

dr.sc. Javor Škare
KONČAR-INEM
jskare@koncar-inem.hr

Hrvoje Divić
KONČAR-INEM
hdivic@koncar-inem.hr

USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA POHRANE ELEKTRIČNE ENERGIJE

SAŽETAK

Trenutno je na tržištu dostupan velik broj tehnologija pohrane električne energije, koje se često dijele na elektrokemijsku pohranu energije, mehaničku pohranu energije, pohranu kemijske energije i pohranu toplinske energije. Sve tehnologije imaju svoje prednosti i nedostatke, koje određuju kada je koja prikladna za primjenu u različitim situacijama. Tehnički napredne tehnologije koje se trenutno najviše koriste su crpno-akumulacijske hidroelektrane i sustavi za pohranu energije komprimiranim zrakom (mehanički) te baterijski sustavi za pohranu električne energije. Iako su neke od tih tehnologija dobro poznate, razvoj na tom području je ogroman i brz. To stvara potrebu za dubljim poznavanjem svake tehnologije da bi se mogla pronaći ona koja je najprikladnija za svaku situaciju.

Ključne riječi: Crpno – akumulacijske hidroelektrane, sustavi pohrane energije komprimiranim zrakom, baterijski sustavi za pohranu električne energije, pohrana energije pomoću zamašnjaka, proizvodnja i skladištenje vodika i toplinski sustavi za pohranu električne energije

VARIOUS ELECTRICAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES COMPARISON

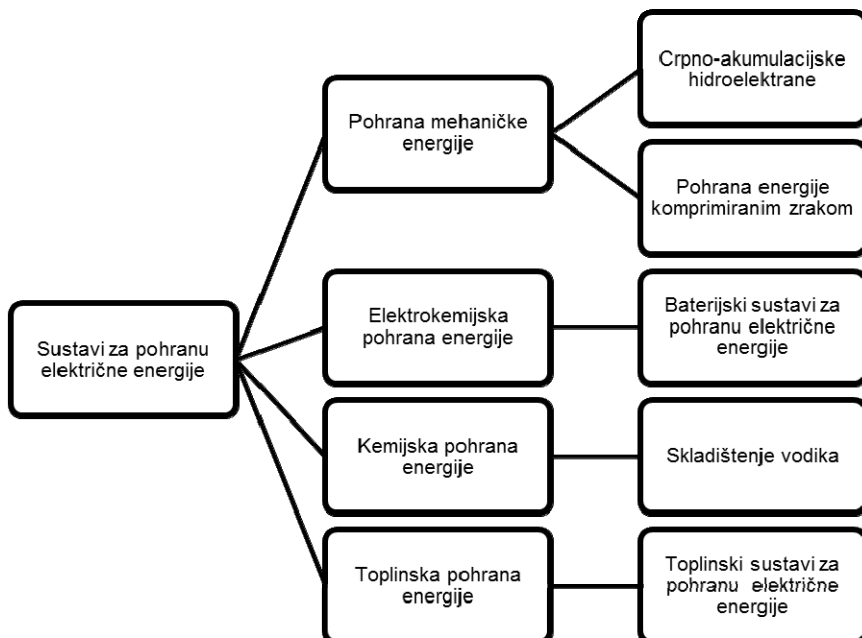
SUMMARY

Presently there is a great number of Electrical Energy Storage Technologies available on the market, often divided into Electrochemical Energy Storage, Mechanical Energy Storage, Chemical Energy Storage and Thermal Energy Storage. All of the technologies have their advantages and disadvantages therefore which are ideal in different situations and applications. The more mature technologies currently used are pumped hydro energy storage, compressed-air energy storage (mechanical) and battery electrical energy storage (electrochemical). Even though some of the conventional technologies are well known, the development in the field is vast and fast. This creates a need to a more in-depth knowledge of each technology to be able to find the one most suitable for each situation.

Key words: Pumped hydro energy storage, compressed-air energy storage, flywheel energy storage, battery electrical energy storage system, hydrogen energy storage, thermal electrical energy storage

1. UVOD

U elektroenergetskom sustavu (EES) vrši se stalno uravnoteženje između proizvedene i potrošene električne energije. Pohrana proizvedene električne energije za vrijeme smanjenog opterećenja ili povećane proizvodnje te njezina predaja u trenucima povećanog opterećenja ili smanjene proizvodnje omogućuje optimalno vođenje EES-a. Međutim, izmjenična električna energija se ne može direktno pohraniti, ali ju je moguće pohraniti pretvarajući je u neki drugi oblik energije, na primjer mehaničku, kemijsku, elektrokemijsku ili toplinsku.



Slika 1. Tehnologije pohrane električne energije prema načinu pohrane

Na slici 1 predočene su razne tehnologije za pohranu električne energije koje se danas koriste prema načinu pohrane. Različite tehnologije spremnika električne energije imaju različite značajke. Radi toga ne mogu sve tehnologije spremnika biti jednako prikladne za sve funkcije koje mogu obavljati u elektroenergetskom sustavu.

Postrojenja velike snage s mogućnošću pohrane velike količine električne energije (nazivne snage >50 MW, s mogućnošću pohrane električne energije >250 MWh) danas se još uvijek gotovo isključivo izvode kao crpno-akumulacijske hidroelektrane ili kao hibridna postrojenja s pohranom komprimiranog zraka za rad plinskih termoelektrana. Takva postrojenja se grade samo na mjestima gdje su zadovoljeni neophodni lokalni geološki uvjeti. Radi se najčešće o izdvojenim lokacijama u električnoj mreži.

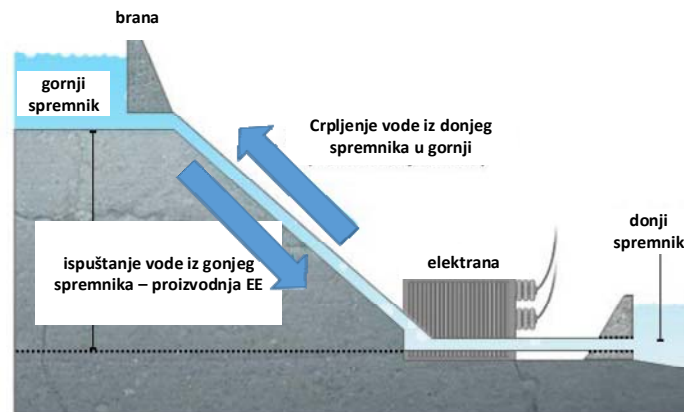
Postrojenja srednje i male snage s mogućnošću pohrane srednjih i malih količina električne energije (do nazivne snage 50 MW, s mogućnošću pohrane električne energije do 250 MWh) danas se najčešće izvode kao baterijski sustavi za pohranu električne energije. Međutim, postoje i druge tehnologije koje se danas ubrzano razvijaju, a neke od njih opisane su u ovom referatu.

2. CRPNO-AKUMULACIJSKE HIDROELEKTRANE

Crpno-akumulacijske hidroelektrane koriste se za pohranu električne energije još od davne 1890. godine, kada je izgrađena prva takva elektrana u Italiji i Švicarskoj [5]. Trenutno je u svijetu instalirano preko 120 GW crpno - akumulacijskih hidroelektrana, što danas čini približno 99% svih instaliranih sustava za pohranu električne energije u svijetu [3]. Trenutno najveća crpno-akumulacijska hidroelektrana je Bath Country, Virginia, SAD, reverzibilnog je tipa i ima instaliranu nazivnu snagu 3003 MW [5].

Za razliku od konvencionalnih hidroelektrana, kod kojih voda protječe kroz postrojenje iz akumulacijskog jezera (spremnika vode) i nastavlja dalje prirodnim tokom, crpno-akumulacijske hidroelektrane sastoje se od dva spremnika za vodu (akumulacijska jezera), na različitim visinama. Gornji i donji spremnik za vodu povezani su cjevovodima.

Za vrijeme malih opterećenja energija se pohranjuje tako da se voda crpi iz donjeg u gornji spremnik, a kada je zbog velike potrošnje potrebno proizvoditi električnu energiju, voda teče iz gornjeg u donji spremnik te pokreće turbinu s generatorom, slika 2 [1].



Slika 2. Princip rada crpno – akumulacijske hidroelektrane

Postoje dvije vrste crpno-akumulacijskih hidroelektrana. Kod reverzibilnih hidroelektrana dva spremnika su povezana jednim cjevovodom po bloku, a u cjevovodu se nalazi reverzibilna turbina koja može po potrebi raditi i kao crpka i kao turbina. Druga vrsta su crpne hidroelektrane kod kojih su spremnici vode povezani s dva cjevovoda po bloku, u jednom cjevovodu je turbina, a u drugom crpka.

Crpno-akumulacijske hidroelektrane razlikuju se i po načinima pohrane energije na čisti crpni sustav i kombinirani crpni sustav pohrane.

Čisti crpni sustav pohrane baziran je na spremnicima koji nisu dio prirodnog vodnog toka i namijenjen je kratkotrajnoj pohrani energije, najčešće ispod 24 sata. Crpljenje vode se odvija za vrijeme smanjene potrošnje električne energije, a za vrijeme povećane potrošnje pohranjena energija koristi se za pokrivanje vršnih opterećenja.

Kod kombiniranih sustava gornji spremnik vode se osim pumpanjem puni i prirodno prolazećom vodom. To podrazumijeva izgradnju gornjeg spremnika vode na odgovarajućem vodnom slivu.

Za donje spremnike mogu se za oba sustava koristiti postojeće akumulacije, napušteni rudnici ili druge podzemne šupljine, a moguća su i rješenja s otvorenim morem. Prva crpno – akumulacijska hidroelektrana koja koristi morsku vodu izgrađena je u Japanu 1999. godine u Yanbaru.

Prednosti crpno – akumulacijskih hidroelektrana:

- Provjerena tehnologija koja omogućava skladištenje velike količine energije.
- Visok stupanj iskoristivosti 70-85%.
- Malo samopražnjenje.
- Relativno kratko vrijeme odziva (nekoliko minuta).
- Umjerena cijena (€/kWh).
- Dug životni vijek.

Nedostaci crpno – akumulacijskih hidroelektrana:

- Mala gustoća energije.
- Ovisnost mogućnosti izgradnje o geološkoj formaciji okoliša.
- Veliki utjecaj na okoliš.
- Zahtjeva ogromne vodene resurse.

Zbog sve većeg utjecaja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, crpno-akumulacijske hidroelektrane još uvijek imaju vodeću ulogu u skladištenju električne energije, a razlog je to što ostale novije tehnologije za pohranu energije trebaju još vremena da se nametnu kao komercijalno isplative.

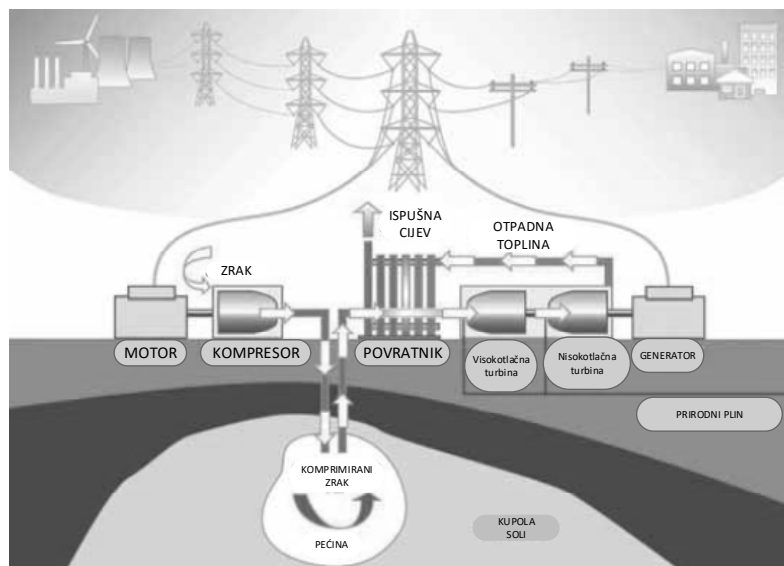
Međutim, izgradnja novih crpno-akumulacijskih hidroelektrana je izazov zbog utjecaja na okoliš i potrebe pronalaska odgovarajućih visinskih razlika u krajolicima.

Zbog toga se danas proizvođači električne energije prvo okreću rekonstrukciji i modernizaciji postojećih hidroelektrana u cilju podizanja njihove nazivne snage i učinkovitosti, nakon toga korištenju postojećih akumulacija, kao donjih spremnika vode pri izgradnji novih crpno-akumulacijskih hidroelektrana, a države koje posjeduju podzemne rudnike koji se više ne koriste pokreću istraživanja za

izgradnju podzemnih crpnih hidroelektrana. Budućim razvojem tehnologije očekuje se sve povoljnija cijena izgradnje crpno-akumulacijskih hidroelektrana koje koriste morsku vodu.

3. SUSTAVI POHRANE ENERGIJE KOMPRIMIRANIM ZRAKOM

Tehnologija skladištenja energije pomoću komprimiranog zraka još je jedna provjerena tehnologija poznata već od 19. stoljeća. Komprimirani zrak se pohranjuje u podzemnom spremniku ili nadzemnom sustavu spremnika ili cijevi, po potrebi miješa s prirodnim plinom, spaljuje i širi u modificiranoj plinskoj turbini za proizvodnju električne energije, slika 3 [2].



Slika 3. Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom

Sustav pohrane energije komprimiranim zrakom sastoji se od tri glavna dijela: kompresora, spremnika zraka i plinske turbine/generatora.

Za vrijeme malih opterećenja energijom iz električne mreže pokreće se kompresor, koji komprimira zrak i gura ga u spremnik. Ovaj komprimirani zrak se koristi za vrijeme vršnog opterećenja tako da se širi, miješa s prirodnim plinom i zatim sagorijeva i pokreće plinsku turbinu. Kod konvencionalnih plinskih termoelektrana ciklus komprimiranja zraka vrši se za vrijeme rada turbine, što smanjuje učinkovitost plinskih turbina u odnosu na ovakav sustav.

Tipična podzemna skladišta su špilje ili napušteni rudnici, npr. soli. Prilikom komprimiranja zrak se zagrijava, a poslije širenja hladi. Zbog toga se zrak nakon komprimiranja najprije treba ohladiti prije nego se smjesti u spremnik, a komprimirani hladni zrak se nakon širenja treba opet zagrijati jer bi inače moglo doći do zaleđivanja krilaca turbine. To znatno smanjuje učinkovitost koja kod suvremenih sustava pohrane komprimiranim zrakom (koje zovu i „dijabatski“ sustavi) iznosi približno 40-50%.

U cilju podizanja efikasnosti elektrane s komprimiranim zrakom danas se radi na projektu naprednog „adijabatskog“ sustava, kod kojeg će se toplina nastala tijekom komprimiranja skladištiti i upotrijebiti za zagrijavanje zraka tijekom širenja. Ciljana učinkovitost takvog sustava je 70%. Naime, kod „dijabatskog“ sustava toplina koja nastaje prilikom kompresije zraka (razvija se temperatura do 600 °C) se otpušta u okolinu. Napredni „adijabatski“ sustav će skladištiti nastalu toplinsku energiju i koristiti je za zagrijavanje zraka prilikom njegove dekompresije.

Prednosti sustava za pohranu energije komprimiranim zrakom:

- Omogućava skladištenje, slično kao i crpne hidroelektrane, velike količine energije.
- Iako postojeći „dijabatski“ sustavi imaju malu učinkovitost (40-50%), u skoroj budućnosti bit će ostvaren visok stupanj učinkovitosti (približno 70%) koristeći naprednu tehnologiju „adijabatskog“ skladišta komprimiranog zraka.
- Malo samopražnjenje komprimiranog zraka, ali ne i samopražnjenje cijelog sustava u slučaju napredne tehnologije „adijabatskog“ skladištenja (vidi nedostatke).
- Relativno kratko vrijeme odziva (nekoliko minuta).
- Na pogodnim lokacijama može biti najjeftiniji način pohrane energije (€/kWh).

Nedostaci sustava za pohranu energije komprimiranim zrakom:

- Ekonomična su samo postrojenja kod kojih se prirodni podzemni spremnici adaptiraju, a koji se pojavljuju samo na malom broju lokacija.
- Podzemni prirodni spremnici se danas često koriste i za pohranu prirodnog plina i vodika te je upitna količina slobodnih podzemnih kapaciteta za tehnologiju komprimiranog zraka.
- Uz korištenje napredne tehnologije „adijabatskog“ skladištenja, zbog gubitaka topline, ovakvi sustavi su trenutno ekonomični samo za jednodnevnu pohrane energije. Naime, veliko je samopražnjenje spremnika topline.
- Napredni „adijabatski“ sustavi s velikom učinkovitosti nisu još do kraja tehnološki razvijeni.

Razvojem naprednih adijabatskih sustava komprimiranja zraka trebao bi se postaviti temelji budućeg pojačanog korištenja ove tehnologije jer se smatra da bi napredna rješenja mogla biti ravnopravna rješenjima s crpno-akumulacijskim hidroelektranama [3].

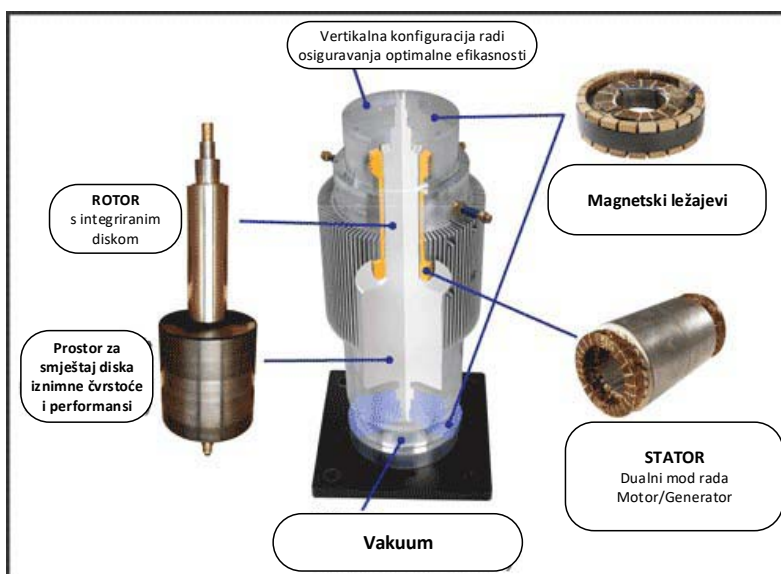
4. POHRANA ELEKTRIČNE ENERGIJE POMOĆU ZAMAŠNJAKA

Zamašnjak je rotirajući mehanički uređaj koji se koristi za pohranu električne energije u rotacijsku (kinetičku) mehaničku energiju opisanu izrazom:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

gdje je I moment tromosti zamašnjaka, a ω kutna brzina.

Kada postoji višak električne energije u EES-u, električna energija se iz mreže, preko pretvarača, dovodi do statora zamašnjaka koji stvara zakretni moment koji pokreće rotor. Zamašnjak tada radi kao motor i pohranjuje kinetičku energiju. Kada zamašnjak treba u mrežu predati pohranjenu energiju smjer energije je suprotan, a zamašnjak preuzima ulogu generatora. Zamašnjaci prve generacije, koji se još nazivaju i spororotirajući zamašnjaci, se komercijalno koriste od 1970. godine. Oni sadrže veliko čelično rotirajuće tijelo na mehaničkim ležajevima [3]. Spororotirajući zamašnjaci se i danas ponekad koriste u sustavima za besprekidna napajanja u kombinaciji s diesel agregatima i nazivaju se „rotirajući“ UPS-ovi.



Slika 4. Sastavni dijelovi brzorotirajućeg zamašnjaka

Suvremeni visokotehnološki brzorotirajući zamašnjaci izgrađeni su od ugljičnih vlakana visoke čvrstoće, na magnetskim ležajevima, unutar kućišta u kojima je vakuum i postižu velike brzine vrtnje, od 20.000 do preko 50.000 okretaja u minuti [3], slika 2.5.

Prednosti zamašnjaka:

- Gotovo neograničen broj ciklusa punjenja i pražnjenja i dug životni vijek (do 20 godina).
- Nije zahtjevno održavanje pa su zato i mali troškovi održavanja.

- Kratko vrijeme punjenja energijom (za nekoliko minuta može se ubrzati od mirovanja do nazivne brzine).
- Mjerenjem broja okretaja lagano se utvrđuje stanje napunjenosti (SoC).
- Ekološki su prihvatljivi. Ne sadrže otrovne komponente i pri radu nema CO2 emisije.
- Kratko vrijeme odziva (u ms).
- Visoka učinkovitost punjenje/praznjenje, >85%. Gubici su uglavnom na elektro energetske opremi (transformatorima i pretvaračima).
- Velika gustoća snage.
- Modularnost. Slaganjem više jednakih jedinica moguće je postići veliki raspon snaga sustava.

Nedostaci zamašnjaka:

- Brzo samopražnjenje (3 – 20% na sat). Nepogodni su za dugoročno spremanje energije jer se zbog trenja u ležajevima i otpora zraka zamašnjak stalno usporava.
- Veliki investicijski troškovi, naročito ako se računaju po (€/kWh). Na troškove utječu i troškovi zbog potrebe za složenijom opremom vezano uz regulaciju (pretvarači).
- Zbog relativno male gustoće energije pogodni su samo za sustave za pohranu snage (s pražnjenjem od nekoliko sekunda do petnaest minuta). Pri tom su troškovi (€/kW) umjereni i konkurentni nekim drugim tehnologijama koje se koriste za pohranu snage (baterije, superkondenzatori).
- Mehanička izvedba i sigurnost predstavljaju veliki izazov za proizvođače. U slučaju pucanja rotora postoji velika opasnost od ozljeđivanja jer dijelovi rotora lete velikim brzinama u svim smjerovima te stoga zamašnjak mora biti izveden s minimalnom mogućnosti pucanja rotora i izlaska dijelova rotora iz kućišta.

Zbog velike specifične snage zamašnjaci mogu biti pogodni za usluge regulacije frekvencije i napona u EES-u. Oni nisu pogodni za ostale usluge koje zahtijevaju duža pražnjenja jer imaju relativno malu gustoću energije, ali mogu se koristiti i za takve usluge, zbog svog vrlo brzog odziva, kao potpora nekim drugim tehnologijama koje imaju sporiji odziv.

Najveća postrojenja koja su priključena na električnu mrežu, a koriste tehnologiju brzorotirajućih zamašnjaka su Stephenown, New York (NY), SAD i Hazle Township, Pennsylvania (PA), SAD. Njihova nazivna snaga iznosi 20 MW, s mogućnosti pohrane energije do 5 MWh.

Današnji zamašnjaci komercijalno se instaliraju u industrijskim i energetske postrojenjima za održavanja kvalitete električne energije te za besprekidno napajanje električnom energijom, uglavnom u hibridnoj izvedbi, odnosno u zajedničkoj izvedbi s motor/generatorom, prigušnicom i diesel agregatom.

Nastoji se unaprijediti zamašnjake kako bi im se produžila autonomija rada (do nekoliko sati) i smanjilo samopražnjenje. To bi omogućilo da ih se koristiti i za druge usluge koje zahtijevaju pohranu veće količine električne energije. To se planira postići razvojem beskontaktnih supravodljivih magnetskih ležajeva s kojim bi se u potpunosti eliminiralo trenje ležajeva, pri čemu treba riješiti problem smanjenja učinkovitosti zbog sustava hlađenja ležajeva koji treba ugraditi [1].

5. BATERIJSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Akumulatorske baterije su tehnologija koja se danas najčešće koriste za mala i srednje velika postrojenja za pohranu električne energije.

Prvi baterijski sustavi za pohranu električne energije (BSPEE) namijenjeni za pružanje usluga u elektroenergetskoj mreži pojavili su se ranih 80-ih godina prošlog stoljeća, a prvo izgrađeno postrojenje veće snage bilo je BEWAG baterijski sustav za pohranu električne energije, namijenjen napajanju tada izoliranog („otočnog“) elektroenergetskog sustava zapadnog Berlina. To postrojenje je izgrađeno 1986. godine. Nazivna snage sustava bila je 17 MW, a pohranjena energija 14 MWh. Do danas je u svijetu ugrađeno preko 11 GWh [12] baterijskih sustava za pohranu električne energije, a po nekim procjenama [12] do 2030 god. u svijetu će biti instalirano između 100 i 421 GWh BSPEE.

Dvije su osnovne izvedbe (grupe) akumulatorskih baterija koje se koriste za ugradnju u velika baterijska postrojenja.

Prvu grupu čine obične stacionarne akumulatorske baterije, osobite samo po izuzetno velikim kapacitetima i visokotemperaturne stacionarne baterije. U nju spadaju:

- Olovne (Pb) akumulatorske,
- Nikal kadmij (NiCd) baterije,
- Li – ion baterije,

- NaS baterije,
- ZEBRA (NaNiCl₂) baterije.

Druga grupa su baterije sa cirkulirajućim elektrolitom. Kod tih baterija nabijeni elektrolit je smješten u zasebnim spremnicima i pomoću crpki se vodi do baterijskih članaka u kojima se nalaze pozitivna i negativna elektroda. U ovu grupu spadaju:

- VR (vanadij-redox),
- Regenesys (PSB, polisulfid-bromid) i
- ZnBr (HFB, hybrid flow battery) baterije.

Prednosti BSPEE:

- Brzo vrijeme odziva
- Velika gustoća energije
- Velika gustoća snage
- Relativno visoka učinkovitost punjenje/praznjenje, 60-80%.
- Modularnost.
- Mogućnost distribuirane ugradnje u bilo kojem dijelu elektroenergetskog sustava
- Prihvatljiva cijena za mala i srednje velika postrojenja

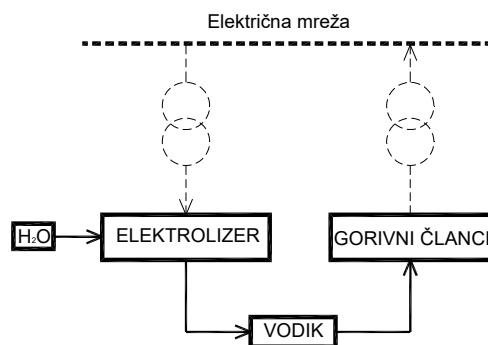
Nedostaci BSPEE:

- Ograničen broj ciklusa punjenja i pražnjenja u ovisnosti o tipu odabrane baterije
- Relativno dugo vrijeme punjenja energijom

Iako su troškovi izgradnje baterijskog sustava za pohranu električne energije trenutno približno dvostruko viši od troškova izgradnje crpno-akumulacijskih elektrana, pri čemu troškovi znatno ovise o odabranom tipu baterije, njihova cijena od svih opisanih tehnologija trenutno najbrže pada pa se pretpostavlja da će izgradnja postrojenja s litijevim baterijama ili postrojenja s baterijama sa cirkulirajućim elektrolitom velikih kapaciteta do 2024. godine dostići cijenu izgradnje crpno-akumulacijskih elektrana (približno 350 €/kWh).

6. PROIZVODNJA I SKLADIŠTENJE VODIKA

Sustav za proizvodnju i skladištenje vodika sastoji se od spremnika vode, elektrolizera i spremnika vodika.



Slika 5. Sustav za proizvodnju i skladištenje vodika

Elektrolizer je elektrokemijski pretvarač koji uz pomoć električne energije razdvaja vodu na vodik i kisik. Iz ekonomskih i praktičnih razloga tijekom elektrolize pohranjuje se samo vodik dok se kisik ispušta u atmosferu. Vodik se pohranjuje u plinskim bocama ili spremnicima pod tlakom i tako se može čuvati praktički na neodređeno vrijeme.

Za proizvodnju električne energije koriste se gorivni članci koji neposredno pretvaraju kemijsku energiju u električnu. Pohranjeni vodik i kisik koji se uzima iz zraka dovode se u gorivni članak, gdje se odvija elektrokemijska reakcija između vodika i kisika, pri čemu se stvara voda, a tijekom te reakcije proizvodi se električna energija i oslobađa toplina.

Vodik se može pohraniti u različitim oblicima, u obliku tekućine, komprimiranom ili krutom obliku.

Pored već opisanog načina neposredne pretvorbe kemijske energije u električnu pomoću gorivnih članaka, postoje još dva načina za proizvodnju električne energije koristeći pohranjeni vodik [10]:

- Metanizacija, sintetiziranje prirodnog plina stvaranjem metana, koji se injektira direktno u postojeću plinsku mrežu ili se koristi za pokretanje klasične plinske elektrane za proizvodnju električne energije.
- Direktnim korištenjem vodika u plinskoj elektrani koja je posebno konstruirana za ovu svrhu.

Prednosti proizvodnje i skladištenja vodika:

- Vodik ima vrlo veliku gustoću energije i može se koristiti za pohranjivanje velike količine energije. Energija se može skladištiti od nekoliko dana do nekoliko mjeseci.
- Malo samopražnjenje.

Nedostaci proizvodnje i skladištenja vodika:

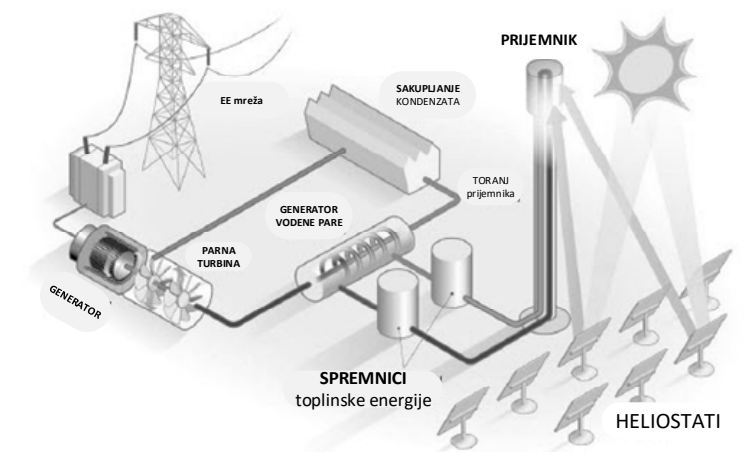
- Vrlo niska učinkovitost (30 – 40%), uz slabu vjerojatnost da će razvojem tehnologije ikada prijeći 50%.
- Za pokretanje procesa – „hladni start“ često je potreban neki drugi uređaj za pohranu energije (akumulatorska baterija ili superkondenzator).
- Konvencionalni gorivni članci koriste platinu što utječe na njihovu cijenu.
- Vodik je eksplozivan plin što zahtjeva veće mjere sigurnosti prilikom njegovog skladištenja i transporta. Zbog toga je skladištenje vodika pod tlakom ili ukapljivanjem skupo. Za povećanje učinkovitosti kao skladište se može koristiti i postojeća plinska mreža koja zbog toga treba biti dobro izgrađena.

Najveće postrojenje s gorivnim člancima priključeno na električnu mrežu je elektrana „Gyeonggi Green Energy fuel cell park“ u Hwasung City u Južnoj Koreji. Nazivna snaga cijelog postrojenja je 58,8 MW i sastoji se od 21 jedinice s gorivnim člancima, svaka snage 2,8 MW. Osim za proizvodnju električne energije, oslobođena toplinska energija se koristi za zagrijavanje grada. Ukupna godišnja proizvodnja električne energije tog postrojenja iznosi 440 GWh. [13]

Iako je učinkovitost ovakvih sustava trenutno 30-40%, tehnologija proizvodnje i skladištenja vodika će se nastaviti razvijati, a u budućnosti se očekuje veća efikasnost i znatno niža cijena ovakvih sustava.

7. TOPLINSKI SUSTAVI ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Toplinski sustavi za pohranu električne energije koriste spremanje toplinske energije u materijalima koji imaju sposobnost nakon zagrijavanja duže zadržavati toplinu. Kada je to potrebno pohranjena toplinska energija se koristi za proizvodnju vodene pare koja pogoni parne turbine u elektranama za proizvodnju električne energije. Koncept toplinskog sustava prikazuje slika 6 [14].



Slika 6 . Toplinski sustav za pohranu električne energije

Medij za pohranu toplinske energije je otopina soli (60% NaNO₃ i 40% KNO₃) koja ima sposobnost apsorpcije velike količine toplinske energije. Preko velikih ogledala koja su pokretna i prate kretanje sunca (heliostati) u prijemniku se vrši zagrijavanje medija. Zagrijani medij se zatim sakuplja u spremnicima toplinske energije. Kada je potrebno proizvoditi električnu energiju, u generatoru vodene pare pomoću toplinske energije se stvara vodena para. Pregrijana para se odvodi u parnu turbinu stvarajući moment koji služi za proizvodnju električne energije u električnom generatoru. Pregrijana para se nakon izlaska iz generatora hladi u izmjenjivaču topline. Ohlađena solna otopina se sakuplja u spremniku, pumpa u prijemnik gdje se zagrijava i proces proizvodnje električne energije se ponavlja. Zbog dobrih toplinskih svojstava i mogućnosti dužeg zadržavanja topline, zagrijani medij od solne otopine može se koristiti za pohranu energije i proizvodnju električne energije i u periodima kada Sunčeva zračenja uopće nema ili ga nema dovoljno.

Primjer primjene sustava za pohranu topline je Sunčana elektrana Adasol u južnoj Španjolskoj [15]. Sastoji se od tri identične elektrane nazivne snage 50 MW, ukupno 150 MW. Tijekom noći i za oblačnih dana sustav može proizvoditi dovoljnu količinu električne energije za snabdijevanje potrošača 7,5 sati nakon prestanka djelovanja Sunčeva zračenje.

Prednosti toplinskih sustava za pohranu energije:

- Mogućnost velike pohrane energije.
- Sigurni su.
- Imaju visoku gustoću energije.
- Osiguravaju iskorištenje energije Sunca uz znatno ujednačeniju proizvodnju od fotonaponskih elektrana.

Nedostaci toplinskih sustava za pohranu energije:

- Relativno veliko samopražnjenje 0,05-2% po danu.
- Složen proces pretvorbe Sunčeve energije u električnu energiju što utječe na visoku cijenu izgradnje ovakvih postrojenja.
- Relativno niska učinkovitost (30-60%)

Sljedeći koraci u razvoju toplinskog sustava za pohranu energije je pronalazak drugih vrsta jeftinih i lakše upravljivih medija.

8. ZAKLJUČAK

Od svih tehnologija za pohranu električne energije crpno-akumulacijske hidroelektrane su još uvijek najznačajniji oblik pohrane energije. Glavni nedostaci ove tehnologije su geografska ograničenja, utjecaj na okoliš, složenost i vrijeme razvoja projekta te sporije vrijeme odziva. Unatoč navedenim nedostacima, vjerojatno će crpno-akumulacijske elektrane još dugo ostati dominantna tehnologija za izgradnju velikih spremnika električne energije.

Sustavi za pohranu energije komprimiranim zrakom mogu se pokazati ekonomski isplativ način pohrane energije kada se izgrade na pogodnim lokacijama. Geografska ograničenost još je veći nedostatak ove tehnologije nego kod crpno-akumulatorskih elektrana, a pored toga izazov je i niža učinkovitost, sporo vrijeme odziva i utjecaj na okoliš.

Pored navedene dvije tehnologije, za pohranu električne energije danas se najviše koriste baterijski sustavi. Oni su trenutno dominantna tehnologija za izvedbu malih i srednjih spremnika električne energije. Za njihovu ugradnju ne postoje geografska ograničenja pa se mogu ugraditi u bilo kojem dijelu EES-a.

Iako se i ostale tehnologije, kao što su sustavi za pohranu energije pomoću zamašnjaka, sustavi za proizvodnju i skladištenje vodika i toplinski sustavi za pohranu energije, danas sve više koriste, a tehnološkim razvojem će neke od njih u narednim godinama možda postati još zanimljivije, njihova trenutna zastupljenost u svijetu je zanemariva.

9. LITERATURA

- [1] A. Oberhofer, P. Meisen, »Energy storage Technologies & Their Role in Renewable Integration,« GENI, 2012.
- [2] IEC, »Electric energy Storage,« *White paper*, 2011.

- [3] K. Takeda, »Battery Energy Storage,« Cigre TNC Technical Seminar: Future Renewable energy and Smart Grid Technologies, 2014.
- [4] J. Gustavsson, , »Energy storage Technology Comparison « GTH School of Industrial Engineering and Management, Bachelor of Science Thesis
- [5] R. Power, »ADELE - adiabatic compressed-air energy storage for electricity supply,« 2010.
- [6] ESMAP, »Energy Storage Trends and Opportunities in Emerging Markets«.
- [7] Aviani, »Energija, nove mogućnosti,« Institut za fiziku.
- [8] J. Škare, S. Štefan, I. Toljan, »Baterijska postrojenja i njihova primjena za pohranu električne energije u EES,« 10. savjetovanje HRO Cigré, Cavtat, 2011.
- [9] Z.Luburić, H.Pandžić, »Uloga spremnika energije u elektroenergetskom sustavu“, HRO CIGRE, 12. simpozij o sustavu vođenja EES, Split 2016.
- [10] »Baterijski sustavi za pohranu električne energije i mogućnost njihove primjene u distribucijskoj mreži HEP ODS-a“, Končar-INEM, 2018.
- [11] I. Đurić, T. Marijanić, J. Škare »Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži,« 6.(12.) savjetovanje HO Cired, Opatija, 2018.
- [12] IRENA, »Utility-scale batteries“, 2019.
- [13] <http://fuelcellpower.org.uk/wp-content/uploads/2014/06/stationary-issue-PDF.pdf>.
- [14] <http://cleanleap.com/3-thermal-storage/how-thermal-storage-works>«.
- [15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Deva_termoelektrana_Andasol.
- [16] [https://www.fer.unizg.hr/ download/repository/spremanje_energije_dio.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/spremanje_energije_dio.pdf).
- [17] <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/grid-infrastructure-benefits>«.