

Dvosmerna izmenjava električne energije V2G za razvoj storitev prožnosti z agregacijo voznega parka električnih vozil

Tim Marentič, Igor Mendek, Klara Anžur, Matej Zajc

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

E-pošta: tim.marentic@fe.uni-lj.si, igor.mendek@fe.uni-lj.si, klara.anzur@fe.uni-lj.si, matej.zajc@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku smo raziskali koncept dvosmerne izmenjave električne energije med električnimi vozili (EV) in omrežjem (angl. vehicle to grid, V2G). Na primeru voznega parka, ki uporablja tehnologijo V2G, smo demonstrirali zmožnost sodelovanja EV v storitvah prožnosti in posledično zagotavljanja stabilnosti omrežja. Za iskanje optimalne razporeditve polnjenj in praznjenj EV za izbrani primer uporabe, smo razvili preprost simulator v jeziku Python s knjižnico PuLP. Cilj optimizacije, ki smo jo zapisali z linearnim programiranjem, je doseči najmanjše število ur polnjenj in praznjenj EV, da so izpolnjene vse zahteve EV in omrežja. Z vidika agregatorja smo za izbrane primere uporabe ugotovili, da je primer službenega parkirišča z 20 % napolnjenostjo (angl. state of charge, SOC) ob priklopu in zahtevanem SOC ob odklopu na 80 % najustreznejši za sodelovanje v storitvi V2G.

Ključne besede: električna vozila, e-mobilnost, V2G, V2X, VGI, storitve prožnosti, virtualna elektrarna, QoL

Bidirectional power exchange between electric vehicles and the grid V2G for the development of flexibility services with aggregation of the EV fleet

The paper presents a vehicle-to-grid (V2G) technology. On an example of a vehicle fleet using the V2G technology, the ability of electric vehicles (EVs) is demonstrated to participate in flexibility services to ensure the grid stability. A simple simulation tool in Python with the PuLP library, is developed to calculate the optimal scheduling of the EVs charging and discharging. The optimization written with linear programming assures minimum number of EV charging and discharging hours while meeting the EVs and grid requirements. From the aggregator's point of view, we found that the most suitable use case is the one with the EVs charged at 20 % at plug-in and the required state of charge at disconnection at 80 %.

Keywords: electric vehicles, e-mobility, V2G, V2X, flexibility services, virtual power plant, QoL

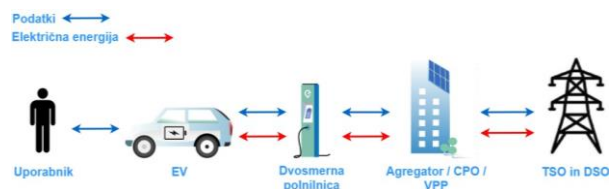
1 UVOD

Težnja po ublažitvi podnebnih sprememb zahteva drastične spremembe. Ena izmed njih je elektrifikacija prometa, katere cilj je zmanjšati izpuste toplogrednih plinov in posledično vplivati na kakovost življenja (angl. quality of life, QoL). S širšo uporabo električnih vozil (EV) pa nastajajo težave pri preobremenjenosti omrežja, ki zahtevajo ustrezne rešitve [1].

Po dveh desetletjih koncept dvosmerne izmenjave električne energije med EV in omrežjem (angl. vehicle to grid, V2G) prehaja iz teorije v praktično rabo, saj so se temu zavezali vsi večji proizvajalci EV [2]. Tehnologija V2G oziroma širši termin V2X (angl. vehicle to everything) je tudi osrednji del projekta

Horizon Europe EV4EU, v okviru katerega raziskujemo vpliv množične uvedbe e-mobilnosti s poudarkom na tehnologijah V2G in razvoju novih poslovnih modelov [3]. Načeloma V2G omogoča lažje vključevanje večjega števila EV v omrežje, saj poleg dinamičnega polnjenja EV omogoča tudi njihovo praznjenje, to je oddajanje električne energije iz baterij EV nazaj v omrežje.

V članku obravnavamo tehnologijo V2G s stališča agregacije več vozil v storitve prožnosti, s ciljem, da EV pripomorejo k večji stabilnosti omrežja. Podali smo algoritem za določitev optimalne razporeditve polnjenj in praznjenj EV na izbranem primeru uporabe službenega parkirišča ter prikazali vpliv V2G. Prav tako smo izračunali razpoložljivo kapaciteto voznega parka za polnjenje in praznjenje. Na podlagi izbranih primerov uporabe smo ocenili, kateri je najustreznejši za sodelovanje v izbranem konceptu V2G.



Slika 1. Akterji koncepta V2G ter izmenjava električne energije in podatkov med njimi. Vizualni elementi so uporabljeni z dovoljenjem EV4EU [3].

2 DVOSMERNNA IZMENJAVA ELEKTRIČNE ENERGIJE MED EV IN OMREŽJEM

Tehnologija V2G je del širšega pojma V2X, ki vključuje vse vrste komunikacije vozila z drugimi subjekti kot so druga vozila, infrastruktura, hiše itd. [2].

Slika 1 predstavi akterje koncepta agregacije EV s tehnologijo V2G. Ključna elementa sta EV, ki podpira tehnologijo V2G, in dvosmerna polnilnica (angl. bidirectional charger), ki lahko polni in prazni baterijo EV [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 upravljavcem polnilnih mest (angl. charge point operator, CPO) in omrežjem, ki ga predstavljata operater prenosnega omrežja (angl. transmission system operator, TSO) ali operater distribucijskega omrežja (angl. distribution system operator, DSO).

Agregator skupino EV oziroma polnilnice, na katere so ti priključeni, agregira v virtualno elektrarno (angl. virtual power plant, VPP) [6], s katero upravlja različne razpršene vire. Vedno večjo vlogo ima CPO, ki prevzema upravljanje polnilnih mest, zato je vmesni člen med EV, polnilnicami in agregatorjem [4].

Agregator od omrežja pridobi zahteve, kdaj in koliko električne energije mora porabiti (polnjenje EV) oziroma oddati (praznjenje EV) v omrežje. Ob izpolnjenju zahtev, ki zadevajo EV, poskrbi tudi za zagotavljanje zahtev omrežja. Agregator s tem sodeluje v storitvah prožnosti in posledično poskrbi za večjo stabilnost omrežja, hkrati pa se EV napolnijo na zeleno napolnjenost (angl. state of charge, SOC) [4].

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 porabi oziroma odda v omrežje. To za primer V2G pomeni, da agregator s pomočjo VPP polni oziroma prazni baterije EV. Motiv TSO in DSO za sodelovanje v storitvah V2G je zmanjšanje stroškov obratovanja, doseganje zanesljivega obratovanja in odlog finančnih vložkov v infrastrukturo [7], [8]. Poslovni model V2G omogoča lastnikom EV udeležbo na trgu električne energije, s čimer pridobijo dodatni zaslužek in prispevajo k stabilnosti omrežja [9].

3 IZBRANI PRIMER UPORABE

Zaradi priložnosti, ki jih prinaša agregacija večjega števila EV, so aktualne raziskave voznega parka poslovnih EV v povezavi s konceptom V2G. Z raziskavo želimo ugotoviti vpliv koncepta V2G na službeno parkirišče desetih dostavnih kombijev s kapaciteto baterij 100 kWh in podporo dvosmernemu polnjenju.

Predpostavili smo, da je službeno parkirišče opremljeno z desetimi dvosmernimi polnilnicami, ki imajo maksimalno moč polnjenja oziroma praznjenja

20 kW. Ob tem smo predpostavili tudi, da se EV lahko polnijo oziroma praznijo le z maksimalno močjo polnilnice ali pa se ne polnijo. V času delovnika EV opravljajo dostave. Ob koncu delovnika, ob 16. uri, so priključeni na polnilnice do naslednjega dne, do 8. ure zjutraj.

Zaradi minimalne obremenitve baterije smo določili, da se vsak EV lahko prazni največ dve uri v celotnem obdobju, ko je priključen [10]. Na podlagi [11] smo določili, da se EV ne smejo izprazniti pod 20 %.

Določili smo tudi, da če se EV prazni, se mora tudi dodatno polniti znotraj istega obdobja priključenosti. Razlog za to je, da je treba do odklopa EV doseči zahtevano raven SOC. V našem primeru se mora EV dodatno polniti toliko ur, kolikor ur se je praznil.

Polnjenje in praznjenje EV v našem primeru upravlja agregator, ki zahteve, ki zadevajo posamezni EV, določi sam. V predstavljenem primeru morajo biti vsi EV ob odklopu napolnjeni na 80 % (zahtevan SOC ob odklopu). Ob priklopu SOC vsakega EV znaša 20 %.

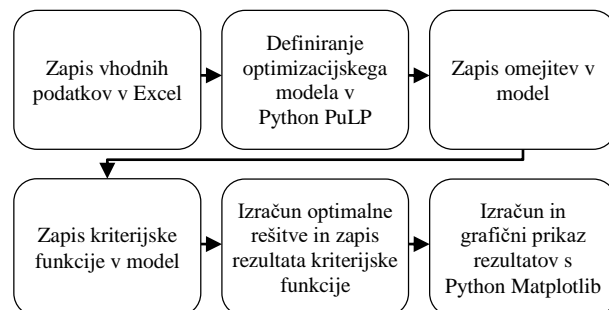
Službeno parkirišče z desetimi EV opazujemo z vidika agregatorja, ki mora poleg zahtev, ki zadevajo EV, zagotoviti tudi zahteve pridobljene s strani omrežja. V raziskavi smo obravnavali idealni sistem, v katerem ni izgub oziroma ima 100-odstotni izkoristek.

4 ISKANJE OPTIMALNE RAZPOREDITVE POLNENJ IN PRAZNENJ EV

Cilj raziskave je pregled vpliva koncepta V2G na izbrani primer uporabe ter določitev optimalne razporeditve ur polnjenj in praznjenj desetih EV, da zagotovimo zahtevani SOC ob odklopu. Ob tem pa še vedno izpolnimo zahteve omrežja ter druge poenostavitve in predpostavke, ki smo jih določili v 3. Cilj optimizacije je doseči najmanjše število ur polnjenj in praznjenj EV, da so izpolnjene vse zahteve. Primer optimizacije smo izvedli s knjižnico *Python PuLP* [12].

4.1 Potek izvajanja optimizacije

Na sliki 2 je prikazan potek izvajanja optimizacije. Pri izvajanju optimizacije smo izbrali časovni interval ure.



Slika 2. Prikaz poteka izvajanja optimizacije za iskanje optimalnega razporeda polnjenj in praznjenj.

Pred začetkom optimizacije smo zapisali vhodne podatke v Excelov dokument. Vanj smo zapisali tudi

osnovne podatke, podane v 3, ter podatke o zahtevah omrežja in zahtevanih urah polnjenja posameznega EV. Nato smo definirali optimizacijski model v *Pythonu* s knjižnico *PuLP* ter določili spremenljivke in zapisali omejitve, opisane v 4.2, in uvozili še podatke iz prej navedenega Excelovega dokumenta. Optimizacijski model smo zapisali s kriterijsko funkcijo, opisano v 4.3. Po zagonu optimizacijskega modela smo dobili optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj desetih EV ter rezultat kriterijske funkcije. Rezultati so predstavljeni v 5.

4.2 Spremenljivke in omejitve

Za zapis primera optimizacije smo izbrali tri spremenljivke: polnjenje (x), praznjenje (y) ter dodatno polnjenje (z) EV. Zaradi lažjega zapisa smo določili, da so vse spremenljivke binarne.

V optimizacijskem modelu smo zapisali naslednje omejitve, ki so morale biti izpolnjene:

- posamezni EV se mora polniti toliko ur, da se napolni do zahtevanega SOC ob odklopu;
- vsak EV se lahko prazni največ 2 uri;
- EV se dodatno polni toliko ur, kolikor ur se je praznil, da doseže zahtevani SOC, kljub sodelovanju v storitvah V2G;
- EV se v posameznem časovnem intervalu lahko le polni, prazni ali dodatno polni;
- dodatno polnjenje EV se izvede pred praznjenjem, kadar je potrebno;
- EV se lahko praznijo samo v urah, ki jih obsega zahteva, v tem času se drugi EV ne smejo polniti;
- zagotavljanje zahtev omrežja.

4.3 Kriterijska funkcija

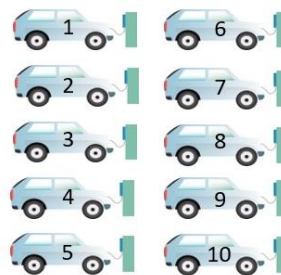
Iskali smo minimum kriterijske funkcije, s katero želimo doseči najmanjše število ur polnjenj in praznjenj desetih EV, da ustrezemo zahtevam, predpostavkam in poenostavitvam. Za zapis kriterijske funkcije smo za vsak EV sešteli ure, ko se je polnil, dodatno polnil ali praznil, ter nato iskali razporeditev, ko je to število najmanjše. Ta kriterijska funkcija se navezuje na vsak posamezni EV in ure, v katerih smo izvedli optimizacijo (24 ur).

5 OPTIMALNA RAZPOREDITEV IN OBREMITVENI DIAGRAM

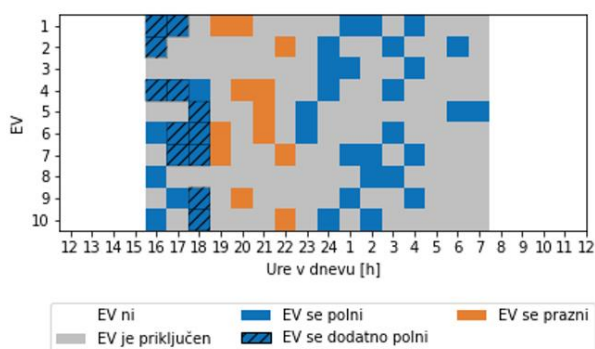
Na sliki 3 je izbrani primer uporabe z optimalno razporeditvijo polnjenj in praznjenj. Vidimo, da se vsak EV polni tri ure (brez dodatnih polnjenj). To je potreben čas, v katerem se EV napolni na 80 % SOC.

Razvidno je, da so se vsi EV tudi dodatno polnili toliko ur, kolikor ur so se praznili, kar ustreza postavljenim predpostavkam. Poleg tega se noben EV ne prazni več kot dvakrat, kar ustreza zahtevi, ki se navezuje na izbrano minimalno obremenitev baterije posameznega EV. Te ugotovitve potrjujejo, da optimalna razporeditev

polnjenj in praznjenj EV ustreza zastavljenim okvirom modela.



Optimalna razporeditev polnjenj in praznjenj EV

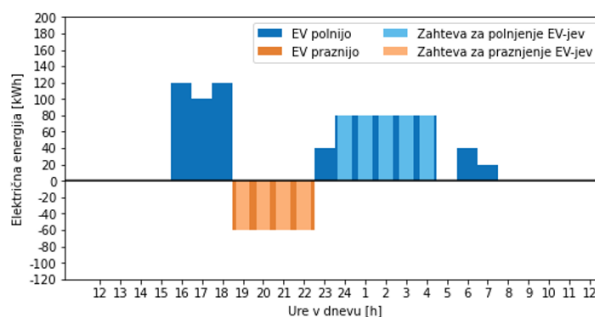


Slika 3. Prikaz optimalne razporeditve polnjenj in praznjenj EV izbranega primera uporabe. Vizualni elementi so uporabljeni z dovoljenjem EV4EU [3].



Agregator / VPP

Obremenitveni diagram



Slika 4. Agregiran prikaz obremenitvenega diagrama za izbrani primer uporabe glede na optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj EV. Vizualni elementi so uporabljeni z dovoljenjem EV4EU [3].

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

Na sliki 4 je prikazano agregirano službeno parkirišče. Obremenitveni diagram prikazuje količino električne energije, ki jo je službeno parkirišče porabilo iz omrežja oziroma jo vanj oddalo. Izračun temelji na optimalni razporeditvi, ki je prikazana na sliki 3. Na sliki 4 so prikazane tudi zahteve s strani omrežja za rabo električne energije iz omrežja in oddajanje električne energije vanj (osnovne zahteve).

Na sliki 4 vidimo, da so zahteve omrežja izpolnjene. To je razvidno v prekrivanju stolpcev prejete oziroma oddane električne energije s stolpci podanih zahtev.

Za podane vhodne podatke je minimum kriterijske funkcije 54. Ta podatek predstavlja število polnjenj in praznjenj za vse EV skupaj. Iz podatka 54 ur lahko izračunamo, da je v povprečju baterija posameznega EV v uporabi 5,4 ure oziroma približno eno tretjino časa priključenosti.

6 NAKLJUČNI VHODNI PODATKI IN VEČ ITERACIJ OPTIMIZACIJE

V raziskavi smo želeli raziskati tudi vpliv naključnega spreminjanja vhodnih podatkov in se s tem bolj približati realnemu primeru.

6.1 Naključni vhodni podatki

V optimizacijo smo vpeljali v nadaljevanju opisane naključne vhodne podatke.

- Določili smo naključne ure priklopa in odklopa posameznega EV, ki od časov, določenih v 3, odstopajo za ± 2 uri.
- Skladno s [13] o popravilih in vzdrževanju poslovnih vozil, smo določili, da je EV prisoten 357 dni v letu oziroma da verjetnost priklopa EV znaša 97,8 %.
- Skladno s trditvijo, da je čas delovanja polnilnic med 95 in 98 % [14], smo privzeli 95 % verjetnost, da polnilnica deluje.

6.2 Gotovost zagotavljanja izbranih zahtev omrežja

Gotovost zagotavljanja izbranih zahtev omrežja smo izračunali po izvedenih 100 in 1.000 iteracijah optimizacije. Gotovost je izračunana kot razmerje med vsemi uspešno izvedenimi iteracijami, v katerih zagotovimo vse zahteve, in vsemi izvedenimi iteracijami.

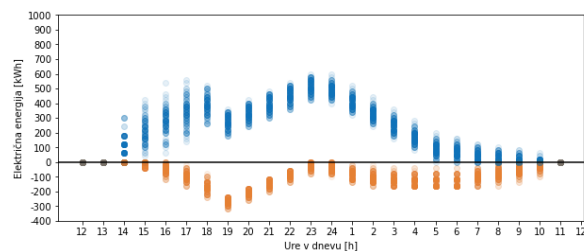
Z vidika agregatorja smo želeli ugotoviti, s kakšno gotovostjo lahko zagotavlja izbrane zahteve omrežja, in oceniti, katere lahko zagotavlja z dovolj veliko gotovostjo, da lahko sodeluje v storitvah prožnosti na trgu električne energije. Dejanskega podatka, s kolikšno gotovostjo zagotavljanja zahtev omrežja je agregator te še pripravljen sprejeti, nismo zasledili. Pri poljih vetrnih

elektrarn je natančnost napovedi proizvodnje med 80 in 90 %, kar pomeni, da kljub 10- do 20-odstotni napaki sodelujejo v tovrstnih storitvah [15]. Zato smo privzeli, da je meja gotovosti zagotavljanja zahtev, kjer jih agregator še sprejme, okrog 80 %. Vse v nadaljevanju podane ugotovitve so sprejete na podlagi izračunane gotovosti po 1.000 iteracijah.

Za izbrani primer uporabe, ki je omenjen v 3, smo ugotovili, da lahko agregator z dovolj veliko gotovostjo sprejme štiri od devetih izbranih zahtev omrežja.

6.3 Spreminjanje razpoložljive kapacitete voznega parka

Na sliki 5 je za vsako uspešno iteracijo od stotih prikazana razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje. Z modro barvo je prikazano polnjenje in z oranžno praznjenje. Razpoložljiva kapaciteta nam za vsako uro pove skupno kapaciteto baterij vseh priključenih EV, ki je na voljo za polnjenje oziroma praznjenje. S slike 5 je razvidno, kako se ta spreminja za vsako uspešno iteracijo pri zagotavljanju osnovnih zahtev omrežja.



Slika 5. Razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje za vsako uspešno iteracijo optimizacije od stotih pri zagotavljanju osnovnih zahtev omrežja.

S slike 5 je razvidno, da se v začetnih urah pojavi veliko nihanje oziroma raztros razpoložljive kapacitete za polnjenje. Razlog je v tem, da je ta odvisna od števila EV, ki so priključeni. V začetnih urah ta narašča, ker je vse več EV priključenih. Nato upade, ker se posamezni EV začnejo polniti, da bodo ugodili zahtevam omrežja za oddajo električne energije. Upad proti koncu se zgodi, ker se EV začnejo polniti proti zahtevanemu SOC ob odklopu, kar zmanjša kapaciteto v baterijah EV, ki je na voljo. Povprečna vrednost je po vseh izvedenih iteracijah v območjih temno modre barve.

Od 14. do 16. ure je razpoložljiva kapaciteta voznega parka za praznjenje v povprečju zelo nizka, saj EV ob priklopu nimajo na voljo električne energije za praznjenje. Omejuje jih meja izpraznjenosti. Potem začne naraščati, ker se posamezni EV začnejo polniti, tako se povečuje količina električne energije, ki je na voljo za praznjenje. Nato upade in se ponovno vzpne do meje, ki je omejena s predpostavkami in poenostavitvami. Povprečna vrednost se po vseh izvedenih iteracijah nahaja v območjih temno oranžne barve.

Razvidno je, da je razpoložljiva kapaciteta praznjenja nasprotno od razpoložljive kapacitete polnjenja ob

priklopu najmanjša in se do zadnjih ur obnaša inverzno v primerjavi z razpoložljivo kapaciteto polnjenja.

Razpoložljiva kapaciteta voznega parka, bodisi za polnjenje ali praznjenje, nam služi za predvidevanje količin, ki jih lahko agregator ponudi na trgu električne energije.

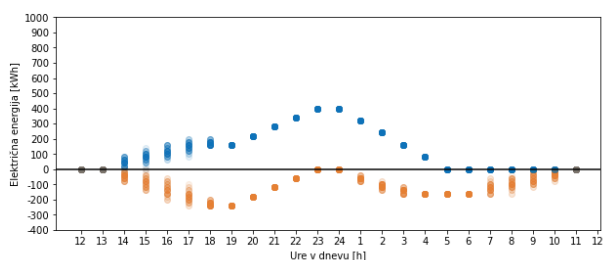
7 DODATNA PRIMERA UPORABE

Z željo po opazovanju vpliva spremembe SOC ob priklopu EV in zahtevanega SOC ob odklopu smo vpeljali še dva primera uporabe. Spreminjali smo SOC ob priklopu in zahtevani SOC ob odklopu. Spremembo SOC v primeru uporabe smo zapisali z vpeljavo indeksa SOC ($x-y$), kjer x predstavlja SOC ob priklopu EV in y zahtevani SOC ob odklopu.

7.1 SOC (40–60)

V tem dodatnem primeru uporabe smo želeli ponazoriti primer dostave zadnjega kilometra, ki ima v kombinaciji z EV velik potencial [16].

Na sliki 6 je za vsako uspešno iteracijo prikazana razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje, ki se navezuje na primer uporabe SOC (40–60).



Slika 6. Razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje za vsako uspešno iteracijo od stotih za ponazorjeni primer dostave zadnjega kilometra pri zagotavljanju osnovnih zahtev omrežja.

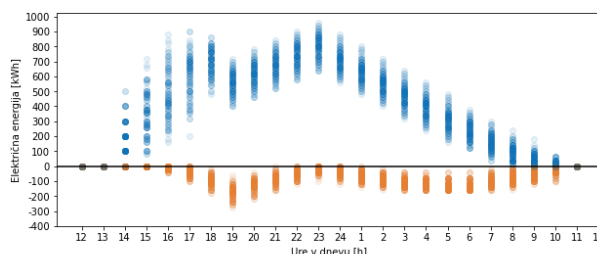
Na sliki 6 je razvidno, da so vse uspešne iteracije pri razpoložljivi kapaciteti voznega parka za polnjenje in praznjenje v določenih urah konsistentne (samo ena pika). Razlog je v tem, da je uspešnost zagotavljanja osnovnih zahtev okoli 50 %.

V primerjavi s primerom iz 6 je razvidno, da je v primeru SOC (40–60) na voljo manj razpoložljive kapacitete voznega parka za polnjenje. Razlog je manjša razlika med SOC ob priklopu in zahtevanim SOC ob odklopu. Ta je v primerjavi s primerom iz 6 manjša za 40 %. Tako je že v začetku na voljo manj kapacitete baterij EV za polnjenje. Pri primerjavi kapacitet za praznjenje vidimo, da je ta zdaj večja. Razlog je, da imajo EV v primeru SOC (40–60) že ob priklopu na voljo nekaj električne energije za izpraznitev.

Ugotovili smo, da agregator v tem primeru ne more z dovolj veliko gotovostjo zagotoviti izbranih zahtev omrežja. Njegovo sodelovanje v našem primeru koncepta V2G je omejeno.

7.2 SOC (0–100)

Dodatni primer uporabe SOC (0–100) smo vpeljali, da bi prikazali vpliv, če imamo na voljo celotno baterijo EV. Na sliki 7 je za vsako uspešno iteracijo prikazana razpoložljiva kapaciteta voznega parka za primer uporabe SOC (0–100).



Slika 7. Razpoložljiva kapaciteta voznega parka za polnjenje in praznjenje za vsako uspešno iteracijo od stotih za primer uporabe SOC (0–100) pri zagotavljanju osnovnih zahtev omrežja.

S slike 7 je razvidno, da je v tem primeru razpoložljiva kapaciteta za polnjenje največja v primerjavi s prej omenjenima primeroma. Razlog je, da imajo EV na voljo največ kapacitete baterij za napolnitev.

Razpoložljiva kapaciteta voznega parka za praznjenje je v primeru SOC (0–100) najmanjša in na voljo najmanj časa v primerjavi z zgornjima primeroma. Vzrok je, da so ob priklopu EV napolnjeni na 0 %, kar pomeni, da se morajo polniti vsaj dve uri, preden bodo imeli na voljo nekaj električne energije za praznjenje.

Ugotovili smo, da lahko agregator v tem primeru z dovolj veliko gotovostjo zagotovi šest izbranih zahtev omrežja, kar je dve izbrani zahtevi več kot v primeru iz 6.

7.3 Ocena najbolj ustreznega primera uporabe za sodelovanje v našem primeru koncepta V2G

Na podlagi vseh zgornjih ugotovitev smo ocenili, da je primer službenega parkirišča z 20-odstotnim SOC ob priklopu in zahtevanim SOC ob odklopu na 80 % najustrežnejši za sodelovanje v našem primeru koncepta V2G. Razlog je, da primer dostave zadnjega kilometra ne more z dovolj veliko gotovostjo zagotavljati dovoljšnjega števila izbranih zahtev omrežja. Ponuja tudi najmanj časa in najnižjo kapaciteto voznega parka za polnjenje. Težava primera uporabe SOC (0–100) je nasprotna, in sicer v najnižji razpoložljivi kapaciteti za praznjenje, kar zelo oslabi njegovo sodelovanje v konceptu V2G. Poleg tega se poraja vprašanje o smiselnosti tega primera v praksi.

8 ZAKLJUČEK

V članku smo predstavili koncept dvosmerne izmenjave električne energije med EV in omrežjem. Na primeru voznega parka EV in tehnologije V2G smo demonstrirali zmožnost sodelovanja v storitvah prožnosti.

Z uspešno zapisanim primerom optimizacije smo za izbrani primer uporabe prikazali optimalno razporeditev polnjenj in praznjenj EV ter ocenili njegovo zmožnost za sodelovanje v storitvah prožnosti. Z vpeljavo ključnih vhodnih podatkov smo z vidika agregatorja ocenili, koliko izbranih zahtev omrežja bi ta lahko sprejel za sodelovanje v storitvah prožnosti na trgu električne energije. Za dva dodatna primera uporabe smo prikazali, kako se zmožnost sodelovanja v storitvah spreminja glede na izbrani SOC.

Rezultati raziskave lahko služijo kot podlaga za razvoj algoritmov različnih strategij agregatorja za sodelovanje na trgu električne energije, sistemskih storitvah ali trgu prožnosti.

ZAHVALA

Raziskave financira projekt HE EV4EU v okviru pogodbe 101056765. Avtor Matej Zajc je delno financiran s strani ARRS P2-0246.

LITERATURA

- [1] T. Mephie in A. Crespo Parrondo, „EU deal to end sale of new CO2 emitting cars by 2035“, European Commission - European Commission. Pridobljeno: 15. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6462
- [2] M. N. Eisler, „False Starts: The Checkered History of Vehicle-to-Grid Power“, *IEEE Spectr.*, let. 60, št. 4, str. 46–53, apr. 2023, doi: 10.1109/MSPEC.2023.10092392.
- [3] „EV4EU“. Pridobljeno: 22. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://ev4eu.eu/resources/>
- [4] 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.
- [5] Uradni list RS, „Zakon o oskrbi z električno energijo“, Uradni list RS, št. 172/21. Pridobljeno: 21. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina>
- [6] M. Zajc, M. Kolenc, N. Suljanović, „11 - Virtual power plant communication system architecture“, v *Smart Power Distribution Systems*, Q. Yang, T. Yang, in W. Li, Ur., Academic Press, 2019, str. 231–250. doi: 10.1016/B978-0-12-812154-2.00011-0.
- [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] A. Mehinovic, M. Zajc, in N. Suljanovic, „Interpretation and Quantification of the Flexibility Sources Location on the Flexibility Service in the Distribution Grid“, *Energies*, let. 16, št. 2, Art. št. 2, jan. 2023, doi: 10.3390/en16020590.
- [9] A. Goncearuc, N. Sapountzoglou, C. De Cauwer, T. Coosemans, M. Messagie, in T. Crispeels, „An integrative approach for business modelling: Application to the EV charging market“, *J. Bus. Res.*, let. 143, str. 184–200, apr. 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.12.077.
- [10] J. Svarc, „V2G Explained - Benefits of Vehicle-to-grid Technology“, *CLEAN ENERGY REVIEWS*. Pridobljeno: 15. avgust 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/v2g-explained-vehicle-to-grid-benefits>
- [11] S. Blanco, „How to Maximize EV Range“, J.D. Power. Pridobljeno: 19. september 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/how-to-maximize-ev-range>
- [12] T. Marentič, „Raziskava koncepta dvosmerne izmenjave električne energije med električnimi vozili in omrežjem“, Masters thesis, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2023.
- [13] „Minimising Commercial Vehicle downtime. A management guide from Alphabet“. Alphabet, 2019. Pridobljeno: 19. september 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.alphabet.com/files/2019-03/minimising-commercial-vehicle-downtime-management-briefing.pdf>
- [14] D. Keith, „Building and sustaining reliable public EV charging in the United States“. *Environmental Research Letters*, 2023. Pridobljeno: 19. september 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acae39/pdf>
- [15] A. Pepiciello, G. Bernardo, E. D’Argenzio, in A. Vaccaro, „A Decision Support System for the Strategic Operation of Virtual Power Plants in Electricity Markets“, v *2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, jul. 2019, str. 370–374. doi: 10.1109/ICCEP.2019.8890115.
- [16] D. Mehl in S. Simonetti, „Electric vehicles for last-mile delivery: start scaling now to capture early profits“. *Kearney*. Pridobljeno: 19. september 2023. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.kearney.com/automotive/article/>

Tim Marentič je leta 2021 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je leta 2023 tudi magistriral. Zaposlen je kot raziskovalec na Horizon Europe projektu EV4EU. Njegovo zanimanje zajema področje e-mobilnosti, dekarbonizacije elektroenergetskega omrežja in iskanja trajnostnih rešitev za industrijo.

Igor Mendek je leta 2014 diplomiral na Fakulteti za naravoslovje in matematiko Univerze v Mariboru, kjer je leta 2022 tudi magistriral. Zaposlen je kot raziskovalec na EU projektu EV4EU, kjer obravnava temam pristopa z vidika obravnave kompleksnih sistemov z metodami nelinearne dinamike.

Klara Anžur je leta 2020 diplomirala na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani, kjer je leta 2023 tudi magistrirala. Zaposlena je kot raziskovalka pri EU-projektu EV4EU, kjer raziskuje nove poslovne modele, njihove ekonomske učinkovitosti in ocenjevanje uspešnosti strategij trajnostnih rešitev.

Matej Zajc je redni profesor na Katedri za IKT Fakultete za elektrotehniko. Raziskovalno se ukvarja z IKT v pametnih omrežjih in integracijo e-mobilnosti v EES. Kot koordinator projekta EV4EU na UL vodi skupino raziskovalcev.