

Testiranje koncepta V2G na demonstratorju za razvoj storitev prožnosti z baterijskim hranilnikom električne energije

Tim Marentič¹, Dušan Golubović^{1,3}, Anton Kos², Andreja Smole³, Matej Zajc¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana

²Elektro Celje, Vrunčeva ul. 2a, 3000 Celje

³GEN-I, Dunajska c. 119, 1000 Ljubljana

E-pošta: tim.marentic@fe.uni-lj.si, matej.zajc@fe.uni-lj.si

Testing the V2G concept on a demonstrator for the development of flexibility services using a battery energy storage system

Abstract. The paper presents selected tests on a demonstrator in which the battery energy storage system (BESS) is aggregated via a virtual power plant (VPP) which emulates Vehicle-to-Grid (V2G) electric vehicles (EVs) using developed EV profiles. We analyzed the performance of VPP activation of a selected EV profile, its participation in local flexibility services and its impact on the grid. VPP activation on the BESS was successful as the system responded appropriately to the control signal. Participation in the local services congestion management and PV curtailment was also effective and contributed to improved stability at the selected secondary substation. A comparison of five EV profiles activations highlights that profiles representing employees EVs and company EVs on weekends offer the highest flexibility potential to aggregators and grid operators in regard to local flexibility services. The results support the development and evaluation of the Slovenian EV4EU demonstrator.

Keywords: BESS, EV profiles, VPP, V2G, flexibility services, energy grid

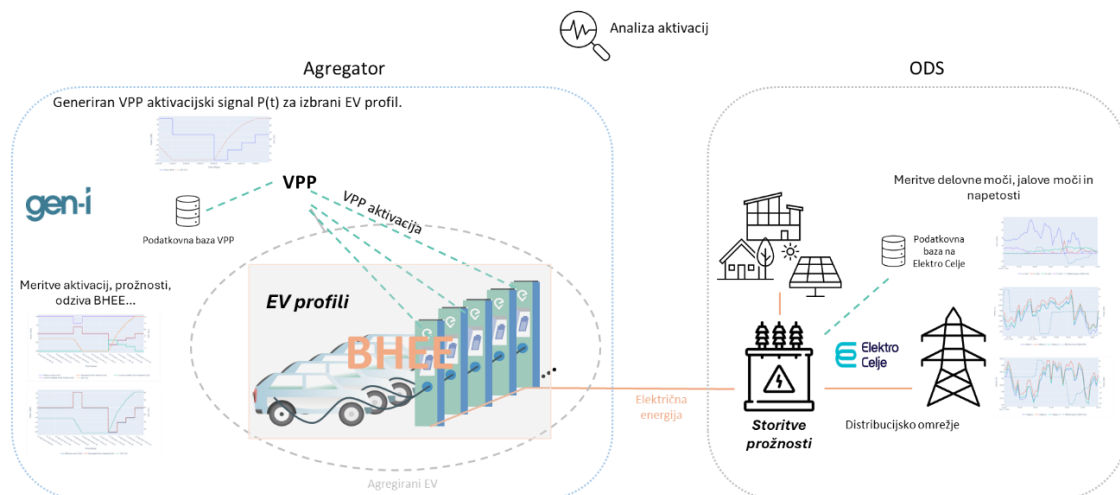
1 Uvod

Elektrifikacija mobilnosti je ključen del zelenega prehoda, katerega cilj je ogljična nevtrálnost EU do leta 2050 [1]. Naraščajoče število električnih vozil (EV)

prinaša dodatne obremenitve v elektroenergetskem sistemu, kar povečuje potrebo po prožnosti za ohranjanje njegove stabilnosti [2]. Prožnost predstavlja prilagajanje proizvodnje ali porabe električne energije in vključuje ukrepe kot so sistemske storitve, zmanjševanje konične porabe ter upravljanje proizvodnje obnovljivih virov [3]. Pomemben vir prožnosti so sistemi za shranjevanje energije, kot so baterijski hranilniki električne energije (BHEE), ki omogočajo hiter odziv na spremembe v omrežju [3]. Glede na omenjeno, EV lahko tretiramo kot premikajoče se BHEE, ki lahko ponujajo velik potencial prožnosti omrežju [2]. Napredna tehnologija Vehicle-to-Grid (V2G), ki poleg polnjenja omogoča tudi praznjenje baterij EV, omogoča še dodatni izkoristek potenciala prožnosti, ki ga EV lahko ponujajo operaterju omrežja [4].

Omenjena tehnologija se izdatno testira znotraj skupine projektov V2X Cluster, en izmed projektov je EV4EU. V projektu EV4EU - Upravljanje električnih vozil za ogljično nevtrálnost Evrope, ki ga financira program Evropske unije Obzorje Evropa za raziskave in inovacije, raziskujemo celotno evalvacijo tehnologije V2X (ang. Vehicle-to-Everything) katera je širši pojem tehnologije V2G [5].

Zaradi številnih omejitev pri implementaciji tehnologije V2G povezanih s protokoli, regulacijo, kompatibilnimi EV itd. [6], smo kot vmesni korak znotraj slovenskega demonstratorja projekta EV4EU razvili demonstrator z BHEE agregiranim v virtualno elektrarno (ang. Virtual Power Plant, VE) [7]. Cilj omenjenega demonstratorja je emulacija V2G EV in posledično



Slika 1: Slovenski demonstrator projekta EV4EU z agregiranim BHEE v VPP

polnilnic z BHEE. S pomočjo razvitih EV profilov opisanih v [8], ki smo jih z VE aktivirali na BHEE, smo lahko analizirali in ocenili potencial prožnosti V2G EV za sodelovanje v lokalnih storitvah in njihov vpliv na omrežje.

V članku smo predstavili slovenski BHEE demonstrator projekta EV4EU in metodologijo testiranja med dejanskim obratovanjem distribucijskega omrežja. V nadaljevanju smo analizirali in evalvirali aktivacijo VE izbranega EV profila na BHEE, kjer smo ocenili uspešnost aktivacije in sodelovanja v lokalnih storitvah ter vpliv na omrežje. Prav tako smo zapisali ugotovitve na podlagi primerjave aktivirane prožnosti vseh petih EV profilov predstavljenih v [8]. V zaključku, so poleg povzetih ugotovitev podani predlogi za nadaljnje delo.

2 Demonstrator in metodologija testiranja

Poglavje 2 predstavlja demonstrator, na katerem so bila izvedena testiranja, opisana v poglavjih 3 in 4. V njem je predstavljena tudi uporabljena metodologija testiranja.

2.1 Demonstrator z agregiranim BHEE v virtualno elektrarno

Na Slika 1 je predstavljena arhitektura dela slovenskega demonstratorja projekta EV4EU, kjer je BHEE agregiran v VE, s katero upravlja agregator, v našem primeru GEN-I. BHEE ima kapaciteto 80 kWh in maksimalno moč polnjenja oz. praznjenja 40 kW. Iz Slika 1 je razvidno, da je BHEE priključen na transformatorsko postajo (TP), katera je v lasti in nadzoru operaterja distribucijskega omrežja (ODS) Elektro Celje. Na TP je priključenih tudi več odjemalcev in dve sončni elektrarni (PV).

Na omenjenem BHEE so bili preko VE aktivirani EV profili predstavljeni v poglavju 2.2 [8]. Kot je razvidno iz Slika 1, na demonstratorju izvajamo meritve pri različnih akterjih, ki nam služijo pri analizi rezultatov in oceni potenciala prožnosti tehnologije V2G. Z omenjeno oceno in širše se tudi ukvarjajo v sklopu skupine projektov V2X Cluster in EU iniciativi BRIDGE. Potek testiranja in meritve so opisane v poglavju 2.3.

2.2 Profili V2G električnih vozil za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti

Za oceno vpliva V2G EV in potenciala prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah, smo na demonstratorju uporabili EV profile razvite v [8].

Pri razvoju petih različnih EV profilov smo uporabili podatke o obnašanju uporabnikov vozil v Sloveniji, o verjetnostih začetka poti vozil za namen dela in prostega časa, pridobljene iz Statističnega urada Republike Slovenije. Za določitev časov aktivacije lokalnih storitev prožnosti smo uporabili podatek iz študije o obremenitvah distribucijskega omrežja [8].

Na podlagi statistične analize izvedene na omenjenih podatkih, smo razvili pet EV profilov za pet različnih primerov uporabe doma in v službi (zaposleni in službena vozila), definirane za delovnik in vikend. EV profili

predstavljajo pet agregiranih polnilnic s priključenimi EV, kjer ima vsaka moč 8 kW. Tako skupna maksimalna moč polnjenja oz. praznjenja znaša 40 kW.

Profili so zasnovani na način, da med časom priključenosti zagotavljajo tudi lokalni storitvi prožnosti upravljanje prezasedenosti (ang. Congestion management) v obdobjih koničnih obremenitev (med 8:00 – 10:00 in 19:00 – 21:00 med tednom, ter 18:00 – 21:00 med vikendom) in poraba viškov iz PV (ang. PV curtailment).

Za vsak EV profil smo generirali signal $P(t)$, moč polnjenja oz. praznjenja simuliranega EV v odvisnosti od časa priključenosti, kateri se naloži v VE in nato aktivira na BHEE. Prav tako smo za posamezni profil definirali zahtevano začetno stanje za proženje kot je ura aktivacije in napolnjenost (ang. State of Charge) BHEE.

2.3 Potek testiranja in meritve

Testiranje na demonstratorju opisanem v poglavju 2.1 z namenom ocene vpliva V2G EV in ocene potenciala prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti je potekalo z aktivacijami, izbranih EV profilov (poglavje 2.2) na BHEE z uporabo VE.

Testiranje se prične z uvozom generiranega signala $P(t)$ izbranega EV profila v VE. Ko so pogoji za aktivacijo izpolnjeni, VE izvede aktivacijo omenjena signala na BHEE. V tem primeru VE pošlje željeno moč v določenem intervalu s katero se naj BHEE odzove oz. polni ali prazni. V obdobju aktivacij lokalnih storitev prožnosti, polnjenje predstavlja negativno in praznjenje pozitivno aktivacijo [2], [4].

Po končani aktivaciji se izvede analiza in ocena uspešnosti aktivacije VE. Ta se naredi na podlagi podatkov, ki jih pridobimo iz TP, VE in BHEE (Slika 1). Glavni podatek pridobljen iz VE je podatke o aktivacijskem signalu. BHEE vsebuje podatek o moči polnjenja oz. praznjenja v odvisnosti od časa in stanje napolnjenosti. Podatke iz VE in BHEE priskrbi agregator, kateri so beleženi na 10 sekundnem intervalu. Podatke iz TP kot so delovna in jalova moč ter napetost beleži ODS na 15 minutnem intervalu. Podatki se lahko uporabijo tudi za izračun kazalnikov uspešnosti.

Pri vseh naših ugotovitvah in zaključkih je potrebno upoštevati, da je bilo testiranje aktivacij VE na BHEE izvedeno med dejanskim obratovanjem distribucijskega omrežja. Zato razlog za spremembe v razmerah na izbrani TP morda ni izključno posledica polnjenja ali praznjenja BHEE, vendar je ta vsekakor imel vpliv.

Analiza in vpliv aktivacije VE za izbrani EV profil, na podlagi omenjenih podatkov se nahaja v poglavju 3.

3 Analiza aktivacije izbranega EV profila

V poglavju 3 smo analizirali uspešnost aktivacije VE za izbrani EV profil in uspešnost sodelovanja v lokalnih storitvah prožnosti ter vpliv na omrežje.

V nadaljevanju je analizirana aktivacija EV profila, ki predstavlja primer uporabe flote petih službenih EV med vikendom, kjer so EV priključena na polnilnice čez celotni dan, saj med vikendom niso v uporabi [8].

3.1 Aktivacija virtualne elektrarne

V poglavju 3.1 ocenimo uspešnost aktivacije VE za izbrani EV profil oz. pripadajočega $P(t)$ signala. Na Slika 2 je z rdečo prikazan aktivacijski signal poslan z VE na BHEE, modra prikazuje odziv BHEE na prejeti signal in zelena prikazuje napolnjenost. Negativne vrednosti predstavljajo polnjenje, pozitivne pa praznjenje BHEE.



Slika 2: Meritve iz VE in BHEE: Aktivacijski signal iz VE, moč BHEE in napolnjenost v odvisnosti od časa

Iz Slika 2 je razvidno, da BHEE dokaj dobro sledi aktivacijskem signalu. Opazimo lahko, da se največje odstopanje pojavi med 12. in 13. uro, razlog je v tem, da se BHEE ni odzval, s pričakovano maksimalno močjo 40 kW, ampak nekoliko nižjo. Predvidevamo, da zaradi določenih omejitev EMS (ang. Energy management system) in izkoristkov v BHEE. Na podlagi ugotovitev lahko sklepamo, da je integracija in komunikacija v demonstratorju med VE in BHEE ustrezna.

3.2 Vpliv sodelovanja v lokalnih storitvah prožnosti na razmere v TP

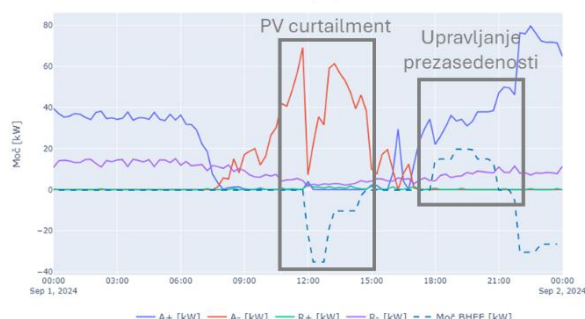
Slika 3 prikazuje razmere na izbranem TP v obdobju omenjene aktivacije z VE. Z rdečo barvo so prikazani viški delovne moči proizvedeni s strani PV (A-), obremenitev (delovna moč) TP je prikazana z vijolično (A+). Pripadajoča jalova moč pri PV viških (R-) in obremenitvi TP (R+) je prikazana z zeleno oz. roza. Na Slika 3 je prav tako s črtkano modro prikazan odziv BHEE na aktivacijski signal.

S sivima pravokotnikoma so označeni deli aktivacije z VE, kjer se je izvedla aktivacija izbrane lokalne storitve prožnosti oz. simulirana EV so sodelovala v izbrani storitvi.

Razvidno je, da se je v obdobju med 12. in 13. uro izvedla aktivacija storitve PV curtailment, saj so takrat pričakovani viški proizvodnje iz PV (največja verjetnost). Aktivacija storitve je bila negativna, kar pomeni, da se je v tem obdobju BHEE polnil z namenom, da se bi PV viški zmanjšali oz. porabili.

Iz Slika 3 lahko opazimo, da so se med aktivacijo omenjene storitve, PV viški zmanjšali. To je razvidno iz padca rdeče črte na Slika 3 med 12. in 13. uro. Na podlagi tega lahko zaključimo, da je bila aktivacija lokalne storitve prožnosti PV curtailment uspešna, saj so se viški iz PV zmanjšali in s tem se je posledično povečala tudi stabilnost omrežja oz. izbranega TP. Z ugotovljenim lahko potrdimo, da je aktivacija te storitve dosegla svoj namen. Poleg tega, se je BHEE med omenjenim časom polnil z zeleno energijo, kar poveča ogljično nevtralnost.

Zaradi pričakovane popoldanske konične obremenitve TP med 18. in 21. uro, smo v omenjenem obdobju izvedli aktivacijo lokalne storitve prožnosti upravljanje prezasedenosti, kar je tudi razvidno na Slika 3. Omenjena aktivacija storitve je bila pozitivna, kar pomeni, da se je v tem obdobju BHEE praznil in s tem poizkusil razbremenitvi TP oz. zmanjšati konično obremenitev.



Slika 3: Meritve iz TP: Delovna moč, jalova moč, napetost in moč BHEE v odvisnosti od časa

Razvidno je (Slika 3), da se je v obdobju aktivacije izbrane storitve, obremenitev na TP (A+) zmanjšala. Zmanjšanje obremenitve TP je razvidno predvsem na začetku in sredini aktivacije. Razlog je verjetno v tem, da se je med aktivacijo poraba porabnikov na TP povečala in v določenih obdobjih zmanjšala vpliv aktivacije storitve upravljanje prezasedenosti.

Na podlagi ugotovitev lahko zaključimo, da je bila aktivacija storitve upravljanje prezasedenosti uspešna, saj se je generalno gledano konična obremenitev TP zmanjšala zaradi aktivacije, kar je glavni cilj. Posledično s tem se je tudi povečala stabilnosti izbranega TP in dela distribucijskega omrežja.

Ob koncu aktivacije z VE se je BHEE pričel polniti z namenom zagotovitve zahtevane napolnjenosti ob odklopu, kar ni del aktivacije lokalne storitve. Opazimo lahko, da je polnjenje po 22. uri povečalo obremenitev TP, kar bi lahko imelo negativne posledice na stabilnosti omrežja. Zato je lahko v prihodnje smiselno polnjenje za doseg napolnjenosti ob odklopu, izvesti skozi daljše časovno obdobje ob nižji moči.

4 Primerjava aktivirane prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah med EV profili

Na podlagi rezultatov aktivacij še ostalih štirih EV profilov iz [8], smo izvedli primerjavo aktivirane negativne in pozitivne prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah. Z namenom, da določimo primer uporabe oz. EV profil, ki agregatorju oz. upravljalcu polnilnih mest (ang. Charge point operator) in posledično ODS ponudi največ negativnega in pozitivnega potenciala prožnosti.

V Tabela 1 je prikazana primerjava aktivirane negativne in pozitivne prožnosti petih EV profilov za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti.

Razvidno je, da se največ negativne prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah aktivira v primeru flote

službenih EV med vikendom (50 kWh), kjer sledi primer EV zaposlenih z 48 kWh. Ostali trije EV profili agregatorju oz. ODS ne ponujajo negativne prožnosti, saj takrat ko se v povprečju pojavijo zahteve po njej, EV niso priključeni.

Tabela 1: Primerjava aktivirane negativne in pozitivne prožnosti za pet različnih EV profilov oz. primerov uporabe - sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti

	Primeri uporabe za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti				
	Dom delovnik	Dom vikend	EV zaposlenih	Službena EV delovnik	Službena EV vikend
Aktivirana negativna prožnost [kWh]	0	0	48	0	50
Aktivirana pozitivna prožnost [kWh]	30	15	16	50	50

Z analizo rezultatov aktivirane pozitivne prožnosti, lahko ugotovimo, da EV profila vezana na službena vozila med delovnikov in vikendom ponujata največji potencial, oba 50 kWh. Sledi EV profil, ki simulira primer uporabe doma med delovnikom (30 kWh) in profil EV zaposlenih (16kWh). Najmanj pozitivnega in tudi negativnega potenciala prožnosti ponuja EV profil dom med vikendom.

Največ skupne aktivirane prožnosti (100 kWh) ponuja EV profil flote službenih EV med vikendom, kar je pričakovano, saj so EV priključena čez celotni dan, sledi mu profil EV zaposlenih z 64 kWh aktivirane prožnosti.

Zaključimo lahko, da agregatorju, upravljalcu polnilnih mest in ODS, primera službenih EV med vikendom in EV zaposlenih lahko ponudita največ negativne prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah. Največ pozitivne prožnosti ponujajo službena EV med delovnikom in vikendom. Primera službenih EV med vikendom in EV zaposlenih lahko ponudita agregatorju in posledično ODS največ negativnega in pozitivnega potenciala prožnosti skupaj.

5 Zaključek

V članku je predstavljen vmesni korak slovenskega demonstratorja projekta EV4EU, kjer smo razvili napredni pristop za oceno potenciala prožnosti V2G EV za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti in oceno vpliva na omrežje, v obdobju ko se V2G tehnologija spopada s številnimi omejitvami pri integraciji. Omenjeni demonstrator obsega BHEE agregiran v VE, kateri s pomočjo razvitih EV profilov simulira V2G električna vozila in posledično polnilnice.

Analizirali smo uspešnost aktivacije VE za izbrani EV profil in uspešnost sodelovanja v lokalnih storitvah prožnosti ter vpliv na omrežje. Prav tako smo izvedli primerjavo aktivirane negativne in pozitivne prožnosti za sodelovanje v lokalnih storitvah prožnosti, za pet aktiviranih EV profilov na demonstratorju. Ocenili smo

kateri primeri uporabe ponujajo agregatorju, upravljalcu polnilnih mest in ODS največji potencial prožnosti.

Tehnična zasnova, interoperabilnost in delovanje slovenskega demonstratorja projekta EV4EU je bilo potrjeno. Ugotovitve podpirajo strategije za vključevanje agregatorjev, upravjalcev polnilnih mest in ODS na lokalne trge prožnosti.

Nadaljnje raziskave lahko obsegajo razvoj in aktivacijo EV profilov za sodelovanje v izravnalnih storitvah, kar bo služilo pri oceni potenciala tehnologije V2G za sodelovanje na nacionalnem trgu.

6 Zahvala

Raziskave podpira projekt HE EV4EU.

This research work was funded by European Union's Horizon Europe R&I 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 grating authority can be held responsible for them.

Literatura

- [1] EU Comission, „The European Green Deal - Striving to be the first climate-neutral continent,“ 24 12 2024. [Elektronski]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [2] T. Marentič, I. Mendek, A. Kos, M. Malenšek, H. Morais in M. Zajc, „Estimation of electric vehicles with V2G capabilities potential for market participation,“ v *IEEE MELECON 2024*, Porto, 2024.
- [3] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola in J. Salpakari, „Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Izv. 45, pp. 785-807, 2015.
- [4] T. Marentič, D. Golubović, A. Kos, A. Smole in M. Zajc, „Sodelovanje električnih vozil v lokalnih storitvah prožnosti: ocena potenciala prožnosti za izbrani primer uporabe tehnologij V2X,“ v *17. konferenca slovenskih elektroenergetikov CIGRE-CIRED*, Portorož, 2025.
- [5] EV4EU, „EV4EU,“ 20 2 2024. [Elektronski]. Available: <https://ev4eu.eu/>.
- [6] A. Goncearuc, C. D. Cauwer, N. Sapountzoglou, G. V. Kriekinge, D. Huber, M. Messagie in T. Coosemans, „The barriers to widespread adoption of vehicle-to-grid: A comprehensive review,“ *Energy Reports*, Izv. 12, pp. 27-41, 2024.
- [7] T. Marentič, I. Mendek, K. Anžur in M. Zajc, „Dvosmerna izmenjava električne energije V2G za razvoj storitev prožnosti z agregacijo voznega parka električnih vozil,“ *Elektrotehniški vestnik*, Izv. 90, št. 5, pp. 259-264, 2023.
- [8] T. Marentič, I. Mendek, D. Golubović, K. Anžur in M. Zajc, „Razvoj profilov električnih vozil za testiranje izbranih primerov uporabe tehnologij V2X,“ v *Triintrideseta mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca ERK 2024*, Portorož, 2024.