

Matija Zidar
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER)
matija.zidar@fer.hr

Ivan Pavić
Sveučilište u Zagrebu, FER
ivan.pavic@fer.hr

Ninoslav Holjevac
Sveučilište u Zagrebu, FER
ninoslav.holjevac@fer.hr

Dalibor Jakšić
HEP ODS
dalibor.jaksic@hep.hr

Tomislav Radočaj
HEP ODS
tomislav.radocaj@hep.hr

Igor Kuzle
Sveučilište u Zagreb, FER
igor.kuzle@fer.hr

INTEGRACIJA INFRASTRUKTURE ZA PUNJENJE ELEKTRIČNIH VOZILA U DISTRIBUCIJSKU MREŽU KARLOVCA

SAŽETAK

Broj električnih vozila značajno se povećava i potpomognut je različitim oblicima poticaja od strane države i jedinica lokalne samouprave. Utjecaj na elektroenergetski sustav očituje se na različite načine, od porasta opterećenja na razini kućanstava za sporo punjenje električnih vozila do posebno izraženog utjecaja na sustav kroz integraciju brzih punionica. Kako bi se smanjile negativne posljedice te korisnicima pružila zadovoljavajuća razina usluge potrebno integraciju punionica razmotriti sa strane potreba transportnog sustava te sa strane ograničenja elektroenergetskog sustava. Poznavanje međusobne povezanosti ova dva sustava ključna je za pravilan odabir lokacije i kapaciteta punionica. U referatu će na primjeru testne mreže Karlovca biti prikazan utjecaj integracije brze punionice i većeg broja električnih automobila u distribucijskoj mreži na struno-naponske prilike, pouzdanost pogona te ukupne iznose gubitaka energije. Referat će dati usporednu analizu utjecaja na mrežu brzih punionica s i bez spremnika energije.

Ključne riječi: električna vozila, brze punionice, utjecaj na elektroenergetska mreža

ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE INTEGRATION IN KARLOVAC DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

The number of electric vehicles is increasing and is stimulated with different kinds of incentives provided both by the central government and local stakeholders. Their impact on the power system manifests in various ways, from the increase of load of the households due to increased slow charging demands accumulated to the global impact the fast charging stations have. To reduce the negative impacts and maintain the satisfactory service level the integration of charging infrastructure is needed to be addressed both from the requirements of the transportation system and constraints from the power system. The interdependency between these two systems is key when choosing the appropriate location and capacity. This paper will show the impact the integration of fast charging stations serving a large fleet of electric vehicles has on a power system. On a case-study network of the Elektra Karlovac the paper will present different power flow analysis, reliability indices analysis and power losses analysis results. Furthermore, it will give a comparison of the future network with the fast charging stations integrated with energy storage and without energy storage.

Key words: electric vehicles, fast charging, power system impact

1. UVOD

Novim energetskim mjerama, objavljenim potkraj 2016. godine pod nazivom Zimski paket, Europska komisija nastoji potaknuti aktivno sudjelovanje korisnika distribucijske mreže u pogonu elektroenergetskog sustava [1]. Osiguranjem uvjeta za kompetitivno djelovanje korisnika distribucijske mreže na tržištu električne energije te pomoćnih usluga, iskorištava se fleksibilnost korisnika distribucijske mreže koja je do sada bila zanemarena te se otvara put ka niskougljičnom sustavu budućnosti. Električna vozila te stanice za brzo punjenje ili zamjenu baterija jedan su od korisnika distribucijske mreže koji sustavu mogu ponuditi dodatnu fleksibilnost. Novi prijedlog direktive o unutarnjem tržištu električne energije [2], ističe potrebu stvaranja regulative za integraciju elektromobilnosti u distribucijske mreže. Prijedlog direktive nalaže da svaka država članica mora osigurati da operator distribucijskog sustava na nepristran način surađuje sa svim tvrtkama zainteresiranim za investiranje, razvoj, upravljanje i priključenje infrastrukture za punjenje električnih vozila (EV). Operator distribucijskog sustava može imati vlasništvo te upravljati punionicama EV jedino ako nema zainteresiranih nakon tendera za izgradnju punionice te ako je nacionalno regulativno tijelo dopustilo takav oblik vlasništva. Neovisno o vlasništvu, punionice EV, zbog velikih snaga koje povlače iz mreže, stvaraju probleme pri vođenju mreže te potencijalno i potrebu za ulaganjem u nove elemente distribucijske mreže. Detaljnije istraživanje utjecaja EV na mrežu može se pronaći u [3]-[6].

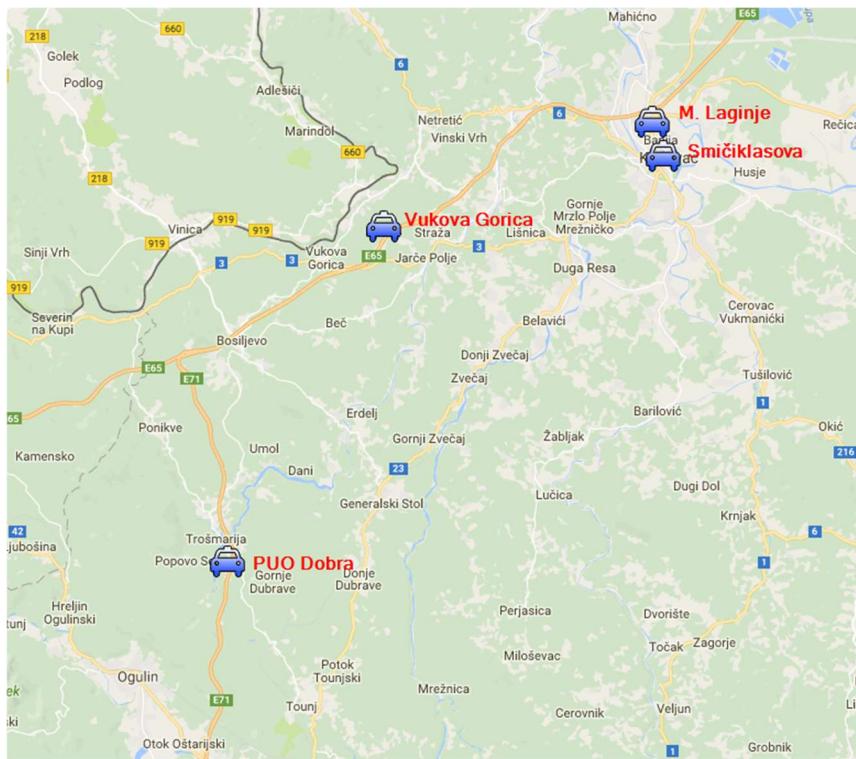
Integracija električnih vozila u svijetu uzela je maha te je u prosincu 2016. godine broj EV na ulicama narastao na preko 2 milijuna te se prepostavlja da je u drugom kvartalu 2017. godine ta brojka premašila 3 milijuna [7]. U Norveškoj je protekle godine broj prodanih električnih vozila činio četvrtinu tržišta automobila te su električna vozila zauzela oko 5% ukupnog voznog parka. Slična situacija događa se i u drugim zemljama zapadne i sjeverne Europe (Nizozemska, Njemačka, UK itd.) te se takvi trendovi mogu očekivati i u Hrvatskoj u narednom desetogodišnjem razdoblju. Prema državnom zavodu za statistiku broj osobnih vozila u 2016. u Republici Hrvatskoj bio je nešto veći od 1,5 milijuna [8], dok je broj električnih i hibridnih danas na oko 1500. Još uvijek je zanemariv postotak EV na ulicama te je pravo vrijeme da se počne razmišljati kako će EV utjecati na distribucijsku mrežu u Hrvatskoj. Prelazak s konvencionalnog pogona na elektromobilnost će utjecati na daljnji razvoj prometnog, ali i elektroenergetskog sektora. Pitanje je koliko će naša mreža biti spremna prihvati veće količine EV i njima povezanih punionica.

Ovaj rad dat će analizu utjecaja brzih punionica EV na konkretnu distribucijsku mrežu u RH, mrežu Elektre Karlovac. Kao alternativa brzim punionicama EV javlja se i mogućnost integracije stanica za zamjenu baterija gdje vozila, umjesto da staju i direktno se priključuju na mrežu, vrše zamjenu svoje prazne baterije (niske razine napunjenošći) punom baterijom. Punonica za zamjenu baterija prema tome sadrži stog baterija koje se pune neovisno o trenutnim potrebama korisnika. Navedeni stog prema mreži djeluje kao stacionarni spremnik energije. U radu će biti dana i analiza utjecaja punionice za EV s integriranim spremnikom energije, odnosno stanice za zamjenu baterija.

2. MODEL MREŽE

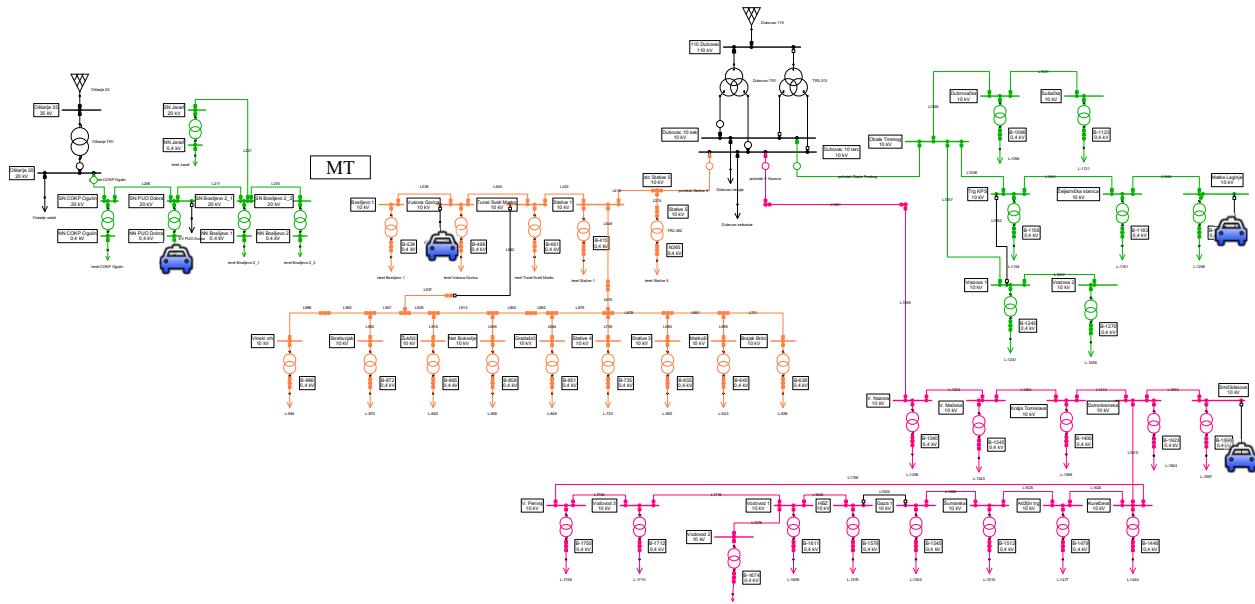
Za analizu utjecaja brzih punionica na mrežu odabrane su četiri lokacije na području HEP ODS Elektra Karlovac. Odabранe su zbog svog položaja jer se dvije potencijalne lokacije nalaze na autocesti A1, a dvije na državnoj cesti D1 te se na njima očekuje značajan promet, pogotovo za vrijeme turističke sezone. Prostorni prikaz dan je slikom (Slika 1). Nazivi na slikama su nazivi TS 10(20)/0,4 kV s kojih bi se predvidljivo moglo napajati buduće punionice.

Na slici (Slika 2) prikazan je model SN mreže u Neplanu. Neplan je aplikacija za proračune u elektroenergetskim mrežama koja ima mogućnost analize tokova snaga s krviljama snage u vremenu što će biti korišteno u ovom radu. TS 20/0,4 kV PUO Dobra napaja se iz TS 35/20 kV Oštarije po izvodu Čvor Ogulin koji je prikazan zelenom bojom na lijevom dijelu slike. Desni dio slike prikazuje izvode iz TS 110/10 kV Dubovac koja napaja preostale tri punionice. TS 1V/0,4 Vukova Gorica napaja se iz izvoda Stative 5 koji je prikazan narančastom bojom, TS 10/0,4 kV Smičiklasova napaja se iz izvoda V. Nazora prikazanog rozom bojom dok se TS 10/0,4 Matka Laginje napaja iz izvoda Obala Trnskog prikazanog zelenom bojom. Oznakom MT naznačeno je postojanje međutransformatora 10/20 kV, ali on neće biti razmatran u ovom radu te nije modeliran. Izvodi Čvor Ogulin i Stative 5 su kabelski izvodi izvedeni uz autocestu s aluminijskim kabelom opteretivim do 360 A. Dio izvoda Stative 5 je zračna mreža manjeg presjeka, ali ona nije značajna za ovu analizu jer se radijalno odvaja od kabelske magistrale na kojoj će se nalaziti punonica. Izvodi Obala Trnskog i V. Nazora su klasični kabelski gradski izvodi koji su kombinacija starih i novih kabela. Na izvodu V. Nazora od pojne točke do punionice najslabije je opteretiv bakreni vodič presjeka 70 mm^2 (210 A), a na izvodu Obala Trnskog bakreni vodič 95 mm^2 (255 A).



Slika 1 Prostorni prikaz potencijalnih lokacija punionica

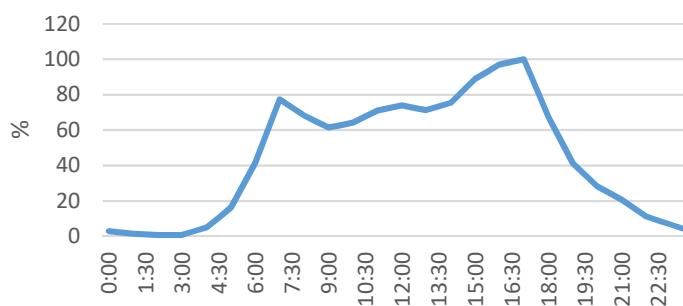
Na temelju stvarnih opterećenja i krivulja potrošnje početka izvoda i značajnih korisnika na njima napravljena je analiza tokova snaga s krivuljama snage. Na slici (Slika 3) prikazano je opterećenje na početku sva četiri promatrana izvoda.



3. UTJECAJ EV NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

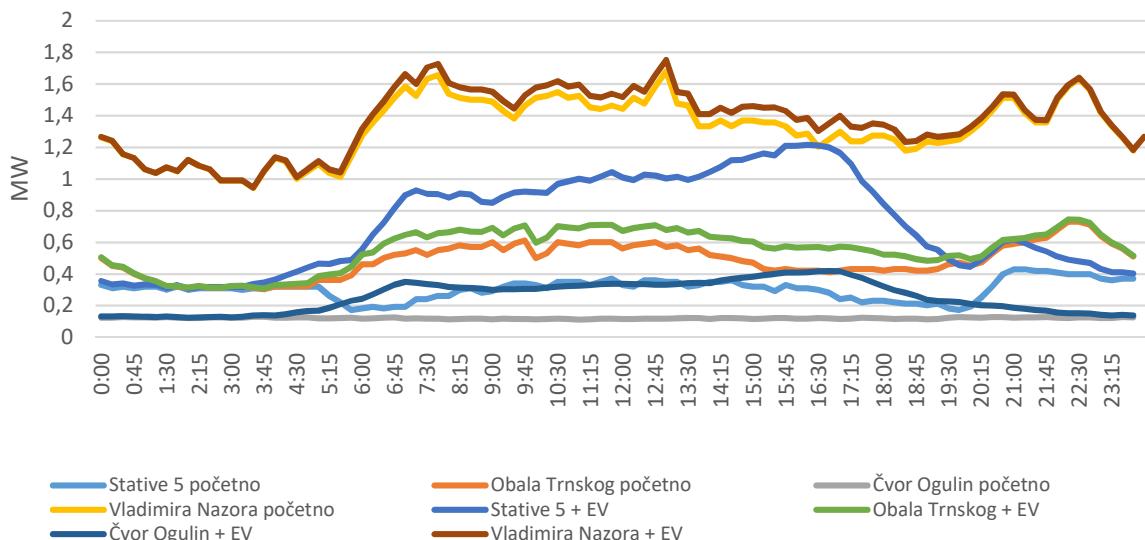
Utjecaj električnih vozila na distribucijsku mrežu promatrać će se kroz utjecaj na strujno naponske prilike u mreži i kroz utjecaj na gubitke. Prvo će se razmotriti utjecaj brzog punjenja bez spremnika energije integriranih u sustav, a zatim će se kroz modul za optimiranje veličine i položaja spremnika energije vidjeti što se dobiva sa punionicama vozila koje imaju mogućnost zamjene baterija u vozilima.

Definiranje krivulja snage punionice električnih vozila koja ovisi o broju električnih vozila i gustoći prometa na promatranoj prometnici je van opsega ovog rada. Opća krivulja snage je preuzeta iz [9] te je njen normirani oblik prikazan slikom (Slika 3). Za svaku od predviđenih lokacija predviđeno je brzo punjenje, a na svakoj lokaciji, ovisno o očekivanom prometu i broju punjača, predviđena je različita snaga. Na TS 10/0,4 Vukova Gorica predviđena je instalirana snaga od 880 kW, na TS 20/0,4 kV PUO Dobra 300 kW, na TS 10/0,4 kV Matka Laginje 150 kW te na TS 10/0,4 kV Smičiklasova 100 kW.



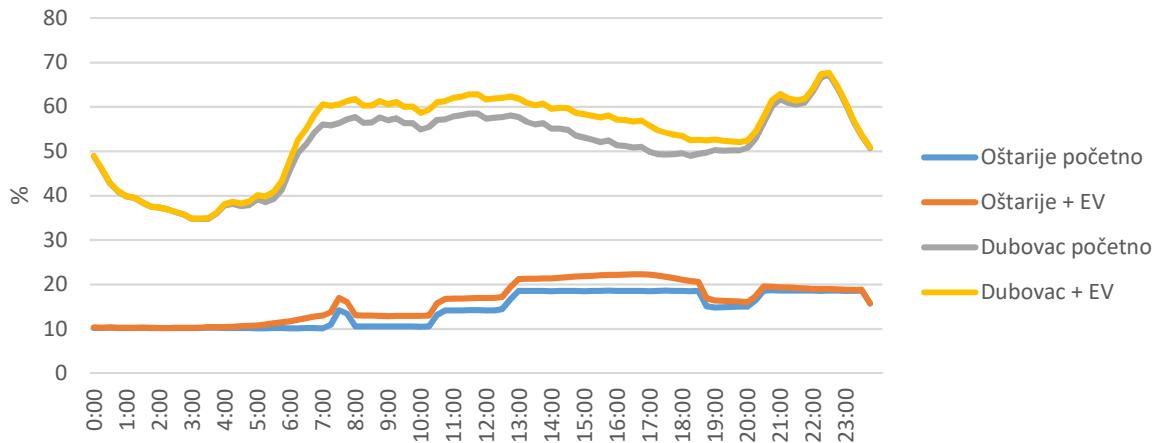
Slika 3 Normalizirana snaga punjenja EV u brzom punionici

Na slici Slika 4 vidi se utjecaj na snagu na početku izvoda. Najzamjetniji je utjecaj na snagu izvoda Stative 5 na koji se priključuje punonica snage 480 kW. Budući da je u cijeloj razmatranoj mreži najslabiji kabel opteretiv do preko 3 MVA, ne dolazi do prekoračenja dozvoljenih opterećenja.



Slika 4 Snage na početku izvoda prije i nakon priključenja punionice

Utjecaj na opterećenje pojne stanice prikazan je slikom Slika 5. Uočljivo je da vrhunac prometa ne koincidira s maksimalnim opterećenjem u klasičnoj krivulji potrošnje te u gradskoj mreži nije došlo do značajnog porasta maksimalnog opterećenja pojne stanice. Na TS 35/20 kV Oštarije zamjetan je porast maksimalnog opterećenja stanice, no njeno opterećenje je ionako malo te je ostala unutar dopuštenih granica.



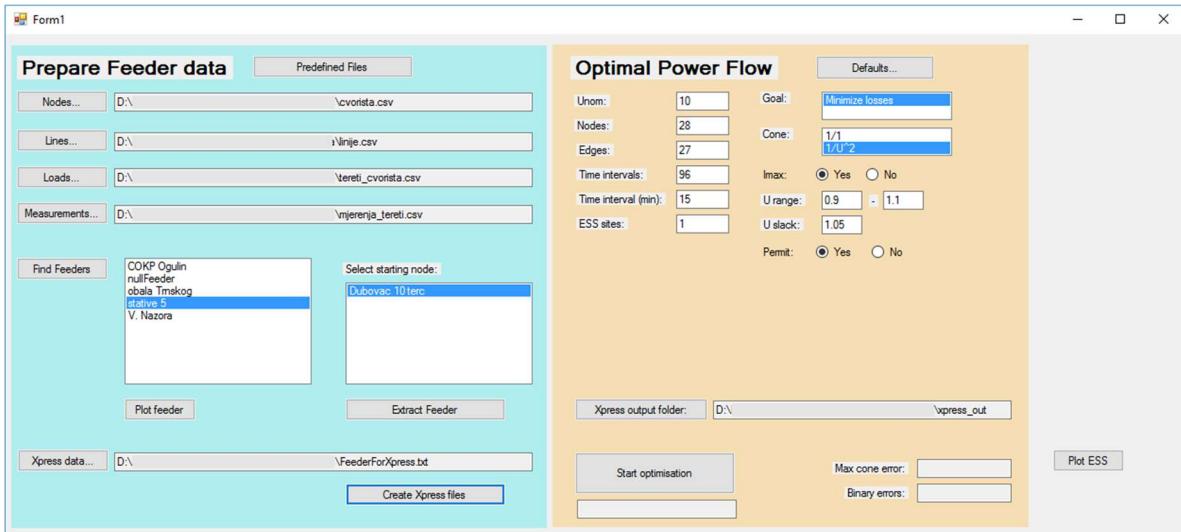
Slika 5 Utjecaj punionica električnih vozila na opterećenje pojnih točki

4. STANICA ZA ZAMJENU BATERIJA

S aspekta distribucijske mreže, stanica za zamjenu baterija (engl. „Battery swapping station“) [10] može se modelirati kao korisnik (punionica) sa spremnikom energije. Takav korisnik može u trenutcima niskog opterećenja (ili niske cijene) puniti baterije, a u periodima visokog opterećenja može ih čak i prazniti u mrežu.

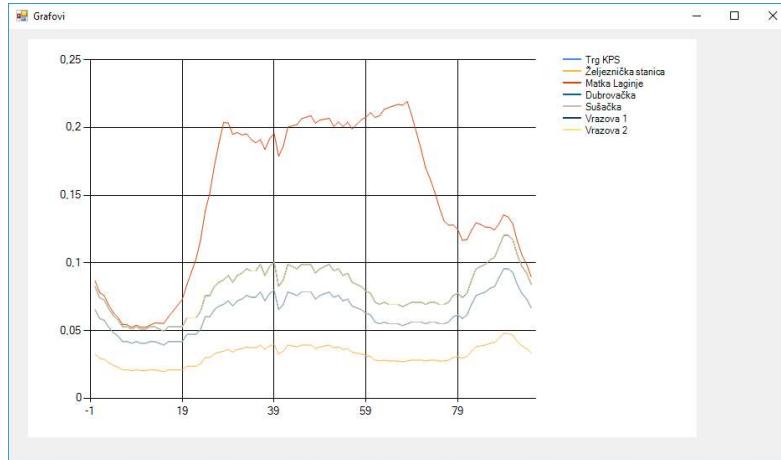
U ovom radu je svaka punionica modelirana kao takav jedan korisnik koji mora zadovoljiti svoje dnevne potrebe za energijom, a ima na raspolaganju i spremnik energije kojim može smanjiti utjecaj na mrežu. Naravno, poštujući fizikalna ograničenja samog spremnika. Dodatno, kako bi rezultati bili relevantni, pretpostavka je da je napunjenošć spremnika na kraju dana jednaka kao i na početku kako bi takvo ponašanje mogao ponoviti i idući dan.

Za modeliranje stanice za zamjenu baterija korištena je na FER-u razvijana aplikacija za optimiranje spremnika energije u distribucijskoj mreži. Opis samog modela dan je u [11], a slika ispod (Slika 6) prikazuje izgled sučelja trenutne verzije.



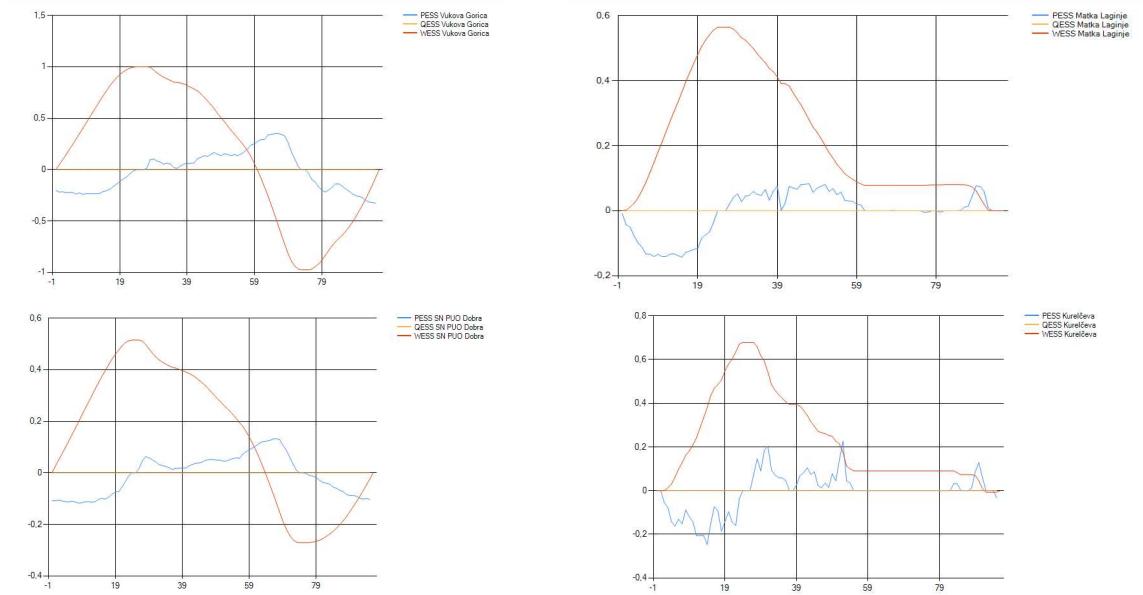
Slika 6 Aplikacija za optimiranje smještaja i veličine spremnika energije

Specifičnost navedenog pristupa je u direktnoj povezanosti Neplana i aplikacije za optimiranje. Za Neplan je razvijen dodatak koji izravno generira podatke o mreži i krivulje potrošnje koje se onda koriste u optimizacijskom algoritmu. Vidljivo je na slici (Slika 6) da je aplikacija preuzela izvode koji se nalaze u Neplan mreži, a na slici (Slika 7) vidi se prikaz tih krivulja nakon pritiska na gumb „Plot feeder“.



Slika 7 Krivulje tereta preuzete iz Neplana

Optimizacijski algoritam zasniva se na mješovitom cijelobrojnom stožastom programiranju i metodi tokova snaga po granama koja je prilagođena radikalnim distribucijskim mrežama. Budući da se optimira ponašanje punionice električnih vozila, broj lokacija na koje je moguće instalirati spremnik energije ograničen je na jednu po izvodu. Funkcija cilja koja se optimira je minimizacija gubitaka u srednjenačkoj mreži. Rezultati po izvodima su dani slikom (Slika 8). Crvenom bojom je prikazano stanje napunjenošću baterije, plavom radna snaga, a narančastom jalova snaga. Za potrebe ovog razmatranja, jalova snaga je postavljena na nulu. Negativan predznak snage označava punjenje baterije (teret), a pozitivan pražnjenje baterije (proizvođač). Zanimljivo je primijetiti kako se punionice veće snage (na autocesti) pune i ujutro i navečer dok su manje gradske punionice najveći dio potrebne energije pohranile ujutro. Budući da optimizacijskom algoritmu nije moguće predefinirati lokaciju na koju je potrebno smjestiti spremnik energije, već samo broj čvorista na koje je to moguće, za punionicu električnih vozila napajanu iz TS 10/0,4 Smičiklasova, optimalna lokacija je odabrana u obližnjoj TS 10/0,4 Kurelčeva. Za sve ostale slučajeve je optimalna lokacija upravo ona od punionice.

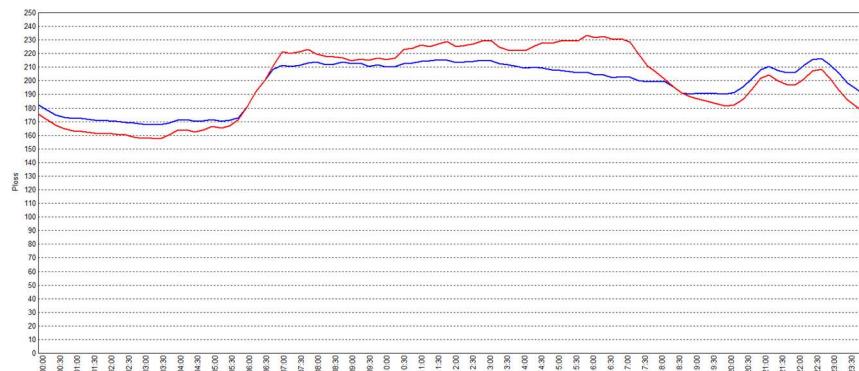


Slika 8 Rezultati optimiranja smještaja i veličine spremnika energije

Za potrebe usporedbe običnih brzih punionica i onih proširenih sa spremnikom energije, dobivene krivulje snage spremnika su unesene u Neplan te su napravljeni proračuni tokova snaga s krivuljama i za taj slučaj. U tablici (Tablica 1) prikazani su dnevni gubici za sve promatrane scenarije. Najmanji dnevni gubici su očekivano dok nema punionica električnih vozila. Priključenje punionica bez spremnika energije uzrokuje porast dnevnih gubitaka za 494 kWh (s 4254 kWh na 4748 kWh). Najznačajniji je porast na 00 kV izvodu Stative 5 na koji se spaja najveća punonica.

Tablica 1 Usporedba dnevnih gubitaka promatrane mreže

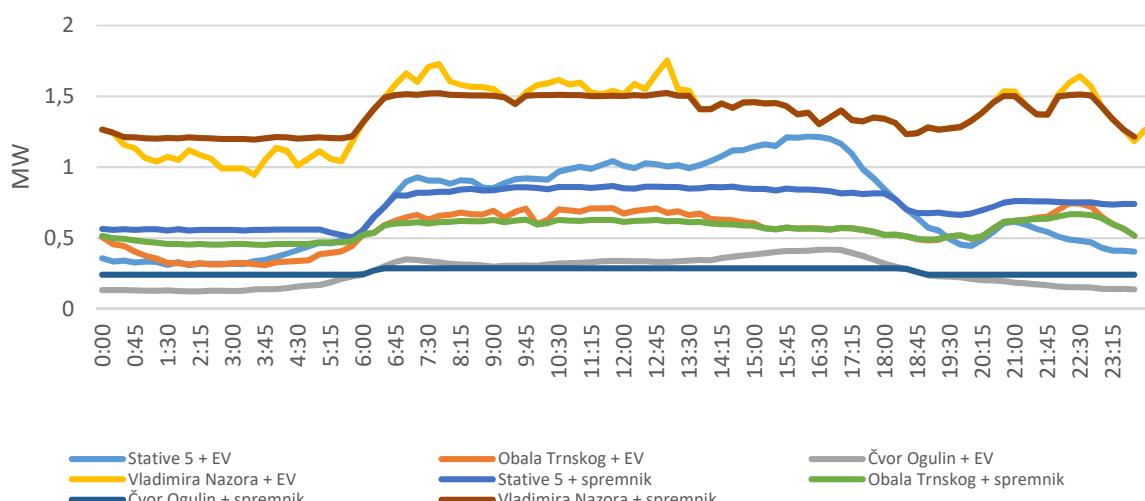
	Dnevni gubici Početna mreža [kWh]	Dnevni gubici Samo EV [kWh]	Dnevni gubici EV + spremnik energije [kWh]
Modelirana mreža	4254	4748	4690
Izvod Čvor Ogulin	692	692	691
Izvod Stative 5	214	593	540
Izvod Vladimira Nazora	561	575	574
Izvod Obala Trnskog	187	195	194



Slika 9 Mrežni gubici u promatranom danu. Crveno – spojene punionice bez spremnika energije; Plavo – sa spremnikom energije

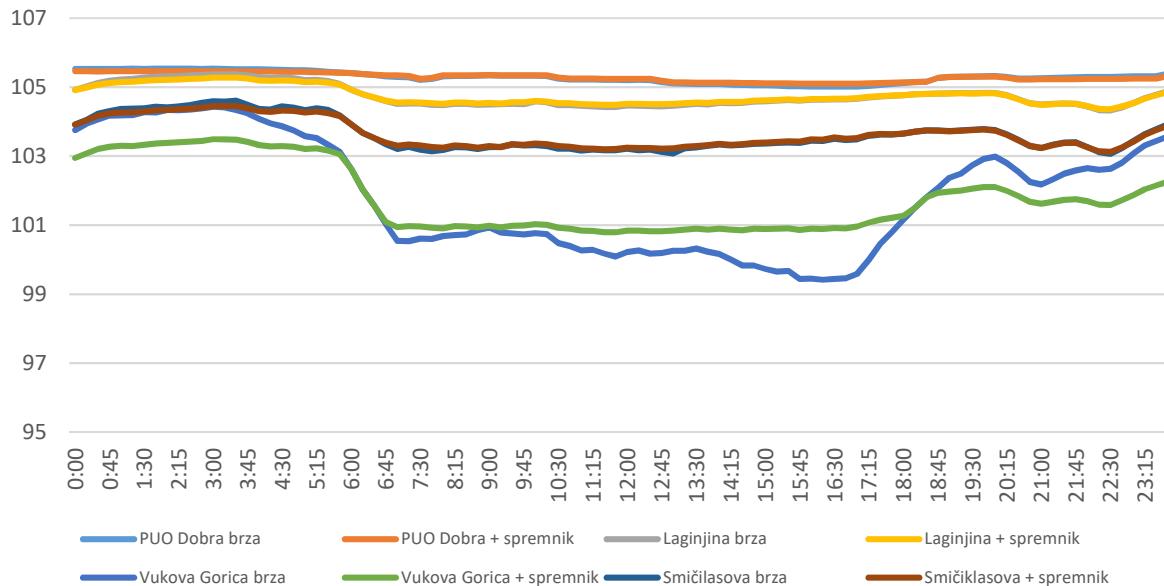
Sa slike (Slika 9) vidi se povećanje gubitaka u jutarnjim i večernjim satima, a smanjenje u ostatku dana. To je posljedica premještanja potrošnje u sate nižeg opterećenja kako bi se smanjili gubici. Budući da mreža nije značajno opterećena, a gubici su ovisni o kvadratu struje, premještanjem potrošnje nisu se postiglo značajno smanjenje gubitaka. Ugradnjom spremnika energije (stanice za zamjenu baterija) u cijeloj promatranoj mreži gubici su smanjeni samo 58 kWh. Proračuni gubitaka su vršeni u Neplanu te obuhvaćaju i gubitke u svim modeliranim transformatorima.

Prikaz opterećenja na početku svakog izvoda prikazano je na slici (Slika 10). Vidi se premještanje potrošnje u slabije opterećene dane, ali posljedično je došlo i do manje varijacije snage na početku izvoda i smanjenja vršnog opterećenja. Na izvodu Vladimir Nazor je s dnevne promjene od 0,945 MW - 1,752 MW (807 MW) varijacija smanjena na 1,194 MW – 1,524 (330 MW), a na izvodu Stative 5 s 0,308 MW – 1,216 MW (908 MW) na 0,504 MW - 0,868 MW (364 MW). U razmatranoj mreži nema slabih dionica te se spremnikom energije ne izbjegavaju investicije u pojačanje mreže, ali je iz ovih razmatranja vidljiva mogućnost istog.



Slika 10 Opterećenje početka izvoda spojene punionice vozila i spremnici energije

Utjecaj spremnika energije na kretanje napona kroz dan dano je slikom (Slika 11). Značajni utjecaj vidljiv je samo na TS Vukova Gorica jer se tamo spaja najveća od promatranih punionica, a i udaljenost od pojne točke je značajna.



Slika 11 Kretanje napona kroz dan na SN sabirnicama punionica električnih vozila

5. ZAKLJUČAK

U radu je razmotren utjecaj priključenja punionica električnih vozila na području Karlovca. Razmotrio se slučaj priključenja punionica bez spremnika energije koje snagu za punjenje vozila preuzimaju iz mreže te ju izravno predaju električnom vozilu i punionica koje bi imale mogućnost pohrane u spremnik energije te bi mogle u konačnici vršiti i punjenje vozila zamjenom baterijskog bloka napunjениm baterijama. Korištena je Neplan analiza s krivuljama snage i optimizacijski modul koji koristi stožasto programiranje za proračune tokova snaga. Razmatrana mreža je pretežno kabelska, urbana mreža, te integracija punionica u mrežu nije uzrokovala preopterećenja iako se pokazalo da bi se korištenjem spremnika smanjilo maksimalno opterećenje. Budući da mreža nije značajno opterećena, zbog kvadratne ovisnosti gubitaka i opterećenja, spremnicima energije nisu se postigle značajne uštede, već su se gubici samo premjestili iz sredine dana u jutarnje i večernje sate. Spremnik energije je pozitivno djelovao na dnevnu varijaciju napona iako je i ona bila unutar dopuštenih granica čak i za brzu punionicu bez spremnika.

6. ZAHVALA

Rad autora sufinancirala je Hrvatska zaklada za znanost kroz projekt Electric Vehicle Battery Swapping Station - EVBASS (IP-2014-09-3517) te kroz projekt FENISG—Flexible Energy Nodes in Low Carbon Smart Network (Grant broj 7766).

7. LITERATURA

- [1] Dostupno na poveznici: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>
- [2] European Comision, „Proposal for a Directive of European Parliament and of the Council on common rules for the internal market in electricity, Brussels 2016
- [3] M. Neaimeh, R. Wardle, A. M. Jenkins, J. Yi, G. Hill, P. F. Lyons, Y. Hübner, P. T. Blythe, P. C. Taylor, “A probabilistic approach to combining smart meter and electric vehicle charging data to investigate distribution network impacts,” Appl. Energy, vol. 157, pp. 688–698, 2015.

- [4] E. Veldman, R. a Verzijlbergh, "Distribution Grid Impacts of Smart Electric Vehicle Charging From Different Perspectives," *Smart Grid*, IEEE Trans., vol. 6, no. 1, pp. 333–342, 2015.
- [5] I Pavić, N Holjevac, T Capuder, I Kuzle, „Role and Impact of Coordinated EV Charging on Flexibility in Low Carbon Power Systems“, IEEE International electric vehicles conference 2014
- [6] A. Y. S. Lam, Y.-W. Leung, X. Chu, "Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, 2014.
- [7] "EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database.", dostupno na poveznici: <http://www.ev-volumes.com/>
- [8] Državni zavod za statistiku, „Registirana cestovna vozila i cestovne prometne nesreće u 2016.“, dostupno na adresi: http://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2017/05-01-05_01_2017.htm
- [9] R. Haaren, „Assessment of Electric Cars' Range Requirements and Usage Patterns based on Driving Behavior recorded in the National Household Survey of 2009“, New York, 2011.
- [10] I Pavić, N Holjevac, M Zidar, I Kuzle, A Nešković, „Transportation and Power System Interdependency for Urban Fast Charging and Battery Swapping Stations in Croatia“, MIPRO 2017
- [11] M. Zidar, T. Capuder, D. Škrlec, „Optimiranje smještaja i veličine spremnika energije korištenjem metode stošca drugog reda“, 5. savjetovanje Hrvatskog ogranka Međunarodne elektrodistibucijske konferencije
- [12] dostupno na poveznici: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>