slabosti ter njihovo trenutno stanje za morebitno komercialno uporabo. Tretje poglavje primerja zgoraj naštete načine shranjevanja med seboj glede na tehnično zrelost, nazivno moč in čas praznjenja, ekonomsko in tehnično učinkovitost, gostoto energije in gostoto moči, življenjsko dobo ter vpliv na okolje. Četrto poglavje opisuje področja uporabe, na katerih lahko uporabimo hranilnike energije in pozitivne učinke, ki jih prinašajo. V tem delu je opisan tudi kritični vidik hranilnikov in njihovo trenutno stanje uporabe ter napovedi uporabe v prihodnosti. V petem poglavju sledijo opisi štirih primerov vpeljanih hranilnikov energije v elektroenergetskem sistemu. Prvi in drugi primer analizirata uspešnost in smiselnost vpeljave baterijskih hranilnikov v omrežje. Tretji primer opisuje problematično stanje z dobavo električne energije v Južni Avstraliji, ki rešitev trenutne situacije vidi v vzpostavitvi več hranilnih sistemov v omrežje. V zadnjem primeru je prikazan prvi vpeljani sistem za shranjevanje energije s stiskanjem zraka.

1 RAZLOGI ZA SHRANJEVANJE ENERGIJE IZ VIDIKA OBNOVLJIVIH VIROV

Poraba električne energije se po svetu iz leta v leto povečuje (Leskošek, 2019). Tehnološka dovršenost, boljše toplotne izolacije stavb, pametna elektronika, učinkovitejši mehanski procesi itd. pripomorejo k zmanjšani porabi, vendar se na trgu stalno pojavljajo novosti (toplotne črpalke, električna vozila in elektronske naprave), ki za svoje delovanje potrebujejo električno energijo in tako povečajo potrebo po njeni proizvodnji (Leskošek, 2019). Električno energijo večinoma pridobivamo iz klasičnih virov: iz jedrskih elektrarn, termoelektrarn in plinskih elektrarn. Ker skušamo zmanjšati onesnaženost okolja, se vedno bolj poslužujemo OVE. Nedvomno je poleg energetske in stroškovne učinkovitosti treba upoštevati tudi vidik okolja in družbeni vpliv. Vseeno pa je potreben smiseln in postopen prehod na OVE, saj bi za popoln nadomestek klasičnih virov potrebovali večjo količino

novih hidroelektrarn in vetrnic, ki pa bi se slej kot prej pojavile tudi na območjih, kjer bi pustile posledice v okolju. Ob tem bi bila vprašljiva tudi zanesljivost dobave energije (Leskošek, 2019).

Zanimiv podatek o energetskem omrežju v Združenih državah Amerike (v nadaljevanju ZDA) je že leta 2008 izdal Committee for the National Academies Summit. Opozorili so, da bi se električno omrežje v ZDA lahko destabiliziralo, če bi nepredvidljiva obnovljiva energija presegla 20-odstotni delež proizvodnje energije brez skladiščenja (Weber in drugi, 2011). Inštitut za elektroenergetiko v ZDA je ocenil, da bi s povečano proizvodnjo iz OVE, vključevanjem skladiščenja in uporabo pametnega omrežja do leta 2030 lahko zmanjšali energetsko porabo v ZDA za 4 %. To enačijo z izločitvijo emisij 50 milijonov avtomobilov in z 20 milijardami dolarjev prihrankov odjemalcev letno (Weber in drugi, 2011).

Ali pa OVE resnično prispevajo k čistejšemu okolju in so hkrati tehnološko in ekonomsko na ravni klasičnih virov proizvajanja energije? V nadaljevanju v poglavjih 1.1 do 1.5 poskušamo odgovoriti na to vprašanje.

1.1 Vpliv na okolje

OVE pri svojem tehnološkem procesu proizvajanja energije ne izločajo fosilnih goriv ali drugih strupenih plinov. Prav tako sončne elektrarne fizično zavzamejo manj prostora v okolju in porabijo manj materiala kot klasične elektrarne, vendar pa je njihova izdelava vse prej kot čista. Za izdelavo sončnih panelov so potrebne jedke kemikalije (natrijev hidroksid in fluorovodikova kislina), pri postopkih izdelave pa nastajajo toplogredni plini. Nekateri proizvajalci panelov so sicer zavezani k trajnostnemu razvoju in stremijo k vgrajevanju manjših količin škodljivih snovi, vendar se jim v celoti ni mogoče odpovedati. Zaradi jedkih ali plemenitih kovin (srebro, telur, indij itd.) bodo v prihodnosti zelo pomembna vprašanja reciklaže sončnih panelov (Nunez, 2014).

V nasprotju z izdelavo sončnih elektrarn pa vetrne elektrarne pri izgradnji in vgradnji ne potrebujejo škodljivih snovi. Večja težava so fizični in biološki vpliv na okolje ter poraba materiala za njihovo izgradnjo, ki je na ravni klasičnih elektrarn ali celo večja. Za postavitev vetrnice z močjo 2 MW v Dolenji vasi v občini Divača je bilo potrebnih 500 m^3 betona in okrog 150 t železa (le za temelj 50 t), za jedrsko elektrarno z močjo 1 MW pa je potrebnih 90 m^3 betona in 40 ton železa. Z upoštevanjem tehnične učinkovitosti elektrarn, kjer ima jedrska 4- do 5-krat večji izkoristek, bi za zgraditev vetrne elektrarne, ki bi bila na ravni jedrske, potrebovali 900 m^3 betona in 450 t železa, kar predstavlja velike količine materiala. Ob tem pa nismo upoštevali življenjske dobe, ki je pri OVE krajša kot pri klasičnih virih (Mihalič, 2011).

Hidroelektrarne so vrsta OVE z veliko tehnično učinkovitostjo, vendar pa jih mnogi zaradi velikega posega v okolje mednje nočejo uvrščati. Poraba materiala za njihovo izgradnjo je

ogromna, imajo pa tudi velik kemijski, hidrološki, klimatski, krajinski, gospodarski in biološki vpliv na vodotok (Savske elektrarne Ljubljana, brez datuma).

1.2 Tehnološke karakteristike

Pomemben parameter tehnološke primerjave elektrarn je gostota moči na površino (W/m^2). Običajna jedrska elektrarna z dvema reaktorjema in močjo 2700 MW ima 25 W/m^2 energijske gostote. Vetrna elektrarna ima 1,2 W/m^2 gostote moči, sončna elektrarna 6,7 W/m^2, elektrarna na biomaso 0,4 W/m^2, elektrarna, ki pridobiva etanol iz koruze pa le 0,05 W/m^2. Glede na omenjene vrednosti bi za enako količino proizvedene energije, ki bi ustrezala povprečni moči 1000 MW, potrebovali malo večjo jedrsko elektrarno, kot je v Krškem oz. 2500 vetrnih elektrarn z močjo 2 MW, ki imajo običajne izkoristke 20 %. Ob tem bi morali upoštevati tudi neprimerno večje stroške postavitve razpršenih daljnovodov iz vsake od teh v primerjavi s tistimi iz jedrske elektrarne (Mihalič, 2011).

OVE so precej odvisni od vremenskih pogojev, zato so zelo nestabilni. Obstajajo mnoga zelo vetrovna področja, kjer veter načeloma ne pojenja, težava pa se pojavi, če se to zgodi. Sončna energija je morda še najbolj nestabilna, saj ni veliko področij z vsakodnevnim jasnim sončnim vremenom. Še najbolj zanesljiva je hidroenergija s stalnim pretokom vode (Pušnik, 2011).

Tehnični izkoristek pretvorbe OVE v električno energijo je v primerjavi s termo- in jedrskimi elektrarnami precej nizek. Izjema so hidroelektrarne z zelo visokim izkoristkom, med 70 % in 80 %. Vetrne elektrarne dosegajo v optimalnem delovanju 20–30 % izkoristek, v brezvetrju pa njihovega učinka ni. Premočan veter ali vetrni sunki pomenijo tudi porabo električne energije za zaviranje, hkrati pa je potrebno plačilo normalnega delovanja elektrarne njihovim lastnikom. Nepredvidljivost delovanja na področjih z nestalnim vetrom pomeni praktično njihovo neuporabnost, saj so potrebne popolne rezerve za primer nedelovanja oz. se poveča odvisnost od uvoza energije. Sončne elektrarne so precej odvisne od naklona sonca, saj imajo najvišji izkoristek ob 90° padcu sončnih žarkov na sončni panel. Običajne imajo približno 10 % izkoristek, dražje pa do 20 %. Poleti proizvedejo višek električne energije, ki je zlasti čez dan ne porabimo, v času večernih in jutranjih konic pa je nimamo na voljo. Pozimi, ko se energije potrebuje največ, je sonce prešibko za učinkovito delovanje večjih sistemov (Pušnik, 2011). Zanimiv problem sončnih elektrarn je tudi slabši izkoristek zaradi pregrevanja sistema v primeru velike vročine (Mihalič, 2011).

1.3 Uvozna odvisnost

Vetrne in sončne elektrarne globalno še niso prevzele velikega deleža zagotavljanja električne energije. Ta je še vedno močno odvisen od klasičnih energetskih virov in hidroelektrarn. Pa bo tako tudi v prihodnje? Zaloge fosilnih energentov naj bi bile omejene, vendar pa z novimi tehnologijami lahko povečamo učinkovitost izrabe in odkrivamo nova najdišča. Dejstvo je, da je Evropa premočno odvisna od uvoza nafte in plina z drugih celin,

zato bi optimizacija delovanja in povečana tehnična ter ekonomska učinkovitost OVE zanjo pomenili veliko večjo energetsko in politično neodvisnost. Treba se je zavedati, da bi z uporabo novih tehnologij postali odvisni od drugih surovin, ki jih prav tako ni na pretek. Na začetku bi se cene teh surovin zaradi porasta uporabe zagotovo znižale, z leti pa bi nedvomno narasle. Tako bi ponovno postali odvisni od drugih surovin in drugih držav, saj Evropa ni bogata z naravnimi surovinami (Mihalič, 2011).

1.4 Problematika prehitrega prehajanja na obnovljive vire energije

Glavno težavo prehoda na OVE predstavljata vremenska nestabilnost in nestabilnost fizikalne vztrajnosti. Klasične elektrarne vsebujejo vmesne hranilnike energije, ki temeljijo na težkih rotirajočih se masah (t.i. rotorji sinhronskih generatorjev). Te se stalno vrtijo z enako hitrostjo, kar določa frekvenco napetosti. Padanje frekvence pomeni povečanje moči elektrarne, zato stalno poteka usklajevanje med njima. V Evropi je frekvenca striktno določena na 50 Hz ± 2,5 Hz. Odklon s tega območja pomeni ustavitev elektrarn zaradi njihove lastne varnosti. OVE te vztrajnosti nimajo, saj temeljijo na elektronskih sistemih, ki ne vsebujejo elementov za kratkotrajno shranjevanje energije. Odvisnost OVE od klasičnih elektrarn je torej neizogibna. Nekatere države z večjim deležem OVE, kot je npr. Nemčija, so zato močno odvisne od uvoza iz sosednjih držav, ki uporabljajo klasične načine proizvajanja energije (Tetičkovič, 2019).

Zanimiv primer države, ki sloni na OVE, je Danska. Ogromna količina vetrnih elektrarn predstavlja velik delež nepredvidljive električne moči, zato za stabilno obratovanje potrebujejo prilagajanje ostalih virov energije. Najboljša kompenzacija so hidroelektrarne oz. črpalne hidroelektrarne (v nadaljevanju ČHE). Ker Danci teh nimajo, so preko sistema podmorskih kablov povezani zlasti z vodnato Norveško. V primeru prevelike količine električne energije, proizvedene iz vetra, jo izvažajo na Norveško, ki jo kupuje po nizki ceni ter jo shrani v ČHE. Ko na Danskem primanjkuje energije, ji jo Norveška uvozi in po višji ceni proda. V primeru, da Danci ne morejo izvoziti energije, morajo zaustaviti vetrnice in lastnikom vseeno plačati znesek, enak normalnemu delovanju (Mihalič, 2011). Elektroenergetski sistem torej deluje, vendar z visoko stopnjo odvisnosti in stroškovno neučinkovitostjo, saj je na ravni gospodinjstev električna energija najdražja v Evropi (približno dvakrat dražja kot na Norveškem). Shranjevanje električne energije bi lahko za Dansko pri visokih cenah energije pomenilo stroškovne prihranke (Eurostat, 2019).

1.5 Pregled klasičnih energetskih virov in ekonomska primerjava

Glede na omenjeni kritični pregled OVE bi lahko rekli, da so klasični viri najprimernejši za zagotavljanje električne energije. Sistemi so zreli in posledično tehnološko in ekonomsko bolj dovršeni. Poseg klasičnih virov v okolje je zaradi velikih kompleksnih konstrukcij in izločanja strupenih snovi pri svojem procesu nedvomno precejšen. Pri izgradnji posežejo v biološki naravni sistem, zanjo porabijo velike količine materiala, hkrati pa pri proizvajanju energije zgorevajo fosilna goriva in izločajo strupene pline in odpadke. Termoelektrarne so

s sežiganjem fosilnih goriv morda največji onesnaževalci okolja, hkrati pa lahko negativno vplivajo tudi na naše zdravje. Poleg velikih količin izpuščenega ogljikovega dioksida (v nadaljevanju CO_2) izločajo tudi emisije žveplovega dioksida, prašne delce, dušikov oksid, živo srebro itd. (Pokale, 2012). Slednje bi nedvomno lahko omejili, saj je s sodobnejšo tehnologijo mogoče odstraniti večino letečega pepela in žvepla ter zmanjšati delež škodljivih izločenih emisij. Jedrske elektrarne so v osnovi mnogo čistejše, težavo pa predstavljajo radioaktivni odpadki. Zaradi visoke stopnje varnostnih ukrepov so danes praktično nenevarne (Mihalič, 2011).

Stroške, povezane s sistemi za proizvajanje električne energije, ločimo na investicijske stroške (fiksni stroški) in na stroške obratovanja (variabilni stroški). Investicijski stroški so odvisni od področja gradnje, zato višina stroškov zemljišča, dela, gradbenih dovoljenj itd. precej variira. Stroški obratovanja so odvisni od količine proizvedene energije, mednje pa vključujemo stroške goriva, dela in vzdrževanja. V splošnem velja, da imajo elektrarne z višjimi investicijskimi stroški nižje stroške obratovanja in obratno. Pri elektrarnah, ki proizvajajo energijo s fosilnimi gorivi, velik del stroškov obratovanja predstavljajo stroški goriva. Nasprotno pa velja za OVE. Njihov energetski vir je praktično brezplačen (to ne velja za sisteme z biomaso), vendar pa prevladujejo stroški dela in vzdrževanja. V tabeli 1 lahko vidimo, da so najnižji investicijski stroški na enoto moči pri plinskih in termoelektrarnah, najvišji pa pri fotovoltaičnih sistemih. Drugače je pri stroških obratovanja na enoto energije, kjer so najnižje vrednosti pri vetrnih elektrarnah na morju, fotovoltaičnih sistemih in hidroelektrarnah, najvišje pa pri plinskih elektrarnah (The Pennsylvania State University, brez datuma).

Tabela 1: Primerjava investicijskih stroškov in stroškov obratovanja tehnologij proizvajanja električne energije

TEHNOLOGIJA	INVESTICIJSKI STROŠKI ($/kW)	STROŠKI OBRATOVANJA ($/kWh)
Termoelektrarne	500–1000	0,02–0,04
Plinske elektrarne	400–800	0,04–0,10
Uplinjanja premoga	1000–1500	0,04–0,08
Zemeljski plin v skupnem ciklu	600–1200	0,04–0,10
Vetrne elektrarne na morju	1200–5000	< 0,01
Jedrske elektrarne	1200–5000	0,02–0,05
Fotovoltaični sistemi	> 4500	< 0,01
Hidroelektrarne	1200–5000	< 0,01

Vir: The Pennsylvania State University (brez datuma).

Tehtani povprečni stroški električne energije v življenjski dobi hranilnika (angl. Levelized costs of electricity, v nadaljevanju LCOE) neposredno primerjajo stroške alternativne proizvodnje električne energije in so izraženi v $/kWh. Definiramo jih kot neto sedanjo vrednost stroškov na enoto električne energije v življenjski dobi sistema (Ren21, 2019). Njihova vrednost se med tehnologijami proizvajanja energije sicer močno razlikuje med državami in regijami, vendar pa dobro prikaže gibanje stroškov. Klasični viri energije so že precej zreli, zato se njihovi LCOE zmanjšujejo zanemarljivo. OVE pa imajo še potencial v optimiziranju procesov in zmanjšanju stroškov izdelave, za kar poskrbi tudi vedno večja tržna konkurenca. LCOE se pri OVE torej iz leta v leto zmanjšujejo. Glede na leto 2017 so se LCOE v letu 2018 fotovoltaičnim sistemom in vetrnim elektrarnam na obali zmanjšali za povprečno 13 %, hidroenergiji za 11 %, geotermalnim sistemom in vetrnim elektrarnam na morju pa za 1 % (Ren21, 2019). Spodnje meje LCOE za hidroelektrarno so v letu 2018 tako znašale 47 $/MWh, za vetrno elektrarno na obali 56 $/MWh, za geotermalne sisteme 72 $/MWh, za fotovoltaične sisteme 85 $/MWh, za vetrne elektrarne na morju pa 127 $/MWh. Nekateri LCOE so močno primerljivi s klasičnimi elektrarnami, kjer se spodnja meja LCOE giblje pri 49 $/MWh. Vidimo, da so glede na LCOE nekateri OVE že konkurenčni klasičnim virom energije. Velik tehnološki in posledično ekonomski napredek je glede na LCOE v zadnjih letih naredila zlasti vetrna tehnologija, saj so se cene vetrnih turbin od leta 2017 znižale za 10–20 %, kar močno vpliva na višino investicije vetrnih elektrarn (Ren21, 2019).

Po omenjenih analizah bi optimalno proizvajanje električne energije v prihodnosti temeljilo na uporabi klasičnih in obnovljivih energetskih virov. Trenutno zasnovano elektroenergetsko omrežje tako v Sloveniji kot globalno ne prenese deleža OVE, večjega od 30 %, če vanj niso vključeni hranilniki energije oz. če njihove nestabilnosti v veliki meri ne pokriva uvoz iz drugih držav. Zato je nedvomno potreben kompromis s sočasno uporabo obnovljivih in klasičnih virov energije (Tetičkovič, 2019). Obstajajo tudi teorije o novih tehnologijah proizvajanja energije, ki bi lahko popolnoma spremenile smer razvoja. Eden izmed načinov je fuzijski reaktor, v katerem prihaja do zlivanja jeder brez radioaktivnih odpadkov in ki zagotavlja neomejene količine energije v objektu, vendar fizikalno še ni dovolj dovršen za komercialno rabo (Leskošek, 2019).

2 NAČINI SHRANJEVANJA ENERGIJE IN NJIHOVE LASTNOSTI

Splošne lastnosti energetskih virov so (Mihalič, 2011):

- Dostopnost – vključuje dostop do energetskih virov za proizvajanje energije ter cenovno dostopnost. Na slednjo lahko vplivamo z napredkom tehnologije, kar poveča npr. učinkovitost črpanja, izrabe energentov, novih tehnologij vrtanja, polj vetrnih elektrarn na morju itd.
- Predvidljivost – zajema informacijo in zanesljivo dobavo električne energije od energetskega vira, ko to potrebujemo.

- Energijska vsebnost oz. gostota – je količina energije, ki jo lahko shranimo na enoto mase (Wh/kg) ali volumna (Wh/L). Izračuna se kot razmerje shranjene energije in mase oz. prostornine.

Pojem shranjevanja energije temelji na uporabi OVE, saj lahko njihovo presežno energijo uporabimo kot energijo, potrebno za proces shranjevanja. S shranjevanjem bi lahko vplivali tako na njihovo cenovno dostopnost kot tudi na posledično predvidljivost sistema z velikim deležem OVE. Glede na trenutni razvoj OVE bodo sistemi za shranjevanje energije v prihodnosti pomemben del elektroenergetskega omrežja, saj OVE naredijo zanesljivejše in fleksibilnejše (Basmaji, 2019).

Sistemi za shranjevanje električne energije se med seboj razlikujejo. Imajo različne tehnične lastnosti, zato so primerni za različna področja. Njihove splošne vloge so (Basmaji, 2019):

- Shranjevanje presežne energije in posledično zniževanje cen električne energije v koničnem obdobju.
- Izboljšanje kakovosti električne energije z vplivanjem na korekcijo napetostne sinusoide, zagotavljanje neprekinjenega oskrbovanja odjemalcev v primeru napetostnih upadov, pomoč pri delovanju sistemov za neprekinjeno napajanje (angl. Uninterruptible power supply, v nadaljevanju UPS) in dovajanje energije v času preobremenitev.
- Vplivanje na ravnovesje med povpraševanjem in ponudbo za večjo tehnično optimizacijo in ekonomičnost delovanja sistema.

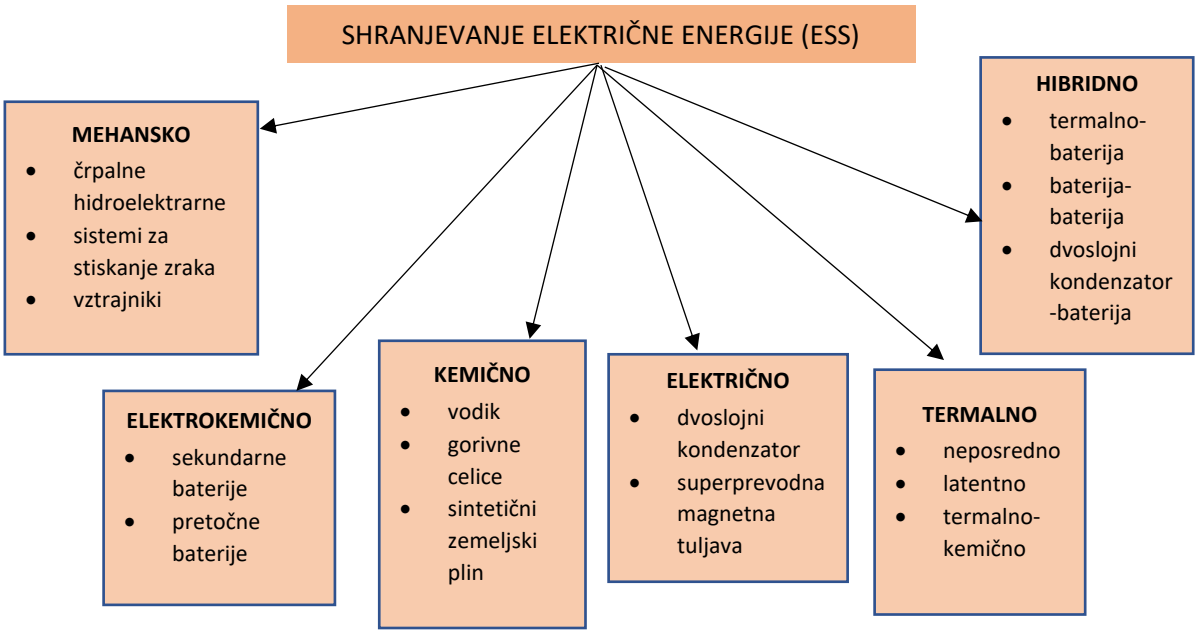
Shranjevanje električne energije ni izziv sodobnega časa, saj so se s tem ukvarjali že v razvojih elektroenergetskega sistema. V zadnjem času je to pomembno področje, s katerim se ukvarja vedno več strokovnjakov in podjetij (Vilman & Jerele, 2019).

Shranjevanje električne energije v manjši meri lahko koristi tudi omrežju brez integriranih OVE. Zmanjša lahko neravnovesje med povpraševanjem in ponudbo, ki škoduje stabilnostnim razmeram, kakovosti napetosti in frekvenci napajanja. Morda najpomembnejša vloga pa bi bila razbremenitev omrežja z lokacijsko razpršenimi hranilniki energije (International Electrotechnical Commission, 2011). Lokacije postavitve hranilnikov so odvisne od vira energenta, velikosti in geografske lege sistema. Nedvomno je najboljša izbira postavitev tik ob porabniku, saj s tem zmanjšamo izgube prenosa, vendar to običajno ni mogoče (International Energy Agency, 2014).

Poznamo različne vrste sistemov za shranjevanje električne energije. Zavedati se je treba, da ti sistemi ne proizvajajo električne energije, ampak shranjeno energijo oddajo v manjši količini, kot jo pridobijo, saj že za samo delovanje porabijo nekaj energije, prisotne pa so tudi izgube. V osnovi jih delimo na mehanske, elektrokemične, kemične, električne in toplotne shranjevalne sisteme, kot je prikazano na sliki 1, vendar pa so si nekateri glede na tehnološki princip delovanja zelo podobni. Večina načinov je še v začetnih razvojnih fazah,

nekateri so vsaj poskusno že vpeljani v sisteme, redki pa predstavljajo pomembno vlogo v elektroenergetskem sistemu. Mednarodna standardizacija IEC je razvita le za zrele sisteme, kot sta črpalna hidroelektrarna in nekatere sekundarne baterije. Za ostale sisteme obstajajo le posamezni standardi, ki pokrivajo posamezne komponente sistemov. Običajna vsebina standardizacijskih dokumentov hranilnih sistemov vsebuje terminologijo, osnovne značilnosti komponent in sistemov hranilnikov, opredelitev merilnih metod za primerjavo in tehnično ocenjevanje (zmogljivost, moč, čas praznjenja, življenjska doba, standardne velikosti itd.), protokole, električno in mehansko varnost, zahteve glede kakovosti električne energije, napetostne tolerance, frekvenčne nivoje in načine merjenja ter preskušanja (International Electrotechnical Commission, 2011).

Slika 1: Razvrstitev tehnologij shranjevanja energije



Prirejeno po Hannan, Hoqueb, Mohamed & Ayob (2017).

2.1 Mehansko shranjevanje energije

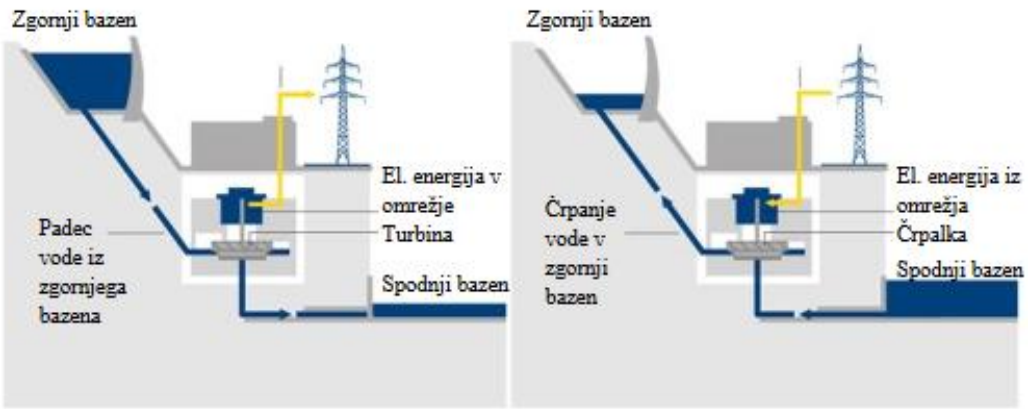
Mehansko shranjevanje energije temelji na pretvorbi v mehansko energijo, ki se v osnovi deli na kinetično in potencialno energijo. Mehanski sistemi temeljijo na zakonu o ohranjanju energije (Basmaji, 2019).

2.1.1 Črpalne hidroelektrarne

Hidroelektrarne so zelo pomemben in uporabljan elektroenergetski vir, ki pridobiva električno energijo preko potencialne energije vode. Poznamo več vrst hidroelektrarn: pretočne, akumulacijske, pretočno-akumulacijske in črpalne. Slednje so trenutno najbolj razširjena, zrela in učinkovita oblika shranjevanja energije, ki omogoča hranjenje velikih kapacitet energije. Teoretično je njihova pridelava električne energije enaka nič, vendar

imajo pomembne ekonomične in energetsko uravnalne učinke. Z njihovim prilagajanjem si lahko pomagamo pri korekcijah sinusoide, kar omogoča termoelektrarnam in jedrskim elektrarnam nenehno delovanje z največjim izkoristkom. V času nižje cenovne tarife električne energije oz. ko je energije dovolj, se vodo s pomočjo črpalk polni v zgornji zbiralnik (glej sliko 2). V koničnem času, ko energije primanjkuje, pa se vodo iz zgornjega zbiralnika spusti preko turbine v spodnji bazen, pri čemer se proizvaja električna energija (Kirbiš, 2016).

Slika 2: Princip delovanja črpalne hidroelektrarne



Vir: Kirbiš (2016).

Rezultat proizvodnje ČHE je tako rekoč ničen, vendar so z upoštevanjem izgub (upornost, izhlapevanje itd.) dejansko porabnik energije. Razlog za uporabo je ekonomska uspešnost, ki je odvisna od cen odkupne in prodane električne energije. Količina energije, ki jo je mogoče shraniti, je odvisna od fizične razpoložljivosti zbiralnikov, ti pa od naravne danosti in geografske lege. Sistem dosega večjo učinkovitost z večjimi količinami vode v zbiralniku oz. z večjo višinsko razliko med zgornjim in spodnjim bazenom. ČHE imajo v osnovi zelo nizko energijsko gostoto in predstavljajo velik poseg v okolje, saj imajo kemijski, hidrološki, klimatski, krajinski, gospodarski in biološki vpliv na vodotok in njegovo okolico. Gradnja je precej kompleksna in dolgotrajna, njeni denarni vložki pa so veliki, zlasti za izgradnjo zbiralnikov (Kirbiš, 2016).

Prednosti ČHE so v shranjevanju ogromne količine energije, hkrati pa pomagajo pri nadzoru napetostne frekvence v omrežju ter nudijo zalogo energije v primeru energetskega primanjkljaja, saj omogočajo hitre in velike spremembe moči. Izkoristek ČHE je med 70 % in 80 %, v najboljšem primeru pa tudi do 87 %. V primerjavi s termoelektrarnami imajo hiter odzivni čas (nekaj sekund).

Čeprav je sistem ČHE že zelo zrel, pa lahko v prihodnosti pričakujemo še manjše tehnološke izboljšave, ki bi izboljšale njegovo delovanje. Že sedaj lahko zasledimo ideje in nove metode, kot so (Kirbiš, 2016):

- Obmorski sistemi – ti naj bi kot medij uporabljali morsko vodo. Med drugim bi lahko koristili tudi plimo in oseko, kjer bi prihranili energijo za črpanje vode v zgornji zbiralnik, vendar pa bi v tem primeru morali generatorje zgraditi pod morsko gladino.
- Direktno črpanje – pridobivanje energije za črpanje vode s pomočjo vetrnih ali sončnih elektrarn.
- Podzemni rezervoarji – uporaba propadajočih in zapuščenih rudnikov za spodnje zbiralnike. S tem bi močno zmanjšali stroške izgradnje, hkrati pa bi nekoristni prostor primerno izkoristili.
- Decentralizirani sistemi – vključevanje manjših vodotokov (potoki, omrežja pitne vode, cevovodi za proizvajanje umetnega snega), ki so kljub svojim majhnim kapacitetam precej fleksibilni za omrežne korekcije.

ČHE najdemo po celem svetu. Njihova skupna moč je v letu 2016 znašala 127 GW s hranilno kapaciteto 740 TWh. V EU je bila leta 2016 njihova skupna moč 38,3 GW, predstavljala pa je 5 % hranilnih kapacitet energije (Kirbiš, 2016). Tudi v Sloveniji imamo primer ČHE v Avčah, ki je leta 2009 nastala predvsem zaradi potreb po izboljšanju kakovosti električne energije v Sloveniji. Instalirana moč znaša 185 MW v generatorskem režimu in 180 MW v črpalnem režimu. Na leto proizvede 426 GWh električne energije, za črpanje pa je porabi 553 GWh. Priključena je na 110 kW omrežno zanko v zahodnem delu Slovenije. Je ena izmed prvih reverzibilnih ČHE v Evropi s spremenljivo hitrostjo vrtenja v črpalnem režimu, kar omogoča učinkovitejše delovanje omrežnega sistema preko sistemskih rezerv, regulacije napetosti in kompenzacije jalove energije. Zgornji zbiralnik vode ima 2,2 milijona m^3 prostornine, zgrajen pa je v naravni kotanji in se razteza preko 15 hektarjev. V načrtih je še ČHE Kozjak, ki pa je še v nastajanju (Soške elektrarne Nova Gorica, brez datuma).

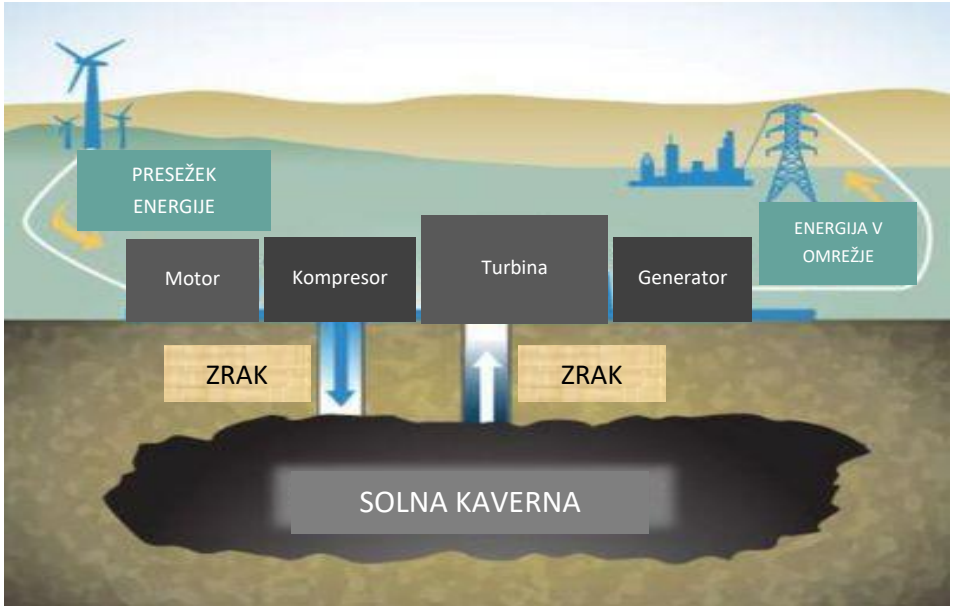
2.1.2 Shranjevanje energije s stiskanim zrakom

Glede na princip delovanja in zmogljivost so sistemi za stiskanje zraka (angl. Compressed-air Energy Storage, v nadaljevanju CAES) zelo podobni ČHE. Namesto črpanja vode s spodnjega na zgornji nivo v času presežne energije stisnemo zunanji zrak in ga pod tlakom shranimo v prostor pod zemljo. Ko električno energijo potrebujemo, se s pomočjo zgorevanja zemeljskega plina zrak v ekspanzijski turbini pod tlakom segreva in razširi ter s tem poganja generator, ki proizvaja energijo (glej sliko 3). Pri stiskanju zraka se sprošča toplota, zato v primeru njenega shranjevanja povečamo izkoristek sistema, obenem pa ni treba uporabljati zemeljskega plina za segrevanje. Shranjeno toplotno energijo lahko uporabimo pri izpušnih turbinah za ogrevanje dovodnega zraka ali pa pred vstopom v votlino za adiabatsko ekspanzijo, ki črpa toploto iz sistema toplote. Sproščeno toploto se pri postopku stiskanja odstrani s pomočjo vmesnega hladilnika ali pa se jo neposredno shrani v za to pripravljene materiale. Tako kot ČHE tudi ta temelji na cenovni arbitraži. S CAES sistemi si lahko pomagamo pri uravnavanju ponudbe in povpraševanja po energiji, pomagajo pri vključevanju OVE v sistem ter so v pomoč pri stabiliziranju in izboljšanju učinkovitosti elektroenergetskega sistema (Energy Storage Association, brez datuma c).

Poznamo več različic shranjevanja po omenjenem postopku. Ena izmed njih je shranjevanje energije s tekočim zrakom (angl. Liquid Air Energy Storage, v nadaljevanju LAES), kjer se električno energijo najprej uporabi za hlajenje zraka do njegovega utekočinjenja. Tega se običajno shrani v podzemnih jamah oz. solnih kavernah ter se ga nato s pomočjo zunanjega zraka ali toplotne energije spet vrne v plinasto stanje, pri čemer poganja turbino ter proizvaja električno energijo (Energy Storage Association, brez datuma c).

Investicijski stroški na enoto moči oz. energije naj bi za CAES manjšega obsega znašali 1300–1550 $/kW oz. 200–250 $/kWh, večjega obsega 400–1000 $/kW oz. 120 $/kWh, za LAES pa 900–2000 $/kW oz. 260–530 $/kWh. Ob tem se je treba zavedati, da 50–60 % začetne investicije znaša izgradnja podzemnih rezervoarjev. Letni stroški obratovanja in vzdrževanja pri sistemih CAES znašajo med 19 in 25 $/kW, pri sistemih LAES pa še nekaj več. S tehnološko dovršitvijo bi lahko zmanjšali toplotne izgube, izgube izgorevanja, mehanske izgube zaradi trenja in vibracij itd., s katerimi bi povečali učinkovitost sistema in znižali tudi stroške. Življenjska doba sistema je med 20 in 40 leti (Xing & Wang, 2013).

Slika 3: Princip delovanja sistema za stiskanje zraka v solnih kavernah s povezovanjem vetrnih elektrarn



Vir: Solar Media Ltd. (2017).

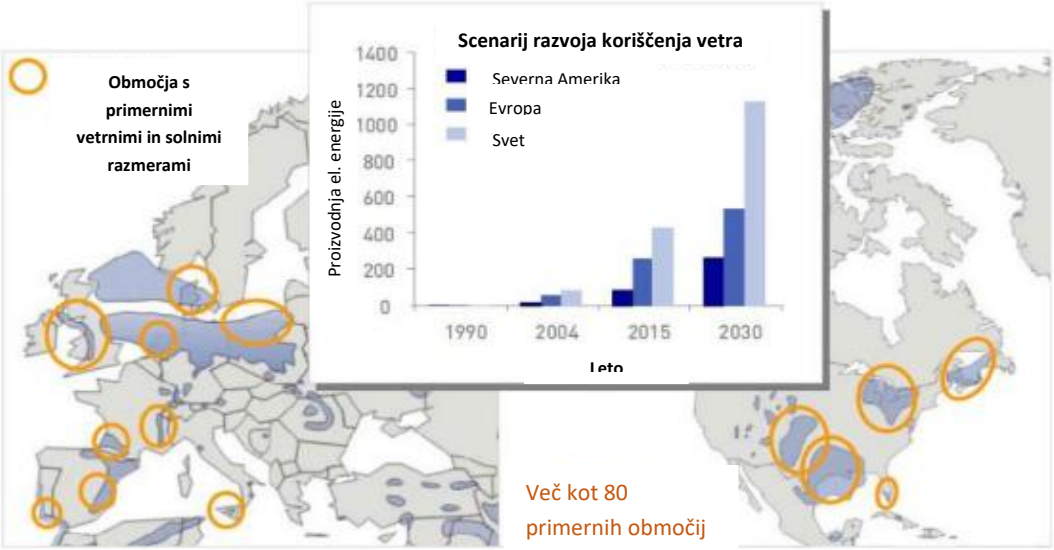
Glede na upravljanje s toploto, nastalo v procesu stiskanja, ločimo dve osnovni metodi:

- Diabatska – edina komercialno uporabljena metoda, ki toploto, nastalo pri ohlajanju stisnjenega zraka, odvede s pomočjo vmesnega hladilnika. Toploto se izloči v okolje, lahko pa se jo shrani in kasneje uporabi pri ekspanziji zraka, kar poveča učinkovitost sistema. Praktični izkoristek sistema znaša približno 40 % brez izkoriščanja odpadne toplote oz. 55 % z njenim izkoriščanjem. Teoretično bi lahko dosegli večjo učinkovitost sistema, tudi do 85 % (Energy Storage Association, brez datuma c).

- Adiabatska – toploto, nastalo pri stiskanju, se neposredno shrani v materiale, kot so beton, kamen, olje, tekoča sol itd. in se jo kasneje ponovno uporabi za segrevanje zraka. Učinkovitost sistema je višja kot pri diabatski metodi. Investicijski stroški so nedvomno višji, sistem pa je tudi kompleksnejši, zato metoda še ni bila uporabljena v komercialnem okolju (Rhenish-Westphalian Power Plant, 2010).

Slabost tega velikega sistema je tako kot pri ČHE umeščanje v prostor, saj predstavljajo velike komplekse, ki vplivajo na naravo in okolje. Visoki so tudi investicijski stroški izgradnje. Zaradi majhne gostote zraka pri skladiščenju so potrebna velika skladišča, zato so omejeni glede lokacije umestitve. Ustrezajo jim opuščena črpališča zemeljskega plina in umetno zgrajene solne kaverne, saj so te zelo prožne, imajo manjše izgube tlaka in v njih ne potekajo plinske reakcije. Na sliki 4 lahko vidimo, da je več kot 80 območij po svetu primernih za uvedbo tehnologije CAES v kombinaciji z vetrnimi elektrarnami. Z zgorevanjem zemeljskega plina povzročajo tudi emisije v okolju. Razvit je bil tudi sistem AA-CAES, ki pri svojem delovanju ne uporablja zemeljskega plina, zato je okolju prijaznejši, vendar pa je njegova učinkovitost nižja (Energy Storage Association, brez datuma c).

Slika 4: Vrisane potencialne lokacije v Evropi in ZDA za CAES



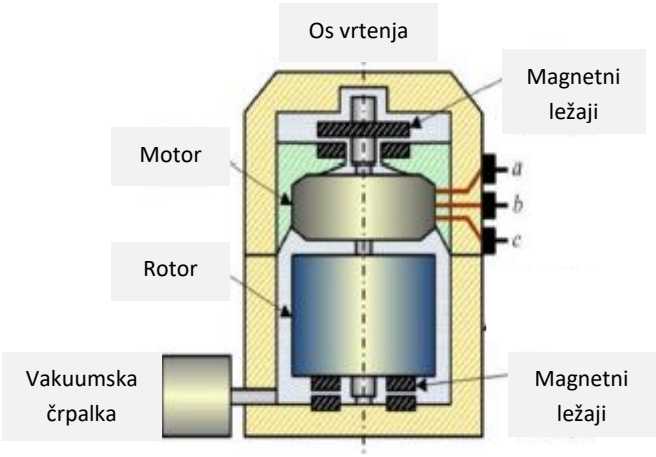
Vir: Xing & Wang (2013).

2.1.3 Shranjevanje energije z vztrajnikom

Najmanj razširjena mehanska metoda za shranjevanje električne energije je sistem za shranjevanje energije z vztrajnikom (angl. Flywheel Energy Storage, v nadaljevanju FESS). Električno energijo shranimo v obliki kinetične energije z vrtenjem mase (rotorja), ki je povezana z motorjem oz. generatorjem. Rotor, ki je običajno v obliki trdnega in votlega valja, se vrti v ohišju in ima nizko trenje ter je podprt z magnetnimi ležaji (glej sliko 5). V

času nizke cenovne tarife se energijo porabi za delovanje motorja, ki rotor poganja z visoko hitrostjo. Za optimizacijo razmerja med energijo in rotorjem se mora ta vrteti z največjo mogočo hitrostjo. V času primanjkovanja energije pa rotor poganja motor, ki s tem dobi vlogo generatorja. Tako se kinetična energija pretvori nazaj v električno, vztrajnik pa deluje kot mehanična baterija (Basmaji, 2019). Vztrajnost omogoča shranitev kratkoročne rezervne moči, saj se v primeru kratkega defekta rotor še naprej vrti ter s tem posredno proizvaja električno energijo (Energy Storage Association, brez datuma c). Sistem vztrajnika deluje v vakuumu zaradi večje učinkovitosti. Količina shranjene energije v vztrajniku je odvisna od oblike, mase in materiala ter vztrajnosti in hitrosti delovanja sistema. Izbira fizičnih lastnosti vztrajnika vpliva na zmogljivost sistema, saj ima ta lahko npr. jeklena platišča ali pa platišča iz ogljikovega kompozita. Izbira vpliva na stroške, težo, velikost in posledično na učinkovitost sistema, saj so kompozitna platišča lažja in močnejša, hkrati pa lahko dosežejo večje hitrosti vrtenja (Energy Storage Association, brez datuma c).

Slika 5: Struktura vztrajnika



Vir: Basmaji (2019).

Prednosti FESS so nizke potrebe po vzdrževanju, dolga življenjska doba (tudi do 175.000 polnih izpraznjevalnih ciklov) in prijaznost okolju. Najučinkovitejši je pri uporabi aplikacij z visoko močjo ter nizko porabo energije, ki zahtevajo veliko število ciklov, zato se jih trenutno uporablja v vesoljskih aplikacijah in sistemih za neprekinjeno napajanje. Imajo visoko energijsko gostoto in vzdržljivost, zato hitro menjavanje ciklov ne vpliva na zmogljivost sistema. Vztrajniki so veliko bolj temperaturno odporni kot baterije, z enostavnim merjenjem hitrosti vrtenja pa lahko natančno določimo količino shranjene energije. Slabosti vztrajnikov so kratkoročno shranjevanje energije, visoki stroški shranjevanja energije za daljše obdobje in omejenost dimenzioniranja, saj morajo zasedati določeno neprilagodljivo površino in prostornino večje velikosti (Energy Storage Association, brez datuma c).

2.2 Elektrokemično shranjevanje energije

Elektrokemično shranjevanje energije bi lahko poimenovali tudi shranjevanje energije v baterijah. Danes poznamo precej različnih vrst baterij, ki postajajo vedno bolj stroškovno učinkovite in zmogljivejše, kljub temu pa so za uporabo v večjih sistemih še predrage. Z leti uporabe se jim manjša tudi učinkovitost delovanja. Stroški shranjevanja v baterijah so v veliki meri sorazmerni s količino shranjene energije. V severozahodnem delu ZDA je mesečno povpraševanje po električni energiji približno 13.000 MW, za kar bi potrebovali 8.700.000.000 kWh shranjene električne energije. Če strošek akumulatorja znaša okroglih 100 $/kWh, bi v tem primeru strošek baterijskega skladiščenja energije predstavljal 870.000.000.000 $, kar je približno 50-kratna naložba vseh vetrnih in sončnih virov v regiji (Dragoon, 2018). Čeprav so baterije nameščene tudi v elektroenergetskih sistemih, so uporabnejše v manjših sistemih. Zlasti zanimive so na področju razvoja električnih avtomobilov. V osnovi jih delimo na sekundarne in pretočne baterije.

2.2.1 Sekundarne baterije

Želimo baterije z veliko energijsko gostoto, ki jih lahko hitro in neštetokrat napolnimo, so lahke in imajo majhne dimenzije. Te lastnosti ima lahko več različnih vrst baterij, posamezne vrste pa odlikuje le kakšna izmed njih. Lahko sicer naredimo enoten sistem različnih baterij, vendar bi s tem dobili kompleksen, prostorninsko velik in zelo drag sistem. Kot referenčno baterijo običajno vzamemo standardizirano klasično NiCd baterijo, ki je tako rekoč najosnovnejša baterija. V nadaljevanju so predstavljene le izbrane in največkrat uporabljene vrste baterij (Battery University, brez datuma).

a) Nikelj-kadmijeva baterija

Značilnosti te najosnovnejše nikelj-kadmijeve (v nadaljevanju NiCd) robustne baterije so dolga življenjska doba (1000–2500 ciklov), visoka stopnja samopraznjenja (20 %) in nizka cena (500–1500 $/kW). Zanjo bi lahko rekli, da je močan in tih »delavec«, saj dobro deluje v strogih delovnih pogojih z zmogljivimi obremenitvami. Priporočena je stalna uporaba baterije, saj se z neuporabo hitro izprazni, na celičnih ploščah pa se začnejo tvoriti kristali, ki zmanjšajo njeno učinkovitost. Ima sorazmerno nizko energijsko gostoto (50–75 Wh/kg). Je okolju neprijazna, saj vsebuje strupene kovine, zato so v nekaterih državah prepovedane za uporabo. Na Aljaski tehnologijo uporablja Golden Valley Electric Association, s katero s 27 oz. 46 MW omogoča 15- oz. 5-minutno podporo omrežju kot rezervna energija, stabilizator elektroenergetskega omrežja in regulator frekvence ter obremenitve (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

b) Nikelj-železo-vodikova baterija

Nikelj-železo-vodikova baterija (v nadaljevanju NiMH) ima v primerjavi z NiCd večjo energijsko gostoto (60–120 Wh/kg), hkrati pa so prijazne okolju. Imajo krajšo življenjsko dobo (300–1500 ciklov), so bolj občutljive in imajo visoko stopnjo samopraznjenja (30 %), ki jo lahko s pomočjo kemičnih dodatkov zmanjšamo, vendar na račun zmanjšanja

energijske gostote. Življenjska doba se jim v primeru ponavljajočih se visokih tokovnih obremenitev in visokih temperatur skladiščenja močno zmanjša. Ob polnjenju sproščajo večjo količino toplote, relativno dolg pa je tudi čas polnjenja. Zahtevajo polno praznjenje, da preprečijo nastanek škodljivih kristalov. Zaradi pozitivnega učinka na okolje jih skušajo vpeljati na področja, na katerih prevladujejo NiCd baterije, vendar pa so cenovno dražje od njih. Po mnenju strokovnjakov so NiMH baterije vmesni korak k vpeljavi litijevih baterij (Battery University, brez datuma).

c) Baterija s svinčeno kislino

Baterije so zelo ekonomične pri uporabi z velikimi močmi, posledično pa imajo veliko maso in velikost. Zasnovane imajo prenapetostne potenciale, ki preprečujejo prekomerno polnjenje, s katerim bi se začeli ustvarjati škodljivi plini. Baterij zato nikoli ne moremo povsem napolniti. Hraniti jih je treba v napolnjenem stanju. Popolna izpraznitev ni priporočena, saj se jim s tem krajša življenjska doba. Stopnja samopraznjenja je najboljša med polnilnimi baterijami (5 %). NiCd baterija v treh mesecih izgubi približno 40 % energije, kolikor je svinčena po enem letu. Nakupna cena je relativno nizka, vendar so v ponavljajočih nakupnih ciklih dražje od NiCd baterij (400–800 Wh/kg). Značilno je dobro delovanje pri visokih impulznih tokovih. Ima relativno kratko življenjsko dobo (200–300 praznjenj/polnjenj), ki pa je močno odvisna tudi od temperature. Priporočljivo obratovanje je pri 25 °C, pri čemer je predvidena življenjska doba 10 let. Obratovanje pri 33 °C naj bi jo skrajšalo tudi za 5 let. Svinčena baterija ima med polnilnimi baterijami najnižjo energijsko gostoto (30–50 Wh/kg), zaradi vsebnosti elektrolitov in svinca pa je okolju neprijazna (Battery University, brez datuma).

Objekt, ki za shranjevanje energije uporablja svinčeno baterijo, je BEWAG v Berlinu, ki lahko shrani do 80 MWh energije (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013). Praktično bi bile zaradi krajše življenjske dobe lahko namenjene rezervnemu napajanju in telekomunikacijskim aplikacijam (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010).

d) Litij-ionska baterija

Litij-ionska baterija (v nadaljevanju Li-Ion) je v zadnjem času verjetno najbolj prodajana baterija, ki je uveljavila v mobilnih telefonih in prenosnih računalnikih. Litij odlikuje največji elektrokemični potencial, posledica katerega sta visoka gostota energije (75–250 Wh/kg) in majhna teža (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013). Za njeno varno polnjenje potrebujemo zagotovljene varnostne ukrepe. Njena občutljivost se zmanjša z izdelanimi zaščitnimi tokokrogi, ki med polnjenjem omejijo največjo napetost vsake celice in preprečijo, da bi napetost pri praznjenju padla pod standardizirano mejo. Li-Ion baterije praktično ni potrebno vzdrževati, samopraznjenje pa je približno dvakrat manjše kot pri NiCd bateriji (10 %). Litij ni strupena snov, vendar pa ga je treba uporabljati s primesmi drugih kovin, ki so okolju neprijazne. Morda največjo omejitev Li-Ion baterij predstavlja hitro staranje, saj je že po letu dni opazno močno poslabšanje učinkovitosti. Staranje baterije se lahko zmanjša s shranjevanjem v hladnem prostoru in 40 % napolnjenostjo (Battery

University, brez datuma). Cena je relativno visoka (1200–4000 $/kW), vendar pa bi se z napredovanjem tehnologije in vgrajevanjem alternativnih materialov v prihodnosti lahko zmanjšala. Kljub temu ni predvidena za uporabo pri srednjih in velikih močeh. Proizvajanje baterij Li-Ion proizvede 70 kg CO_2/kWh, kar je veliko manj od alternativnih fosilnih goriv. Vendar pa so zaloge za proizvodnjo baterij omejene, zato bi se ob razširjeni uporabi močno zmanjšale (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010).

e) Baterija natrij-žveplo

Baterije natrij-žveplo (v nadaljevanju NaS) imajo visoko gostoto moči (150–240 W/kg) in visoko tehnološko učinkovitost (75–90 %). So okolju prijazne, saj ne izločajo emisij, hkrati pa je mogoče reciklirati 99 % celotne baterije. Pazljivost je potrebna le pri ravnanju z natrijem, ki lahko z nepravilnim rokovanjem postane nevarna snov. Njihova slabost je zahtevana visoka delovna temperatura (med 300 in 350 °C) in visoki investicijski stroški (2000 $/kW oz. 350 $/kWh). Znana večja inštalirana tehnologija NaS baterije je na Japonskem, kjer so stabilizirali dobavo električne energije na kmetijskem območju z večjim deležem vetrnih elektrarn. V ta namen so namestili 34 MW/245 MWh NaS sistem (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010).

Različica NaS baterije je baterija natrij-nikljev klorid brez emisij (angl. Sodium–nickel chloride battery with Zero Emissions, v nadaljevanju ZEBRA), ki ima nekoliko nižjo energijsko gostoto (120 Wh/kg) in gostoto moči (150 W/kg), vendar pa lahko deluje v temperaturnem območju -40–70 °C (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010).

f) Baterije kovina-zrak

Baterije kovina-zrak lahko štejemo kar kot posebno vrsto gorivnih celic, saj kovina predstavlja gorivo, zrak pa je oksidant. Med najbolj zanimivimi so aluminij-zrak in cink-zrak, obstajajo pa tudi druge kombinacije kovin z zrakom. Zaradi vsebnosti nestrupenih snovi so okolju prijazne in jih je mogoče popolno reciklirati. Izkoristek sistema je manjši od 50 % (Haisheng in drugi, 2009). Imajo visoko energijsko gostoto (110–3000 Wh/kg), so precej kompaktne in najcenejše med baterijami (100–250 $/kW). Glavne omejitve najdemo v zelo težkem in neučinkovitem polnjenju in kratki življenjski dobi z le nekaj sto cikli (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

Te vrste baterij so zelo zanimive za prihodnjo uporabo, vendar bo potreben napredek na področju njihovega polnjenja. Potencialne so za uporabo v električnih vozilih, saj so z baterijo aluminij-zrak že prevozili 1800 km med posameznim polnjenjem. Problem polnjenja bi lahko rešili kar z zamenjavo baterije in ponovnim recikliranjem. Ob tem se seveda pojavi vprašanje stroškovne učinkovitosti (AX elektronika d.o.o., 2014).

2.2.2 Pretočne baterije

Pretočne baterije pridobijo kemično energijo iz dveh sestavin, ločenih z membrano, ki se raztopita v tekočini znotraj baterije. V sistemu pride do dveh reakcij, kemične redukcije in oksidacije, ki se uporabljata za shranjevanje elektrokemične energije v tekočih raztopinah elektrolitov. Količina shranjene baterije je odvisna od prostornine elektrolita. Namesto da shranimo elektrokemične reaktante znotraj elektrod, se ti raztopijo v elektrolitski raztopini in shranijo v zunanje rezervoarje. To je tudi glavna razlika z običajnimi baterijami, kjer se energija shrani v elektrode (Energy Storage Association, brez datuma b).

Prednosti pretočnih baterij najdemo v dolgi življenjski dobi cikla, hitrem odzivnem času, nezahtevnem vzdrževanju in globini praznjenja, ki ne vpliva na življenjsko dobo, kot je to običajno pri ostalih baterijah. Odlikuje jih tudi visoka fleksibilnost za samostojno prilagajanje moči in shranjevanje energije, saj je moč mogoče prilagoditi bremenu, zmogljivost shranjevanja pa je mogoče neodvisno prilagoditi potrebam po shranjevanju energije v določeni aplikaciji. Tako lahko pretočne baterije vsaki aplikaciji zagotovijo optimiziran sistem shranjevanja energije. V primerjavi s sekundarnimi baterijami so precej varne za uporabo, saj se tudi v okvari in v primeru nenadzorovanega sproščanja energije tok zlahka zaustavi. Primerne so za uporabo z močjo od 10 kW do 10 MW, možna količina shranjene energije pa je od 500 kWh do 100 MWh. Znotraj tega območja so cenovno ugodne, saj so rezervoarji za skladiščenje in kontrola pretoka precej enostavni (Energy Storage Association, brez datuma b). Zaradi hitrega odzivnega čas (manj kot milisekunda) so primerne za zagotavljanje kakovosti električne energije. Slabost teh baterij je veliko nižja energijska gostota kot pri ostalih baterijah, zato so potrebni veliki elektrolitski rezervoarji z velikimi elektrodami in membranami, kar predstavlja visoke stroške izdelave (Weber in drugi, 2011). Pomanjkljivosti so tudi majhna gostota moči in strupenost nekaterih uporabljenih materialov. Poznamo več vrst pretočnih baterij, najbolj uporabljani in poznani na trgu pa sta (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010):

- Cink-bromid pretočna baterija (angl. Zinc-bromine flow battery, v nadaljevanju ZBR) – izkoristek sistema je približno 75 %. Primerna je za manjše sisteme shranjevanja, saj ima relativno majhno energijsko gostoto (75–85 Wh/kg) in več kot 2000 ciklov polnjenja. V Španiji so uporabili ZBR sistem z močjo 600 kW/3000 kWh za reguliranje cen električne energije v kombinaciji z 2,5 MW vetrnimi elektrarnami (Beaudin, Zareipour, Schellenberglabe & Rosehart, 2010).
- Vanadij redoks pretočna baterija (angl. Vanadium redox flow battery, v nadaljevanju VRB) – izkoristek sistema znaša 65–85 %, ob ustreznem vzdrževanju pa doseže veliko več kot 13.000 ciklov polnjenja. VRB sistemi so nameščeni na več lokacijah po svetu, vključno z 8 kW sistemom na Danskem in 250 kW sistemom v Utahu za reguliranje elektroenergetskega omrežja (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

2.3 Kemično shranjevanje energije

Osnova kemičnega shranjevanja energije sta vodik in sintetični zemeljski plin, saj predstavljata nosilca energije. Shranjevanje temelji na uporabi presežne energije za proizvodnjo vodika, iz katerega lahko kasneje izpeljemo več različnih načinov shranjevanja. Izkoristek procesa shranjevanja z vodikom in zemeljskim plinom je majhen, kljub temu pa omogočata shranjevanje velikih količin energije (TWh) za daljše časovno obdobje (sezonsko skladiščenje) (International Electrotechnical Commission, 2011). Vodikova industrija se v zadnjih letih precej razvija, kar pripomore tudi k razvoju vodikovih hranilnikov energije. Nekateri strokovnjaki so prepričani, da bo dolgoročno shranjevanje energije v prihodnosti odvisno od vodika in metana (Kirbiš, 2016).

2.3.1 Vodik

Vodik je energent z neomejenimi zalogami, ki ne povzroča nevarnih emisij oz. ni strupen. Sicer je v slabo zračenih prostorih lahko tudi eksploziven. V naravi neposredno ni dostopen, zato ga je treba pridelovati. Ima nizko gostoto energije glede na volumen, zato potrebuje ogromno prostora za skladiščenje. Vodik lahko pridobimo na sledeče načine: s preoblikovanjem zemeljskega plina, uplinjanjem in pirolizo, ki pri procesu izločata emisije CO_2, z elektrolizo, kjer je potrebna električna energija in s termokemično ločitvijo vode, fotoelektrolizo ter fotobiološkimi procesi, ki pa pridobijo energijo preko obnovljivih energentov (Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko, 2013). Večina trenutno uporabljenih metod temelji na pridelavi vodika iz cenejših fosilnih surovin (Kirbiš, 2016). Kljub slabemu izkoristku sistema shranjevanja je zanimivo, saj premore večje zmogljivosti skladiščenja v primerjavi z baterijami, ČHE ali CAES. Vodikov sistem lahko deluje po principu CAES, vendar ima od slednjega v isti prostornini več kot 50-krat večjo gostoto stisnjenega zraka. Učinkovitost cikla tega sistema je sicer manjša od 40 %, vendar pa je v prihodnosti obetavna možnost za dolgoročno skladiščenje v storitvah z redko menjavo cikla (Styczynski in drugi, 2011). Manjše količine vodika (nekaj MWh) lahko shranimo v večjih tlačnih posodah, velike količine pa se običajno shranjuje v večjih sistemih, kot so plinovodi ali podzemni prostori. Tam lahko shranimo tudi do 500.000 m^3 vodika, kar predstavlja 100 GWh električne energije (Energy Storage Association, brez datuma a).

V obratovanju je že nekaj hranilnikov vodikove energije v Aziji in Evropi. Kot primer je v Nemčiji vpeljan sistem Energiepark Mainz, ki porablja odvečno vetrno energijo za ustvarjanje vodikovega goriva. V Kanadi so leta 2018 odprli prvi večji hranilnik energije na območju Severne Amerike z močjo 2,5 MW, ki uporablja odvečno energijo iz OVE za proizvodnjo vodika. Ta pripomore k zagotavljanju stabilnosti in zanesljivosti električnega omrežja. V naslednjih letih bo zgrajenih še nekaj podobnih projektov (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, 2019).

Vodik lahko shranimo na več načinov (Kirbiš, 2016):

1. Elektroliza

Elektroliza je proces, ki s pomočjo enosmerne električne napetosti preko elektrolizerja na katodi in anodi povzroči oksidacijo in redukcijo kemijskih spojin. Poznamo več vrst elektrolize, ki se ločijo glede na vrsto uporabljenih elektrod in elektrolitov. Najbolj tipična je elektroliza vode, pri kateri pride do razcepa na vodik na katodi in kisik na anodi, ob tem pa se sprošča še toplota. Običajni izkoristek procesa je 50–80 % (Jurjevčič, Mori & Drobnič, 2012). Shranjeno energijo nato pridobimo z združevanjem vodika in kisika. Sisteme za shranjevanje energije z elektrolizo vode lahko najdemo v državah z velikim deležem hidroenergije, kot so Kanada, Norveška, Brazilija, Indija in Egipt. Metoda elektrolize vode zaradi nizkega izkoristka še ni primerna za komercialno rabo. Trenutno se jo preskuša in uporablja na področjih, kjer cena električne energije ne igra pomembne vloge. Z doseganjem večjega izkoristka elektrolizerja in zmanjšanem stroškov bi v prihodnosti lahko postala zanimiva metoda shranjevanja (Kirbiš, 2016).

2. Komprimiran vodik

Verjetno najbolj obetavna kemična kratkoročna oblika shranjevanja s komprimiranim vodikom je tehnično zelo enostavna. S kompresorjem stisnemo vodik in ga shranimo v rezervoarje. Slabost metode shranjevanja je nizka gostota energije, ki je odvisna od tlaka. Če povečamo tlak, se močno povečajo obratovalni stroški. Investicijski stroški hranilnikov komprimiranega vodika so ocenjeni med 600 in 2200 $/kg vodika. Največji delež obratovalnih stroškov predstavlja porabljena energija za stiskanje vodika.

Komprimiran vodik se lahko shrani v neprepustnih prostorih pod zemljo (izčrpana zajetja zemeljskega plina, solne votline, podzemni rovi, jame) ali v cevovodih, ki so dolgi tudi na stotine kilometrov. Podzemno shranjevanje vodika je najcenejša možnost shranjevanja večjih količin vodika, vendar pa je močno odvisna od lokacije in naravnih danosti. Ocenjeni stroški hranjenja na primernih legah se gibljejo okrog 30 $/kg vodika (Kirbiš, 2016).

3. Utekočinjen vodik

Nekoliko kompleksnejši proces utekočinjenja vodika za svoje shranjevanje potrebuje kombinacijo kompresorjev, toplotnih prenosnikov, ekspanzijskih motorjev in dušilnih ventilov, s pomočjo katerih se pridelan vodik ohlaja in posledično utekočini. Prednost tega načina shranjevanja vodika je nižja vrednost volumna na enoto energije kot pri komprimiranem vodiku. Hranilniki so nizkotlačni, vendar pa ceno močno zviša potrebna izolacija za preprečevanje izparevanja vodika. Investicijski stroški so ocenjeni med 400 in 720 $/kg vodika (Kirbiš, 2016).

4. Kovinski hidridi

S spremenjenim tlakom in z uporabo različnih kovin lahko omogočimo absorbiranje vodika na omenjeno zlitino, vendar je s trenutnimi metodami delež absorbiranega plina glede na volumen kovine zelo nizek. Ob tem je treba odvajati toploto, nastalo pri procesu. Shranjeni

vodik lahko nato pridobimo s povišanjem temperature in tlaka. Investicijski stroški omenjene metode, večino katerih predstavljajo stroški materiala, se gibljejo med 800 in 11.000 $/kg vodika (Kirbiš, 2016).

2.3.2 Gorivne celice

Gorivne celice so sistem, ki neposredno pretvori kemično energijo v električno energijo z visoko učinkovitostjo. Proces delovanja v gorivnih celicah je nasproten procesu elektrolize vode. Vodik kot gorivo oksidira, nato pa se sproščena kemijska energija pretvori direktno v električno energijo. Gorivne celice so po delovanju zelo podobne baterijam. V primerjavi z njimi energije ne izrabijo in zato ne potrebujejo dodatnega polnjenja, saj jo z stalnim dovodom vodika in kisika neprekinjeno zagotavljajo. Prednosti gorivnih celic so kompaktnost, visoki gostoti energije in moči, tiho delovanje in zanemarljive izgube pri prenosu, pretvorbi ter distribuciji (Kirbiš, 2016). Prijaznost do okolja je odvisna od uporabe snovi, saj lahko vodik pridobimo iz vode ali metana. Glavna težava vpeljave je zelo visok strošek izdelave celic (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013). V zadnjem času se je s tehnološkim napredkom cena nekoliko zmanjšala, vendar je še vedno previsoka za komercialno uporabo, saj znaša med 4500 in 11.000 $/kW, kar je tudi do 10-krat več v primerjavi z dizelskim generatorjem (670 $/kW–1500 $/kW). V prihodnosti bi jih lahko uporabili v vozilih, saj je njihov izkoristek približno 60 %, kar je precej višje kot pri bencinskih motorjih z 22 % izkoristkom oz. dizelskih motorjih s 45 % izkoristkom (Kirbiš, 2016).

Poznamo več vrst gorivnih celic, ki se razlikujejo glede na uporabljeni elektrolit in gorivo. Delovanje pri različnih delovnih temperaturah in moči v območju 1 kW–1 MW jim omogoča uporabo v elektrarnah, pri oskrbi hiš in v različnih tipih prevoznih sredstev (avtomobili, podmornice, vesoljska plovila itd.) (Kirbiš, 2016).

2.3.3 Sintetični zemeljski plin

Metoda shranjevanja s sintetičnim zemeljskim plinom (angl. Synthetic Natural Gas, v nadaljevanju SNG) za njegovo proizvajanje porablja električno energijo, vodo in CO_2. Najprej preko pojava elektrolize ustvarimo vodik, ki mu dodamo CO_2 in tako dobimo SNG. Elektrolizo dosežemo z dovajanjem električnega toka preko elektrod v vodi. Ta se nato deli na vodik in kisik, sočasno pa se sprošča tudi toplota, ki jo lahko koristno uporabimo za proizvodnjo vodne pare in kasneje za proizvodnjo vodika. V postopku metanacije vodiku dodamo CO_2 in tako nastane sintetični zemeljski plin, iz katerega lahko pridobimo metan, metanol ali višje alkohole in kemikalije. Omenjena metoda shranjevanja za zdaj še ne omogoča ekonomične vpeljave v elektroenergetski sistem, saj ima še previsoke naložbene stroške in prenizko učinkovitost pretvorbe (Ažman, 2016).

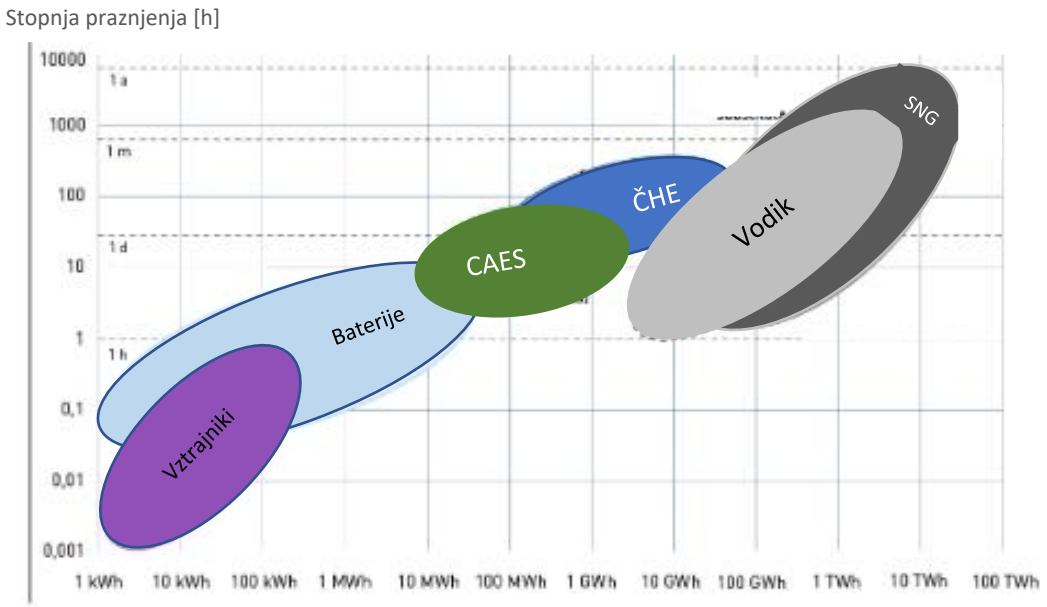
Metoda zagotavlja dolgoročno in obsežno skladiščenje, saj lahko hranimo energijo v velikih količinah daljše časovno obdobje. Primerna je tudi za sezonsko skladiščenje, saj ima zelo

nizko stopnjo praznjenja v času glede na količino shranjene energije (glej sliko 6). Velika prednost tega načina shranjevanja je neomejena možnost skladiščenja, saj lahko SNG shranjujemo v plinovodno omrežje (Ažman, 2016). V primerjavi z baterijskim shranjevanjem je skladiščenje večjih količin energije v tem primeru tudi do stokrat cenejše, v primeru nadaljnjega razvoja pa bi lahko številka še narasla. Proizvodnja vodikovih in metanskih goriv je lahko brez ogljikovih emisij, če jih ne pridelamo iz fosilnih surovin. Tehnološki postopek je pozitiven na več področjih (Paulus, 2014):

- Zmanjša emisije ogljika.
- Spodbuja obstoječo infrastrukturo zemeljskega plina za zagotavljanje sezonskega skladiščenja in distribucijo obnovljive energije.
- Zmanjša izpostavljenost tveganju cenovne ogroženosti zaradi zemeljskega plina, ki bi lahko postal predmet prihodnjih davkov na ogljik.
- Poveča učinkovitost in uporabnost OVE.

Tehnologija shranjevanja preko SNG je bila odkrita pred več kot 200 leti, vendar se je razvoj z leti ustavljal, danes pa ponovno postaja zanimiv. Energetska politika EU je naklonjena dolgoročnemu skladiščenju obnovljive energije v infrastrukturi zemeljskega plina in priznava njegovo pomembnost. V ZDA je mnenje povsem drugačno, saj te metode sploh ne priznavajo kot tehnologije za shranjevanje energije (Dragoon, 2018). Njena največja slabost je slabša tehnična učinkovitost sistema, saj je običajni izkoristek približno 35–55 % (Paulus, 2014). S koriščenjem odpadne toplote bi lahko sistem teoretično dosegel tudi 80 % izkoristek (Ažman, 2016).

Slika 6: Čas praznjenja in kapaciteta shranjevanja energije



Vir: Paulus (2014).

Metoda shranjevanja se preskuša v Stuttgartu, kjer so v projekt vložili 4 milijone $ (Paulus, 2014). Za merjenje upravičenosti takšnih obratov so bili razviti nekateri poslovni modeli. Ena izmed raziskav napoveduje 14 % donosnost naložbe. Druga študija ocenjuje strošek naložbe v višini 1670 $/kW z 9 % obrestno mero. Komercialna izvedba naj bi bila upravičena le v primeru oproščenih davkov in stroškov distribucije (Paulus, 2014).

2.4 Električno shranjevanje energije

Električno shranjevanje energije je edini način, pri katerem ne pride do pretvorbe med seboj različnih si energij, ampak električno energijo le shranimo v električne komponente.

2.4.1 Dvoslojni kondenzator

Elektrokemijski dvoslojni kondenzatorji oz. superkondenzatorji so nekakšna vrzel med klasičnimi kondenzatorji, uporabljenimi v elektroniki in splošnimi baterijami. Njihovi cikli delovanja so zelo stabilni. V primerjavi z običajnimi kondenzatorji so precej zmogljivejši in imajo večjo kapaciteto shranjevanja. Kljub temu bi lahko v prihodnosti sistem tehnološko še nadgradili (International Electrotechnical Commission, 2011).

Kondenzator shranjuje energijo v obliki električnega polja. V osnovi je sestavljen iz dveh elektrod, ki ju ločuje dielektrik oz. neprevodna plast. Če ga priključimo na napetost, se na elektrodah vzpostavita nasprotna si naboja in tam ostaneta tudi po tem, ko odstranimo napetostni vir. Superkondenzator hrani energijo v raztopini elektrolitov. Njegove elektrode imajo večjo površino, med njimi pa je majhna razdalja (manj kot 1 nm), zato omogočajo zelo velike kapacitete in posledično veliko količino shranjene energije (Haisheng in drugi, 2009).

Glavna prednost superkondenzatorjev so visoke kapacitivnosti (več 1000 faradov), možnost zelo hitrega polnjenja in praznjenja zaradi nizkega notranjega upora in trajnost (tudi do 1 milijon ciklov polnjenja). Druge pozitivne lastnosti so visoka zanesljivost, zanemarljivo vzdrževanje, delovanje v širokem temperaturnem območju in v različnih okoljih (vročem, hladnem in vlažnem), enostavna reciklaža ter prijaznost do okolja. Običajna učinkovitost sistemov je 90 %. Superkondenzatorji se uporabljajo zlasti pri aplikacijah, ki potrebujejo visoko zmogljivost in imajo veliko število ciklov kratkega polnjenja in praznjenja. Zasledimo jih lahko v potrošniški elektroniki in v sistemih za neprekinjeno napajanje za pokritje kratkih napetostnih izpadov. V prihodnosti bi jih lahko uporabili v električnih avtomobilih kot varovalni sistem za pospeševanje in regenerativno zaviranje (International Electrotechnical Commission, 2011). Superkondenzatorji niso primerni za shranjevanje energije v daljših časovnih obdobjih, saj imajo visoko stopnjo samopraznjenja in nizko energijsko gostoto (0,05–30 Wh/kg). Slabost sistema je tudi njegova visoka cena na enoto energije (300–2000 $/kWh) (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

2.4.2 Superprevodna magnetna tuljava

Superprevodna magnetna tuljava (angl. Superconducting Magnetic Energy Storage, v nadaljevanju SMES) je edina znana metoda, ki shranjuje električno energijo kot neposredni električni tok, ki kroži po tuljavi tako rekoč neskončno dolgo. Izgub v procesu skoraj ni. Deluje po elektrodinamičnem principu, ko v superprevodno tuljavo dovedemo enosmerni tok, zaradi katerega se ustvari magnetno polje, kamor se shrani električna energija. Osnovna komponenta sistema je tuljava iz superprevodnega materiala, ki je potopljena v tekoči helij, ki predstavlja hladilno sredstvo s temperaturo 4,2 K. Še boljši, vendar dražji, je super-tekoči helij s temperaturo 1,8 K. Glavni deli SMES sistema so superprevodna enota, kriostatski sistem (hladilnik in vakuumsko izolirana posoda) in sistem za pretvorbo energije (Haisheng in drugi, 2009).

V SMES ni vgrajenih premičnih delov, zato sta zanesljivost sistema in čas trajanja skladiščenja energije odvisna od hladilnega sistema. Glavne prednosti sistema so zelo hiter odzivni čas, saj lahko zahtevano moč dobimo skoraj v trenutku, visok izkoristek (od 85 % do 90 %) in visoka izhodna moč. Slednja je na razpolago le za kratek čas. Stopnja samopraznjenja je v primerjavi z baterijami nizka. Ima dolgo življenjsko dobo, zato je primerna za stalno delujoče aplikacije s polnim ciklom trajanja. Velike superprevodne tuljave z več kot 10 MW moči lahko zasledimo v detektorjih za visoko energetske fizikalne poskuse in jedrsko fuzijo. Primerne so tudi za reševanje kakovosti električne energije za velike industrijske odjemalce (International Electrotechnical Commission, 2011). Glavni omejitvi SMES sta visoka cena na proizvedeno enoto energije (1000–10.000 $/kWh) in negativen vpliv na okolje, saj je v njeni bližini prisotno močno magnetno polje (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

2.5 Termalno shranjevanje energije

Princip delovanja termalnih hranilnih sistemov (angl. Thermal Energy Storage, v nadaljevanju TES) temelji na segrevanju ali hlajenju akumulacijskega medija. Uporabimo jih lahko v kombinaciji s sončnimi elektrarnami, saj se ob sončnem vremenu toplotna energija shranjuje, v primeru slabega vremena pa hranilni sistemi poskrbijo za potrebno energijo. Temperaturno območje shranjevanja energije je od -40 °C do več kot 400 °C (IEA-ETSAP & IRENA, 2013). Po principu delovanja razvrstimo termalno shranjevanje energije na (IEA-ETSAP & IRENA, 2013):

- Neposredno shranjevanje toplotne energije – gre za shranjevanje toplotne energije s segrevanjem oz. hlajenjem tekočega ali trdega medija (voda, pesek, staljena sol, kamnine). Najbolj priljubljen vir je zaradi nizke cene voda. Ti sistemi niso primerni za velike in zmogljivejše sisteme, saj so mediji shranjevanja omejeni s specifično toploto skladiščenja. Običajne kapacitete znašajo med 10 in 50 kWh/t, izkoristek skladiščenja pa je med 50 in 90 %, odvisno od toplotne akumulacije medija in uporabljene izolacije.

- Latentno shranjevanje toplotne energije (angl. Phase Change Materials, v nadaljevanju PCM) – kot način shranjevanja energije uporabimo spremembo agregatnega stanja (običajno temelji na spremembi trdno/tekoče), ki lahko premore večje kapacitete skladiščenja, okrog 100 kWh/m^3. Učinkovitost tega načina skladiščenja je med 75 in 90 %. Najbolj znani metodi sta shranjevanje z ledom in vodno paro.
- Termalno-kemično shranjevanje (angl. Thermochemical Storage, v nadaljevanju TCS) – za shranjevanje energije se uporabljajo kemične reakcije in sproščanje toplotne energije. Premorejo največje zmogljivosti skladiščenja med TES, saj lahko uskladiščimo tudi do 250 kWh/t z delovnimi temperaturami do več kot 300 °C in izkoristkom med 75 in 95 %.

TES metode so uporabljene v gospodinjskih sistemih, pri daljinskem ogrevanju in v industriji. Energijska gostota je pri neposrednem shranjevanju zelo nizka (3- do 5-krat nižja kot pri PCM in TCS sistemih), zato potrebujemo velike količine toplotne energije za pridobivanje smiselnih količin električne energije. Z uporabo neposrednega shranjevanja je metoda relativno poceni, saj stroški shranjevanja znašajo med 0,1 in 11 $/kWh. Odvisni so od velikosti, uporabe in tehnologije toplotne izolacije. PCM in TCS sistemi so dražji, zato so trenutno ekonomični le v aplikacijah z velikim številom ciklov. Cena enote energije PCM sistemov znaša med 10 in 55 $/kWh, medtem ko se pri TCS giblje med 8 in 110 $/kWh. Vseeno pa le PCM in TCS sistemi predstavljajo potencial za razširjeno uporabo večjih količin energije, saj so v primerjavi z drugimi sistemi cenovno relativno ugodni. Termalni sistemi so lahko centralizirani (pri daljinskem ogrevanju oz. hlajenju, v aplikacijah velikih industrijskih naprav) ali distribuirani (pri ogrevanju oz. hlajenju prostorov ali vode) (IEA-ETSAP & IRENA, 2013).

V eni izmed raziskav je bilo ocenjeno, da bi s povečano uporabo skladišč toplotne energije v gradbenih in industrijskih sektorjih v Evropi lahko prihranili približno 1,4 milijona GWh energije na leto in v istem obdobju zmanjšali emisije CO_2 za 400 milijonov ton (IEA-ETSAP & IRENA, 2013).

Primeri načinov in različic TES:

- Shranjevanje toplotne energije pod zemljo (angl. Underground Thermal Energy Storage, v nadaljevanju UTES)

  UTES vključuje enega izmed sledečih načinov (IEA-ETSAP & IRENA, 2013):

  - Skladiščne vrtine – vertikalni toplotni izmenjevalci pod zemljo prenašajo toplotno energijo v glino, pesek, kamnine. Običajno so v kombinaciji s toplotnimi črpalkami.
  - Vodonosno skladišče – skladišče toplotne energije predstavlja podzemni vodoprepustni sloj. Večinoma je uporabljeno za poletno hlajenje stavb in industrijskih procesov.

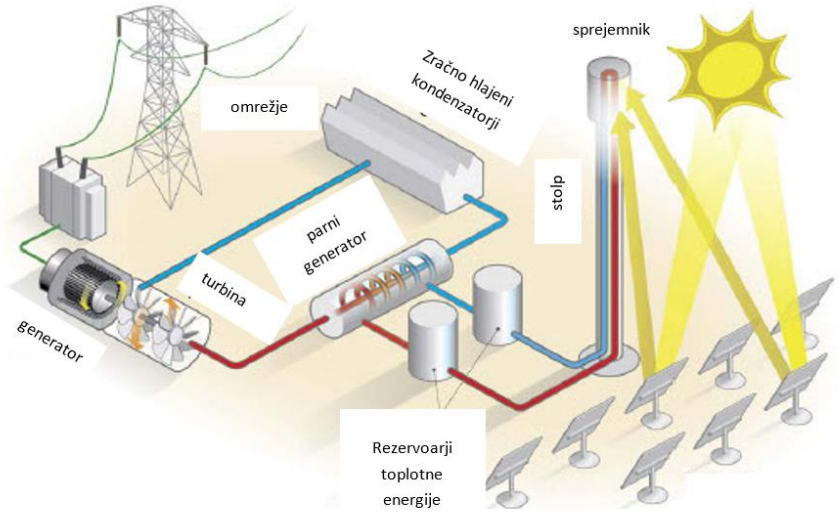
- Skladiščenje v votlinah in jamah – skladiščenje toplotne energije v podzemnih jamah je močno odvisno od naravnih danosti, saj so drugače sistemi omejeni zaradi velikih naložbenih investicij gradnje.

V Nemčiji so vpeljali sistem shranjevanja toplotne energije pod zemljo, ki ogreva 320 stanovanj in njihovo vodo s skupno površino prostorov 30.400 m^2 v kombinaciji s sončnim daljinskim ogrevanjem. Sončno energijo, ki se jo uporabi neposredno ali pa se jo shrani v podzemno skladišče z vodo s prostornino 6000 m^3, zbirajo preko kolektorjev s površino 2761 m^2. Dodatno ogrevanje zagotavlja še toplotna črpalka, ki je povezana z vodnim skladiščem, od koder črpa energijo za delovanje. Neposredna povezava daljinskega sistema in ogrevalnih naprav v hišah preprečuje padce temperature na toplotnih izmenjevalcih. Sistem lahko za zdaj pokrije več kot 50 % letne porabe toplotne energije v stanovanjih, kar predstavlja približno 2000 MWh energije (IEA-ETSAP & IRENA, 2013).

- Tehnologija staljene soli

V tej metodi shranjevanja je medij za prenos toplote staljena sol, ki se tali pri 131 °C. Trenutno je v uporabi sistem s sončnim stolpom, ki je prikazan na sliki 7. Hladno staljeno sol se prečrpa do sprejemnika, kjer se s pomočjo sončne energije segreje in steče v vroč hranilnik, od koder gre proti toplotnemu izmenjevalcu. Tam se toplota prenese na vodo in nastane para, ki vrti turbino za proizvajanje električne energije. Staljena sol nato steče nazaj v hladilno shranjevalno posodo, kjer se jo da shraniti in kasneje uporabiti za pridobivanje električne energije. Temelj delovanja sistema je sonce, vendar toplotno shranjevanje staljene soli omogoča napravi, da še več ur po pomanjkanju sončne svetlobe zanesljivo proizvaja električno energijo (Cleanleap Pty. Ltd., brez datuma).

Slika 7: Princip delovanja termalnega shranjevanja energije s tehnologijo staljene soli



Vir: Cleanleap Pty. Ltd. (2019).

- Kriogeno shranjevanje energije (angl. Cryogenic Energy Storage, v nadaljevanju CES)

  Pri kriogenem shranjevanju pridobimo energijo za delovanje procesa v času konične moči iz OVE, iz odpadnih dimnih plinov ali z neposrednim mehanskim delom vodnih oz. vetrnih turbin. Z njeno pomočjo se zavre kriogen (tekoči dušik ali tekoči zrak), ki se ga nato uporabi za pridobivanje električne energije s kriogenim motorjem. CES lahko uporabimo tudi za hlajenje in klimatske naprave. Ima relativno visoko energijsko gostoto (100–200 Wh/kg), nizke stroške na enoto energije in dolgo skladiščno dobo, hkrati pa je prijazen okolju. Slabost sistema je nizek izkoristek, s 40–50 % učinkovitostjo (Špindler, 2016).

2.6 Hibridno shranjevanje energije

Hibridne metode shranjevanja (angl. Hybrid Electric Energy Storage, v nadaljevanju HEES) so zaradi kompleksnosti trenutno šele v razvojni fazi. Združujejo dva ali več različnih (zgoraj naštetih) načinov shranjevanja v enoten sistem. S hibridnimi sistemi bi dobili sisteme, ki vsebujejo tako »sprinterja« kot »maratonca«. Idejni načrti običajno vsebujejo dva različna hranilna sistema. Prvi naj bi bil namenjen pokrivanju povpraševanja po energiji in hitremu prilagajanju obremenitvi, zato bi potreboval hiter odzivni čas, visok izkoristek in dolgo življenjsko dobo. Drugi hranilnik bi dopolnjeval prvega z nizko stopnjo samopraznjenja in zmanjševanjem cen na enoto energije. Z uporabo takega sistema bi se povečala učinkovitost procesa in življenjska doba sistema, saj ta deluje bolj optimizirano. Prednost hibridnega sistema so tudi zmanjšani investicijski stroški v primerjavi izgradnje ločenih sistemov shranjevanja, saj si lahko sistema delita večino elektronike in povezav. Posledično bi bili tudi stroški vzdrževanja manjši (Bocklisc, 2015).

V idejnih zasnovah poznamo tri najosnovnejše vrste HEES (Dufresne Private Ltd., brez datuma):

- TES/baterija – shranjevanje toplotne energije je veliko cenejše kot elektrokemično shranjevanje, kar omogoča manjšo velikost baterije.
- Baterija/baterija – poznamo veliko vrst baterij z različnimi lastnostmi. »Boj za prevlado« med pretočnimi baterijami z nizko ceno in dolgo življenjsko dobo ter hitro odzivnimi Li-Ion baterijami z visoko energijsko gostoto bi se lahko uspešno končal z njuno združitvijo.
- Superkondenzator/baterija – superkondenzatorji dopolnjujejo baterije s hitrimi odzivi, daljšo življenjsko dobo in hitrejšim polnjenjem.

Kljub privlačnemu delovanju pa so za vzpostavitev HEES najprej potrebne tehnološke izboljšave posameznih sistemov shranjevanja. Kombinirani sistemi bi bili pri reguliranju porabe energije precej zapleteni, visoki investicijski stroški in velikost sistema pa bi lahko bili precejšnje ovire za komercialno uporabo (Dufresne Private Ltd., brez datuma).

3 PRIMERJAVA HRANILNIH SISTEMOV

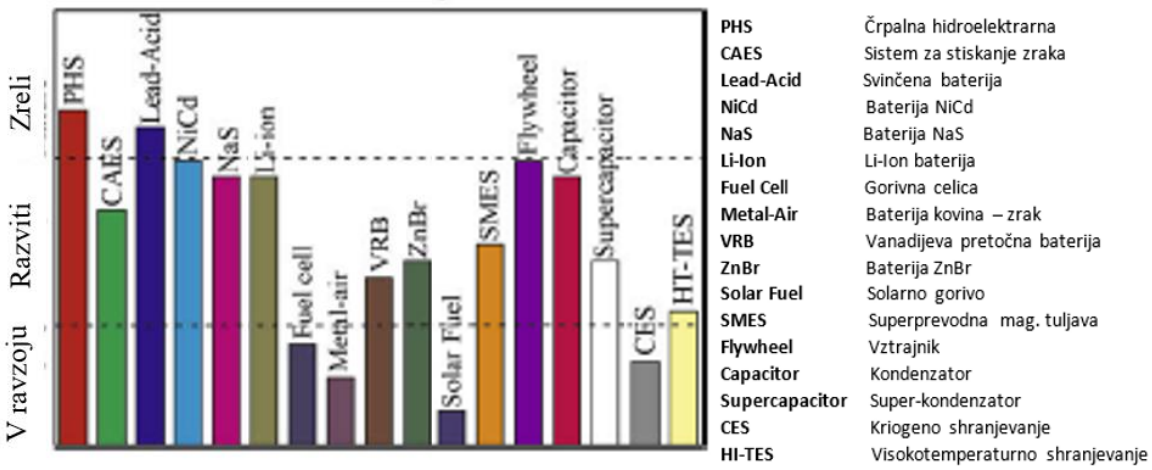
Hranilniki energije se po svojih tehničnih karakteristikah med seboj precej razlikujejo, zato je njihova uporaba omejena glede na vrednosti parametrov, ki jih dosegajo. Najbolj razvite med večjimi hranilnimi sistemi so črpalne hidroelektrarne, med manjšimi pa sekundarne baterije (Haisheng in drugi, 2009). Nedvomno z njimi ne moremo optimizirati vseh nalog, ki jih omrežni sistem zahteva. Nekateri hranilniki so tehnično zelo učinkoviti, vendar neekonomični. Drugi so neučinkoviti, vendar jim neomejena količina energenta omogoča konkurenčno delovanje. Tretji so ekonomični, vendar imajo zelo kratko življenjsko dobo. In spet naslednji so tako tehnično kot ekonomsko smiselni, vendar pri svojem delovanju negativno vplivajo na okolje s strupenimi izpusti. Ključno pri tem je, da znamo izluščiti tehnološke, naravovarstvene in stroškovno najučinkovitejše hranilne metode. Te imajo različne stopnje tehnične zrelosti, zaradi česar so sistemi bolj tehnično in ekonomsko dovršeni. Kombinirana uporaba različnih sistemov v teoriji pokrije vse tehnološke zahteve, vendar pa je za zdaj preveč kompleksna za praktično vpeljavo. V obdobju zavzemanja za čistejše okolje bodo tako v ospredje prišli čisti sistemi, ki bodo imeli prednost pred stroškovno učinkovitimi sistemi. Nedvomno pa bosta za končne uporabnike in lokalna omrežja prišla do izraza investicijski strošek in nemotena dobava energije (Haisheng in drugi, 2009).

3.1 Tehnična zrelost hranilnih sistemov

Glede na tehnično zrelost razvrstimo EES v tri kategorije, kar je prikazano tudi na sliki 8 (Haisheng in drugi, 2009):

- Tehnološko zrele tehnologije – sistemi, ki se uporabljajo že več kot 100 let in so tehnološko dovršeni: črpalne hidroelektrarne in baterije s svinčeno kislino.
- Tehnološko razvite tehnologije – razviti in komercialno dostopni sistemi, ki jih je mogoče tehnološko še nadgraditi: sistemi za stiskanje zraka, sekundarne baterije, pretočne baterije, superprevodne magnetne tuljave, superkondenzatorji, vztrajniki, vodikovi sistemi in sistemi za termalno shranjevanje energije.
- Tehnologije v razvoju – tehnično smiselni sistemi, ki potrebujejo velik napredek za komercialno uporabo, zlasti z zmanjševanjem celotnih stroškov: gorivne celice, baterije kovina-zrak in kriogeno shranjevanje energije.

Slika 8: Primerjava hranilnih sistemov glede na tehnično zrelost



Vir: Haisheng in drugi (2009).

3.2 Uporaba hranilnih sistemov glede na nazivno moč in čas praznjenja

Glede na nazivno moč in posledično uporabo lahko EES razvrstimo v tri kategorije, kar je prikazano v tabeli 2 (Haisheng in drugi, 2009):

- Upravljanje z energijo – storitve zahtevajo nekajurno ali celodnevno obratovanje z visokimi močmi, od 10 do 100 MW, kamor sodijo črpalne hidroelektrarne, sistemi za stiskanje zraka, termalni sistemi shranjevanja, vodikovi sistemi, nekatere sekundarne in pretočne baterije ter gorivne celice.
- Kakovost električne energije – nekatere storitve potrebujejo hitre odzive (milisekunde) z močmi, manjšimi od 1 MW, za ukrepanje na napetostne padce, zmanjšanje utripanja napetosti in kratkotrajne izpade električne energije. V to kategorijo spadajo vztrajniki, superprevodne magnetne tuljave, superkondenzatorji in nekatere sekundarne baterije.
- Premostitvena moč – storitve z močmi od 100 kW do 10 MW potrebujejo relativno hitre odzive (manj kot sekunda) in počasno praznjenje (nekaj ur), zato sem uvrščamo nekatere sekundarne baterije, pretočne baterije in gorivne celice.

Glede na stopnjo samopraznjenja (glej tabelo 2) razdelimo sisteme v tri kategorije (Haisheng in drugi, 2009):

- Majhna stopnja samopraznjenja: v to kategorijo uvrščamo gorivne celice, pretočne baterije, baterije kovina-zrak in črpalne hidroelektrarne ter sisteme za stiskanje zraka.
- Srednja stopnja samopraznjenja: značilna je za termalne hranilnike energije in sekundarne baterije (s svinčeno kislino, NiCd, Li-Ion).

- Velika stopnja samopraznjenja: samopraznjenje sistemov je med 10 in 40 % na dan, zato so primerni le za kratka ciklična obdobja: superprevodne magnetne tuljave, superkondenzatorji in nekatere sekundarne baterije. Izstopajo vztrajniki, ki se v nekaj urah popolnoma izpraznijo.

Tabela 2: Tehnične karakteristike hranilnih sistemov

SISTEM	**Stopnja moči**	**Čas praznjenja**	**Stopnja samopra-znjenja v 1 dnevu**	**Doba skladiščenja**	**Investicijski stroški**		
Enote	**MW**	**sekunde, minute ali ure**	**%**	**s, min, h, dan, mesec**	**$/kW**	**$/kWh**	**$/kWh -na cikel**
Črpalna hidroelektrarna	100–5000	1–24 ur +	~ 0	ure–več mesecev	600–2000	5–100	0,1–1,4
Sistem za stiskanje zraka	5–300	1–24 ur +	0,1	ure–več mesecev	400–800	2–5	2–4
Svinčena baterija	0–20	sekunde–več ur	0,1–0,3	minute–več dni	300–600	200–400	20–100
Baterija NiCd	0–40	sekunde–več ur	0,2–0,6	minute–več dni	500–1500	800–1500	20–100
Baterija NaS	0,05–8	sekunde–več ur	~ 20	sekunde–več ur	1000–3000	300–500	8–20
Baterija Li-Ion	0–0,1	minute–več ur	0,1–0,3	minute–več dni	1200–4000	600–2500	15–100
Gorivna celica	0–50	sekunde–24ur +	~ 0	ure–več mesecev	10000+	-	6000–20000
Baterija kovina-zrak	0–0,01	sekunde–24 ur +	~ 0	ure–več mesecev	100–250	10–60	-
Vanadijeva pretočna baterija	0,03–3	sekunde–10 ur	0,1	ure–več mesecev	600–1500	150–1000	580
Solarno gorivo	0–10	1–24 ur +	~ 0	ure–več mesecev	-	-	-
Superprevodna mag. tuljava	0,1–10	milisekunde–8 sekund	10–15	minute–več ur	200–300	1000–10000	-
Vztrajnik	0–0,25	milisekunde–15 minut	100	sekunde–več minut	250–350	1000–5000	3–25
Superkondenza-tor	0–0,3	milisekunde–60 minut	20–40	sekunde–več ur	100–300	300–2000	2–20
Visokotempera-turno termalno shranjevanje	0–0,06	1–24 ur +	0,05–1	minute–več mesecev	-	30–60	-
Kriogeno shranjevanje	0,1–300	1–8 ur	0,5–1	minute–več dni	200300	3–30	2–4

Vir: Haisheng in drugi (2009).

3.3 Stroški hranilnih sistemov

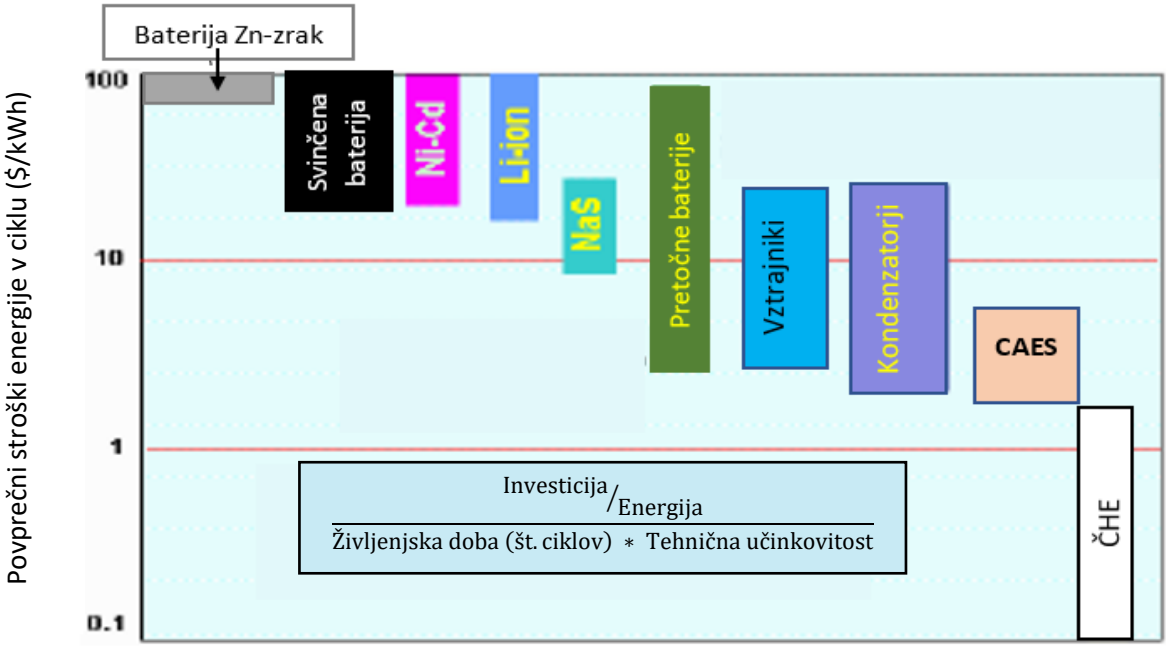
Pri hranilnih sistemih nas običajno zanimajo investicijski stroški in povprečni stroški energije v ciklu, saj lahko z njihovo pomočjo najbolje primerjamo stroškovno učinkovitost sistemov (glej tabelo 2). Večji hranilni sistemi, kot so črpalne hidroelektrarne, sistemi za stiskanje zraka, vodikovi sistemi in termalni sistemi že za samo izgradnjo potrebujejo velike investicije, vendar pa je njihova življenjska doba daljša, hkrati pa lahko shranjujejo veliko več energije kot npr. baterije, ki so z vidika stroškov izdelave veliko cenejše. Verjetno najboljša opredelitev so povprečni stroški energije v ciklu oz. med posameznim polnjenjem, kjer delimo strošek na enoto energije z življenjsko dobo cikla. V vseh stroškovnih pogledih negativno izstopajo gorivne celice (Haisheng in drugi, 2009).

Stroške obratovanja hranilnih sistemov sestavljajo stroški, ki so povezani z energijo in tisti, ki zajemajo delovno silo, vzdrževanje hranilnikov, nadomestne komponente hranilnikov in stroške razgradnje in odstranjevanja. V idealnem primeru bi morali pogosto uporabljeni hranilniki imeti visoko učinkovitost in relativno nizke variabilne obratovalne stroške, s čimer bi bile koristi veliko večje od stroškov (Ibrahim & Ilinca, 2011).

Povprečni stroški energije v ciklu so verjetno najboljši način ocenjevanja stroškov shranjevanja energije, saj upoštevajo stroške polnjenja in praznjenja. Investicijski stroški svinčenih baterij so relativno nizki, vendar imajo baterije zelo kratko življenjsko dobo, zato so njihovi povprečni stroški energije v ciklu relativno visoki. Omejeno pa je ocenjevanje povprečnih stroškov energije v ciklu pri sistemih, namenjenih za rezanje konic in energetsko arbitražo, saj imajo redkejše cikle polnjenja in praznjenja. Na sliki 9 lahko vidimo, da so črpalne hidroelektrarne z vidika povprečnih stroškov energije v ciklu ob upoštevanju učinkovitosti in življenjske dobe najbolj ugoden hranilni sistem. Ob tem niso bili upoštevani stroški obratovanja, vzdrževanja in odstranjevanja. Sledijo jim sistemi za stiskanje zraka in kriogeno shranjevanje energije. Najnižje vrednosti dosegajo sekundarne baterije, nekoliko višje pa pretočne baterije. Popolnoma nekonkurenčne so gorivne celice, pri katerih je povprečni strošek energije v ciklu za zdaj veliko višji od drugih hranilnikov (Styczynski in drugi, 2011).

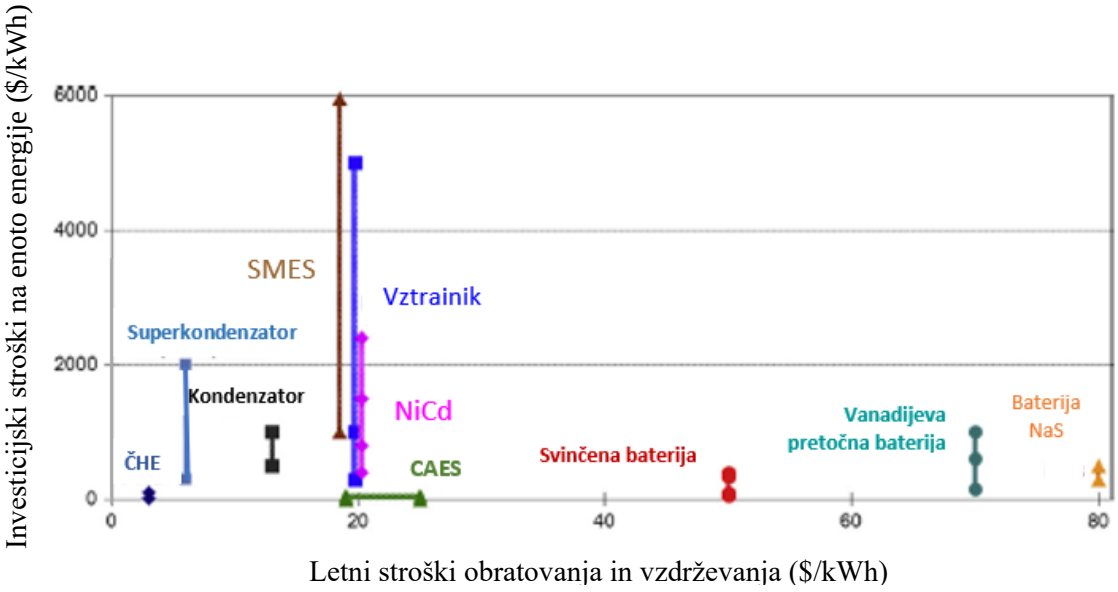
Investicijski stroški na enoto energije so odvisni od velikosti hranilnika in lokacije izgradnje, ki lahko zaradi naravnih danosti močno zmanjša ocenjene stroške. Predvideni investicijski strošek je najnižji za baterije kovina-zrak, vendar jih omejuje kratka življenjska doba in kriogeno shranjevanje energije. Na sliki 10 lahko vidimo, da so investicijski stroški na enoto energije najnižji pri črpalnih hidroelektrarnah, sistemih s stisnjenim zrakom, ki zahtevajo nekaj več denarnih vložkov v obratovanje in vzdrževanje, in baterijah, ki pa zahtevajo tudi do 10-krat več letnih stroškov obratovanja in vzdrževanja. Vztrajniki, superprevodne magnetne tuljave in superkondenzatorji so stroškovno upravičeni pri kratkotrajnih visokih obremenitvah, saj so z vidika izhodne moči poceni, vendar pa je shranjevanje energije drago (Haisheng in drugi, 2009).

Slika 9: Povprečni stroški energije v ciklu ob upoštevanju njegove učinkovitosti in življenjske dobe



Vir: Styczynski in drugi (2011).

Slika 10: Primerjava investicijskih stroškov na enoto energije in letnih stroškov obratovanja ter vzdrževanja



Vir: Luo, Wang, Dooner & Clarke (2014).

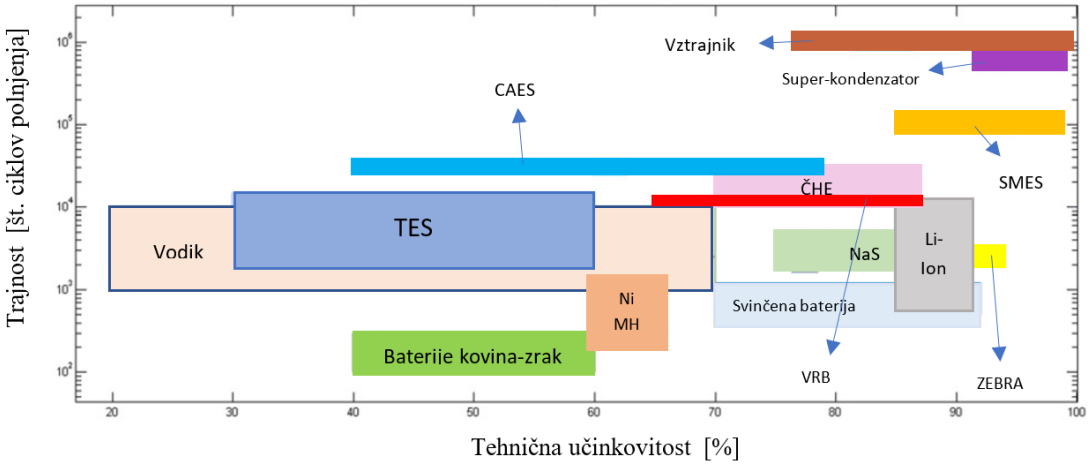
Za shranjevanje energije skozi daljše časovno obdobje so primerne črpalne hidroelektrarne, sistemi za stiskanje zraka in vodikovi sistemi. Vsi ti sistemi potrebujejo velik akumulacijski bazen, ki lahko vsebuje tudi do 1 TWh energije. Investicijski stroški so torej zelo visoki. Pri dolgoročnem shranjevanju energije, ki omogoča sezonsko skladiščenje, so črpalne hidroelektrarne najbolj ekonomične, saj je cena za enoto proizvedene energije 3–11 $/kWh. Cena za enoto proizvedene energije pri sistemih za stiskanje zraka znaša do 28 $/kWh, z učinki učenja pa to lahko znižamo tudi na 11 $/kWh. Prav tako lahko pri vodikovih sistemih s pomočjo učenja znižamo ceno z običajnih 45 $/kWh na 25 $/kWh (Styczynski in drugi, 2011).

3.4 Tehnična učinkovitost hranilnih sistemov

Tehnično učinkovitost oz. izkoristek sistemov lahko izračunamo z razmerjem vnosa energije in njene proizvodnje znotraj enega cikla. Glede na to EES delimo v tri kategorije (Haisheng in drugi, 2009):

- Visoko učinkoviti: sistemi z izkoristkom, večjim od 90 %, so superprevodna magnetna tuljava, vztrajniki, superkondenzatorji, baterije ZEBRA in Li-Ion baterije.
- Srednje učinkoviti: sistemi z izkoristkom med 60 in 90 % so črpalne hidroelektrarne, sistemi za stiskanje zraka, sekundarne baterije (razen Li-Ion) in pretočne baterije.
- Nizko učinkoviti: sistemi z izkoristkom, nižjim od 60 %, so baterije kovina-zrak, vodikovi sistemi, termalni hranilniki energije, kriogeno shranjevanje energije in gorivne celice.

Slika 11: Tehnična učinkovitost sistemov shranjevanja energije



Vir: Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes (2013).

Zgornjo delitev ponazarja tudi slika 11, ki prikazuje tehnično učinkovitost hranilnikov energije v odvisnosti od njihove življenjske dobe glede na število ciklov polnjenja. Najvišjo

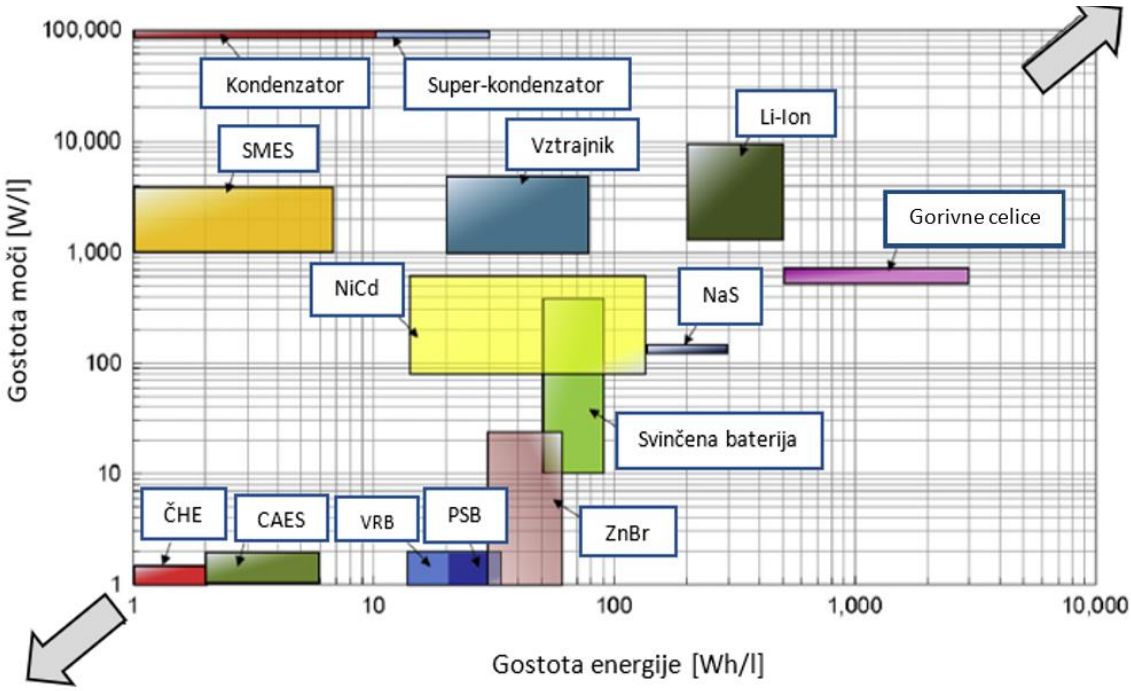
tehnično učinkovitost in trajnost dosegajo vztrajniki, superkondenzatorji in superprevodne magnetne tuljave. Za vse sekundarne baterije je značilno manjše število ciklov polnjenja glede na ostale sisteme. Najnižje vrednosti trajnosti dosegajo baterije kovina-zrak, ki omogočajo le nekaj več kot 100 ciklov polnjenja, ob tem pa so tudi relativno slabo tehnično učinkovite. Slabši izkoristek dosegajo tudi vodikovi in termalni sistemi (Ferreira, Garde, Fulli, Kling & Lopes, 2013).

3.5 Gostota energije in gostota moči hranilnih sistemov

Gostota energije je količina energije, ki jo sistem lahko shrani na enoto mase (Wh/kg) ali volumna (Wh/L). Glede na gostoto energije EES razdelimo v tri skupine, kar je prikazano tudi na sliki 12 (Haisheng in drugi, 2009):

- Sistemi z visoko gostoto energije: energijska gostota znaša tudi do več kot 1000 Wh/kg, kar premorejo gorivne celice in baterije Li-Ion.
- Sistemi s srednjo gostoto energije: energijska gostota znaša okrog 100 Wh/kg. V to skupino spadajo termalni hranilniki energije, vodikovi sistemi, kriogeno shranjevanje energije, vztrajniki in sekundarne ter pretočne baterije.
- Sistemi z nizko gostoto energije: energijska gostota znaša tudi le do 30 Wh/kg. V to kategorijo uvrščamo črpalne hidroelektrarne, sisteme za stiskanje zraka, superprevodne magnetne tuljave in superkondenzatorje.

Slika 12: Primerjava gostote moči in gostote energije hranilnih sistemov



Vir: Luo, Wang, Dooner & Clarke (2014).

Gostoto moči definiramo kot količino moči v določeni masi (W/kg) ali volumnu (W/L). Velja, da imajo baterije večjo gostoto energije od superkondenzatorjev, vendar imajo ti večjo gostoto moči. Tudi za superprevodne tuljave in vztrajnike velja lastnost nižje gostote energije, vendar pa so njihove gostote moči zelo visoke in jih prav zaradi tega uporabljamo za zagotavljanje ustrezne kakovosti električne energije (Haisheng in drugi, 2009). Opazno je, da imajo nekateri sistemi zelo nizko energijsko gostoto, drugi pa zelo nizko gostoto moči, kar prikazuje tudi tabela 3. Črpalne hidroelektrarne izstopajo po zelo nizkih vrednostih obeh kategorij. Treba je opozoriti, da sta zgoraj omenjena parametra močno odvisna od proizvajalca sistema (Haisheng in drugi, 2009).

3.6 Življenjska doba hranilnih sistemov

Življenjska doba superkondenzatorjev je izstopajoča, saj je nekajkrat daljša od vseh drugih sistemov, kar lahko vidimo v tabeli 3. Visoko življenjsko dobo dosežejo tudi črpalne hidroelektrarne, sledijo pa jim sistemi za stiskanje zraka, kriogeno shranjevanje energije in superprevodne magnetne tuljave. Poleg električnih hranilnikov so mehanski in toplotni hranilniki energije najboljši sistemi glede trajnosti, saj so odvisni le od življenjske dobe mehanskih komponent. Z leti delovanja se poslabša učinkovitost kemijskih procesov v sekundarnih in pretočnih baterijah ter gorivnih celicah, zato je njihova življenjska doba relativno nizka (Haisheng in drugi, 2009). Poleg življenjske dobe je zanimiv parameter tudi predvideno število ciklov polnjenja, ki jih sistem doseže. Tega sicer ne moremo upoštevati za vse sisteme, saj črpalne hidroelektrarne, sistemi za stiskanje zraka, termalni hranilniki energije in nekateri drugi sistemi ne delujejo po principu ponovnega polnjenja. Med polnilnimi sistemi imajo izstopajoče kratko število preživetih ciklov superkondenzatorji in baterije kovina-zrak, ki dosežejo le nekaj sto ciklov. Najbolj vzdržljivi sistemi glede na število ponovnih polnjenj so superprevodne tuljave in sekundarne baterije (Haisheng in drugi, 2009).

3.7 Vpliv hranilnih sistemov na okolje

V tabeli 3 lahko vidimo, da ima večina sistemov vpliv na okolje, nekateri z izločanjem strupenih snovi, drugi pa s fizičnim posegom v okolje. S črpalnimi hidroelektrarnami, sistemi za stiskanje zraka, termalnimi hranilniki energije in vodikovimi sistemi naredimo velik fizični poseg v naravo in njen biološki sistem. Pri sistemih za stiskanje zraka in gorivnih celicah pride do zgorevanja fosilnih goriv. Sekundarne in pretočne baterije vsebujejo strupene odpadke, zato imamo težave z recikliranjem. V superprevodnih magnetnih tuljavah je prisotno močno magnetno polje, ki lahko škodljivo vpliva na okolico. Še najprijaznejši okolju so vztrajniki, superkondenzatorji in baterije kovina-zrak, ki nimajo večjih posegov in vplivov na okolje (Haisheng in drugi, 2009).

Tabela 3: Tehnične karakteristike hranilnih sistemov

SISTEM	**Gostota energije in moči**				**Življenjska doba**		**Vpliv na okolje**	**Opis vpliva na okolje**
Enota	**Wh/kg**	**W/kg**	**Wh/l**	**W/l**	**leta**	**št. ciklov**		
Črpalna hidroelektrarna	0,5–1,5	-	0,5–1,5		40–60	-	negativen	Velik poseg v okolje
Sistem za stiskanje zraka	30–60	-	3–6	0,5–2	20–40	-	negativen	Velik poseg v okolje
Svinčena baterija	30–50	75–300	50–80	10–400	5–15	500–10000	negativen	Uporaba škodljivih zmesi
Baterija NiCd	50–75	150–300	60–150	-	10–20	2000–2500	negativen	Uporaba strupenih kovin
Baterija NaS	150–240	150–230	150–250	-	10–15	2500	negativen	Uporaba škodljivih zmesi
Baterija Li-Ion	75–200	150–315	200–500	-	5–15	1000–10000+	negativen	Uporaba strupenih zmesi
Gorivna celica	800–10000	500+	500–3000	500+	5–15	1000+	negativen	Ostanki in zgorevanje fosilnih goriv
Baterija kovina-zrak	150–3000	-	500–10000	-	-	100–300	zanemarljiv	Male količine ostankov
Vanadijeva pretočna baterija	10–30	-	16–33	-	5–10	12000+	negativen	Strupeni ostanki
Solarno gorivo	800–100000	-	500–10000	-	-	-	prijazen	-
Superprevodna mag. tuljava	0,5–5	500–2000	0,2–2,5	1000–4000	20+	100000+	negativen	Močno magnetno polje
Vztrajnik	10–30	400–1500	20–80	1000–2000	~ 15	20000+	prijazen	-
Superkondenza-tor	0,05–5	100000+	2–10	2,5–15	500–5000	100000+	prijazen	-
Visokotempera-turno termalno shranjevanje	80–200	-	120–500	-	5–15	-	zanemarljiv	-
Kriogeno shranjevanje	150–250	10–30	120–200	-	20–40	-	prijazen	-

Vir: Haisheng in drugi (2009).

4 PREDNOSTI IN SLABOSTI HRANILNIKOV ENERGIJE IN TRENUTNO STANJE UPORABE

Shranjevanje električne energije je zanimivo za uporabo na več obstoječih področjih, saj bi lahko povečalo tehnično in ekonomsko učinkovitost in kakovost različnih sistemov, hkrati pa omogoča tudi lažji razvoj novih področij. Vseeno nekateri kritizirajo vpeljevanje hranilnih sistemov, saj v njih ne vidijo smiselnih pridobitev. Trenutno trend razvoja in vpeljevanja hranilnikov energije kaže, da se bo njihova uporaba v naslednjih letih povečala (International Energy Agency, 2014).

4.1 Področja in koristi uporabe hranilnikov energije

Shranjevanje električne energije je zanimivo za sledeče opisana področja:

a) Večja kakovost in zanesljivost elektroenergetskega omrežja

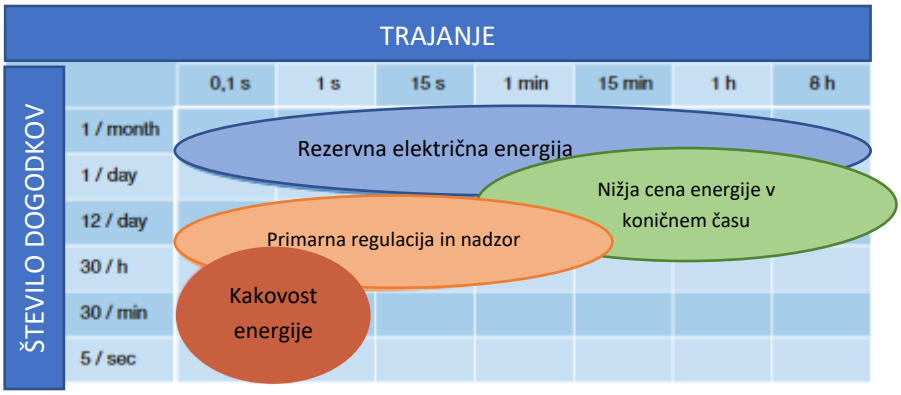
Zasnovo skladiščne zmogljivosti v omrežju predstavljajo rotorji sinhronskih generatorjev, ki pa so le kratkotrajni način shranjevanja energije. Proizvodnja energije mora biti dejansko enaka porabi energije. Delovanje vključuje kompleksen postopek napovedi povpraševanja po električni energiji, saj mora dobava vedno ustrezati nenehno spreminjajočemu se povpraševanju. Generatorji električne energije morajo imeti poleg osnovne proizvodnje še dve funkciji, proizvajanje stalne zadostne moči in krmiljenje frekvence, ki določa izhod preko sekundnih in minutnih sprememb povpraševanja. OVE so v zagotavljanju omenjenih funkcij nezanesljivi, zato bi te težave lahko kompenzirali preko hranilnikov energije (International Electrotechnical Commission, 2011).

S hranilniki energije bi lahko tudi decentralizirali dobavo energije. Večja kot je oddaljenost potrošnikov od objektov za proizvodnjo energije, večja je možnost za prekinitev napajanja. V primeru naravnih nesreč in posledičnih defektih bi lahko s shranjeno energijo nemoteno nekaj časa nadaljevali z neprekinjenim napajanjem odjemalcev. Povezave preko dolgih daljnovodov so bolj ranljive v primeru naravnih nesreč (strele, orkani) in preobremenitev (International Electrotechnical Commission, 2011). Omrežje postaja vedno bolj obremenjeno, saj se število priključenih naprav stalno povečuje. Distribucijska podjetja imajo zato na mnogih delih omrežja težave z zagotavljanjem ustreznega napetostnega nivoja 230 V ± 10 %. Šibke člene nedvomno predstavljajo odjemalci na koncu omrežja, ki imajo lahko težave z neprekinjeno dobavo in z utripanjem svetlobe zaradi hitrih napetostnih sprememb (CIRED, 2019). Hranilniki energije bi lahko pripomogli k izboljšanju stabilnosti, fleksibilnosti, zanesljivosti in odpornosti omrežja (Taczi & ERRA, 2016).

Izbira vrste omrežnega hranilnika energije je različna glede na pogostost uporabe hranilnika in trajanje njegovega delovanja. Kot je prikazano na sliki 13, je za vzdrževanje kakovosti napetosti (npr. kompenzacija jalove moči) potreben hranilnik z visoko stabilnostjo in kratkim trajanjem pri visoki izhodni moči, kar je nasprotno zmanjševanju cen v koničnem času, ki potrebuje za shranjevanje energije daljše obdobje z manjšim številom ciklov

(International Electrotechnical Commission, 2011). Storitve v omrežju ločimo na kratkotrajne in dolgotrajne. V kratkotrajne vključujemo proces vzdrževanja frekvence s 15-sekundnimi zahtevami shranjevanja, kompenzacijo utripanja s 60-sekundnimi zahtevami, regulacijo napetosti z 10-milisekundnimi do 60-sekundnimi zahtevami, vključevanje občasne energije iz OVE s 5–20-minutnimi zahtevami itd. Dolgotrajne storitve zajemajo rezanje konične porabe s 4–8-urnimi zahtevami shranjevanja, pomoč pri ponovnem zagonu elektrarn ali dela električnega omrežja z 2–10-urnimi zahtevami itd. (Styczynski in drugi, 2011).

Slika 13: Uporaba tipa hranilnika glede na zahtevane storitve v omrežju



Vir: International Electrotechnical Commission (2011).

b) Razvoj električnih vozil

Tipični primer uporabe manjših hranilnih sistemov so električni avtomobili, ki so v zadnjem času močno v porastu. Prav ta rastoči trg bi lahko igral ključno vlogo pri množičnejšem razvoju in uporabi skladiščnih sistemov (Taczi & ERRA, 2016). Trenutno naj bi globalno prodali več kot 200.000 električnih avtomobilov na leto, na evropskih cestah pa je njihov trenutni delež 1 % (Gaberšček, 2018). Najpogosteje uporabljene so Li-Ion baterije, vendar pa vedno zanimivejše postajajo baterije kovina-zrak. Te so zmogljivejše in cenejše, vendar je zaradi težkega ponovnega polnjenja smisel njihove uporabe vprašljiv (Gaberšček, 2018).

c) Pomoč pri razvoju pametnega omrežja

Pametno omrežje si lahko predstavljamo kot izboljšano elektroenergetsko omrežje, ki omogoča dvosmerno izmenjavo informacij in karakteristik med dobavitelji in potrošniki. Z dodajanjem pametnih tehnologij stalno prihaja do izmenjevanja informacij med proizvodnjo in porabo energije, zato lahko dobimo učinkovitejšo in zanesljivejšo oskrbo. Pametna omrežja bi prinesla stroškovno učinkovito opravljanje dejavnosti priključenih odjemalcev in proizvajalcev, trajnejši elektroenergetski sistem, nižje izgube in višjo kakovost električne energije. Ena izmed pomembnejših tehnologij za razvoj pametnega omrežja so hranilniki energije. Mednje uvrščamo še pametne števce, napredno merjenje, prilagajanje odjema, aktivna omrežja ter elektromobilnost (Agencija za energijo, 2014).

d) Spodbujanje čistejšega okolja in zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv

Z vpeljavo hranilnikov energije bi lahko smiselno povečali delež OVE v elektroenergetskem sistemu in zmanjšali količino škodljivih in strupenih snovi, ki jih pri proizvajanju izločajo klasične elektrarne. S spodbujanjem električnih vozil bi se zmanjšal delež vozil na motorni pogon in s tem njihove emisije. Povečan delež uporabe OVE v povezavi s hranilniki energije bi zmanjšal tudi uvozno odvisnost od držav, ki prodajajo fosilna goriva (EASE & ERRA, 2015).

e) Stroškovni prihranki pri obratovanju elektrarn

Nekatere elektrarne že imajo nameščene hranilnike energije za sledenje obremenitve pri proizvodnji. Skladiščne tehnologije zagotovijo hiter odziv pri regulaciji in s tem zmanjšajo stalno spreminjajoči se odjem energije. S tem zmanjšajo stroške električne energije in posledičnega vzdrževanja tehnologij (Taczi & ERRA, 2016).

f) Sezonsko skladiščenje energije

Nekatere tehnologije EES lahko energijo hranijo daljše časovno obdobje. To pomeni, da bi lahko proizvedeno presežno energijo poleti uporabili v zimskih obdobjih, ko je potreba po njej največja (Taczi & ERRA, 2016).

g) Zmanjševanje cen v koničnem času

Scenarij energetske arbitraže govori o trgovanju z električno energijo. Cilj razlikovanja visokih in nizkih cenovnih obdobij na istem trgu je razbremenitev omrežja zaradi neenakomerne porabe energije, saj je strošek proizvodnje v konici veliko višji kot v drugih časovnih obdobjih. V času največje porabe električne energije morajo dobavitelji dopolnjevati osnovno obremenitev elektrarn s stroškovno manj učinkovitimi oblikami pridobivanja. Dva načina za vodenje energetske arbitraže sta sistem za shranjevanje energije in reguliranje proizvajanja energije glede na povpraševanje. S hranilnimi sistemi bi tako lahko zmanjšali cene v času konic, ko je elektroenergetski sistem preobremenjen (Cam, 2014).

h) Rezervno napajanje v sili

V primeru hudih naravnih nesreč se lahko zgodi, da bi vir energije lahko pridobili le preko decentraliziranih hranilnikov energije. Na območjih, kjer omrežje ni zančno sklenjeno, bi lahko s skladiščenjem energije zagotovili aktivno rezervno energijo za dobavo električne energije gospodinjstvom in industriji. V primeru prekinitve dobave energije in nedelovanja drugih tehnologij bi s shranjeno energijo lahko omogočili počasen izklop industrijskih obratov, saj imajo lahko v nasprotnem primeru visoko materialno in ekonomsko škodo. V primeru (ponovnega) zagona večjih elektrarn bi lahko shranjena energija razbremenila omrežje večjih zagonskih tokov in posledičnega poslabšanja kakovosti napetosti. V tem primeru potrebujemo hitro odzivne in vzdržljive hranilne sisteme. Tudi za primer naravnih

nesreč so potrebni hranilniki s takojšnjim odzivom, zlasti za ohranjanje telekomunikacijskih storitev (Haisheng in drugi, 2009).

i) Izkoriščanje odpadne toplote

Pri nekaterih procesih shranjevanja pride do sproščanja toplote, ki je po večini neizkoriščena. Nekateri sistemi to lahko ponovno uporabijo in s tem povečajo učinkovitost delovanja. Druge tehnologije, ki te toplote ne morejo uporabiti, bi jo lahko prenesle na okoliške zgradbe za ogrevanje prostorov in zagotavljanje tople vode (International Energy Agency, 2014).

j) Možnost samooskrbe

Z OVE lahko naredimo posamezne zgradbe samooskrbne, kar pomeni, da so neodvisne od omrežja ali pa so nanj priključene le za rezervno napajanje. Proizvedeno energijo porabi objekt sam, presežek pa se prenese v omrežje. Težava je v presežku sončne in vetrne energije podnevi, ko je poraba gospodinjstev najnižja. Takrat se energijo težko porabi, hkrati pa je težavna tudi regulacija proizvodnje in povpraševanja. Ob tem imajo distribucijska omrežja kar nekaj težav s popačenjem sinusoide napetosti zaradi vnašanja energije iz različnih lokacij, različnih velikosti in neperiodičnosti (Božič, 2016).

Uredba o samooskrbi z električno energijo iz OVE iz leta 2015 omogoča gospodinjskim in malim poslovnim odjemalcem samooskrbo na podlagi neto merjenja. Lastniki OVE imajo ob koncu vsakega leta obračunano porabo električne energije glede na odvzem in izvoz. Z vpeljavo hranilnikov energije bi lahko presežno energijo shranjevali v objektu in jo črpali v času primanjkovanja, zvečer in zjutraj. S tem bi olajšali delo distribucijskim podjetjem in povečali učinkovitost reguliranja proizvajanja energije glede na povpraševanje. Trenutno so stroški popolne samooskrbe še previsoki za komercialno uporabo. Velik je že vložek v OVE, cena akumulatorjev energije pa je potem še skoraj 10-krat večja (Božič, 2016).

4.2 Slabosti hranilnikov energije

Kljub omenjenim koristim, ki bi jih lahko hranilni sistemi prinesli, pa nekateri nasprotujejo njihovemu vpeljevanju. Pravijo, da si številne organizacije, ki se zavzemajo za OVE, prizadevajo vpeljati hranilnike električne energije le, da bi odpravile njihovo šibkost in neuporabnost. Poleg nestabilnosti OVE so ti strokovnjaki razočarani tudi nad njihovo nizko tehnično in ekonomsko učinkovitostjo (Goreham, 2019).

V ZDA naj bi le 1 W od 100.000 W električne energije prišel iz črpalnih hidroelektrarn, ki so najbolj razširjeni način shranjevanja energije. Kritizirajo zlasti ekonomsko neučinkovitost hranilnikov energije. Črpalna hidroelektrarna kot ena izmed najcenejših oblik po njihovi oceni na enoto moči stane približno 2000 $/kW, več kot dvourno shranjevanje v baterijah pa približno 2500 $/kW. Ali je potem smiselno vlagati v hranilne sisteme, če vetrna elektrarna stane dvakrat manj, približno 1000 $/kW (Goreham, 2019)?

V New Yorku do leta 2030 načrtujejo namestitev 9000 MW vetrnih zmogljivosti na morju, ki bi bile povezane s sistemom baterij z močjo 3000 MW. Vetrni sistemi naj bi stali več kot 9 milijard dolarjev, sistem baterij pa okrog 7,5 milijarde dolarjev. Te baterije naj bi bile po mnenju nekaterih strokovnjakov slaba investicija, saj bi s predpostavko 33 % izkoristka vetrnih elektrarn zmogljivost baterij omogočila le dvourno rezervno napajanje. Za nadomestitev celodnevne proizvodnje v času brezvetrja bi po analizah potrebovali hranilnik s 36.000 MW. Stroškovno to pomeni 90 milijard ameriških dolarjev ali približno desetkratno vrednost vetrnega sistema (Goreham, 2019).

Kritizirajo tudi kratko življenjsko dobo baterij, ki so v uporabi približno 10–15 let, kar je skoraj pol manj od življenjske dobe sončnih elektrarn. Ob tem je treba opozoriti tudi na zmanjševanje zmogljivosti baterij s časom. Po mnenju kritikov bodo minila še desetletja, preden bo omrežno shranjevanje energije imelo pomembno vlogo v elektroenergetskih sistemih, če sploh kdaj (Goreham, 2019).

4.3 Vpeljevanje hranilnih sistemov in napovedi za prihodnost

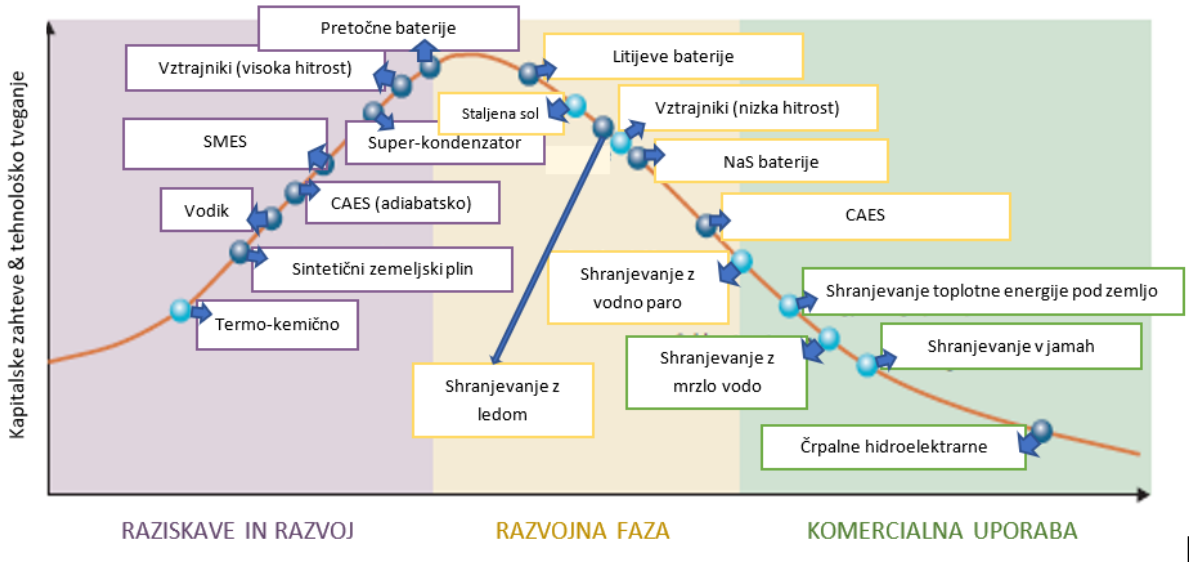
Trenutna ekonomska upravičenost večine hranilnih sistemov je, razen pri ČHE, še neustrezna za vpeljavo v elektroenergetsko omrežje in na elektroenergetski trg. Po mnenju dr. Leopolda Hermana s Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani so ČHE trenutno edina ekonomična oblika shranjevanja tako zaradi visokega izkoristka procesa (med 75 % in 85 %) kot tudi zaradi relativno nizke cene na enoto energije, ki v povprečju znaša 65 $/kWh. V Sloveniji je edina ČHE v Avčah (185 MW), ki so jo zgradili leta 2009. Nekaj let po tem so sprejeli prostorski načrt za ČHE Kozjak (400 MW), ki pa je še niso zgradili. Po njegovem mnenju bi Slovenija morala še povečati število ČHE, saj so razmere z veliko vode in višinske razlike pri nas zelo ugodne. Do leta 2028 naj bi bilo v Sloveniji načrtovanih za 185 MW manjših ČHE. Po mnenju Hermana se uporaba drugih oblik trenutno še ne splača, vendar pa bo treba v prihodnosti narediti velik korak k razvoju hranilnikov glede na trenutni trend rasti OVE. Hranilni sistemi naj bi postali pomembni, ko bo delež oskrbe z OVE presegel 50 % (Šalamun, 2013).

Tudi profesor Mihalič s Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani vidi edini trenutni način shranjevanja energije v ČHE, saj naj bi v tem primeru imeli najmanjše, 20 % izgube energije (Tetičkovič, 2019). Opozarja, da so te pri baterijah enake, vendar so njihovi stroški precej višji. Hranilniki, temelječi na vodiku, so po njegovem mnenju neučinkoviti, saj s pretvarjanjem izgubimo tudi do dve tretjini energije. Drugih sistemi skladiščenja potrebujejo tehnološke izboljšave in nižje stroške za morebitno vpeljavo v elektroenergetski sistem.

Prav tako Mednarodna agencija za energijo kot najprimernejši sistem shranjevanja energije omenja črpalne hidroelektrarne. Razlog za njihovo razširjenost je tehnična zrelost v odvisnosti od tehnične učinkovitosti in stroškov, kar je prikazano na sliki 14 (International Energy Agency, 2014). Po njihovem mnenju so za komercialno uporabo primerni še nekateri termalni sistemi, grajeni na primernih lokacijah, in sistemi za stiskanje zraka. Ostali sistemi

so za zdaj še v fazi razvoja ali pa so neekonomični za smiselno uporabo (International Energy Agency, 2014).

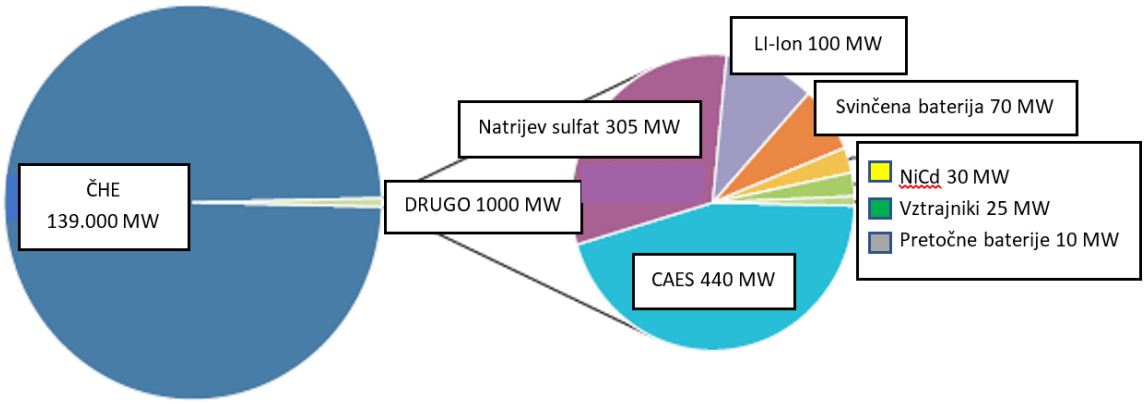
Slika 14: Zrelost uporabe sistemov za shranjevanje energije glede na primernost tehnične učinkovitosti in stroškov



Vir: International Energy Agency (2014).

Globalno so EES bolj ali manj razširjeni le v razvitih državah. V letu 2014 naj bi bilo globalno nameščenih za 140.000 MW hranilnikov energije, 99 % delež katerih so predstavljale ČHE. S slike 15 je razvidno, da so preostali 1 % prispevale sekundarne baterije (NaS, Li-Ion, svinčena baterija in NiCd), sistemi za stiskanje zraka, vztrajniki in pretočne baterije (International Energy Agency, 2014).

Slika 15: Vrste uporabljenih hranilnikov energije v letu 2014



Vir: International Energy Agency (2014).

V letu 2019 je skupna svetovna inštalirana moč vseh EES znašala že 176.000 MW. Od tega se jih je polovica nahajala na Kitajskem (32.000 MW), Japonskem (28.500 MW) in v ZDA (24.000 MW), med katerimi so največji delež moči prispevale ČHE (96 %). Sledili so jim termalni hranilniki energije (3300 MW), baterije (1900 MW) in mehanski hranilni sistemi (1600 MW). V Kanadi, kjer naj bi ČHE predstavljale 174 MW (86 %), elektrokemične baterije 26 MW (13 %), termalni sistemi pa 1,5 MW (0,8 %), naj bi imeli hranilniki energije v letu 2019 približno 202 MW moči. V naslednjih letih načrtujejo povečanje števila hranilnih sistemov na 4500 MW zmogljivosti (Canadian Energy Research Institute, 2019). V petih letih je opaziti veliko porast uporabe EES, pri čemer so vpeljani tudi drugi viri shranjevanja, ne le ČHE.

Vpeljuje se vedno več različnih metod shranjevanja, kar bo nedvomno prispevalo k tehnološkemu napredku posameznih tehnologij in manjšim stroškom izdelave in obratovanja. Ob tem bo treba razviti standardizacijo, s katero se bo zagotovilo varne in kakovostne hranilnike energije, hkrati pa se bodo povečale tudi naložbe v raziskave in razvoj (Haisheng in drugi, 2009).

Ker se strokovnjaki iz področja energetike znotraj EU zavedajo pomembnosti vpeljave hranilnikov energije, so začrtali korake za oblikovanje trga EES v EU do leta 2030. Želijo določiti pravni okvir za zagotovitev skladiščne energije z dodano vrednostjo in enotnega evropskega trga ter prikazati ustrezno raven pomembnosti na ravni EU za finančno podporo pri raziskavah, razvoju in demonstracijah. Hkrati bi radi oblikovali trge EES z enakimi možnosti prodora vseh tehnologij shranjevanja energije, če te izpolnjujejo zahteve. S shranjevanjem energije bi radi pridobili dodano vrednost na različnih ravneh elektroenergetskega sistema. Energetska politika EU se zaveda, da bodo hranilniki energije v prihodnosti lahko ključni za varno in zanesljivo dobavo električne energije industrijskim in gospodinjskim odjemalcem (EASE & ERRA, 2015).

5 ANALIZA IZBRANIH PRIMEROV

V tem poglavju analiziram štiri različne primere shranjevanja električne energije. Primera 5.1 in 5.2 sta iz podjetja Elektro Gorenjska d.d., ki velja za zelo razvojno usmerjeno distribucijsko podjetje pri nas. Hkrati je močno povezano tudi z mednarodnim združenjem strokovnjakov CIRED. Primer 5.3 je bil analiziran zaradi javne odmevnosti dogodkov, ki se dogajajo v zadnjih letih v Južni Avstraliji. V zadnjem primeru 5.4 sem želel analizirati in prikazati dalj časa vpeljan sistem za shranjevanje večjih količin energije, ki se nahaja v Nemčiji.

5.1 Vgradnja baterije Li-Ion v nizkonapetostno omrežje z veliko razpršene proizvodnje

Elektro Gorenjska d.d. je razvojno najbolj usmerjeno distribucijsko podjetje v Sloveniji. Stalno si prizadeva slediti novim tehnologijam in se pripraviti na izzive v prihodnosti, zato

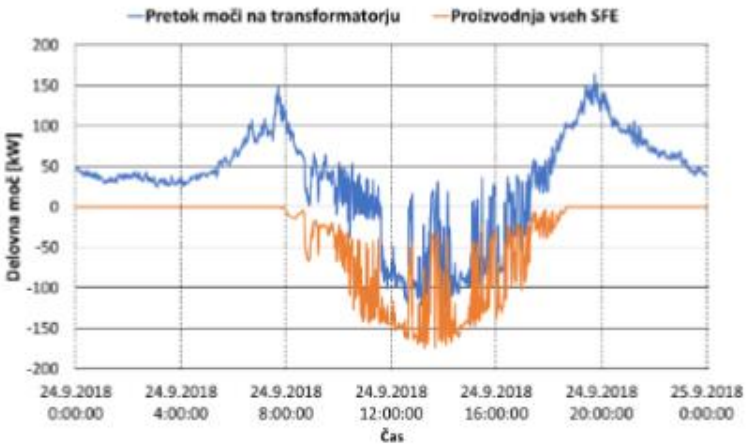
kot partner med drugim sodeluje tudi v projektu STORY (Added value of STORage in distribution sYstem). Kot član projekta so ponudili demonstracijsko okolje za analizo obnašanja Li-Ion hranilnega sistema v elektroenergetskem sistemu. To je prvi vgrajen hranilni sistem v slovenskem distribucijskem omrežju s tovrstno tehnologijo in naprednim krmilnim sistemom, ki optimizira delovanje trenutne porabe in proizvodnjo sončnih elektrarn. Podjetje dosega visoko raven kakovosti in zanesljivosti dobave električne energije, zato namen uvedbe hranilnega sistema ni bil posledica odpravljanja napak (Vilman & Jerele, 2019).

5.1.1 Lastnosti in vloga Litij-ionske baterije

V podjetju so se zaradi zanimanja o stanju hranilnih sistemov z veseljem odločili za poskusno vpeljavo Li-Ion baterije. Vas Suha na Gorenjskem ima dobre pogoje za postavitev sončnih elektrarn, zato ima sedem gospodinjstev vgrajene sončne elektrarne s skupno inštalirano močjo 210 kW. Na sliki 16 lahko z označeno modro črto vidimo pretok moči na transformatorju (v nadaljevanju TP) v vasi Suha in z oranžno proizvodnjo sončnih elektrarn. Povprečna poraba energije v času jutranje in večerne konice je 150 kW, konična proizvodnja iz sončnih elektrarn pa pričakovano ne sovpada s temi konicami (Vilman & Jerele, 2019).

Tako so v začetku leta 2019 inštalirali hranilni sistem v podeželskem okolju v TP Suha na nizkonapetostnem omrežju. Hranilnik z inštalirano močjo 170 kVA in kapaciteto 4540 kWh je izdelalo podjetje ABB. Vseboval je 84 baterijskih modulov, ob začetku življenjske dobe pa je njegova tehnična učinkovitost znašala 87 %. Ocenjeni strošek razvoja in sestave hranilnika naj bi se gibal med 200.000 € in 250.000 € (Vilman & Jerele, 2019).

Slika 16: Prikaz pretoka moči na TP Suha (modra), kjer proizvodna moč sončnih elektrarn ne pokriva največje porabe (oranžna)



Vir: Vilman & Jerele (2019).

Naloge Li-Ion baterij so (Vilman & Jerele, 2019):

- Rezanje konic – s pomočjo algoritma se zmanjša pretok moči čez transformator, ki ga povzročajo odjemalci in proizvedena energija sončnih elektrarn. Algoritem je odvisen od sončnega obsevanja, zato Agencija Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju ARSO) vsakih 6 ur posreduje 36-urno napoved obsevanja za Suho. Preko te se izračuna predvideno energijo, ki jo bodo proizvedle sončne elektrarne v vasi Suha in izbere tipski profil pretoka moči čez transformator. Tipski profil je izbran iz arhiva, ki ga je izdelala Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani. Arhiv je bil narejen na podlagi sončnega obsevanja in meritev pretoka čez transformator v različnih razmerah, zato je sestavljen iz 360 različnih tipskih profilov. Tako se glede na stanje napolnjenosti v nekem trenutku določi meje polnjenja in praznjenja hranilnika.
- Kompenzacija jalove energije – z jalovo energijo ustvarimo potrebno magnetno polje v transformatorjih in motorjih, vendar pa povzroča obremenitve v omrežju in ni zmožna opraviti koristnega dela (ELES, brez datuma). Hranilni sistem preko algoritma omogoča kompenzacijo jalove energije transformatorja.
- Kompenzacija harmonikov – poleg osnovnega harmonika imamo tudi višje harmonike, ki lahko popačijo signale, ki jih s pomočjo hranilnika lahko uravnamo.
- Zagotavljanje normalnega stanja rezerv pri regulaciji frekvence.
- Simulacija otočnega obratovanja – v primeru razpada elektroenergetskega sistema del sistema začasno obratuje ločeno. Obsega enega ali več izvorov energije in enega ali več odjemalcev (ELES, brez datuma). Ker je v vasi Suha velik delež sončnih elektrarn, so izdelali algoritem, namenjen otočnemu obratovanju, ki stalno preverja pretok moči čez transformator. Algoritem je bil v času preizkusa učinkovit, saj pretok čez transformator nikoli ni presegel dovoljenih meja.

5.1.2 Vključevanje Litij-ionske baterije v omrežje in komunikacijska shema

Odjemalce se iz TP Suha napaja preko devetih nizkonapetostnih izvodov. Na desetem izvodu je priključen hranilnik energije z močjo 170 kW. Na koncu enega izvoda je bil dodan še manjši hranilnik energije (18 kW) po želji podjetja NGEN, ki prav tako razvojno sodeluje s podjetjem Elektro Gorenjska (Vilman & Jerele, 2019).

Podjetje Elektro Gorenjska je na dvanajstih lokacijah namestilo analizatorje omrežja. Meritve želenih parametrov se z minutnim intervalom preko modemov prenašajo v podatkovno bazo strežnika obratovalnih meritev. Center vodenja elektroenergetskega omrežja območja Elektro Gorenjska preko platforme skrbi za nadzor in vodenje TP Suha. Hkrati skrbi tudi za regulacijo transformatorja in hranilnika ter za prenos podatkov, do katerih lahko dostopajo vsi partnerji projekta STORY, na strežnik na Finskem. Del komunikacijske sheme predstavlja tudi kontrolni algoritem hranilnika ABB, ki s pomočjo vremenske napovedi ARSO izbere primerno krivuljo dnevnega pretoka moči čez transformator in izračuna meje polnjena in praznjenja hranilnika (Vilman & Jerele, 2019).

5.1.3 Zaključek

Mnenja članov projekta so bila po pol leta obratovanja hranilnega sistema mešana. S hranilnikom so bili zadovoljni zaradi uresničevanja vseh predvidenih funkcionalnosti, zlasti pri zmanjševanju koničnih bremenitev. Delovanje privatnega brezžičnega omrežja je bilo zanesljivo, prav tako pa je bilo zanesljivo tudi delovanje sistema obratovalnih meritev in razvitega nadzornega sistema. Opazili so tudi precej pomanjkljivosti, kot so veliko število napak v delovanju hranilnika, generiranje visokofrekvenčnih motenj (nedelovanje daljinskega odčitavanja števcev), kompleksnost sistema in stalno potreben nadzor nad njegovim delovanjem. Vpeljava sem jim zdi zlasti ekonomsko neupravičena, saj je cena sistema previsoka glede na kratko življenjsko dobo baterije. Ocenjujejo, da bi za inštaliran kW moči porabili približno 1000 €. Ta bi se še povečala, če bi za inštaliran kW moči hoteli več kWh energije (Vilman & Jerele, 2019).

Elektro Gorenjska ima trenutno zanesljivo in kakovostno delovanje obstoječega elektroenergetskega sistema, napajanje uporabnikov pa je na visoki ravni, zato izpolnjujejo svoje osnovno poslanstvo. Zavedajo se, da je z vsakim letom omrežje bolj obremenjeno, vendar pa vpeljava hranilnikov energije z obstoječo stopnjo razvoja še ne pride v poštev, saj trenutno še niso dovolj stroškovno in tehnološko učinkoviti. Prihodnja močnejša omrežja pa nedvomno vidijo obogatena z novejšimi tehnologijami, morda tudi s hranilniki električne energije (Vilman & Jerele, 2019).

5.2 Izboljšanje kakovosti električne energije v podeželski mreži s pomočjo hranilnikov energije

Avstrijski operater distribucijskega omrežja KNG - Kärnten Netz GmbH je želel preizkusiti delovanje hranilnika energije v omrežju, njegove funkcionalnosti in vpliv na raven kakovosti moči. Ocenjevanje vpliva na kakovost moči naredimo z merjenjem (Ferstl, Renner & Brandl, 2019):

- napetostnega nivoja, ki je po standardih 230 V ± 10 %,
- neravnovesja napetosti kot neravnovesja med proizvodnjo in povpraševanjem,
- utripanja svetlobnih virov, ki je definirano kot motnja v omrežju zaradi obratovanja hitro spremenljivega bremena (ELES, brez datuma).

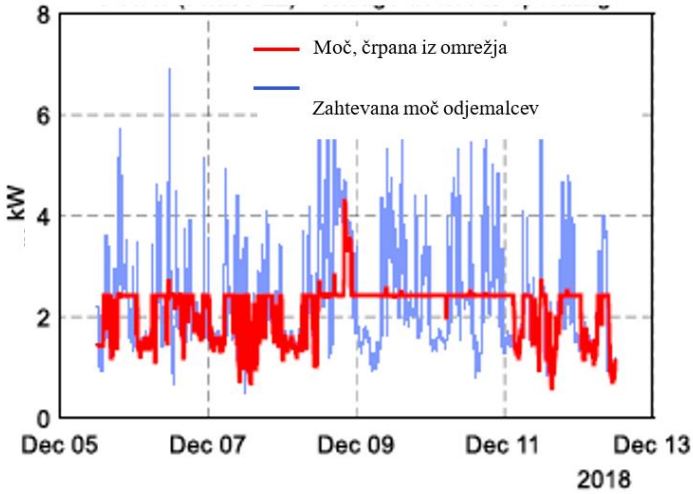
Po standardu EN 50160 naj bi bile meritve izvedene preko 10-minutnih srednjih vrednosti, za opazovanje pa so upoštevali srednje vrednosti znotraj sekunde (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

5.2.1 Lastnosti in vloga Litij-ionske baterije

Sistem za shranjevanje omrežja je bil v letu 2018 4 mesece uporabljan na transformatorju v podeželskem omrežju s sedmimi odjemalci (zabeležena največja moč 17 kW). Za

shranjevanje energije so uporabili Li-Ion hranilni sistem s skupno močjo 24 kWh. Njegova naloga je bila podpirati nadzorovano aktivno izmenjavo energije, tako da v času majhne porabe shranjuje energijo, v času velike porabe pa omrežje podpira z zagotavljanjem energije. Poleg funkcije rezanja konic so upoštevali še ciklizacijo skladiščnega sistema, ki preprečuje zgodnje staranje baterije zaradi potekanja notranjih kemičnih procesov. Kombinacija shranjevanja energije in hitrega odzivnega časa naj bi bila zmožna omejiti obremenitev s poravnavo njegovega gradienta, kar povzroči nižjo raven utripanja in višjo ter stabilnejšo napetost. Na sliki 17 vidimo, da so z vpeljanim hranilnikom uspešno zmanjšali nihanje moči v eni izmed faz (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

Slika 17: Prikaz zmanjšanja nihanja moči v drugi fazi v 9-dnevnem obdobju, če je hranilni sistem deloval



Vir: Ferstl, Renner & Brandl (2019).

5.2.2 Ugotovitve

a) Napetostni nivo

V času merjenja so dokazali, da hranilnik energije ima učinek na stabilizacijo napetostnega nivoja, saj se je ta z večanjem obremenitve zmanjševal manj, kot če hranilnika ni bilo. Napetost se je redkeje spustila na spodnjo dovoljeno napetostno raven. Izračunali so tudi povprečno napetost pri odjemalcu, ki presega 4 kW. Ta je bila z uporabo Li-Ion hranilnika izboljšana, saj je bila v času večjih obremenitev povečana tudi za 3 %. S tem bi se lahko zmanjšalo število padcev napetosti za odjemalce na koncu omrežja (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

b) Neravnovesje napetosti

Do neravnovesij večkrat pride zaradi novih priklopljenih elektronskih naprav, kot so enofazne toplotne črpalke, močnejši stroji itd. S hranilnikom energije se je nekoliko zmanjšalo napetostno neravnovesje, ki je po standardu EN 50160 določeno na manj kot 2 % (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

c) Utripanje svetlobnih virov

V primeru hranilnika energije so opazili rahlo zmanjšanje utripanja. Vpliv na kratkotrajno in dolgotrajno utripanje je bil dokaj majhen, kar je bila posledica relativno počasnega odziva sistema za shranjevanje. S hitrimi reakcijskimi časi hranilnika (manjšimi od 100 ms) bi lahko pripomogli tudi k učinkovitejšemu zmanjšanju nivoja utripanja (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

5.2.3 Zaključek

Rezultati so pokazali, da so hranilniki energije in njihova vpeljava v omrežje še v poskusni fazi. Opazni so bili rezultati izboljšave kakovosti električne napetosti, zlasti pri zagotavljanju ustreznega napetostnega nivoja in pri reševanju neravnovesja napetosti. Glede na trenutno ceno in vidne učinke je njihova upravičenost še vprašljiva, vendar pa je pomembno zavedanje, da lahko pripomorejo k izboljšavam elektroenergetskega sistema (Ferstl, Renner & Brandl, 2019).

5.3 Energetski problemi v Južni Avstraliji

Južna Avstralija je četrta največja zvezna država v Avstraliji z 1,7 milijona prebivalcev. Je ena izmed vodilnih držav pri vpeljevanju OVE v elektroenergetski sistem. Lahko bi rekli, da je oskrba z električno energijo v Južni Avstraliji najčistejša doslej in hkrati bolj ranljiva kot kadarkoli v novejši zgodovini. V Južni Avstraliji se velikokrat soočijo z veliko obremenjenostjo omrežja, zlasti poleti, ko se zaradi velike vročine industrija in gospodinjstva močno poslužujejo klimatskih naprav. Južna Avstralija ima 16 polj vetrnih elektrarn in je odvisna od vetrne energije za skoraj polovico svoje proizvodnje električne energije. Več kot tretjino energije uvozijo iz sosednje države Viktorije, ob tem pa manjši delež energije zagotovi še sončna energija (Harmsen, 2017). V zadnjih letih so se popolnoma preusmerili na OVE. Do leta 2025 bodo vanje vložili naknadnih 10 milijard dolarjev, do leta 2050 pa bi radi postali »emisijsko čista država«. Pred leti so zaprli rudnik premoga in termoelektrarne, tako da niso več mogoči za uporabo. Nekaj let je bila dobava zadovoljiva, vendar so imeli leta 2016 hudo preizkušnjo, kasneje pa še nekaj milejših. V nekaterih primerih so bili zaradi preobremenjenosti primorani odklopiti del omrežja, kar pa je poleg neprijetnosti in nedelovanja klimatskih naprav v gospodinjstvih povzročilo velike stroške v industrijskih obratih (Marks, 2016).

5.3.1 Elektroenergetsko stanje Južne Avstralije

V Južni Avstraliji od leta 2017 najdemo primer zanesljivega delovanja elektroenergetskega sistema z visokim deležem OVE. Kljub temu pa je bilo v zadnjih letih v vročih poletnih dneh opaziti težave pri delovanju elektroenergetskega sistema, zato so bili močno odvisni od uvoza energije iz sosedne zvezne države Viktorije. S tem so se cene električne energije precej povečale. Ob tem je z vidika samostojnosti vprašljiva tudi zanesljivost delovanja sistema z OVE, saj je Južna Avstralija vedno bolj odvisna od sodelovanja na nacionalnem

trgu električne energije. Južna Avstralija podpira nacionalni trg električne energije z izvažanjem presežne vetrne energije (v času nizkega povpraševanja). Na celotnem nacionalnem trgu z električno energijo je v letih 2013 in 2014 veter prispeval 4,4 % celotne proizvodnje električne energije, 74 % so je pridelali iz premoga in 12 % iz plina. Kljub prodaji 338 GWh vetrne energije je Južna Avstralija uvozila 2010 GWh energije, kar je 6-krat več od izvoza. Ob tem je imela izvožena energija nizko ceno, uvožena pa večinoma visoko (Australian Energy Market Operator, 2014). V Južni Avstraliji so z visokim deležem OVE že močno presegli točko nasičenosti, s shranjevanjem pa bi se morda vrnili k nižjim cenam električne energije.

5.3.2 Septembrska energetska katastrofa 2016

Septembra 2016 so se v Južni Avstraliji pojavile močne nevihte in zgodila se je prava energetska katastrofa. Prišlo je do poškodb v treh daljnovodih in do električnega preboja izolacije daljnovodov, kar je povzročilo množico zaporednih napak in nekaj padcev napetosti v dvominutnem obdobju. Napake so privedle do nepričakovane odpovedi delovanja devetih sistemov vetrnih elektrarn, ki so jih neuspešno poskušali večkrat ponovno vzpostaviti. Zaradi pomanjkanja električne energije so jo poskusili v večjih količinah uvoziti iz Viktorije. Nenadna in nepričakovana izguba moči vetrnih elektrarn je poslabšala frekvenco v omrežju tako hitro, da dovod iz Viktorije ni deloval. Bil je preobremenjen, zato se je izklopil. Popoldne okrog 16. ure je prišlo do zrušitve celotnega elektroenergetskega sistema v Južni Avstraliji (Harmsen, 2017). Nastal je električni mrk po celotni državi, saj je preostanek proizvedene energije zaščitil infrastrukturo. Vključitev dizelskih generatorjev in počasna vzpostavitev povezave z Viktorijo je po približno šestih urah elektrificirala večji del mest, naslednje jutro pa večji del države. Zaradi velike škode je bilo še dva dni po neurju 10.000 hiš brez dobave električne energije. Težave so se pojavile tako v bolnišnicah, kjer so morali prestaviti bolnike z intenzivne nege v druge bolnišnice, kot v industriji, kjer je nastala velika materialna škoda. Eden izmed obratov je bil talilnica cinka, ki je bila nato zaprta še nekaj tednov, saj se jim je vsebina ohladila in strdila. Država je po tem dogodku uvidela, da so potrebne spremembe za zanesljivo dobavo električne energije (Wikipedia, brez datuma).

Leta 2017, ko se je v enem izmed poletnih dni temperatura povzpela na 47 °C, so zabeležili rekordno visoke cene električne energije. Vladalo je brezvetrje, zato se je uporaba klimatskih naprav še povečala. Večji industrijski porabniki so morali prenehati z obratovanjem, oblasti pa so se pripravljale na začasen odklop določenih področij za razbremenitev omrežja. Že nekaj časa so se sicer soočali z motnjami zagotavljanja energije in zvišanimi cenami električne energije. 40.000 gospodinjstev je imelo težave s prekinitvami dobave. Medtem ko je proizvodnja skušala zadostiti zahtevam po energiji, je cena MWh za kratek čas narasla na rekordnih 9500 $, kar je 166-krat več od povprečnih 57 avstralskih dolarjev (Radiotelevizija Slovenija, 2017).

5.3.3 Vpeljava hranilnika energije

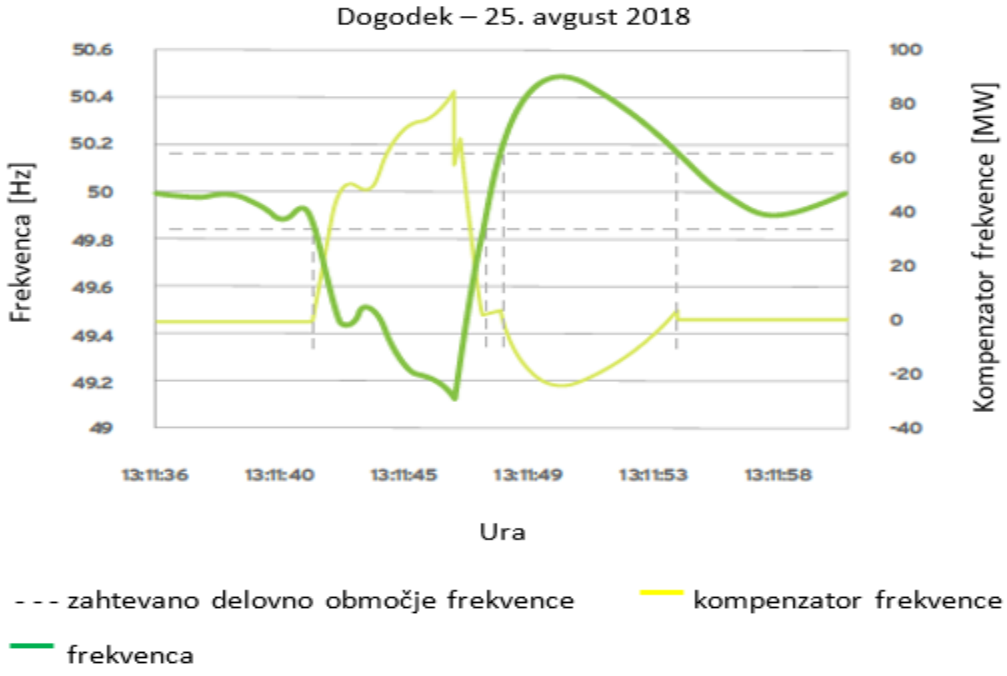
Podjetje Tesla je v povezavi s francoskim proizvajalcem OVE Neoen Južni Avstraliji ponudilo izdelavo in postavitev globalno največjega Li-Ion hranilnega sistema, sestavljenega iz 1000 manjših Li-Ion baterij. S hranilnikom so hoteli povečati zanesljivost dobave energije. Postavljen je bil ob vetrnem sistemu elektrarn Hornsdale z močjo 317 MW. Hranilnik operaterjem omogoča večjo stabilnost omrežja, frekvenčni nadzor in uporabo rezervne energije v času največjega povpraševanja, brezvetrja, oblačnega vremena in ponoči. Zmanjšati so želeli tudi uporabo rezervnih plinskih generatorjev. Za hranilnik so značilni hitri odzivi (nekaj milisekund), zato se na motnje lahko hitro odzove (Parkinson, 2017 a).

Li-Ion baterijski sistem ima 129 MWh energijske kapacitete in 100 MW moči. Zadosti lahko 10-minutnemu napetostnemu upadu, kar naj bi bilo dovolj za zagon in kasnejše vpeljevanje rezervnih plinskih generatorjev. Del baterije s 70 MW je namenjen zagotavljanju stabilnosti in varnosti omrežja, kar bi bilo dovolj za omilitev tako hudih dogodkov, kot so se zgodili septembra 2016. Drugih 30 MW je namenjenih povezovanju z vetrno elektrarno Hornsdale in zmanjšanju visokih dnevnih cen električne energije. Hranilnik pokriva hektar površine, nameščen pa je v vodoodpornih omarah. Cena izgradnje sistema je skrivnostna. Po ocenah naj bi se gibala med 50 in 200 milijoni ameriških dolarjev. Baterija ima garancijsko dobo 15 let (Parkinson, 2017 b).

Ključni sistemski varnostni storitvi hranilnika sta sodelovanje v shemi zaščite integritete sistema (angl. System Integrity Protection Scheme, v nadaljevanju SIPS) in hitri frekvenčni odziv (angl. Fast Frequency Response, v nadaljevanju FFR) v nepredvidljivih dogodkih. SIPS prepreči izgubo povezovanja v primeru izgube več generatorjev in hitro zmanjšanje frekvence. S tem bi lahko preprečili dogodek, kot se je zgodil septembra 2016. Pri FFR gre za zaustavitev padajoče frekvence zaradi nepredvidenih dogodkov. Zagotavlja visoko kakovostno regulacijo in ohranjanje omrežne frekvence v običajnem delovnem območju 50 Hz. Odziv je veliko hitrejši kot pri običajnih velikih parnih turbinah. Na sliki 18 lahko vidimo odziv hranilnika energije na motnjo v omrežju 25. avgusta 2018, ko natančno sledi spreminjajoči se omrežni frekvenci in prepreči padec izven dovoljenih meja (Aurecon Group Brand Pty. Ltd., 2018).

Tehnični in ekonomski rezultati uvedbe Li-Ion baterije so vlado zadovoljili, zato so se zavzeli za izgradnjo dodatnih hranilnih sistemov v okolicah drugih elektrarn. Že konec leta 2018 je pričel delovati baterijski sistem ElectraNet 30 MW/8 MWh, ki pomaga krepiti omrežje in zanesljivost dobave spodnjega polotoka Yorke. Zagotavlja urejanje omrežnih storitev in reguliranje cen energije. V primeru prekinitve dobave na tem območju lahko hranilnik zagotavlja energijo še 2 do 3 ure. Sistem je povezan z vetrno elektrarno Wattle Point (90 MW) in bližnjo sončno elektrarno, ki jima pomaga zagotoviti hiter frekvenčni odziv (ElectraNet Pty. Ltd., brez datuma).

Slika 18: Prikaz delovanja hitre frekvenčne odzivnosti glede na motnjo avgusta 2018



Vir: Aurecon Group Brand Pty. Ltd. (2018).

Kritiki uvedbe baterijskih sistemov imajo popolnoma drugačen pogled kot njihovi državni voditelji. Po njihovem mnenju je shranjevanje energije glede na delež OVE potrebno, vendar pa Tesla-Neoen baterija s svojo rezervno energijo predstavlja le 0,2 % potrebne energije v državi in praktično pomaga vetrnim elektrarnam le pri uravnavanju nihanja moči in pri nekajminutnih rezervah v primeru njihovega nedelovanja (Tetičkovič, 2019). Kljub vpeljavi hranilnikov so leta 2019 zabeležili nove visoke cene energije, saj so zaradi velike vročine in prešibkega vetra klimatske naprave delovale z največjimi obrati. Že podnevi je lastno proizvedene energije močno primanjkovalo. Ko pa je sonce zašlo, je bilo stanje katastrofalno, saj je MWh poskočila na okrog 13.000 $. Elektrodistribucijska podjetja so imela tako ta dan 550 $ izgube na gospodinjstvo (Tetičkovič, 2019).

5.3.4 Zaključek

Tehnične težave s kritičnim spreminjanjem napetosti in frekvence zaradi nestalnega vetra in sonca bi se z vpeljavo primernega, obsežnega in dobro načrtovanega shranjevalnega sistema lahko rešile. To je dokazal tudi Tesla-Neoen baterijski sistem, vendar pa se je treba zavedati njegove relativno kratke življenjske dobe in upadajoče zmogljivosti z leti, ko bo le še med 60 in 65 %. Dolgoročno bo Južna Avstralija ob trenutnem trendu vpeljevanja OVE potrebovala veliko več kapacitet shranjevanja energije, ki ne bodo temeljile le na baterijskih sistemih, saj ti zaradi svojih tehničnih parametrov niso najbolj primerni za shranjevanje večjih količin energije. Ti bodo morali biti zmogljivejši in bolj ekonomični, da bodo lahko poleti zagotavljali rezervno energijo tudi več ur ali celo dni. Finančno bi bil to nedvomno

zelo velik in obsežen projekt. Država se je prehitro odločila za popoln prehod na OVE, saj bi z ohranjeno termoelektrarno lahko imeli zanesljiv (rezervni) sistem. Glede na višanje povprečne temperature v zadnjih letih bodo naraščale tudi cene električne energije, če država ne bo ustrezno ukrepala. Kaj ne bi bilo iz denarja, ki ga porabijo v vročih poletnih dneh, bolj smiselno zgradili jedrske ali termoelektrarne? S finančnega vidika bi bilo to zagotovo bolje. Južna Avstralija je s shranjevanjem presežne energije stabilizirala svoj elektroenergetski sistem. Ne glede na tehnično in ekonomsko učinkovitost shranjevanja energije pa so vsekakor naredili pomemben korak pri razvoju hranilnikov energije po svetu, saj je bila vpeljava Li-Ion baterijskega sistema precej medijsko odmevna.

5.4 Shranjevanje energije s stisnjenim zrakom v Huntorfu

Prvi hranilni sistem s stisnjenim zrakom je leta 1978 zgrajena elektrarna v Huntorfu v Nemčiji z močjo 290 MW. Sledila ji je elektrarna v McIntoshu v Alabami s 110 MW, ki so jo zgradili leta 1991. Slednja ima zmogljivost shranjevanja 2700 MWh in lahko zagotavlja polno obremenitev tudi do 26 ur (Xing & Wang, 2013). Obe kot podzemno skladišče uporabljata solno kaverno oz. umetno zgrajeno solno jamo. Imata nizko tehnično učinkovitost, vendar pa omrežju lahko omogočata rezerve energije z visoko razpoložljivostjo (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001). Novejši sistem CAES, ki kot podzemno skladišče uporablja rudnik apnenca s prostornino 10 milijonov m^3, se nahaja v Nortonu v Ohiu (Xing & Wang, 2013).

5.4.1 Predstavitev in vloga hranilnika v Huntorfu

Huntorf se nahaja v Severni Nemčiji, hranilnik pa je bil tam nameščen pod vodstvom znanega inženirskega podjetja ABB. Solni kaverni za zemeljski plin sta velikosti 310.000 m^3. V delovnih pogojih sistem potrebuje osem ur polnjenja stisnjenega zraka, nato pa lahko dve uri deluje z močjo 290 MW. Zanesljivost delovanja sistema je visoka, saj ima 90 % razpoložljivost in 99 % zanesljivost zagona. Izkoristek sistema CAES v Huntorfu je 42 %, kar je manj kot v CAES v McIntoshu, ki z rekuperacijo toplote doseže učinkovitost tudi do 53 % (Xing & Wang, 2013).

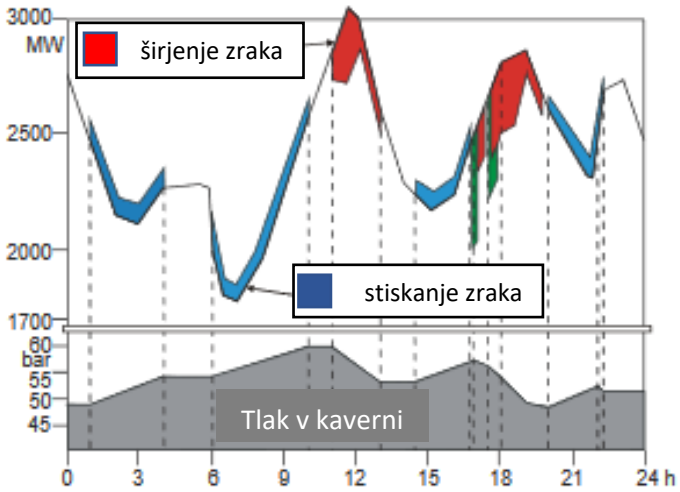
Prvotna vloga hranilnika je bila zagotovitev energetske podpore jedrski elektrarni blizu Severnega morja. Uporabili so jo tudi za nujne kratkotrajne rezerve v primeru nenačrtovanega izpada drugih energetskih virov in kot alternativo za zmanjšanje cen električne energije v času viškov porabe. Število zagonov kompresorja in turbin je bilo v začetku delovanja tudi do 300 na leto, po nekaj letih pa so se zmanjšali zaradi priključitve dodatne hidroelektrarne na omrežje. Z leti je število zagonov padlo tudi pod 100 na leto. Takrat je bil glavni namen uporabe hranilnika zagotavljati rezervno energijo pri zaganjanju termoelektrarn, ki potrebujejo več kot 3 ure za ustvarjanje polne zmogljivosti. V zadnjih letih se je uporaba ponovno povečala, v prihodnosti pa pričakujejo še večjo uporabo sistema, saj je bilo v Nemčiji v zadnjih letih veliko klasičnih elektrarn zaustavljenih, vetrna energija pa je močno v porastu. Količino proizvedene energije vetrnih elektrarn je težko zanesljivo

napovedati, zato hranilnik v Huntorfu pomaga pri njeni kompenzaciji (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001).

5.4.2 Delovanje sistema in solne kaverne

Kompresor za stiskanje zraka naj bi potreboval 60 MW moči, turbina pa poganja generator z 290 MW (Raju & Khaitain, 2011). V času nizke cenovne tarife sistem porablja energijo za stiskanje in shranjevanje zraka v podzemnih solnih kavernah. Ko je cena visoka, se s pomočjo stisnjenega toplega zraka zgoreva zemeljski plin v komorah. Zgorevani plin v plinski turbini postane energetski vir za generator, ki proizvaja električno energijo. To energijo lahko med drugim koristimo za rezanje konične porabe, kot je to prikazano na sliki 20 (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001).

Slika 19: Prikaz rezanja koničnega odjema glede na potek delovanja sistema CAES



Vir: Crotogino, Mohmeyer & Scharf (2001).

Znotraj kavern je tlak običajno med 46 in 66 bari. Z leti delovanja se je večkrat spremenil na raven atmosferskega tlaka. Ob tem je problematično časovno dolgotrajno ponovno polnjenje kavern z visokimi stroški. Mogoča bi bila izvedba le ene solne kaverne, vendar sta bili zaradi lažjega vzdrževanja narejeni dve. V primeru popravila lahko eno od niju ustavimo. Hkrati tudi lažje ponovno polnimo kaverne po prehodu na atmosferski tlak in omogočimo zagon kompresorjev. Zaradi zagotavljanja stabilnosti notranjega tlaka se solni votlini nahajata 650 m pod zemljo, njuno dno pa dosega globino več kot 800 m. Skupni volumen kavern je 310.000 m^3, pri čemer ena zavzema 140.000 m^3, druga pa 170.000 m^3. Temperatura stene kavern je 50 °C. Narejene so bile umetno preko raztapljanja kamene soli in s hkratnim dodajanjem vode (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001). Predvidena cena tovrstnega načina izdelovanja kavern je 2–10 $/kWh, kar naj bi predstavljalo 60 % celotne investicije (Xing & Wang, 2013). Da bi zmanjšali toplotno izmenjavo na skalo v zemlji in s tem zmanjšali toplotne izgube, so kaverne naredili nepravilnih oblik. S tem se je zmogljivost skladiščenja močno povečala. Pri vzdrževanju in upravljanju kavern je pomembna stabilnost

okoliške soli, saj so plinske turbine občutljive na sol pri izgorevanju (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001).

5.4.4 Omejitve sistema v Huntorfu

Slabost sistema CAES v Huntorfu je dolg čas preklopa med obratovanjem, saj za prehod s stiskanja na razširitev zraka potrebuje vsaj 20 minut. To omejuje sistem, da bi uravnotežil hitra nihanja v omrežju, zato ga lahko uporabimo le za predvidljive dogodke v omrežju in kot rezervni vir energije. Novejši CAES sistemi imajo popolnoma ločene komponente za stiskanje in razširjanje, zato je čas preklopa lahko veliko krajši (Xing & Wang, 2013).

Pri CAES je težavno zagotavljanje dolgoročne stabilnosti podzemnega skladišča. Nekatere dele sistema ogroža tudi korozija, saj je stalno prisoten nasičen zrak, stisnjen z vodo. CAES pri svojem delovanju zgoreva zemeljski plin, zato so prisotni izpusti CO_2 in drugi škodljivi plini (Crotogino, Mohmeyer & Scharf, 2001).

5.4.5 Zaključek

Sistem CAES v Huntorfu je trenutno redko uporabljena oblika shranjevanja energije. Pogostost njegove uporabe se je skozi čas spreminjala, vendar pa je v zadnjem času vedno bolj v uporabi. Poleg koristi omrežnih storitev sistem nudi dober vpogled v praktično vpeljan hranilni sistem, s pomočjo katerega lahko v prihodnosti nastanejo tehnološko in ekonomično učinkovitejši sistemi. Nastalo je veliko raziskav, ki so analizirale njegovo delovanje. Ena izmed njih govori o izboljšani učinkovitosti pri delni obremenitvi z uporabo odpadne toplote, ki se izloča v procesu. Predvideva uporabo vbrizgane parne plinske turbine, s katero bi med procesom vbrizgali paro. S tem bi izboljšali učinkovitost ciklov in turbin ter prihranili gorivo (Lückert, 2016).

S pomočjo analiz sistema v Huntorfu so strokovnjaki lahko ugotovili, kako bi lahko CAES sistemi pridobili večjo tehnično in ekonomsko učinkovitost in posledično več vpeljav v elektroenergetski sistem (Xing & Wang, 2013):

- Razviti nove tehnologije komponent sistema, zlasti na področju kompresorjev in turbin, s katerimi bi zmanjšali uhajanje zraka in izgube v delovanju.
- Izboljšati tehnično učinkovitost z izkoriščanjem odpadne toplote in tehnoloških izboljšav, ki bi po mnenju strokovnjakov lahko dosegla tudi do 80 % izkoristek procesa.
- Elektrarne CAES predstaviti širši javnosti, jih finančno podpreti in vzpostaviti sodelovanje med podjetji za izgradnjo učinkovitega sistema.
- Vzpostaviti programska orodja za analiziranje sistema in simuliranje delovanja, s čimer bi lažje razumeli dinamiko delovanja sistema, izboljšali učinkovitost, optimizirali delovanje in posledično zmanjšali velikost elektrarn.

- Preučiti možne geografske lokacije CAES sistemov in tako zmanjšati stroške izgradnje podzemnih jam.
- Omogočiti učinkovitejše in čistejše zgorevanje fosilnih goriv in zmanjšati vpliv na okolje.

SKLEP

V zadnjih desetletjih se je delež OVE močno povečal, zato se je razvil tudi konkurenčni trg. S tem so postali komercialno dostopnejši, njihove cene pa se z razvojem še znižujejo. Tako se bo uporaba OVE v omrežju nedvomno še povečevala. Trenutno zasnovano elektroenergetsko omrežje, tako v Sloveniji kot globalno, ne prenese večjega deleža OVE od 30 %, če vanj niso vključeni hranilniki energije oziroma če nestabilnosti omrežja v veliki meri ne pokriva uvoz električne energije iz drugih držav. Zadostno količino energije, nemoteno dobavo in manjšo količino strupenih izpustov lahko dobimo le s sočasnim obratovanjem tehnično učinkovitejših in stabilnejših klasičnih elektrarn in elektrarn, ki temeljijo na OVE.

Večina trenutno razvitih hranilnikov energije je v kombinaciji z OVE tehnično in ekonomsko neupravičena za razširjeno vpeljavo v elektroenergetski sistem. Ne glede na napredek obeh pa je v prihodnosti za nemoteno in stabilno dobavo treba ohraniti tudi delež klasičnih elektrarn. Tako jedrske kot termoelektrarne lahko z novimi tehnologijami zmanjšajo delež škodljivih snovi in izpustov v okolje.

Vključevanje OVE ponuja nove možnosti in hkrati težave za elektroenergetsko omrežje. Te bi se lahko zmanjšale s shranjevanjem energije, saj bi energijo, pridobljeno iz obnovljivih virov, ki je v nekem trenutku ni mogoče porabiti, prihranili za čas primanjkovanja energije. Glavna težava prehoda na OVE je njihova nestabilnost zaradi vremenske spremenljivosti in nestabilnost fizikalne vztrajnosti, ki pa jo bi s shranjeno energijo lahko odpravili. Poleg povečane uporabe OVE in s posledično zmanjšano odvisnostjo od fosilnih goriv lahko s hranilniki energije omogočimo tudi ravnovesje med povpraševanjem in ponudbo, povečamo kakovost in zanesljivost električne energije, decentraliziramo proizvodnjo energije ter odkrivamo nove možnosti, ki nam jih omogočajo tehnologije (električni avtomobili, pametna omrežja, samooskrba). Shranjevanje energije ima tudi ekonomske učinke, saj zmanjšamo cene v času največje porabe energije, pri industrijskih obratih pa z rezervnim napajanjem preprečimo škodo, ki bi se lahko zgodila ob nepričakovani zaustavljeni dobavi energije. Shranjevanje energije tako lahko pozitivno vpliva na podjetja v distribuciji električne energije, industrijo, pa tudi na gospodinjske odjemalce.

Vsaka država sama izbira smer razvoja energetske proizvodnje. Tiste, ki se bodo odločile za večanje deleža OVE, bodo morale že zelo hitro začeti vpeljevati hranilnike energije, če ne bodo hotele biti odvisne od uvoza električne energije in posledično višjih cen.

Porast vpeljave hranilnikov je v zadnjih letih zelo opazen, saj se je njihova inštalirana moč od leta 2014 do 2019 povečala za 26 %. Poleg črpalnih hidroelektrarn, ki so predstavljale skoraj celoten delež vseh hranilnikov energije, so v zadnjih letih vpeljali v sistem tudi druge tehnologije. Prav tako se postopoma razvijata standardizacija in trg, s čimer se bodo povečale investicije v razvoj in vpeljavo hranilnih sistemov. Tako bo na voljo vedno več komercialno primernih tehnologij, ki bodo s časom tehnološko in ekonomično postale učinkovitejše.

Trenutno so za vpeljavo v elektroenergetski sistem tehnološko in ekonomsko primerne le črpalne hidroelektrarne. Vodnate države si jih lahko privoščijo, vendar pa z njihovo izgradnjo močno posežejo v naravni in biološki sistem. Ekonomsko upravičen je lahko tudi sistem za stiskanje zraka, če ga zgradimo na zapuščenih rudnikih ali podzemnih votlinah, s katerimi lahko precej zmanjšamo investicijske stroške. Težava pri tem sistemu je zgorevanje zemeljskega plina in posledičnih emisijah. Emisije se pojavljajo tudi pri uporabi shranjevanja s sintetičnim zemeljskim plinom in pri določenih načinih uporabe gorivnih celic. Kljub svoji tehnični neučinkovitosti so lahko v primernih naravnih okoliščinah ekonomični tudi termalni sistemi shranjevanja energije. Poleg omenjenih sistemov je za dolgotrajno skladiščenje energije primerno tudi shranjevanje energije z vodikom, ki pa še ni razvito za komercialno uporabo.

Vsi ti sistemi omogočijo veliko rezervo energije, zmanjšajo cene v času največje porabe in omogočajo sezonsko skladiščenje energije. Večinoma imajo daljšo življenjsko dobo od drugih sistemov, vendar zaradi svoje velikosti fizično precej posegajo v okolje. Manj primerne so za reguliranje frekvenčnega območja in zagotavljanje kakovosti električne energije. Za to so primernejši hranilniki s hitrejšim odzivom, kot so vztrajniki, superprevodne magnetne tuljave in superkondenzatorji. Ti imajo milisekundni odzivni čas, visok izkoristek, visoko izhodno moč in dolgo življenjsko dobo. Trenutno so vsi ekonomsko še neupravičeni za komercialno uporabo. Enako velja za gorivne celice, ki so zaradi velike gostote energije in izkoristka primerne za uporabo tako v avtomobilih kot za zagotavljanje kakovosti električne energije in shranjevanje energije daljši čas. Tudi vse vrste baterij lahko uporabimo v omrežnih storitvah, vendar so ekonomične le za kratkotrajne storitve. Njihova slabost sta kratka življenjska doba in zmanjšanje izkoristka s časom zaradi poslabšanja kemijskih procesov.

Tehnično bi torej lahko uporabili vse zgoraj naštete načine shranjevanja, vendar so trenutno ekonomsko upravičene le črpalne hidroelektrarne in morda kakšen sistem, ki so ga prilagodili svojim tehničnim karakteristikam in izkorišča naravne danosti. Veliko tehnologij shranjevanja je perspektivnih, vendar jih bosta morala širša stroka in javnost prepoznati, da se lahko njihov pospešen razvoj šele začne. Tudi če bi se to zgodilo danes, bo potrebno še vsaj desetletje ali več za uveljavitev in posledično komercialno uporabo.

Kateri način je torej najzanimivejši za uporabo v prihodnosti? Odgovora na to ne moremo dati, saj ima vsaka tehnologija svoje prednosti in omejitve. Vsi sistemi, tako elektroenergetski kot manjši, imajo svoje zahteve, ki jim lahko zadostimo le z različnimi

hranilnimi sistemi. Nedvomno je potrebna vpeljava stroškovno upravičenih hranilnikov, ki pri svojem procesu izgubijo čim manjši delež energije in hkrati ne izgorevajo fosilnih goriv. Če jih sistemi izgorevajo, potem so praktično neuporabni, saj je v tem primeru ceneje ohraniti višji delež klasičnih elektrarn.

Vsaka vpeljava hranilnega sistema v omrežje je, ne glede na njegovo vlogo in učinkovitost, pomembna za prihodnji razvoj shranjevanja energije. Tako kot se danes lahko šalimo o velikosti prvih računalnikov, tako se bomo verjetno lahko tudi le nasmehnili nad hranilnimi sistemi čez 50 let, ko bodo ti tehnično izboljšani in cenovno dostopnejši.

Ob trenutnem trendu razvoja proizvodnje električne energije lahko rečemo, da bodo hranilniki energije čez desetletja pomemben in nepogrešljiv del elektroenergetskega omrežja in tehnoloških sistemov. Ker pa se trend lahko s tehnološko inovacijo tudi obrne, bo nedvomno zanimivo spremljati dogajanje na tem področju. Morda se bo v prihodnosti razvil nov način proizvajanja električne energije in bo uporaba hranilnikov nepotrebna, morda pa bodo ključni za delovanje sistema. Vsekakor bo tehnologija shranjevanja električne energije ostala zanimivo področje, ki se bo z leti nedvomno razvijalo in odpiralo nova poglavja v elektroenergetiki.

LITERATURA IN VIRI

1. Agencija za energijo. (2014). *Pametna omrežja*. Pridobljeno 3. oktobra 2019 iz https://www.agen-rs.si/izvajalci/elektrika/pametna-omrezja
2. Aurecon Group Brand Pty. Ltd. (2018). *Hornsdale power reserve impact study*. Pridobljeno 25. septembra 2019 iz https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=15&ved=2ahUKEwisxO-YkbnkAhUCi8MKHTisBMsQFjAOegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.aurecongroup.com%2F-%2Fmedia%2Ffiles%2Fdownloads-library%2F2018%2Faurecon-hornsdale-power-reserve-impact-study-2018.pdf%3Fla%3Den&usg=AOvVaw3reC1grV3iGYH2dCINZEbB
3. Australian Energy Market Operator. (2014). *Engaging, responding and adapting to changing energy markets*. Pridobljeno 12. septembra 2019 iz https://www.aemo.com.au/-/media/Files/About_AEMO/Annual-Report/AEMO-Annual-Report-2014.pdf
4. AX elektronika d.o.o. (2014). 1800 km z novimi aluminij-zračnimi baterijami. *Svet elektronike*. Pridobljeno 14. avgusta 2019 iz https://svet-el.si/revija/novice/1800-km-z-novimi-aluminij-zracnimi-baterijami/
5. Ažman, G. (2016). *Uporaba sintetičnega plina pri shranjevanju električne energije* (magistrsko delo). Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko.
6. Basmaji, E.A. (2019). Flywheel Energy Storage System. *Examination paper*. Pridobljeno 14. avgusta 2019 iz https://www.researchgate.net/publication/332061263
7. Battery University. (brez datuma). *What's the Best Battery?*. Pridobljeno 14. avgusta 2019 iz https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery
8. Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglabe, A. & Rosehart, W. (2010). Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources. *Energy for Sustainable Development*, *14*(4), 302–314.
9. Bocklisc, T. (2015). Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*, *73*, 103–111.
10. Božič, P. (2016). *Analiza in potencial neto meritvene sheme v Sloveniji* (magistrsko delo). Ljubljana: Ekonomska fakulteta.
11. Cam, E. (2014). *Identifying Energy Arbitrage Opportunities based on Statistical Analysis of Electricity Prices* (magistrsko delo). Pridobljeno 30. avgusta 2019 iz https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/itet/institute-eeh/power-systems-dam/documents/SAMA/2014/Cam-MA-2014.pdf

12. Canadian Energy Research Institute. (2019). Electricity storage systems. *Applications and Business cases study No.180.* Pridobljeno 16. septembra 2019 iz https://ceri.ca/files/publications/426

13. Cleanleap Pty. Ltd. (brez datuma). *How Thermal Storage Works*. Pridobljeno 25. avgusta 2019 iz https://cleanleap.com/3-thermal-storage/how-thermal-storage-works

14. Crotogino, F., Mohmeyer, K.U. & Scharf, R. (2001). *Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation*. Pridobljeno 5. oktobra 2019 iz http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf

15. Dragoon, K. (2018). Power to Gas. *Flink Energy Consulting Study*. Pridobljeno 2. avgusta 2019 iz https://flinkenergy.com/resources/Power%20to%20Gas.pdf

16. Dufresne Private Ltd. (brez datuma). *Hybrid energy storage: Are combined solutions gaining ground?* Pridobljeno 23. septembra 2019 iz https://energystorageforum.com/news/energy-storage/hybrid-energy-storage-combined-solutions-gaining-ground

17. EASE & ERRA. (2015). *European Energy Storage Technology Development road map towards 2030*. Pridobljeno 5. avgusta 2019 iz http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2015/10/EASE-EERA-recommendations-Roadmap-LR.pdf

18. ElectraNet Pty. Ltd. (brez datuma). *Boosting Reliability on Lower Yorke Peninsula*. Pridobljeno 29. septembra 2019 iz https://www.electranet.com.au/electranets-battery-storage-project/

19. ELES. (brez datuma). V *Slovar izrazov*. Pridobljeno 25. avgusta 2019 iz https://www.eles.si/medijsko-sredisce/slovar-izrazov-in-kratic/slovar-izrazov

20. Energy Storage Association. (brez datuma a). *Hydrogen Energy Storage*. Pridobljeno 10. novembra 2019 iz https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/hydrogen-energy-storage/

21. Energy Storage Association. (brez datuma b). *Batteries*. Pridobljeno 14. avgusta 2019 iz http://energystorage.org/energy-storage/technologies/redox-flow-batteries

22. Energy Storage Association. (brez datuma c). *Mechanical Energy Storage*. Pridobljeno 14. avgusta 2019 iz https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/mechanical-energy-storage/

23. Eurostat. (2019). *Statistični podatki o cenah električne energije*. Pridobljeno 16. januarja 2020 iz https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/sl

24. Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. (2019). *Unlocking the Potential of Hydrogen Energy Storage*. Pridobljeno 5. novembra 2019 iz http://www.fchea.org/in-transition/2019/7/22/unlocking-the-potential-of-hydrogen-energy-storage

25. Ferreira, H.L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W. & Lopes, J.P. (2013). Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, *53*, 288–298.

26. Ferstl, J., Renner, H. & Brandl, S. (2019). Power quality improvement in a rural grid by grid storage system. *25th International Conference on Electricity Distribution – Madrid*. Ljubljana: Slovensko združenje elektroenergetikov CIRED.

27. Gaberšček, M. (2018). Baterije – resnice in zmote? *10. Inovacija energetike – Brdo pri Kranju*. Ljubljana: Kemijski inštitut.

28. Goreham, S. (2019). *Battery Storage - An Infinitesimal Part of Electrical Power*. Pridobljeno 5. avgusta 2019 iz https://www.energycentral.com/c/gr/battery-storage%E2%80%94-infinitesimal-part-electrical-power

29. Haisheng, C., Thang N.C., Wei Y., Chunqing, T., Yongliang, L. & Yulong, D. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, *19*(3), 291–312.

30. Hannan, M.A., Hoqueb, M.M., Mohamed, A. & Ayob, A. (2017). Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 771–789.

31. Harmsen, N. (2017). *AEMO releases final report into SA blackout, blames wind farm settings for state-wide power failure*. Pridobljeno 29. septembra 2019 iz https://www.abc.net.au/news/2017-03-28/wind-farm-settings-to-blame-for-sa-blackout-aemo-says/8389920

32. Ibrahim, H. & Ilinca, A. (2011). *Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies*. Pridobljeno 20. oktobra 2019 iz https://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/techno-economic-analysis-of-different-energy-storage-technologies

33. IEA-ETSAP & IRENA. (2013). Thermal Energy Storage. *Technology Brief*. Pridobljeno 5. avgusta 2019 iz https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E17-Thermal-Energy-Storage.pdf

34. International Electrotechnical Commission. (2011). *Electrical Energy Storage*. Pridobljeno 1. avgusta 2019 iz https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf

35. International Energy Agency. (2014). *Technology Roadmap: Energy storage*. Pridobljeno 1. avgusta 2019 iz https://www.researchgate.net/publication/261848307_Technology_Roadmap_Energy_storage/link/0a85e535a4091ab9d6000000/download

36. Jurjevčič, B., Mori, M. & Drobnič, B. (2012). *Tehnologije gorivnih celic* (laboratorijska vaja). Ljubljana: Fakulteta za strojništvo.

37. Kirbiš, J. (2016). *Proizvodnja vodika iz viškov električne energije* (magistrsko delo). Maribor: Fakulteta za strojništvo.

38. Kroposki, B. (brez datuma). Seasonal Energy Storage. *Presentation of national renewable energy laboratory*. Pridobljeno 15. septembra 2019 iz http://smart-cities-centre.org/wp-content/uploads/Kroposki-Seasonal_Energy_Storage.pdf

39. Laboratorij za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko. (2013). *Proizvodnja in shranjevanje vodika*. Pridobljeno 7. novembra 2019 iz http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/mate_tehn/Vodik_proizv_sklad.pdf

40. Leskošek, T. (2019). Gorski svet in pridobivanje energije. *Planinski vestnik 7-8*:8-11.

41. Lückert, J. (2016). *Advancement of Operational Performance of the Huntorf CAES*. Pridobljeno 1. oktobra 2019 iz https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/research/grouplist/electricalpower/images/members/shared/theshard/presentations/lueckert_caes_london_12062016.pdf

42. Luo, X., Wang, J., Dooner, M. & Clarke, J. (2014). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, *137*, 511–536.

43. Marks, K. (2016). Innovation is in our blood: how South Australia leads the way on renewables. *The guardian*. Pridobljeno 29. septembra 2019 iz https://www.theguardian.com/commentisfree/2016/apr/21/innovation-is-in-our-blood-how-south-australia-leads-the-way-on-renewables?CMP=twt_a-environment_b-gdneco

44. Mihalič, R. (2011). »Zelena« energija – bližnjica k energetski neodvisnosti ali slepa ulica? *Elektrotehniški vestnik*, *78*(5), 245–256.

45. Nunez, C. (2014). How Green Are Those Solar Panels, Really? *National Geographic*. Pridobljeno 1. avgusta 2019 iz https://www.nationalgeographic.com/news/energy/2014/11/141111-solar-panel-manufacturing-sustainability-ranking/

46. Parkinson, G. (2017 a). *Explainer: What the Tesla big battery can and cannot do*. Pridobljeno 29. avgusta 2019 iz https://reneweconomy.com.au/explainer-what-the-tesla-big-battery-can-and-cannot-do-42387/

47. Parkinson, G. **(**2017 b). *Tesla big battery officially switched on in South Australia***.** Pridobljeno 23. septembra 2019 iz https://reneweconomy.com.au/tesla-big-battery-officially-switched-on-in-south-australia-55285/

48. Paulus, P. (2014). *Energy storage and Synthetic Natural Gas*. Pridobljeno 29. avgusta 2019 iz http://energy.sia-partners.com/wpfiles/2014/05/Paulus_Pascale_ArticleUpdated1.pdf

49. Pokale, W. K. (2012). Effects of thermal power plant on environment. *Science Reviews & Chemical Communications*, *2*(3), 212–215.

50. Pušnik, I. (2011). Preskušanje in energetska učinkovitost. *Študijska skripta*, *3*, 87–93.

51. Radiotelevizija Slovenija. (2017). *Zaradi vročinskega vala v Avstraliji rekordna cena elektrike*. Pridobljeno 20. septembra 2019 iz https://www.rtvslo.si/okolje/novice/zaradi-vrocinskega-vala-v-avstraliji-rekordna-cena-elektrike/414723

52. Raju, M. & Khaitan, S.K. (2011). Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant. *Applied* Energy, 89, 474–481.

53. Ren21. (2019). Renewables 2019. *Global status report.* Pridobljeno 25. oktobra 2019 iz https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf

54. Rhenish-Westphalian Power Plant. (2010). Adiabatic compressed air energy storage for electricity supply. *ADELE brochure*. Pridobljeno 25. avgusta 2019 iz https://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/364260/1/rwe-power-ag/innovations/Brochure-ADELE.pdf

55. Savske elektrarne Ljubljana. (brez datuma). *Vplivi vodnih zadrževalnikov in hidroelektrarn na habitatne tipe, floro in favno*. Pridobljeno 22. avgust 2019 iz http://www.sel.si/vplivi-hidroelektrarn

56. Solar Media Ltd. (2017). *Canadian firms NRStor and Hydrostor partner up on utility-scale adiabatic compressed air storage*. Pridobljeno 23. septembra 2019 iz https://www.energy-storage.news/news/canadian-firms-nrstor-and-hydrostor-partner-up-on-utility-scale-adiabatic-c

57. Soške elektrarne Nova Gorica (brez datuma). *Avče*. Pridobljeno 10. avgusta 2019 iz https://www.seng.si/hidroelektrarne/crpalne-hidroelektrarne/2017060910104485

58. Styczynski, Z., Adamek, F., Abbey, C., Almeida do Vale, Z.M., Cheng, S., Favre-Perrod, P., Ferret, R., Iravani, R., Iwasaki, H., Joos, G., Kieny, C., Kleimaier, M., Lazarewicz, M., Lombardi, P., Mercado, P. E., Soo Moon, M., Ohler, C., Peças Lopes, J., Piekutowski, M., Price, A., Roberts, B., Seethapathy, R., Verma, S.C., Vikelgaard, H., Voropai, N. & Wojszczyk, B. (2011). Electric Energy Storage Systems. *CIGRE C6.15 No. 458*. CIGRE:Paris.

59. Šalamun, A. (2013). Potrebujemo še vsaj eno črpalno hidroelektrarno. *Finance.* Pridobljeno 1. oktobra 2019 iz https://www.fe.uni-lj.si/mma/Potrebujemo-vsaj-%C5%A1e-eno-%C4%8Drpalno-hidroelektrarno/2013111315023253/

60. Špindler, R. (2016). *Kriogena akumulacija energije* (diplomsko delo). Maribor: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo).

61. Taczi, I. & ERRA. (2016). Overview of the Energy Storage Possibilities to Support the Electrical Power System. *Research Paper to assist the ERRA Licensing and Competition Committee*. Pridobljeno 1. avgusta 2019 iz https://erranet.org/wp-content/uploads/2016/09/Research_Paper_Energy_Storage_final_2016_eng.pdf

62. Tetičkovič, L. (2019). Prej ali slej bomo spet v atomski dobi: zelena družba je mogoča – z jedrskimi elektrarnami. *Svet24*. Pridobljeno 29. septembra 2019 iz https://novice.svet24.si/clanek/novice/slovenija/5d8f50e906050/prej-ali-slej-bomo-

spet-v-atomski-dobi-zelena-druzba-je-mogoca-z-jedrskimi-elektrarnami?fbclid=IwAR3r7RXo34cDC3WHody3ScSHjp1dW2A8g4z3zxUwBls3s5cRgTPa-Rrl1sU

63. The Pennsylvania State University. (brez datuma). *Basic economics of power generation, transmission and distribution*. Pridobljeno 20. oktobra 2019 iz https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/530

64. Vilman, A. & Jerele, M. (2019). *Vgradnja Li-Ion hranilnika električne energije v nizkonapetostna omrežja z veliko razpršene proizvodnje*. 14. konferenca slovenskih elektroenergetikov – Laško 2019. Ljubljana: Slovensko združenje elektroenergetikov CIGRE.

65. Weber, A., Mench, M., Meyers, J., Ross, P., Gostick, J. & Liu, Q. (2011) Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, *41*, 1137–1164.

66. Wikipedia. (brez datuma). *South Australian blackout*. Pridobljeno 29. septembra 2019 iz https://en.wikipedia.org/wiki/2016_South_Australian_blackout

67. Xing, L. & Wang, J. (2013). Overview of current development on compressed air energy storage. *EERA technical report*. Pridobljeno 1. septembra 2019 iz https://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/Overview-of-Current-Development-on-Compressed-Air-Energy-Storage_EERA-report-2013.pdf