

# Stacionarni baterijski sustava i njihova uloga u elektroenergetskom sustavu

---

Čolić, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*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:200:433616>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*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 prijediplomski studij**

**STACIONARNI BATERIJSKI SUSTAVI I NJIHOVA**  
**ULOGA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

**Završni rad**

**Antonio Čolić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Antonio Čolić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4939, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165088652
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
<b>Sumentor:</b>	Zvonimir Šimić, univ. mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Stacionarni baterijski sustava i njihova uloga u elektroenergetskom sustavu
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U završnom radu potrebno je obraditi temu stacionarnih baterijskih sustava i njihovu primjenu u elektroenergetskom sustavu. U uvodnom dijelu rada treba na temelju dostupne literature istražiti trenutno stanje primjene stacionarnih baterijskih sustava u elektroenergetskom sustavu na globalnoj razini, razini Europske unije i na razini Republike Hrvatske s aspekta instalirane snage te kapaciteta pohrane. Nadalje, treba opisati tehnologije stacionarnih baterijskih sustava koje se koriste u elektroenergetskom sustavu uzimajući u obzir primjenu na razini prijenosnog i na razini distributivnog sustava. Za svako
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	02.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	11.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	12.09.2024.

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

Osijek, 12.09.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Antonio Čolić
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4939, 27.07.2021.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Stacionarni baterijski sustava i njihova uloga u elektroenergetskom sustavu**

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

i sumentora Zvonimir Šimić, univ. 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 pristupnika:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
2. PREGLED LITERATURE.....	2
3. TRENUTNO STANJE PRIMJENE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU .....	4
4. TEHNOLOGIJE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA .....	5
4.1. Baterije .....	5
4.1.1. Ragone dijagram .....	7
4.1.2. Pražnjenje i punjenje baterija .....	8
4.1.3. Recikliranje baterija .....	10
4.2. Sekundarne i protočne baterije.....	11
4.2.1. Litij – ionske baterije.....	11
4.2.2. Nikal – metal hidridne baterije.....	17
4.2.3. Nikal – kadmijeve baterije .....	19
4.2.4. Olovno – kiselinske baterije.....	21
4.2.5. Vanadij redox baterije.....	23
4.2.6. Rastaljena natrijeva baterija ( Molten Na battery) .....	25
4.2.7. Nova metal ionska baterija.....	27
4.3. Primjena rabljenih baterija iz električnih automobila .....	28
4.3.1. Ispitivanje baterije za ponovno upotrebu .....	29
4.3.2. Rezultati mjerenja .....	32
5. Uloga baterijskog spremnika u elektroenergetskom sustavu .....	34
5.1. Primjena na razini prijenosne mreže .....	34
5.1.1. Kvaliteta električne energije.....	34
5.1.2. Upravljanje zagušenjima .....	35

5.1.3.	N–1 kriterij sigurnosti .....	36
5.1.4.	Regulacija napona i jalove snage .....	36
5.1.5.	Sposobnost samostalnog pogona.....	37
5.2.	Primjena na distribucijskoj mreži.....	37
5.2.1.	Odgoda ulaganja u distribucijsku mrežu.....	38
5.2.2.	Regulacija napona i jalove snage .....	39
6.	USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA STACIONARNOG BATERIJSKOG SUSTAVA.....	40
7.	ZAKLJUČAK .....	41
	LITERATURA .....	42
	SAŽETAK.....	47

## **1. UVOD**

Pod pojmom baterijski sustav podrazumijevaju se spremnici za pohranu energije koji se mogu primjenjivati u elektroenergetskim sustavima. Glavni problem rada je pronalazak najboljeg baterijskog spremnika za primjenu u elektroenergetskom sustavu.

U radu u poglavlju 4. opisane su sekundarne i protočne baterije i njihove karakteristike. Za korištene baterije iz automobila prikazana je sekundarna primjena u drugim elektroenergetskim sustavima, a hipoteza je dokazana prema mjerenjima provedenim na automobilu marke „Nissan“, model „Leaf“. Kroz rad obuhvaćene su teme primjene baterijskih spremnika u elektroenergetskom sustavu prilikom čega je zaključeno u koje svrhe se mogu najbolje iskoristiti baterijski spremnici.

Sve karakteristike u radu obrađenih tehnologija su uspoređene, te je donesen zaključak kako je za elektroenergetski sustav najučinkovitija baterija litij-ionska baterija unatoč ekološkim problemima i problemima sa recikliranjem same baterije.

Kako bi pobliže upoznali baterijske sustave u radu je objašnjena trenutna primjena baterijskih sustava, tehnologije baterijskih sustava i njihova funkcionalna uloga u elektroenergetskim sustavima, u konačni su uspoređeni stacionarni baterijski sustavi i iskazana njihova najbolja svojstva.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

U završnome radu potrebno je obraditi temu stacionarnih baterijskih sustava i njihovu primjenu u elektroenergetskom sustavu. U uvodnom dijelu potrebno je istražiti trenutno stanje primjene stacionarnih baterijskih sustava u elektroenergetskom sustavu na globalnoj razini, razini Europske unije i na razini Republike Hrvatske s aspekta instalirane snage te kapaciteta pohrane. Nadalje, treba opisati tehnologije stacionarnih baterijskih sustava koje se koriste u elektroenergetskom sustavu uzimajući u obzir primjenu na razini prijenosnog i na razini distributivnog sustava. Za svaku tehnologiju opisati princip rada te dati pregled tehničkih karakteristika s aspekta snage, kapaciteta pohrane, brzine odziva, povratne (kružne) učinkovitosti i sl., istražiti primjenu rabljenih baterija iz električnih vozila za stacionarne primjene u elektroenergetskom sustavu. Napraviti usporedbu pojedinih tehnologija i dati preporuke za korištenje pojedinih tehnologija s aspekta različitih primjena u elektroenergetskom sustavu.

## 2. PREGLED LITERATURE

Baterijski spremnici u zadnje vrijeme imaju sve značajniju ulogu u integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav (EES). Omogućuju bolju integraciju elektrana na obnovljive izvore energije te omogućuju veću fleksibilnost sustava. U ovom poglavlju će se kroz pregled literature ukratko prikazati aktualna znanstvena istraživanja vezana uz primjenu stacionarnih baterijskih sustava u EES-u.

U literaturi [1] autori navode da tržište stacionarnih baterijskih sustava za skladištenje energije snažno raste diljem svijeta već nekoliko godina. Područja same primjene stacionarnih baterijskih sustava postala je jako široka i sve više se primjenjuje u EES-u. Ovaj je članak fokusiran na situaciju u Njemačkoj koja je jedno od glavnih tržišta i na kojem je zadnjih godina došlo do značajnog porasta u instaliranoj snazi baterijskih spremnika energije. Najviše se primjenjuju litij – ionske baterije koje dominiraju na samom tržištu zbog mnogobrojnih prednosti svojih tehničkih karakteristika.

Kako je prikazano u literaturi [2], može se primijetiti da baterijski sustavi za pohranu energije su postali sve važniji u modernom elektroenergetskom sustavu zbog vremenske neravnoteže između ponude i potražnje električne energije. Energetski sustav sastoji se od sve većeg broja distribuiranih i varijabilnih energetskih izvora, poput fotonaponskih elektrana (PV) i vjetroelektrana, kao i dvosmjernih energetskih komponenti poput električnih vozila (EV). Također uključuje korištenje baterija u elektroenergetskim sustavima za različite svrhe kao što su regulacija frekvencije i napona, pokretanje bez napajanja, integracija obnovljive energije itd.

Prema istraživanju prikazanom u [3], sustavi temeljeni na litij – ionskim baterijama razvijaju se vrlo brzo sa širokim rasponom ćelijskih tehnologija i arhitektura sustava dostupnih na tržištu. Autori su se najviše dotakli teme dizajniranja sustava za pohranjivanje u kojima navode potencijalne tehnike rješenja kako bi poboljšali same sustave i iskoristili puni potencijal stacionarnih sustava za pohranu energije.

U literaturi [4] autori se dotiču teme o recikliranju baterija iz električnih vozila koje ako se ne zbrinu na odgovarajući način mogu predstavljati potencijalni problem ljudskom zdravlju i okolišu. Stoga, kada baterije iz električnih automobila završe svoj prvi životni vijek, one još uvijek sadrže dovoljno energije i kapaciteta za primjenu u stacionarnim baterijskim sustavima za pohranu energije. Ovo istraživanje je provedeno s ciljem procjene je li ekonomski isplativo instalirati stacionarne baterijske sustave za pohranu energije koristeći rabljene baterije iz električnih vozila uzimajući u obzir starost baterije.



Još jedan važan aspekt kod stacionarnih baterijskih sustava jest upravljanje energijom. U literaturi [5] autori predlažu model upravljanja baterijskim sustavom u distribucijskim mrežama za stacionarne primjene. Glavna svrha modela je maksimalno iskoristiti distribuirane obnovljive izvore energije u distribucijskim mrežama, sprječavajući situacije obrnutog toka snage u distribucijskom transformatoru. Ovaj je model testiran i rezultati su pokazali da baterije mogu značajno pridonijeti pohranjivanju viška energije i postići učinkovito iskorištenje.

U literaturi [6] prikazan je pristup smanjenju vršnih opterećenja u distribucijskoj mreži korištenjem baterijskog spremnika energije gdje je sam algoritam primijenjen i testiran s mjerenim podacima ostvarenim na realnoj stacionarnoj bateriji. Ovaj rad predlaže kontrolnu shemu upravljanja pohranom energije koja se temelji na predviđanjima opterećenja dan unaprijed za smanjenje vršnog opterećenja. Rad baterijskih sustava za pohranu energije ovisi o predviđanju opterećenja dan unaprijed, tj. mjerenjima na transformatoru u stvarnom vremenu i vršnim snaga prethodnih vremenskih koraka u mjesecu. Ovim testiranje postignute su uštede na određenim područjima koje se mogu koristiti u budućnosti.

U radu [7] je prikazan optimizacijski model upravljanja energijom u elektroenergetskom sustavu potrošača. Optimizacijski model daje optimalan raspored iskorištenja stacionarnog spremnika baterije i raspored punjenja baterija u električnom vozilu prema očekivanoj proizvodnji iz fotonaponske elektrane i potrošnji kućanstva. Cilj je minimizirati troškove električne energije za elektroenergetski sustav potrošača. Rezultati pokazuju uštede kada se stacionarna baterija koristi u elektroenergetskom sustavu potrošača.

Na osnovu pregleda literature, glavni doprinos ovog rada je cjeloviti uvid u baterijske spremnike i njihove karakteristike na osnovu kojih se može procijeniti koja baterija je najpogodnija za određene primjene.

### **3. TRENUTNO STANJE PRIMJENE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU**

Trenutno se u Europi i u svijetu nastoji promijeniti model tržišta električne energije pri čemu dolazi do promjene prijenosnog i distribucijskog sustava. Kako bi ostvarili zamišljene ciljeve Europska komisija je u Republici Hrvatskoj pokrenula paket energetske mjere pod nazivom „Čista energija za sve Europljane“. Paket mjera sastoji se od 3 značajke :

- smanjuje vršnu potrošnju korisnika mreže;
- prebacuje potrošnju iz skuplje (dnevne) u jeftiniju (noćnu) tarifu;
- omogućuje sudjelovanje u pružanju rezerve operatoru sustava.

Godišnje tržište za pohranu energije u Europi je doseglo 2,2 GW, dok je na globalnoj razini ta brojka 26GWh. Kratkoročno se od Europe očekuje kako će doseći implementaciju od 6,0 GWh, dok su dugoročni planovi implementacije 160 GWh/80 GW. Globalno tržište sustava za pohranu baterije (BESS) predviđa se da će se udvostručiti svake 3 godine u razdoblju od 2020. do 2040. godine. Iako Europa nadmašuje i Kinu i SAD po rastu kapaciteta za obnovljivu energiju, to nije slučaj za postavljanje stacionarne baterije. EU ima mnogo snažniju i gušću elektroenergetsku mrežu, čime se ograničava ovisnost na skladištu. Uz potrebnu temeljitu obnovu energetske sustava EU-a s ciljem ublažavanja klimatskih promjena i ograničavajući ovisnost o vanjskim nositeljima energije, situacija se može značajno promijeniti. Spremnici električne energije postaju sve češće korišteni kako u svijetu, EU tako i u Hrvatskoj. Iako još uvijek nije potpuno poznata uloga BSPEE u Hrvatskoj, sigurno je kako će se hrvatska elektroprivreda nastaviti uključivati u razne projekte i što prije uvesti konkretnu primjenu i u Hrvatskoj.

## 4. TEHNOLOGIJE STACIONARNIH BATERIJSKIH SUSTAVA

### 4.1. Baterije

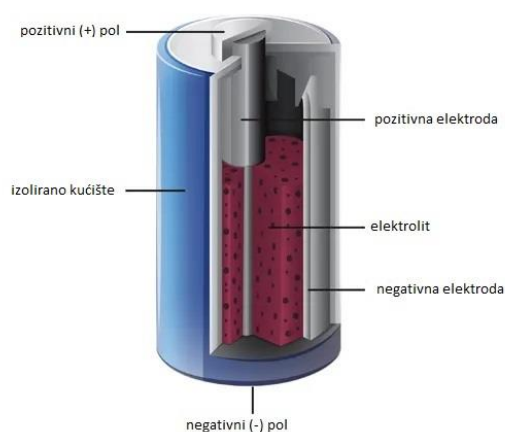
Baterije su elektro-kemijski uređaji koji pretvaraju kemijsku energiju u električnu energiju pomoću redoks reakcija za napajanje raznih aplikacija. Osnovni dio baterije je ćelija, pri čemu se baterija se može sastojati od jedne ili više ćelija, koje mogu biti spojeni u seriju ili paralelu, ovisno koji se kapacitet i izlazni napon žele postići. Osnovna tri dijela ćelija su:

- Anoda je negativna elektroda ćelije povezana sa oksidativnim kemijskim reakcijama koje oslobađaju elektrone u vanjski krug
- Katoda je pozitivna elektroda ćelije povezana s reduktivnim kemijskim reakcijama koje dobivaju elektrone iz vanjskog kruga
- Elektrolit je materijal koji osigurava čistu ionsku vodljivost između pozitivne i negativne elektrode ćelije [8]

Baterije se dijele na:

- Primarne (nepunjive) baterije su baterije koje imaju određeni životni vijek i nakon pražnjenja se više ne mogu koristiti. Ove baterije sadrže takozvane suhe ćelije, odnosno unutar baterije nema tekućine, već se nalazi pasta koja omogućava kretanje ionima. [9] Primarne baterije su jeftine i prikladne za prijenosne elektroničke i električne uređaje, rasvjetu, igračke, fotografsku opremu. [8]

ANODA I KATODA PRIMARNE BATERIJE



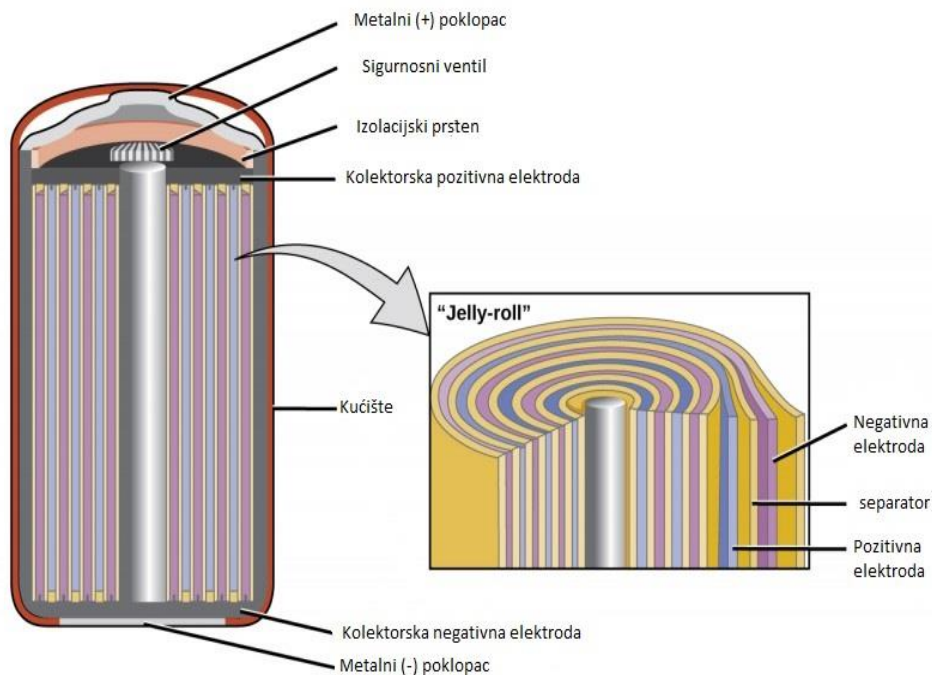
**Slika 4.1.** Prikaz unutrašnjosti primarne baterije [10]

- Sekundarne (punjive) baterije su baterije koje se mogu ponovno napuniti odnosno vratiti u prvobitno stanje preokretanjem strujnog kruga kroz ćeliju. Za razliku od primarnih baterija,

ove baterije sadrže takozvane mokre ćelije, odnosno cijela ćelija je ispunjena tekućinom i unutar tekućine su smješteni tekući elektroliti koji doprinose kretanju iona. [9] Odlikuju se velikom gustoćom snage, dosljednim krivuljama pražnjenja, velikom brzinom pražnjenja i pouzdanim radom čak i na niskim temperatura. [8]

Ovisno kako ih primjenjujemo, sekundarne baterije se mogu koristiti na dva različita načina kao:

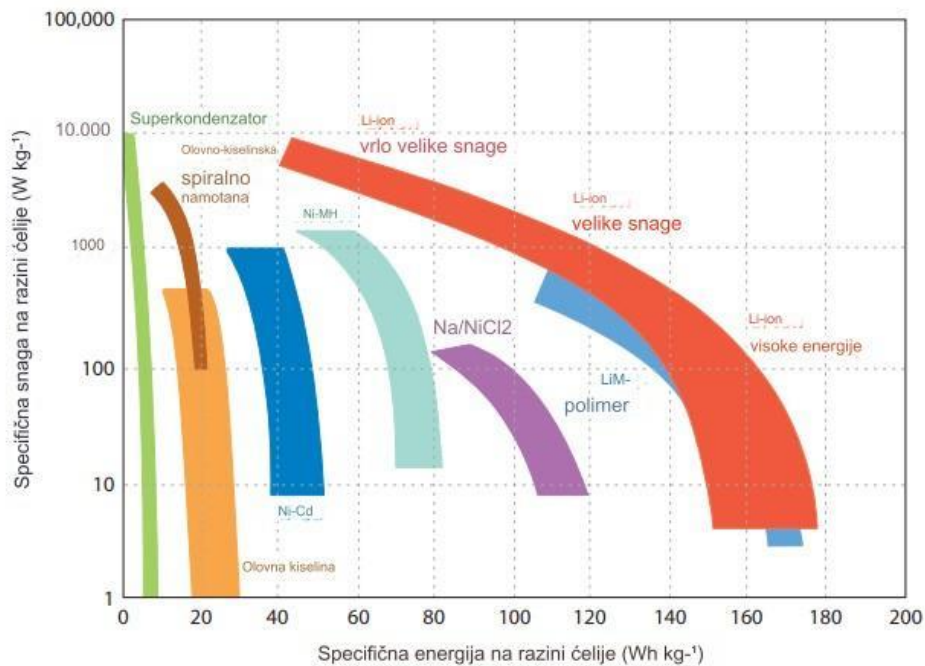
- Uređaj za pohranjivanje energije i za isporuku energije potrošaču na zahtjev, ukoliko je glavni izvor u kvaru ili ne može podnijeti opterećenje.
- Baterija koja se isprazni i ponovno napuni umjesto da koristimo primarne baterije radi uštede i trošenja energije koje primarne baterije ne mogu podnijeti. Koriste se kod električnih vozila, pogona i stacionarnih baterijskih sustava. [8]



**Slika 4.2.** Prikaz unutrašnjosti sekundarne baterije [11]

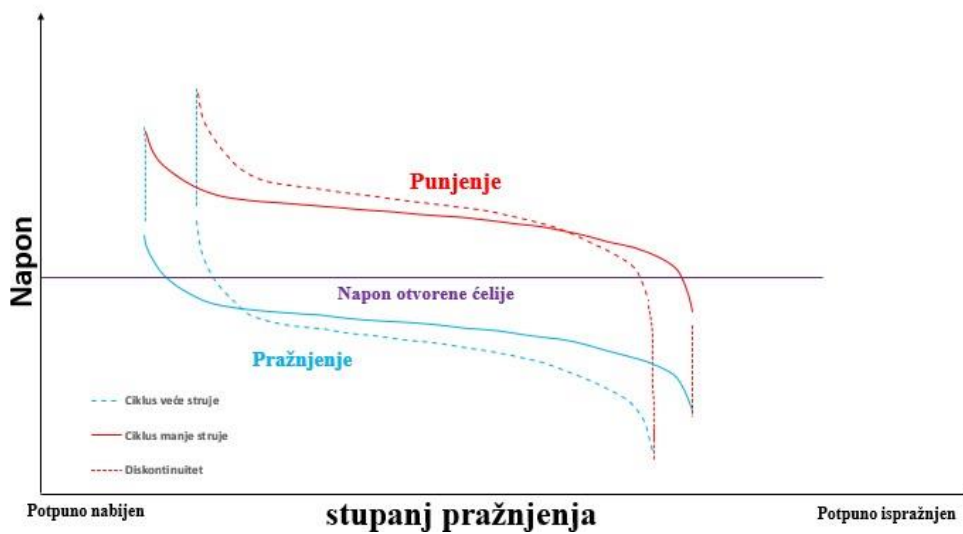
### 4.1.1. Ragone dijagram

Ragone dijagram predstavlja odnos između gustoće snage i gustoće energije baterija za pohranu energije i predstavlja učinkovito tehničko sredstvo za procjenu stanja baterija za pohranu energije. Grafovi se temelje na provođenju mjerenja punjenja i pražnjenja baterije pri konstantnoj struji iz kojih se krivulja može konstruirati graf. Sami broj krivulja zavisi koliko ciklusa punjenja i pražnjenja je provedeno tijekom mjerenja. [12]



**Slika 4.3.** Usporedba gustoće snage i gustoće energije različitih tipova baterija [13]

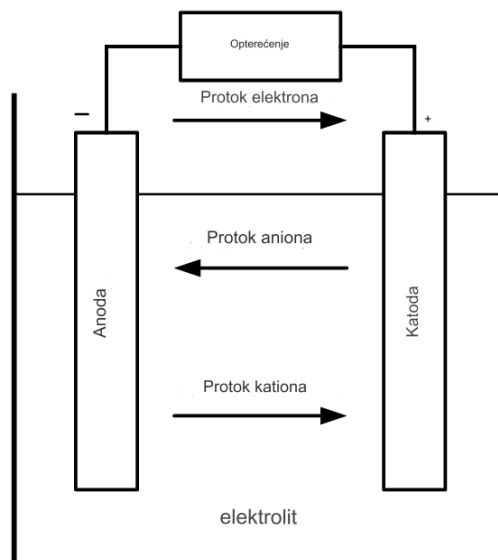
Za baterije, razlika u količini energije preuzete tijekom punjenja i isporučene energije tijekom pražnjenja može biti znatna. Razlika ovisi o brzini punjenja/pražnjenja baterije i to se može prikazati krivuljama napona u odnosu na stanje naboja. Na sljedećoj slici su prikazane krivulje napona na litij–ionskoj bateriji gdje se vidi da je napon manji od napona otvorenih ćelija tijekom pražnjenja i veći tijekom punjenja zbog gubitaka koji su nastali pri različitim brzinama punjenja/pražnjenja. Razlika između punjenja i pražnjenja je veća pri većim strujama, što ukazuje na manju učinkovitost skladištenja energije, a kako se naboj troši tako i napon pada. [13]



**Slika 4.4.** Naponske krivulje punjenja i pražnjenja baterije [13]

#### 4.1.2. Pražnjenje i punjenje baterija

Ukoliko se na bateriju priključi trošilo, elektroni se počinju kretati od anode, prolaze kroz trošilo i stižu do katode koja preuzima elektrone i tako dolazi do smanjenje katodnog materijala i pražnjenja same baterije. [8]



**Slika 4.5.** Električni krug pražnjenja baterije [8]

Za primjer možemo uzeti cink koji će se koristiti kao anodni materijal i klor kao katodni materijal koje ćemo prikazati sljedećim slijedom formula:

Negativna elektroda uzrokuje oksidaciju i gubitak elektrona što predstavlja anodnu reakciju i možemo je zapisati sljedećom jednačinom [8]:



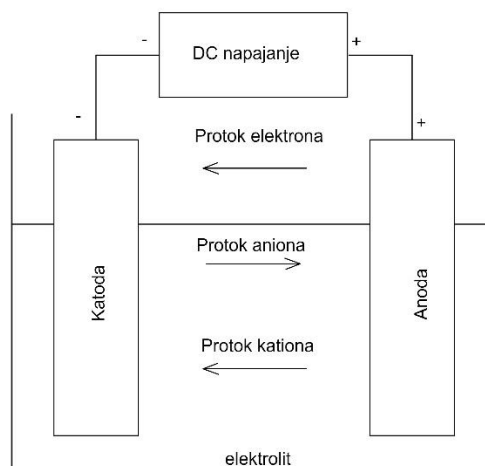
Pozitivna elektroda uzrokuje redukciju i dobitak elektrona što predstavlja katodnu reakciju možemo je zapisati sljedećom jednačinom [8]:



Pražnjenje možemo zapisati sljedećom jednačinom [8]:



Pri punjenju baterije, pozitivna elektroda uzrokuje oksidaciju pri čemu predaje elektrone, dok negativna elektroda uzrokuje redukciju na koju se primaju elektroni pri promijenjenom smjeru struje.



**Slika 4.6.** Električni krug punjenja baterije [8]

Negativna elektroda uzrokuje redukciju i dobitak elektrona što predstavlja anodnu reakciju i možemo je zapisati sljedećom jednačinom [8]:



Pozitivna elektroda uzrokuje oksidaciju i gubitak elektrona što predstavlja katodnu reakciju i možemo je zapisati sljedećom jednadžbom [8]:



Punjenje možemo zapisati jednadžbom [8]:



### 4.1.3. Recikliranje baterija

Recikliranje baterija predstavlja ključan proces za rješavanje ekoloških i zdravstvenih problema jer baterije sadrže otrovne kemikalije koje se oslobađaju prilikom nepravilnog skladištenja otpada baterija. Pošto se stacionarni baterijski spremnici energije temelje na sekundarnim baterijama jako je važno samo recikliranje baterija i povodom toga navesti ćemo neke od uobičajenih korištenih procesa recikliranja litij–ionskih baterija kao što su: [14]

- 1) Hidrometalurgija – koristi kemijske procese, uključujući upotrebu kiselina i baza za ispiranje metala iz komponenti litij–ionskih baterija. Ova metoda može uključiti širi raspon materijala u usporedbi sa pirometalurgijom, ali zahtijeva prethodnu obradu i odvajanje različitih kemikalija.
- 2) Pirometalurgija – predstavlja proces koji se odvija pri visokim temperaturama radi razgradnje i obnavljanja materijala iz litij–ionskih baterija. Iako se može primjenjivati na različitim kemijskim sastavima baterija, ima i nedostatke, uključujući visoke troškove energije i relativno nisku učinkovitost recikliranja.
- 3) Mehanička separacija – uključuje fizičko rastavljanje i odvajanje litij–ionskih komponenti. Ova metoda može povećati učinkovitost recikliranja i smanjiti utjecaj na okoliš, ali je i jako izazovna zbog lijepljenih i složenih struktura samih baterija.
- 4) Elektrodijaliza – je inovativna i čista tehnologija za recikliranje baterija. Mehanizam koristi električno polje preko ion–selektivnih membrana za odvajanje i koncentriranje metala iz baterija. Elektrodijaliza može učinkovito oporaviti litij od otpadnih voda koje nastaju prilikom usitnjavanja litija i otopine za ispiranje katodnih materijala. Međutim, potrebno je riješiti probleme kao što su prisutnost HF-a (fluorovodika) zbog hidrolize PF6



(heksafluorofosfata) i redukcije dvovalentnih kationa prije elektrodijalize kako bi se izbjeglo taloženje metala unutar membrana.

- 5) COOL–proces – predstavlja proces koji koristi superkritični CO<sub>2</sub> i vodu kao sredstva za ispiranje, koje omogućuju ekološke prednosti kao što su minimalna potrošnja kemikalija i visoka učinkovitost ekstrakcije.
- 6) Izravno recikliranje – uključuje uklanjanje katodnog ili anodnog materijala sa elektroda za rekondicioniranje i ponovnu upotrebu u prerađenim litij–ionskim baterijama. [14]

Ove metode za recikliranje baterija imaju svoje prednosti i nedostatke, ovisno o čimbenicama kao što su učinkovitost, cijena, utjecaj na okoliš. Izbor metode može varirati ovisno o specifičnim ciljevima napora recikliranja, stanju tehnologije i infrastrukture. [14]

## **4.2. Sekundarne i protočne baterije**

Sekundarne i protočne baterije se primjenjuju kod stacionarnih baterijskih sustava i u nastavku ćemo objasniti karakteristike pojedinih baterija kao što su :

- Litij–ionske baterije
- Nikal–metal hidridne baterije
- Nikal–kadmijeve baterije
- Olovno–kiselinske baterije
- Vanadij redox baterije
- Rastaljene natrijeve baterije
- Nove metal–ionske baterije

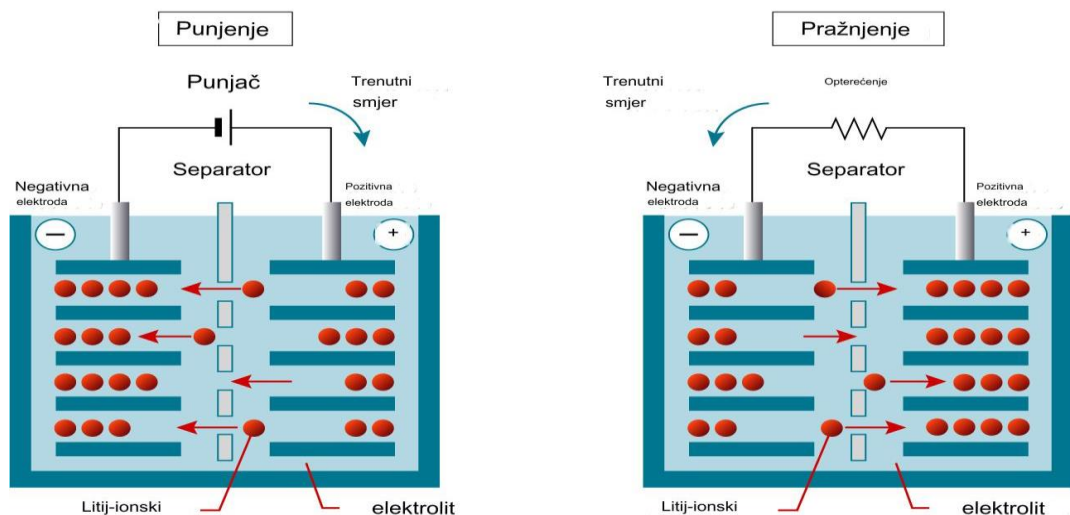
### **4.2.1. Litij – ionske baterije**

Litij–ionske baterije predstavljaju tehnologiju baterija koje su zbog svojih karakteristika postale mnogo važnije od ostalih baterija. Standardna litij–ionska baterija sastoji se od anode, separatora i katode koji se nalaze u elektrolitu koji ima ulogu omogućavanja kretanja iona. Prilikom pražnjenja baterije ioni prelaze s anode (negativne elektrode) na katodu (pozitivnu elektrodu), dok prilikom punjenja se događa obrnuti proces gdje ioni prelaze s katode (negativne elektrode) na anodu (pozitivnu elektrodu). Elektrode su razdvojene separatorom, koji u mnogim slučajevima može biti kao membrana. [15]

Anoda se obično temelji na nekom obliku čestica ugljika, dok nekoliko novijih tehnologija baterije koristi anodni materijal na bazi silicija ili titanija. Anode na bazi silicija imaju prednost zbog manjeg volumena i mase, ali se proširuju nekoliko puta tijekom ciklusa te zbog toga nisu još dovoljno upotrebljive kao tehnologija. Anode na bazi titanija se koriste za jako brze cikluse zbog kapacitivnih svojstava materijala. [15]

Separator je napravljen od poroznog materijala koji služi da odvaja elektrode suprotnog naboja kako bi spriječio kratki spoj i daljnje pregrijavanje. [15]

Katoda se sastoji od metalnih oksida. Najčešći katodni materijali koji se koriste su litij-kobalt oksidne ( $\text{LiCoO}_2$ ), litij-mangan oksidne ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), litij-željezo fosfatna ( $\text{LiFePO}_4$ ) i litij-nikal-mangan-kobalt oksidne ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ). Svaki od ovih materijala nudi različite gustoće energije, toplinske stabilnosti i isplativosti. [16]



**Slika 4.7.** Prikaz punjenja i pražnjenja litij–ionske baterije [17]

Osnovne karakteristične veličine kojima se opisuju litij–ionske baterije su:

- Kapacitet (Ah)
- Napon (V)
- Energija baterije (Wh)
- Unutarnji otpor ( $\Omega$ )
- Gustoća snage (W/l)
- Specifična energija (Wh/kg)
- Gustoća energije (Wh/l)

- C – stopa
- Broj ciklusa punjenja i pražnjenja
- Dubina pražnjenja baterije (%)
- Stanje napunjenosti (%)
- Kraj životnog vijeka

**Kapacitet (Ah)** - opisuje količinu električnog naboja koju izvor energije može isporučiti pod određenim uvjetima pražnjenja. Ovisi o struji pražnjenja, graničnom naponu, temperaturi te vrsti i količini aktivnih materijala. [18]

**Napon (V)** - predstavlja potencijal punjenja u bateriji. [18]

**Energija baterije (Wh)** - odnosi se na količinu energije koju će baterija pohraniti. [18]

**Unutarnji otpor ( $\Omega$ )** – ima svojstvo da se opire prolasku električne struje kroz bateriju. [18]

**Gustoća snage (W/l)** – predstavlja koliko snage baterija sadrži po jedinici mase. [18]

**Specifična energija (Wh/kg)** – odnosi se na masu punjive baterije. [19]

**Gustoća energije (Wh/l)** – odnosi se na volumen punjive baterije. [19]

**C – stopa** odnosi se na brzinu kojom baterija može napuniti ili isprazniti svu svoju energiju (ili snagu). C – stopa je opisana u odnosu na 1 h pražnjenja, tako da je stopa 1 C jednak struji kojom se baterija potpuno isprazni (ili napuni) u 1 h. Na isti način, stopa 2 C bi tad bio jednak struji kojom se baterija potpuno isprazni u 30 min ( $60 \text{ min}/2 \text{ C} = 30 \text{ min}$ ). [18]

**Ciklus** – odnosi se na proces pražnjenja, a zatim i punjenja baterije. Potpuno pražnjenje pa punjenje poznato je kao jedan ciklus. Ciklus se može izvoditi na različitim razinama snage i/ili napona ili čak koristeći konstantu stopu punjenja i pražnjenja, ovisno o zahtjevima primjene. [18]

**Dubina pražnjenja baterije (%)** – je mjera koliko će se energije ćelije koristiti za tu primjenu. Obično se koristi od 20 % do 90 % ukupne količine energije kako bi se spriječilo prekomjerno punjenje na vrhu i upravljalo niskim naponom. [18]

**Stanje napunjenosti (%)** – mjeri koliko je baterije preostalo u određenom trenutku. [18]

**Kraj životnog vijeka** - postignut je kada se maksimalna snaga i energija baterija smanje na oko 80 % prilikom mjerenja. [18]

Glavne prednosti litij–ionskih baterija su: [20]

- Gustoća energije i specifična gustoća litij–ionskih ćelija veće su nego kod bilo koje druge baterije
- Ne pate od efekta pamćenja
- Njihov ciklički život je vrlo visok

Glavni nedostaci litij–ionskih baterija su: [20]

- Jako su osjetljive, jer ako se prepune, mogu eksplodirati
- Zbog njihove sklonosti eksploziji potrebno je sastaviti sofisticirani regulator za njihovo punjenje
- Temperaturu ćelija treba pratiti iz sigurnosnih razloga
- Skuplje su od NiMH ćelija

Kvar litij–ionskih baterija je iznimno rijedak. Današnji dobavljači baterija koriste kvalitetne materijale, vrhunski dizajn i poboljšane metode proizvodnje litij–ionskih baterija koje se koriste u različitim područjima. [21]

Većina litij–ionskih baterija mogu se napuniti preko 90 % kapaciteta za manje od 2 h, te ako određeni sustav ima višestruke nestanke struje u jednom danu, litij–ionske baterije mogu se ponovno brzo napuniti kako bi osigurale da se nadoknadi svaki prekid struje. Osim toga, litij–ionske baterije mogu se upariti s generatorima na fosilna goriva i drugim generatorima za brzo punjenje i sporo pražnjenje, optimizirajući prikupljanje energije kada je dostupno. [21]

Litij–ionske baterije imaju životni vijek od 10–15 godina, prilikom čega imaju predvidljivu krivulju degradacije, što olakšava određivanje kada se približavaju kraju životnog vijeka. Osim toga, litij–ionsku bateriju je moguće isprazniti od 100 % do 0 % kapaciteta bez ikakvog oštećenja ćelija. [21]

Mala veličina litij–ionskih baterija olakšava njihovu ugradnju u ograničene prostore, kao što su kontejnerski podatkovni centri, 5G mikro čvorovi i podatkovni ormari. Manja težina baterija je značajna prilikom transporta i ugradnje te posebno kada se dostavljaju na udaljena mjesta. [21]

U vanjskim uvjetima, litij–ionske baterije mogu tolerirati različite temperature i manje su osjetljive na nagle promjene temperature, dok u zatvorenim uvjetima, nisu potrebne značajna ulaganja u hlađenje sustava, jer ormari u kojima se nalaze baterije su sposobne održavati temperaturu. [21]

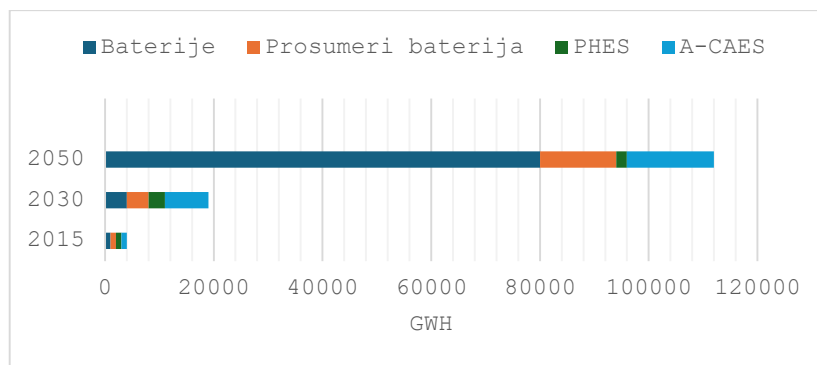
Sve litij–ionske baterije imaju ugrađeni sustav upravljanja baterijom koji prate mogućnosti baterije, prilikom čega se smanjuje rizik od iznenadnog kvara baterije. Sustav upravljanja baterijom osigurava automatsko praćenje statusa, balansiranje ćelija i optimizaciju napajanja za svaku pojedinačnu bateriju i omogućava tehničarima da prate stanje baterije s udaljenih lokacija. To omogućuje maksimalno produljenje vijeka trajanja baterije, minimalno vrijeme prekida rada i smanjenje troškova rada i održavanja. [21]

Jedan od glavnih nedostataka litij–ionskih baterija je cijena i problem recikliranja zbog opasnih kemikalija koje sadrže, ali u konačnici imaju najbolje karakteristike zbog čega se i najviše koriste u stacionarnim baterijskim sustavima, vozilima i mnogim drugim sustavima. [21]



*Slika 4.8.* Prikaz litij – ionske baterije [22]

Energy Watch Group (EWG) je razvila dinamički globalni model energetskeg sustava kako bi se procijenili učinci prelaska na 100 % obnovljive izvore energije do 2050. godine. Model se temelji na budućem scenariju u kojem rezultati pokazuju ogromnu potrebu za jedinicama za pohranu energije. Predviđa se da će samo potrebe za skladištenjem baterija doseći približno 8400 GWh u 2030. godini i 74.000 GWh u 2050. godini. Na slici ćemo s pomoću grafa prikazi kako bi to trebalo izgledati, a sam graf će se sastojati od baterija, baterijskih prosumera, PHES (pumpno hidroelektrično skladištenje energije) i A-CAES (adijatsko skladištenje energije komprimiranim zrakom). [23]



**Slika 4.9.** Potencijalne mogućnosti skladištenja energije na bazi litija [23]

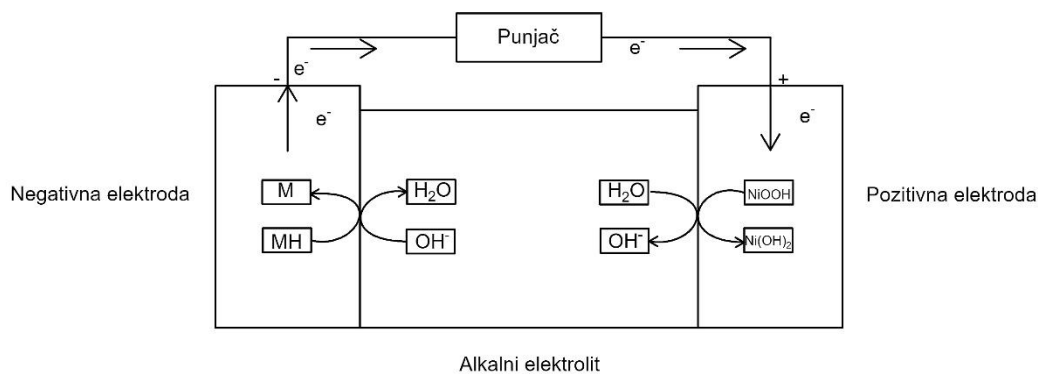
**Tablica 4.1.** Prikaz karakteristika različitih stacionarnih baterija [3]

Parametar	Jedinica	Vrijednosti ćelija litij ionskih baterija			
Ćelija	-	SDI94Ah	NCR18650B	US26650FTC1	SCiB Titanate
Proizvođač	-	SAMSUNG	PANASONIC	Murata	Toshiba
Kemijski sastav	-	NMC:C	NCA:C	LFP:C	MO <sub>x</sub> :LTO
Format ćelije	-	Prizmatičan	Cilindričan	Cilindričan	Prizmatičan
Kapacitet	Ah	94,0	3,2	3,0	20
Gustoća energije	Wh/l	355	676	278	177
Sposobnost kontuirane snage	C - stopa	3 C/1 C	2 C/0,5 C	6 C/1 C	8 C/> 3 C
Životni ciklus	Puni ekvivalentni ciklus	> 5000	320	> 6000	10000
Raspon napona	V	2,70 – 4,15	2,50 – 4,20	2 – 3,6	1,5 – 2,7
Nazivni napon	V	3,7	3,6	3,2	2,3

#### 4.2.2. Nikal – metal hidridne baterije

Nikal – metal hidridne baterije su baterije koje zbog svoje učinkovitosti imaju široku primjenu i pripadaju sekundarnim baterijama odnosno mogu se puniti. NiMH ćelije sastoje se od:

- Pozitivna elektroda je nikal hidroksid koja ima uloga da izmjenjuje proton u reakciji naboja i pražnjenja
- Alkalni elektrolit u NiMH ćeliji je vodena otopina od oko 30 % kalijevog hidroksida koja ima vrlo visoku ionsku vodljivost. Elektrolit obično održava koncentraciju tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja.
- Vodik je aktivni materijal u negativnoj elektrodi, ali vodik je pohranjen kao metalni hibrid koji čini negativnu elektrodu. Količina vodika u metalnom hibridu je u rasponu od 1 – 2 % na temelju težine. [24]



**Slika 4.10.** Princip rada NiMH ćelija [24]

NiMH ćelije konstruirane su u cilindričnom, gumbastom i prizmatičnom obliku. Cilindrična konfiguracija je naširoko korištena, a postoje mnoge vrste cilindričnih ćelija namijenjenih specifičnim primjenama. Glavna značajka ovog dizajna je da su i pozitivna i negativna elektroda namotane s separatorom. Prizmatične ćelije obično su kompaktne i tanke, nudeći bolju iskoristivost prostora u uređajima poput mobitela koji su tanki i dugi. [25]

NiMH baterije karakteristične su po tome što imaju veliki kapacitet, jako dobro rade na niskim temperaturama, ne pate od memorijskog efekta i imaju dobru gustoću energije koja je približna litij – ionskim baterijama. Pored ovih navedenih prednosti, ove baterije sadrže i nedostatke poput

visoke cijene proizvodnje, velike brzine samopražnjenja baterije i što im nakon određenog broj ciklusa kapacitet počinje opadati. [26]

Prema kapacitetu, baterije možemo podijeliti na: [26]

- AA – (1700 – 2900 mA/h)
- AAA – (800 – 1000 mA/h)
- S – (4500 – 6000 mA/h)
- D – (9000 – 11500 mA/h)

Zbog velike brzine samopražnjenja, razvijene su NiMH baterije s niskim samopražnjenjem prilikom čega je uklonjen problem samopražnjenja te mogu se uključiti do 1800 puta i održavaju do 90 % napunjenosti nakon godinu dana rada. [25]

NiMH baterije se pored litij–ionskih baterija još uvijek primjenjuju u vozilima, jer su pokazale visoku razinu punjenja/pražnjenja tijekom duljeg razdoblja i također, mogu se koristiti za pohranu ogromnih količina električne energije proizvedene vjetrom ili solarnom energijom. [25]



*Slika 4.11.* Prikaz NiMH baterije [26]



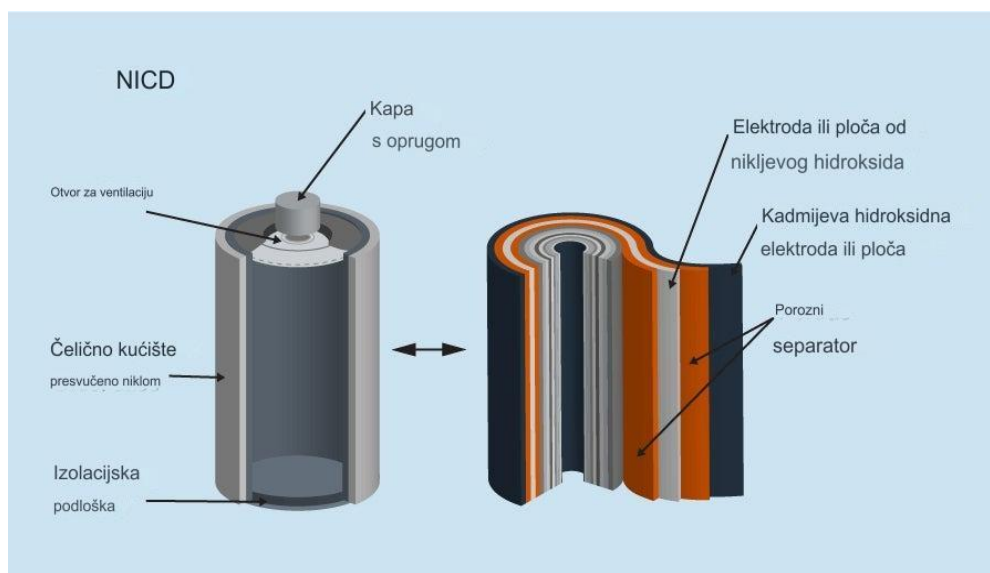
### 4.2.3. Nikal – kadmijeve baterije

Nikal–kadmijeve baterije pripadaju punjivim baterijama koje su slične nikal–metal hibridnim baterijama jer temelje se na redox reakciji između nikal hidroksida i kadmija. Ključne aktivne jedinice u ćeliji uključuju pozitivnu elektrodu (nikal hidroksid), negativnu elektrodu (kadmij oksid), separator i alkalni elektrolit koji je obično kalijev hidroksid. [25]

Najčešći tip pozitivne elektrode je sferični nikal hidroksid visoke gustoće koji se proizvodi taloženjem. Soli nikla reagiraju s kaustičnom sodom kao što je NaOH (natrijev hidroksid) u prisutnosti amonijaka. Na ovaj način se dobiva sferični nikal hidroksid koji ima prikladnu kristalnost, gustoću i površinu, ali to loše utječe na kapacitet, iskoristivost, snagu i sposobnost brzine pražnjenja baterije. [25]

Kako bi poboljšali vodljivost negativnim elektrodama dodajemo nikal ili grafit. Ponavljajuće punjenje i pražnjenje baterije uzrokovat će postupni rast kristala kadmija, što dovodi do smanjenja aktivne površine i pada kapaciteta. [25]

NiCd ćelije mogu biti hermetički zatvorene i ventilirane. Kod hermetički zatvorenih, kako bi se omogućila učinkovita rekombinacija plina kroz separator i spriječilo povećanje tlaka, ćelije nisu potpuno napunjene elektrolitom. Kod ventiliranih ćelija koristi se tlačni ventil za ispuštanje kisika i vodika kada je tlak previsok te zahtijevaju periodično održavanje jer će se elektrolit izgubiti tijekom vremena. [25]



*Slika 4.12.* Prikaz kadmijeve baterije [27]

Važne karakteristike NiCd baterija su:

- Nazivni napon je 1,2 V koji baterije mogu isporučiti tijekom svakog životnog ciklusa, te u kombinacijama se koriste za dobivanje 12 V i 24 V
- Ne mogu se lako pregrijati jer imaju širok temperaturni raspon od -50 do +40 stupnjeva
- Granični napon po ćeliji je 1 V
- Prosječni kapacitet je od 600 - 1000 mAh
- Stopa samopražnjenja NiCd baterije je oko 10 % mjesečno na 20 stupnjeva, a raste do 20 % na višim temperaturama
- NiCd baterije mogu pružiti preko 500 ciklusa punjenja/pražnjenja [28]

Glavne prednosti NiCd baterija su što omogućuju visoku izlaznu struju, relativno su tolerantne na prekomjerna punjenja, podnose preko 500 ciklusa punjenja, ali iako ima dobre tehničke karakteristike glavni nedostaci ovih baterija su cijena, brzo samopražnjenje, primjetan memorijski efekt punjenja i kadmij nije ekološki prihvatljiv. [28]

U današnjici se primjenjuju kao baterije za neprekidna napajanja i u prijenosnim uređajima male veličine kao što su medicinski instrumenti, električni alati ili industrijski prijenosni proizvodi, a koriste se proizvodima male veličine jer su 4 – 5 puta skuplje od olovnih baterija za isti kapacitet. [28]



*Slika 4.13.* Prikaz NiCd baterije za industrijsku upotrebu [29]

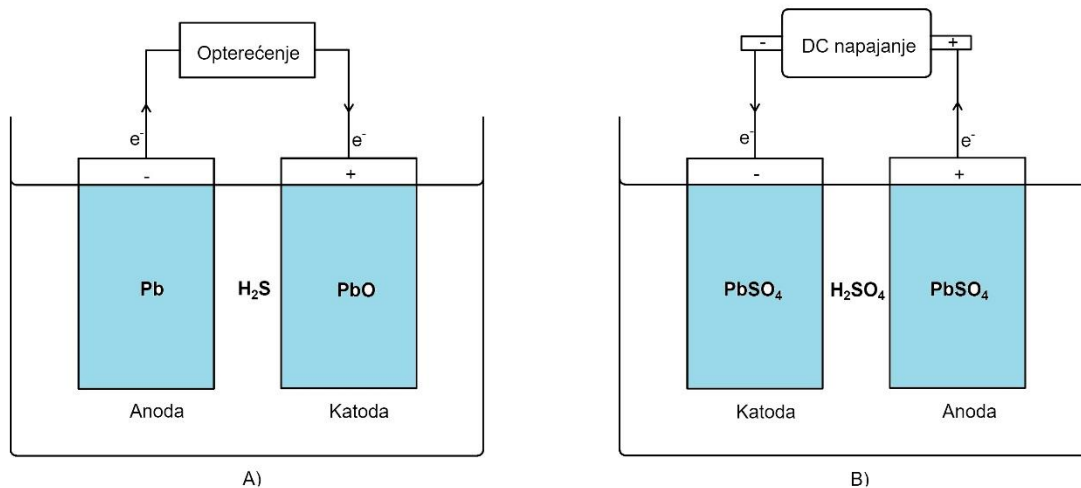
#### 4.2.4. Olovno – kiselinske baterije

Olovno–kiselinska baterija može se smatrati jednim od najstarijih uspješnih izuma Gastona Planté 1859. godine u povijesti baterija. Jedinčna ćelija sastoji od pozitivne elektrode (olovni dioksid  $PbO_2$ ) i negativne elektrode (čisto olovo  $Pb$ ) koje su uronjene u elektrolit (sumporna kiselina  $H_2SO_4$ ). Baterija se sastoji od više jediničnih ćelija koje su spojene paralelno, serijski ili oboje, kako bi se postigla željena snaga i razina napona. [30]

U jediničnoj ćeliji baterije, prijenos elektrona se odvija u dvije fizički odvojene kemijske reakcije. Za bateriju koja se prazni, elektroda na kojoj se odvija reakcija oksidacije je anoda i ima pozitivan napon, a elektroda na kojoj se odvija reakcija redukcije naziva se katoda i ima negativan napon. Tijekom pražnjenja, reakcija oksidacije na anodi stvara elektrone koji tijekom pražnjenja putuju do katode. Elektrolit olakšava izmjenu aniona i kationa (nabijenih iona) između procesa oksidacije i redukcije, te prilikom punjenja baterije koristi se samo obrnuti proces. [30]

Na sljedećoj slici prikazat ćemo dva različita stanja olovno–kiselinske ćelije:

- A. Potpuno napunjena baterija koja opskrbljuje vanjsko opterećenje
- B. Potpuno ispražnjena baterija koja prima struju iz vanjskog izvora napajanja



**Slika 4.14.** Prikaz dva različita stanja olovno – kiselinskih baterija [30]

Postoje različite vrste olovnih baterija za različite namjene poput: [20]

- SLI (engl. *Starting – Lighting – Ignition*) olovne baterije – koriste se u automobilskoj industriji. Svaka ćelija se sastoji od nekoliko tankih pozitivnih i negativnih elektroda sa

separatorima između njih. Ova konfiguracija omogućuje ćeliji da proizvodi veliku struju, koja je prikladna za pokretanje

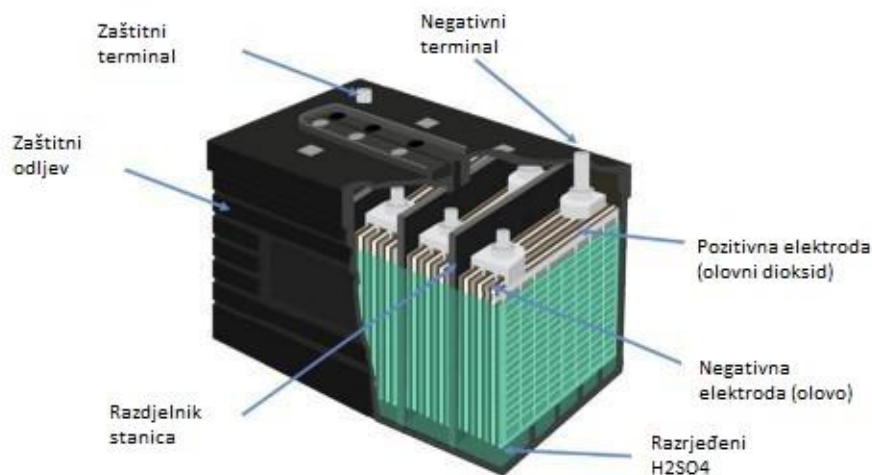
- Zapečaćene olovne baterije – su zatvorene olovne baterije koje se koriste za duboko pražnjenje, koje je primjenjivo u neprekinutim izvorima napajanja i solarnim sustavima. Elektrolit ovih baterija može biti zatvoren u apsorbiranim staklenim podlogama ili geliran dodavanjem čestica silicijevog dioksida u elektrolit te je regulirana ventilom
- Cjevaste olovne baterije – su baterije koje se intenzivno koriste u velikim skladištima energije sustava. U cjevastim olovnim baterijama pozitivna elektroda napravljena je od cijevi koje su ispunjene pozitivnim materijalom. Cjevaste ploče su postavljene ispred ravnih negativnih ploča i ova konfiguracija sprječava otpadanje pozitivne elektrode i produljuje njezin vijek trajanja.

Važne karakteristike olovno-kiselinskih baterija su: [31]

- Specifična energija: 25 – 40 Wh/kg
- Gustoća energije: 40 – 100 Wh/l
- Specifična snaga: 100 – 500 W/kg
- Gustoća snage: 400 – 600 W/l
- Učinkovitost: 70 – 90 %
- Kapacitet ovih baterija ovisi o dizajnu ćelija i temperaturi
- Samopražnjenje je između 1 % i 5 % mjesečno na temperaturi od 20 °C, gdje brzina samopražnjenja raste s porastom temperature

Baterije za vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem počinju raditi od oko 90 % napunjenosti i moraju osigurati snagu za pokretanje motora do 10 kW, što znači specifičnu snagu do 600 W/kg, koja se održava manje od 1 s. Baterije za vozila mogu osigurati oko 100 puta veći protok energije od nominalnog kapaciteta, a vijek trajanja je od 4 – 6 godina u umjerenim klimatskim uvjetima. Do kvara dolazi zbog korozije rešetke ili odlijevanja aktivnog materijala s pozitivne ploče. [30]

Olovne baterije imaju nisku cijenu i veliku pouzdanost i zbog toga su popular izbor za sustave s neprekidnim izvorom napajanja. Međutim, njihova primjena je ograničena zbog kratkog vijeka trajanja (500 – 1000 ciklusa), niske gustoće energije, loših karakteristika pri niskim temperaturama i zbog toga zahtijevaju sustav upravljanja toplinom. [30]



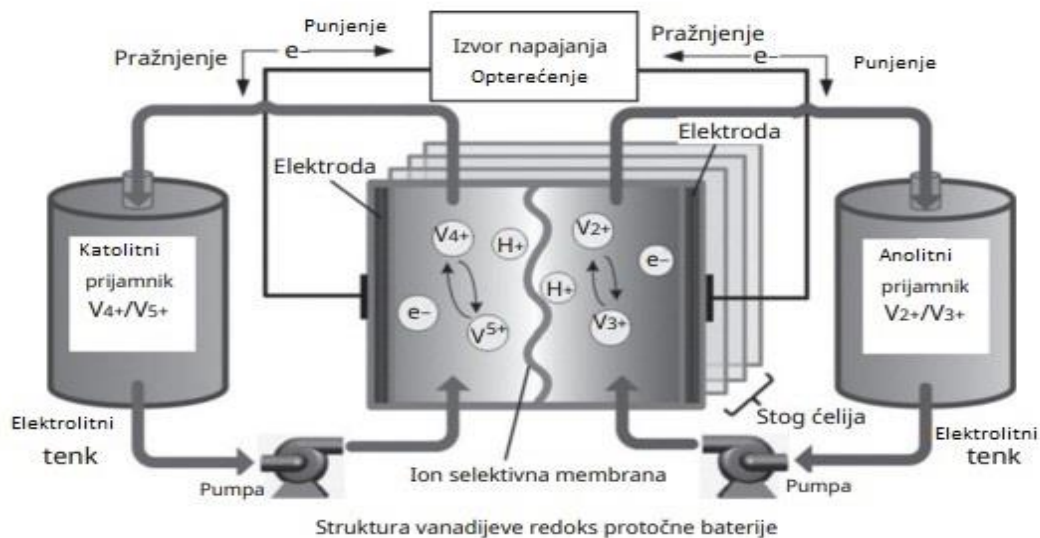
**Slika 4.15.** Prikaz olovno – kiselinske baterije [24]

#### 4.2.5. Vanadij redox baterije

Redox protočne baterije predstavljaju vrstu punjivih baterija koje pohranjuju električnu energiju u dva vanjska spremnika elektrolita koji obično sadrže topive redox parove. Veličine samih spremnika temelje se na zahtjevima skladištenja energije. Pumpe se koriste za prijenos tekućih elektrolita iz spremnika za skladištenje u odjeljke za baterije koji sadrže protočne elektrode, gdje procesi oksidacije i redukcije pretvaraju kemijsku energiju u električnu energiju tijekom pražnjenja, a elektroliti dobivaju kemijsku energiju s dovedenom snagom tijekom punjenja. [30]

Elektroliti koji prolaze kroz anodu i katodu nazivaju se anolit odnosno katolit. Između anodnog i katodnog odjeljka postoji separator koji selektivno dopušta križni transport neaktivnih vrsta kemikalija za održavanje električne neutralnosti i ravnoteže elektrolita. [30]

Vanadijum redox baterije jedne su od najnaprednijih protočnih baterijskih sustava s redox parovima ( $V^{2+} / V^{3+}$  i  $V^{4+} / V^{5+}$ ) u anolitu i katolitu elektrolitskih spremnika. Zbog topljivosti



**Slika 4.16.** Prikaz strukture vanadij redox baterije [30]

VOSO<sub>4</sub> ovog početnog elektrolita, stabilnost vanadijevi vrsta, ukupna koncentracija SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i vanadija se uobičajeno kontrolira pri < 5 i 2M (M – mol/l). Rješenje V<sup>4+</sup> nastaje otapanjem početnog elektrolita VOSO<sub>4</sub> u otopinama sumporne kiseline. [30]

Tijekom ciklusa punjenja / pražnjenja, H<sup>+</sup> ioni se izmjenjuju između dva spremnika elektrolita kroz polimernu membranu propusnu za vodik. Tijekom postupka punjenja, V<sup>3+</sup> ioni pretvaraju se u V<sup>2+</sup> ioni na negativnoj elektrodi, dok u isto vrijeme V<sup>4+</sup> ioni se pretvaraju u V<sup>5+</sup> ione otpuštanjem elektrona. Jedna ćelija vanadij redox baterije stvara standardni napon od 1,26 V na 25 °C. Za veći napon, pojedinačne ćelije se slažu u niz koristeći par bipolarnih ploča za svaku jedinicu. [30]

Zbog ovog posebnog načina rada, kapacitet energije i snage lako se može povećati povećanjem volumena spremnika odnosno veličine elektroda. Protočna baterija ima prednost visokog kapaciteta energije i snage, niskog samopražnjenja, visoke učinkovitosti (75 % - 85 %) i dugog vijeka trajanja (> 15 godina odnosno > 10000 ciklusa). Protočna baterija je prikladna za veliki stacionarni baterijski sustav s relativnom visokom gustoćom energije. Gustoća energije vadijeve redox protočne baterije je 40 Wh/kg. [32]

S druge strane, potrebe za pumpama, senzorima, upravljanjem napajanjima i sekundarnim zadržavanjem čini ih neprikladnima za male primjene pohrane energije. Kao sustavi za pohranu električne energije, vanadij redox baterije su bolje za višemegavatne snage i megavatsatne energije. Elektrane koji koriste vanadij redox baterije za vršnu regulaciju i skladištenje energije spojene su na mrežu i ukupna izgradnja je iznosila 200 MW/800 MWh. Prosječna cijena protočnog

baterijskog sustava s projektiranim trajanjem skladištenja od 4 h je oko 2000 – 3000 \$/kWh. Prema tome točke koje treba poboljšati su smanjenje troškova, poboljšanje gustoće energije i izbjegavanje štetnog curenja plina. [32]



*Slika 4.17.* Vanadij redox baterije [33]

#### **4.2.6. Rastaljena natrijeva baterija ( Molten Na battery)**

Rastaljena Na baterija uključuje natrijevu–sumpurnu bateriju (Na–S) i natrijevu–metal halogenidnu bateriju (ZEBRA baterija).

Natrij–sumporne baterije pretvaraju električnu energiju u kemijski potencijal putem elektrokemijskih reakcija. Tijekom faze pražnjenja, svakom atomu natrija s metalne natrijeve elektrode oduzima se jedan elektron i tako stvoreni natrijevi ioni migriraju prema odjeljku pozitivne elektrode kroz elektrolit. Elektroni oslobođeni od metalnog natrija prolaze kroz krug opterećenja i vraćaju se na pozitivnu elektrodu. Povratne elektrone hvata rastaljeni sumpor da bi se transformirao u polisulfid. Tok negativnog naboja elektrona je uravnotežen sa pozitivno nabijenim ionima natrija koji migriraju u odjeljak pozitivne elektrode. Ovaj proces je obrnut tijekom punjenja baterije. [30]

Temperatura baterije se obično održava  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  kako bi se olakšao proces punjenja i pražnjenja. Natrij–sumporna baterija daje napon od 1,78 – 2,208 V na  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ovisno koja kemijska reakcija se koristi. Vrlo su učinkovite s učinkovitošću od obično 89 %. [30]

Japanska tvrtka NGK Insulators proizvela je Na–S bateriju koja se može puniti brzinom od 50 kW 7 h. Gustoća energije i energetska učinkovitost ove baterije su  $151\text{ kWh/m}^3$  odnosno 85 %. Osim

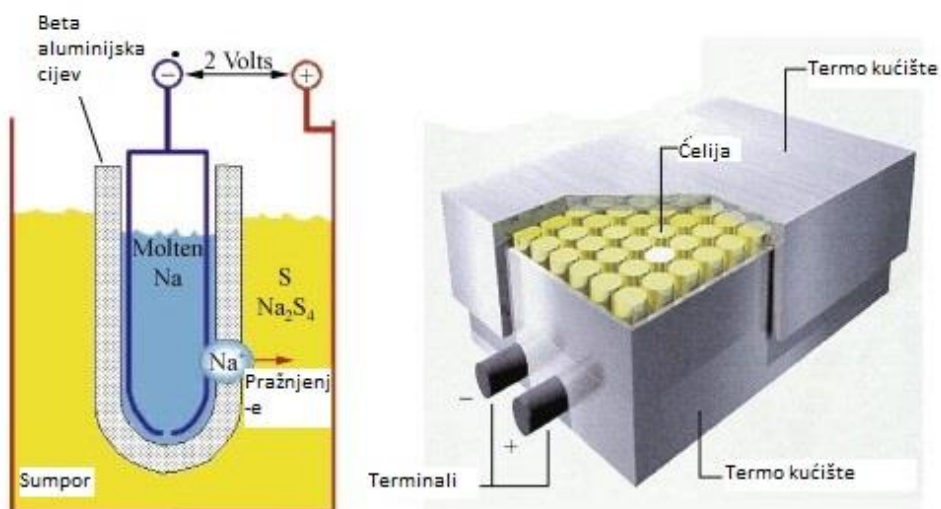
toga, American Electric Power instalirao je 1 MW Na–S baterijskog sustava koji se sastoji od 20 pojedinačnih Na–S baterijskih modula od 50 kW. Ovaj baterijski sustav bi mogao pohraniti više od 6 MWh električne energije s kratkim intervalom od oko 1 s ili manje. [32]

Natrij–metal halogenidne (ZEBRA) baterije izrađene su s polukrutom katodom koja je napravljena od poroznih metalnih halogenih struktura, gdje impregnirani rastaljeni  $\text{NaAlCl}_4$  predstavlja drugi elektrolit. Slično Na–S bateriji, natrij–metal halogenidne baterije obično su konstruirane na cjevastoj beta–aluminij membrani. [30]

Na–metal kloridne baterije nude standardni napon od 2,58 V na 300 °C. Tijekom pražnjenja, natrijevi ioni se prenose kroz beta–aluminijevu elektrodu od anode do katode, reducirajući  $\text{NiCl}_2$  u Ni putem migracije natrijevih iona u rastaljenoj  $\text{NaAlCl}_4$  kao drugi elektrolit. [30]

Kao jedan od potencijalnih stacionarnih baterijskih sustava, ZEBRA baterije imaju prednosti u odnosu na natrij–sumpornu bateriju kao što su viši napon, nulto samopražnjenje i sigurniji način kvara. [32]

ZEBRA bateriju na bazi Na– $\text{NiCl}_2$  izumio je Coetzer 1978. godine, pri čemu je baterija testirana i pokazala je jako dobre performanse. Nakon toga, predložena je napredna ZEBRA baterija na bazi Na– $\text{FeCl}_2$  za stacionarne primjene. Ove baterije su imale srednju radnu temperaturu (< 200 °C), visoku gustoću energije (135 Wh/kg) i dobru ukupnu energetska učinkovitost (> 92 %). Također, baterije na bazi Na– $\text{CuCl}$  pokazale su visoke performanse na sobnoj temperaturi. Rezultati ispitivanja pokazali su da ove baterije imaju vrhunsko zadržavanje kapaciteta preko 1000 ciklusa punjenja/pražnjenja i povratnu učinkovitost od 97 % na sobnoj temperaturi. [32]



**Slika 4.18.** Prikaz unutrašnjosti baterije [34]



#### 4.2.7. Nova metal ionska baterija

Nedostatak litija i veliki troškovi natjerali su istraživače da pronadu nove materijale koji bi omogućili jednake i bolje performanse pri skladištenju energije. Alternative za litij–ionske baterije su metal–ionske baterije kao što su: [32]

- Aluminij–ionska baterija
- Natrij–ionska baterija
- Magnezij–ionska baterija
- Kalcij–ionska baterija
- Vodena–cink ionska baterija
- Dual–ion baterija

Tehnologiju aluminij–ionskih baterija prvi put je otkrila Dai grupa 2015. godine. Prema istraživanjima, ova vrsta baterije mogla bi se u potpunosti napuniti unutar 1 min, a životni vijek mogao bi biti do 7500 ciklusa uz malo smanjenje kapaciteta. Također, ima izvrsne performanse pri gustoći snage (3000 W/kg), ali nema idealnu gustoću energije (80 Wh/kg). Ultrabrzo vrijeme punjenja i dugotrajna izdržljivost čine da aluminij – ionska baterija ima potencijal i prednost da bude kandidat za veliki stacionarni baterijski sustav za obnovljivu energiju. [32]

Natrij–ionska baterija je obećavajuća tehnologija za stacionarni baterijski sustav zbog velikih izvora natrija i niske cijene. Dostupnost natrij–ionske baterije istraživana je paralelno sa litij–ionskom baterijom 70-ih godina, ali spori napredak je uvelike ukinuo proizvodnju natrij–ionske baterije. Niska specifična energija, slaba ciklička stabilnost, niska početna kulonska učinkovitost, velika ekspanzija volumena i visok sigurnosni rizik su ključna pitanja koja se moraju riješiti prije praktične primjene i te karakteristike se uglavnom odnose na materijale anode, katode i elektrolita. Faradion (UK) je 2015. godine izradio natrij–ionsku bateriju od 120 Wh/kg i uspješno je stavio u električne bicikle i također, TIAMAT (Francuska) je razvio cilindričnu natrij–ionsku bateriju s gustoćom energije od 90 Wh/kg i radnim vijekom više od 2000 ciklusa, ali gustoća energije je bila daleko od zahtjeva za skladištenje energije. Ova tehnologija je još uvijek nezrela, ali posljednjih godina je poraslo interesiranje u ovaj oblik tehnologije i očekuje se da će uskoro biti dostupna. [32]

Magnezij–ionska baterija se smatra dobrim kandidatom za skladištenje energije zbog velikog izvora magnezija i niske cijene. Magnezijeva–ionska baterije zbog visokog teoretskog specifičnog kapaciteta (2205 mAh/g) i volumetrijskog kapaciteta (3383 mAh/cm<sup>3</sup>) usporediva je s litij–ionskom baterijom. Međutim, slično kao i s natrij–ionskom baterijom, napredak magnezij–ionske

baterije je ograničen svim komponentama. Stvarna izvedba u eksperimentima daleko je ispod teorijskog kapaciteta zbog niskog napona pražnjenja i kapaciteta. Nedostatak visokoučinkovitih elektrolita i anodnog/katodnog materijala predstavlja izazov za praktičnu primjenu zbog čega je ova baterija još uvijek u fazi istraživanja i daleko od upotrebe. [32]

Kalcij–ionsku bateriju karakterizira niski redox potencijal (3,04 V u odnosu na standardnu vodikovu elektrodu), veliki volumetrijski kapacitet (2073 mAh/cm<sup>3</sup>), brza kinetika difuzije iona u čvrstim materijalima elektroda i velika gustoća snage. Pasivirajući slojevi na kalcijevoj anodi i razgradnja elektrolita problemi su s kojim se suočavaju ove baterije zbog nedostataka materijala za elektrode i elektrolite. [32]

Vodena cink – ionska baterija predstavlja novu komponentu za skladištenje energije. Prednost visokog teorijskog kapaciteta (820 mAh/g, 5855 mAh/cm<sup>3</sup>), niskog redox potencijala (0,76 V u odnosu sa standardnom vodikovom elektrodom), velike zastupljenosti, niske toksičnosti i intrinzične nezapaljivosti omogućuje ovim baterijama da budu kandidat za skladištenje energije. Međutim, postoje dva problema koja utječu na njegovu elektrokemijsku izvedbu. Prvi problem je stabilnost MnO<sub>2</sub> katode koji nastaje zbog puno jače elektrostatske interakcije između Zn<sup>2+</sup> i O<sup>2-</sup>, dok drugi je problem nejednoliko skidanje i nanošenje iona Zn na površinu anode. Nizak praktični kapacitet, veliki početni ireverzibilni gubitci, loša stabilnost ciklusa i vijek trajanja problemi s kojim se ove baterije suočavaju i zbog toga su još u procesu istraživanja. [32]

Dual–ion baterija se dosta razlikuje od ostalih metal–ion baterija. Pozitivni i negativni ioni u elektrolitu prenose se na katodu, odnosno na anodnu elektrodu u procesu pražnjenja. Istodobno kretanje dva iona skraćuje put prijenosa i ubrzava proces punjenja i pražnjenja. Jedna od najatraktivnijih prednosti jest brza kinetika interkalacije, visoki radni napon, niska cijena, visoka gustoća energije, ali poput i drugih novih baterija, materijale anodne elektrode, katodne elektrode i elektrolita je potrebno istraživati kako bi se dobila veća stabilnost materijala. [32]

### **4.3. Primjena rabljenih baterija iz električnih automobila**

Globalno tržište električnih vozila svake godine raste zbog pritiska vlada država na proizvođače vozila da proizvode vozila koji manje zagađuju okoliš. Iako su električna vozila prihvatljiva za okoliš i klimu nego vozila s motorima s unutarnjim sagorijevanjem, odlaganje baterija na kraju njihovog životnog ciklusa pokazalo se kao ozbiljan ekološki problem. Litij – ionske baterije koji

se koriste sadrže metale i otrovne materijale koji nepovoljno utječu na okoliš i predstavljaju rizik za ljudsko zdravlje. [4]

Proizvođači električnih vozila preporučuju zamjenu baterija električnih vozila kada se njihovo zdravstveno stanje smanji na oko 70 – 80 %, otprilike 8 godina ili 160000 km. Međutim, te baterije još uvijek imaju dovoljno energije da se koriste za druge manje zahtjevne svrhe drugog životnog vijeka, kao što stacionarni baterijski sustavi i stoga se mogu ponovno upotrijebiti uz odgodu konačne faze recikliranja do 20 godina. [4]

Zahtjevi stacionarnih baterijskih sustava su niži od onih za električna vozila, što potvrđuje da gubitak snage i kapaciteta ponovno korištenih baterija nije velik problem za većinu stacionarnih baterijskih sustava. [4]

U nastavku objasniti ćemo način na koji se uklanja baterija iz električnih vozila i važne karakteristike koje treba ispitati prije ponovne upotrebe baterije. [4]

#### **4.3.1. Ispitivanje baterije za ponovno upotrebu**

Mohammed Hussein Saleh Mohammed Haram i njegovi suradnici proveli su proces uklanjanja baterije iz vozila i potom su testirali njegove performanse kako bi se baterija u narednom periodu mogla koristiti u stacionarnim baterijskim sustavima. U ovom projektu korištena je baterija iz Nissana Leaf (2012. godina). [35]

Proces testiranja baterije sastoji se od: [35]

- Uklanjanje baterije
- Testa napona otvorenog kruga
- Dolaznog testa izolacije visokog napona
- Testa kapaciteta
- Testa ciklusa punjenja / pražnjenja
- Ispitivanja unutarnjeg napona
- Testa samopražnjenja

Okolinu rastavljanja litij – ionske baterije vrlo je važno uzeti u obzir. Okolina ne smije uzrokovati kondenzaciju zbog visoke temperature ili vlage te mora se spriječiti bilo kakav ulazak metalnog praha, masti, prašine i drugih tvari. Pod mora biti suh, a radni prostor mora biti barem veličine jednog cijelog auta ili veći. [35]

Budući da električna vozila sadrže visokonaponske baterije, postoji opasnost od strujnog udara, curenja struje ili drugih nezgoda ako se s ovim komponentama ne rukuje ispravno. Mora se koristiti izolirana zaštitna oprema kako bi se spriječili električni udari. Izolirane rukavice moraju imati barem izolacijsku izvedbu za 1000 V/300 A. Demontažu moraju izvršiti 2 osobe pri čemu prvo je potrebno ukloniti servisni utikač kako bi se isključili visokonaponski krugovi prije nastavka s rastavljanjem. Tijekom rastavljanja mora se koristiti izolirana oprema kako bi se osiguralo da se terminali ne dodiruju s pomoću opreme koja se koristi. [35]

Prije samog početka rastavljanja, potrebno je izdvojiti podatke iz sustava za upravljanje baterijom koja pohranjuje povijesne podatke o bateriji i može biti od značajne pomoći pri dijagnosticiranju baterije. Također, prije tehničkog testiranja, potrebno je vizualno pregledati bateriju zbog mogućih oštećenja. [35]

**Tablica 4.2.** Informacije o bateriji [35]

<b>Komponente</b>	<b>2012 Nissan Leaf 1</b>
Tip baterije	Litij – ionska baterija (Laminate type)
Kemijski sastav	LiMn2O4 s LiNiO2 / Grafit
Težina baterije	294 kg
Dimenzije paketa	1570,5 mm x 1188 mm x 264,9 mm
Težina modula	3,75 kg
Ukupna težina modula	180 kg (48 x 3,75 kg)
Dimenzije modula	320 mm x 225 mm x 36 mm
Ukupni napon	364,8 V
Napon modula	7,6 V
Napon ćelije	3,8 V
Maksimalni napon punjenja ćelije	4,2 V
Minimalni napon punjenja ćelije	2,5 V
Ukupni kapacitet	24 kWh
Kapacitet modula	65 Ah
Kapacitet ćelije	32,5 Ah
Broj ćelija	192
Broj modula	48 (2P2S)
Hlađenje	Pasivno hlađenje



**Slika 4.19.** Prikaz komponenti baterije [35]

Za Nissan Leaf 1, svaki modul sadrži 4 ćelije, gdje su 2 spojene paralelno koje su u serijskom spoju s još 2 paralelne ćelije. Terminal 1 je pozitivan dok je terminal 3 negativan, te terminal 2 se koristi za BMS (baterijski sustava upravljanja) za nadzor i kontrolu punjenja i pražnjenja. Terminal 2 ne smije se koristiti za punjenje ili pražnjenje visokom strujom. [35]

Tehničko testiranje je započeto s testom napona otvorenog kruga. Svrha ovog testa je mjerenje stanja napunjenosti baterije. Prvo, prije rastavljanja baterije, mjeri se napon otvorenog kruga cijele baterije. Nakon što se rastave moduli ili ćelije, mjeri se napon otvorenog kruga svakog modula i ćelije. Ukupno kombinirano mjerenje napona otvorenog kruga ćelija mora odgovarati izmjenom naponu modula, a ukupno kombinirano mjerenje napona modula mora odgovarati izmjenom naponu otvorenog kruga cijele baterije. Sva odstupanja moraju se zabilježiti, a neispravne ćelije odvojiti radi dodatnog testiranja. [35]

Ispitivanje izolacije dolaznog visokog napona za baterije važan je korak u procjeni sigurnosti i performansi. Namjera je osigurati da terminali unutar baterijskog sustava su adekvatno izolirani od drugih dostupnih vanjskih dijelova koji bi mogli provodi struju. Ovaj test pomaže u sprječavanju kratkog spoja, koji može dovesti do požara ili strujnog udara. Nakon puštanja 500 V istosmjerno tijekom najmanje 60 s, otpor izolacije trebao bi najmanje iznositi 100  $\Omega/V$  za istosmjerne krugove i 500  $\Omega/V$  za izmjenične krugove. [35]

Kapacitet baterije mora se ispitati kako bi se odredio preostali kapacitet koji je upotrebljiv za ponovnu primjenu. Test se provodi na osnovu punjenja i pražnjenja baterije, pri čemu maksimalni napon punjenja u ovom slučaju je 8,4 V, a minimalni napon pražnjenja je 5 V. U početku testa,

baterija mora biti napunjena do maksimalnog napona i zatim se mora odmarati od 1 – 2 h prije nego što se potpuno isprazni na minimalni napon. Na samom kraju, bateriju je potrebno napuniti do maksimalnog napona, te nakon što je ispitivanje dovršeno, izračunava se stanje zdravlja (SOH) koje je povezano s preostalim kapacitetom. Stanje zdravlja baterije koje se tiče kapaciteta definira se kao omjer izmjerenog kapaciteta ( $Q_m$ ) i nazivnog kapaciteta ( $Q_n$ ). [35]

$$\text{SOH [\%]} = (Q_m/Q_n) \times 100 \quad (3-7)$$

Test ciklusa punjenja / pražnjenje se jako važan zbog nepravilnosti prilikom punjenja i pražnjenja. Baterije se testiraju punjenjem i pražnjenjem na sobnoj temperaturi prilikom čega temperatura, napon i struja njihovih ćelija i modula se pomno prate. [35]

Ispitivanje unutarnjeg otpora mora se provesti na cijelom paketu baterije ako se namjerava koristiti kao cjelina ili na pojedinačnim modulima ili ćelijama. Postoje mnogi načini provođenja ispitivanja unutarnjeg otpora kao što je metoda izmjenične struje, metoda toplinskih gubitaka, metoda strujnih koraka koja se može izračunati preko struje isključenja ili preklopne struje i dr. Uobičajena metoda za mjerenje unutarnjeg otpora uključuje slanje strujnih impulsa kroz bateriju. Promatranjem rezultirajućeg pada napona na bateriji i korištenjem Ohmovog zakona, utvrđuje se otpor. [35]

Ispitivanje samopražnjenja treba provesti na ćelijama i modulima koji se namijenjeni za ponovno primjenu. Baterija se u potpunosti puni do maksimalnog napona i zatim se čuva na sobnoj temperaturi minimalno 1 dan. Napon otvorenog strujnog kruga ove napunjene baterije bilježi se u intervalima od 5 – 10 min, 1 – 2 h i 24 h nakon punjenja te nakon bilo kojeg duljeg trajanja skladištenja. Ako baterija pokazuje stopu samopražnjenja veću od smjernice proizvođača onda se odbacuje. [35]

#### **4.3.2. Rezultati mjerenja**

Prilikom testiranja napona otvorenog kruga, zbroj dviju ćelija uspoređen je s mjerenjem modula kako bi uočile razlike. Najveća zabilježena razlika bila je 0,75 %, što se smatra normalnim. Zbroj svih modula je iznosio 378,38 V, te je uspoređen s ukupnim naponom otvorenog kruga paketa koji je iznosio 378,32 V pri čemu je zaključeno da je sve ispravno. [35]

Ispitivanje izolacije obavljeno je s pomoću Megger testera i sva su mjerenja bila iznad 200 M $\Omega$  što ukazuje na to da su baterije dobro izolirane. [35]

Ispitivanje kapaciteta provedeno je način koji smo prethodno opisali. Moduli su najprije potpuno napunjeni do 8,4 V, a zatim su mirovali 1 h prije potpunog pražnjenja do minimalnog napona od 5 V pri konstantnoj struji od 0,2 C, što bi bilo 13 A za slučaj Nissan Leaf modula od 65 Ah. Utvrđeno je da ukupni prosjek iznosi 31,48 Ah što predstavlja 48,43 % stanja zdravlja (SOH). Maksimalni pronađeni kapacitet bio je 32,99 Ah što predstavlja 50,76 % stanja zdravlja (SOH) dok je najmanji pronađeni kapacitet među svih 48 modula bio 29,54 Ah što predstavlja 45,45 %. [35]

Što se tiče testa unutarnjeg otpora, baterija je bila potpuno napunjena brzinom od 0,2 C (13 A) i zatim je mirovala 1 h. Nakon toga, baterija se ispraznila istom brzinom struje do 90 % stanja napunjenosti. Mjerenje unutarnjeg otpora zatim je prevedeno s pomoću Arbin Battery Tester – a gdje je uočeno da postoje određene razlike. [35]

Prilikom testa samopražnjenja nije primijećen značajan pad napona niti je bilo velikih razlika između dvije ćelije svakog modula. [35]

Što se tiče baterija s prosječno 48,43 % stanja zdravlja (SOH), one se mogu koristiti u sustavima s malim zahtjevima kao što su sustavi za pohranu energije za različite primjene koje ne zahtijevaju visoku struju pražnjenja, a takav primjer je solarna ulična svjetiljka na solarni pogon. [35]

## **5. Uloga baterijskog spremnika u elektroenergetskom sustavu**

Baterijski sustavi za pohranu energije predstavlja elektro-kemijski uređaj koji služi za pohranu električne energije s pomoću obnovljivih izvora energije, elektroenergetske mreže i zatim njenu distribuciju potrošačima. Dvije glavne tehnologije koje se primjenjuju su litij – ionske i protočne baterije. Iako svaka tehnologija ima svoje snage i slabosti, litij – ionska baterija je postala najpopularniji izbor zahvaljujući padu troškova i električnim vozilima. Mogu se koristiti u razne primjene kao što je regulacija frekvencije, odgodu ulaganja u prijenosne i distribucijske infrastrukture, integraciju obnovljive mreže i u mikromrežama. [36] Pored navedenih primjena, potreba za fleksibilnim sustavima raste s implementacijom obnovljivih izvora energije, što je omogućilo baterijskim sustavima da imaju značajnu ulogu u elektroenergetskim sustavima. Primjene baterijskih spremnika na razini mreže mogu se podijeliti na: [37]

- Na razini prijenosne mreže
- Na razini distribucijske mreže

### **5.1. Primjena na razini prijenosne mreže**

Primjena baterijskih spremnika postaje sve zastupljenije na razini prijenosne mreže zbog energetske tranzicije koja teži ekološki prihvatljivoj električnoj energiji. Ugradnjom baterijskih spremnika omogućuje razne prednosti i mogućnosti koje će se prikazati u nastavku koje doprinose u radu prijenosne mreže.

#### **5.1.1. Kvaliteta električne energije**

Kvaliteta električne energije se odnosi na neprekidnost napajanja i kvalitetu napona. Dobra kvaliteta električne energije osigurava pouzdan, neprekidnut i raspoloživ rad mreže gdje je potrebna energija dostupna u bilo kojem trenutku.

Na primjeru mjerenja i testiranja punionice SCHARK nazivne snage 11 kW, prikazat će se parametri i rezultati mjerenja koji su važni za kvalitetu električnu energije. Mjerenja su provedena na temelju norme EN 50160 koja obuhvaća kvalitetu napona u distribucijskim mrežama u normalnom pogonu.

EN 50160 normu karakterizira mrežna frekvencija, amplituda napona, THDI (ukupna harmonijska distorzija), nesimetrija napona, jakost treperanja (flikeri), promjena napona itd.



**Tablica 5.1.** Prikaz rezultata mjerenja parametara punionice SCHARK

<b>Punionica SCHARK</b>	
Norma	EN 50160
Područje primjene	Distribucijska mreža
Mrežna frekvencija	50 Hz
Napon	400 V
Promjena napona	$\pm 2 \%$
THDI	2 %
Flikeri	Plt = 1
Nesimetrija napona	$\pm 0,5 \%$
Snaga	10,449 kW (11 kW)
Prividna snaga	18,037 kVA
Jalova snaga	16,554 kVar

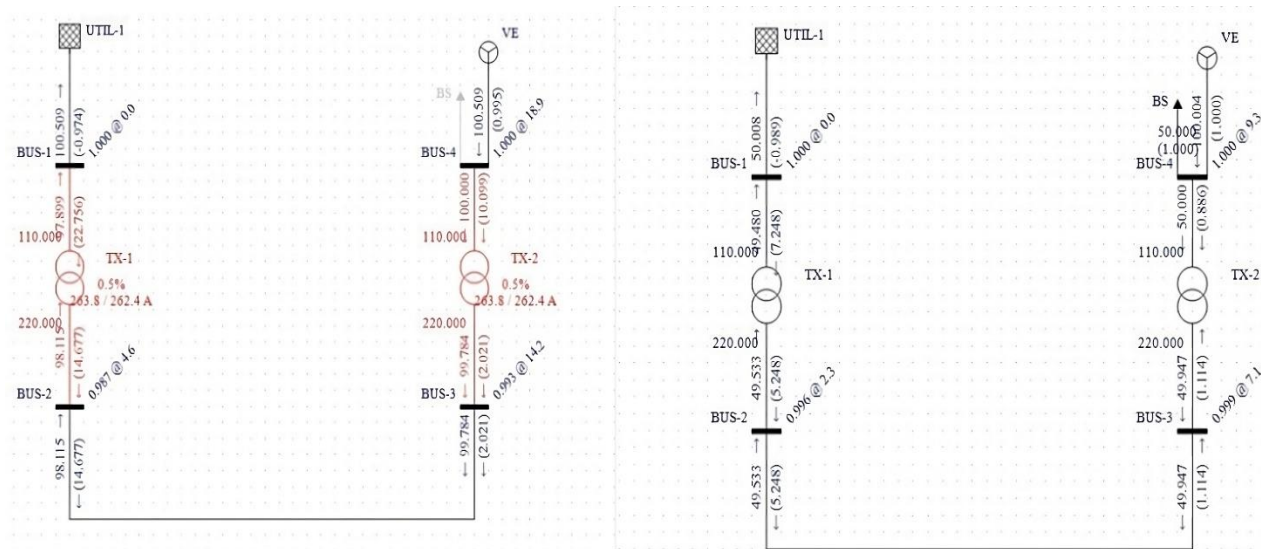
Rezultati mjerenja punionice SCHARK prikazali su da navedeni parametri ne odstupaju od nazivnih i dopuštenih vrijednosti pri čemu se osigurava dobra kvaliteta električne energije.

Loša kvaliteta električne energije se očituje kroz propadanje napona, nesimetriju napona, prekid napajanja, kvaru opreme, gubitcima u sustavu i pregrijavanju transformatora.

### **5.1.2. Upravljanje zagušenjima**

Zagušenje u mreži predstavlja preopterećenje prijenosne mreže do kojeg dolazi ako dostupnu energiju nije moguće dostaviti potrošačima jer prijenosna mreža nije u stanju prenijeti potrebnu energiju. Zagušenje mreže se očituje prilikom ugrožavanja naponske i kutne stabilnosti sustava te tokova snaga koji preopterećuju elemente mreže. [38]

Na temelju simulacije, u programu EasyPower prikazat će se način na koji se može riješiti zagušenje u mreži s pomoću baterijskog spremnika energije. U simulaciji na sabirnicu je dodana vjetroelektrana snage 100 MW koja uzrokuje zagušenje u mreži i preopterećenje transformatora. Dodavanje baterijskog spremnika na sabirnicu regulirat će se preopterećenje transformatora i tako će se riješiti zagušenje u mreži. Na sljedećoj slici prikazat će se primjer simulacije s pomoću kojeg se može upravljati zagušenjima u mreži.



**Slika 5.1.** Prikaz simulacije prijenosne mreže

### 5.1.3. N–1 kriterij sigurnosti

N–1 kriterij sigurnosti je kriterij korišten u elektroenergetskom sustavu koji pruža pouzdanost i stabilnost elektroenergetskoj mreži. N–1 kriterij sigurnosti osigurava rezervno napajanje korisnicima ako se dogodi ispad bilo kojeg elementa mreže, kako bi frekvencija, napon i ostale veličine ostale unutar graničnih vrijednosti. [38]

Primjenom baterijskih spremnika može se osigurati pouzdanost N–1 kriterija sigurnosti na način koji je naveden u prethodnom poglavlju. Prilikom zagušenja mreže, ruši se i N–1 kriterij sigurnosti prilikom čega se ugrađuje baterijski spremnik na lokacije zagušenja mreža, koji ima ulogu da smanji preopterećenje mreže i elemenata. [39]

Sama implementacija baterijskih spremnika je isplativa samo u slučaju da će obavljati i druge zadaće u mreži uz osiguravanje pouzdanosti N–1 kriterija sigurnosti. Pri tome postoje druga rješenja koja su potencijalno isplativija kao što je ugradnja prijenosnih vodova većih poprečnih presjeka, metoda razdvajanja sabirnica i ugradnja autotransformatora. U današnje vrijeme najbolje rješenje se kombinacija različitih alternativa. [39]

### 5.1.4. Regulacija napona i jalove snage

Regulacija napona postiže se upravljanjem tokovima jalove snage zbog induktivnog karaktera prijenosnih vodova. Naponska stabilnost predstavlja odražavanje napona unutar dozvoljenih

granica za određene naponske razine (za prijenosnu mrežu 110 kV, 220 kV i 400 kV). Do rušenja naponske stabilnosti unutar mreže može doći prilikom preopterećenja, ispada elementa iz mreže, neplaniranih događaja koje stvaraju poremećaje u mreži. [39]

Kompenzacijom jalove snage pored što se regulira napon, poboljšava se i faktor snage pri čemu se smanjuju gubitci. Baterije kao spremnici energije nemaju veliku ulogu pri regulaciji napona i jalove snage jer elektronički pretvarači koji se nalaze unutar baterije mogu upravljati jalovom snagom. Ako se dogodi naponska nestabilnost u mreži, potrebno ju je što prije ukloniti i zbog toga se koriste uređaji koji imaju brzi odziv. [39]

### **5.1.5. Sposobnost samostalnog pogona**

Sposobnost samostalnog pogona odnosi se na: [38]

1. Sposobnost crnog starta
2. Sposobnost otočnog pogona
3. Sposobnost pogona u praznom hodu

Crni start predstavlja pokretanje proizvodne jedinice bez vanjskog napajanja kako bi se nakon pada sustava osigurala radna snaga za energizaciju prijenosne i distribucijske mreže i pokretanje drugih proizvodnih jedinica. [39]

Otočni pogon je stanje u kojem proizvodna jedinica može podnijeti djelomično opterećenje tijekom određenog vremenskog perioda u odvojenom dijelu elektroenergetskog sustava. Za otočni pogon je nužan sustav regulacije koji regulira snagu jer radna i jalova snaga moraju biti jednake u bilo kojem trenutku. Prilikom prijelaza proizvodnih jedinica u prazni hod, osigurava se napajanje vlastite potrošnje. [39]

Baterijski spremnici u ovoj ulozi primjenjuju se kao rezerva djelatne snage i mogu pohraniti dio energije na sebe kako sustav ne bi bio preopterećen. Tijekom preuzimanja preopterećenja, baterija prelazi u ciklus punjenja i na taj način stvara rezervu za naknadne potrebe. [39]

## **5.2. Primjena na distribucijskoj mreži**

Baterijski spremnici za pohranu energije danas su široko prihvaćene na razini distribucijske mreže. Baterijski spremnici zbog dobrih tehničkih karakteristika, jednostavne ugradnje i održavanja sve učestalije se ugrađuju u niskonaponske i srednjenaponske mreže gdje je česta primjena litij -

ionskih baterija. U kombinaciji s obnovljivim izvorima energije, baterijski spremnici se najbolje mogu iskoristi za umanjene poremećaja u mreži i pohranu energije ako se mreža preoptereti da bi se izbjeglo isključivanje obnovljivih izvora energije. [40]

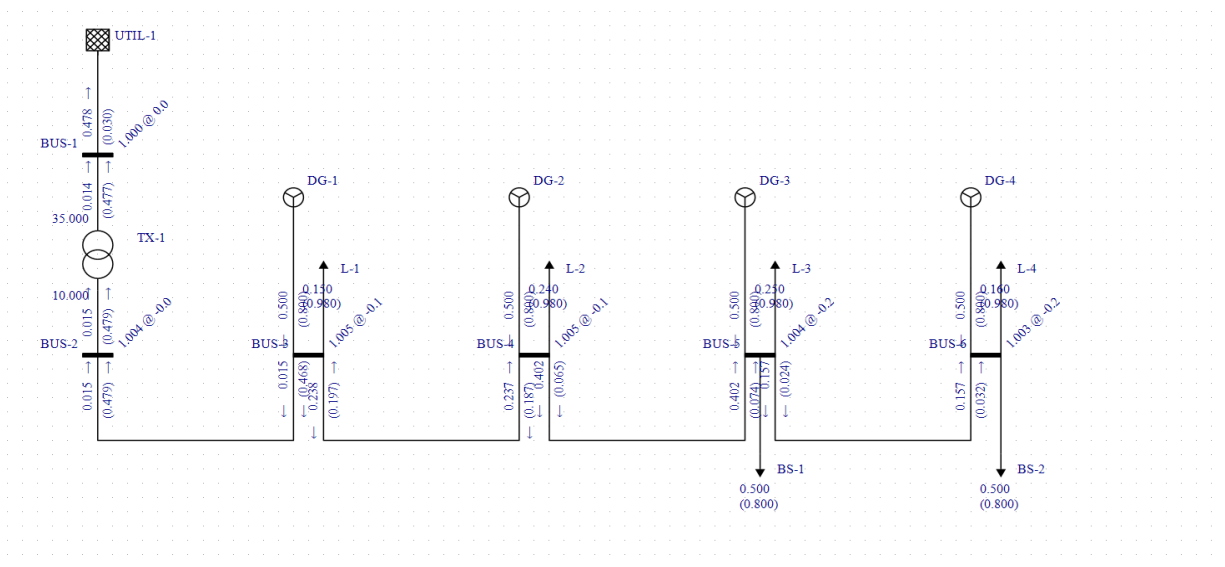
Mreža u svakom trenutku se može preoptereti i u tom slučaju baterijski spremnici imaju zadaću da upravljaju zagušenjima u mreži i odgađaju ulaganja u distribucijsku mrežu, reguliraju napone i jalove snage, povećaju kvalitetu napona i kompenziraju jalove snage. Ove mogućnosti omogućuju mreži sigurnost i pouzdan rad. U sljedećim poglavljima će se prikazati primjeri korištenje baterijskih spremnika na razini distribucijske mreže. [40]

### 5.2.1. Odgoda ulaganja u distribucijsku mrežu

Primjenom baterijskih spremnika na brz i učinkovit način mogu se ukloniti ograničenja u mreži što doprinosi funkcionalnosti i boljoj iskoristivosti mreže.

Na sljedećem primjeru simulacije distribucijske mreže radi smanjenja opterećenja mreže na posljednje dvije sabirnice su postavljena dva baterijska spremnika koji imaju ulogu da preuzmu dio opterećenja na sebe i taj način odgode ulaganja u distribucijsku mrežu.

U simulaciji je korišten transformator (35 kV/10 kV) na čije sabirnice je spojeno ukupno opterećenje od 800 kW, presjeka vodiča od 120 mm<sup>2</sup>. Pri uključivanju simulacije opterećenje vodova je bilo veće od dozvoljenog. Pri tome, kako bi smanjili opterećenje, simulirane su dvije baterije od ukupno 1000 kW koje su pokupile dio opterećenja na sebe, i tako smanjile opterećenje vodova na razini za normalan rad sustava. Opterećenje vodova je ispod 10 %.

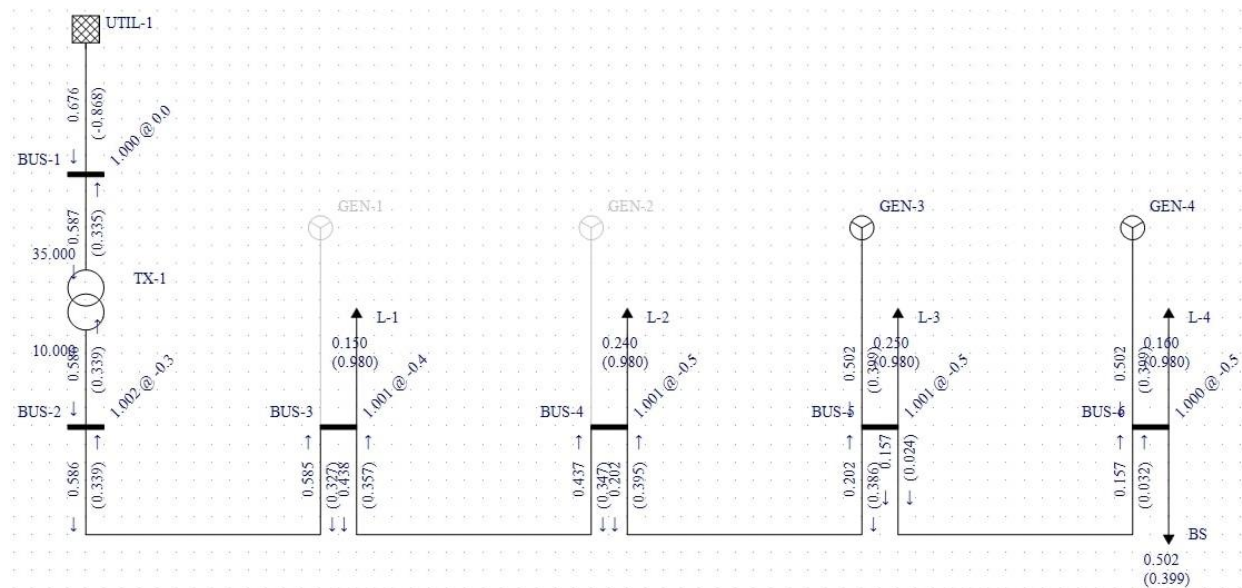


Slika 5.2 Prikaz simulacije odgode ulaganja u distribucijsku mrežu

## 5.2.2. Regulacija napona i jalove snage

Smanjenje napona u distribucijskoj mreži vrši se s pomoću regulacije tokova jalove snage. Na sljedećem primjeru simulacije prikazat će se način na koji se može regulirati napon korištenjem baterijskog spremnika.

U distribucijskoj mreži korišten je transformator (35 kV/10 kV) na čije sabirnice je priključeno ukupno opterećenje od 800 kW. U ovoj simulaciji su aktivirana samo posljednja 2 generatora, prilikom čega je došlo do porasta napona. Regulacijom jalove snage i priključivanje baterijskog spremnika od 500 kW na posljednju sabirnicu, smanjeni su naponi na dozvoljene razine. Na ovaj način se može regulirati napon i smanjiti rizik od povišenja napona pri čemu osiguravamo pouzdan i siguran rad sustava.



*Slika 5.3.* Prikaz regulacije napona i jalove snage

## 6. USPOREDBA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA STACIONARNOG BATERIJSKOG SUSTAVA

Usporedba tehnologija stacionarnog baterijskog sustava može se izvršiti na različite načine. Jedna od najvažnijih usporedbi je tehnička usporedba tehnologija, prema kojoj se vidi koja baterija ima najbolje mogućnosti i specifikacije.

Na sljedećoj tablici prikazat će se usporedba bitnih veličina baterija prema kojoj se može zaključiti koja tehnologija baterija je najbolja za upotrebu.

**Tablica 6.1** Prikaz bitnih veličina baterija

Vrsta baterija	Gustoća energije (kWh/m <sup>3</sup> )	Gustoća snage (kW/m <sup>3</sup> )	Snaga (MW)	Vrijeme odziva (ms-h)
Litij – ionska baterija (Li-ion)	200-500	1000-5000	0-100	20 ms – 1 s
Nikal-metal-hidridna baterija (NiMH)	83-170	7,8-580	0,01-3	-
Nikal-kadmijeva baterija (NiCd)	50-150	150-300	0-40	20 ms – 1 s
Olovno-kiselinske baterija (Pb-Acid)	50-80	10-400	0-40	5-10 ms
Vanadij-redoks baterija (VRFB)	20-70	0,5-2	0,3-3	< 10 min
Natrij-sumporna baterija (NaS)	150-250	150-250	0,05-34	1-2 min
Zebra baterija (NaNiCl <sub>2</sub> )	150-180	220-300	0-3	< 1 s

Kako bi došli do zaključka o najučinkovitijoj bateriji u razmatranje su uzeta 4 parametra: gustoća energije, gustoća snage, snaga i vrijeme odziva. Za navedene parametre najbolje vrijednosti je pokazala litij-ionska baterija i time se ona uzima za najučinkovitiji baterijski sustav.

## 7. ZAKLJUČAK

Stacionarni baterijski sustavi u uporabi su dugi niz godina, ali njihova popularnost ne opada s vremenom i vrhunac njihove primjene tek dolazi. Kroz naredne godine očekivan je značajan porast primjene stacionarnih baterijskih sustava, kako samostalnih tako i u kombinaciji s ostalim spremnicima energije.

Jedan od glavnih problema baterijskih sustava je njihovo zbrinjavanje nakon uporabe, tj. Nemogućnost adekvatnog recikliranja, unatoč problemima bez baterijskih sustava nije moguće funkcioniranje. Najčešće korištena baterija je litij-ionska baterija, koja je svoju široku primjenu stekla zbog svojih odličnih karakteristika, te se pokazala najučinkovitijim baterijskim sustavom. Posebno treba istaknuti primjenu rabljenih baterija iz električnih automobila, koja je djelomično smanjila probleme onečišćenja i troškove proizvodnje novih baterija.

Kako u svijetu tako i u Europi i u Republici Hrvatskoj nastoji se promijeniti model tržište električne energije. Zahvaljujući ulaganjima Europske unije u Republici Hrvatskoj je pokrenut i poseban projekt koji donosi niz novih mjera kako i energetska učinkovitost dosegla svoj maksimum i kako bi korisnici bili zadovoljni.

U programu EasyPower simulirano je na koji način baterijski spremnici mogu uticati na prijenosnu i distribucijsku mrežu. Simulacija je pokazala kako baterijski spremnici u slučaju zagušenja mreže, preopterećenja transformatora i vodova imaju sposobnost regulacije napona, jalove snage i ostalih veličina čiji je utjecaj na mrežu prilikom prijenosa i distribucije jako značajan.

## LITERATURA

- [1] J. Figgener, P. Stenzel, K.-P. Kairies, J. Linßen, D. Haberschusz, O. Wessels, G. Angenendt, M. Robinius, D. Stolten i D. U. Sauer, »The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review,« *Journal of Energy Storage*, svez. 29, 2020.
- [2] C. Zhao, P. Bach Andersen, C. Træholt i . S. Hashemi, »Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , svez. 182, 2023.
- [3] H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic i A. Jossen, »Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids,« *Energies*, svez. 10, 2017.
- [4] H. Rallo, L. Canals Casals, D. De La Torre, R. Reinhardt, C. Marchante i B. Amante, »Lithium-ion battery 2nd life used as a stationary energy storage system: Ageing and economic analysis in two real cases,« *Journal of Cleaner Production*, svez. 272, 2020.
- [5] A. Purvins i M. Sumner, »Optimal management of stationary lithium-ion battery system in electricity distribution grids,« *Journal of Power Sources*, svez. 242, 2013.
- [6] N. A. Efkarpidis, S. Imoscopi, M. Geidl, A. Cini, S. Lukovic, C. Alippi i I. Herbst, »Peak shaving in distribution networks using stationary energy storage systems: A Swiss case study,« *Sustainable Energy, Grids and Networks*, svez. 34, 2023.
- [7] G. Knežević, N. Mišljenović, N. Radić i A. Brandis, »The optimal use of stationary battery storage in a prosumer power system,« u *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Split / Bol, 2022.
- [8] D. Linden i T. B. Reddy, *Handbook of batteries*, New York: McGraw Hill Professional, 2001.
- [9] »PC CHIP,« [Mrežno]. Available: <https://pcchip.hr/ostalo/tech/baterije-vrste-tehnologija-izrade-i-nacin-rada/>. [Datum pristupa 21 05 2024].
- [10] »Tycorun,« [Mrežno]. Available: <https://www.tycorun.com/blogs/news/primary-battery>. [Datum pristupa 21 5 2024].



- [11] »Nigerian Scholars,« [Mrežno]. Available: <https://nigerianscholars.com/tutorials/electrochemistry/secondary-batteries/>. [Datum pristupa 22 5 2024].
- [12] N. Bilić, »Repozitorij Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu,« [Mrežno]. Available: <https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A1595/datastream/PDF/view>. [Datum pristupa 22 05 2024].
- [13] C. M. Hayner, X. Zhao i H. H. Kung, »Materials for Rechargeable,« *ANNUAL REVIEW OF CHEMICAL AND BIOMOLECULAR ENGINEERING* , svez. 3, 2012.
- [14] P. M. Roy, H. H. Sawant, P. P. Shelar, P. U. Sarode i S. H. Gawande, »Battery Health Management- A Perspective of Design, Optimization, Manufacturing, Fault Detection, and Recycling,« u *Energy Storage and Saving*, 2024.
- [15] O. S. Burheim, »Chapter 7 - Secondary Batteries,« u *Engineering Energy Storage*, 2017, pp. 111-145.
- [16] »What Are Battery Anode and Cathode Materials?,« Aqua Metals, [Mrežno]. Available: <https://www.aquametals.com/recyclopedia/lithium-ion-anode-and-cathode-materials/>. [Datum pristupa 27 05 2024].
- [17] »Toray Films,« [Mrežno]. Available: <https://www.films.toray/en/products/setela/>. [Datum pristupa 27 05 2024].
- [18] J. Warner, »Chapter 3 - Basic Terminology,« u *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, Elsevier, 2015, pp. 23-33.
- [19] S. Leuthner, »Lithium-ion battery overview,« u *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, 2018, pp. 13-19.
- [20] F. Torabi i P. Ahmadi, »Chapter 1 - Battery technologies,« u *Simulation of Battery Systems*, Academic Press, 2020, pp. 1-54.

- [21] »Power System Design: Why Lithium is Taking Over Stationary Energy Storage,« Green Cubes Technology, [Mrežno]. Available: <https://greencubes.com/in-the-news/why-lithium-is-taking-over-stationary-energy-storage/>. [Datum pristupa 30 05 2024].
- [22] »The working principle of lithium ion battery,« [Mrežno]. Available: <https://www.dtpbattery.com/a/The-working-principle-of-lithium-ion-battery.html>. [Datum pristupa 30 05 2024].
- [23] M. Weil, J. Peters i M. Baumann, »Stationary battery systems: Future challenges regarding resources, recycling, and sustainability,« u *The Material Basis of Energy Transitions*, Academic Press, 2020, pp. 71-89.
- [24] B. Sundén, »Chapter 4 - Battery technologies,« u *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*, Academic Press, 2019, pp. 57-79.
- [25] Z. Huang i G. Du, »Chapter 4 - Nickel-based batteries for medium- and large-scale energy storage,« u *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 73-90.
- [26] »Nikal-metal hibridna baterija,« [Mrežno]. Available: <https://power.bigbadmole.com/hr/akkumulyatory/batarei/ni-mh.html>. [Datum pristupa 30 05 2024].
- [27] »The best uses for nickel cadmium (Ni-Cd) batteries,« SolarReviews, [Mrežno]. Available: <https://www.solarreviews.com/blog/best-uses-for-nickel-cadmium-batteries>. [Datum pristupa 31 05 2024].
- [28] »Nickel-cadmium Battery,« [Mrežno]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/electric-battery/nicd-battery/>. [Datum pristupa 31 05 2024].
- [29] »NiCd Nickel Cadmium Battery,« Mak Plus Power Systems, [Mrežno]. Available: <https://www.mak-powersis.de/nickel-cadmium-nicd-battery.html>. [Datum pristupa 31 05 2024].
- [30] S. T. Revankar, »Chemical Energy Storage,« u *Storage and Hybridization of Nuclear Energy*, Academic Press, 2019, pp. 177-227.

- [31] D. A. J. Rand i P. T. Moseley, »Chapter 13 - Energy Storage with Lead–Acid Batteries,« u *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Elsevier, 2015, pp. 201-222.
- [32] Y. Yang, Z. Wu, J. Yao, T. Guo, F. Yang, Z. Zhang, J. Ren, L. Jiang i B. Li, »An overview of application-oriented multifunctional large-scale stationary battery and hydrogen hybrid energy storage system,« *Energy Reviews*, svez. 3, 2024.
- [33] »Vanadium flow battery to be installed at Native American-run fire station in Southern California,« *Solar Power World*, [Mrežno]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2020/11/vanadium-flow-battery-installed-at-native-american-run-fire-station-in-southern-california/>. [Datum pristupa 01 06 2024].
- [34] »Sodium Sulfur Battery,« ZHANG'S RESEARCH GROUP, [Mrežno]. Available: <https://ziang.binghamton.edu/sodium-sulfur-battery/>. [Datum pristupa 02 06 2024].
- [35] M. H. S. M. Haram, M. T. Sarker, G. Ramasamy i E. E. Ngu, »Second Life EV Batteries: Technical Evaluation, Design Framework, and Case Analysis,« *IEEE Access*, svez. 11, pp. 138799-138812, 2023.
- [36] »Battery Energy Storage Overview,« [Mrežno]. Available: <https://www.cooperative.com/programs-services/bts/documents/reports/battery-energy-storage-overview-report-update-april-2019.pdf>. [Datum pristupa 09 06 2024].
- [37] T. Bowen, I. Chernyakhovskiy i P. L. Denholm, »Grid-scale battery storage: frequently asked questions,« *National Renewable Energy Laboratory*, [Mrežno]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74426.pdf>. [Datum pristupa 09 06 2024].
- [38] I. Pavić i H. Pandžić, »Primjena spremnika energije,« FER Zavod za visoki napon i energetiku, Zagreb, 2021.
- [39] I. Dokozić, »Repozitorij Tehničkog fakulteta u Rijeci,« 2022. [Mrežno]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:553107>. [Datum pristupa 28 06 2024].
- [40] I. Đurić, T. Marijanić i J. Škare, »BATERIJSKI SPPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI,« HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNE ELEKTRODISTRIBUCIJSKE KONFERENCIJE-HO CIRED, 2018. [Mrežno]. Available:

[https://www.hocired.hr/images/OPATIJA2018/Referati\\_po\\_studijskim\\_odborima/SO5/SO5-17.pdf](https://www.hocired.hr/images/OPATIJA2018/Referati_po_studijskim_odborima/SO5/SO5-17.pdf).  
[Datum pristupa 28 06 2024].

## SAŽETAK

Tema ovog rada su stacionarni baterijski sustavi i njihova uloga u elektroenergetskom sustavu. Kroz rad istražene su različite tehnologije baterijskih spremnika i njihove karakteristične veličine. Također, u radu je prikazana i uporaba korištenih baterija iz električnih automobila, koja je potkrijepljena mjerenjima baterije iz automobila marke Nissan Leaf. Baterijski sustavi su se također pokazali učinkovitima na razini prijenosne i distribucijske mreže. U programu EasyPower prikazano je kako se može upravljati zagušenjima u mreži, regulirati napon i jalova snaga, te odgoditi ulaganja u mrežu. U konačnici su uspoređene različiti baterijski sustavi i donesen je zaključak kako je litij-ionska baterija najučinkovitija u elektroenergetskom sustavu.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sustavi, litij-ionska baterija, stacionarni baterijski sustavi, sekundarne baterije

## ABSTRACT

The topic of this work are stationary battery systems and their role in the power system. Through the work, different technologies of battery tanks and their characteristic sizes were investigated. Also, the paper shows the use of used batteries from electric cars, which is supported by measurements of batteries from Nissan Leaf cars. Battery systems have also proven to be efficient at the level of transmission and distribution networks. The EasyPower program shows how congestion in the network can be managed, voltage and reactive power can be regulated, and investment in the network can be postponed. In the end, different battery systems were compared and the conclusion was reached that the lithium-ion battery is the most efficient in the power system.

**Keywords:** power systems, lithium-ion battery, stationary battery systems, secondary batteries