

ULOGA I ZNAČAJ ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA U PAMETNIM MREŽAMA**THE ROLE AND IMPORTANCE OF ELECTRIC VEHICLES IN SMART GRIDS**

Maja Mišković, Boris Dumnić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Rad analizira ulogu električnih vozila u konceptu pametnih elektroenergetskih mreža i njihovu povezanost sa obnovljivim izvorima energije. U MATLAB/Simulink okruženju modelovana je IEEE 13-čvorna test mreža sa integrisanom solarnom elektranom i baterijskim skladištem energije. Cilj je prikaz uticaja ovih sistema na stabilnost i efikasnost distributivne mreže, kao i procena potencijala električnih vozila kao aktivnih elemenata u budućim pametnim mrežama.

Ključne reči: pametne mreže, električna vozila, obnovljivi izvori energije, solarna elektrana, baterijsko skladište energije, IEEE 13 test mreža, MATLAB/Simulink

Abstract – This paper analyzes the role of electric vehicles within the concept of smart power grids and their interaction with renewable energy sources. In the MATLAB/Simulink environment, the IEEE 13-bus test network was modeled with an integrated solar power plant and battery energy storage system. The aim is to evaluate the impact of these components on the stability and efficiency of the distribution network, as well as to assess the potential of electric vehicles as active elements in future smart grids.

Keywords: smart grids, electric vehicles, renewable energy sources, solar power plant, battery energy storage system, IEEE 13 test network, MATLAB/Simulink

1. UVOD

Tokom poslednjih decenija, energetska sektor suočava se sa izazovima održivosti i potrebom za smanjenjem emisije štetnih gasova, dok se tradicionalni energetski sistem, zasnovan na fosilnim gorivima sve više dovodi u pitanje zbog negativnog uticaja na životnu sredinu i klimatske promene. Smanjenje ovih uticaja moguće je kroz energetska tranziciju i postepeno uvođenje obnovljivih izvora energije, koji doprinose dekarbonizaciji i očuvanju životne sredine. U okviru procesa energetske tranzicije, posebno mesto zauzima razvoj električnih vozila i njihova integracija u koncept pametnih mreža. Električna vozila predstavljaju jedan od ključnih elemenata modernog energetskog sistema, jer ne deluju samo kao potrošači, već i kao aktivni učesnici u stabilizaciji i optimizaciji rada elektroenergetskog mreže. Cilj ovog rada jeste da se istraži uloga i značaj električnih automobila u kontekstu pametnih mreža, sa posebnim

osvrtnom na njihov uticaj na stabilnost i fleksibilnost sistema, balansiranje potrošnje i mogućnost integracije u savremene energetske koncepte.

Struktura rada organizovana je na sledeći način.

- U prvom poglavlju data su uvodna razmatranja o značaju upotrebe obnovljivih izvora energije. Poseban akcenat stavljen je na ulogu električnih vozila u okviru pametnih mreža, njihov doprinos fleksibilnosti, stabilnosti i balansiranju energetskog sistema.
- U drugom poglavlju razmatra se razvoj elektroenergetskih sistema od tradicionalnog koncepta ka savremenom, koji uključuje decentralizovane izvore energije i napredne tehnologije upravljanja.
- Treće poglavlje se odnosi na pouzdanost i sigurnost kao ključne parametre elektroenergetskog sistema.
- Četvrto poglavlje posvećeno je električnoj mobilnosti. Tipovi električnih vozila, infrastruktura za punjenje, pregled novih tehnologija, detaljno su obrađeni u ovom poglavlju.
- U petom poglavlju izvršena je simulaciona analiza IEEE 13 test mreže u koju su integrisani fotonaponska elektrana kao obnovljivi izvor energije i baterijski sistem skladištenja energije.
- Završno, šesto poglavlje, ističe najvažnije zaključke dobijene analizom. Posebno se naglašava značaj električnih vozila i pametnih mreža za moderni elektroenergetski sistem, kao i njihov potencijal za dalji razvoj i primenu u okviru održive energetske tranzicije.

2. PAMETNE MREŽE

Osnovni zadatak elektroenergetskog sistema jeste da obezbedi sigurnu, kvalitetnu i ekonomičnu isporuku električne energije. Međutim, tradicionalni elektroenergetski sistem sve više se suočava sa ekološkim, finansijskim i tehničkim izazovima, što uslovljava potrebu za njegovom modernizacijom. Kao odgovor na ove izazove, javlja se koncept pametne električne mreže, čiji je cilj unapređenje pouzdanosti, energetske efikasnosti i kvaliteta napajanja električnom energijom [1].

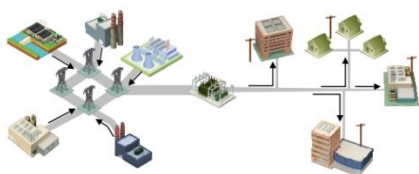
2.1. TRADICIONALNI ELEKTROENERGETSKI SISTEM

Na slici 2.1.1. prikazan je tradicionalni model proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije. U ovom modelu energija se proizvodi u velikim

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Boris Dumnić, red. prof.

centralizovnim elektroenergetskim postrojenjima, zatim se prenosi putem mreže visokog napona do lokalnih distributivnih sistema, koji obezbeđuju snabdevanje domaćinstva, industrijskih i poslovnih objekata [2].



Slika 2.1.1. Infrastruktura tradicionalnog elektroenergetskog sistema [2]

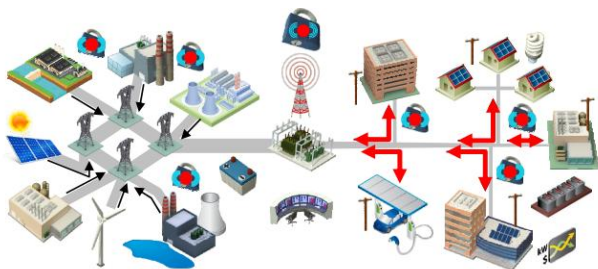
2.1.1. POJAVA DECENTRALIZOVANIH IZVORA ENERGIJE

Pojava decentralizovanih izvora energije, kao što su solarne elektrane, vetroelektrane i biogasna postrojenja, značajno menja tradicionalnu strukturu elektroenergetskog sistema. Potrošači postaju i proizvođači energije, što omogućava dvosmerni tok električne energije i veću energetska nezavisnost. Ovakva transformacija zahteva primenu naprednih tehnologija za upravljanje, merenje i kontrolu, čime se postavljaju temelji za razvoj pametnih električnih mreža.

2.2. PAMETNA MREŽA KAO OSNOVA MODERNE ELEKTROENERGETIKE

Pametne mreže obuhvataju niz tehnologija koje omogućavaju efikasniju integraciju obnovljivih izvora energije u postojeći elektroenergetski sistem. Pored toga, uvode savremene tehnološke inovacije koje omogućavaju da tradicionalna mreža funkcioniše na napredniji, stabilniji i precizniji način u odnosu na dosadašnji pristup [3].

Infrastruktura pametne mreže sa svojim osnovnim funkcijama predstavljena je na slici 2.2.1. Karakteriše je dvosmerni protok električne energije, dvosmerna komunikacija u realnom vremenu, uređaji za skladištenje električne energije, kao i pametni meri uređaji.



Slika 2.2.1. Infrastruktura pametne mreže [2]

Nesumnjivo je da pametna mreža i dalje zavisi od velikih termo, hidro, kao i nuklearnih elektrana, ali za razliku od infrastrukture tradicionalnog elektroenergetskog sistema uključuje značajan broj uređaja za skladištenje električne energije, implementaciju obnovljivih izvora energije, veću primenu električnih automobila, kao i veću funkcionalnost čitavog elektroenergetskog sistema [4].

Pogodnosti koje se postižu integracijom pametnih mreža su brojne. Samo neke od njih navedene su u nastavku:

- efikasan prenos i distribucija električne energije, kao i trenutno prikupljanje podataka sa mreže,
- trenutno detektovanje kvarova na mreži, te brže uspostavljanje ponovnog snabdevanja potrošača električnom energijom,
- smanjenje troškova pri prenosu i distribuciji električne energije, što direktno dovodi do smanjenja troškova potrošača,
- integracija obnovljivih izvora energije,
- upotreba hibridnih i električnih automobila,
- kao i smanjenje emisije štetnih gasova.

3. POUZDANOST I SIGURNOST KAO KLJUČNI PARAMETRI SAVREMENOG ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Pouzdanost i sigurnost predstavljaju ključne parametre savremenog elektroenergetskog sistema, jer od njih zavisi stabilnost, kontinuitet i kvalitet snabdevanja električnom energijom. **Pouzdanost** podrazumeva sposobnost sistema da obezbedi neprekidno i kvalitetno napajanje u svim uslovima rada, dok **sigurnost** podrazumeva otpornost sistema na poremećaje i njegovu sposobnost da spreči širenje kvarova i očuva stabilnost mreže. Razlika između ova dva pojma posebno dolazi do izražaja u uslovima integracije obnovljivih izvora energije, koji, iako doprinose energetska tranziciji i smanjenju emisije CO₂, unose nove tehničke i operativne izazove u pogledu stabilnosti i upravljanja sistemom.

3.1. ULOGA PAMETNIH MREŽA U POVEĆANJU POUZDANOSTI

Pametne mreže predstavljaju savremeni koncept elektroenergetskog sistema koji povećava njegovu pouzdanost, stabilnost i efikasnost. Zahvaljujući dvosmernoj komunikaciji i automatizaciji, omogućavaju brzo otkrivanje, izolaciju i otklanjanje kvarova, čime se skraćuje vreme prekida napajanja. Integracijom obnovljivih izvora energije i sistema za skladištenje energije postiže se bolje balansiranje između proizvodnje i potrošnje. Primena naprednih informacionih tehnologija i upravljačkih sistema omogućava fleksibilnije i sigurnije funkcionisanje mreže, čime se stvara osnova za dalji razvoj održivog i otpornog elektroenergetskog sistema budućnosti.

4. ELEKTRIČNA VOZILA I INFRASTRUKTURA

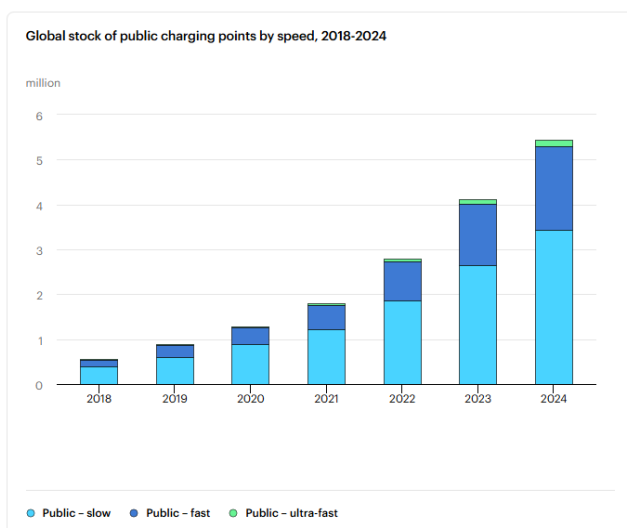
Zahvaljujući mogućnosti da smanje emisiju štetnih gasova kao i zavisnost od fosilnih goriva, električna vozila postaju sve prisutniji i traženiji oblik prevoza, koji je u poslednje vreme privukao veliku pažnju. Umesto upotrebe benzin ili dizel goriva, pokretanje električnih automobila vrši se pomoću električnog motora koji crpi energiju iz punjivih baterija. Predviđa se da će broj korisnika električnih vozila biti i do tri puta veći do 2030. godine u odnosu na 2011. godinu, što se prvenstveno pripisuje visokotehnološkom napretku u razvoju baterija i njihovom pozitivnom uticaju na autonomiju (domet) vozila – koliko daleko i koliko dugo mogu da voze bez potrebe za punjenjem [5].

4.1. TIPOVI ELEKTRIČNIH VOZILA

Električna vozila mogu se podeliti na više tipova u zavisnosti od izvora energije i načina rada [5]. **Baterijska električna vozila (BEV)** - koriste isključivo električnu energiju iz punjivih baterija i ne emituju štetne gasove, ali imaju ograničen domet. **Hibridna vozila (HEV)** - kombinuju električni i benzinski motor, pri čemu se baterija puni tokom vožnje, dok **priključna hibridna vozila (PHEV)** omogućavaju i spoljno punjenje. **Vozila na gorivne ćelije (FCEV)** - koriste vodonik za proizvodnju električne energije i imaju veći domet, ali zahtevaju posebnu infrastrukturu. **Vozila sa produženim dometom (ER-EV)** - kombinuju električni pogon sa malim benzinskim generatorom koji produžava autonomiju. Svaka tehnologija ima svoje prednosti i ograničenja – BEV i FCEV su ekološki najčistija rešenja, dok HEV i PHEV nude veću fleksibilnost i dostupnost u praksi.

4.2. INFRASTRUKTURA ZA PUNJENJE ELEKTRIČNOG VOZILA

Razvoj infrastrukture za punjenje ključan je za ubrzanje tranzicije ka održivom transportu. Sa rastom broja električnih vozila raste i potreba za brzim, pouzdanim i dostupnim sistemima punjenja.



Slika 4.2.1. Globalni porast javnih punjača u period od 2018. Do 2024. godine [6]

Globalni broj javnih punjača porastao je sa manje od milion u 2018. na skoro šest miliona u 2024. godini. Najviše su zastupljeni spori punjači, ali se od 2020. beleži nagli rast brzih i ultra-brzih sistema, što ukazuje na prelazak ka efikasnijoj i fleksibilnijoj infrastrukturi punjenja [6].

4.3. BUDUĆNOST ELEKTRIČNIH VOZILA

Električna mobilnost postaje novi standard savremenog transporta. Iako se baterija vozila često smatra ograničenjem, savremene tehnologije pretvaraju je u aktivan deo elektroenergetskog sistema. Zahvaljujući pametnim funkcijama kao što su *Vehicle-to-Grid (V2G)* i *Vehicle-to-Home (V2H)*, električna vozila mogu da služe ne samo kao potrošači već i kao izvori i skladišta energije.

V2G omogućava dvosmerno povezivanje vozila i mreže, pri čemu se energija može vraćati nazad u mrežu tokom perioda visoke potrošnje, čime se doprinosi stabilizaciji sistema i integraciji obnovljivih izvora energije. Korisnici mogu ostvariti finansijske benefite kroz nadoknadu za isporučenu energiju, dok mreža dobija fleksibilniji i otporniji sistem [7].

Sličan princip ima i V2H, gde se energija iz baterije koristi za napajanje domaćinstva, posebno u periodima visoke potrošnje ili prekida u snabdevanju. Ova tehnologija omogućava uštedu energije i veću energetske nezavisnost.

Iako su V2G i V2H sistemi još u fazi razvoja, interesovanje globalno raste - trenutno postoji više od 100 pilot-projekata širom sveta, što jasno ukazuje na njihov potencijal u budućim pametnim mrežama [7].

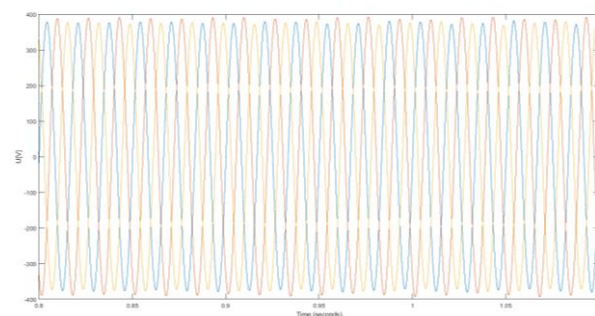
5. SIMULACIONA ANALIZA IEEE 13 TEST MREŽE SA INTEGRISANIM OBNOVLJIVIM IZVOROM I BATERIJSKIM SKLADIŠTEM

Simulaciona analiza predstavlja ključni korak u proceni performansi i stabilnosti sistema pre njegove praktične implementacije. U ovom radu, simulacija je izvršena u MATLAB/Simulink okruženju, koje omogućava integraciju različitih energetske komponenti i njihovo ponašanje u realnim uslovima rada.

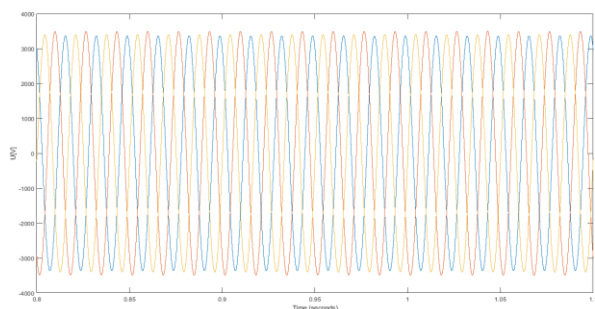
Kao referenti model korišćena je IEEE 13-bus test mreža koja predstavlja standardnu distributivnu mrežu pogodnu za analizu naponskih profila i uticaja integracije novih energetske izvora. U okviru ove mreže izvršena je integracija fotonaponskog (PV) sistema i baterijskog sistema skladištenja energije radi simulacije rada pametne distributivne mreže sa mogućnošću lokalne proizvodnje i upravljanja energijom.

U analizi je poseban naglasak stavljen na uticaj baterijskog skladišta i solarne elektrane na naponske profile, kako u uslovima normalnog rada mreže, tako i tokom pojave kratkog spoja u čvoru 671. Na taj način ispituje se ponašanje napona u čvoru u kojem su priključeni fotonaponski sistem i baterijsko skladište, kao i njihova zajednička sposobnost da ublaže poremećaje izazvane kvarom u drugom delu mreže.

U režimu normalnog rada, integracija decentralizovanih izvora u čvoru 634 pozitivno utiče na lokalne naponske profile i doprinosi stabilnosti sistema.

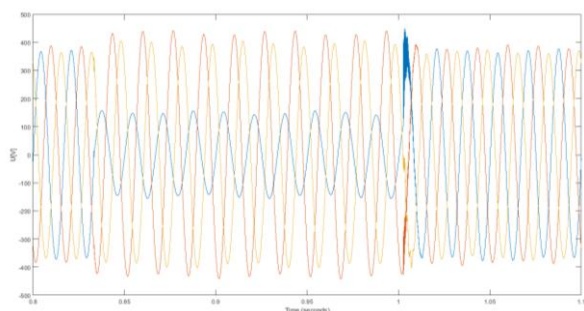


Slika 5.1. Napon u čvoru 634

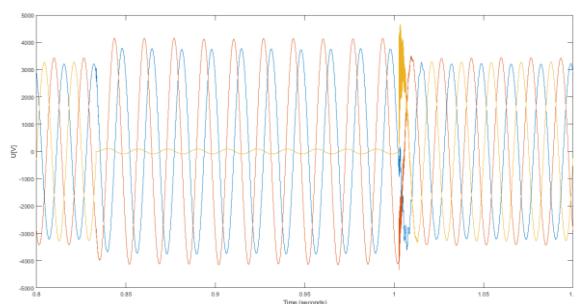


Slika 5.2. Napon u čvoru 671

Da bi se ispitaio uticaj kvarova na naponske profile, u simulaciju je uveden jednofazni kratki spoj u čvoru 671, faza A, pri čemu je praćen napon u čvorovima 671 i 634, gde su priključeni fotonaponski sistem i baterijsko skladište. Tokom kvara u fazi A dolazi do privremenog pada napona, dok prisustvo decentralizovanih izvora omogućava delimično održavanje napona i ublažavanje oscilacija. Nakon prestanka kvara, napon se stabilizuje i vraća na nominalne vrednosti, što potvrđuje ulogu baterijskog skladišta i fotonaponskog sistema u poboljšanju stabilnosti i kvaliteta napajanja.



Slika 5.3. Napon u čvoru 634



Slika 5.4. Napon u čvoru 671

Da bi se prikazala uloga decentralizovanih izvora, simuliran je jednofazni kratki spoj u čvoru 671, faza A, bez priključenog fotonaponskog sistema i baterijskog skladišta, pri čemu je zabeležen izraženiji pad napona i duže trajanje tranzijentnih oscilacija. Prisutvo PV sistema i baterije značajno ublažava pad napona i skraćuje vreme oporavka mreže, poboljšavajući stabilnost i pouzdanost distributivnog sistema. Poređenjem oba scenarija jasno se vidi ključna uloga lokalnih izvora u održavanju naponske stabilnosti tokom kvarova, dok detaljno praćenje struja

dodatno osvetljava njihovu dinamiku u trenutku kratkog spoja.

Tokom jednofaznog kratkog spoja u čvoru 671, bez prisustva decentralizovanih izvora, struja kratkog spoja u fazi A brzo dostiže vršnu vrednost, a zatim se stabilizuje na uobičajenom nivou mreže. Prisustvo DER-a (PV sistema i baterijskog skladišta) u čvoru 634 rezultira nešto višim vršnim vrednostima struje kratkog spoja, dok istovremeno doprinosi stabilizaciji napona i ublažava pad u mestu kvara. Ovi rezultati ističu ključnu ulogu decentralizovanih izvora u kontroli kratkospojnih struja i unapređenju stabilnosti distributivne mreže.

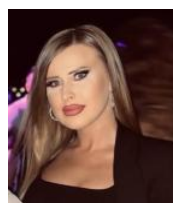
6. ZAKLJUČAK

Savremene elektroenergetske mreže sve više integrišu decentralizovane izvore i baterijska skladišta, pri čemu električni automobili kroz V2G koncept mogu doprineti stabilnosti napona i ublažavanju kratkospojnih struja. Simulacije u MATLAB/Simulinku pokazuju da prisustvo PV sistema i baterija smanjuje vršne vrednosti kratkospojnih tokova i ubrzava povratak napona u ustaljeno stanje, čak i kod manjih lokalnih skladišta. Pored tehničkih benefita, električni automobili unapređuju energetska efikasnost i fleksibilnost mreže, čineći je stabilnijom, održivijom i spremnijom za integraciju obnovljivih izvora.

7. LITERATURA

- [1] Isidora Savić, "Realizacija pametnih mreža i distribuirani generatori", Zbornik radova, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
- [2] G. Horst, M. McGranaghan, P. Myrda, "Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid – A Preliminary Estimate of the Investment"
- [3] D. Brajović, A. Rašić, "Implementacija novih tehnologija pametnih mreža sa automatizacijom u postojeće mreže elektrodistribucije Jagodina i uticaj na kvalitet isporuke električne energije na delu područja PJ Svilajnac"
- [4] Zorica Delić, "Pametna mreža – automatizacija i integracija novih tehnologija", Elektrotehnički fakultet
- [5] Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation
- [6] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging>
- [7] <https://blog.evbox.com/v2g-v2h-difference>

Kratka biografija:



Maja Mišković rođena je u Sremskoj Mitrovici 2000. god. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka 2024. god. Iste godine upisuje master studije, smer– Distribuirani energetska resursi i pametne mreže.



Prof. Dr Boris Dumnić rođen je 1976. god. Redovni je profesor, dekan i šef katedre za Energetska elektronika i pretvarače.