

Tehnologija dvosmernega polnjenja električnih vozil za razvoj storitev prožnosti odjema

Tim Marentič, Igor Mendek, Matej Zajc

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: tm6126@student.uni-lj.si, matej.zajc@fe.uni-lj.si

Bidirectional electric vehicle charging for flexibility services development

Abstract. This article presents technologies and their applications that aim to transform electric vehicles from mere consumers of electrical energy that can burden the power grid to active participants in grid enhancing services, contributing to the security and stability of the grid.

We present a theoretical example showing a car park with ten electric vehicles actively participating in grid services. To facilitate understanding, we first introduce Vehicle-to-Grid (V2G) concept and the main actors. For the selected use-case we explain optimization of EV charging.

1 Uvod

Za omilitev posledic globalnega segrevanja je Evropska unija (EU) sprejela ukrep *EU ban 2035*, ki z letom 2035 v Evropi dovoljuje le registracijo novih avtomobilov in kombijev z ničelnimi izpusti emisij v ozračje [1]. Eno takšnih je električno vozilo (EV, ang. electric vehicle). Znana so kot okolju prijazna alternativa, v primerjavi z danes najbolj razširjenimi vozili na notranje izgorevanje.

Širša uporaba EV, ki jo je mogoče zaznati in tudi predvideti [2], vodi k večji porabi električne energije in obremenitvi omrežja. Da bi raziskali vpliv in predlagane rešitve ter razvili nove za čim blažji prehod, je EU podprla projekt EV4EU. V projektu EV4EU bo razvitih več orodij, metodologij, storitev, tehnologij in rešitev za blažji prehod k množični uporabi EV. Med drugim se v okviru projekta razvijajo tudi strategije upravljanja EV, v okviru poslovanja parkirišč in voznih parkov.

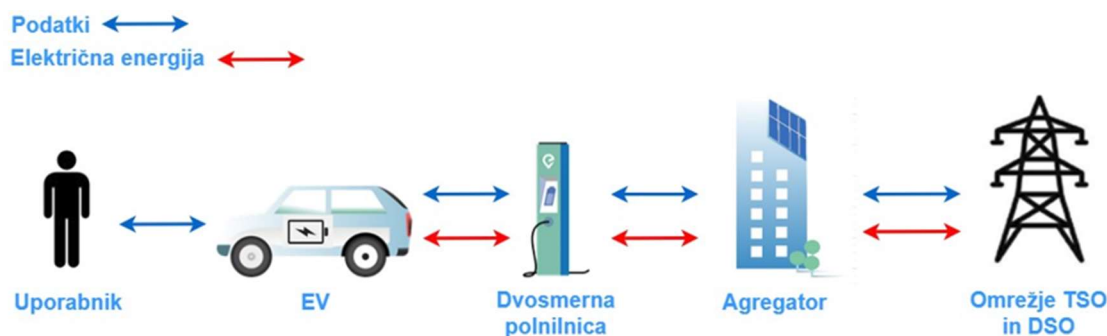
V tem članku bomo predstavili eno od tehnologij s katero lahko ublažimo težave, ki bodo nastale z množično uporabo EV. Predstavili bomo tehnologijo, ki omogoča dvosmerno izmenjavo električne energije med EV in omrežjem (V2G, ang. vehicle to grid). V2G omogoča lažje vključevanje večjega števila EV v omrežje, saj poleg polnjenja EV omogoča tudi njihovo praznjenje, to je oddajanje električne energije iz baterij EV nazaj v omrežje. Na tak način EV pripomorejo k večji stabilnosti omrežja.

V nadaljevanju bomo razložili tehnologijo V2G ter njen koncept. Nato bomo predstavili algoritem za določitev optimalne razporeditve polnjenj in praznjenj desetih EV na izbranem primeru uporabe službenega parkirišča. Cilj optimizacije je najmanjše skupno število ur polnjenj in praznjenj, ki še vedno zagotovi vse zahteve. In iz tega izhajajoča razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje, podana za vsako posamezno uro.

2 Dvosmerna izmenjava električne energije med EV in omrežjem

Tehnologija V2G omogoča EV, da shranjuje električno energijo iz omrežja v baterijo in da jo iz nje oddaja nazaj v omrežje, ko je to potrebno [2]. Je del širšega pojma V2X (ang. vehicle to everything), ki vključuje vse vrste komunikacije vozila z drugimi subjekti, kot so druga vozila, infrastruktura, hiše, itd.

EV, ki so kompatibilna s tehnologijo V2G, so ključni element pri izvajanju V2G koncepta, saj le ta omogočajo shranjevanje in oddajanje električne energije v omrežje. Iz raziskave [3] je razvidno, da se število EV, ki podpirajo tehnologijo V2G, iz leta v leto povečuje, kar veča tudi njen potencial uporabe v prihodnosti. EV in drugi akterji, ki so del V2G koncepta, so prikazani na sliki 1.



Slika 1. Akterji V2G koncepta ter izmenjava električne energije in podatkov med njimi [2]

Drugi ključni element je dvosmerna polnilnica (ang. bidirectional charger). To je napredna polnilnica, ki lahko polni in prazni baterijo EV, kar je njena prednost v primerjavi z navadnimi polnilnicami [4].

Agregator je udeleženec na trgu, bodisi fizična ali pravna oseba, ki povezuje odjem ali proizvodnjo več uporabnikov sistema, z namenom prodaje, nakupa ali sodelovanja na dražbah trgov električne energije [5]. Predstavlja povezavo med več EV oziroma upravljalcem polnilnih mest (CPO, ang. charge point operator) in omrežjem, ki ga predstavljata operater prenosnega omrežja (TSO, ang. transmission system operator) ali operater distribucijskega omrežja (DSO, ang. distribution system operator).

Agregator skupino EV oziroma polnilnice na katere so ti priključeni, tretira kot celoto in z njimi tudi upravlja [6]. Agregator te polnilnice agregira z virtualno elektrarno (VPP, ang. virtual power plant), s katero upravlja različne razpršene vire. Pogosto se v tem okolju pojavlja tudi prej omenjen CPO, ki prevzema nekaj nalog agregatorja. Kot izhaja iz njegovega imena prevzema upravljanje s polnilnimi mesti. Tako je vmesni člen med EV, polnilnicami in agregatorjem.

Agregator s strani omrežja pridobi zahteve, kdaj in koliko električne energije mora prejeti (polnjenje EV) oziroma oddati (praznjenje EV) v omrežje [4], [6]. Ob izpolnjenju vseh zahtev, ki se tičejo EV, pa poskrbi da so zagotovljene tudi vse zahteve s strani omrežja. Agregator s tem pripomore k večji stabilnosti omrežja, hkrati se EV napolnijo na želen SOC (ang. state of charge) [6].

TSO in DSO, ki upravljata omrežje na nacionalnem oziroma lokalnem nivoju, na podlagi podatkov o stanju v omrežju agregatorju podata zahtevo kdaj in koliko električne energije, naj prejme oziroma odda v omrežje. To za primer V2G pomeni, da TSO in DSO podata agregatorju zahtevo, ali naj polni oziroma prazni baterije [4], [7]. Motiv TSO in DSO za sodelovanje oziroma izvajanje storitev s pomočjo tehnologije V2G je lahko tudi odlog finančnih vložkov v infrastrukturo in podobno.

Uporabnik v V2G konceptu je lahko fizična oseba ali podjetje, ki ima v lasti vozni park EV ali ga upravlja. V primeru voznega parka, ki ga ima v lasti podjetje oziroma ga upravlja agregator, ta določa z EV povezane zahteve. V V2G konceptu lahko uporabnik nastavi naslednje podatke, ki se tičejo EV [4], [8]: predviden čas odklopa, zahtevan SOC ob odklopu in dodatne podatke, odvisne od primera.

3 Izbrani primer uporabe službenega parkirišča

Raziskave tehnologij V2G so trenutno aktualne, zato smo se lotili raziskave voznega parka EV [10]. V tem primeru službenega parkirišča dostavnih kombijev, ki imajo baterije s kapaciteto 100 kWh in možnost dvosmerne polnjenja.

Med delavnikom, v času službe, EV na službenem parkirišču niso priključeni, saj opravljajo dostave. Ob koncu delavnika, ob 16ih, se EV priključijo do naslednjega dne, do 8ih zjutraj.

Predpostavili smo, da je službeno parkirišče opremljeno z desetimi dvosmernimi polnilnicami. Z maksimalno močjo polnjenja oziroma praznjenja je 20 kW. Ob tem smo predpostavili, da se EV lahko polnijo oziroma praznijo le z maksimalno močjo polnilnice ali pa se ne.

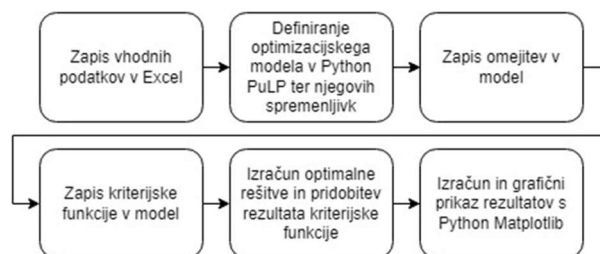
Polnjenje in praznjenje EV v našem primeru upravlja agregator. Predpostavili smo, da agregator zahteve, ki se tičejo posameznega EV, določi sam. V predstavljenem primeru morajo biti vsi EV ob odklopu napolnjeni na 80 odstotkov (zahtevan SOC ob odklopu), kar je znotraj območja napoljenosti baterije [9]. SOC ob priklopu vsakega EV v našem primeru znaša 20 odstotkov, saj smo določili, da vsak posamezni EV med delavnikom porabi 60 odstotkov baterije.

Službeno parkirišče z desetimi EV opazujemo z vidika agregatorja, kar pomeni, da se mora poleg zahtev, ki se tičejo EV (npr. SOC ob odklopu) zagotoviti tudi zahteve, pridobljene s strani omrežja za polnjenje in praznjenje EV. Te zahteve s strani omrežja predstavljajo električno energijo, ki jo naj EV prejmejo s polnjenjem oziroma količino električne energije, ki jo naj EV oddajo v omrežje s praznjenjem, v urah, ki jih zahteve obsegajo. Podrobnejši opisi predpostavk in poenostavitev so zbrani v [10].

4 Iskanje optimalne razporeditve polnjenj in praznjenj električnih vozil

Cilj raziskave je optimalna razporeditev ur polnjenj in praznjenj desetih EV, da zagotovimo določen SOC. Ob tem pa še vedno zagotovimo zahteve s strani omrežja ter ostale poenostavitve in predpostavke, ki smo jih določili. Optimizacijo smo dosegli z najmanjšim številom skupnih ur polnjenj in praznjenj EV. Primer optimizacije smo izvedli s knjižnico *Python PuLP*.

4.1 Koraki optimizacije



Slika 2. Prikaz poteka izvajanja optimizacije za iskanje optimalnega rasporeda polnjenj in praznjenj EV na službenem parkirišču z desetimi električnimi vozili

Na sliki 2 je prikazan potek optimizacije. Pred začetkom optimizacije smo zapisali vhodne podatke v Excel dokument, ki smo ga nato prebrali v *Pythonu*. V tem

dokumentu smo zapisali osnovne podatke, podane v poglavju 3, ter podatke o zahtevah s strani omrežja, priključenosti EV in zahtevanih urah polnjenja posameznega EV. Nato smo definirali optimizacijski model v *Pythonu* s *PuLP* knjižnico ter določili spremenljivke, zapisane v podpoglavju 4.2. Sledil je zapis omejitev, definiranih v podpoglavju 4.3. Naš optimizacijski model smo zapisali s kriterijsko funkcijo, opisano v podpoglavju 4.4. Po zagonu optimizacijskega modela, smo pridobili optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj desetih EV ter rezultat kriterijske funkcije. Rezultati so predstavljeni v poglavju 5. Za grafični prikaz smo uporabili *Matplotlib* knjižnico v *Pythonu*.

4.2 Spremenljivke in omejitve

Za zapis našega primera optimizacije potrebujemo tri spremenljivke, polnjenje EV (x), praznjenje (y) ter dodatno polnjenje (z), ki se mora izvesti tolikokrat (toliko ur) kolikorkrat se je EV praznil. Zaradi lažjega zapisa smo določili, da so vse spremenljivke binarne.

Model smo omejili z naslednjimi zahtevami:

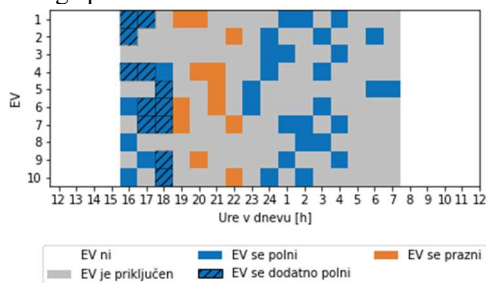
- EV se polni toliko ur, da se napolni iz začetnega SOC na zahtevan SOC,
- EV se lahko prazni največ 2 uri,
- EV se dodatno polni toliko ur kolikor ur se je praznil (doseganje željenega SoC, kljub sodelovanju v storitvi),
- EV se v posameznem časovnem intervalu lahko le navadno polni, dodatno polni ali prazni, dodatno polnijo kadar je to le mogoče je pred praznjenjem in
- EV se lahko praznijo samo v urah, katere obsega zahteva, v tem času se drugi EV ne smejo polniti.

4.3 Kriterijska funkcija

Optimalna razporeditev v našem primeru je minimum kriterijske funkcije. Za zapis kriterijske funkcije smo morali za posamezen EV sešteti ure v katerih se je polnil, dodatno polnil in praznil in nato iskati rezultat oziroma razporeditev, ko je to število najmanjše [10].

5 Rezultati

Na sliki 3 je prikazana optimalna razporeditev polnjenj in praznjenj desetih EV na izbranem primeru uporabe službenega parkirišča.



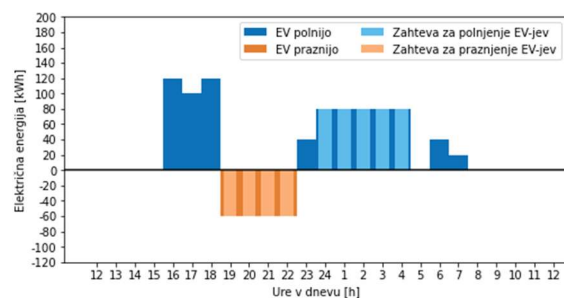
Slika 3. Optimalna razporeditev polnjenj in praznjenj desetih EV za izbrani primer uporabe službenega parkirišča

Iz slike 3 je razvidno, da se vsak EV polni 3 ure (brez dodatnih polnjenj). To je čas, ki ga potrebuje vsak EV, da se napolni iz 20 na 80 odstotkov. Ure smo izračunali po enačbi (1), ki je zapisana v [10].

Vsi EV so se tudi dodatno polnili toliko ur, kolikor ur so se praznili, kar ustreza našim predpostavkam. Poleg tega je razvidno, da se noben EV ne prazni več kot 2-krat, kar ustreza zahtevi, ki se navezuje na minimalno obremenitev baterije posameznega EV. Te ugotovitve potrjujejo, da je optimalna razporeditev polnjenj in praznjenj EV ustreza.

Iz slike 3 je razvidno, da se vsi EV, ki se praznijo, polnijo pred praznjenjem, kar je razumljivo, saj imajo ob priklopu vsi EV baterijo napolnjeno na 20 odstotkov. Torej nimajo v baterijah na voljo električne energije, ki bi jo lahko uporabili za praznjenje (zahteva – meja izpraznjenosti baterije je 20 %).

Na naslednji sliki, slika 4, je prikazana količina električne energije, ki se prejme oziroma odda v omrežje iz celotnega službenega parkirišča z desetimi EV v V2G konceptu znotraj obdobja 24 ur za vsako posamezno uro. Količina električne energije je izračunana na podlagi optimalnega razporeda polnjenj in praznjenj desetih EV, ki je prikazan na sliki 3. Poleg tega so na sliki 4 prikazane zahteve s strani omrežja za polnjenje (prejemanje električne energije iz omrežja) in praznjenje (oddajanje električne energije v omrežje) EV, kot smo jih definirali [10].



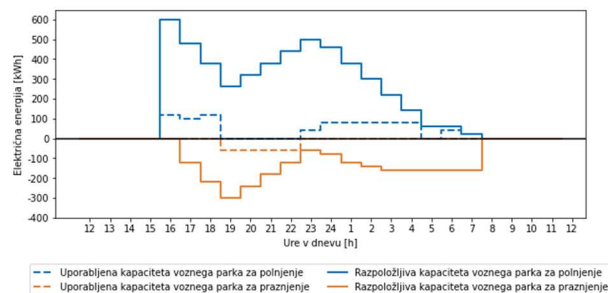
Slika 4. Električna energija, ki se rabi oziroma oddaja v omrežje iz celotnega službenega parkirišča z desetimi EV, za vsako uro v obdobju 24 ur glede na optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj EV

Iz slike 4 je razvidno, da smo zagotovili zahteve s strani omrežja za polnjenje in praznjenje EV. To opazimo tako, da se stolpec z zahtevo iz omrežja prekriva s količino prejete oziroma oddane električne energije v omrežje iz celotnega službenega parkirišča.

Kot rezultat kriterijske funkcije smo po izvedeni optimizaciji dobili število 54. Kar pomeni, da se mora deset EV skupno polniti in prazniti najmanj 54 ur. S tem se namreč zagotovi zahtevam s strani omrežja za polnjenje in praznjenje EV ter vse potrebne predpostavke in poenostavitve. Iz podatka 54 ur lahko izračunamo, da je v povprečju baterija posameznega EV-ja na našem službenem parkirišču v uporabi 5,4 ure. To pomeni, da se baterija posameznega EV-ja skupno polni in prazni toliko časa. V našem primeru je posamezni EV priključen 16 ur, kar pomeni, da je v povprečju njegova baterija v uporabi približno eno tretjino časa ko je vozilo priključeno.

Za takšen voznik park lahko tudi podamo razpoložljivo kapaciteto. Ta nam pove za vsako uro skupno kapaciteto baterij vseh priključenih EV, ki je na voljo za polnjenje oziroma praznjenje (slika 5).

Na sliki 5 vidimo, da je največja razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje v prvi uri od priklopa EV. Prikazana je s polno modro črto. Razlog je v tem, da so vsi EV na začetku izpraznjeni na 20 odstotkov. Nato razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje prične upadati, saj se baterije EV polnijo. Po času sodelovanja v storitvah prične ponovno naraščati do časa, ko se EV pričnejo polniti proti zahtevanemu SOC ob odklopu.



Slika 5. Razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje ter uporabljena kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje, glede na optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj desetih EV za izbrani primer uporabe

Iz slike 5 je razvidna tudi razpoložljiva kapaciteta za praznjenje. Ta je prikazana s polno oranžno črto. Ker smo v izračunih za vrednosti praznjenja uporabljali negativen predznak, smo tak način označevanja ohranili tudi tukaj za prikaz količin.

Vidimo, da je razpoložljiva kapaciteta praznjenja nasprotno od razpoložljive kapacitete polnjenja ob priklopu najmanjša in se do zadnjih ur obnaša inverzno napram razpoložljivi kapaciteti polnjenja.

Razpoložljiva kapaciteta baterije EV, bodisi za polnjenje ali pa praznjenje, nam služi za predvidevanje količin, ki jih lahko agregator ponudi na trgu električne energije. Tako lahko služi kot podlaga za razvoj algoritmov različnih strategij agregatorja za sodelovanje na dražbah trgov z električno energijo, storitvami električnega omrežja ali trgu prožnosti.

6 Zaključek

V članku smo predstavili koncept dvosmernega polnjenja električnih vozil V2G. Z raziskavami poskušamo ugotoviti njeno vlogo pri zagotavljanju stabilnosti omrežja ob vključevanju vse večjega števila EV. S projekti, kot je [2], želimo določiti vlogo tehnologije V2G pri zagotavljanju stabilnosti omrežja ob večanju števila EV na evropskih cestah.

Raziskave predstavljene v tem članku so širše vpete v projekt Horizon Europe EV4EU [2]. Za izbrani primer uporabe službenega parkirišča, smo poiskali optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj EV. Ugotovili smo, da je ob podanih zelenih SOC EV, zahtevah omrežja in omejitvah modela, potrebnih najmanj 54 skupnih ur polnjenj in praznjenj EV za zagotovitev vseh zahtev.

V prihodnje bomo vključili realne podatke, ko bodo na voljo ustrezni testni poligoni v okviru projekta [2]. S

tem se bodo rezultati še bolj približali realni situaciji. Možnost za nadaljnje delo je tudi skaliranje izbranega primera in ugotavljanje občutljivosti na različne parametre.

7 Zahvala

Raziskave podpira projekt HE EV4EU (2022-2025).

EV4EU is funded by European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement no. 101056765. Views and opinions expressed in this document are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Literatura

- [1] T. Mcphie in A. Crespo Parrondo, „EU deal to end sale of new CO2 emitting cars by 2035“, *European Commission - European Commission*, 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462 (pridobljeno 15. avgust 2023).
- [2] „EV4EU“. Pridobljeno: 22. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://ev4eu.eu/resources/>
- [3] Industry ARC, „Vehicle to Grid (V2G) Market 2020 - 2025“, 2023. <https://www.industryarc.com/Report/19376/vehicle-to-grid-market.html> (pridobljeno 15. avgust 2023).
- [4] J. Svarc, „V2G Explained - Benefits of Vehicle-to-grid Technology“, *CLEAN ENERGY REVIEWS*, 30. junij 2023. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/v2g-explained-vehicle-to-grid-benefits> (pridobljeno 15. avgust 2023).
- [5] Uradni list RS, „Zakon o oskrbi z električno energijo“, *Uradni list RS, št. 172/21*, 20. oktober 2021. <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina> (pridobljeno 21. avgust 2023).
- [6] S.-A. Amamra in J. Marco, „Vehicle-to-Grid Aggregator to Support Power Grid and Reduce Electric Vehicle Charging Cost“, *IEEE Access*, let. 7, str. 178528–178538, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2958664.
- [7] Y. Ma *idr.*, „An overview on V2G strategies to impacts from EV integration into power system“, v *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, maj 2016, str. 2895–2900. doi: 10.1109/CCDC.2016.7531477.
- [8] Vehicle 2 Grid, „Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Home (V2H), bidirectional charging, the car as electricity storage for grid stabilization (control energy), new grid services, CHAdeMO plug“, *Vehicle-2-Grid*, 2023. <https://www.vehicle-2-grid.eu/en/on-the-topic/> (pridobljeno 15. avgust 2023).
- [9] S. Blanco, „How to Maximize EV Range“, *J.D. Power*, 2022. <https://www.jdpower.com/shared/pageerror> (pridobljeno 24. junij 2023).
- [10] T. Marentič, „Raziskava koncepta dvosmerne izmenjave električne energije med električnimi vozili in omrežjem“, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, september 2023.