Baterije za autonomne fotonaponske sustave

Travančić, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:851305

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

BATERIJE ZA AUTONOMNE FOTONAPONSKE SUSTAVE

Završni rad

Matea Travančić

Osijek, 2017.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Osnovne komponente autonomnih fotonaponskih sustava 2
3. Baterije korištene u autonomnim FN sustavima za pohranu električne energije 5
3.1. Olovne baterije 5
3.2. VRLA baterije 11
3.3. Nikal-kadmijske baterije 12
3.4. Nikal-metal-hidridne baterije 14
3.5. Litij-ionske baterije 16
3.6. Litij-polne baterije 17
3.7. Srebrov oksid baterije 18
3.8. Protočne baterije 19
3.9. Vanadij redoks baterije 19
4. Ispitivanje baterija 21
4.1. Ispitivane karakteristike baterija 21
4.2. Mjerenje unutarnjeg otpora 24
5. Odabir baterije 28
5.1. Opća 1kWh litij-ionska baterija 28
5.2. Opća 1kWh olovna baterija 31
5.3. Redflow ZBM baterija 33
5.4. Redflow ZBM2 baterija 36
5.5. Redflow ZBM3 baterija 38
5.6. Rezultati simulacija 41
6. Zaključak 43
Literatura 44
Popis slika 46
Popis grafikona 47
Popis tablica 48
Sažetak 49
Abstract 50
Životopis 51

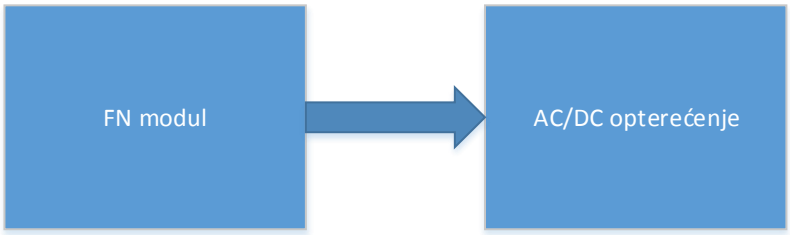
1. Uvod

Cjelokupna struktura elektroenergetskih sustava je u procesu izmjene. Sve više se odmiče od fosilnih goriva, koji su bitan izvor energije u svijetu, k obnovljivim izvorima energije koji su održivi i sigurniji za okoliš. Čimbenici koji potiču ideju smanjenja korištenja fosilnih goriva su: rast potražnje za električnom energijom u razvijenim zemljama kao i u zemljama u razvoju, nedostatak resursa za izgradnju elektrana i distribucijskih mreža u mnogim zemljama u razvoju, nedovoljna proizvodnja energije u industrijaliziranim zemljama te briga za posljedice stakleničkih plinova i promjene klime. Vjetroelektrane, fotonaponski solarni sustavi, solarne termoelektrane, elektrane na biomasu, gorivne ćelije, mikrokogeneracijski sustavi (engl. *Combined Heat and Power*) i hibridni sustavi su dijelovi sustava za proizvodnju električne energije koji koriste obnovljive izvore kako bi se minimiziralo korištenje fosilnih goriva. Međutim, korištenje obnovljivih izvora energije, čak i kada postoji dobar potencijalan izvor, može biti problematično zbog njihove nestalne i promjenjive prirode. Odnosno, fluktuacije u brzini vjetra, promjene intenziteta sunčeva zračenja, munje, nagle promjene opterećenja i slično, mogu izazvati trenutne padove napona sustava. Istraživanja pokazuju da pohrana energije može kompenzirati za stohastičku prirodu i naglu nedostupnost obnovljivih izvora energije za kratke periode bez gubitaka i potrebe za stavljanjem drugih elektrana u pogon. Drugi problem jest integracija sustava obnovljivih izvora energije u mreže na udaljenim mjestima gdje je mreža slaba, što može generirati neprihvatljive varijacije napona zbog promjene snage. Nadogradnja infrastrukture za prijenos energije kako bi se ublažio problem često nije ekonomična. Umjesto toga, implementacija pohrane energije za ublažavanje promjene napona na udaljenim mjestima bi omogućila povoljnu alternativu nadogradnji infrastrukture [1].

2. Osnovne komponente autonomnih fotonaponskih sustava

Autonomni fotonaponski sustavi su dizajnirani i dimenzionirani za istosmjerna (DC) i/ili izmjenična (AC) opterećenja. Nazivaju se još i izravno povezani sustavi (engl. *Direct coupled systems*) zato što je istosmjerni izlaz fotonaponskog modula ili polja izravno povezan s istosmjernim opterećenjem. Izravno povezani sustavi, u kojima nema pohrane električne energije u baterijama, se koriste samo za vrijeme kada je Sunce na obzoru. Točka maksimalne snage MPPT (engl. *Maximum power point tracker*) se koristi između polja i opterećenja kako bi se bolje iskoristila maksimalna izlazna snaga dostupnog polja i za usklađivanje impedancije električnog opterećenja s maksimalnom snagom fotonaponskog polja.

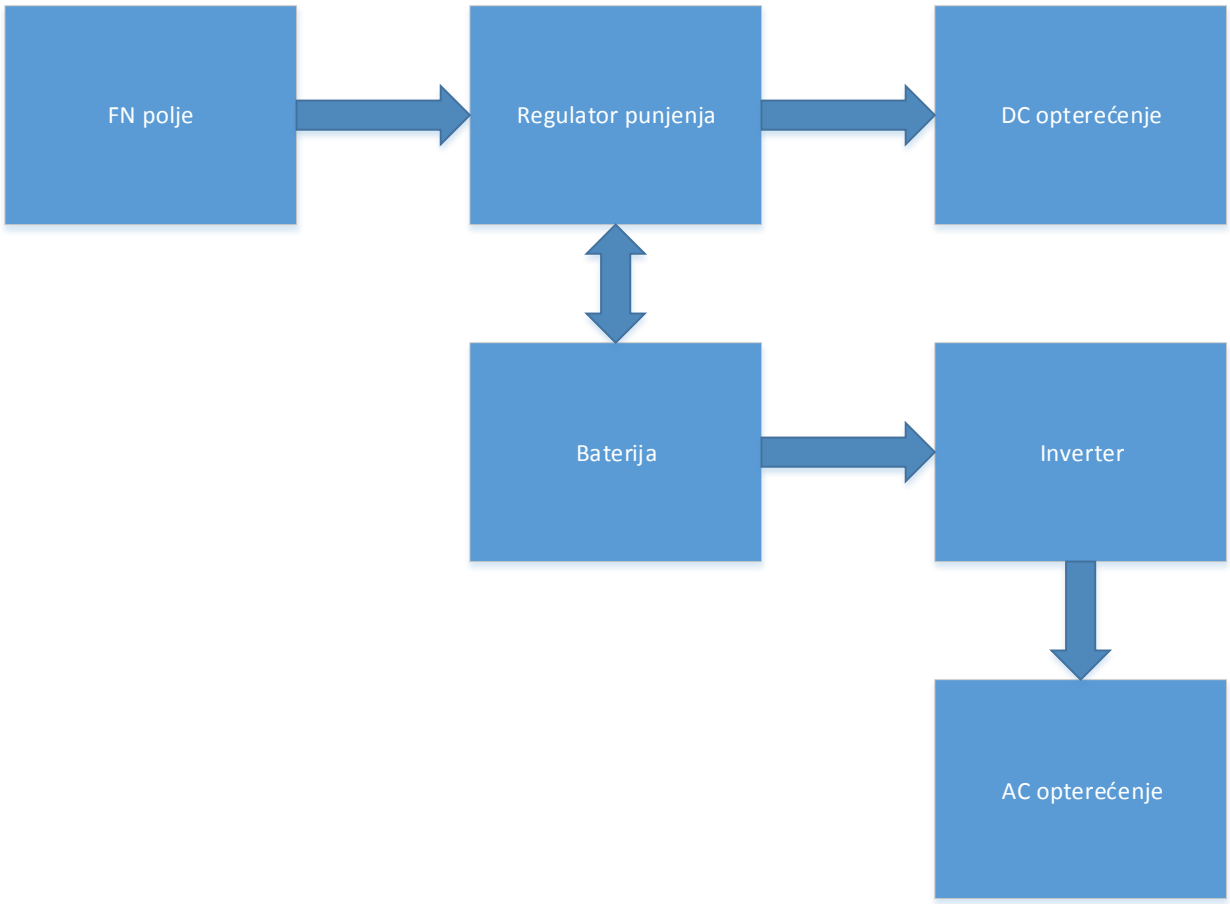
Slika 2.1. prikazuje općeniti blok dijagram autonomnog fotonaponskog sustava bez pohrane energije:



Slika 2.1. Autonomni FN sustav bez pohrane energije

Primjer upotrebe izravno povezanih FN sustava je solarni fotonaponski modul koji je izravno povezan za pokretanje crpke te se koristi u poljoprivredi. Ovisno o kapacitetima crpke, modul može biti povezan serijskim ili paralelnim konfiguracijama.

Slika 2.2. prikazuje blok dijagram tipičnog autonomnog fotonaponskog sustava s DC i AC opterećenjem s mogućnošću pohrane energije u bateriji:



Slika 2.2. Blok dijagram FN sustava s baterijom

Razlika između fotonaponskog polja s baterijom i fotonaponskog polja bez baterije je u tome što polje s baterijom sadrži dodatne komponente koje su potrebne za stabilnost punjenja baterije. Fotonaponski moduli su povezani u serije kako bi se dobio željeni porast istosmjernog napona, poput 12, 24 ili 48 V. Regulator punjenja regulira strujni izlaz i sprječava da razina struje preraste maksimalnu vrijednost za punjenje baterije. Izlaz regulatora punjenja je priključen na bateriju preko dvostrukog odspojenog istosmjernog prekidača.

Osim toga, može se omogućiti i prekidač koji kada se isključi zbog sigurnosnih mjera, istodobno odspaja opterećenje i fotonaponska polja. Za vrijeme kada je Sunce na obzoru, opterećenje je opskrbljeno istosmjernom strujom dok istodobno puni bateriju. Regulator osigurava da izlaz istosmjerne struje iz fotonaponskog polja uvijek bude primjeren za napajanje spojenog opterećenja pri dimenzioniranju baterija. Dimenzioniranje baterija ovisi o brojnim čimbenicima, poput trajanja

neprekinutog napajanja opterećenja kada je sunčevo zračenje slabije ili ga nema. Baterija proizvodi 20 - 30 % gubitaka zbog grijanja kada je u upotrebi, koje također mora biti uzeto u obzir. Pri dizajniranju solarnog fotonaponskog sustava s baterijom, mora se uzeti u obzir odgovarajuće mjesto za bateriju i ventilaciju prostorije [2].

3. Baterije korištene u autonomnim FN sustavima za pohranu električne energije

U fotonaponskim sustavima se koriste sekundarne baterije (engl. *Secondary batteries*), one su punjive te mogu pohranjivati i isporučivati električnu energiju [2]. Često korištene i komercijalno dostupne sekundarne baterije se mogu podijeliti u grupe prema korištenom elektrokemijskom sustavu. To su, prema [3]:

- Standardne baterije – olovne baterije (engl. *Lead acid*), nikal-kadmijske (Ni-Cd)
- Moderne baterije – nikal-metal-hidridne (Ni-MH), litij-ionske (Li-ion), litij-polimerske (Li-pol)
- Posebne baterije – srebro-oksidne baterije (Ag-Zn), nikal-hidrogenske baterije (Ni-H_2)
- Protočne baterije – cink-bromidne baterije (Br_2-Zn), vanadij redoks baterije (engl. *Vanadium redox battery*)
- Baterije za visoku temperaturu – natrij-sumpor baterije (Na-S), natrij-metalkloridne baterije

3.1. Olovne baterije

Prednosti su niska cijena i dostupnost olova, dobra pouzdanost, visok napon ćelija (2 V), visoka elektrokemijska korisnost i životni ciklus baterije od nekoliko stotina do nekoliko tisuća punjenja i pražnjenja. Zahvaljujući tim svojstvima, olovne baterije su najviše korištene sekundarne baterije i čine 60% korištenih sekundarnih baterija. Negativna strana je težina olova i time niža specifična energija u rasponu 30-60 Wh/kg. Olovne baterije su pogodne za srednje i velike pohrane energije jer nude dobru kombinaciju parametara snage i nisku cijenu [3].

Izgradnja olovne baterije ovisi o korištenju. Obično se sastoji od serijski povezanih ćelija, a glavni dijelovi su elektrode, odjeljivači (engl. *Separators*), elektroliti, posude s poklopcem, ventilacije i neki drugi elementi [3].

Elektroda se sastoji od rešetke i aktivne mase, a pozitivna elektroda rešetke mora biti otporna na koroziju. Korozija pretvara olovnu leguru u olovni oksid s manjom mehaničkom snagom i električnom vodljivosti. Rešetke su napravljene od olovnih legura jer bi čisto olovo bilo premekano. Koriste se legure olovo-kalcij (Pb-Ca) ili olovo-antimon (Pb-Sb), s primjesama aditiva poput kositra

(Sn), kadmija (Cd) i selenija (Se), koji popravljaju otpornost na koroziju i povećavaju mehaničku snagu.

Aktivni materijal je izrađen od olovnog oksida PbO zalijepljenog na rešetku i zatim elektrokemijski pretvorenog u crvenkasto-smeđi olovni dioksid PbO_2 na pozitivnoj elektrodi i u sivo spužvasto olovo Pb na negativnoj elektrodi [3].

Odjeljivači električki odvajaju pozitivnu elektrodu od negativne te imaju 4 funkcije [3]:

1. Omogućiti električnu izolaciju između pozitivne i negativne ploče te sprječavanje kratkih spojeva
2. Djelovati kao mehanički razmak koji drži ploče u određenoj poziciji
3. Zadržati aktivne materijale u bliskom dodiru s rešetkom
4. Dopustiti slobodnu difuziju elektrolita i kretanje iona

Materijali korišteni za odjeljivače mogu biti drveni furniri, celuloza (papir) obično očvrsnuta fenol-formaldehidnom smolom, i odjeljivači od sintetičkih materijala poput gume, polivinil klorida (PVC), polietilena (PE) i mikrofibra od stakla [3].

Elektrolit je vodena topina H_2SO_4 gustoće 1.22 - 1.28 g/cm^3. Većinom je tekućina, ponekad se pretvara u gel ili potpuno apsorbira u odjeljivače. Posuda s poklopcem mora biti izdržljiva na napinjanje uzrokovano težinom unutarnjih dijelova baterije i unutarnjeg pritiska zbog podizanja tlaka tijekom ciklusa. Najčešće korišten materijal je polipropilen, ali i PVC i guma. Ako se tijekom punjenja pojavi nadtlak, problem se rješava ventilom ugrađenim najčešće u poklopac [3].

Postoje neke glavne vrste konstrukcije baterije: prizmatska konstrukcija s rešetkom ili cijevnim pločama, cilindrična konstrukcija (spiralna rupa ili disk ploče) i bipolarna konstrukcija.

Slika 3.1. Shema prizmatske i spiralne olovne baterije [3]

Ukupna kemijska reakcija tijekom pražnjenja je:

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O;\ E_0 = +2.048\ V$$

Reakcija djeluje u suprotnom smjeru tijekom punjenja.

Podjela mehaničkih kvarova olovnih baterija:

1. Širenje pozitivne ploče i pozitivno aktiviranje masenog udjela
2. Gubitak vode uzrokovan plinom ili visokom temperaturom
3. Kiselinsko raslojavanje
4. Sulfacija aktivne mase uzrokovana nepotpunim punjenjem

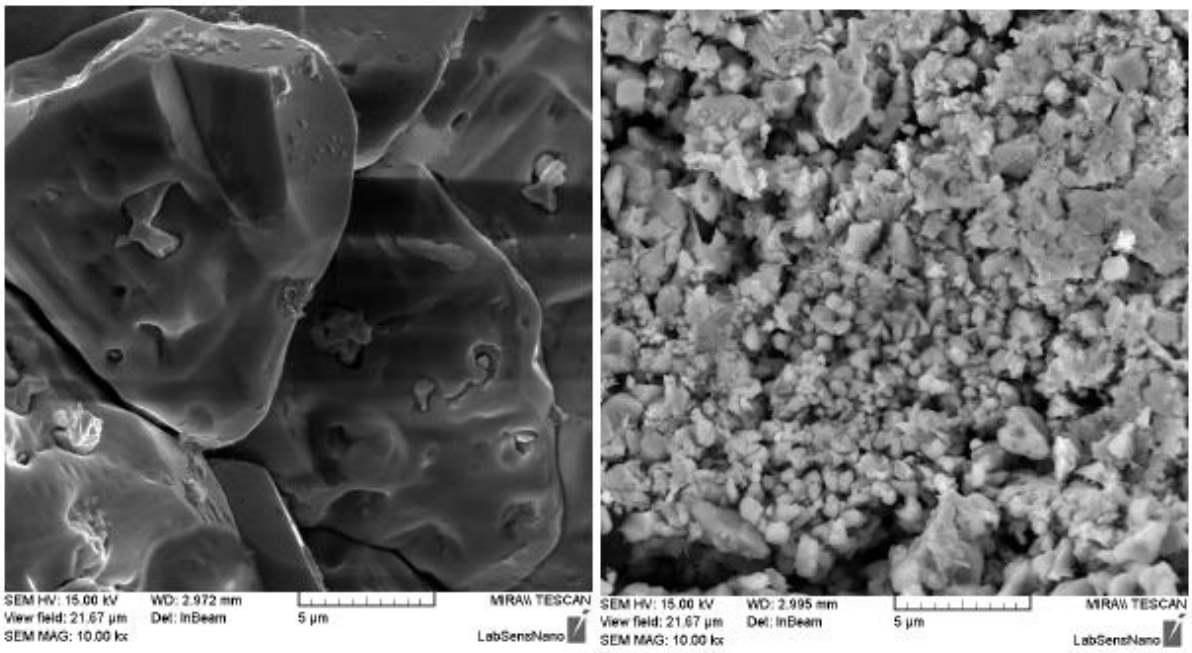
5. Korozija pozitivne rešetke
6. Sulfacija negativne aktivne mase (baterije u hibridnim automobilima i baterije za opskrbu električne energije udaljenim područjima)

Ponavljano pražnjenje i punjenje baterije uzrokuje povećanje pozitivne aktivne mase jer proizvod reakcije pražnjenja $PbSO_4$ zauzima veći volumen od pozitivnog aktivnog materijala PbO_2. Punjenje ćelija vraća većinu olovnog dioksida, ali ne unutar izvornog volumena. Negativna aktivna masa ne pokazuje istu tendenciju za proširenjem. Razlog tome bi mogao biti što je olovo mekše nego olovni dioksid i zbog toga se negativni aktivni materijal više komprimira tijekom pražnjenja, jer dolazi do pretvorbe olova u olovni sulfat. Drugi razlog može biti da spužvasto olovo ima veće pore od pora olovnog dioksida i s time ima veću mogućnost apsorbiranja olovnog sulfat bez proširenja negativne aktivne mase. Progresivno širenje pozitivne aktivne elektrode uzrokuje rastući udio pozitivnog aktivnog materijala. Taj materijal postaje električki odspojen od procesa prikupljanja struje i uzrokuje smanjenje kapaciteta ćelije [9].

Slika 3.2. Frakcioniranje pozitivne aktivne mase [3]

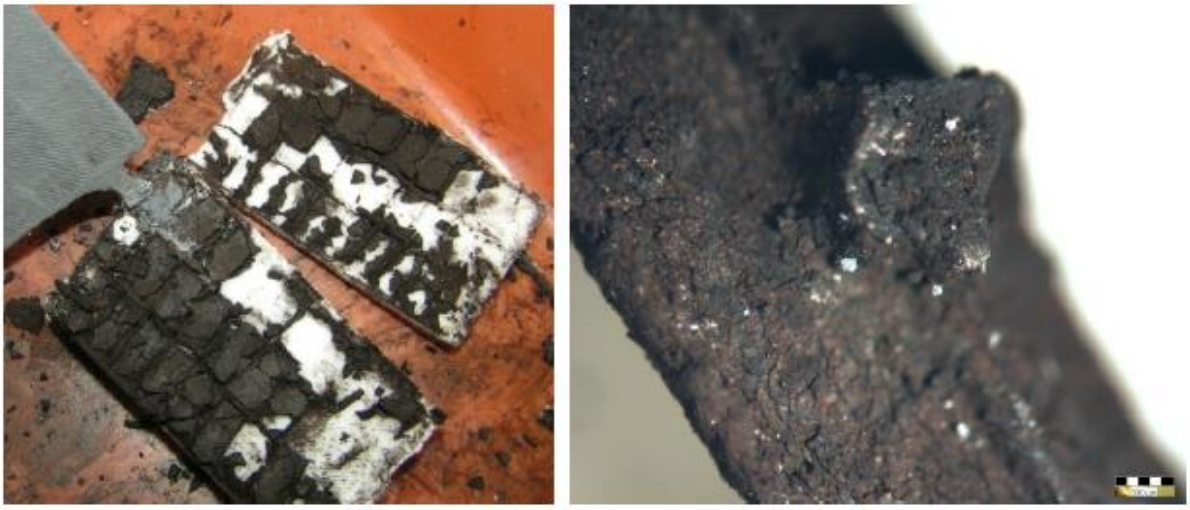
Razvijanje plina tijekom prepunjenja vodi do smanjenja volumena elektrolita. Neki od aktivnih materijala time gube kontakt s elektrodama. Isušenje povećava unutarnji otpor baterije što uzrokuje pretjeran rast temperature tijekom punjenja i ovaj proces ubrzava gubitak vode kroz isparavanje. Tijekom punjenja proizvodi se sumporna kiselina između elektroda i kiselina veće koncentracije, koja ima veću relativnu gustoću, pada na dno ćelije olovne kiseline. Stratifikacija kiseline može biti uzrokovana i preferencijalnim ispuštanjem gornjih dijelova ćelije, zbog nižeg omskog otpora tih dijelova. Koncentracija elektrolita u gornjem dijelu ćelije je tada manja od koncetracije na dnu ćelije, što vodi do pražnjenja gornjeg dijela i punjenja donjeg dijela ćelije. Vertikalni gradijent koncentracije sulforne kiseline može dovesti do nejednake upotrebe aktivne mase i, posljedično, smanjiti vijek trajanja kroz nepovratni oblik $PbSO_4$ [10].

Kada su elektrode opetovano nepotpuno punjene, bilo zbog krivog načina punjenja ili kao rezultat fizikalnih promjena koje sprječavaju elektrode u ispunjenju odgovarajućeg potencijala (zbog antimonskog trovanja negativne elektrode), tada dolazi do rapidnog opadanja kapaciteta baterije zbog progresivnog nakupljanja olovnog sulfata u aktivnoj masi. Sulfacija je stvaranje izolacijskog sloja olovnog sulfata na površini elektrode, što dovodi do inhibicije kontakta elektrolita s aktivnom masom. Sulfacija raste tijekom dugih perioda ostavljanja baterije u stanju pražnjenja, u slučaju elektrolitske stratifikacije ili nepotpunog punjenja. U slučaju sulfacije mali kristali olovnog sulfata rastu do velikih, a veliki kristali smanjuju unutarnji otpor ćelije i tijekom punjenja teško je moguće pretvoriti ih natrag u aktivnu masu.



Slika 3.3. SEM (pretražni elektronski mikroskop, engl. scanning electric microscope) slike negativne aktivne mase. Sulfacija lijevo, zdravo stanje desno [3]

Tijekom punjenja pozitivna rešetka je sklona koroziji jer se olovni kolektor priključuje na olovni dioksid ili olovni sulfat. Brzina procesa ovisi o sastavu rešetke i mikrostrukturi, također potencijalu ploče, sastavu elektrolita i temperaturi ćelije. Proizvodi korozije obično imaju veći električni otpor od pozitivne rešetke. U ekstremnim slučajevima, korozija može rezultirati raspadom pozitivne rešetke i posljedično tome urušavanjem pozitivne elektrode.



Slika 3.4. Prikaz korozije pozitivne rešetke [3]

3.2. VRLA baterije

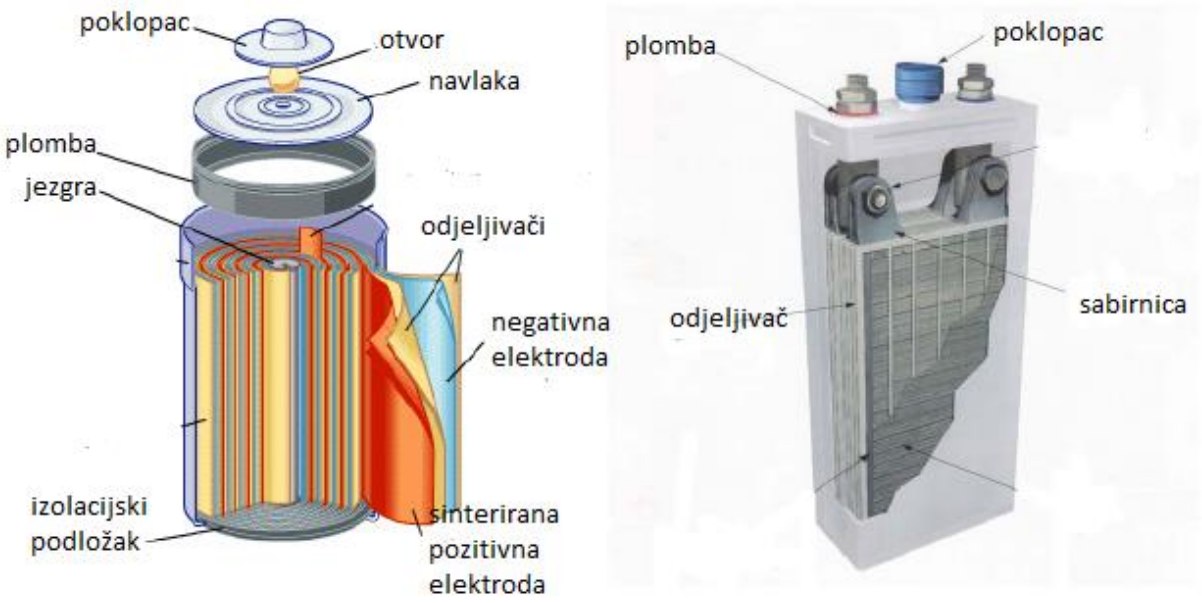
VRLA (engl. v*alve regulated lead-acid*) su olovne baterije regulirane ventilom i predstavljaju povoljne baterije koje se mogu puniti olovnom kiselinom. Zbog njihove konstrukcije, ne zahtijevaju dodatno dodavanje vode u ćelije. Najčešće su podijeljene u dvije grupe: apsorpcijske baterije od staklenog sloja i gel baterije [4].

Te baterije se kolokvijalno nazivaju zapečaćenim (engl. s*ealed*) olovnim baterijama, ali uvijek imaju sigurnosni ventil za smanjenje tlaka. Suprotno ventiliranim baterijama, VRLA baterije ne mogu proliti elektrolit. Osim toga, one koriste puno manje elektrolita nego tradicionalne olovne baterije. Naziv „regulirane ventilom“ ne opisuje dovoljno dobro tehnologiju, one su zapravo „rekombinantne“ baterije, odnosno kisik nastao na pozitivnim pločama će se uveliko rekombinirati s ugljikom spremnim za nastajanje na negativnim pločama, što daje vodu – a time i sprječava gubitak vode. Ventil je sigurnosna mjera u slučaju da količina nastalog ugljika postane opasno velika. Jedan rezultat tog dizajna je mnogo veći omjer snage i površine nego kod ventiliranih baterije, a drugi rezultat je veliki kapacitet snage, iako relativno kratkog vijeka trajanja. VRLA baterije se često koriste u sustavima s neprekidnim izvorom napajanja. VRLA baterije mogu zamijeniti gotovo svaku ventiliranu olovnu bateriju (u kombinaciji s dobro reguliranim punjenjem), kao i u svakoj primjeni gdje se ventilirane baterije ne mogu koristiti [4].

3.3. Nikal-kadmijske baterije

Nikal-kadmijske baterije su proizvedene u širokoj raznolikosti komercijalno važnih baterijskih sustava, od zapečaćenih ćelija bez održavanja (kapaciteta od 10 mAh do 20 Ah) do ventiliranih jedinica u stanju čekanja (engl. *vented standby power units*) kapaciteta od 1000 Ah i više. Imaju dugačak životni ciklus, mogućnost prepunjenja, visoke stope punjenja i pražnjenja, gotovo stalan napon pražnjenja i mogućnost djelovanja pri niskoj temperaturi. Međutim, cijena kadmija je nekoliko puta veća od cijene olova, stoga je cijena izrade nikal-kadmijeve ćelije puno skuplja od olovnoe ćelije. Osim toga problem je štetnost i otrovnost kadmija. Unatoč tome, niski troškovi održavanja i dobra pouzdanost su ju učinile idealnom za brojne primjene, poput osvjetljenja za hitne slučajeve, pokretanja motora, prijenosnog televizijskog prijemnika, električnih brijača, zrakoplovnih i svemirskih satelitskih sustava. Ovisno o izradi, nikal-kadmijeve ćelije imaju gustoću energije u rasponu 40-60 Wh/kg (50-150 Wh/dm^3). Životni ciklus im ide od nekoliko stotina za zapečaćene ćelije do nekoliko tisuća za ventilirane ćelije.

Izrada baterija je podijeljenja u dva tipa. U prvom tipu se koriste elektrode sa džepnim pločama (engl. *pocket plate electrodes*) u ventiliranim ćelijama. Aktivni materijal se nalazi u džepovima fino usitnjenog poniklovanog čeličnog lima, pozitivne i negativne ploče su odvojene plastičnim klinovima i izolatorima pločastih rubova. Drugi tip koristi sinterirane, vezane ili elektrode s vlaknastim pločama i u ventiliranim i u zapečaćenim ćelijama. U sinteriranim pločastim elektrodama, porozna nikalna elektroda je sinterirana u peći u smanjenju atmosfere pri 800 do 1000°C. Aktivni materijal se distribuira unutar pore, a koristi se posebni pleteni ili najlonski odjeljivač koji dopušta difuziju kisika u zapečaćenim ćelijama. Najčešće su korištene u obliku spiralnih i prizmatskih konstrukcija ćelija.



Slika 3.5. Shema spiralnih (lijevo) i prizmatskih (desno) konstrukcija Ni-Cd baterija [3]

Elektrolit je vodena otopina kalijevog hidroksida (KOH) koncentracije 20-28% po težini i gustoće od 1.18-1.27 g/cm^3 pri 25°C. Kada radi pri visokim temperaturama ponekad se koristi i vodena otopina natrijeva hidroksida (NaOH) kao elektrolit.

Ukupna reakcija ćelije tijekom pražnjenja je prikazana kemijskom jednadžbom:

$$2NiOOH + Cd + 2H_2O \rightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2;\ E_0 = +1.30\ V$$

Vidljivo je da količina vode u elektrolitima opada tijekom pražnjenja. Nikal-kadmijske baterije su dizajnirane kao pozitivan ograničeni ciklus kisika. Kisik nastao na pozitivnoj elektrodi tijekom punjenja difundira na negativnu elektrodu i reagira s kadmijem stvarajući $Cd(OH)_2$. Dodatno, ugljikov dioksid iz zraka može reagirati s kalijevim hidroksidom u elektrolitima i stvoriti K_2CO_3, a $CdCO_3$ može nastati na negativnim pločama. Oba spoja povećavaju unutarnji otpor i smanjuju kapacitet baterije [3].

Nikal-kadmijske baterije imaju veliku brzinu samopražnjenja pri visokim temperaturama i imaju efekt pamćenja (engl. *memory effect*) [3].

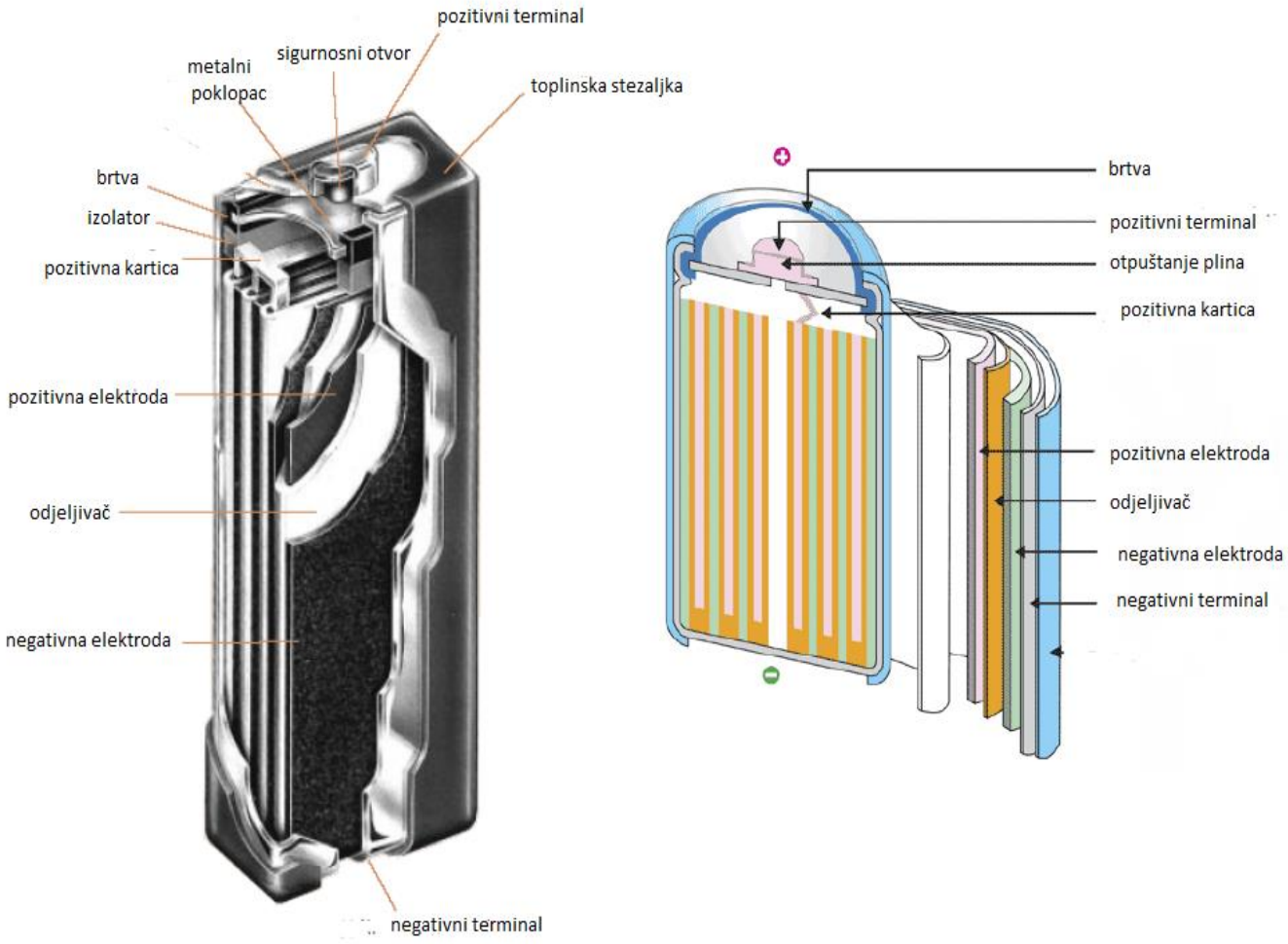
Efekt pamćenja je povratni proces koji rezultira trenutnim smanjenjem kapaciteta ćelija, a uzrokovan je plitkim ciklusom punjenja i pražnjenja. Nakon plitkog ciklusa dolazi do naponskog

koraka tijekom pražnjenja, tj. kao da ćelija pamti dubinu plitkog ciklusa. Veličina redukcije napona ovisi o broju prethodnih plitkih ciklusa i vrijednosti struje pražnjenja. No, kapacitet ćelije nije ugrožen ako je ćelija nakon toga potpuno ispražnjena (na 0.9 V), a zatim napunjena. Duboko pražnjenje nakon toga pokazuje normalnu krivulju pražnjenja. Efekt je najvjerojatnije temeljen na porastu otpora neispražnjenog materijala [11].

3.4. Nikal-metal-hidridne baterije

Zapečaćena nikal-metal-hidridna ćelija je s ugljikom apsorbirala u metalnoj leguri kao aktivni negativni materijal. U usporedbi s nikal-kadmijskom ćelijom, ima veću gustoću energije te je ekološki prihvatljiviji izvor energije. Međutim, ima veće samopražnjenje i manje je tolerantna na prepunjenje od nikal-kadmijske ćelije.

Pozitivna elektroda je NiOOH, negativna elektroda sadrži legure koje apsorbiraju vodik, a mogu apsorbirati preko tisuću vlastitih volumena vodika. Legura se obično sastoji od dva metala, prvo apsorbira vodik egzotermički, a zatim endotermički. Služe kao katalizator za disocijacijsku adsorpciju atomskog hidrogena u rešetku legure. Primjeri korištenih metala su: paladij (Pd), vanadij (V), titanij (T), cirkonij (Zr), nikal (Ni), krom (Cr), kobalt (Co), selenij (Sn), željezo (Fe), lantanidi i drugi. Dizajn cilindričnih i prizmatičkih zapečaćenih Ni-MH ćelija i sličan nikal-kadmijevim ćelijama. Koristi se hidrofilni polipropilenski odjeljivač.



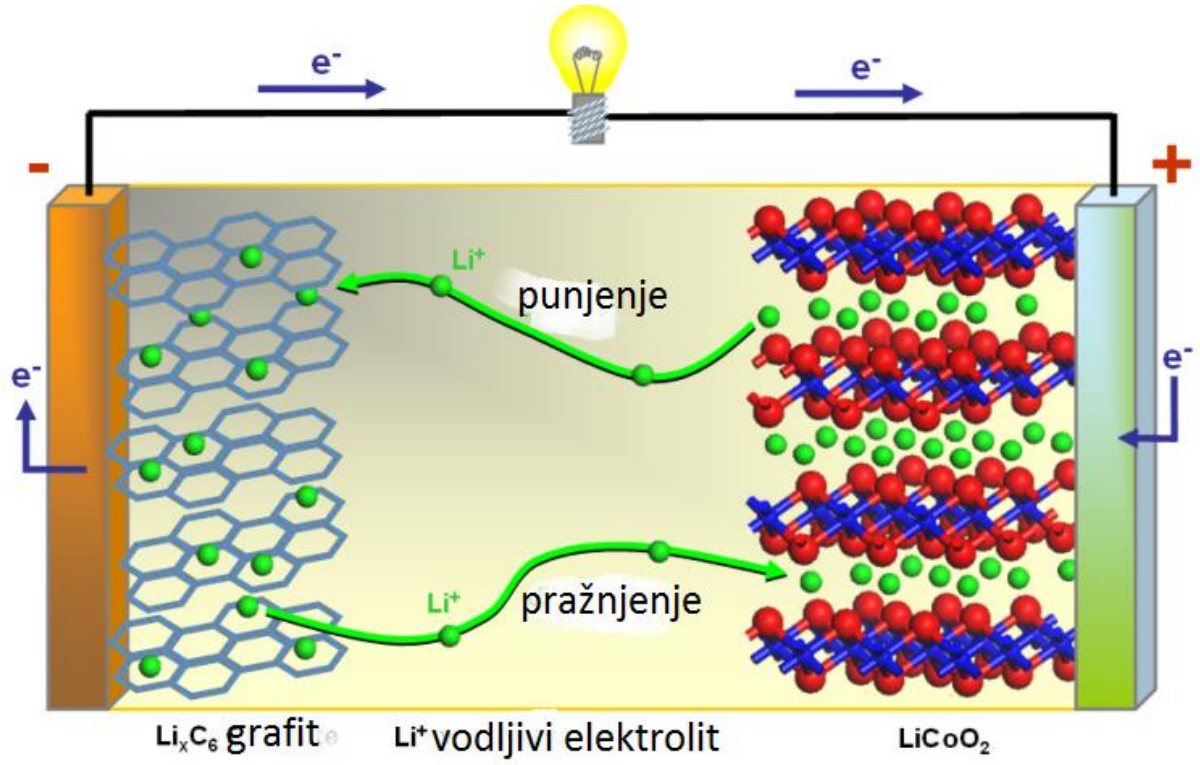
Slika 3.6. Shema prizmatske (lijevo) i spiralne (desno) Ni-MH baterije [3]

Gustoća energije je 25% veća nego kod Ni-Cd ćelija (80 Wh/kg), gustoća snage je oko 200 W/kg, i ima preko 1000 životnih ciklusa. Samopražnjenje je vrlo izraženo, 4-5% dnevno, a to je uzrokovano vodikom otopljenim u elektrolitu koji reagira s pozitivnom elektrodom. Ni-MH baterije se koriste gdje je potrebna visoka stopa životnog ciklusa baterije, dakle najviše u hibridnim električnim akumulatorima, električnim četkicama za zube, kamerama i medicinskim instrumentima. Te baterije također imaju efekt pamćenja.

3.5. Litij-ionske baterije

Litij je zanimljiv materijal za negativnu elektrodu baterije zbog toga što je lagan, ima visok potencijal redukcije i nizak otpor. Njihov razvoj je započeo u 1970-ima, no danas je uvelike sigurniji za ponovno punjenje jer litij-ionska ćelija više nije dizajnirana od litij-metala.

Princip rada litij-ionske ćelije je prikazan shematski na slici 3.7. Litijevi ioni putuju između elektroda tijekom punjenja i pražnjenja.



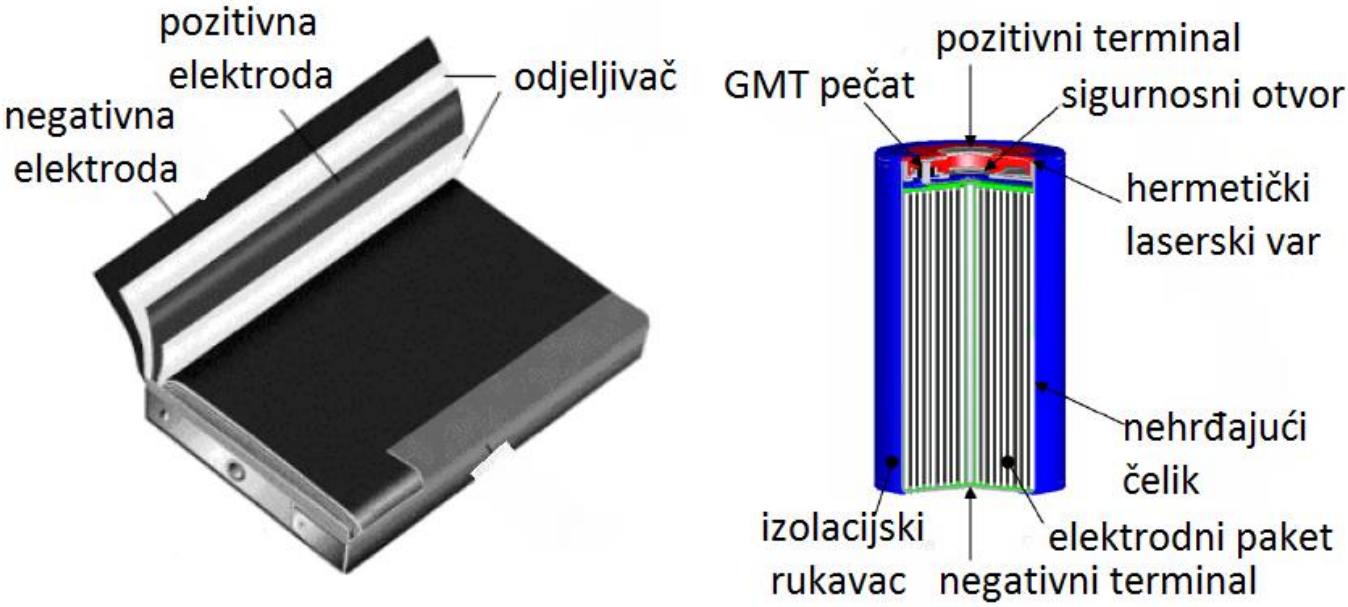
Slika 3.7. Princip rada litij-ionske ćelije [3]

Većina komercijalnih litij-ionskih ćelija ima pozitivne elektrode od kobaltovog oksida. Negativna elektroda je ugljik, ili u obliku grafita ili amorfnog materijala velike površine. Ugljik je dostupan i jeftin materijal male težine i ima sposobnost apsorbirati veliku količinu litija. Kada je uparen s metal oksidom kao pozitivnom elektrodom daje ćeliji relativno visok napon (od 4 V u potpuno punom stanju, do 3 V u ispražnjenom stanju) [15].

Elektrolit se sastoji od organske tekućine (etera) i disolvirane soli. Pozitivna i negativna aktivna masa je primijenjena na obje strane tanke metalne folije (aluminij na pozitivnu i bakar na

negativnu). Mikroporozni polimerski list između pozitivne i negativne elektrode djeluje kao odjeljivač.

Proizvode se u obliku prizmatskih i cilindričnih konstrukcija.



Slika 3.8. Prizmatska (lijevo) i cilindrična (desno) konstrukcija Li-ionskih ćelija [3]

Najvažnije prednosti litij-ionske ćelije su visoka gustoća energije, od 150 do 200 Wh/kg (250-530 Wh/l), visok napon (3.6 V), dobre karakteristike punjenja i pražnjenja (s više od 500 ciklusa), prihvatljivo nisko samopražnjenje (< 10% mjesečno), odsutnost efekta pamćenja, sigurnost u odnosu na ekvivalentne ćelije koje koriste metal litij i mogućnost brzog punjenja (2h).

Glavni nedostatak je visoka cijena litij-ionske baterije. Osim toga i kontroliran proces punjenja, posebno blizu napona od 4.2 V pri potpunoj napunjenosti. Prepunjenje ili grijanje preko 100°C uzrokuje raspadanje pozitivne elektrode uz oslobađanje kisika ($LiCoO_2$ daje Co_3O_4).

3.6. Litij-polne baterije

Polimeri koji sadržavaju hetero-atom (poput kisika ili sumpora) mogu rastaviti litijeve soli u vrlo velikim koncentracijama. Međutim, nedostatak je loša vodljivost krute otopine litijevih iona

(otprilike 10^{-5} S/m) pri sobnoj temperaturi. Pri višim temperaturama, preko 60°C, dolazi do faze transformacije kristalnog do amorfnog oblika što dovodi do puno bolje električne vodljivosti (10^{-1} S/m pri 100°C). Ta vrijednost dopušta polimeru da služi kao elektrolit u litijskim baterijama, ali debljina polimera mora biti mala, 10 do 100 mikrometara. Polimer kao elektrolit je sigurniji od tekućeg elektrolita jer nije zapaljiv [15].

3.7. Srebrov oksid baterije

Srebrov oksid baterije imaju jednu od najvećih energija vodenih ćelija. Teoretska gustoća energije je 300 Wh/kg (1400 Wh/dm^3), ali su praktične vrijednosti u rasponu 40-130 Wh/kg (110-320 Wh/dm^3). Ćelije imaju loš životni ciklus, ali mogu imati vrlo nizak unutarnji otpor, koji ih uz njihovu visoku gustoću energije čini vrlo korisnima za zrakoplovne i vojne svrhe. Srebrova pozitivna aktivna masa je oblikovana sinteriranjem srebrova praha pri temperaturama između 400 i 700°C i smještena je na srebrnim ili posrebrenim bakrovim rešetkama ili perforiranim listovima. Cinkova negativna elektroda se priprema kao mješavina cinka, cinkova oksida i organskih sredstava za vezanje. Cilj je proizvesti elektrode visoke poroznosti, a elektrolit je vodena otopina KOH (1.40 do 1.42 g/cm^3).

Odjeljivač je najvažnija komponenta ćelije srebrova oksida. On mora sprječavati kratki spoj među elektrodama, prelazak srebra na negativnu elektrodu, kretanje cinkata i čuvati cjelovitost cinkove elektrode. Odjeljivač mora imati nisku otpornost iona s dobrom termičkom i kemijskom stabilnosti u KOH otopini. Tipični odjeljivači korišteni u baterijama srebrova oksida su od celofana (regenerirane celuloze), sintetičkih vlaknastih obloga od najlona, polipropilena i netkanih vlakana. Sintetički vlaknasti oblozi su postavljeni do pozitivne elektrode kako bi čuvali regeneriranu celulozu od utjecaja oksidacije. U većini ćelija odjeljivači u obliku omotnica potpuno zatvaraju cinkove elektrode (Vincent & Scrosati, 2003.).

Komercijalne ćelije su uglavnom prizmatskog oblika i plastičnog omota. Prave se tako da u potpunosti mogu izdržati mehanički stres, a ćelije su najčešće zapečaćene sigurnosnim ventilima. Volumen slobodnih elektrolita je vrlo mali, apsorbiran u pore elektrode i odjeljivač. Gustoća energije praktične cink-srebro oksidne ćelije je pet do šest puta veća nego nikal-kadmijske ćelije. Glavni nedostatak sustava je visoka cijena i loš životni ciklus.

Slika 3.9. Ag-Zn prizmatska baterija [3]

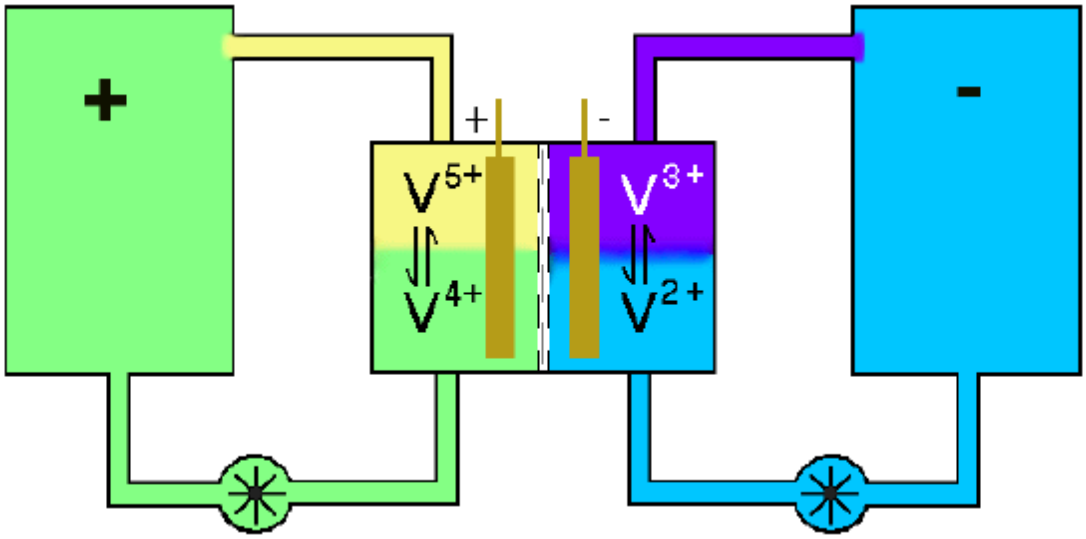
3.8. Protočne baterije

Protočne baterije (engl. *flow batteries*) pohranjuju i otpuštaju električnu energiju uz pomoć reverzibilnih elektrokemijskih reakcija u dva tekuća elektrolita. Elektrokemijska ćelija ima dvije petlje koje su fizički odvojene ionskom ili protonskom izmjenjivačkom membranom. Elektroliti teku unutar i izvan ćelije kroz odvojene petlje te se podvrgavaju kemijskoj reakciji unutar ćelije, s ionskim ili protonskim izmjenjivanjem kroz membranu i elektronsko izmjenjivanje kroz vanjski električki krug. Prednosti korištenja protočnih baterija u usporedbi s konvencionalnim sekundarnim baterijama su: mogućnost mjerenja kapaciteta sustava povećanjem elektrolitskih spremnika i mogućnost potpunog praznjenja baterije uz mali gubitak elektrolita tijekom ciklusa. Protočne baterije imaju malo samopražnjenje jer su elektroliti pohranjeni odvojeno. Nedostatak je mala gustoća energije i specifična energija.

3.9. Vanadij redoks baterije

Vanadij redoks baterija je tip protočne baterije u kojoj su elektroliti u dvije petlje odijeljeni protonskom izmjenjivačkom membranom (PEM, engl. *proton exchange membrane*). Elektrolit se

dobiva otapanjem vanadijeva pentoksida (V_2O_5) u sumpornoj kiselini (H_2SO_4). Kemijske reakcije se odvijaju na ugljikovim elektrodama.



Slika 3.10. Shema vanadij redoks baterije [3]

U stvarnim uvjetima ćelija, napon otvorenog kruga od 1.4 V je promatran na 50% napunjenosti, dok potpuno napunjena ćelija proizvodi preko 1.6 V u otvorenom krugu, a potpuno prazna ćelija 1.0 volt [3].

Ekstremno veliki kapaciteti vanadij redoks baterija čine ih pogodnima za upotrebu u autonomnim sustavima, gdje mogu smanjiti oscilacije nepredvidivih izvora energije poput vjetra i Sunčeve energije. Vrlo brza vremena odziva čine ih pogodnima za primjene u sustavima s neprekidnim izvorima napajanja gdje mogu zamijeniti olovne baterije. Nedostatak vanadij redoks baterija je niska gustoća energije, od otprilike 25 Wh/kg elektrolita, niska učinkovitost punjenja (nužna uporaba crpke) i visoka cijena [3].

4. Ispitivanje baterija

U autonomnim fotonaponskim sustavima mora se posvetiti posebna pažnja baterijama, koje su često nazivane najslabijim komponentama, kako bi se osigurala usluga konačnom korisniku.

Ima više razloga za testiranje baterija:

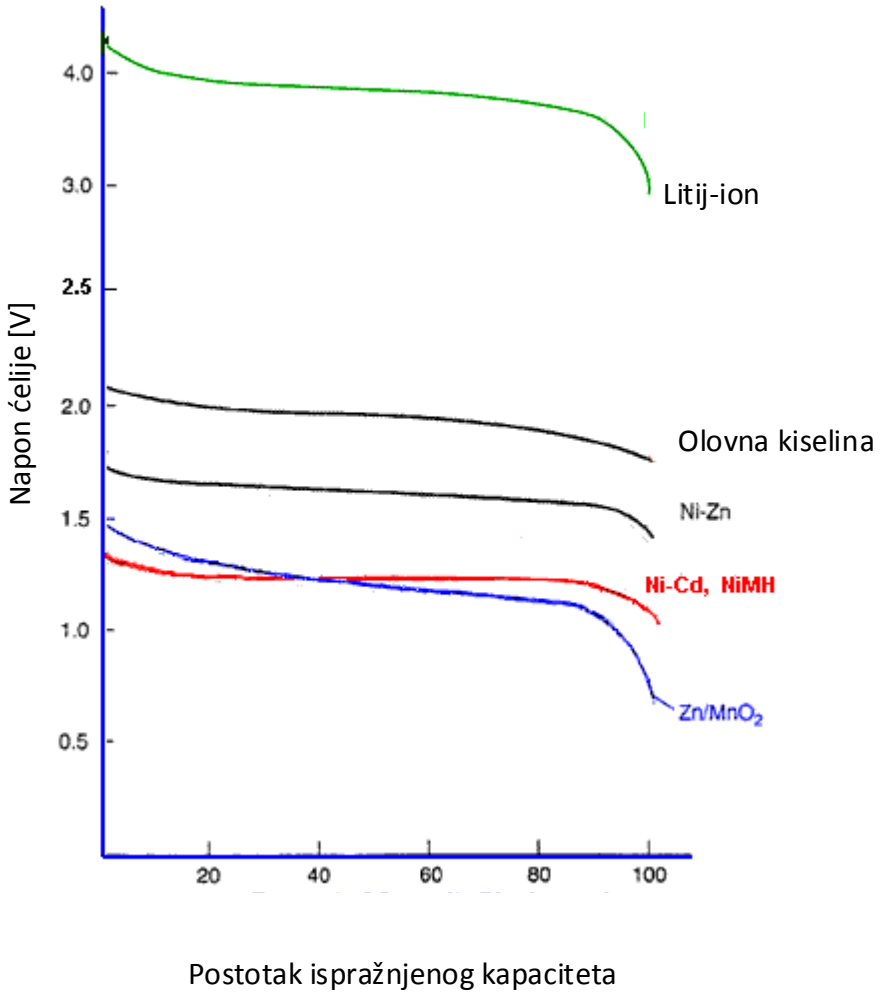
1. Utjecaj baterije na troškove i pouzdanost životnog ciklusa FN sustava
2. Karakteristike (korisnost, vijek trajanja, itd) se mogu razlikovati od baterije do baterije, čak za isti dizajn
3. Zbog specifičnih ograničenja i uvjeta rada na fotonaponskom polju, konvencionalni testovi baterija ne odgovaraju
4. Ispitivanje baterija koristeći postojeće metode je skupo i iziskuje puno vremena, a rezultati su dostupni tek nakon godinu ili dvije

Najvažniji cilj postupka testiranja ciklusa je procjenjivanje životnog vijeka baterije, izraženog u smislu smanjenja kapaciteta (brzine kojom se smanjuje sposobnost korištenja), u svakoj točki tijeka ispitivanja [5].

4.1. Ispitivane karakteristike baterija

Nominalni napon galvanske ćelije fiksiran je elektrokemijskim svojstvima aktivnih kemikalija korištenih u stanici, tzv. kemija ćelije (engl. *Cell Chemistry*). Stvarni napon koji se pojavljuje na terminalima u bilo kojem određenom trenutku ovisi o struji opterećenja i unutarnjoj impedanciji ćelije, a to ovisi o temperaturi, stanju napona i starosti ćelije. Na slici 4.1. se prikazuje tipična krivulja pražnjenja za ćelije koje koriste niz kemijskih stanica koje se prazne promjenom od 0.2°C. Svaka kemijska ćelija ima svoju karakterističnu krivulju nominalnog napona i pražnjenja. Litij-ionske baterije i slične imaju prilično ravnu krivulju pražnjenja, dok druge poput olovne imaju izražen nagib. Snaga koju proizvode ćelije s kosom krivuljom pražnjenja pada progresivno tijekom ciklusa pražnjenja, a to može dovesti do problema u primjeni gdje su potrebne velike snage i pri kraju ciklusa. Za primjene male snage kojima je potreban stabilan napon napajanja, potrebno je ugraditi regulator napona ako je nagib prestrm, zbog toga se ne koriste u primjenama koje zahtijevaju velike snage jer gubici u regulatoru također uzimaju snagu baterije. Ravna krivulja pražnjenja pojednostavljuje primjenu u kojoj se koristi baterija jer napon napajanja ostane

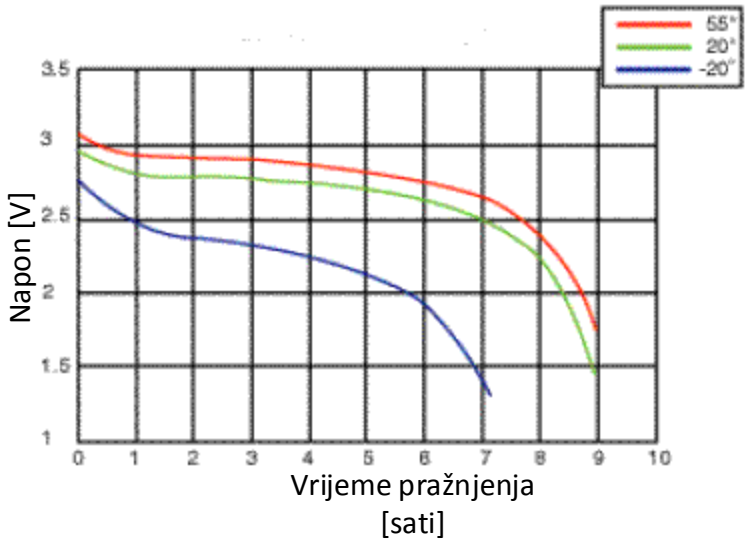
konstantan tijekom ciklusa pražnjenja. Nagnuta krivulja olakšava procjenu stanja napunjenosti (engl. *State of Charge*) baterije jer se napon ćelije može koristiti kao mjera preostalog naboja u ćeliji. Moderne litij-ionske ćelije imaju vrlo ravnu krivulju pražnjenja stoga se moraju koristiti druge metode za utvđivanje stanja napunjenosti [7].



Slika 4.1. Krivulja pražnjenja za određene ćelije [7]

X-os prikazuje karakteristike ćelija normalizirane kao postotak kapaciteta ćelija tako da oblik grafa može biti prikazan neovisno o stvarnom kapacitetu ćelije. Kada bi x-os bila temeljena na vremenu pražnjenja, dužina svake krivulje pražnjenja bi bila proporcionalna nominalnom kapacitetu krivulje [7].

Performanse ćelija se mogu drastično promijeniti promjenom temperature. Pri nižim ekstremima, u baterijama s vodenastim elektrolitima ti elektroliti se mogu slediti postavljajući niži limit radnoj temperaturi. Pri niskim temperaturama kod litijskih baterija dolazi do litijacije anoda (engl. *Lithium planting of the anode*) što uzrokuje trajno smanjenje kapaciteta baterije. Pri visokim ekstremima aktivne kemikalije se mogu razložiti što uzrokuje uništavanje baterije. Ćelijine performanse se obično popravljaju povišenjem temperature, dok se temperatura nalazi između gornjeg i donjeg limita. Kod litij-ionskih baterija performanse se pogoršavaju porastom radne temperature, životni ciklus baterije se skraćuje povećanjem ili sniženjem radne temperature od sobne temperature, što je prikazano na slici 4.2.

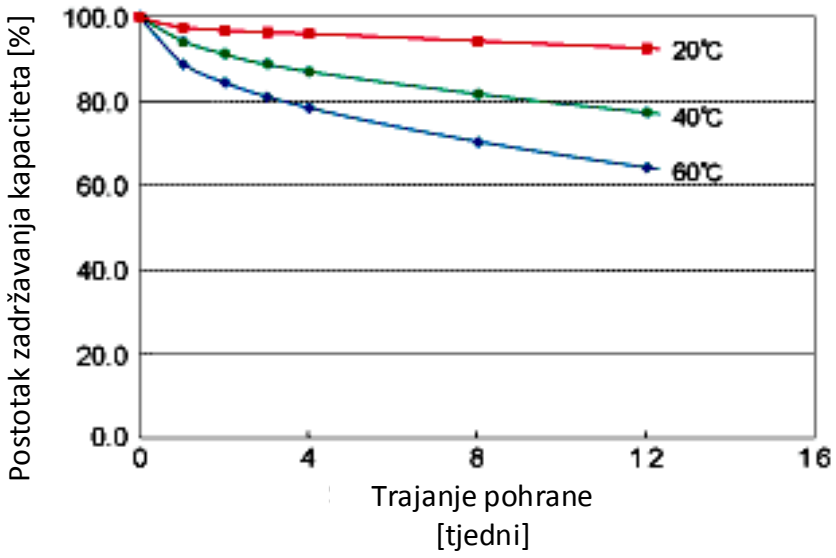


Slika 4.2. Ovisnost performanse litij-ionske baterije o temperaturi [7]

Karakteristike samopražnjenja pokazuju koliko brzo će ćelija izgubiti energiju prilikom nekorištenja zbog neželjenih kemijskih djelovanja unutar nje same. Stopa samopražnjenja ovisi o kemiji stanice i temperaturi. Ovisno o kemiji stanice, stopa samopražnjenja za pojedine ćelije jest:

- Litijske – od 4% do 6% mjesečno
- Nikal-kadmijske – od 15% do 20% mjesečno
- Nikal-metal-hidridne – 30% mjesečno
- Litijske – od 2% do 3% mjesečno

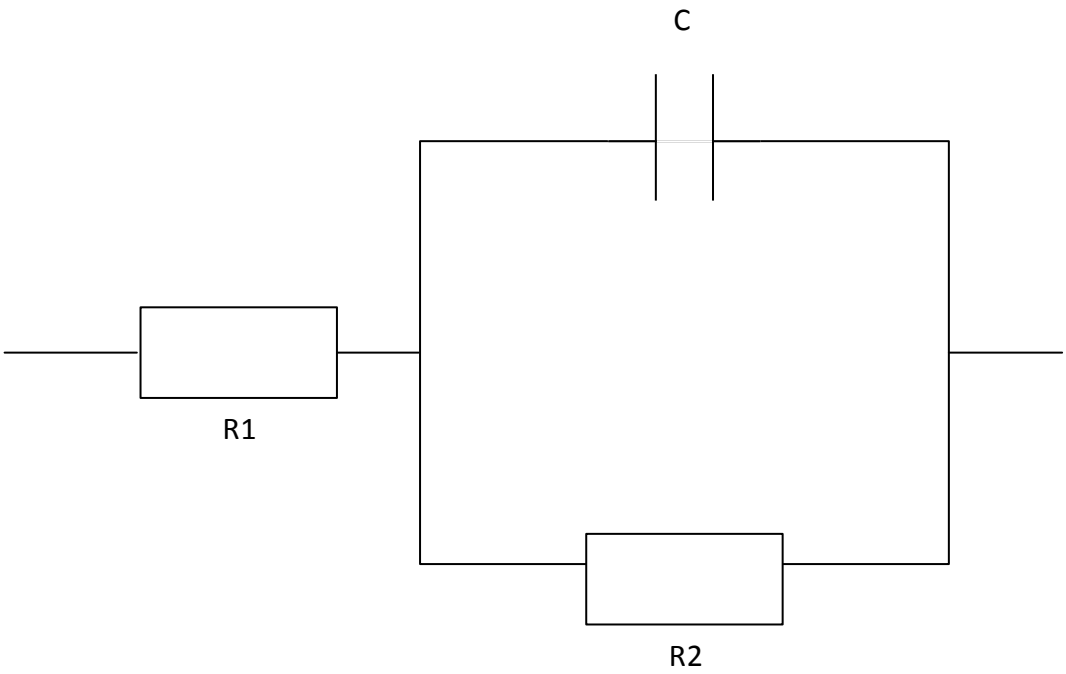
Stopa neželjenih kemijskih reakcija koje uzrokuju curenje unutarnje struje između pozitivnih i negativnih elektroda ćelije, kao i sve kemijske reakcije, povećavaju se s temperaturom, čime se povećava brzina samopražnjenja baterije [7].
Grafikon na slici 4.3. prikazuje tipične brzine samopražnjenja za litij-ionsku bateriju.



Slika 4.3. Značajke pohrane litij-ionske ćelije [7]

4.2. Mjerenje unutarnjeg otpora

Električni otpor čistog opterećenja poput grijaćeg elementa, nema reaktancije. Napon i struja teku unisono i nema prethodeće ili kasneće faze, faktor snage je 1 što daje najtočnije mjerenje potrošnje energije. Većina električnih opterećenja su reaktivna i sastoje se od kapacitivne reaktancije (kondenzatora) i induktivne reaktancije (zavojnice). Kapacitivna reaktancija smanjuje se s višom frekvencijom, dok se induktivna reaktancija povećava. Baterija ima otpor, kapacitet i induktivitet, a pojam impedancija uključuje svo troje u jednom modelu. Impedancija se najbolje ilustrira modelom Randlesovim modelom prikazanim na slici 4.4. koji uključuje otpornike R1 i R2, kao i kondenzator C. Induktivna reaktancija obično je zanemarena u bateriji, naročito pri niskoj frekvenciji.



Slika 4.4. Randlesov model olovne baterije [8]

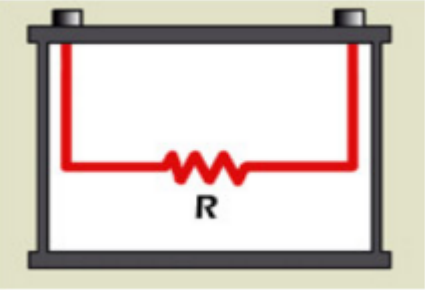
Ukupan otpor baterije sastoji se od ohmskog otpora, kao i induktivne i kapacitivne reaktancije, a dijagram i električne vrijednosti razlikuju se za svaku bateriju [8].

Metode mjerenja unutarnjeg otpora baterije su:

- Metoda DC opterećenja
- AC vodljivost
- Elektrokemijska spektroskopija impedancije

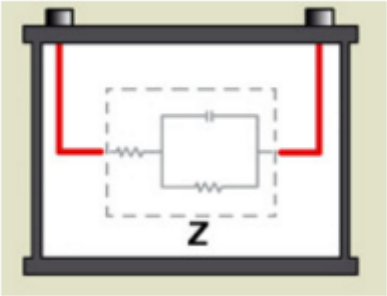
Metoda DC opterećenja je jedna od najstarijih i najpouzdanijih metoda ispitivanja. Baterija se kratko prazni na sekundu ili duže. Struja opterećenja za malu bateriju je 1 amper ili manje; za starter bateriju može biti 50 ampera ili više. Voltmetar mjeri napon otvorenog kruga bez opterećenja, nakon čega slijede druga mjerenja s opterećenjem; Ohmov zakon izračunava vrijednost otpora (razlika napona podijeljena sa strujom je jednaka otporu). Metoda je kompatibilna za provjeravanje velikih stacionarnih baterija, a ohmska očitavanja s uređaja su vrlo precizna i ponovljiva. Vrhunski testni instrumenti garantiraju očitanja otpora i do 10 mikroohma. Metoda ograničava u tome što spaja R1 i R2 otpornik iz Randesova modela u jedan kombinirani otpornik i zanemaruje kondenzator, što je

prikazano na slici 4.5., a kondenzator je važna komponenta baterije koja predstavlja 1.5 F po 100 Ah. U osnovi, DC metoda vidi bateriju kao otpornik i može pružiti samo ohmske reference, osim toga dobiva slična očitanja od dobre baterije koja je djelomično napunjena i marginalne baterije koja je potpuno napunjena. Procjene stanja napunjenosti i procjene kapaciteta nisu moguće [8].



Slika 4.5. Randlesov model, prikaz R1 i R2 kao jedne ohmske vrijednosti kod metode DC opterećenja [8]

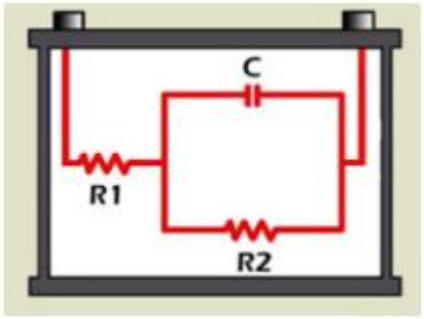
Metoda mjerenja vodljivosti kako bi se procijenile starter baterije je prvi puta objavljena 1975. godine, učinio je to Keith Champlin demonstrirajući linearnu korelaciju između ispitivanja opterećenja i vodljivosti. Unošenjem frekvencije od otprilike 90 herza, kapacitivna i induktivna reaktancija konvergiraju s baterijom od 70-90 ampersati, što rezultira zanemarivim padom napona koji minimizira reaktanciju. Ta frekvencija raste s manjom baterijom, a pada s većom.



Slika 4.6. Randlesov model, pojedinačne komponente se ne mogu razlikovati kod metode AC vodljivosti [8]

Elektrokemijska spektroskopija impedancije, čija je abrevijacija EIS (engl. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) je mjerenje provedeno umetanjem električnog podražaja na izlaz

ispitivanog elektrokemijskog sustava i mjerenjem dobivenog signala. Impedancija mjerenog sustava je zatim izračunata iz podražaja i dobivenog signala transformacijom funkcija i Ohmovim zakonom. Dakle, možemo provesti mjerenje „in situ“ što znači da se uz pomoć napona, struje i vremena proučava sustav bez odvajanja komponenti. Mogu se koristiti različite vrste podražaja, poput step funkcije napona, šumova, monoharmonijskog signala i bilo kojeg drugog tipa podražaja nastalog spajanjem navedena tri. S porastom komercijalne dostupnosti mjernih instrumenata, karakterizacija elektrokemijskog sustava obično koristi AC signal, ili mali AC napon ili struju. U većini slučajeva, to se također naziva „AC impedancija“[6].



Slika 4.7. Randlesov model, EIS metoda [8]

R1, R2 i C su izmjereni odvojeno što omogućuje mjernje stanja napunjenosti i kapaciteta [8].

5. Odabir baterije

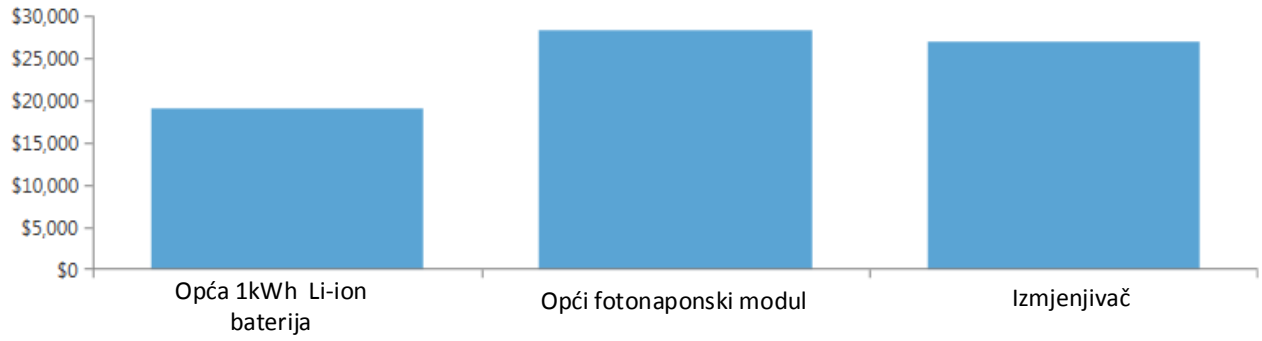
Izvršena je usporedba pet baterija u programskom paketu HOMER Pro. Uspoređene baterije su generička 1 kWh litij-ionska baterija, generička 1 kWh olovna baterija i tri vrste cink-bromidne baterije, Reflow ZBM, Redflow ZBM2 i Redflow ZBM3.

Sustav koji predstavlja kućanstvo se sastoji od izmjeničnog trošila dnevne potrošnje 11.26 kWh, istosmjernog fotonaponskog modula snage 15 kW, izmjenjivača snage 10 kW te baterije. Podaci o solarnom globalnom vodoravnom izvoru zračenja odgovaraju koordinatama grada Osijeka te se koriste za ravnu pločastu fotonaponsku komponentu.

5.1. Opća 1kWh litij-ionska baterija

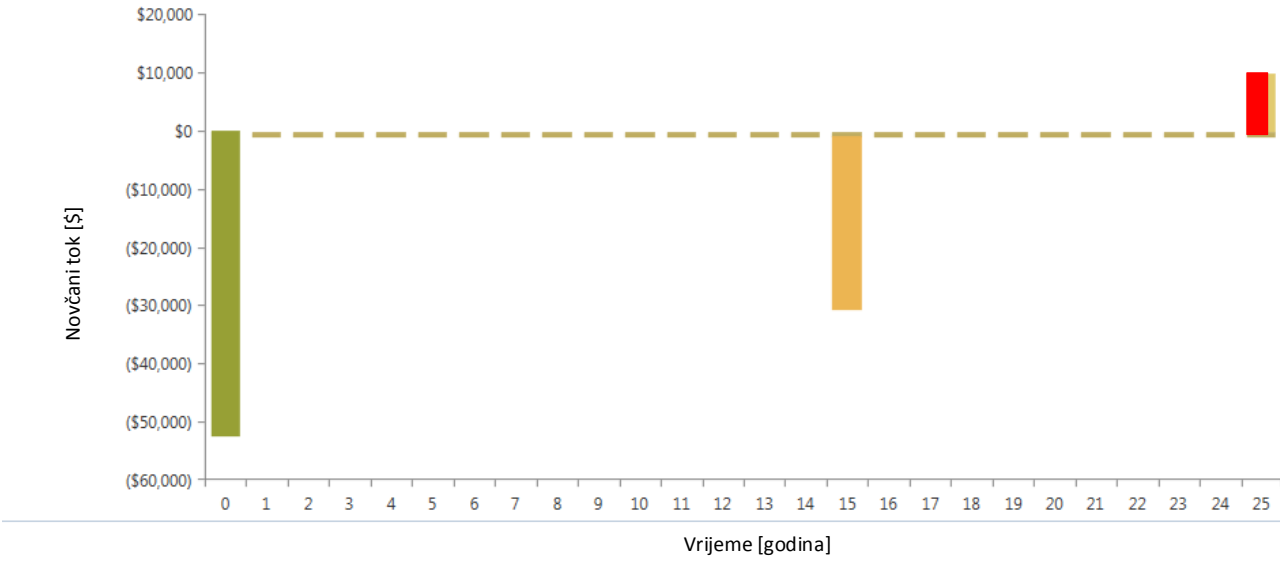
Za simulaciju je korištena generička li-ion baterija nominalnog napona 6 V, nominalnog kapaciteta 1 kWh, maksimalnog kapaciteta 166.667 Ah, učinkovitosti ciklusa 90%, maksimalne struje punjenja 166.667 A, maksimalne struje pražnjenja 500 A i mase 6.8 kg. U modelu su korištene 44 baterije u paraleli.

Grafikon 5.1. prikazuje odnos cijena baterije, fotonaponskog modula i izmjenjivača izraženih u američkim dolarima.



Grafikon 5.1. Odnos cijena li-ion baterije, FN modula i izmjenjivača

Simulacija troškova se radi za trajanje od 25 godina.



Grafikon 5.2. Prikaz novčanog toka sustava s li-ion baterijom

Na grafikonu 5.2. je prikazan stvarni redoslijed novčanog toka na kojem je zelenom bojom označen veliki kapitalni trošak u nultoj godini, mali trošak rada i održavanja koji se pojavljuje svake godine označen smeđom bojom, veliki trošak zamjene koji se javlja u 15. godini označen narančastom i ostatna vrijednost koja se pojavljuje na kraju projekta koja je označena crvenom bojom.

Fiksni trošak rada i održavanja sustava (engl. *Operation & Maintenance*) je ponavljajući godišnji trošak koji se pojavljuje bez obzira na veličinu ili građu elektroenergetskog sustava. Taj trošak utječe na ukupni neto sadašnji trošak svake konfiguracije sustava jednako [12].

U tablici 5.1. su izražene cijene kupnje, zamjene i održavanja komponenata, te ukupni troškovi sustava.

Tablica 5.1. Troškovi komponenata sustava s li-ion baterijom

Komponenta	**Kapitalni troškovi ($)**	**Troškovi zamjene ($)**	**Troškovi rada i održavanja ($)**	**Ušteda ($)**	**Ukupno ($)**
1kWh Li-ion baterija	$9,988.00	$4,327.65	$5,688.12	-$797.57	$19,116.20
Fotonaponski modul	$22,500.00	$0.00	$5,817.38	$0.00	$28,317.38
Izmjenjivač	$20,000.00	$8,485.48	$0.00	-$1,597.05	$26,888.43
Sustav	$52,488.00	$12,723.13	$11,505.50	-$2,394.62	$74,322.01

Ukupni neto sadašnji trošak sustava NPC (engl. *Net present cost*) predstavlja sadašnju vrijednost svih troškova koje sustav stvara tijekom svog životnog vijeka, umanjen za sadašnju vrijednost svih prihoda koji ostvaruje tijekom svog životnog vijeka. Troškovi uključuju kapitalne troškove, troškove zamjene, troškove djelovanja i održavanja, troškove goriva, kazne za emisije i troškove kupnje energije iz mreže. Iščitava se iz tablice 5.1. i on iznosi $74,322.01.

HOMER izračunava ukupan NPC zbrajanjem ukupnih diskontiranih novčanih tokova u svakoj godini životnog vijeka projekta.

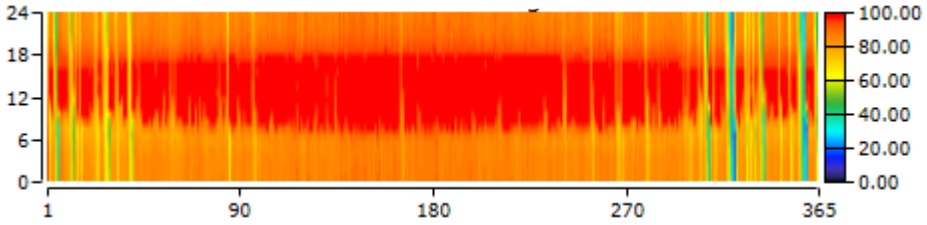
Ukupni NPC je glavni ekonomski output HOMER-a, vrijednost kojom se rangiraju sve konfiguracije sustava u rezultatima optimizacije i osnova iz koje izračunava ukupni godišnji trošak i razgraničeni trošak energije.

HOMER definira razine troškova energije COE (engl. *Cost of Energy*) kao prosječnu cijenu po kWh korisne električne energije koju proizvodi sustav [13], te iznosi $1.40.

Operativni trošak je godišnja vrijednost svih troškova i prihoda, osim početnih kapitalnih troškova, te iznosi $1,688.96.

Tablica 5.2. Vrijednosti karakteristika li-ion baterije u promatranom sustavu

Karakteristika	**Vrijednost**	**Jedinica**
Autonomija baterije	75.03	sat
Trošak skladištenja	0.08	$/kWh
Nazivni kapacitet	44	kWh
Upotrebljivi nazivni kapacitet	35.20	kWh
Vijek trajanja	36,219.66	kWh
Očekivani životni ciklus	15.00	godina
Prosječni trošak energije	0.00	$/kWh
Primljena energija	2,520.39	kWh/god
Predana energija	2,290.73	kWh/god
Iscrpljivanje pohrane	23.60	kWh/god
Gubici	206.06	kWh/god
Godišnji protok	2,414.64	kWh/god

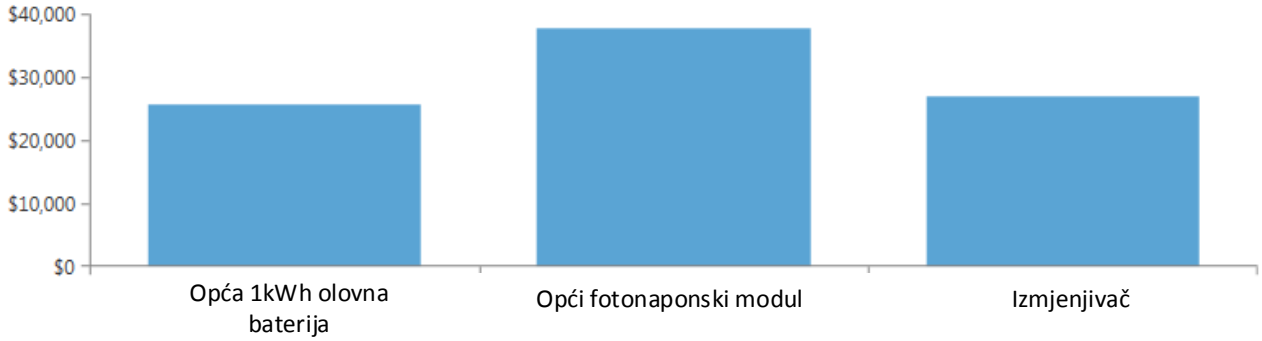


Grafikon 5.3. Prikaz stanja napunjenosti li-ion baterije

Na grafikonu 5.3. je prikazano stanje napunjenosti baterije od 0 do 100% u svako doba dana kroz cijelu godinu, baterija je dizajnirana tako da joj je početna vrijednost napunjenosti 100%, a minimalna vrijednost napunjenosti ne smije biti niža od 20%.

5.2. Opća 1kWh olovna baterija

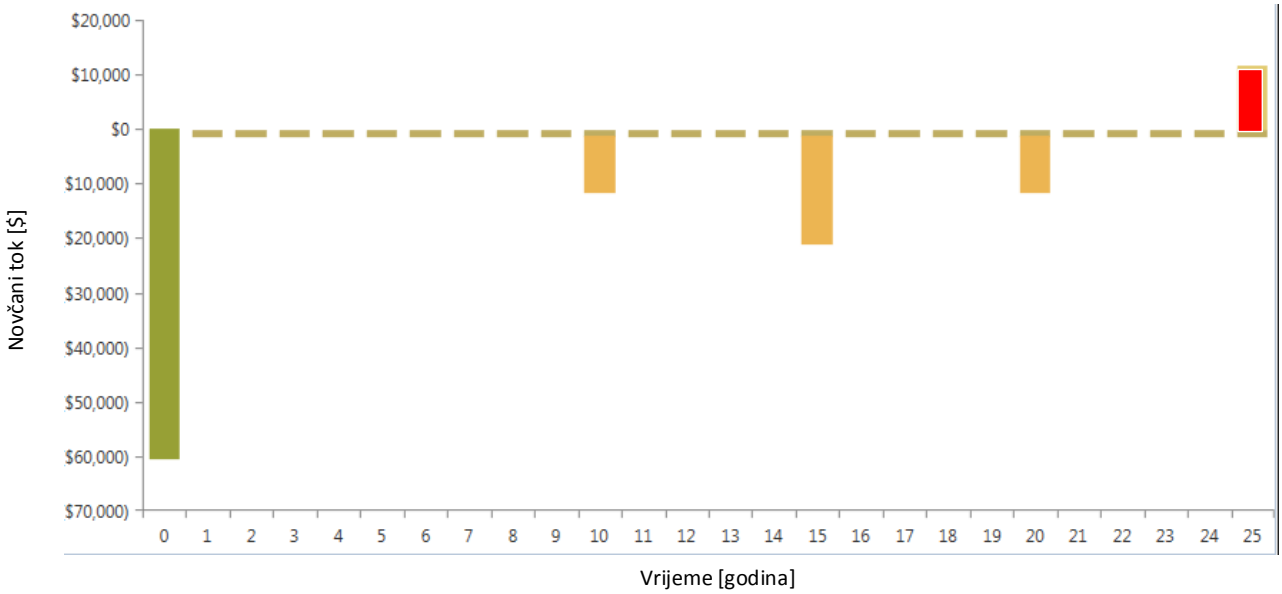
Za simulaciju je korištena generička olovna baterija nazivnog napona 12 V, nazivnog kapaciteta 1kWh, maksimalnog kapaciteta 83.4 Ah, učinkovitosti ciklusa 80%, maksimalne struje punjenja 16.667 A, maksimalne struje pražnjenja 24.33 A i mase 11.3 kg. U modelu su korištene 53 baterije u paraleli.



Grafikon 5.4. Odnos cijena olovne baterije, FN modula i izmjenjivača

Grafikon 5.4. uspoređuje visine cijena opće 1kWh olovne baterije, općeg fotonaponskog modula i izmjenjivača u američkim dolarima.

Simulacija troškova se radi za trajanje od 25 godina.



Grafikon 5.5. Prikaz novčanog toka sustava s olovnom baterijom

Grafikon 5.5. prikazuje stvarni redoslijed novčanog toka sustava s olovnom baterijom, na kojem je zelenom bojom označen veliki kapitalni trošak u nultoj godini, mali trošak rada i održavanja je označen smeđom bojom, troškovi zamjene su označeni narančastom i javljaju se u 10., 15. i 20. godini. Ostatna vrijednost koja se pojavljuje na kraju projekta prikazana je crvenom bojom u 25. godini.

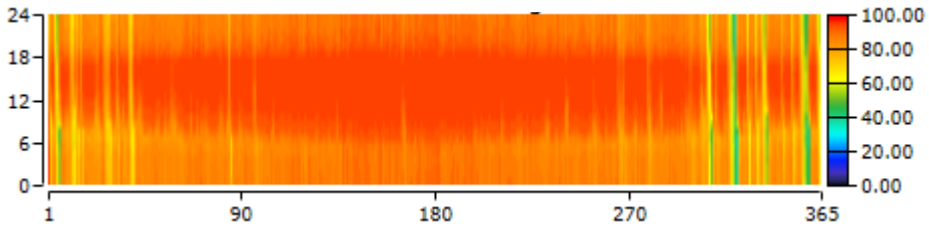
Tablica 5.3. Troškovi komponenata sustava s olovnom baterijom

Komponenta	**Kapitalni troškovi ($)**	**Troškovi zamjene ($)**	**Troškovi rada i održavanja ($)**	**Ušteda ($)**	**Ukupno ($)**
1kWh olovna baterija	$10,600.00	$9,364.44	$6,851.60	-$1,269.66	$25,546.38
Fotonaponski modul	$30,000.00	$0.00	$7,756.51	$0.00	$37,756.51
Izmjenjivač	$20,000.00	$8,485.48	$0.00	-$1,597.05	$26,888.43
Sustav	$60,600.00	$17,849.92	$14,608.11	-$2,866.71	$90,191.32

Ukupni neto sadašnji trošak sustava NPC se iščitava iz tablice 5.3. te iznosi $90,191.32. HOMER izračunava troškove energije kao prosječnu cijenu po kWh korisne električne energije koju proizvodi sustav, a iznosi $1.70. Godišnja vrijednost svih troškova i prihoda, operativni trošak, iznosi $2,289.02.

Tablica 5.4. Vrijednosti karakteristika olovne baterije u promatranom sustavu

Karakteristika	**Vrijednost**	**Jedinica**
Autonomija baterije	67.84	sat
Trošak skladištenja	0.28	$/kWh
Nazivni kapacitet	53.04	kWh
Upotrebljivi nazivni kapacitet	31.83	kWh
Vijek trajanja	24,993.56	kWh
Očekivani životni ciklus	10.00	godina
Prosječni trošak energije	0.00	$/kWh
Primljena energija	2,770.04	kWh/god
Predana energija	2,235.49	kWh/god
Iscrpljivanje pohrane	21.75	kWh/god
Gubici	512.80	kWh/god
Godišnji protok energije	2,499.36	kWh/god

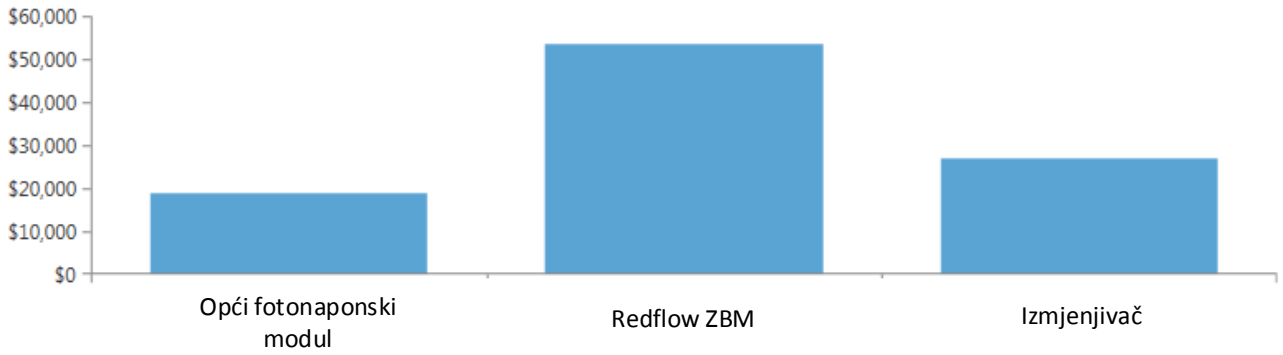


Grafikon 5.6. Prikaz stanja napunjenosti olovne baterije

Na grafikonu 5.6. je prikazano stanje napunjenosti olovne baterije od 0% do 100%, u svako doba dana kroz čitavu godinu. Inicijalna vrijednost napunjenosti iznosi 100%, kroz godinu ne dostiže ponovno 100% nego maksimum napunjenosti postaje 99.6%, a minimalna dozvoljena napunjenost ne smije biti niža od 40%.

5.3. Redflow ZBM baterija

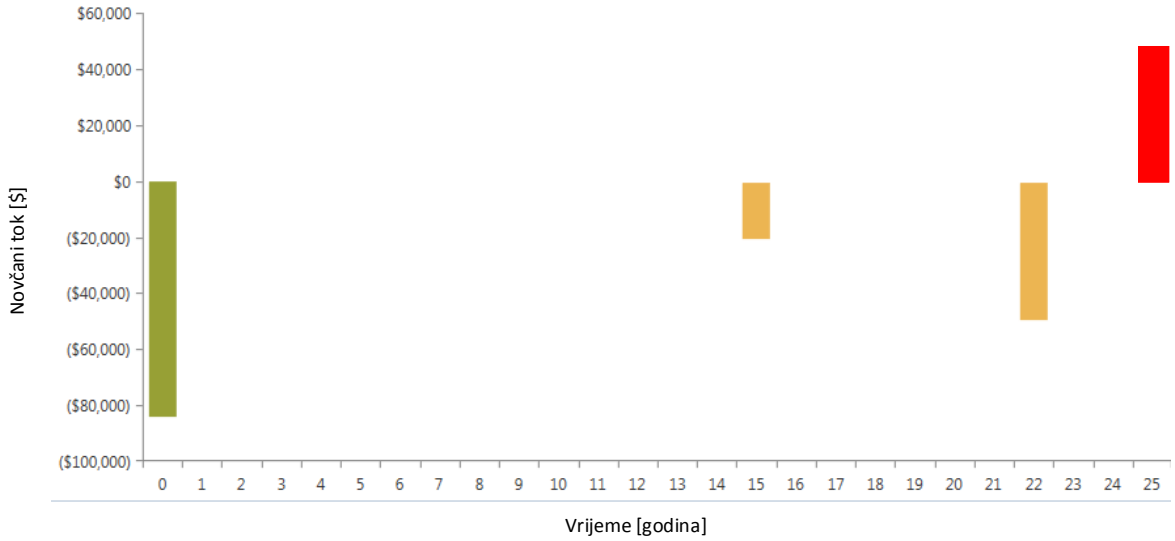
Redflow ZBM je protočna cink-bromidna baterija nazivnog napona 48 V, nazivnog kapaciteta 9 kWh, maksimalnog kapaciteta 177.246 Ah, učinkovitosti ciklusa 75%, maksimalne struje punjenja 52.08 A, maksimalne struje pražnjenja 104.17 A i mase 240 kg. U modelu je korišteno 7 baterija u paraleli. Svaka baterija se sastoji od 2 paralelne skupine, od kojih svaka skupina ima po 30 ćelija.



Grafikon 5.7. Odnos cijena Redflow ZBM baterije, FN modula i izmjenjivača

Grafikon 5.7. prikazuje odnos cijena Redflow ZBM baterije, fotonaponskog modula i izmjenjivača izražene u američkim dolarima.

Simulacija troškova se radi za trajanje od 25 godina.



Grafikon 5.8. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM baterijom

Grafikon 5.8. prikazuje stvarni redoslijed novčanog toka sustava s Redflow ZBM baterijom, na kojem je zelenom bojom označen veliki kapitalni trošak u nultoj godini, troškovi zamjene su označeni narančastom i javljaju se u 15. i 22. godini. Redflow ZBM baterija nema troškove rada i održavanja. Ostatna vrijednost koja se pojavljuje na kraju projekta prikazana je crvenom bojom u 25. godini.

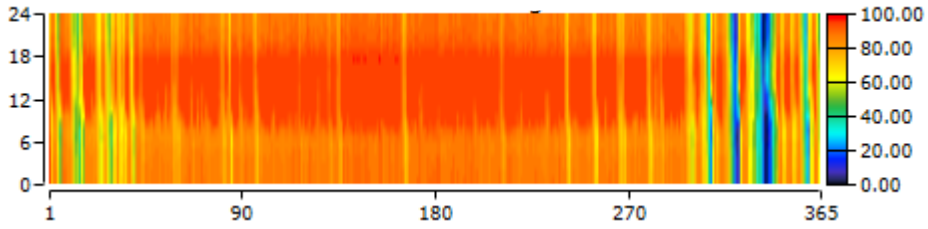
Tablica 5.5. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM baterijom

Komponenta	**Kapitalni troškovi ($)**	**Troškovi zamjene ($)**	**Troškovi rada i održavanja ($)**	**Ušteda ($)**	**Ukupno ($)**
Redflow ZBM	$49,000.00	$14,274.36	$0.00	-$9,876.68	$53,397.68
Fotonaponski modul	$15,000.00	$0.00	$3,878.25	$0.00	$18,878.25
Izmjenjivač	$20,000.00	$8,485.48	$0.00	-$1,597.05	$26,888.43
Sustav	$84,000.00	$22,759.84	$11,473.73	-$11,473.73	$99,164.36

Ukupni neto sadašnji trošak sustava NPC se iščitava iz tablice 5.5. te iznosi $99,164.36. HOMER izračunava troškove energije kao prosječnu cijenu po kWh korisne električne energije koju proizvodi sustav, a iznosi $1.87. Godišnja vrijednost svih troškova i prihoda, operativni trošak, iznosi $1,173.03.

Tablica 5.6. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM baterije u promatranom sustavu

Karakteristika	**Vrijednost**	**Jedinica**
Autonomija baterije	126.95	sat
Trošak skladištenja	0.95	$/kWh
Nazivni kapacitet	59.55	kWh
Upotrebljivi nazivni kapacitet	59.55	kWh
Vijek trajanja	59,548.77	kWh
Očekivani životni ciklus	21.58	godina
Prosječni trošak energije	0.00	$/kWh
Primljena energija	3,151.11	kWh/god
Predana energija	2,389.99	kWh/god
Iscrpljivanje pohrane	30.78	kWh/god
Gubici	730.35	kWh/god
Godišnji protok energije	2,759.72	kWh/god



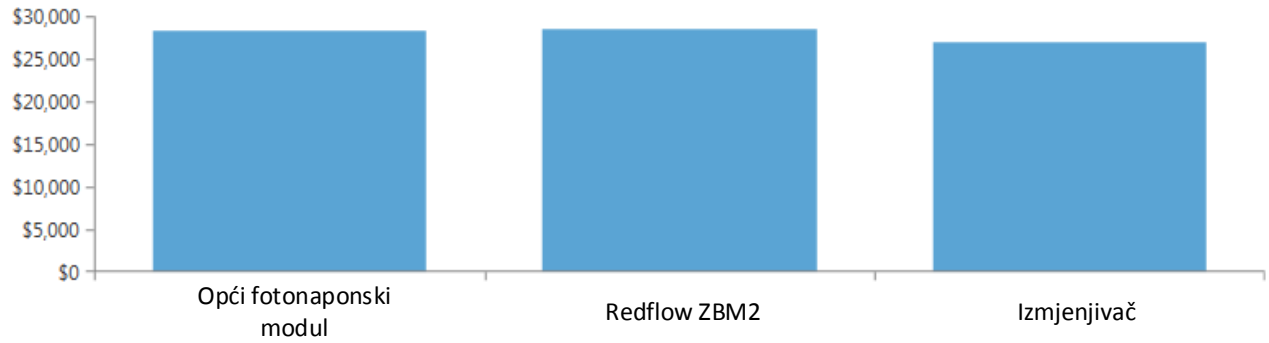
Grafikon 5.9. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM baterije

Na grafikonu 5.9. je prikazano stanje napunjenosti Redflow ZBM baterije od 0% do 100%, u svako doba dana kroz čitavu godinu. Inicijalna vrijednost napunjenosti iznosi 100%, minimalno stanje napunjenosti je 0%, na grafikonu vidimo promjene stanja kroz godinu.

5.4. Redflow ZBM2 baterija

Redflow ZBM2 je protočna cink-bromidna baterija nazivnog napona 48 V, nazivnog kapaciteta 10 kWh, maksimalnog kapaciteta 214.628 Ah, učinkovitosti ciklusa 75%, maksimalne struje punjanja 52.08 A, maksimalne struje pražnjenja 104.17 A i mase 240 kg. U modelu su korištene 4 baterije u paraleli, svaka baterija se sastoji od 2 paralelne skupine od kojih svaka ima po 30 ćelija.

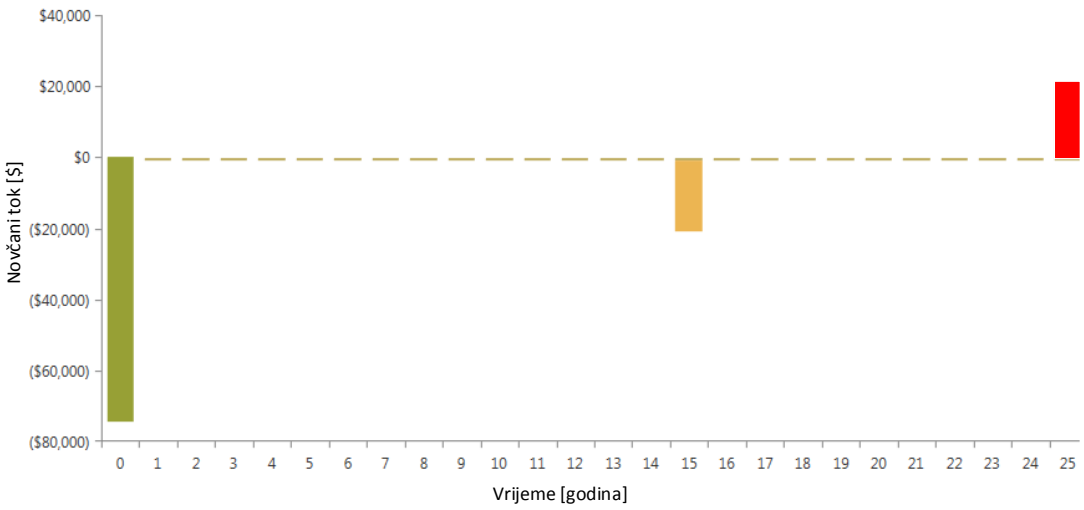
2015. godine je proizvođač Redflow 10kWh ZBM2 baterije snizio cijenu za 16% na $8,000.00 [14].



Grafikon 5.10. Odnos cijena Redflow ZBM2 baterije, FN modula i izmjenjivača

Grafikon 5.10. prikazuje odnos cijena Redflow ZBM2 baterije, fotonaponskog modula i izmjenjivača izražene u američkim dolarima.

Simulacija troškova se radi za trajanje od 25 godina.



Grafikon 5.11. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM2 baterijom

Grafikon 5.11. prikazuje stvarni redoslijed novčanog toka sustava s Redflow ZBM2 baterijom, na kojem je zelenom bojom označen veliki kapitalni trošak u nultoj godini, vrlo mali trošak rada i održavanja je označen smeđom bojom, troškovi zamjene su označeni narančastom i javljaju se u 15. godini. Ostatna vrijednost koja se pojavljuje na kraju projekta prikazana je crvenom bojom u 25. godini.

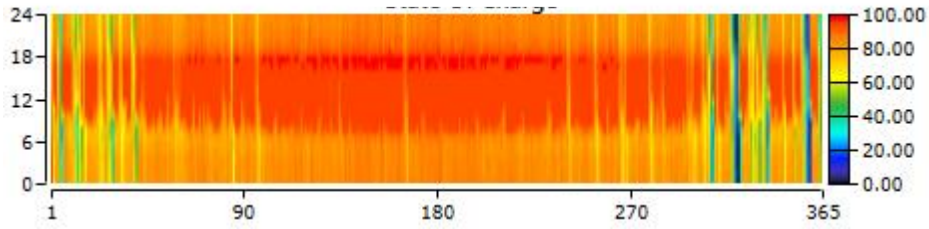
Tablica 5.7. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM2 baterijom

Komponenta	**Kapitalni troškovi ($)**	**Troškovi zamjene ($)**	**Troškovi rada i održavanja ($)**	**Ušteda ($)**	**Ukupno ($)**
Redflow ZBM2	$32,000.00	$0.00	$0.00	-$3,563.18	$28,436.82
Fotonaponski modul	$22,500.00	$0.00	$5,817.38	$0.00	$28,317.38
Izmjenjivač	$20,000.00	$8,485.48	$0.00	-$1,597.05	$26,888.43
Sustav	$74,500.00	$8,485.48	$5,817.38	-$5,160.23	$83,642.63

Ukupni neto sadašnji trošak sustava NPC se iščitava iz tablice 5.7. te iznosi $83,642.63. HOMER izračunava troškove energije kao prosječnu cijenu po kWh korisne električne energije koju proizvodi sustav, a iznosi $1.58. Godišnja vrijednost svih troškova i prihoda, operativni trošak, iznosi $707.22.

Tablica 5.8. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM2 baterije u promatranom sustavu

Karakteristika	**Vrijednost**	**Jedinica**
Autonomija baterije	126.95	sat
Trošak skladištenja	0.95	$/kWh
Nazivni kapacitet	59.55	kWh
Upotrebljivi nazivni kapacitet	59.55	kWh
Vijek trajanja	59,548.77	kWh
Očekivani životni ciklus	21.58	godina
Prosječni trošak energije	0.00	$/kWh
Primljena energija	3,151.11	kWh/god
Predana energija	2,389.99	kWh/god
Iscrpljivanje pohrane	30.78	kWh/god
Gubici	730.35	kWh/god
Godišnji protok energije	2,759.72	kWh/god



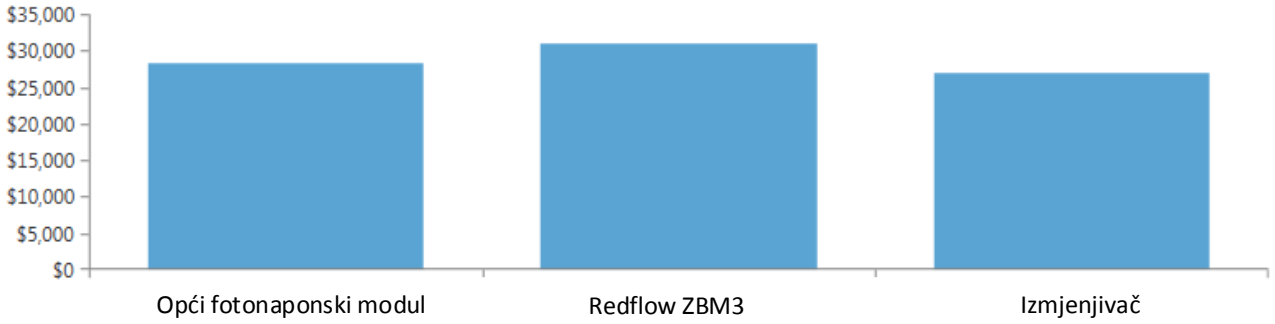
Grafikon 5.12. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM2 baterije

Na grafikonu 5.12. je prikazano stanje napunjenosti Redflow ZBM2 baterije od 0% do 100%, u svako doba dana kroz čitavu godinu. Inicijalna vrijednost napunjenosti iznosi 100%, minimalno stanje napunjenosti je 0%.

5.5. Redflow ZBM3 baterija

Redflow ZBM3 je protočna cink-bromidna baterija nazivnog napona 53 V, nazivnog kapaciteta 11 kWh, maksimalnog kapaciteta 213.132 Ah, učinkovitosti ciklusa 75%, maksimalne struje punjanja 47.17 A, maksimalne struje pražnjenja 141.51 A i mase 240 kg. U modelu su korištene 4 baterije u paraleli, svaka baterija se sastoji od 2 paralelne skupine od kojih svaka ima po 33 ćelije.

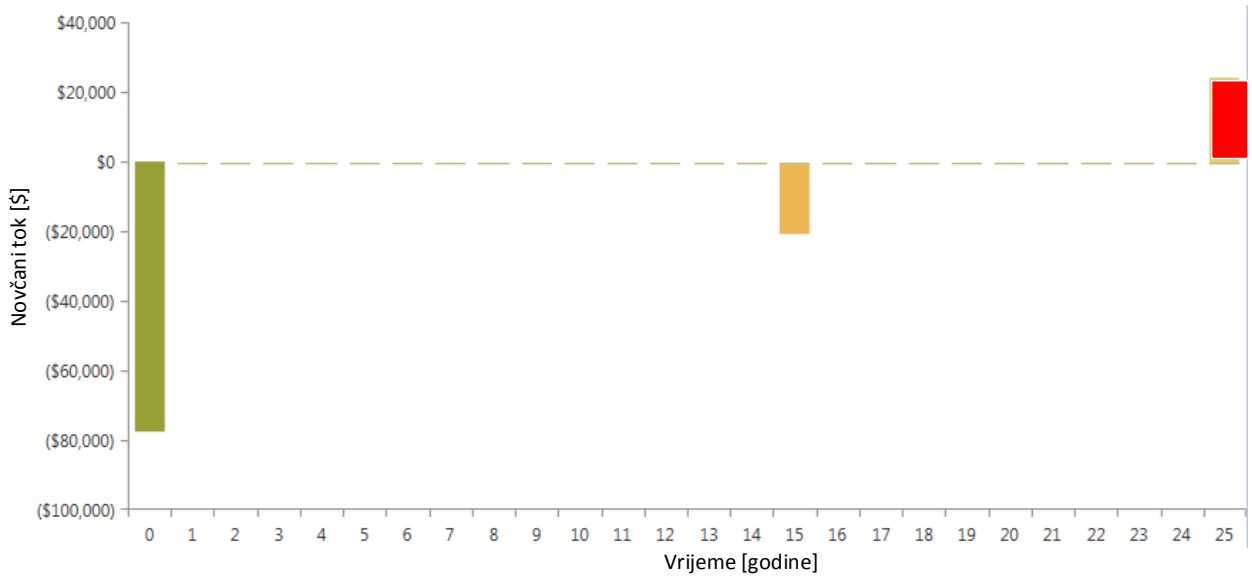
2015. godine je proizvođač Redflow 11kWh ZBM3 baterije snizio cijenu za 10% na $8,800.00 [14].



Grafikon 5.13. Odnos cijena Redflow ZBM3 baterije, FN modula i izmjenjivača

Grafikon 5.13. prikazuje odnos cijena Redflow ZBM3 baterije, fotonaponskog modula i izmjenjivača izražene u američkim dolarima.

Simulacija troškova se radi za trajanje od 25 godina.



Grafikon 5.14. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM3 baterijom

Grafikon 5.14. prikazuje stvarni redoslijed novčanog toka sustava s Redflow ZBM3 baterijom, na kojem je zelenom bojom označen veliki kapitalni trošak u nultoj godini, vrlo mali trošak rada i održavanja je označen smeđom bojom, troškovi zamjene su označeni narančastom i javljaju se u 15. godini. Ostatna vrijednost koja se pojavljuje na kraju projekta prikazana je crvenom bojom u 25. godini.

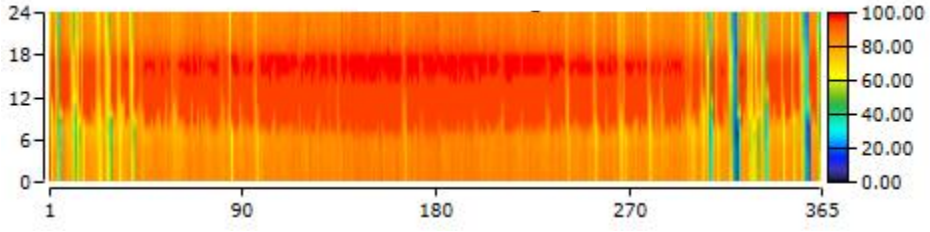
Tablica 5.9. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM3 baterijom

Komponenta	**Kapitalni troškovi ($)**	**Troškovi zamjene ($)**	**Troškovi rada i održavanja ($)**	**Ušteda ($)**	**Ukupno ($)**
Redflow ZBM3	$35,200.00	$0.00	$0.00	-$4,311.84	$30,888.16
Fotonaponski modul	$22,500.00	$0.00	$5,817.38	$0.00	$28,317.38
Izmjenjivač	$20,000.00	$8,485.48	$0.00	-$1,597.05	$26,888.43
Sustav	$77,700.00	$8,485.48	$5,817.38	-$5,908.89	$86,093.97

Ukupni neto sadašnji trošak sustava NPC se iščitava iz tablice 5.9. te iznosi $86,093.97. HOMER izračunava troškove energije kao prosječnu cijenu po kWh korisne električne energije koju proizvodi sustav, a iznosi $1.62. Godišnja vrijednost svih troškova i prihoda, operativni trošak, iznosi $649.31.

Tablica 5.10. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM3 baterije u promatranom sustavu

Karakteristika	**Vrijednost**	**Jedinica**
Autonomija baterije	96.31	sat
Trošak skladištenja	0.30	$/kWh
Nazivni kapacitet	45.18	kWh
Upotrebljivi nazivni kapacitet	45.18	kWh
Vijek trajanja	135,548.18	kWh
Očekivani životni ciklus	51.16	godina
Prosječni trošak energije	0.00	$/kWh
Primljena energija	3,028.86	kWh/god
Predana energija	2,294.52	kWh/god
Iscrpljivanje pohrane	26.41	kWh/god
Gubici	707.93	kWh/god
Godišnji protok energije	2,649.48	kWh/god



Grafikon 5.15. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM3 baterije

Na grafikonu 5.15. je prikazano stanje napunjenosti Redflow ZBM3 baterije od 0% do 100%, u svako doba dana kroz čitavu godinu. Inicijalna vrijednost napunjenosti iznosi 100%, minimalno stanje napunjenosti je 0%.

5.6. Rezultati simulacija

Rezultati simulacija programskim paketom HOMER pokazuju da sva predložena rješenja imaju određene prednosti i nedostatke.

Tablica 5.11. Operativni troškovi ispitanih baterija

Vrsta baterije	*Operativni troškovi*
Opća 1kWh olovna	$2,289.01
Opća 1kWh litij-ionska	$1,688.96
Redflow ZBM	$1,173.03
Redflow ZBM2	$707.22
Redflow ZBM3	$649.31

Sustav baziran na općoj olovnoj bateriji ima najveće operativne troškove koji iznose $2,289.01. Prednost ovakvog sustava je relativno niska cijena početnog ulaganja. Sustav s općom litij-ionskom baterijom ima niže početne troškove kao i niže troškove održavanja i zamjene baterija, što ga čini izborom u usporedbi s prethodnim sustavom. Također, operativni troškovi su znatno niži, za oko 27%. Tri predstavljene Redflow protočne baterije predstavljaju dugoročno najisplativiji izbor, s godišnjim troškovima koji iznose $1173.03, $707.22 i $649.31. Nedostatak ovih baterija je izrazito visoka cijena početnog ulaganja koja se kreće od $74,000.00 do $80,000.00, što je i do 40% više u odnosu na početna ulaganja za litij-ionski sustav.

Razlike između pojedinih Redflow baterija su zanemarive, model ZBM ne zahtijeva dodatne troškove za rad i održavanje baterije, međutim kapitalni ulog je viši nego za ZBM2 i ZBM3. Između modela ZBM2 i ZBM3 nema velikih razlika, osim u cijeni početnog ulaganja.

Utjecajna veličina pri odabiru sustava može biti i masa samih baterija. Litij-ionske baterije imaju najmanju masu, oko 6.8 kg po bateriji, dakle oko 300 kg za simulirani sustav. Olovne baterije imaju masu otprilike 600 kg, dok protočne imaju masu 960 kg. Najbolji izbor se može suziti na dvije baterije. Opću 1kWh litij-ionsku i Redflow ZBM3.

Litij-ionska predstavlja najbolji izbor za kupca koji nije u mogućnosti izdvojiti veliki početni kapital, a baterija dugoročno gledajući zahtijeva niske troškove održavanja. Osim toga, svojom masom su litij-ionske baterije najpristupačnija opcija. Redflow ZBM3 predstavlja najbolji izbor u slučaju da su početna sredstva za ulaganje dostupna jer dugoročno predstavlja daleko bolju opciju u odnosu na litij-ionsku bateriju, za čak 260% profitabilniju opciju gledajući operativne troškove.

6. Zaključak

Tema ovog završnog rada jest istraživanje karakteristika, prednosti i razlika sekundarnih baterija kako bi se donijela odluka koje najbolje odgovaraju određenim autonomnim fotonaponskim sustavima. Odabrane i opisane baterije su: standardne (olovne, nikal-kadmijske baterije), moderne baterije (nikal-metal-hidridne, litij-ionske i litij-polne baterije), posebne baterije (srebrov oksid), protočne (cink-bromidne, vanadij redoks baterije). To su baterije koje najbolje mogu ispuniti potrebe i primjene potrošača. Obzirom na tehnički nedostatak sekundarnih baterija, odnosno sporo samopražnjenje njihovih ćelija, pogodne su za korištenje u ograničenim vremenskim periodima. Osim toga, baterije stare, što utječe na smanjenje kapaciteta pohrane energije. Specifična energija i specifična snaga su dva vrlo važna parametra za elektrokemijsku pohranu, a drugi važni parametri su sposobnost pražnjenja i punjenja velik broj puta, zadržavanje napunjenosti što duži vremenski period i sposobnost punjenja i pražnjenja pri različitim temperaturama.

Literatura

[1] Zobaa, A.F. „Energy Storage – Technologies and Applications“, InTech Open, 2013

[2] Sumathi, S., Ashok Kumar, L., Surekha, P. „Solar PV and Wind Energy Conversion System“, Springer, 2015

[3] Kivik, P., Baca, P., „Electrochemical Energy Storage“, InTech Open, 2016

[4] VRLA baterije, url: http://www.gsbattery.com/content/vrla, datum pristupa: 1. svibnja 2017.

[5] „Testing of batteries used in Stand Alone PV Power Supply Systems“, Use of Photovoltaic Power Systems in Stand-Alone and Island Applications; Report IEA PVPS T3-11: 2002, izvješće

[6] Zhu, Y., Zhu, W. H., Tatarchuk, B. J., „In-Situ Dynamic Characterization of Energy Storage and Conversion Systems“, Energy Storage, InTech Open, 2013

[7] Pražnjenje baterija, url: http://www.mpoweruk.com/performance.htm, datum pristupa: 1. lipnja 2017.

[8] Mjerenje unutarnjeg otpora, url: http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_internal_resistance, datum pristupa: 30. lipnja 2017.

[9] Calabek, M. et al. (2001)., „A fundamental study of the effects of compression on the performance of lead accumulator plates“, *J. Power Sources*, Vol. 95, 97 – 107, ISSN 0378-7753

[10] Ruetschi , P. (2004). „Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries“, *J. Power Sources*, Vol. 127, 33–44, ISSN 0378-7753

[11] Vincent, C.A. & Scrosati, B. (2003). „*Modern Batteries“*, Antony Rowe Ltd, ISBN 0-340-66278-6, Eastbourne, Velika Britanija

[12] Definicija troška rada i održavanja, url: http://www.homerenergy.com/support/docs/3.10/system_fixed_operations_and_maintenance_om_cost.html , datum pristupa: 1. rujna 2017.

[13] Definicija cijene energije, url: http://www.homerenergy.com/support/docs/3.10/levelized_cost_of_energy.html, datum pristupa: 5. rujna 2017.

[14] Cijene Redflow ZBM2 i ZBM3 baterije, url: https://www.energy-storage.news/news/redflow-halves-zbm-battery-costs-to-below-grid-price, datum pristupa: 5. rujna 2017.

[15] Dell, R.M. & Rand, D.A.J. (2001). Understanding Batteries, The Royal Society of Chemistry, ISBN 0-85404-605-4, Cambridge, Velika Britanija

Popis slika

Slika 2.1. Autonomni FN sustav bez pohrane energije 2
Slika 2.2. Blok dijagram FN sustava s baterijom 3
Slika 3.1. Shema prizmatske i spiralne olovne baterije [3] 7
Slika 2.2. Blok dijagram FN sust Slika 3.2. Frakcioniranje pozitivne aktivne mase [3] 8
Slika 3.3. SEM (pretražni elektronski mikroskop, engl. scanning electric microscope) slike negativne aktivne mase. Sulfacija lijevo, zdravo stanje desno [3] 10
Slika 3.4. Prikaz korozije pozitivne rešetke [3] 11
Slika 3.5. Shema spiralnih (lijevo) i prizmatskih (desno) konstrukcija Ni-Cd baterija [3] 13
Slika 3.6. Shema prizmatske (lijevo) i spiralne (desno) Ni-MH baterije [3] 15
Slika 3.7. Princip rada litij-ionske ćelije [3] 16
Slika 3.8. Prizmatska (lijevo) i cilindrična (desno) konstrukcija Li-ionskih ćelija [3] 17
Slika 3.9. Ag-Zn prizmatska baterija [3] 19
Slika 3.10. Shema vanadij redoks baterije [3] 20
Slika 4.1. Krivulja pražnjenja za određene ćelije [7] 22
Slika 4.2. Ovisnost performanse litij-ionske baterije o temperaturi [7] 23
Slika 4.3. Značajke pohrane litij-ionske ćelije [7] 24
Slika 4.4. Randlesov model olovne baterije [8] 25
Slika 4.5. Randlesov model, prikaz R1 i R2 kao jedne ohmske vrijednosti kod metode DC opterećenja [8] 26
Slika 4.6. Randlesov model, pojedinačne komponente se ne mogu razlikovati kod metode AC vodljivosti [8] 26
Slika 4.7. Randlesov model, EIS metoda [8] 27

Popis grafikona

Grafikon 5.1. Odnos cijena li-ion baterije, FN modula i izmjenjivača 28
Grafikon 5.2. Prikaz novčanog toka sustava s li-ion baterijom 29
Grafikon 5.3. Prikaz stanja napunjenosti li-ion baterije 31
Grafikon 5.4. Odnos cijena olovne baterije, FN modula i izmjenjivača 31
Grafikon 5.5. Prikaz novčanog toka sustava s olovnom baterijom 32
Grafikon 5.6. Prikaz stanja napunjenosti olovne baterije 33
Grafikon 5.7. Odnos cijena Redflow ZBM baterije, FN modula i izmjenjivača 34
Grafikon 5.8. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM baterijom 34
Grafikon 5.9. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM baterije 35
Grafikon 5.10. Odnos cijena Redflow ZBM2 baterije, FN modula i izmjenjivača 36
Grafikon 5.11. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM2 baterijom 36
Grafikon 5.12. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM2 baterije 38
Grafikon 5.13. Odnos cijena Redflow ZBM3 baterije, FN modula i izmjenjivača 38
Grafikon 5.14. Prikaz novčanog toka sustava s Redflow ZBM3 baterijom 39
Grafikon 5.15. Prikaz stanja napunjenosti Redflow ZBM3 baterije 40

Popis tablica

Tablica 5.1. Troškovi komponenata sustava s li-ion baterijom 29
Tablica 5.2. Vrijednosti karakteristika li-ion baterije u promatranom sustavu 30
Tablica 5.3. Troškovi komponenata sustava s olovnom baterijom 32
Tablica 5.4. Vrijednosti karakteristika olovne baterije u promatranom sustavu 33
Tablica 5.5. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM baterijom 35
Tablica 5.6. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM baterije u promatranom sustavu 35
Tablica 5.7. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM2 baterijom 37
Tablica 5.8. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM2 baterije u promatranom sustavu 38
Tablica 5.9. Troškovi komponenata sustava s Redflow ZBM3 baterijom 40
Tablica 5.10. Vrijednosti karakteristika Redflow ZBM3 baterije u promatranom sustavu 40
Tablica 5.11. Operativni troškovi ispitanih baterija 41

Sažetak

U ovom završnom radu su obrađene osnovne komponente autonomnih fotonaponskih sustava te sekundarne baterije kao odgovarajuće za korištenje u autonomnim fotonaponskim sustavima za pohranu električne energije. Detaljno su, s odgovarajućim predstavnicima, elektrokemijski objašnjene standardne, moderne, posebne i protočne baterije. Zbog važnosti osiguranja usluge konačnom korisniku, temeljno je objašnjeno ispitivanje baterija, koje su nazivane najslabijim komponentama autonomnog fotonaponskog sustava, te su obrazložene ispitivane karakteristike baterija.

U programskom paketu HOMER Energy je uspoređeno 5 baterija, litij-ionska, olovna i tri vrste cink-bromidne baterije, u sustavu dimenzioniranom kao kućanstvo, kako bi se donijela rezolucija o ekonomski najisplativijoj bateriji.

Abstract

This paper processes basic components of autonomous photovoltaic systems and secondary batteries for their appropriate use in autonomous photovoltaic systems for electricity storage. Standard, modern, special and flow batteries and their appropriate representatives are thoroughly electrochemically explained. Battery testing is comprehensively explained as well as tested battery characteristics.

Five batteries are compared in Homer Energy software, including lithium-ion, lead acid and three types of zinc bromide batteries, in a dimensioned home-based system, to provide the most profitable battery.

Životopis

Matea Travančić je rođena 31. srpnja 1995. u Vinkovcima, u Republici Hrvatskoj. Nakon završenog općeg smjera Gimnazije Matije Antuna Reljkovića u Vinkovcima, upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, 2014. godine, smjer elektroenergetika. Na drugoj godini studija postaje student demonstrator na kolegijima Fizika 1 i Elektronika 1. Napredan je govornik engleskog jezika s dobrim znanjem njemačkog jezika.