

Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet, Podgorica



Ivan Adžić

Predlog novog „Vehicle-to-Grid” koncepta za poboljšanje krive opterećenja i maksimizaciju profita u distributivnim mrežama

- MASTER RAD-

Podgorica, jun 2023. godine

PODACI I INFORMACIJE O KANDIDATU

Ime i prezime: Ivan Adžić

Datum i mjesto rođenja: 17.02.1999. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2021. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv osnovnih studija: Energetika i automatika, smjer Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov master rad: Predlog novog „Vehicle-to-Grid“ koncepta za poboljšanje krive opterećenja i maksimizaciju profita u distributivnim mrežama

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 13.02.2023.godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 24.04.2023. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti kandidata:

Prof. dr Vladan Vujičić

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Milovan Radulović

Mentor: Doc. dr Martin Čalasan

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Vladan Vujičić

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Milovan Radulović

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Vladan Vujičić

Doc. dr Martin Čalasan

Prof. dr Milovan Radulović

Datum odbrane: 10.10.2023.godine

Datum promocije: _____

Ime i prezime autora: Ivan Adžić, BSc

Etička izjava

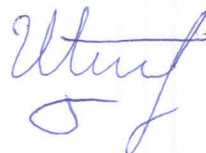
U skladu člana 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

**„Predlog novog „Vehicle-to-Grid “ koncepta za poboljšanje krive opterećenja i
maksimizaciju profita u distributivnim mrežama”,**

moje originalno dijelo.

Podnosilac izjave:

Ivan Adžić, BSc



U Podgorici, dana 16.06.2023. godine

Lista skraćenica

ABS	Anti-lock braking system
AWD	All Wheel Drive
BBC	Bridge Boost Converter
BLBC	Bridgeless Boost Converter
BTMS	Battery temperature management system
BMS	Battery Management System
CAN	Controller Access Network
CASIO	California Independent System Operator
CBC	Constant Boost Control
CBP	Controlled Boost Power
CCM	Continuous Conduction Mode
CEC	China Electricity Council
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques
CM	Common Mode
CPO	Charging Point Operator
CSMS	Charging Station Management System
CT	Current Transformer
DCM	Discontinuous Conduction Mode
DG	Distributed Generation
DM	Differential Mode
EMI	Electromagnetic interference
EPRI	Electric Power Research Institute
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
G2V	Grid to Vehicle

GHG	Greenhouse Gasees
LF	Low Frequency
MPP	Maximum Power Point
OCPP	Open Charge Point Protocol
PCU	Power Conditioning Unit
PEV	Plug in electric vehicle
PFC	Power Factor Correction
PLL	Phase Locked Loop
PSO	Particle Swarm Optimization
RWD	Rear Wheel Drive
SBBC	Semi Bridgeless Boost Converter
SoC	State of Charge
SST	Solid State Transformer
THD	Total Harmonic Distortion
V2G	Vehicle to Grid
V2H	Vehicle to Home
V2L	Vehicle to Load
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VPP	Virtual Power Plant
ZCS	Zero Current Switching
ZVS	Zero-Voltage Switch

Predgovor

Istraživanje ovog master rada motivisano je nizom aktuelnosti kako u automobilske industriji, tako i u elektroenergetskom sektoru. Integracija distribuiranih izvora u savremenim distributivnim sistemima je otvorila nove perspektive razvoja elektroenergetskog sistema. Naime, ovaj proces je prouzrokovao promjene u proizvodnim, potrošačkim i distributivnim sistemima, što je rezultiralo povećanom kompleksnošću cjelokupnog sistema sa stanovišta tokova snaga, zaštita, upravljanja, nadzora i slično. Međutim, posljednjih godina, i električna vozila postala su značajan akter distributivne mreže, kako zbog svojih izraženih potreba za električnom energijom, tako i zbog mogućnosti da se koriste kao uređaji za skladištenje energije. U slučaju nekontrolisanog priključenja vozila u mrežu, dodatno opterećenje može rezultirati značajnim povećanjem vršnog opterećenja sistema, fluktacijama napona izvan dozvoljene granice odstupanja, većim gubitacima u sistemu, preopterećenjem vodova, umanjnjem nivoa kvaliteta električne energije, kao i čestim havarijama. Savremeni distributivni sistem nastoji da integriše sve aktere u jednu efikasnu, upravljivu i ekonomičnu cjelinu. Shodno navedenom, kako bi se umanjio negativni uticaj električnih vozila na elektroenergetski sistem, te podstakli korisnici električnih vozila na racionalno korišćenje električne energije, razvoj bidirekcionog interfejsa između električnih vozila i mreže predstavlja prioritet.

Shodno navedenom, u ovom radu je obrađena koordinacija punjenja i pražnjenja električnih vozila primjenom novog pristupa u realizaciji „*vehicle to grid*” koncepta u distributivnom sistemu. Dodatno, predloženi koncept je testiran na praktičnom primjeru, odnosno na TS 10/0.4 kV Zeković koja se nalazi u elektrodistributivnom sistemu Opštine Nikšić.

Izvod rada

Rapidan porast broja električnih vozila prijeto da uprkos pozitivnim efektima smanjenja emisije štetnih gasova dovede do destabilizacije distributivnog sistema, odnosno cjelokupnog elektroenergetskog sektora. Nekoordinisano priključenje vozila može dovesti do naglog rasta vrijednosti vršnog opterećenja, odnosno do pojave „pikova”, što za posledicu može imati izražene fluktuacije napona i povećane gubitke u vodovima, kao i učestaliju pojavu kvarova u čitavom sistemu. Shodno navedenom, pravilna koordinacija priključenja električnih vozila predstavlja ključ za rješavanje navedenog problema, smanjenje troškova električne energije neophodne za punjenje električnih vozila, kao i smanjenje opterećenja cjelokupnog sistema što će doprijeti rjeđim havarijama. Na bazi prethodno opisane aktuelnosti, ovaj rad se bavi optimizacijom priključenja električnih vozila u mrežu primjenom novog predloga V2G (*eng. vehicle to grid*) koncepta realizovanog u *Matlab* programskom okruženju.

U cilju optimizacije mreže, odnosno postizanja „ispeglane” krive opterećenja korišćena je kriterijumska funkcija minimizacije odstupanja trenutnog opterećenja od srednje vrijednosti opterećenja posmatranog intervala. Takođe, uz postizanje optimizacionog cilja, biće uzeti u obzir i zahtjevi korisnika po pitanju napunjenosti baterija električnih vozila. Dodatno, u sprovedenim analizama je korišćen dvotarifni sistem mjerenja potrošnje električne energije definisan od strane Elektroprivrede Crne Gore. Cijene električne energije uzete su sa uračunatim PDV-om i gubicima u mreži, odnosno 0.12933 €/kWh po višoj tarifi i 0.0647 €/kWh po nižoj tarifi. Obračunom razmjenjene energije je izračunat konačni ekonomski bilans koji će potvrditi tvrdnje da V2G donosi benefite korisnicima električnih vozila. Ideja i matematička pozadina novog koncepta biće objašnjeni na proizvoljnoj krivoj opterećenja. Dodatno, sprovedena je simulacija primjene novog V2G koncepta, nekoordinisanog punjenja, kao i punjenja tokom niže tarife, na dijelu distributivnog sistema Crne Gore, odnosno na TS 10/0.4 kV Zeković, Nikšić. Rezultati simulacije, kao i poređenje sa navedenim vidovima punjenja vozila će biti posebno obrađeni, uz osvrt na ekonomski bilans navedenih metoda.

Primjena definisanog predloženog koncepta na praktičnom primjeru je potvrdila prethodno donijete zaključke, čime je istaknut značaj primjene novog predloga V2G koncepta u cilju veće efikasnosti korišćenja distributivnog sistema.

Ključne riječi: distributivni sistem, V2G, stanje napunjenosti baterije, električna vozila

Abstract

The rapid increase in the number of electric vehicles threatens to destabilize the distribution system, that is, the entire power sector, despite the positive effects of reducing greenhouse gas emissions. Uncoordinated connection of vehicles can lead to a sudden increase in the value of the peak load, i.e. to the appearance of "peaks", which can result in pronounced voltage fluctuations and increased losses in the lines, as well as more frequent occurrence of failures in the entire system. According to the above, the correct coordination of the connection of electric vehicles is the key to solving the mentioned problem, reducing the cost of electricity necessary for charging electric vehicles, as well as reducing the load on the entire system, which will contribute to less frequent breakdowns. On the basis of the previously described actuality, this work deals with the optimization of the connection of electric vehicles to the grid by applying the new proposal V2G (eng. vehicle to grid) concept implemented in the Matlab programming environment.

In order to optimize the network, i.e. to achieve an "ironed" load curve, a criterion function was used to minimize the deviation of the current load from the average value of the load of the observed interval. Also, with the achievement of the optimization goal, the user's requirements regarding the charging of electric vehicle batteries will be taken into account. Additionally, the two-tariff system of electricity consumption measurement defined by the Electric Power Company of Montenegro was used in the conducted analyses. Electricity prices are taken with VAT and network losses included, ie 0.12933 €/kWh at the higher tariff and 0.0647 €/kWh at the lower tariff. By calculating the exchanged energy, the final economic balance was calculated, which will confirm the claims that V2G brings benefits to users of electric vehicles. The idea and mathematical background of the new concept will be explained on an arbitrary load curve. In addition, a simulation of the application of the new V2G concept, uncoordinated charging such as charging during the lower tariff, was carried out on part of the distribution system of Montenegro, that is, on TS 10/0.4 kV Zeković, Nikšić. The results of the simulation, as well as the comparison with the specified types of vehicle charging, will be separately processed, with reference to the economic balance of the specified methods.

The application of the defined proposed concept on a practical example confirmed the previously reached conclusions, which highlighted the importance of applying the new proposal of the V2G concept in order to use the distribution system more efficiently.

Key words: distribution system, V2G, battery state of charge, electric vehicle

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Savremene distributivne mreže.....	6
2.1. Konfiguracija i topologija distributivnih sistema električne energije.....	7
2.1.1. Konfiguracija primarne mreže.....	8
2.1.1.1. Radijalna konfiguracija.....	10
2.1.1.2. Prstenasta konfiguracija.....	11
2.1.1.3. Konfiguracija sa dvostranim napajanjem.....	12
2.1.2. Konfiguracija sekundarnih mreža.....	12
2.2. Ciljevi razvoja savremenih distributivnih sistema.....	14
2.2.3. Distribuirani izvori električne energije.....	16
2.2.3.1. Solarne elektrane.....	17
2.2.3.2. Vjetrogeneratori.....	18
2.2.4. Integracija električnih vozila u distributivnoj mreži.....	20
3. Električna vozila.....	23
3.1. Konfiguracija električnih vozila.....	25
3.2. Napajanje.....	29
3.2.1. Litijum jonske baterije.....	29
3.2.1.1. Ekvivalentno kolo i elektrohemijska svojstva litijum jonskih baterija.....	29
3.2.1.2. Tehničke karakteristike i zahtjevi za odabir baterije kod električnih vozila.....	32
3.2.2. Punjenje baterija.....	35
3.2.2.1. Tipovi konektora.....	37
3.2.2.1.1. AC konektori.....	38
3.2.2.1.1.1. Konektor Tip 1 (Type 1).....	38
3.2.2.1.1.2. Konektor Tip 2 (Type 2).....	38
3.2.2.1.1.3. Tesla US konektor.....	39
3.2.2.1.2. DC konektori.....	39
3.2.2.1.2.1. CCS Combo 1 i Combo 2.....	39
3.2.2.1.2.2. CHAdeMO.....	40
3.2.2.1.2.3. Tesla DC konektori.....	40

3.2.2.1.2.4. China GB/T konektor	41
3.2.2.2. Standardi punjenja električnih automobila	41
3.2.2.3. Nivoi punjenja („Levels of Charging“)	41
3.2.2.4. Toplogije AC/DC pretvarača.....	43
3.2.2.4.1. Topologija monofaznih pretvarača.....	44
3.2.2.4.1.1. „Bridge Boost“ konvertor.....	46
3.2.2.4.1.2. „Semi-Bridgeless“ konvertor.....	51
3.2.2.4.1.3. „Bridgeless boost“ konvertor	54
3.2.2.4.2. Topologija trofaznih pretvarača	56
3.2.2.5. Bidirekcionni punjači	60
3.2.2.5.1. Topologija punjača	61
3.3. Motori u električnim vozilima.....	61
3.3.1. DC motori.....	63
3.3.2. DC motori sa permanentnim magnetima (PM BLDC)	63
3.3.3. Indukcioni motori (IM)	63
3.3.4. Sinhroni motor sa permanentnim magnetima (PMSM).....	64
3.3.5. Prekidački reluktantni motor (SRM).....	64
3.3.6. Poređenje karakteristika motora električnih vozila	65
4. Novi predlog V2G koncepta.....	66
4.1. V2X koncept.....	68
4.1.1. V2G	69
4.1.1.1. OCCP (eng. <i>Open Charge Point Protocol</i>).....	70
4.1.1.2. Kontrolna logika bidirekcionnog punjača tokom G2V operativnog moda	72
4.1.1.3. Kontrolna logika bidirekcionnog punjača tokom V2G operativnog moda	74
4.1.2. V2H	75
4.1.3. V2L.....	76
4.2. Matematički opis novog V2G koncepta	77
4.3. Primjena <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> algoritma u rješavanju posmatranog optimizacionog problema	81
5. Rezultati simulacija	89
5.1. <i>Varijanta 1</i>	91

5.2. Varijanta 2.....	102
5.3. Varijanta 3.....	109
5.4. Varijanta 4.....	119
5.5. Varijanta 5.....	123
6. Zaključak	126
Literarura	128

1.Uvod

Kao i kompletan elektroenergetski sistem (EES), distributivni sistem se suočava sa nizom problema koji su najčešće prouzrokovani neprekidnim povećanjem broja potrošača i emisijom štetnih gasova. Rješenje koje se nameće bazira se na optimizaciji rada energetske mreže kroz priključivanje savremenih uređaja kao što su: distribuirani izvori električne energije, uređaji za skladištenje električne energije i uređaji za kompenzaciju reaktivne energije. Međutim poseban problem sa kojim se današnji EES susreću jeste pojava „pikova”, tj. naglih povećanja snage potrošnje, u pojedinim intervalima dana. Prethodno dovodi do preopterećenja vodova, naprezanje opreme i, u konačnom, do čestih kvarova. Sa stanovišta optimalnog upravljanja EES, idealan scenario je da kriva opterećenja bude prava linija, odnosno da se minimizuju fluktuacije opterećenja, a što je moguće postići ukoliko postoje fleksibilni, upravljivi, sistemi za skladištenje energije.

Distributivna mreža predstavlja dio elektroenergetskog sistema koji spaja podsistem prenosa i podsistem potrošača. U odnosu na prenosne mreže, razlikuje se po topologiji i nižem naponskom nivou. Distributivne mreže se najčešće sreću u radijalnoj konfiguraciji, sa predefinisanim smjerom toka snage od distributivnih trafostanica do krajnjih korisnika, a ponekad i u prstenastoj konfiguraciji gdje postoje najmanje dvije putanje snage od trafostanice do krajnjih korisnika. Primarni naponski nivo distributivnih mreža kreće se u opsegu od 0.4 kV do 35 kV, pri čemu su u Crnoj Gori zastupljene distributivne mreže naponskog nivoa 0.4 kV, 10kV i 35 kV.

Shodno problemima današnjice vezanim za povećanje emisije štetnih gasova i sve izraženijim efektom staklene bašte, akcent se stavlja na poboljšanje energetske efikasnosti kao i na očuvanju životne sredine. U cilju smanjenja emisije štetnih gasova iz vozila sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem, električna vozila se nameću kao prihvatljiva alternativa. Prema navodima iz [1] broj električnih vozila će do 2030. godine premašiti brojku od 240 miliona. Iako se električna vozila nameću kao „zelene” alternative, njihov uticaj na EES je višestruk. Posljednjih godina sve više se aktuelizuje tema penetracije snage nazad u mrežu iz vozila (*eng. „vehicle to grid”-V2G*), što predstavlja veoma kompleksan problem, za čije razrješenje je neophodno uzeti u obzir veliki broj parametara [2]. Dostupnost tehnologije, izazovi, strategije budućeg razvoja, kao i trenutno implementirani koncepti V2G interfejsa zasebnih vozila i flota vozila dati su u radu [3]. Vremenski intervali punjenja električnih vozila, kao i tajming priključenja vozila u mrežu moraju biti optimalno raspoređeni kako bi se minimizovao njihov nepovoljni uticaj na EES,

odnosno na karakteristiku opterećenja. Osim pozitivnih efekata po mrežu, optimalni tajming priključenja može doprinijeti smanjenju troškova punjenja električnog vozila [4], smanjenju vremena neophodnog za punjenje baterije itd. Uprkos činjenici da V2G predstavlja inovaciju kako u automobilskoj industriji, tako i u cjelokupnoj elektrotehnici, za realizaciju navedenog koncepta neophodan je razvoj softvera, komunikacije, kao i proširenje postojeće infrastrukture [5]. Nekoordinisano priključenje i rapidan porast broja električnih vozila, mogu dovesti do povećanja vršnog opterećenja u najkritičnijim periodima dana. Shodno navedenom, nekoordinisano priključenje može dovesti do povećanja vrijednosti viših harmonika, rasta gubitaka, preopterećenja vodova i u najgorem slučaju havarije sistema. Zbog svega navedenom, optimalno i raspoređeno punjenje električnih vozila predstavlja prioritet savremenih EES.

Obzirom da je V2G relativno nov pojam, aktuelizovan rapidnim porastom broja električnih vozila, pojavljuje se sve veći broj autora čiji naučni radovi se bave problemima integracije električnih vozila sa EES-om [6], [7]. Autori rada [8] razmatraju efekat električnih vozila na tehničke potrebe mreže. Takođe, pojavljuju se i istraživanja koja razmatraju različite metode povezivanja električnih vozila i EES-a [9].

V2G opisuje sistem u kome električna vozila sa priključkom (*eng. plug in electric vehicle - PEV*) predaju uskladištenu električnu energiju iz svojih baterija kao odgovor na potražnju mreže. Osim same prodaje električne energije, usluge mogu biti pružene i u vidu kontrole frekvencije ili smanjenja učestanosti punjenja. Pružanjem usluga korišćenja energije skladištene u električnim automobilima smanjuje se opterećenje mreže, koja bi inače mogla da doživi poremećaje usled varijacija opterećenja [10],[11]. Osim toga, postoje brojna istraživanja koja pokazuju da bi vlasnici vozila mogli da imaju značajne finansijske benefite ako koriste vozila shodno V2G kriterijumu [12]. Ovo je posebno važno imajući na umu da statistika govori da je u svakom trenutku 95% električnih automobila parkirano, pa njihova energija ostaje neiskorišćena.

Vozila sa V2G tehnologijom mogu da obezbijede snagu za balansiranje opterećenja mreže (punjenje noću kada je potražnja mala i “slanje snage u mrežu kada je potražnja velika”) [13], [14]. Nivelisanje vršnog opterećenja podržava usluge regulacije (održavanje napona i frekvencije stabilnim) i obezbjeđuje obrtne rezerve (za ispunjavanje iznenadnih zahtjeva za snagom). Spajanje ovih usluga sa “pametnim brojlama” omogućava implementaciju V2G koncepta [15]. Postoje i studije koje govore da bi V2G koncept pružao mogućnost *baferovanja* energije, tj. privremenog skladištenja energije, posebno iz obnovljivih izvora energije tako što će skladištiti višak energije i obezbediti je mreži tokom perioda visokog opterećenja.

U mnogim državama cijena električne energije je tokom perioda vršnog opterećenja znatno skuplja nego u toku ostatka dana. Autori rada [16] ističu da da bi mrežni operater u tim periodima „kupovao“ energiju od električnih automobila, koja bi predstavljala jeftiniju alternativu i na taj način širio V2G tržište. Osim samog balansiranja opterećenja, istraživanja autora rada [17] ističu pozitivnu ulogu električnih vozila sa V2G tehnologijom pri regulaciji primarne frekvencije i sekundarnih rezervi.

Autori rada [18] su primjenom *Monte Carlo* metode i Markovljevog lanca, uzimajući u obzir zahtjeve za snagom, mobilnost korisnika, planove putovanja, te troškova utrošene energije i boljeg upravljanja električnom energijom u mreži, simulirali uticaj PEV u mikromreži. Rezultati simulacije su potvrdili da ovakav pristup može značajno smanjiti troškove punjenja električnih automobila. Svrha Markovljevog lanca jeste da simulira putovanja, odnosno da približi „*real time*“ upravljanje ovakvim sistemom, što inicira veće učestvovanje korisnika.

Pametno punjenje električnih vozila u vidu „*load shifting*“ i „*valley filling*“, odnosno „pomjeranje opterećenja“ i „popunjavanje doline“ preporučuju autori rada [19]. Autori rada [20] ukazuju na barijere same implementacije V2G koncepta koje se tiču ekonomske isplativosti, kao i same pouzdanosti, što uključuje degradaciju baterija i prepreke samog uključivanja vozila u EES kao injektora snage.

Trenutno veliki broj država pokušava da započne sa V2G programom, pri čemu su u Holandiji implementirani javni bidirekcionni punjači sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom [21]. Baterije imaju ograničen broj ciklusa punjenja, kao i vijek trajanja, stoga V2G može uticati na dugovječnost baterije. Kapacitet baterije je složena funkcija hemije baterije, brzine punjenja/praznjenja, temperature, stanja napunjenosti i starosti, i razvija se sa poboljšanjem tehnologije. Većina studija koje koriste spore stope praznjenja baterija pokazuju samo nekoliko procenata dodatne degradacije, dok je jedna studija sugerisala da bi korišćenje vozila za skladištenje u mreži moglo da poboljša dugovječnost baterija [22] .

Efikasnost V2G sistema uslovljena je mnogim faktorima. Studija autora [23] ističe da je efikasnost V2G od 53% do 62%, pri čemu su najveći gubici u bidirekcionnim pretvaračima. Autori rada [24] ističu da su gubici uslovljeni sa više faktora i da sama efikasnost može znatno da se razlikuje, dok je je ključan faktor kvalitet same stanice i načina punjenja.

U [25] je korišćen sličan princip „peglanja“ krive kao i u predloženom istraživanju ovog master rada. Medjutim, u [25] fokus je bio na analizi mogućnosti PEV da pri izraženim fluktacijama

popravi karakteristiku i ustabili sistem ne vodeći računa o ostvarenom statusu napunjenosti baterija na kraju posmatranog ciklusa punjenja baterije električnog vozila.

Autori rada [26] koriste V2G za „*peak shaving*“ definišući „*state of charge*“, odnosno stanje napunjenosti baterije kao operativno od 10% do 90%. Kroz tri nivoa definiše se karakteristika potrošnje. Prva zona predstavlja operativnu zonu pražnjenja, odnosno opterećenje pri kojem će V2G sistem započeti sa pražnjenjem vozila. Ova zona se definiše za sve vrijednosti trenutne potrošnje za 10% veće od prosječne potrošnje. Zona operativnog punjenja predstavlja zonu kada je trenutno opterećenje manje za 10% ili više od prosječne potrošnje, odnosno vozila počinju da se pune. Treća zona predstavlja „*dead band*“, odnosno „mrtvi opseg“. Ova zona odražava minimalne fluktacije opterećenja od $\pm 10\%$ kada se po V2G kriterijumu ne vrši razmjena energije. U radu [26] koristi se sličan princip isključenja vozila sa mreže u slučaju da se vozila isprazne do 10% ili napune do 90%. Suštinska razlika jeste što ovakav pristup jeste definisan od strane operatera kao tehnička karakteristika električnih vozila, a ne kao zahtjev korisnika. Važno je naglasiti da ne postoje tačno definisane granice o minimalnoj i maksimalnoj napunjenosti baterija električnih vozila jer je, kao što je već naglašeno, životni vijek baterije složena funkcija kako njene upotrebe, tako i njene konstrukcije.

U radu [27] napravljena je analiza energetske menadžmenta, odnosno angažovanje resursa u cilju pokrivanja krive potrošnje. Energetski menadžment se podudara sa V2G mogućnostima i potencijalno bi električna vozila mogla biti korišćena kao privremeni *bateri* energije.

Shodno prethodnoj analizi, jasno je da V2G koncept predstavlja izazov kako za praktičnu realizaciju, tako i za naučna istraživanja jer pruža mogućnost ispitivanja različitih aspekata efikasne upotrebe električnih vozila.

Predmetni master rad je organizovan iz nekoliko poglavlja.

U **drugom poglavlju** biće data osnovna razmatranja vezana za distributivne mreže, što uključuje konfiguraciju i topologiju mreže, mane i prednosti savremenih distributivnih mreža.

U **trećem poglavlju** biće opisana konfiguracija električnih vozila, savremenih litijum jonskih baterija, tehnologija punjenja vozila, bidirekciono pretvarači energetske elektronike, kao i savremeni V2G, V2H i V2V koncepti uz pregled postojeće literature sa osvrtom na prednosti i nedostatke svih modela.

U **četvrtom poglavlju** biće data matematička formulacija novog V2G koncepta, realizovanog primjenom algoritma roja čestica (*eng. Particle Swarm Optimization-PSO*), sa

definisanim zahtjevima korisnika i mreže uz formulaciju optimalnog upravljanja angažovanom snagom pomoću električnih vozila.

Peto poglavlje biće posvećeno simulacionim rezultatima dobijenim primjenom predloženog V2G koncepta na dijelu distributivne mreže na izlazu iz TS 10/0.4 kV/kV iz EDS Nikšić, u različitim scenarijima sa uvažavanjem zahtjeva korisnika. Dobijeni rezultati biće upoređeni sa tradicionalnim punjenjem električnih automobila pri čemu će osvrt biti na tehničko-ekonomskim karakteristikama. Na kraju ovog poglavlja, biće napravljen osvrt na isplativost predloženog koncepta.

Na kraju, u **šestom poglavlju** biće napravljen osvrt na cijelokupan rad, predstavljena završna razmatranja i definisani mogući pravci daljeg istraživanja iz ove oblasti.

2. Savremene distributivne mreže

Elektroenergetski sistemi današnjice su izuzetno složeni u smislu topologije mreže, tehnologija proizvodnje, uloga pojedinačnih elemenata itd. Prema definiciji, EES obuhvata nekoliko podsistema, kao što su proizvodnja, prenos, distribucija i potrošnje energije [28].

Distributivne mreže predstavljaju važan dio EES-a, jer predstavljaju vezu između tačke predaje energije iz prenosnog sistema i krajnjeg potrošača vršeci raspodjelu električne energije. Distributivne sisteme karakteriše visoka složenost usled neophodnosti postojanja velikog broja komponenti za upravljanje i nadzor. Zbog tendencije rasta broja konzuma, te sve gušće naseljenih urbanih sredina, distributivni sistemi predstavljaju toploški kompleksne strukture, znatno kompleksnije od prenosnih sistema sa većim brojem naponskih nivoa, transformatora, elemenata energetske elektronike itd.

Za razliku od izvorne pasivne uloge distributivne mreže, današnje distributivne mreže predstavljaju fleksibilne strukture različitih konfiguracija, topologija i karakteristika sa mogućnošću integracije distribuiranih izvora električne energije (*eng. distributed generation – DG*), te sve aktivnijim učešćem krajnjih korisnika u upravljanju proizvodnjom, potrošnjom i skladištenjem električne energije. Distributivne mreže se grade uzimajući u obzir sve ključne faktore usluga i troškova. Jedan od najvažnijih pokretača za modelovanje distributivne mreže i snabdijevanja je lokacija krajnjih potrošača. Učešće korisnika ogleda se u integraciji solarnih i vjetro elektrana sa savremenim distributivnim mrežama, dok se uloga krajnjih korisnika u skladištenju električne energije ogleda prvenstveno u korišćenju električnih automobila kao privremenih *bafera* (privremenih skladišta) električne energije. *CASIO* („*California Independent System Operator*“), tj. kalifornijski nezavisni operater, definiše ulogu električnih vozila u distributivnim mrežama kroz četiri nivoa:

- V1G, odnosno jednosmjerni tok snage od mreže ka vozilima
- V1G sa agregiranim resursima
- V1G sa fragmentiranim ciljevima aktera
- V2G, odnosno bidirekcionu razmjenu energije na linku „vozilo-mreža”

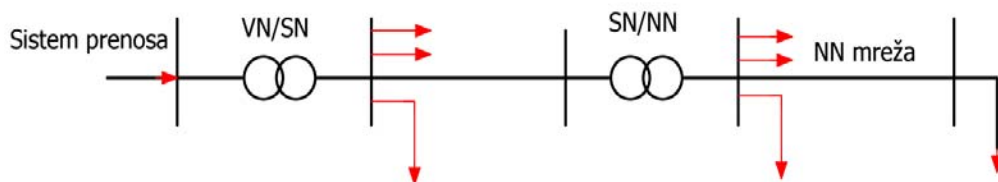
Iz ovakve podjele moguće je zaključiti da se uloga električnih vozila mijenjala sa razvojem tehnologije. Kao najaktuelnije rješenje za rapidan porast električnih vozila nameće se V2G (*eng. “vehicle to grid”*) koncept, kao i njemu srodni hijerarhijski niži koncepti u vidu V2V (*eng. “vehicle*

to vehicle”), V2H (eng. “vehicle to home”) itd. U **četvrtom poglavlju** biće dat detaljan opis svakog od navedenih koncepata i njihova uloga u distributivnim mrežama.

2.1. Konfiguracija i topologija distributivnih sistema električne energije

Zbog same kompleksnosti, kako prostorne tako i funkcionalne, struktura distributivne mreže može se uprostiti na sledeći način:

1. **Trafostanica VN/SN** - koja zavisno od topologije i kompleksnosti same mreže može pripadati ili prenosnom ili distributivnom sistemu i predstavlja tačku napajanja distributivnih sistema;
2. **SN (srednjenaponske) mreže** - u literaturi ove mreže se često nazivaju primarnim distributivnim mrežama. Zavisno od EES-a, mreže na području evroazijskog kontinenta obično su dimenzionisane za naponske nivoe između 10 kV i 30 kV i sastoje se od glavnih izvoda i grana. Iz SN mreže napajaju se distributivni niskonaponski transformatori, a zatim potrošači ili industrijska postrojenja koja zahtevaju desetine ili stotine kW aktivne snage;
3. **Trafostanica SN/NN** - povezuju se na SN mrežu i služe za napajanje potrošača u manjim regionima, kao što su naselja i kvartovi;
4. **NN (niskonaponske) mreže** - odnosno sekundare distributivne mreže, predstavljaju mreže čiji nominalni linijski napon iznosi 400 V, dok fazni napon iznosi 230 V.



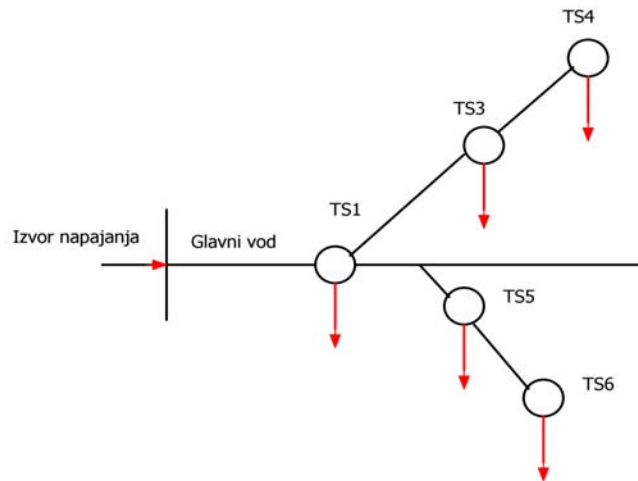
Slika 2.1.1 Šema distributivne mreže

Prema topologiji mreže se mogu svrstati u dvije osnovne grupe:

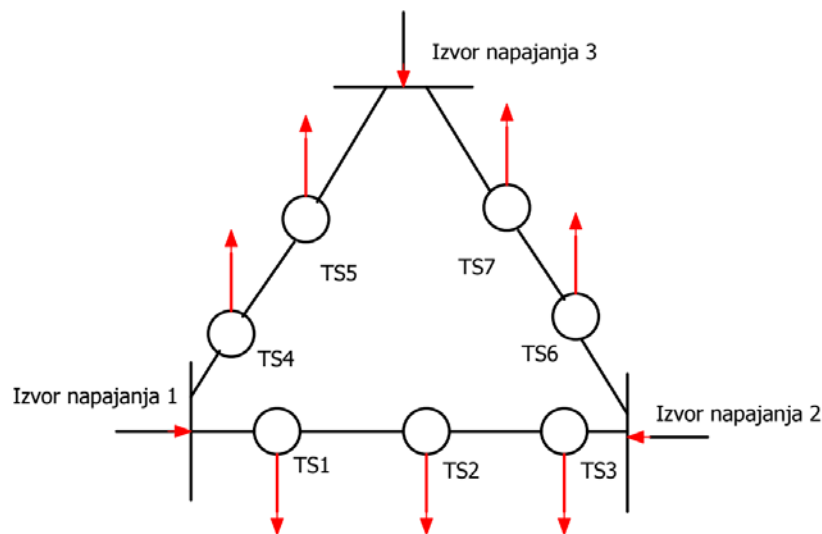
- radijalne mreže i
- petljaste mreže.

Osnovni princip podjele na navedene dvije grupe jeste smjer prenosa električne energije duž vodova. Karakteristika radijalnih mreža jeste jedan smjer prenosa energije duž vodova, kao i jednostrano napajanje čvorova. Radijalna mreža može biti realizovana kao: čisto radijalno napajanje, napajanje sa ograncima, radijalno napajanje u tački i dr. Različite varijante radijalnog napajanja

prikazane su na slici 2.1.2. Za razliku od radijalnih mreža, petljastu konfiguraciju karakterše prenos energije u oba smjera. Navedeno svojstvo postiže se međusobnim vezivanjem vodova, kao i povezivanjem napojnih tačaka na više izvora napajanja (slika 2.1.3).



Slika 2.1.2 Radijalna konfiguracija



Slika 2.1.3 Petljasta konfiguracija

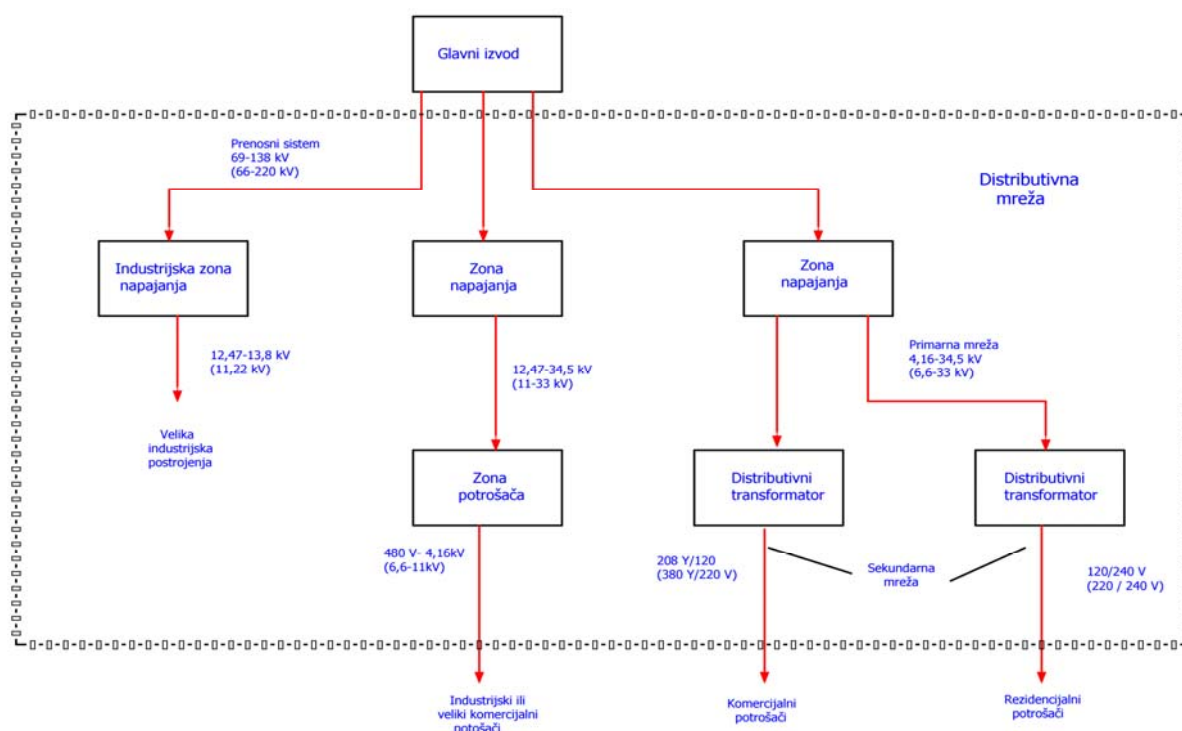
2.1.1. Konfiguracija primarne mreže

Distributivni sistemi Sjeverne Amerike i Evrope dijele se na primarne i sekundarne mreže i predstavljaju najčešće implementirane sisteme [29]. Ova dva sistema međusobno se razlikuju u naponskim nivoima što je ilustrovano u Tabeli 2.1.1.1.

Tabela 2.1.1.1 Naponski nivoi Sjeverne Amerike i Evrope

Naponski nivo	Sjeverna Amerika	Evropa
Naponski nivo primarne mreže (linijski)	4 do 35 kV	6.6 do 33 kV
Trofazni napon sekundarne mreže (linijski)	208, 480, ili 600 V	380, 400, ili 416 V
Fazni napon sekundarne mreže	120/240, 277, ili 347 V	220, 230, ili 240 V

Naponski nivo distributivne mreže bira se na osnovu zahtjeva krajnjih konzuma, odnosno u zavisnosti da li se radi o industrijskim, rezidencijalnim ili komercijelnim potrošačima. Tipičan blok dijagram strukture distributivne mreže prikazan je na slici 2.1.1.1. Na osnovu blok dijagrama uočljivo je da se napajanje industrijskih, komercijalnih i rezidencijalnih područja odvija na različitim naponskim nivoima, s toga je i u zavisnosti od tipa potrošača, odnosno u zavisnosti od zahtjeva za napajanjem po pitanju pouzdanosti i ključan izbor odgovarajuće konfiguracije.



Slika 2.1.1.1 Naponski nivoi za različite vrste potrošača (za sisteme Sjeverne Amerike i Evrope)

Pri projektovanju primarne mreže, potrebno je uzeti u obzir opterećenja koja će biti izazvana

napajanjem kako njenih vlastitih potrošača, tako i potrošača sekundarne mreže ili trafostanica srednjeg/nnižeg napona. Parametri koji se uzimaju u obzir su [29]:

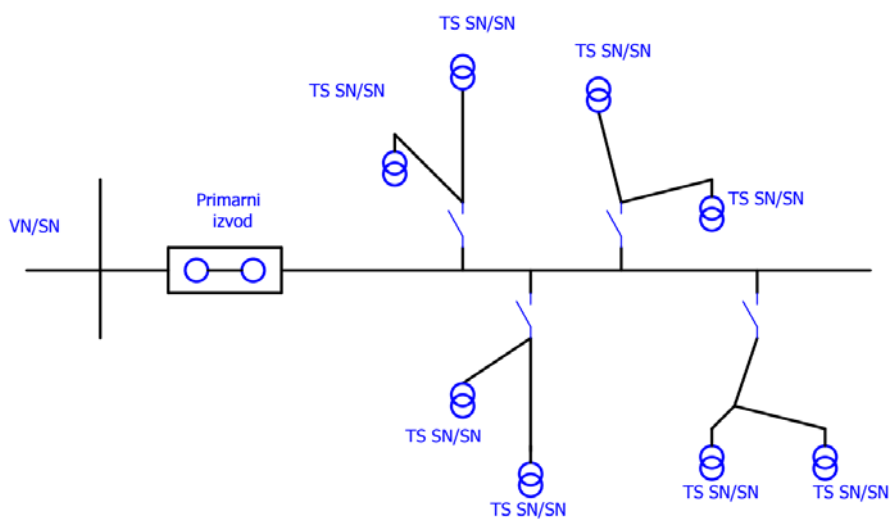
- tip potrošača priključenih na mrežu,
- ukupna potrošnja napajane oblasti,
- stepen porasta broja potrošača,
- tip i nominalne snage trafostanica

Najčešće korišćene konfiguracije distributivnih primarnih mreža u zavisnosti od načina napajanja su:

- radijalna konfiguracija
- prstenasta konfiguracija i
- konfiguracija sa dvostranim napajanjem

2.1.1.1 Radijalna konfiguracija

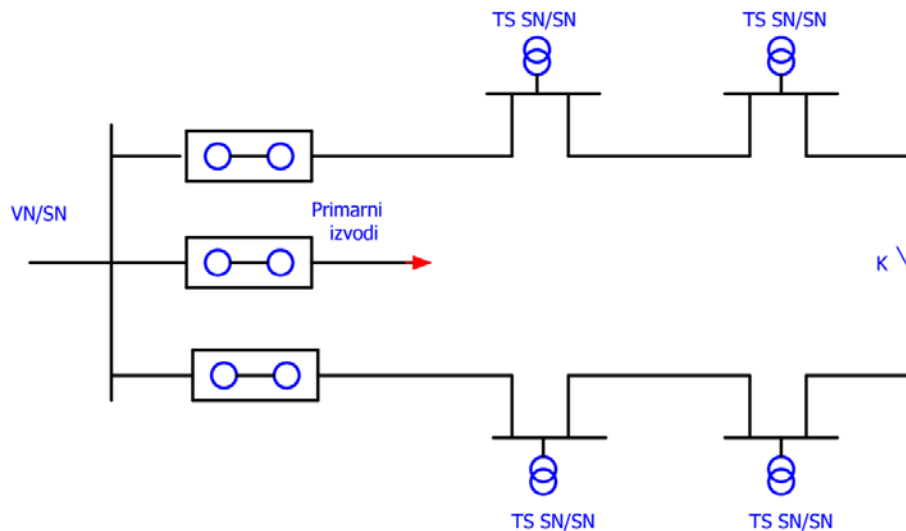
Radijalna mreža predstavlja najjednostavniju konfiguraciju primarne distributivne mreže. Na osnovu slike 2.1.1.1.1. uočljivo je da je struja najveća na primarnom izvodu, dok se daljim grananjem ka specificiranim potrošačkim područjima, struja smanjuje. Ovakva konfiguracija je jednostavnija za upravljanje, dok sa druge strane, u slučaju kvara, te ispada mreže, potrošačka područja će ostati bez napajanja. Prednost ovakve konfiguracije su manje struje kvara, niži troškovi implementacije, jednostavniji sistem zaštite, kao i lakše planiranje optimalnih tokova snaga.



Slika 2.1.1.1.1 Radijalna konfiguracija primarne mreže

2.1.1.2. Prstenasta konfiguracija

Karakteristika prstenaste konfiguracije jeste mogućnost prenosa energije duž vodova u oba smjera. Prednost ovakve konfiguracije svakako su veća pouzdanost, jer u slučaju ispada jednog voda, moguće je napajati SN/NN trafostanice drugim vodom sa istog izvoda uklapanjem prekidača K. U normalnom pogonu prekidač K je otvoren. U slučaju potrebe za napajanjem sa druge strane, prekidač K se zatvara. Izvod se najčešće dimenzioniše tako da može da izdrži opterećenje oba izvoda, pa u slučaju kvara, snadbijevanje električnom energijom se može odvijati nesmetano.

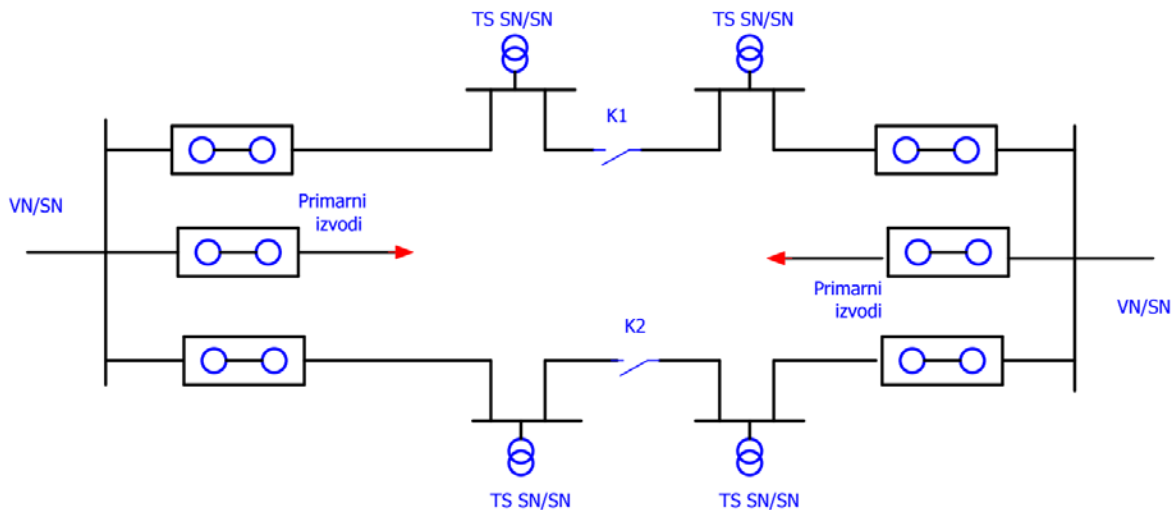


Slika 2.1.1.2.1 Prstenasta topologija

U slučaju havarije na primarnom izvodu, najprije se otvara glavni prekidač, tako da čitav izvod ostaje bez napajanja. Nakon izolovanja kvara, uklapa se glavni prekidač i kontakt između izvoda, tako da trafostanice postaju napojene bilo sa jedne ili druge strane. Moguća je i izvedba u kojoj će dvije strane napajanja biti priključene na različite transformatore, ali to zahtjeva dodatnu opremu, te povećava kompleksnost samog upravljanja, a samim tim i cijenu [30]. Prstenasta konfiguracija se primjenjuje u potrošačkim područjima za koje je konstantno napajanje od velike važnosti i ispadi mogu da izazovu velike havarije.

2.1.1.3. Konfiguracija sa dvostranim napajanjem

Konfiguracija mreže sa dvostrukim napajanjem prikazana je na slici 2.1.1.3.1. Mreža sa dvostrukim napajanjem ima veći stepen sigurnosti i pouzdanosti u odnosu na radijalnu i prstenastu konfiguraciju. Ovakva konfiguracija je pogodna u slučaju havarije na jednoj od VN/SN trafostanica i u tom slučaju moguće je napajanje sa druge. U slučaju havarije na SN izvodu, nakon izolovanja kvara, moguće je staviti trafostanicu u normalan pogon.

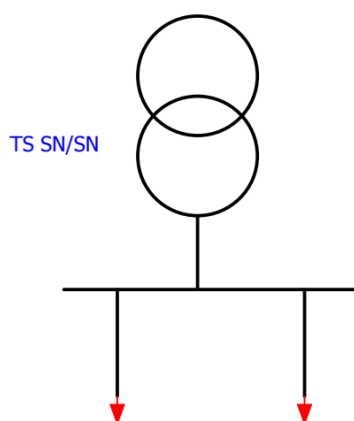


Slika 2.1.1.3.1 Konfiguracija distributivne mreže sa dvostranim napajanjem

Osim same sigurnosti, prednost ovakve konfiguracije su i manji troškovi usled veće fleksibilnosti raspodjele optimalnih tokova snaga, smanjenje opterećenja, te manjih gubitaka.

2.1.2. Konfiguracija sekundarnih mreža

Kao što je navedeno u **Potpoglavlju 2.1.1.** najčešća konfiguracija primarnih mreža je radijalna. Takođe, radijalna mreža je najzastupljenija konfiguracija i kod sekundarnih mreža prvenstveno zbog jednostavnije implementacije i niže cijene. Izuzetak su objekti i potrošačka područja koja zahtjevaju visok stepen pouzdanosti napajanja, kao što su bolnice, aerodrome, poslovni objekti i slično. Prikaz radijalne konfiguracije sekundarne mreže dat je na slici 2.1.2.1. Mana ovakve konfiguracije bila bi niska pouzdanost. Prilikom ispada na bilo kom dijelu mreže, čitavo područje ostaće bez napajanja.



Slika 2.1.2.1. Radijalna konfiguracija radijalne sekundarne mreže

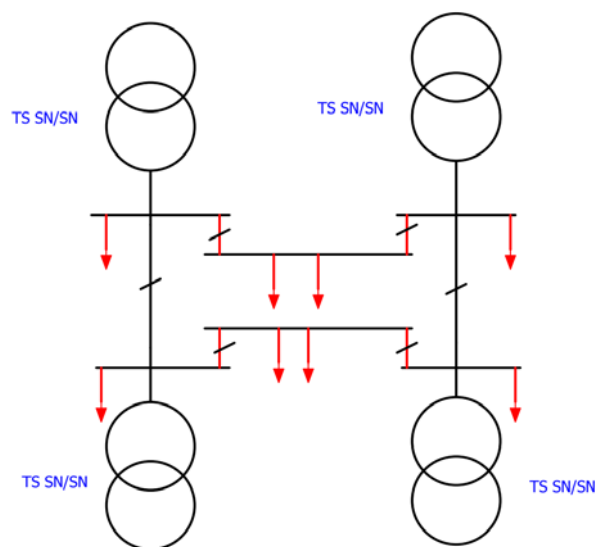
U cilju postizanja veće sigurnosti i pouzdanosti napajanja, primjenjuje se neka od sledećih konfiguracija:

- petljasta (slika 2.1.2.2)
- prstenasta (slika 2.1.2.3) ili
- paralelno-povezana topologija (slika 2.1.2.4).

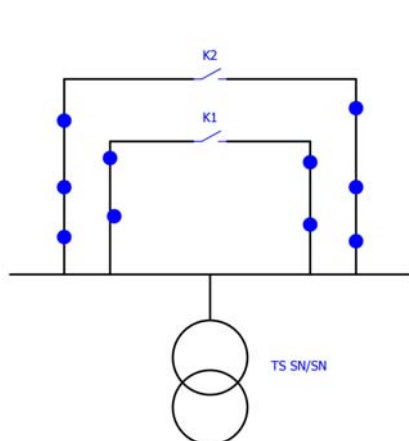
Petljasta konfiguracija omogućava da u slučaju ispada neke od TS SN/NN potrošači budu napajani sa neke druge TS, na koju je potrošač povezan.

Prstenasta konfiguracija na neki način predstavlja unapređenu radijalnu konfiguraciju i uklapanjem prekidača omogućava se napajanje TS sa “druge strane” u slučaju da dodje do ispada na nekom od niskonaponskih vodova.

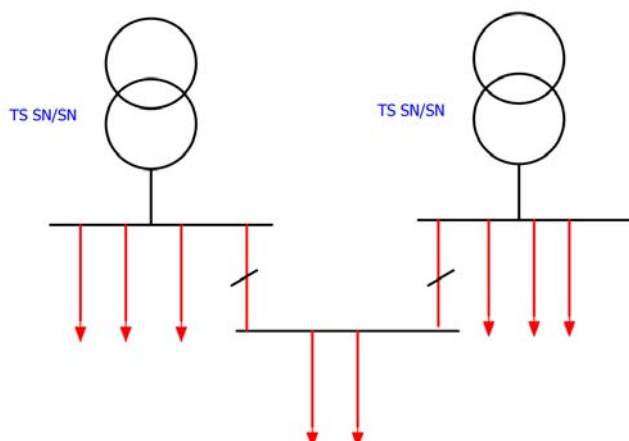
Konačno, kod paralelno-povezane konfiguracije susjedne trafostanice su međusobno povezane, čime se u slučaju havarije na jednoj TS SN/NN postiže veća sigurnost napajanja niskonaponskih konzuma.



Slika 2.1.2.2 Petljasta konfiguracija



Slika 2.1.2.3 Prstenasta konfiguracija



Slika 2.1.2.4 Paralelno povezana konfiguracija

Obzirom da sekundarna mreža predstavlja vezu između niskonaponskih konzuma i ostatka sistema, veoma je važno da bude ispravno dimenzionisana kako bi se smanjili gubici, te obezbijedio odgovarajući kvalitet snadbijevanja. U cilju smanjenja gubitaka, te poboljšanja naponskih prilika, preporuka je da se TS lociraju što bliže potrošačkim regionima.

2.2. Ciljevi razvoja savremenih distributivnih sistema

Ciljevi savremene distributivne mreže prvenstveno se odnose na smanjenje emisije štetnih gasova, odnosno smanjenje efekta staklene baste (*eng. Greenhouse Gasees – GHG*), priključenje distribuiranih izvora energije kao odgovor na sve veći porast konzuma, kako bi se otklonila ili makar

privremeno usporila potreba za proširenjem i izmjenom savremene konfiguracije distributivne mreže [31].

Pariski sporazum predstavlja globani sporazum protiv klimatskih promjena, usvojen na Pariskoj konferenciji 2015. godine. Osnovni cilj Pariskog sporazuma¹ je jačanje odgovara na klimatske promjene na globalnom nivou kroz:

- redukovanje emisije štetnih gasova,
- limitiranje porasta temperature na 2 °C u odnosu na period prije razvoja industrije [32].

S ciljem smanjenja emisije štetnih gasova, prelazak s tradicionalnih centralizovanih izvora na alternativne obnovljive izvore postala je prioritet. Prednost ovakvih izvora bila bi potpuno „zelena“ proizvodnja, te nezavisnost potrošačkih područija od same mreže. Distribuirana proizvodnja takođe podrazumijeva implementaciju ovakvih izvora energije u samim potrošačkim regionima, pa bi zbog manje fizičke udaljenosti i gubici u mreži bili znatno manji te bi se poboljšao kvalitet snadbijevanja, čime bi se postigla veća nezavisnost od glavne mreže. Problemi integracije ovakvih izvora sa distributivnim mrežama ogledaju se u kompleksnosti upravljanja i održavanja sistema na marginama stabilnosti. Pored distribuiranih izvora, poslednjih godina došlo je do rapidnog porasta proizvodnje električnih automobila kao alternativa automobilima sa unutrašnjim sagorijevanjem. Iako su u početku električni automobili predstavljali tehnološku inovaciju sa konstruktorskim izazovima u vidu povećanja dometa vožnje i performansi, porastom njihovog broja otvorilo se pitanje priključenja istih u mrežu. Trenutno, eksploatacija električnih automobila nije značajnog obima, te njihova integracija sa primarnom distributivnom mrežom je prihvatilja. Međutim, u skorijoj budućnosti, prateći trend rasta broja električnih vozila, jasno je da je pitanje dana, kada će električna auta postati svakodnevna pojava. Uslovno rečeno, električna vozila su „veliki“ konzumi u odnosu na kapacitete niskonaponske distributivne mreže, te njihova neracionalno priključenje može dovesti do nepoželjnih vršnih opterećenja. Poslednjih godina električna vozila se priključuju u mrežu kroz različite oblike pametnog punjenja. Međutim, posebno ambiciozan i izazovan sistem priključenja vozila ogleda se u V2G konceptu.

V2G je prvi put istražen kao koncept u akademskim krugovima. Vilet Kempton i Stiven Letendre su izveli prvo istraživanje na ovu temu 1997. godine na Univerzitetu Delaver pod naslovom „*Electric Vehicles as a New Source of Power for Electric Utilities*“. U ovom trenutku, termin V2G

¹ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en

još nije bio u upotrebi, a električna vozila nisu bila uobičajena. Njihov rad se prvenstveno fokusirao na rešavanje ideje o nadoknađivanju vršne potražnje za energijom. Kempton i Letendre² su nastavili sa objavljivanjem brojnih studija koje slijede tokom sledeće decenije, od kojih je svaka razvijala koncept istražujući različite aplikacije i tokove prihoda energije. Ipak, u ovoj fazi istraživanje je ostalo u potpunosti u sferi teorije, prvenstveno zbog nedostatka električnih vozila.

2.2.3. Distribuirani izvori električne energije

Distribuirani izvori energije predstavljaju decentralizovane proizvodne jedinice koje su priključene na distributivnu mrežu [33],[35]. Mjesto priključivanja izvora je varijabilno i može biti ili u neposrednoj blizini konzuma ili u širem potrošačkom području. Iako se rad “zelenih” distribuiranih izvora bazira na energiji sunca i vjetra, postoji niz drugih tehnologija koje se zasnivaju na konverziji električne energije iz ostalih, konvencionalnih ili nekonvencionalnih, izvora. Razlika u odnosu na centralizovanu proizvodnju osim samog načina priključenja ogleda se i u naponskim nivoima i nominalnim snagama. Najčešći naponski nivoi distribuiranih izvora su: 10kV, 20kV i 35 kV, dok postoje i izvori koji se mogu direktno priključiti i na 0.4 kV mrežu, što ih čini prihvatljivim za masovnu primjenu u vidu stvaranja malih solarnih elektrana na krovovima domaćinstava. Što se tiče instalisane snage distribuiranih izvora, konkretan opseg snage koji svrstava izvor u distribuirani nije jednoznačno definisan [33]. Definisana snaga od strane Elektroenergetskog istraživačkog instituta (*eng. Electric Power Research Institute - EPRI*) je u opsegu od 1 kW do 50 MW. Međunarodni savijet za velike električne mašine (*CIGRE*), definiše distribuirani izvor kao proizvodnu jedinicu izlazne snage u opsegu od 50 kW do 100 MW. Bez obzira na različite definicije od strane relevantnih institucija, može se reći da se prema kriterijumu izlazne snage, distribuirani izvori dijele u četiri kategorije [33],[34]:

- mikro izvori: snage 1 W – 5 kW,
- mali izvori: snage 5 kW – 5 MW,
- srednji izvori: snage 5 MW – 50 MW i
- veliki izvori: snage veće od 50 MW.

Iako osim obnovljivih distribuiranih izvora kao što su sunce i vjetar, postoji niz drugih nekonvencionalnih izvora kao što su gasne mikroturbine i dizel/gasni recipročni motor, kao i sistemi

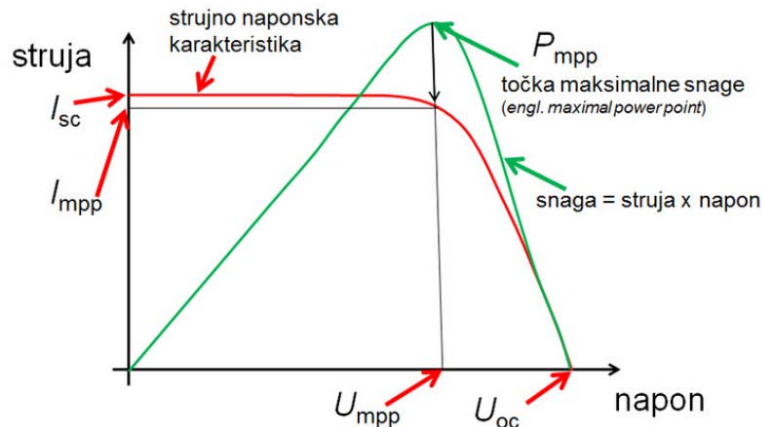
² <https://www1.udel.edu/V2G/docs/V2G-PUF-LetendKemp2002.pdf>

na bazi elektrohemijskih reakcija, odnosno gorivne ćelije. Naredna dva potpoglavlja biće fokusirana na sistemima baziranim na obnovljivim izvorima, odnosno na fotonaponske panele i vjetrogeneratore.

2.2.3.1. Solarne elektrane

Fotonaponski uređaji pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Jedan FN uređaj, odnosno ćelija proizvodi između 1-2 W. Da bi se povećala izlazna snaga ove ćelije neophodno je vezati iste bilo paralelno ili redno čime se povećava izlazni jednosmjerni napon, a samim tim i snaga. Jedna od osnovnih karakteristika svih fotonaponskih sistema jeste strujno-naponska (I-V) karakteristika [35].

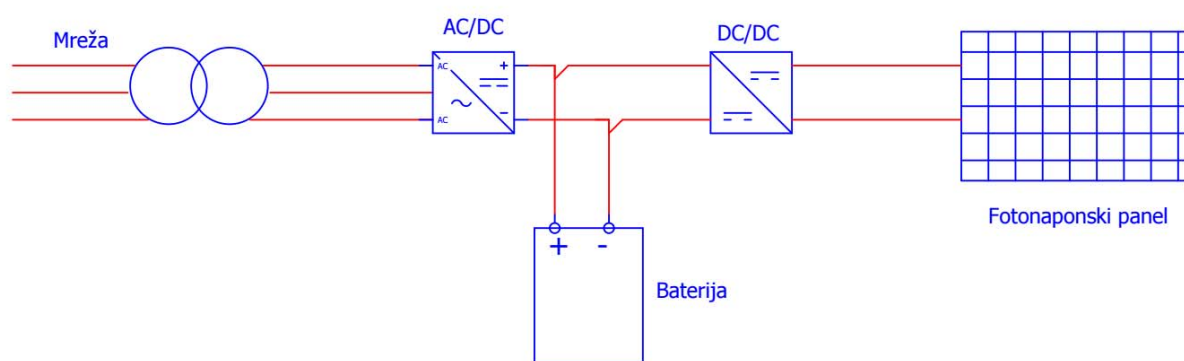
Na slici 2.2.3.1.1 prikazana je strujno-naponska karakteristika fotonaponskog panela. Oblik ove karakteristike uslovljen je karakteristikama poluprovodničkih elemenata koje sam panel koristi, temperature panela, insolaciji, broja modula i slično. U cilju energetske efikasne eksploatacije solarnih panela, definiše se tačka maksimalne snage (eng. *Maximum Power Point-MPP*). U ovoj tački izlazna snaga fotonaponskog panela je maksimalna, odnosno solarne elektrane rade svojim punim kapacitetom. Obično, na solarnim invertorima postoji određeni broj stringova, odnosno hardverskih ulaza na koje je moguće vezati solarne panele, pri čemu svaki od tih ulaza ima zaseban MPP algoritam.



Slika 2.2.3.1.1 I-V i P-V karakteristike fotonaponskog panela

Trenutno se fotonaponski sistemi sreću u dvije varijante: *on grid* (priključeni na mrežu) i *standalone* (samostalni). *On grid* sistemi predstavljaju kompleksnija rješenja i sadrže više elemenata energetske elektronike kako bi bio obezbijeđen nesmetan priključak na mrežu. Na slici 2.2.3.1.2 prikazana je blok šema *on grid* sistema. Iako ne nužno, ovakvi sistemi se često izvode u hibridnoj verziji sa integrisanim baterijama, čime se omogućava samostalno napajanje u slučaju ispada mreže. Veza sa panelima ostvaruje se pomoću DC-DC konvertora, trofaznog invertora i transformatora po

potrebi. Zadatak konvertora jeste da prilagodi jednosmjerni napon panela, naponu mrežu, zatim se pomoću invertora jednosmjerni napon pretvara u trofazni naizmjenični kako bi se omogućio priključak u mrežu. Uloga transformatora je da obezbijedi odgovarajući naponski nivo, adekvatan mreži u kojoj se priključuje ovakav sistem. U slučaju *standalone* sistema, inverter i transformator se izostavljaju i vrši se direktno napajanje jednosmjernih potrošača preko DC-DC konvertora. Važno je napomenuti da prikazani *on grid* sistem ne predstavlja jedino strukturno rješenje priključenja. Postoji još načina priključenja u zavisnosti od samog tipa panela, te njegove namjene [36]. U Crnoj Gori su rijetki sistemi sa akumulacionim uređajima, već se sva proizvedena energija koristi za napajanje potrošača, dok se višak preusmjerava u mrežu.



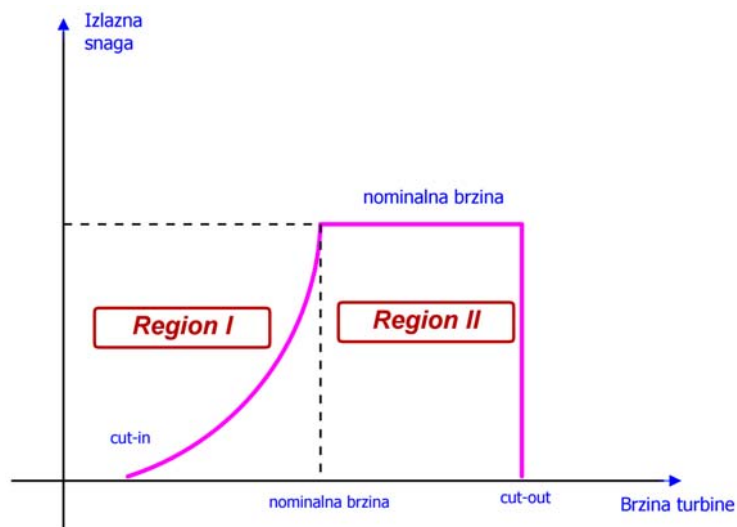
Slika 2.2.3.1.2 Fotonaponski *on grid* sistem

2.2.3.2. Vjetrogeneratori

Princip rada vjetrogeneratora zasniva se na konverziji energije vjetra u mehaničku energiju putem okretanja lopatica vjetroturbine. Kinetička energija okretanja lopatica preko reduktora se dalje prenosi do generator, gdje usled okretanja rotora dolazi do proizvodnje električne energije.

Najvažnija karakteristika kod vjetrogeneratora jeste zavisnost izlazne snage od brzine okretanja lopatica. Ova karakteristika prikazana je na slici 2.2.3.2.1. U *regionu I* brzine turbine su niže od nominalne, te izlazna snaga nije maksimalna. Porastom brzine okretanja turbine u ovom regionu dolazi do eksponencijalnog porasta izlazne snage. U ovom regionu važna tačka jeste *cut-in*. Ova tačka predstavlja brzinu pri kojoj će doći do pokretanja turbine, te proizvodnje električne energije. U praksi *cut-in* brzina iznosi oko 2.5 m/s. Sve brzine niže od ove se smatraju neefikasnim i nerentabilnim, te će shodno tome turbine biti zakočena. *Region II* predstavlja region nominalne snage. Vjetroagregat će na izlazu davati približno konstantnu nominalnu snagu za sve brzine koje pripadaju *regionu II*, a manje su od *cut-out* brzine. *Cut-out* brzina predstavlja maksimalnu dozvoljenu brzinu vjetra pri kojoj će

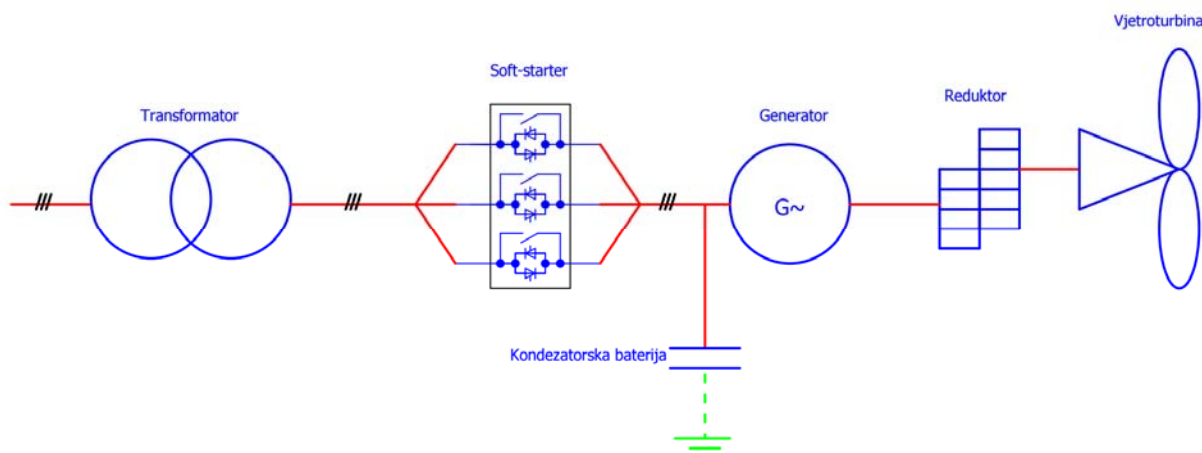
turbine ostati u pogonu. Za sve brzine veće od ove, turbina se zaustavlja kako ne bi došlo do havarije i razlijetanja vjetrogeneratorskog sistema.



Slika 2.2.3.2.1 Izlazna snaga vjetrogeneratora u zavisnosti od brzine vjetra

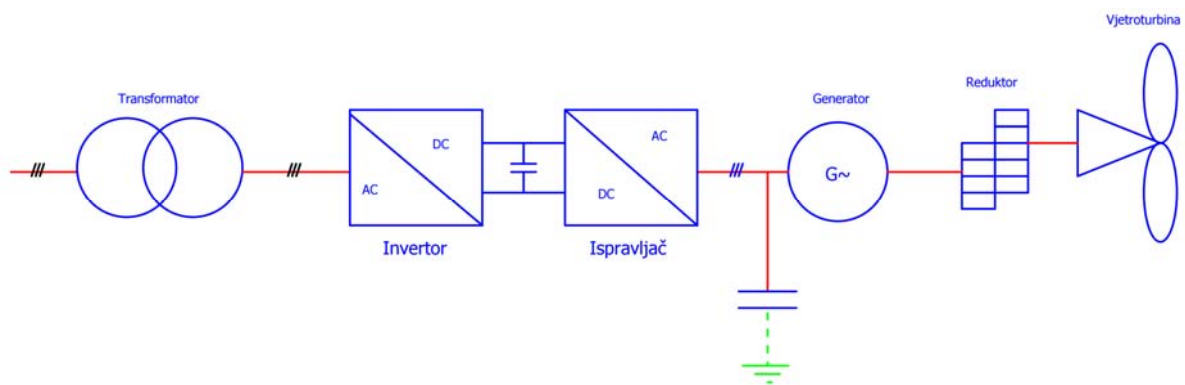
U zavisnosti od geografskog područja, odnosno samog profila vjetrova, te zahtjeva za proizvodnjom, vjetroagregati se mogu podijeliti u dvije osnovne konfiguracije, to su: konfiguracije za fiksne brzine vjetra i konfiguracije za promjenjive brzine vjetra [37].

Konfiguracija za fiksne brzine prikazana je na slici 2.2.3.2.2. Ovakva konfiguracija koristi *soft-starter* kako bi se na samom startu agregat zaletio kao motor. Nakon toga, mašina se kratko spaja i radi u generatorskom režimu, pri čemu je neophodna kompenzacija reaktivne energije pomoću otočnih kondenzatorskih baterija. Najčešće se u ovakvim konfiguracijama koristi asinhrona kavezna mašina koja je preko transformatora spojena na mrežu.



Slika 2.2.3.2.2 Vjetrogeneratorski sistem za fiksne brzine vjetra.

Na slici 2.2.3.2.3 prikazana je konfiguracija vjetrogeneratora za promjenjive brzine. Osim razlike u funkcionalnosti, za razliku od konfiguracije sa fiksnom brzinom, u ovom slučaju često se koriste proste sinhronne mašine ili sinhronne mašine sa permanentnim magnetima [37]. Ovakav sistem ne zahtjeva kompezatore reaktivne energije, jer tu ulogu preuzimaju inverter i ispravljač. Dakle, obzirom da je namijenjena promjenjivim brzinama, brzina okretanja turbine diktiraće učestanost napona zbog čega je najprije potrebno ispraviti napon pomoću AC-DC ispravljača, a zatim pomoću invertora napon prilagoditi učestanosti mreže. Sa invertora, napon se dovodi na krajeve transformatora kako bi se prilagodio naponski nivo.



Slika 2.2.3.2.3 Vjetrogeneratorski sistem za promjenjive brzine vjetra.

2.2.4. Integracija električnih vozila u distributivnoj mreži

Prateći trend porasta broja proizvodnih jedinica, te najave sve masovnije proizvodnje električnih automobila, sve veće elektroprivredne organizacije Evrope pripremaju se za dolazak električnih vozila. Gradnja adekvatnih punionica za električna vozila, smatra se jednim od glavnih strateških ciljeva budućeg razvoja elektroprivredne djelatnosti. Iako elektroprivredne organizacije kao pozitivan efekat dolaska električnih vozila vide u profitu kroz prodaju električne energije, usluge koje mogu ponuditi električna vozila mreži su višestruke. Pozitivan uticaj može se ogledati u regulaciji frekvencije, vraćanje skladištene enegije u mrežu tokom perioda vršnog opterećenja. Međutim, ovakve usluge još uvijek nisu masovno u upotebi, jer je neophodno da se stave u proces direktne ili indirektno regulacije, kao i prođu kroz sve zakonske okvire svake zemlje.

Punjenje električnih vozila može imati negativan uticaj na cjelokupan elektroenergetski sistem. Uslovno rečeno, električna vozila su veliki potrošači. Čak i uz vrlo skupa proširenja distributivnih sistema problem priključenja većeg broja vozila neće biti lako prevaziđen. Osnovni problem prilikom integracije električnih vozila javlja se u činjenici da vozači, kao krajnji korisnici električnih vozila, uglavnom imaju iste navike, odnosno veći dio stanovništva će posegnuti za punjenjem vozila nakon

dolaska sa posla ili slično, što će u perioda dana od 16h do 22h opteretiti sistem i izazivati velike fluktacije. Na osnovu analiza trenutnih kapaciteta EES-a, priključenja manjeg broja električnih vozila je izvodljivo. Međutim, problem će se javiti implementacijom velikog broja punjača, naročito onih velikih snaga (50 kW ili više).

Prenosni sistemi će biti u mogućnosti da podnesu veće zahtjeve za prenosom energije vodovima. Međutim, usled gustog rasporeda električnih vozila zagušenja se očekuju u distributivnim mrežama. Poseban problem jeste očekivana nehomogenost javljanja punionica i individualnih punjača, odnosno usled nepredvidivog geografskog rasporeda očekuje se lokalni uticaj na distributivne mreže [38]. Potencijalni problem predstavlja preopterećenje sredjenaponskih i niskonaponskih izvoda usled priključenja većeg broja vozila na ograničenom području. U slučaju punjenja vozila monofaznim sistemima moguće je da dođe i do asimetrije napona. Električna vozila se pune preko konvertora, koji su sastavni dio savremenih punjača, bilo da su unidirekcioni ili bidirekcioni. Ovakvi elementi dovode do emisije nižih harmonika u mrežu.

Nadogradnja distributivnih mreža usled negativnog uticaja električnih vozila na stabilnost mreže je izrazito skupo rješenje, pa se stoga neophodno okrenuti nekim jeftinijim i održivijim rješenjima. Jedan način jeste primjena pametnog punjenja kako bi se izbjegla preopterećenja sistema, a samim tim i sačuvali vlasnici električnih vozila od plaćanja “penala”. Drugi način jeste punjenje tokom noći za vrijeme nižeg opterećenja. Na ovaj način električna vozila imaju pozitivan uticaj na mrežu, jer rješavaju problem porasta napona usled podopterećenja, te rasterećuju sistem tokom dana za vrijeme vršnih opterećenja. Međutim, kao najnaprednije rješenje nameće se „*Vehicle Grid Integration*” koncepti među kojima je najznačajni V2G. Ovakav koncept zasniva se na bidirekcionoj razmjeni energije između vozila i mreže. Pozitivni uticaj ovakvog koncepta je višestruk, najprije u vidu “*peak shaving*”, odnosno smanjenja vršnog opterećenja, što za direktnu posledicu ima regulaciju napona i frekvencije, smanjenje opterećenja vodova i transformatora, te produženje životnog vijeka istih. Ovakav koncept prvenstveno je zamišljen za primjenu u primarnim mrežama na flotama automobila lociranih na istoj punionici. Međutim, ekspanzijom tržišta, V2G koncept svoju svrhu dobija u svakodnevnoj upotrebi električnih vozila, odnosno primjena ovakvog sistema se spušta na nivo sekundarne mreže čime se uključuje veći broj električnih vozila. Čitava ideja koncepta zasniva se na činjenici da su automobile parkirani 95% vremena, te da na taj način energija ostaje neiskorišćena. Međutim, električna vozila predstavljaju prevozno sredstvo, za čije kretanje se svakodnevno troši energije skladištena u baterijama, te jedan od osnovnih zahtjeva koji se stavlja ispred ovakvog koncepta jeste poštovanje zahtjeva vozača po pitanju *SoC*-a. U narednim poglavljima, biće

više riječi o samom konceptu i njegovim načelima.

3. Električna vozila

Električni vozilo je transportno sredstvo koje pokreće elektromotor, koristeći električnu energiju akumuliranu u baterijama ili sličnim uređajima za skladištenje energije.

Istorija električnih automobila datira još iz 19. vijeka i početka 20. vijeka. Međutim, pojavom i rapidnim razvojem motora sa unutrašnjim sagorijevanjem ideja razvoja električnih vozila je privremeno stavljena u drugi plan. Velike energetske krize tokom 70-ih godina prethodnog vijeka dovele su do ponovnog buđenja ideje o masovnoj proizvodnji električnih vozila, prvenstveno zbog porasta cijena nafte, rapidnim iscrpljivanjem izvora nafte, te potrebe za smanjenjem zagađenja [39], [40].

Od septembra 2011. godine započinje serijska proizvodnja električnih vozila. Kompanije koje su prve počele sa proizvodnjom su *Tesla*, *Buddy*, *Mitshubishi*, *Nissan*, pri čemu su *Nissan*-ov model *Leaf*³ i *Mitshubishi MiEV*⁴ najprodavaniji modeli do početka 2012. godine sa prodatih 15 000 primjeraka.

Važan cilj za razvoj električnih vozila je prevazilaženje razlika između troškova razvoja, proizvodnje i radnih karakteristika, u poređenju sa vozilima sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem. Automobili sa unutrašnjim sagorijevanjem za pokretanje motora koriste smjesu naftnih derivata i vazduha, dok električni automobili koriste električnu energiju skladištenu u baterijama, što predstavlja ekvivalent rezervoarima za gorivo kod tradicionalnih vozila. Visoka cijena električnih automobila, kao i hibridnih vozila, uslovljena je visokom cijenom baterija. Međutim, poslednjih godina aktivan je trend opadanja cijena. U tom smislu može se očekivati veći broj automobila u skorijoj budućnosti, obzirom da je visoka cijena jedna od glavnih prepreka kupovine električnih automobila. Istraživanje koje je sproveo Nilsen za *Financial Times*⁵ pokazalo je da 65% Amerikanaca i 76% Britanaca ne želi da plati mnogo više od cijene benzinskog automobila za električni automobil. Izvještaj agencije *JD Power and Associates*⁶ ističe da preko 50% kupaca koji su američki državljani nije spremno da izdvoji više od 5000 dolara više za električno vozilo u odnosu na standardne automobile sa benzinskim agregatima. Početna cijena električnog vozila znatno je veća od cijene automobila sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem uprkos subvencijama koje pojedine države nude svojim građanima zbog korišćenja električnog vozila. Kao osnovni razlog visoke cijene

³ <https://web.archive.org/web/20130925122343/http://www.michigan.com/cars/>

⁴ https://www.greencarreports.com/news/1066863_2012-mitsubishi-i-first-drive-u-s--spec-miev

⁵ <https://www.ft.com/content/e599a283-4456-483e-9bb0-cf1de5495a0e>

⁶ <https://web.archive.org/web/20110726170010/http://businesscenter.jdpower.com/news/pressrelease.aspx?ID=2010213>

navode se baterije, čije cijene mogu dostizati vrijednost od nekoliko stotina dolara po kWh. U periodu od 2007. godine do 2012. godine, cijene baterija su se smanjile gotovo tri puta. Redukovanje cijena baterija moguće je postići napretkom tehnologije, kao i dodatnim subvencijama od strane država, što bi dovelo do veće konkurentnosti električnih vozila na tržištu.

Međutim, nakon gotovo vijeka pauze, visok stepen zagađenja vazduha, zabrinutost izazvana globalnim zagrijavanjem, te konstantno iscrpljivanje rezervi nafte doveli su do ponovnog porasta popularnosti električnih automobila. Budući da je transport poznat kao jedan od glavnih izazivača zagađenja i emisije štetnih gasova, u cilju dekarbonizacije ovog sektora, elektrifikacija se nametnula kao opravdan cilj [41]. Prema podacima iz 2020. godine, širom svijeta u upotrebi je preko 10 miliona automobila⁷, što predstavlja porast preko 40% u odnosu na godinu ranije.

Kao jedan od prvih nedostataka u masovnoj eksploataciji električnih vozila jeste nedovoljno fleksibilna mreža. Međutim, unapređenje mreže, te rapidnim napretkom tehnologije baterija, smanjenjem nivoa buke, kao i veće efikasnosti motora uz smanjene varijabilne troškove (gorivo) električna vozila dobijaju prioritet u odnosu na konvencijalna. Drugi nedostatak bio bi nedovoljno razvijena infrastruktura za punjenje električnih vozila. Prvi nedostatak rješava se izgradnjom guste mreže kako bi se obezbijedila veća fleksibilnost, dok se drugi prevazilazi implementacijom punjača velikih snaga, kako bi proces punjenja trajao što kraće. Jedan poseban nedostatak električnih vozila svakako bi bio domet. Domet električnog automobila definisan je njegovom baterijom za razliku od konvencionalnog automobila kod kojeg je domet definisan količinom goriva. Kod benzinskih i dizel agregata, nestanak goriva rješava se ponovnim punjenjem rezervoara, što predstavlja relativno brz proces. Sa druge strane, kod električnih vozila proces punjenja može potrajati u zavisnosti od snage punjača. Električna vozila postižu maksimalni domet u gradskim uslovima, zbog čestog kočenja, a samim tim i rekuperacije energije. Kao jedno od rješenja nameće se upotreba „*DC Fast Charging*” punjača, koji u zavisnosti od nazivne snage i kapaciteta baterije električnog vozila, proces punjenja električnog vozila mogu završiti za svega 30 minuta. Alternativa brzim punjačima bila bi zamjena baterija, odnosno bilo bi potrebno prvi put kupiti bateriju, a nakon toga se baterija ne bi punila, već bi se mijenjala za već napunjenu bateriju na lokalnoj punionici ili benzinskoj pumpi. Takođe, jedno od rješenja dolazi od *BMW*-a, koje je predstavljeno u modelu *i3*. Ideja je da u slučaju da se baterija isprazni, dođe do startovanja benzinskog motora koji bi napajao bateriju, odnosno radio kao agregat. Međutim, iako je iskoristivost ovakvog motora gotovo maksimalna, važno je napomenuti da ovo i

⁷ <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>

dalje predstavlja prelazno rješenje, a ne ideju potpune dekarbonizacije.

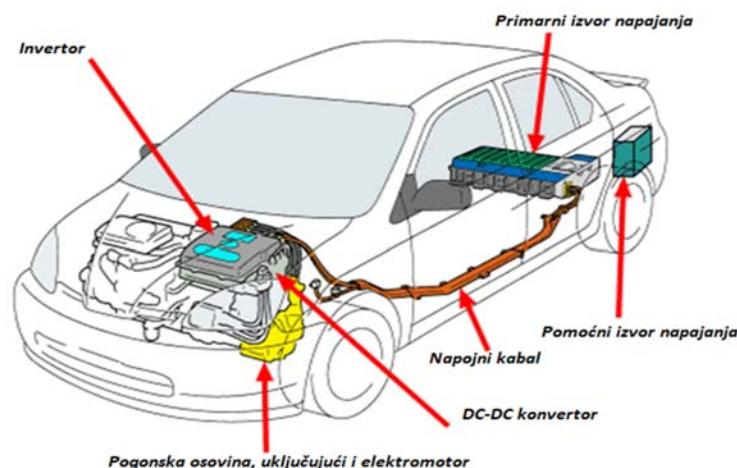
U narednim poglavljima će biti predstavljena konfiguracija električnih vozila, savremene tehnologije punjenja, uključujući bidirekzione punjače, tehnologija savremenih litijum-jonskih baterija, kao i pregled trenutno dostupne literature vezane za V2G, V2H i V2V koncepte.

3.1. Konfiguracija električnih vozila

Električno vozila predstavlja skup kompleksnih podistema, koji se mogu grubo svrstati u tri kategorije i to:

1. pogonski podsystem,
2. podsystemi napajanja i
3. pomoćni podsystemi i senzorika.

Pogonski podsystem se sastoji od motora, konvertora, mehaničkih prenosnika, jednog ili više kontrolera i pneumatika. Podsystem napajanja sastoji se od same jedinice napajanja, hardvera neophodnog za punjenje vozila, kao i posebnog upravljačkog sistema za upravljanje procesom punjenja. Pomoćni podsystem čine servo upravljač, BTMS (eng. „*Battery temperature management system*“), tj. sistema za upravljanje temperaturom baterije, odnosno hlađenjem, rezervnog izvora napajanja, sistema za kontrolu stabilnosti, ABS („*anti-lock braking system*“) sistema, kao i mnogobrojne senzorike neophodne za normalno funkcionisanje automobila.

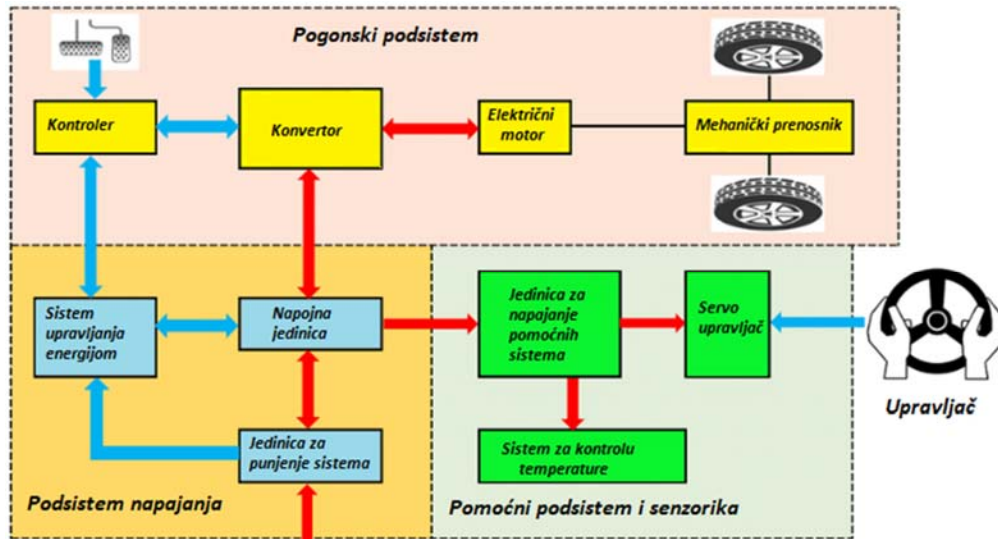


Slika 3.1.1 Prostorni raspored osnovnih električnih komponenti

Na slici 3.1.1 prikazana je prostorna konfiguracija pratećih električnih komponenti. Važno je napomenuti da je ovakva konfiguracija ilustrativnog karaktera i služi za sticanje jasnije slike o položaju opreme unutar samog vozila, a detaljna konfiguracija u zavisnosti od načina prenošenja

snage na točkove biće data u nastavku.

Na slici 3.1.2 prikazana je blok-šema konfiguracije električnog vozila sa odgovarajućim podsistemima [42].

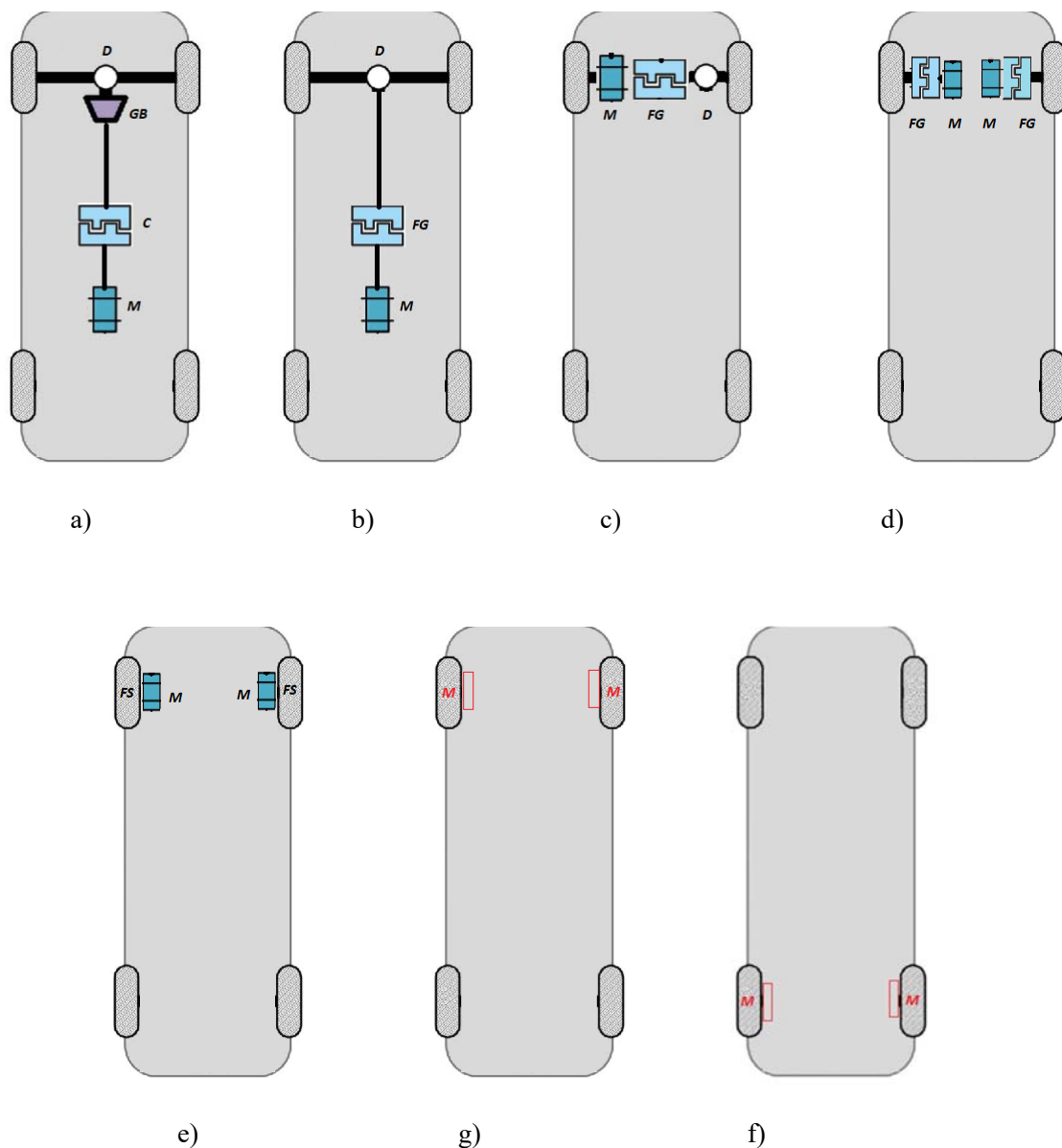


Slika 3.1.2 Blok šema električnog vozila

U zavisnosti od rasporeda elemenata, odnosno podsistema i načina prenošenja obrtnog momenta od motora do točkova, razlikuje se nekoliko konfiguracija električnih vozila (slika 3.1.3).

Prvo rešenje je slično onom koji se koristi u vozilima sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem (a). Prednost drugog rešenja (b) je odustajanje od kvačila i mjenjača i korišćenje fiksnog zupčanika, čime se smanjuje težina pogonskog sistema i smanjuju troškovi proizvodnje. U odnosu na konfiguraciju na slici (c), da bi se postigla diferencijalna funkcija, konfiguracija (d) se sastoji od dva motora koja nezavisno pokreću točkove preko učvršćenih zupčanika. Ovo je omogućilo upotrebu dva motora manje snage koji pojedinačno pokreću desni i lijevi točak. U odnosu na sliku (d), u konfiguraciji (f) fiksni zupčanici su u potpunosti izostavljeni, a motori su postavljeni uz obode točkova (*eng. In-wheel*).

In-wheel konfiguracijom redukuje se ukupna težina pogonskog podsistema. Na ovaj način se postiže bolja upravljivost, a takođe oslobađa se i prostor za dodatne baterije. Međutim postavljanje motora uz obod točkova povećava rizik od mehaničkih oštećenja usled djelovanja spoljašnjih uticaja [43].



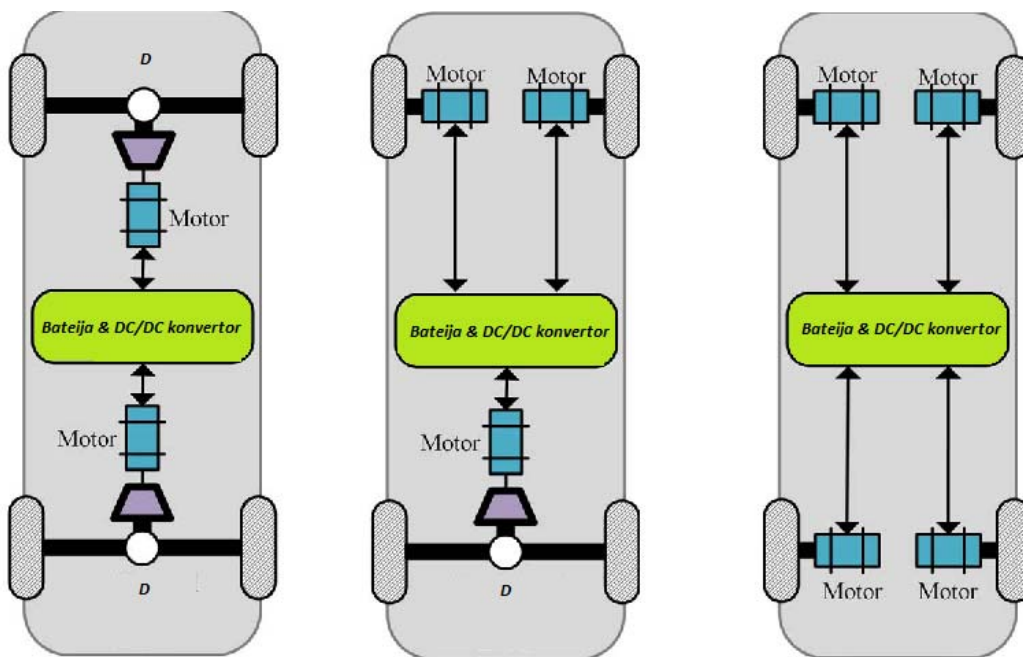
Slika 3.1.3 Moguće konfiguracije električnih vozila

(C-kvačilo, GB- sistem transmisije, M-motor, D- diferencijal, FG- fiksni zupčanik)

Osim ovakvih konfiguracija koje se primjenju i na RWD (*eng. rear wheel drive*) pogonske sisteme, kao u slučaju modela *Tesla S* postoje i izvedbe sa pogonom na svim točkovima (*eng. all wheel drive-AWD*). Ovakvi sistemi dolaze u tri različite konfiguracije prikazane na slici 3.1.4. Isti omogućava bolju kontrolu trakcije⁸, a samim tim i veću upravljivost vozila. Konfiguracija prikazana

⁸ Kontrola trakcije (*eng. Traction Control System-TCS*) predstavlja sistem koji sprječava proklizavanje točkova oduzimanjem gasa softverski. TCS je postao standard u svim automobilima poslednje decenije.

na slici (a) je najčešća *AWD* konfiguracija. Sastoji se od dva nezavisna elektromotora koja najčešće koriste zajednički izvor napajanja. Preko diferencijala snaga se prenosi na prednje i zadnje točkove u zavisnosti od trakcije. Osim raspodjele snage na istoj osovini, motori “komuniciraju” međusobno i spregnuti su u zajednički sistem. Ovakva konfiguracija se najčešće sreće kod električnih automobila sa pogonom na svim točkovima, prvenstveno zbog jednostavnosti implementacije u odnosu na ostale *AWD* konfiguracije. Konfiguracija sa tri elektromotora (b) je nešto rjeđa i prvenstveno se koristila kao prelazno rješenje ka konfiguraciji sa četiri elektromotora (c) koja je postala standard kod *hyper* sportskih automobila kao što je *Rimac Nevera*⁹. Kod ovakve konfiguracije upravljanje se obavlja pomoću sva četiri točka i predstavlja daleko superiorniju konfiguraciju u odnosu na do sada navedene [44]. Razlog rijetke implementacije iste jeste visoka cijena. Ovakav pristup omogućava visoke performanse i velika ubrzanja, čak veća i od ubrzanja slobodnog pada, uz postizanje maksimalne brzine veće od 400 km/h¹⁰.



Slika 3.1.4 Moguće konfiguracije vozila sa *AWD* sistemom

⁹ <https://www.rimac-automobili.com/nevera/>

¹⁰ <https://www.rimac-automobili.com/media/press-releases/record-breaking-rimac-nevera-hits-412kph-to-become-worlds-fastest-production-electric-car/>

3.2. Napajanje

Napajanje elektromotora moguće je postići iz nekoliko različitih napojnih jedinica koje predstavljaju sastavne djelove podsistema napajanja. Kao osnovni zahtjevi koji se stavljaju ispred uređaja za napajanje su gustina snage i energije. Specifična energija, odnosno njena vrijednost odražava sposobnost automobila da pređe određenu kilometražu, dok sa druge strane, specifična snaga je odgovorna za ubrzanja. Takođe, neophodno je da sistem napajanja ima što kraće vrijeme punjenja i duži vijek trajanja, što bi ih činilo održivim na duže staze [45].

3.2.1. Litijum jonske baterije

Litijum–jonske baterije predstavljaju sekundarne baterije namijenjene skladištenju električne energije. Karakteriše ih velika gustina energije, dug životi vijek i minimalna stopa samopražnjenja. Nedostatak litijum-jonskih baterija, jeste generisanje značajne količine toplote tokom procesa eksploatacije zbog omskog otpora i unutrašnjih hemijskih reakcija. Istovremeno, na dugovječnost i efektivnost litijum-jonske baterije utiču održavanje temperature u dozvoljenim granicama, što je postalo bitan parametar koji utiče na performanse litijum-jonske baterije. U skladu sa trenutno dostupnom tehnologijom, odgovarajuća radna temperatura litijum-jonskih baterija je od 25 do 40°C, sa dozvoljenim temperaturnim odstupanjem ispod 5°C između ćelija i čitavog modula. Shodno navedenom, implementiranje odgovarajućeg sistema za kontrolu toplote baterije postalo je prioritetni izazov u automobilskoj industriji, industriji namijenjenoj proizvodnji uređaja za skladištenje energije, kao i svim uređajima napjanim pomoću litijum-jonskih baterija, s ciljem postizanja veće sigurnosti i pouzdanosti. Nobelovu nagradu iz oblasti hemije dodijeljena je trojici naučnika 2019. godine zbog poboljšanja hemijskih svojstava litijum-jonskih baterija¹¹.

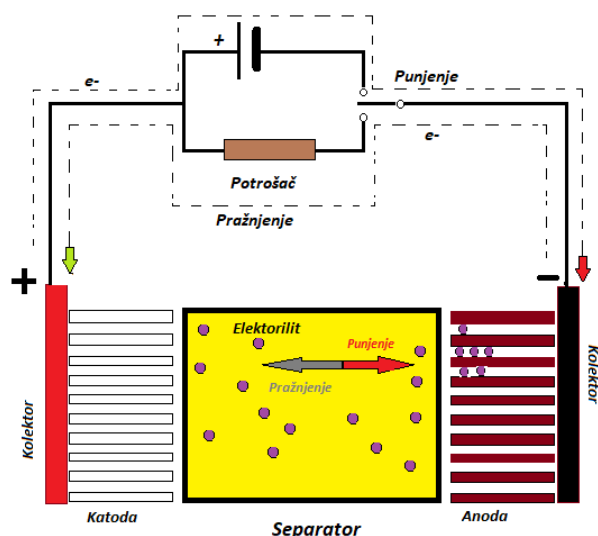
3.2.1.1. Ekvivalentno kolo i elektrohemijaska svojstva litijum jonskih baterija

Električna energija igra jednu od najvažnijih uloga u svakodnevnom životu. Ista je široko primenljiva i lako se pretvara u druge obilke energije. U svjetu u kome se potrebe za energijom i potrošnja energije povećavaju svakodnevno, skladištenje električne energije predstavlja bitan tehnološki problem. U osnovi, skladištenje električne energije zahtjeva njeno pretvaranje u druge vidove energije. U hemijskim izvorima energije, hemijska energija predstavlja energetska medijum. U principu, hemijski izvori energije su uređaji koji pretvaraju uskladištenu hemijsku energiju u električnu energiju kroz spontanu hemijsku reakciju. Reakcija koja se u njima odvija je redoks reakcija. Jedna hemijska vrsta se oksidira, čime se „ispuštaju” elektroni sa kojima je druga vrsta

¹¹<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>

redukovana. Pošto su oksidirajuće i redukcijske supstance odvojene materijalom koji je elektronski izolator, redoks reakcija se ne odvija sve dok se dvije vrste ne povežu preko eksternog kola. Kada su dvije vrste povezane preko eksternog kola, reakcija se odvija spontano i elektroni putuju kroz eksterno kolo, stvarajući tako struju koja se može koristiti za napajanje potrošača. Hemijski izvori energije uključuju gorivne ćelije i baterije [46]. Osnovna razlika između njih je u tome što gorivne ćelije predstavljaju otvorene sisteme koji zahtijevaju kontinuirano snabdijevanje reaktantima i uklanjanje produkata, dok su baterije zatvoreni sistemi u kojima se procesi skladištenja i konverzije energije odvijaju u istom prostoru, unutar baterije. Baterija se sastoji od jedne ili više primarnih ćelija, od kojih se svaka sastoji od elektroita, katode i anode. Katoda je elektroda na kojoj se dešava proces redukcije tokom pražnjenja baterije, a anoda je elektroda na kojoj se dešava proces oksidacije. Elektrolit je hemijska supstanca koja je jonski provodnik, ali i elektronski izolator i fizički odvaja katodu od anode.

Postoje dvije vrste baterija - primarne baterije i sekundarne baterije. U slučaju galvanskih baterija, hemijske reakcije koje se odvijaju su nepovratne, pa se ova baterija ne može vratiti u početno stanje elektrolizom. Primarne baterije su za jednokratnu upotrebu. Suprotno od navedenog, ako je hemijska reakcija koja se odvija reverzibilna, baterija se može vratiti u prvobitno stanje primjenom eksternog napona suprotnog polariteta, pri čemu se ovakva baterija koristi za višestruku upotrebu i naziva se sekundarna baterija. Litijum-jonske baterije predstavljaju sekundarne baterije bazirane na sposobnosti pojedinih jedinjenja da interkaliraju, odnosno deinterkaliraju litijum jone. Hemijska reakcija interkalacije predstavlja proces povratnog umetanja specificirane hemijske vrste u kristalnu rešetku jedinjenja domaćina bez narušavanja strukture domaćina, pri čemu se novoformirana jedinjenja nazivaju interkalarna jedinjenja [47]. Interkalacija litijuma predstavlja povratno umetanje jona litijuma u kristalnu rešetku materijala anode ili katode uz ekvivalentan broj elektrona, bez narušavanja njihovih struktura. Za vrijeme punjenja, joni litijuma (i elektroni) uz pomoć eksternog napona "ispumpavaju" se iz katode uz oslobađanje energije i „sabičaju“ u rešetku anode zahvaljujući proširenju *van der Waals*-ovih međuprostora, dok tokom procesa pražnjenja teče obrnut proces.



Slika 3.2.1.1 Električno kolo litijum-jonske ćelije

Kako bi se modelovali procesi punjenja i pražnjenja sa određenom aproksimacijom koristi se šema prikazana na slici 3.2.1.1. Katoda i anoda, kao dva interkalarana materijala, nanšena su na strujne sabirnice, odnosno na bakarnu i aluminijsku foliju. Katodu i anodu razdvaja separator, ispunjen elektrolitom, koji je provodnik litijumovih jona, ali ne i elektrona. Uloga poroznog separatora je da spriječi kratak spoj anode i katode, a najčešće se izrađuje od propilena. Najčešće korišćen elektrolit je $LiPF_6$ (heksafluorofosfat), dok se anoda najčešće pravi od grafita sposobnog da interkalira litijumove jone formirajući karbide. Sa druge strane, katoda se najčešće pravi od litijum kobalt oksida ($LiCoO_2$) i litijum manganata ($LiMnO_4$) [48].

Ukoliko struja I koja protiče kroz kolo je približna nuli, tada se reakcije unutar baterije približavaju stanju ravnoteže, a U_r teži E . Dakle, prilikom pražnjenja napon na izlazu zavisi od struje koja protiče kroz strujni krug baterije i uvijek je manji od ε . U slučaju da je struja jednaka nuli, napon na izlazu je jednak U . Ovakav model je koristan za prikazivanje osnovnih karakteristika. U slučaju priključenja potrošača naponu na krajevima baterije je potrebno određenu vrijeme da padne na nižu vrijednost, pri čemu se ovakvi dinamički procesi modeluju uz pomoć kapacitivnosti.

Primjenjujući pravila elektrohemije, dolazi se do izraza za tzv. *radni napon*

$$U_r = E - Ir \quad (1)$$

Napon U_r je umanjen usled gubitaka koji potiču od unutrašnjeg otpora ćelije r [48]. Pad napona posledica je gubitaka polarizacije na elektrodama, omskih gubitaka elektroda i ostalih komponenata unutar ćelije [46], [48].

Tri parametra, izuzev napona, koja su ključna za određivanje karakteristika kako litijum jonske tako i svake druge baterije su:

- ⇒ specifični kapacitet,
- ⇒ specifična energija i
- ⇒ specifična snaga.

Naelektrisanje koje baterija može da isporuči u realnom vremenu, definiše se na sledeći način:

$$C = I\Delta t, \quad (2)$$

gdje je Δt vrijeme potrebno da se baterija isprazni, odnosno napuni.

Kapacitet litijum jonskih baterija određuje količina aktivnih materijala sposobnih za interkalaciju litijuma, kao i njihov stepen iskorišćenja. Obzirom, da litijum jonske baterije dolaze u različitim „fizičkim” veličinama, kapacitet se izražava po jedinici mase, odnosno u Ah/kg kada se naziva specifični kapacitet. Kada se računa specifični kapacitet, u obzir se uzima masa svih internih elemenata, a ne samo masa aktivnih materijala. Vrijednost specifičnog kapaciteta zavisi prvenstveno od karakteristika materijala, ali i od struje i temperature - porastom struje pražnjenja, specifični kapacitet opada, a porastom temperature, raste [49],[50].

Proizvod specifičnog kapaciteta i radnog napona naziva se specifičnom energijom ili gravimetrijska gustina energije, a predstavlja energetska sadržaj koji baterija može da skladišti po jedinici mase. Specifična energija izražava se u Wh/kg. Površina ispod krive zavisnosti napona od specifičnog kapaciteta predstavlja specifičnu energiju, a moguće je i izraziti po jedinici zapremine, odnosno Wh/dm^3 , kada se naziva volumetrijska gustina energije.

Snaga predstavlja proizvod struje i napona i izražava se u W . U cilju poređenja, snaga se definiše po jedinici mase i predstavlja specifičnu snagu (W/kg), odnosno gustina snage (W/dm^3).

3.2.1.2. Tehničke karakteristike i zahtjevi za odabir baterije kod električnih vozila

U osnovi, baterija predstavlja ključnu komponentu za pokretanje elektromotora kod električnih vozila. Karakteristike i elektrohemijski procesi unutar baterije opisani su u **Potpoglavlju 3.2.1.1**. Baterija se u principu može posmatrati kao crna kutija sa određenim zadacima. Zahtjevi se prvenstveno ogledaju u odgovarajućoj vrijednosti specifične snage, specifične energije, stepena samopražnjenja, „calendar life“ (ukupni vijek trajanja, tokom operativnih i neoperativnih perioda) i „cycle life“ (broj ciklusa punjenja) [50]. Osim navedenih uslova, faktori od velikog uticaja na

performanse baterije su i interna temperature baterije, geometrija, stope punjenja i pražnjenja, kao i ambijentalna temperatura [51].

Autori rada [52] predstavili su najvažnije zahtjeve koje baterije električnih vozila treba da zadovolje kako bi se konkurentnost električnih vozila u odnosu tradicionalna vozila povećala. Predloženi zahtjevi dati su u Tabeli 3.2.1.

Tabela 3.2.1.2.1. Zahtjevi za odabir baterije kod električnog vozila

<i>Karakteristike baterije</i>	<i>Glavni zahtjevi</i>
<i>Specifična energija</i>	>730 Wh/L i 340 Wh/kg po ćeliji
<i>Cijena</i>	>100\$/kWh po ćeliji
<i>Brzina punjenja</i>	80% napunjenosti Δ SoC (eng. State of Charge) za 15 minuta
<i>Životni vijek</i>	12 godina
<i>Performanse</i>	Minimalni uticaj ambijenta na performanse
<i>Sigurnost</i>	Zaštita od havarije

Jedan od najvećih izazova koji se stavlja ispred konstruktora baterija električnih automobila je nedostatak jedinstvene tehnologije. Odnosno, različite performanse, zahtjevaju i različite materijale, geometrije i konstrukciona rješenja. Zbog toga prilikom odabira, nephodno je pažljivo odabrati kompromisno rješenje [52]. Neke od najpoznatijih i najkorišćenijih baterija današnice su¹²:

- ⇒ olovno-kisjelinske,
- ⇒ nikel-kadmijumske,
- ⇒ nikel-metal-hidridne
- ⇒ litijum-jonske
- ⇒ litijum-polimerske baterije

¹² <https://batteryuniversity.com/article/whats-the-best-battery>

Olovno-kiselinske (Pb-PbO₂) baterije predstavljaju jednu od najstarijih tehnologija proizvodnje baterija, a samim tim čine i vrlo pouzdanu i „ispitanu“ tehnologiju patentiranu u drugoj polovini 19. vijeka. Prednosti ove tehnologije su niska cijena i jednostavnost proizvodnje, kao i mala stopa samopražnjenja. Imaju prilično lako održavanje u odnosu na druge tipove. Kao glavne mane ističu se mala gustina energije, velika osjetljivost na potpuno pražnjenje, i prilično kompleksne procedure transporta usled toksičnosti u slučaju havarije.

Nikl-kadmijumske (NiCd) baterije karakteriše brzo i jednostavno punjenje uz gotovo 1000 ciklusa punjenja i pražnjenja. Ekonomične su i jednostavne za transport, kao i prilično fleksibilne sa veličinama. Međutim, imaju malu gustinu energije, visoku stopu samopražnjenja i loš uticaj na životnu sredinu.

Nikl-metal-hibridne (NiMH) baterije imaju gotovo 1/3 veći kapacitet u odnosu na nikl-kadmijumske, jednostavan transport i smanjen štetni uticaj na životnu sredinu. Mane su im ograničen životni vijek, izazovnost u samom procesu punjenja usled oslobađanja većih količina toplote, visok stepen samopražnjenja, kao i visok stepen degradacije u slučaju skladištenja na visokim temperaturama.

Litijum-jonske (Li-Ion) baterije predstavljaju najpopularniju i najefikasniju tehnologiju današnjice. Karakteriše ih visoka specifična gustina energije i specifična snaga. Imaju upola manju stopu samopražnjenja u odnosu na ranije navedene tipove i lako se održavaju. Mane su im kompleksnija tehnologija punjenja zbog neophodnosti ograničenja napona i struje, skupa proizvodnja, i složen postupak transporta.

Litijum-polimerske (Li-Poly, LiPo, LIP) baterije pripadaju skupu punjivih baterija na bazi litijuma i predstavljaju naslednice litijum-jonskih baterija. U osnovi, performanse su im iste kao i prethodnim, dok tehnološki pomak predstavlja elektrolit koji čini polimer. Glavna odlika ovakvih baterija je mogućnost oblikovanja polimera, zbog čega su našle primjenu kod mobilnih telefona i sličnih uređaja. Imaju veći stepen sigurnosti od klasičnih litijum-jonskih baterija zbog aluminijsko-plastičnog kućišta, koje sprječava eksploziju čak i pri izuzetno visokim temperaturama elektrolita. Glavne mane su osjetljivost na niskim temperaturama, dok je životni vijek na nivou NiMH baterija¹³.

¹³ <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/>

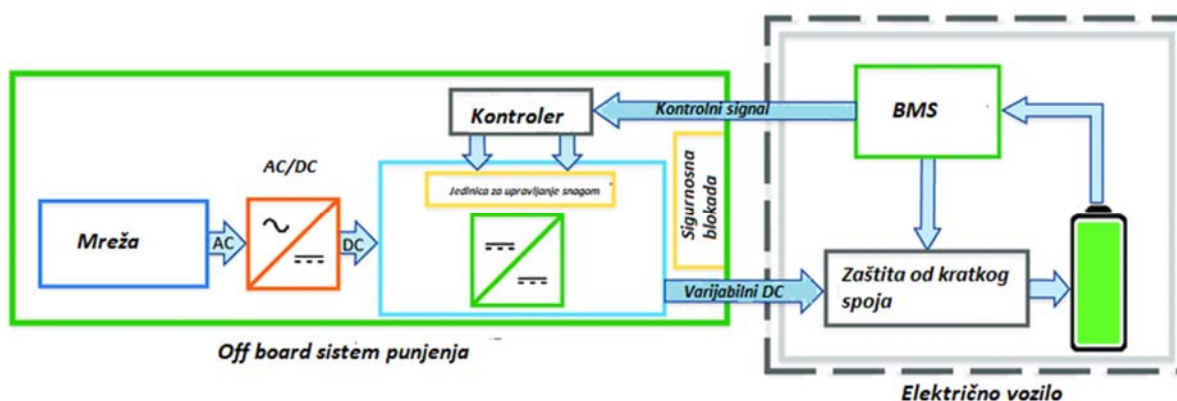
3.2.2. Punjenje baterija

U cilju povećanja konkurentnosti električnih vozila teži se izgradnji „široke“ mreže stanica za punjenje električnih automobila. Međutim, instalacija i svakodnevna eksploatacija stanica predstavlja izazove i za razvijene države [53],[54]. Odabir lokacije stanice za punjenje je od krucijalne važnosti. Naime, implementacija jedne stanice, koja može da primi desetine automobila nephodna je u urbanim sredinama ili u njihovoj blizini, što implicira njihovo priključenje na lokalnu mrežu. Takve mreže su u principu već dovoljno opterećene konstantnim porastom broja konzuma, pa bez detaljne analize, instalacija stanice za punjenje može dovesti do kraha mreže na određenom području, jer bez dodatnih ulaganja i proširenja, većina savremenih distributivnih mreža nema kapacitet da podnese dodatno opterećenje razmjera električnih vozila.

Baterije električnih vozila se pune povezivanjem vozila na adekvatan hardver (eng. *Electric Vehicle Supply Equipment-EVSE*), odnosno stanicu za punjenje električnih automobila. U slučaju AC opreme, zadatak opreme je monitoring, kontrola i komunikacija između vozila i mreže. Sa druge strane, jednosmjerni EVSE imaju ulogu osim navedenog i u konverziji naizmjenične u jednosmjernu struju¹⁴. Na osnovu navedenog, razlikuju se dva tipa energetskog pretvarača¹⁵:

- sistem koji se nalazi izvan vozila (eng. *off board charger*) i
- sistem koji se nalazi u vozilu (eng. *onboard charger*)

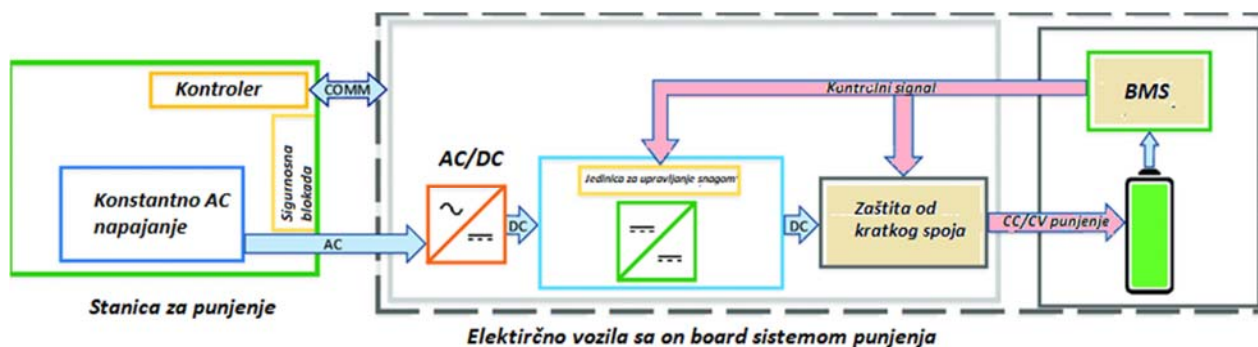
Navedeni sistemi, prikazani su na slici 3.2.2.1.



a)

¹⁴ Ili obrnuto, u zavisnosti da li se radi o unidirekcionim ili bidirekcionim punjačima

¹⁵ Dostupno na: <https://www.driveelectricvt.com/Media/Default/docs/electric-vehicle-charging-station-guidebook.pdf>



b)

Slika 3.2.2.1. Blok šema a) jednosmjernog EVSE-a, b) i naizmjeničnog EVSE-a.

Punjenje baterije električnog automobila najčešće se odvija kroz sekundarnu mrežu (**Potpoglavlje 2.1.2.**) zbog nedostatka infrastrukture. Punjači kompatibilni sa ovakvom mrežom pripadaju nivou I (120 V) i nivou II (240 V) prema standardima SAEJ1772 [55]. Konfiguracija ovakvih punjača najčešće je *onboard* (slika 3.2.2.1. b). U ovakvom slučaju, vozila treba da budu opremljena namjenskim punjačima koji su sposobni da iz mreže „povuku” 1.92 kW (odgovara nivou I) i 19.2 kW (odgovara nivou II). Ovim punjačima je u principu potrebno više od 8 sati da dodaju oko 300 km dometa električnom vozilu, što je nepoželjno za vožnju autoputevima. Međutim, teško je razviti punjač velike snage prvenstveno zbog cijene, težine i bezbjednosnih regulativa električnih vozila [56], [57]. Važno je istaći da su izvedeni neki od prototipnih sistema za povećanje nivoa snage u rasponu 30-200 kW korišćenjem propulzionih pogonskih sistema [57]. Ovako integrisani punjači zahtijevaju specijalizovane pretvarače i modifikaciju motora. Trenutno, *Renault ZOE* koristi ovakvu tehnologiju primjenom *Chameleon* punjača koji može da prihvati snagu 3 kW do 43 kW kroz vučni motor, koji ima ulogu filtra [57], [58]. Međutim, ovakva oprema može povećati opterećenje i smanjiti vijek trajanja pogonskog sistema. Takođe, moguće je da tokom punjenja usled pojave zakretnog momenta, dođe do obrtanja motora, kao i stvaranja buke i vibracija [59].

Alternativa u cilju povećanja snage punjenja, bila bi primjena *off-board* (slika 3.2.2.1. a)). Ovakav tip punjača ima mogućnost da isporuči jednosmjerno napajanje bateriji električnog vozila primjenom jedinice za upravljanje snagom (*eng. power conditioning unit-PCU*).

Tipičan brzi punjač od 50 kW jednosmjerne struje obezbjeđuje dovoljnu napunjenost baterije električnog vozila za svega 60 minuta, odnosno aproksimativno 200 km dometa vožnje, dok je punjaču snage 350 kW potrebno svega 10 minuta za isti domet [60]. Ovakvi punjači mogu biti









instalirani kao izolovana jedinica ili kao jedinica sa više stajališta. Većina savremenih punionica dimenzioniše se sa 50 kW, a sastoji se od AC/DC ispravljača sa korekcijom faktora snage (*eng. power factor correction-PFC*) koji se napaja sa niskofrekventnog (*eng. low frequency-LF*) transformatora. Međutim, LF transformatori dodatno komplikuju implementaciju kada je direktno priključen na SN vod, pri čemu se povećava cijena sistema [61]. Da bi se prevazišao navedeni problem, koriste se tzv. „čvrsti” transformatori (*eng. solid-state transformer-SST*) čime se omogućava veća gustina snage i efikasnost uz postizanje ekstremno brzog punjenja sa benefitom eliminacije LF transformatora [62]. Ovakva konstrukcija obezbjeđuje bolji kvalitet snadbijevanja, a što je posebno važno, obezbjeđuje dvosmjerni protok snage neophodan za V2G sistem

3.2.2.1. Tipovi konektora

Baterije električnih vozila mogu se puniti preko AC ili DC punjača iz mreže. U Tabeli 3.2.2.1.1 prikazani su nivoi punjenja, uključujući spore, brze i ekstremno brze standarde punjenja. Različiti konektori se koriste širom svijeta kako bi se bi se omogućio širok spektar punjenja. Na slici 3.2.2.1.2 prikazane su konfiguracije savremenih konektora [56], [57]. U sledećim poglavljima, biće opisani svi priloženi tipovi konektora u zavisnosti od tržišta na kojem se primjenjuju.

Tabela 3.2.2.1.1 Nivoi punjenja i standardi

Nivo punjenja	Naponski nivo	Maksimalna snaga (kW)	Vrijeme punjenja	Kina	Evropa	Japan	Sjeverna Amerika
Nivo I (sporo)	120 VAC	3.7	10-15 h	Nije specificirano	Nije specificirano	Nije specificirano	SAE J1772 (Tip 1)
Nivo II (sporo)	220 VAC	3.7-22	3.5-7 h	GB/T 20234(AC)	IEC 62196 (Tip 2)	SAE J1772 (Tip 1)	SAE J1772 (Tip 1)
Nivo III (brzo)	3~ φ 480 VAC	22-43.5	10-30min	GB/T 20234(AC)	IEC 62196 (Tip 2)	SAE J3068	SAE J3068
	200-600 VDC	<200		GB/T 20234(DC)	CSS Combo 2	CHAdEMO	CSS Combo 1
		<150		Tesla i CHAdEMO			
XFC	>800	>400	~ dopuna goriva	CSS / CHAdEMO			

			
SAE J1772 Type 1 1Φ 240V/7.68kW	IEC 62196-2 Type 2 3Φ 400V/12.8kW	GB/T 20234 AC 3Φ 380V/12.16kW	Tesla Supercharger 480V/140kW
			
GB/T 20234 DC 750V/187.5kW	CHAdeMO 500V/200kW	CCS Combo 1 600V/75kW	CCS Combo 2 1000V/200kW

Slika 3.2.2.1.2 Konektori dostupni na svjetskom tržištu

3.2.2.1.1. AC konektori

Industrija električnih vozila još uvijek nije postigla dogovor u pogledu korišćenja jednog univerzalnog AC konektora. U zavisnosti od proizvođača električnih vozila, zemlje i nivoa snage punjača, konektori variraju u smislu veličine, oblika i rasporeda pinova (*eng. pin-out*). To je upravo iz razloga što različiti regioni imaju svoje nivoe i frekvencije naizmjenične mreže. Tipičan AC konektor ima dva i više velikih pinova u zavisnosti od napona i nekoliko manjih pinova za komunikaciju. Trenutno postoje četiri tipa AC konektora o čemu će više riječi biti u nastavku.

3.2.2.1.1.1. Konektor Tip 1 (*Type 1*)

Ovaj konektor se koristi posebno za jednofazno punjenje naizmjeničnom strujom i ima okruglu konfiguraciju koja se sastoji od pet pinova koji uključuju dvije AC linije, dvije signalne linije i jednu zaštitnu putanju uzemljenja. Maksimalni nazivni napon je 120 V ili 240 V sa nominalnom strujom do 80 A.

3.2.2.1.1.2. Konektor Tip 2 (*Type 2*)

Ovaj tip konektora karakteriše mogućnost rada sa jednosmjernim i naizmjeničnim napajanjem. U slučaju monofaznog napajanja, radni napon je 230 V sa nazivnom strujom 80 A, dok u slučaju rada sa trofaznim sistemom, napon je 400 V, dok je nazivna struja 63 A.

3.2.2.1.1.3. Tesla US konektor

Tesla US model konektora dizajniran je za tržište Sjedinjenih Američkih Država. Ovaj konektor ima mogućnost rada sa jednosmjernim i naizmjeničnim naponom. Maksimalna snaga punjenja je 17.2 kW pri 230 V naizmjeničnog napona.

3.2.2.1.2. DC konektori

DC brzi punjači su dizajnirani da zamijene punjače tip 1 i tip 2. Oni se dimenzionišu između 50 kW do 500 kW u zavisnosti od proizvođača. Sa većom snagom, konverzija snage postaje znatno kompleksnija, odnosno upravljanje ovakvim sistemom postaje kompleksnije, a samim tim i čitav sistem glomazniji i skuplji. Ovo je jedan od glavnih razloga zašto su DC punjači implementirani u *off board* varijanti. Drugi razlog je bezbjednost. Sa velikom snagom pretvarača i povećanom veličinom komponenti za upravljanje snagom, sigurnost putnika postaje ključno pitanje. Ukoliko se pretpostavi maksimalna bezbjednost ovakvih komponenti za svakodnevnu vožnju, ostaje problem njihove težine. Jedan od osnovnih zahtjeva u automobilskoj industriji jeste što manja masa samog vozila. Manjom masom postižu se bolje vozne karakteriste, pogonskim jedinicama je potrebno manje snage za obavljanje zahtjevanih radnji, povećava se energetska efikasnost, a sa druge strane, postojanjem ovakvih izvedbi u *onboard* sistemima iziskivalo bi široku mrežu stanica za punjenje koje mogu da isporuče definisanu snagu, što predstavlja dodatni problem za EES. Postoji uglavnom pet varijanti DC konektora i o njima će biti riječi u narednim potpoglavljima. Važno je navesti da u nastavku navedeni konektori predstavljaju konektore ocijenjene i verifikovane svjetskim standardima, ali postoji još nekolicina konektora koji koriste pojedini proizvođači za svoja vozila.

3.2.2.1.2.1. CCS Combo 1 i Combo 2

Charging Interface Initiative e.V. (skr. *CharIN e. V.*) je registrovana organizacija čiji su osnivači *Audi, BMW, Daimler, Mennekes, Opel, Phoenix Contact, Porsche, TÜV SÜD* i *Volkswagen*. *CharIN* je pozadinski interfejs konektora kombinovanog tipa. Glavna prednost CCS (*eng. Combined Charging System*) konektora je mogućnost rada kako sa AC, tako i sa DC napajanjima, što ih čini univerzalno primjenjivim. Ovi konektori dio su standarda *IEC 62196-1, IEC 62196-2* i *IEC 62196-3*¹⁶. Konektori mogu da provedu struju do 350 A pri naponu u opsegu od 200 V do 1 kV sa maksimalnom snagom prenosa do 350 kW.

¹⁶ Napomena: Standardi su citirani iz [56], [57].

3.2.2.1.2.2. CHAdeMO

CHAdeMO udruženje (eng. CHAdeMO Assosiation) je osnovano 2010. godine od kompanija: Nissan Motor Co.Ltd., Mitshubishi Motors Corporation, Toyota Motor Corporation, Tokyo Electric Power Company, Inc i Fuji Heavy Industries Ltd. CHAdeMO je dio IEC standard i to **IEC 61851-23, -24**, kao i **62196-3**, takođe dio je i IEEE standarda (**IEEE Standard 2030.1.1TM-2015**). Raspon snage prenosa kreće se od 200 do 400 kW, čime je CHAdeMO prvi DC punjač, sposoban da nesmetano omogući primjenu V2X (eng. "Vehicle to everything") koncepta. Kao pionir primjene ovakvog protokola u V2G sistemima, CHAdeMO je realizovao mnogobrojne pilot projekte širom svijeta¹⁷ šireći mrežu bidirekcionih punjača sposobnih da injektiraju energiju nazad u mrežu. Bidirkcioni pretvarači predstavljaju elemente energetske elektronike koji su obavezni dio svakog punjača koji nudi usluge dvosmjernog toka energije i kao takvi postali su standard kod svih vozila sa tendencijama učestvovanja u V2G. Više o bidirekcionim konvertorima biće dato u **Potpoglavlju 3.2.2.5**. Iz CHAdeMO organizacije, tvrde da će do 2028. godine električna vozila koja budu primjenjivala njihov protokol, biti u stanju da EES-u obezbijede obrtne rezerve u rangu reverzibilnih hidro elektrana¹⁸. Iako široko primjenjivana u svijetu električnih vozila, CHAdeMO verzija 1.1 se prevazili, dok se tokom 2020. godine na tržište pojavila verzija 2.0 sa ultra – brzim punjenjem. Snaga razmjene energije ove verzije je do 400 kW i širom Evrope započeto je sa implementacijom 2.0 protokola u partnerstvu sa IONITY organizacijom koja se bavi instalacijom stanica za punjenje¹⁹. U avgustu 2018. godine objavljeni su prvi podaci vezani za najnoviji CHAdeMO 3.0 konektor, koji se razvija u saradnji sa CEC (eng. China Electricity Council) organizacijom. Novi konektor nosi kodno ime *ChaoJI*, a prema dostupnim podacima snaga ovakvog konektora bila bi 900 kW, pri naponu od 1.5 kV i 600 A [63]. Cilj ovakvog projekta je stvaranje ultra- brzog protokola punjenja, koji će biti kompatibilan sa postojećim CSS punjačima, odnosno **IEC 62916-3** standardom.

3.2.2.1.2.3. Tesla DC konektori

Tesla superpunjači u Sjedinjenim Američkim Državama koriste svoj sopstveni konektor za punjenje. Jedinstvena karakteristika Tesla konektora je u tome što koristi isti konektor i pinove za AC i DC punjenje. Oni takođe nude opciju za adapter koji čini konektor kompatibilnim sa CHAdeMO stanicama za punjenje takođe. Ovi konektori nude nivoe snage do 120 kW.

¹⁷ https://www.chademo.com/globalcounts2022_h1

¹⁸ https://www.chademo.com/v2g_webiner_6

¹⁹ <https://electrek.co/2018/06/15/chademo-faster-electric-vehicle-charging-400-kw-protocol/>

3.2.2.1.2.4. *China GB/T konektor*

Kina ima svoj DC konektor za punjenje zasnovan na standardu 20234.3-2015. Ovaj konektor komunicira sa ugrađenim sistemom za upravljanje napajanjem preko CAN (*eng. Controller Access Network*) protokola. Glavna prednost ovog konektora je da je opremljen za punjenje dvije baterije istovremeno, odnosno niskonaponsku pomoćnu bateriju kao i glavnu visokonaponsku bateriju. Pri nominalnom naponu od 750 V do 1 kV, može da isporučuje struje do 250 A.

3.2.2.2. **Standardi punjenja električnih automobila**

U cilju postizanja visokih performansi, oprema za punjenje električnih automobila i konvertori kako bi bili verifikovani na evropsko tržištu moraju zadovoljiti sledeće standard [64]:

1. IEC/EN 61851-1, generalni zahtjevi,
2. IEC/EN 61851-21, zahtjevi za povezivanje vozila sa opremom za punjenje baterije,
3. IEC/EN 61851-22, primjena AC EVSE,
4. IEC/EN 61851-23, primjena DC EVSE,
5. IEC/EN 61851-24, protokoli komunikacije,
6. IEC/EN 62196-1, IEC/EN 62196-2 i IEC/EN 62196-3, muško/ženski konektori i kabal
7. IEC 60950, bezbjednost IT opreme,
8. IEC 61000, EN 55011 i EN 55022, zahtjevi elektromagnetne kompatibilnosti koji se tiču neometanog rada susjednih komunikacionih kablova.

Kao specijalni zahtjevi, često se iziskuje rad opreme u ekstremnim uslovima, odnosno oprema mora biti fleksibilna za rad pri ambijentalnoj temperature od -40°C do 105°C, -40°C do 70°C tečnog medijuma za odvođenje toplote, kao i IP6K9K i IP6K7 klasa zaštite.

3.2.2.3. **Nivoi punjenja („Levels of Charging“)**

Zavisno do zahtijevane snage, nivoi punjenja se mogu podijeliti na sledeći način:

1. **Normalno punjenje** - podrazumijema punjenje snagom koju je moguće obezbijediti u kućnim uslovima, odnosno preko napajanja u domaćinstvu. Ovo punjenje odgovara Nivou I definisanog SAE-J1772 standardom, uglavnom zastupljenog u Sjedinjenim Američkim Državama. Snaga punjenja u domaćinstvu zavisi od regije, odnosno od naponskih nivoa u različitim djelovima svijeta. Za evropsko tržište, napon monofazne utičnice u domaćinstvu je

230 V, dok je nominalna struja 16 A. Snaga koju je moguće prenijeti jednom fazom u ovom slučaju iznosi oko 3.7 kW²⁰. Trenutni prosjek kapaciteta baterije električnih vozila iznosi između 50-60 kWh, pa samim tim punjenje snagom od 3.7 kW predstavlja prilično dug proces, za koji je u najboljem slučaju potrebna čitava noć. Za razliku od Evrope, u Sjedinjenim Američkim Državama nominalni napon utičnice domaćinstva iznosi 120 V, odnosno nominalna struja je 15 A, što daje snagu oko 1.8 kW, a samim tim i dvostruko veće vrijeme neophodno za punjenje baterije električnog vozila.

2. **Umjereno-brzo punjenje** - podrazumijeva punjenje na trofaznim priključenjima koja je moguće postići korekcijom instalacija u domaćinstvu. Snaga punjenja iznosi u prosjeku 11 kW, a ovaj nivo punjenja odgovara Nivou II u Sjedinjenim Američkim Državama. Važno je naglasti da u slučaju punjenja vozila na Nivou II, ograničenja dolaze u vidu mogućnosti opreme da prenese određenu snagu. Za slučaj da je nominalna struja 16 A, vozilo bi bilo moguće puniti sa 11,085 kW, dok u slučaju da je oprema dimenzionisana za 32 A, vozilo bi se moglo puniti snagom od 22 kW. Sa stanovišta mreže, punjenje trofaznim sistemom predstavlja povoljnost za mrežu, zbog mogućnosti raspoređivanja opterećenja po fazama, a samim tim i smanjenje asimetrije faza. Iako je u posljednje vrijeme trofazni AC/DC konvertor postao standard kod električnih vozila, neophodno je detaljno provjeriti vozilo, jer raniji modeli nijesu imali mogućnost trofaznog punjenja.
3. **Brzo punjenje** - karakteriše mnogo veći nivo snage prenosa u odnosu na prethodna dva, pa samim tim i zahtijeva posebne korekcije infrastrukture i predimenzionisanje opreme. Brzo punjenje podržava korišćenje i jednosmjernih i naizmjeničnih EVSE. U zavisnosti od toga o kojoj vrsti EVSE-a se radi, zavisiće i snaga punjenja. Kod jednosmjernih, hardver za ispravljanje struje nalazi se van vozila, tako da je moguće postići znatno veće snage, dok u slučaju naizmjeničnog EVSE-a, hardver za konverziju se nalazi u samom vozilu, tako da je snaga punjenja ograničena. Tipična snaga punjenja naizmjeničnim EVSE-om iznosi 43 kW, dok u slučaju jednosmjernog punjenja snage se mogu kretati do standardnih 150 kW, ili čak i do 400 kW. Iako jednosmjerni sistemi sa sobom nose velike prednosti u vidu brzog punjenja, a sa tim u vezi se povećava kompetitivnost sa tradicionalnim vozilima, oni nose i velike nedostatke, i to: neophodni su veliki presjeci kablova kako bi se prenijela tražena snaga,

²⁰ Napomena: Odobrena snaga trofaznim potrošačima u Crnoj Gori je 16 kW, međutim, oprema se obično dimenzioniše za standardnih 11 kW, odnosno 3.7 kW po fazi kako ne bi došlo do preopterećenja kablova. Teorijski, vozila se u domaćinstvu mogu puniti i snagom od 7-11 kW što odgovara umjereno-brzom punjenju.

značajna ulaganja u infrastrukturu za brzo punjenje, opterećenje distributivne mreže itd. Važno je naglasiti da je ovakva podjela „gruba“ podjela tipičnih nivoa punjenja. Nivo III predstavlja poseban vid punjenja na super - punjačima, koji pretežno rade na većim naponima od 480 V, a snage koje se prenose se su u principu veće od 250 kW, kao u slučaju *Tesla Supercharger*, odnosno Nivo IV u slučaju *CHAdEMO 2.0 Revise CCS* koji radi na naponima od 800-1000 V i tipična snaga prenosa je veća od 400 kW [65].

3.2.2.4. Toplogije AC/DC pretvarača

Bez obzira na tip pretvarača, princip rada zasniva se na sekvenci upavljačkih signala, tj. impulsa, koji dovode do periodičnog uključivanja i isključivanja. U zavisnosti od takta, pretvarači će u manjoj ili većoj mjeri dovesti do deformacije ulazne struje, što dovodi do pojave viših harmonika. Viši harmonici dovode do izražene “zaprljanosti” mreže, što se direktno odražava na ulaznu struju ili napon, a samim tim utiče na rad ostalih potrošača [66].

Faktor snage, definiše se na sledeći način:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

gdje je $\cos\varphi$ faktor snage, P predstavlja aktivnu snagu, do S označava prividnu snagu potrošača.

Faktor distorzije predstavlja se kao količnik efektivne vrijednosti osnovne i ukupne ulazne struje. Faktor distorzije je vrlo često broj blizak jedinica i za vrlo velika izobličenja, s toga često nije koristan kao podatak. Umjesto faktora distorzije, najčešće se primjenjuje THD, odnosno totalna harmonijska distorzija (eng. *Total Harmonic Distortion- THD*).

$$THD = \sqrt{\frac{I_{2ef}^2 + I_{3ef}^2 + I_{4ef}^2 + \dots + I_{nef}^2}{I_{1ef}^2}} \quad (4)$$

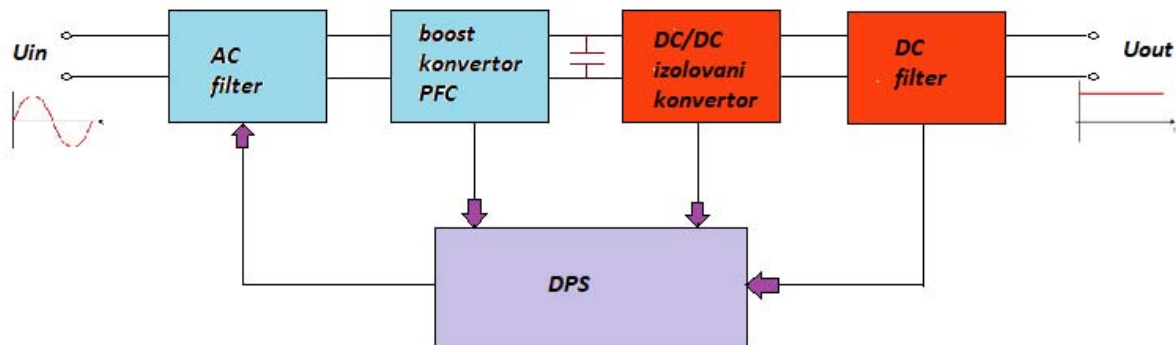
gdje je I_{1ef} efektivna vrijednost osnovnog harmonika, dok je I_{pef} efektivna vrijednost p -tog harmonika, pri čemu $p=2,3\dots n$.

Ispravljači sa korekcijom faktora snage predstavljaju elemente koji omogućavaju prenos energije od mreže do vozila (i obrnuto) i kao takvi mogu se podijeliti na:

⇒ jednostepene, pogodne za korišćenje kod sistema manje snage sa Pb-PbO₂ baterijama,

⇒ dvostepene, koriste se kod savremenih električnih automobila sa litijum-jonskim baterijama.

Dvostepeni ispravljač sastoji se od ispravljača sa korekcijom faktora snage, čija je uloga da „ispegla” ulaznu struju i DC/DC konvertra koji prilagođava izlazni napon bateriji. Blok šema dvostepenog ispravljača prikazana je na slici 3.2.2.4.1.



Slika 3.2.2.4.1 Blok šema dvostepenog ispravljača

U zavisnosti od smjera tokova snaga, ispravljači sa korekcijom faktora snage mogu se podijeliti na jednosmjerne ili dvosmjerne. U zavisnosti od tipa konvertora, ispravljači se dijele na galvanski izolovane i neizolovane. Tip izlaznog napona kod različitih vrsta ispravljača može biti konstantan ili promjenjiv, dok osnova DC izlaza mogu biti *buck*, *boost* ili *buck-boost* konvertori. Različiti nivou punjenja (**Potpoglavlje 3.2.2.3**) zahtjevaju ispravljače različitih snaga, pa s tim u vezi razlikuju se monofazne i trofazne topologije.

3.2.2.4.1. Topologija monofaznih pretvarača

Korišćenje konvencionalnih diodnih ispravljača koji pretvaraju AC u DC napajanje zasniva se na upotrebi impulsnih signala iz mreže što povećava elektromagnetne smetnje (*eng. Electromagnetic interference-EMI*), smanjuje energetska efikasnost i smanjuje kapacitet mreže [67],[68]. Alternativa u prevazilaženju ovih problema bila bi upotreba pretvarača sa kontrolisanim pojačanjem snage (*eng. Controlled Boost Power-CBP*) [69]. Pretvarači sa konstantnim pojačanjem (*eng. Constant Boost Control-CBC*) koriste tehniku korekcije faktora snage, odnosno PFC koja se sastoji od kontrole naizmjenične struje tako da ostane sinusoida i u fazi sa naponom mreže, a sa druge strane obavlja se regulacija DC napona na izlazu. U osnovi, CBC pretvarači se ponašaju kao omsko opterećenje u mreži, poboljšavajući kvalitet struje i ukupnu efikasnost, a takođe pomažu u smanjivanju

viših harmonika, odnosno pomažu u usklađivanju harmonijske regulacije propisane standardom **IEC-1000-3-2** [70],[71]. Drugi važan faktor, jesto što upotreba CBC pretvarača eliminiše zavisnost od filtera aktivne snage. Implementacija CBC doprinosi većoj efikasnosti mreže, smanjujući reaktivne i harmonijske komponente, a shodno tome, smanjuju se gubici energije u prenosnim i distributivnim vodovima. Uopšteno govoreći, poboljšanja koja donosi upotreba CBC ne odnose se samo na korekciju faktora snage, već i na THD i EMI.

Što se tiče primjene CBC pretvarača, široko se koriste u snadbijevanju potrošača kao što su *Data* centri, serveri, telekomunikaciona oprema, kao i u punjačima za punjenje električnih vozila [72],[73]. Visoka efikasnost, velika gustina snage, nisko harmonijsko izobličenje i visok faktor snage su glavne prednosti CBC pretvarača. Na osnovu topologije kola, CBC konvertori mogu se klasifikovati na:

- mosni *boost* konvertor sa PFC korekcijom (*eng. Bridge Boost Converter-BBC*),
- polumosni *boost* konvertor (*eng. Semi Bridgeless Boost Converter-SBBC*) i
- bezmosni *boost* konvertor (*eng. Bridgeless Boost Converter-BLBC*).

BBC topologije se najučestalije upotrebljavaju, zbog svoje jednostavnosti. Takođe, omogućavaju dostizanje visokog nivoa THD i PFC faktora. Međutim, ovakva topologija ima sledeće nedostatke kada se koriste u aplikacijama srednje-velike snage:

- ⇒ BBC ima tri poluprovodnička uređaja u strujnom krugu, što povećava gubitke provođenja,
- ⇒ Nephodna frekvencija veća od 30 *kHz* da bi se smanjio THD ispod standarda **IEC 1000-3-2**,
- ⇒ kalem se nalazi na jednosmjernoj strani, što zahtijeva posebnu analizu kako bi se izbjeglo zasićenje jezgra.

BBC topologija preporučuje se u aplikacijama do 1 kW. Gubici u u linijskom mosnom ispravljaču isnose od 30% do 60% ukupnih gubitaka BBC ispravljača. U [74] je predložena upravljačka struktura za rad BBC sa promjenjivom frekvenijom. Frekvencija komutacije se mijenja iz dva razloga: da bi se smanjili gubici u komutaciji, da bi se smanjio THD tokom „ prolaska struje kroz nulu“ (*eng. zero crossing*). BBC zahtijeva kontroler zatvorene petlje sa stepenom filtriranja snage kako bi se istovremeno obezbijedili EMI i THD, a sa druge strane istovremeno održavanje visokog PFC-a i regulisanje jednosmjernog napona [75].

SBBC topologije omogućavaju smanjenje gubitaka provođenja. U osnovi, SBBC ima manje

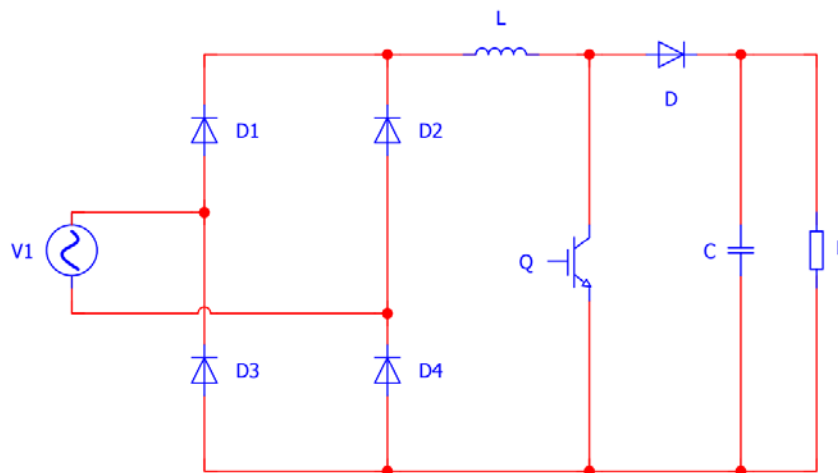
poluprovodničkih elemenata u strujnom krugu u poređenju sa BBC-om. Međutim, ovaj pretvarač pokazuje značajnu količinu smetnji prisutnih u ulaznoj struji, što iziskuje dodatne komponente. Problem smetnji ulazne struje pri normalnom radu izazvan je „plivajućim“ uzemljenjem, koje pulsira u skladu sa frekvencijom komutacije. Pored toga, ova topologija zahtijeva dodatni kalem koji povećava masu uređaja, dimezije, kao i cijenu. U SBBC topologije, EMI problemi se rješavaju primjenom dioda, kondenzatora, kalema, kao i dodavanjem simetričnih prekidača za faze i nulu [76],[77].

BLBC pretvarači imaju asimetričan raspored elemenata u granama, što dovodi do smanjenja reverzibilne struje dioda. Pored toga, ovakva topologija ima kapacitet za bidirekcionu konverziju snage.

U narednim poglavljima, biće detaljno opisane pomenute tri topologije.

3.2.2.4.1.1. „Bridge Boost“ konvertor

Na slici 3.2.2.4.1.1.1 prikazana je konvencionalna BBC topologija, gdje je V_{ac} izvor napajanja ili priključak iz mreže. Ispravljanje napona se vrši pomoću diodnog mosta (D1, D2, D3 i D4). Kalem (L) i kondenzator (C) provode, dok dioda (D) sprečava povrat struje. Otpornik (R) je opterećenje koje se napaja kroz regulisani napon na DC liniji. Kontrolna petlja se implementira korišćenjem kaskadne PI strukture za regulisanje DC i izvođenje PFC regulacije. BBC predstavlja najčešće korišćenu topologiju kod niskonaponskih sistema i sistema male snage zbog smanjenog broja komponenti. U [78] autori su pokazali značaj meke komutacije (*eng. soft switching*) za sredjenaponske i visokonaponske sisteme.

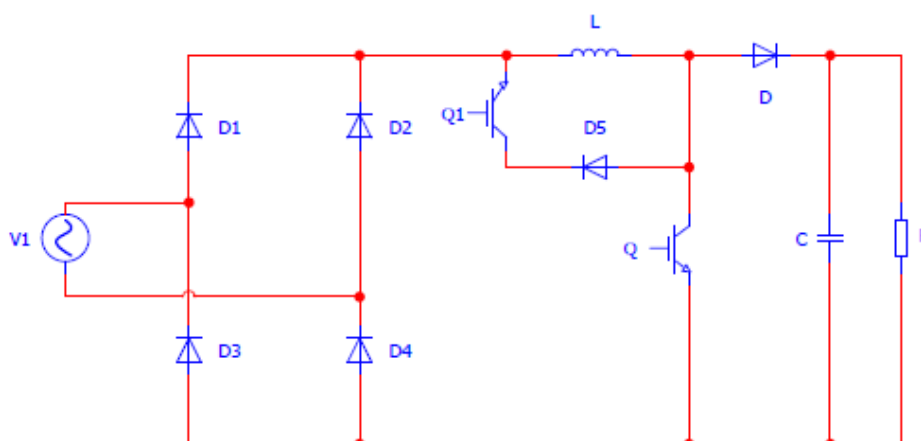


Slika 3.2.2.4.1.1.1 Konvencionalna BBC topologija

Veliki nedostatak navedene tehnologije su visoki gubici za veće nivoe snage, kao i izražene pulsacije u kondenzatoru. Veliki gubici dovode do zagrijavanja diodnog mosta što utiče na performanse i efikasnost diodnog mosta. Autori rada [79] predstavljaju EMI filter za BBC srednje snage, pokazujući smanjenje vibracija u CM (eng. *Common Mode*) i DM (eng. *Differential Mode*) kada je potrebna visoka frekvencija komutacije. EMI filter sa klasičnom linearnom PID kontrolom može smanjiti THD do normativnih vrijednosti, ipak ograničenja PID-a (spor odziv i neophodnost podešavanja oko ekvilibrijuma) može smanjiti efikasnost EMI filtera, povećati THD i uzrokovati loše dinamičke performanse. Ovakav problem može biti riješen primjenom hibridnog PID-a [80], [81]. Konvencionalna BBC topologija može biti modifikovana, što je predloženo u [82]. Slika 3.2.2.4.1.1.2 prikazuje BBC sa pseudo-kontinuiranim provodnim režimom gdje dioda D5 i prekidač Q1 su dodati paralelno kalemu L. Ovakva modifikacija poboljšava dinamičke performanse u tranzijentnim periodima i smanjuje napon na kalemu. Međutim, dodavanje dva poluprovodnička elementa uvode se dva nova problema:

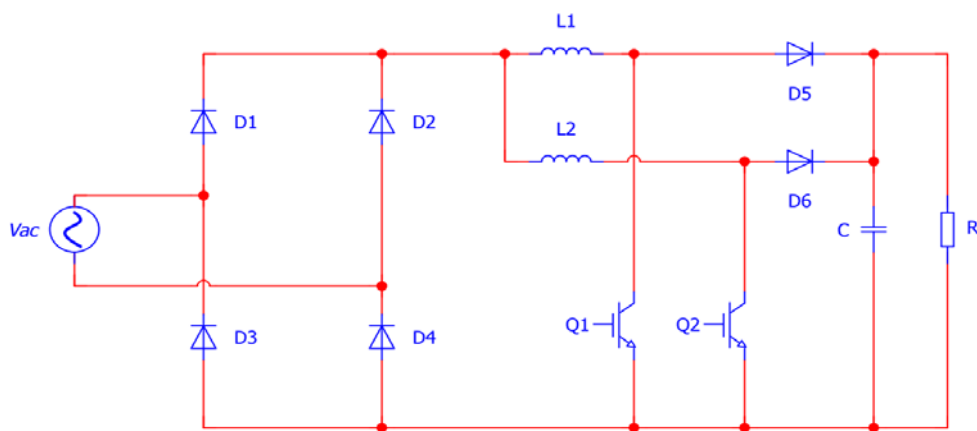
- povećavaju se gubici,
- složenije upravljanje usled postojanja kontakta Q1.

Ovakva modifikacija doprinosi manjem “talasanju” u DCM (eng. *Discontinuous Conduction Mode*) i CCM (eng. *Continuous Conduction Mode*) pri malim snagama. Još jedna topologija predstavljena je u [83], gdje su dva kondenzatora i dva kalema dodati između napajanja i ispravljačkog mosta. Ovakva topologija, doprinosi niskom THD faktoru i visokoj efikasnosti PID kontrole za niskonaponske sisteme. Ipak, dodatne komponente povećavaju cijene implementacije.



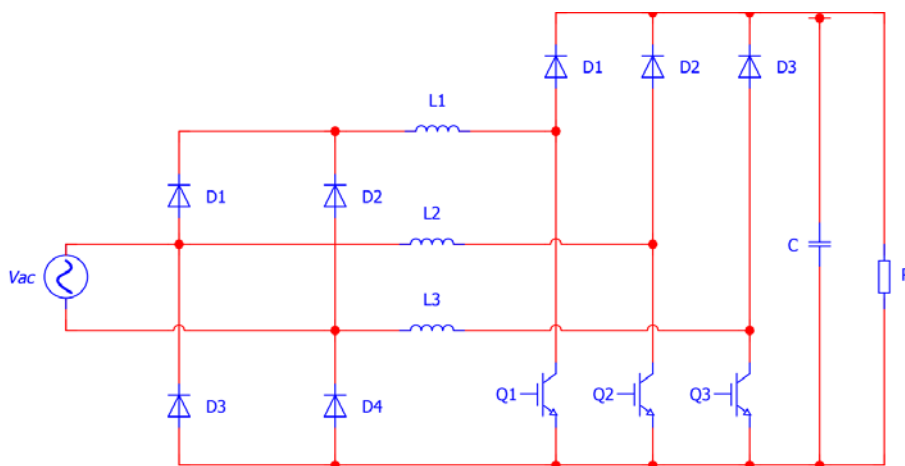
Slika 3.2.2.4.1.1.2 Konvencionalna PFC topologija sa pseudo-kontinuiranim provođenjem

Smanjenje pulsacije ulazne struje se može postići primjenom *interleaved* (“isprepletani”) *boost* konvertora sa korekcijom faktora snage (slika 3.2.2.4.1.1.3). Ovakva topologija može imati nekoliko “pojačanih” pretvarača povezanih između ispravljačkog mosta i kondenzatora DC linije, čiji je upravljački signal fazno pomjeren za 180° . Pomjeranjem struje kroz kalemove za 180° postižu se manje pulsacije ulazne struje u odnosu na konvencionalnu BBC topologiju. Na ovaj način postiže se smanjenje EMI, a usled strujnog razdjelnika između dvije *boost* grupe, smanjuje se naprezanje pojedinačnih komponenti. Za regulisanje DC struje, preporučuje se *interleaved boost* konvertor u sredjenaponskim aplikacijama, ali se ne preporučuje u visokonaponskim aplikacijama zbog izraženih gubitaka. Ovakva topologija se najčešće koristi u industrijskim aplikacijama.



Slika 3.2.2.4.1.1.3 *Interleaved* PFC topologija

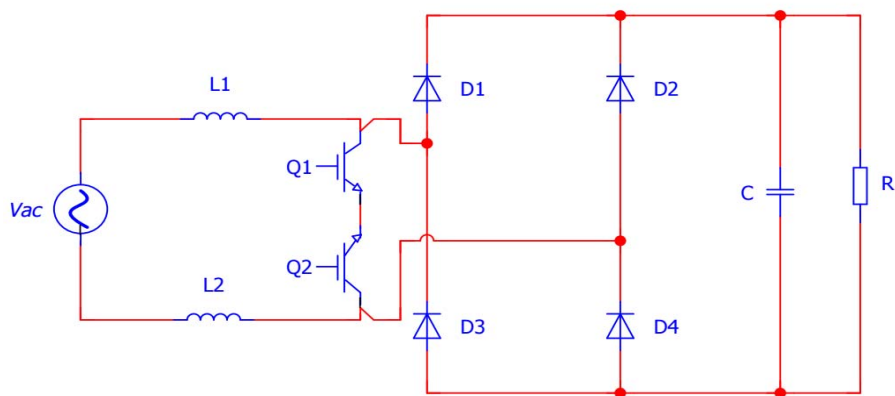
Kao naprednije rješenje *interleaved boost* topologije nameće se hibridna BBC topologija sa tri nivoa (slika 3.2.2.4.1.1.4). Ovakav pretvarač može imati efikasnost od oko 97% kada se koristi PI kontroler [84]. U osnovi topologije, struje teku između grana pretvarača, omogućavajući ne samo smanjenje pulsacija, već i smanjenje gubitaka u odnosu na *interleaved boost* konvertor sa dva nivoa. Međutim, dodavanje treće grane, cijena konvertera raste. Uopšteno, ovakva topologija predlaže se za aplikacije srednjeg napona zbog niskih pulsacija i THD u poređenju sa konvencionalnim BBC konvertorom. Pored toga, trostepena topologija preporučuje se u niskonaponskim aplikacijama sa nezavisnom mekom komutacijom, pri čemu je kontrola svakog od prekidača nezavisna.



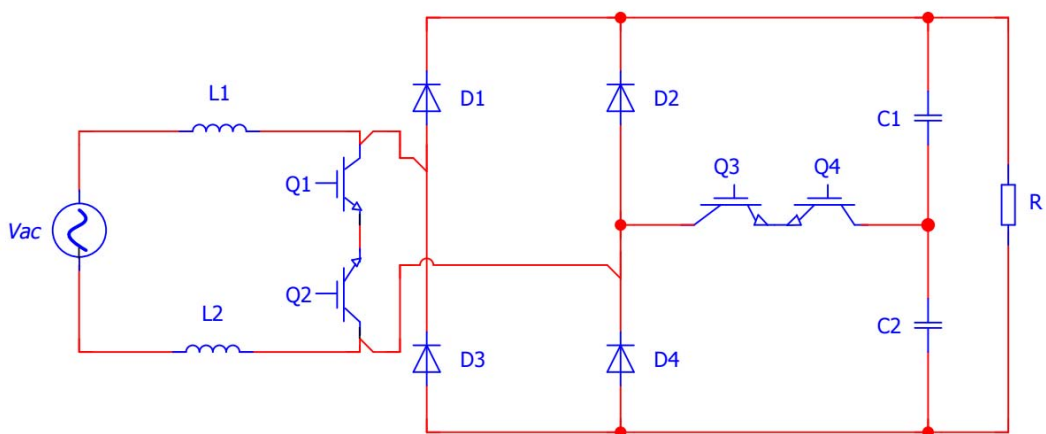
Slika 3.2.2.4.1.1.4 Hibridna *Interleaved* PFC topologija

Na slici 3.2.2.4.1.1.5 prikazana je PFC topologija sa prekidačima za dvosmjerni (*eng. bidirection*) tok energije [83]. U ovoj topologiji, L1 i L2 kalemovi se koriste kao “kvačilo”, dok se dvosmjerni prekidači Q1 i Q2 (MOSFET-i) nalaze na AC strani pretvarača. Za normalan režim rada, diode D1 i D4 moraju biti diode za brzi „oporavak”, obzirom da promjena toka energije može da se dešava nekoliko puta u sekundi. Ovakva topologija dozvoljava smanjenje buke. Međutim, prisustvo EMI filtera je neophodno. Prednost ovakve topologije je što prekidači Q1 i Q2 mogu biti kontrolisani istim kontrolnim signalom. Važno je napomenuti da Q1 i Q2 moraju biti instalirani obrnutim redosledom kako bi se izbjegla struja suprotnog smjera u režimu kada su oba prekidača otvorena. Pored navedenog, u radu [84] preporučeno je da faze napajanja i kontrole budu izolovane. Takođe, u radu [85] preporučuje se ugradnja rezonantnog kola za meku komutaciju, kako bi se smanjili gubici.

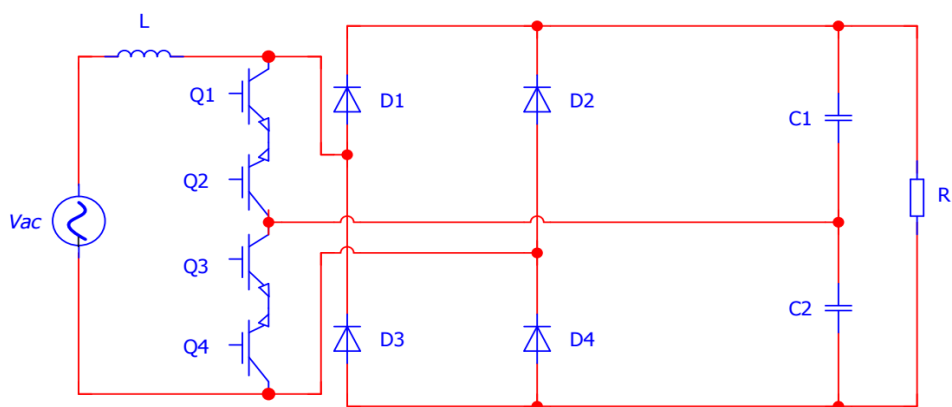
Predložene su različite konfiguracije za poboljšanje dvosmjerne BBC toplogije [86], [87]. PFC topologija sa dvosmjernim i fleksibilnim prekidačem prikazana je na slici 3.2.2.4.1.1.6 a). Ovaj pretvarač sadrži Q3 i Q4 kao pomoćne prekidače kao i podijeljenu DC liniju napajanja sa C1 i C2 kondenzatorima. Q3 i Q4 omogućavaju napajanje pretvarača sa dva različita nivoa ulaznog napona, pri čemu su oba prekidača otvorena ili zatvorena u isto vrijeme. Ovakvi konvertori preporučuju se za niskonaponske i aplikacije male snage zbog prilično velikih gubitaka u bidirekcionom konvertoru i potrebi za znatno robusnijim upravljanje u radu sa „velikim” strujama. *Interleaved* BBC toplogija sa PFC korekcijom, a koja uključuje bidirekciono prekidače prikazana je na slici 3.2.2.9. b). Ovi konvertori preporučuje se u aplikacijama male snage, jer iziskuju upotrebu velikog broja poluprovodničkih elemenata, a što zahtijeva nezavisni „meki” start za svaki od prekidača.



Slika 3.2.2.4.1.1.5 Konvencionalna PFC (BBC) topologija sa bidirekcionim prekidačima



a)



b)

Slika 3.2.2.4.1.1.6 PFC (BBC) topologija sa bidirekcionim prekidačima

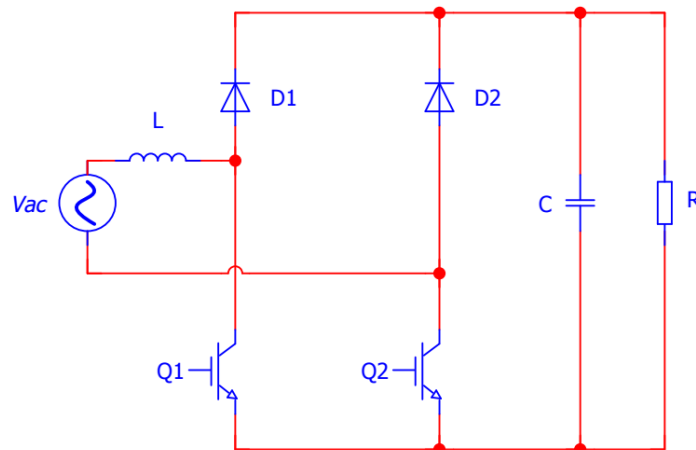
a) sa bidirekcionim i fleksibilnim prekidačima, b) bidirekcionim i *interleaved*.

Bidirekzione topologije se preporučuju za niskonaponske i aplikacije male snage prvenstveno zbog većeg broja komponenti, odnosno većeg broja uklopljivih prekidača koji povećavaju cijenu implementacije i upravljanja. Za aplikacije srednje i visoke snage bidirekzione topologije imaju mali procenat efikasnosti iz razloga što struja ima mogućnost protoka „jednim putem u jednom smjeru“, odnosno ne postoji mogućnost splitovanja čime bi se povećala efikasnost i smanjili gubici kao što je slučaj sa ranije navedenim unidirekcionim pretvaračima. U skladu sa navedenim, povećava se termičko opterećenje elemenata i gubici usled velikog broja komponenti, što doprinosi povećanju buke [84],[88]. Dodatno, smanjenje gubitaka u bidirekcionim pretvaračima nophodno je iz dva razloga:

1. bidirekcionni pretvarači imaju duplo više prekidača za iste funkcije²¹ kao i unidirekcionni (jednosmjerni),
2. bidirekcionni prekidači nalaze se prije ispravljačkog mosta, odnosno na AC strani, zbog čega moraju biti znatno robusniji u odnosu na prekidače postavljene „iza“ ispravljačkog mosta.

3.2.2.4.1.2. „Semi-Bridgeless“ konvertor

Konvencionalna ili simetrična polumosna topologija prikazana je na slici 3.2.2.4.1.2.1. Prednost SBBC konvencionalne toplogije u odnosu na BBC je što se gubici mogu znatno više redukovati sa manje kondezatora.



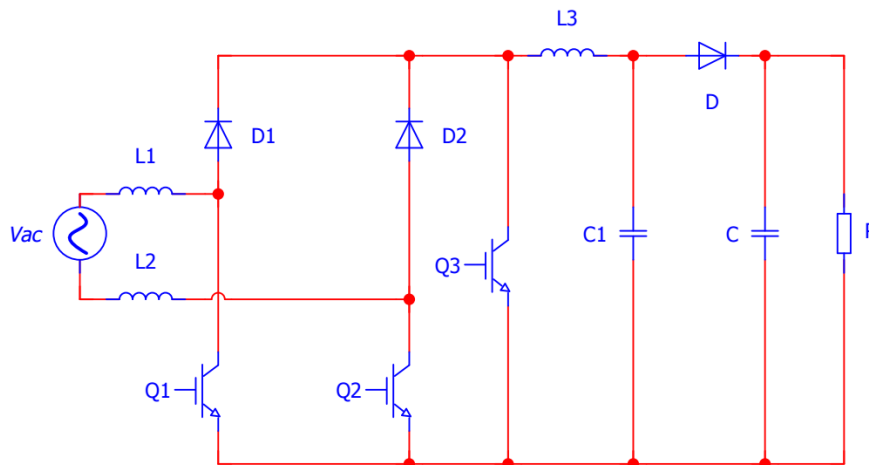
Slika 3.2.2.4.1.2.1 Toplogija polumosnog ispravaljača

U poređenju sa BBC toplogijom, SBBC topologija ima manje šuma u CM i DM modu. Šumovi u DM modu, kao i termičko opterećenje mogu biti smanjeni dodavanjem kalema serijski sa neutralnim

²¹ Napomena: Pod pojmom „iste funkcije“ podrazumijeva se isti kapacitet u vidu prenosa snage

kondezatorom, pri čemu istovremenim uklapanjem serijski vezana dva kalema moguće je smanjiti šumove u CM modu [89].

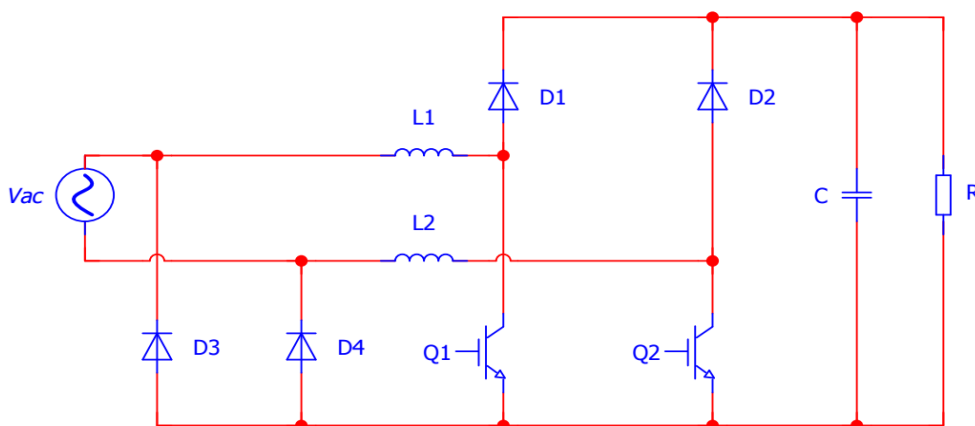
„Soft switching” postiže se dodavanjem *snubber* kola sastavljenog od MOSFET-a Q3, kalema L3 i kondenzatora C1, što je prikazano topologijom na slici 3.2.2.11.



Slika 3.2.2.4.1.2.2. SBBC topologija sa „soft switching”

U osnovi, snubber kolo redukuje gubitke u tranzistorima (MOSFET). Dodatno, moguće je dodati i rezonantno kolo, što se preporučuje u radovima [90],[91].

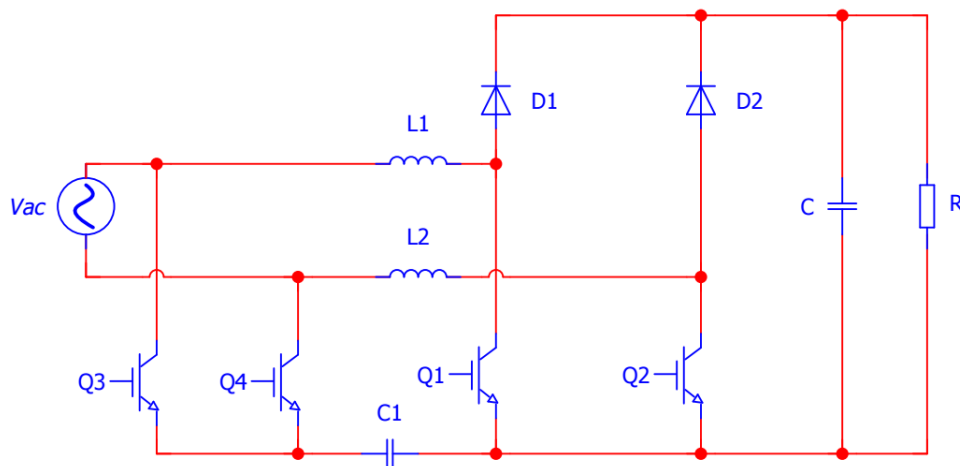
SBBC topologija sa spregnutim diodama ili „pseudo-totem” topologija prikazana je na slici 3.2.2.4.1.2.2. Ova konfiguracija uključuje dodatne dvije diode D3 i D4 da bi se postigla simetrična topologija. Kao rezultat, dobija se topologija koja se sastoji od dva *boost* konvertora, gdje svaki radi u svakoj poluperiodi sinusoidalnog talasa. Zbog ovoga, ova topologija je poznata kao dvostruki *boost* PFC ispravljač.



Slika 3.2.2.4.1.2.4 SBBC topologija sa spregnutim diodama

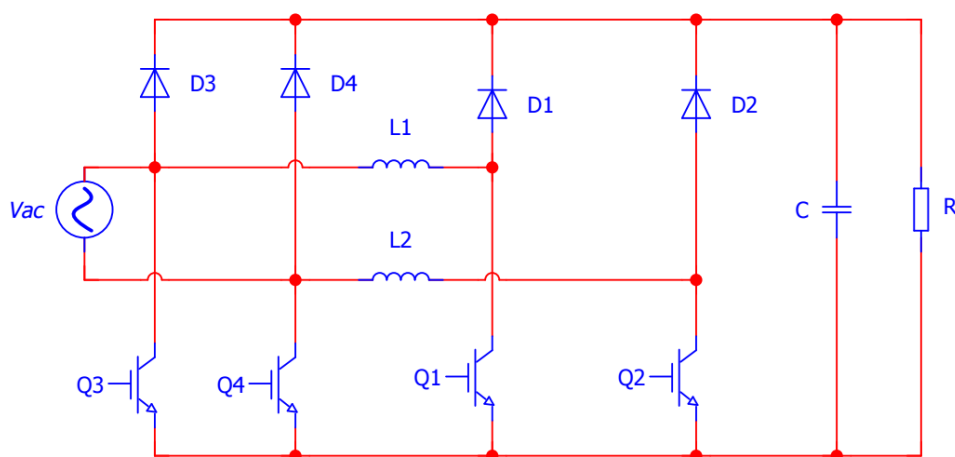
Prednost ovakve topologije je što prekidačima Q1 i Q2 se može upravljati istim kontrolnim signalom. Redukcija šuma u CM modu postiže se dok diode D3 i D4 provode. U svakom slučaju, DM šumovi i pikovi struje su mogući samo ako jedan kalem provodi u jednom ciklusu. Autori rada [92] ističu da su dizajniranjem kaskadnog PI kontrolera postigli PF faktor od 0.99 i THD oko 3.9 %, što implicira da se kvalitet snadbijevanja može poboljšati, ukoliko se SBBC dizajnira za redukovanje viših harmonika.

Hibridna SBBC spregnuta topologija ili SBBC sa aktivnim virtuelnim uzemljenjem je prikazana na slici 3.2.2.4.1.2.3. Kondenzator C1 i dva spregnuta prekidača (MOSFETA-a) Q3 i Q4 su dodati, dok su diode uklonjene. Prednost ovakve topologije je što je moguće dodati LCL filter između SBBC i AC napajanja, što kao rezultat daje gotovo potpunu eliminaciju šumova u DM modu. Kao prednost ovakve topologije, ističe se potreba za manje robusnim EMI filterima u odnosu na topologiju sa spregnutim diodama. U radu [93] pretvarač se kontroliše pomoću PI kontrolera namijenjenog za Q1 i Q2 prekidače, dok se prekidači Q3 i Q4 kontrolišu nezavisno.



Slika 3.2.2.4.1.2.4 SBBC topologija sa spregnutim tranzistorima

Na osnovu navedene dvije spregnute topologije, kao naprednija konfiguracija ističe se SBBC topologija sa spregnutim diodama i tranzistorima, prikazana na slici 3.2.2.4.1.2.4. Ova konfiguracija uključuje dva dodatna tranzistora Q3 i Q4, gdje svaki konvertor koristi dva tranzistora za vrijeme poluperiode. Prednost ovakve topologije su smanjeni gubici provođenja, kao i redukcija šumova u CM modu. Važno je napomenuti da gubici ne rastu obzirom na dodate komponente, obzirom da su diode D3 i D4 u normalnom radu ili stacionarnom stanju isključene.



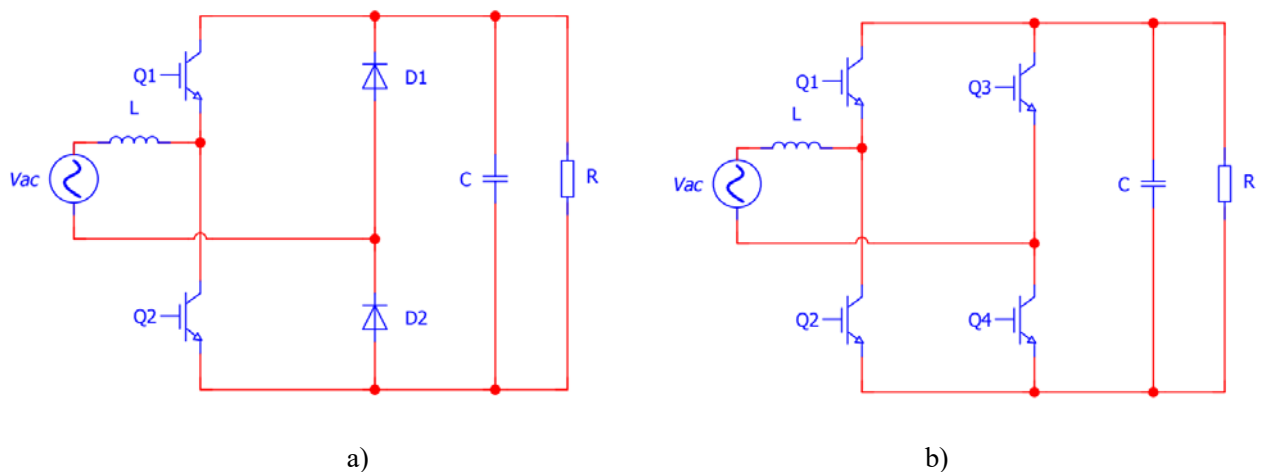
Slika 3.2.2.4.1.2.5 SBBC topologija sa spregnutim tranzistorima i diodama

3.2.2.4.1.3. „*Bridgeless boost*“ konvertor

U ovom poglavlju opisani su BLBC konvertori bazirani na boost topologiji. Ova topologija sadrži dva kanala MOSFET-a na čije se gejtove dovodi isti kontrolni signal. Ovakvom topologijom izbjegava se upotreba ulaznog diodnog mosta, a zadržava se boost PFC topologija. Zbog svega navedenog, jasno je da je ova topologija, usled smanjenog broja komponenti pogodna za aplikacije snage veće od 1 kW, ali sa druge strane ima izražene EMI smetnje zbog kalemova na izlazu. BLBC topologija najčešće se izvodi u dvije varijente:

- “*Totem Pole*” i
- “*Pseudo Totem Pole*”.

Na slici 3.2.2.4.1.3.1 prikazana je asimetrična topologija bazirana na *boost* konvertoru. Na slici a) prikazana je konvencionalna BBC *totem pole* topologija zasnovana na pojačanom pretvaraču sa ispravljачkom linijom realizovanom pomoću dioda. Ova topologija ima MOSFET-e u prvoj grani i diode u drugom. Ovo omogućava smanjenje THD i brži „oporavak“ dioda. Međutim, ovakva realizacija korišćena je u niskonaponskim aplikacijama zbog izraženih harmonika [94],[95]. Takođe, preporuka autora rada [96] je korišćenje GaN tehnologije. Ova tehnologija omogućava frekvencije komutacije veće od 100 kHz uz male gubitke u poređenju sa IGBT tiristorima. Važno je napomenuti da je frekvencija komutacije uslovljena faktorima kao što su dimenzije, radni ciklus, kontrolna logika itd. Ipak, IGBT su ograničeni svojim karakteristikama, pri čemu se njihova efikasnost na frekvencijama većim od 100 kHz značajno smanjuje.

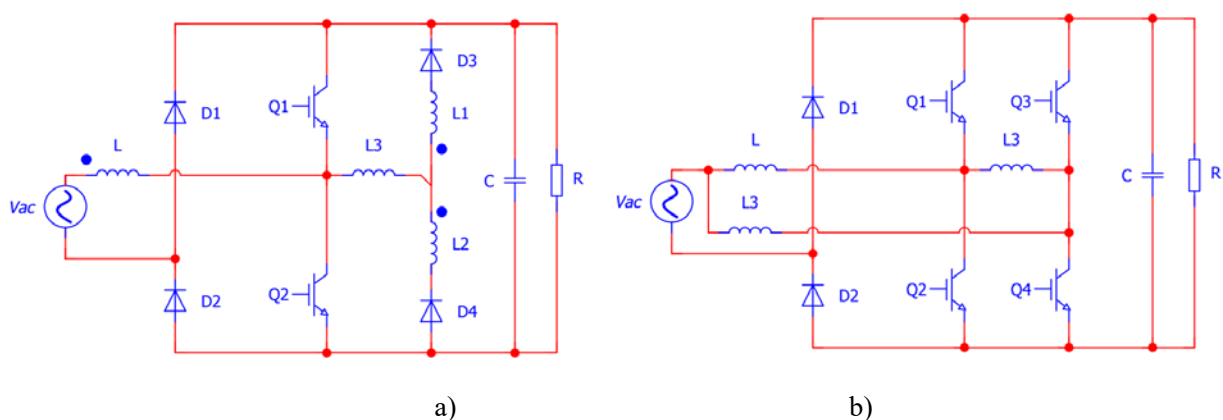


Slika 3.2.2.4.1.3.1 „Totem pole“ topologija

a) ispravljačka linija sa diodama, b) ispravljačka linija sa tranzistorima

Na slici 3.2.2.4.1.3.1 b) prikazana je modifikovana verzija *totem pole* topologije, u kojoj su diode zamijenjene sa tranzistorima (Q3 i Q4). U ovoj topologiji, preporučuje se da Q1 i Q2 budu GaN, tako da bi bilo moguće postići visok faktor snage i efikasnost sa PI kontrolerom [97]. Takođe, BBC topologija sa GaN tranzistorima daje THD faktor u normativnim granicama sa klasičnim PI kontrolerom uz primjenu PWM tehnike. Smanjenje gubitaka kod ovakve topologije moguće je postići dodavanjem rezonantnog kola [98].

Totem pole topologija se može poboljšati dodavanjem D3 i D3 dioda, kao i kalema L, L1, L2. Uloga kalema je da smanje reverznu struju dioda D1 i D2. Diode D3 i D4 doprinose ZCS (*eng. Zero Current Switching*) zajedno sa tranzistorima Q1 i Q2 (slika 3.2.2.4.1.3.2 a)). Ovakva topologija koristi se kod niskonaponskih sistema i sistema male snage, prvenstveno zbog većeg broja komponenti, a samim tim i povećanim gubicima.



Slika 3.2.2.4.1.3.2 Interleaved boost konvertor, (a) *totem pole* topologija; (b) GaN *totem-pole*.

Na isti način, GaN *totem pole* topologija se može modifikovati dodavanjem diode D1 i D2, kao i kalema L3 u skladu sa šemom sa slike 3.2.2.4.1.3.2 b) [99]. Obje navedene topologije doprinose smanjivanju efikasnosti, zbog čega zahtijevaju robusno upravljanje i filtriranje u skladu sa zahtjevanim THD faktorom.

3.2.2.4.2. Topologija trofaznih pretvarača

Jedan od glavnih problema sa kojim se susreću monofazne topologije jeste nemogućnost prenosa velike snage. Generalno govoreći, problem prenosa velike snage rješava se primjenom trofaznih pretvarača i to u jednom od sledećih konfiguracija:

- Tri monofazna konvertora,
- Jedan trofazni konvertor.

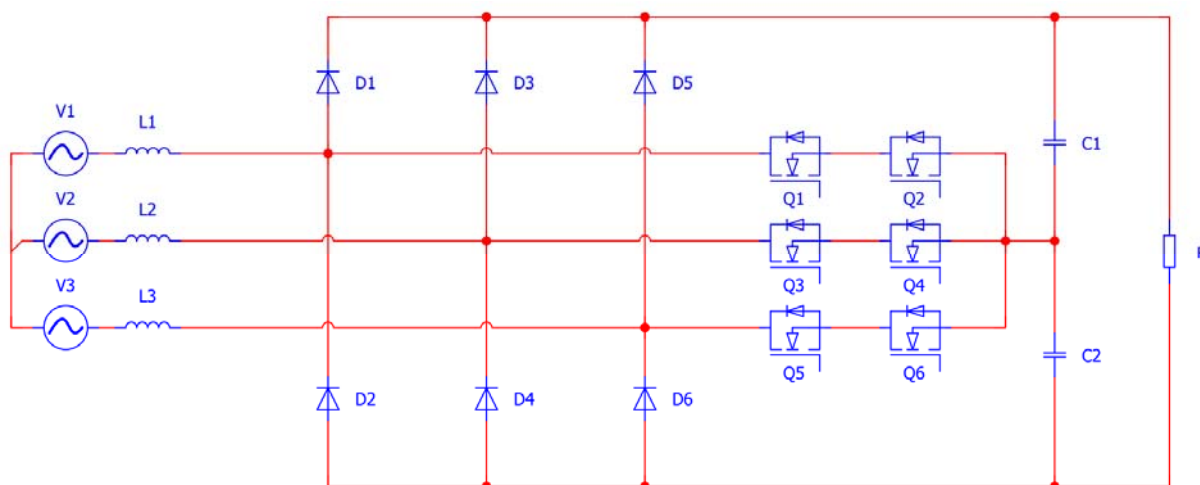
Ulazni napon u pojedinačnim monofaznim konvertorima može biti ili linijski ili fazni. Ovakvo rješenje predstavlja umnožavanje monofazne topologije, pri čemu svaki konvertor ima iste zahtjeve kao po pitanju konstrukcije kao što je opisano u ranijim poglavljima. Ovakvo rješenje karakteriše jednostavnost i veća efikasnost u odnosu na jedinstvenu trofaznu topologiju. Dodatno, kako se radi o tri zasebna konvertora, primjenom strujnog djeljitelja, struja po fazama se smanjuje, pa od tuda su i zahtjevi za filtriranjem manji. S tim u vezi, upravljački elementi su izloženi znatno manjom opterećenju što predstavlja važnu karakteristiku u vidu dimenzionisanja elemenata. Međutim, unosi se veći broj elemenata u odnosu na jedinstvenu trofaznu topologiju, pa samim tim iziskuje i veći broj podsistema.

Primjena jedinstvene trofazne topologije iziskuje manje komponenti u odnosu na rješenje sa tri monofazna konvertora. Međutim, upravljački algoritam je znatno složeniji i oprema se izlaže većem opterećenju zbog čega mora biti veća i robusnija. Izlazni napon iz ovih konvertora je preko 700V, zbog čega je neophodna primjena visokonaponskog čopera ili kaskadno vezano više čopera. Topologije trofaznih konvertora sa korekcijom faktora snage koje se danas sreću su trofazni *Totem pole* i *Vienna*.

Vienna ispravljač našao je široku primjenu u poslednjoj deceniji [100]. *Vienna* konvertore karakteriše velika efikasnost od gotovo 98%, nizak nivo THD-a (ispod 2%) i velika gustina snage. Karakteristike ove topologije su rad u CCM modu, istovremeno trokratno prekidanje i malo naponsko naprezanje. Trokratno prekidanje omogućava raspodjelu struje, što omogućava upotrebu kalemova manjih dimenzija. Topologija *Vienna* konvertora prikazan je na slici 3.2.2.4.2.1.

Za upravljanje *Vienna* konvertorima, koriste se histerezisni kontroleri. Međutim, ovakvi

kontroleri su često vrlo kompleksnog dizajna, zbog čega se u posljednje vrijeme sve više pribjegava kontrolerima baziranim na srednoj struji. Glavni nedostatak kontrolera baziranim na srednoj struji jeste neophodnost uvođenja dvije kontrolne petlje. Međutim, logika upravljanja je mnogo jednostavnija nego u slučaju korišćenja kontrolera baziranog na histerezi. Primjena jednostavnijih kontrolera dovela je do ubrzanog razvoja i primjene *Vienna* konvertora u industrijskim procesima. Takođe, Vienna konvertore karakterišu niski gubici komutacije, kao i niska emisija EMI smetnji. Iako se radi o trofaznoj topologiji, Vienna konvertori ne zahtijevaju vezivanje sa neutralnim provodnikom, već se potencijal može kontrolisati pomijeranjem referentnih vrijednosti fazne struje [101].



Slika 3.2.2.4.2.1 *Vienna* ispravljač sa korekcijom faktora snage i PWM modulacijom

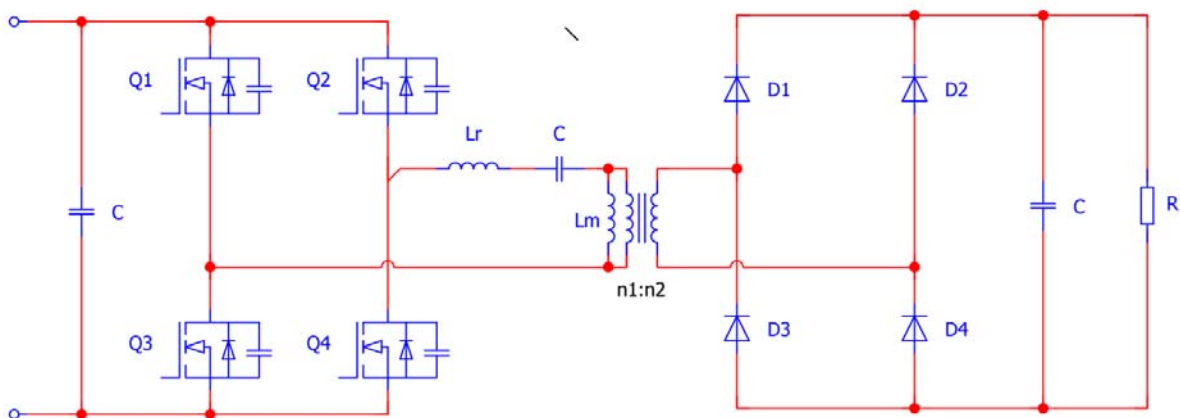
Generalno govoreći, čoperi mogu biti izolovani i neizolovani, a u odnosu na smjer toka snage, dijele se na jednosmjerne (unidirekzione) i dvosmjerne (bidirekzione).

Neizolovani čoperi predstavljaju DC/DC pretvarače koji galvanski povezuju izvor i napajanu stranu. S tim u vezi, ne obezbjeđuje se zaštita uređaja od prenosa kvarova na napojnoj strani, ali sa druge strane prednosti su im niska cijena i efikasnost. Međutim, ovi čoperi nalaze primjenu kod sistema male snage.

Izolovani čoperi omogućavaju galvansku izolaciju primara i sekundara i na taj način se sprečava prenos kvara. Sa druge strane, sadrže veliki broj komponenti i pogodni su za aplikacije velike snage. Zbog prisustva transformatora povećavaju se gubici, ali i omogućavaju dodatna regulacija napona u zavisnosti od prenosnog odnosa transformatora.

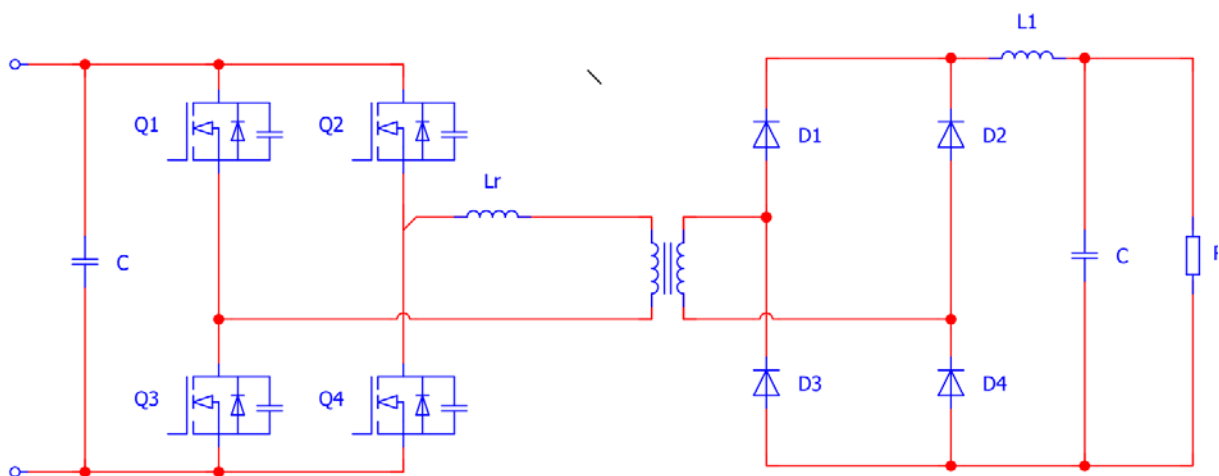
Jedna od najčešće primjenjivanih topologija čopera kod električnih vozila je rezonantni LLC

konvertor (slika 3.2.2.4.2.2). Prvenstveno, ovakva topologija se koristila u telekomunikacijama, zbog mogućnosti da zadrži konstantan napon na izlazu u trenucima kada ulazni napon prolazi kroz nulu. Mogućnost prekidanja pri nultoj struji i naponu kvalifikovala ih je za upotrebu u punjačima električnih vozila. Sreću se u dvije izvedbe, kao polumosni ili punomosni, pri čemu se punomosni pretežno koriste za sisteme veće snage [102].



Slika 3.2.2.4.2.2 Punomosni rezonantni LLC konvertor

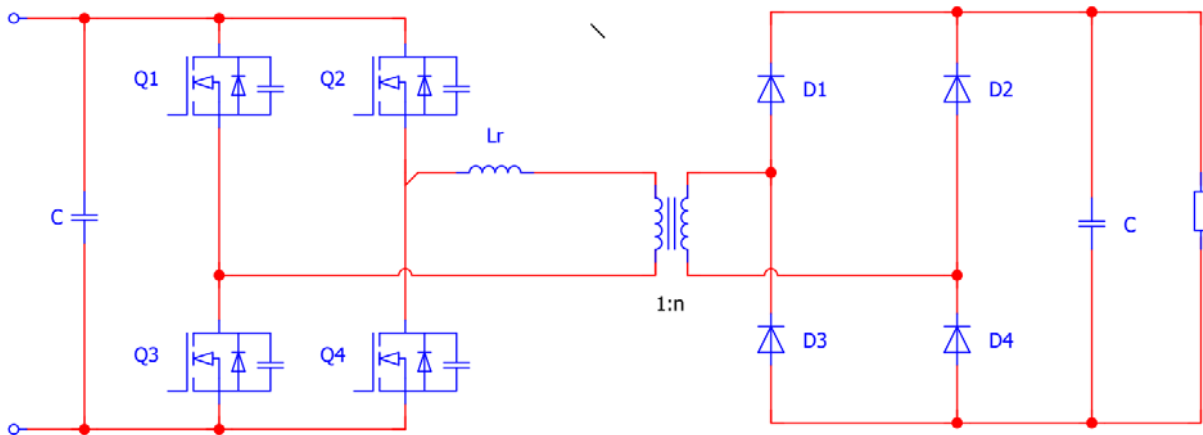
Punomosni konvertor sa faznim pomjerajem i prekidanjem pri nultom naponu (eng. *Zero-Voltage Switch-ZVS*) primjenjuje se kod sistema velike snage (slika 3.2.2.4.2.3). Prekidanje pri nultom naponu postiže se zahvaljujući rasipnoj induktivnosti. Glavni nedostaci ovakve topologije su ograničeni ZVS opseg, povećani gubici na primaru transformatora i šumovi na sekundarnoj strani.



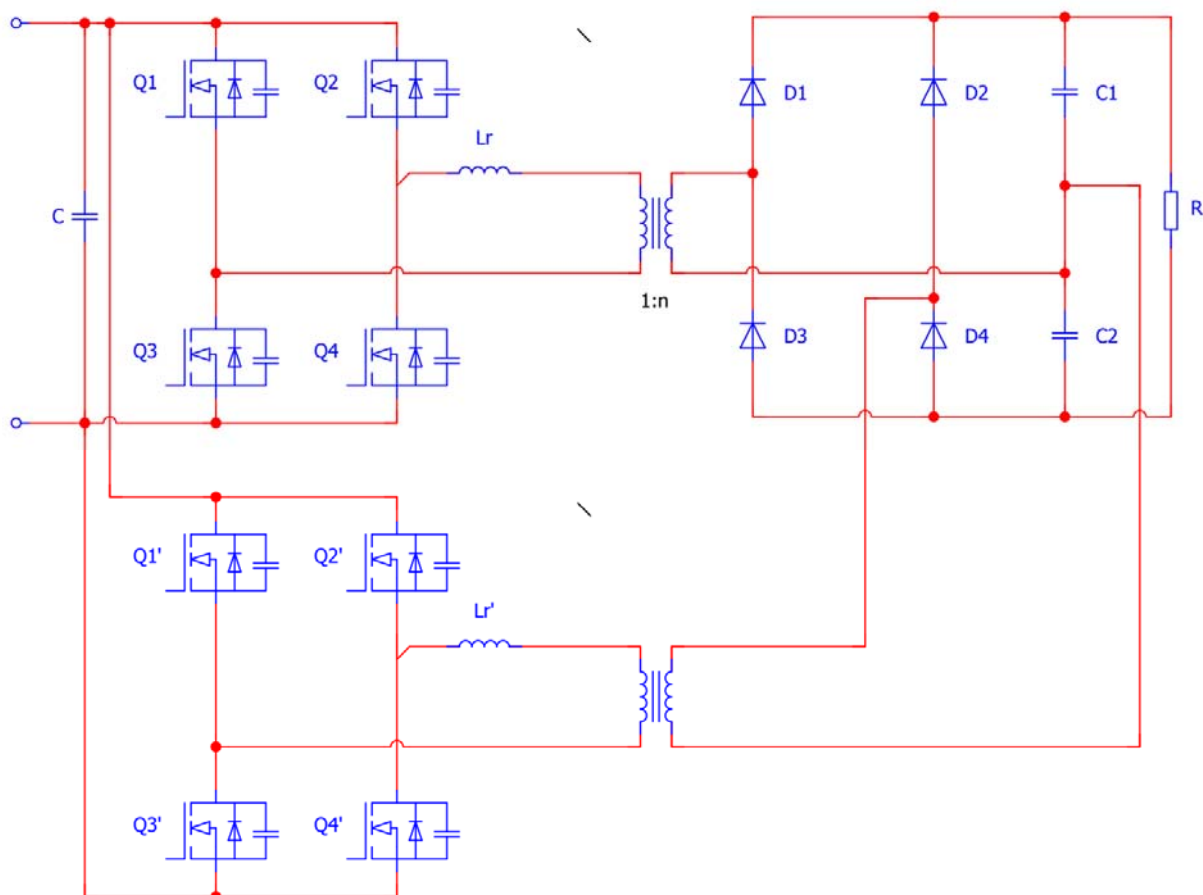
Slika 3.2.2.4.2.3 Punomosni konvertor sa faznim pomjerajem i sa prekidanjem pri nultom naponu

Smanjenje oscilacija na sekundarnom namotaju postiže se primjenom punomosnog konvertora sa izlaznim kapacitivnim filterom (slika 3.2.2.4.2.4). Punomosni inverter sa MOSFET-ovima Q1-Q4

se nalazi na primarnoj strani. Upravljanje sa Q1 i Q2 vrši se pomoću PWM modulacije, dok Q3 i Q4 rade sa 0.5 faktorom popunjenosti. Ovaj konvertor ima mogućnost rada u DCM modu.



Slika 3.2.2.4.2.4 Punomosni konvertor sa izlaznim kapacitivnim filterom



Slika 3.2.2.4.2.5 *Interleaved* konvertor sa udvostručavanjem napona i ZVS

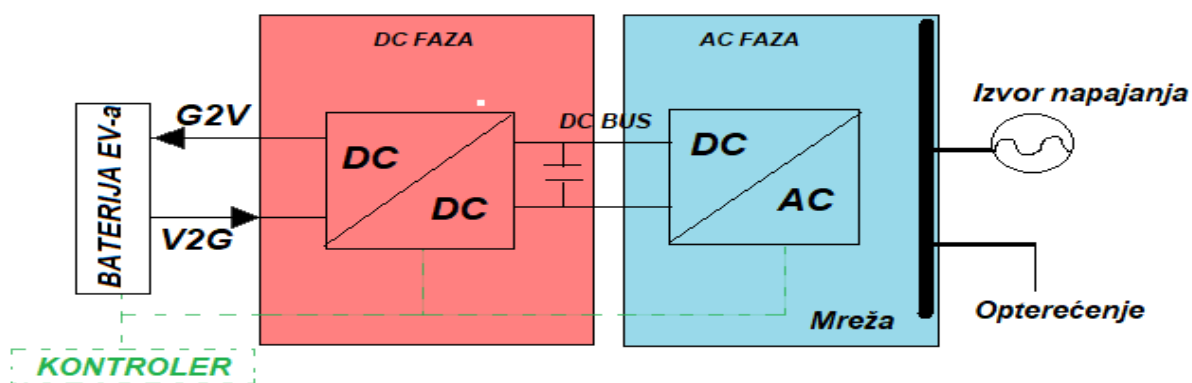
Nedostaci u vidu izraženih pulsacija struje kondenzatora mogu se ublažiti primjenom *interleaved* čopera. Ova topologija obuhvata dva paralelno vezana čopera, čiji su kontrolni signali fazno pomjereni za 180°, pri čemu se ulazna snaga raspoređuje na dva dijela, a samim tim i smanjuje naprezanje komponenti. *Interleaved* konvertor sa udvostručavanjem napona i ZVS-om (slika 3.2.2.4.2.5) omogućava smanjeno naprezanje kondenzatora na izlazu. Smanjenje broja komponenti postiže se dodavanjem još jednog kondenzatora na izlazu. Iako je moguć i kontinualni režim rada, zbog povećanog naprezanja opreme, isti se ne preporučuje [102].

3.2.2.5. Bidirekcionni punjači

Za razliku od većine postojećih tehnologija za punjenje električnih vozila, koje energiju šalju samo u jednom pravcu tj. od izvora ka bateriji električnog automobila, dvosmjerno punjenje omogućava vozilu da energiju „daje” drugim uređajima, vozilima ili je čak vrati nazad u mrežu.

Kod jednosmjernog punjenja, naizmjenična struja (AC) se pretvara u jednosmjernu (DC) koja se skladišti u bateriji električnog vozila. Ovakva konverzija moguća je unutar samog punjača ili u vozilu, u zavisnosti od toga kakvim uređajima je opremljen pretvarač (**Potpoglavlje 3.2.2.**).

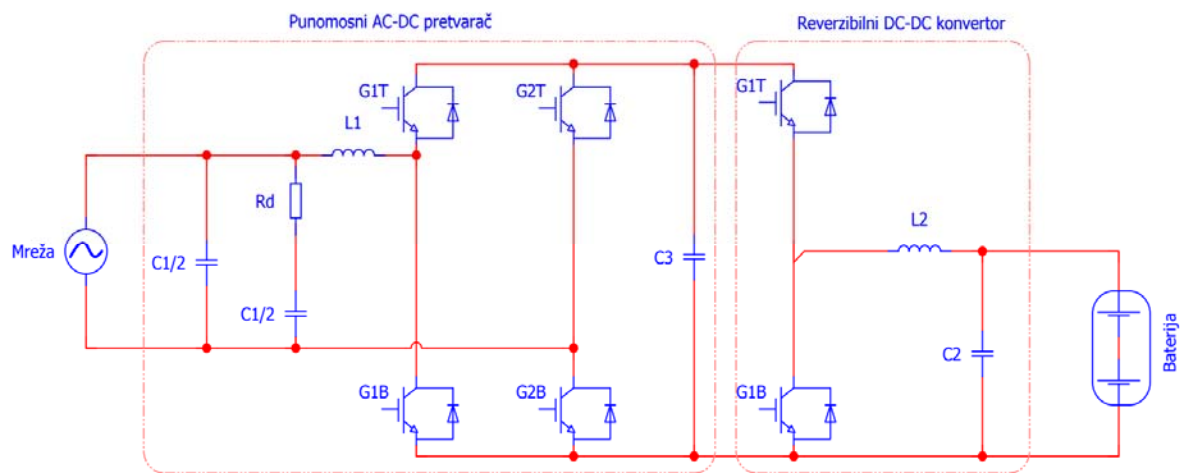
Sa dvosmjernim punjačem, pretvarač može da transformiše jednosmjernu energiju automobila nazad u naizmjeničnu struju i da je prenese do sledećeg primaoca. Efikasno pokretanje ovog procesa dvosmjerne konverzije zahtijeva tehnologiju pametnog punjenja, koja upravlja „kako i kada“ automobil uzima ili vraća energiju, odnosno neophodno je obezbijediti algoritam sa odgovarajućim sekvencama. Strukturna šema bidirekcionne tehnologije data je na slici 3.2.2.5.1.



Slika 3.2.2.5.1 Topologija tehnologije bidirekcionnog punjenja

3.2.2.5.1. Topologija punjača

Na slici 3.2.2.5.1.1 prikazan je punjač koji čini kompozicija od dva konvertora koja dijele DC liniju. Jedan konvertor nalazi se na strani napajanja, a drugi na strani baterije. Uobičajno, na strani mreže, koristi se punomosni AC-DC konvertor. Konverter ovakve konfiguracije, sposoban je da radi kao ispravljač za naizmjeničnom strujom i konstantnim faktorom snage za vrijeme G2V (eng. „*Grid to Vehicle*”) perioda. Tokog V2G i V2H modova, kontroler upravlja baterijom automobila, kako bi obezbijedio traženu energiju mreži ili domaćinstvu. U ovim modovima, pretvarač radi kao inverter. Na strani baterije, nalazi se reverzibilni DC-DC pretvarač. Za vrijeme G2V moda, ovaj pretvarač radi kao *buck* čoper i kontroliše struju i napon koji se isporučuju bateriji vozila. Kontrolna logika i razlike između navednih operacionih modova biće date u **Poglavlju 4**.



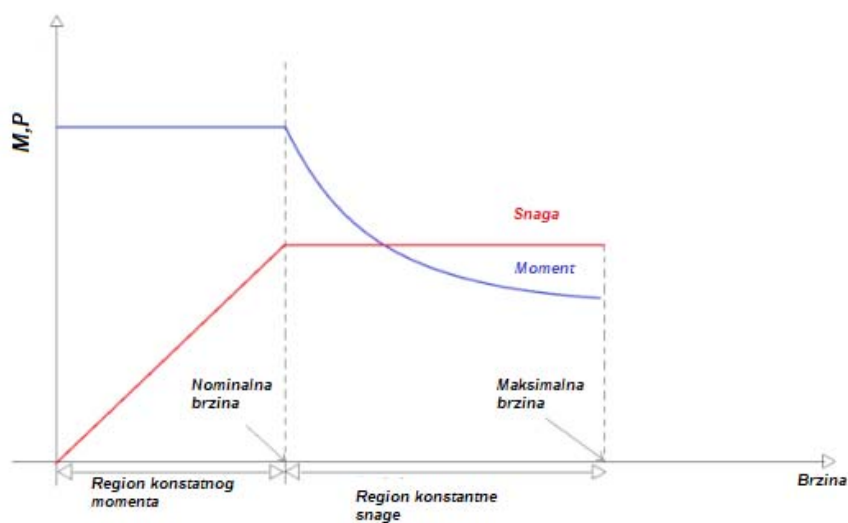
Slika 3.2.2.5.1.1 Topologija punomosnog bidirekcionog AC-DC pretvarača

3.3. Motori u električnim vozilima

Električna vozila koriste vučne motore koji su sposobni da isporuče obrtni moment neophodan za pokretanje i nesmetano kretanje točkova. Elektromotori se mogu grubo podijeliti u dva tipa: DC i AC motori. Oba tipa se mogu koristiti za pokretanje električnih vozila. DC motori su robusni i omogućavaju jednostavnu kontrolu. DC motori se mogu napraviti sa četkicama (eng. *brushed*) i bez četkica (eng. *brushless*). DC motori sa četkicama su dobro poznata tehnologija koja obezbeđuje nisku cijenu, visok obrtni moment pri maloj brzini i laku kontrolu brzine. Ove karakteristike su veoma važne za vučne motore. Međutim, ovi DC motori ne nalaze široku primjenu u električnim vozilima zbog svojih nedostataka, koji uključuju izraženu veličinu, nisku efikasnost i potrebu za čestim održavanjem zbog strukture četkica i kolektora. DC motori bez četkica imaju mnogo veću efikasnost. Ovi motori koriste elektronski komutator/invertor umjesto četkica. U poređenju sa DC motorima, prednosti AC

motora su visoka efikasnost, manje održavanja, veća pouzdanost i regenerativna sposobnost koja omogućava da se energija kočenja vrati u baterije.

Efikasnost motora i elektronike električnog vozila direktno utiču na težinu baterije, jer izgubljenu snagu je potrebno nadoknaditi. Za svako 1% niže efikasnosti zahtijeva se 1% više energije iz baterije. Performanse električnog vozila direktno zavise od specifikacija električnog motora. Performanse motora su određene karakteristikom obrtnog momenta-brzine i snaga-brzine (slika 3.3.1).



Slika 3.3.1 Karakteristike moment-brzina (plava) i snaga- brzina (crvena)

Nagib krive i maksimalna brzina su važni parametri ovih karakteristika. Željena sposobnost motora podrazumijeva visok obrtni moment pri maloj brzini, omogućavajući pravilno pokretanje i ubrzanje. Motor električnog vozila treba da ima veliku snagu pri velikoj brzini i širok opseg brzine u regionu konstantne snage, kao što je prikazano na slici 3.3.1. Radni region sa konstantnim obrtnim momentom je važan pri maloj brzini da bi se obezbijedio dobar start i vožnja pri većem opterećenju ili usponu. Region konstantne snage određuje maksimalnu brzinu električnog vozila na ravnim površinama. Kada se postigne nominalna brzina, motor dostiže svoju granicu nominalne snage i obrtni moment motora opada proporcionalno kvadratu brzine. Region konstantne snage počinje iznad nazivne brzine u opsegu od nominalne brzine do maksimalne brzine motora. Ovaj opseg je različit kod različitih tipova motora i važan je parametar pri odabiru odgovarajućeg tipa motora. Takođe, opseg rada motora se može podesiti korišćenjem odgovarajućih upravljačkih pogona. Odabir odgovarajuće izlazne karakteristike motora je izazov, jer je neophodno pronaći ravnotežu između performansi ubrzanja i širokog opsega brzine u regionu konstantne snage. Kada se povećava oblast

konstantne snage, potreba za snagom u cilju poboljšanja performansi ubrzanja se smanjuje.

Karakteristike poželjne kod motora električnih vozila su sledeće:

- visoka efikasnost,
- velika trenutna snaga,
- brz odziv,
- niska cijena i
- veliko brzanje.

3.3.1. DC motori

Najveće prednosti DC motora u električnim vozilima su robusna konstrukcija i jednostavna kontrola. DC motori imaju odgovarajuće karakteristike obrtnog momenta i brzine obezbeđujući visok obrtni moment pri maloj brzini. Njihovi glavni nedostaci su veličina, niska efikasnost, niska pouzdanost i kompleksno održavanje, kao i ograničena brzina zbog trenja između četkica i kolektora. Postoje dva tipa motora jednosmerne struje: motori jednosmerne struje bez četkica i motori sa četkicama. Motori sa četkicama se sve više potiskuju zbog napretka energetske elektronike.

3.3.2. DC motori sa permanentnim magnetima (PM BLDC)

PM BLDC motori koriste trajne magnete umjesto namotaja rotora. Ovi motori imaju kratko područje rada konstantne snage zbog njihovog permanentnog magnetnog polja oslabljenog statorskim poljem. Pošto električna vozila zahtijevaju širi region konstantne snage, isti se može proširiti korišćenjem kontrole ugla provodljivosti. Međutim, permanentni magneti takođe ograničavaju obrtni moment motora. Na magnete značajno utiče visoka temperatura koja smanjuje zaostalu gustinu fluksa, a samim tim i kapacitet obrtnog momenta motora. Cijena magneta predstavlja najveći nedostatak ovog tipa motora.

3.3.3. Indukcioni motori (IM)

Ovaj tip motora je veoma čest u električnim vozilima zbog svoje jednostavne konstrukcije, visoke pouzdanosti, robusnosti, jednostavnog održavanja, niske cijene i rada u različitim uslovima okruženja. IM se mogu prirodno isključiti, ako dođe do kvara na invertoru, što je važna bezbjednosna prednost za električna vozila. Od svih vrsta upravljanja, u električnim vozilima dominantno se koristi vektorsko upravljanje. Štaviše, vektorsko upravljanje IM je industrijski standardizovano.

Nedostaci IM su nešto niža efikasnost (u poređenju sa PM motorima), veći gubici snage (povećani zbog gubitaka u kavezu) i relativno nizak faktor snage. Slabljenje fluksa se može koristiti

za proširenje opsega brzine u regionu rada sa konstantnom snagom. Ovaj region se takođe može proširiti korišćenjem dvostrukih pretvarača. Gubici rotora se takođe mogu smanjiti pažljivim dizajnom motora.

3.3.4. Sinhroni motor sa permanentnim magnetima (PMSM)

PMSM, slični BLDC motorima, imaju trajne magnete u rotoru. Za razliku od BLDC motora koji imaju talasni oblik trapezoidne elektromotorne sile (EMS), PMSM-ovi imaju sinusnu EMS. PMSM-ovi imaju jednostavnu konstrukciju, visoku efikasnost i veliku gustinu snage, pa su pogodni za upotrebu kao vučni motori (uobičajeni u hibridnim vozilima, električnim vozilima i autobusima). PMSM motori imaju veću efikasnost u poređenju sa IM.

Nedostaci ovog tipa motora su visoki troškovi, gubici usled vrtložnih struja pri velikoj brzini i rizik po pitanju pouzdanosti zbog mogućeg lomljenja magneta. Postoje dvije varijante PMSM motora: sa površinski montiranim permanentnim magnetima (*eng. surface-mounted permanent magnet -SPM*) i sa unutrašnjim permanentnim magnetima (*eng. interior permanent magnet-IPM*). IPM motori imaju bolje performanse od SPM-a, ali loša strana je njihov složen dizajn.

3.3.5. Prekidački reluktantni motor (SRM)

Prednost SRM-a je njihov veliki obrtni moment, što omogućava njihovu upotrebu u mnogim aplikacijama kao što su energija vjetra, sistemi za pokretanje generatora u gasnoturbinskim postrojenjima i vazduhoplovne primjene sa zahtjevima visokih performansi. Štaviše, njihove prednosti u električnim vozilima uključuju njihovu robusnost, jednostavnu kontrolu, visoku efikasnost, široki region rada sa konstantnom snagom, toleranciju grešaka i dobre karakteristike obrtnog momenta i brzine. Pošto ne sadrže četkice, kolektore ili magnete, održavanje SRM-a je veoma jednostavno i efikasno, a cijena im je veoma konkurentna. Odsustvo magneta eliminiše problem sa mehaničkim silama, omogućavajući motoru da radi velikom brzinom. Pošto se namotaji motora ne koriste, nema gubitaka bakra u rotoru što osigurava da je temperatura rotora niža u odnosu na ostale tipove motora. Pošto faze nisu povezane, SRM motori mogu nastaviti sa radom čak i kada se jedna od faza isključi. SRM rotori imaju manju inerciju od drugih tipova motora. Nedostaci ovog tipa motora su povećane vibracije i akustična buka. Pored toga, rotor sa istaknutim polovima i konstrukcija statora uzrokuju velike pulsacije obrtnog momenta. Odgovarajući dizajn motora omogućava široki radni region konstantne snage, što zauzvrat omogućava rad pri velikim brzinama. SRM imaju odgovarajuću karakteristiku obrtnog momenta/snage za upotrebu u električnim vozilima.

3.3.6. Poređenje karakteristika motora električnih vozila

Autor rada [103] su izvršili komparativnu analizu IPM, IM i SRM motora i uporedili ih pri brzini rotacije od 1500 ob/min i 6000 ob/min i njihovoj maksimalnoj snazi. Parametri koji su razmatrani uključivali su obrtni moment, gubitak u gvožđu, gubitke u bakru, efikasnost i gustinu struje. Za slučaj od 1500 ob/min, obrtni momenti IPM i IM su veći od SRM. IM ima veće gubitke u bakru. Pokazano je da IPM ima najveću efikasnost (91,3%). Pri 6000 ob/min, SRM daje najveću vrijednost obrtnog momenta. IPM ponovo ima najveću efikasnost koja raste sa porastom brzine (SRM 96,1%, IM 95,2%, SRM 88,2%). Autori rada [104] analizirali su DC, IM, PM i SRM tipove upoređujući njihovu gustinu snage, efikasnost, upravljivost, pouzdanost i cijenu u električnim vozilima (Tabela 3.3.6.1) .

Tabela 3.3.6.1. Poređenje relevantnih karakteristika različitih tipova motora (reprodukovano iz [104])

<i>Karakteristike</i>	DC	IM	PM	SRM
<i>Gustina snage</i>	Niska	Srednja	Veoma visoka	Srednja
<i>Efikasnost</i>	Niska	Srednja	Veoma visoka	Srednja
<i>Upravlјivost</i>	Veoma visoka	Veoma visoka	Visoka	Srednja
<i>Pouzdanost</i>	Srednja	Veoma visoka	Visoka	Veoma visoka
<i>Tehnička istražnost</i>	Veoma visoka	Veoma visoka	Visoka	Visoka
<i>Cijena</i>	Niska	Veoma niska	Visoka	Niska

Primjetno je da tip motora IM ima sve karakteristike pogodne za upotrebu u električnim vozilima. U automobilskoj industriji, bezbjednost je jedno od najvažnijih pitanja, a SRM i IM tipovi obezbeđuju bezbijednost i pouzdanost. Međutim, nominalna brzina IM je relativno niska. PM ima veći faktor snage i efikasnost u oblasti malih brzina. SRM tip ne koristi četkice i magnetne i stoga ima manje zahtjeva za održavanjem. Ovaj tip takođe ima manje gubitke snage od drugih tipova, zbog kratkih krajeva namotaja i njihove ukupne dužine. Rotor ne sadrži provodnike, što omogućava nižu temperaturu rotora i lakše hlađenje. SRM radi pri velikim brzinama u širokom regionu konstantne snage i omogućava rad pri izuzetno velikim brzinama. Osim toga, motor je manje mase u odnosu na ostale tipove, cjenovno konkurentan i ima visoku efikasnost. Ako se uzmu u obzir sve karakteristike, SRM je najpogodniji tip motora za električna vozila. Čak i sa njihovom relativno velikom gustinom snage i efikasnošću, BLDC motori obično se ne koriste u električnim vozilima, uglavnom zbog njihovog ograničenog opsega konstantne snage.

4. Novi predlog V2G koncepta

Električna vozila su prilično „veliki“ potrošači u odnosu na standardna domaćinstva pa je, usled punjenja električnih vozila, očekivano značajno povećanje opterećenja postojećeg distributivnog sistema. Obzirom da se „skokovi“ opterećenja mogu javljati na različitim lokacijama i u različitim vremenskim trenucima, neophodno je razviti strategije pametnog punjenja. Kako savremeni trendovi upućuju da će broj električnih vozila rapidno rasti, očekuje se da bi njihovo nekontrolisano priključenje u mrežu dovelo do ozbiljnih problema u istoj, čak i ozbiljnih havarija.

Iako električna vozila stvaraju dodatno opterećenje za mrežu, veliki broj istraživanja pokazao je da ista mogu predstavljati važan element u distributivnom sistemu. Pravilnim rasporedom punjenja i pražnjenja moguće je koristiti električna vozila kao privremene *bafere*, odnosno privremena skladišta energije. Logika ovakvog optimalnog upravljanja bila bi sledeća: za vrijeme vršnog opterećenja, vozila injektiraju energiju u mrežu, a tokom vremena podopterećenja, vozila uzimaju energiju. Ovakav koncept naziva se V2G („*vehicle to grid*“) i G2V („*grid to vehicle*“). Iako ova dva pojma ilustruju smjer toka energije, danas se najčešće sreću pod objedinjenim nazivom V2G. Međutim, jasno je da razvoj pametne mreže koji uključuje primjenu bidirekcionih tokova energije prilično veliki izazov, uzimajući u obzir primjenu sistema naprednog mjerenja, decentralizovanih sistema upravljanja, senzora, itd [105].

Pametno punjenje obuhvata definisanje različitih nivoa snage punjenja električnih vozila u različitim vremenskih trenucima u zavisnosti od trenutnog opterećenja mreže. U skladu sa navedenim, V2G predstavlja koncept sa sličnom logikom, ali je tok energije dvosmjernan. Dakle, snaga punjenja i pražnjenja vozila se mijenja u vremenu u zavisnosti od cilja optimizacije i trenutnih prilika u mreži. Generalno govoreći, V2G podržava sve definisane nivoe punjenja (**Potpoglavlje 3.2.2.3**). Međutim, umjereno brzo punjenje bi predstavljalo željenu sredinu, iz razloga što odgovara naponskim nivoima i snagama dostupnim u domaćinstvima i rezidencijalnim centrima. Takođe, mogućnost brzog punjenja svakako bi ostala kao opcija na javnim parkinzima, u sklopu kojih bi mogle biti implementirane punionice sa brzim punjačima.

Za razliku od postojeće komunikacije koja se koristi u savremenim EVSE, potrebno je obezbijediti dodatne komunikacione module poput „*Vehicle Smart Link*“ čipova. Takođe, većina savremenih punjača vrši komunikaciju preko *Modbus*-a ili *CAN Bus*-a sa BMS-om (eng. *Battery Managment System*), a dalja komunikacija sa operaterom obavlja se pomoću posebno razvijenog komunikacionog protokola nazvanog OCPP (eng. *Open Charge Point Protocol*).

Pored obezbjeđivanja bidirekcionog punjača i odgovarajućeg komunikacionog protokola, važno je i definisati učesnika koji će električnim vozilima da šalje kontrolne signale. U principu, operator distributivnog sistema bi mogao da obalja ovakav zadatak. Međutim, uzimajući u obzir sve veći priliv električnih vozila, koordinisanje električnim vozilima na signal iz mreže poželjno bi bilo obavljati na lokalnom nivou. U principu, koristio bi se specijalizovani *framework* koji bi signale dobijene od operatora distributivne mreže prosleđivao do tačaka u kojima su priključena električna vozila. Najvažniji faktor ovakvog koncepta su sami korisnici električnih vozila, odnosno energija koju se spremni da daju na korišćenje. Sam problem punjenja se može podijeliti na dva dijela:

- *SoC* nepohodan korisnicima kako bi koristili vozila za primarnu funkciju, odnosno za vožnju,
- vrijeme koje su korisnici električnih vozila u mogućnosti da izdvoje za učešće u razmjeni energije.

Značaj V2G koncepta za električna vozila je višestruk. Naime, pružaoci balansnih usluga najčešće zahtevaju minimalnu snagu učešća oko 1 MW, što upućuje da bi bilo potrebno između 50 i 100 električnih vozila sa trenutno dostupnom tehnologijom da bi se stvorili uslovi za učešće na tržištu. S toga, uloga agregatora bi postala ključna, jer u zavisnosti od ugovora i zahtjeva same mreže, bilo bi moguće obračunati snage vozila sa više različitih lokacija. Drugi pristup bio bi lokalnog karaktera, odnosno odvijao bi se u sklopu jednog naselja, rezidencijalne sredine, zgrade i slično. Odnosno, sa jednog izvoda se obično napaja više trafostanica, koje dalje prosleđuju energiju za stotine domaćinstava. Ukoliko postoji više stotina domaćinstava povezanih na jednoj trafostanici, postoje opravdane indicije da bi se moglo postići da dovoljan broj vozila istovremeno injektira 1 MW u mrežu. Ukoliko to ne bi bio slučaj, postojala bi mogućnost kombinovanja više trafostanica kako bi se u sumi dobila tražena energija.

Posebno važan segment V2G koncepta je sistem mjerenja obzirom da će potencijalno provajder biti zadužen za koordinaciju velikog broja vozila, pa samim tim u cilju efikasnosti V2G-a, nepohodno je da isti ima precizne podatke o snazi, naponu, struji itd. Dodatno, nepohodan je i precizan sistem mjerenja potrošnje, kako bi se na kraju izračunao tačan bilans uzete i injektirane snage i isti fakturisao, jer bi osnovni motiv za učešće u programu svakako bio finansijska dobit vlasnika električnih vozila. Obzirom da je tipični učesnik na tržištu pojedinačni korisnik, a ne skup korisnika, mjerenje i obezbjeđivanje brzog odziva se pojednostavljuje [106].

4.1. V2X koncept

Bidirekcionni punjač je napredni punjač električnih vozila sposoban za dvosmjerno punjenje. Dvosmjerna razmjena energije je složen proces konverzije snage iz naizmjenične struje (AC) u jednosmjernu (DC). Za razliku od standardnih punjača, dvosmjerni punjači rade slično kao invertori i pretvaraju naizmjeničnu struju u jednosmjernu tokom punjenja i obrnuto tokom pražnjenja. Međutim, dvosmjerni punjači mogu da rade samo sa vozilima koja su kompatibilna sa dvosmjernim DC punjenjem. Nažalost, trenutno postoji veoma mali broj električnih vozila koja mogu da obavljaju razmjenu energije u dva smjera, a najpoznatiji je kasniji model *Nissan Leaf-a*. Kao osnovni razlog nedostatka vozila kompatibilnih sa V2G tehnologijom, jeste cijena dvosmjernih punjača, koji su znatno kompleksniji u odnosu na standardne punjače, prvenstveno jer sadrže naprednu elektroniku za upravljanje smjerom protoka energije. Za napajanje kuće, dvosmjerni punjači takođe uključuju opremu za upravljanje opterećenjem i izolaciju kućnog priključka od mreže tokom nestanka napajanja, odnosno za *backup* rad ili „ostrvski rad“. Osnovni princip rada dvosmjernog punjača je veoma sličan dvosmjernim inverter punjačima, koji se koriste u sistemima za rezervno napajanje više od jedne decenije.

Najnoviji standard za komunikaciju između električnih vozila i dvosmjernog punjača je **ISO 15118:2014**. Svrha ovog standarda je da detaljno objasni komunikaciju između električnog vozila i EVSE .

Dvosmjerni punjači se mogu koristiti za dvije različite aplikacije. Prvi i o kome se najviše govori je V2G, dizajniran za slanje ili izvoz energije u električnu mrežu kada je potražnja velika. Ako su hiljade vozila sa V2G tehnologijom priključene i osposobljene, V2G ima potencijal da transformiše način na koji se električna energija skladišti i proizvodi u ogromnom obimu. Električna vozila opremljena su baterijama velikog kapaciteta, tako da bi kombinovana snaga hiljada vozila sa V2G tehnologijom mogla biti ogromna. V2X je termin koji se koristi da opiše razmjenu energije sa više sistema, od koji su najvažniji sledeći:

- V2G – električno vozilo injektira energiju u mrežu,
- V2H - energija skladištena u električnom vozilu se koristi za napajanje kuće ili nekog drugog objekta.
- V2L²²(eng. „*vehicle to load*“) – električno vozilo se može koristiti za napajanje uređaja ili

²² Napomena: V2L ne zahtijeva dvosmjerni punjač

punjenje drugih električnih vozila.

Druga upotreba dvosmjernih punjača je V2H. Kao što nazivi sugerišu, V2H omogućava da se električno vozilo koristi slično kao sistem kućnih baterija za skladištenje viška solarne energije i napajanje domaćinstva. Na primjer, tipičan sistem kućnih baterija, kao što je *Tesla Powerwall*²³, ima kapacitet od 13,5kWh, dok prosječno električno vozilo ima kapacitet od 65kWh, što je ekvivalentno skoro pet *Tesla Powerwall* baterija. Zbog velikog kapaciteta baterije, potpuno napunjeno električno vozilo bi moglo da napaja domaćinstvo nekoliko uzastopnih dana ili mnogo duže kada se kombinuje sa solarnom energijom na krovu.

4.1.1. V2G

V2G je koncept koji podrazumijeva da se dio uskladištene energije u baterijama injektira u električnu mrežu kada je to potrebno, u zavisnosti od opterećenja mreže. Preduslov učestvovanja u V2G programima je dvosmerni DC punjač i kompatibilno električno vozilo. Električno vozilo sa V2G tehnologijom takođe može omogućiti vlasniku da učestvuje u programu virtualne elektrane (*eng. Virtual Power Plant-VPP*) radi poboljšanja stabilnosti mreže i snabdijevanja električnom energijom tokom perioda najveće potražnje. Samo nekoliko električnih vozila trenutno ima V2G i mogućnost dvosmjernog punjenja DC, a to uključuje kasniji model *Nissan Leaf (ZE1)* i *Mitsubishi Outlander* ili *Eclipse plug-in* hibride.

Uprkos publicitetu, jedan od problema sa uvođenjem V2G tehnologije su regulatorni izazovi i nedostatak standardnih dvosmjernih protokola i konektora za punjenje. Dvosmjerni punjači, poput solarnih invertora, smatraju se još jednim „oblikom proizvodnje električne energije“ i moraju ispuniti sve regulatorne standarde bezbjednosti i isključivanja u slučaju havarije na mreži. Da bi prevazišli ove složenosti, neki proizvođači vozila, kao što je *Ford*, razvili su jednostavne sisteme za dvosmjerno punjenje naizmjeničnom strujom koji rade samo sa *Ford*-ovim električnim vozilima za snabdevanje električnom energijom u kući, a ne za injektiranje u mrežu, što zapravo predstavlja V2H koncept. Drugi, kao što je *Nissan*, rade koristeći univerzalne dvosmjerne punjače kao što je *Walbox Quasar*²⁴.

Standardi V2G su kompleksni, jer uključuju regulisanje snage, bezbjednosti i električnih zahtjeva prilikom injektiranja energije u mrežu. **UL9741** je predloženi bezbednosni standard koji je još uvijek u razvoju, a tiče se opreme za dvosmjerno punjenje. Takođe, aktivno se vrši nadogradnja i proširenje **IEEE1547** standarda za međusobno povezivanje distribuiranih energetske resursa (DER)

²³ <https://www.tesla.com/powerwall>

²⁴ https://wallbox.com/en_catalog/quasar-dc-charger

sa sistemima električne energije.

V2G tehnologija može omogućiti hiljadama električnih vozila da rade zajedno i djeluju kao veliki distribuirani energetska sistem, pružajući ključne usluge energetska mreži. Jedan od načina na koji to može da se uradi je snabdijevanje energijom tokom perioda najveće potražnje i punjenje tokom perioda niske potražnje, efikasno balansirajući mrežu. Ovakva kompozicija električnih vozila ili sistema fiksnih baterija se naziva virtuelna elektrana (VPP) [107]. Na primjer, kada je električno vozilo priključeno, višak energije se može poslati mreži tokom najtoplijih dijelova dana kada mreži treba više kapaciteta da bi zadovoljila dodatnu potražnju usled porasta opterećenja zbog rada klimatizacije. Nasuprot tome, električna vozila se takođe mogu puniti tokom vremena podopterećenja, kao što vjetrovit sunčan dan²⁵ ili kada su troškovi električne energije smanjeni zbog niske potražnje, odnosno prvenstveno tokom noći.

4.1.1.1. OCPP (*eng. Open Charge Point Protocol*)

OCPP je *open source* („jezik otvorenog koda“) koji koriste stanice za punjenje i sistemi za upravljanje mrežom kako bi komunicirali jedni sa drugima. OCPP komunikacioni protokol je stvorila i objavila *Open Charge Alliance*²⁶, sa sjedištem u Holandiji, kako bi promovisala otvorene standarde u mrežama za punjenje električnih vozila na globalnom nivou. U suštini, uloga OCPP-a je da učini da bilo koja stanica za punjenje električnih vozila radi na kompatibilan način sa bilo kojim softverom za upravljanje punjačem. Stanice za punjenje koriste OCPP usklađenost da bi omogućile sesije punjenja, upravljale daljinskom dijagnostikom i osigurale bezbjednu razmjenu podataka.

Neophodnost postojanja jedinstvenog komunikacionog protokola u punjenju električnih vozila najlakše je objasniti kroz tri nezavisne djelatnosti neophodne kako bi krajnji korisnici električnih vozila mogli nesmetano da pune svoja vozila, a to su:

- Proizvođači EVSE-a (punjača) – kompanije zadužene za proizvodnju hardvera,
- CSMS (*eng. Charging Station Management System*) – kompanije zadužene za razvijanje i implementaciju softvera za upravljanje punionicima,
- CPO (*eng. Charge Point Operator*) – kompanije koje se bave pružanjem usluga, odnosno provajderi zaduženi za kontakt sa klijentima.

Uobičajeno je da ove tri djelatnosti budu odvojene, ali u nekim slučajevima pojedinačne

²⁵ Ovakav ambijent idealan je za vršnu proizvodnju solarnih elektrana i vjetro elektrana.

²⁶ <https://www.openchargealliance.org/protocols/ocpp-201/>

kompanije odlučuju da preuzmu ulogu dva ili svih od gore navedenih, što znači da upravljaju širom infrastrukturom za punjenje.

OCPP je ključan faktor u integraciji navedene tri djelatnosti u jedan jedinstveni sistem dostupan korisniku. Na primer, mreže za punjenje i vlasnici stanica treba da naplate vozaču za korišćenje električne energije i da upravljaju električnim opterećenjem. Punjač, dakle, treba da se kontroliše preko centralnog interfejsa. Ovi centralni sistemi upravljanja su obično administrativni portali zasnovani na *web-u* koji se nalaze u „oblaku“ (*eng. cloud*) i koriste javni internet. Izrađuju ih dobavljači CSMS softvera.

OCPP je jezik koji punjači koriste da „razgovaraju“ sa ovim centralnim sistemima upravljanja, dajući im interoperabilnost uprkos tome što imaju različite proizvođače i različite dobavljače softvera. Sistem koji nije OCPP ne bi imao ovu funkcionalnost.

Tipična sekvenca koja se dešava u pozadini procesa punjenja električnog vozila na javnoj punionici data je u nastavku:

1. Putem mobilne aplikacije (ili poruke sa mobilnog telefona), korisnik električnog vozila vrši rezervaciju punjača na željenoj destinaciji,
2. U pozadini (CPO) vrši rezervaciju punjača,
3. Dolaskom vozača do rezervisanog punjača, vrši se identifikacija, a zatim i dobijanje dozvole za početak punjenja,
4. Nakon dobijanja dozvole, vrši se fizičko otključavanje konektora (CSMS) koji korisnik može priključiti na vozilo,
5. Obavlja se sesija punjenja vozila,
6. Nakon isteka sesije, vozač preko iste aplikacije (ili poruke) dobija obavještenje o razvršetku punjenja,
7. Nakon vraćanja konektora na predviđeno mjesto, softver ga opet zaključava,
8. Punjač pokreće događaj naplate u skladu sa utrošenom energijom i cijenama utvrđenim od strane operatera (CPO).

Svaki od gore navedenih koraka koristi sistem zadavanja komandi i primanja odgovora koji se razmjenjuje između stanice za punjenje i CSMS-a preko OCPP otvorenog protokola. Zahvaljujući OCPP-u, postoji kompatibilnost između različitih proizvođača, sistema i provajdera usluga, što

zauzvrat omogućava veći izbor hardvera i softvera za korisnike električnih vozila.

Benefiti postojanja OCCP su mnogobrojni. Posjedovanje opreme koja se bazira na OCPP povlači za sobom benefite u vidu mogućnosti promjene operatera, kao i pronalaženje novog u slučaju da postojeći prestane da postoji. Takođe, obzirom da OCPP omogućava pristup gotovo na svim stanicama zasnovanim na ovom protokolu, to bi podstaklo operatere da zadrže konkurentnost cijena, odnosno, tržište bi spriječilo monopol i nekontrolisan rast cijena električne energije. Takođe, jedan od važnijih aspekata ovog protokola je bezbjednost. Obzirom da se preko iste komunikacije vrši i naplata, odnosno novčana transakcija, samim tim OCPP postaje idealna meta zloupotreba. Da bi neki proizvođač pristupio korišćenju OCCP protokola, neophodno je da prođe rigorozne mjere bezbjednosti²⁷ definisane od strane *Open Charge Alliance*. Prilikom svake ugovorene sesije punjenja, korisnik od strane operatera dobija „uobičajnu“ šifru karakterističnu za operatera koja služi za ulazak u interakciju sa punjačem, a zatim preko posebnih sigurnosnih kanala dobija i individualnu lozinku, odnosno verifikacioni kod namijenjen ugovorenoj sesiji koji se može iskoristiti samo za jedan ciklus punjenja. Na ovaj način, vrši se dvostuka bezbjednosna autorizacija. Paralela OCPP protokola mogla bi biti KNX²⁸ protokol namijenjen automatizaciji rezidencijalnih objekata, odnosno stvaranju „*Smart Home*“ sistema. Princip je gotovo identičan sa stanovišta proizvođača opreme, svim procesima neophodnim za postizanje potpunog užitka korisnika upravlja se iz jedinstvenog softvera, dok zauzvrat svi proizvođači moraju da poštuju standarde definisane od strane *KNX Association*. Važno je napomenuti da OCPP nije jedini komunikacioni protok, ali svakako okuplja najveći broj proizvođača.

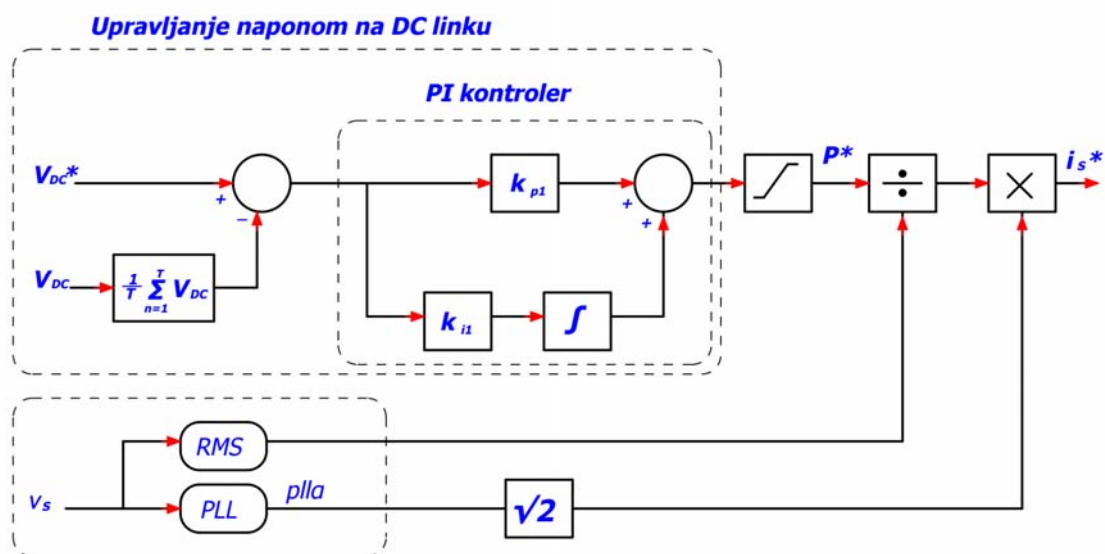
4.1.1.2. Kontrolna logika bidirekcionog punjača tokom G2V operativnog moda

Tokom ovog režima punomosni AC-DC bidirekcionni konvertor radi kao aktivni ispravljač sinusoidnog talasa sa jediničnim faktorom snage. Reverzibilni DC-DC konvertor radi kao *buck* konvertor. Da bi se postigla maksimalna amplituda osnovnog harmonika struje, te ograničili niži harmonici specificirani IEC 61000-3-2 standardom, neophodno je da upravljanje punomosnim AC-DC bidirekcionnim konvertorom bude sinhronizovano sa nominalnim naponom mreže [108]. Prema tome, jednofazna petlja sa faznim zaključavanjem (*eng. Phase-locked Loop-PLL*) je prvi algoritam implementiran u digitalnim kontrolerima u α - β koordinatama. Ovaj algoritam generiše dva sinusna talasa sa fazama pomjerenim za 90° . Kada se PLL sinhronizuje sa električnom mrežom, signal sa *pll*

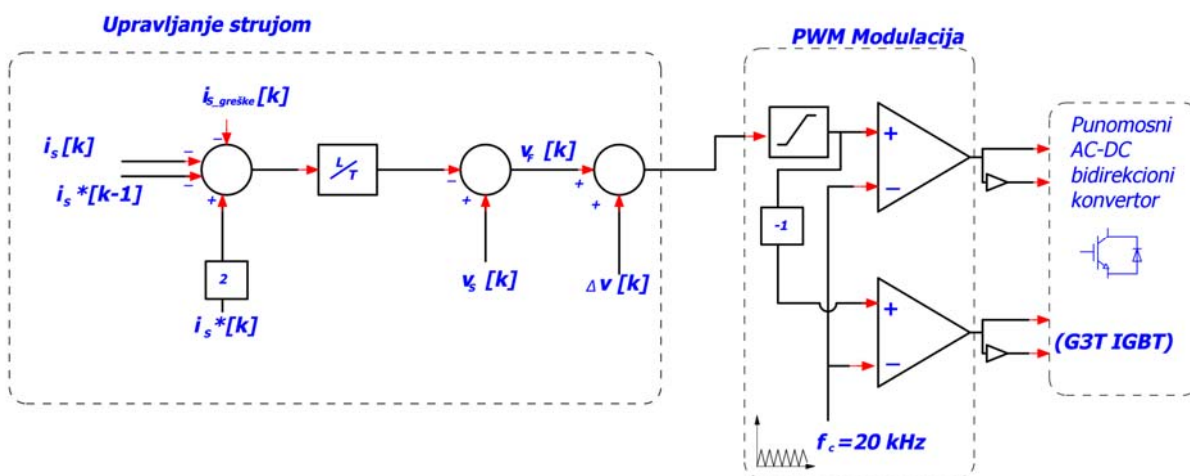
²⁷ <https://wevo.energy/white-papers/open-charge-point-protocol-ocpp-security-explained/>

²⁸ <https://www.knx.org/knx-en/for-professionals/index.php>

odgovara na direktnu komponentu nominalnog napona, a zatim se ovaj signal koristi kao ulaz za naredni digitalni signal. Drugi kontrolni algoritam je odgovoran za izračunavanje referentne struje za punomosni AC-DC bidirekcionni pretvarač. Amplituda referentne struje se postiže podjelom aktivne snage sa referentim naponom mreže na koji utiče *plla* signal. Referentna aktivna snaga, dobija se pomoću PI kontrolera dizajniranog za održavanje napona na DC linku. Na slici 4.1.1.1 prikazan je kontrolni blok dijagram za generisanje trenutne reference (i_s^*), dok je tehnika generisanja data slikom 4.1.1.2. Ova kontrolna struja koristi parameter modela kola i informacije iz prethodnog *semplovanja* za izračunavanje napona koji AC-DC konvertor mora dati na krajevima u toku svake naredne iteracije.

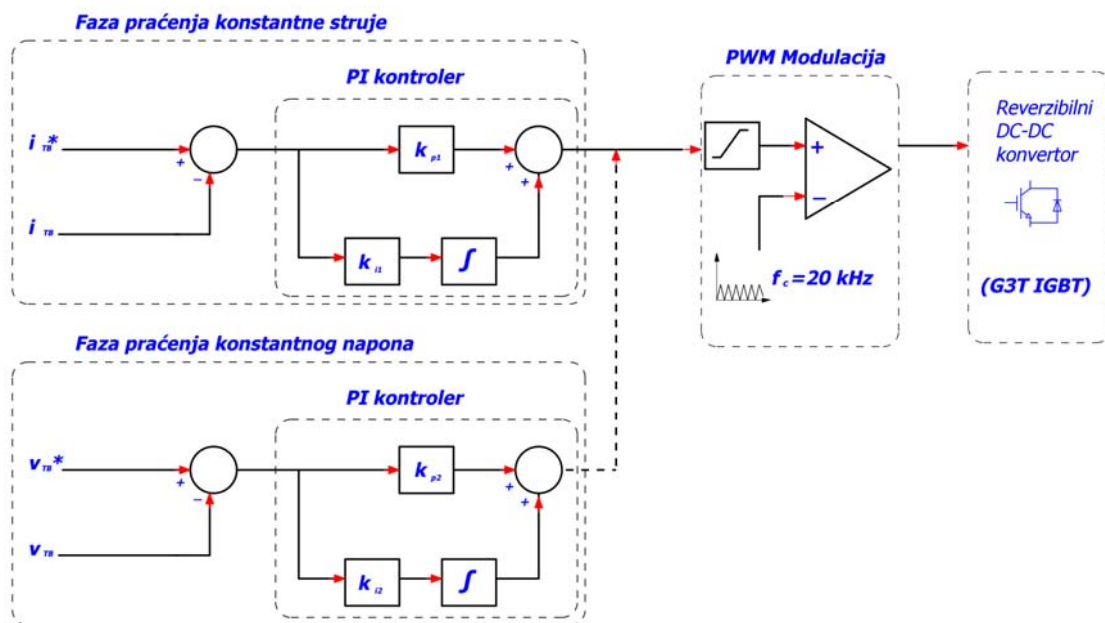


Slika 4.1.1.1 Kontrolni blok dijagrama generisanja referentne struje za punomosni AC-DC konvertor



Slika 4.1.1.2 Kontrolni blok dijagrama upravljanja referentnom strujom

Reverzibilni DC-DC konvertor se kontroliše kroz dvije faze, konstantnom strujom i konstantnim naponom (slika 4.1.1.3). Tokom faze konstantne struje i_{TB}^* referentna struja se upoređuje sa stvarnom strujom i_{TB} . Dobijena strujna greška se uvodi u PI kontroler koji vrši regulaciju i podešava izlaz pomoću PWM modulacije sa „testerastim“ signalom frekvencije 20 kHz. Kada se dostigne nominalni napon baterije definisan od strane proizvođača, započinje druga kontrolna faza, odnosno upravljanje prema konstantnom naponu. U ovoj fazi drugi PI kontroler održava na izlazu konstantni napon v_{TB} prema referentnom naponu v_{TB}^* [109].

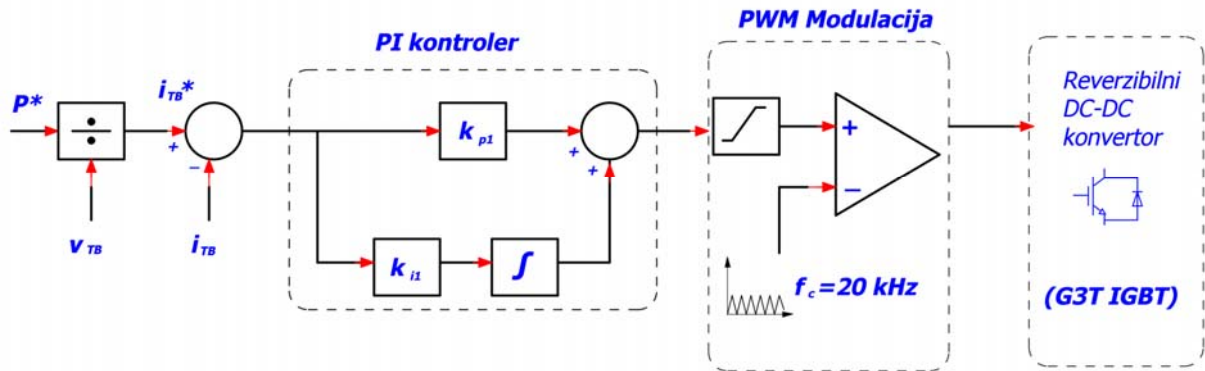


Slika 4.1.1.3 Kontrolni blok dijagrama reverzibilnog DC-DC konvertora

4.1.1.3. Kontrolna logika bidirekcionog punjača tokom V2G operativnog moda

Tokom ovog operativnog moda, punomosni AC-DC bidirekcionni konvertor radi kao inverter sa sinusoidnim stujnim signalom, dok reverzibilni DC-DC pretvarač radi kao *boost* čoper [110]. Kao i u G2V režimu, i ovom slučaju AC-DC konvertor mora biti sinhronizovan sa nominalnim naponom (osnovnim harmonikom). Sinhronizacija se postiže na identičan način kao i kod G2V, pomoću PLL u α - β koordinatnom sistemu. Kontrolni algoritam V2G je sličan kao i za G2V. U cilju sinteze referentne struje, odnosno u cilju postizanja isporučivanja odgovarajuće aktivne snage koristi se prediktivna kontrola struje [111]. Obzirom da se naelektrisanja kreću od višeg ka nižem potencijalu, nephodno je da napon na DC linku bude nešto veći od napona mreže. Shodno tome, reverzibilni DC-DC konvertor mora da radi kao *boost* čoper kada je napon na kraju baterije manji od napona neophodnog na DC linku. Međutim, napon na kraju baterije opada tokom procesa pražnjenja, pa shodno tome u cilju

održavanja injektirane aktivne snage u mrežu, neophodno je povećati referentnu struju. Dijeljenjem referentne aktivne snage (P^*) i napona v_{TB} dobija se referentna struja i_{TB} koja se uvodi u PI kontroler. PI kontroler pomoću PWM modulacije od 20 kHz podešava odgovarajući radni ciklus (slika 4.1.1.4).



Slika 4.1.1.4 Kontrolni blok dijagrama reverzibilnog DC-DC konvertora tokom V2G

4.1.2. V2H

V2H je sličan V2G-u, ali se energija lokalno²⁹ koristi za napajanje kuće umjesto da se injektira u električnu mrežu. Ovo omogućava električnim vozilima da funkcionišu kao običan sistem baterija za domaćinstvo kako bi se povećala dobit, ili smanjili troškovi, posebno kada se kombinuje sa solarnom energijom. Međutim, najočiglednija prednost V2H je mogućnost da obezbijedi rezervno napajanje (*eng. backup*) tokom nestanka struje.

Da bi V2H funkcionisao, potreban mu je kompatibilan dvosmjerni punjač i dodatna oprema, uključujući mjerač energije (CT mjerač³⁰) koji mora biti instaliran na glavnoj tački priključka na mrežu. CT mjerač prati protok energije ka i iz mreže. Kada sistem otkrije energiju mreže koju troši domaćinstvo, on signalizira dvosmjernom punjaču da isprazni jednaku količinu energije, nadoknađujući na taj način snagu koja se povlači iz mreže. Isto tako, kada sistem otkrije da se energija proizvodi u solarnoj elektrani³¹, istu preusmjerava da napuni električno vozilo. Da bi se omogućilo rezervno napajanje u slučaju nestanka struje ili hitnog slučaja, V2H sistem mora biti u stanju da otkrije nestanak mrežnog napajanja i izoluje se od mreže pomoću automatskog kontaktora (slika 4.1.2.1³²). Ovo je poznato kao ostrvski rad, a dvosmjerni inverter u suštini radi

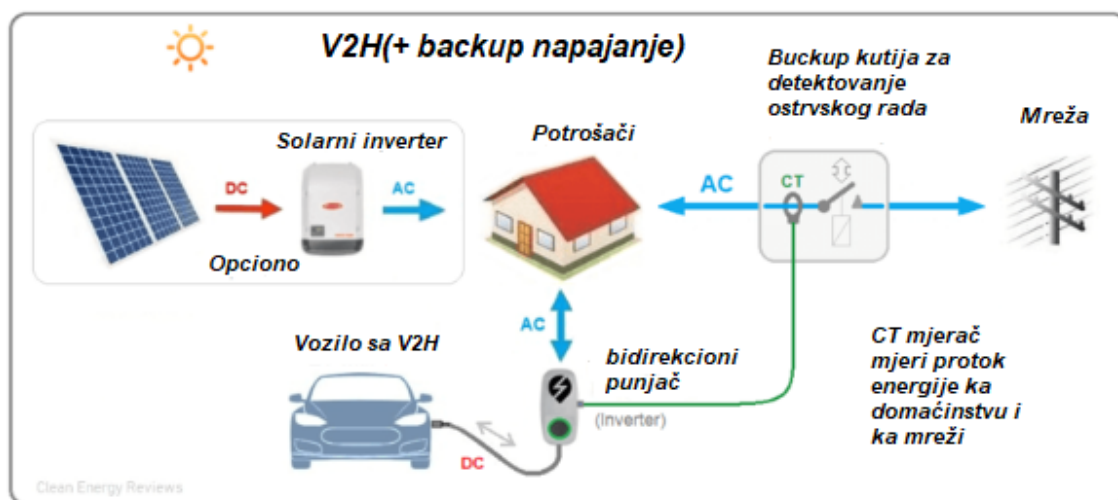
²⁹ Hijerarhijski se može posmatrati kao niži nivo od V2G

³⁰ <https://blog.intellimeter.com/how-is-a-current-transformer-ct-used-in-metering>

³¹ Napomena: Misli se na sistem solarnih panela na krovu domaćinstva

³² <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-charging-v2g-v2h-v2l>

kao inverter van mreže koristeći bateriju električnog vozila kao izvor DC napajanja. Oprema za izolaciju mreže je neophodna da bi se omogućio rezervni rad, slično kao kod hibridnih pretvarača koji se koriste u sistemima rezervnih kućnih baterija [112]. Samo nekoliko električnih vozila trenutno ima mogućnost realizacije V2H tehnologiju, uključujući noviji model *Nissan Leaf*, *Mitsubishi Outlander PHEV*³³, pri čemu oba koriste CHAdeMO konektor starijeg tipa. Novi *Ford F-150 Lightning* je jedinstven po tome što može da radi u V2H režimu koristeći CCS konektor preko dvosmjernog punjača u vozilu. Međutim, bidirekciona razmjena energije može da funkcioniše samo kada se koristi sa *Ford Charge Station Pro* zajedno sa Fordovim sistemom kućne integracije. *F-150 Lightning* takođe ima tehnologiju V2L.



Slika 4.1.2.1 V2H sistem kombinovan sa solarnim panelima

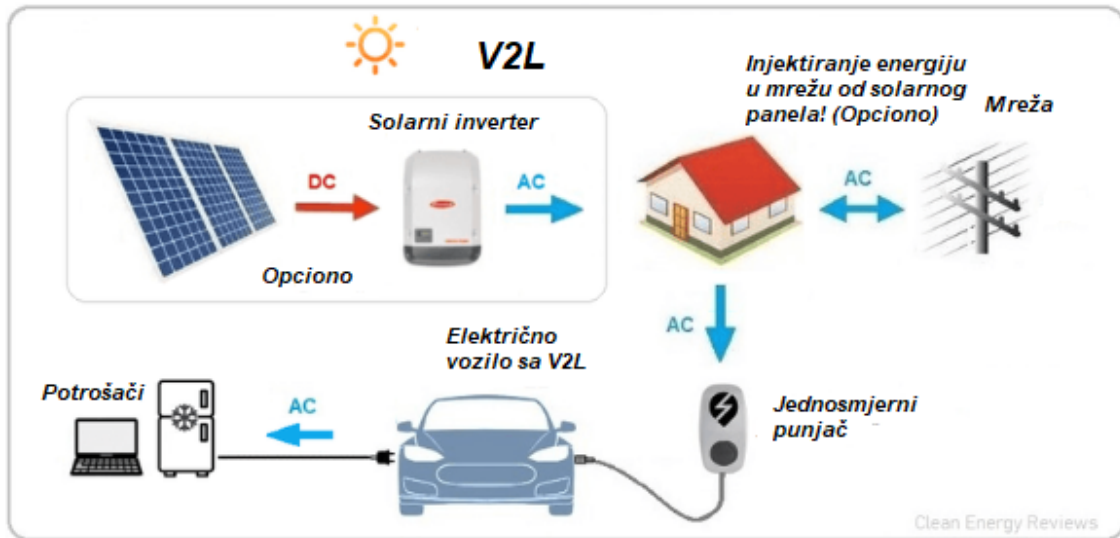
4.1.3. V2L

V2L tehnologija je mnogo jednostavnija od V2H i V2G, jer ne zahtijeva bidirekcionni punjač za rad. Vozila sa V2L imaju ugrađeni dvosmjerni punjač i standardne utičnice za naizmjeničnu struju, koje se mogu koristiti za uključivanje bilo kojeg običnog kućnog aparata na naizmjeničnu struju. Takođe, moguća je izvedba u kojima se dio utičnice (ili uređaja) u domaćinstvu vezuju na poseban strujni krug tako da je u slučaju nestanka napajanja, priključenjem vozila sa V2L moguće dobiti napajanje definisanih potrošača³⁴. Novi *Ford F-150 Lightning* ima V2L mogućnost preko četiri 2,4kW utičnice naizmjenične struje za ukupno 9,6kW snage. Ostala

³³ eng. *plug-in hybrid electric vehicle*

³⁴ Princip sličan radu agregatskih utičnica i potrošača

vozila koja imaju V2L tehnologiju uključuju novi *Hyundai IONIQ 5*³⁵ i *Kia EV6*³⁶, koji imaju interne i eksterne utičnice naizmjenične struje. Na slici 4.1.3.1²⁹ prikazan je V2L sistem.



Slika 4.1.3.1 Tok energije u V2L sistemu sa vozilom sa eksternom AC utičnicom

4.2. Matematički opis novog V2G koncepta

U prethodnim poglavljima predstavljani su savremeni koncepti V2G, V2H i V2L³⁷ tehnologija. V2H i V2L predstavljaju jednostavnije tehnologije, ograničene na individualne jedinice ili potrošače, pa se shodno tome njihova problematika rješava na individualnom nivou i najčešće su rješenja uslovljena dostupnom infrastrukturom samih instalacija i dostupnom tehnologijom vozila. Za razliku od toga, V2G predstavlja „problem“ na nivou EES-a, pa je samim tim na vrhu hijerarhije. Dakle, osnovni problem priključenja električnih vozila u mrežu tiče se njihovog uticaja na vršna opterećenja. Električna vozila predstavljaju dodatno opterećenje za mrežu, naročito ukoliko se neplanski priključuju. Trenutno je broj električnih vozila mali, pa samim tim moguće je pametnim punjenjem i sličnim konceptima održavati balans između potrošnje i mogućnosti proizvodnje i prenosa električne energije. V2G nudi rješenje za ovakav problem, ali nedostaje konceptualno rješenje. Dakle, sa jedne strane, korisnici električnih vozila žele da im se obezbijedi neophodna energija, a sa druge strane mreži je neophodno koordinisano

³⁵ <https://www.hyundai.com/worldwide/en/eco/ioniq5/highlights>

³⁶ <https://www.kia.com/us/en/ev6>

³⁷ Pod ovim pojmom se ubraja i V2V (eng. *vehicle to vehicle*), jer u tom slučaju, jedno vozilo bi služilo kako izvor energije za drugo vozilo koje bi u tom slučaju predstavljalo potrošača

priključenje kako ne bi doživjela havariju. Ukoliko bi se našao kompromis između ova dva zahtjeva, problem priključenja električnih vozila bio bi riješen.

U principu, V2G koncept se temelji na sledećem:

- injektirati energiju iz vozila u mrežu u periodima vršnog opterećenja, i
- „puniti“ vozila kada je sistem podopterećen.

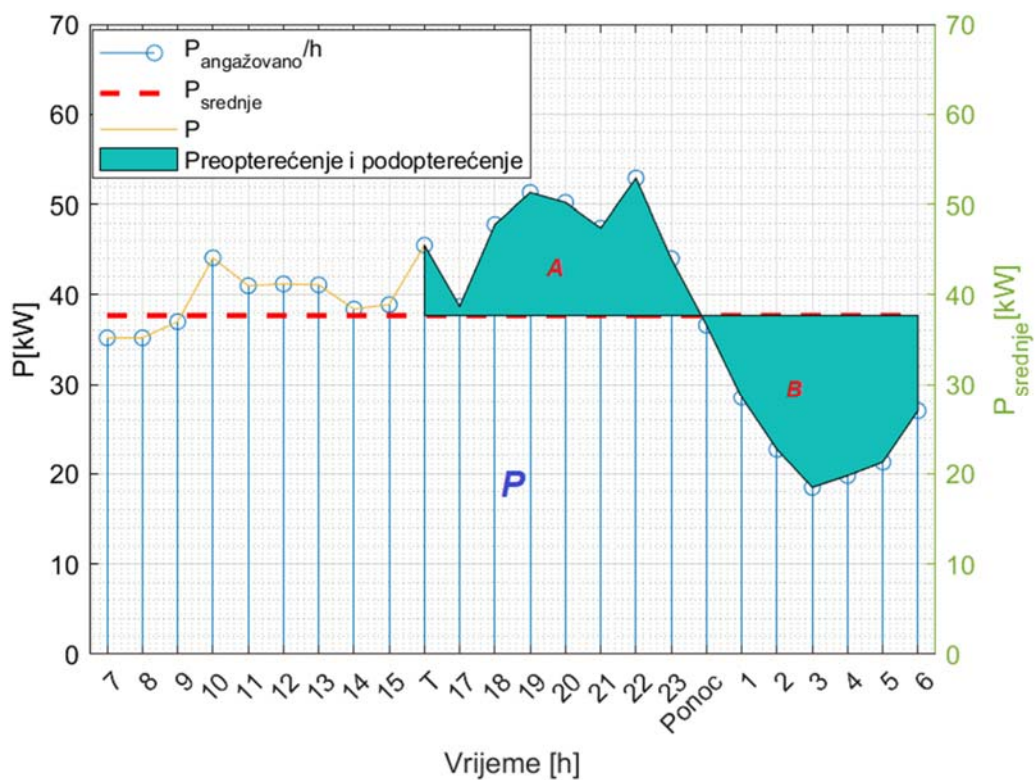
Iako ovakva konstatacija zvuči jednostavno, u praksi nije. Prvi problem koji se javlja jeste koordinacija. Stotine hiljada vozila koja bi se priključivala u mrežu, sa sopstvenim ciljevima bi destabilizovali mrežu. Savremeni V2G koncepti temelje se na kreiranju događaja, odnosno simuliraju se situacije u kojima vozila periodično dolaze i odlaze i injektiraju energiju u mrežu uz određenu novčanu nadoknadu, dok se naknadno punjenje vozila ostavlja samom korisniku. Međutim, ako se uzme u obzir da su vozila 95% vremena zapravo parkirana, postoji bolji pristup čitavom problemu. Najprije, u savremenom svijetu, usled ubrzanog tempa života, većina vlasnika električnih vozila bi bila prilično zauzeta, a upravljanje energijom u vozilu bi predstavljalo dodatno opterećenje. Odnosno, jednostavno rečeno, korisnik bi trebao da ima stalni uvid u to koliko je energije prodao, koliko mu je ostalo u vozilu i kada mora da se dopuni, da li je energija tada po višoj ili nižoj tarifi i na kraju, da li je zaradio uopšte. Shodno navedenom, novi koncept bi se temeljio na tome da „mreža“ kao operater preuzme potpuno brigu o energetsom i finansijskom menadžmentu. Na primjer, korisnik električnog vozila je došao sa posla, priključio je vozilo na bidirekcionni punjač, daje operateru energiju skladištenu u vozilu na raspolaganje tokom ostatka dana, ali ujutro želi da vozilo ponovo bude napunjeno kako bi ga nesmetano koristio i, što je najvažnije, da ostvari finansijsku dobit na kraju ciklusa. Tipičan primjer sekvence koja bi se odvijala je sledeći:

1. Korisnik električnog vozila dolazi sa posla u npr. 16h i priključuje vozilo sa npr. 80% napunjenosti baterije.
2. Daje na raspolaganje operateru energiju iz vozila na korišćenje sa definisanim sigurnosnim minimumom od 30% u slučaju hitnosti korišćenja vozila.
3. Zahtijeva npr. 90% *SoC* ujutro u 7h i očekuje finansijsku dobit.

Sa druge strane, „mreža“ kao operater koristila bi energiju uskladištenu u vozilu da popravi energetske prilike u mreži, odnosno da „ispegla“ krivu potrošnje.

Pretpostavke vezane za novi koncept su sledeće:

- svi akteri imaju svoje ciljeve koje žele da ostvare i
- vrši se bidirekciona razmjena snage u zavisnosti od zahtjeva korisnika sa jedne strane, a sa druge strane "mreža" vrši sopstvenu optimizaciju tako što koristi vrijeme i energiju pruženu od strane korisnika da prilagodi svoju krivu potrošnje svojim potrebama, a bezuslovno garantuje korisniku željeni „state of charge“ na kraju ciklusa i snadbijevanje potrošača.



Slika 4.2.1. Proizvoljna kriva opterećenja

Slika 4.2.1. ilustruje proizvoljnu krive opterećenja, odnosno dnevnih potreba za angažovanom snagom. Narandžasta linija predstavlja angažovanu snagu po satu, dok crvena isprekidana linija predstavlja aritmetičku sredinu niza, koja u ovom slučaju predstavlja skup od 24 tačke, čije vrijednosti predstavljaju angažovanu snagu u određenom satu. Dakle, dnevni dijagram potrošnje se može tumačiti kao funkcija $f(x)$, dok x predstavlja vremenske trenutke. Na osnovu *Teoreme o srednjoj vrijednosti integrala*³⁸, važi da je površina ispod integrala na definisanom intervalu, jednaka površini ispod horizontale čija je vrijednost zapravo aritmetička sredina funkcije $f(x)$ na istom intervalu. Odnosno, matematički definisano:

⇒ ako je $f(x)$ neprekidna na intervalu $[a,b]$, tada postoji tačka $c \in [a,b]$, tako da važi:

$$f(c) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx, \quad (5)$$

odnosno

$$\int_a^b f(x) dx = f(c)(b-a) \quad (6)$$

Iz navedenog slijedi, da sva energija koja se nalazi iznad srednje vrijednosti, mogla bi se „smjestiti“ ispod nje korišćenjem uređaja za skladištenje energije. Postojanje takvih uređaja iziskuje dodatna ulaganja i proračunato pozicioniranje. Međutim, obzirom da električna vozila imaju baterije prilično velikog kapaciteta, moguće ih je iskoristiti za istu svrhu, ali tada električna vozila zapravo postaju obične baterije i gube svoju primarnu svrhu. Dakle, da bi se električna vozila iskoristila za „peglanje“ krive opterećenja, neophodno je uzeti u obzir zahtjeve po pitanju napunjenosti baterija vozila, kako bi ovakav koncept bio održiv. U principu, da li će se vozila „ponašati“ kao izvor, bafer ili potrošač zavisi od krajnjeg bilansa snaga, odnosno ukoliko se vozilo priključi u mrežu sa ciljem da na kraju ciklusa postigne veći *SoC* od početnog, u konačnom bilansu, to vozilo predstavlja potrošač, pa samim tim potreba za angažovanom snagom tokom dana je veća, što implicira da će i prosječno opterećenje biti veće. U slučaju da korisnik električnog vozila zahtjeva isti *SoC* na početku i na kraju ciklusa, tada se vozilo može smatrati *baferom* energije i njegovo priključenje u mrežu neće dovesti do promjene konačnog bilansa snaga/energije. Na kraju, ukoliko korisnik na kraju ciklusa želi manji *SoC* od početnog, to električno vozilo se tretira kao izvor. Shodno navedenom, moguće je zaključiti da ukoliko se proračuna nova srednja vrijednost, teorijski „ispod“ nje je moguće „smjestiti“ svu energiju isporučenu tokom jednog dana, odnosno svako vozilo koje se priključi u mrežu, ukoliko remeti

³⁸ <https://courses.lumenlearning.com/calculus2/chapter/the-mean-value-theorem-for-integrals/>

postojeći bilans snaga, remetiće i vrijednost prosječnog opterećenja. U ovom poglavlju opisan je način izbora optimizacionog cilja, dok će u sledećem poglavlju biti opisan optimizacioni algoritam i parametri nepходni za rad algoritma.

4.3. Primjena *Particle Swarm Optimization (PSO)* algoritma u rješavanju posmatranog optimizacionog problema

Algoritam optimizacije rojem čestica (*eng. Particle Swarm Optimization-PSO*) je iterativni optimizacioni algoritam koji poboljšava potencijalno rešenje pokušavajući da ga približi konačnom rešenju. Simbolika PSO algoritma zasniva se na posmatranju kretanja ptica u jatima i insekata u rojevima. Koncizan opis PSO algoritma može se naći u [113]. Suština *PSO* algoritma jeste da on traži rešenje u unaprijed definisanim granicama. Na početku, nepходno je definisati opsege svih parametara, kao i početne vrijednosti traženih varijabli, koje na početku najčešće uzimaju nasumičnu vrijednosti iz definisanog opsega. Nakon definisanja početnih vrijednosti, i granica, *PSO* algoritam shodno svojim matematičkim pravilima iterativno pretražuje definisanu oblast u cilju pronalaska optimalnog rješenja. Kretanje promjenjivih u definisanom prostoru pretrage vrši se na osnovu prethodno precizirane objektivne funkcije, odnosno kriterijumske funkcije. Vrijednost ove funkcije definiše i tačnost i blizinu optimalnog rješenja problema. Minimizovanje kriterijumske funkcije na nulu smatra se idealnim rješenjem, ali je u praksi to teško postići. Karakteristika *PSO* algoritma je u tome da se za svaki koeficijent tokom iteracija definiše sopstvena i globalna poziciju. Sopstvena pozicija karakteristična je za svaku varijablu, dok je globalni optimum zajednički za sve. Tokom iteracija, vrijednost koeficijenata se mijenja, a konačno rješenje predstavlja globalni optimum, tj. rješenje koje ima minimalnu vrijednost objektivne funkcije. Međutim, promjene vrijednosti parametara iz iteracije u iteraciju uslovljene su i komponentom inercije, kojom se izražava težnja da se kretanje varijable (njena brzina i pozicija) nastavi po prethodnom smjeru [25].

Ako su v_i i x_i vektori brzine i pozicije, respektivno, pripisani i -toj varijabli, p_i - njena trenutna najbolja pozicija, a g – trenutni globalni optimum, onda se kretanje u prostoru može opisati sljedećom matematičkom formulacijom:

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + c_1(p_i(t) - x_i(t)) + c_2(g(t) - x_i(t)) \quad (7)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1), \quad (8)$$

gdje su c_1 i c_2 , konstante ubrzanja, parametar w težinski koeficijent inercije, dok je t korak iteracije.

Zadatak koji je potrebno riješiti u ovom radu je - kako na osnovu poznate karakteristike

opterećenja mreže rasporediti punjenje, odnosno pražnjenje automobila u cilju ujednačenja krive potrošnje, uz uvažavanje stepena napunjenosti baterija automobila.

Sekvenca započinje najprije analizom bilansa snaga dostupnih vozila. Spisak vozila dat je u Tabeli 4.3.1.

Tabela 4.3.1. Spisak vozila koja učestvuju u V2G programu

	SoC ₁	SoC ₂	SoC ₃
Vozilo 1	A1(%)	B1(%)	C1(%)
Vozilo 2	A2(%)	B2(%)	C2(%)
Vozilo n	An(%)	Bn(%)	Cn(%)

Na osnovu postavljenih uslova po pitanju *SoC*-a, može se zaključiti da su u konačnom bilansu sva vozila potrošači ukoliko je *SoC*₃ veći od *SoC*₁. Odnosno, sva vozila će tokom perioda vršnog opterećenja ustupiti energiju dostupnu u baterijama, ali na kraju ciklusa neophodno je ostvariti energetska suficit. Dnevne potrebe za angažovanom snagom proizvoljne mreže prikazane su na slici 4.2.1. sa **P** u [kW], odnosno, prosječno dnevno opterećenje iznosi **P/24** [kW]. Međutim, obzirom da navedena vozila na kraju ciklusa „žele“ da ostvare energetska suficit, neophodno je uračunati energiju koju na kraju ciklusa potražuju električna vozila. *SoC*₁ predstavlja stanje napunjenosti baterije sa kojim se vozilo priključuje u mrežu. *SoC*₂ stanje napunjenosti baterije koje je minimalno prihvatljivo za korisnika ili stanje koje korisnik električnog vozila želi da postigne u kratkom vremenskom periodu. *SoC*₃ je stanje napunjenosti koje korisnik električnog vozila želi na kraju ciklusa. Shodno navedenom, snaga koju električna vozila potražuju na kraju ciklusa računa se na sledeći način:

$$P_{vozila} = \sum_i^n (SoC_3 * C - SoC_1 * C) \quad (9)$$

gdje je C kapacitet baterije.

Na osnovu dobijene snage potražnje električnih vozila, moguće je izračunati novu srednju vrijednost dnevnog opterećenja:

$$P_{avg} = \frac{(P_{ang} + P_{vozila})}{24}, \quad (10)$$

gdje je P_{avg} nova srednja vrijednost, a P_{ang} suma cjelokupne angažovane snage tokom dana, bez uticaja električnih vozila.

Ukoliko se analizira grafik sa slike 4.2.1, a za mjeru preopterećenja uzmemo snagu iznad

srednje vrijednosti opterećenja, a podopterećenja kao snagu ispod iste u periodu od T-6h, prostim matematičkim operacijama može se izračunati koliko iznose njihove vrijednosti. Nephodno je naglasiti da preopterećenje i podopterećenje nisu fiksne vrijednosti, već promjenjive koje se razlikuju u zavisnosti od energije koju korisnici električnih vozila žele na kraju ciklusa. Ako se posmatra kriva opterećenja bez uticaja vozila, u posmatranom intervalu dolazi se do cifre od A kW preopterećenja i B kW podopterećenja. Dakle, u ovom slučaju idealno bi bilo naći takvu vrijednost, koja će period od T-23h i 23h-6h da razdvaja polje tako da preopterećenje i podopterećenje budu $\frac{(A+B)}{2}$ kW, pri čemu T predstavlja trenutak kada se vozila priključuju. Shodno navedenom, cilj je razmotriti razmjenu energije na sledeći način:

$$P_{ponudeno} = \sum_i^n (SoC_2(i) - SoC_1(i)) * C \quad (11)$$

$$P_{traženo} = \sum_i^n (SoC_3(i) - SoC_2(i)) * C \quad (12)$$

Ukoliko je $P_{ponudeno} \gg A$, a $P_{traženo} \gg B$, razmjena energije na definisani način dovela bi prosto da razmjene opterećenja. Odnosno, tokom dana pomoću električnih vozila, opterećenje bi bilo spušteno, ali tokom noći usled obaveze vraćanja energije vozilima, mreža bi bila preopterećena. Zbog navedenog, P_{avg} definisano ranije, imalo bi smisla ako bi vozila bila priključena 24 h. Kako bi se prevazišao ovaj problem, P_{avg} se definiše na sledeći način :

$$P_{avgn} = \frac{(P_{ang}(T - 24) + P_{vozila})}{(24 - T)} \quad (13)$$

Ovako dobijena srednja vrijednost predstavlja optimizacioni cilj. Dakle, teorijski, ispod ovako dobijenog P_{avgn} moguće je „smjestiti“ cjelokupne potrebe za angažovanom snagom tokom posmatranog intervala sa jedne strane, a sa druge strane, dovodenje sistema u definisanu tačku P_{avgn} za posledicu će imati da sva vozila mogu postići zahtjevani SoC. Kako je ranije navedeno, ukoliko se pojavi više vozila koja injektiraju više energije u mrežu od samih potreba mreže, može doći do zamjene opterećenja. Kako bi se izbjegla situacija da neka vozila budu izostavljena iz V2G programa, zbog tehničkih zahtjeva mreže, nephodno je uvesti parametar koji će skalirati ravnopravno snagu uzetu iz svakog vozila, kako nijedan korisnik ne bi na kraju ciklusa ostao bez profita. Najprije, nephodan je podatak o preopterećenju, koji se dobija kao suma razlike snaga u intervalu T-23h početne

krive i nove srednje vrijednosti za isti interval³⁹. Odnosno:

$$P_{preopterećenja} = \sum P_{ang(T-23h)} - P_{avgn(T-23)} \quad (14)$$

Potom, nepходно je definisati snage „davaoca“ i „primaoca“ energije. Iako suština novog V2G koncepta predviđa da vozila injektiraju energiju u mrežu, ovaj koncept uzima u obzir i vozila koja se pune na standardan način, odnosno vozila koja predstavljaju dodatno opterećenje. Pod pojmom „davalac“ podrazumijeva se vozilo koje injektira snagu u mrežu, dok pojam „primalac“ upućuje na vozila koja uzimaju snagu iz mreže. Odnosno, ako je $SoC_1 > SoC_2$ vozilo je davalac, a u koliko je $SoC_1 < SoC_2$, vozilo je primalac. Zbog svega prethodno navedenog, sva vozila se svrstavaju u jednu od navedenih grupa i ukupna suma snaga se računa na sledeći način:

$$SoC_1 > SoC_2, P_{davaoca} = \sum (SoC_1 - SoC_2) * C \quad (15)$$

$$SoC_1 < SoC_2, P_{primaoca} = \sum (SoC_1 - SoC_2) * C \quad (16)$$

Zatim, računa se parametar za skaliranje na sledeći način:

$$\alpha = \frac{P_{preoptećenja} + P_{primaoca}}{P_{davaoca}} \quad (17)$$

Potom, nepходно je izvršiti korekciju SoC_2 za svako vozilo po sledećem principu:

$$SoC_{2n} = SoC_1 - \alpha(SoC_1 - SoC_2) \quad (18)$$

Ovakve uopštene podatke je potrebno prosljediti algoritmu. U ovom konceptu za dobijanje optimalnih rezultata korišćen je *PSO* algoritam. Generalno, ovakav pristup je pogodan za većinu optimizacionih algoritma, dok je *PSO* korišćen kao alat za dobijanje optimalnih rezultata. U okviru samog algoritma definisana su sigurnosna *SoC* ograničenja na 30% i 95%, kao donja i gornja granica respektivno (kao minimalno i maksimalno prihvatljiva stanja za litijum jonske baterije). Takođe, te granice se koriste kako bi se zaustavio proces punjenja ili pražnjenja u skladu sa definisanim zahtjevima korisnika, tako što se zahtjevani *SoC* postavlja kao sigurnosni. Međutim, najvažniji dio

³⁹ Oduzmu se vektori iste dužine, a zatim se sumira niz.

algoritma je njegova kriterijumska funkcija. Dakle, vozila jedno po jedno “prolaze“ kroz algoritam, pri čemu prvo vozilo vidi početnu karakteristiku, a svako sledeće vozilo izmijenjenu karakteristiku usled djelovanja prethodnog vozila. Na ovaj način može se simulirati istovremeni rad svih vozila u mreži.

Kriterijumskoj funkciji se prosleđuju sledeći podaci:

- Vrijeme priključenja (kako bi dobili odgovarajući vektor vrijednosti i razmatrali samo željeni interval),
- Snaga punjenja ili pražnjenja vozila,
- *P_{ažurirano}*, koje predstavlja vektor trenutne krive potrošnje (samo će prvo vozilo u nizu vidjeti karakteristiku opterećenja kako je ona izgledala prije priključenja, dok će sva ostala dobijati neku novu krivu). Cilj je naći optimalne snage punjenja/pražnjenja tako da se minimizuje kriterijumsku funkciju:

$$S = \sum_T^{Kraj\ ciklusa} P_{opt}(i) - P_{avgn} + \sum_T^{Kraj\ ciklusa} P_{sch}(i), \quad (19)$$

gdje je:

- *S* – suma koju je potrebno minimizovati,
- *P_{opt}(i)* – opterećenje mreže u i-tom satu, za svako sledeće vozilo $P_{opt} = P_{ažurirano}$,
- *P_{avgn}* – nova srednja vrijednost nakon uzimanja snage potražnje električnih vozila i
- *P_{sch}(i)* – planirana snaga za injektiranje/uzimanje mreži.

Sistem zbog različite razmjene snage, odnosno rasporeda priključenja vozila, može da „upadne“ u neki vid ravnoteže iz kojeg neće moći da izađe. Na primjer, pomoću tri vozila je izvršen „*peak shaving*“ opterećenja do srednje vrijednosti, pa zatim četvrto vozilo koje treba da se prazni „ne vidi“ opterećenje koje treba da spusti, a iza njega postoji vozilo koje treba puniti. Na taj način se otvara se novo pitanje same koordinacije vozilima. Najpraktičnije je vozila „ukrstiti“, odnosno težiti da:

$$\sum_{i=1}^n P_d(i) - \sum_{i=1}^m P_p(i) + \sum_{i=1}^k P_v(i) = 0, \quad (20)$$

gdje je:

- n - broj vozila koji daju energiju mreži
- m - broj vozila koji uzimaju energiju iz mreže
- k - kraj posmatranog intervala
- $Pd(i)$ - snaga koju „nudi“ i -to vozilo
- $Pp(i)$ – snagu koju „traži“ i -to vozilo
- $Pv(i)$ – snaga preopterećenja u i -tom satu

Takođe, stanje ravnoteže može da zaustavi konvergenciju algoritma zbog dostignute srednje vrijednosti prije nego što su sva vozila završila definisani ciklus, odnosno ako vozilo treba puniti, neophodno je na postojeću srednju snagu dodati i traženu snagu po satu, pri čemu će se vozilo puniti do vrijednosti koja su definisana SoC ograničenjima:

$$P_{avgn} = P_{avgn} + \frac{(SoC_2 - SoC_1) * C}{T - T_1}, \quad (21)$$

gdje je T_1 kraj intervala u kojem se vozilo puni.

SoC ograničenja se definišu na sledeći način:

$$SoC_1 > SoC_2, \text{ Donja sigurno granica} = SoC_1 \quad (22)$$

$$SoC_1 < SoC_2, \text{ Gornja sigurno granica} = SoC_2 \quad (23)$$

Pseudo kod algoritma dat je na slici 4.3.2.

```

1. Ulazni podaci( SoC1,SoC2, SoC3, početna kriva opterećenja,vrijeme priključenja,
   tarifa 1, tarifa 2,C(kapacitet baterija)
2. Računanje bilansa snaga
3. IF ( $\sum Pd - \sum Pp - \sum Pv > 0$ ) THEN
4. |  $ind \leftarrow 1$ 
5. ELSE  $ind \leftarrow 0$ 
6. IF ( $ind == 1$ ) THEN
7. |  $\alpha = (\sum Ppre + \sum Pprim) / \sum Pdav$ ;
8. ELSE  $\alpha = 1$ ;
9. WHILE  $i < n$ 
10. | DO  $SoC2(i) = SoC1(i) - \alpha(SoC1(i) - SoC2(i))$ ;
11. | DO PSO;
12. | DO Snaga razmjene $\{i\} = bestVariables(i)$ ;
13. FOR  $j \leftarrow n$ 
14. | DO  $s = cell2mat(Snaga\ razmjene\{i\})$ ;
15. | FOR  $q \leftarrow (24 - vrijeme\ priključenja)$ 
16. | | DO  $CharDischar(j) = SoC1 * C + s(q)$ ;
17. | | DO Pokretanje sekvece za obračun zarade

```

Slika 4.3.2. Pseudo kod V2G programa

Pseudo kod *Particle Swarm Optimization* (PSO) algoritma dat je na slici 4.3.3.

```

1. IF  $SoC_1 \geq SoC_2$ 
2.   THEN  $donjaGranica \leftarrow SoC_2, UB=0; LB=- Snaga\ punjača$ 
3. ELSE  $gornjaGranica \leftarrow SoC_2, UB= Snaga\ punjača; LB=0$ 
4. FOR  $i \leftarrow MAXRUN$  DO
5.   FOR  $j \leq 24$ - vrijeme priključenja
6.      $xo(j) = round(LB(j) + random * (UB(j) - LB(j)))$ ;
7.   DO  $Psch = xo + k$ 
8.   IF  $Psch > Snaga\ punča$  THEN  $Psch = Snaga\ punjača$ 
9.   IF  $Psch < -Snaga\ punča$  THEN  $Psch = - Snaga\ punjača$ 
10.  DO  $SoC = SoC + Psch / C$ 
11.  DO  $k = k - (Psch - xo)$ 
12.  IF  $SoC < donjaGranica$ 
13.    THEN  $SoC = donjaGranica, k = k - (donjaGranica - SoC) * C$ 
14.  IF  $SoC < donjaGranica$ 
15.    THEN  $SoC = gornjaGranica, k = k - (SoC - gornjaGranica) * C$ 
16.  IF  $k > 0 \cap k > xo$  THEN  $xo = 0$ 
17.  ELSE IF  $k < 0 \cap k < xo$  THEN  $xo = 0$ 
18.  ELSE  $xo = xo - k$ 
19.  DO  $f = S(xo, Popt, Pavgn), fmin = min(s), pbest = xo, gbest = xo(:)$ 
20.  WHILE  $ite < maxite \ ||\ tolerance > 10^{-18}$ 
21.    DO  $w = wmax - (wmax - wmin) * ite / maxite, x = xo$ 
22.    FOR  $m \leftarrow Broj\ čestica$ 
23.      FOR  $t \leftarrow (24 - vrijeme\ priključenja)$ 
24.         $v = w * v + c_1 random() * (pbest - x) + c_2 random() * (gbest - x)$ 
25.         $x = x + v$ 
26.        IF  $x < -Snaga\ punjača$  THEN  $x = -Snaga\ punjača$ 
27.        IF  $x > Snaga\ punjača$  THEN  $x = Snaga\ punjača$ 
28.      7-19
29.    IF  $min(gbest(i) < min(gbest(i-1)))$  THEN  $runbest = gbest(i)$ 

```

Slika 4.3.3. Pseudo kod PSO algoritma u V2G programu

Simulacioni rezultati i analiza različitih scenarija po pitanju zahtjeva korisnika i na kraju sama efikasnost predloženog metoda uz osvrt na finansijski benefit i načina obračuna prihoda biće data u **Poglavlju 5.**

5. Rezultati simulacija

U cilju analize uticaja novog V2G koncepta na mrežu, u ovom poglavlju će biti prikazano pet varijanti primjene koncepta u „tradicionalnom”⁴⁰ distributivnom sistemu. Obzirom da je cilj primjene V2G koncepta smanjenje vrijednosti vršne snage, kao optimizacioni cilj mreže koristiće se srednja vrijednost opterećenja na posmatranom intervalu. Naime, analiziraće se sledeće varijante:

- **Varijanta 1** - simuliraće se priliv većeg broja vozila od neophodnog kako bi mreža postigla svoj optimizacioni cilj.
- **Varijanta 2** - mreži nedostaje energije preuzete iz baterija električnih vozila kako bi postigla svoj optimizacioni cilj.
- **Varijanta 3** - u mrežu se priključuju korisnici koji žele da imperativno napune baterije svojih vozila. U ovom poglavlju biće opisana situacija u kojoj vozila „peglažu” uticaj drugih vozila, odnosno mreža “vrši” V2V.
- **Varijanta 4**- simuliraće priliv dovoljnog broja vozila kako bi bio zadovoljen uslov iz **Potpoglavlja 4.3** (jednačina (20)) o bilansu snaga.
- **Varijanta 5** - simulira se priliv vozila koja učestvuju u V2G konceptu i inicijalno zadaju uslove koji su suprotni osnovnim principima V2G koncepta.

Obzirom da V2G predstavlja relativno nov pojam, jako mali broj vozila zadovoljava kriterijume neophodne za učešće u V2G-u. Trenutno, jedino vozilo koje je testirano i serijski se proizvodi, a posjeduje V2G tehnologiju, je *Nissan Leaf*. *Volkswagen* ističe da će sva električna vozila od 2023. godine koja budu proizvedena posjedovati V2G tehnologiju sa umjereno-brzim punjenjem, odnosno pražnjenjem⁴¹. S tim u vezi, u simulacijama je predstavljeno da sva vozila imaju kapacitet od 65 kWh i snagu punjenja/pražnjenja od 7.7 kW. Ove brojke su odabrane kao prosječne vrijednosti karakteristične za električna vozila trenutno dostupna na tržištu.

U ovom poglavlju biće opisani simulacioni rezultati dobijeni primjenom predloženog V2G koncepta na dijelu distributivne mreže na izlazu iz TS 10/0.4 kV/kV iz EDS Nikšić. Podaci

⁴⁰Napomena: Riječ „tradicionalni“ u ovom kontekstu koristi za opisivanje distributivnog sistema koji ne sadrži distribuirane izvore, već se napajanje obezbjeđuje samo iz tačaka konekcije sa prenosnim sistemom. Kako je opisano u poglavlju 4. Ovakav sistem zahtjeva izuzetno precizne sisteme mjerenja potrošnje energije, kao i adekvatne senzore i komunikaciju kako bi čitav process tekao nesmetao.

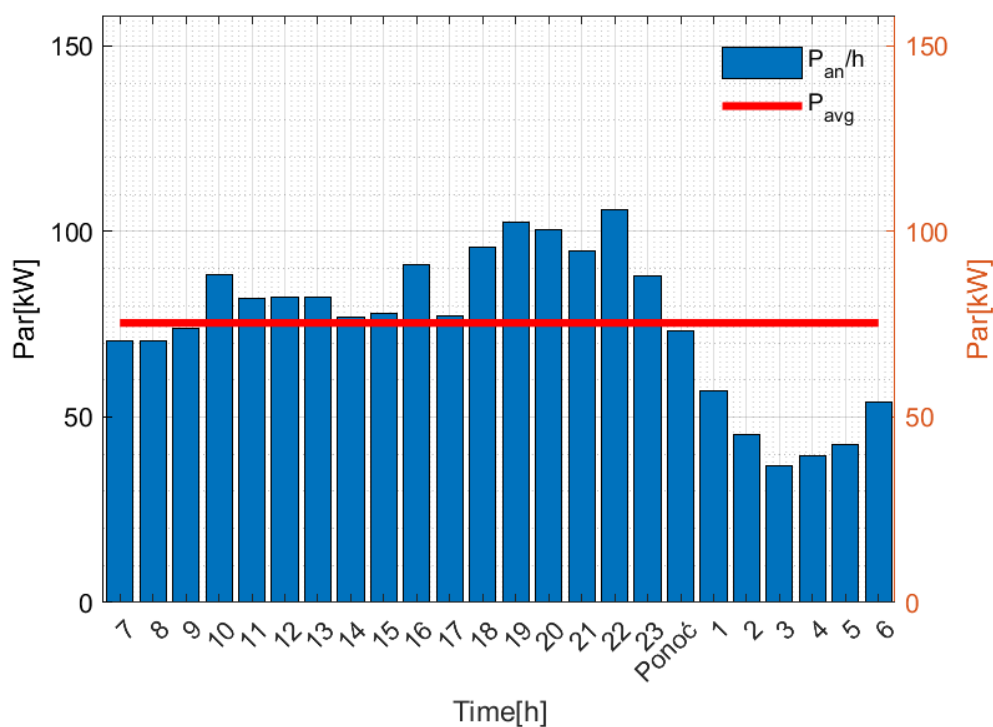
⁴¹ <https://www.handelsblatt.com/mobilitaet/elektromobilitaet/elektromobilitaet-bidirektionales-laden-so-will-volkswagen-am-speichern-von-strom-verdienen/27052182.html?ticket=ST-1932499-X1gulRmA6zm34i93qirA-cas01.example.org>

predstavljene trafostanice dobijeni od Službe za AMM (Sektor za mjerenje – DOO “Crnogorski elektrodistributivni sistem”, Podgorica), a čiji će dijagrami opterećenja biti korišćeni u simulacijama, dati su u Tabeli 5.1.

Tabela 5. 1. Podaci o trafostanici TS-074 ZEKOVIC

<i>STT</i>	<i>Pametno brojilo</i>	<i>Trafostanica</i>	<i>kVA</i>	<i>Odnos transformacije</i>	<i>Konstanta</i>	<i>Broj potrošača</i>
<i>150074A</i>	<i>12N9M5C2516601225</i>	<i>TS-074 ZEKOVIC</i>	<i>630</i>	<i>1000/5</i>	<i>200</i>	<i>125</i>

Na slici 5.1 dat je dnevni dijagram opterećenja na izlazu pomenute trafostanice. Predstavljena kriva opterećenja vizuelizuje podatke za 10.10.2022. godine, gdje P_{ang} predstavlja angažovanu satnu snagu izraženu u kW, a P_{avg} srednju vrijednost opterećenja tokom 24h.



Slika 5. 1 Dijagram angažovane snage tokom 24 sata - TS 074 Zeković 10/0.4 kV/kV

Kao i većina potrošačkih područja (izuzev industrijskih potrošača), posmatrano potrošačko područje ima približno sličan oblik krive opterećenja. Za stambene objekte karakteristično je da tokom noći preovladavaju periodi podopterećenja, a tokom popodneva uobičajno je da je sistem preopterećen. Ovakva kriva je očekivana i u skladu sa uobičajnim ponašanjem stanovništva. Veća odstupanja se mogu pojaviti tokom ljetnjih perioda, kada je usled potrebe za klimatizacijom, tokom

većeg dijela dana (izuzev noći), sistem preopterećen.

Dnevna potrebna za angažovanom snagom računa se kao kumulativna suma satnog opterećenja prema sledećoj relaciji:

$$P_u = \sum_{i=1}^{24} P_s(i), \quad (24)$$

gdje je $P_s(i)$ angažovana snaga u i -tom satu.

Kumulativna potreba za angažovanom dnevnom snagom shodno relaciji (24), a u skladu sa satnim opterećenjem predstavljene mreže iznosi 1808.6 kW. U cilju određivanja konačne dobiti učešća vozila u V2G konceptu, biće korišćen dvotarifni sistem koji se trenutno primjenjuje u Crnoj Gori (u periodu od 7h-23h cijena električne energije će se prodavati/kupovati po cijeni od 0.12933€/kWh, odnosno primjenjivaće se Tarifa 1, dok će u periodima od 23h do 7h cijena električne energije iznositi 0.0647 €/kWh - Tarifa 2). Ovakve cijene su formirane na osnovu trenutnih tarifa u Crnoj Gori, sa uračunatim PDV-om i gubicima u mreži. Inicijalno, svaka simulacija će se odvijati u intervalu od 16h-6h. Ova dva trenutka odabrana su na osnovu uobičajnog ponašanja većeg dijela stanovništva da, nakon dolaska sa posla, su u mogućnosti da ostave vozilo priključeno na bidirekcionu punjač do jutarnjih časova. Ukoliko se ugovoreni interval poštuje do samog kraja, korisniku se garantuje i energetska i ekonomski suficit, u protivnom, bilans se svodi na vremenski trenutak kada je vozilo uklonjeno sa punjača, odnosno, kada je ciklus prekinut.

5.1. Varijanta 1

U prvoj varijanti posmatrana je situacija u kojoj se vozila koja se priključuju na kućne bidirekcionu punjače pune, odnosno prazne, sa istim inicijalnim zahtjevima predstavljenim u Tabeli 5.1.1. U ovoj simulaciji, učestvovala će šest vozila koja posjeduju V2G tehnologiju i priključuju se u istom trenutku, odnosno u 16h.

Kao što je definisano u **Potpoglavlju 4.3.** promjenjive SoC_1 , SoC_2 i SoC_3 predstavljaju stanje napunjenosti baterije električnog vozila izraženo u procentima i to:

- SoC_1 - stanje napunjenosti baterije sa kojim se vozilo priključuje u mrežu.
- SoC_2 - stanje napunjenosti baterije koje je minimalno prihvatljivo za korisnika ili stanje koje korisnik električnog vozila želi da postigne u kratkom vremenskom periodu.
- SoC_3 - stanje napunjenosti koje korisnik električnog vozila želi na kraju ciklusa.

Tabela 5.1.1 Inicijalni uslovi vlasnika električnih vozila u vezi SoC-a. (Varijanta 1)

Vozilo	SoC ₁	SoC ₂	SoC ₃
Vozilo 1	80%	30%	90%
Vozilo 2	80%	30%	90%
Vozilo 3	80%	30%	90%
Vozilo 4	80%	30%	90%
Vozilo 5	80%	30%	90%
Vozilo 6	80%	30%	90%

Dakle, obzirom na početne inicijalne uslove, može se zaključiti sledeće:

- Svako od vozila na početku ciklusa priključuje se sa 80% SoC-a, odnosno sa 52 kWh.
- Inicijalni zahtjev korisnika jeste da proda po 32.5 kWh (proizvod razlike SoC_2 i SoC_1 i kapaciteta baterije), odnosno ukupno 195 kWh za svih šest vozila.
- Cilj svih korisnika jeste da na kraju ciklusa ostvare energetski suficit od 10% u odnosu na početni, odnosno 6.5 kWh.

U skladu sa postupkom koji je opisan u **Potpoglavlju 4.3**, zaključuje se da su navedena vozila u konačnom bilansu potrošači, odnosno kada se uzme u obzir potreba za angažovanom snagom uobičajnih potrošača (početna kriva potrošnje) i snaga koju potražuju električna vozila, dolazi se do nove prosječne intervalne potrošnje od 76.2267 kW na osnovu relacije (13), a u skladu sa proračunom na osnovu relacija (25) i (26)

$$P_{vozila} = \sum_{i=1}^n (SoC_3(i) - SoC_1(i)) * C = 39kWh \quad (25)$$

$$P_{avgn} = \frac{P_{ang}(T - 24) + P_{vozila}}{(24h - T)} = \frac{\sum_{i=T-6}^{24} P_{ang}(i) + 39}{24 - (T - 6)} = 76.2267kW \quad (26)$$

gdje $P_{ang}(i)$ predstavlja angažovanu snagu u i -tom satu izraženu u kW, dok P_{vozila} predstavlja ukupne energetske potrebe električnih vozila na kraju ciklusa.

Na osnovu formule (14) dolazi se do vrijednosti snage preopterećenja od 145.7867 kW na sledeći način:

$$P_{preopterećenja} = \sum P_{ang(T-23h)} - P_{avg(T-23h)} = \sum_{i=T-6}^{24-6} P_{ang}(i) - \sum_1^{23-T} 76.2267kW = 145.7867kW \quad (27)$$

$$SoC_1 > SoC_2, P_{davaoca} = \sum_{i=1}^n (SoC_1(i) - SoC_2(i)) * C = 429kWh \quad (28)$$

gdje $P_{ang}(i)$ - predstavlja angažovanu snagu u i -tom⁴² satu izraženu u kW, P_{avg} - predstavlja novu srednju intervalnu vrijednost, a $P_{davaoca}$ - ukupnu količinu energije koju je moguće injektirati iz baterija vozila.

Shodno relaciji (15), a u skladu sa proračunom iz relacije (28), jasno je da je proračunata snaga preopterećenja manja od snage koju je moguće injektirati iz vozila u mrežu. Pri tome zaključuje se da se jedno vozilo može u potpunosti eliminisati na osnovu predstavljene formule (20) o bilansu snaga. Međutim, takav pristup doveo bi do neravnomjernog preuzimanja energije iz baterija električnih vozila korisnika koji učestvuju, pa se primjenjuje skaliranje prema formulama (17) i (18), a u skladu sa proračunom iz relacije (29). U vezi sa tim, dobijaju se skalirani podaci po pitanju donje granice SoC-a prikazani u Tabeli 5.1.2. Parametar skaliranja α iznosi:

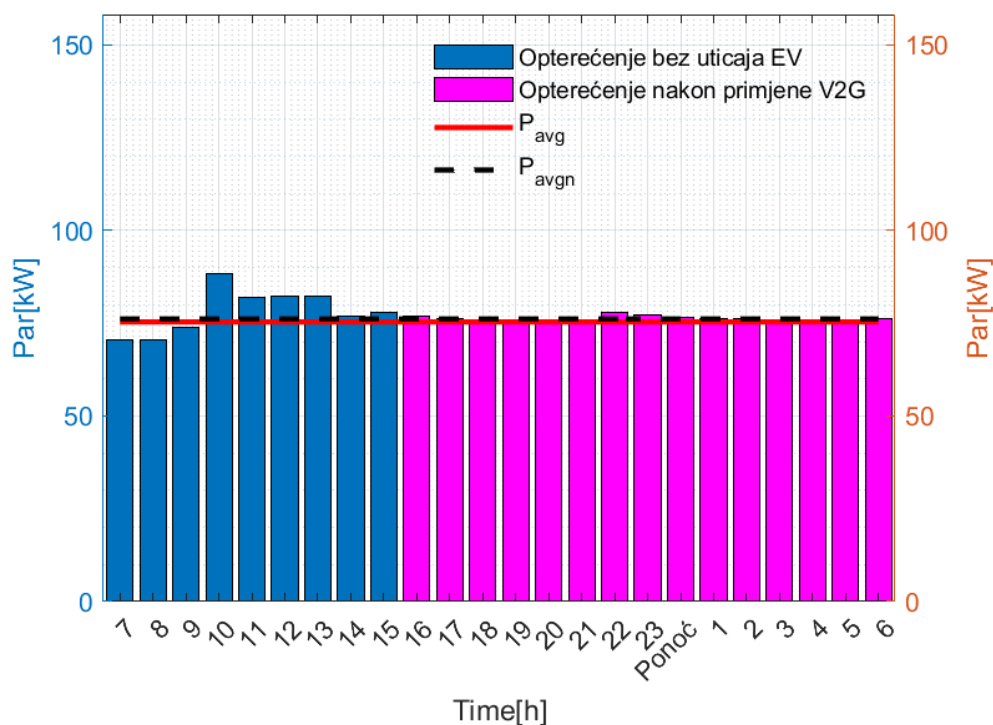
$$\alpha = \frac{P_{preoptećenja} + P_{primaoca}}{P_{davaoca}} = \frac{145.7877kW + 0kW}{195kW} = 0.7467 \quad (29)$$

Tabela 5.1.2 Reinicijalizovani uslovi vlasnika električnih vozila u vezi SoC-a.

Vozilo	SoC ₁	SoC ₂	SoC ₃
Vozilo 1	80%	42.62%	90%
Vozilo 2	80%	42.62%	90%
Vozilo 3	80%	42.62%	90%
Vozilo 4	80%	42.62%	90%
Vozilo 5	80%	42.62%	90%
Vozilo 6	80%	42.62%	90%

Nakon završenog ciklusa, kriva potrošnje tokom posmatranog perioda predstavljena je histogramom sa slike 5.1.1.

⁴² Napomena: Prilikom sumiranja angažovanih snaga, korišćen je niz sa 24 člana, a obzirom da su mjerenja izvršena u periodu od 7h ujutro, do 7h sledećeg jutra, potrebno je posmatrati sat pomjeriti za 6 pozicija unazad. Odnosno, 16h će biti na poziciji 10 u posmatranom nizu P_{ang} .



Slika 5.1.1 Histogram opterećenja nakon primjene V2G u interval 16h-6h (Varijanta 1)

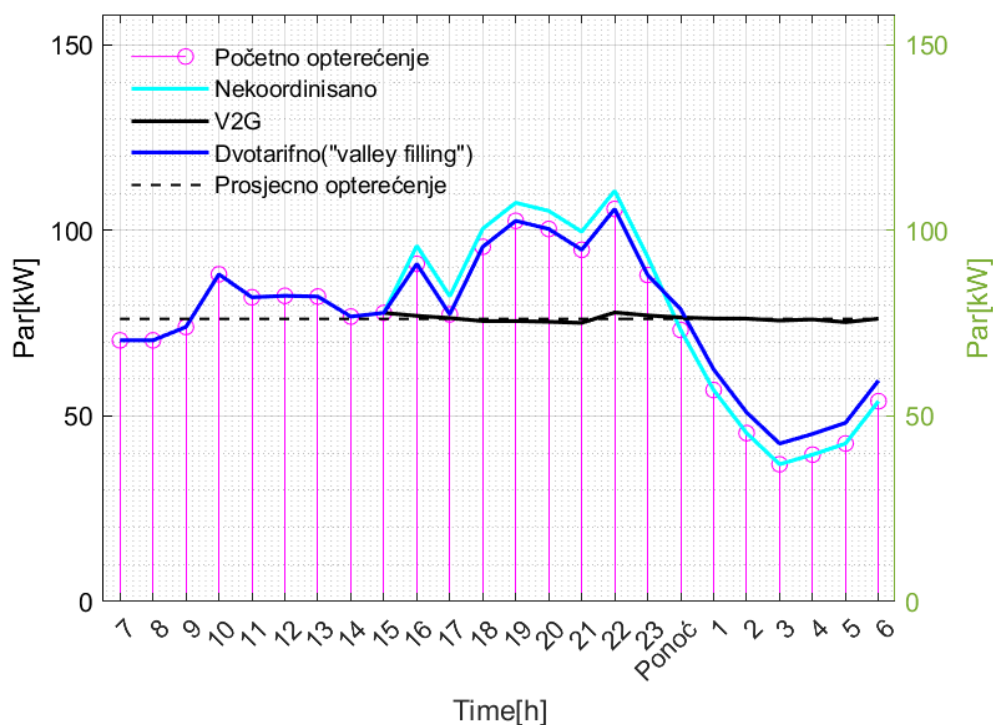
Na osnovu histograma sa slike 5.1.1 moguće je zaključiti da je optimizacioni cilj “mreže” postignut, odnosno uz blaga odstupanja, kriva opterećenja je „ispeglana”. Crvenom linijom označena je srednja vrijednost koja važi za početnu krivu bez uticaja električnih vozila. Obzirom da je da su vozila u konačnom bilansu potraživala svega 39 kWh kumulativno, očekivano je da će i nova srednja vrijednost opterećenja biti gotovo identična početnoj, odnosno:

$$P_{\text{potražnje}} = \sum_{i=1}^n (SoC_3(i) - SoC_1(i)) * C = 39kWh, \quad (30)$$

gdje je n - broj prikuljučenih vozila u mrežu, a C - kapacitet baterije.

Dakle, ovako dobijena kriva, predstavlja energiju koju je potrebno preuzeti iz prenosnog sistema, pri čemu gotovo da nema vršne potrošnje, već je sistem stabilan tokom čitavog dana, što će za posledicu imati bolje naponske prilike i lakšu kontrolu frekvencije.

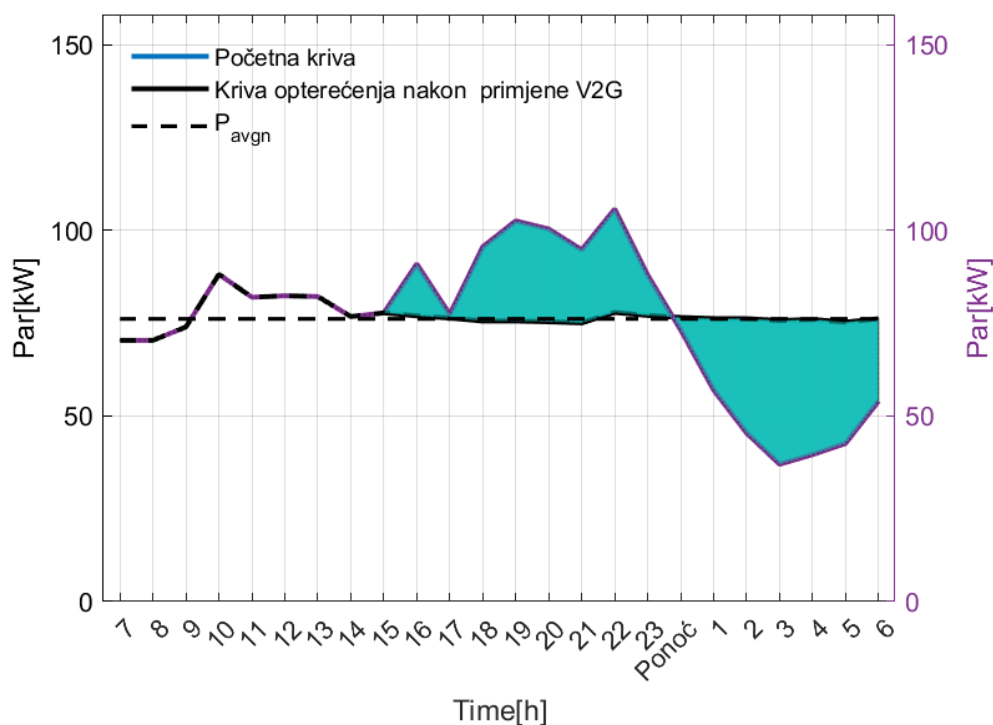
U cilju bolje vizulizacije dobijenih rezultata, kriva opterećenja kreirana V2G programom biće upoređena sa punjenjem iste flote vozila nekoordinisano i tokom niže tarife (eng. „valley filling”). Navedena komparacija prikazana je graficima na slici 5.1.2.



Slika 5.1.2 Komparacija različitih oblika punjenja električnih vozila (Varijanta 1)

U poređenju sa navedenim oblicima punjenja V2G je superiorniji i pruža veću fleksibilnost mreži. Dakle simulacija nekoordinisanog punjenja izvršena je ravnomjernim raspoređivanjem energije potražnje električnih vozila tokom vršnog opterećenja, dok „valley filling” u principu predstavlja punjenje vozila u periodima niske potražnje što predstavlja jedan vid „pametnog punjenja”. Potrebno je naglasiti da nekoordinisano punjenje nije izvršeno primjenom navedenog algoritma, jer sam algoritam i za proces punjenja tokom vršnog opterećenja ima sopstveni vid „pametnog punjenja” i teži da ustabilji mrežu i zaštiti je od preopterećenja.

Poređenje nove krive opterećenja i početne, dato je na slici 5.1.3.

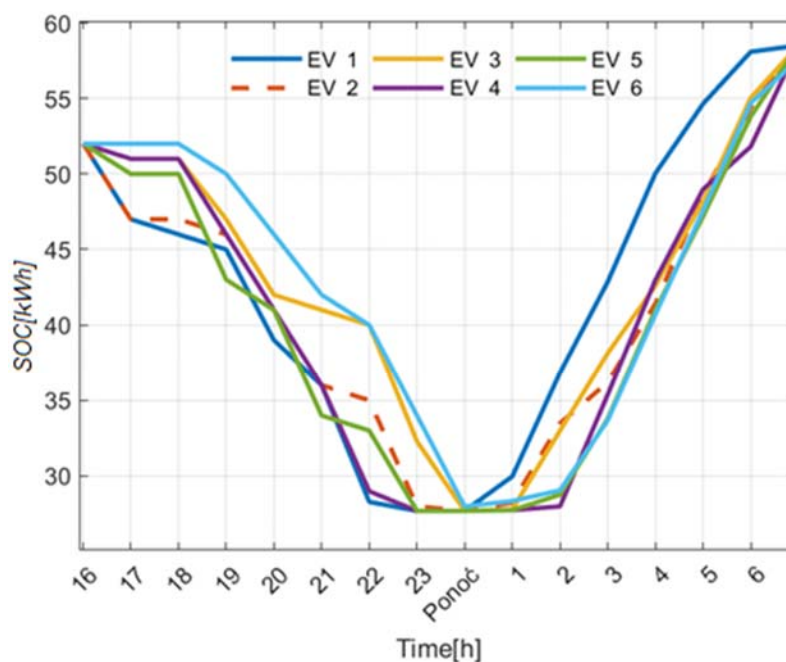


Slika 5.1.3 Komparacija početne krive opterećenja i krive opterećenja nakon primjene V2G (Varijanta 1)

Na osnovu slike 5.1.3 zaključuje se sledeće:

- Krive opterećenja se poklapaju u intervalu od 7h do 16h, obzirom da u tom periodu vozila nijesu uticala na mrežu.
- Nakon priključenja definisane flote, započeto je baferovanje energije, odnosno, vozila su mreži ustupa skladištenu energiju u baterijama sve do trenutka dok nisu dobila signal da je smer energije poželjno okrenuti, što je u konkretnom slučaju ponoć. Nakon toga, vozila su bila na definisanom minimumu *SoC*-a (ne manjem od definisanog od strane korisnika).
- Nakon dobijanja signala o promjeni toka energije, vozila su započela punjenje, čime je počeo proces “popunjavanja doline”, odnosno „*load valley filling*”.

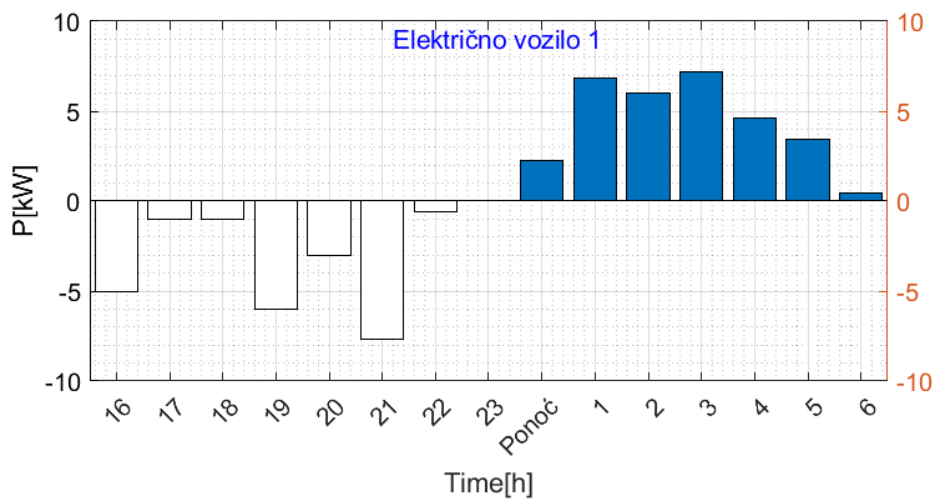
Proces punjenja, odnosno pražnjenja električnih vozila, dat je na slici 5.1.4.



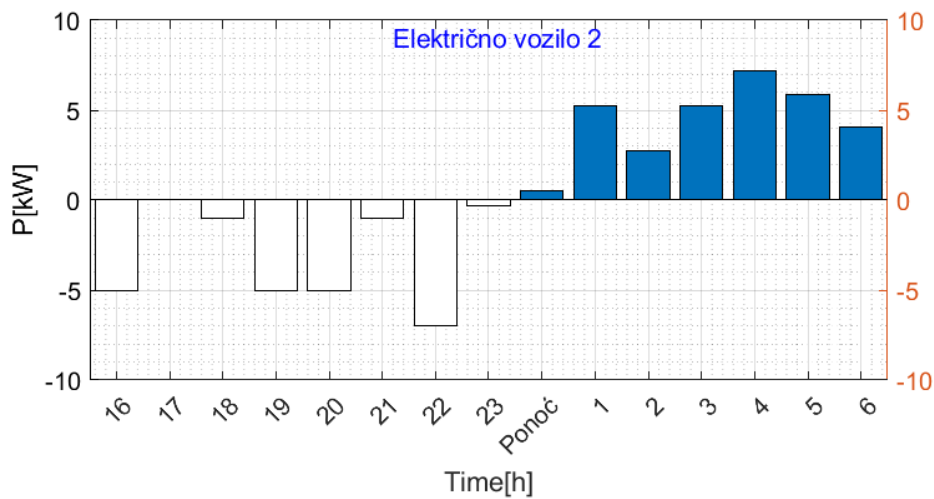
Slika 5.1.4 Proces punjenja i pražnjenja vozila u period 16h-7h (Varijanta 1)

Obzirom da se navedeni problem rješavao pomoću metaheurističkog algoritma, svako od vozila je dobijalo proračunatu snagu za isporuku ili uzimanje u granicama od -7.7 kW do 7.7 kW. Shodno tome, vozila su već u 16h dobila vrijednost koju je trebalo isporučiti mreži, zbog čega je grafik transliran za jedan sat u lijevo, kako bi se vizuelizovalo identično početno stanje vozila po pitanju SoC-a na početku i kraju ciklusa. Sa druge strane, iako su SoC na početku i kraju postignuti u skladu sa definisanim granicama, pri čemu minimalni SoC jeste 27.7 kWh, odnosno 42.62%, vozila se tokom definisanog intervala nisu punila i praznila istom dinamikom, već su se prilagođavala optimizacionom cilju mreže. Konkretno, vozila 5 i 6 tokom perioda od 17h do 18h nijesu razmjenjivala energiju sa mrežom, jer su vozila prije njih “ispeglala” opterećenja. Zbog toga su navedena vozila čekala sledeći sat kako bi započela razmjenu.

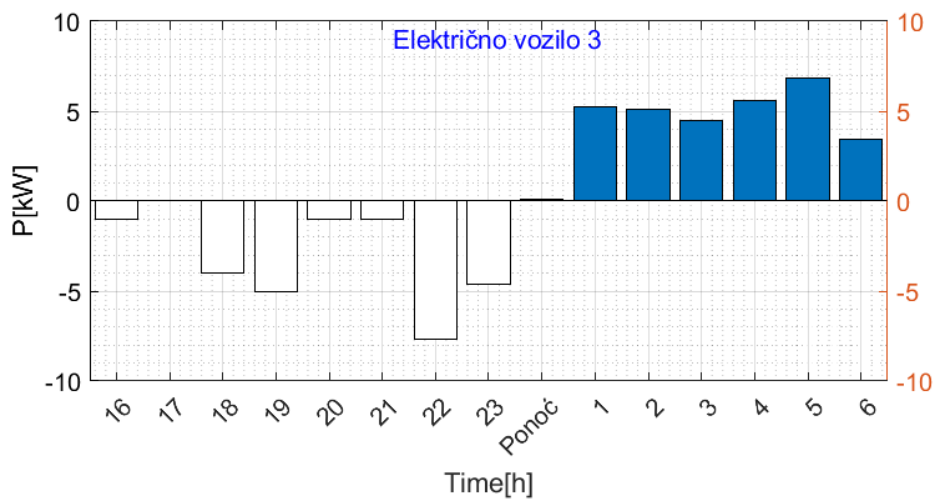
Na slici 5.1.5 biće date satne razmjene energije između svakog od navedenih vozila i mreže. Važno je naglasiti, da vozila zajedničkim uticajem vrše optimizaciju, odnosno, što je trenutna potrošnja “dalja” od poželjne, vozila će se brže prazniti, a kako se kriva potrošnje i srednja vrijednost približavaju, vozila će razmjenjivati sve manje energije. U skladu sa navedenim, algoritam na osnovu zadatog rasporeda „odlučuje” koje će se vozilo brže, a koje sporije prazniti, odnosno puniti.



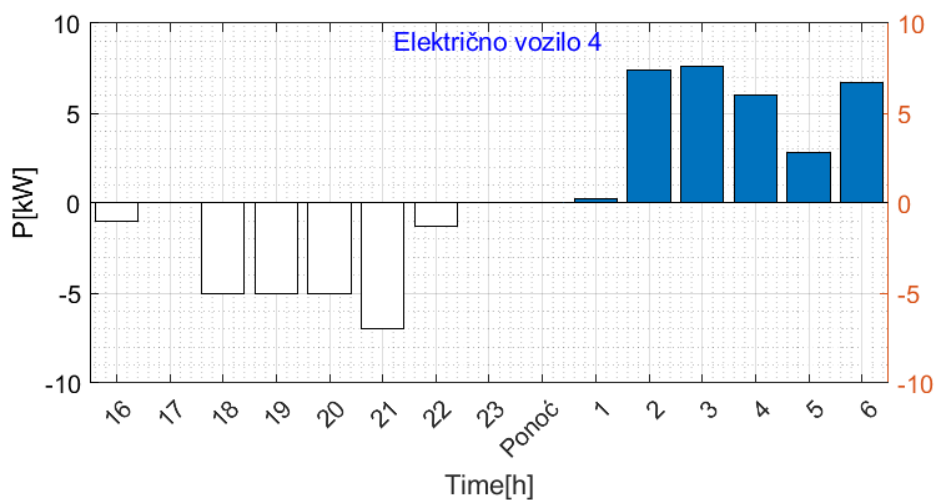
a)



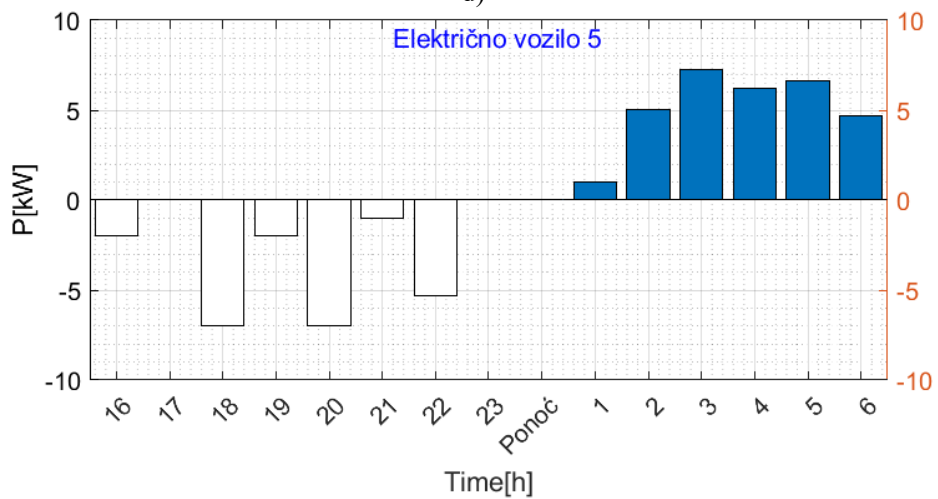
b)



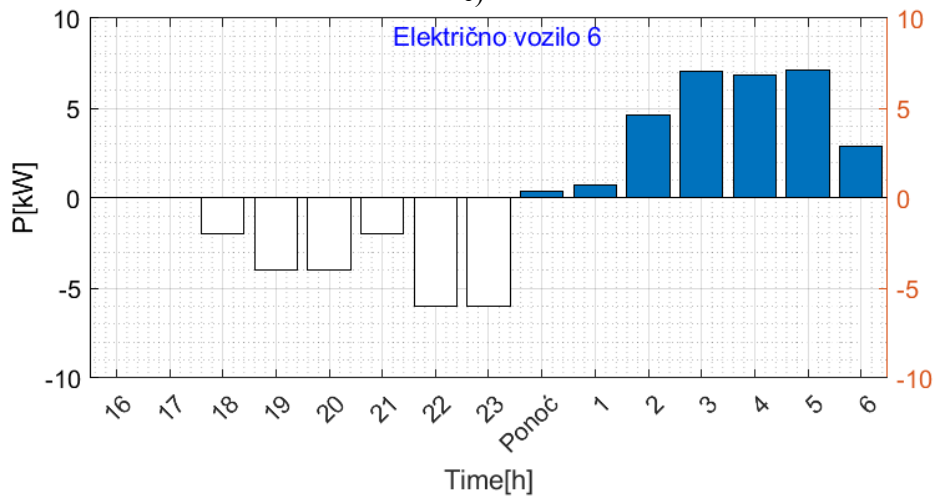
c)



d)

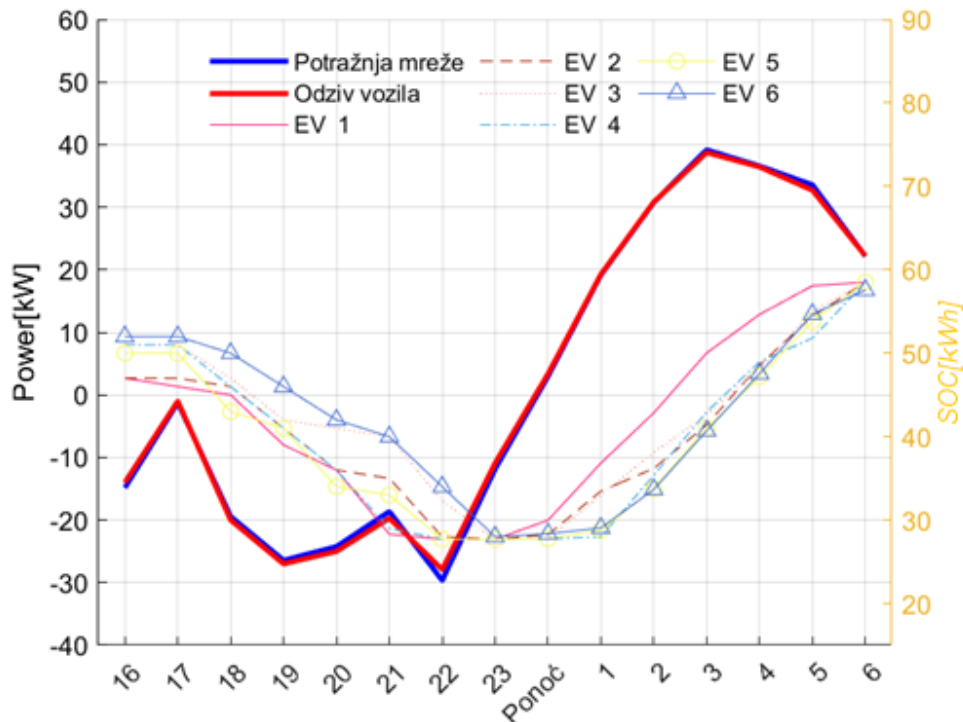


e)



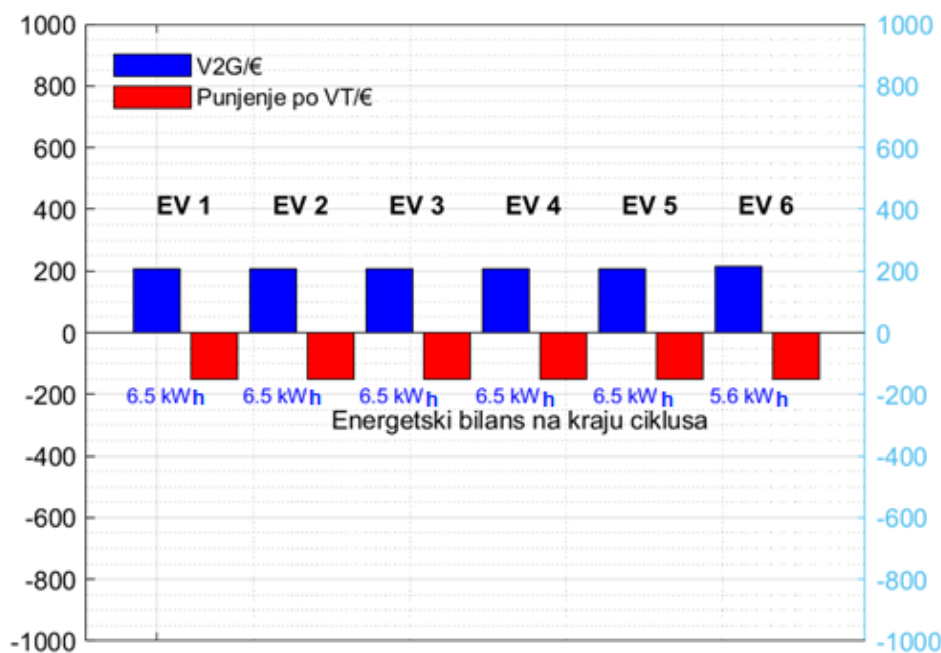
f)

Slika 5.1.5 Satna razmjena snage vozila sa mrežom (Varijanta 1)
 a) Električno vozilo 1, b) Električno vozilo 2 c) Električno vozilo 3
 d) Električno vozilo 4, e) Električno vozilo 5, f) Električno vozilo 6



Slika 5.1.6 Odziv vozila na signal mreže (Varijanta 1)

Na slici 5.1.6 prikazan je odziv vozila po pitanju isporučene, odnosno tražene snage u skladu sa optimizacionim ciljem, što je u ovom slučaju srednja vrijednost posmatranog intervala. Plavi dijagram predstavlja potražnju mreže, odnosno energiju neophodnu injektirati ili uzeti iz mreže kako bi kriva opterećenja bila „ispeglana”. Crvena linija predstavlja odziv vozila, čime se može i utvrditi efikasnost predloženog metoda. U idealnom slučaju, ove dvije krive bi se u potpunosti poklapale, odnosno odziv bi bio jednak potražnji mreže. Odstupanja u periodu od 19h do 22h zapravo odražavaju oscilatornost opterećenja, zbog čega dolazi do numeričke greške. Takođe, isporučena, odnosno uzeta snaga prikazana je na *Power [kW]* osi, dok osa *SOC [kWh]* prati satnu promjenu SoC-a za svako vozilo. Kako je ranije rečeno, trenutak signala za okretanje toka energije je ponoć, što ujedno u skladu sa grafikom predstavlja trenutak kada signal prolazi kroz nulu, nakon čega sa stanovišta električnih vozila, potražnja postaje pozitivna, odnosno započet je proces punjenja. Takođe, ovakva interpretacija može služiti i kao ocjena efikasnosti, odnosno greške. U principu, potencijalna greška bi se javila zbog konflikta interesa mreže i korisnika, pri čemu kompromis mora biti na strani korisnika, kako bi ovakav koncept ostao održiv.



Slika 5.1.7 Ekonomsko-energetski bilans (Varijanta 1)

Na slici 5.1.7 prikazan je ekonomsko-energetski bilans. Dakle, ekonomska računica je svedena kroz 180 ciklusa, što bi u principu predstavljalo da korisnici električnih vozila skoro svaki drugi dan učestvuju u V2G programu. Takođe, ovako definisan broj ciklusa je i u skladu sa trenutno dostupnom tehnologijom litijum jonskih baterija čiji se „*cycle life*“ definiše između 2500 i 3000 ciklusa, što bi u značilo da baterije električnih vozila potencijalno imaju životni vijek od oko 15 godina. Energetski bilans prvih pet vozila iznosi +6.5 kWh, dok šesto vozilo zbog numeričke greške je ostvarilo manji bilans za 0.9 kWh⁴³. U poređenju sa tradicionalnim punjenjem po skupoj tarifi, korisnici bi mogli da ostvare profit od 207 €, i energetski suficit od 1170 kWh, što konačno dovodi do uštede od 360€. Uz pretpostavku da je uticaj V2G na životni vijek baterije zanemarljiv, moguće je isplatiti ukupnu cijenu trećine litijum jonske baterije za električno vozilo⁴⁴, ili bidirekcionni punjač u potpunosti.

U skladu sa navedenim, moguće je zaključiti da princip skaliranja funkcioniše i da svi korisnici imaju jednake šanse u zavisnosti od ponuđene energije, te da ne postoji mogućnost da od jednog vozila

⁴³ Pomenuto vozilo je ostvarilo SoC od 88.55 %, odnosno profit je 214 €, što u principu ne predstavlja veću zaradu, već manje uzete energije.

⁴⁴ Napomena: Uzeta je vrijednost baterije od 15 000 €, optimalna promjena baterije za vozila proizvedena do 2014. godine je bila 10 godina, sada se taj period već povećao na 15 godina. Važno je napomenuti da baterije koje su u fazi razvoja nude 6000 ciklusa punjenja i pražnjenja, što bi korisniku omogućilo 300 ciklusa godišnje u periodu od 20 godina koliko je i vrijeme eksploatacije samog vozila, a što bi korisniku moglo za taj period da donese 15 000 eura uštede. Dakle, zaključak je da je V2G ograničen infrastrukturom mreže i degradacijom baterije.

bude preuzeta sva energija, a od drugog ništa, čime se postiže konkurentnost na tržištu. Važno je naglasiti da korisnici koji ponude više energije, više će i prodati nakon primjene skaliranja. Dodatno, energija koja se kupuje/prodaje u periodu od 7h-23h se obračunava po Tarifi 1, odnosno višoj, dok energija kupljena/prodata u periodu od 23h do 6h se obračunava po Tarifi 2. Na kraju ciklusa se svodi konačni bilans i množi sa brojem radnih ciklusa.

5.2. Varijanta 2

U drugoj varijanta posmatrana je situacija u kojoj se vozila koja se priključuju na kućne bidirekzione punjače pune, odnosno prazne, sa različitim inicijalnim zahtjevima predstavljenim u Tabeli 5.2.1. U ovoj simulaciji, učestvovala su tri vozila koja posjeduju V2G tehnologiju i priključuju se u istom trenutku, odnosno u 16h.

Tabela 5.2.1 Inicijalni uslovi vlasnika električnih vozila u vezi SoC-a (Varijanta 2)

Vozilo	SoC ₁	SoC ₂	SoC ₃
Vozilo 1	80%	30%	90%
Vozilo 2	67%	40%	75%
Vozilo 3	60%	30%	70%

U skladu sa postupkom opisanom u **Potpoglavlju 4.3**, zaključuje se da su navedena vozila u konačnom bilansu potrošači, odnosno kada se uzme u obzir potreba za angažovanom snagom uobičajnih potrošača (početna kriva potrošnje) i snaga koju potražuju električna vozila (31), dolazi se do nove prosječne intervalne potrošnje od 74.84 kW, odnosno:

$$P_{vozila} = \sum_{i=1}^n (SoC_3(i) - SoC_1(i)) * C = 18.2 kWh \quad (31)$$

$$P_{avgn} = \frac{(P_{ang}(T-24) + P_{vozila})}{(24 - T)} = \frac{\sum_{i=T-6}^{24} P_{ang}(i) + 18.2}{24 - (T - 6)} = 74.84 \text{ kW} \quad (32)$$

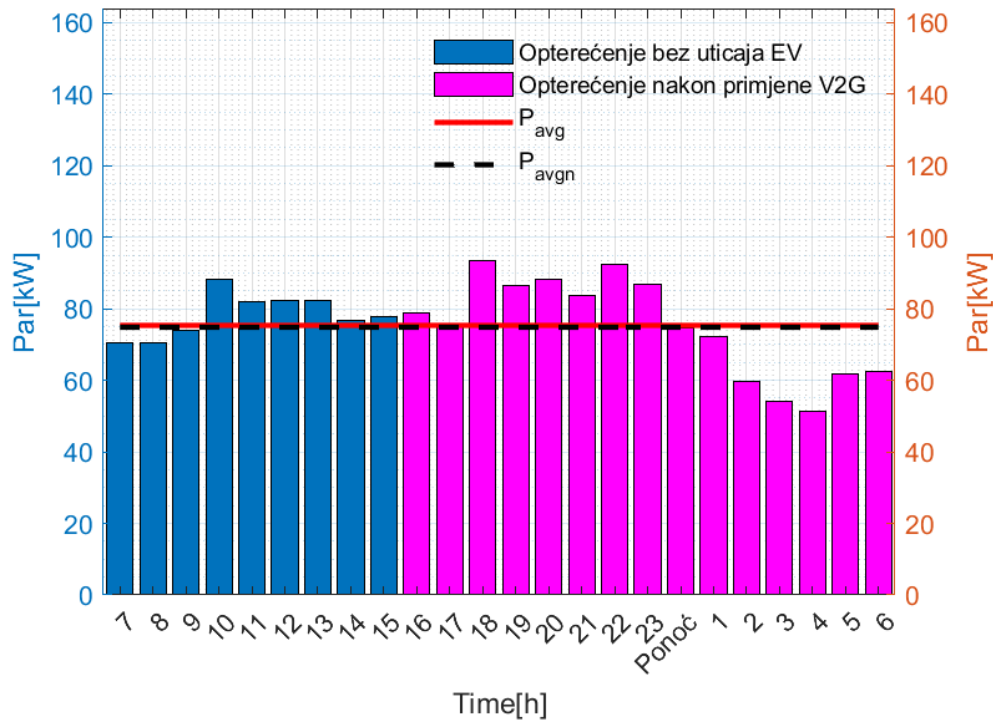
Na osnovu fomule (14), dolazi se do vrijednosti snage preopterećenja od 156.88 kW, odnosno:

$$P_{preopterećenja} = \sum P_{ang(T-23h)} - P_{avgn(T-23)} = \sum_{i=T-6}^{24-6} P_{ang}(i) - \sum_1^{23-T} 74.84 kW = 156.88 kW \quad (33)$$

Shodno tome, jasno je da je proračunata snaga preopterećenja veća od snage koju „nude” vozila mreži. Snaga koju vozila nude mreži je 69.55 kW ($P_{davaoca}$, relacija (15)) ukupno, pa shodno tome, neće biti primjene skaliranja, odnosno sva energija će biti otkupljena. U ovom slučaju, snaga preopterećenja je veća nego u scenariju opisanom u **Potpoglavlju 5.1**. Razlog je manji broj vozila,

samim tim i manja srednja intervalna vrijednost, a kako je ranije navedeno, prepterećenjem će se smatrati sva snaga koju je nepходно angažovati, a smještena je iznad nove srednje intervalne vrijednosti⁴⁵.

Nakon završenog ciklusa, kriva potrošnje tokom posmatranog perioda predstavljena je histogramom sa slike 5.2.1.

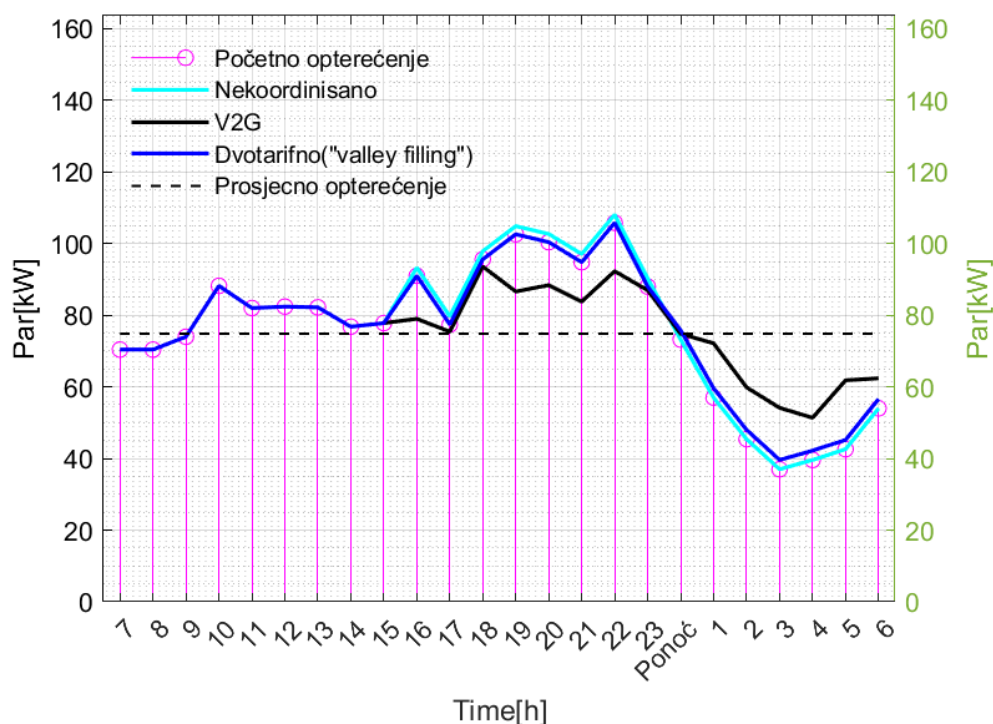


Slika 5.2.1 Histogram opterećenja nakon primjene V2G u interval 16h-6h (Varijanta 2)

Na osnovu histograma sa slike 5.2.1. moguće je zaključiti da je optimizacioni cilj mreže djelimično postignut. Crvenom linijom označena je srednja vrijednost koja važi za početnu krivu bez uticaja električnih vozila. Obzirom da je da su vozila u konačnom bilansu potraživala svega 18.2 kWh kumulativno, očekivano je da će i nova srednja vrijednost opterećenja biti gotovo identična početnoj. Dakle, ovako dobijena kriva predstavlja energiju koju je potrebno preuzeti iz primarne mreže. Razlika u odnosu na scenario prikazan u **Potpoglavlju 5.1.** jeste što je broj vozila manji, manje je dostupne energije energiju za injektiranje u mrežu, pa samim tim, kriva opterećenja nije u potpunosti ispeglana. Ovako dobijena kriva, predstavlja rezultat injektiranja kompletne energije dostupne u baterijama

⁴⁵ Napomena: Srednja vrijednost koja se posmatra je srednja vrijednost na intervalu u kojem vozila djeluju. U slučaju da se posmatra srednja vrijednost čitavog dana, ovakav pristup ne bi imao matematičku opravdanost i tačnost.

električnih vozila u skladu sa definisanim minimum korisnika. Takođe, početna srednja vrijednost krive opterećenja iznosi 75.35 kW, dok nova srednja vrijednost, izabrana kao optimizacioni cilj, iznosi 74.84 kW. Iako su sva vozila u konačnom bilansu potrošači, ukupna srednja vrijednost je manja. Razlog je dužina posmatranog intervala, odnosno algoritam uzima u razmatranje samo satna opterećenja nakon priključenja vozila, odnosno, ne postoji mogućnost retrospektivnog djelovanja. Prosječno opterećenje na posmatranom intervalu je bilo nešto manje od ukupnog prosječnog opterećenja, pa kada se doda potražnja od kumulativnih 18.2 kWh od strane električnih vozila, novonastala srednja vrijednost se neznatno mijenja na posmatranom intervalu.

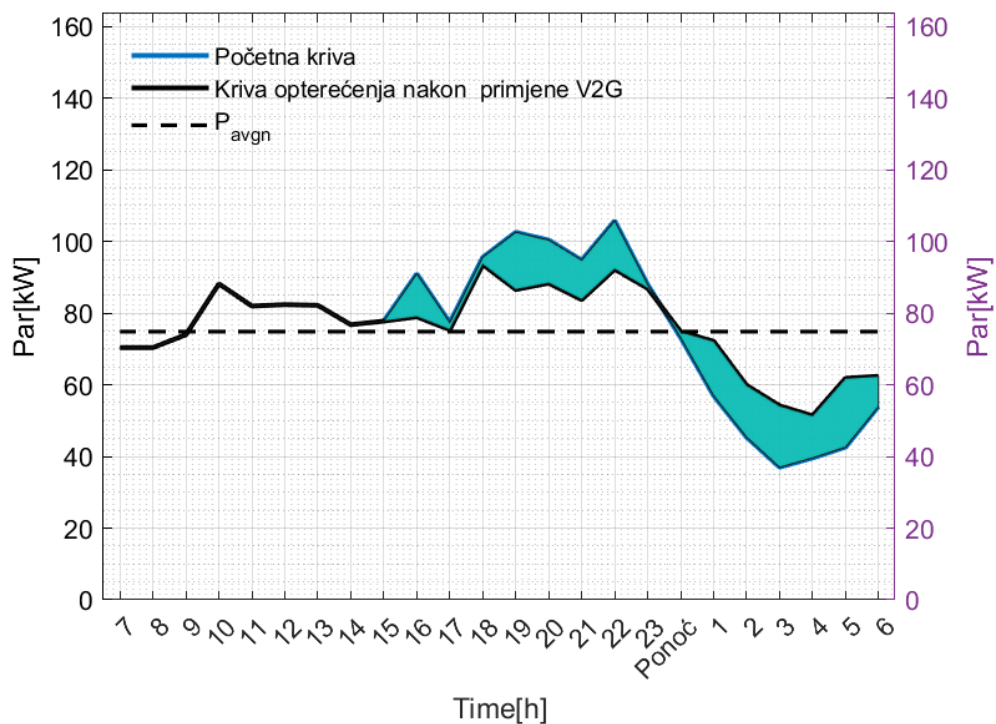


Slika 5.2.2 Komparacija sa ostalim oblicima punjenja (Varijanta 2)

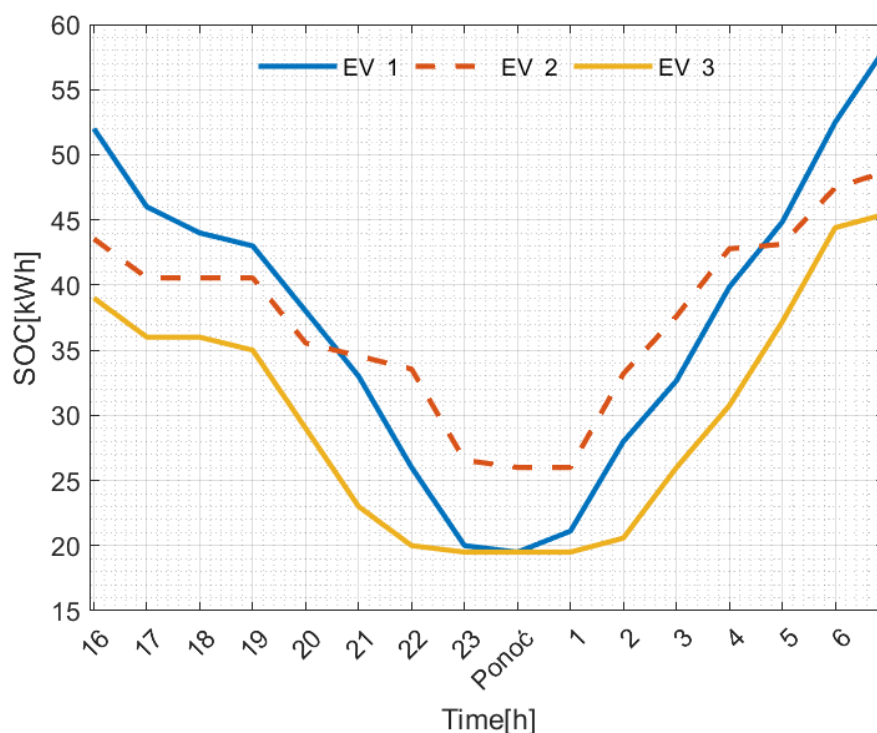
Na slici 5.2.2 prikazana je komparacija sa navedenim oblicima punjenja. Obzirom da je potražnja svega 18.2 kWh, takvo opterećenje je gotovo zanemarljivo za posmatranu mrežu u navedenom intervalu, pa shodno tome, nekoordinisano punjenje i „valley filling“ neće značajni odstupati od početne krive. Međutim, sa druge strane, V2G uprkos malom broju vozila, a samim tim i manjoj količini snage raspoložive za injektiranje u mrežu znatno popravlja krivu opterećenja i teži da je „ispegla“. U principu, mreži navedeni scenario ne predstavlja izazov, ali primjenom V2G postoji mogućnost da se pomoću samo tri vozila, znatno poprave prilike u mreži.

Na slici 5.2.3 prikazano je poređenje početne krive opterećenja i krive opterećenja nakon

primjene V2G, dok osjenčeni dio predstavlja *baferovanu* snagu. U periodu od 16h-24h, *baferovana* snaga iznosi 69.55 kW, dok u period od 24h-6h iznosi 87.75 kW, što odgovara razlici od 18.2 kWh koju su vozila potraživala, a koja je isporučena u periodiu niže tarife. Na ovaj način, primjenom V2G, u istom ciklusu izvršen je proces „*load shifting*” i „*valley filling*”. Odnosno, pomoću jedinstvene kontrolne logike moguće je zadovoljiti oba navedena metoda kako bi se kriva opterećenja optimizovala.

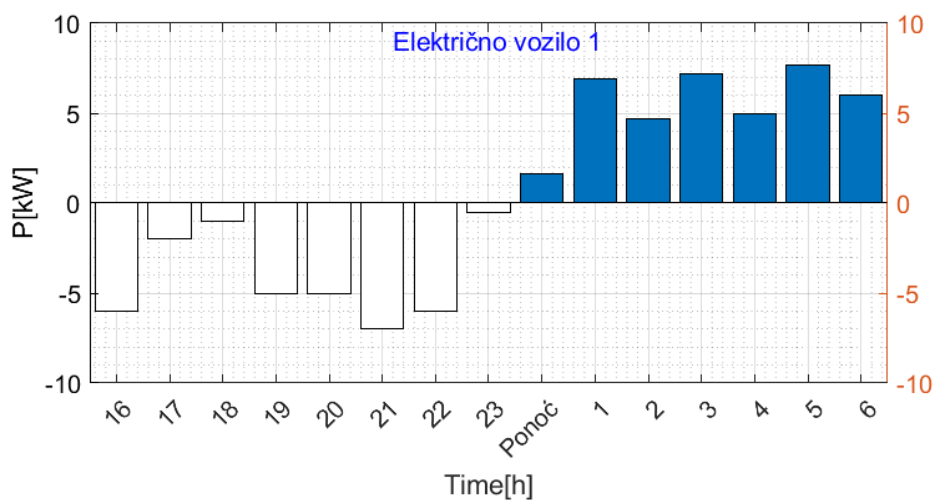


Slika 5.2.3 Komparacija početne krive opterećenja i krive opterećenja nakon primjene V2G (Varijanta 2)

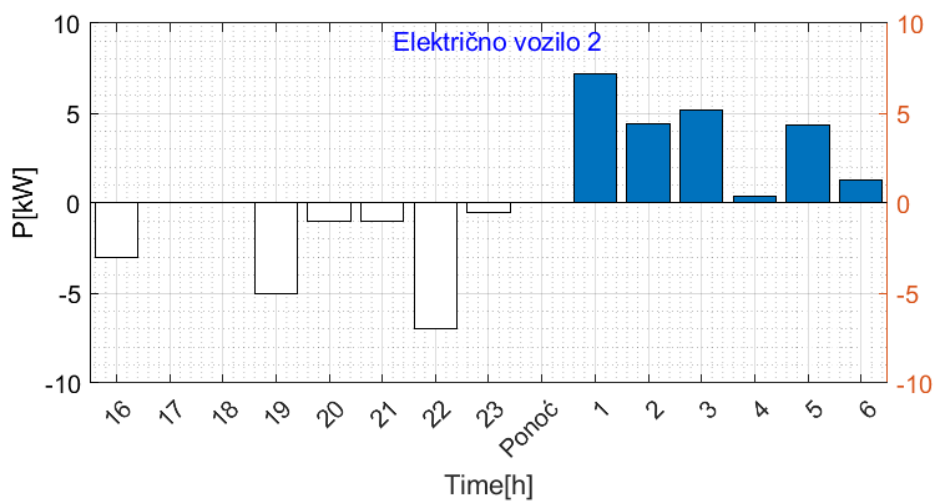


Slika 5.2.4 Proces punjenja i pražnjenja vozila u period 16h-6h (Varijanta 2)

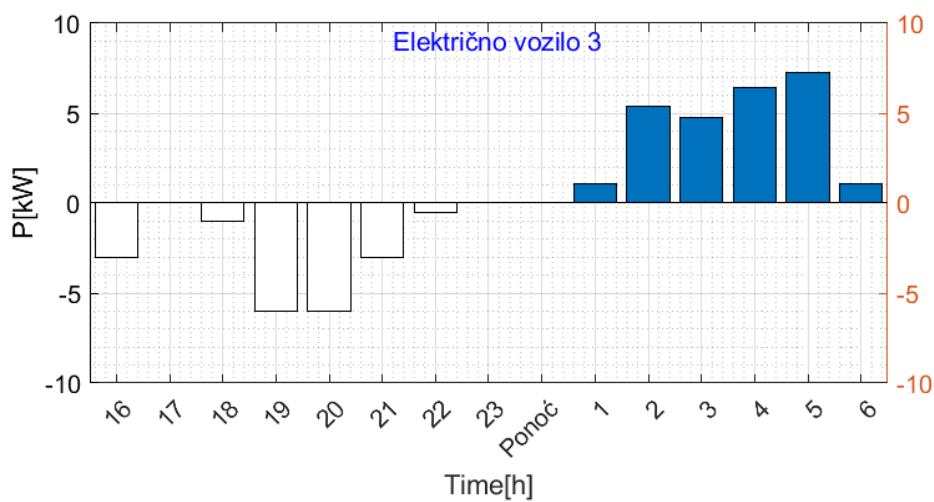
Na slici 5.2.4 prikazan je proces pražnjenja, odnosno punjenja posmatranih vozila. Inicijalno, vozila koja su učestvovala u simulaciji imaju bateriju identičnih kapaciteta, odnosno 65 kWh, pri čemu su snage punjača u rasponu -7.7 kW do 7.7 kW. Na osnovu grafika sa slike 5.2.4 moguće je zaključiti da vozila 1 i 3 završavaju proces pražnjenja na 19.5 kWh, što odgovara vrijednosti minimalnih 30% definisanih od strane korisnika. Sa druge strane, vozilo 2 tačno u 24h dostiže definisani minimum od 40%, odnosno 26 kWh. Obzirom da je u 1h sistem podopterećen, vozilo 1 će započeti proces punjenja, ali ne i ostala dva, jer bi isporuka snage vozilama u tom periodu dovela do „prelaska“ granice srednje vrijednosti. Shodno navedenom, vozila 2 i 3 će „čekati“ sledeći sat, kako bi započela punjenje. Na kraju intervala, vozila 1, 2 i 3 dostižu traženi *SoC* od 58.5 kWh (90%), 48.75 kWh (75%) i 45.5kWh (70%), respektivno. Satna razmjena energije vozila sa mrežom, data je na slici 5.2.5.



a)

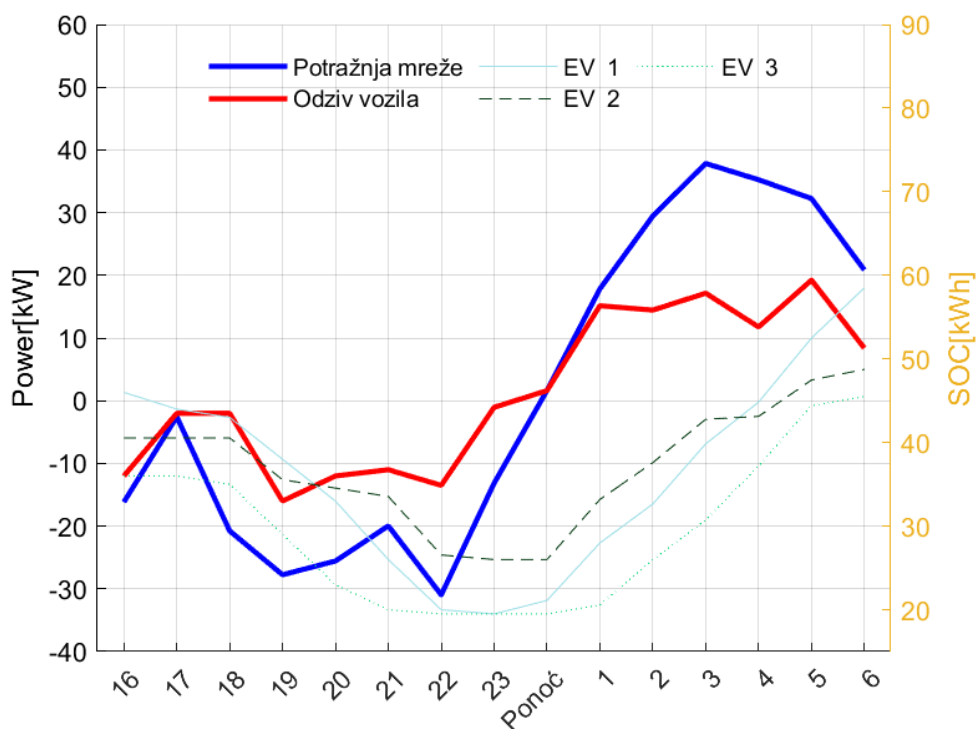


b)



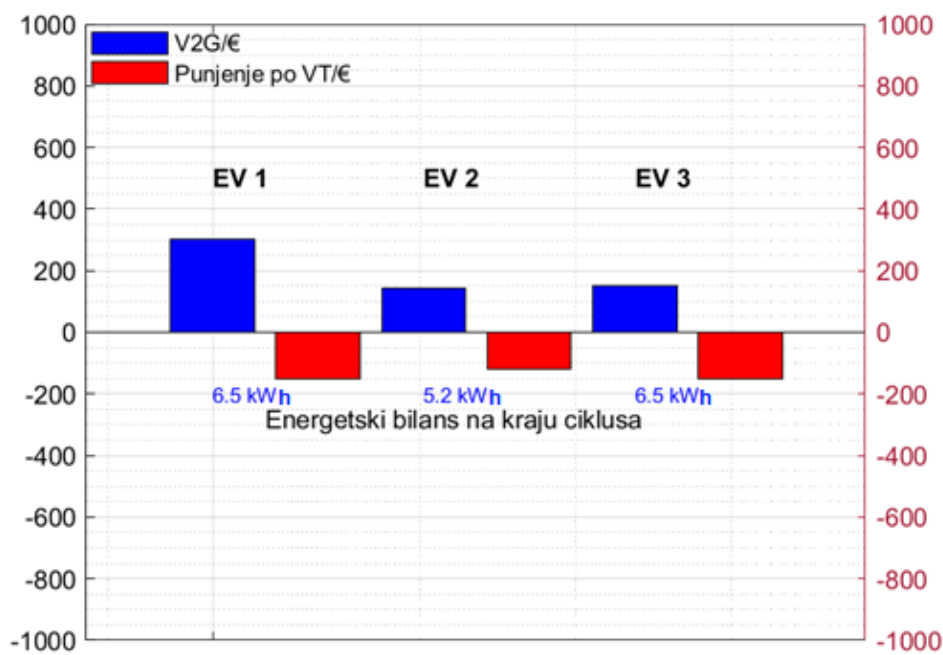
c)

Slika 5.2.5 Satna razmjena snage vozila sa mrežom (Varijanta 2)
 a) Električno vozilo 1, b) Električno vozilo 2 c) Električno vozilo 3



Slika 5.2.6 Odziv vozila na signal mreže (Varijanta 2)

Na slici 5.2.6 prikazan je odziv vozila po pitanju isporučene, odnosno tražene snage u skladu sa optimizacionim ciljem, što je u ovom slučaju srednja vrijednost posmatranog intervala. Plavi dijagram predstavlja potražnju mreže, odnosno energiju neophodnu injektirati ili uzeti iz mreže kako bi kriva opterećenja bila „ispeglana”. Crvena linija predstavlja odziv vozila, čime se može i utvrditi efikasnost predloženog metoda. Takođe, isporučena, odnosno uzeta snaga prikazana je na $Power[kW]$ osi, dok osa $SOC [kWh]$ prati satnu promjenu SoC -a za svako vozilo. Kako je ranije naglašeno, trenutak signala za „okretanje“ toka energije je ponoć, što ujedno u skladu sa grafikom predstavlja trenutak kada signal prolazi kroz nulu, nakon čega, sa stanovišta električnih vozila, potražnja postaje pozitivna, odnosno započet je proces punjenja. Takođe, ovakva interpretacija može služiti i kao ocjena efikasnosti, odnosno greške. Odstupanje odziva vozila, od potražnje mreže, zapravo predstavlja razliku između početne krive opterećenja i krive nastale primjenom V2G. Odziv vozila i signal mreže, poklapaju se u periodu od 24h do 1h, kada je na osnovu histograma sa slike 5.2.1 postignut optimizacioni cilj.



Slika 5.2.7 Ekonomsko-energetski bilans (Varijanta 2)

Na histogramu sa slike 5.2.7 prikazan je ekonomsko-energetski bilans prikazane simulacije. Vozilo 1 je ostvarilo energetski suficit u iznosu od 6.5 kWh, a profit definisan kroz 180 ciklusa iznosi 302.4€, pri čemu bi isti energetski suficit pri punjenju za vrijeme više tarife koštao korisnika 151.7 € kroz isti broj ciklusa. Korisnici vozila 2 i 3 su ostvarili profit od 143.6€ i 151.3€ respektivno. Međutim, korisnici vozila 1 i 3 su tražili na kraju ciklusa identičan suficit, ali je korisnik vozila 3 ostvario duplo manju zaradu. Razlog je količina energije koju je vozilo injektiralo u mrežu. Vozilo 1 je injektiralo u period od 16h do 24h 50% kapaciteta baterije, odnosno 32.5 kWh, dok je vozilo 3 injektiralo 30% , odnosno 19.5 kWh. Vozilo 1 je za vrijeme jeftine tarife potraživalo 39 kWh, što u konačnom bilansu, uzevši u obzir dvotarifni sistem mjerenja, iznosi 1.6789€ po ciklusu, za razliku od vozila 3 koje ostvaruju finansijski profit od 0.83915€ po ciklusu.

5.3. Varijanta 3

U trećem scenariju posmatrana je situacija sa korisnicima koji u toku ciklusa žele da napune baterije svojih električnih vozila. U ovoj simulaciji, učestvovala je sedam vozila koja posjeduju V2G tehnologiju i priključuju se u istom trenutku, odnosno u 16h. U posmatranoj simulaciji, za razliku od prethodnih, određeni broj vozila se puni tokom perioda vršnog opterećenja, pa shodno tome biće pokazana efikasnost definisanog metoda u cilju zaštite mreže od preopterećenja.

Tabela 5.3.1 Inicijalni uslovi vlasnika električnih vozila u vezi SoC-a (Varijanta 3)

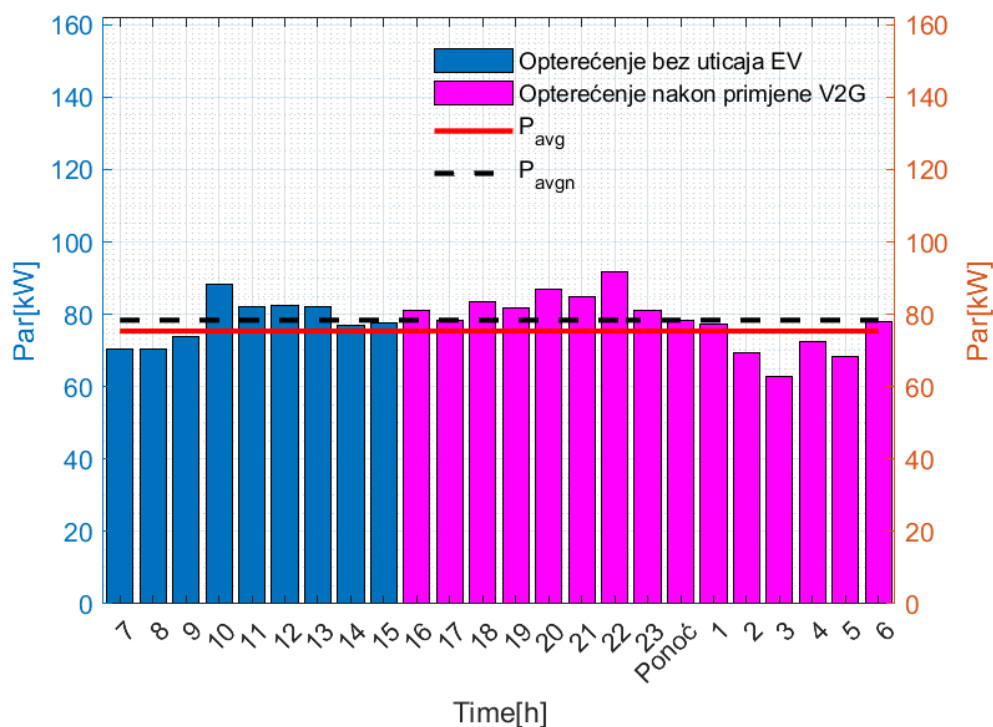
Vozila	SoC ₁	SoC ₂	SoC ₃
Vozilo 1	30%	55%	65%
Vozilo 2	30%	55%	65%
Vozilo 3	80%	30%	90%
Vozilo 4	70%	54%	80%
Vozilo 5	80%	30%	90%
Vozilo 6	70%	54%	80%
Vozilo 7	80%	30%	80%

Za razliku od dosadašnjih simulacija, u ovoj simulaciji postoje vozila kojima se isporučuje energija i vozila koja injektiraju energiju u mrežu. Shodno tome, čitav proces razmjene energije postaje znatno kompleksniji. U ovom scenariju, na novoformiranu srednju vrijednost utiču kumulativne sume davalaca i primalaca enegije. Shodno relaciji (15) u **Potpoglavlju 4.3**, $P_{davaoca}=118.3$ kWh, dok je $P_{primaoca}=32.5$ kWh, dok novo srednje intervalno opterećenje iznosi 78.39 kW, odnosno:

$$P_{vozila} = \sum_{i=1}^n (SoC_3(i) - SoC_1(i)) * C = 65kWh \quad (34)$$

$$P_{avgn} = \frac{(P_{ang}(T-24) + P_{vozila})}{(24-T)} = \frac{\sum_{i=T-6}^{24} P_{ang}(i) + 65}{24-(T-6)} = 78.39 \text{ kW} \quad (35)$$

Shodno tome, snaga koju je potrebno *baferovati* iznosi 128.45 kW. Na osnovu relacije (20) iz **Potpoglavlja 4.3** jasno je da snaga preopterećenja ne može biti nadoknađena pomoću električnih vozila, pa samim tim parametar α se inicijalizuje na vrijednost 1. Obzirom da ovakav metod predstavlja opciono rješenje za popravljjanje karakteristike opterećenja, pražnjenje vozila ne može biti prioritet. Prioritet V2G programa jesu vozila koja se pune, jer je najprije neophodno obezbijediti korisniku energiju neophodnu za normalno funkcionisanje električnog automobila. Odnosno, prosto rečeno, korisnici koji prodaju energiju ne moraju prodati svu energiju koju su planirali. Takođe, ni mreža ne mora biti optimizovana u potpunost, ali vozila na kraju ciklusa moraju imati traženi *SoC*, jer jedino na taj način, ovakav koncept postaje energetski održiv.

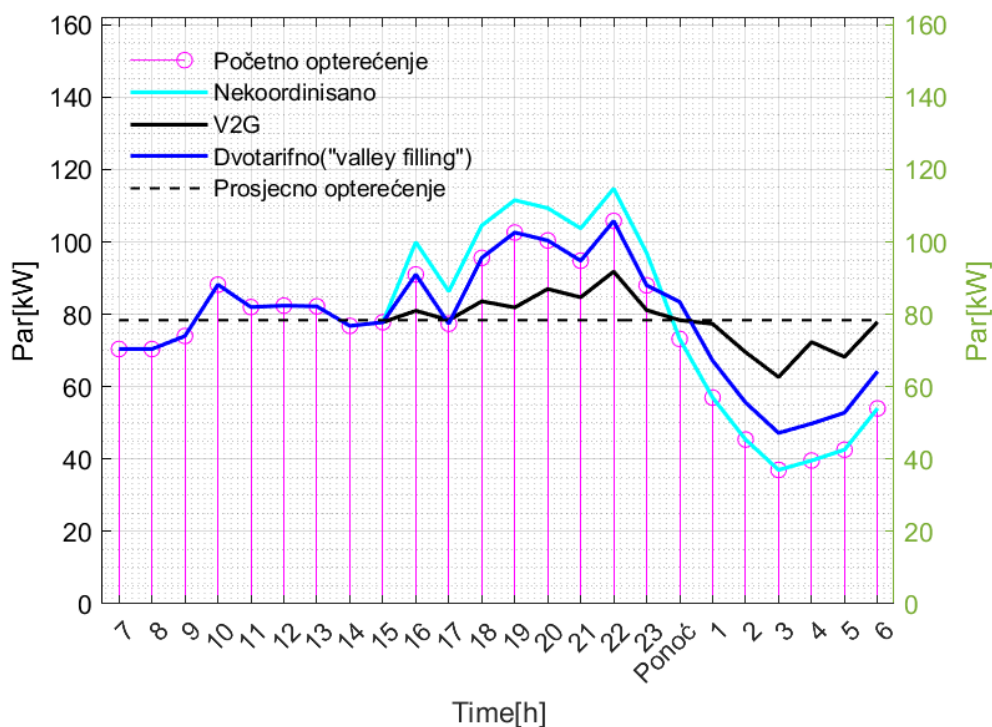


Slika 5.3.1 Histogram opterećenja nakon primjene V2G u interval 16h-6h (Varijanta 3)

Na osnovu histograma sa slike 5.3.1 zaključuje se da je nova srednja vrijednost znatno veća od početne, što je zapravo posledica većeg broja vozila, koja bez obzira u kojem su modu rada tokom perioda vršnog opterećenja, na kraju ciklusa zahtjevaju energetske suficit. Vizuelno je moguće utvrditi da je u periodu podopterećenja postojalo „prostora“ da se *baferuje* dodatna energija. Međutim, obzirom da su postojali korisnici koji su punili svoja vozila, neophodno je bilo prvobitno suzbiti njihov uticaj na posmatrani interval opterećenja. Dakle zaključak je da je optimizacioni cilj mreže djelimično ispunjen, ali da je kriva opterećenja prilično „ispeglana“ u odnosu na početnu krivu prikazanu histogramom na slici 5.1.

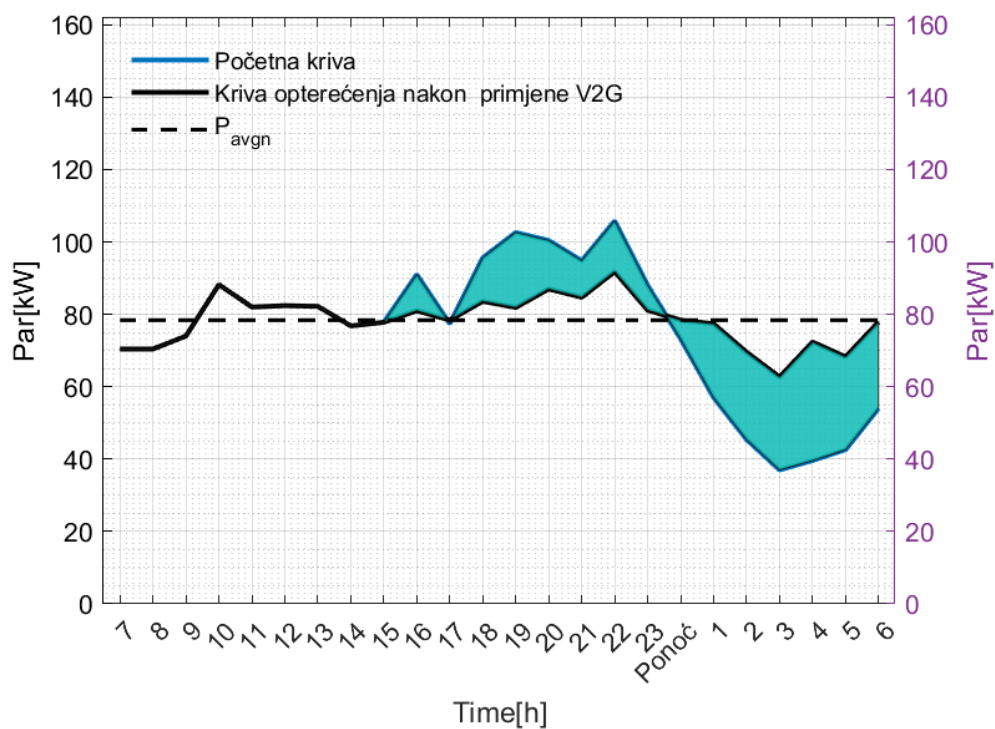
Značaj V2G koncepta posebno je vidljiv na osnovu komparativnog grafika prikazanog na slici 5.3.2. Primjenom nekoordinisanog punjenja, angažovana snaga u periodu od 21h-22h iznosi 114.7 kW, što za ovako dimenzionisanu mrežu predstavlja prilično veliko opterećenje. Za razliku od navedenog, „*valley filling*“ predstavlja nešto bolju varijantu, u kojoj se snaga potražnje preusmjerava na period podopterećenja, ali opet, bez značajnih benefita ni za korisnika ni za mrežu. Za razliku od toga, V2G nudi kompletno rješenje. Satno opterećenje mreže gotovo da je svedeno na prosječno opterećenje, svim korisnicima koji su zahtijevali energiju u periodu vršnog opterećenja tražena energija je i isporučena, dok su korisnici koji su prodavali energiju tokom perioda vršnog opterećenja

ostvarili finansijsku dobit i na kraju ciklusa baterije njihovih električnih vozila su dostigle zahtjevani *SoC*.

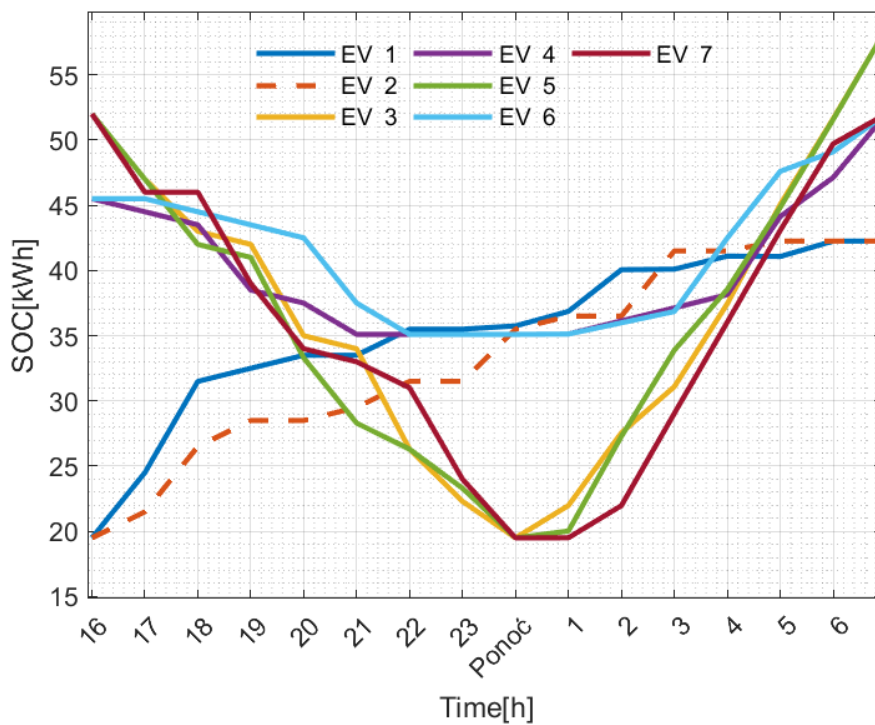


Slika 5.3.2 Komparacija sa ostalim oblicima punjenja (Varijanta 3)

Na osnovu slike 5.3.3 uočava se da *baferovana* energija u periodu 16h do 24h i 24h do 07h se prilično razlikuje, tačnije, znatno više energije je uzeto iz mreže nego što je dato, a sa druge strane mreža je prilično optimizovana uzevši u obzir zahtjeve korisnika po pitanju *SoC*-a. Ovo je moguće zbog toga što višak energije koji se pojavljuje u periodu podopterećenja zapravo predstavlja energiju koju su zahtijevali korisnici koji su se isključivo „punili” tokom perioda vršnog opterećenja, odnosno osjenčeni dio u periodu od 24h do 6h predstavlja zbir snage preopterećenja i kumulativne sume snaga svih primalaca. Dakle, snaga koju bi po pravilu trebala da se injektira u mrežu, zapravo prvo je isporučena vozilima koja su se punila, a preostali dio snage je iskorišćen za optimizaciju mreže.



Slika 5.3.3 Komparacija početne krive opterećenja i krive opterećenja nakon primjene V2G (Varijanta 3)

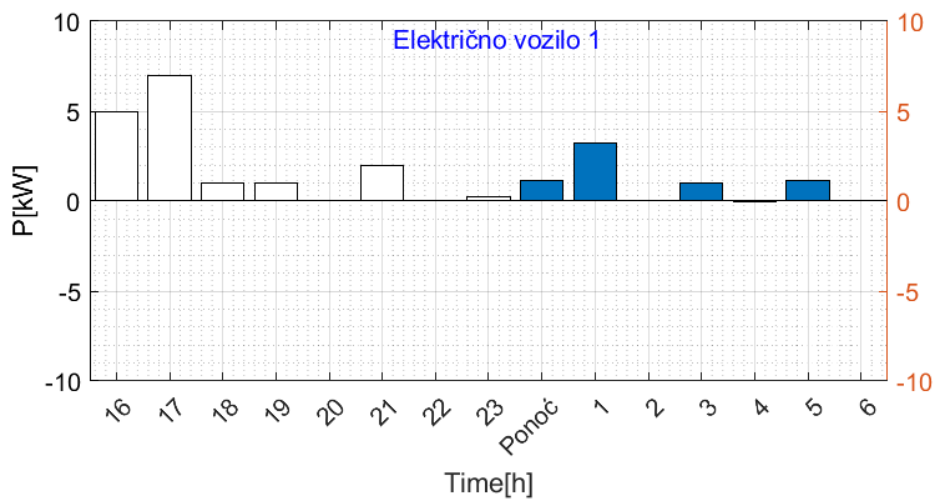


Slika 5.3.4 Proces punjenja i pražnjenja vozila u period 16h-6h (Varijanta 3)

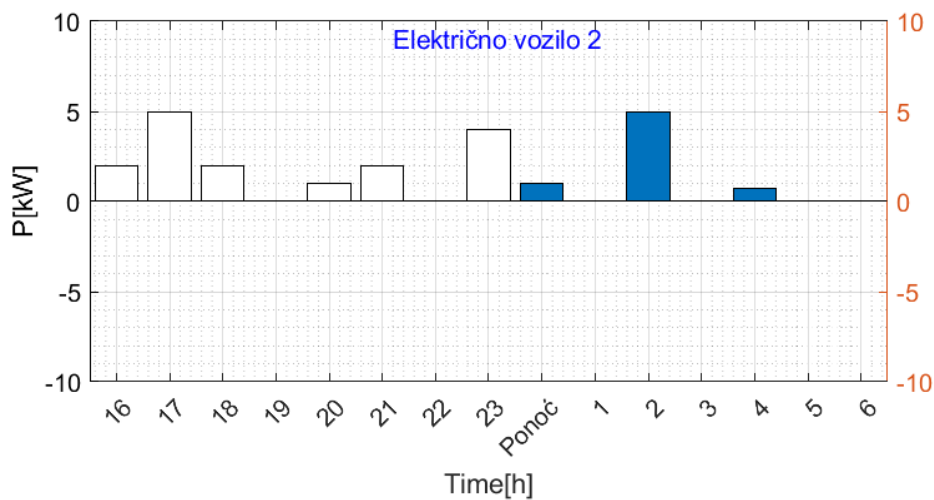
Na slici 5.3.4 prikazan je proces punjenja, odnosno pražnjenja svakog od navedenih sedam vozila.

SoC na kraju ciklusa za svako vozilo iznosi: 42.25 kWh, 42.25 kWh, 58.5 kWh, 52 kWh, 58.5 kWh, 52 kWh i 52 kWh, respektivno, što odgovara definisanom SoC-u od strane korisnika u procentima, obzirom da kapacitet baterije svih vozila pojedinačno iznosi 65 kWh.

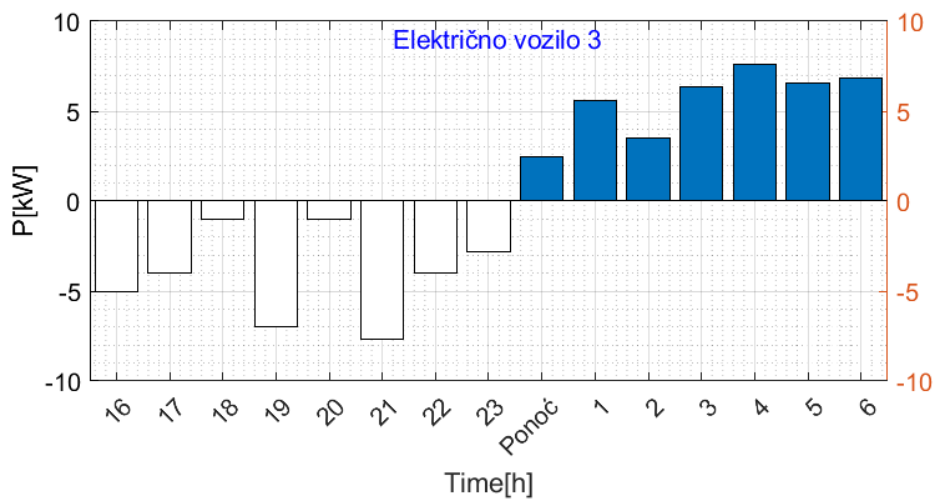
Na slici 5.3.5 prikazana je satna razmjena energije za svako od vozila u intervalu od 16h-6h.



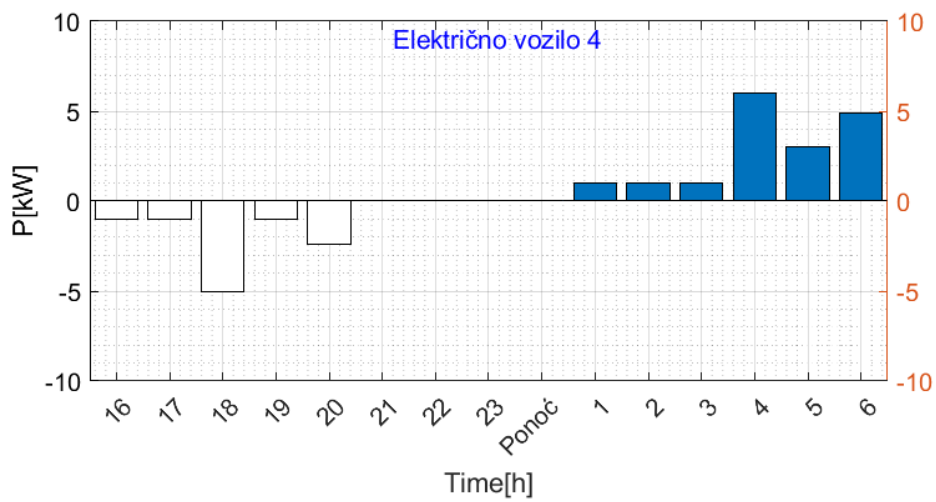
a)



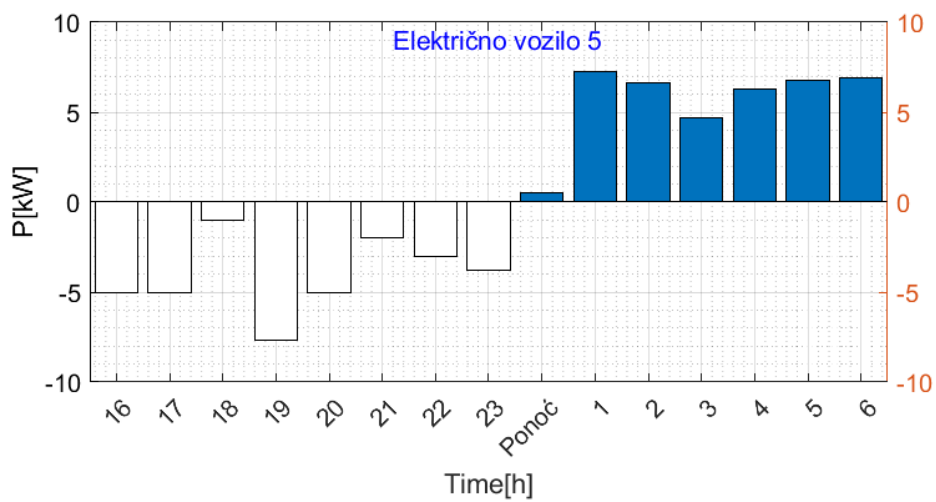
b)



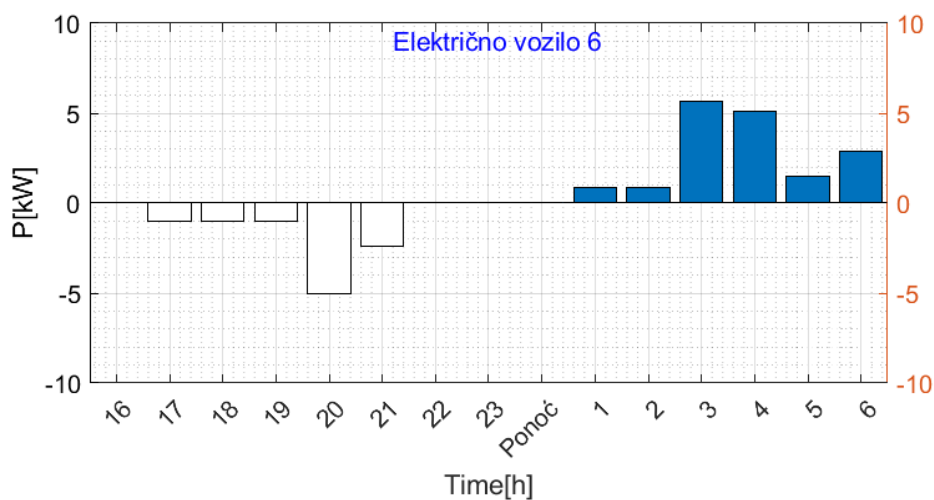
c)



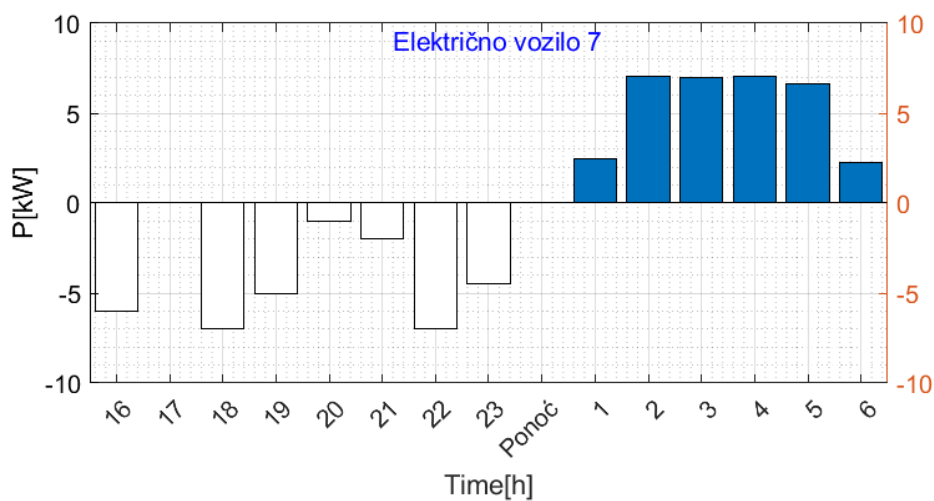
d)



e)



f)



g)

Slika 5.3.5 Satna razmjena snage vozila sa mrežom (Varijanta 3)

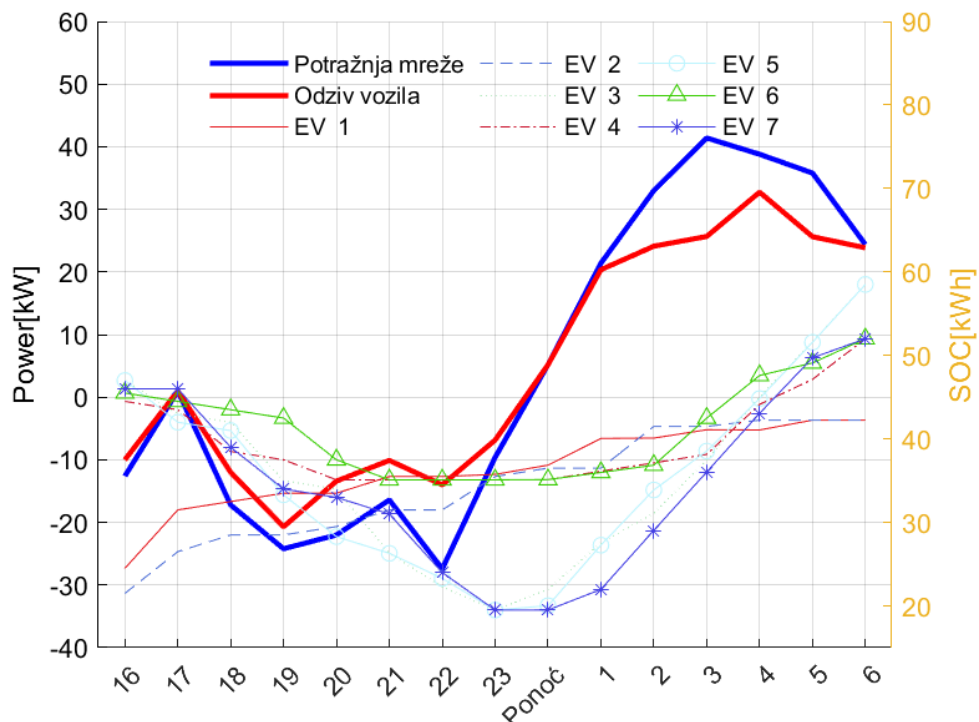
- a) Električno vozilo 1, b) Električno vozilo 2 c) Električno vozilo 3
 d) Električno vozilo 4, e) Električno vozilo 5, f) Električno vozilo 6
 g) Električno vozilo 7

U konkretnom slučaju, ako se posmatra 19h, moguće je zaključiti sledeće:

- Prvobitno opterećenje je iznosilo 102.6 kW
- Nakon primjene V2G, opterećenje u 19h je iznosi 81.9 kW
- Električno vozilo 1 je potraživalo 1kW
- Električno vozilo 2 nije razmjenjivalo energiju

- Električno vozilo 3 je injektiralo u mrežu 7 kW
- Električno vozilo 4 je injektiralo u mrežu 1 kW
- Električno vozilo 5 je injektiralo u mrežu 7.7 kW
- Električno vozilo 6 je injektiralo u mrežu 1 kW
- Električno vozilo 7 je injektiralo u mrežu 5 kW

Dakle, vozila su u 19h injektirala 21.7 kW, dok je vozilo 1 potraživalo 1 kW. Nakon pokrivenog opterećenja vozila koje se puni, preostalo je 20.7 kW da se postigne optimazacioni cilj, što je iskorišćeno da se opterećenje spusti do vrijednosti 81.9 kW, što i odgovara navedenoj razlici od 20.7 kW. Identičan princip, primijenjen je i ostalim vremenskim trenucima.

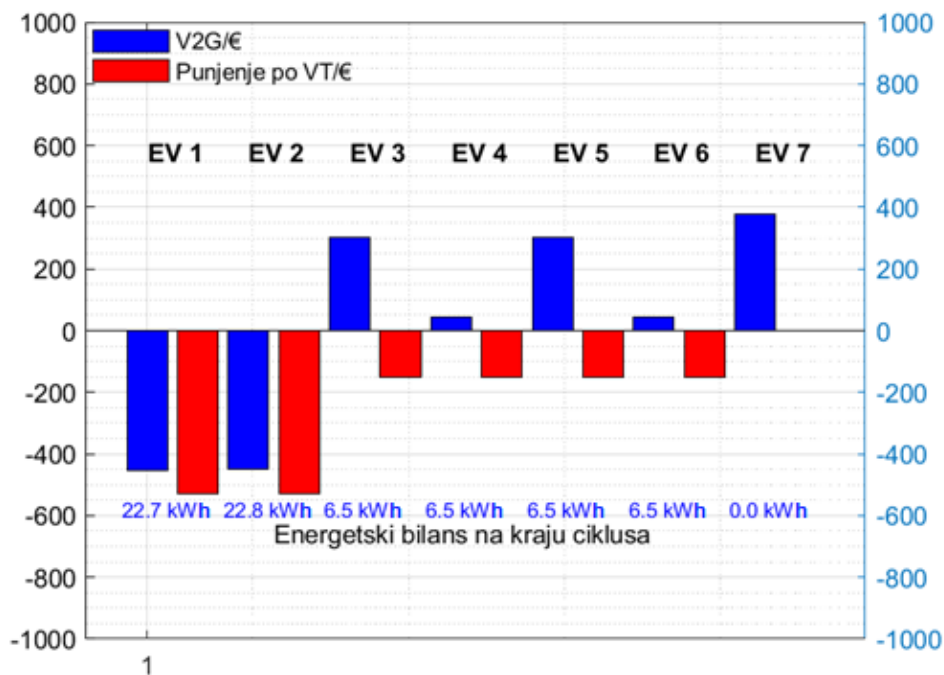


Slika 5.3.6 Odziv vozila na signal mreže (Varijanta 3)

Na slici 5.3.6 prikazan je odziv vozila na potražnju mreže. Satna razlika između potražnje i odziva odgovara razlici između krive opterećenja nastale nakon primjene V2G i intervalne srednje vrijednosti (slika 5.3.1).

Na slici 5.3.7 prikazan je ekonomski-energetski bilans. Na osnovu histograma, moguće je zaključiti da sam program pravi korisnicima uštedu primjenom pametnog punjenja. Konkretno, zahtjev shodno Tabeli 5.3.1 za vozila 1 i 2 bio je 55% SoC kao prihvatljiv minimum, dok je ostalih

10% ostavljeno samom programu da rasporedi. Shodno tome, korisnicima je obezbijedena tražena energija u najkraćem mogućem periodu, ali i naplaćena po Tarifi 1, dok je ostatak isporučen za vrijeme Tarife 2, čime je ostvarena ušteta samom korisniku, bez obzira što nije učestvovao u V2G programu na definisan način. Odnosno, korisnicima 1 i 2, prvobitna cijena punjenja iznosila bi 529.6€, dok je nakon primjene V2G trošak sveden na 451.1€, čime je izvršena ušteta od 78.5€ kroz definisanih 180 ciklusa. Iako ovakva situacija nije najpogodnija, svakako predstavlja kompromisno rješenje između uštete za korisnike i optimizacije mreže sa druge strane, uz nephodnost isporuke definisane količine energije.



Slika 5.3.7 Ekonomsko-energetski bilans (Varijanta 3)

Korisnici 3, 4, 5 i 6 su ostvarili identičan energetski suficit, ali različit finansijski. Razlog je isti kao i u scenariju iz **Potpoglavlja 5.2**. Korisnici 3 i 5 su ponudili više energije tokom perioda vršnog opterećenja, što je u konačnom bilansu dalu i veću zaradu, koja konkretno iznosi 302.4€, dok su vozila 4 i 6 ostvarila dobit od 45.29 €. Za sva navedena vozila, crveni histogrami označavaju trošak za isti energetski suficit kroz definisani broj ciklusa po Tarifi 1. U ovom scenariju, prikazan je poseban slučaj korisnika koji pruža energiju skladištenu u bateriji električnog vozila na korišćenje, a na kraju zahtijeva *SoC* isti kao i na početku ciklusa, čime je njegov energetski suficit jednak 0. Konkretno, zarada korisnika električnog vozila iznosi 378.1€, što odgovara razlici tarifa. Odnosno, korisnik je svakog drugog dana prodavao 32.5 kWh po cijeni od 0.1293€/kWh, dok je kupovao istu količinu snage po cijeni od 0.0647€/kWh, što dovodi do profita od 378.1€, koliko je i sam program izračunao.

5.4. Varijanta 4

U ovom scenariju, SoC svakog od vozila biće dimenzionisan tako da nakon završenog ciklusa budu u potpunosti zadovoljeni tehničko – ekonomski ciljevi V2G koncepta. Konkretno, biće otkupljena sva energija od korisnika, bez primjene skaliranja, dok će sa druge strane mreža u potpunosti biti optimizovana. U Tabeli 5.4.1 dati su inicijalni zahtjevi korisnika.

Tabela 5.4.1 Inicijalni uslovi vlasnika električnih vozila u vezi SoC -a. (Varijanta 4)

Vozilo	SoC_1	SoC_2	SoC_3
Vozilo 1	80%	30%	90%
Vozilo 2	70%	36.38%	80%
Vozilo 3	80%	30%	90%
Vozilo 4	70%	54%	80%
Vozilo 5	80%	30%	80%
Vozilo 6	80%	50%	90%

Primjenom matematičkih operacija opisanih u **Potpoglavljju 4.3**, zaključuje se da važi jednakost u jednačini (20), čime su postignuti uslovi za ostvarivanje punog potencijala predloženog koncepta. Nova prosječna intervalna vrijednost opterećenja iznosi od 75.793 kW, odnosno:

$$P_{vozila} = \sum_{i=1}^n (SoC_3(i) - SoC_1(i)) * C = 32.5 kWh \quad (36)$$

$$P_{avgn} = \frac{(P_{ang}(T-24) + P_{vozila})}{(24-T)} = \frac{\sum_{i=T-6}^{24} P_{ang}(i) + 32.5}{24-(T-6)} = 75.793 \text{ kW} \quad (37)$$

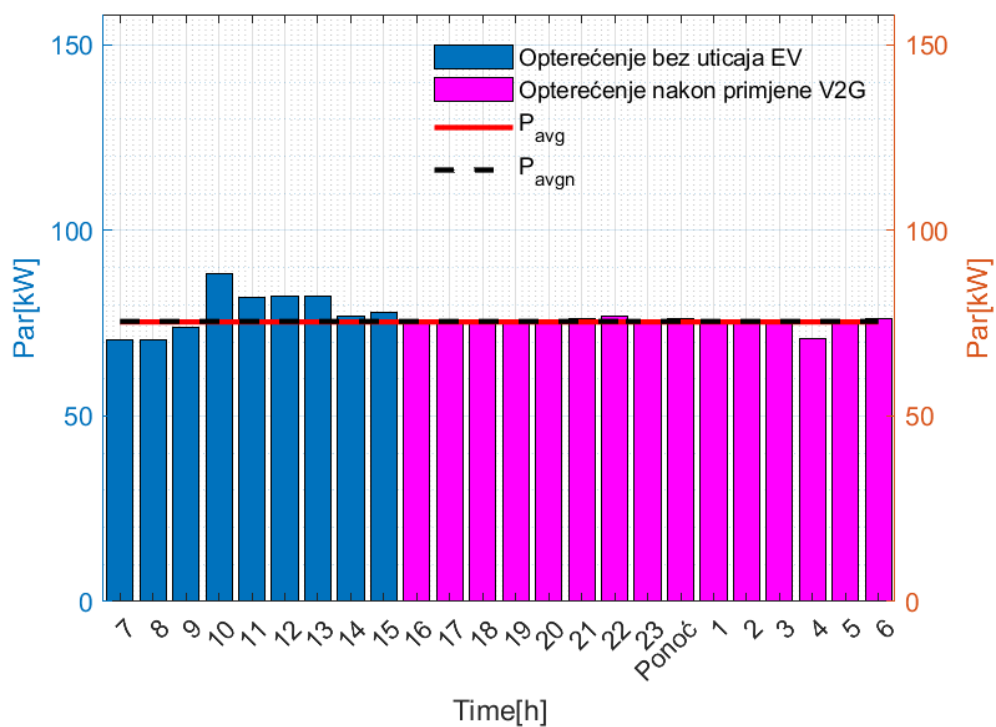
Na osnovu formule (14), dolazi se do vrijednosti snage preopterećenja od 149.25 kW, odnosno:

$$P_{avgn} = \frac{(P_{ang}(T-24) + P_{vozila})}{(24-T)} = \frac{\sum_{i=T-6}^{24} P_{ang}(i) + 32.5}{24-(T-6)} = 75.793 \text{ kW} \quad (38)$$

dok shodno relaciji (15), a u skladu sa proračunom iz relacije (39), snaga koju nude električna vozila iznosi:

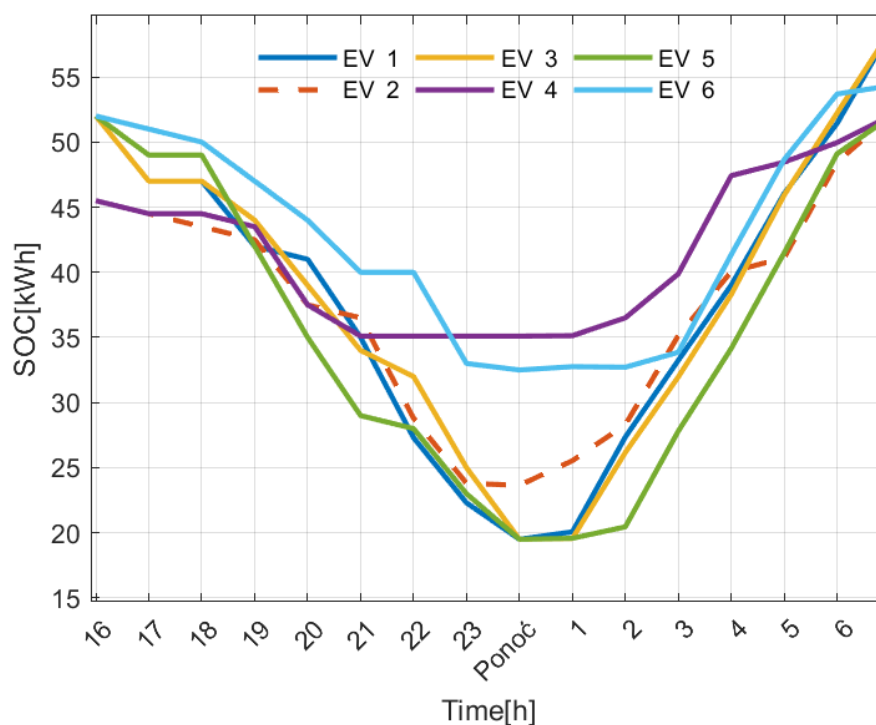
$$SoC_1 > SoC_2, P_{davaoca} = \sum_{i=1}^n (SoC_1(i) - SoC_2(i)) * C = 149.25 kWh \quad (39)$$

Na slici 5.4.1 prikazan je histogram opterećenja nakon primjene V2G programa.



Slika 5.4.1 Histogram opterećenja nakon primjene V2G u interval 16h-6h (Varijanta 4)

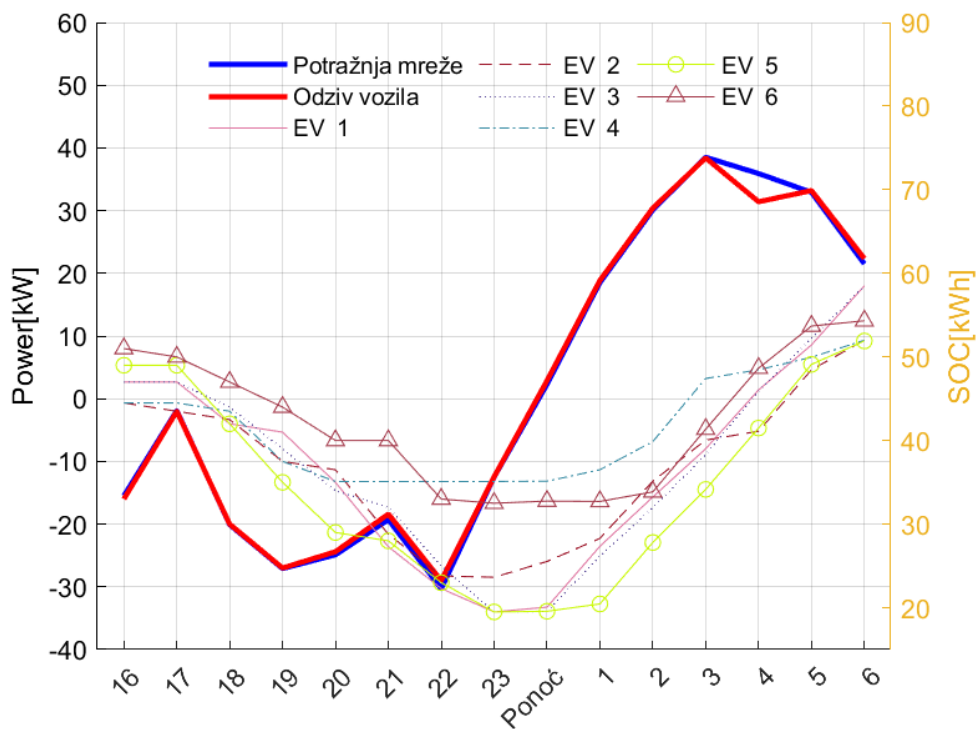
Na osnovu slike 5.4.1 zaključuje se da je kriva opterećenja ispeglana gotovo bez odstupanja, sa izuzetkom u 4h ujutro. Ovakvo odstupanje će biti objašnjeno u nastavku potpoglavlja.



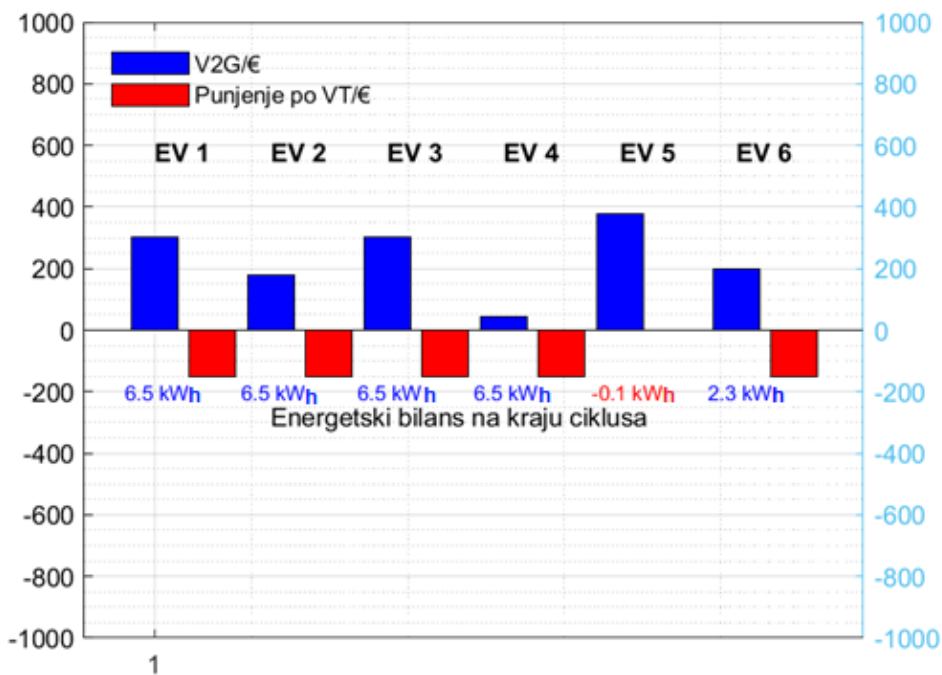
Slika 5.4.2 Proces punjenja i pražnjenja vozila u period 16h-6h (Varijanta 4)

Na slici 5.4.2 prikazan je proces pražnjenja, odnosno punjenja vozila na posmatranom intervalu u skladu sa definisanim zahtjevima korisnika. Uočava se da su sva vozila, izuzev vozila 6, postigla zahtjevani *SoC* na kraju ciklusa. Korisnik električnog vozila 6 je inicijalno zahtijevao 90% *SoC* na kraju ciklusa, dok je nakon završetka programa, *SoC* iznosio 83,57%. Shodno histogramu sa slike 5.4.1 greška u proračunu u 4h ujutro iznosi 4.5 kW, što zapravo i odgovara razlici koju je potrebno nadomjestiti vozilu 6. Tačnije, do definisanih 90%, vozilo 6 je bilo nepходno još 4.17 kWh, što pokriva većim dijelom grešku koja se pojavila u 4h, dok ostatak predstavlja opterećenje koje nije u potpunosti svedeno na novu srednju vrijednost, već preostalih 0.33 kW⁴⁶ predstavljaju akumuliranu grešku tokom perioda vršnog opterećenja. Važno je napomenuti da ovakva greška ne predstavlja konceptualni problem, već numeričku grešku algoritma. Na slici 5.4.3 prikazano je odziv vozila na potražnju mreže uz ostvareni *SoC* svakog od vozila. Na osnovu grafika, moguće je uočiti da se identično odstupanje javlja u periodu od 3h-5h ujutru.

⁴⁶ Napomena: U 22h opterećenje nakon primjene V2G je iznosilo 76.8 kW, što je za 1.29 kW više od srednje vrijednosti, međutim u većem dijelu intervala kriva je optimizovana na 75.4 kW, što je za 100W manje od optimizacionog cilja, čime se greške u konačnom bilansu svode na 330W akumuliranog preopterećenja.



Slika 5.4.3 Odziv vozila na signal mreže (Varijanta 4)



Slika 5.4.5 Ekonomsko-energetski bilans (Varijanta 4)

Na slici 5.4.5 prikazan je histogram ekonomsko-energetskog bilansa na kraju ciklusa. Uočava se da su korisnici električnih vozila ostvarila zaradu kako su i definisali, izuzev korisnika vozila 6 koje je ostvarilo nešto veću zaradu, ali uz manji energetski suficit. Zarade svakog od navedenih

vlasnika električnih vozila iznose: 302.4€, 178.5€, 302.4€, 45.29€, 379.1€ i 199.8€, respektivno. Međutim, uzeviši u obzir da u slučaju da vozila nisu učestvovala u V2G, trošak za definisani energetski suficit iznosio bi 151.3€, čime je ušteda svakog od vozila veća za pomenuti iznos. Obzirom da trenutno dostupni bidirekcionni punjač *Quasar Wallbox* na tržištu košta između 6000€ i 7000€⁴⁷ uz garanciju od 10 000 priključenja, jasno je da korisnik tokom perioda eksploatacije vozila može da otplati navedeni punjač i, kao dodatni bonus, ostvari energetski suficit. Takođe važno je napomenuti da se ovakve analize primjenjuju u skladu sa očuvanjem životnog vijeka litijum-jonske baterije unutar električnog vozila. Sa napretkom tehnologije litijum-jonskih baterija, te neminovnim padom cijena bidirekcionnih punjača usled napretka tehnologije, isplativost V2G koncepta će se udvostručiti.

5.5. Varijanta 5

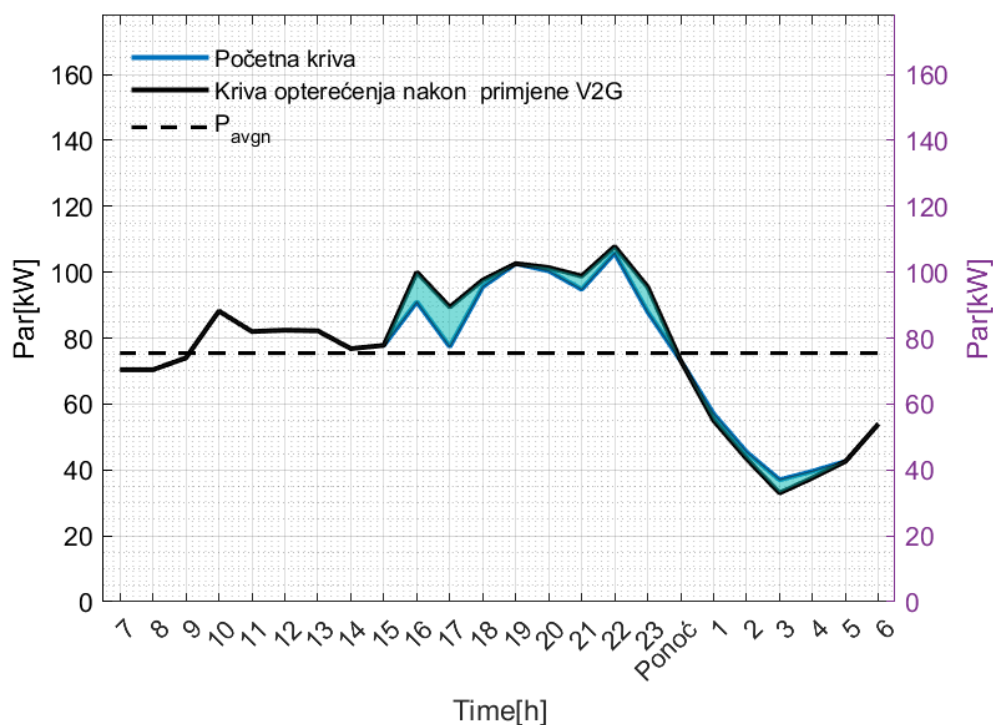
Svrha ovog scenarija jeste da prikaže efikasnost programa u „borbi“ protiv nesavjesnih korisnika, odnosno protiv vozila koje učestvuju suprotno principima V2G. U Tabeli 5.5.1 dati su inicijalni uslovi korisnika po pitanju *SoC*-a.

Tabela 5.5.1 Inicijalni uslovi vlasnika električnih vozila u vezi *SoC*-a. (Varijanta 5)

Vozila	<i>SoC</i> ₁	<i>SoC</i> ₂	<i>SoC</i> ₃
Vozilo 1	40%	70%	40%
Vozilo 2	30%	57%	30%

Obzirom na ranije definisane kriterijume V2G, vozila bi trebala da postignu zahtjevani *SoC*₂ po pitanju napunjenosit, odnosno neophodno je obezbijediti korisnicima zahtjevanu energiju. Međutim, shodno ranije navedenom, algoritam će zaustaviti proces pražnjenja vozila u periodu podopterećenja i neće dozvoliti da se mreža destabilizuje i dođe do dodatnog porasta napona. U ovom potpoglavlju korišćena su vozila kao i u ranijim simulacijama, odnosno kapacitet baterija iznosi 65 kWh za svako od vozila, dok je maksimalna snaga punjača 7.7 kW.

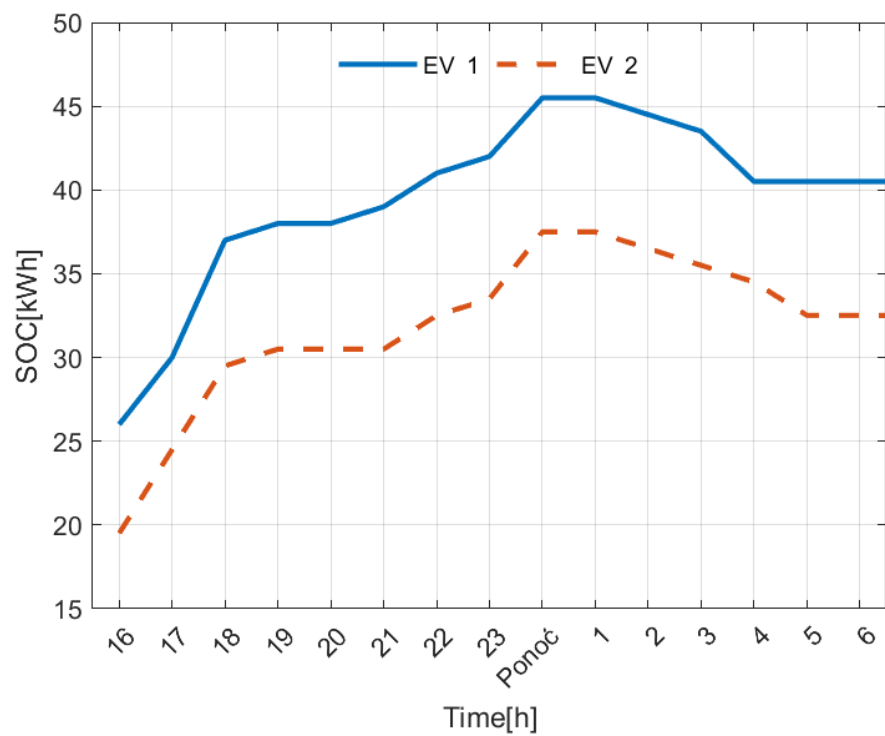
⁴⁷ <https://voltaconsolar.com/quasar-bidirectional-ev-charger.html>



Slika 5.5.1 Komparacija početne krive opterećenja i krive opterećenja nakon primjene V2G (Varijanta 5)

Na osnovu slike 5.5.1 moguće je zaključiti da je periodima kada su korisnici zahtijevali punjenje baterija svojih vozila, vršena razmjena odnosno da su ispunjeni zahtjevi. Međutim, nakon prelaska u period podopterećenja, sistem je izvršio minimalnu razmjenu energiju, što je zapravo posledica jednakosti (21) definisane u **Potpoglavlju 4.3**.

Na osnovu slike 5.5.2 moguće je zaključiti da je nakon zamjene tarifa, odnosno ulaska sistema u period podopterećenja, izvršena minimalna razmjena energije sa vozilima. Konkretno vozilo 1 je ispražnjeno za svega 7.8%, odnosno 5.07 kWh, dok je vozila 2 ispražnjeno za 7%, odnosno 4.55 kWh, što u poređenju sa inicijalnim zahtjevima korisnika predstavlja zadovoljavajući rezultat. Važno je naglasiti da su oba vozila do 24h dostigla zahtjevani *SoC* od 70%, odnosno 57%. Mogućnost algoritma da se izbori sa ovakvim zahtjevi zasniva se zapravo na minimizovanju definisane funkcije cilja, označene relacijom (19). Forsiranjem tražene snage po satu moguće je napuniti određeni broj vozila ovakvom metodom, nakon čega bi sistemu bilo neophodno ili priključiti vozilo koje će da injektira snagu u mrežu ili odložiti punjenje vozila. Isto važi i za proces pražnjenja, samo što apsolutni prekid razmjene energije nastupa mnogo ranije. Ukoliko bi se veći broj vozila sa sličnim zahtjevima priključio u mrežu, V2G program bi zaustavio razmjenu energije u oba smjera.



Slika 5.5.2 Proces punjenja i pražnjenja vozila u period 16h-6h (Varijanta 5)

6. Zaključak

Svjetska tendencija smanjenja zagađenja i očuvanja životne sredine dovela je do povećane potrebe za elektrifikacijom, kako transporta, tako i sistema za grijanje. Ovakvi sistemi uprkos smanjenju zagađenja životne sredine, značajno utiču na balans elektroenergetskog sistema. Pojavom električnih automobila pojavila se opravdana prijetnja da bi usled nesavjesnog i neplanskog priključenja moglo doći do pojave preopterećenja mreže, a naročito povećanja vršnog opterećenja, što bi za EES predstavljalo dodatno opterećenje i sam kapacitet mreže bi bio doveden u pitanje. Kako bi se ovakva situacija izbjegla, sve više radova i istraživanja se bavi optimalnom koordinacijom punjenja električnih vozila, pri čemu se poslednjih godina posebno aktuelizovala primjena V2G tehnologije.

Zbog aktuelnosti rješavanja problema priključenja električnih vozila, te optimizacije mreže primjenom istih, ovaj rad se bavi rješavanjem problema optimalnog upravljanja snagom uskladištenom u baterijama električnih vozila, kao i upravljanjem snagom koju mreža isporučuje vozilima. U radu je osim detaljne analize matematičke pozadine samog koncepta, predstavljeno i praktično rješenje kroz pet različitih scenarija.

Uz uvažavanje zahtjeva korisnika po pitanju *SoC*-a, te minimizovanje funkcije cilja u vidu minimalnog odstupanja trenutnog opterećenja u odnosu na definisanu srednju vrijednost V2G se pokazao superiornijim u odnosu na ostale koncepte optimizacije mreže („*valley filling*“ i „*load shifting*“). Primjena ovakvog koncepta demonstrirana je na praktičnom primjeru TS 10/0.4 kV Zeković iz elektrodistributivnog sistema u Opštini Nikšića.

Rezultati simulacije potvrdili su pretpostavku da predloženi V2G koncept gotovo u svim scenarijima donosi tehnička poboljšanja, kao i ostvarenje ekonomskih benefita korisnika, bilo kroz čist profit ili smanjenje troškova ukoliko vozilo ostane priključeno do kraja ugovorenog intervala. Simulacioni rezultati su takođe pokazali da je moguće postići potpuni balans mreže u vidu „ispeglane“ krive opterećenja, kao i maksimizaciju profita korisnika. Takođe, simulacioni rezultati su pokazali i efikasnost algoritma da spriječi neracionalne zahtjeve korisnika, kao i dejstvo bezbjednosnih funkcija predloženog metoda u slučaju havarije na nekom od uređaja za komunikaciju ili eventualno nemara i greške korisnika. Na kraju, pokazano je da predloženi metod garantuje jednakost svih korisnika na tržištu po pitanju prodane energije.

Obzirom da su predstavljeni scenariji simulirani sa poznatim parametrima mreže i pod pretpostavkom da su ti parametri u potpunosti tačni, budući pravac istraživanja ticao bi se primjene izloženog V2G koncepta u realnom vremenu, sa posebno kreiranim scenarijima po pitanju

priključenja i isključenja vozila. Takođe, analiziraće se primjena i potencijalna poboljšanja predloženog koncepta u elektrodistributivnim sistemima sa distribuiranom proizvodnjom.

Literarura

- [1] IEA, „*Global EV Outlook 2019*“, Paris, dostupan na: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7d7e049e-ce64-4c3f-8f23-6e2f529f31a8/Global_EV_Outlook_2019.pdf
- [2] C. Li, Y. Cao, Y. Kuang, B. Zhou, „Influences of Electric Vehicles on Power System and Key Technologies of Vehicle-to-Grid“, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2016.
- [3] M. Yilmaz & P. T. Krein, „Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5673-5689, Dec. 2013.
- [4] H. Turker & S. Bacha, „Optimal Minimization of Plug-In Electric Vehicle Charging Cost With Vehicle-to-Home and Vehicle-to-Grid Concepts“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 10281-10292, Nov. 2018.
- [5] B. Sah, P. Kumar, R. Rayudu, S. K. Bose & K. P. Inala, „Impact of Sampling in the Operation of Vehicle to Grid and Its Mitigation“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 7, pp. 3923-3933, July 2019.
- [6] J. R. Pillai & B. Bak-Jensen, „Integration of Vehicle-to-Grid in the Western Danish Power System“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 12-19, Jan. 2011.
- [7] Z. Luo, Z. Hu, Y. Song, Z. Xu & H. Lu, „Optimal Coordination of Plug-in Electric Vehicles in Power Grids With Cost-Benefit Analysis—Part II: A Case Study in China“, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3556-3565, Nov. 2013.
- [8] T. Han, A. Mao, S. Kuai & B. Ye, „Load ratio optimization of Urban Power Grid Considering penetration of electric vehicles“, *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, pp. 1738-1742, 2018.
- [9] C. Liu, K. T. Chau, D. Wu and S. Gao, „Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies“, *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 11, pp. 2409-2427, Nov. 2013.
- [10] Cutler J. Cleveland, Morris C. , „Dictionary of Energy“, *Elsevier*, Amsterdam, p.473. ISBN 978-0-08-044578-6, 2006.
- [11] Robledo Carla B., Oldenbroek Vincent, Abbruzzese Francesca; Wijk, Ad J.M. van ., „Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building“. *Applied Energy*. 215: 615–629.
- [12] Li Z., Chowdhury M. Bhavsar, „Optimizing the performanse of vehicle-to-grid (V2G) enabled battery electric vehicles through a smart charge scheduling model“. *Int.J Automot. Technol.* 16, 827–837 (2015). doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-015-0085-3>
- [13] Liasi S.G., Golkar M.A. , „Electric vehicles connection to microgrid effects on peak demand with and without demand response“. *Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Tehran. pp. 1272–1277. doi: [10.1109/IranianCEE.2017.7985237](https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2017.7985237), 2017.
- [14] Uddin K., Dubarry M., Glick M.B., „The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective“, *Energy Policy*, 113:342-347, doi: [10.1016/j.enpol.2017.11.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015). Feb. 2018.
- [15] Pillai Jayakrishnan R., Bak-Jensen Birgitte , „Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems“, pp. 1–6. doi: [10.1109/vppc.2010.5729191](https://doi.org/10.1109/vppc.2010.5729191). ISBN 978-1-4244-8220-7. S2CID 34017339.
- [16] Liasi S.G., Bathaee S.M.T, „Optimizing microgrid using demand response and electric vehicles connection to microgrid“. *Smart Grid Conference (SGC)*, Teheran, pp.1-7, doi: [10.1109/SGC.2017.8308873](https://doi.org/10.1109/SGC.2017.8308873), 2017.

- [17] Saldaña Gaizka, Jose Ignacio San Martin, Inmaculada Zamora, Francisco Javier Asensio & Oier Oñederra, „Electric vehicle into the grid: Charging methodologies aimed at providing ancillary services considering battery degradation” *Energies* 12, no. 12 (2019): 2443, 2019.
- [18] Iqbal S., Habib, S., Ali M. , Shafiq A. , Ahmed E.M., Khurshaid T. , Kamel S., „ The Impact of V2G Charging/Discharging Strategy on the Microgrid Environment Considering Stochastic Methods”. *Sustainability*, 14, 13211. doi: [10.3390/su142013211](https://doi.org/10.3390/su142013211), 2022.
- [19] Jan M.U., Xin A., Rehman H.U., Abdelbaky M.A., Iqbal, S., Aurangzeb M, „Frequency Regulation of an Isolated Microgrid with Electric Vehicles and Energy Storage System Integration Using Adaptive and Model Predictive Controllers”, *IEEE Access*, 9. 14958-14970, doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3052797>, 2022.
- [20] Lauinger D., Vuille F., Kuhn D, „A Review of the State of Research on Vehicle-to-Grid (V2G): Progress and Barriers to Deployment”, *In Proceedings of the European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress*, Geneva, Switzerland, 16 Mar. 2017.
- [21] Dumiak, Michael. „This Dutch City Is Road-Testing Vehicle-to-Grid Tech”. *IEEE Spectrum*, 2013.
- [22] Uddin Kotub, Jackson Tim, Widanage Widanalage D., Chouchelamane Gael, Jennings Paul A., Marco James, „On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system”, *Energy*, 133: 710-722, doi:[10.1016/j.energy.2017.04.116](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.116), August 2017.
- [23] Shirazi Yosef A., Sachs David L. , „Comments on "Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging" – Notable findings for V2G economics”. *Energy*, 142: 1139–1141. doi:[10.1016/j.energy.2017.10.081](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.081). , 2018.
- [24] A.I. Elpiniki, Codani P., Kempton W. , „Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging”, *Energy*, 127: 730-742, doi:[10.1016/j.energy.2017.03.015](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015), ISSN 0360-5442, 2017.
- [25] Ostojić Andrija D., Čalasan Martin P., Mujović Saša V. , Implementacija V2G modela u cilju poboljšanja karakteristike opterećenja energetskog sistema korišćenjem PSO algoritma”. *Tehnika* 2019, vol. 74, br. 6, str. 841-846. doi: <https://doi.org/10.5937/tehnika1906841O>, 2019.
- [26] Soon-Jeong Leea, Yun-Sik Ohb, Bo-Seok Simb, Min-Sung Kimb , Chul-Hwan Kim., „Analysis of peak shaving effect of demand power using Vehicle to Grid system in distribution system”. *Journal of International Council on electrical engineering*, vol. 7, no. 1, 198- 204 doi: <https://doi.org/10.1080/22348972.2017.1324275>.
- [27] Denholm P., Ela E., Kirby B. , Milligan M. , „Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation”, *NREL: Golden, CO, USA*, 2010.
- [28] Vujošević I. (2006) „Analiza elektroenergetskih sistema I“, Elektrotehnički fakultet, Podgorica
- [29] Sallam A., Malik O. P., „Electric Distribution Systems“. *IEEE Press Series on Power Engineering*, Wiley, New Jersey, 2011.
- [30] Short T. , „Electric Power Distribution Handbook“. *The Electric Power Engineering Series*, CRC Press, 2004.
- [31] Hadjsaid N., Sabonnadiere J. C. (2011). „Electrical Distribution Networks“. *ISTE and Wiley*
- [32] *The Paris Agreement*, Adopted Dec. 12, 2015; entered into force Nov. 4, 2016
- [33] G. B. Gharehpetian, S. M. Mousavi, „Distributed generation systems: Design, operation and grid integration”, Oksford, Velika Britanija: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [34] T. Funabashi, „ Integration of distributed energy resources in power systems: Implementation, operation and control”, Amsterdam: *Academic Press*, 2016.

- [35] G. M. Masters, „Renewable and Efficient Electric Power Systems”, Hoboken: *John Wiley & Sons*, 2004.
- [36] Y. Yang, F. Blaabjerg, K. A. Kim, A. Sangwongwanich, „Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems”, Doxford, *Woodhead Publishing*, 2019.
- [37] E. Youssef, A. Sharaf, A. Amin, A. El Samhey, „Wind Energy FACTS Applications and Stabilization Schemes“ *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, Ed. I. Yahyaoui, Amsterdam, Elsevier, 2018.
- [38] Adnan Bosović, „Priprema distributivnih mreža za punjenje električnih vozila“, 10. Savjetovanje BHK CIGRE, 2011.
- [39] Sperling Gordon, Daniel Gordon, Deborah Gordon, „Two billion cars: driving toward sustainability”. *Oxford University Press*, New York. str. 22-26. ISBN 978-0-19-537664-7, 2009.
- [40] David B. Sandalow, „Plug-In Electric Vehicles: What Role for Washington?” , *The Brookings Institution*, str. 1-6. ISBN 978-0-8157-0305-1, 2009.
- [41] Larminie J., Lowry J. , „Electric Vehicle Technology Explained“, *Jonh Wiley & Sons*, 2009.
- [42] Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. , „Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles“. *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 3rd edition, 2018.
- [43] Dukalski, Piotr & Będkowski, Bartłomiej & Parczewski, Krzysztof & Wnek, Henryk & Urbaś, Andrzej & Augustynek, Krzysztof , „Analysis of the influence of assembly electric motors in wheels on behaviour of vehicle rear suspension system”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, doi:421. 022004. 10.1088/1757-899X/421/2/022004. , 2018.
- [44] Omara, Ahmed & Michael A. Sleptsov, „Efficient electric traction drive configuration for battery electric vehicles”, *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (2017)*: 1-5.
- [45] Un-Noor F., Padmanaban S., Mihet-Popa L. , „A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development“. *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1-84, 2017.
- [46] S. Mentus, Elektrohemijska, Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2001.
- [47] M. Nič, J. Jiráč, B. Košata, A. Jenkins, A. McNaught, eds., reference material, in: IUPAC Compend. Chem. Terminol., 2.1.0 ed., *IUPAC*, Research Triangle Park, NC, 2009. Dostupan na: <http://goldbook.iupac.org/R05230.html> ,2015.
- [48] R. Dell, D.A.J. Rand, „Understanding batteries“, *Royal Society of Chemistry*, Cambridge, 2001.
- [49] H.A. Kiehne, ed., „Battery technology handbook“, 2nd ed, *Marcel Dekker*, New York, 2003.
- [50] Lu Wenquan , Zhang Linghong , Qin Yan , Jansen Andrew , „Calendar and Cycle Life of Lithium-Ion Batteries Containing Silicon Monoxide Anode”. *Journal of The Electrochemical Society*. 165. A2179-A2183. 10.1149/2.0631810jes.
- [51] Ivan Adžić, Martin Čalasan, Mihailo Micev, „Modelovanje litijum - jonske baterije uzimajući u obzir uticaj ambijentalne temperature”, Crnogorsko savjetovanje CIGRE, komitet B4, maj 2023.
- [52] Deng J., Bae C., Denlinger A., Miller T. , „Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges“, *Joule*, vol. 4, issue 3, pp. 511-515, 2020.
- [53] Hirst D., Winnett J., Hinson S., „Electric vehicles and infrastructure“. House of Commons Library, Number CBP-7480, 2020. Dostupan na: <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-7480/CBP-7480.pdf>

- [54] Capgemini invent. (2020). „Electric vehicles in Belgium: Charging towards the future“. Dostupan na: <https://www.capgemini.com/be-en/wp-content/uploads/sites/17/2020/06/ElectricVehicles-in-Belgium-charging-towards-the-future-capgemini-1.pdf>
- [55] Williamson S.S., Rathore A.K., Musavi, F. , „Industrial Electronics for Electric Transportation: Current State-of-the-Art and Future Challenges“, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 62, 3021–3032, 2015.
- [56] Yilmaz M., Krein P.T. , „Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles“, *IEEE Trans. Power Electron*, 28, 2151–2169, 2013.
- [57] Khaligh A., D’Antonio M., „Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles“, *IEEE Trans. Veh. Technol.* , 68, 3306–3324, 2019.
- [58] Renault Zoe 2018. Dostupan na: <https://www.renault.co.uk/vehicles/new-vehicles/zoe.html>
- [59] Ronanki D., Williamson S.S., „Modular Multilevel Converters for Transportation Electrification: Challenges and Opportunities“. *IEEE Trans. Transp. Electrif.* , 4, 399–407, 2018.
- [60] Bai S., Lukic S.M., „Unified Active Filter and Energy Storage System for an MW Electric Vehicle Charging Station“, *IEEE Trans. Power Electron*, 12, 5793–5803, 2018.
- [61] Aggeler D., Canales F., Zelaya-De La Parra H., Coccia, A.; Butcher, N.. Apeldoorn, O., „Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids“, *In Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Gothenberg, Sweden, 11–13 October 2010; pp. 1–8.
- [62] Srdic S., Lukic S., „Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line“, *IEEE Electrifi. Mag.*, 7, 22–31, 2019.
- [63] Tomako Blech, „Project ChaoJi: the background and challenges of harmonising DC charging standards“, EVS33. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4023281>, 2020.
- [64] Lu M., H. Jen, M. U. , „Safety Design of Electric Vehicle Charging Equipment“. *World Electric Vehicle Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 1017-1024, Los Angeles, California, 2012.
- [65] Yang Dingtong, Sarma J.S, Navjyoth , Hyland, Michael & Jayakrishnan, R., „ Dynamic Modeling and Real-time Management of a System of EV Fast-charging Stations“. *University of California-Irvine, Civil and Environmental Engineering*, 2020.
- [66] Islam R., Shah R., Ali M. H., „Emerging Power Converters for Renewable Energy and Electric Vehicles: Modeling, Design and Control“. *CRC Press, Taylor & Francis*, 2021.
- [67] Ortatepe Z., Karaarslan A., „DSP-based comparison of PFC control techniques applied on bridgeless converter“, *IET Power Electron*, 13, 317–323, 2020.
- [68] Qiao C., Smedley K.M. , „A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shaper“, *IEEE Trans. Power Electron.*, 16, 360–368, 2002.
- [69] Kim J., Choi H., Won, C., „New Modulated Carrier Controlled PFC Boost Converter“. *IEEE Trans. Power Electron.* , 33, 4772–4782, 2018.
- [70] Lin X., Wang F., Iu H.H.C., „A New Bridgeless High Step-up Voltage Gain PFC Converter with Reduced Conduction Losses and Low Voltage Stress“, *Energies* , 11, 2640, 2018.
- [71] Mohanraj K., Danya Bersis C., Dash S.S., „Comparison and Simulation of Various PFC Boost Converters. In Power Electronics and Renewable Energy Systems“; *Lecture Notes in Electrical Engineering*; Kamalakannan, C., Suresh, L.P., Dash, S.S., Panigrahi, B.K., Eds.; Springer: New Delhi, India , ; pp. 1445–1452, 2015.
- [72] Huang Q., Huang, A.Q., „ Review of GaN totem-pole bridgeless PFC“, *CPSS Trans. Power Electron. Appl.* 2017, 2, 187–196.

- [73] Kushwaha R., Singh B., „Interleaved Landsman Converter Fed EV Battery Charger With Power Factor Correction”. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2020, 56, 4179–4192.
- [74] Nair H.S., Lakshminarasamma, N., „Challenges in achieving high performanse in boost PFC converter”. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Kollam, India, pp. 1–6, Nov. 2017.
- [75] Hu J., Xiao W., Zhang B., Qiu D., Ho C.N.M., „A Single Phase Hybrid Interleaved Parallel Boost PFC Converter”. In *Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA, 23–27; pp. 2855–2859, 2018.
- [76] Jacoboski M.J., de Bastiani Lange A., Heldwein M.L., „Closed-Form Solution for Core Loss Calculation in Single-Phase Bridgeless PFC Rectifiers Based on the iGSE Method”. *IEEE Trans. Power Electron.* , 33, 4599–4604, 2018.
- [77] Nguyen H.V., Lee D., „Reducing the dc-Link Capacitance: A Bridgeless PFC Boost Rectifier That Reduces the Second-Order Power Ripple at the dc Output”. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2018, 24, 23–34.
- [78] Urrea-Quintero J.H., Muñoz-Galeano N., Gómez-Echavarría L.M., „Analysis and Control of Power Electronic Converters Based on a System Zero Locations Approach”. *Appl. Mod. Control.* 2018.
- [79] Zhu H., Liu D., Zhang X., Qu, F. , „Reliability of Boost PFC Converters with Improved EMI Filters”. *Electronics* , 7, 413, 2018.
- [80] Han J., Baek, J., Jeong Y., Yeon C., Moon G., „A simple THD improving method for CCM boost PFC converter under mixed conduction mode operation”. In *Proceedings of the 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017—ECCE Asia)*, Kaohsiung, Taiwan, pp. 466–470, 2017.
- [81] Lu W., Han J., Li, S., Iu H.H., „Mitigating Line Frequency Instability of Boost PFC Converter Under Proportional Outer-Voltage Loop with Additional Third Current-Harmonic Feedforward Compensation”. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 66, 4528–4541, 2019.
- [82] Zhang F., Xu, J., „A Novel PCCM Boost PFC Converter with Fast Dynamic Response”. *IEEE Trans. Ind. Electron.* , 58, 4207–4216, 2011.
- [83] Chellappan, S., „A comparative analysis of topologies for a bridgeless-boost PFC circuit”. *Analog. Des. J.*, 3, 1–3, 2018.
- [84] Huber L., Jang Y., Jovanovic M.M., „Performanse Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 23, 1381–1390, 2008.
- [85] Fardoun A.A., Ismail E.H., Al-Saffar M.A., Sabzali A.J., „A Bridgeless Resonant Pseudoboost PFC Rectifier”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 5949–5960, 2014.
- [86] Venkatesh S., Sarveswararao D., Nikhitha G., Mehanaz, S., „Bridgeless Boost PFC Rectifier with High Efficiency”, *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, 6, 3741–3747, 2019.
- [87] Liu T., Xin X., Zeng J., Ying J., Zhao W. , „Bridgeless PFC Converter with Low Common-Mode Noise and High Power Density”, *U.S. Patent US20070279955A1*, 20 October 2007.
- [88] Kim Y., Sung W., Lee B., „Comparative Performanse Analysis of High Density and Efficiency PFC Topologies”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 2666–2679, 2014.
- [89] Gopinath, M., Ramareddy S. , „A brief analysis on bridgeless boost PFC converter”. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011)*, Chennai, India, 20–22 ,pp. 242–246, 2011.
- [90] Tahami F., Yazdani F., „Zero-voltage-transition with dual resonant tank for bridgeless boost PFC rectifier with low current stress”, In *Proceedings of the 2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, Iran, pp. 241–247, 2016.

- [91] Alam M., Eberle W., Dohmeier N., „An inrush limited, surge tolerant hybrid resonant bridgeless PWM AC-DC PFC converter. In Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)”, Pittsburgh, PA, USA, pp. 5647–5651, 2014.
- [92] Mejía-Ruiz, G., Muñoz-Galeano N., Lopez-Lezama, J., „Modeling and development of a bridgeless PFC Boost rectifier”, *Rev. Fac. Ing.*, 9–21, 2017.
- [93] Ho C.N.M., Li, R.T., Siu K.K., „Active Virtual Ground—Bridgeless PFC Topology”, *IEEE Trans. Power Electron*, 32, 6206–6218, 2017.
- [94] Muhammad K.S., Lu, D.D.C., „Two-switch ZCS totem-pole bridgeless PFC boost rectifier”, *In Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Kota Kinabalu, Malaysia, pp. 1–6, 2012.
- [95] Molavi N., Maghsoudi M., Farzanehfard H., „Quasi-Resonant Bridgeless PFC Converter with Low Input Current THD”, *IEEE Trans. Power Electron*, 36, 7965–7972, 2021.
- [96] Wu W., „1.5 kW Digital Totem Pole PFC Design for Air-Conditioner and Performance Comparison Using IGBT, SiC and GaN”, *In Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe 2017)*, Nuremberg, Germany, pp. 1–5., 2017.
- [97] Zhang R., Liu S., Li B., Zhao N., Wang G., Xu D., „Totem-Pole Bridgeless Boost PFC Converter Based on GaN HEMT for Air Conditioning Applications”, *In Proceedings of the 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, pp. 1–9, 2018.
- [98] González-Santini N.S., Zeng H., Yu Y., Peng F.Z., „Z-Source Resonant Converter with Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 31, 7691–7700, 2016.
- [99] Baek, J., Park M.H., Kim T., Youn H.S., „Modified Power Factor Correction (PFC) Control and Printed Circuit Board (PCB) Design for High-Efficiency and High-Power Density On-Board Charger”, *Energies*, 14, 605, 2021.
- [100] Texas Instruments, „Design guide: TIDM-1000, Vienna Rectifier-Based, ThreePhase Power Factor Correction (PFC) Reference Design Using C2000TM MCU“, 2020.
- [101] J.W. Kolar, U. Drofenik, F.C. Zach, „Space Vector Based Analysis of the Variation and Control of the Neutral Point Potential of Hysteresis Current Controlled Three-Phase/Switch/Level PWM Systems, Singapore, Vol.1., pp.22-33, 1995, doi: [10.1109/PEDS.1995.404952](https://doi.org/10.1109/PEDS.1995.404952).
- [102] Tamara Ninković, „Koordinacija punjenja električnih vozila u savremenim distributivnim sistemima“, magistarski rad, Univerzitet Crne Gore, 2021.
- [103] Dorrell D.G., Popescu M., Knight A.M., Evans L., Staton D.A., „Comparasion of Different Motor Design Drivers for Hybrid Electric Vehicle, *IEEE*, pp.3352-3359, 2010.
- [104] Z. Mounir, El Hachemi Bebnouzid M. Senior Member, Diallo D., „Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion System: A Comparative Study”, *IEEE*, vol. 55, no.6, pp.1756-1764, Nov. 2006.
- [105] Rajakaruna S., Shahnia F., Ghosh A., „Plug In Electric Vehicles in Smart Grids“, *Springer, Power Systems*, 2015.
- [106] Noel L., Rubens G. Z., Kester J., Sovacool B., „Vehicle-to-Grid: A Sociotechnical Transition Beyond Electric Mobility“. *Energy, Climate and Environment.*, Palgrave Macmillan, 2019.
- [107] Kumar Gautam, Kumar Lalit, Kar Manoj, Kumar Sanjay, „Bid-Based Economic Load Dispatch in Coordination with Virtual Power Plan”, doi:[10.1007/978-981-19-8353-5_13](https://doi.org/10.1007/978-981-19-8353-5_13), 2023.
- [108] Y. Huang J. J. Ye, X. Du, L. Y. Niu, „Simulation study of system operating efficiency

- of EV charging stations with different power supply topologies”, *Appl. Mech. Mater.*, vol. 494–495, pp. 1500–1508, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.494-495.1500](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.494-495.1500), 2014.
- [109] Aswini Kotla , Ram Vara Prasad Bugatha , Kamala Jillidimudi , Sriram Lanka , Kowshik Bhasuru , Venkata Damaraju, Bharani Sai, „ Design and Analysis of Bidirectional Battery Charger for Electric Vehicle”, 2021.
- [110] R. A. Dolly , Bugatha Ram Vara prasad, „Enhancement of PFC and Torque Ripple Reduction using BL Buck- Boost Converter fed HCC BLDC Drive” , vol. 02, no. 11, pp. 895–901, 2015
- [111] Bugatha Ram Vara prasad, K. M. Babu, K. Sreekanth, K. Naveen, C. V. Kumar, „Minimization of Torque Ripple of Brushless DC Motor Using HCC with DC-DC Converter,” vol. 05, no. 12, pp. 110–117, 2018
- [112] M. Kaleeswari, M. Madheswaran, Vijayakumar Krishnasamy , „Investigation on PV fed hybrid electric vehicle with various power electronic circuits”, *International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT)*, doi:[10.1109/ICAETGT.2017.8341455](https://doi.org/10.1109/ICAETGT.2017.8341455), 2017.
- [113] M. A. Abido, „Optimal power flow using particle swarm optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, Vol. 24, No. 7, pp. 563–571, 2002.