

UPOTREBA ELEKTRIČNIH VOZILA U REGULACIJI FREKVENCIJE

ELECTRIC VEHICLES CONTRIBUTION FOR FREQUENCY CONTROL

Jelena STOJKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu, Srbija
Predrag STEFANOV, Elektrotehnički fakultet - Univerzitet u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Trend dekarbonizacije energetskog sektora stavio je obnovljive izvore u prvi plan u pogledu proizvodnje električne energije. Međutim, njihova intermitentna i stohastička priroda unela je dodatnu složenost pri balansiranju proizvodnje i potrošnje u sistemu. Kao indikator uravnoteženosti ove dve veličine, frekvencija predstavlja bitan pokazatelj stanja u sistemu i potrebno je da se održava unutar definisanih granica. Integracija obnovljivih izvora energije zahteva povećanje regulacione rezerve koje su tradicionalno pružale konvencionalne proizvodne jedinice što dodatno povećava eksploatacione troškove. S druge strane, klimatske promene i zahtevi za smanjenjem emisije CO₂ su popularizovali električna vozila koja postaju sve više zastupljena u transportu. Treba naglasiti da upotreba električnih automobila jedino ima smisla kada se za njihovo punjenje koristi električna energija dobijena iz obnovljivih izvora. Zbog toga, integracija obnovljivih izvora predstavlja bitan preduslov za korišćenje električnih vozila. S druge strane, baterije električnih vozila mogu da se iskoriste kao važan resurs u energetskom sistemu i mogu da pruže dodatne usluge u pogledu regulacije frekvencije. Sposobnost da kontrolisano preuzimaju, odnosno vraćaju energiju u mrežu i da to rade jako brzo im daje mogućnost da učestvuju u primarnoj regulaciji frekvencije i da na taj način olakšaju dalju integraciju obnovljivih izvora energije. U ovom radu će biti opisana upravljačka strategija kojom električna vozila učestvuju u regulaciji frekvencije bez uticaja na komfor korisnika. Algoritam će biti verifikovan kroz komparativnu analizu kada električna vozila učestvuju i ne učestvuju u regulaciji frekvencije za karakterističan scenario.

Ključne reči: regulacija frekvencije, električna vozila, inteligentne mreže, obnovljivi izvori energije

ABSTRACT

The decarbonization trend of the energy sector has put renewables at the forefront in terms of electricity generation. However, their intermittent and stochastic nature added additional complexity in balancing generation and demand in the system. As an indicator of the balance of these two quantities, frequency is an important system marker and its value must be maintained within defined limits. The integration of renewable energy sources requires an increase in the regulatory reserves traditionally provided by conventional generation units, which further increases operating costs. On the other hand, climate change and demand to cutback CO₂ emission have popularized electric vehicles. It should be emphasized that the use of electric cars only makes sense when they are using electricity from renewable sources for charging. Therefore, the integration of renewables is an essential prerequisite for using electric vehicles. Electric vehicle batteries, on the other hand, can be used as an important resource in the energy system and can provide additional services in terms of frequency control. The ability to take and return energy to the grid in a controlled manner and the fact that they can do it fast gives them the opportunity to participate in primary frequency control and thus facilitate the further integration of renewable energy. This paper will describe the control strategy by which electric vehicles participate in frequency control without affecting user comfort. The algorithm will be verified through comparative analysis when electric vehicles participate and do not participate in frequency control for a characteristic scenario.

Key words: frequency control, electric vehicles, smart grid, renewable energy

UVOD

Klimatske promene, ubrzane povećanom emisijom ugljen dioksida, su navele države sveta da donesu regulative i nacionalne strategije energetskog sektora koje promovišu čistu i zelenu energiju. Obnovljivi izvori energije (OIE) povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike i trend gašenja elektrana na fosilna goriva doprineli su smanjenju ukupne rotacione inercije u elektroenergetskog sistema (EES). Postojanje manje rotacione inercije umanjilo je sposobnost elektroenergetskog sistema da odgovori na poremećaje usled ispada velikih proizvodnih jedinica. Sistemi koji imaju veliku penetraciju OIE i manju inerciju su podložni većim i bržim promenama frekvencije nakon poremećaja [1], [2]. Tradicionalna primarna regulacija nije više dovoljno brza da ograniči odstupanja frekvencije u okviru definisanih granica. Velika brzina promene frekvencije može da dovede do kaskadnih ispada generatora koji vode ka totalnom raspadu sistema. Problemi koji su posledica smanjenja rotacione inercije naročito su izraženi u sistemima koji su potpuno ili parcijalno izolovani od suseda. Operatori prenosnih sistema Velike Britanije [3], Irske [4] i Južne Australije [5] su pokrenuli studije sa ciljem identifikovanja problema i potencijalnih rešenja usled povećanja udela OIE i smanjenja inercije u sistemu. Izazovi sa kojima se ovi sistemi suočavaju postaću još zastupljeniji sa povećanjem udela OIE u proizvodnji električne energije. S druge strane, promenljiva i intermitentna priroda OIE je dodatno doprinela neizvesnosti na strani proizvodnje. U tradicionalnom EESu, promenljivost je bila vezana samo za stranu potrošnje i bila je potrebna manja količina regulacione rezerve koja obezbeđuje ravnotežu proizvodnje i potrošnje.

Frekvencija predstavlja osnovni pokazatelj stanja sistema i indikator balansa između proizvodnje i potrošnje u EESu. Nominalna vrednost frekvencije ukazuje na ravnotežu proizvodnje i potrošnje, a odstupanje od te vrednosti je posledica nejednakosti između aktivne snage generisanje i aktivne snage potrošnje i gubitaka u sistemu. Povećanje proizvodnje u odnosu na potrošnju rezultuje u frekvenciji većoj od nominalne i obrnuto. Održavanje frekvencije u uskom opsegu oko nominalne vrednosti je jedan od zadataka operatora prenosnog sistema. Da bi osigurao normalan rad EESa u slučaju potencijalnog ispada proizvodne jedinice, operator alokira regulacionu rezervu koja je u stanju pripravnosti i mora da odreaguje u slučaju da se poremećaj dogodi. U tradicionalnom EESu regulaciona rezerva je bila alocirana samo na strani proizvodnje gde su proizvodne jedinice povećavanjem/smanjivanjem izlazne snage omogućavale balansiranje proizvodnje i potrošnje. Takav način regulacije nametnuo je ograničenje sinhronim generatorima koji nisu mogli da rade sa maksimalnim kapacitetom. Smanjenjem udela konvencionalnih proizvodnih jedinica, smanjena je i količina resursa koji su mogli da ponude usluge regulacione rezerve. Istovremeno sa povećanjem udela OIE nametnuti su zahtevi za veću količinu regulacione rezerve koja je potrebna u sistemu. U ovakvim okolnostima, operator je bio prinuđen da limitira udeo OIE u proizvodnji ili da upravljive proizvodne kapacitete drži u toplom startu. Ograničenje rezerve na proizvodnoj strani motivisalo je operatora da regulacionu rezervu nađe na strani potrošnje [6].

Trend dekarbonizacije je pored energetskog sektora zastupljen i u transportnom sektoru. Zagađenje u velikim gradovima, naročito izraženo poslednjih godina, masovno je pripisano prevoznim sredstvima koji koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem. Loš kvalitet vazduha s jedne strane, kao i veliki napredak u razvoju tehnologija za baterije, sa druge, doprineli su većoj zastupljenosti električnih vozila (EV). Procena je da će se do 2025. godine nalaziti 400 miliona EV na putevima širom sveta [7]. Treba napomenuti da dekarbonizacija transportnog sektora jedino ima smisla ako se radi u paraleli sa dekarbonizacijom energetskog sektora. Ukoliko EV ne koriste zelenu električnu energiju dobijeni iz OIE, dekarbonizacija transporta je samo zamaskirana jer je emisija CO₂ dislocirana od transportnog ka energetskom sektoru. Upotrebom električnih automobila uspostavila se direktna dvosmerna konekcija između transportnog i energetskog sektora. Da bi se efikasno iskoristio puni potencijal EV kao fleksibilnog energetskog resursa koji je povezan na energetsku mrežu, EV ne samo da mogu da koordinisano preuzimaju energiju iz mreže, već mogu da vraćaju energiju nazad u mrežu kada je to potrebno. Takva sposobnost punjača električnog vozila se naziva Vehicle to Grid (V2G) i vrši se pomoću ugrađenog dvosmernog DC-AC pretvarača [8]. Ova tehnologija omogućava električnim vozila da se ponašaju kao distribuirani energetski resursi (DER) sa potencijalom za pametnu integraciju u mrežu [9], [10]. Uspešna primena V2G tehnologije u domenu regulacije frekvencije sistema je bila predmet istraživanja u mnogim radovima [11], [12]. Frekvencija je jedan od najvažnijih pokazatelja elektroenergetskog sistema i mora se održavati u granicama koje su definisane od strane regulatornih organa. Zbog kratkog vremena odziva EV punjača (reda 10ak milisekundi), EV-a imaju prednost u odnosu na neke druge resurse koji mogu da pruže uslugu regulacije frekvencije [13].

Cilj ovog rada je da analizira mogućnost korišćenja električnih automobila u regulaciji frekvencije. Rad ispituje odziv sistema nakon poremećaja u zavisnosti od stepena penetracije vozila i vremena odziva punjača, odnosno brzine promene snage punjenja. Nakon što je u uvodu opisana motivacija i potreba za ovakvim istraživanjem, u drugom poglavlju je izložena detaljna metodologija i predložena je upravljačka šema. Test sistem sa simuliranim scenarijima je prikazan u trećem poglavlju, dok su u četvrtom predstavljeni rezultati simulacija sa komentarima. Na kraju su u zaključku sumirani glavni doprinosi rada i predložene su ideje za nastavak istraživanja.

METODOLOGIJA

Teorijska pozadina

Regulacija frekvencije je mehanizam kojim se frekvencija drži unutar dozvoljenih granica. Razlikuje se primarna, sekundarna i tercijarna regulacija frekvencije. Primarna regulacija frekvencije predstavlja spontani odgovor regulatora turbina na odstupanje frekvencije. Njen zadatak je da uspostavi balans između proizvodnje i potrošnje, ali nakon toga frekvencija nije jednaka nominalnoj vrednosti. Uspostavljanje nominalne vrednosti frekvencije i ugovoreni snaga razmene je zadatak sekundarne regulacije. Agregati koji učestvuju u sekundarnoj regulaciji dobijaju upravljački signal koji je prosleđen od strane centralnog kontrolnog centra. Tercijarna regulacija oslobađa rezerve za sekundarnu regulaciju i radi ekonomsku preraspodelu između agregata.

Promena frekvencije f nakon poremećaja kao systemske promenljive se može prikazati pomoću diferencijalne jednačine prvog reda:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2HS_b} [-(k_D + k_{prim})f + \Delta P]$$

, gde f_0 odgovara nazivnoj frekvenciji sistema, H predstavlja konstantnu inercije, a S_b snagu generisanja u sistemu. Veličina k_D je recipročna vrednost koeficijenta samoregulacije opterećenja kojim se modeluje osetljivost snage potrošnje na promenu frekvencije. Veličina k_{prim} je recipročna vrednost statizma generatora. Ukupna snaga debalansa ΔP je definisana kao razlika između ukupne snage proizvodnje i ukupnog opterećenja sistema. Iz izraza se zaključuje da brzina promene frekvencije zavisi od veličine poremećaja, ali i od inercije u sistemu. Zbog toga su sistemi koji imaju veliki udeo nesinhronne proizvodnje električne energije više osetljivi na poremećaje.

Prednosti pri korišćenju električnih vozila u regulaciji frekvencije

- 1) Novčana nadoknada i subvencije za vlasnike vozila: Sa ekonomskog aspekta, vlasnici EV mogu ostvariti prihod stavljajući na raspolaganje baterije svojih vozila za pružanje usluge regulacije frekvencije potrebne operatoru prenosnog sistema. Konvencionalni generatori koji se obično koriste za obezbeđivanje ove usluge predstavljaju veliki trošak za operatore zbog ograničenja da ne mogu da rade punim kapacitetom. Pored novčane nadoknade za pružanje usluge, podsticajne mere poput mogućnosti zamene ili produžene garancije na bateriju mogu biti ponuđene vlasnicima EV-a koji efikasno učestvuju u pružanju usluge regulacije frekvencije.
- 2) Povećana pouzdanost i stabilnost: Usluge regulacije frekvencije od strane EV nude veći nivo pouzdanosti i stabilnosti jer se njihova snaga lako i precizno kontroliše. Sa pravilno koordinisanim punjenjem i pražnjenjem njihova agregisana snaga se može koristiti za pružanje usluga regulacije frekvencije.
- 3) Pozitivan uticaj na životnu sredinu i aktivno učešće potrošača u vođenju sistema: Učešće EVa u pružanju usluge regulacije frekvencije pomaže u smanjenju emisije CO₂ usled sagorevanja fosilnih goriva iz konvencionalnih elektrana koje se koriste se za pružanje ove usluge. Društveni uticaj se ogleda u činjenici da električna vozila podstiču ljude da aktivno učestvuju u radu sistema pružanjem dodatnih usluga.

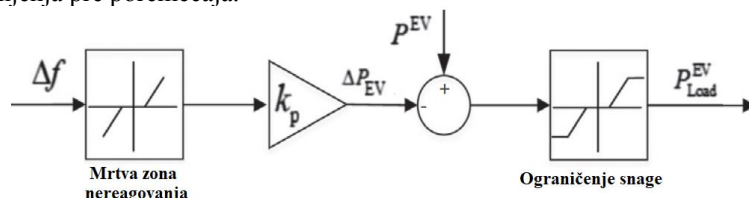
Ograničenja pri korišćenju električnih vozila u regulaciji frekvencije

- 1) Degradacija baterije: Učešće EV-a u regulaciji frekvencije rezultira bržom degradacijom baterije i manjim životnim vekom. Životni vek baterije se obično izražava pomoću broja ciklusa punjenja/pražnjenja koje baterija može obaviti pre nego što joj se formalni kapacitet smanji ispod određenog nivoa. EV-a koji učestvuju u regulaciji frekvencije su izraženije podložni brzom degradaciji baterije zbog toga što punjenje/ pražnjenje njihovih baterija skraćuje ukupni vek baterije. U slučaju regulacije frekvencije degradacija baterije trenutno predstavlja glavni izazov.
- 2) Tehnička ograničenja: Kapacitet napajanja baterija EV je većinom ograničen tehničkim karakteristikama okolnih uređaja, kao što su kablovi, releji kao i hemijskim karakteristikama same baterije. Trenutno stanje napunjenosti baterije je veoma često faktor koji ograničava kapacitet napajanja baterije jer punjenje i pražnjenje baterije nije dozvoljeno kada je ona skoro puna, odnosno prazna i to može potencijalno ometati učešće u procesu regulacije frekvencije.
- 3) Zahtevi za komunikacionom infrastrukturom: Povećanje broja EV-a koji su voljni da učestvuju u regulaciji frekvencije nameće veće izazove za upravljačku i komunikacionu infrastrukturu koja vrši koordinaciju procesa punjenja/pražnjenja i utiče na kvalitet pružanja usluge.
- 4) Ponašanje korisnika: Da bi učestvovao u pružanju usluge regulacije frekvencije, EV komunicira s agregatorom i prenosi informacije o stanju napunjenosti, planiranom vremenu polaska itd. Očekuje se da će se neki vlasnici

EV-a odlučiti da voze svoja vozila pre nego što bude izvršena ugovorena usluga, što utiče na pružanje usluge regulacije. Međutim, agregator mora uzeti u obzir ovaj neočekivani odlazak kada operatoru nudi regulacionu rezervu za uslugu regulacije frekvencije. Pomoću ugovorne obaveze, agregatori mogu sprečiti vlasnike EV-a da koriste vozila tokom određenog perioda definisanog u ugovoru. Ovo može smanjiti motivaciju vlasnika EV-a da učestvuju u usluzi regulacije frekvencije.

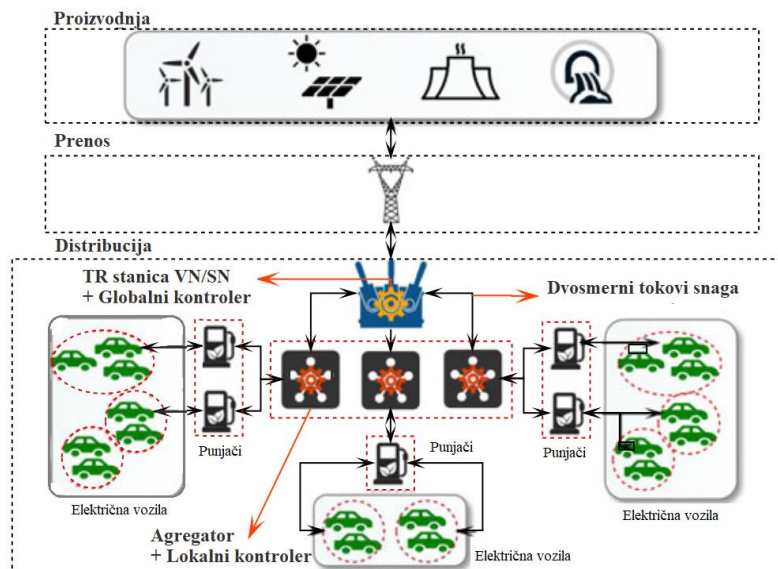
Upravljačka šema

Iako je punjenje pojedinačnog električnog vozila vrlo nepredvidivo, moguće je relativno pouzdano proceniti agregisano opterećenje grupe EV. Punjenje EV uključuje samo hemijske i elektromagnetne procese i zbog toga je moguće brzo promeniti snagu punjenja što predstavlja jako bitnu karakteristiku resursa koji pruža usluge regulacije frekvencije. U literaturi su predložene različite upravljačke strategije kojim se omogućava da električna vozila, tj. stanice za punjenje električnih vozila, učestvuju u regulaciji frekvencije [13]. Upravljačka strategija koja oponaša reakciju regulatora turbine konvencionalnih elektrana može biti primenjena za promenu snage punjenja električnih vozila (ΔP_{EV}) koja je srazmerna promeni frekvencije (Δf). Na slici 1 je prikazan opšti model upravljanja punjačem, odnosno procesom punjenja baterija EV. Odstupanje frekvencije se meri lokalno, a reakcija na odstupanja frekvencije se izvodi autonomno. Postavke za elektronski pretvarač snage se ažuriraju u skladu sa odstupanjem frekvencije. Promena snage punjenja EV-a je proporcionalna stvarnom odstupanju frekvencije sistema (k_p – koeficijent srazmere). Takođe se može uključiti mrtva zona nereagovanja kojim se sprečava često menjanje snage punjenja kako bi se smanjio uticaj na degradiranje i životni vek baterije. Ograničenje snage se odnosi na maksimalnu snagu punjenja/praznjenja baterije, odnosno punjača. P^{EV} predstavlja snagu punjenja pre poremećaja.



SLIKA 1. OPŠTI MODEL UPRAVLJANJA PUNJAČEM EVA U SVRHU PRUŽANJA PRIMARNE REGULACIJE FREKVENCije

Hijerarhija upravljačke strategije za regulaciju frekvencije od strane električnih automobila je prikazana na slici 2. U različitim tačkama distributivnog sistema se nalaze stanice za punjenje koje pružaju uslugu regulacije frekvencije. Takve stanice imaju mogućnost da upravljaju procesom punjenja baterija automobila koji su priključeni na punjač i menjaju snagu srazmerno odstupanju frekvencije od nominalne vrednosti. Agregator, koji obuhvata više stanica za punjenja, se nalazi unutar transformatorske stanice VN/SN koja razgraničava distributivni i prenosni sistem. Sva komunikacija operatora prenosnog sistema sa stanicama za punjenje koje se nalaze unutar distributivnog sistema se odvija preko agregatora. On komunicira sa stanicama za punjenje koje se nalaze u njegovoj nadležnosti i izdaje im naredbe za promenu snage punjenja u zavisnosti od odstupanja frekvencije. Frekvencija se meri lokalno u tački u kojoj se nalazi agregator. Promena snage stanica za punjenje koje su u nadležnosti istog agregata ne moraju da budu identične. Preraspodela učešća pojedinih stanica može da se menja u zavisnosti od broja vozila koji je priključen na stanicu za punjenje, tj. koliko je dostupna regulaciona rezerva.

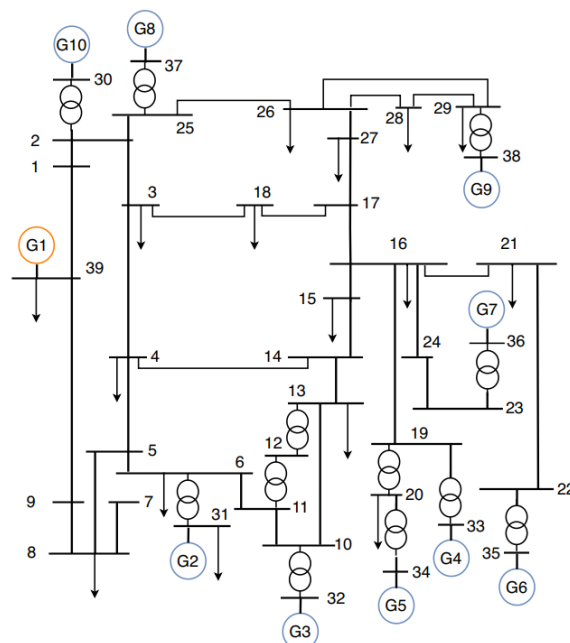


SLIKA 2. HIJERARHIJA UPRAVLJAČKE STRATEGIJE ZA REGULACIJU FREKVENCIJE OD STRANE ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

SIMULACIJE

Test sistem

Predložena upravljačka strategija je testirana na primeru modifikovanog IEEE 39 test sistem koji se sastoji od 32 voda, 10 generatora i 19 potrošača (Slika 3). U originalnom test sistemu, svi generatori, osim generatora u čvoru 39, su opremljeni regulatorima napona tipa IEEE 1 i jednostavnih turbinskim regulatorima. Generator i potrošnja u čvoru 39 predstavljaju ekvivalent susjednog sistema. Sistem je modelovan u MATLAB/Simulinku i detaljni parametri su dostupni u [14].



SLIKA 3. IEEE 39 TEST SYSTEM

Razmatrani scenariji

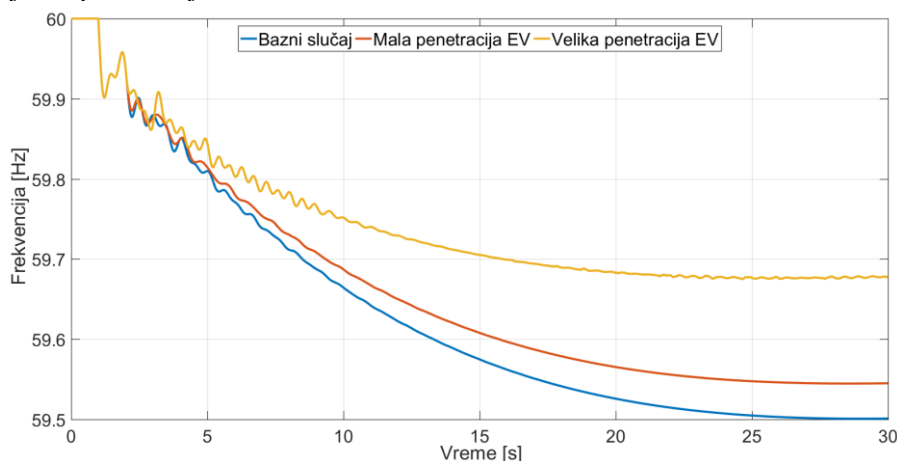
Da bi se ispitao potencijal učešća električnih automobila u regulaciji frekvencije simuliran je ispad generatora koji se nalazi u čvoru 4. Ispad ove proizvodne jedinice odgovara ispadu snage od 800 MW koja je ekvivalentna 5% snage generisanja u početnom radnom stanju. Za potrebe simulacija originalni IEEE 39 sistem je modifikovan tako da su umanjene konstante inercije generatora 2, 3, 6 i 8 sa ciljem da novodobijeni sistem ima manju inerciju. Na ovaj način je obuhvaćeno učešće OIE u proizvodnji električne energije koji su od mreže raspregnuti preko uređaja energetske elektronike i ne doprinose ukupnoj inerciji sistema. Analizirana su dva efekta. Prva analiza se odnosi na uticaj stepena penetracije električnih vozila na odziv frekvencije nakon poremećaja pri čemu su posmatrana tri slučaja: bazni slučaj kada električna vozila ne učestvuju u regulaciji frekvencije, slučaj kada postoji mala penetracija električnih vozila koji pružaju uslugu regulacije frekvencije (50 MW regulacione rezerve na raspolaganju) i slučaj velikog učešća električnih vozila (200 MW regulacione rezerve na raspolaganju). U sva tri slučaja je vreme reagovanja punjača identično i iznosi 1s. Druga analiza se odnosi na uticaj vremena reagovanja, odnosno promene snage punjenja, od trenutka kada se desio poremećaj. Ovo vreme uključuju vreme potrebno za merenje frekvencije, vreme prenošenja upravljačkog signala od agregatora do stanice za punjenje i vreme odziva punjača. Posmatran je slučaj kada postoji velika penetracija vozila i razmatrano je vreme reagovanja od 0.2s, 1s i 5s.

REZULTATI

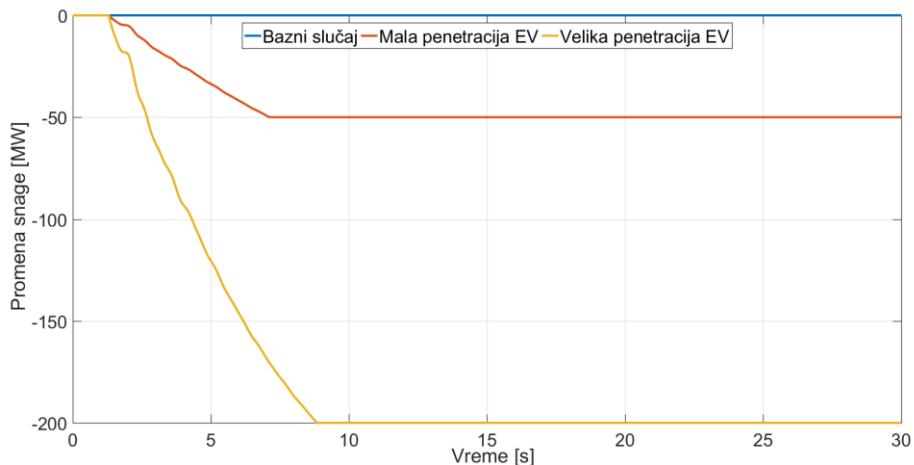
U ovom poglavlju su izloženi rezultati simulacija koje su prikazane u prethodnom delu.

Uticaj stepena penetracije električnih vozila na odziv frekvencije

Promena frekvencije nakon poremećaja za različite nivoe penetracije EV je prikazana na slici 4. Sa grafika se može zaključiti da se pri većem stepenu penetracije električnih vozila dobija manji propad frekvencije nakon poremećaja. Ovaj rezultat je očekivan jer veći stepen penetracije EV odgovara većoj količini regulacione rezerve koja reaguje brže od tradicionalne regulacije. Promena agregisane snage punjača nakon poremećaja za različite nivoe penetracije EV prikazana je na slici 5.



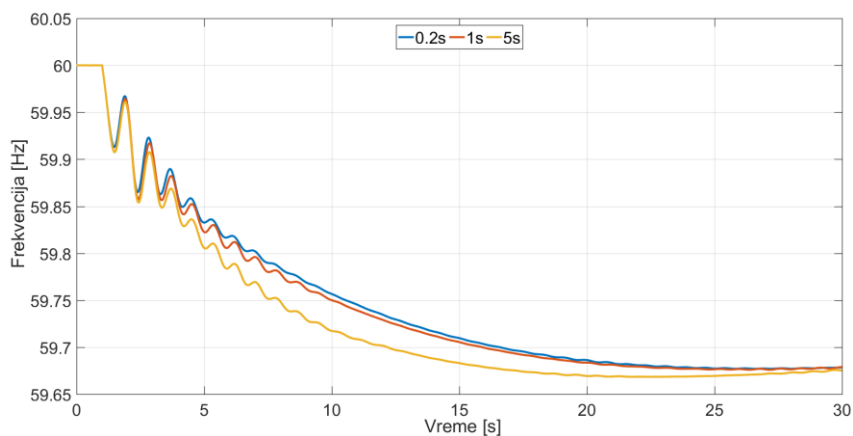
SLIKA 4. PROMENA FREKVENCIJE NAKON POREMEĆAJA ZA RAZLIČITE NIVOE PENETRACIJE EV



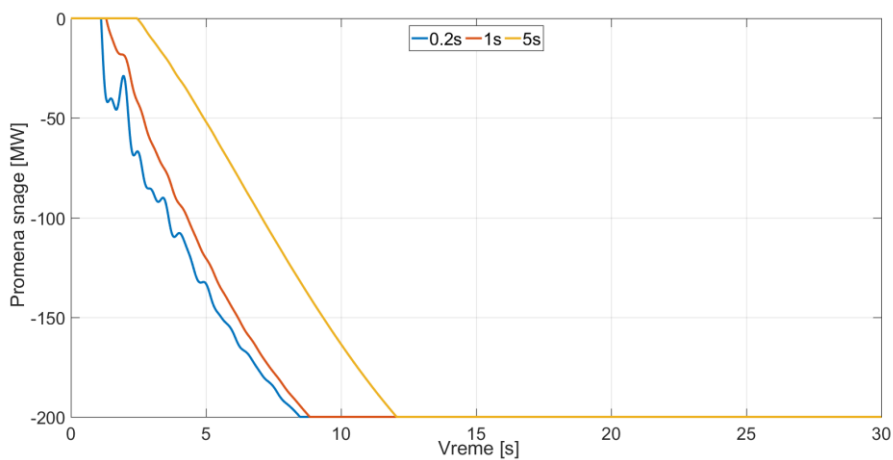
SLIKA 5. PROMENA AGREGISANE SNAGE PUNJAČA NAKON POREMEĆAJA ZA RAZLIČITE NIVOE PENETRACIJE EV

Uticaj brzine odziva punjača na odziv frekvencije

Promena frekvencije nakon poremećaja za različite brzine reagovanja punjača je prikazana na slici 6. Sa grafika se može zaključiti da se pri bržem reagovanju punjača dobija neznatno manji propad frekvencije nakon poremećaja. Promena agregisane snage punjača nakon poremećaja za različite brzine reagovanja punjača prikazana je na slici 7.



SLIKA 6. PROMENA FREKVENCIJE NAKON POREMEĆAJA ZA RAZLIČITE BRZINE REAGOVANJA PUNJAČA



SLIKA 7. PROMENA AGREGISANE SNAGE PUNJAČA NAKON POREMEĆAJA ZA RAZLIČITE BRZINE REAGOVANJA PUNJAČA

ZAKLJUČAK

Elektroenergetski sistem je suočen sa mnogim izazovima usled integracije OIE koja beleži stalan rast poslednjih godina. Jedan od problema koji će biti još izraženiji sa većom penetracijom OIE ogleda se u smanjenju rotacione inercije u sistemu koja definiše otpornost sistema u slučaju poremećaja. Sisteme sa manjom inercijom karakterišu brže i veće promene frekvencije nakon poremećaja i oni imaju veće zahteve u pogledu regulacione rezerve. S druge strane, zbog smanjenja udela konvencionalnih elektrana u sistemu, resursi na strani proizvodnje koji bi mogli da ponude usluge regulacije frekvencije su još više ograničeni. Potencijalno rešenje je alokacija regulacione rezerve na strani potrošnje. Dekarbonizacija predstavlja trend koji je pored energetskog sektora zahvatio i transportni sektor što je dovelo do nagle popularnosti električnih automobila. Vreme odziva i brzina promene snage punjenja su izdvojila električna vozila kao kandidate koji uspešno mogu da daju podršku regulaciji frekvencije. U ovom radu se analizira potencijalni doprinos električnih automobila u regulaciji frekvencije. Predložen je upravljački algoritam kojim se snaga punjenja menja u zavisnosti od odstupanja frekvencije od nominalne vrednosti. Ovim pristupom je reagovanje električnih automobila slično reakciji turbinskog regulatora usled odstupanja frekvencije. Merenje frekvencije je lokalno i na taj način je izbegnuta potreba za robusnom i skupom komunikacionom infrastrukturom. Ovaj lokalni pristup je dobar i iz konteksta same regulacije frekvencije, jer je neposredno nakon poremećaja frekvencija lokalna, a ne globalna promenljiva a najveća odstupanja frekvencije su upravo u blizini mesta poremećaja. Na taj način, najveća promena snage električnih automobila će biti na lokacijama koje su bliske poremećaju i čiji je doprinos najznačajniji. Predstavljena upravljačka strategija je implementirana u MATLAB/Simulinku i validirana na modifikovanom IEEE 39 test sistemu. Posmatrano je više scenarija, bazni slučaj kada električni automobili ne učestvuju u regulaciji frekvencije i scenariji kada električni automobilu učestvuju sa različitim nivoom penetracije. Analiziran je i uticaj vremena reagovanja punjača na odziv i maksimalno odstupanje frekvencije usled ispada proizvodne jedinice. Rezultati simulacija pokazuju da učešće električnih automobila u regulaciji frekvencije doprinosi boljem odzivu i sprečava da frekvencija padne ispod dozvoljene granice. Analiza izvršena u ovom radu potvrđuje da agregisani skup električnih automobila može efikasno da učestvuje u regulaciji frekvencije preko agregatora koja ovu uslugu nudi operatoru sistema. Ovi rezultati mogu biti od koristi operatoru prenosnog sistema prilikom planiranja regulacione rezerve i vlasnicima stanica za punjenje koji mogu da budu nagrađeni za pružanje usluga regulacije frekvencije. Budući pravci istraživanja uključuju razvoj metode za novčanu kompenzaciju pružaocima usluge i detaljniju analizu karakteristika punjača.

LITERATURA

- [1] Milano, F., Dorfler, F., Hug, G., *et al.*: 'Foundations and challenges of low-inertia systems (Invited Paper)', 20th Power Systems Computation Conference (PSCC 2018), Dublin, Ireland, June 2018, pp. 1–25
- [2] Fang, J., Li, H., Tang, Y., *et al.*: 'On the Inertia of Future More-Electronics Power Systems', IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7, (4), pp. 2130–2146.
- [3] National Grid: 'System Operability Framework Summary', UK electricity transmission, 2015.
- [4] EirGrid/SONI: 'All Island TSO Facilitation of Renewables Studies', 2010
- [5] Australian Energy Market Operator: 'Future Power System Security Program - Progress Report', 2016
- [6] Molina-García, A., Bouffard, F., Kirschen, D.S.: 'Decentralized demand-side contribution to primary frequency control', IEEE Transactions on Power Systems, 2011.
- [7] IEA: 'Global EV Outlook 2019 – Analysis - IEA', 2019
- [8] Kempton, W., Tomić, J.: 'Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy', Journal of Power Sources, 2005.
- [9] Yang, J., Zeng, Z., Tang, Y., *et al.*: 'Load frequency control in isolated micro-grids with electrical vehicles based on multivariable generalized predictive theory', Energies, 2015.
- [10] Tomić, J., Kempton, W.: 'Using fleets of electric-drive vehicles for grid support', Journal of Power Sources, 2007.
- [11] Codani, P., Petit, M., Perez, Y.: 'Participation of an electric vehicle fleet to primary frequency control in France', International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2015.
- [12] Pillai, J.R., Bak-Jensen, B.: 'Integration of vehicle-to-grid in the Western Danish power system', IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011.
- [13] Meng, J., Mu, Y., Jia, H., *et al.*: 'Dynamic frequency response from electric vehicles considering travelling behavior in the Great Britain power system', Applied Energy, 2016.
- [14] Athay, T., Podmore, R., Virmani, S.: 'A practical method for the direct analysis of transient stability', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979.