Broj rada: R4-14
DOI:10.46793/CIRED2026.R4-14_103

BIDIREKCIONI ENERGETSKI PRETVARAČI ZA PRIMENU U PUNIONICAMA ELEKTRIČNIH VOZILA

BIDIRECTIONAL POWER CONVERTERS FOR APPLICATION IN ELECTRICAL VEHICLE CHARGING STATIONS

Balša ĆERANIĆ*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija,
Luka ZOROJE, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija,
Doroteja ZAREV, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija,
Leposava RISTIĆ, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija
Predrag STEFANOV, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija
Jelena STOJKOVIĆ TERZIĆ, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija
Andrea BONFIGLIO, University of Genoa, Italy

KRATAK SADRŽAJ

U kontekstu potrebe za elektrifikacijom saobraćaja i rastućeg udela obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sistemu, jedno od rešenja koje privlači pažnju nalazi se u primeni Vehicle-to-Grid (V2G) sistema u punionicama za električna vozila (EV). Ovi sistemi omogućavaju tok energije u smeru od vozila ka mreži, čime EV i punionice poprimaju ulogu distribuiranih izvora energije koji mogu da ojačaju stabilnost i fleksibilnost mreže. Ovaj rad ima za cilj da predstavi pregled literature koja se tiče opštih razmatranja vezanih za V2G sisteme i ispunjenost tehničkih preduslova za komercijalnu primenu ovakvih rešenja, sa posebnim osvrtom na uređaje energetske elektronike koji se primenjuju u punionicama. U tom smislu, ovaj rad se bavi klasifikacijom tehnologija punjača po snazi, primeni, mestu priključenja i arhitekturi punjačkih stanica. Dalje, ovaj rad pruža uvid u topologije energetskih pretvarača koje su najzastupljenije u oblasti punjačkih stanica. Predstavljene su široko rasprostranjene metode upravljanja ovim pretvaračima koje se koriste za smanjenje gubitaka u radu i održavanju, kao i algoritmi za upravljanje ovim sistemima kroz koje se ostvaruje optimizacija celokupnog procesa. Konačno, rad daje odgovor na pitanje kada su ispunjeni tehnički uslovi za implementaciju V2G punionica kao takvih, dok dalje istraživanje treba da odgovori na pitanja vezana za integraciju takvih punionica u mrežu.

Ključne reči: Električna vozila, punionice za električna vozila, energetska elektronika, topologije pretvarača, vehicle-to-grid sistemi

ABSTRACT

In order to address the need to electrify transportation and growing share of renewable energy sources in the power system, one solution that is attracting attention lies in the implementation of Vehicle-to-Grid (V2G) systems in electric vehicle charging stations. These systems enable bidirectional energy flow, allowing electric vehicles and charging stations to take on the role of distributed energy resources that can enhance the stability and flexibility of the power grid. This paper aims to present a review of the literature addressing general

* Korespondirajući autor: Balša Ćeranić, ceranic@etf.bg.ac.rs

considerations related to V2G systems and the fulfillment of technical prerequisites for the commercial application of such solutions, with particular emphasis on power electronic devices used in charging stations. In this regard, this paper addresses classification of charger technologies according to power rating, application, connection point, and charging station architecture. Furthermore, this paper provides an overview of the power converter topologies that are most commonly used in the field of charging stations. Widely used control methods for these converters are presented, aimed at reducing operational and maintenance losses, as well as system control algorithms through which optimization of the overall process is achieved. Finally, the paper addresses the question of meeting technical conditions for implementation of V2G charging stations, while further research should address issues related to integration of such charging stations into the power grid.

Keywords: Electric vehicles, EV charging stations, power electronics, converter topologies, vehicle-to-grid

UVOD

Visoka penetracija obnovljivih izvora energije (OIE), posebno integracija fotonaponskih (PV) izvora u distributivnu mrežu, predstavlja ključnu stavku u neminovnoj energetskoj tranziciji, ali sa sobom povlači i određene probleme vezane za varijabilnost proizvodnje PV sistema, obrnute tokove snaga, preopterećenje postojećih kapaciteta i narušavanje naponskog profila. Integracija EV može povećati fleksibilnost distributivne mreže i ublažiti negativne efekte visoke penetracije PV sistema, ako se baterije EV koriste kao izvor i kao skladište energije, što se ostvaruje upotrebom V2G tehnologije. Ovi sistemi poseduju mogućnost racionalnog, efikasnog i automatizovanog rada, pomoću merenja relevantnih veličina, komunikacije između različitih delova sistema i obrade dostupnih podataka u svrhu utvrđivanja optimalnog režima rada. V2G sistemi su povezani sa nadređenim upravljanjem koje snagu punjenja prilagođava uslovima okoline kao što su tokovi snaga u mreži i energija koja se dobija iz distribuiranih OIE. Prema tome, energetski pretvarač sa mogućnošću upravljanja izlaznom snagom je važan deo V2G sistema.

U prvom poglavlju ovog rada su predstavljene najvažnije klasifikacije tehnologija punjača EV. U drugom poglavlju su predstavljene najznačajnije topologije pretvarača, dok su u trećem opisane strategije i metode koje se koriste za upravljanje pretvaračima na način koji povećava efikasnost i životni vek komponenti, kao i nadređeni algoritmi koji doprinose kvalitetu upravljanja, a mogu se primeniti kako na pretvarač, tako i na celokupan sistem. Nakon toga, dat je zaključak o nivou razvoja tehnologija namenjenih integraciji električnih vozila u V2G sisteme, zajedno sa opisom šireg istraživanja iz kojeg je ovaj rad proistekao.

1 KLASIFIKACIJE TEHNOLOGIJA PUNIONICA EV

U okviru detaljnije diskusije o tehnologijama električnih vozila, najpre se razmatra klasifikacija tehnologija punjenja prema vrsti električne konekcije između punjača i vozila. Ovde se tehnologije punjenja dele na one sa kablovskom vezom, bežičnom vezom i na tehnologiju zamene baterija.

Bežični (induktivni, bezkontaktni) sistemi za punjenje predstavljaju aktuelnu temu na čijem polju postoji dosta prostora za napredak. Postoje tvrdnje da ovi sistemi mogu biti pouzdaniji i lakši za korišćenje od kablovskih punjačkih sistema [1], ali pitanje koje se nameće je da li lakoća u korišćenju ovih sistema odnosi prevagu nad količinom energije i

resursa koje bi bilo potrebno uložiti u izgradnju infrastrukture neophodne za upotrebljivost ovih sistema. Koncept dinamičkog punjenja vozila u pokretu ima interesantnu perspektivu, sa mogućnošću da smanji potrebnu snagu i veličinu baterije uz uslov postojanja odgovarajuće mreže punjača raspoređenih po putevima na način koji ispunjava potrebe vozača [2]. Induktivni sistemi za punjenje se susreću sa problemima vezanim za elektromagnetsku kompatibilnost, visoke cene, neželjene harmonijske komponente napona i struje, bržu degradaciju baterije, potrebu za posebnim zaštitnim uređajima, kao i nižu efikasnost od konkurentnih tehnologija [3,4].

S druge strane, tehnologija zamene baterija (*battery swapping*) je manje zastupljena u literaturi, a realizuje se pomoću standardnih baterijskih jedinica koje se, nakon što se isprazne u svrhu pokretanja EV, u odgovarajućim stanicama menjaju napunjenim jedinicama. Ovo rešenje je izvodljivije u manjim EV čije su baterijske jedinice pristupačnije nego u većim EV, kod kojih su baterije pričvršćene na šasiju [5]. Stanice za zamenu baterija su povezane na mrežu i kao takve predstavljaju skladišta velike snage i kapaciteta, koje karakteriše dobra fleksibilnost, koja se delom prenosi na mrežu. Ovaj model koristi sporo punjenje, koje produžava životni vek baterije i povećava efikasnost procesa punjenja [6].

Rastući pritisci i napori u ispunjenju ciljeva Zelene agende su autore usmerili ka prioritizaciji istraživanja rešenja koja su primenljivija u bližoj budućnosti. Među navedenim opcijama, punjači sa kablovskom vezom su najšire rasprostranjeni, zbog čega je fokus ovog rada upravo na tehnologijama ovog tipa.

Punjači EV se dalje klasifikuju prema četiri standardizovana nivoa, gde svaki nivo karakteriše snaga punjenja i način napajanja, kao u Tabeli I [7,8]. Nivo 1 je prisutan u V2G primenama, dok se nivoi 2 i 3 mogu koristiti u javnim i komercijanim punjačkim stanicama koje preuzimaju ulogu agregatora. Punjači nivoa 4 (*Extra Fast Charging* – XFC) predstavljaju poremećaj za mrežu zbog kratkotrajnih vršnih opterećenja po snazi, te bi njihova šira implementacija narušila stabilnost mreže, kvalitet napajanja i životni vek baterija [3].

Tabela I – Klasifikacija punjača EV prema nivoima.

Nivo	Snaga	Punjač	Lokacija	Vreme punjenja za domet 200km	Napajanje
Nivo 1	1.44-1.9kW	Ugradni	Kuća/stan	20hr	120/230Vac, 12-16A, monofazno
Nivo 2	3.1-19.2kW	Ugradni	Kuća/posao	5hr	208/240Vac, 12-80A, monofazno
Nivo 3	20-350kW	Eksterni	Javne stanice	30min	240Vac, 300-800Vdc, 250-500A trofazno
Nivo 4 (XFC)	>350kW	Eksterni	Javne stanice	5min	>1000Vdc, >400A, višefazno

Standardi prepoznaju i četiri režima punjenja, koji definišu bezbednost i zahteve napajanja, što je od posebne važnosti proizvođačima opreme za dizajniranje bezbednih, interoperabilnih i standardizovanih punjača za EV [8].

Punjači EV mogu biti unidirekcioni ili bidirekcioni. Unidirekcioni služe samo da pune bateriju, što čuva njen životni vek, i zahteva manje komplekan dizajn od bidirekcionih punjača, Bidirekcioni dozvoljavaju tok snage od baterije ka mreži, što ih čini ključnom komponentom u V2G punjačkim stanicama i sistemima [9]. Bitno je napomenuti da i unidirekcioni punjači mogu biti deo pametnog sistema punjenja i doprineti fleksibilnosti mreže, dokle god postoji mogućnost upravljanja snagom punjenja.

Punjači EV se klasifikuju i prema mestu - oni unutar vozila su ugradni (*onboard*), a oni izvan eksterni (*offboard*). Obično su ugradni punjači povezani na mrežni napon i filtar koji je izvan vozila, dok vozilo nosi ispravljač, jednosmerno međukolo (DC link), pretvarač i baterije. Masa ovih komponenti otežava vozilo, i ovaj tip punjača je predviđen za manje snage, ali predstavlja ekonomičniju i interoperabilniju opciju od eksternih punjača, jer ima mogućnost punjenja gde god postoji izvor električne energije. Eksterne punjače karakterišu veća izlazna snaga i brže punjenje, za šta je potrebna oprema većih dimenzija koja se može smestiti samo izvan EV.

U naporima ka proširenju upotrebe EV bitnu ulogu igraju monitoring, bezbednost i informacije o bateriji, a uloga sistema za upravljanje baterijom (*Battery Management System* – BMS) je da to sve obezbedi. Estimacije stanja baterije (State of charge, state of health, state of power, state of function, itd.), termalni menadžment i dijagnostika kvara su neke od čestih funkcija BMS-a, kao i ujednačavanje energije koje je neophodno zbog fabričkih razlika među pojedinačnim kondenzatorima u jednom vozilu. Noviji trendovi istražuju koncepte kao što je komunikacija uslova saobraćaja i vremenskih uslova u realnom vremenu, kao i predikcija ili estimacija parametara koji omogućavaju napredniju kontrolu i optimizacije [10].

Važan deo diskusije o punjačima EV usmeren je ka arhitekturama punjačkih stanica. U zavisnosti od nivoa i režima punjenja i toga da li stanica u svom okviru ima OIE ili sistem za skladištenje energije (SSE), bira se arhitektura stanice. Pojedinačne punjačke jedinice mogu biti povezane na OIE, SSE i mrežni transformator preko sabirnica sa jednosmernim (DC) ili naizmeničnim (AC) naponom, uz mogućnost kombinovanja obe arhitekture. Arhitektura sa AC sabirnicama je bolja za povezivanje standardnih punjačkih jedinica nižeg nivoa, kao i izvore koji koriste energiju vetra. U tom slučaju se dodatni AC/DC pretvarači koriste za povezivanje tih elemenata sa SSE ili PV izvorima energije, ako postoje u okviru stanice. S druge strane, DC sabirnicama se mogu povezati SSE, PV izvor i punjačke jedinice koje rade na višim naponima, bez potrebe za dodatnim AC/DC pretvaračima, izuzev onoga koji povezuje DC sabirnice sa mrežnim transformatorom. Odabir hibridne arhitekture sa oba tipa sabirnica nudi mogućnost punjenja iz AC i DC izvora na istoj lokaciji. PV izvori energije i izvori koji koriste energiju vetra su potrebni da obezbede čistu energiju stanici, dok SSE smanjuje razmenu snage između stanice i mreže, posebno u periodima veće potražnje [11].

U zavisnosti od izbora arhitekture punjačke stanice, pojedinačna punjačka jedinica se može sastojati iz AC/DC i DC/DC nivoa konverzije, ili može primenjivati samo DC/DC pretvaranje.

2 TOPOLOGIJE ENERGETSKIH PRETVARAČA U PUNIONICAMA EV

2.1 DC/DC pretvarači

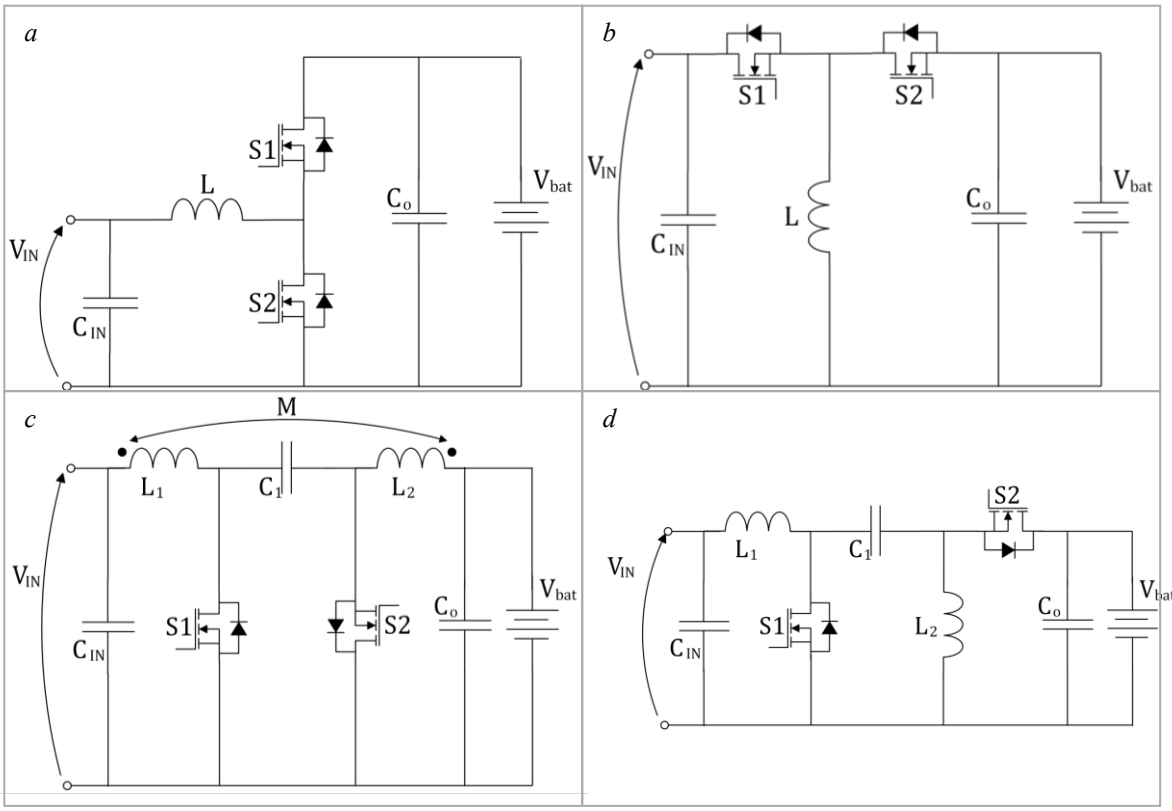
Svrha DC/DC pretvarača je da obezbedi i kontroliše odgovarajući napon koji se dovodi na bateriju EV. Izlazni napon je potrebno regulisati i prilagoditi vrednostima optimalnim za punjenje baterije što je moguće ostvariti pomoću izolovanih ili neizolovanih DC/DC pretvarača.

2.1.1 Neizolovane topologije DC/DC pretvarača

Neizolovane topologije, koje su pogodne za primene sa nižim naponima DC linka, su kompaktnije i imaju veću gustinu snage usled izostanka magnetskih komponenti. Iz osnovnih

topologija se mogu izvesti bidirekcione, zamenom unidirekcionih prekidačkih komponenti bidirekcionima, kao u primerima prikazanim na Sl.1 [12, 13].

Polumosni pretvarač na Sl.1a je baziran na topologijama čopera spuštača i podizača napona sa bidirekcionim poluprovodničkim komponentama. Može da radi u režimu spuštača i podizača napona, pri čemu je režim rada određen željenim tokom snage [14]. Neizolovani bidirekcioni čoper spuštač-podizač napona (Sl.1b) može da radi u režimu spuštača i podizača napona bez obrzira na željeni tok snage, a njegov izlazni napon je invertovan [15]. Bidirekcioni čoper na bazi Ćukovog pretvarača (Sl.1c) sa spregnutim kalemovima za redukciju valovitosti ulazne i izlazne struje ima neprekidne struje na ulazu i izlazu [16]. Pretvarač na bazi SEPIC i Zeta topologije je prikazan na Sl.1d [17].



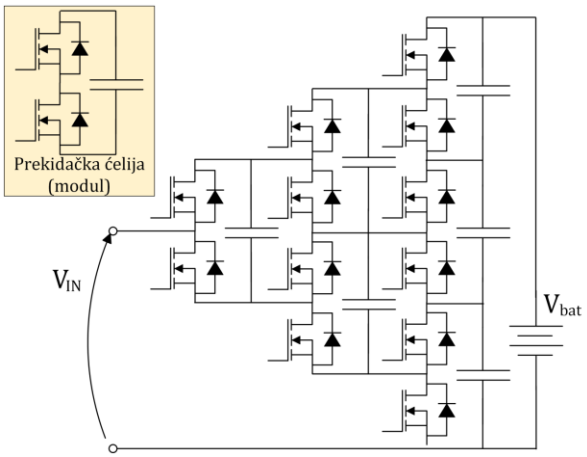
Slika 1 – Neizolovane topologije DC/DC pretvarača.

Još jedna grupa neizolovanih DC/DC pretvarača uključuje topologije sa više naponskih nivoa (*multilevel*). Na slici 2 je šematski prikazan *Modular Multilevel Converter* (MMC), koji se koristi za veće napone, a formira se upotrebom standardnih modula i izbegava upotrebu prigušnica, što smanjuje njegovu ukupnu masu i dimenzije [19].

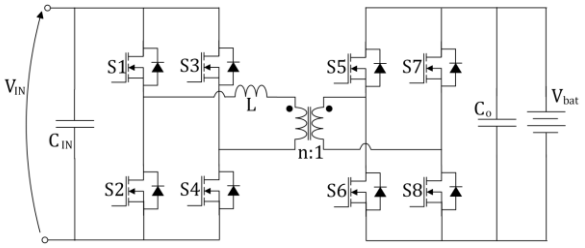
2.1.2 Izolovane topologije DC/DC pretvarača

Izolovani DC/DC pretvarači poseduju transformator ili prigušnicu za galvansku izolaciju izlaza od ulaza, što povećava kompleksnost i cenu pretvarača. Ovi pretvarači su pogodni za primene sa većim snagama i imaju smanjenu buku i elektromagnetne interferencije [25]. Izolovane topologije sa mogućnošću bidirekcionog toka snage koji se koriste u punjačima su mahom zasnovani na *Dual Active Bridge* (DAB) pretvaraču [26], prikazanom na Slici 3. Ove topologije se mogu modifikovati zamenom primarnog mosta [27], ili oba mosta [28], polumostovima. Na ovaj način se smanjuje broj potrebnih prekidačkih

komponenti, ali se povećava broj potrebnih kondenzatora. DAB rade i kao spuštači i podizači napona. Gustina snage ovih pretvarača je poboljšana upotrebom poluprovodničkih komponenti zasnovanih na SiC i GaN tehnologijama [52].

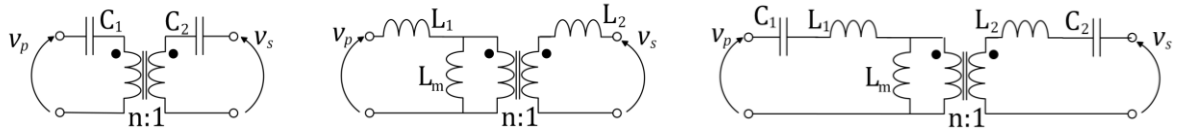


Slika 2 – Modular multilevel converter



Slika 3 – Dual active bridge (DAB) pretvarač

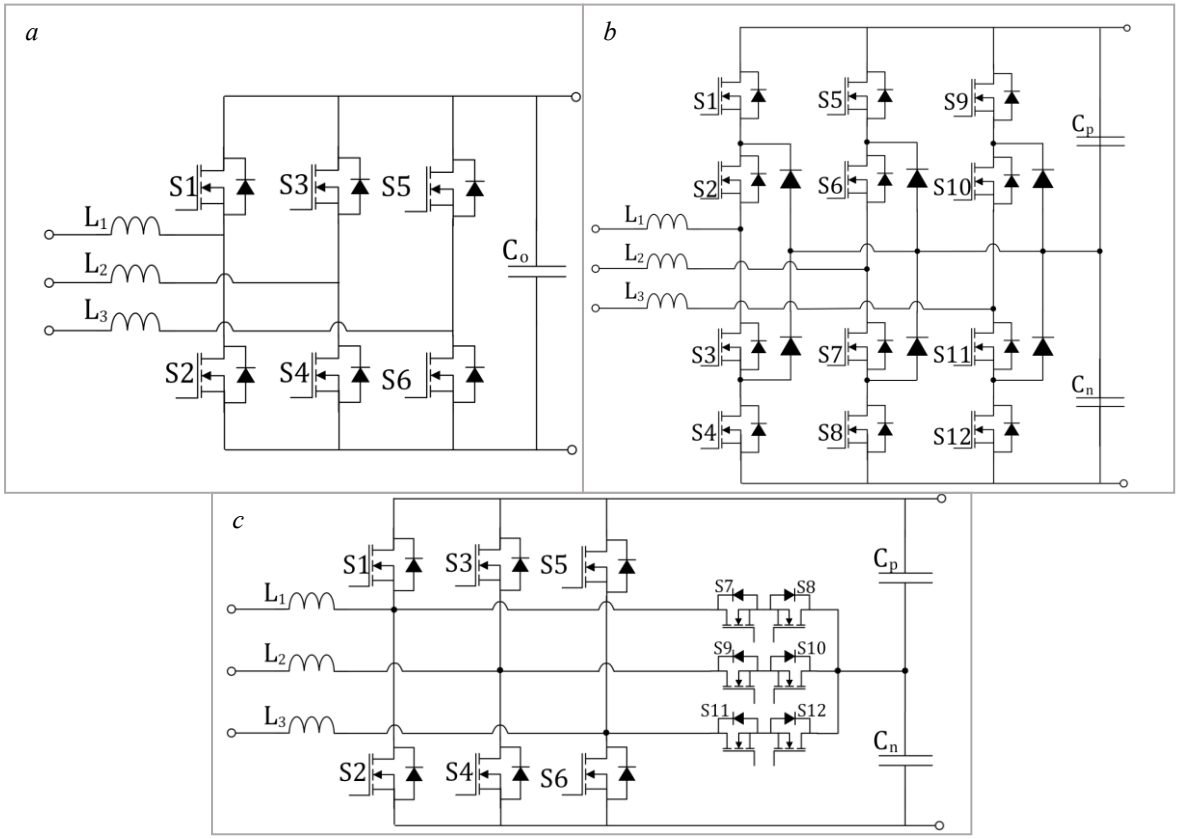
Pored bidirekcionog toka snage, DAB pretvarače odlikuju visoka efikasnost i niži izvod napona po vremenu, zahvaljujući principu komutacije pri nultom naponu (*Zero voltage switching* - ZVS), zahvaljujući kome se mogu smanjiti komutacioni gubici. Pored transformatora, upotrebljavaju se i rezonantna kola koja imaju svrhu da prošire opseg ZVS [30], što omogućava rad na višim učestanostima i smanjuje dimenzije rezonantnog kola [33]. Različita rezonantna kola su prikazana na Slici 4.



Slika 4 – Rezonantna kola: CLC [31], LLL [30] i CLLLC [32], C – kondenzator, L – prigušnica

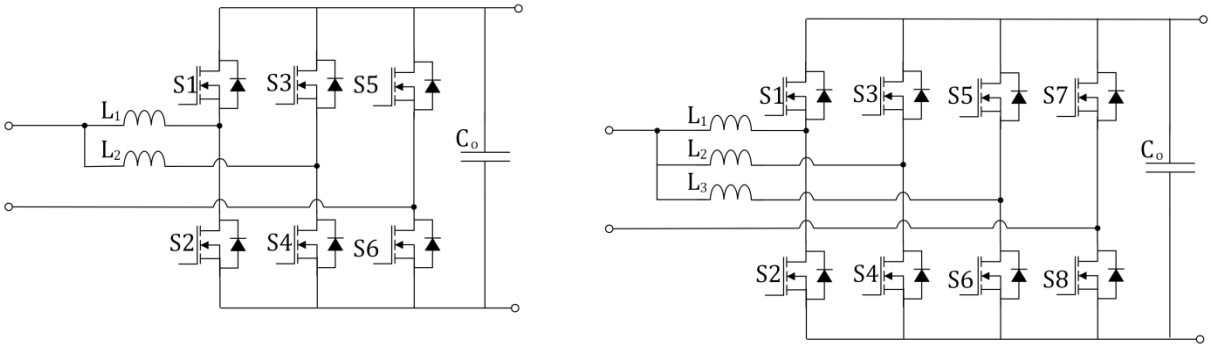
2.2 Ispravljači – AC/DC pretvarači

Ispravljači teže da zadovolje zahteve kvaliteta energije ostvarujući rad punjačke stanice sa sinusoidalnim talasnim oblicima struje i napona i jediničnim faktorom snage, zbog čega se nazivaju *Power Factor Correction* (PFC) pretvaračima. I kod njih je bidirekcioni tok snage ključan za pametnu i fleksibilnu integraciju [34]. Najzastupljeniji bidirekcioni ispravljači su aktivni most, *Neutral Point Clamped* (NPC) i PFC pretvarač T-tipa. Aktivni most, na Sl.5a, je modularan, robustan i standardan element, sa većim prigušnicama u filtru i tri nivoa izlaznog napona. Kod NPC-a, prikazanog na Sl.5b, je manji stres na komponente, manji filtar, kontrola je kompleksnija i ima pet nivoa izlaznog napona. PFC T-tipa, na Sl.5c, je sličan NPC-u sa manjim komutacionim gubicima i nižom učestanošću komutacije, a može se implementirati pomoću standarnih *6-pack* modula [35].



Slika 5 – Bidirekcioni ispravljači: a) Aktivni most, b) NPC i c) PFC T-tipa

Bidirekcione ispravljačke topologije se mogu napajati iz monofaznih ili trofaznih izvora. *Totem-pole* PFC pretvarači sa dvofaznim i trofaznim *interleaved boost* topologijama koje rade sa monofaznim ulazom prikazani su na Slici 6. Ove topologije koriste poluprovodnike zasnovane na SiC i GaN tehnologijama i na taj način postižu faktor snage preko 0,99 i efikasnosti oko 98,8% [36, 37]. *Interleaved* topologije su posebno zanimljive tokom rada sa delimičnim opterećenjem, gde je smanjen broj faza pretvarača koje rade, kako bi se obezbedila veća efikasnost u režimima manjeg opterećenja [18]. Prisutnost većeg broja faza predstavlja redundantnost, što povećava pouzdanost [20]. Druge varijacije ovih uređaja mogu biti okarakterisane i unidirekcionim i bidirekcionim tokom snage [21,22,23].

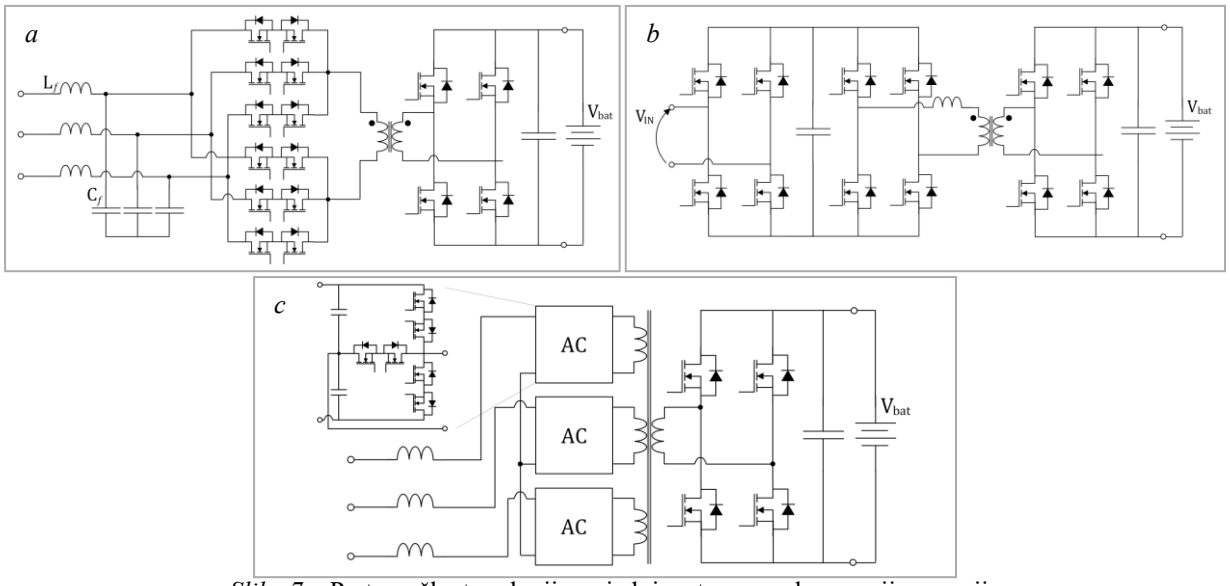


Slika 6 – ispravljači monofaznog napona: Dvofazni (levo) i trofazni (desno) totem-pole PFC

2.3 Punjači sa jednim stepenom konverzije

Izvestan broj izolovanih bidirekcionih pretvarača sa jednim stepenom pretvaranja je predložena kao pokušaj da se u jednom uređaju iskombinuju fleksibilne ugradne punjačke

strukture i prednosti bidirekcionog toka energije, a da se pritom izbegnu DC link kondenzatori velikih dimenzija. Upotreba AC/DC pretvarača sa jednim stepenom pretvaranja nudi veću efikasnost, manji ukupni broj komponenti i jednostavnije upravljanje [40]. Na Sl.7a je DAB pretvarač sa matričnim pretvaračem na primarnoj i aktivnim H-mostom na sekundarnoj strani [41]. Prikazan na Sl.7b, modularni pretvarač sa aktivnim mostom na primaru i izolovanim DAB-om se može smatrati pretvaračem sa jednim stepenom pretvaranja zahvaljujući maloj kapacitivnosti DC linka. U ovoj topologiji, korekciju faktora snage vrši DAB na sekundaru [42]. Trofazni multiport pretvarač T-tipa, na Sl.7c, pruža veći opseg ZVS i skalabilnost [43]. Očekuje se da veća zastupljenost pretvarača sa većom efikasnošću i gustinom prati razvoj tehnologije SiC i GaN uređaja [44].



Slika 7 – Pretvaračke topologije sa jednim stepenom konverzije energije

3 METODE I STRATEGIJE UPRAVLJANJA ENERGETSKIM PRETVARAČIMA

3.1 Upravljanje DC/DC pretvaračima

Glavna uloga DC/DC pretvarača je upravljanje naponom baterije u toku ciklusa punjenja, sa odgovarajućom preciznošću i dinamičkim odzivom. Da bi se ti ciljevi ostvarili, upravljanje mora biti stabilno u prelaznim i ustaljenim režimima. Upravljački algoritmi su primenljivi na veliki broj fizičkih sistema i procesa. Za upravljanje DC/DC pretvaračima su specifične funkcije za poboljšanje efikasnosti i ograničavanje stresa na komponente, što se ostvaruje odgovarajućim strategijama modulacije [13].

U DAB pretvaračima se najčešće primenjuju strategije zasnovane na faznom pomeraju (*phase shifting*). *Single phase shift* je bazična strategija koja omogućava upravljanje snagom podešavanjem faznog pomeraja između napona oba aktivna mosta pretvarača. Korišćenje ove strategije ne garantuje ZVS. Unapređenje pomenute metode postoji u *extended phase shift* metodi koja uvodi unutrašnji fazni pomeraj, između faza istog mosta u cilju proširenja opsega ZVS. Bolje performanse se postižu kada je unutrašnji pomeraj primenjen na oba aktivna mosta, što čini osnov *double phase shift* (DPS) metode, dok *triple phase shift* (TPS) unosi još jedan stepen slobode, omogućavajući različite fazne pomeraje na različitim mostovima DAB

pretvarača [45]. Zbog zahteva TPS za kompleksnijim upravljanjem, DPS se smatra najoptimalnijom od nabrojanih strategija [46].

3.2 Upravljanje ispravljačima

Upravljački algoritam ispravljača ima zadatak da upravlja naponom DC linka i tokom aktivne i reaktivne snage iz mreže. Kod ispravljača povezanog na mrežu je bitno što više smanjiti njegov uticaj na mrežu – ispravljači treba da se napajaju što sinusoidalnijim talasnim oblicima napona i struje sa jediničnim faktorom snage.

Najrasprostranjenije metode za upravljanje ispravljačima su Upravljanje orijentisano prema naponu (*Voltage oriented control* - VOC) i Direktno upravljanje snagom (*Direct power control* - DPC), koje su izvedene iz metoda upravljanja elektromotornim pogonima: vektorskog upravljanja i direktne kontrole momenta. VOC se oslanja na PLL kolo koje ima za cilj da poklopi *d*-osu sinhrono rotirajućeg referentnog sistema u kome se matematički modeluje ispravljač u svrhu upravljanja sa mrežnim naponom, što omogućava preciznu transformaciju trofaznih struja u raspregnute *dq* struje u ovom referentnom sistemu. Struje u *d* i *q* osama se regulišu pomoću PI regulatora, bez greške ustaljenog stanja i sa dobrim dinamičkim odzivom [47]. DPC se zasniva na brzoj i preciznoj estimaciji aktivne i reaktivne snage, gde se komponentama snage upravlja pomoću histerezisnih regulatora, a stanje prekidača se utvrđuje u skladu sa referencama i estimiranim vrednostima. DPC ima brži dinamički odziv i jednostavniju implementaciju od VOC metode, ali je kod DPC metode prekidačka učestanost promenljiva, što komplikuje dizajn mrežnog filtra i povećava talasnost mrežne struje [48].

Povezivanje mrežom vođenih pretvarača na slabu mrežu otvara pitanja vezana za stabilnost mreže. Interesantno rešenje se nalazi u upravljanju pretvaračem kao sinhronom mašinom (*Virtual synchronous motor* – VSM). VSM upravljanje se suočava sa problemima stabilnosti koji su vezani za visoku penetraciju izvora napajanja na bazi energije sunca i vetra, ali se može primeniti i na punjače za EV na mestima gde se velika snaga razmenjuje između mreže i punjačke stanice. Pretvarači koji se upravljaju VSM metodom se u prelaznim režimima ponašaju slično sinhronim mašinama, emulirajući inerciju i stabilizujući napon i frekvenciju [49,50]. Upravljanje može da se modifikuje tako što se u različitim scenarijima pojave poremećaja primenjuje različita ekvivalentna inercija pretvarača [51].

3.3 Nadređeni algoritmi upravljanja

Kada se govori o metodama upravljanja koje se mogu primeniti i na DC/DC i na AC/DC pretvarače, kao i na širok spektar sistema i procesa, PI i PID regulatori predstavljaju najjednostavnija i najšire korišćena rešenja, koja obezbeđuju dobar dinamički odziv i stabilnost, bez greške ustaljenog stanja. PID regulator predstavlja unapređenje u odnosu na PI regulator, sa bržim odzivom i manjim prebačajem, a u malom broju praktičnih primena u kojima performanse PID regulatora nisu zadovoljavajuće, dalje unapređenje se može potražiti u metodama navedenim u nastavku. Ove metode se često kombinuju sa PI i PID regulatorima, a postoje i slučajevi u kojima se dve ili više ovih naprednih metoda koriste zajedno [46].

Sliding mode control (SMC) je koncept koji se suočava sa nelinearnošću pretvarača i njihovih elemenata. Za objekat upravljanja se definiše "*sliding surface*", geometrijsko mesto tačaka koje sadrži sva željena ustaljena stanja. Struktura upravljanja se menja istovremeno sa stanjem sistema, što može izazvati neželjene visokofrekventne prekidačke operacije. Ova

metoda se oslanja na precizno poznavanje parametara sistema i dostupnost merenja u svrhu određivanja podataka o stanju sistema [29].

U osnovi fazi (*fuzzy*) kontrolera su veliki skupovi pravila na osnovu kojih se definiše upravljanje, ali se zato ovi kontroleri ne oslanjaju na potpun model sistema i ne zahtevaju veliki broj merenja. Najveći problem ovog tipa upravljanja je projektovanje veoma kompleksnog algoritma koji čini jedan nelinearni fazi kontroler [21].

Cilj prediktivnog upravljanja je predviđanje ponašanja sistema kojim se upravlja i adaptacija na poremećaje pre nego što ti poremećaji nastanu. Kako bi se ovo postiglo, precizan linearizovani model sistema u diskretnom domenu sa unapred definisanom kriterijumskom funkcijom se implementira na mikroprocesorksim uređajima koji moraju da budu moćni i sofisticirani jer sprovode veliki broj kompleksnih matematičkih operacija. Na ulaz algoritma se dovode aktuelna i prethodna merenja, na osnovu kojih se na izlazu dobija predviđanje budućih vrednosti koje figurišu u kriterijumskoj funkciji koja definiše optimalno upravljanje [38].

Veštačke neuralne mreže su svestran alat za dobijanje informacija iz dostupnih merenja koja se međusobno mogu dovesti u vezu. Po svojoj strukturi, neuralna mreža je nelinearna funkcija čiji je smisao aproksimacija funkcije od interesa, zbog čega je primenljiva i na linearne i na nelinearne sisteme. Neuralne mreže se treniraju na velikim skupovima prethodno dobijenih podataka i ne zavise od parametara sistema upravljanja [39].

Prediktivni algoritmi se mogu koristiti i za predviđanje stanja u elektroenergetskom sistemu – potrošnju električne energije i proizvodnju iz obnovljivih izvora, što su informacije od značaja za planiranje punjenja baterija električnih automobila u punionicama, dok su veštačke neuralne mreže već široko zastupljene u polju prikupljanja podataka bitnih za estimaciju ovih veličina.

4 ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog se može zaključiti da postoji veliki broj tehničkih rešenja za ostvarivanje optimizovanog i efikasnog upravljanja tokovima snage baterija električnih vozila, te su s tehničke strane uslovi za implementaciju V2G punionica u velikoj meri ispunjeni. Ovaj rad predstavlja sažet pregled literature koja se tiče opštih razmatranja vezanih za V2G sisteme, sa posebnim osvrtom na uređaje energetske elektronike koji se primenjuju u punionicama električnih vozila. U tom smislu, ovaj rad klasifikuje punjačke tehnologije, pruža uvid u topologije zastupljene u punjačkim stanicama i predstavlja široko rasprostranjene strategije upravljanja ovim pretvaračima koje služe smanjenju gubitaka u radu i održavanju, kao i algoritme za upravljanje ovim sistemima kroz koje se ostvaruje optimizacija procesa.

Ovaj rad je nastao iz dela istraživanja koje se sprovodi u okviru projekta E-COSMOS, započetog u vidu bilateralne saradnje Univerziteta u Beogradu i Kragujevcu u Srbiji sa italijanskim univerzitetima u Đenovi i Paviji. Na projektu se istražuju mogućnosti upravljanja flotama električnih vozila na način na koji baterije vozila postaju aktivni učesnici u mreži. Širi kontekst ovog istraživanja, odnosno cilj projekta je pronalaženje inovativnih, kao i izdvajanje najboljih postojećih rešenja koja omogućavaju baterijama EV da pružaju usluge mreži, a ne samo obrnuto, što bi trebalo da napravi novi prostor za integraciju obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem, posebno u distributivnu mrežu.

LITERATURA

[1] C. Panchal et al, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system", Engineering Science and Technology, Volume 21, Issue 5, October 2018, pp.922-937
[2] S. Lukic and Z. Pantic, "Cutting the Cord: Static and Dynamic Inductive Wireless Charging of Electric Vehicles," in IEEE Electrification Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, Sept. 2013
[3] D. Ronanki et al, "Extreme Fast Charging Technology—Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation". Energies. 2019; 12(19):3721
[4] V. Ramadoss et al, "Research Insights on Recent Power Converter Topologies and Control Strategies for Wireless EV Chargers: A Comprehensive Study," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 5, pp. 1641-1658, 2024
[5] R. Rao et al, "Optimizing electric vehicle users' charging behavior in battery swapping mode", Applied Energy, Volume 155, October 2015, pp. 547-559
[6] A.M.Vallera et al, "Why we need battery swapping technology", Energy Policy, Volume 157, October 2021, 112481
[7] M. Safayatullah et al, "A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications," in IEEE Access, vol. 10, pp. 40753-40793, 2022,
[8] A. Bahrami, "EV Charging Definitions, Modes, Levels, Communication Protocols and Applied Standards", Technical Report, 2021
[9] V.N. Saraswathi et al. "A comprehensive review on charger technologies, types, and charging stations models for electric vehicles", Heliyon, Volume 10, Issue 20, e38945, October 2024.
[10] M. Shen and Q. Gao, "A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration", International Journal of Energy Research, Volume 43, Issue 10, pp. 5042-5075, 2019
[11] S. Acharige et al, "Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations," in IEEE Access, vol. 11, pp. 41218-41255, 2023,
[12] A. Viatkin et al, "A Novel Modular Multilevel Converter Based on Interleaved Half-Bridge Submodules," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 1, pp. 125-136, Jan. 2023
[13] S. A. Gorji et al, "Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview," in IEEE Access, vol. 7, pp. 117997-118019, 2019
[14] H. Matsuo and F. Kurokawa, "New Solar Cell Power Supply System Using a Boost Type Bidirectinal DC-DC Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-31, no. 1, pp. 51-55, Feb. 1984
[15] F. Caricchi et al, "Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles," Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94, Orlando, FL, USA, 1994, pp. 381-386 vol.1
[16] R. D. Middlebrook et al, "A new battery charger/discharger converter," 1978 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Syracuse, NY, USA, 1978, pp. 251-255
[17] I. D. Kim et al, "New Bidirectional ZVS PWM Sepic/Zeta DC-DC Converter," 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, 2007, pp. 555-560
[18] A. Kolli et al. "A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications", Energy Conversion and Management, Volume 105, November 2015, pp. 716-730

[19] F. Z. Peng et al, "A magnetic-less DC-DC converter for dual voltage automotive systems," Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344), Pittsburgh, USA, 2002, pp. 1303-1310 vol.2
[20] J. W. Kolar et al, "Extreme efficiency power electronics," 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), Nuremberg, Germany, 2012, pp. 1-22.
[21] E. Cox and M. O'Hagan, The Fuzzy Systems Handbook. Waltham, MA: AP Professional, 1994.
[22] B. M. Reddy and P. Samuel, "A comparative analysis of non-isolated bi-directional dc-dc converters," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2016, pp. 1-6
[23] T. Kang et al, "A design and control of bi-directional non-isolated DC-DC converter for rapid electric vehicle charging system," 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, USA, 2012, pp. 14-21
[24] J. Zhang et al, "High-Power Density Design of a Soft-Switching High-Power Bidirectional dc–dc Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 4, pp. 1145-1153, July 2007
[25] M. Forouzesh et al, "Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, Dec. 2017
[26] Y. Yan et al, "Securing Full-Power-Range Zero-Voltage Switching in Both Steady-State and Transient Operations for a Dual-Active-Bridge-Based Bidirectional Electric Vehicle Charger," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 7, pp. 7506-7519, July 2020,
[27] R. Morrison and M. G. Egan, "A new power-factor-corrected single-transformer UPS design," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, pp. 171-179, Jan.-Feb. 2000
[28] X. Xu et al, "A Soft-Switched Back-to-Back Bi-directional DC/DC Converter with a FPGA based Digital Control for Automotive applications," IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 2007, pp. 262-267
[29] C. Edwards and S. K. Spurgeon, Sliding Mode Control: Theory and Applications. London, U.K.: Taylor & Francis, 1998.
[30] S. S. Muthuraj et al, "Triple Phase Shift Control of an LLL Tank Based Bidirectional Dual Active Bridge Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 8035-8053, Oct. 2017,
[31] R. P. Twiname et al, "A Dual-Active Bridge Topology With a Tuned CLC Network," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 12, pp. 6543-6550, Dec. 2015
[32] W. L. Malan et al, "Modeling and Control of a Resonant Dual Active Bridge With a Tuned CLLC Network," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 10, pp. 7297-7310, Oct. 2016,
[33] Z. U. Zahid et al, "Design of Bidirectional DC–DC Resonant Converter for Vehicle-to-Grid (V2G) Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 232-244, Oct. 2015
[34] V. Monteiro et al, "Bidirectional Power Converters for EV Battery Chargers". Energies. 2023; 16(4):1694
[35] A. Zhaksylyk et al, "Review of Active Front-End Rectifiers in EV DC Charging Applications." Batteries. 2023; 9(3):150.
[36] J. Yuan et al, "A Review of Bidirectional On-Board Chargers for Electric Vehicles," in IEEE Access, vol. 9, pp. 51501-51518, 2021

[37] Texas Instruments, “TIDM-1007 — High efficiency GaN CCM totem pole bridgeless Power Factor Correction (PFC) reference design,” TI.com. [Online]. Available: https://www.ti.com/tool/TIDM-1007. [Accessed: Nov. 14, 2025].
[38] L. Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®. London, U.K.: Springer-Verlag, 2009.
[39] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville, Deep Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 2016. [Online]. Available: http://www.deeplearningbook.org
[40] C. S. Wong et al, "A SWISS-Rectifier-Based Single-Stage Three-Phase Bidirectional AC–DC Inductive-Power-Transfer Converter for Vehicle-to-Grid Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 3, pp. 4152-4166, March 2023
[41] D. Das et al, "A Bidirectional Soft-Switched DAB-Based Single-Stage Three-Phase AC–DC Converter for V2G Application," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, no. 1, pp. 186-199, March 2019
[42] J. Lu et al., "A Modular-Designed Three-Phase High-Efficiency High-Power-Density EV Battery Charger Using Dual/Triple-Phase-Shift Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 9, pp. 8091-8100, Sept. 2018
[43] F. Jauch and J. Biela, "Modelling and ZVS control of an isolated three-phase bidirectional AC-DC converter," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-11
[44] B. Gutierrez and S. -S. Kwak, "Cost-Effective Matrix Rectifier Operating With Hybrid Bidirectional Switch Configuration Based on Si IGBTs and SiC MOSFETs," in IEEE Access, vol. 8, pp. 136828-136842, 2020
[45] B. Zhao et al, "Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 8, pp. 4091-4106, Aug. 2014
[46] M. H. Ashfaq et al, "Control Strategies for Bidirectional DC-DC Converters: An Overview", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1127, International Scientific Forum (ISF 2019) 16th-17th December 2019, Malacca, Malaysia
[47] R. Kadri et al, "An Improved Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Grid-Connected Inverter Based on Voltage-Oriented Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 66-75, Jan. 2011
[48] S. Vazquez et al, "A Model-Based Direct Power Control for Three-Phase Power Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, pp. 1647-1657, April 2008
[49] J. Gluščević et al, "Enhancing Stability of Grid-Following Inverter for Renewables," 2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-6
[50] M. Tanasić et al, "Hardware-in-the-Loop Simulation of a Virtual Synchronous Motor," 2023 22nd International Symposium on Power Electronics (Ee), Novi Sad, Serbia, 2023, pp. 1-6
[51] C. Liu, J. Fang, “Analysis and Design of Inertia for Grid-Tied Electric Vehicle Chargers Operating as Virtual Synchronous Machines.” Appl. Sci. 2022, 12, 2194
[52] Y. Liu et al. “Loss Analysis of GaN-Based Dual Active Bridge Converter for Power Electronic Transformer” 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), Nanjing, China, 2020.