

Analiza primarne regulacije frekvencije u mikromrežama sa obnovljivim izvorima i baterijama za skladištenje energije

Dejan Milošević
Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“
Beograd, Srbija
dejan.milosevic@ieent.org

Željko Đurišić
Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Beograd, Srbija
djurisic@etf.rs

Sadržaj — Rad se bavi analizom regulacije frekvencije u mikromrežama sa velikim udelom obnovljivih izvora energije pri velikim poremećajima koji se mogu javiti tokom njihovog rada. Analizirana je mikromreža koja obuhvata prostor jedne transformatorske stanice 35/10 kV, čija je aktivna snaga (mikromreže) oko 1,6 MW. Na formiranom modelu mikromreže su vršene simulacije u softveru *DIgSILENT*. Cilj analiza je da se procene mogućnosti održavanja frekvencije u mikromreži na prihvatljivoj vrednosti u slučaju teških radnih stanja, kao što su prinudni prelazak u ostrvski rad i iznenadne promene potrošnje tokom ostrvskog rada. Pored sistema za skladištenje električne energije, u simulacijama je posmatran uticaj upravljanja potrošnjom na primarnu regulaciju frekvencije.

Gljučne reči – regulacija frekvencije; mikromreža; obnovljivi izvori energije; ostrvski rad; skladištenje energije; upravljanje potrošnjom.

I. UVOD

Sa razvojem obnovljivih izvora energije postavlja se pitanje koji je optimalan način za njihovu integraciju u postojeći distributivni sistem. Potreban je viši nivo monitoringa, automatizacije i kontrole, a sve to omogućava koncept mikromreža [1]. Upravljanje velikim delovima sistema, ili sistemom u celini je veoma kompleksno zbog njegove velike dimenzionalnosti (u smislu broja elemenata i prostora koji zauzima), dok mikromreže omogućavaju decentralizovano upravljanje manjim celinama, što je znatno jednostavnije i efikasnije. Adaptivna i samostalna decentralizovana kontrola omogućava adekvatan odgovor na promenljive uslove. Da bi intermitentni izvori pratili dijagram potrošnje potrebno je implementirati nekonvencionalne regulacione resurse, kao što su sistemi za skladištenje električne energije i upravljanje potrošnjom. Na ovaj način se može obezbediti balansiranje snage u mikromreži i neophodne količine regulacionih rezervi u svakom trenutku. Mikromreža može u jednoj ili više tačaka biti povezana sa postojećom distributivnom mrežom, pa stoga one imaju mogućnost za dva režima rada. Jedna je samostalni (ostrvski) rad, a druga je paralelan rad sa distributivnom mrežom (DM). U cilju povećanja sigurnosti i pouzdanosti napajanja potrošača mogu se formirati interkonekcije mikromreža [2]. Pri poremećajima

u DM koji ugrožavaju paralelan rad javlja se potreba za prelazak mikromreže u ostrvski rad. Ovo može biti veoma „stresna“ situacija za mikromrežu, pa će najkritičniji oblik biti analiziran u radu, a to je prelazak u ostrvski rad kome je prethodio trolpolni kratak spoj u neposrednoj blizini tačke razdvajanja. U ostrvskom režimu mikromreža se oslanja na sopstvene resurse, koji treba da obezbede naponsku i frekvencijsku stabilnost. Kako u toku ostrvskog rada može doći do značajnih promena snage potrošnje, zbog ispada ili zbog aktivnosti konzuma, bitno je sagledati ponašanje i u ovakvim situacijama, što je jedna od tema koja je istraživana u ovom radu. Kao najvažniji regulacioni resursi u radu su predstavljeni sistemi za skladištenje energije i upravljanje potrošnjom, pa je njihov uticaj na dinamiku i stabilnost rada mikromreža posebno razmatran u radu [3].

II. REGULACIJA FREKVENCije U MIKROMREŽAMA SA SKLADIŠTENJEM ENERGIJE

Za razliku od konvencionalnih sistema sa velikim sinhronim generatorima, strukturu izvora u analiziranoj mikromreži dominantno čine generatori koji su priključeni preko pretvarača. Zbog toga su inercijalne mase ovakvih sistema jako male (ili uopšte ne postoje), pa je potrebno na drugi način obezbediti brz odziv pri poremećajima, koji će pokriti debalans i obezbediti održanje frekvencije i napona. U ovakvim sistemima tu ulogu preuzimaju uređaji energetske elektronike koje čine pretvarački sistemi distribuiranih generatora. Osim malih hidroelektrana sa sinhronim generatorom direktno priključenim na mrežu, ostali agregati nemaju prirodan inercijalni odziv na promenu frekvencije. Vetroelektrane i solarne elektrane se mogu uključiti u regulaciju frekvencije adekvatnim upravljanjem pretvaračem i ostavljanjem margina između raspoložive i trenutne proizvodnje.

U ovom radu su kao osnovni resurs za primarnu regulaciju frekvencije korišćene kontrolisane akumulatorske baterije opremljene adekvatnim regulacionim sistemom. One mogu da reaguju na brze i stohastičke promene snage izvora ili brze promene potrošnje i time obezbede kontinualan balans snaga u sistemu. Pretpostavljeno je da baterije imaju odgovarajuće stanje napunjenosti da mogu obezbediti dovoljno energije za balansiranje snaga u analiziranom vremenskom periodu. Pored

odziva kontrolisanih baterija, u radu je analizirano i superponirano dejstvo upravljivog dela potrošnje, proporcionalnim odzivom svih potrošača istovremeno. Ovo čini kompletan sistem regulacije koji je korišćen u radu.

Regulacija frekvencije na izlazu invertora (Voltage Source Converter-VSC) sistema za skladištenje se može opisati relacijom [4]:

$$f = f_s - m \cdot P \quad (1)$$

U relaciji (1) je f trenutna vrednost frekvencije na priključcima invertora, f_s je stacionarna vrednost frekvencije pre poremećaja, m podešeni koeficijent statizma regulatora frekvencije, a P aktivna snaga koju injektira inverter. Ukoliko je u sistemu stacionarno stanje onda su f i f_s jednake, pa shodno relaciji (1), ne postoji injektirana snaga invertora. Ukoliko dođe do poremećaja, trenutna frekvencija će odstupiti od stacionarne i srazmerno ovom odstupanju kontrolisana baterija će injektirati ili apsorbovati aktivnu snagu.

III. MODEL ANALIZIRANOG SISTEMA

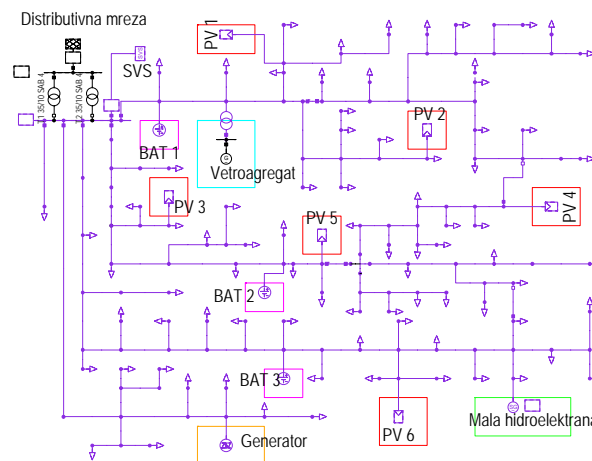
Model na kome su sprovedene analize sastoji se od distributivne mreže u koju su implementirani obnovljivi izvori energije, baterije, mala hidroelektrana i uređaji za kompenzaciju reaktivne snage. Na Sl. 1 je prikazana jednopolna šema korišćenog modela.

Mikromreža je u jednoj tački priključena na distributivnu mrežu preko dva transformatora 35/10 kV (naponski nivo mikromreže je 10 kV). Vršne aktivna i reaktivna snaga bruto potrošnje u mikromreži je oko 1,6 MW i 0,55 Mvar, respektivno. Elementi sa oznakom *BAT* u nazivu predstavljaju akumulatorske baterije koje su preko invertora povezane sa mrežom, čija nominalna snaga iznosi 0,2 MW. Elementi *BAT* pored toga sadrži kontrolno-upravljački sistem koji omogućava učešće kontrolisanih baterija u regulaciji frekvencije u mikromreži. U sistemu postoji šest disperzovanih solarnih sistema (oznake *PV*) ukupne snage 0,5 MW, vetroagregat snage 1 MW, mala hidroelektrana sa sinhronim generatorom snage 1 MW i jedan *Generator* koji može biti ekvivalent nekog drugog izvora (dizel - električni agregat, mikroturbina, itd.) snage 0,5 MW. Sinhroni generator u maloj hidroelektrani radi u režimu održanja napona na svojim sabirnicama na vrednosti 1,05 r.j, dok ostali generatori rade u režimu konstantne snage. *SVS* (*Static Var System*) održava napon na svojim sabirnicama na vrednosti od 1,02 r.j.

TABELA I. Raspodela snaga po izvorima [MW]

BAT 1	0	PV 3	0,1
BAT 2	0	PV 4	0,05
BAT 3	0	PV 5	0,1
Generator	0	PV 6	0,1
PV 1	0,1	Vetroagregat	0,4
PV 2	0,05	Mala hidroelektrana	0,3

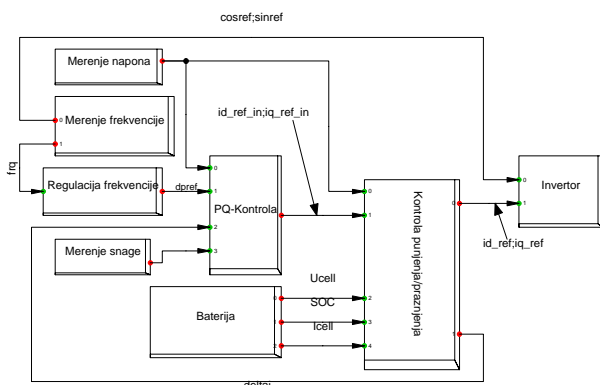
Raspodela aktivnih snaga po izvorima pre nastanka poremećaja je data u Tabeli I. Ova raspodela će važiti u svim slučajevima kada drugačije nije naglašeno.



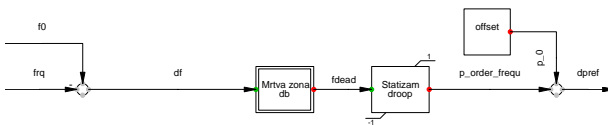
Slika 1. Jednopolna šema analizirane mikromreže

Na Sl. 2 je prikazan blok dijagram elementa *BAT*. Pored neophodnih merenja frekvencije, napona i snage kompletan model ovog elementa sastoji se od modela akumulacione baterije, regulatora frekvencije, regulatora snage, sistema za kontrolu punjenja/praznjenja i invertora koji kompletan sistem povezuje sa priključnom mrežom. Merenja napona i frekvencije se vrše na naizmeničnoj strani invertora. Blok akumulaciona baterija na izlazu daje napon i struju baterije, kao i trenutno stanje akumulisane energije (*SOC*). Na Sl. 3 je prikazan regulator frekvencije na mrežnim priključcima invertora. Na ulaz se dovodi merena frekvencija na priključku invertora- f_{rq} i željena (referentna) frekvencija- f_0 , a zatim na sabiraču određuje odstupanje frekvencije. Mrtva zona sprečava da kontroler reaguje pri veoma malim odstupanjima frekvencije od referentne vrednosti, koje se javljaju u normalnim režimima kada je mikromreža u paralelnom radu sa DM. Izlaz iz bloka statizam predstavlja aktivnu snagu koja definiše doprinos baterije oporavku frekvencije i određena je prema odstupanju frekvencije, shodno relaciji (1). Blok statizam ima ograničenja u opsegu od -1 do 1. U izlaznom sabiraču se odziv baterije na poremećaj u sistemu superponira sa snagom injektiranja invertora iz stacionarnog stanja, pre poremećaja (*offset*). Izlazna promenljiva iz regulatora frekvencije (*dpref*) se vodi u regulator aktivne snage čija je struktura prikazana na Sl. 4. Pored regulatora aktivne snage PQ-Kontrola sa Sl.2 sadrži i granu za regulaciju reaktivne snage i napona (struja po q-osi), ali ona u ovom radu nije razmatrana, pa zbog toga nije ni prikazana. Na ulazu se određuje odstupanje trenutne aktivne snage injektiranja invertora (*pin*) i *dpref*, a nakon toga se odstupanje vodi u blok za kašnjenje (kašnjenje merne opreme i prenosa informacija). PI (proporcionalno-integralni) regulator sa ograničenjima maksimalne i minimalne vrednosti struje po d-osi na izlazu daje referentnu struju po d-osi koja se vodi u sistem za kontrolu punjenja/praznjenja. Struja po d-osi invertora definiše vrednost aktivne snage koju će on injektirati u mrežu. Sistem

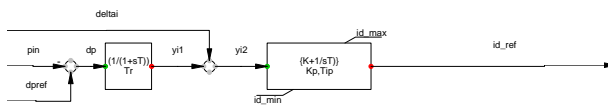
za kontrolu punjenja/praznjenja na osnovu parametara baterije (napon, struja, raspoloživi prostor za skladištenje) i referentne vrednosti struje po d-osi proverava da li postoji dovoljno skladištene energije/raspoloživog kapaciteta za skladištenje i da nije došlo do povrede ograničenja po struji i na osnovu toga definiše struju po d-osi invertora na osnovu koje on injektira odgovarajuću aktivnu snagu u mrežu. Maksimalna snaga baterija ne može premašiti nominalnu vrednost od 0,2 MW po jedinici, dok je maksimalan gradijent snage definisan brzinom promene frekvencije u sistemu i podešenom vrednošću koeficijenta statizma. Δf_{tai} definiše razliku struje po d-osi na ulazu i izlazu iz Sistema za kontrolu punjenja/praznjenja i jednaka je nuli ukoliko nije došlo do povrede nkakvih ograničenja.



Slika 2. Blok dijagram elementa BAT



Slika 3. Regulator frekvencije



Slika 4. Regulator aktivne snage

Što se tiče modela obnovljivih izvora, korišćen je vetroagregat sa dvostrano napajanom asinhronom mašinom. Modeli baterije, vetroagregata i solarnog sistema su preuzeti iz softvera *DIGSILENT* [5]. Mala hidroelektrana ima sinhroni generator koji je direktno priključen na mrežu, pa ona predstavlja jedinu inercijalnu masu u sistem.

Male vrednosti statizama mogu dovesti do nepotrebnih oscilacija u sistemu, dok velike vrednosti statizama imaju za posledicu sporo reagovanje i potencijalnu nestabilnost. U regulatoru frekvencije je podešena vrednost koeficijenta statizma 4%, dok je mrtva zona regulatora frekvencije 0,005 Hz, što je pokazalo zadovoljavajuće karakteristike pri velikim poremećajima koji su analizirani u ovom radu.

Potrošnja je modelovana kao naponski zavisna sa statičkim koeficijentima zavisnosti aktivne snage od napona od 1,6 i reaktivne snage od napona od 1,8. Pretpostavljeno je da potrošnja nije zavisna od frekvencije, odnosno da su koeficijenti zavisnosti aktivne i reaktivne snage od frekvencije jednaki 0. Samim tim je pretpostavljeno da ne postoji inercijalni odziv potrošnje na promenu frekvencije.

IV. PRELAZAK MIKROMREŽE U OSTRVSKI RAD

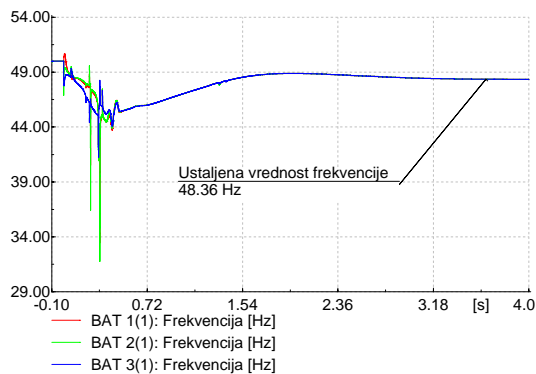
Prelazak analiziranog sistema u ostrvski rad, nakon kvara u distributivnoj mreži, predstavlja jedan od najtežih slučajeva u pogledu regulacije frekvencije u mikromreži. Osnovni zadatak je obezbediti stabilnost frekvencije u uslovima ostrvskog rada. Kvar, koji je uzrokovao prelazak u ostrvski režim analizirane mikromreže, modelovan je na visokonaponskoj strani distributivnog transformatora 35/10 kV u trenutku $t=0s$. U trenutku neposredno pre pojave kvara tok snaga iz distributivne mreže prema mikromreži je bio 0,5 MW i 0 Mvar. Zaštita mikromreže detektuje kvar i dolazi do otvaranja prekidača i njenog prelaska u ostrvski rad u trenutku 0,3s. Zapravo, mikromreža je odvojena od distributivne mreže u trenutku nastanka trofaznog kratkog spoja, jer su u periodu trajanja kratkog spoja i distributivna mreža i mikromreža u kratkom spoju, odnosno napon u zajedničkoj tački je jednak nuli, pa je mikromreža i u toku kvara naponski i frekvencijski raspregnuta od distributivne mreže. Iz tog razloga ovaj režim predstavlja najteži izazov za opstanak pogonskog stanja mikromreže u ostrvskom režimu i on je mnogo teži od jednostavnog isključenja prekidača i trenutnog prelaska u ostrvski rad.

Na Sl. 3 je prikazana promena dinamičke frekvencije na priključcima invertora pojedinih sistema za skladištenje energije za analizirani slučaj. Vidi se da u toku izloženosti kvaru, ali i u nekom periodu nakon eliminacije kvara postoje veoma velike promene frekvencije, koje, ukoliko se zanemare trenutna (dinamička) odstupanja, padaju i do vrednosti od 44 Hz. Čim se pojavi odstupanje frekvencije, reaguju baterije i počinju da povećavaju svoju snagu, zaustavljaju opadanje frekvencije i uspevaju da je stabilizuju na vrednosti od 48,37 Hz. Ovo je veoma dobar rezultat ako se najpre ima u vidu trajanje kvara od 300ms, a zatim debalans u snazi od oko 0,4 MW. Sa slike se može videti i da se frekvencija na priključcima pojedinih invertora u toku prelaznog procesa značajno razlikuju, što će dovesti do razlike u njihovim snagama.

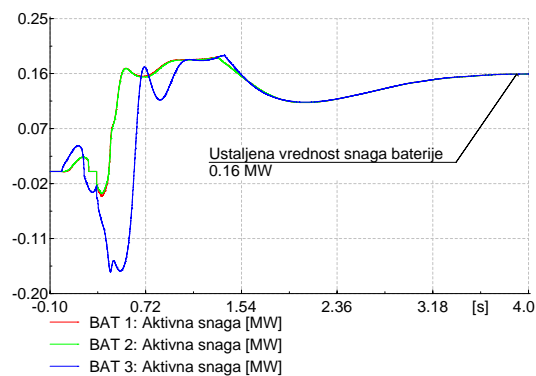
Na Sl. 4 je prikazana promena aktivne snage injektiranja baterije za analizirani slučaj. Vidi se da snage baterija nisu međusobno jednake zbog razlike u frekvencijama, pa čak u nekim trenucima prelaze u režim punjenja (snaga postaje negativna). Suma snaga baterija nadoknađuje inicijalni debalans od oko 0,5 MW i kompenzuje promene u potrošnji koje nastaju kao posledica promene napona u mikromreži.

Pored akumulacionih baterija, koje u najvećoj meri neutrališu poremećaj, značajan doprinos tokom prelaznog procesa daju sinhroni generator u maloj hidroelektrani i

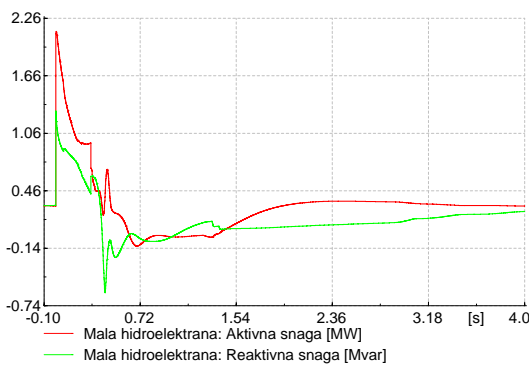
asinhrone mašina u vetroagregatu. Promene njihovih aktivnih i reaktivnih snaga su prikazane na Sl. 5 (za malu hidroelektranu) i Sl. 6 (za vetroagregat).



Slika 5. Promena frekvencije na izlazu invertora pojedinih sistema za skladištenje energije



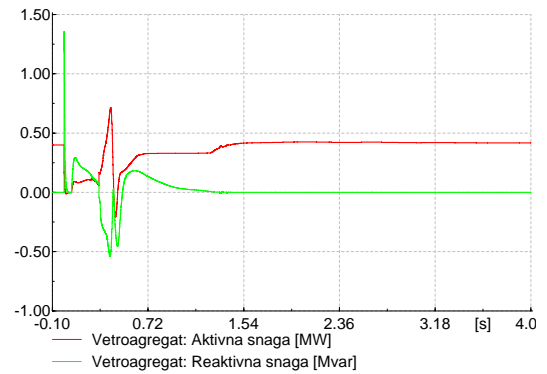
Slika 6. Promena aktivnih snaga injektiranja invertora



Slika 7. Promena aktivne i reaktivne snage male hidroelektrane

Odziv male hidroelektrane na Sl. 5 je posledica prirodnog odziva sinhronog generatora na promene frekvencije i napona na svojim priključcima. Sa ove slike se može videti da u toku izloženosti kvaru generator injektira značajno veće vrednosti aktivne i reaktivne snage. U slučaju vetroagregata, razlozi za "pomoć" tokom prelaznog procesa su sasvim drugačijeg porekla, jer su uslovljeni radom regulacionog sistema agregata koji posredstvom pretvarača u rotorskom kolu prepoznaje

poremećaj u eksternoj mreži i pre svega daje reaktivnu podršku sistemu da bi se omogućio lakši oporavak napona [6].



Slika 8. Promena aktivne i reaktivne snage vetroagregata

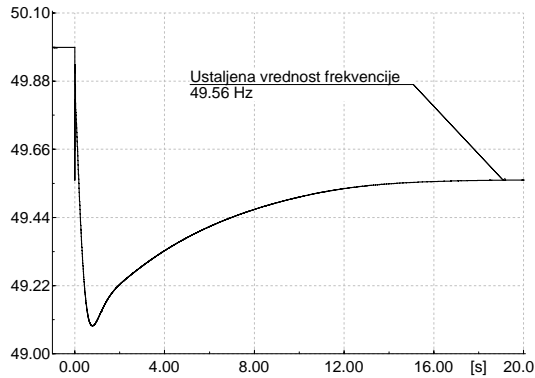
V. REGULACIJA FREKVENCije PRI PROMENI POTROŠNJE U MIKROMREŽI U OSTRVSKOM RADU

Promena dijagrama potrošnje je diktirana aktivnostima i potrebama ljudi, koje imaju izrazito nepredvidivo ponašanje. U velikim sistemima odstupanja od predviđenih ponašanja u pogledu potrošnje se stohastički kompenzuju, dok kod malih sistema, odnosno mikromreža, predviđanje dijagrama potrošnje ima značajno veću grešku. Osim toga, u velikim sistemima u normalnim uslovima nema naglih promena kumulativne potrošnje, dok u malim sistemima te promene mogu biti veoma izražene. Nagle promene potrošnje predstavljaju potencijalno opasna stanja za ispravno funkcionisanje sistema. Drugi uzrok varijacije potrošnje mogu biti kvarovi ili ispadi elemenata mreže. U takvim slučajevima se na test stavlja regulacija učestanosti i napona, koja mora odgovoriti na praktično sve poremećaje.

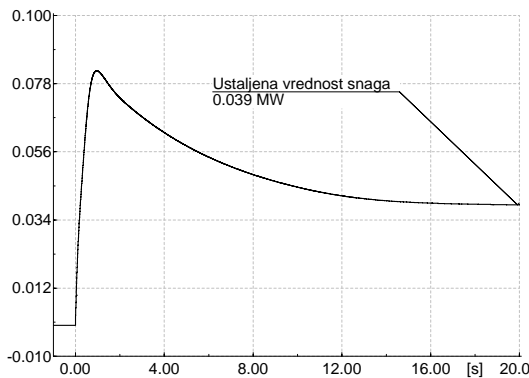
Iz prethodno navedenih razloga, u ovom poglavlju će biti analiziran odziv sistema za regulaciju frekvencije pri promeni potrošnje tokom ostrvskog rada analizirane mikromreže. Posmatrana je trenutna promena aktivne snage potrošnje od 30% (oko 0,48 MW) i reaktivne snage od 15% (oko 0,08Mvar). Ova promena je ravnopravno raspoređena na sve potrošače i dešava se u trenutku $t=0$. Što se tiče raspodele aktivnih snaga izvora u mikromreži, u ovom slučaju postoji samo jedna promena u odnosu na Tabelu I, jer je aktivna snaga vetroagregata sada 0,6 MW, umesto pređašnjih 0,4 MW.

Na Sl. 7 je prikazana promena frekvencije (mereno na priključcima male hidroelektrane) za prethodno definisan slučaj promene potrošnje. U ovom slučaju data je promena frekvencije samo na jednom mestu u mreži jer se može smatrati da nema velikih oscilacija snaga u mikromreži, odnosno razlika u vrednosti frekvencije u različitim tačkama mreže. Sa ove slike se može uočiti da je trenutni minimum frekvencije nakon pretpostavljenog poremećaja u potrošnji oko 49,1 Hz, dok je ustaljena vrednost frekvencije u novom stacionarnom stanju oko 49,56 Hz. Uprkos iznenadnom i značajnom debalansu u sistemu regulacioni elementi, pre svega kontrolisane baterije, ali i mala hidroelektrana, sa

svojom prirodnom inercijom, su uspele da zaustave opadanje frekvencije i da je ustale na datoj vrednosti. Ustaljena vrednost frekvencije može biti nepovoljna sa aspekta rada potrošača i drugih elemenata priključenih na mrežu [7],[8], pa bi u ovakvim slučajevima bilo adekvatno projektovati brzu sekundarnu regulaciju koja će ograničiti vreme trajanja ovako niske vrednosti frekvencije i vratiti je na referentnu vrednost.



Slika 9. Promena frekvencije u sistemu [Hz]



Slika 10. Promena aktivnih snaga injektiranja invertora [MW]

Na Sl. 8 je prikazana promena aktivnih snaga injektiranja invertora, koje su kao posledica jedinstvene vrednosti frekvencije u mikromreži iste za sve invertore. Što se tiče krive sa Sl. 8 može se zaključiti da je ona praktično slika u ogledalu krive promene frekvencije u sistemu sa Sl. 7. Iz ovoga se može konstatovati da su baterije adekvatno odgovorile na promene frekvencije.

Pored prethodno navedenog, mala hidroelektrana daje značajan doprinos u vidu aktivne i reaktivne snage u periodu od oko 0,5s nakon poremećaja. Što se tiče vetroagregata njegov doprinos u ovom slučaju se može zanemariti.

VI. UKLJUČIVANJE UPRAVLJANJA POTROŠNJOM U REGULACIJU FREKVENCIE

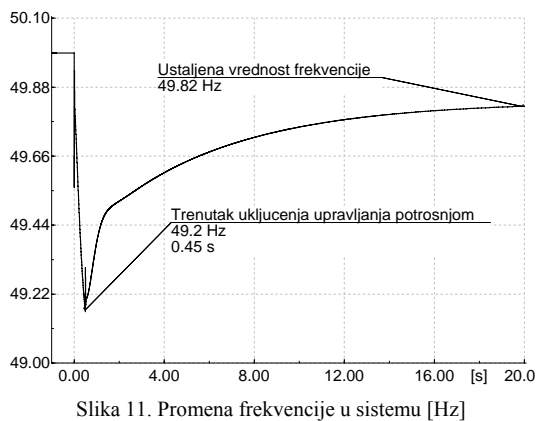
Praćenje iznenadnih stohastičkih promena potrošnje, pokrivanje ispada i održavanja sistema u granicama prihvatljivih radnih stanja, pre pojave obnovljivih izvora je bilo obezbeđeno planiranjem načina rada izvora električne energije. Ovakav način funkcionisanja sistema je omogućavao

visok nivo kontrolabilnosti primarnih resursa (fosilnih goriva i akumulacija hidroelektrana). Sa pojavom obnovljivih izvora energije sve veći deo primarnih resursa postaje stohastičke prirode, jer nije moguće imati tačne predikcije insolacije i brzine vetra, naročito na duži period. Ukoliko nije moguće problem rešiti sa strane proizvodnje, prirodno je uzeti u razmatranje upravljanje sa strane potrošnje. Ideja je da se oni potrošači kojima nije bitno kada će biti uključeni, stave na raspolaganje operatoru sistema i dozvole manipulacije shodno zahtevima sistema i definisanim ugovornim obavezama, što naravno podrazumeva novčanu naknadu potrošačima za pružene usluge operatoru sistema. Upravljanje potrošnjom može biti značajan regulacioni resurs u sistemu i koristi se u različite svrhe. Ono se može primeniti kako u balansiranju snaga u sistemu „peglanjem“ dnevnog dijagrama potrošnje, tako i u regulacione svrhe [9], što je i razmatrano u ovom radu.

Kako bi se sagledali efekti upravljanja potrošnjom korišćen je model analiziran u prethodnom poglavlju (promena potrošnje u ostrvskom radu). Na iznenadnu promenu potrošnje je superponiran i odziv upravljivog dela konzuma, tako što kada frekvencija padne na vrednost od 49,2 Hz, a to se dešava u trenutku 0,45 s, dolazi do smanjenja opterećenja: aktivne snage od 10% (što iznosi oko 0,16 MW) i reaktivne snage 2% (oko 0,01 Mvar). Treba napomenuti da je ova promena ravnopravno raspoređene na sve potrošače. Upravljanje potrošnjom može biti vršeno centralizovano, kroz sistem inteligentnih mreža ili spontano kroz frekvencijski kontrolisane termostatske uređaje (klima uređaje, frižidere, itd.), kao što je pretpostavljeno u ovom radu.

Na Sl. 9 je prikazana promena frekvencije u sistemu, koja se, kao i u prethodnom slučaju, može smatrati jedinstvenom frekvencijom u sistemu. Frekvencija ne dostiže minimum kao u prethodnom slučaju, jer pre toga dolazi do odziva upravljivih potrošača, te je minimum nešto viši (blizu 49,2 Hz). Značaj upravljanja potrošnjom se može najbolje uočiti posmatrajući vrednost ustaljene vrednosti frekvencije koja je 49,82 Hz. Podsećanja radi, kada nije postojalo upravljanje potrošnjom ustaljena vrednost frekvencije je bila 49,56 Hz. Implementacija upravljanja potrošnjom nesumnjivo ima veliki potencijal kada je u pitanju regulacija frekvencije u aktivnih snaga naročito u malim sistemima koji sadrže veliki udeo obnovljivih izvora priključenih preko pretvarača na mrežu.

Naravno treba pomenuti da je za implementaciju ovakvog sistema neophodno u pozadini imati veoma složen tehničko-komunikacioni sistem koji će omogućiti manipulacije sa svakim od upravljivih potrošača i komunikaciju između samih elemenata i regulacionog sistema. Složenost za sobom povlači i neizbežno visoku cenu investicije u ovakav sistem.



VII. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana primarna regulacija frekvencije u mikromrežama koje sadrže veoma visok procenat obnovljivih izvora energije i akumulacionih baterija koji su priključeni na mrežu preko pretvarača. Kao osnovni regulacioni element su korišćene kontrolisane baterije sa svojim podešenim koeficijentima statizma i mrtve zone neosetljivosti. Posmatrani su različiti poremećaji koji se potencijalno mogu desiti: prelazak mikromreže u ostrvski rad usled kvara u eksternoj mreži, iznenadna promena potrošnje tokom ostrvskog rada i kvantifikacija efekata upravljanja potrošnjom na primarnu regulaciju frekvencije u mikromreži. Generalni zaključak je da su kontrolisane baterije uz podršku male hidroelektrane i vetroagregata uspele u svim slučajevima da održe stabilnost frekvencije, ali i celokupnog sistema. Vrednosti koje se imaju u posthvarijskom ustaljenom stanju nisu uvek prihvatljive, te ih je potrebno brzo korigovati do prihvatljivih vrednosti. Treba naglasiti da je upravljanje potrošnjom pokazalo veoma dobre performanse i značajno smanjilo minimum frekvencije tokom tranzijentnog perioda i povećalo vrednosti frekvencije u ustaljenom stanju nakon poremećaja. Ove analize daju optimističke prognoze kada je razvoj mikromreža u pitanju. Vreme trajanja izloženosti kvaru, kao i vremena potrebna za regulaciju upravljanja potrošnjom u ovom radu su možda previše pesimistički uzeta, pa bi njihovo smanjenje značajno doprinelo poboljšanju dinamičkih performansi mikromreže. Buduće istraživanje za nadogradnju ovog rada bi moglo biti razvijanje brze sekundarne regulacije čije bi se dejstvo superponiralo na primarnu regulaciju definisanu u radu, čime bi se uspostavila hijerarhija i koordinacija u regulaciji frekvencije. Ovakav koncept bi omogućio kvalitetan i pouzdan sistem regulacije frekvencije u mikromrežama, koji bi mogao zadovoljiti standarde u pogledu kvaliteta frekvencije, čime bi

se stekli uslovi da i praktično zažive mikrosistemi u ostrvskom radu.

LITERATURA

- [1] A. Keyhani, „Design of smart power grid renewable energy systems“, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [2] V. Mijailović, „Distribuirani izvori energije“, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [3] D. Milošević, „Analiza primarne regulacije frekvencije u mikromrežama“, Master rad (Mentor Ž. Đurišić), Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2015.
- [4] A. Keyhani, M. Marwali, „Smart Power Grids 2011“, Springer, 2011.
- [5] Technical documentation, „DIGSILENT PowerFactory User Manual 15.0“, DIGSILENT GmbH, Gomaringen, 2015.
- [6] D. Milošević, I. Vidaković, „Analiza tranzijentne stabilnosti vetroelektrana sa dvostrano napajanom asinhronom mašinom pri kratkim spojevima u priključnoj mreži“, INFOTEH-JAHORINA, Vol. 14, Ref. ENS-3-4, str. 239-344, Mart 2015.
- [7] M. Čalović, „Regulacija elektroenergetskih sistema“, Tom 1, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Bogradu, 1997.
- [8] P. Kundur, „Power Systems Stability and Control, McGraw-Hill“, New York, 1994.
- [9] A. Etxegarai, E. Torres, P. Eguia, „Frequency Control in Isolated Power Systems with Wind Power Penetration“, 2013.

ABSTRACT

This paper analyzes regulation of frequency in microgrids with large share of renewable energy sources during the large disturbances that can appear in exploitation. Microgrid, which is analysed, covers the area of a substation 35/10 kV, whose active power is about 1,6 MW. Simulations are conducted in software *DIGSILENT* using the formed model of microgrid. Aim of analyses is to estimate possibilities maintain frequency on the acceptable value in case of difficult operate states like forced entering in isolated work and sudden change of loads during the isolated work. Beside storage systems, in simulations are considered influence demand response on primary regulation of frequency.

Key words – regulation of frequency; microgrid; renewable energy sources; isolated work; energy storage; demand response.

ANALYSIS OF PRIMARY REGULATION OF FREQUENCY IN MICROGRIDS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES AND BATTERY STORAGE SYSTEMS

D. MILOŠEVIĆ, Ž. ĐURIŠIĆ