

Pražnjenje litijum-jonskih baterija iz električnih vozila u svrhu reciklaže

Studentski rad

Dragana Nikić

Student drugog ciklusa studija
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
nikicdragana20@gmail.com

Sažetak—Zahtjevi tržišta za sve većom proizvodnjom i korištenjem litijum-jonskih baterija dovode do potrebe za njihovom reciklažom. Tome u prilog služi i činjenica da se ovakve baterije na kraju životnog vijeka moraju bezbjedno odložiti iz upotrebe. Duboko pražnjenje litijum-jonskih baterija iz električnih vozila u toku procesa reciklaže predstavlja bitan, zahtjevan i nezaobilazan korak procesa. Ovakvo pražnjenje baterije znači da je potrebno da se iz baterije iscrpi sva energija koju ona posjeduje. U ovom radu su predstavljena dva efikasna načina potpunog pražnjenja baterija pred reciklažu, koristeći testnu opremu proizvođača DV Power.

Ključne riječi – litijum-jonska baterija; električno vozilo; pražnjenje baterije; reciklaža;

I. UVOD

Litijum-jonske baterije predstavljaju tip punjive baterijske tehnologije, koja pretvara hemijsku energiju, skladištenu u elektrohemijskim ćelijama, u električnu energiju. Obično se koriste u prenosivoj elektronici, električnim vozilima i sistemima za skladištenje energije. Litijum-jonske baterije karakteriše visoka gustina energije, dug životni vijek, manja težina u poređenju sa ostalim vrstama baterije, mala stopa pražnjenja u neaktivnom režimu i velika efikasnost.

Svaka litijum-jonska ćelija se sastoji od dvije elektrode, međusobno razdvojene elektrolitom. Pozitivna elektroda se naziva katoda, a negativna anoda. Pored ovih komponenti, litijum-jonska ćelija često u sebi sadrži i separator, koji služi kao fizička barijera između anode i katode [1]. Litijum-jonske ćelije mogu biti prizmatične, cilindrične, kao i tzv. torbica litijum-polimerske ćelije. Jedna baterija može sadržavati više litijum-jonskih ćelija, koje mogu biti grupisane u module. Veći broj grupisanih modula predstavlja jedan baterijski pack.

Ove baterije rade na principu da pomjeraju litijum jone između pozitivne i negativne elektrode tokom ciklusa punjenja i pražnjenja. U toku pražnjenja baterije, odnosno u situaciji kada baterija služi kao izvor električne energije, anoda oslobađa litijum jone na katodu, stvarajući tok elektrona sa jedne na drugu stranu ćelije. Kada se litijum-jonska baterija puni, dešava se suprotan proces, odnosno katoda oslobađa litijum jone prema anodi.

Koncept litijum-jonske baterije se pojavljuje u periodu oko 1970. godine, kada su naučnici počeli da istražuju efikasnije rješenje od olovnih baterija. Jedan od prvih primjeraka punjive litijum-jonske baterije je napravljen unutar laboratorije kompanije ExxonMobil Clinton, od strane hemičara Stanley Whittingham. U narednim godinama, razvoj litijum-jonske baterije je napredovao toliko da je do kraja 20. vijeka ova baterija preuzela primarno mjesto u baterijskoj industriji. Revolucionarno otkriće litijum-jonske baterije je nagrađeno 2019. godine Nobelovom nagradom za hemiju, koju su pored Stanley Whittingham, dobili i Akira Yoshino i John Goodenough [2][3].

Tržište u kome je značajno rasprostranjena upotreba litijum-jonskih baterija jeste automobilska industrija, odnosno proizvodnja baterija za električna vozila (eng. EV – Electric Vehicle). Proizvodnja baterija za električna vozila uključuje korištenje vrijednih materijala, kao što su sam litijum, aluminijum, kobalt, nikl, bakar, grafit i mangan. Svakim danom se povećava tržište električnih vozila, odnosno potreba za proizvodnjom što većeg broja baterija. Količine litijuma, kao i ostalih materijala koji se pominju prilikom proizvodnje baterija za električna vozila, su ograničene i to je potencijalni problem koji se može pojaviti u skorijoj budućnosti [4]. Zahtjevi tržišta upravo pokazuju koliko je reciklaža ovih baterija od izuzetnog značaja. Pored toga, bitno je naglasiti da sa baterijama koje su dostigle kraj svog životnog vijeka treba rukovati na bezbjedan način i takve baterije je potrebno na ispravan način odložiti.

II. PROCES RECIKLAŽE LITIJUM-JONSKIH BATERIJA

Reciklaža baterija EV je kompleksan proces, koji se može podijeliti na pet koraka, prikazanih na Sl. 1.



Slika 1. Koraci u procesu reciklaže baterija

Baterije koje pristižu na reciklažu su baterije koje su dostigle kraj životnog vijeka i ne mogu se više koristiti ni u jednoj grani industrije. Baterije mogu biti izvađene iz električnih vozila, ali takođe mogu biti i baterije koje su neupotrebljive zbog greške tokom proizvodnje.

Prvi korak je nezaobilazan i izuzetno bitan, a to je upravo pražnjenje baterija. Pražnjenje baterije podrazumijeva da se isprazni sva preostala energija koju baterija posjeduje. Ukoliko se ovaj korak u toku procesa ne bi ispoštovao, postojala bi šansa da baterija postane opasna za rukovanje, kako za operatere, zbog hemijskih reakcija unutar baterije, tako i za opremu. Preostala energija bi mogla da prouzrokuje iskrenje u toku drobljenja i na taj način bi oštetila nožve na mašinama za drobljenje. Kada je baterija potpuno ispražnjenja, ona se smatra bezbjednom za dalje rukovanje i demontiranje.

Demontaža podrazumijeva razdvajanje materijala koji se zasebno recikliraju, kao što su kablovi, kućišta i plastika. Na ovaj način se od cijele litijum-jonske baterije, odnosno baterijskog pack-a, razdvajaju baterijski moduli, kao manje jedinice i prosledjuju na drobljenje.

Nakon drobljenja, materijal dobijen od baterije se razdvaja i dalje obrađuje, čime se dobija tzv. crna masa. Crna masa je prah koji se dobija iz aktivnih komponenti baterije i sadrži ranije pomenute materijale. Potrebna je hidrometalurška obrada da bi se iz crne mase izvukli korisni materijali za proizvodnju baterija novih generacija.

III. PRAŽNJENJE LITIJUM-JONSKIH BATERIJA

Pražnjenje litijum-jonskih baterija iz električnih vozila u cilju reciklaže se može izvesti koristeći DV Power opremu iz kategorije uređaja za testiranje i pražnjenje baterija. Pod testiranjem i pražnjenjem baterija se podrazumijeva sprovođenje testa kapaciteta baterija, pražnjenje baterija u svrhu skladištenja, transporta ili reciklaže. U toj kategoriji se nalaze Battery Load Unit – BLU uređaji.

Uređaji koji su opisani u ovom radu su iz BLU-C serije uređaja, modeli BLU500C i BLU700C. BLU500C uređaj se primjenjuje za baterije do maksimalnog naponskog nivoa 500 V DC, te omogućava struju pražnjenja do 220A, pri maksimalnoj snazi pražnjenja do 20 kW. BLU700C uređaj podržava opseg radnog napona priključene baterije do 700 V DC, pri strujama pražnjenja do 260 A, i maksimalnoj snazi do 42 kW [5].

Sam proces pražnjenja započinje priključivanjem BLU uređaja na bateriju, podešavanjem potrebnih parametara za pražnjenje, kao što su željena struja ili snaga pražnjenja baterije. BLU uređaj predstavlja stabilan elektronski teret, koji energiju iz baterije pretvara u toplotu disipiranu na rezistivnom bloku, i na taj način vrši kontrolisano pražnjenje baterije do 0 V DC. Ovakvo pražnjenje se naziva totalno ili duboko pražnjenje baterije.

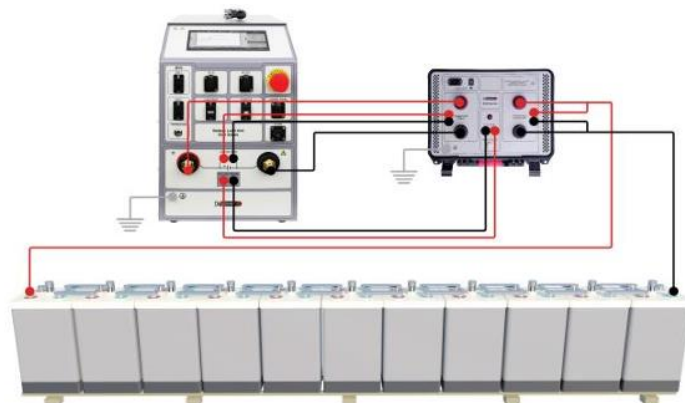
Nakon što je test pražnjenja sa BLU uređajem završen i teret se odspoji sa litijum-jonske baterije, prirodno dolazi do rapidnog rasta napona na bateriji. Ovaj fenomen oporavka napona litijum-jonske baterije se naziva rebound napon [6]. Rebound napon je pokazatelj toga da u bateriji i dalje postoji

energija. Ovu energiju je takođe potrebno isprazniti iz baterije prije nego što se započne sledeći korak u procesu reciklaže. Dakle, uz uređaje iz BLU-C serije je potrebno kombinovati još neki uređaj kako bi se proces pražnjenja baterije do kraja sproveo. Uređaji koji se mogu koristiti su uređaji iz Zero Voltage Discharge Module – ZVD modul serije, kao i Battery Active Resistor - BAR uređaj, takođe DV Power proizvodi. U nastavku rada analizirana su dva načina pražnjenja baterijskog pack-a, jedan pomoću BLU500C i ZVD80 uređaja, a drugi koristeći BLU700C i BAR uređaj.

A. Pražnjenje baterije koristeći BLU500C i ZVD80 modul

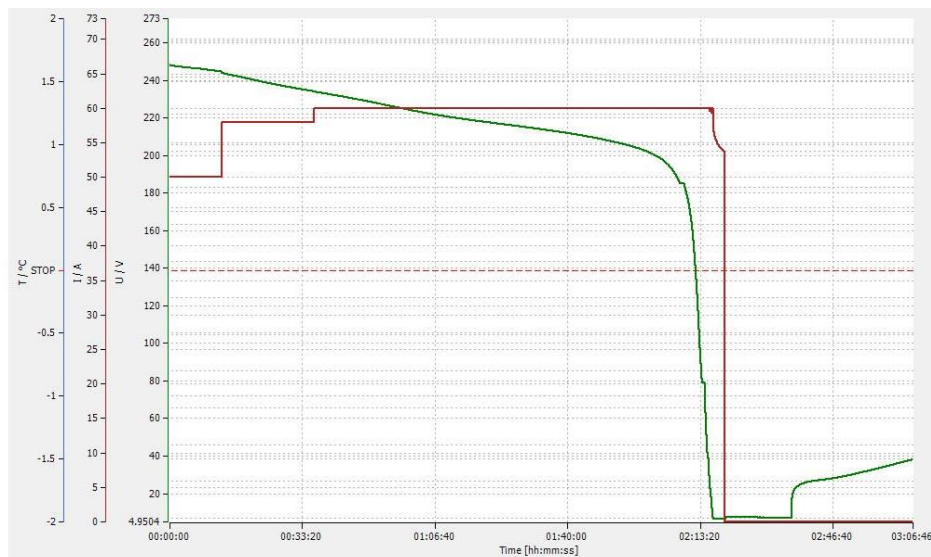
Zero Voltage Discharge Module ZVD80 je modul dizajniran da ispunjava specifičan zahtjev za totalnim pražnjenjem baterije do 0 V DC za potrebu reciklaže baterija. ZVD80 modul radi u sistemu zajedno sa BLU-C uređajem, omogućavajući pražnjenje baterija naponskih nivoa do 800 V DC strujom do 60 A [7]. Pražnjenje se odvija konstantnom strujom, pri čemu korisnik bira kojom strujom želi da prazni bateriju.

Sistem koji čine BLU500C i ZVD80 omogućava proces pražnjenja u dva koraka. Prvi korak je efikasno i kontrolisano pražnjenje strujom do maksimalno 60 A, sve do momenta dok napon ne dostigne 0 V DC. Zatim ZVD80 modul kratko spaja bateriju kako bi iscrpio preostalu energiju iz baterije. Princip povezivanja BLU500C i ZVD80 modula na testni objekat, tj. bateriju, prikazan je na Sl. 2.



Slika 2. BLU500C i ZVD80 sistem povezan na bateriju [5]

U ovom radu opisan je test pražnjenja dijela baterije iz električnog vozila, koji se sastoji od 10 baterijskih modula. Grafik pražnjenja je prikazan na Sl. 3, na kome je crvenom bojom predstavljena struja, a zelenom napon. Napon dijela baterije na početku testa iznosio je 250 V DC. Pražnjenje se vrši po principu konstantne struje i započeto je strujom od 50 A. Korisnik može u bilo kom trenutku da promijeni struju pražnjenja, što objašnjava promjenu na 57 A. Da bi se ubrzao proces pražnjenja, odabrana je struja od 60 A sa kojom se odvija pražnjenje sve do 0 V DC.



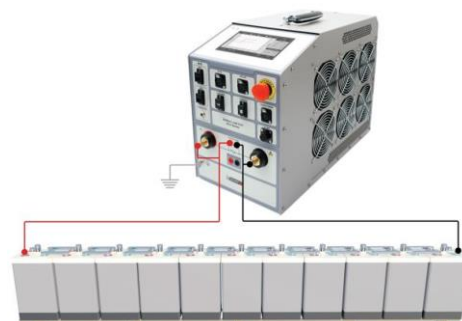
Slika 3. Grafik pražnjenja baterije pomoću BLU500C i ZVD80 modula

U momentu kada napon dostigne 0 V DC, ZVD80 modul kratko spaja bateriju i tako preuzima pražnjenje baterije. Ukoliko se ZVD80 odspoji sa baterije prije nego što je sva energija iscrpljena, pojaviće se rebound napon, kao što se može primjetiti na kraju testa. Pojava rebound napona ovdje dokazuje to da je bateriju potrebno držati u kratkom spoju, sve dok u njoj postoji energija.

B. Pražnjenje baterije koristeći BLU700C i BAR uređaj

Drugo rješenje koji se efikasno bori protiv rebound napona jeste Battery Active Resistor - BAR uređaj. BAR je prenosivi uređaj, napravljen kao kombinacija pasivnih i aktivnih komponenti. Glavna karakteristika mu je pražnjenje preostale energije unutar baterije, nakon odspajanja sa glavnog pražnjača, u ovom slučaju BLU700C uređaja. BLU700C i

BAR uređaj se spajaju pojedinačno na bateriju. Na Sl. 4. je prikazan način spajanja BLU-C uređaja na bateriju.



Slika 4. BLU-C uređaj priključen na bateriju [5]



Slika 5. Grafik pražnjenja baterije BLU700 uređajem

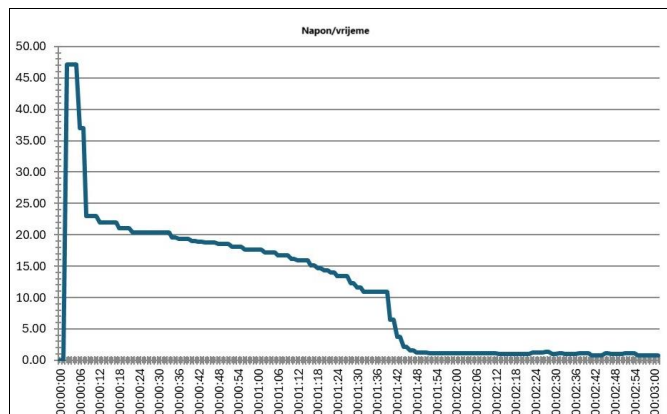
Test pražnjenja sa BLU700C uređajem odrađen je na baterijskom pack-u iz električnog vozila, čiji je napon u početnom trenutku iznosio 370 V DC. Kriva pražnjenja se može vidjeti na Sl. 5.

Nakon završenog testa sa BLU700C, baterija se spaja na BAR. BAR je dizajniran za rad sa naponima do 500 V DC, pri maksimalnoj snazi pražnjenja 120 W i maksimalnom strujom do 10 A. BAR uređaj ima dva načina rada, neaktivni i aktivni. Neaktivni režim podrazumijeva da na uređaj nije priključena baterija. U trenutku priključenja na bateriju, BAR automatski započinje pražnjenje, tj. prelazi u aktivni režim rada. Ovaj uređaj takođe vrši monitoring temperature baterije, te na taj način omogućava temperaturno kontrolisano pražnjenje [8]. Način spajanja BAR uređaja na bateriju prikazan je na Sl. 6.



Slika 6. Princip spajanja BAR uređaja na bateriju

Prilikom pražnjenja baterije sa BAR uređajem moguće je pratiti napon, struju/snagu i temperaturu baterije. U ovom radu je na Sl. 7. prikazan grafik napona u zavisnosti od vremena. Nakon što se baterija odspojila sa BLU700C, desio se oporavak napona, tj. pojavio se rebound napon. Zahvaljujući BAR uređaju, rast napona se zaustavlja i vrlo brzo smanjuje, kako se baterija prazni. Na kraju testa baterija se kratko spaja i time se proces pražnjenja završava.



Slika 7. Grafik pražnjenja baterije BAR uređajem

IV. POREĐENJE METODA PRAŽNjenja LITIJUM-JONSKIH BATERIJA U CILJU RECIKLAŽE

Na tržištu postoje mnogobrojne vrste litijum-jonskih baterija koje se koriste u električnim vozilima. Parametri koji su ključni pri odabiru odgovarajuće opreme za potpuno

pražnjenje litijum-jonskih baterija su maksimalni napon i stanje napunjenosti baterije. U zavisnosti od zahtjeva korisnika, zavisi i odabir opreme za pražnjenje.

Prvi sistem opisan u radu, BLU500C i ZVD80 uređaj, je pogodan za pražnjenje baterijskih pack-ova čiji je napon do 500 V DC. Pored napona, bitan parametar je i struja, koja je u ovakvoj kombinaciji ograničena na 60 A.

Drugo rješenje korišteno za pražnjenje baterije jeste BLU700C i BAR uređaj. Ova dva uređaja se ne povezuju u jedinstven sistem, već zasebno, jedan nakon drugog. Zbog toga u prvom dijelu pražnjenja postoji mogućnost za pražnjenje baterija naponskog nivoa do 700 V DC, sa strujom do 260 A. U drugom dijelu pražnjenja ograničenja su zasnovana na specifikacijama BAR uređaja, što znači da je moguće prazniti baterije napona do 500 V DC, sa strujom pražnjenja do 10 A.

Kada bi se poredila ova dva rješenja za pražnjenje dvije baterije identičnih karakteristika, BLU700C i BAR rješenje bi bilo efikasnije iz sledećih razloga:

1. Snaga BLU700C uređaja je veća nego BLU500C uređaja;
2. BAR uređaj vrši aktivno pražnjenje baterije, dok ZVD80 vrši kratko spajanje baterije, realizovano preko strujnih kablova i interne strukture uređaja.

V. ZAKLJUČAK

Litijum-jonske baterije koje su dostigle kraj životnog vijeka je neophodno na siguran način odložiti iz upotrebe. Pored toga, tržište svakim danom zahtjeva sve veću proizvodnju litijum-jonskih baterija, jer se opseg njihove upotrebe svakim danom širi. Na osnovu prethodno navedenog, dolazi se do zaključka da je reciklaža litijum-jonskih baterija od izuzetne važnosti. Reciklaža baterija koje se koriste u električnim vozilima je složen proces koji obuhvata nekoliko različitih koraka. Jedan od ključnih koraka u tom procesu je pražnjenje baterija, koje predstavlja potpuno pražnjenje do 0 V DC.

Prilikom pražnjenja baterije u toku reciklaže, bitno je obratiti pažnju na sigurnost operatera. U slučaju neopreznog rukovanja sa baterijom, postoji mogućnost da hemijske reakcije unutar nje postanu opasne. Pored toga, potrebno je zaštititi i opremu, odnosno potpuno iscrpiti energiju iz baterije, kako bi se izbjegla mogućnost za iskrenjem u toku drobljenja.

U radu je objašnjen značaj reciklaže litijum-jonskih baterija iz električnih vozila i predstavljena su dva različita sistema za efikasno i sigurno pražnjenje baterija, pomoću testne opreme DV Power proizvođača. Jedan od rješenja za potpuno pražnjenje baterije jeste koristeći BLU500C i ZVD80 modul, a drugi način uključuje upotrebu BLU700C i BAR uređaja.

ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje kolegama iz kompanije DV Power na prenesenom znanju i iskustvima potrebnim za pisanje ovog rada. Takođe se zahvaljuje kompaniji na mogućnostima za učešće u kreiranju novih rješenja koje tržište zahtjeva, kao i prilici za testiranje istih u realnim uslovima.

LITERATURA

- [1] Van Genechten, L. "Fast deep discharge using a controllable load as pretreatment for EV battery recycling: A study on efficacy, speed and safety", Master teza, KTH Royal Institute of Technology, Štokholm, Švedska, 2023.
- [2] K. Obarcanin, A. Music, "The Impact of Controlled Deep Discharge Start Voltage, End Voltage and Current on Voltage Recovery and Cell Temperature for Lithium Ion Battery Recycling", 2024 6th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Budapest, Hungary, 2024, pp. 289-293, doi: 10.1109/GPECOM61896.2024.10582606.
- [3] Z. Dao, Z. Zhijie, Z. Peng, Z. Yijun, F. Zhichao, Y. Yang and C. You, "Health condition assessment of satellite li-ion battery pack considering battery inconsistency and pack performance indicators," *Journal of Energy Storage*, vol. 60, 2023.
- [4] N. Naoki, W. Feixiang, L. Jung Tae, „Li-ion battery materials : Present and future”, *Materials Today*. 2015 ; Vol. 18, No. 5. pp. 252-264.
- [5] DV Power, Battery Load Unit – BLU-C series Brochure, Štokholm, Švedska, 2024.
- [6] H. Rouhi, E. Karola, R. Serna-Guerrero and A. Santasalo-Aarnio, "Voltage behavior in lithium-ion batteries after electrochemical discharge and its implications on the safety of recycling processes," *Journal of Energy Storage*, vol. 35, 2021.
- [7] DV Power, Zero Voltage Discharge Module – ZVD series Brochure, Štokholm, Švedska, 2024.
- [8] DV Power, Battery Active Resistor – BAR series Brochure, Štokholm, Švedska, 2025.

ABSTRACT

The demands of the market for the ever-increasing production of Lithium-Ion batteries, as well as the fact that such batteries must be safely disposed of at the end of their life, lead to the need for recycling of Lithium-Ion batteries.

The discharge of Lithium-Ion batteries from electric vehicles during the recycling process is an essential and unavoidable step within this complex process. Discharging Lithium-Ion batteries is a demanding step and requires that the battery be completely discharged before recycling. Discharging the battery like this means that it is necessary to drain all the energy it has. This paper presents two effective ways of completely discharging batteries before recycling, using test equipment from the DV Power manufacturer.

DISCHARGE OF LITHIUM-ION ELECTRIC VEHICLE BATTERIES PRIOR TO RECYCLING

Dragana Nikic