

Eksploataciona ispitivanja brzih punjačkih stanica za E-automobile snaga 120 kW i 240 kW

Milan Đerić*, Željko V. Despotović**, Miloš Kostić*, Uroš Ilić**

*Charge & GO, Beograd

**Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Beograd

Rezime - U radu su predstavljena eksploataciona ispitivanja i testovi koji su sprovedeni na brzim punjačkim stanicama za električne automobile. Ispitivanja su rađena na punjačkim stanicama izlaznih DC snaga od 120 kW i 240 kW. Ulazni napon testiranih punjačkih stanica je 3x400 V, 50 Hz, a izlazni jednosmerni napon 400 V. Merene veličine od interesa su bile ulazni mrežni napon i ulazna mrežna struja, izlazni jednosmerni napon i izlazna jednosmerna struja, stanje napunjenosti baterijske banke na električnom vozilu (SOC%), kao i ulazna i izlazna aktivna snaga. U radu su prikazani ključni eksperimentalni rezultati dobijeni tokom ispitivanja i izvršeno je snimanje krive stepena iskorišćenja brzih punjačkih stanica u zavisnosti od izlazne snage pri različitim režimima rada.

Ključne reči - Električna vozila, električne baterije, brze punjačke stanice, energetski pretvarači, AC snaga, DC snaga

I UVOD

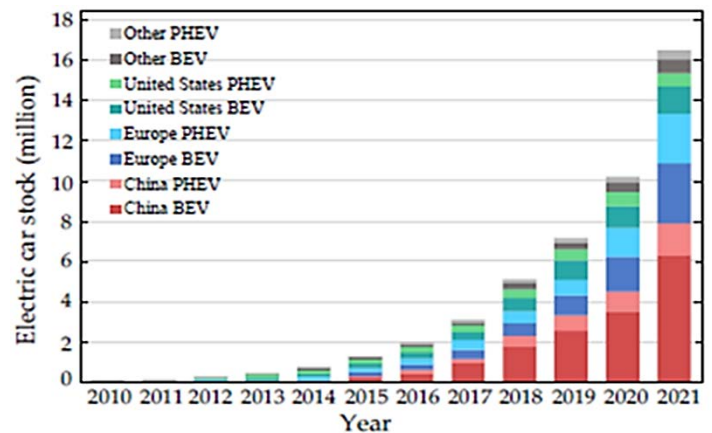
Pоследnjih godina svest ljudi o očuvanju resursa i zaštiti životne sredine postepeno raste. Električna vozila (EV) sve više postaju bitan pravac razvoja automobilske industrije zbog niske emisije zagađenja i niskih troškova upotrebe, a takođe, podstiču razvoj drugih sektora u svom industrijskom lancu [1-2]. U poređenju sa tradicionalnim vozilima na gorivo, EV imaju tri veoma bitne prednosti: (1) dvosmerni tok energije i mogućnost rekuperacije, (2) tehnologija elektronskih komponenti i modula energetske elektronike na kojima su EV zasnovana je postala već standardna i na visokom nivou pouzdanosti, (3) emisije ugljen-dioksida su niske [1],[3].

U tom kontekstu, vlade i automobilske kompanije postepeno usmeravaju svoj fokus istraživanja na razvoj EV. Kao rezultat toga, godišnja prodaja EV je brzo porasla. U 2021. godini globalna prodaja EV dostigla je 6.6 miliona jedinica, što je duplo više nego 2020. godine. U 2012. godini širom sveta prodato je samo 120000 EV, dok je u 2021. godini taj broj dostizan na nedeljnom nivou [1],[4-5].

Na Slici 1 je prikazan globalni broj EV u periodu od 2010. do 2021. godine. U 2021. godini ukupni broj EV na globalnom nivou premašio je 16.5 miliona, što je tri puta više u odnosu na 2018. Predviđa se da će do 2030. godine globalna EV flota premašiti 150 miliona vozila [5].

Industrijalizacija EV je složen sistemski projekat, a infrastruktura za punjenje baterijskih banki u sklopu EV je jedan od najvažnijih segmenata. Sistem punjenja baterijskih banki EV a predstavlja

ključni deo infrastrukture za punjenje i služi za obnavljanje energije potrebne za rad EV, uz to što je i važan podržavajući sistem za rad EV [6]. Sistemi punjenja moraju biti kompatibilni sa baterijskim sistemima EV i dele se na sisteme sporog i brzog punjenja, u zavisnosti od njihove snage. Kako svet sve više prelazi na obnovljive izvore energije, potražnja za električnim vozilima je porasla. Kao odgovor na to, jača potreba za infrastrukturu koja podržava ovaj porast i ona postaje ključna. Jedna od najvažnijih komponenti te infrastrukture su stanice za punjenje električnih vozila.



Slika 1. Globalni porast broja električnih vozila na svetskom nivou u periodu od 2010. do 2021. godine [5]

U Evropi se očekuje da će broj električnih vozila na putevima porasti na 44 miliona do 2030. godine, što stvara hitnu potrebu za izgradnjom većeg broja punjačkih stanica i adekvatne elektroenergetske strukture.

Kako trend elektrifikacije i dekarbonizacije dobija na zamahu širom sveta, potražnja za električnim vozilima raste sa predviđenom godišnjom stopom rasta (CAGR) od 10%. Sve vodeće ekonomske zemlje nude različite podsticaje i subvencije u različitim oblicima kako bi ubrzale prelazak sa motora sa unutrašnjim sagorevanjem (ICE) na električna vozila. Takođe evropski program "Fit for 55", zakonski obavezuje smanjenje emisije CO₂ u EU za najmanje 55% do 2030. godine.

Međunarodna agencija za energiju (IEA - *International Energy Agency*), uzimajući u obzir vladine politike usmerene na ubrzanje ove tranzicije, očekuje se da će do kraja 2025. godine na putevima biti skoro 50 miliona električnih vozila[4-5].

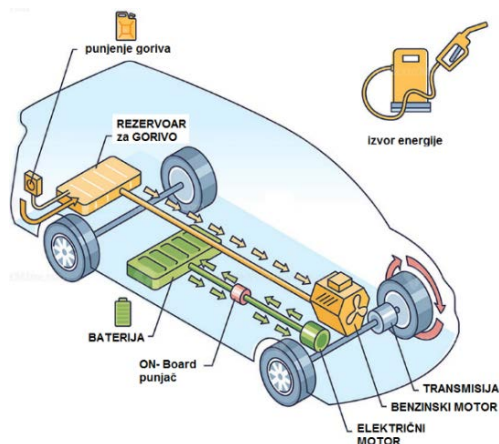
Treba ipak napomenuti da predviđeni prodor električnih vozila u transportni sektor, koji je prepoznat kao ključ za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene, ozbiljno pretili da usled zahteva za punjenjem baterijske banke EV, doveli do značajnog povećanja opterećenja elektroenergetskog sistema, odnosno da rezultuje narušavanjem propisanog nivoa kvaliteta napajanja električnom energijom, sigurnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sistema. Sa tog aspekta, razvoj strategije pametnog punjenja predstavlja jedan od najvažnijih koraka koji omogućava prodor ovih vozila u životnu svakodnevicu uz što manje troškove, kako za sistem, tako i za njegove korisnike.

U ovom radu su predstavljena eksploataciona ispitivanja i testovi koji su sprovedeni na brzim punjačkim stanicama proizvodnje KOSTAD UNITY za električne automobile. Ispitivanja su rađena na punjačkim stanicama izlaznih DC snaga od 120 kW i 240 kW. Ulazni napon testiranih punjačkih stanica je 3x400 V, 50 Hz, a izlazni jednosmerni napon $U_{dc}=400$ V. Eksploatacioni testovi su bili bazirani na merenju električnih veličina od interesa: ulazni mrežni napon i ulazna mrežna struja, izlazni jednosmerni napon i izlazna jednosmerna struja, stanje napunjenosti baterijske banke na električnom vozilu (SOC%), kao i ulazna i izlazna aktivna snaga. Motivacija za ovim aktivnostima je bila dobijanje eksperimentalnih rezultata (osciloskopskih snimaka) i snimanje krive stepena iskorišćenja brzih punjačkih stanica u zavisnosti od izlazne DC snage, pri različitim režimima rada.

II OSNOVNI TIPOVI E-AUTOMOBILA I PUNJAČA

Elektromobili (E-automobili ili električna vozila) su vozila koja pogonsku snagu u potpunosti ili delimično dobijaju posredstvom električnog motora. Mogu se razlikovati četiri osnovna tipa E-automobila:

- hibridno električno vozilo (eng. *Hybrid Electric Vehicle* - HEV),
- plug-in hibridno električno vozilo (eng. *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* - PHEV),
- čisto električno vozilo, bazirano na baterijskoj banci (eng. *Battery Electric Vehicle* - BEV)
- vozilo bazirano na gorivim ćelijama (eng. *Fuel Cell Vehicle* - FCV).

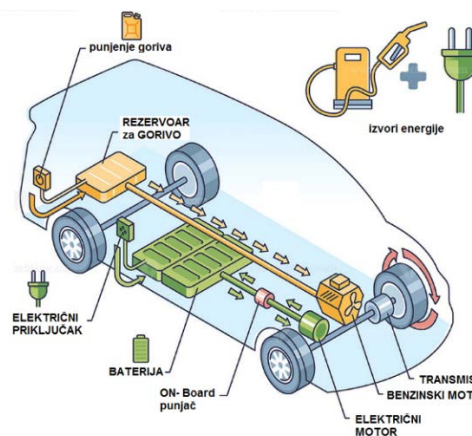


Slika 2. Dispozicija hibridnog električnog vozila (HEV) [7]

Uprošćena dispozicija jednog HEV-a je prikazana na Slici 2.

HEV poseduju konvencionalni motor sa unutrašnjim sagorevanjem, odgovarajuću transmisiju i električni motor. Električni motor služi za postizanje bolje ekonomičnosti potrošnje goriva. Procesom regenerativnog kočenja kinetička energija vozila pretvara se u električnu energiju, koja se preko "On-board" punjača skladišti u baterijama. HEV vozila usled bolje ukupne efikasnosti ispuštaju manje CO₂ gasova od konvencionalnih automobila, ali i dalje se kao primarni izvor energije koriste naftni derivati. Ova vozila nemaju mogućnost punjenja baterije električnom energijom iz elektroenergetске mreže.

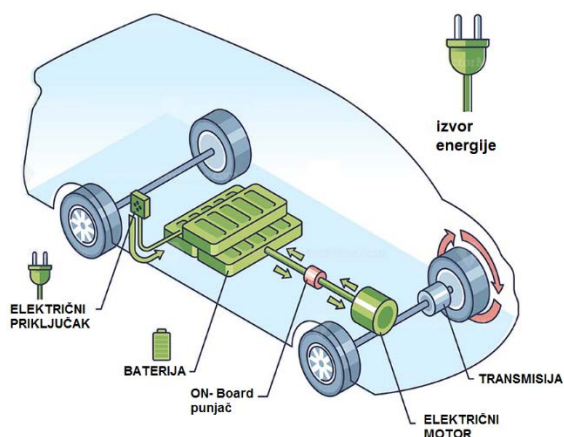
Da bi se postiglo značajnije smanjenje emisija CO₂ gasova, neophodno je koristiti električnu energiju kao primarni izvor energije za pogon vozila. Stoga se dodavanjem električnog priključka HEV-u, u stvari dobijaju PHEV, čime se omogućava da se dopunjavanje baterije električnom energijom vrši iz elektroenergetске mreže. Osnovna dispozicija PHEV-a je data na Slici 3.



Slika 3. Plug-in hibridno električno vozilo (PHEV) [7]

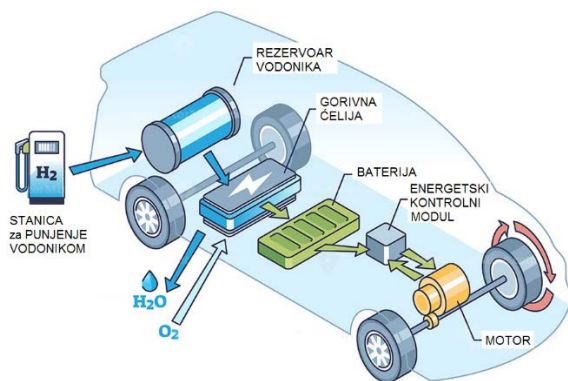
Osnovni cilj razvoja ovih vozila je da se postigne autonomija električnog pogona u toku prvih (40÷60) km, što je u proseku udaljenost ispod koje većina vozača putuje na dnevnoj osnovi. Potrebno je istaći da se domet prema evropskom sertifikacionom telu *New European Driving Cycle* (NEDC) meri sa isključenim svim pomoćnim sistemima (klima uređaj, svetla, ventilacija i sl.) jer isti utiču na smanjenje dometa E-automobila. Uzimajući u obzir pretpostavku da se baterije PHEV vozila dopunjavaju na dnevnoj osnovi isto znači da će PHEV vozila za pogon u proseku mnogo više koristiti električnu energiju nego fosilna goriva. Za duža putovanja, u slučaju nedostatka dovoljnog kapaciteta baterije, PHEV vozila koriste benzinski motor sa rezervoarom za gorivo čiji je kapacitet približno jednak kapacitetu rezervoara kod konvencionalnih vozila.

Konfiguracije BEV-a imaju samo električni motor i svu energiju dobijaju iz baterijske banke (litijum jonska baterija-Li Ion) visokih performansi, koja se dopunjava iz elektroenergetске mreže. Osnovna dispozicija jednog BEV-a je data na Slici 4. U ovom tipu vozila je primenjen isključivo elektromotorni pogon (asinhroni ili sinhroni električni motor sa pripadajućim energetskim pretvaračem - inverterom). Ovaj čisto električni pogonski sistem za primenu na veće udaljenosti zahteva i baterije većeg kapaciteta.



Slika 4. Dispozicija baterijskog električnog vozila (BEV) [7]

Vozilo sa gorivim ćelijama tzv. *Fuel Cell Vehicle* (FCV) ili električno vozilo sa gorivnim ćelijama tzv. *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) je električno vozilo koje koristi gorivu ćeliju, ponekad u kombinaciji sa malom baterijom ili super kondenzatorom, za napajanje svog ugrađenog elektromotora. Dispozicija FCV-a je data na Slici 5. Gorivne ćelije u vozilima proizvode električnu energiju uglavnom koristeći kiseonik iz vazduha i komprimovani vodonik. Proizvedena električna energija se koristi za punjenje baterijske banke na vozilu. Posredstvom energetskog kontrolnog modula sa dvosmernim tokom snage se vrši sprezanje pogonskog motora i baterijske banke. I u ovom slučaju je moguća rekuperacija energije. Vozila sa gorivim ćelijama su takođe klasifikovana kao vozila sa nultom emisijom štetnih gasova.

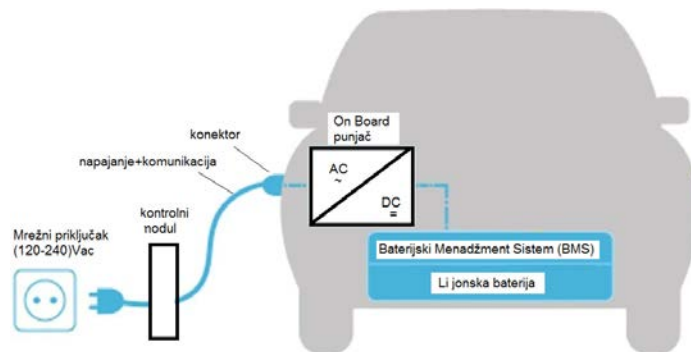


Slika 5. Vozilo bazirano na gorivim ćelijama (FCV) [7]

U poređenju sa vozilima sa unutrašnjim sagorevanjem, vozila na vodonik centralizuju zagađivače na mestu proizvodnje vodonika, gde se vodonik obično dobija iz prirodnog gasa. Transport i skladištenje vodonika takođe može stvoriti zagađivače. Gorivne ćelije su koriste u različitim vrstama vozila, uključujući viljuškare, posebno u unutrašnjim aplikacijama gde su njihove čiste emisije važne za kvalitet vazduha, takođe postoje primene i u svemirskim aplikacijama. Gorivne ćelije se razvijaju i testiraju u kamionima, autobusima, čamcima, brodovima, motociklima i biciklima, i sličnim vojnim vozilima.

U ovom radu je razmatranje i istraživanje fokusirano na koncepciju sa Slike 4, odnosno na isključivo baterijski napajana električna vozila (BEV). Dva su osnovna tipa punjenja, odnosno punjača baterijske banke korišćenih na ovim na ovim vozilima: (1) naizmenični ili AC punjači i jednosmerni ili DC punjači.

Punjenje naizmeničnom strujom se odnosi na punjenje pomoću električne energije dostupne iz elektroenergetske mreže. Ova vrsta punjenja zahteva ugrađeni punjač na električnom vozilu, tzv. "On-Board Charger" (OBC), koji je ustvari AC/DC energetski pretvarač sa kontrolisanim DC izlazom, odnosno izlaznom strujom, koja je potrebna za punjenje baterijske banke. Principski prikaz AC punjačkog sistema EV je dat na Slici 6.



Slika 6. AC punjački sistem na EV

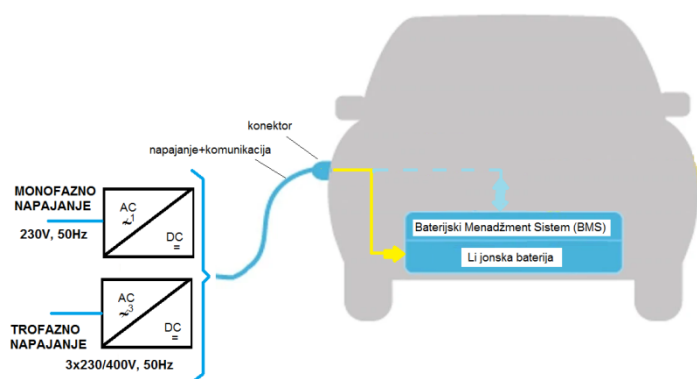
Što se tiče AC punjača električnih vozila, razlikujemo dva tipa AC punjača. AC punjač nivoa 1 i AC punjač nivoa 2.

AC punjač nivoa 1, je najjednostavniji osnovni punjač koji na svom ulazu iz mreže dobija napon ($120 \div 240$) V_{ac} i zatim napaja električno vozilo preko kabla za punjenje. Ulazna struja ovog punjača je opsega ($13 \div 16$) A. Ovo je najsporiji tip punjača, ali je i najprenosiviji i može se priključiti skoro svuda. Većina modela je izlazne snage opsega ($1 \div 2$) kW. Približno vreme punjenja kod ovih punjača je >20 časova.

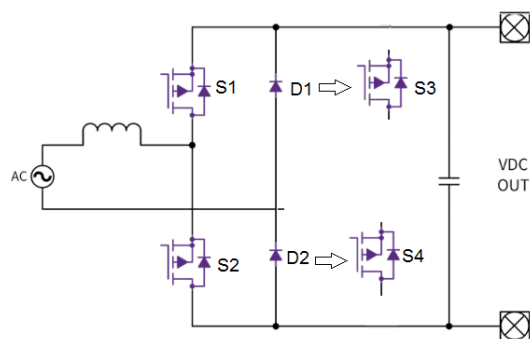
AC punjač nivoa 2 takođe koristi dostupno mrežno napajanje ($120 \div 240$) V_{ac}, ali je za razliku od prethodnog tipa AC punjača, znatno veće struje ($32 \div 40$) A. Ovi punjači su izlazne snage opsega ($11 \div 22$) kW. Približno vreme punjenja baterije kod ovih sistema je oko ($5 \div 6$) h.

Da bi se smanjilo vreme punjenja za EV, jedini način je korišćenje DC punjenja. DC punjači isporučuju struju direktno na bateriju u EV, praktično mimo ugrađenog punjača u EV. DC punjači nivoa-3 se često nazivaju DC brzi punjači tzv. "DC Fast Charger" (DCFC) ili super punjači. Nivoi snage za ovaj tip se kreću od 50 kW do 500 kW. Ovi punjači su napravljeni od više modularni napajanja od po 20, 30, 50 ili 60 kW, koje se mogu integrisati i koristiti za postizanje željenog ukupnog nivoa izlazne snage. U zavisnosti od kapaciteta, ovi brzi punjači mogu da napune tipičnu EV litijum jonsku bateriju za manje od 30 min.

Na Slici 7 je dat prikaz DC super-brzog punjačkog sistema, sa monofaznim ili trofaznim mrežnim ulazom. Na Slici 8 su dati tipovi punjačkih konektora u skladu sa prethodno navedenom podelom punjača.

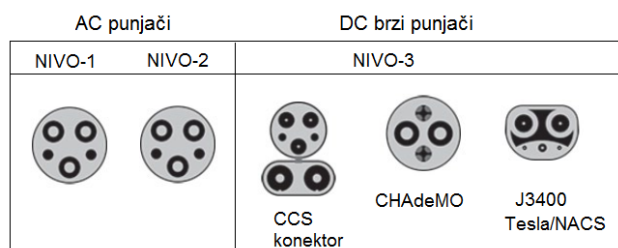


Slika 7. DC punački sistem EV a monofaznim i trofaznim ulazom



Slika 8. PFC "tothem pole" topologija DC punjača

SAE J1772 je industrijski standard za AC nivoe 1 i 2 punjača. CHAdeMO je jedan od prvih konektora predstavljenih na globalnom tržištu. Razvijen je u saradnji pet japanskih proizvođača automobila i implementiran je da bude industrijski standard. Ovo je najistaknutiji konektor u Japanu za upotrebu sa električnim vozilima koje proizvode japanski proizvođači automobila. Podržava samo DC punjenje i za EV je potreban dodatni kabl J1772 da bi se postigli nivoi punjenja 1 ili 2 [8].



Slika 8. Tipovi punjačkih konekcija

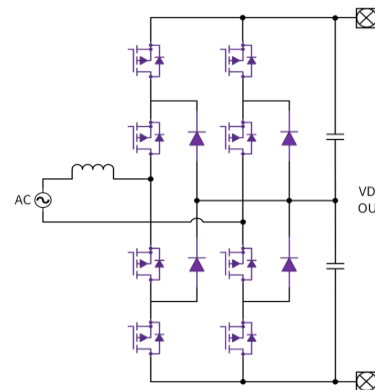
CCS tip se koristi za kombinovani sistem punjenja, koji je takođe predstavljen otprilike u isto vreme kada i CHAdeMO. Najveća prednost CCS-a je u tome što omogućava AC ili DC punjenje na istom priključku. Postao je omiljeni konektor među evropskim i američkim proizvođačima automobila. J3400 - Tesla® / NACS konektor je ekskluzivno dimenzionisan za Tesla EV i njegovu mrežu za punjenje. Mreža Tesla super-punjača je rapidno porasla od svog uvođenja. Sa Tesla automobilima i ojačanom prodajnom mrežom postaju sve popularniji u Severnoj Americi. Kompanija je odlučila da otvori mrežu za punjenje za električna vozila koja

nisu Tesla sredinom 2023. Najveći američki i evropski proizvođači automobila najavili su partnerstvo sa Teslom kako bi iskoristili mrežu punjača zajedno sa novim velikim električnim vozilima koja nisu opremljena prema dizajnu Tesla konektora [8].

III OSNOVNE TOPOLOGIJE DC PUNJAČA

Za AC/DC konverziju u ovim punjačkim sistemima se mogu koristiti jednofazne i trofazne topologije. Jednofazne topologije su najčešće primenjene za rezidencijalne stanice za punjenje ili kada su nivoi snage manji od 6 kW, dok su trofazne topologije pogodnije za punjenja veće snage (>11 kW).

PFC topologija "tothem pole" (Slika 9) je ustvari standardni monofazni PFC podizač napona, gde jedna polovina mosta sadrži dva aktivna prekidača, obično za ove aplikacije MOSFET ili IGBT prekidači od silicijum karbida (SiC) (S1 i S2), a druga polovina mosta sadrži dve diode (D1 i D2).



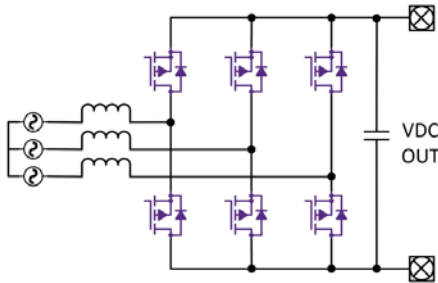
Slika 9. NPC PFC topologija DC punjača [8]

Glavna prednost ove topologije je u tome što obezbeđuje bolju efikasnost u poređenju sa konvencionalnim PFC podizačem. Ako se umesto dioda koriste S3 i S4 prekidači, ova topologija može da obezbedi dvosmerni tok energije, što može biti interesantno za DC punjačke aplikacije. Gubici inverznog oporavka u SiC prekidačima ograničavaju rad ove topologije u diskontinualnom režimu tzv. *Discontinuous Conduction Mode* (DCM). Sa ultra niskim povraćenim naelektrisanjem Q_{rr} tokom inverznog oporavka ova prekidačka topologija omogućava i rad u kontinualnom režimu, tzv. *Continuous Conduction Mode* (CCM).

U monofaznim aplikacijama je postala interesantna topologija energetskog pretvarača sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkom koja obezbeđuje korekciju faktora snage (PFC), tzv. "neutral point clamped" (NPC) PFC. Primena NPC obezbeđuje da se mogu birati prekidači u svakoj vertikali sa nižim probojnim naponom, a takođe i sa manjim dozvoljenim porastom napona "dv/dt". Prekidači sa nižim naponom su jeftiniji, te se njihovim izborom smanjuje cena modula, a manji "dv/dt" obezbeđuje manja EMI zračenja, čime se smanjuje veličina potrebnih ulaznih filtera. Ovom topologijom je moguće postići dvosmernost toka energije, veću gustinu snage (pa i energije) i bolju efikasnost. Glavni nedostatak ove topologije je taj što zahteva veći broj prekidačkih komponenti i što se na taj način povećava složenost kontrolnog kola sistema.

Ako postoje zahtevi za brže punjenje i većom gustinom snage, nameće se korišćenje trofaznih topologija. U zavisnosti od zahteva krajnjeg dizajna, trofazne konfiguracije se mogu podeliti u dva dela: (1) topologije na dva nivoa i (2) topologije sa više nivoa, tzv. “multilevel”, pri čemu svaka pruža svoje jedinstvene prednosti.

Na Slici 10 je prikazana mrežna PFC topologija sa dva nivoa. Za izlazni napon 800 Vdc napon međukola, svaka vertikalna sadrži SiC prekidačke elemente probojnog napona 1200 V. Za energetske modul snage 22 kW tipične vrednosti napona su 400 V za ulazni mrežni napon, učestanosti 50 Hz i jednosmerni napon DC međukola 800 Vdc.

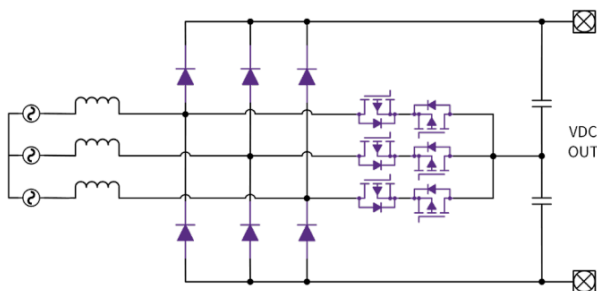


Slika 10. Mrežna PFC topologija DC punjača

Glavna prednost ove topologije je što je jednostavna za implementaciju i da ima pojednostavljenu šemu upravljanja. Uz prisustvo aktivnih prekidača za svaku vertikalnu mostu, ovaj tip energetskog pretvarača može da obezbedi dvosmerni protok energije. Budući da se u ovom slučaju radi o topologiji sa dva nivoa, glavni njen nedostatak je taj što zahteva velike ulazne filtere da bi se redukovala EMI na prihvatljive nivoe u poređenju sa topologijama sa više nivoa.

Za konverziju velike snage, posebno sa EV punjačem sa tri nivoa, Vienna ispravljač je najčešća topologija koja se koristi u trofaznoj izvedbi konverzije na tri nivoa, kao što prikazuje Slika 11. Glavna prednost ove topologije je inherentna trostepena konverzija koja proizvodi nizak stres na prekidačima čime se povećava njegova sposobnost da radi u CCM režimu.

Postoje različite verzije topologije Vienna ispravljača, pri čemu je T-tip najčešći (Slika 12). Topologija na Slici 11 koristi kombinaciju šest 1200 V SiC Šotki dioda i šest aktivnih MOSFET prekidača od 650 V. Tipična snaga jednog energetskog modula za ovu topologiju je 25 kW.

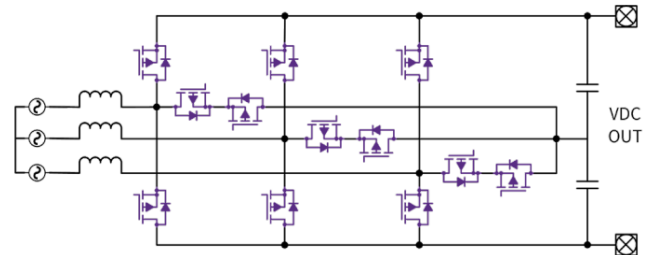


Slika 11. Vienna ispravljačka topologija DC punjača [8]

Pošto su svi aktivni prekidači “fiksirani” neutralnom tačkom (NPC), aktivni prekidači trpe samo polovinu napona

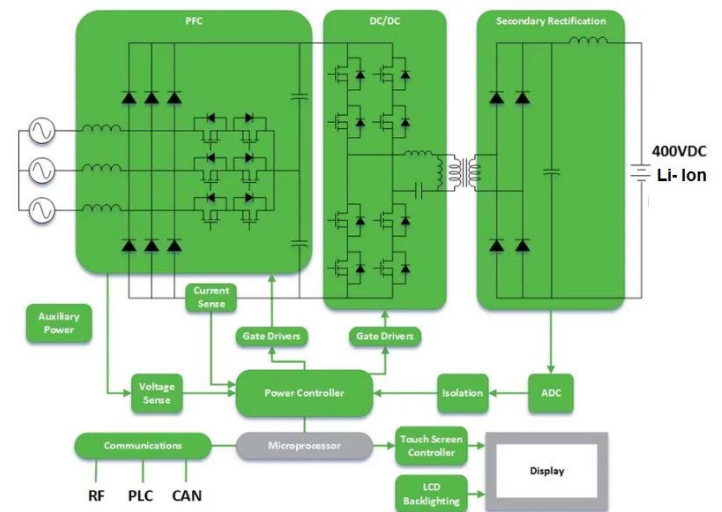
karakterističnog za standardne 1200 V aplikacije. Glavni nedostatak ove topologije je što može da obezbedi samo protok snage u jednom smeru.

Ukoliko se Šotki diode zamene sa MOSFET prekidačima dobijamo tzv. T-topologiji Vienna ispravljača, koja je prikazana na Slici 12. Ova topologija obezbeđuje dvosmerni tok snage. Srednji prekidači su u NPC, što dovodi do smanjenja naponskog stresa na njima.



Slika 12. Vienna ispravljačka T- topologija DC punjača[8].

Na Slici 13 je predstavljena topologija testiranih DC punjačkih stanica koja u sebi kombinuje Vienna PFC ispravljač i NPC mosnu topologiju sa galvanskom izolacijom DC baterijske strane.



Slika 13. Topologija testirane DC brze punjačke stanice

IV SPECIFIKACIJE TESTIRANIH PUNJAČA I E-VOZILA

U sklopu ovog istraživanja je izvršeno testiranje punjačkih stanica proizvodnje KOSTAD UNITY 120, izlazne DC snage 120 kW i KOSTAD UNITY 240, izlazne DC snage 240 kW[9-10]. Testovi su sprovedeni za razne režime punjenja na vozilu Hyundai Kona Electric iz 2021. Stoga će u nastavku biti date neke osnovne tehničke karakteristike baterije na pomenutom električnom vozilu, kao i karakteristike punjačkih stanica.

Hyundai Kona Electric ima aerodinamično oblikovanu karoseriju sa zatvorenom prednjom maskom i modernizovanim LED svetlima. Unutrašnjost je prostrana i sadrži visokokvalitetne materijale sa naprednim multimedijalnim sistemom. Snaga pogonskog elektromotora je 150 kW (204KS), obrtni moment

395 Nm, ubrzanje (0÷100) km/h, odnosno za vreme 7.9s se postiže maksimalna brzina od 167 km/h.

Baterija na ovom vozilu je polimerna Litijum-jonska energetskog kapaciteta 64 kWh. Nominalni jednosmerni napon baterije je 400 V_{dc}. Domet vozila sa ovom baterijom je prema standardu tzv. "Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure" (WLTP), maksimalno 484 km, dok je potrošnja približno 14,7 kWh/100 km. Priključak na vozilu za punjenje je CCS Combo 2. Za navedenu bateriju je se primenjuju brzo i sporije (tzv. "kućno") punjenje. Za brzo punjenje DC punjač snage daje 100 kW (od 10% do 80% za oko 47 min), 50 kW (od 10% do 80% za oko 64 min), dok se za kućno punjenje primenjuje AC punjač snage od 10.5kW (6 h i 50 min za punjenje od 10% do 100%) i AC punjač snage 7.2 kW (9 h i 15 min za punjenje do 100%).



Slika 14. Izgled (zadnji i prednji deo razvodnog ormara) punjačke stanice KOSTAD UNITY 120, izlazne snage 120 kW

Na Slici 14 je dat izgled punjačke stanice KOSTAD UNITY 120. KOSTAD UNITY 120 je stanica za brzo punjenje električnih

vozila sa maksimalnom izlaznom snagom od 120 kW (6 paralelno povezanih jediničnih modula snage 20 kW i svaki jednosmernog izlaznog napona 400 V_{dc}). KOSTAD UNITY 240 je stanica za brzo punjenje električnih vozila sa maksimalnom izlaznom snagom od 240 kW (12 paralelno povezanih jediničnih modula snage 20 kW i jednosmernog napona 400 V_{dc}).

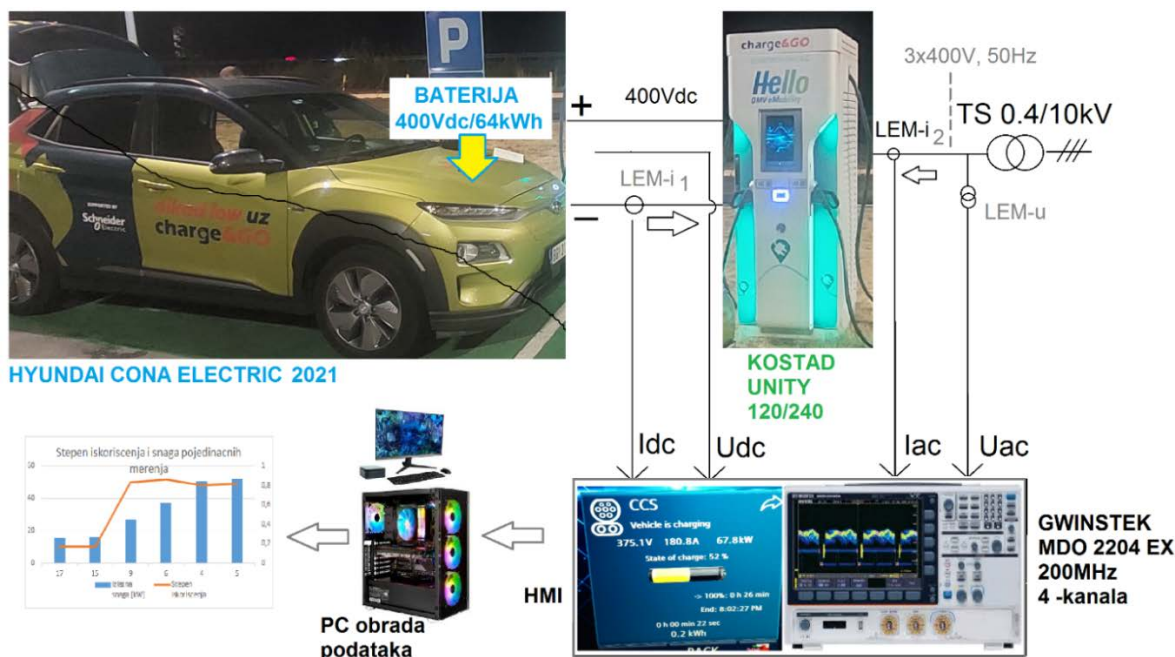
Oba pomenuta tipa punjačkih stanica su opremljena sa dva CCS2 priključka, omogućavajući istovremeno punjenje dva vozila, svako sa po 60 kW. U slučaju paralelnog punjenja, integrisani sistem za upravljanje opterećenjem osigurava ravnomernu raspodelu dostupne snage. Pored CCS2 priključaka, stanica podržava i CHAdeMO (DC) i Type2 (AC) standarde punjenja, pružajući dodatne opcije za različite tipove vozila.

Obe stanice se mogu koristiti i kao AC punjači za EV. Maksimalna AC izlazna snaga stanice KOSTAD UNITY 120 je 22 kW, dok je maksimalna AC izlazna snaga stanice KOSTAD UNITY 240, 44 kW. Stanice imaju mogućnost komunikacije putem OCPP 1.6 JSON protokola, sa mogućnošću nadogradnje na OCPP 2.0, omogućavajući efikasno upravljanje i nadzor putem Web baziranih sistema.

Pomenute KOSTAD stanice su optimizovane za javne i polujavne prostore, poput autoputeva, parkirališta, trgovinskih centara i depoa za autobuse i komercijalna vozila i sličnim objektima.

V EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni nakon eksploatacionih ispitivanja i testiranja brzih punjačkih stanica koje su bazirane na jedinicama KOSTAD UNITY 120/240, a koje je ugradila firma Charge & GO iz Beograda. Na Slici 15 je dat funkcionalni prikaz test okruženja u sklopu kojeg su ispitivani režimi punjenja na električnom vozilu *Hyundai Cona Electric*. Testirani su vi režimi punjenja na polimernoj Li-jonskoj bateriji nominalnog napona 400 V_{dc} i kapaciteta 64kWh.



Slika 15. Eksperimentalni setap za testiranje brze DC punjačke stanice KOSTAD UNIT 120/240-investitor firma Charge & GO

Osciloskopski su merene sledeće električne veličine od interesa: napon punjenja U_{dc} , struja punjenja I_{dc} , ulazni mrežni napon U_{ac} i ulazna mrežna struja I_{ac} . Preko HMI interfejsa na prednjoj strani KOSTAD jedinica su očitavane izmerene vrednosti stepena napunjenosti baterije SOC% i energija baterije u kWh. Prilikom testiranja je korišćena sledeća merna oprema:

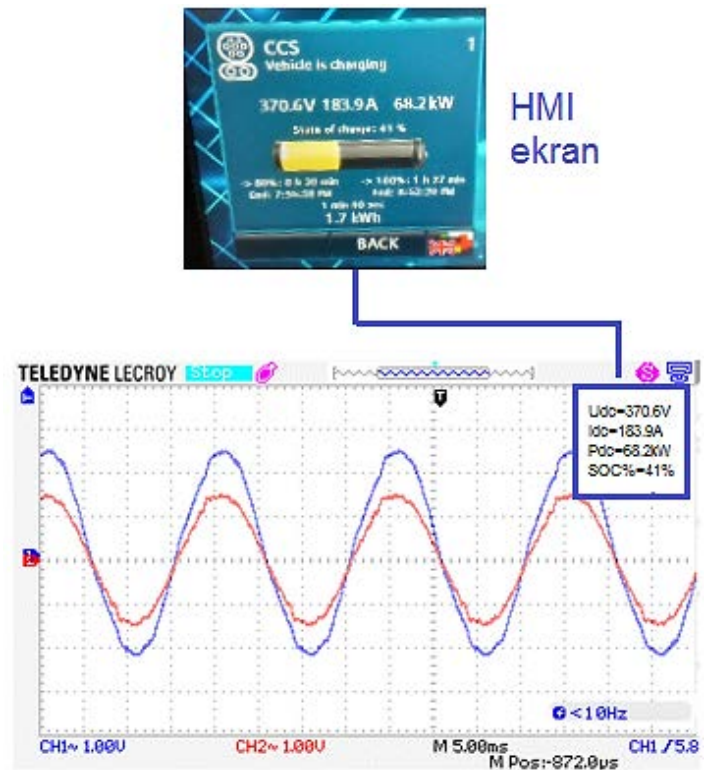
- digitalni 4-kanalni osciloskop GW INSTEK MDO2204EX, 200 MHz, 1 Gs/s i 2-kanalni osciloskop WAVE ACE 1000 TELEDYNE LeCROY, 60 MHz, 1 Gs/s,
- merenje napona U_{dc} je obavljeno visokonaponskom sondom (razdelnikom) za maksimalni napon 10kV, prenosnog odnosa 1:100, za direktno povezivanje na osciloskop preko BNC konektora,
- merenje struja I_{dc} i I_{ac} je obavljeno AC/DC strujnim sondama baziranim na Hall efektu, CC650 HANTEK, propusnog opsega 50 MHz, za maksimalnu struju 650A, mernih osetljivosti 1 mV/A i 1 mV/0,1A,
- merenje napona U_{ac} je vršeno naponskim LEM modulom LV100 VSP558 baziranog na Hall efektu, prenosnog odnosa 1000/1000, primarne struje 25 mA.

Na Slikama 17-19 su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni testiranjem punjačke jedinice KOSTAD UNITY 120. U ovim testovima su mereni mrežna struja i mrežni napon za tri karakteristične vrednosti stanja napunjenosti baterije 40 %, 80 % i 95 %. Napon i struja baterije (U_{dc} i I_{dc}) su očitavani sa HMI na prednjoj strani razvodnog ormara jedinice KOSTAD 120.

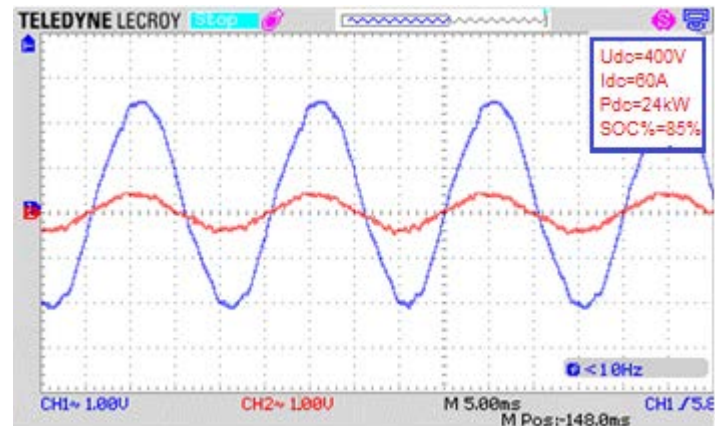
Na Slici 17 su prikazani snimljeni talasni oblici mrežnog faznog napona i mrežne fazne struje pri naponu baterije $U_{dc}=370,6$ Vdc, pri struji punjenja $I_{dc}=183,9$ A i pri stanju napunjenosti baterije SOC%=41%. Ove vrednosti su očitane na HMI ekranu na prednjoj strani razvodnog ormara punjačke jedinice KOSTAD UNITY 120. Kao što se sa prikazanih snimaka može videti mrežna struja i mrežni napon su u fazi (kolo za PFC ovo obezbeđuje). Izmerena maksimalna vrednost mrežnog napona je $U_{ac(max)}=312$ V, dok je izmerena maksimalna vrednost mrežne struje $I_{ac(max)}=150$ A. Ovim vrednostima odgovaraju efektivne vrednosti, $U_{ac}=312$ V/1,41=221,30 V i $I_{ac}=150$ A/1,41=106,38 A. Obzirom da je faktor snage veoma blizak jedan i ako zanemarimo harmonijska izobličenja ulazne struje i ulaznog napona, možemo zaključiti da je ulazna aktivna snaga koju punjačka jedinica uzima iz mreže po jednoj fazi jednaka $P_{ac1} \approx 221,3$ V · 106,38 A = 23,54 kW. Ukupna aktivna snaga koja se uzima iz mreže je $P_{ac} \approx 70,5$ kW. Izlazna snaga se dobija na osnovu izmerenih DC vrednosti napona i struje u režimu stanja napunjenosti baterije SOC%=41%, $U_{dc}=370,6$ V i $I_{dc}=183,9$ A, odnosno $P_{dc}=U_{dc} \cdot I_{dc}=370,6$ V · 183,9 A = 68,15 kW. Na osnovu prethodnih merenja se može dobiti stepen iskorišćenja za režim kada je stepen napunjenosti baterije SOC%=41%, odnosno $\eta=P_{dc}/P_{ac}=68,15$ kW/70,5 kW=0,966=96,6%.

Gubici u energetske modulima (ulazni AC PFC modul +izlazni DC ispravljač) u okviru KOSTAD 120 jedinice su $P_{\gamma} \approx 2,35$ kW. Ovaj deo značajnije utiče na grejanje punjačke jedinice, ali je sistemom ventilatora za hlađenje na osnovnim jedinicama snage 20 kW adekvatno rešeno odvođenje toplote sa poluprovodničkih modula, tako da u toku rada nisu detektovana niti primećena

pregrevanja energetske modula.



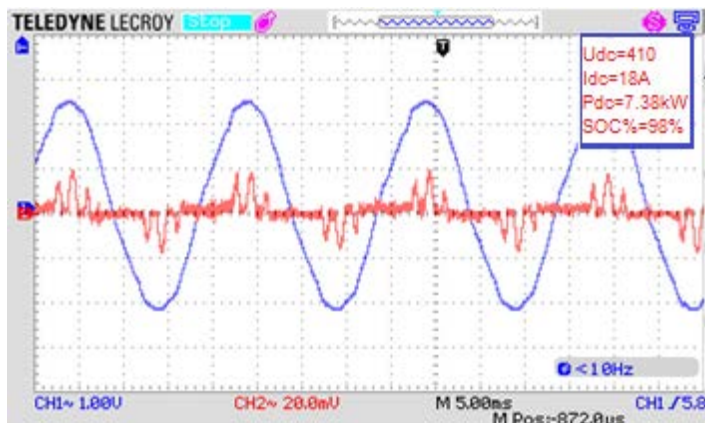
Slika 17. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 40%
CH1- napon mreže $U_{ac}=130$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=100$ A/div



Slika 18. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 80%
CH1- napon mreže $U_{ac}=130$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=100$ A/div

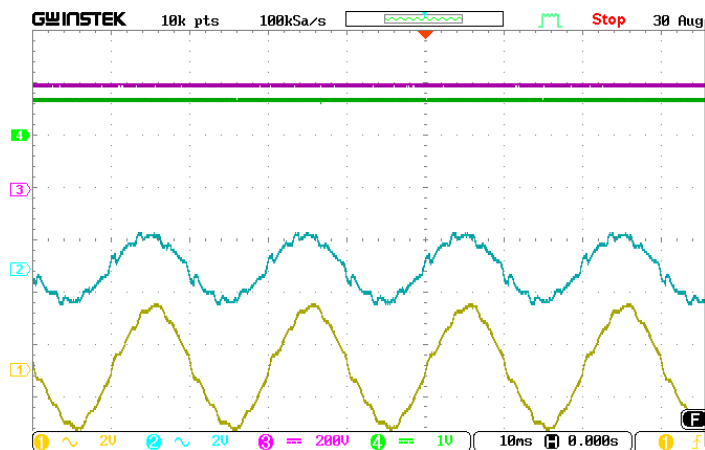
Na Slici 18 su prikazani eksperimentalni rezultati u režimu kada je stepen napunjenosti baterije iznosio 85%. U ovom režimu su izmerene maksimalna vrednost mrežnog napona $U_{ac(max)}=312$ V, dok je izmerena maksimalna vrednost struje $I_{ac(max)}=50$ A. Ovim izmerenim maksimalnim vrednostima odgovaraju efektivne vrednosti, $U_{ac}=312$ V/1,41=221,3 V i $I_{ac}=50$ A/1,41=35,4 A. Ukupna aktivna snaga koja se uzima iz mreže je jednaka $P_{ac}=\sum P_{ac1}=3 \cdot 221,3$ V · 35,4 A ≈ 23,5 kW. Na HMI modulu su

očitanu $U_{dc}=400$ V i $I_{dc}=60$ A. Stoga je stepen iskorišćenja u ovom slučaju $\eta=P_{dc}/P_{ac}=24$ kW/28,25 kW $\approx$ 85%. U slučaju manjih struja opterećenja stepen iskorišćenja opada. Gubici usled vođenja pri malim opterećenjima opadaju, ali u ovom slučaju su dominantni prekidački gubici koji sporije opadaju sa opterećenjem i stoga uslovljavaju niži stepen iskorišćenja.



Slika 19. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 98%
CH1- napon mreže $U_{ac}=120$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac} = 20$ A/div

Na Slici 19 je prikazan režim kada je baterija napunjena na SOC%=98%. Izmerene vrednosti na DC strani su $U_{dc}=410$ V i $I_{dc}=18$ A, što daje veoma nisku izlaznu snagu u ovom režimu, odnosno $P_{dc}\approx 7,38$ kW. Što se tiče ulazne struje i napona, konstatovano je značajnije izobličenje ulazne struje. Razlog za ovu pojavu je taj, što je ulazni PFC ispravljač u ovom režimu punjenja ušao u diskontinualni režim rada (DCM), odnosno struja je prekidna u pojedinim intervalima, kao što se vidi sa osciloskopskog snimka na Slici 19.



Slika 20. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 71%
CH1- napon mreže $U_{ac}=300$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=200$ A/div,
CH3 - napon baterije $U_{dc}=200$ V/div,
CH4 - struja punjenja baterije $I_{dc}=200$ A/div

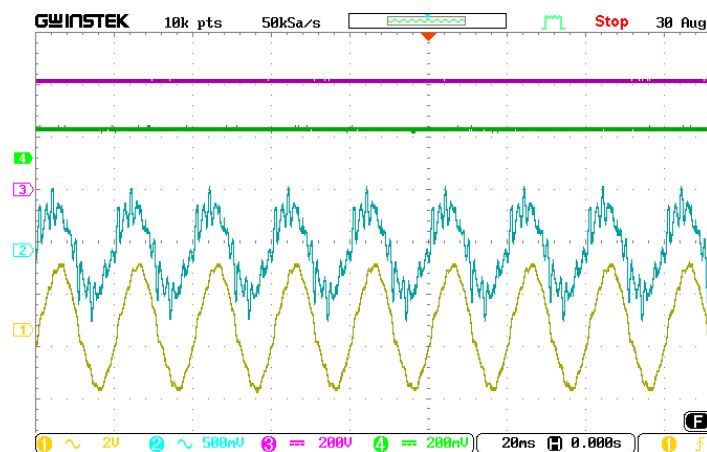
U ovom režimu su izmerene vrednosti na mrežnoj AC strani, $U_{ac}=230$ V, $I_{ac}=15$ A i $P_{ac}=3,3,45$ kW=10,35 kW i određen je

stepen korisnosti $\eta=P_{dc}/P_{ac}=7.38$ kW/ 10.35 kW $\approx$ 71%. U ovom režimu je bio najniži stepen iskorišćenja. Režim nije trajan i nakon relativno kratkog vremena, tipično (5÷10) min, dok traje impulsno punjenje sa relativno malom strujom punjenja (tzv. “trickle charge”) punjačka jedinica se isključuje obzirom da je u tom slučaju SOC%=100%, odnosno baterija na električnom vozilu je napunjena.

Na Slikama 20-24 su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni prilikom testiranja druge punjačke jedinice veće izlazne snage (240 kW) KOSTAD UNITY 240. Rezultati su prikazani prilikom dopune baterije na vozilu sa $(SOC\%)_1=71\%$ do stanja napunjenosti $(SOC\%)_2=96\%$.

Sa osciloskopskog snimka koji je prikazan na Slici 20 su očitane vrednosti napona i struje na DC strani $U_{dc}=395$ V i $I_{dc}=147,8$ A. Maksimalna vrednost mrežne struje je iznosila $I_{ac(max)}=128$ A, a maksimalna vrednost faznog napona mreže $U_{ac(max)}=324$ V. Pri ovim uslovima, izmerene su izlazna snaga $P_{dc}=58,3$ kW i ulazna snaga $P_{ac}=62,70$ kW, pa je stepen korisnosti oko 93%.

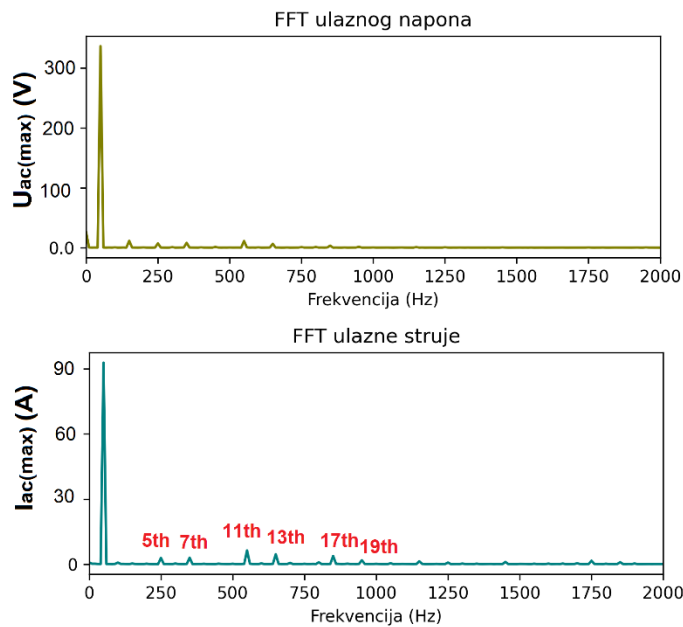
Na Slici 21 su takođe predstavljeni talasni oblici prethodno navedenih veličina U_{dc} , I_{dc} , U_{ac} i I_{ac} ali u režimu kada je baterija bila napunjena na 96% od svog nominalnog energetskeg kapaciteta od 64 kWh (pri deklarisanom naponu od 400 V je kapacitet baterije $C_b=64$ kWh/400 V=160 Ah). Pri naponu $U_{dc}=410,2$ V i kapacitetu baterije $C_b=0,96\cdot 160$ Ah $\approx$ 153 Ah, ukupna energija uskladištena u bateriji je $W_b=153$ Ah $\cdot$ 410,5 V $\approx$ 62.8kWh. Slično kao i u prethodnom slučaju su dobijene vrednosti snaga $P_{dc}=14,7$ kW i $P_{ac}=19,5$ kW, te je na osnovu ovih vrednosti određen stepen iskorišćenja, koji je u tom slučaju iznosio oko 70%



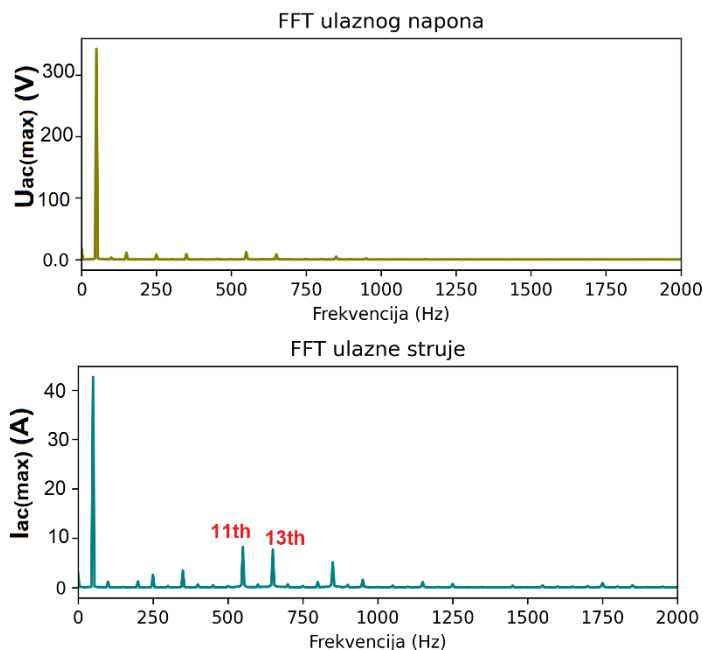
Slika 21. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 96%
CH1- napon mreže $U_{ac}=300$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=40$ A/div,
CH3 - napon baterije $U_{dc}=200$ V/div,
CH4 - struja punjenja baterije $I_{dc}=40$ A/div

Na Slici 22 su dati frekventni spektri ulaznog mrežnog napona i ulazne mrežne struje u stanju napunjenosti baterije SOC%=71%. Sa spektara prikazanih na Slici 22 se uočava da je prisustvo viših harmonika napon zanemarljivo i da dominira osnovni harmonik 50 Hz, dok je u ulaznoj struji uočeno prisustvo viših harmonika reda 5,7,11,13,17 i 15. Pri ovome treba napomenuti da su od prikazanih viših harmonika dominantni 11- ti i 13-ti (učestanosti

su 550 Hz i 650 Hz, respektivno). Amplituda 11-tog harmonika je oko 7 A, dok je amplituda 13-tog harmonika oko 4 A. Stoga je, pri 50 Hz, njihov procentualni udeo u odnosu na maksimalnu struju 7,8 % u prvom slučaju i oko 4,3% u drugom slučaju.



Slika 22. Spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje u režimu stanja napunjenosti SOC%=71%



Slika 23. Spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje u režimu stanja napunjenosti SOC%=96%

Na Slici 23 su dati spektri ulaznog mrežnog napona i ulazne mrežne struje u stanju napunjenosti baterije SOC%=96% (skoro u potpunosti napunjena baterija na električnom vozilu.). Uočava se da je prisustvo viših harmonika napona zanemarljivo i da dominira osnovni harmonik 50 Hz, dok je u ulaznoj struji uočeno prisustvo viših harmonika višeg reda 5, 7, 11, 13, 17 i 19. Pri

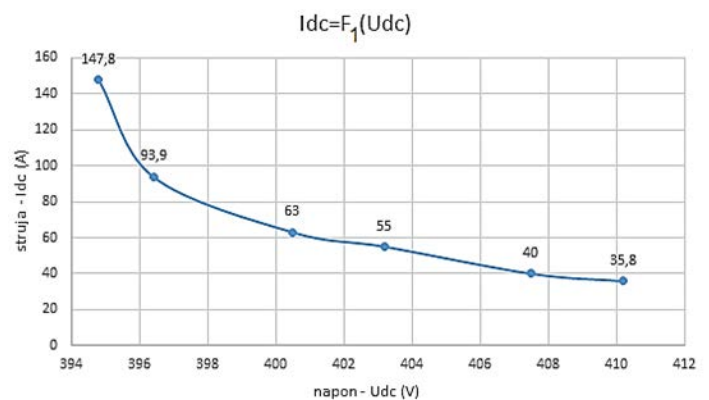
ovome treba napomenuti da su od prikazanih viših harmonika dominantni 11-ti i 13-ti. Amplituda 11-tog harmonika je oko 10A, dok je amplituda 13-tog harmonika oko 8 A. Stoga je pri 50 Hz njihov procentualni udeo u odnosu na maksimalnu struju 25% u prvom slučaju i oko 19% u drugom slučaju.

U nastavku su dati rezultati merenja i karakterizacije bitnih karakteristika punjačke stanice (Tabela 1).

Tabela 1. Tabelarni prikaz merenih veličina od interesa tokom testiranja (od stanja napunjenosti baterije 71% do 96%).

I_{dc} (A)	U_{dc} (V)	P_{dc} (kW)	SOC (%)	U_{ac} (V)	I_{ac} (A)	P_{ac} (kW)	η (%)
147,8	394,8	58,3	71	229,6	91,00	62,70	0,93
93,9	396,4	37,2	77	226,5	59,40	40,34	0,92
63	400,5	25,3	85	225,0	42,40	28,49	0,88
55	403,2	22,18	88	226,0	39,90	27,05	0,85
40	407,5	16,30	94	224,0	32,00	21,50	0,76
35,8	410,2	14,7	96	225,0	28,37	19,41	0,70

Na Slici 24 je prikazana funkcionalna zavisnost F1 struja punjenja baterije I_{dc} od njenog napona U_{dc} . Uočava se da je na početku punjenja baterije pri $(SOC\%)_1=71\%$, $I_{dc1}=147,8$ A, pri naponu $U_{dc1}=394,8$ V, a da je na kraju punjenja pri $SOC\%_2=96\%$ $I_{dc2}=35,8$ A, pri naponu baterije od $U_{dc}=410,2$ V.

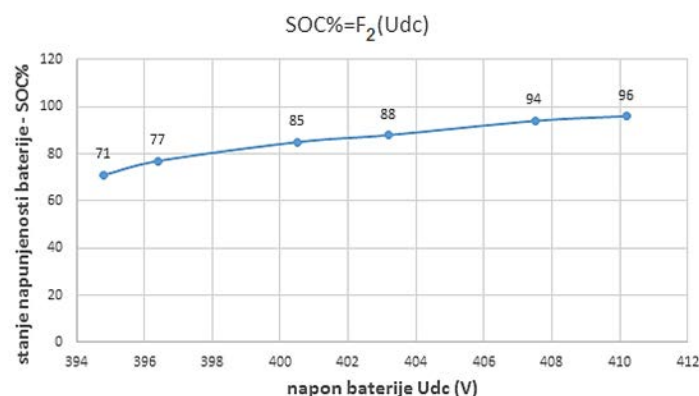


Slika 24. Zavisnost struje punjenja baterije I_{dc} električnog vozila od napona baterije U_{dc} za SOC% u opsegu (71%-96%)

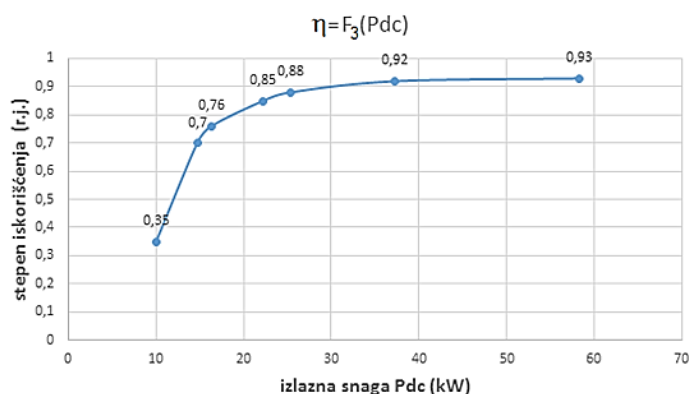
Na Slici 25 je prikazana funkcionalna zavisnost F2 stanja napunjenosti baterije SOC% od napona U_{dc} . Ova karakteristika je približno linearna u opsegu punjenja od SOC% 71%-96%.

Na Slici 26 je prikazana funkcionalna zavisnost F3 stepena iskorišćenja η (izraženog u r.j.) baterijskog punjača u zavisnosti od izlazne snage punjenja P_{dc} . Maksimalna vrednost stepena iskorišćenja je za režim punjenja SOC%=71% i ona je iznosila 93% pri izlaznoj snazi od $P_{dc}=58,3$ kW i pri ulaznoj snazi $P_{ac}=62,7$ kW. U ovom režimu su gubici iznosili $P_{\gamma}\approx 4,4$ kW. Prema deklaraciji proizvođača maksimalni stepen iskorišćenja ispitivanih punjačkih stanica je 96%, ali pri punoj snazi od 240 kW za punjačku jedinicu KOSTAD UNITY 240. Rezultat za stepen iskorišćenja od 93% koji je dobijen pri izlaznoj snazi koja je približno 1/4 od maksimalne snage (oko 60 kW) za ovu

napojnu jedinicu je u potpunosti zadovoljavajući.



Slika 25. Zavisnost stanja napunjenosti baterije SOC% od napona baterije U_{dc} za SOC% u opsegu (71%-96%)



Slika 26. Zavisnost stepena iskorišćenja od izlazne snage P_{dc} punjača na električnom vozilu; SOC% u opsegu (71%-96%)

VI ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana eksperimentalna verifikacija i testiranje dva tipa napojnih jedinica KOSTAD UNITY 120 izlazne snage 120 kW i KOSTAD UNITY 240 izlazne snage 240 kW na baterijskoj banci E-vozila *Hyundai Cona Electric*, proizvodnje 2021. Nominalni kapacitet baterije na ovom vozilu je 160Ah pri naponu 400 Vdc. Sva testiranja i ispitivanja su sprovedena na punjačkim stanicama koje je isporučila i ugradila firma Charge & GO, koja jed između ostalog generalni zastupnik i distributer austrijske firme KOSTAD renomiranog proizvođača punjačkih stanica. U okviru eksploatacionih testova su osciloskopsku snimljene sve relevantne veličine od interesa i određen je stepen iskorišćenja ovih punjačkih jedinica za različite režime izlaznih snaga punjenja i stepena napunjenosti baterije na E-vozilu. Takođe su u sklopu ovog istraživanja su snimljeni FFT metodom spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje i procenjen je uticaj punjačke stanice na napojnu mrežu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao deo tekućih istraživanja studenta Milana Đerića u okviru master završnog rada iz predmeta Projektovanje

elektroenergetskih pretvarača (PEEP), pod mentorstvom prof. Željka Despotovića, na Akademiji tehničko-umetničkih strukovnih studija (ATUS) - Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva iz Beograda.

Publikovanje i objava ovog rada su najvećim delom finansirani od strane firme Charge & GO iz Beograda, koja je bila nosilac posla prilikom implementacije testiranih punjačkih stanica za potrebe korisnika TC "Big Fashion", ulica Višnjička 84, Karaburma, Beograd i benzinske pumpe OMV, ulica Novi Novosadski put bb., Zemun.

Jednim delom finansiranje ovog istraživanja je takođe bilo podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024.-2025. (Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034).

LITERATURA

- [1] Yu, D.M., Yang, C., Jiang, L.R., Li, T.Y., Yan, G.G., Gao, F.K., Liu, H.N. Review on Safety Protection of Electric Vehicle Charging, Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, Vol. 42, No.6, pp. 2145-2164, 2022. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210274>
- [2] Zhou, K., Wu, Y., Wu, X., Sun, Y., Teng, D., Liu, Y. Research and Development Review of Power Converter Topologies and Control Technology for Electric Vehicle Fast-Charging Systems, Electronics, Vo. 12, No. 7, pp.1581-, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12071581>
- [3] Dixon, J., Keith, Bell, K. Electric vehicles, Battery capacity, charger Power, access to charging and the impacts on distribution networks, eTransportation, Vol. 4, 100059, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100059>
- [4] Global EV Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> [pristupljeno 10.01.2025]
- [5] Global Electric Car Stock, 2010-2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2022> [pristupljeno 10.01.2025]
- [6] Tong, M.H., Cheng, M., Xu, Z.H., Wen, H.H., Hua, W., Zhu, X.Y. Key issues and solutions of integrated on-board chargers for electric vehicles, Transactions of China Electrotechnical Society, Vol. 36, No. 24, pp. 5125-5142, 2021. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201154>
- [7] EV and HEV Fundamentals, Academy.gannet solutions <https://academy.gannetsolutions.com/product/ev-and-hev-fundamentals/> [pristupljeno 10.01.2025]
- [8] Aulakh, A. PRD-08367 REV 1.0, EV Charging Power Topologies Design Guidebook, Wolfspeed, 2024, https://assets.wolfspeed.com/uploads/2024/01/Wolfspeed_PRD-08367_EV_Charging_Power_Topologies_Design_Guidebook_Application_Note.pdf [pristupljeno 10.01.2025]
- [9] Technical DataSheet, UNITY120, 2020, https://www.greenetik.eu/images/Kostad/Unity120_DE_EN_FR_RU_AR_Datasheet.pdf [pristupljeno 10.01.2025]
- [10] Elektro punjači, KOSTAD Unity 240, 2023, <https://elektropunjac.com/product/kostad-unity-240/> [pristupljeno 10.01.2025]

AUTORI/AUTHORS

Milan Đerić - dipl. inž. strukovnih studija, Charge & GO, Beograd, milan.djeric@chargego.rs, ORCID [0009-0008-1192-5419](https://orcid.org/0009-0008-1192-5419)

Željko V. Despotović - prof. dr, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)

Miloš Kostić - dipl. inž., direktor firme Charge & GO, Beograd, milos.kostic@chargego.rs

Uroš Ilić - master inž., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, uros.ilic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-3955-8995](https://orcid.org/0000-0003-3955-8995)

Exploitation Tests of Fast Charging 120 kW and 240 kW Power Stations for E-cars

Abstract - The paper presents exploitation testing that were carried out at fast charging stations for electric cars. Tests were performed at charging stations with output DC powers of 120 kW and 240 kW. The input voltage of the tested charging stations is 3x400 V, 50 Hz, and the output DC voltage is 400 V. The measured quantities of interest were input grid voltage and input grid current, output DC voltage and output DC current, state of charge (SOC%), of the electric vehicle battery bank as well as input and output active power. The paper presents the key experimental results obtained during the test and it is recorded the efficiency curve of fast charging stations depending on the output power in different operating modes.

Index terms - E-cars, Electrical battery, Fast charging station, Power converters, AC power, DC power