

Tehno-ekonomska analiza rada elektroenergetskog sistema sa integracijom električnih vozila

Jovana Nikodijević*, Mileta Žarković**

* Go2Power d.o.o., Beograd

** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd

Rezime - Energetska tranzicija i povećana primena obnovljivih izvora energije u elektroenergetskim sistemima dovode do izazova u upravljanju mrežom. Jedan od značajnih faktora u ovom procesu je integracija električnih vozila (EV) i njihova mogućnost dvosmernog punjenja kroz *Vehicle-to-Grid* (V2G) tehnologiju, koja omogućava vraćanje energije iz baterija EV u mrežu. Ovaj rad analizira uticaj V2G tehnologije na stabilnost napona u distributivnoj mreži naponskog nivoa 35 kV, kao i njen ekonomski značaj za sistem. Pomoću PLEXOS i MATLAB softverskih paketa, modelovani su različiti scenariji punjenja i pražnjenja EV, uz solarne elektrane kao primarni obnovljivi izvor. Rezultati ukazuju na pozitivne efekte V2G tehnologije, uključujući poboljšanje naponskih prilika i smanjenje operativnih troškova. Ekonomska analiza pokazuje da V2G omogućava uštede potrošačima i smanjuje potrebu za konvencionalnim izvorima snabdevanja tokom vršnih opterećenja. Međutim, ubrzano trošenje baterija EV predstavlja značajan izazov, te se preporučuju dalja istraživanja radi unapređenja tehnologije i razvoja regulatornih okvira za široku primenu V2G u budućnosti.

Gljučne reči - Energetska tranzicija, Električna vozila, Naponska stabilnost, Ekonomska analiza

I UVOD

Energetska tranzicija, usmerena na održiviju i ekološki prihvatljiviju budućnost, stavlja obnovljive izvore energije u centar savremenih elektroenergetskih sistema. Njihova primena doprinosi smanjenju emisije štetnih gasova, smanjuje zavisnost od fosilnih goriva i ublažava klimatske promene [1]. Ipak, integracija obnovljivih izvora u postojeće elektroenergetske mreže predstavlja značajne tehničke i ekonomske izazove [1].

Transformacija energetskog sektora podstiče upotrebu distribuiranih izvora energije, kao što su solarni paneli i vetroelektrane. Ovi izvori se najčešće priključuju na sredjenaponsku i niskonaponsku mrežu, unoseći dvosmerni tok snage koji utiče na naponske prilike, kvalitet energije i rad relejne zaštite u mreži [1]. U cilju stabilnosti mreže, planiranje distributivnog sistema mora da obezbedi da napon ostane u dozvoljenim granicama i da se kontrolišu naponske oscilacije usled varijabilnosti obnovljivih izvora [2].

Pored obnovljivih izvora, električna vozila dobijaju sve važniju ulogu u globalnoj energetskoj tranziciji. Prema podacima iz 2023. godine, na globalnom nivou je registrovano više od 40 miliona električnih vozila, što je porast od 54% u odnosu na

prethodnu godinu [3]. Masovno usvajanje električnih vozila smanjuje emisiju CO₂ u transportu, ali zahteva razvoj infrastrukture i utiče na distributivne mreže [4]. Pravilno integrisana, ova vozila mogu biti značajan fleksibilni resurs za skladištenje energije i balansiranje mreže, posebno kroz koncept *Vehicle-to-Grid* (V2G) tehnologije [5].

Električna vozila se dele na baterijska (BEV), hibridna (HEV) i plug-in hibridna vozila (PHEV), sa značajnim rastom broja ovih vozila na globalnom nivou. Punjači se deče na tri nivoa: Nivo 1 (kućni punjači), Nivo 2 (brži punjači u javnim i poslovnim objektima) i Nivo 3 ili DC brzo punjenje. Ova infrastruktura je ključna za postizanje klimatskih ciljeva i omogućava pametno punjenje i V2G tehnologiju, koja doprinosi stabilizaciji mreže i podršci za obnovljive izvore energije [5]. Razvoj infrastrukture za punjenje električnih vozila je ključan za dalje širenje upotrebe električnih vozila. Prema Evropskoj komisiji, za postizanje klimatskih ciljeva do 2025. godine biće potrebno oko milion javnih punjačkih stanica u Evropi [6].

V2G omogućava dvosmerni protok energije između električnih vozila i mreže, čime vozila mogu doprineti balansiranju mreže u vršnim periodima. Prednosti V2G uključuju smanjenje zavisnosti od fosilnih goriva, finansijske koristi za vlasnike vozila i podršku stabilnosti mreže u uslovima povećane upotrebe obnovljivih izvora. Međutim, izazovi uključuju visoke troškove dvosmernih punjača, potencijalno smanjenje trajanja baterija i potrebu za jasnim regulatornim okvirom [5].

Softverski paket PLEXOS omogućava simulaciju i optimizaciju rada energetskih sistema na različitim vremenskim horizontima, od dugoročnog planiranja do kratkoročnih operacija. On integriše podatke, simulira realne uslove i procenjuje efekte različitih faktora na energetski sistem. Ovakve simulacije omogućavaju efikasnije upravljanje resursima i optimalno planiranje sistema [7].

II METODOLOGIJA

U pogledu uticaja na naponske prilike, ukoliko se posmatra distributivni vod nazivnog napona U_n , napon na mestu priključenja u jednom vremenskom intervalu, distribuiranog izvora (U), aktivne i reaktivne snage P_D i Q_D , iznosi:

$$U = \sqrt{U_{Re}^2 + U_{Im}^2}, \quad (1)$$

gde su U_{Re} i U_{Im} realna i imaginarna komponenta napona U , definisane sledećim jednačinama:

$$U_{Re} = A \pm \sqrt{A^2 - B - (R_V \cdot (P_P - P_D) + X_V \cdot (Q_P - Q_D))} \quad (2)$$

$$A = \frac{U_1}{2}, \quad B = \frac{(X_V \cdot (P_P - P_D) - R_V \cdot (Q_P - Q_D))^2}{U_1^2},$$

$$U_{Im} = \frac{(X_V \cdot (P_P - P_D) - R_V \cdot (Q_P - Q_D))}{U_1} \quad (3)$$

u kojima su X_V i R_V reaktansa i rezistansa posmatranog distributivnog voda.

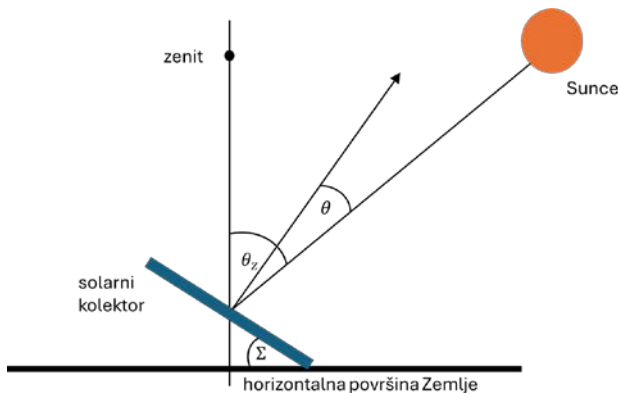
Iradijansa je gustina snage sunčevog zračenja po površini objekta u Zemljinoj atmosferi koji se posmatra. Maksimalna vrednost iradijansa na površi Zemlje postiže se pri čistoj atmosferi i vedrom danu i iznosi 1.000 W/m^2 [8]. Deli se na direktno i difuzno zračenje. Direktno zračenje je najveće pri vedrom danu i čistoj atmosferi i podrazumeva zračenje koje dolazi do tla direktno u liniji sa Suncem. Difuzno zračenje se javlja kao posledica rasejanja zračenja u atmosferi i najveće je kada je mutnost atmosfere najveća.

Ukupna iradijacija na solarni kolektor (I_C) je zbir direktne (I_{BC}), difuzne (I_{DC}) i reflektovane (I_{RC}) komponente zračenja. Reflektovana komponenta zračenja je posledica refleksije od horizontalne površine tla i najveća je u zimskom periodu [8].

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC}. \quad (4)$$

Zenit je tačka na nebu neposredno iznad posmatrane površine, a zenitni ugao θ_z je ugao između prave koja povezuje zenit i posmatranu površinu i prave koja povezuje posmatranu površinu i Sunce. Incidentni ugao θ je ugao između normalne na solarni kolektor i Sunca, dok se nagib solarnog kolektora u odnosu na horizontalnu površinu tla često označava sa Σ . Na Slici 1 je dat prikaz solarnog kolektora pod nagibom sa relevantnim uglovima i može se uočiti da važi:

$$\theta = \theta_z - \Sigma. \quad (5)$$



Slika 1. Prikaz relevantnih uglova za proračun incidentnog ugla

Direktna iradijansa na solarni kolektor iznosi [8]:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta. \quad (6)$$

Difuzna komponenta iradijansa na površinu kolektora iznosi [7]:

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \frac{3 + \cos 2\Sigma}{4}, \quad (7)$$

gde je I_{DH} difuzna horizontalna iradijansa.

Reflektovana komponenta iradijansa određuje se na osnovu jednačine [8]:

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \frac{1 - \cos 2\Sigma}{4}, \quad (8)$$

gde je $I_{BH} = I_B \cdot \cos \theta_z$ direktna horizontalna iradijansa, a ρ je koeficijent refleksije tla (površinski albedo).

Takođe, za solarni panel vezan na mrežu važi [8]:

$$t_{cell} = t + \frac{NOCT - 20 \text{ }^\circ\text{C}}{0,8} \cdot I_C, \quad (9)$$

$$P_{DC} = n \cdot \eta \cdot P_{DC,STC} \cdot (1 + \alpha_P \cdot (t_{cell} - 25 \text{ }^\circ\text{C})), \quad (10)$$

$$P_{AC} = P_{DC} \cdot \eta_{inv} \cdot (1 - \eta_s) \cdot (1 - \eta_m), \quad (11)$$

gde su t_{cell} – temperatura ćelije pri datim atmosferskim uslovima [$^\circ\text{C}$], P_{DC} – izlazna DC snaga solarnog modula [W], P_{AC} – izlazna AC snaga solarnog modula [W].

Optimizacija je postupak pronalaženja najboljeg rešenja u datim uslovima, pri čemu se vrednosti upravljačkih promenljivih određuju tako da se optimizuje određena objektivna funkcija, uz zadovoljavanje ograničenja. U zavisnosti od prirode promenljivih i objektivne funkcije, optimizacija može biti linearna, nelinearna, sa kontinualnim ili diskretnim promenljivama. U okviru optimizacije, mešovito celobrojno programiranje (MCP) je metoda koja obuhvata diskretne i kontinualne promenljive, omogućavajući rešavanje kompleksnih problema koji uključuju binarne i celobrojne odluke, poput odluke o instalaciji novih resursa [9].

MCP se najčešće rešava *branch-and-bound* metodom, koja deli problem na manje podprobleme kroz razgranavanje na integralne i relaksirane promenljive [10]. Ovaj algoritam stvara stablo razgranavanja, gde se podproblemi rešavaju rekurzivno do pronalaženja optimalnog rešenja. U svakom čvoru stabla, problem se relaksira na LP (linearno programiranje) da bi se dobile granice rešenja. Ova metoda podržava i heurističke pristupe i napredne tehnike za optimizaciju izbora promenljivih i detekciju simetrije u stablu, čime se ubrzava proces [11].

U ovom radu za optimizaciju rasporeda punjenja i pražnjenja električnih vozila korišćen je Gurobi optimizator, koji je uključen u softverski paket PLEXOS. Gurobi optimizator je jedan od vodećih rešavača za složene MCP probleme, sa primenom u raznim industrijama, uključujući energetiku i finansije. On koristi multijezgarne procesore i paralelnu obradu za brže rešavanje velikih problema [12]. Gurobi podržava različite tipove optimizacije, uključujući linearno programiranje, MCP, kvadratno programiranje i stohastičko programiranje, čime je izuzetno fleksibilan i pouzdan za primenu u kritičnim zadacima kao što je planiranje proizvodnje ili optimizacija lanaca snabdevanja [11].

Analizirani elektroenergetski sistem je distributivna mreža naponskog nivoa 35 kV, prikazana na Slici 2. Ekvivalentni vod koji povezuje distributivnu mrežu i konzum ima reaktansu od $10,3 \Omega$ i rezistansu od $4,16 \Omega$.

Definisano je četiri scenarija:

- „GODINA“: Godišnji model sa satnim intervalima bez V2G.
- „GODINA V2G“: Godišnji model sa satnim intervalima sa V2G.
- „DAN“: Dnevni model sa petnaestominutnim intervalima bez V2G.
- „DAN V2G“: Dnevni model sa petnaestominutnim intervalima sa V2G.

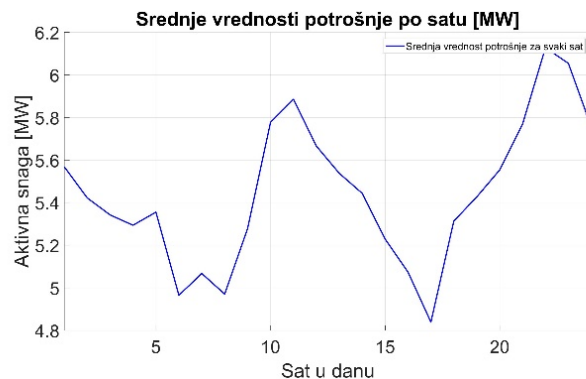
Za analizu naponskih prilika izabran je dan sa najvećom naponskom razlikom.

Pretpostavlja se da potrošački konzum čine pretežno domaćinstva sa konstantnim faktorom snage $\cos \varphi = 0,98$. Profil aktivne potrošnje na petnaestominutnim intervalima za jednu godinu za 1000 domaćinstava preuzet je iz [13]. Tarifni sistem ovih domaćinstava se deli na: nižu tarifu – u periodu od 00.00 do 09.30 časova i od 21.45 do 00.00 časova svakog dana i višu tarifu – u periodu od 9.45 do 21.30 časova svakog dana. U skladu sa podacima, pretpostavljene su: niža tarifa od 4,5 RSD/kWh, koja važi od 22.00 do 00.00 i od 00.00 do 9.00 časova svakog dana, i viša tarifa od 13 RSD/kWh, koja važi od 09.00 do 22.00 časova svakog dana. Ovi profili su sumirani za svaki interval na godišnjem nivou, zatim je tako dobijen profil skaliran (prema maksimalnom vršnom opterećenju) tako da napon u tački priključenja konzuma ostane u granicama ispod 1,05 r.j. Maksimalna vršna aktivna snaga domaćinstava dobija se korišćenjem formula (1), (2) i (3), gde su $P_D = 0$ i $Q_D = 0$. Tako odabrana vršna aktivna snaga potrošača iznosi 8,828 MW.

Konzum se napaja i iz distribuiranih solarnih panela. Uz pretpostavku da se potrošačko područje ne prostire na dovoljno velikoj površini da postoje značajne razlike u insolaciji na pojedinačnim solarnim panelima na krovovima domaćinstava, usvojeno je pojednostavljenje da se proizvodnja solarnih panela može modelovati kao solarna elektrana sa istom tačkom priključenja na mrežu kao i sumirana potrošnja domaćinstava. Uvedene su sledeće pretpostavke o solarnom panelu: koristi se jedan inverter na dva solarna panela ($n = 2$), u skladu sa pretpostavkom da se solarni paneli nalaze na krovovima domaćinstava; nagib panela (Σ) jednak je uglu geografske širine ($44,81^\circ$, u skladu sa lokacijom merenja preuzetih podataka); panel je orijentisan ka jugu i fiksiran je; panel je snage $P_{DC,STC} = 1.000 \text{ W}$ pri standardnim uslovima ispitivanja (STC – eng. *Standard Test Conditions*); efikasnost panela je $\eta = 20\%$, pri temperaturnom koeficijentu od $\alpha_p = 0,4 \text{ } \%/^\circ\text{C}$; efikasnost invertora je $\eta_{inv} = 97\%$, koeficijent zaprljanja iznosi $\eta_s = 3\%$, a koeficijent neuparenosti je $\eta_m = 3\%$.

Godišnji profil proizvodnje solarne elektrane izračunat je na osnovu podataka o vremenu dobijenih iz [14] koji sadrže podatke (na petnaestominutnim intervalima) za 18 godina, od 2005. godine do 2022. godine, za područje Beograda. Podaci koji su korišćeni za izradu ovog rada su: datum i vreme, direktna normalna iradijacija ($I_B [\text{W}/\text{m}^2]$), horizontalna difuzna iradijacija ($I_{DH} [\text{W}/\text{m}^2]$), solarni zenitni ugao ($\theta_z [^\circ]$), površinski albedo (ρ) i temperatura ambijenta ($t [^\circ\text{C}]$). Podaci su prvo usrednjeni za sve intervale u godinu dana. Ovi podaci su obrađeni u skladu sa jednačinama (4) do (8) redom na svakom intervalu na nivou od godinu dana, čime je dobijena ukupna iradijansa na solarni modul $I_C [\text{W}/\text{m}^2]$. Zatim su primenjene

jednačine (9) do (11). Ovako dobijene vrednosti izlazne snage modula za date vremenske uslove su zatim skalirane, u odnosu na godišnju maksimalnu vršnu izlaznu snagu, tako da odgovaraju maksimalno dozvoljenoj vrednosti, a da napon na priključcima ne opadne ispod granice od 0,95 r.j. Maksimalna vršna snaga solarne elektrane dobija se korišćenjem formula (1), (2) i (3) za svaki sat u godini, gde su P_p i Q_p vrednosti dobijene za aktivnu i reaktivnu snagu konzuma. Tako izračunata maksimalna snaga solarne elektrane iznosi 23,022 MW.



Slika 2. Srednja satna potrošnja konzuma na nivou godine



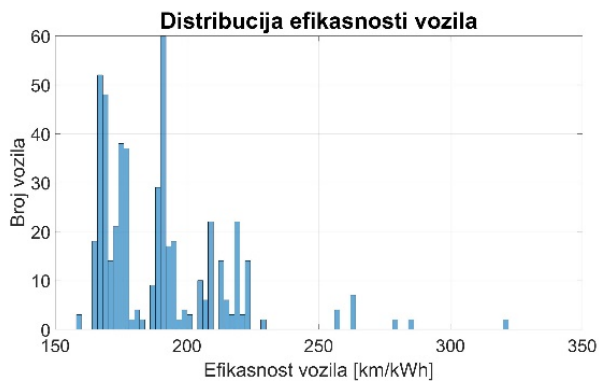
Slika 3. Srednja satna potencijalna proizvodnja solarne elektrane na nivou godine

Na Slici 3 dati su dobijeni profili potrošnje konzuma, a na Slici 4 potencijalne proizvodnje solarne elektrane za godinu dana usrednjeni na satnom nivou.

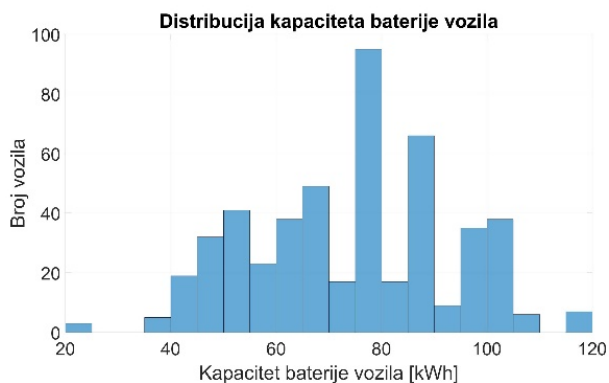
Vršna snaga stanice za punjenje električnih vozila izabrana je tako da napon ne prelazi dozvoljene granice od 0,9 r.j. do 1,1 r.j. Maksimalna vršna snaga stanice dobija se korišćenjem formula (1), (2) i (3) za svaki sat u godini, gde su P_p i Q_p vrednosti snage domaćinstava od kojih je oduzeta proizvodnja solarne elektrane. Ovako izabrana vršna snaga stanice iznosi 9,878 MW. Pretpostavljeno je da je vršna snaga jednog punjača u stanici 22 kW, efikasnost punjenja 95 %, a efikasnost pražnjenja 85 % u slučaju V2G mogućnosti. U skladu sa tim, izabrano je da će ukupno biti 500 vozila koji u toku godine redovno koriste tu stanicu za punjenje električnih vozila, a punjača je ukupno 449.

U radu [15] autori su obradili preko 860 repozitorijuma otvorenog pristupa (*open access*) i dobili više od 60 skupova podataka relevantnih za modelovanje punjenja električnih vozila.

Autori su zatim objavili skup podataka za šest lokacija koje prethodno u literaturi nisu obrađivane [16], koji su u ovom radu korišćeni. Za ovaj rad, odbacivanjem podataka koji sadrže nepotpune informacije, dobijen je skup od 138.328 podataka koji sadrži sledeće parametre: vreme prispeća električnog vozila na stanicu za punjenje, vreme koje je vozilo provelo na stanici, da li je u pitanju radni dan ili vikend. Na osnovu ovih podataka, klasterizacijom metodom K srednjih vrednosti (u daljem tekstu: K-klasterizacije) određeno je 50 klastera električnih vozila u koje je raspoređeno ukupno 500 električnih vozila. Posebno su obrađeni radni dani i vikendi. Dodatno, omogućeno je odstupanje od sat i po vremena za momenat dolaska na stanicu i sat vremena za vreme provedeno na stanici, u odnosu na ovako dobijeni profil korišćenja stanice za punjenje. Na ovaj način dobijen je profil za petnaestominutne intervale na nivou jedne godine sa vrednošću 100 % ukoliko se klaster vozila u tom intervalu nalazi na stanici za punjenje električnih vozila i vrednošću 0 % u suprotnom, u skladu sa zahtevanom formom unosa podataka u PLEXOS softverski paket.



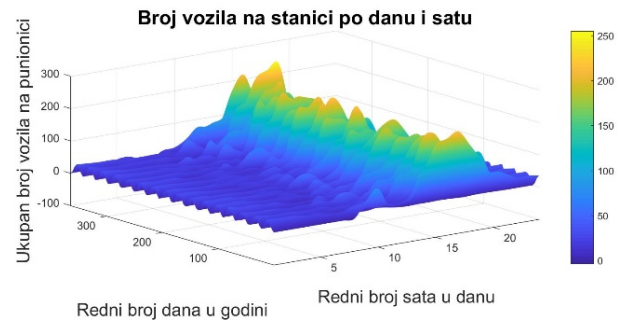
Slika 4. Distribucija efikasnosti vozila



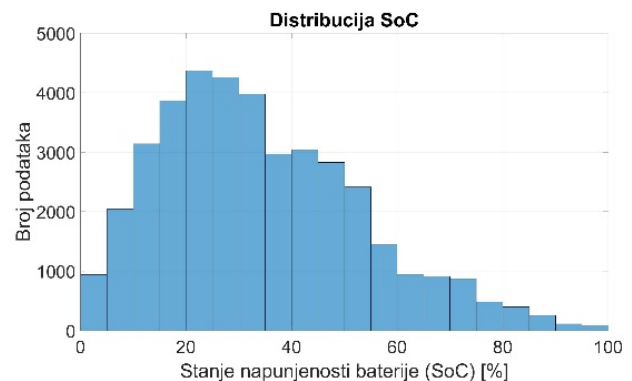
Slika 5. Distribucija kapaciteta baterije vozila

Na osnovu podataka o dostupnim modelima električnih vozila na tržištu u [17] i na osnovu podataka o zastupljenosti određenih vrsta električnih vozila na tržištu po realnoj maksimalnoj kilometraži pri punoj bateriji iz [18], formiran je skup podataka koji sadrži informacije o efikasnosti vozila i maksimalnom kapacitetu baterije vozila. Ovi podaci obrađeni su K – klasterizacijom i dodeljeni klasterima određenim u prethodnoj tački u skladu sa veličinom klastera iz obe tačke. Za sva vozila pretpostavljena je maksimalna snaga punjenja od 22 kW, a

maksimalna snaga pražnjenja od 20 kW. Stanje napunjenosti baterije (SoC – eng. *state-of-charge*) se može kretati od 0% do 100%. Na osnovu podataka iz [19] određena je K-klasterizacija na 50 klastera električnih za SoC prilikom dolaska na stanicu za punjenje. Zatim su podaci o vremenu provedenom na stanici i podaci o SoC obrađeni, uz pretpostavku da je $SoC = 100\%$ u početnom trenutku simulacije, kako bi se dobila raspodela vožnje (u km) za svaki sat koji vozilo ne provodi na stanici. Pretpostavljeno je da za svaki klaster vozila pri odlasku sa stanice, baterija vozila mora da se napuni minimum koliko bi se napunila konstantnim (tokom vremena provedenog na stanici) korišćenjem punjača od 11 kW. Na ovaj način, u skladu sa zahtevanim načinom unosa podataka u PLEXOS softverski paket, „namešteno“ je da dati klaster vozila u trenutku dolaska na stanicu za punjenje električnih vozila ima zahtevani SoC. Na Slikama 5, 6, 7 i 8 dat je prikaz distribucije ovako dobijenih ulaznih podataka električnih vozila.



Slika 6. Raspored dolaska vozila na stanicu



Slika 7. Distribucija SoC pri dolasku na stanicu

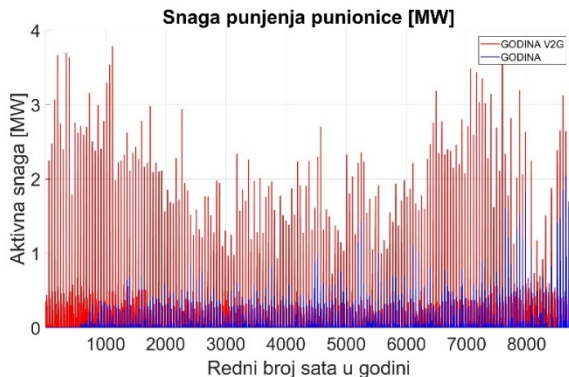
Za analizu naponskih prilika na godišnjem i dnevnom nivou koristi se softverski paket MATLAB. Naponske prilike određene su pomoću formula (1), (2) i (3) za svaki interval posmatranog scenarija.

III REZULTATI

Optimalni raspored punjenja vozila koji je generisan pomoću PLEXOS softverskog paketa za scenarije „GODINA“ i „GODINA V2G“ dati su na Slici 8.

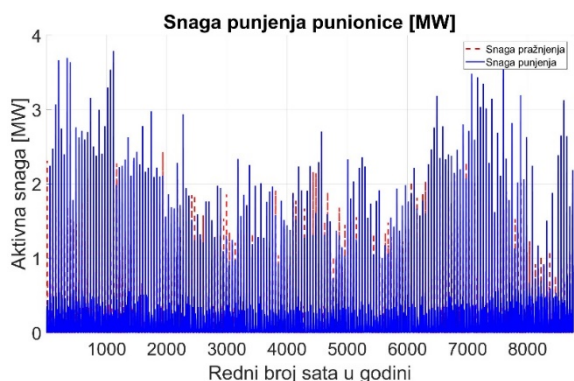
Na ovom grafiku može se uočiti znatno veća snaga punjenja vozila u slučaju mogućnosti V2G. Razlog ovome je potreba za

većom energijom u skladištu baterije vozila, kako bi se ona mogla prazniti u trenucima kada je manja proizvodnja iz solarnih elektrana, kako bi se izbegla kupovina energije od distributivne mreže.

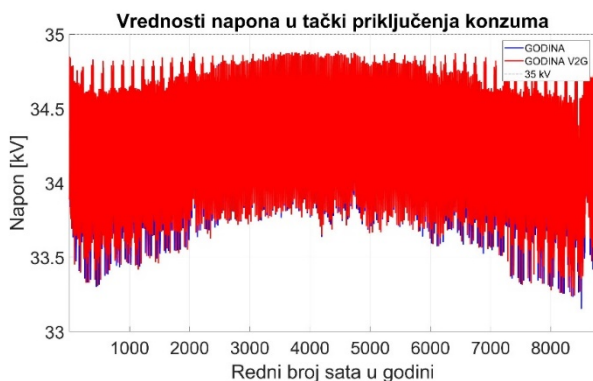


Slika 8. Snaga punjenja vozila stanice za punjenje na nivou godine u slučaju sa i bez mogućnosti V2G

Na Slici 9 dat je prikaz optimalnog rasporeda punjenja i pražnjenja vozila na nivou godine u ovom slučaju. Značajno veća snaga punjenja u odnosu na snagu pražnjenja objašnjava se manjom efikasnošću pražnjenja baterija u odnosu na punjenje.



Slika 9. Snage punjenja i pražnjenja punionice za scenario „GODINA V2G“



Slika 10. Napon na priključcima konzuma na nivou godine za dva posmatrana scenarija

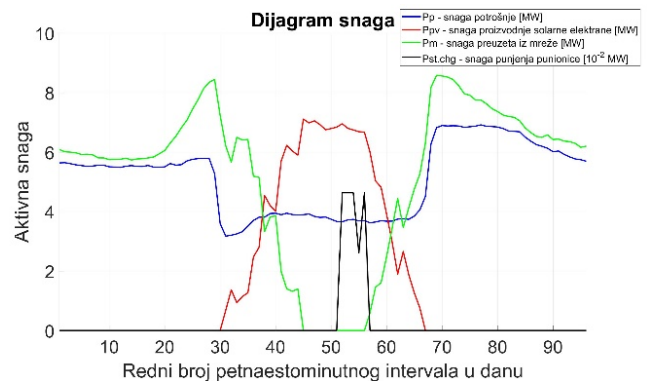
Napon tačke priključenja konzuma na mrežu u skladu sa optimizovanim rasporedom punjenja i pražnjenja električnih

vozila prikazan je na Slici 10.

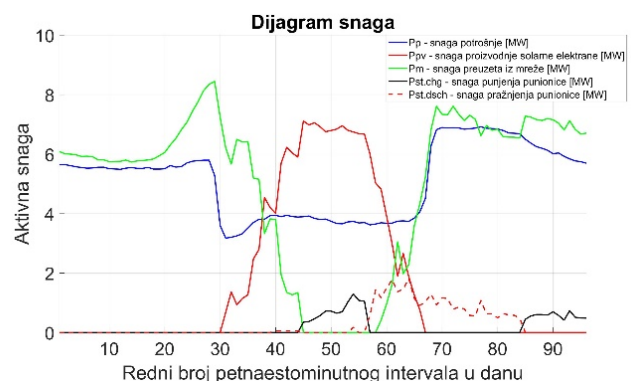
Sa ovog grafika može se uočiti da je napon na priključcima konzuma viši u slučaju V2G mogućnosti odnosu na slučaj gde ovo nije omogućeno, pogotovo u zimskim mesecima. U ovom periodu, poboljšanje naponskih prilika, odnosno povećanje napona, usled pražnjenja baterija vozila nazad u mrežu je najznačajnije. Ovo se objašnjava činjenicom da je potrošnja domaćinstava u ovom periodu godine viša, usled grejne sezone, pa je i napon na priključcima niži. Istovremeno, uz nižu iradijaciju Sunčevog zračenja tokom zimskih meseci, solarne elektrane proizvode manje energije, što takođe utiče na niži napon u tački priključenja.

Na nivou dana, sa petnaestominutnom rezolucijom, mnogo se lakše uočavaju razlike u naponskim prilikama u slučaju mogućnosti vraćanja energije nazad u mrežu iz baterija električnih vozila i bez.

Na Slici 11 prikazani su snaga proizvodnje iz solarne elektrane, snaga preuzeta iz mreže, snaga punjenja punionice i snaga potrošnje na nivou jednog dana, za scenario „DAN“. Za scenario „DAN V2G“ dijagram prethodno opisanih snaga, uz snagu pražnjenja punionice, prikazan je na Slici 12.

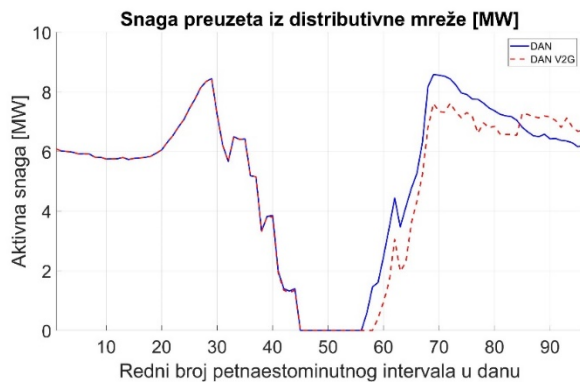


Slika 11. Dijagram snaga za posmatrani dan za scenario „DAN“



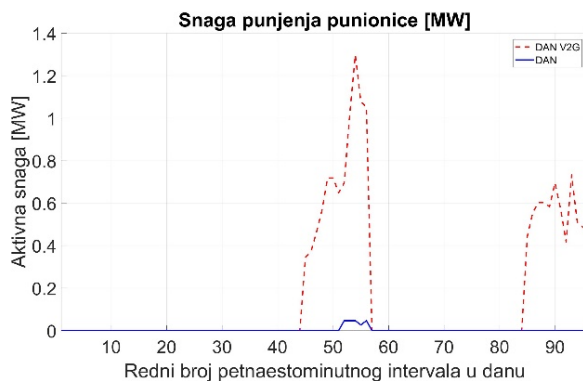
Slika 12. Dijagram snaga za posmatrani dan za scenario „DAN V2G“

Može se uočiti da se snaga preuzeta iz mreže u večernjim satima smanjuje u slučaju mogućnosti pražnjenja vozila u mrežu, usled pražnjenja baterija. Uporedni prikaz snage preuzete iz mreže prikazan je na Slici 13.

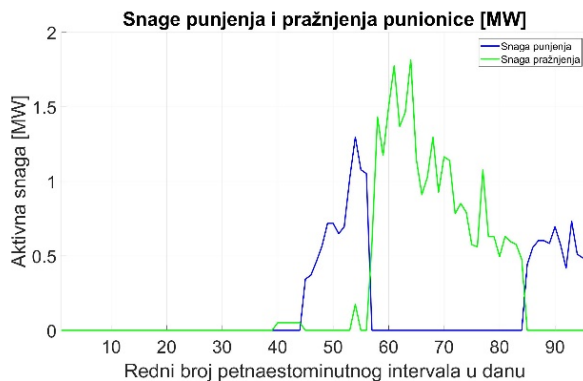


Slika 13. Snaga preuzeta iz distributivne mreže za posmatrane scenarije

Istovremeno, snaga punjenja baterija je povećana, ali na račun proizvodnje iz solarne elektrane. Snage punjenja baterija za posmatrane scenarije date su na Slici 14.



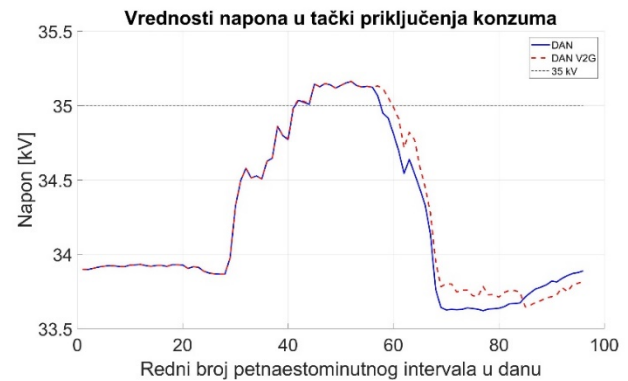
Slika 14. Snaga punjenja stanice za punjenje električnih vozila za posmatrane scenarije



Slika 15. Snage punjenja i pražnjenja punionice za scenario „DAN V2G“

Optimalni raspored punjenja i pražnjenja vozila za posmatrane scenarije dat je na Slici 15. Razlika u snazi je usled manje efikasnosti pražnjenja baterija u odnosu na punjenje.

Ovakav raspored punjenja i pražnjenja dovodi do promene naponskih prilika na priključcima konzuma. Na Slici 16 je prikazan nivo napona za scenarije „DAN V2G“ i „DAN“ na nivou posmatranog dana.



Slika 16. Naponi na priključcima mreže na nivou dana za dva posmatrana scenarija

Na ovom grafiku može se uočiti smanjenje napona u periodu kada je najviši, odnosno kada postoji proizvodnja iz solarnih elektrana. S druge strane, povećanje napona dešava se u večernjim satima kada baterije vraćaju energiju u mrežu, a kada je napon na znatno nižoj vrednosti od nominalne. U oba slučaja, naponske prilike su se poboljšale.

Rezultat optimizacije u softveru PLEXOS pruža podatke o ekonomskim parametrima relevantnim kako za vlasnike proizvodnih jedinica, tako i za operatore sistema i potrošače. Ekonomski parametri koji se u ovom radu analiziraju su: cena generisanja, cena energije, vremenski ponderisana cena, cena ponderisana po proizvodnji, troškovi opterećenja, prihodi generatora i suficit poravnanja. Svaki od ovih parametara je ključan za razumevanje ukupnog ekonomskog učinka elektroenergetskog sistema u okviru ova dva scenarija.

Napominje se da su varijabilni troškovi proizvodnje modelovani za objekat generatora, zapravo cene više i niže tarife posmatrane distributivne mreže. Na ovaj način, izlazni ekonomski parametri koji se tiču generatora, a koji su rezultat analize, zbog pretpostavke da su varijabilni troškovi proizvodnje i održavanja solarnih panela jednaki nuli, zapravo se odnose na telo koje upravlja distributivnom mrežom.

Analiza ekonomskih parametara će se vrši samo na nivou godinu dana, a rezultujuće vrednosti parametara za dva scenarija date su u Tabeli 1.

U scenariju sa V2G, primetno je smanjenje troškova generisanja energije (sa 202.375 hilj. RSD na 193.243 hilj. RSD), što se može pripisati funkciji baterija električnih vozila kao resursa za skladištenje, smanjujući potrebu za skupim vršnim generatorima. Ovo je rezultiralo i nižom cenom energije koju plaćaju potrošači (sa 4.137 na 4.081 RSD/MWh), jer se u periodu visokog opterećenja energija vraća u mrežu iz baterija, čime se smanjuje pritisak na tradicionalne generatore.

Prosečna vremenski ponderisana cena (3.966 RSD/MWh u V2G scenariju) je neznatno viša nego u scenariju bez V2G, što se objašnjava čestim pražnjenjem baterija tokom perioda nižeg opterećenja. Iako V2G snižava cene u vršnim periodima, njegova upotreba tokom manje potražnje blagom povećanju prosečne cene. Slično tome, cena ponderisana po proizvodnji je takođe

nešto niža u V2G scenariju zbog porasta konkurencije sa alternativnim izvorom energije, što umanjuje prihode generatora.

Tabela 1. Uporedni prikaz ekonomskih parametara za dva posmatrana scenarija na nivou godine

Parametar	GODINA	GODINA V2G
Cena generisanja [hilj. RSD]	202.375,3	193.243,5
Cena energije [RSD/MWh]	4.136,6	4.080,8
Vremenski ponderisana cena [RSD/MWh]	3.966,0	3.981,4
Cena ponderisana po proizvodnji [RSD/MWh]	4.077,7	3.863,6
Troškovi opterećenja [hilj. RSD]	198.284,0	200.899,2
Prihodi generatora [hilj. RSD]	197.908,6	192.473,5
Suficit poravnanja [hilj. RSD]	375,460	8.425,668

Troškovi opterećenja su neznatno veći u V2G scenariju (200.899 hilj. RSD) zbog dinamike punjenja i pražnjenja baterija, što ukazuje na potrebu za pažljivijim planiranjem kako bi se maksimizovala ušteda. Prihodi generatora opadaju u V2G scenariju (na 192.474 hilj. RSD), budući da V2G obezbeđuje alternativu konvencionalnoj proizvodnji i stvara konkurenciju. Suficit poravnanja značajno raste u V2G scenariju (sa 376 na 8.426 hilj. RSD), što ukazuje na ekonomičnije funkcionisanje sistema i veći ekonomski potencijal za operatore.

Ovi parametri zajedno ukazuju na ekonomske benefite V2G sistema za operatore i potrošače, uz blagu redukciju prihoda za konvencionalne generatore. Time se podstiču investicije u obnovljive izvore i tehnologije za skladištenje, što je značajan korak ka zelenoj energetskej tranziciji i smanjenju emisija.

IV ZAKLJUČAK

Na osnovu analize sprovedene u ovom radu, može se zaključiti da tehnologija V2G pruža značajne prednosti u upravljanju elektroenergetskim sistemima sa visokim udelom obnovljivih izvora energije. V2G sistem omogućava da električna vozila ne budu samo potrošači energije, već i aktivni učesnici u balansiranju mreže, što doprinosi stabilizaciji naponskih prilika i smanjenju operativnih troškova. Ovaj pristup, u kombinaciji sa obnovljivim izvorima energije, potencijalno može značajno uticati na povećanje efikasnosti i održivosti elektroenergetskih sistema.

Rezultati pokazuju da korišćenje električnih vozila kao skladišta energije u V2G sistemu poboljšava stabilnost mreže i omogućava fleksibilnost koja je neophodna za integraciju velikih količina obnovljivih izvora energije. Ovo je posebno važno u slučaju varijabilnih izvora kao što su solarna energija i energija vetra, gde V2G sistemi mogu igrati ključnu ulogu u ublažavanju intermitentnosti i oscilacija proizvodnje i potrošnje.

Međutim, jedan od značajnih izazova koji se mora uzeti u obzir jeste uticaj V2G tehnologije na dugovečnost baterija električnih

vozila. Ponovljeni ciklusi punjenja i pražnjenja, koji su neophodni za učešće u V2G sistemu, mogu dovesti do ubrzanog trošenja baterija, čime se smanjuje njihov životni vek i efikasnost. Ovaj problem otvara prostor za dalja istraživanja, posebno u pravcu razvoja baterijskih tehnologija koje bi bile otpornije na česte cikluse punjenja i pražnjenja, kao i planiranja optimalnog rasporeda punjenja i pražnjenja električnih vozila.

V2G tehnologija pokazuje veliki potencijal za poboljšanje upravljanja elektroenergetskim sistemima i podršku obnovljivim izvorima energije, ali su dalja istraživanja neophodna, kako u pogledu navika potrošača, uticaja na životni vek baterija, algoritama za optimalno punjenje i pražnjenje električnih vozila, tako i u pogledu razvoja infrastrukture za podršku masovnijoj integraciji električnih vozila u mrežu, kao i unapređenja regulatornih okvira koji bi omogućili efikasnu i sigurnu primenu V2G tehnologije na globalnom nivou.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Autori se zahvaljuju kompaniji Go2Power d.o.o. (Beograd) na omogućavanju korišćenja softverskog paketa PLEXOS.

LITERATURA

- [1] Rajaković, N., Tasić, D. *Distributivne i industrijske mreže*, Akademski misao, Beograd, 2008.
- [2] World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf [preuzeto 03.02.2025]
- [3] Ritchie, H. Tracking global data on electric vehicles, Our World in Data, 2024. <https://ourworldindata.org/electric-car-sales> [pristupljeno 6. 9. 2024]
- [4] Shariff, S.M., Iqbal, D., Alam, M.S., Ahmad, F. A State of the Art Review of Electric Vehicle to Grid (V2G) Technology, in *Proc. First International Conference on Materials Science and Manufacturing Technology*, Tamil Nadu, India, 12–13 April 2019, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012103>
- [5] Alsharif, A., Ahmed, A.A., Khaleel, M.M., Daw Alarga, A.S., Jomah, O.S. M., Imbayah, I. Comprehensive State-of-the-Art of Vehicle-To-Grid Technology, in *Proc. 2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Benghazi, Libya, pp. 530-534, 2023. <https://doi.org/10.1109/MI-STA57575.2023.10169116>
- [6] Sustainable Transport, European Commission – Transport, https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/sustainable-transport_en [pristupljeno: 6. 9. 2024]
- [7] Energy Exemplar, PLEXOS Brochure, <https://www.energyexemplar.com/hubfs/Brochures/Energy%20Exemplar-PLEXOS-Brochure-A4.pdf> [pristupljeno 5. 9. 2024].
- [8] Mikulović, J., Đurišić, Ž. *Solarna energetika*, Akademski misao, Beograd, 2019.
- [9] Savić, A., Šošić, D., Dobrić, G., Žarković, M. *Metode optimizacije: primena u elektroenergetici*, Akademski misao, Beograd, 2018.
- [10] Bixby, R.E. A Brief History of Linear and Mixed-Integer Programming Computation, in *Optimization Stories*, Documenta Mathematica Series, EMS Press, pp. 107-121, 2012. <https://doi.org/10.4171/dms/6/16>
- [11] Gurobi Optimization, LLC, Documentation - Gurobi Optimization, <https://www.gurobi.com/documentation/> [pristupljeno 5. 9. 2024]
- [12] Energy Exemplar, PLEXOS Desktop Guide, <https://portal.energyexemplar.com/unified-help/plexos-desktop/index.htm#t=Main.Welcome.html> [pristupljeno 1. 9. 2024]
- [13] Cenky, M., Bendik, J., Cintula, B., Janiga, P., Eleschová, Ž., Belán, A. Dataset of 15-minute values of active and reactive power consumption of 1000 households during a single year, *Data in Brief*, Vol. 50, 109588, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109588>
- [14] METEOSTAT IODC REGION: Physical Solar Model (PSM) API, <https://developer.nrel.gov/docs/solar/nsrdb/meteosat-download/>

- [pristupljeno 5. 9. 2024]
- [15] Amara-Ouali, Y., Goude, Y., Massart, P., Poggi, J.-M., Yan, H. A Review of Electric Vehicle Load Open Data and Models, *Energies*, Vol. 14, No. 8, pp. 2233, 2021.
<https://doi.org/10.3390/en14082233>
- [16] Amara-Ouali, Y. GitHub - yvenn-amara/ev-load-open-data, <https://github.com/yvenn-amara/EV-Load-Open-Data>. [pristupljeno 5. 9. 2024]
- [17] EV Database, "Electric Vehicle Database," <https://ev-database.org/>. [pristupljeno 1. 9. 2024]
- [18] Electric vehicle model statistics, <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/policymakers-and-public-authorities/electric-vehicle-model-statistics> [pristupljeno 5. 9. 2024]
- [19] GitHub - DESL-EPFL/Level 3 electric vehicle charging dataset,

<https://github.com/DESL-EPFL/Level-3-EV-charging-dataset/tree/main>.
[pristupljeno 1. 9. 2024]

AUTORI

msr Jovana Nikodijević – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Go2Power d.o.o., jovananikodijevic97@gmail.com, ORCID [0009-0007-3414-276X](https://orcid.org/0009-0007-3414-276X)

dr Mileta Žarković – vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5855-6595](https://orcid.org/0000-0001-5855-6595)

Techno-Economic Analysis of the Power System Operation with the Integration of Electric Vehicles

Abstract - The energy transition and increased application of renewable energy sources in power systems pose challenges in electric grid management. One significant factor in this process is the integration of electric vehicles (EVs) and their capability for bidirectional charging through Vehicle-to-Grid (V2G) technology, enabling energy return from EV batteries to the grid. This paper analyses the impact of V2G technology on voltage stability in a 35 kV distribution network and its economic significance for the system. Using PLEXOS and MATLAB software packages, various EV charging and discharging scenarios were modelled, with solar power plants as the primary renewable energy source. The results indicate positive effects of V2G technology, including improved voltage conditions and reduced operational costs. Economic analysis shows that V2G enables consumer cost savings and reduces the need for conventional supply sources during peak loads. However, accelerated battery wear in EVs presents a significant challenge, and further research is recommended to enhance the technology and develop regulatory frameworks for the broader adoption of V2G in the future.

Index Terms - Energy transition, Vehicle-to-Grid (V2G), Voltage stability, Economic analysis