

Mia Previšić, mag. el.
JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar
mia.previsic@ephzhh.ba

Lucija Medić, mag. ing. el. techn. inf.
JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar
lucija.medic@ephzhh.ba

Marin Majstorović, mag. el.
JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar
marin.majstorovic@ephzhh.ba

Ivan Šimović, mag. el.
JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar
ivan.simovic@ephzhh.ba

STRATEGIJA OPTIMIZACIJE PUNJENJA ELEKTRIČNIH VOZILA ZA SMANJENJE VRŠNIH OPTEREĆENJA

SAŽETAK

Rad istražuje potencijal pametnog punjenja električnih vozila, uz implementaciju strategije optimizacije vremena punjenja, kao načina za smanjenje vršnih opterećenja na distribucijskim transformatorima, poboljšanje ukupne učinkovitosti elektroenergetskog sustava te ostvarivanje financijskih ušteda za krajnje korisnike. Analiza integracije kućnih punjača za električna vozila provedena je uz pomoć programskog alata DIgSILENT PowerFactory, koristeći kvazi-dinamičke simulacije. Simulacije obuhvaćaju razdoblje s najvećim opterećenjem na segmentu distribucijske mreže Mostar-Jug. Pri integraciji 5 % punjača u odnosu na ukupni broj potrošača na distribucijskom transformatoru, zabilježen je porast gubitaka u mreži. Povećanjem udjela punjača na 15 %, gubici se dodatno povećavaju, što rezultira preopterećenjem transformatora. Implementacijom upravljanja opterećenjem, pri čemu 50 % potrošača na preopterećenim transformatorima sudjeluje u odgovorima na potražnju, zabilježen je značajan pad gubitaka, a uvjeti opterećenja optimizirani.

Ključne riječi: električna vozila, distribucijska mreža, fleksibilnost, punjači, gubici

OPTIMIZATION STRATEGY OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING TO REDUCE PEAK LOADS

SUMMARY

The paper explores the potential of smart charging of electric vehicles, combined with the implementation of a charging time optimization strategy, as a means to reduce peak loads on distribution transformers, improve the overall efficiency of the power system, and achieve financial savings for end-users. The analysis of the integration of home electric vehicle chargers was conducted using the DIgSILENT PowerFactory software tool, employing quasi-dynamic simulations. The simulations cover the period of highest load on the Mostar-South distribution network segment. When 5% of chargers were integrated relative to the total number of consumers on the distribution transformer, an increase in network losses was observed. Increasing the share of chargers to 15% further amplified the losses, resulting in transformer overload. By implementing load management, with 50% of consumers on overloaded transformers participating in demand response, a significant reduction in losses was recorded, and load conditions were optimized.

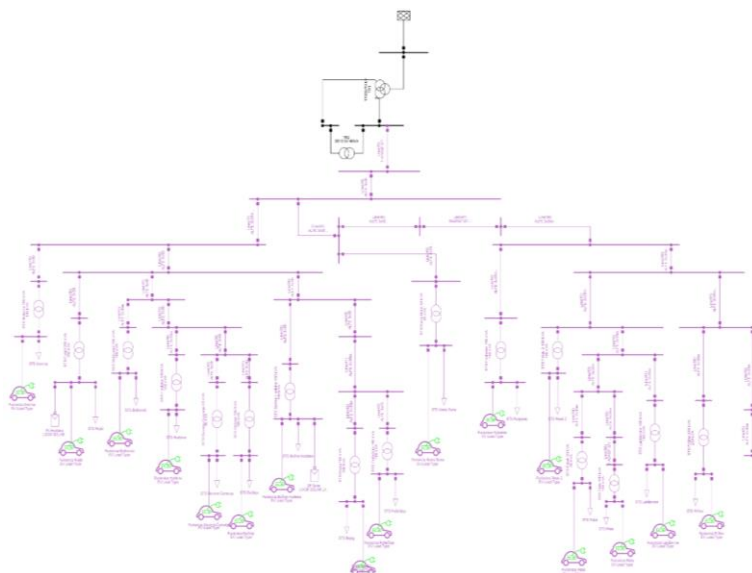
Key words: electric vehicles, distribution network, flexibility, charger, losses

1. UVOD

Tehnološki napredak kontinuirano poboljšava izvedbu i dostupnost električnih vozila (EV) koji postaju sve važniji sudionici u sustavu fleksibilnosti energetske mreže. EV ne samo da nude ekološki prihvatljivu alternativu vozilima s unutarnjim izgaranjem, već predstavljaju i mobilne baterijske sustave kojima se može upravljati kako bi se optimizirala potrošnja energije i uravnotežila ponuda i potražnja u elektroenergetskom sustavu. Fleksibilnost postaje ključna s obzirom na rastući udio obnovljivih izvora energije koji su podložni varijacijama u proizvodnji. Uvođenje EV u sustav fleksibilnosti otvara niz izazova i mogućnosti. Uključuje pitanja vezana uz infrastrukturu punjenja, upravljanje baterijama vozila, tehnološke standarde i protokole komunikacije, kao i regulatorne politike. Istovremeno, pruža mogućnosti za inovativna rješenja koja optimiziraju korištenje obnovljivih izvora energije, smanjuju troškove i poboljšavaju stabilnost energetske mreže [1]. U ovom radu će se istražiti uloga EV kao sudionika u sustavu fleksibilnosti, analizirati izazovi i mogućnosti koje oni donose te razmotriti smjerovi razvoja koji bi mogli oblikovati budućnost održive mobilnosti i energetike. U pametnim mrežama (eng. Smart Grids), EV mogu komunicirati s mrežom kako bi optimizirala punjenje i ispuštanje energije. Ova integracija omogućuje dinamičko prilagođavanje potrošnje električne energije u skladu s promjenama u ponudi i potražnji na mreži. Razvoj infrastrukture i regulative igra ključnu ulogu u poticanju integracije EV u sustav fleksibilnosti. Potrebni su poticaji i politike koje potiču uporabu EV, kao i jasna pravila za pristup mreži i korištenje V2G (eng. Vehicle to Grid – vozilo na mrežu) tehnologije. U cjelini, EV predstavljaju značajan resurs u transformaciji energetske sustava prema održljivoj budućnosti.

2. METODOLOGIJA

U programskom paketu DigSILENT PowerFactory (DPF) modeliran je dio srednjenaponske mreže Mostar jug, tj. Dalekovod – DV 10 kV Hodbina koji se napaja iz TS Mostar 9 (Buna), s TR1 110/35/10 kV. Dodijeljeni su nazivi elementima mreže uneseni svi podaci za svaki pojedini element (vod, sabirnicu, transformator, potrošnju, fotonaponsku elektranu, punionicu EV), kao što je prikazano na Slici 1. Punionice za EV dodane su na mrežu u element „General Load“ te je korišten simbol za punionicu. Također su na predmetnu mrežu spojene dvije fotonaponske elektrane instalirane snage svaka po 15 kW. Najčešći tip izvedbe vodiča na promatranom dijelu distribucijske mreže je AIFe 3x50 mm².



Slika 1. Prikaz modelirane elektroenergetske distribucijske mreže

2.1. Modeliranje fotonaponske elektrane

Za modeliranje fotonaponskih elektrana koje se nalaze u dijelu mreže odabran je model „Solar Calculation“ koji ima dodatne opcije za modeliranje i daje precizne podatke o proizvodnji elektrane. Prilikom otvaranja kartice prikazuje se mogućnost unosa općih podataka o modeliranom fotonaponskom sustavu. Kod modela „Solar Calculation“ za definiranje izlazne snage elektrane važno je odrediti broj

fotonaponskih modula po izmjenjivaču, snagu elektrane, geografske koordinate, vremensku zonu, kut nagiba i slično [2]. Nudi se i mogućnost definiranja fotonaponskih modula, gdje su unesene tehničke karakteristike poput proizvođača modula, tip fotonaponskog modula, snaga modula, nominalni napon i struja i sl.

2.2. Modeliranje punionica električnih vozila

DPF omogućava kreiranje modela opterećenja i kvazi-dinamičkih modela definiranih od strane korisnika kako bi se dobilo prilagodljivo ponašanje opreme u elektroenergetskom sustavu. Za simulaciju ponašanja punjenja EV korišten je predložak „*DigSILENT Electric Vehicle*” iz globalne knjižnice, koji je klase „*TypQdsI*”. Ta se simulacija izvodi korištenjem „*Quasi-Dynamic Simulation Language*” (QDSL) modela. Prilikom otvaranja modela, prvotno se prikazuje kartica „*Basic Data*” gdje se pruža mogućnost unosa parametara i varijabli vezanih za EV. U kvazi-dinamičkoj simulaciji EV će se početi puniti unutar unaprijed vremenskog okvira (zadanog putem parametara „*EarliestArrival*” i „*LatestArrival*”). U modelu se može podesiti opcija koja opisuje podržava li punionica brzo punjenje ili ne (parametar „*Fastcharging*”), kapacitet baterije u MWh i stanje napunjenosti baterije (parametar „*SOCmax*”). Početak punjenja će biti nasumično izabrano vrijeme unutar zadanog okvira. Da bi se prikazalo različitost prijeđenih kilometara u danu, stanje napunjenosti baterije na početku svakog dana će također biti nasumično odabrano.

Postoji više vrsta punionica EV. Za potrebe simulacija je korištena tipska trofazna punionica snage 11 kW. Prilikom pokretanja kvazi-dinamičke simulacije odabran je karakteristični radni dan u 2023. godini kada je potrošnja dalekovoda bila najveća, a to je 18. srpnja 2023. godine.

Postavke kvazi-dinamičkog modela punionica EV su sljedeće:

- „*Fastcharging*” - opcija brzog punjenja je uključena, te je inicijalna vrijednost postavljenja na 1.
- „*MaxP Power*” – snaga brzog punjenja u jedinici MW je 0,011.
- „*LowP Power*” – snaga sporog punjenja u jedinici MW je 0,0037.
- „*SOCmax*” – krajnje stanje napunjenosti baterije, tj. do koje granice se EV puni je postavljeno na 80 %.
- „*Eini*” – veličina baterije u jedinici MWh je 0,06.
- „*EarliestArrival*” – najranije vrijeme početka punjenja je podešeno na 17 sati jer je radni dan pa se pretpostavlja da će korisnici puniti vozila nakon dolaska s posla.
- „*LatestArrival*” – najkasnije vrijeme početka punjenja podešeno je na 23 sata.

U praktičnom dijelu rada obrađena su 4 scenarija:

- Prvi scenarij: početno stanje kada nema kućnih punionica na promatranoj mreži.
- Drugi scenarij: priključenje punionica na mrežu – 5 % od ukupnog broja potrošača po pojedinom transformatoru, koji pune svoja vozila u periodu od 17 do 23 sata.
- Treći scenarij: priključenje punionica na mrežu – 15 % od ukupnog broja potrošača po pojedinom transformatoru, koji pune svoja vozila u periodu od 17 do 23 sata.
- Četvrti scenarij: priključenje punionica na mrežu – 15 % od ukupnog broja potrošača po pojedinom transformatoru; 50 % potrošača na preopterećenim transformatorima sudjeluje u odzivu potrošnje, tj. odgađaju punjenje za period od 1 do 2 sata ujutro idući dan zbog preopterećenja u mreži.

Tablica I. prikazuje ukupan broj potrošača te broj punionica EV za pojedini scenarij.

Tablica I. Pregled broja potrošača i broja punionica EV za pojedini scenarij

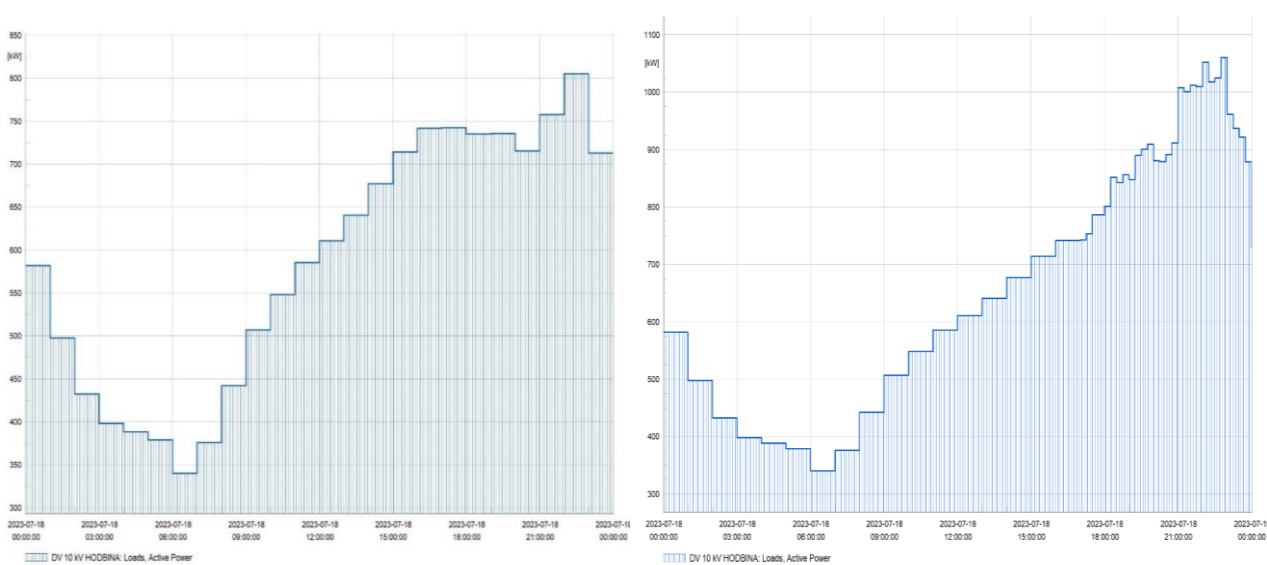
Naziv transformatora	Ukupan broj potrošača	Broj punionica na TS (scenarij 2)	Broj punionica na TS (scenarij 3 i scenarij 4)
STS Boškovići	43	2	6
STS Bočine Hodbina	91	5	14
STS Brijeg	24	1	4
STS Govorci Čumurija	11	1	2
STS Hodbina	50	3	8
STS Kamp Buna	3	1	1

STS Lakiševine	73	4	11
STS Mokrice	48	2	7
STS Petak 2	16	1	2
STS Petak	26	1	4
STS Pista	7	1	1
STS Podpetak	72	4	11
STS Pođečinje	49	2	7
STS Pržine	113	6	17
STS Puljići	148	7	22
STS Đečinje	38	2	6

3. REZULTATI SIMULACIJA

3.1. Rezultati za prvi i drugi scenarij

Cilj je analizirati opće stanje mreže, pogotovo na mjestima planiranim za instalaciju punionica EV. Podaci o potrošnji dobiveni su iz sustava automatskog očitavanja brojila u vlasništvu Operatora distribucijskog sustava (ODS). Ukupna potrošnja za dan 18. srpnja 2023. godine iznosi 14,06 MW. Na slici 2.a prikazano je opterećenje dalekovoda za prvi scenarij, odnosno za početno stanje mreže, a na slici 2.b prikazano je opterećenje dalekovoda za drugi scenarij nakon priključenja punionica EV.



Slika 2.a Opterećenje dalekovoda za prvi scenarij

Slika 2.b Opterećenje dalekovoda za drugi scenarij

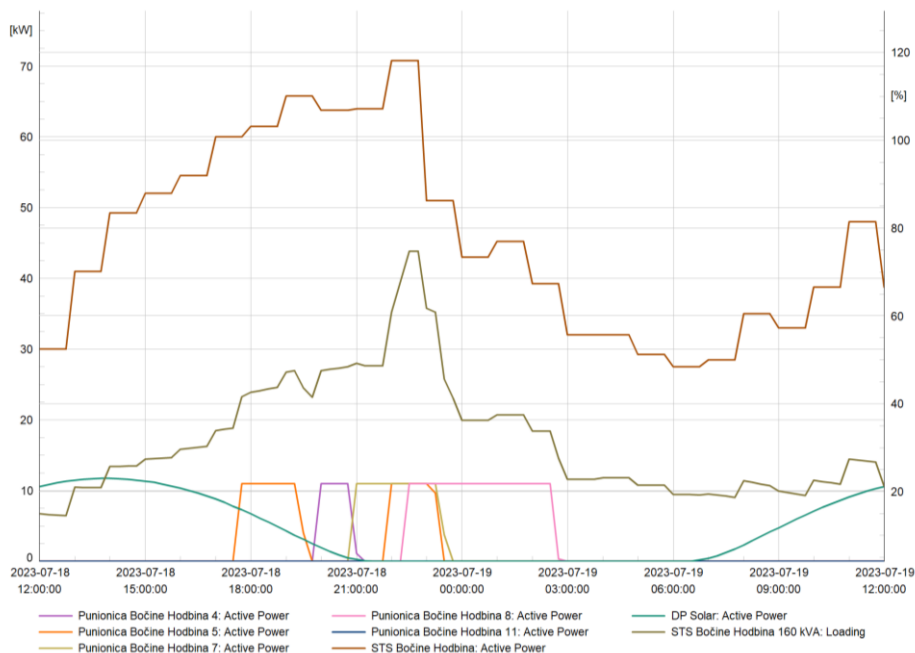
Kvazi-dinamičkom simulacijom dobiveni su podaci o gubicima u mreži, naponskim prilikama i opterećenjima transformatora. Najveći gubici u mreži u prvom scenariju za promatrani dan iznose 12 kW dok prosječno iznose 6,8 kW. Najopterećeniji transformator predmetnog dijela mreže je STS Podpetak 160 kVA s maksimalnim opterećenjem od 80,5 %.

U drugom scenariju vrši se analiza stanja u mreži nakon priključenja punionica na svaku pojedinu trafostanicu. Broj kućnih punionica za punjenje EV na pojedinoj TS je određen brojem mjernih mjesta, tj. brojem potrošača električne energije na toj TS. U ovom scenariju se razmatra opcija pri kojoj 5 % potrošača pojedine TS ima kućnu punionicu. Pretpostavka je da će potrošači svoja EV početi puniti nakon posla iza 17 sata pa do 23 sata. Potrošnja se povećava u periodu od 18 sati sve do 23 sata kada je najveće povećanje od 45 % u odnosu na isto vrijeme početnog stanja. Krivulja potrošnje, u usporedbi s prethodnim slučajem u kojem nema punionica, ima veći skok u periodu od 18 do 23 sata, što je posljedica punjenja EV. Priključenjem punionica povećali su se i maksimalni gubici u mreži s 12 kW na 19,8 kW, što

je povećanje od 65 % u odnosu na početno stanje, dok vrijednost prosječnih gubitaka iznosi 8 kW. Priključenjem punionica za EV, najopterećenijem transformatoru, predmetnog dijela mreže STS Podpetak 160 kVA se povećalo maksimalno opterećenje za 17 % u odnosu na početno stanje.

Dozvoljeno odstupanje napona za 35, 20, 10 kV mrežu se mora održavati u vrijednosti $\pm 10\%$ nazivne vrijednosti, dok je za niskonaponsku mrežu dozvoljeno odstupanje od $+5\%$ do -10% od nazivne vrijednosti prema mrežnim pravilima EP HZHB [3]. Sve vrijednosti napona su unutar dozvoljenih granica.

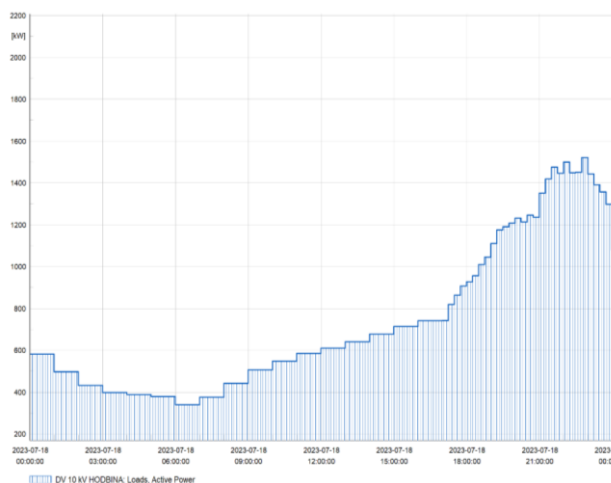
Na Slici 3. je prikazano opterećenje TS Bočine Hodbina s priključenim punionicama za EV. U početnim slučajevima maksimalno opterećenje STS Bočine Hodbina bilo je 47,2 %, a sada iznosi 81,6 %. Razlog tog povećanja opterećenja je brzo punjenje EV koje se odvija u periodu od 17 do 23 sata, te se svako vozilo puni snagom od 11 kW.



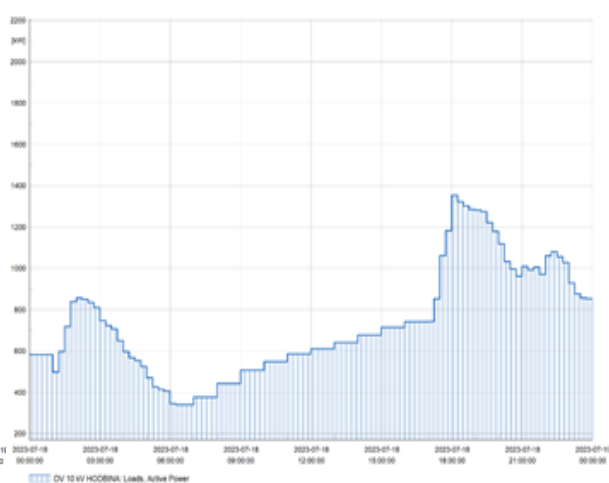
Slika 3. Opterećenje TS Bočine Hodbina za drugi scenarij

3.2. Treći i četvrti scenarij

U trećem scenariju broj kućnih punionica se povećava na 15 % od ukupnog broja potrošača po mjestnom mjestu, te se promatra stanje u mreži nakon priključenja. Na slici 4.a prikazano je opterećenje dalekovoda za treći scenarij, a na slici 4.b prikazano je opterećenje dalekovoda za četvrti scenarij.



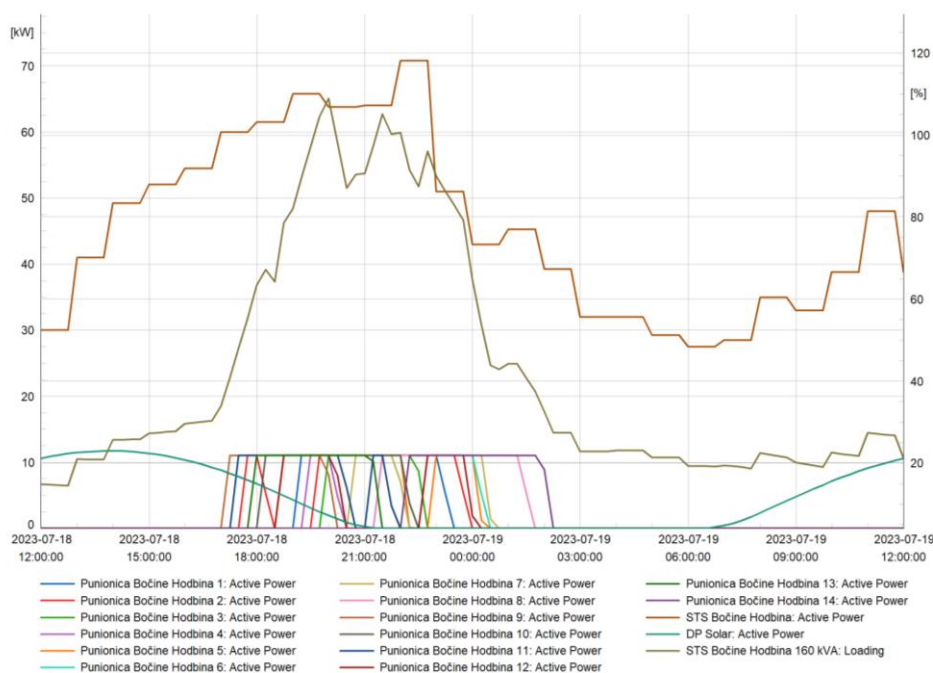
Slika 4.a Opterećenje dalekovoda za treći scenarij



Slika 4.b Opterećenje dalekovoda za četvrti scenarij

U trećem scenariju punjenje potrošači svoja EV počinju puniti u periodu od 17 do 23 sata. Najveći napon na 0,4 kV sabirnici u mreži iznosi 1,006 p.u., a najmanji 0,972 p.u. Prema tome, naponske prilike na 0,4 kV sabirnicama su i dalje u dozvoljenim vrijednostima. Opterećenja transformatora su veća nego u prethodnom scenariju, te na pet transformatora maksimalno opterećenje skoro prelazi 100 %. Kratkotrajna preopterećenja transformatora ne bi trebala napraviti veću štetu, dok dugotrajno preopterećenje može uzrokovati razne probleme kao što su smanjenje efikasnosti, oštećenje izolacije, smanjenje životnog vijeka, stvaranje prenapona u mreži i ubrzano starenje zbog temperature.

Na Slici 5. je prikazano stanje na transformatoru STS Bočine Hodbina s priključenih 14 punionica za EV. Opterećenje transformatora je prikazano od 12 sati, dana 18. srpnja, do 12 sati dana 19. srpnja 2023. godine. U prethodnom slučaju s pet punionica maksimalno opterećenje STS Bočine Hodbina iznosilo je 81,6 %, a sada iznosi 114,1 %. Iz slike je vidljivo da je vršna potrošnja od 22 do 23 sata, a punjenje EV u tom trenutku samo dodatno utječe na nestabilnost sustava. S obzirom na to da potrošnja i opterećenje transformatora opada iza ponoći, pomjeranje punjenja EV bi znatno utjecalo na preopterećenje transformatora i povećanje stabilnosti.



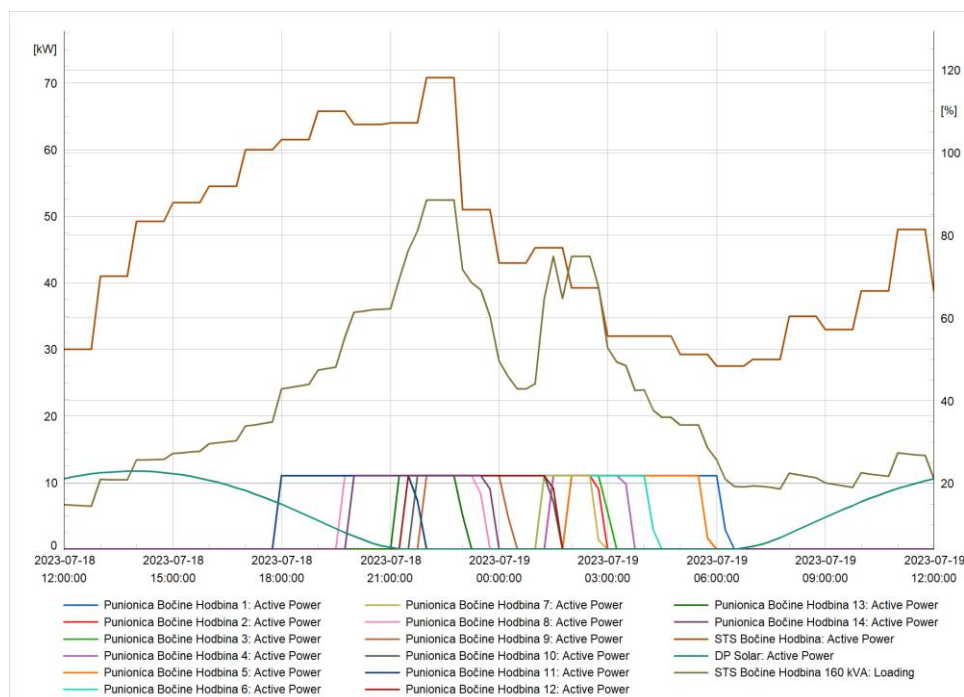
Slika 5. Opterećenje STS Bočine Hodbina za treći scenarij

U četvrtom scenariju broj kućnih punionica ostaje isti, 15 % od ukupnog broja potrošača po mjernom mjestu. Punjenje se odvija tako što će 50 % potrošača koji imaju punionicu, a spojeni su na preopterećene TS, sudjelovati u odzivu potrošnje te pomjeriti vrijeme punjenja svog EV. Upravo to upravljanje potrošnjom doprinosi ravnoteži mreže i smanjenju potrebe za dodatnim kapacitetima i ponovnom dimenzioniranju mreže. S obzirom na to da je nemoguće da svi potrošači sudjeluju u odzivu, uzet je prosjek od 50 % korisnika. U postavkama kvazi-dinamičkog modela EV, pomjerit će se parametri „EarliestArrival“ i „LatestArrival“ s početnih 17 i 23 sata na 1 i 2 sata, što bi značilo da će se vozila puniti idući dan između 1 i 2 sata ujutro, kada se opterećenje transformatora smanjuje.

Maksimalni gubici, raspon i prosjek su se smanjili u odnosu na prethodni scenarij. U prethodnom trećem scenariju kada nije bilo odziva potrošnje na preopterećenim transformatorima, maksimalni gubici su bili 39,2 kW, dok su se sada smanjili na 28,7 kW, što je smanjenje od oko 27 %.

Prema dobivenim podacima pri priključenih 15 % punionica od ukupnog broja potrošača, kada na preopterećenim trafostanicama 50 % potrošača sudjeluje u odzivu potrošnje, vidljivo je da maksimalno opterećenje transformatora opada. Tako se maksimalno opterećenje na STS Bočine Hodbina smanjilo za 25,5 %. Smanjenje maksimalnog opterećenja je prisutno i u STS Lakiševine gdje iznosi 23,3 %, STS Podpetak gdje iznosi 31,8 %, STS Pržine gdje iznosi 34,1 % te na STS Puljići gdje se opterećenje smanjilo za 19,1 %. Niti jedan transformator ne prelazi opterećenje od 100 %. Maksimalna opterećenja su se smanjila pomjeranjem potrošnje s vršnih sati, te nema potrebe za dodatnim kapacitetima i ponovnom dimenzioniranjem mreže.

TS Bočine Hodbina u prvom scenariju bila je maksimalno opterećena s 47,2 %, u drugom scenariju 81,6 % te u trećem scenariju 114,1 %. U 4. scenariju maksimalno opterećenje TS iznosi 88,6 %, prikazano na Slici 6. Najveći napon na 0,4 kV sabirnici u mreži iznosi 1,006 p.u., a najmanji 0,977 p.u. Prema tome, naponske prilike na 0,4 kV sabirnicama su i dalje u dozvoljenim vrijednostima.



Slika 6. Opterećenje STS Bočine Hodbina za četvrti scenarij

4. ZAKLJUČAK

Elektroenergetska mreža zadovoljava potrebe u isporuci električne energije, no nagli porast EV mogao bi to promijeniti. Porast vozila povećava potrebu za punionicama, što može opteretiti elektroenergetski sustav i distribucijsku mrežu. U radu je obavljena analiza priključenja kućnih punionica za EV, na dijelu mreže Mostar-Jug, te je provedena kvazi-dinamička simulacija u za radni dan u prošloj godini kada je bila najveća potrošnja dalekovoda, 18. srpnja 2023. godine. U programskim paketu DIgSILENT PowerFactory odrađene su simulacije za više scenarija za predmetni dio mreže te kako spajanje određenog broja punionica utječe na mrežu. Priključenjem 5 % punionica EV od ukupnog broja potrošača na TS povećavaju se gubici, raste potrošnja zbog punjenja EV, ali maksimalno opterećenje transformatora ne prelazi 100 %. Priključenjem 15 % punionica za EV od ukupnog broja potrošača na TS povećavaju se gubici, raste potrošnja zbog punjenja, te je 5 transformatora na promatranom dijelu mreže preopterećeno. S dodanim upravljanjem punjenja, pri kojem 50 % potrošača sudjeluje u odzivu potrošnje na preopterećenim TS u posljednjem slučaju, smanjuju se gubici u mreži u odnosu na prethodni scenarij s 15 % punionica za EV od ukupnog broja potrošača po TS, naponi na NN mreži su u dozvoljenim granicama, a na preopterećenim transformatorima se smanjilo maksimalno opterećenje za:

- STS Bočine Hodbina – 25,5 %
- STS Lakiševine – 23,4%
- STS Podpetak – 31,8 %
- STS Pržine – 34,1 %
- STS Puljići – 19,1 %.

Odziv potrošnje punjenja EV poboljšava stabilnost mreže, smanjuju troškove električne energije, omogućuju veću integraciju obnovljivih izvora, smanjuju emisije stakleničkih plinova te pružaju financijske uštede za vlasnike EV. Do sada proizvodnja uvijek prilagođavala potrošnji, a sada se više očekuje prilagodba potrošača. Time se osigurava pouzdana opskrba energijom i mogu se odgoditi dodatna ulaganja u sustav. Analize provedene u okviru istraživanja pokazale su da pametno punjenje, koje uključuje strategije poput optimizacije vremena punjenja i ravnotežnog rasporeda opterećenja, može učinkovito smanjiti vršna opterećenja na transformatorima. Tako se, uz pravilno implementirane

tehnologije i upravljačke sustave, može postići bolja stabilnost i fleksibilnost elektroenergetskog sustava, smanjiti rizik od preopterećenja i poboljšati ukupna učinkovitost distribucijskog sustava.

5. LITERATURA

- [1] Amin, A.; Khan Taren, W.U.; Usman, M.: „A Review of Optimal Charging Strategy for Electric Vehicles under Dynamic Pricing Schemes in the Distribution Charging Network“, Sustainability, 2020.
- [2] DlgSILENT PowerFactory User Manual, 2022.
- [3] Mrežna pravila distribucije, Operatora distributivnog sistema JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar, 2017.