

USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kurkutović, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:660615>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I

INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

**USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA
ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Završni rad

Hrvoje Kurkutović

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 07.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Hrvoje Kurkutović
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4697, 22.07.2019.
OIB Pristupnika:	57642002581
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Sumentor:	Zvonimir Šimić, mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Usporedba različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati ulogu baterijskih sustava pohrana, objasniti način rada i gdje se primjenjuju. Zatim je potrebno detaljno opisati najčešće korištene tehnologije baterija, vidjeti koje su prednosti i nedostaci pojedinih tehnologija, prikazati njihove osnovne karakteristike, napraviti usporedbu. U praktičnom dijelu rada potrebno je modelirati punjenje i pražnjenje baterija u MATLAB-u, napraviti simulacije
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	07.09.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	21.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 21.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Hrvoje Kurkutović

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4697, 22.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Danijel Topić

i sumentora Zvonimir Šimić, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	2
2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE	3
3. ULOGA BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE	4
3.1. Potreba za pohranom energije	4
3.2. Podjela sustava pohrane	5
3.3. Baterijski sustavi pohrane	6
3.3.1. Princip rada baterije	6
3.3.2. Osnovni modeli baterije	8
3.3.3. Ključne uloge i primjena	10
4. TEHNOLOGIJE BATERIJA	11
4.1. Olovne baterije	11
4.2. Litij-ionske baterije	13
4.3. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije	14
4.4. Natrij-sumpor baterije	15
4.5. Natrij nikal klorid baterije	16
4.6. Vanadij-redoks protočne baterije	17
4.7. Cink-brom protočne baterije	18
4.8. Polusulfid-bromid protočne baterije	19
4.9. Usporedba tehnologija baterija za pohranu energije	20
5. MODEL BATERIJSKOG SUSTAVA POHRANE	21
5.1. Koraci pisanja koda	21
6. SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA	26
7. ZAKLJUČAK	35
LITERATURA	36
SAŽETAK	38
ABSTRACT	39

1. UVOD

Energija je prisutna svuda oko nas i prijeko nam je potrebna za život. Ona nam omogućava bolji i lagodniji život u smislu da nam je korisna u opskrbi toplinom ili prilikom pripreme hrane. Energiju je moguće dobiti iz puno različitih izvora, od neobnovljivih izvora pa sve do obnovljivih izvora energije. No da bi energija bila najbolje iskorištena ključnu ulogu imaju energetske sustavi koji prikupljaju energiju iz različitih izvora i pretvaraju u oblike energije koji se mogu primjenjivati u različitim sektorima poput industrije, građevinarstva te transporta. Kako sve više gledamo u razvitak te efikasnije i ekonomičnije prikupljanje energije sve se više okrećemo obnovljivim izvorima energije. Obnovljivi izvori energije poput energije Sunca, energije vjetra, hidroenergije, energije biomase te geotermalne energije nam omogućavaju da smanjimo zagađivanje atmosfere, smanjimo povećanje klimatskih promjena te time i omogućimo smanjivanje prosječne temperature na Zemlji. U budućnosti kako se tehnologija sve više razvija moći ćemo se sve više koristiti obnovljivim izvorima energije. Od niza prednosti koje obnovljivi izvori energije imaju, oni imaju i svoje nedostatke. Jedan od većih problema je što obnovljive izvore energije nemamo u svakom trenutku ili u određenoj količini koja nam je potrebna kao što energiju vjetra ili Sunca imamo samo određeni dio dana. Iz toga razloga iz tih izvora energije treba energiju prikupiti i pohraniti onda kada je ona dostupna kako bi se mogla u što većoj mjeri iskoristiti. Skladištenje energije nam osim boljeg ekonomskog učinka omogućuje veću razinu integracije obnovljivih izvora energije u energetske sustave. Sustavi za pohranu energije korišteni su stoljećima, no i dalje se razvijaju i poboljšavaju svoje karakteristike kako bi bili što kvalitetniji i korisniji. Skladištenje energije je posebno važno i za električne sustave jer omogućuje izravnavanje opterećenja, regulaciju frekvencije, prigušivanje energetske oscilacije te poboljšanje pouzdanosti i kvalitete električne energije. Pohrana električne energije u elektrokemijskim sustavima, odnosno u baterijama će se i posvetiti u ovome završnom radu kako bi se što bolje upoznalo s baterijama, odnosno njenim vrstama, veličinama i karakteristikama jer su od velike važnosti sada, a i u budućnosti za pohranu električne energije i sami razvitak elektroenergetskih sustava.

1.1. Zadatak završnog rada

U teorijskom dijelu rada potrebno je opisati ulogu baterijskih sustava pohrana, objasniti način rada i gdje se primjenjuju. Zatim je potrebno detaljno opisati najčešće korištene tehnologije baterija, vidjeti koje su prednosti i nedostaci pojedinih tehnologija, prikazati njihove osnovne karakteristike, napraviti usporedbu. U praktičnom dijelu rada potrebno je modelirati punjenje i pražnjenje baterija u MATLAB-u, napraviti simulacije za različite tehnologije baterija te analizirati i usporediti dobivene rezultate.

2. PREGLED LITERATURE U PODRUČJU ISTRAŽIVANJA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA BATERIJA ZA POHRANU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Autori S. Koohi-Fayegh i M. A. Rosen u literaturi [1] predstavili su sustave za pohranu električne energije, njihov napredak i razvoj. Kratko je opisan svaki sustav pohrane, dok su autori najveću pažnju posvetili baterijskim sustavima pohrane o kojima se proučava i govori i u ovom završnom radu. U radu detaljno je opisan princip rada baterije, njezini glavni dijelovi, a pomoću literature [2] predstavljeni su osnovni modeli baterije te neki od važnijih izraza poput izraza za trenutno stanje napunjenosti (*SoC*) i izraza za napon na baterijskim izvodima. Literatura [3] sadržava detaljan opis kako sekundarnih tako i protočnih vrsta baterija što je uvelike pomoglo pri opisivanju tehnologija baterija, od njihovih karakteristika pa sve do njihove primjene u radu. Osnovne značajke i cijena različitih tehnologija baterija prikazane su pomoću tablice u literaturi [4] te se na taj način lako i uočljivo mogu primjetiti sličnosti i različitosti pojedinih tehnologija baterija. U diplomskom radu [5] autora D. Kosića opisani su načini pohrane električne energije, istaknuta su područja primjene tehnologija pohrane električne energije kao i važnost pohrane energije, što je istaknuto i u ovom završnom radu. Autor D. Jurak u diplomskom radu [6] također govori o različitim sustavima za pohranu električne energije te provodi mjerenja za tri vrste litij-ionskih (Li-ion) baterija i jednu vrstu nikal-metal hidrid (NiMH) baterija. U završnom radu [7] autora M. Antunovića opisane su prednosti i nedostaci različitih sustava za pohranu energije te su rezultati i analize izvedeni u programskom paketu Excel kao i u ovom završnom radu. Razlika je u tome što se u ovome radu za dobivanje rezultata koristi kombinacija rada u programima: Matlab-u i Excel-u.

3. ULOGA BATERIJSKIH SUSTAVA POHRANE

3.1. Potreba za pohranom energije

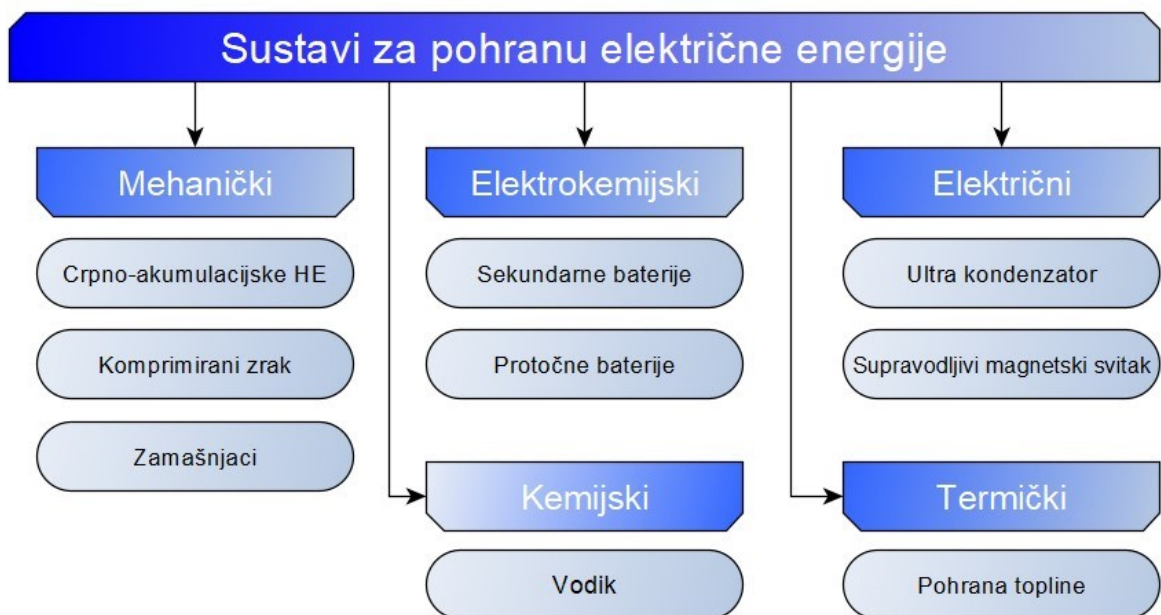
Kako vrijeme prolazi današnji Svijet se sve brže mijenja. Dolazi do toga da je zagađenost sve veća, da raznom proizvodnjom, preradbom ili transportom dolazi do sve većeg smanjenja resursa što uvelike potiče na zabrinutost. Procjene nam govore da će u budućnosti kroz sljedećih nekoliko desetljeća doći do nestajanja fosilnih goriva odnosno njihovih izvora [8]. Iz toga razloga žele se pronaći što bolje zamjene koje će nam jamčiti boljitak i daljnji rast na dugoročnijoj osnovi. Napredna tehnologija nam već nudi nekakve alternative poput vjetroturbina ili fotonaponskih ćelija, no sve te tehnologije imaju svoje nedostatke. Uspoređivanjem općenitih odnosno tradicionalnih elektrana problematična je nedosljednost proizvodnje te one proizvode puno manje količine električne energije. Kako znamo da potražnja električne energije ogromno raste, za otprilike oko 3,6% godišnje [8], mora se naći rješenje u drugim izvorima energije, a to su obnovljivi izvori energije. Problem je što nemamo konstantnu proizvodnju električne energije iz tih izvora energije, a proizvodnja u svakom trenutku mora biti jednaka potrošnji uvećanoj za gubitke. U suprotnom dolazi do neravnoteže te može dovesti do raspada sustava. Da bi se riješio taj problem koriste se sustavi pohrane električne energije. Sustavi pohrane energije su od velike važnosti jer omogućavaju uravnotežiti ponudu i potražnju za proizvodnjom električne energije te njenu distribuciju i skladištenje [3].

Kroz godine i desetljeća modernizacija elektroenergetskog sustava želi što bolje riješiti energetske potrebe. U drugoj polovici dvadesetog stoljeća izgrađeni su veliki objekti za skladištenje električne energije kako bi se uskladila promjenjiva potražnja za energijom postavljanjem nuklearnih elektrana, poznatih po uglavnom konstantnoj proizvodnji električne energije. Kako godine prolaze sve veća pozornost je na očuvanju okoliša, a da i dalje imamo dovoljan kapacitet potrebne energije sve se više koriste i razvijaju obnovljivi izvori energije. Tehnologija napreduje te dolazi do pojave pametnih mreža čije je razvijanje još jedan korak prema boljitku i razvoju skladištenja energije. Kako su obnovljivi izvori poznati po varijacijama u vremenu ili raspoloživoj snazi vezano za meteorološke prilike, motivacija za razvoj i realizaciju novih sustava za pohranu energije sve je veća. Stoga, razmatraju se dva različita aspekta. Prvo, korištenje tehnologije skladištenja kako bi se riješio problem dostupnosti izvora (kao primjer smjena dan-noć za fotonaponska postrojenja ili premošćivanje nedostataka proizvodnje fluktuirajućih izvora). Drugo, korištenje tehnologije skladištenja energije kako bi se

pomoglo nekim problematičnim potrošačima kada lokalna proizvodnja ne može pratiti velike i brze potražnje [9]. Iz ovih primjera spoznajemo da je skladištenje energije od velikog značaja za cijeli elektroenergetski sustav, za njegova poboljšanja i razvitak u budućnosti.

3.2. Podjela sustava pohrane

Elektroenergetski sustav sadrži puno različitih oblika energije. Iz toga razloga sustave za pohranu električne energije dijelimo na mehaničke, elektrokemijske, električne, kemijske te termičke sustave za pohranu električne energije, što nam prikazuje slika 3.1. Od svih tehnologija najstarija je mehanička tehnologija crpno akumulacijskih hidroelektrana, no ograničenja ove tehnologije je njezina potreba za velikim resursima vode i različitom zemljopisnom nadmorskom visinom [10] te se stoga sada sve više razvijaju i primjenjuju druge tehnologije za pohranu energije poput baterijskih sustava pohrane.



Slika 3.1. Grafički prikaz podjele sustava za pohranu električne energije prema obliku energije [11]

3.3. Baterijski sustavi pohrane

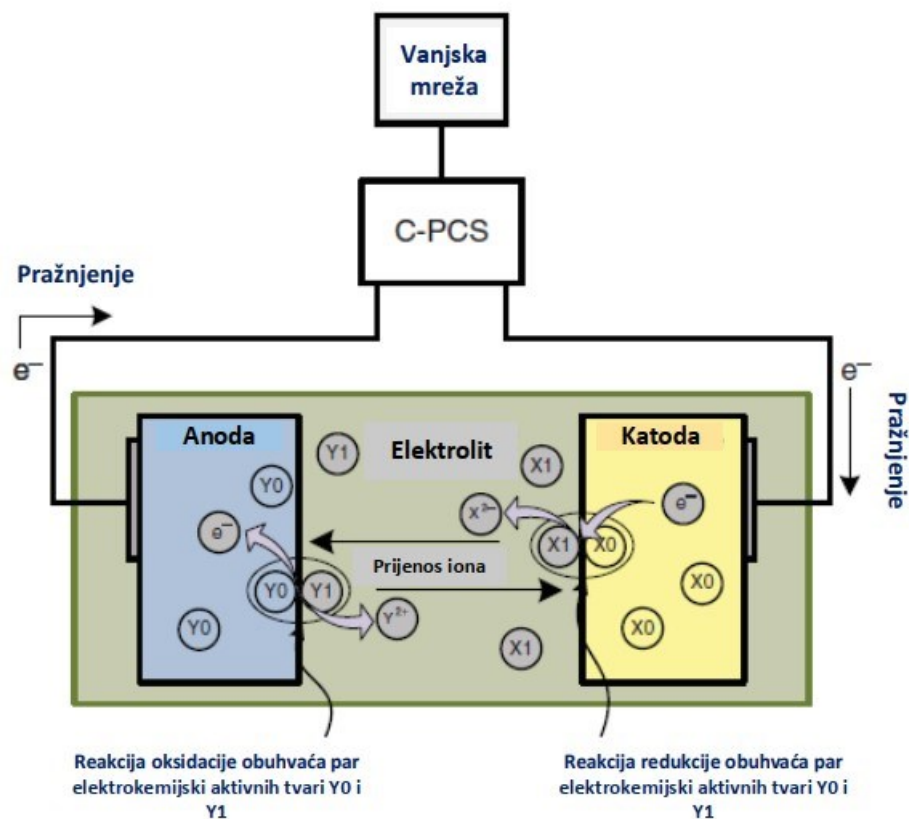
Baterijski sustavi pohrane električne energije primjenjuju se već dugo kroz povijest u elektroenergetskim postrojenjima. Danas se koriste u samostalnim elektroenergetskim „mikromrežama“ snage do oko 10 MW te u kućanstvima s različitim pogonskim zahtjevima od samo nekoliko kW [4]. Baterije su se u elektroenergetici do sada koristile kao izvor pomoćnog, upravljačkog, signalnog i nužnog napajanja te se s vremenom sve ekonomičnije i spretnije koriste zbog sve većeg stručnog iskustva koje iz godine u godinu raste i poboljšava se.

Baterijski sustavi pohrane se sastoje od nekoliko važnih elemenata kao što su baterija, sustav upravljanja, sustav nadzora, usmjerivač (izmjenjivač i ispravljač) i prema potrebi pomoćni sustavi. Što je veći kapacitet baterija, povećava se broj baterijskih ćelija odnosno blokova te ako se radi s baterijama koje rade na višim temperaturama sustavi upravljanja i nadzora te pomoćni sustavi postaju sve složeniji i kompaktniji. Na tržištu postoje razne izvedbe baterija. Važno je odabrati pravilnu izvedbu baterija koja će odgovarati funkciji u elektroenergetskoj mreži. Stoga se moraju pažljivo promotriti tehničke značajke baterija kao što su nazivna snaga, vrijeme punjenja odnosno pražnjenja, vrijeme odziva, radna temperatura te broj ciklusa. [4]

3.3.1. Princip rada baterije

Baterijski sustav za pohranu energije radi tako da pretvara električnu energiju u potencijalnu kemijsku energiju tijekom punjenja, a prilikom pražnjenja oslobađa električnu energiju pretvorenu iz kemijske energije. Važne reakcije na kojima je zasnovan baterijski sustav pohrane su reakcije redukcije i oksidacije. Reakcija elektrokemijske redukcije omogućuje uključenoj komponenti da dobije elektrone u procesu, a reakcija oksidacije da uključena komponenta gubi elektrone. Baterijska ćelija omogućava pojavu reakcija redukcije i oksidacije stvarajući protok elektrona i iona između područja gdje se te reakcije događaju. Iz toga razloga baterija ima dva kruga, unutarnji i vanjski. Unutarnji krug sadržava samu baterijsku ćeliju i omogućava protok dobivenih iona, dok vanjski krug zatvara cjelokupan električni krug čime je osiguran put kojim struje elektroni nastali pripadajućim reakcijama. Vanjski put je osiguran ili nekim opterećenjem ili izvorom energije na koji je spojena baterija. [12]

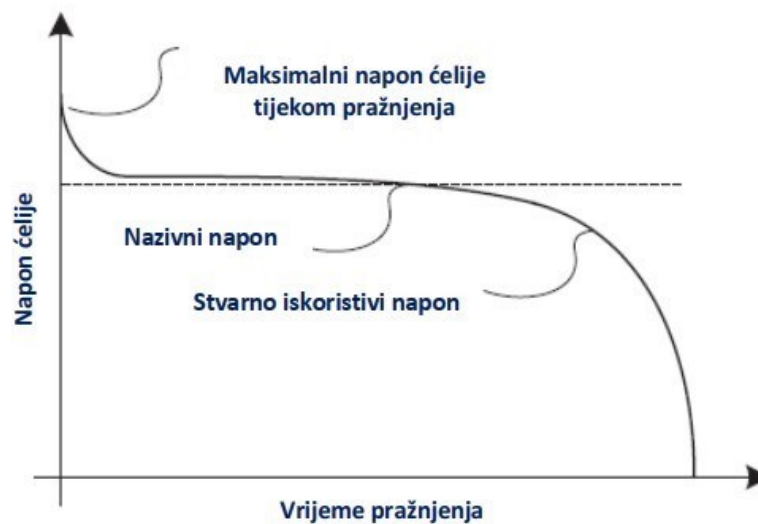
Ćelija baterije se sastoji od dvije elektrode, separatora, elektrolita te oklopa i priključaka. Glavni dijelovi i princip rada baterije prikazani su na slici 3.2. Baterija sadrži dvije elektrode, anodu (negativna elektroda) i katodu (pozitivna elektroda). Obje elektrode su uronjene u elektrolit. Tijekom punjenja elektroni protječu od anode, gdje je područje s najvišim energetske stanjem do katode, gdje je područje s najnižim energetske stanjem. Na anodi se događa reakcija redukcije, dok se na katodi događa reakcija oksidacije. [12] Kako je vidljivo da elektroni kroz elektrolit ne prolaze, pražnjenje je moguće samo ako je na vanjski krug spojeno neko trošilo. Prilikom baterijskog pražnjenja struja se propusti kroz trošilo te time dolazi do oksidacije anode, a redukcije katode. Ako želimo ponovno puniti bateriju potrebno je dodati vanjski izvor koji mijenja smjer struje i omogućava ponovno punjenje baterije.



Slika 3.2. Princip rada baterije [12]

C-PCS (engl. *common part convergence sublayer*) predstavlja vanjsko opterećenje između elektroda.

Napon otvorenog kruga možemo mjeriti pomoću dvije metode. Prva je da napon otvorenog kruga izmjerimo voltmetrom, no ne možemo ga mjeriti odmah nakon završetka procesa punjenja baterije, nego nekoliko sati kasnije odnosno onda kada se baterija „opusti“ nakon procesa iz razloga što je tek onda postignut ravnotežni uvjet. Druga metoda je da se napon otvorenog kruga procjeni statistički odnosno određuje se na procjeni nekoliko krivulja napona tijekom punjenja baterije pomoću opadajućeg niza struja. Važno je razlikovati napon otvorenog kruga od napona izmjerenog u ćeliji baterije. Te nam slika 3.3. prikazuje napon ćelije tijekom procesa pražnjenja. [12] Jedino u idealnom slučaju napon baterijske ćelije bio bi jednak naponu otvorenog kruga, no zbog promjene stanja napunjenosti (*SoC*, engl. *state of charge*) i promjene opterećenja vrijednost napona nije jednaka jer što se opterećenje povećava kapacitet se smanjuje.

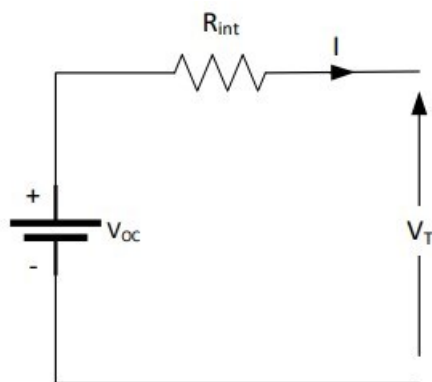


Slika 3.3. Karakteristika naponskog pražnjenja baterijske ćelije [12]

3.3.2. Osnovni modeli baterije

Jednostavni ili linearni model baterije (slika 3.4.) osim izvora napona (V_{oc}) i otpora (R_{int}) sadrži i unutarnji otpor. Otpor R_{int} predstavlja gubitke energije zbog zagrijavanja baterije. Razlika jednostavnog modela u odnosu na idealni je ta što je spojeno trošilo odnosno krug ima opterećenje te se napon na baterijskim izvodima (V_T) računa prema sljedećem izrazu [2] :

$$V_T = V_{oc} - R_{int} \cdot I \quad (3-1)$$



Slika 3.4. Jednostavni ili linearni model baterije [2]

Ako baterija ima veći unutarnji otpor, gubitci će isto biti veći, a maksimalna raspoloživa snaga biti će manja. Otpor baterije uvelike ovisi o vrsti baterije, o temperaturi te o stanju napunjenosti te iz toga razloga formula (3-1) poprima sljedeći oblik [2]:

$$V_T = V_{OC} - R_{int}(SoC) \cdot I \quad (3-2)$$

Formula za unutarnji otpor glasi [2] :

$$R_{int}(SoC) = \frac{R_0}{SoC^K} \quad (3-3)$$

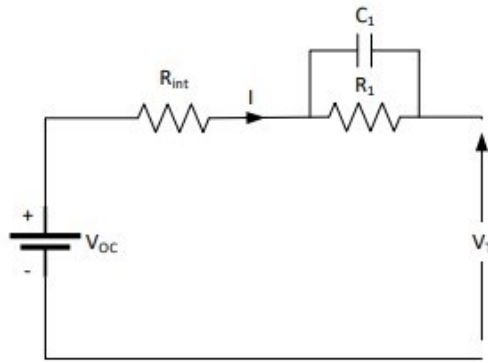
gdje su R_0 početni unutarnji otpor, SoC trenutno stanje napunjenosti i K faktor kapaciteta koji se dobije iz krivulja opterećenja.

Izraz za trenutno stanje napunjenosti glasi [2] :

$$SoC = 1 - \frac{A \cdot h}{C_{10}} \quad (3-4)$$

gdje su A struja mjerena u amperima, h vrijeme rada po satu te C_{10} kapacitet pri radu od 10 sati na referentnoj temperaturi.

Kroz povijest ovaj model je bio jako korišten posebice od strane proizvođača kojima je bilo potrebno pratiti bateriju u stacionarnom području primjene odnosno gdje su temperatura i unutarnji otpor konstantni te je baterija uglavnom bivala na srednjem opsegu napunjenosti (SoC). Da bi se mogle uočiti nelinearnosti koje se mogu javiti u baterijskoj ćeliji osnovni krug je nadograđen i sada poprima naziv Theveninov model koji je prikazan na slici 3.5. [2] Daljnjim proučavanjem i istraživanjem nastali su i drugi, složeniji modeli baterija.



Slika 3.5. Theveninov model baterije [2]

Gdje su V_{OC} izvor napona, R_{int} otpor koji predstavlja gubitke energije zbog zagrijavanja baterije, I ukupna struja kruga, C_1 kapacitet između dvije paralelne ploče, R_1 kontaktni otpor, R_1 i C_1 čine RC par te V_T napon na baterijskim izvodima.

3.3.3. Ključne uloge i primjena

Iz svih gledišta baterijski sustavi za pohranu električne energije su važni, posebice u distribucijskim sustavima. Svi elementi distribucijske mreže mogu imati koristi od raznih usluga baterijskih sustava pohrane. Posljednjih desetak godina traže se i pronalaze odgovori na izazove razvoja elektroenergetske mreže odnosno njihovih pogona na naponskim razinama od niskog i srednjeg napona. Najveću korist baterijski sustavi pohrane mogu osigurati vlasnicima obnovljivih izvora energije. Neke od ključnih uloga baterijskih sustava pohrane su umanjene nepredvidivosti proizvodnje električne energije iz energija sunca ili vjetra, smanjenje potrebe isključenja obnovljivih izvora energije zbog pohrane proizvedene energije u slučaju zagušenja, vremensko optimiranje isporuke električne energije u razdoblju boljih cijena, osiguranje vršne snage, osiguranje mogućnosti starta u vremenu raspada mreže. Krajnjim kupcima omogućavaju povećanje energetske učinkovitosti tako što smanjenjem vršnog opterećenja dolazi do smanjenja troška električne energije koji je proporcionalan vršnom opterećenju. Također, korisniku osiguravaju veću pouzdanost i sigurnost u mreži tako što osiguravaju besprekidno napajanje. Ovo su samo od nekih uloga koje svim sudionicima u distribucijskoj mreži povećavaju profitabilnost, fleksibilnost kao i pouzdanost korištenja električne energije. Procjenjuje se da će baterijski sustavi pohrane još više zaživjeti kako godine dolaze, posebno u zemljama u kojima ima više udjela obnovljivih izvora energije odnosno gdje su elektroenergetske mreže „razvijenije“. [4]

4. TEHNOLOGIJE BATERIJA

Postoje različite tehnologije baterija koje se koriste u baterijskim sustavima pohrane električne energije. Svaka tehnologija ima svoje karakteristike te se međusobno razlikuju na temelju gustoće energije, učinkovitosti punjenja i pražnjenja, ekološke prihvatljivosti te naravno životnog vijeka. Razlikujemo dvije vrste baterija, a to su sekundarne i protočne. U ovom poglavlju su opisane značajnije tehnologije baterija poput olovnih koje su najstariji tip baterija, ali i drugih tehnologija od kojih su neke još u razvoju.

4.1. Olovne baterije

Olovne baterije (Pb-acid) najrašireniji su tip baterije na svijetu. Počele su se koristiti davne 1890. godine. Koriste se u pokretnim i stacionarnim sustavima. Neke od osnovnih primjena su sustavi napajanja kada nema mogućnosti priključka na mrežu, samostalni fotonaponski sustavi, baterijski sustavi za smanjivanje izlaznih fluktuacija kod energije vjetra te kao akumulatori u raznim vozilima. Od 1910. do 1945. godine mnoge olovne baterije su se koristile za skladištenje energije u mrežama. Stacionarni modeli su nešto kvalitetniji od starterskih baterija (akumulatora) jer mogu zadovoljiti veći standard kvalitete. Vijek trajanja olovnih baterija je od 6 do 15 godina, gdje životni vijek sadrži oko 1500 ciklusa na dubini pražnjenja od 80%, dok im je razina učinkovitosti ciklusa od oko 80% do 90%. [11]

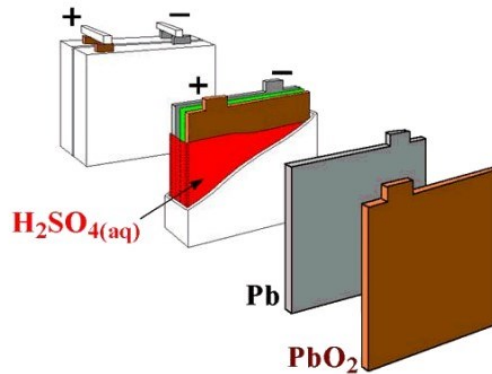
Ćelije olovnih baterija obično su izgrađene od nekoliko olovnih ploča koje su paralelno raspoređene. One su alternativno polarizirane na način da je katodna ploča obložena olovnim dioksidom (PbO₂), dok je anodna ploča obložena s poroznim olovom (Pb). Ploče su uronjene u elektrolit čiji je sastavni dio sumporna kiselina (H₂SO₄). Globalne reakcije redukcije i oksidacije u ćeliji mogu se okarakterizirati sljedećom jednačbom [12] :



Prilikom procesa pražnjenja porozno olovo i olovni dioksid reagiraju sa sumpornom kiselinom čime se dobiva olovni sulfat, voda i višak elektrona na polovima. Višak elektrona putuje od anode do katode kroz vanjski krug ćelije. Prilikom punjenja dolazi do obrnutog procesa reakcije. [12]

Imamo dva tipa olovnih baterija, klasičan tip koji je otvoren i sadrži tekući elektrolit kod kojeg je moguće izmijeniti elektrolit i plin vodik jer postepeno ishlape i tip olovne baterije koji je

zapečaćen, no sadrži regulacijski ventil koji služi za regulaciju tlaka zraka u bateriji. Kod ovog tipa olovne baterije nema istjecanja elektrolita i plina. [12]



Slika 4.1. Topologija olovne baterije [13]

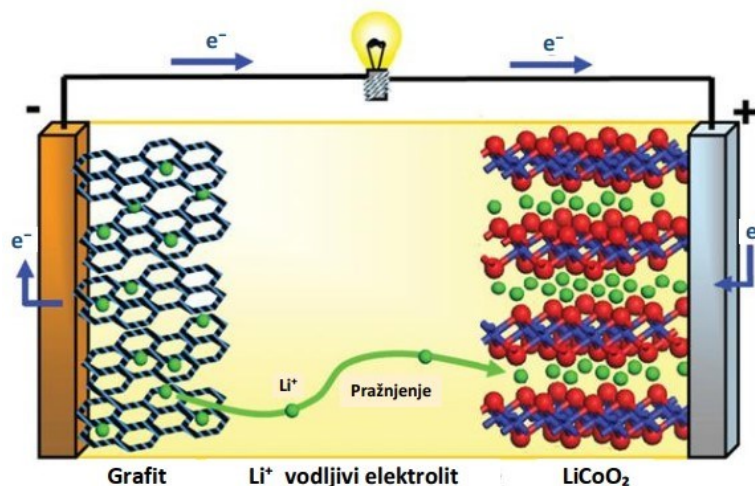
Jedan od većih nedostataka olovnih baterija je znatno smanjenje kapaciteta do čega dolazi ako se isprazni veći dio energije baterije u kraćem vremenskom razdoblju. Pa tako ako se baterija potpuno isprazni za jedan sat, ostati će samo 50% do 70% nazivnog kapaciteta dostupno. [11] Također, dolazi do smanjenja kapaciteta baterije ako se periodički puni do maksimalnog kapaciteta. Tada dolazi do toga da se nastali kristali ne mogu preokrenuti u olovu odnosno olovnom dioksidu u kratkom periodu te dolazi do smanjenja kapaciteta baterije. Obje pojave smanjenja kapaciteta poznatije su kao sulfacija. [12] Osim ovih nedostataka važno je istaknuti i druge nedostatke kao što su niska specifična energija odnosno ne ravnomjeran omjer težine i energije, sporo punjenje: potpuno zasićeno punjenje traje 14 do 16 sati, ograničeni životni vijek zbog izmjene ciklusa, relativno štetan utjecaj na okoliš. Nakon niza nedostataka, olovne baterije imaju i svoje prednosti poput jednostavne i jeftine izrade, niska cijena s obzirom na druge tehnologije (oko 300 €/kWh), visoka specifična snaga, sposobna za velike struje pražnjenja, dobre performanse na niskim i visokim temperaturama te nije potreban baterijski sustav upravljanja za baterijske blokove odnosno ćelije. [10]

Trenutnim istraživanjem i proučavanjem danas se želi razviti tehnologija olovnih baterija tako da se poboljšaju karakteristike i ponašanje baterije u određenim uvjetima kako bi se usavršio rad u mikro-hibridnim električnim vozilima.

4.2. Litij-ionske baterije

Od oko 2000. godine litij-ionske baterije (Li-ion) postale su najvažnija tehnologija skladištenja energije u području prijenosnih i mobilnih uređaja poput prijenosnog računala, mobitela, električnog automobila ili električnog bicikla [11].

Aktivni materijal u katodi obično je litijev metalni oksid, u obliku litijevog kobalta (LiCoO_2), dok je u anodi uglavnom ugljik (C), ali i atomi litija koji se nalaze u elektrodi. Područje elektrode odvojeno je separatorima na bazi polietilena. Elektrolit sadrži otopljene soli na bazi litija. Tijekom procesa punjenja litijevi ioni Li^+ ekstrahiraju se iz katode ćelije i ulaze u grafenske ploče u grafitu. Nastali elektroni teku iz pozitivne prema negativnoj elektrodi kroz vanjski krug. Te se stvara napon otvorenog kruga odnosno napon ćelije. [12] Jedan od primjera unutrašnjosti litij-ionske ćelije prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Shematski prikaz litij-ionske baterijske ćelije [12]

Jedna ćelija Li-ion baterije može imati napona i do 3,7 V što znači da se broj ćelija može i smanjiti kako bi dobili željeni ukupni napon. Kao primjer, jedna litij-ionska ćelija može zamijeniti tri nikal-metal hidrid (NiMH) ili nikal-kadmij (NiCd) ćelije koje imaju napon ćelije od samo 1,2 V. Jedna od prednosti Li-ion baterija je što imaju visoku gravimetrijsku gustoću energije te kroz masovnu proizvodnju može doći do smanjenja troškova same proizvodnje. Više od 50% udjela na tržištu posjeduju Li-ion baterije što se tiče malih prijenosnih uređaja. Jedan od većih nedostataka za povećanje još većeg udjela na tržištu predstavlja visoka cijena koja iznosi oko 600 USD/kWh zbog unutarnjih krugova zaštite od prekomjernog punjenja te zbog posebnog pakiranja baterija. [11]



Slika 4.3. Osnovni Li-ion dizajn u obliku prizme i baterijski moduli [11]

Litij-ionske baterije imaju jako visoku učinkovitost od 95% do 98%. Standardne baterije s 5000 ciklusa vrlo su fleksibilne jer se na tržištu mogu dobiti u vrlo kratkom vremenskom roku. Vrlo dobra prednost je što mogu ostvariti bilo koje vrijeme pražnjenja, čak od sekunde pa sve do tjedna. Zbog svoje visoke cijene mogu konkurirati samo olovnoj bateriji u onim aplikacijama koje zahtijevaju kratka vremenska pražnjenja. Jedan od većih problema Li-ion baterija je sigurnost. Većina elektroda sadrži metalni oksid koji je toplinski nestabilan te pri oslobađanju kisika pri povišenoj temperaturi može doći do raspada baterije. Da bi se ovaj problem sveo na minimum, litij-ionske baterije sadržavaju sustav za nadzor koji onemogućava prekomjerno punjenje i pražnjenje. Tehnologije litij-ionskih baterija još uvijek su u razvoju, no postoji veliki potencijal za daljnji razvoj i napredak. [11]

4.3. Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije

Nikal-kadmijeve baterije (NiCd) su se počele koristiti od oko 1915. godine, a od 1995. godine razvijaju se baterije sa nešto boljim karakteristikama pod nazivom nikal-metal hidrid baterije (NiMH). U usporedbi s olovnim baterijama, imaju nešto veću gustoću energije kao i veći broj ciklusa (od 2000 do 2500 ciklusa). [11]

Ni-Cd baterije imaju niske zahtjeve za održavanje, no jedna od mana ovih baterija je relativno visoka cijena (oko 1000 USD/kWh) zbog skupog proizvodnog procesa. Poznate su po „memorijskom efektu“ iz razloga što mogu prilagoditi električna svojstva određenom radnom ciklusu koji se obavlja dulje vrijeme. [3] Baterije su za upotrebu i s tehničkog gledišta vrlo zahvalan proizvod, no veliki problem predstavlja materijal kadmij od kojeg su izrađene iz razloga što je on toksičan pa je time vrlo opasan za život. Trenutno se u Europi koriste samo za

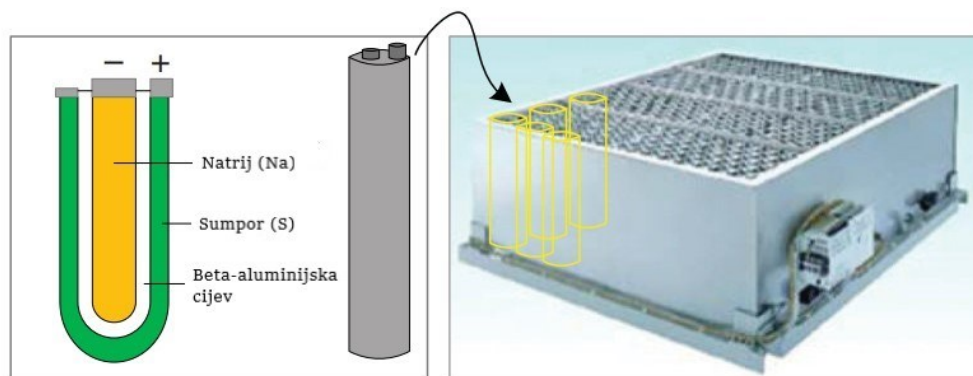
stacionarne primjene jer su od 2006. godine zabranjene za potrošačku upotrebu. [11] Nikal-metal hidrid baterije većinom posjeduju pozitivna svojstva od nikal-kadmij baterija. U praksi se Ni-MH baterije mogu koristiti u telekomunikacijama, kako bi osigurale neprekidno napajanje. Također, mogu se koristiti kao pogon hibridnih električnih vozila zbog njihove visoke gustoće energije (od 40 do 110 Wh/kg) i snage (od 200 do 1200 W/kg). Ekološki su prihvatljive, mogu raditi u širokom rasponu temperatura (od -30 do 70 °C), iz razloga što mogu raditi pri niskim temperaturama u svijetu baterija čini ih jedinstvenim, posjeduju visoku toleranciju na prekomjerno punjenje i prekomjerno pražnjenje, vrlo dugog su vijeka trajanja, nije potrebno veliko održavanje te ni cijena nije pretjerano visoka jer koštaju otprilike kao litij-ionske baterije. [3] Nikal-kadmij i nikal-metal hidrid baterije uz litij-ionske baterije su tri najčešće korištene baterije danas.

4.4. Natrij-sumpor baterije

Natrij-sumporne baterije (NaS) jedna su od tehnologija koje su najviše prilagodljive za korištenje u stacionarnim područjima velikih snaga. Ford Motor Company je izumila prvu NaS bateriju 1967. godine. [3] Konstrukcija ćelije poprilično je drugačija od ostalih baterijskih konstrukcija. Na pozitivnoj elektrodi nalazi se otopljeni (tekući) sumpor, dok je na negativnoj elektrodi otopljeni (tekući) natrij. Tako su elektrode baterijskih ćelija tekuće, dok je elektrolit oblikovan u cijevi od čvrste keramike i djeluje kao separator. Pri radu, elektrode moraju biti u tekućem stanju odnosno moraju se otopiti te se stoga temperatura baterije održava između 300°C i 400°C. Na ovako visokim temperaturama, keramički elektrolit je dobar provodnik iona koji nastaju u kemijskim reakcijama unutar ćelije. [12]

NaS baterije dostižu tipičan životni ciklus (oko 4500 ciklusa) i imaju vrijeme pražnjenja od 6,0 sati do 7,2 sata. Učinkovitost im je oko 75% i imaju relativno brzu reakciju. Tehnologija NaS baterija postavljena je na otprilike 200 lokacija u Japanu, a koriste se i u ostalim državama poput Njemačke, Francuske, SAD-a. Veliki nedostatak je taj što je za održavanje radne temperature potreban izvor topline te za to baterija koristi vlastitu pohranjenu energiju što time djelomično smanjuje performanse baterije. 1990. godine jedna tvrtka u Japanu proizvela je natrij-sumpornu bateriju čiji je minimalni modul veličine od 50 kW i općenito energetske raspon od 300 kWh do 360 kWh. No nije baš praktično koristiti samo jedan modul te da se spoji 20 modula jedna baterija bi imala minimalnu snagu od 1 MW i energetske raspon od 6,0 MWh do 7,2 MWh. Baterije su prikladne za dnevni ciklus. Vrijeme odziva ovih baterija je nekoliko milisekundi te se

natrij-sumporna baterija često koristi za stabilizaciju mreže, a mogu ju koristiti i veliki potrošači ili neke druge usluge poput komunalnih. [11]



Slika 4.4. Shematski prikaz natrij-sumporne baterijske ćelije i modula [12]

Tehnologija natrij-sumporne baterije je relativno mlada tehnologija i još je u razvoju. Potrebno je dodatno istraživanje kako bi baterije postale još učinkovitije i kako bi se prevladali problemi kao što su pucanje keramičke elektrolitičke cijevi ili sprječavanje korozije nastale zbog sumpora te na taj način produljili vijek trajanja baterija. [12]

4.5. Natrij nikal klorid baterije

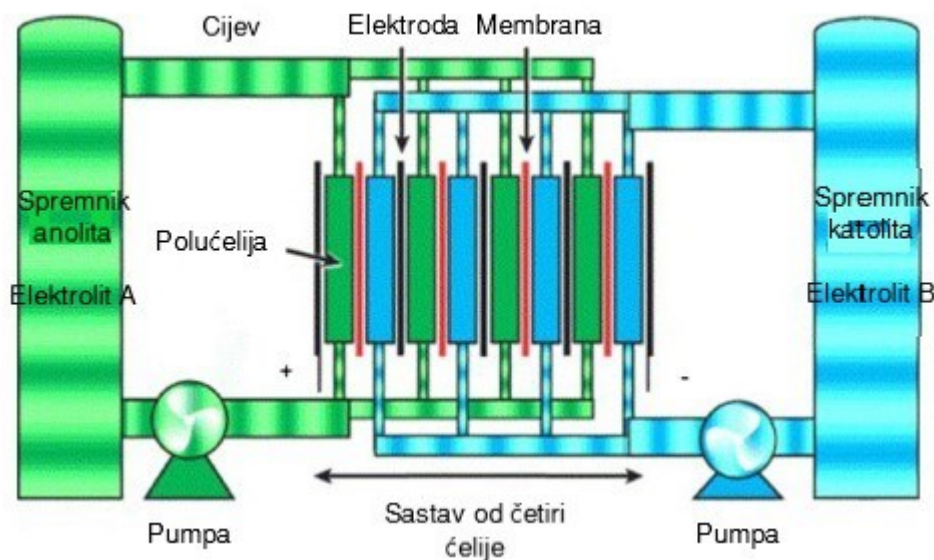
Natrij nikal klorid baterija (NaNiCl), poznata je pod nazivom ZEBRA (engl. *Zero Emission Battery Research Activity*) jedna je od visoko-temperaturnih baterija. Komercijalno je bila dostupna od oko 1995. godine. Radna temperatura joj je oko $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ poput natrij-sumpornih baterija, no za pozitivnu elektrodu umjesto sumpora koristi nikal klorid. [11]

NaNiCl baterije karakteristične su po tome da mogu izdržati ograničeno prekomjerno punjenje i pražnjenje, a u odnosu na NaS baterije imaju bolje sigurnosne karakteristike i veći napon ćelije. Pri pojavi greške imaju mogućnost razviti manji otpor te iz toga razloga kvarovi na ćelijama nastaju samo u serijskim vezama zbog gubitka napona jedne ćelije, a ne dolazi do pojave prijevremenog kvara na cijelom sustavu. Ovakva baterija ne zahtijeva veliko održavanje, ima relativno dug vijek trajanja, vrlo je pouzdana te se iz toga razloga koristi u električnim ili hibridnim vozilima. Kao primjer električnih vozila su Think City i Smart EV. [11]

Buduća vizija je razviti napredne ZEBRA baterije sa većom gustoćom snage za hibridna električna vozila, ali i visokoenergetske modele za skladištenje obnovljivih izvora energije. [11]

4.6. Vanadij-redoks protočne baterije

Princip rada protočnih baterija temelji se kao i kod konvencionalnih baterija na elektrokemijske reakcije koje se događaju u ćelijama baterije. Razlika u odnosu na konvencionalne baterije je ta da elektrolit nije trajno pohranjen u ćeliji, već imamo dvije elektrolitičke vodene otopine (na slici 4.5. prikazane s oznakama A i B) koje se nalaze u odvojenim spremnicima, a između njih nalazi se izmjenjivačka membrana koja je nepropusna za reakcije, a sposobna za prijenos kationa i aniona. Prilikom procesa punjenja, vodene otopine se kroz elektrokemijske ćelije pumpaju gdje dolazi do toga da elektrokemijski aktivni materijal otopljen u elektrolitu A oksidira na anodi, dok elektrokemijski aktivni materijal otopljen u elektrolitu B reducira na katodi. Princip pražnjenja se vrši obrnutim postupkom. [12]

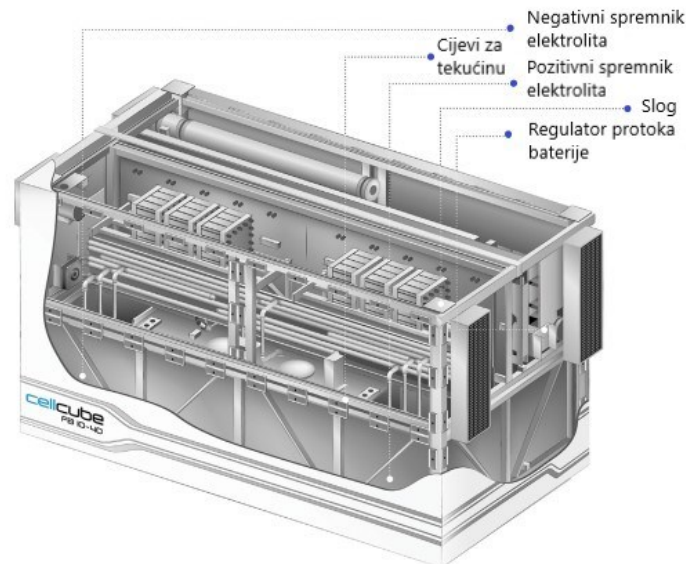


Slika 4.5. Shematski prikaz protočne baterije [3]

Razvijene su tri vrste protočnih baterija koje se prema svojim karakteristikama međusobno razlikuju, a to su vanadij-redoks protočne baterije, cink-brom protočne baterije te polusulfid-bromid protočne baterije.

Vanadij-redoks protočne baterije (VRFB) za rad koriste sumpornu kiselinu koja sadrži redoks parove koji predstavljaju pozitivni i negativni elektrolit polućeije te tako pohranjuju energiju. Prednosti takvih baterija su njihova visoka učinkovitost od 75% do 85%, dug životni vijek od 12000 do 14000 ciklusa, visoka sigurnost pri korištenju, niski operativni troškovi i jednostavno održavanje. VRFB baterije imaju mogućnost dubokog pražnjenja i prikladne su za stacionarne primjene. Međutim, zahtijevaju veliki prostor zbog relativno niske gustoće energije od 10 do

50 Wh/kg. Razvojem je vanadij-redoks baterija postala jedna od najpouzdanijih baterija za veliko skladištenje električne energije na razini mreže. Kao primjer, izgrađena je velika elektrana vanadij-redoks baterija Minamihayakita u gradu Abira-Chou, Hokkaido u Japanu sa snagom od 15 MW. [3]



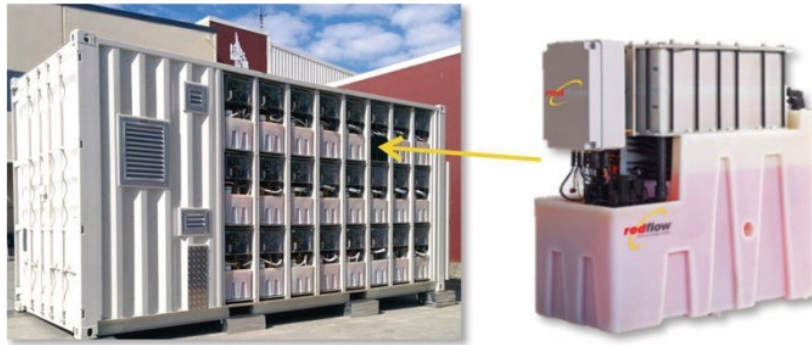
Slika 4.6. Unutrašnji prikaz vanadij-redoks protočnih baterija [9]

Trenutno u svijetu postoji nešto više od 100 VRFB instaliranih sustava s procijenjenim kapacitetom od oko 209 800 kWh energije. U 2018. godini upotreba vanadija za korištenje u sustavima pohrane se udvostručila na 2,1% globalne potrošnje vanadija. [14]

4.7. Cink-brom protočne baterije

Cink-brom protočne baterije (ZBFB) pripadaju skupini hibridnih protočnih baterija (HFB). Građa im je slična vanadij-redoks protočnim baterijama. Elektrode ZBFB ćelija temeljene su na ugljiku. Anodno i katodno područje odvojeno je poliolefinskom membranom. Na anodi nalazi se cink, dok se na katodi nalazi brom. Elektrolit je u tekućem stanju, a sadrži otopljene soli cink-bromida. Jedna od bitnih značajki ovih baterija je kontrola između cinka i broma da ne reagiraju izravno. Ako se to dogodi doći će do samopražnjenja baterije. Od dobrih strana ZBFB baterija je da se između elektroda ćelije može razviti napon od 1,7 V. [12]

Cink-brom baterije nude još nekoliko prednosti kao što su relativno visoka specifična gustoća energije (od 75 do 85 Wh/kg) iz razloga što se iz jednog atoma cinka dobiju dva elektrona, visoka fleksibilnost dizajna i relativno niska cijena, oko 500 USD/kWh, što je jeftinije od Li-ion ili Ni-Cd baterija. No ovakav tip baterija imaju nižu energetska učinkovitost, kratak životni vijek te je brom vrlo štetan za zdravlje prilikom udisanja. [3] Razne tvrtke rade na komercijalizaciji ZBFB baterija poput tvrtke ZBB Energy and Premium Power iz Velike Britanije. [11]



Slika 4.7. Vanjski prikaz Cink-brom protočnih baterija [12]

4.8. Polusulfid-bromid protočne baterije

Polusulfid-bromid protočne baterije (PBFB) su još jedna važna tehnologija baterija koja radi na temelju redoks reakcija između natrijevih polisulfida. Anodna elektroda je od katodne elektrode kao i kod ZBFB baterija odvojena poliolefinskom membranom. Između elektroda ćelije razvija se napon od 1,5 V. Imaju energetska gustoću od oko 30 Wh/kg i veliku brzinu odziva. No ovakva vrsta protočne baterije ima relativno nisku učinkovitost od 60% do 75%. [3] U osnovi su izrađene od reciklirane plastike što je ekološki vrlo prihvatljivo. Jedino što je štetno kod ovih baterija je plin brom. Radna temperatura se kreće od 10 °C do 45 °C. Praktične primjene polusulfid-bromid baterija još nailaze na neke izazove poput visoke cijene ugljičnog filca i komplicirane metode pripreme natrijevog polisulfida. [12]

Od tri vrste protočnih baterija koje smo spomenuli u ovome radu, PBFB baterije su najmanje razvijena tehnologija te je potrebno daljnje proučavanje i istraživanje kako bi se što uspješnije primjenjivale u radu. Regenesys tehnologije su jedne od rijetkih koje su uspješno razvile i provele komercijalizaciju normalnog pogona polisulfid-bromidnih protočnih baterija s kapacitetom snage od 120 MWh u Velikoj Britaniji. [3]

4.9. Usporedba tehnologija baterija za pohranu energije

Tehnologije baterija međusobno se razlikuju prema karakteristikama odnosno značajkama koje posjeduju. Iz toga razloga tehnologije baterija imaju i različite primjene te se pojedina tehnologija koristi ondje gdje na najefikasniji mogući način može odgovoriti svim uvjetima rada i postići određeni odnosno željeni rezultat. U tablici 4.1. prikazana je usporedba glavnih karakteristika različitih tehnologija baterija.

Tablica 4.1. Usporedba različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije

[15], [4], [12], [3]

<i>Tehnologija</i>	<i>Gustoća energije (Wh/kg)</i>	<i>Gustoća snage (W/kg)</i>	<i>Napon ćelije (V)</i>	<i>Broj ciklusa</i>	<i>Životni vijek (god.)</i>	<i>Cijena tehnologije (€/kWh)</i>	<i>Najveća dubina pražnjenja (%)</i>	<i>Samopražnjenje mjesečno (%)</i>	<i>Učinkovitost (%)</i>
Pb-acid	35-50	150-400	2.1	250-1000	6-15	100-300	20-80	2-8 ili neke 20-30	75-90
Li-ion	80-250	200-1000	3-4.5	1000-2000	5-10	700-1300	100	2-10	95-98
NiCd	30-60	80-150	1.2	1000-3500	10-20	450-1100	60-80	5-15	60-70
NiMH	60-80	200-300	1.2	300-600	2-5	700-1300	70-85	15-25	65-75
NaS	150-240	~230	2	4000-5000	≤15	400-600	100	0	75-90
NaNiCl	90-120	130-160	2.5	4000-5000	≤15	550-750	90-100	0	85-95
VRFB	10-50	~100	1.2	12000-14000	7-15	100-400	100	<1	75-85
ZBFB	75-85	90-110	1.7	2000-3000	5-10	450-550	100	0	65-80
PBFB	~30	-	1.5	>2000	~15	-	-	0	60-75

5. MODEL BATERIJSKOG SUSTAVA POHRANE

Praktičan dio rada temelji se na dobivanju određenih karakteristika različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije te analizi i usporedbi dobivenih rezultata. Želi se dobiti precizniji i točniji pregled na karakteristike baterija kako bi se svaka baterija primjenjivala na mjestu gdje najbolje i najefikasnije odgovara svrsi. Pri dobivanju rezultata koristi se kombinacija rada u dvama programima: Matlab-u (MATrix LABoratory) te Microsoft Excel-u. Na osnovu podataka o proizvodnji fotonaponske elektrane i potrošnji kućanstva određuje se kada se baterija puni odnosno prazni. Kada je proizvodnja fotonaponske elektrane veća od potrošnje kućanstva postoji višak energije i baterija se puni. Kada je proizvodnja fotonaponske elektrane manja od potrošnje kućanstva, postoji manjak energije i baterija se prazni. Model baterijskog sustava pohrane napravljen je u Matlab-u te njegovim provođenjem generira se Excel datoteka s rezultatima procesa koji su nam bitni za daljnju analizu i dobivanje određenih zaključaka. Detaljan opis i značenja dijelova modela objašnjena su u sljedećem potpoglavlju.

5.1. Koraci pisanja koda

Početak koda sastoji se od unosa podataka iz Excel datoteke o proizvodnji i potrošnji fotonaponske elektrane za svaki sat tijekom 7 dana. Za tu radnju koristimo naredbu *xlsread* koja te podatke unosi u Matlab workspace te nam omogućava daljnji rad s tim vrijednostima. Daljnjim linijama koda unosimo podatke o bateriji poput kapaciteta baterije, maksimalne snage punjenja i pražnjenja baterije, početno stanje, minimalno te maksimalno stanje napunjenosti baterije. Nakon toga dolazimo do linije koda gdje unosimo vrijednost učinkovitosti baterije. Učinkovitost baterije se razlikuje ovisno o vrsti tehnologije baterije za pohranu električne energije koju koristimo. Te tako ovisno o tehnologiji baterije mijenjamo vrijednost učinkovitosti baterije. Vrijednost učinkovitosti uzimamo iz tablice 4.1. koja je napravljena prema podacima iz pouzdanih izvora. Kako u tablici 4.1. imamo učinkovitost u rasponu dviju vrijednosti u Matlab kod unosimo srednju vrijednost tih dviju vrijednosti. To je i vidljivo na slici 5.1. gdje u petnaestoj liniji koda za učinkovitost olovnih baterija (Pb-acid) koristimo vrijednost od 82,5% .

Linija ***Kod***

```
1:      %Proizvodnja iz FN elektrane
2:      Ppv=xlsread('Input_data','PV output'); %proizvodnja iz FN elektrane
3:      %Ucitavanje podataka o opterecenju
4:      Pload=xlsread('Input_data','Load'); %potrosnja
5:
6:      %Baterija
7:      Battery=10000; %kapacitet baterije u Wh
8:      P_charging_max=5000; %maksimalna snaga punjenja baterije u W
9:      P_discharging_max=5000; %maksimalna snaga praznjenja baterije u W
10:     SOC_0=0.2; %pocetno stanje napunjenosti baterije
11:     SOC_MIN=0.2; %minimlano stanje napunjenosti baterije
12:     SOC_MAX=0.8; %maksimalno stanje napunjenosti baterije
13:
14:     %Ucinkovitost baterije koja se razlikuje ovisno o tehnologiji
       baterije
15:     eta_bat=0.825;
```

Slika 5.1. Prvi dio koda vezan za unos podataka

U drugom dijelu koda određuje se interval punjenja odnosno pražnjenja baterije. Vrijeme određivanja je postavljeno na 168 sati iz razloga što promatramo proizvodnju i potrošnju fotonaponske elektrane svaki sat kroz jedan tjedan. Sedam dana čini jedan tjedan, dan ima 24 sata te rezultat umnoška ta dva broja daje broj 168. U daljnjim linijama koda provjerava se jeli proizvodnja fotonaponske elektrane veća od potrošnje, ukoliko je imamo višak energije odnosno baterija se puni. Zatim se provjerava da snaga punjenja ne bude veća od dozvoljene da ne bi došlo do kvara ili uništenja baterije. Te se iz toga razloga snaga punjenja baterije ograniči na maksimalnu dozvoljenu vrijednost. Jako bitna vrijednost svake baterije je stanje napunjenosti baterije (*SoC*) koju izračunavamo i provjeravamo da ne bude veća od maksimalno dozvoljene. U zadnjoj liniji ovog dijela koda vidljiv je izračun količine energije koji ne stane u bateriju te on predstavlja višak energije koji se šalje u mrežu.

Linija **Kod**

```
16:
17:     %Određivanje intervala punjenja i praznjenja baterije
18:     for i=1:168 %postavljeno je na 168 sati, 7 dana, svaki dan 24 sata
19:         if Ppv(i)>Pload(i) %visak energije
20:             P_charging(i,1)=Ppv(i)-Pload(i); %punjenje baterije
21:             if P_charging(i)>P_charging_max %provjera jeli snaga
punjenja veća od dozvoljene
22:                 P_charging(i,1)=P_charging_max;
23:             end
24:             P_discharging(i,1)=0;
25:             Bat(i,1)=Bat(i-1)+P_charging(i)*eta_bat; %kapacitet baterije
u Wh
26:             SOC(i,1)=Bat(i)/Battery; %stanje napunjenosti baterije
27:             Pgrid(i,1)=0;
28:             if SOC(i)>SOC_MAX %provjera jeli SoC veci od maskimalno
dozvoljenog
29:                 P_charging(i,1)=(SOC_MAX*Battery-Bat(i-1));
30:                 Bat(i,1)=Bat(i-1)+P_charging(i)*eta_bat;
31:                 SOC(i,1)=Bat(i)/Battery;
32:             end
33:             Pexcess(i,1)=Ppv(i)-Pload(i)-P_charging(i); %visak energije
koji ne stane u bateriju
34:
```

Slika 5.2. Drugi dio koda vezan za unos podataka

Treći dio koda je započet s linijom koda gdje uspoređujemo je li proizvodnja fotonaponske elektrane jednaka potrošnji kućanstva. Ukoliko je proizvodnja jednaka potrošnji baterija se ne puni ni prazni. Zatim uspoređujemo jeli potrošnja energije veća od proizvodnje fotonaponske elektrane odnosno imamo li manjak energije. Ako je potrošnja energije veća od proizvodnje baterija se prazni. Kako se u drugom dijelu koda provjeravalo je li snaga punjenja veća od maksimalne dozvoljene, tako se u ovom dijelu koda provjerava je li snaga praznjenja veća od maksimalne dozvoljene, da ne bi došlo do uništenja baterije. Za kapacitet baterije u prvom satu uzima se početni kapacitet, a za ostale sate uzima se kapacitet od prethodnog sata. U daljnjim linijama koda računa se *SoC* te se provjerava da ne bude manji od minimalno dozvoljenog. U zadnjim linijama trećeg dijela koda provjerava se količina energije baterije te ukoliko baterija ne posjeduje dovoljno energije, ostatak energije se uzima iz mreže.

Linija Kod

```
35:         elseif Ppv(i)==Pload(i) %proizvodnja jednaka potrosnji
36:             P_charging(i,1)=0; %baterija se ne puni ni ne prazni
37:             P_discharging(i,1)=0;
38:             Bat(i,1)=Bat(i-1);
39:             SOC(i,1)=Bat(i)/Battery;
40:             Pgrid(i,1)=0;
41:             Pexcess(i,1)=0;
42:
43:         elseif Ppv(i)<Pload(i) %manjak energije
44:             P_charging(i,1)=0;
45:             P_discharging(i,1)=Pload(i)-Ppv(i); %praznjenje baterije
46:             if P_discharging(i)>P_discharging_max %provjera jeli snaga
praznjenja veća od dozvoljene
47:                 P_discharging(i,1)=P_discharging_max;
48:             end
49:             if i==1
50:                 Bat_0=Battery*SOC_0; %u prvom satu za izracun kapaciteta
uzima pocetni kapacitet
51:             else
52:                 Bat_0=Bat(i-1); %za ostale sate uzima kapacitet od
predhodnog sata
53:             end
54:             Bat(i,1)=Bat_0-P_discharging(i);
55:             SOC(i,1)=Bat(i)/Battery;
56:             if SOC(i)<SOC_MIN %provjera jel SoC manji od minimalno
dozvoljenog
57:                 P_discharging(i,1)=(Bat_0-SOC_MIN*Battery);
58:                 if P_discharging(i)>P_discharging_max
59:                     P_discharging(i,1)=P_discharging_max;
60:                 end
61:                 Bat(i,1)=Bat_0-P_discharging(i);
62:                 SOC(i,1)=Bat(i)/Battery;
63:             end
64:             Pgrid(i,1)=Pload(i)-Ppv(i)-P_discharging(i); %ako u bateriji
nema dovoljno energije onda se ostatak uzima iz mreze
65:             Pexcess(i,1)=0;
66:         end
67:     end
68:
```

Slika 5.3. Treći dio koda vezan za unos podataka

Posljednji dio koda sadrži izlazne podatke provedenog izračuna poput proizvodnje, potrošnje, punjenja i pražnjenja baterije, stanja napunjenosti baterije (*SoC*) te količine energije koja se uzima iz mreže ukoliko imamo manjak energije te količine energije koju šaljemo u mrežu ukoliko imamo višak energije.

Linija **Kod**

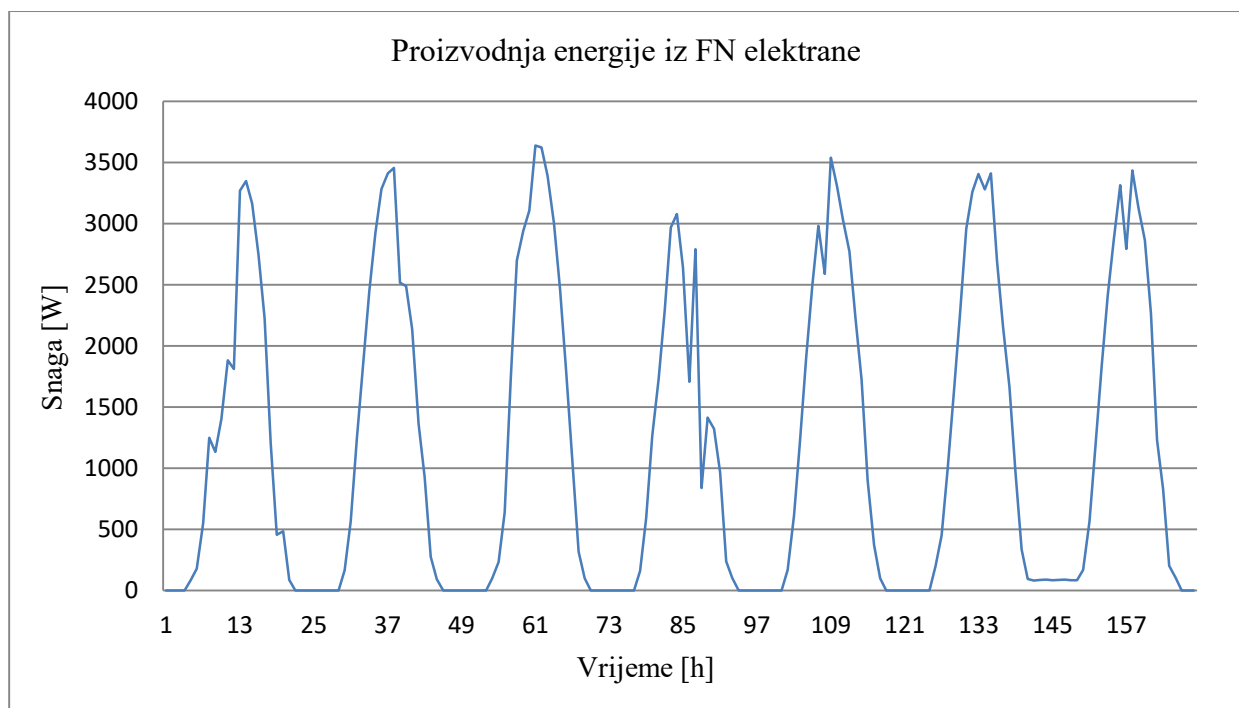
```
69:     %Izlazni podaci
70:     xlswrite('Output_data.xlsx', Ppv, 'Proizvodnja', 'A1');
71:     xlswrite('Output_data.xlsx', Pload, 'Potrosnja', 'A1');
72:     xlswrite('Output_data.xlsx', P_charging, 'Punjenje', 'A1');
73:     xlswrite('Output_data.xlsx', P_discharging, 'Praznjenje', 'A1');
74:     xlswrite('Output_data.xlsx', SOC, 'SOC', 'A1');
75:     xlswrite('Output_data.xlsx', Pgrid, 'Iz mreze', 'A1');
76:     xlswrite('Output_data.xlsx', Pexcess, 'Visak u mrezu', 'A1');
```

Slika 5.4. Četvrti dio koda vezan za unos podataka

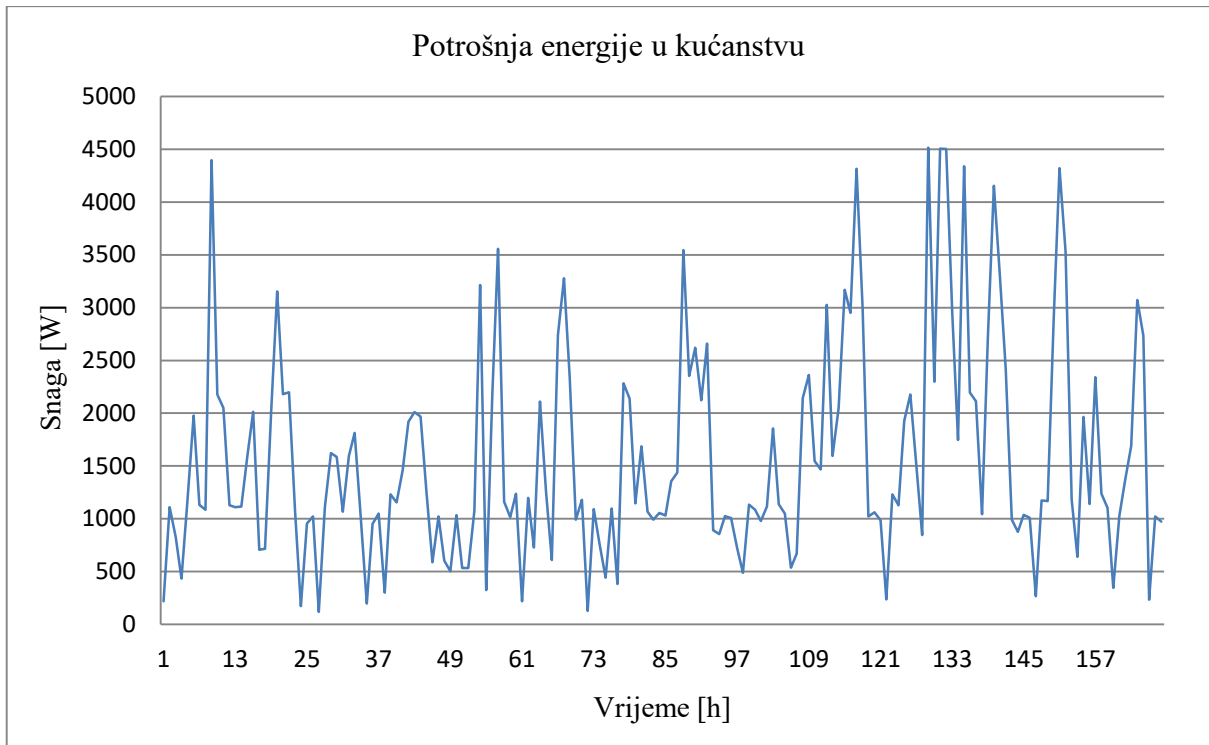
6. SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

Simulacija u programu Matlab provedena je za devet tehnologija baterija za pohranu električne energije. Skupinu od devet tehnologija baterija čine: olovne baterije (Pb-acid), litij-ionske baterije (Li-ion), nikal-kadmij baterije (NiCd), nikal-metal hidrid baterije (NiMH), natrij-sumpor baterije (NaS), natrij nikal klorid baterije (NaNiCl), vanadij-redoks protočne baterije (VRFB), cink-brom protočne baterije (ZBFB) te polusulfid-bromid protočne baterije (PBFB). Provedbom simulacije na navedenim tehnologijama baterija u programskom paketu Excel dobivamo željene grafove poput punjenja baterija, pražnjenja baterija, stanja napunjenosti baterija (*SoC*), potrebne energije uzete iz mreže i višak energije poslana u mrežu. Simulacije su se pravile za vremensko razdoblje od jednog dana (24 h) i od tjedan dana (168 h). Na grafovima u intervalu od 24 sata se mogu bolje i preglednije uočiti razlike između tehnologija, ali grafovi koji obuhvaćaju interval od 168 sati nam daju širu sliku svih tehnologija jer obuhvaćaju veći broj sati rada.

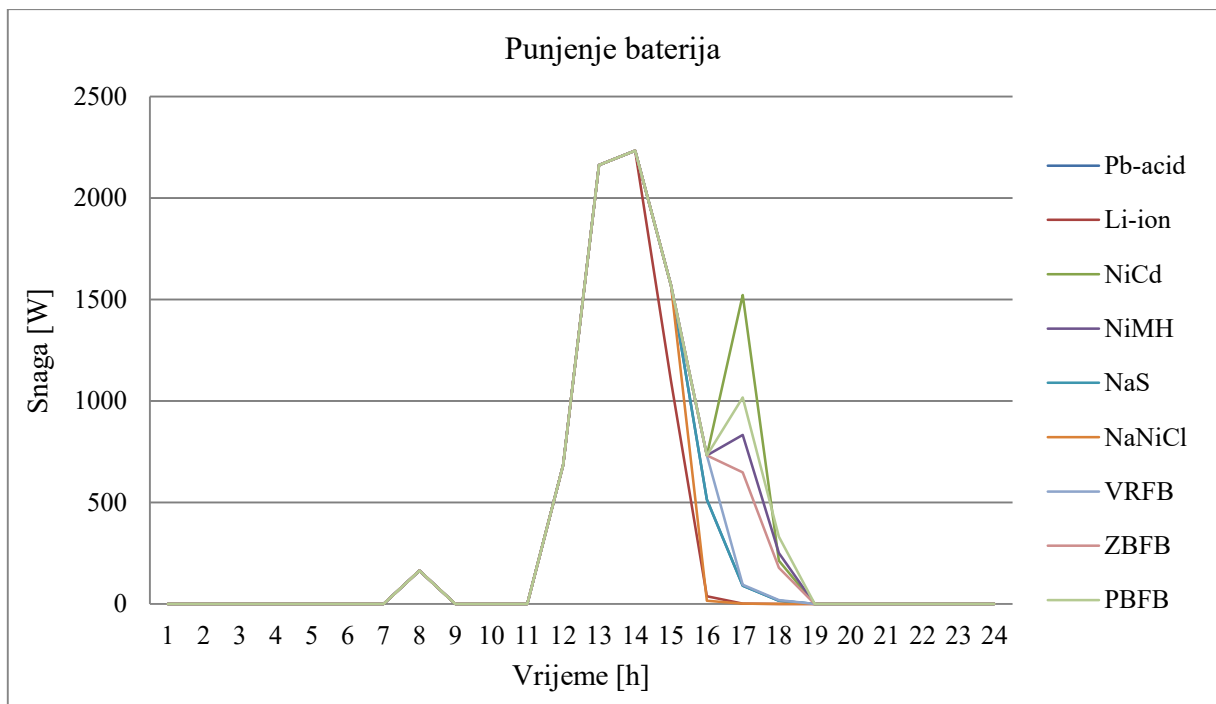
Graf na slici 6.1. prikazuje proizvodnju energije iz fotonaponske elektrane u vremenskom razdoblju od tjedan dana, dok graf na slici 6.2. prikazuje potrošnju energije u kućanstvu u tome istom vremenskom razdoblju.



Slika 6.1. Proizvodnja energije iz FN elektrane u vremenskom razdoblju od 168 sati



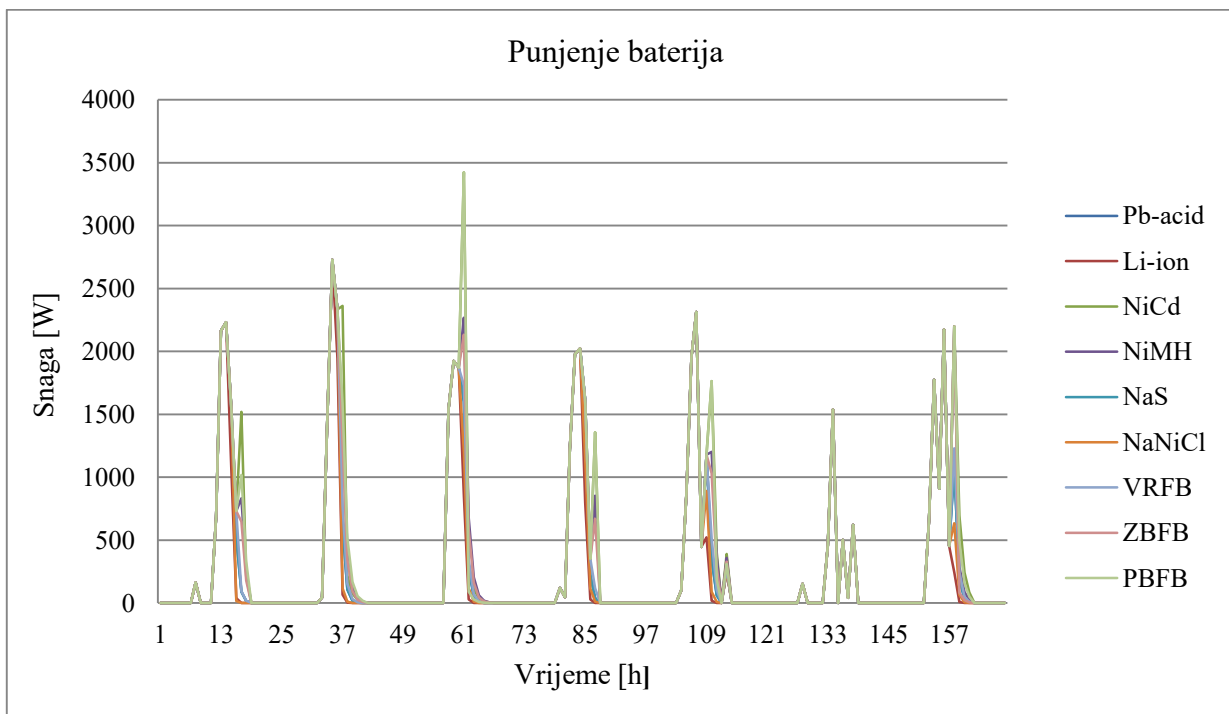
Slika 6.2. Potrošnja energije u kućanstvu u vremenskom razdoblju od 168 sati



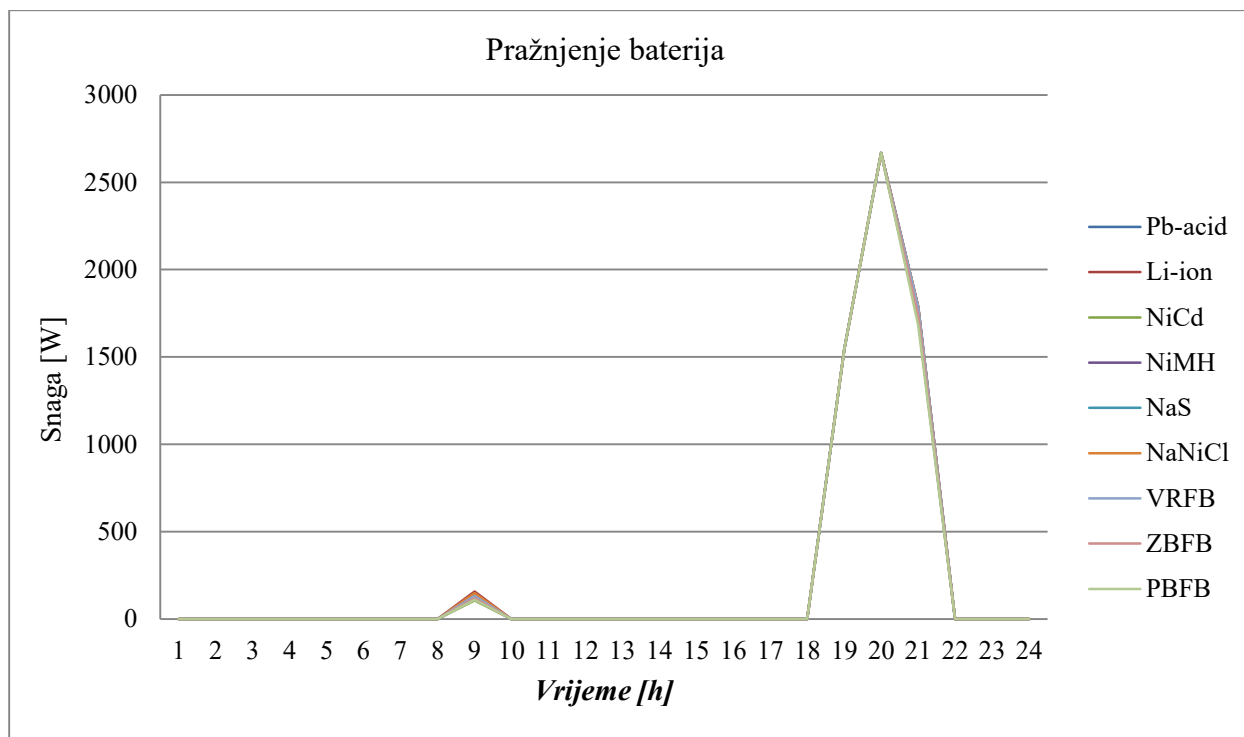
Slika 6.3. Punjenje baterija u vremenskom razdoblju od 24 sata

Iz grafa na slici 6.3. uočavamo da intenzivno punjenje baterija počinje od 11 sati i traje sve do 14-tog sata gdje dolazi do smanjenja punjenja. Uočljivo je da do 14 sati nema razlika pri punjenju različitih tehnologija baterija. Punjenja baterija najintenzivnije opada kod litij-ionskih tehnologija baterija (Li-ion), zatim kod natrij nikel klorid baterija (NaNiCl) te onda kod natrij-sumpor baterija (NaS) i vanadij-redoks protočnih baterija (VRFB). Kod nikel-kadmij baterija (NiCd), polusulfid-bromid protočnih baterija (PBFB), nikel-metal hidrid baterija (NiMH) nakon smanjenja punjenja dolazi do ponovnog povećanja u intervalu od 16 do 18 sati. Punjenje kod cink-brom protočnih baterija (ZBFB) kao i kod svih ostalih tehnologija baterija završava u 19 sati. Zaključujemo da se sve tehnologije baterija intenzivno pune do određene vrijednosti te nakon toga dolazi do sporijeg punjenja. Kod nekih baterija se nastavlja sve slabije punjenje, dok kod nekih dolazi do ponovnog povećanja punjenja, ali samo kratko vrijeme pa zatim opet nastupa slabije punjenje baterija.

U vremenskom intervalu od 168 sati iz grafa sa slike 6.4. može se primijetiti da u intervalima od nekoliko sati dolazi do intenzivnog povećanja, ali i smanjenja punjenja. Sve tehnologije baterija imaju sličnu putanju punjenja odnosno pražnjenja.



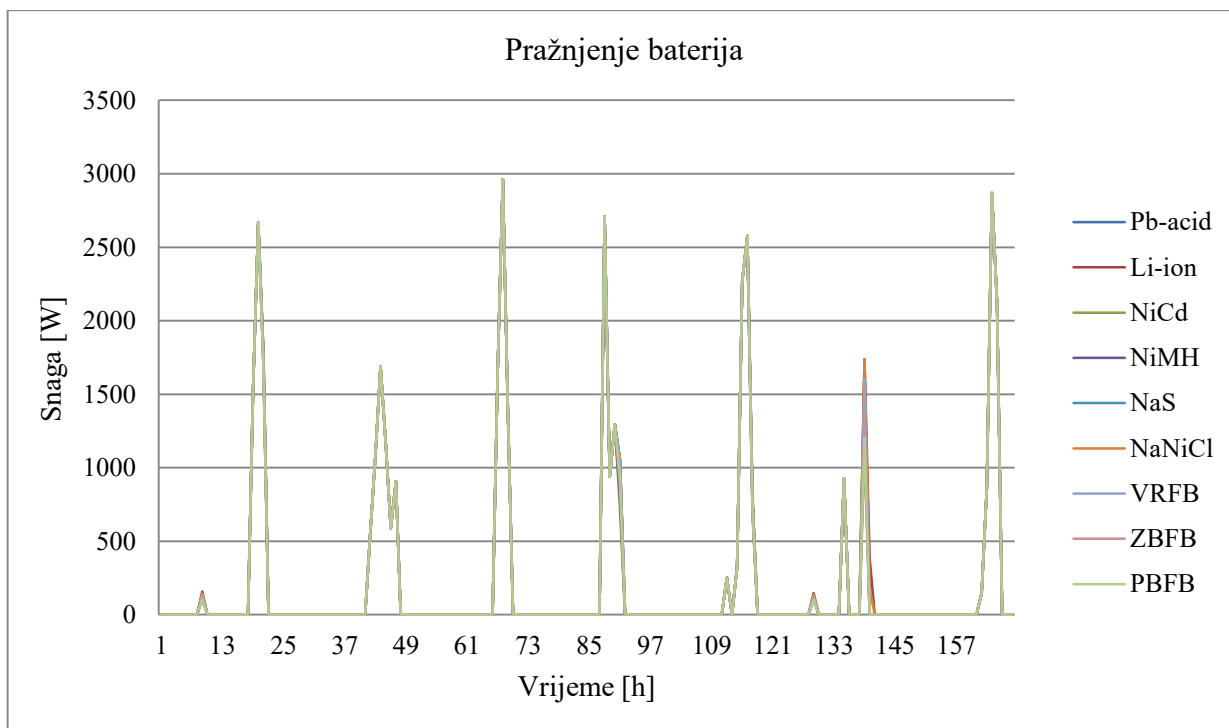
Slika 6.4. Punjenje baterija u vremenskom razdoblju od 168 sati



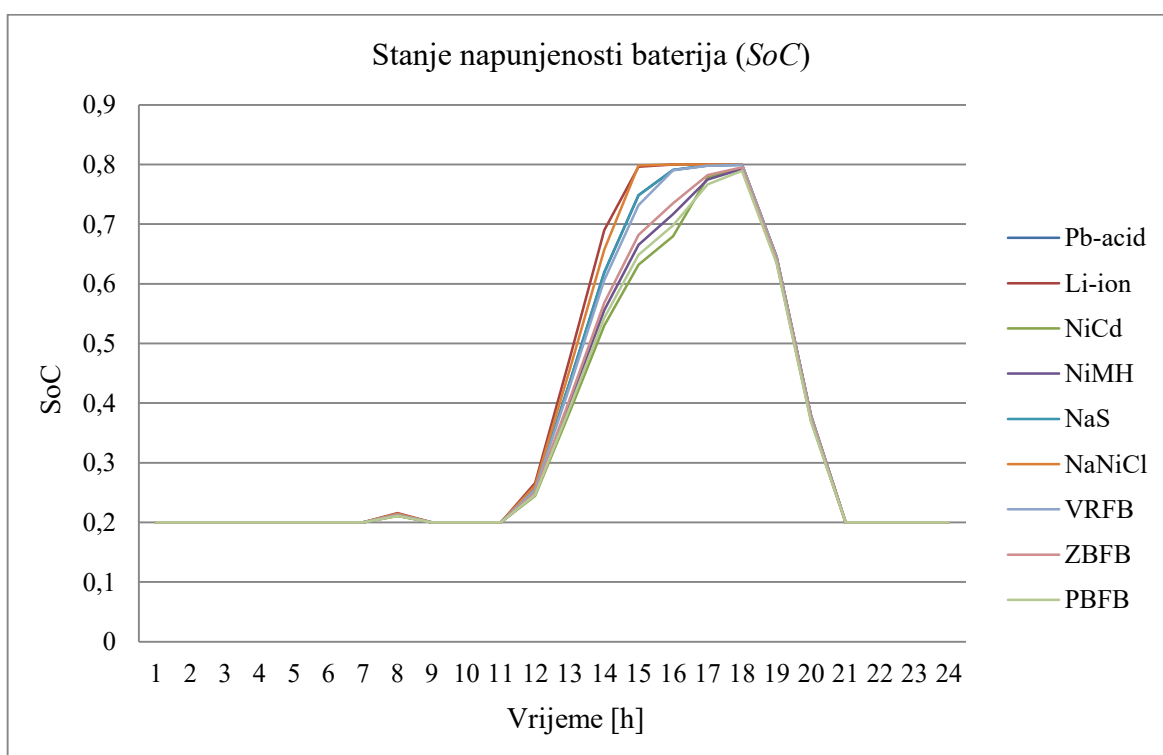
Slika 6.5. Pražnjenje baterija u vremenskom razdoblju od 24 sata

Iz grafa pražnjenja baterija na slici 6.5. zaključujemo da su se u intervalu od 24 sata tehnologije baterija najintenzivnije praznile između 18 i 20 sati, dok interval od 20 do 22 sata predstavlja vrijeme gdje je došlo do smanjenja pražnjenja baterija. Mali dio pražnjenja baterija se dogodio između 8 i 10 sati gdje se najveće pražnjenje osjetilo kod natrij nikal klorid baterija (NaNiCl) i vanadij-redoks protočnih baterija (VRFB).

Graf na slici 6.6. nam pokazuje pražnjenje tehnologija baterija u razdoblju od jednog tjedna. Kako kod punjenja tehnologija baterija postoje intervali gdje dolazi do povećanog punjenja tako i kod pražnjenja tehnologija baterija postoje intervali gdje dolazi do povećanog pražnjenja tehnologija baterija. Iz grafa je također uočljivo da ne prevladavaju neke velike razlike između tehnologija baterija pri njihovom pražnjenju.



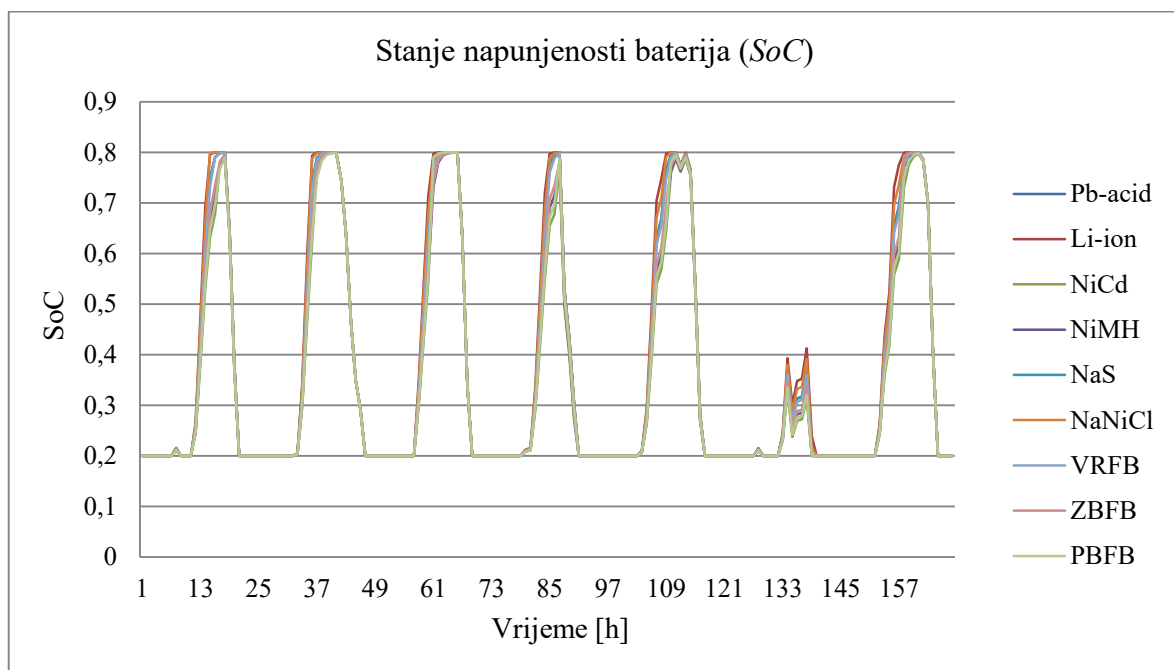
Slika 6.6. Pražnjenje baterija u vremenskom razdoblju od 168 sati



Slika 6.7. Stanje napunjenosti baterija (*SoC*) u vremenskom razdoblju od 24 sata

Graf na slici 6.7. nam pokazuje stanje napunjenosti baterija u razdoblju od 24 sata. Vidljivo je da početno stanje napunjenosti baterija iznosi 0,2. Nakon 11-tog sata dolazi do porasta stanja napunjenosti baterija. Porast stanja napunjenosti razlikuje se ovisno o tehnologiji baterije. Tako

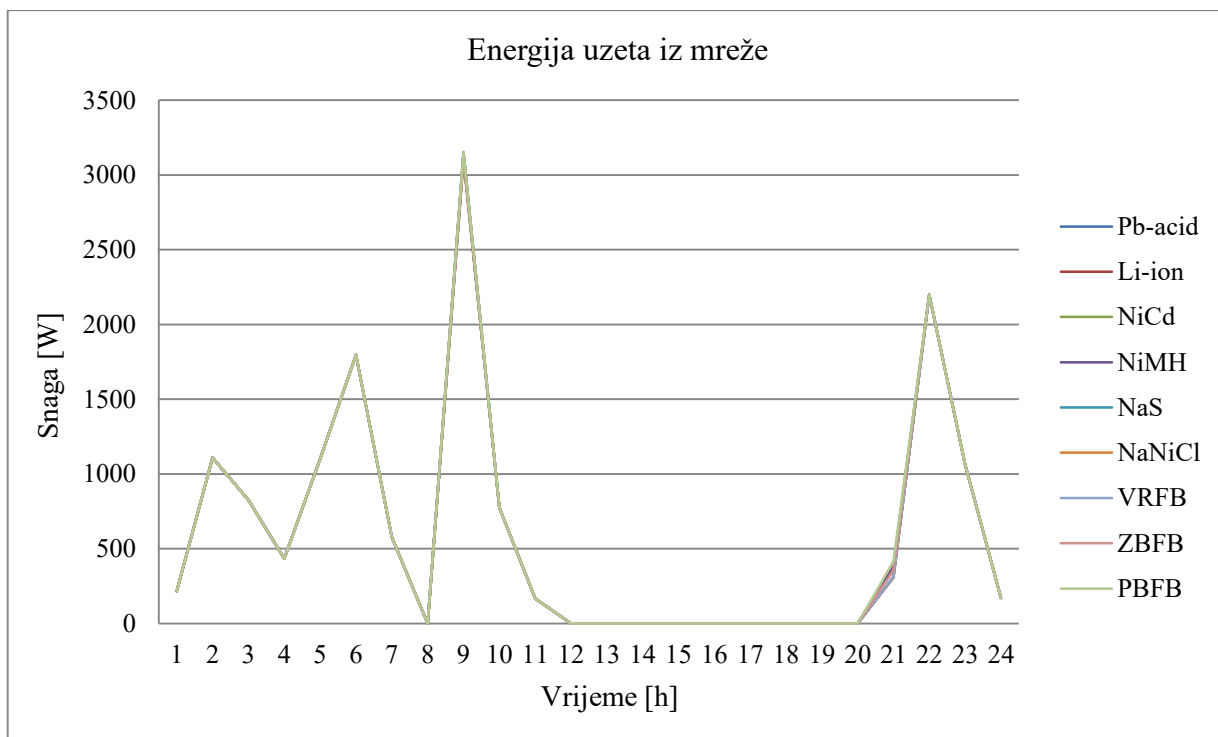
da litij-ionskim (Li-ion) i natrij nikal klorid (NaNiCl) tehnologijama baterija najbrže raste stanje napunjenosti do dozvoljenog stanja. Nešto sporiji porast stanja napunjenosti posjeduju olovne baterije (Pb-acid), natrij-sumpor baterije (NaS) te vanadij-redoks protočne baterije (VRFB). Još nešto sporiji porast stanja napunjenosti imaju cink-brom protočne baterije (ZBFB), nikal-metal hidrid baterije (NiMH), polusulfid-bromid protočne baterije (PBFB). Najsporiji porast stanja napunjenosti baterija imaju nikal-kadmij baterije (NiCd). U vremenu od 18 sati sve tehnologije baterija imaju maksimalno stanje napunjenosti te nakon toga dolazi do snižavanja stanja napunjenosti.



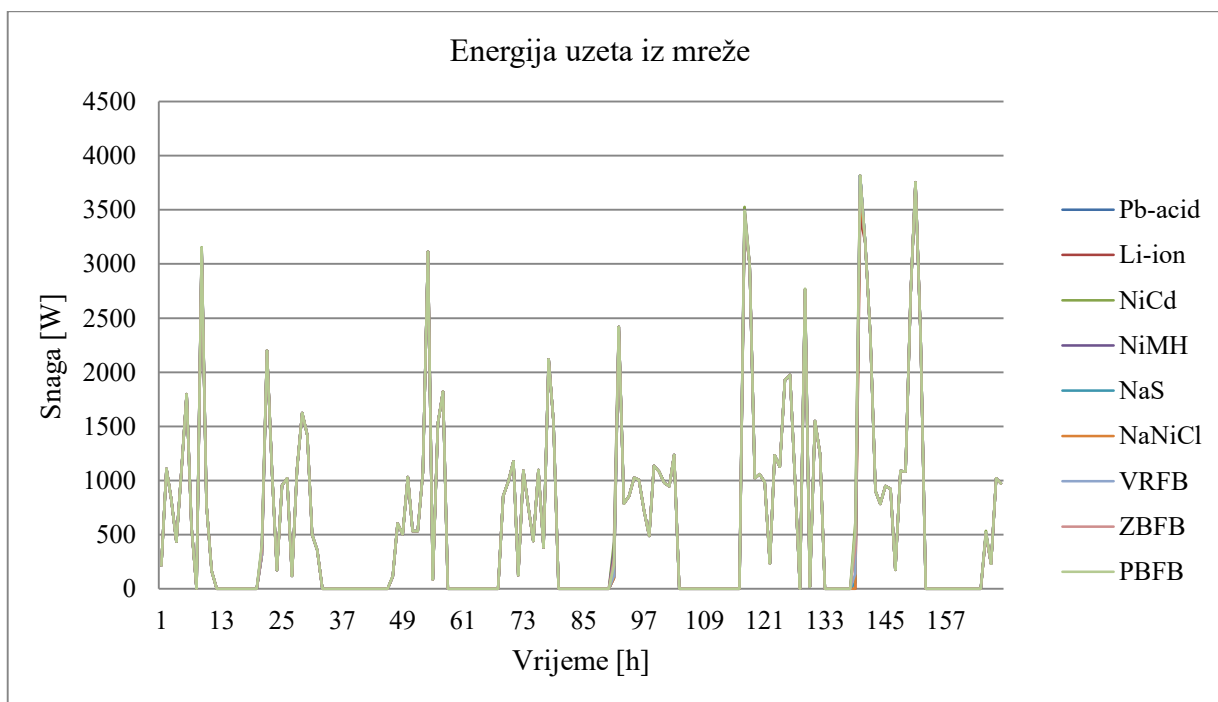
Slika 6.8. Stanje napunjenosti baterija (*SoC*) u vremenskom razdoblju od 168 sati

Na slici 6.8. graf nam pokazuje stanje napunjenosti baterija u jednom tjednu. Može se zaključiti da se stanje napunjenosti tehnologija baterija mijenja u intervalima te da u većem dijelu doseže svoju maksimalnu vrijednost koja iznosi 0,8. Jedino u vremenskom intervalu od 120 do 144 sata stanje napunjenosti baterija ne dosegne maksimalnu odnosno dopuštenu vrijednost iz razloga što je taj dan bila jako velika potrošnja energije u kućanstvu u odnosu na ostale dane što je i vidljivo na grafu na slici 6.2.

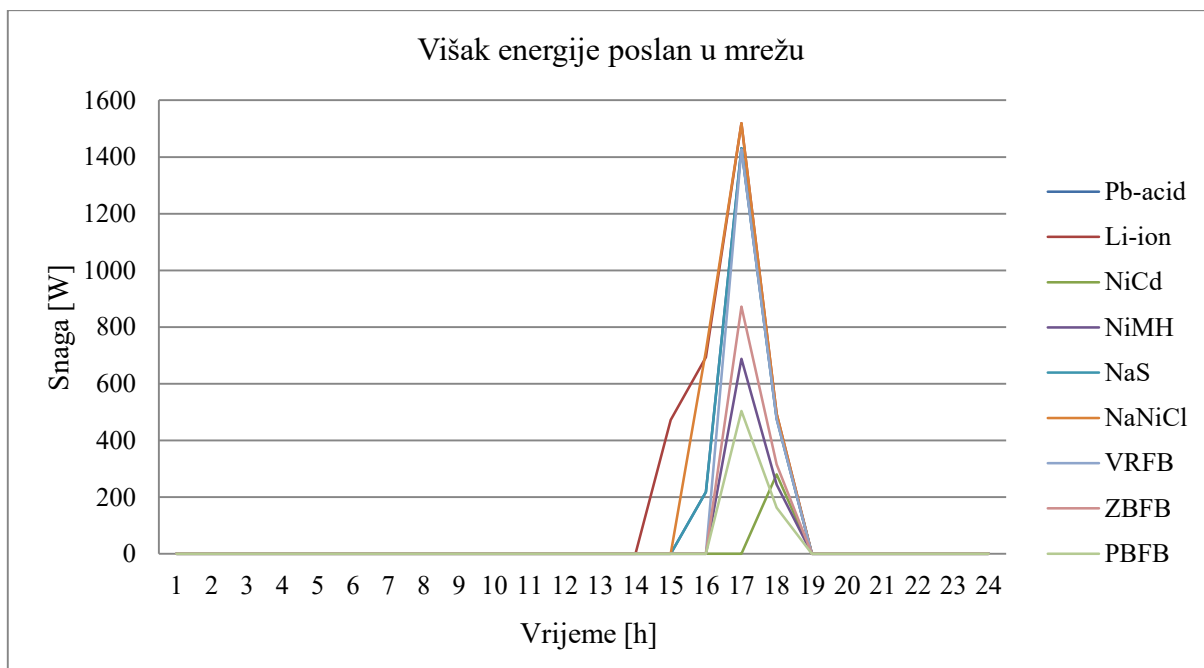
Grafovi na slikama 6.9. i 6.10. prikazuju količinu energije uzetu za nadopunu baterija zbog nedostatka energije u baterijama u vremenskom intervalu od jednog dana odnosno tjedan dana. Iz dobivenih grafova može se zaključiti da nema velikih razlika u količini energije uzete iz mreže s obzirom na različite tehnologije baterija. Uočljivo je da u svakom danu dolazi do potrebe uzimanja određene količine energije iz mreže za svaku od tehnologija.



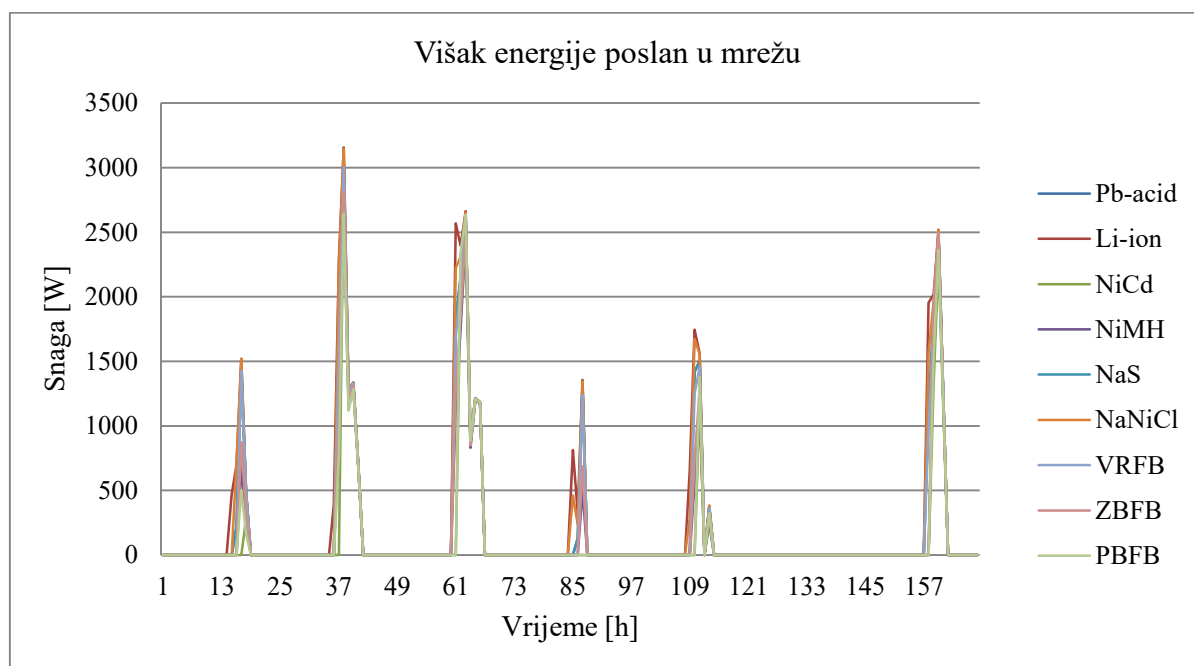
Slika 6.9. Energija uzeta iz mreže za nadopunu baterija u vremenskom razdoblju od 24 sata



Slika 6.10. Energija uzeta iz mreže za nadopunu baterija u vremenskom razdoblju od 168 sati



Slika 6.11. Višak energije koji se šalje u mrežu u vremenskom razdoblju od 24 sata



Slika 6.12. Višak energije koji se šalje u mrežu u vremenskom razdoblju od 168 sati

Višak energije koji se šalje u mrežu prikazan je na grafovima na slikama 6.11. i 6.12. Količina energije koja se šalje u mrežu ovisi o vrsti tehnologije baterije. Višak energije koji je zabilježen javlja se u vremenu od 14 do 19 sati. Najveći višak energije se javlja kod litij-ionske baterije (Li-ion) i natrij nikal klorid baterije (NaNiCl). Nešto manji višak energije se javlja kod vanadij-redoks protočne baterije (VRFB), natrij-sumpor baterije (NaS) te olovne baterije (Pb-acid). Najmanja količina energije koja predstavlja višak energije javlja se kod nikal-kadmij baterije (NiCd). Može se zaključiti da se kod svake tehnologije baterija u određenom trenutku javlja višak energije koji ne stane u bateriju te se iz toga razloga šalje u mrežu.

Pomoću izrađenih grafova dobivamo pregledni prikaz obrađenih tehnologija baterija te na taj način možemo lakše uočiti njihove karakteristike odnosno bolje i lošije strane što nam omogućava da primijenimo određenu tehnologiju na mjesto gdje na najbolji mogući način može služiti svrsi.

7. ZAKLJUČAK

Energija je za sve sustave jako važna i potrebna, kako danas, tako i u godinama koje dolaze. Sve više težimo ka obnovljivim izvorima energije te to predstavlja jedan od većih razloga razvoja i poboljšanja sustava pohrane. Osim skladištenja energije iz drugih izvora, sustavi pohrane omogućavaju najefikasniji i najekonomičniji način potpunog iskorištenja energije dobivene iz obnovljivih izvora jer energije iz obnovljivih izvora nema jednoliko u svakome trenutku poput energije Sunca ili vjetra. Takav jedan sustav pohrane energije je opisan u ovome radu, a to je baterijski sustav pohrane. Baterijski sustavi su svugdje prisutni oko nas, od telefona, računala, tehničke opreme pa sve do električnih automobila. Na tržištu imamo razne izvedbe i vrste tehnologija baterija pa je važno odabrati ispravnu tehnologiju baterija koja nam omogućava pravilan i efikasan rad. U radu su obrađene najčešće korištene tehnologije baterija te utvrđene njihove karakteristike kako bi bile korištene na najbolji mogući način i na najprikladnijem mjestu upotrebe. Iz raznih istraživanja zaključujemo da najveću učinkovitost imaju litij-ionske baterije (Li-ion) i natrij nikal klorid baterije (NaNiCl). Sve tehnologije baterija kreću se u sličnom rasponu cijena, dok jedna tehnologija baterija može imati različitu vrijednost ovisno o karakteristikama koje posjeduje. No, u odnosu na sve tehnologije baterija nešto manju cijenu imaju olovne baterije (Pb-acid), dok najvišu cijenu imaju litij-ionske baterije (Li-ion) i nikal-metal hidrid baterije (NiMH). Što se tiče životnog vijeka tehnologija baterija, najveći imaju protočne baterije u čiju skupinu se ubrajaju: vanadij-redoks protočne baterije (VRFB), cink-brom protočne baterije (ZBFB) te polusulfid-bromid protočne baterije (PBFB). Iz grafova dobivenih provedbom procesa zaključujemo da se tehnologije baterije intenzivno pune do neke određene vrijednosti te onda dolazi do smanjenja intenziteta punjenja. Isti slučaj je vidljiv i kod pražnjenja tehnologija baterija. Brzina rasta stanja napunjenosti ovisi o tehnologiji baterije te tako najbrži porast imaju litij-ionske baterije (Li-ion), a najsporiji porast imaju nikal-kadmij baterije (NiCd). Ovisno o tehnologiji baterije uzima se količina energije iz mreže potrebna za nadopunu baterije, dok se količina energije koja predstavlja višak energije koji ne stane u bateriju šalje se u mrežu. Potreba za razvitkom i mjesta za napredak kako baterijskih tako i ostalih sustava pohrane energije ima te se u tome smjeru treba i gledati. Za razvoj i modernizaciju sustava pohrane potrebna su nešto veća novčana ulaganja, no dugoročno korištenje ovih sustava bi omogućilo ostvarenje značajnih ušteda kako novca tako i energenata. Iz toga se razloga treba sve više prenijeti pažnja na sustave pohrane energije, a posebice na baterijske sustave pohrane električne energije jer oni predstavljaju budućnost napretka cijelog elektroenergetskog sustava.

LITERATURA

- [1] S. Koochi-Fayegh i M. Rosen, »A review of energy storage types, applications and recent developments,« *Journal of Energy Storage*, Oshawa, 2020.
- [2] G. Saldana, J. I. San Martin, I. Zamora, F. J. Asensio i O. Onederra, *Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation*, Eibar, Bilbao: Energies, 2019.
- [3] X. Fan, B. Liu, J. Liu, J. Ding, X. Han, Y. Deng, X. Lv, Y. Xie, B. Chen, W. Hu i C. Zhong, *Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage*, Tianjin, 2020.
- [4] I. Đurić, T. Marijanić i J. Škare, »Baterijski spremnici električne energije u distribucijskoj mreži,« *Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije - HO CIRED*, Opatija, 2018.
- [5] D. Kosić, »Sustavi pohrane električne energije,« *Diplomski rad*, Osijek, 2016.
- [6] D. Jurak, »Usporedba performansi različitih tehnologija baterija za pohranu električne energije,« *Diplomski rad*, Osijek, 2020.
- [7] M. Antunović, »Energetske karakteristike različitih tehnologija pohrane električne energije,« *Završni rad*, Osijek, 2020.
- [8] Global Energy Network Institute i A. Oberhofer, »Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration,« 2012., dostupno na:
<https://www.ourenergypolicy.org/resources/energy-storage-technologies-their-role-in-renewable-integration/> [31. Svibanj 2022.]
- [9] A. Rufer, *Energy storage: Systems and Components*, Boca Raton, 2018.
- [10] Asian Development Bank, *Handbook on battery energy storage system*, City of Mandaluyong, 2018.
- [11] International Electrotechnical Commission - IEC, *Electrical Energy Storage*, 2011.
- [12] F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper i O. Gomis-Bellmunt, *Energy storage in power systems*, Chichester, 2016.

- [13] Concordia University, »Lead acid batteries,« 2016., dostupno na:
https://www.concordia.ca/content/dam/concordia/services/safety/docs/EHS-DOC-146_LeadAcidBatteries.pdf [13. Lipanj 2022.]
- [14] Smart Energy International, »The vanadium redox flow battery-a game changer for energy storage safety«, dostupno na: <https://www.smart-energy.com/storage/the-vanadium-redox-flow-battery-a-game-changer-for-energy-storage-safety/> [15. Lipanj 2022.]
- [15] M. Morris i S. Tosunoglu, Comparison of rechargeable battery technologies, Atlanta, 2012.

SAŽETAK

Ovaj rad temelji se na isticanju važnosti pohrane električne energije, njezina potreba u sadašnjosti pa tako i budućnosti. Navedena je podjela sustava pohrane, dok su detaljno opisani elektrokemijski odnosno baterijski sustavi pohrane te je istaknuta njihova važnost u daljnjem napretku cijelog elektroenergetskog sustava. Također su opisani neki od osnovnih modela baterije te njen princip rada. Detaljno je opisano devet tehnologija baterija za pohranu električne energije, a to su: olovne baterije (Pb-acid), litij-ionske baterije (Li-ion), nikal-kadmij baterije (NiCd), nikal-metal hidrid baterije (NiMH), natrij-sumpor baterije (NaS), natrij nikal klorid baterije (NaNiCl), vanadij-redoks protočne baterije (VRFB), cink-brom protočne baterije (ZBFB) te polusulfid-bromid protočne baterije (PBFB). Istaknute su njihove karakteristike, prednosti i nedostaci te njihova primjena. U praktičnom dijelu rada provedeno je ispitivanje karakteristika navedenih tehnologija baterija, a sam proces ispitivanja napisan je i izveden u programu Matlab (MATrix LABoratory), dok su rezultati i analize predstavljeni pomoću programa Microsoft Excel-a. Istaknute su karakteristike poput punjenja odnosno pražnjenja baterija, stanja napunjenosti baterija (*SoC*), te količine energije koja predstavlja višak ili manjak u odnosu na količinu energije potrebne za napunjenost baterije. Time se dobio bolji prikaz svih obrađenih tehnologija baterija za pohranu električne energije i mogućnost usporedbe istih.

Ključne riječi: pohrana električne energije, tehnologije baterija, proces ispitivanja, karakteristike, usporedba

ABSTRACT

This paper is based on emphasizing the importance of electrical energy storage, its need in the present and also in the future. The division of the storage system is indicated, while the electrochemical and battery storage systems are described in detail and their importance in the further progress of the entire power system is highlighted. Some of the basic models of the battery and its working principle are also described. Nine battery technologies for electrical energy storage are described in detail, namely: lead batteries (Pb-acid), lithium-ion batteries (Li-ion), nickel-cadmium batteries (NiCd), nickel-metal hybrid batteries (NiMH), sodium-sulfur batteries (NaS), sodium nickel chloride batteries (NaNiCl), vanadium-redox flow batteries (VRFB), zinc-bromine flow batteries (ZBFB) and polysulfide-bromine flow batteries (PBFB). Their characteristics, advantages and disadvantages and their application are highlighted. In the practical part, a test of the characteristics of the mentioned battery technologies was carried out, and the test process itself was written and performed in the Matlab program (MATrix LABoratory), while the results and analyzes were presented using the Microsoft Excel program. Characteristics such as charging or discharging batteries, the state of charge of batteries (*SoC*), and the amount of energy that represents an excess or deficit in relation to the amount of energy needed to charge the battery are highlighted. This resulted in a better presentation of all processed battery technologies for electric energy storage and the possibility of comparing them.

Key words: electrical energy storage, battery technology, examination process, characteristics, comparison