

Analiza naponske i ugaone stabilnosti u mikromreži

Ivana Vidaković
Elektroprivreda Srbije
Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Beograd, Srbija
iva.vidakovic90@gmail.com

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

Sadržaj—U radu se razmatra naponska i ugaona stabilnost mikromreže sa obnovljivim izvorima energije. Najprije je izvršena optimizacija mikromreže primjenom programskog paketa HOMER, a zatim je kreiran model u programskom paketu DIGSILENT na kome su izvršene analize. Cilj rada je da se ustanovi kako deбаланси snaga i kratki spojevi u mikromreži utiču na njenu stabilnost.

Ključne riječi - mikromreža; obnovljivi izvori energije; optimizacija; ugaona stabilnost; naponska stabilnost.

I. UVOD

Posmatrajući sve veću zagađenost životne sredine i sve veću potrošnju energije sasvim je izvjesno da neizostavan element u kreiranju moderne energetike postaju obnovljivi izvori energije. Najveći problem koji oni nose sa sobom jeste njihova integracija u konvencionalni elektroenergetski sistem. Međutim, inteligentne elektroenergetske mreže omogućavaju efikasno otklanjanje ovog problema tj. omogućavaju balansiranje stohastične proizvodnje i potrošnje bez narušavanja tehničkih ograničenja i komfora potrošača.

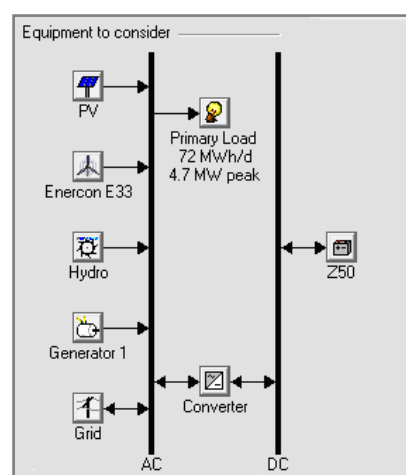
Mikromreža predstavlja inteligentnu elektroenergetsku mrežu. To je jedna kontrolabilna cjelina unutar EES-a koja obuhvata distribuirane izvore, sisteme za skladištenje električne energije, upravljive i neupravljive potrošače [1], [2].

II. OPTIMIZACIJA MIKROMREŽE U PROGRAMSKOM PAKETU HOMER

Programski paket HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) je široko korišćeni softver za modelovanje mikromreža [3]. Omogućava formiranje kompjuterskih modela koji pojednostavljaju kreiranje mikromreža koje mogu da rade samostalno ili paralelno sa distributivnom mrežom. Algoritmi optimizacije i analize osjetljivosti omogućavaju da se procijeni ekonomska i tehnička izvodljivost velikog broja potencijalnih rješenja. Za definisanu potrošnju moguće je odrediti optimalnu kombinaciju distribuiranih generatora na osnovu kriterijuma minimalnih investicionih i eksploatacionih troškova u mikromreži. Analiza osjetljivosti omogućava da se odredi potencijalni uticaj neizvjesnih faktora, cijene goriva ili brzine vjetra, na posmatrani sistem tokom vremena.

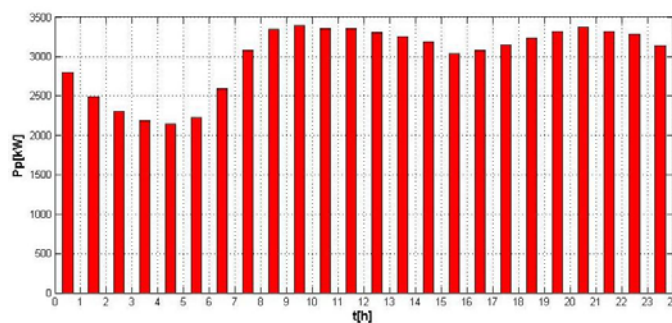
Na sl. 1 prikazana je šema mikromreže kreirana primjenom softvera HOMER [4]. Izabrani radni režim je paralelan rad sa distributivnom mrežom. Elementi koji je sačinjavaju su:

solarna elektrana (PV), vjetroelektrana (*Enercon E33*), mala hidroelektrana (*Hydro*), dizel agregat (*Generator 1*), konvertor (*Converter*) i baterije za skladištenje energije (*Z50*).



Slika 1. Šema kreirane mikromreže

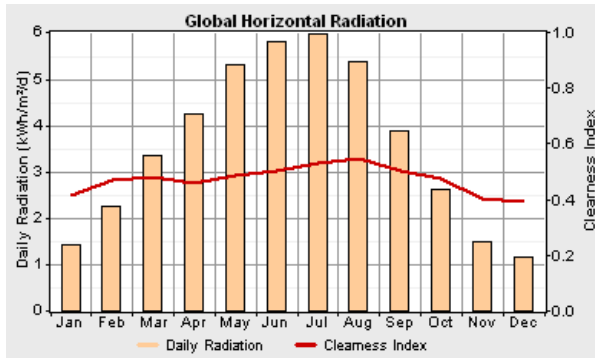
Potrošnja je modelovana kao konstantna, neupravljiva potrošnja (*Primary Load*) tako što je za svaki sat u periodu od godinu dana definisana njena vrijednost. Profil potrošnje prikazan je na sl. 2.



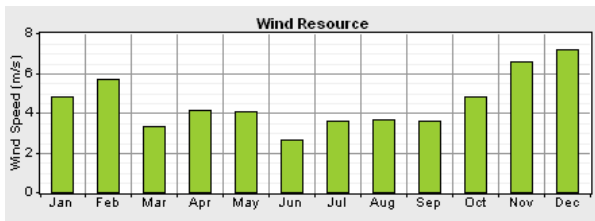
Slika 2. Srednji godišnji dijagram potrošnje za 24 h

Nakon izbora distribuiranih generatora unijeti su odgovarajući podaci o primarnim energentima (insolacija, vjetar, protok vode i dizel). Potencijal energije sunca i vjetra prikazan je grafički na sl. 3 i 4. Prilikom proračuna srednjih satnih brzina vjetra uvažen je visinski profil brzine vjetra korišćenjem logaritamskog zakona [5]. Srednja godišnja vrijednost raspoloživog protoka iznosi 569,2 L/s, a raspoloživi

neto pad 40 m. Cijena dizel goriva iznosi 0,9 \$/L. Pretpostavljeno je da je konstantna tokom trajanja projekta.



Slika 3. Godišnji profil sunčeve iradijacije



Slika 4. Godišnji profil brzine vjetra

Izabrana je godišnja kamatna stopa u iznosu od 6%, a vijek trajanja projekta 20 godina. Za projektovanu mikromrežu optimalno rješenje prikazano je na sl. 5. U tabeli I dat je prikaz troškova optimalnog rješenja.

PV (kW)	E33	Hydro (kW)	Label (kW)	Z50	Conv. (kW)	Grid (kW)
1000	5	1000		10	500	1000

Slika 5. Rezultati optimizacije

TABELA I. TROŠKOVI OPTIMALNOG RJEŠENJA

Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC
\$ 8.374.727	1.078.812	\$ 20.681.088

III. MODEL MIKROMREŽE U DIGSILENT-U

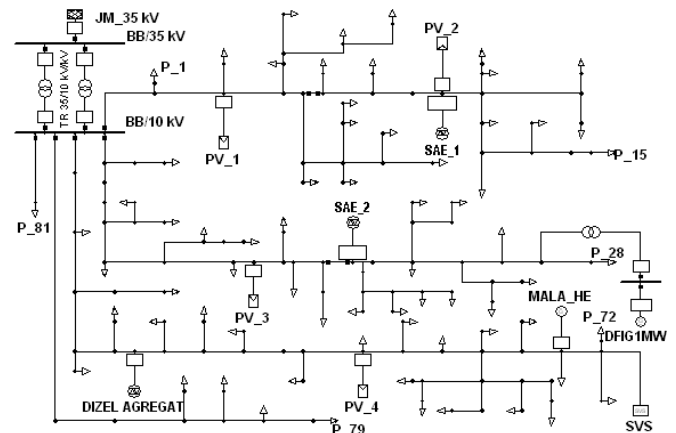
Jednopolna šema mikromreže na kojoj su izvršene analize prikazana je na sl. 6. Elementi su izabrani u skladu sa optimalnom varijantom, sa ekonomskog aspekta, proračunatom u programskom paketu HOMER.

Sa slike 6. vidimo da M₃₅ kV predstavlja ekvivalent eksterne distributivne mreže na koju je priključena analizirana mikromreža. Ona je balansno-referentni čvor za datu konfiguraciju. Dva transformatora u paralelnom radu preko kojih se vrši razmjena energije na relaciji distributivna mreža-mikromreža nose oznaku TR 35/10 kV/kV.

Vjetroelektrana (DFIG1MW) je modelovana jednim agregatom. Izabran je vjetroagregat sa dvostrano napajanjem asinhronom mašinom snage 1 MW [6]. Mala hidroelektrana (MALA_HE) modelovana je sinhronim generatorom direktno priključenim na mrežu nominalne snage 1 MW. Ukupna instalisana snaga solarnih elektrana (PV) iznosi 1,5 MW, a

snaga dizel električnog agregata (DIZEL AGREGAT) 0,3MW. Sistemi za skladištenje električne energije (SAE₁, SAE₂) su ukupne snage 0,8 MW.

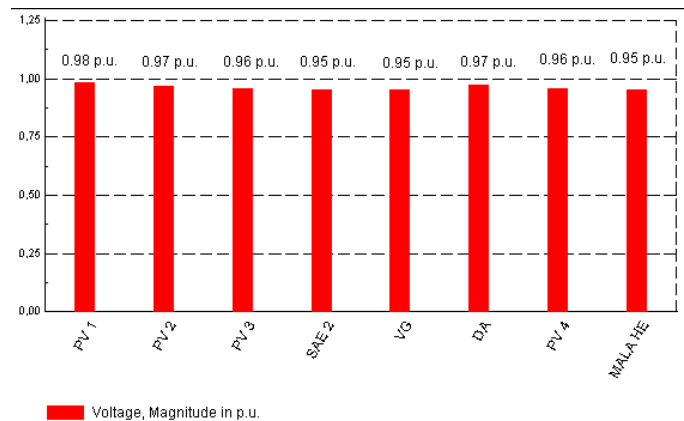
Statički sistem za kompenzaciju reaktivne snage (SVS) lociran je kod male HE. Problem kod integracije kako malih hidroelektrana tako i drugih elektrana u EES je veliko kolebanje napona u karakterističnim režimima tokom eksploatacije. Zadovoljenje propisane vrijednosti napona jedan je od uslova koje elektrana koja želi da se priključi na distributivnu mrežu mora ispuniti [7].



Slika 6. Jednopolna šema mikromreže

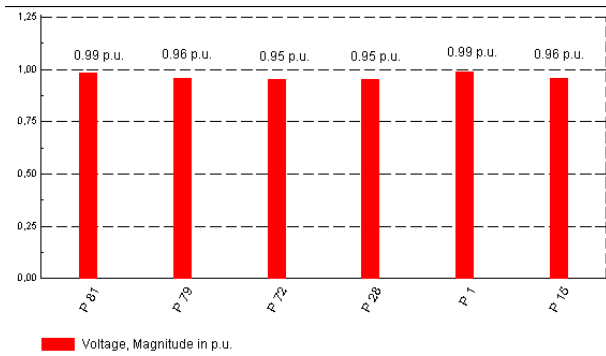
IV. ANALIZA NAPONSKE STABILNOSTI U MIKROMREŽI

Prije priključenja distribuiranih izvora, a uzimajući u obzir nominalnu potrošnju biće sagledane naponske prilike u mreži. Rezultati su prikazani grafički, sl. 7, u vidu bar-dijagrama napona na sabirnicama na kojima se planira priključenje distribuiranih izvora. Takođe, prikazani su i naponi na sabirnicama pojedinih potrošača, sl. 8.



Slika 7. Bar-dijagram napona na sabirnicama na kojima se planira priključenje distribuiranih izvora

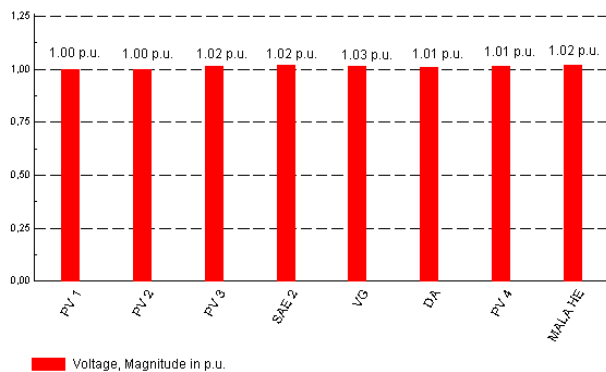
Na sabirnicama na kojima se planira priključenje distribuiranih izvora nisu narušena naponska ograničenja.



Slika 8. Bar-dijagram napona na sabirnicama pojedinih potrošača prije priključenja distribuiranih izvora

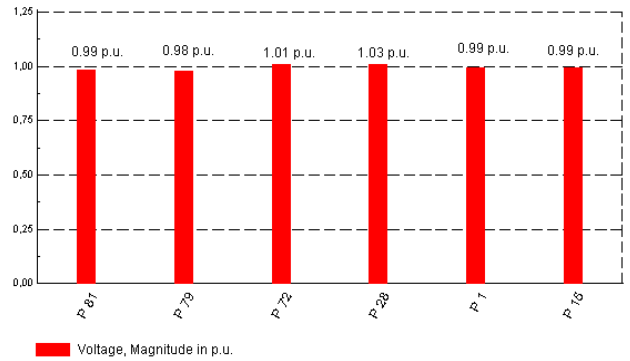
Sa grafika vidimo da se naponi na svim sabirnicama nalaze u okviru dozvoljenih granica odstupanja. Najveće vrijednosti napona javljaju se na sabirnicama potrošača koji su najbliži sabirnicama mikromreže. S obzirom da se zahtjevana energija obezbjeđuje iz distributivne mreže sasvim je i očekivan ovakav rezultat. Udaljavajući se od sabirnica preko kojih je mikromreža povezana na EES, napon opada i najniža vrijednost se javlja na sabirnicama najudaljenijih potrošača.

Priključenjem distribuiranih izvora dolazi do porasta napona iznad dozvoljenih vrijednosti u većem dijelu mikromreže. Najveći problem javlja se kod vjetroelektrane i male hidroelektrane. Međutim, savremeni vjetroagregati su projektovani da rade sa faktorom snage različitim od 1, induktivno/kapacitivno, što je iskorišćeno za regulaciju napona na sabirnicama na koje je priključen. Isti problem kod male hidroelektrane riješen je priključenjem SVS uređaja [8]. Ovaj uređaj omogućava da se napon u tački njegovog priključenja održava na zadatoj vrijednosti. Efekti primjenjenih mjera prikazani su na sl. 9.



Slika 9. Bar-dijagram napona na sabirnicama distribuiranih izvora nakon njihovog priključenja

Podešeno je da vjetroagregat radi sa $\cos\phi=0,9$ kapacitivno, tj. da apsorbira reaktivnu snagu. Treba napomenuti da se regulacija reaktivne snage male hidroelektrane može vršiti, u određenom opsegu, kroz pobudu sinhrona mašine. Ipak, rad u potpobuđenom režimu, kakav se u ovom slučaju zahtjeva, slabi ugaonu stabilnost sinhrona mašine, a može uzrokovati i pregrijevanje polnih nastavaka na rotoru.



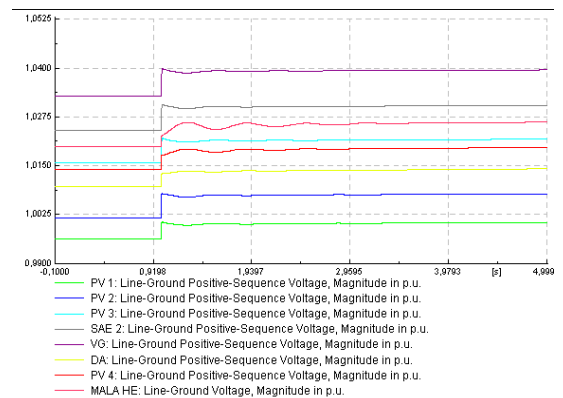
Slika 10. Bar-dijagram napona na sabirnicama pojedinih potrošača nakon priključenja distribuiranih izvora

Najniže vrijednosti napona koje se javljaju pri primjeni prethodno pomenute regulacije prikazane su na sl. 10.

Prethodne analize su urađene za slučaj da je generisanje iz distribuiranih izvora nominalno i da je potrošnja nominalna. Da bi ispitali u kojoj mjeri je projektovana mikromreža naponski stabilna pri poremećajima u njoj analiziramo dva granična slučaja debalansa snaga u mikromreži. Svi slučajevi, koji su približniji realnim dešavanjima, nalaze se između dva analizirana.

a) Naponske prilike u mikromreži pri maksimalnom generisanju i minimalnoj potrošnji

Pretpostavljeno je da svi distribuirani izvori rade sa nominalnom snagom. U trenutku 1 s simulirano je naglo rasterećenje potrošnje. Takođe, u tom trenutku dolazi do isključenja kablovskog izvoda ka potrošaču P₇₉. Rezultati ove simulacije prikazani su na sl. 11.



Slika 11. Vremenska promjena napona na pojedinim sabirnicama mikromreže pri naglom rasterećenju potrošnje

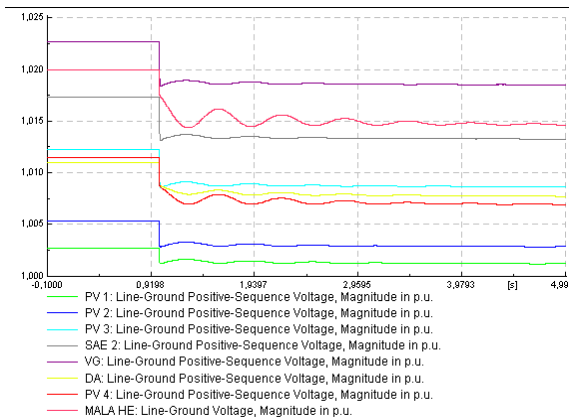
Sa slike vidimo da naponi na svim sabirnicama na koje su priključeni izvori u trenutku 1 s porastu. Takođe, vidimo da je najveća vrijednost napona nešto manja od $u=1,04$ p.u., što je prihvatljivo.

b) Naponske prilike u mikromreži pri minimalnom generisanju i maksimalnoj potrošnji

Polazimo od pretpostavke da je potrošnja maksimalna, a generisanje od strane izvora smanjeno. Smanjenje proizvodnje

za 25 % je zadato u trenutku 1 s. Da bi se stvorili što teži uslovi zadat je nagli skok potrošnje u pojedinim čvorovima mikromreže takođe u trenutku 1 s.

Rezultati simulacije prikazani na sl. 12. ukazuju da na svim sabirnicama dolazi do smanjenja napona, ali da on ipak ostaje u granicama dozvoljenih vrijednosti odstupanja.



Slika 12. Vremenska promjena napona na pojedinim sabirnicama mikromreže pri naglom smanjenju distribuiranog generisanja u mikromreži

V. ANALIZA UGAONE STABILNOSTI U MIKROMREŽI

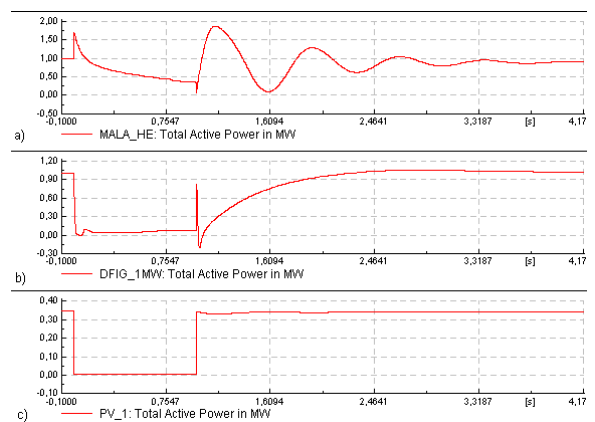
Ukoliko dođe do kratkog spoja u blizini distribuiranih generatora njihov rad je otežan i može doći do isključenja. Snaga koju generator predaje u mrežu srazmjerna je naponu na sabirnicama generatora, koji uslijed kvara pada na malu vrijednost, i on ne može predati snagu u mrežu iako pogonska mašina daje snagu. Zbog toga se mehanička snaga pogonske mašine troši na ubrzavanje generatora, što dovodi do povećanja brzine obrtanja iznad dozvoljene, pa reaguju zaštite od prekomjerne brzine. Vrijednost napona zavisi od udaljenosti mjesta kvara – bliži kvarovi dovode do većeg smanjenja napona. Prethodno razmatranje se odnosi na obrtne generatore, dok kod statičkih generatora ne postoji problem ugaone stabilnosti, ali se mogu isključiti zbog niskog napona na priključcima.

Posmatračemo ponašanje dvostrano napajanoj asinhronog generatora u vjetroelektrani, sinhronog generatora u maloj hidroelektrani i solarnih elektrana pri kvarovima na sabirnicama mikromreže i na sabirnicama na koje su pomenuti generatori priključeni. Ispitivaćemo sistem na troljni kratak spoj jer je najlakši za analizu, a istovremeno i najkritičniji slučaj pri proračunima tranzijentne stabilnosti [9].

a) Troljni kratak spoj na sabirnicama mikromreže sa vremenom trajanja od 1 s

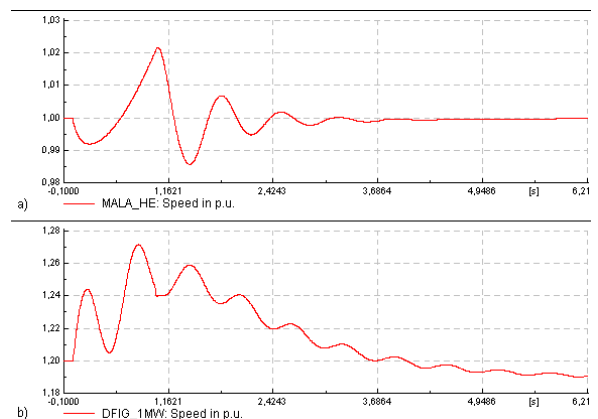
Na sl. 13 jasno se uočava trenutak kada dolazi do kratkog spoja u 0 s i kada dolazi do eliminacije kvara u 1 s. Kod PV elektrane se vidi da je promjena snage sa znatno manje oscilacija, dok se kod obrtnih mašina, vjetroelektrane i male hidroelektrane, odvijaju složeni elektromehanički prelazni procesi koji izazivaju oscilacije. Vidi se da i pri nerealno dugom trajanju kvara (kvarove relejna zaštita eliminiše znatno brže od definisanih) postoji zadovoljavajuća imunost

vjetroagregata na kvarove, jer se veličine vraćaju na početne vrijednosti. Šta će se desiti sa sinhronim generatorom u maloj hidroelektrani zavisi od podešavanja njegovih zaštitnih i regulacionih uređaja. Održanje stabilnosti generatora pri kvarovima je veoma bitno, jer se na taj način povećava pouzdanost napajanja potrošača električnom energijom. Takođe, može se računati na njih pri analizi sigurnosti.



Slika 13. Vremenska promjena aktivne snage a) male hidroelektrane, b) vjetroagregata i c) solarne elektrane pri trofaznom kvaru na sabirnicama mikromreže u trajanju od 1 s

Važno je analizirati i brzinu obrtanja generatora male hidroelektrane i vjetroagregata koje su prikazane na sl. 14.

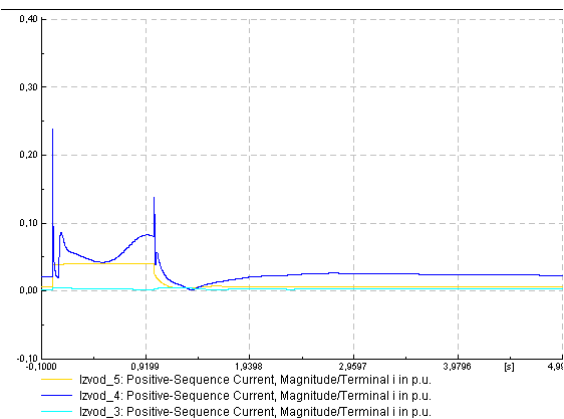


Slika 14. Vremenska promjena brzine obrtanja generatora a) male hidroelektrane i b) vjetrogeneratora pri trofaznom kvaru na sabirnicama mikromreže u trajanju od 1 s

Brzina sinhronog generatora u maloj hidroelektrani raste za vrijeme trajanja kvara, a zatim, nakon eliminacije kvara se oscilatorno prigušenim procesom vraća u inicijalno stanje. Neposredno nakon nastanka kratkog spoja dolazi do kratkotrajnog pada brzine obrtanja sinhronog generatora, a zatim ubrzanja. Ova pojava je posljedica udarnog kočionog momenta. U literaturi ova pojava je poznata kao "back swing". Brzina dvostrano napajane asinhronne mašine osciluje i oscilatorno-prigušenim procesom se postepeno vraća na početnu vrijednost što je rezultat spore regulacije.

Na sl. 15. prikazane su vremenske promjene struja pojedinih izvoda mikromreže neposredno ispred sabirnica

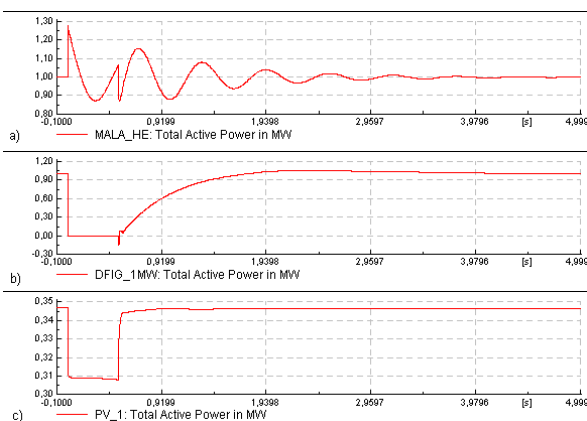
mikromreže na kojima je nastao kvar. Svijetlo plavom bojom prikazana je struja izvoda na kome se nalazi mala hidroelektrana, tamno plavom bojom struja izvoda na kome je vjetroelektrana, a žutom bojom izvoda na kome je solarna elektrana. Njihov vektorski zbir predstavlja ukupan doprinos mikromreže struji kvara.



Slika 15. Vremenska promjena struja pojedinih izvoda mikromreže pri trofaznom kvaru na sabirnicama mikromreže u trajanju od 1 s

b) Tropolni kratak spoj na sabirnicama vjetroelektrane sa vremenom trajanja od 0,5 s

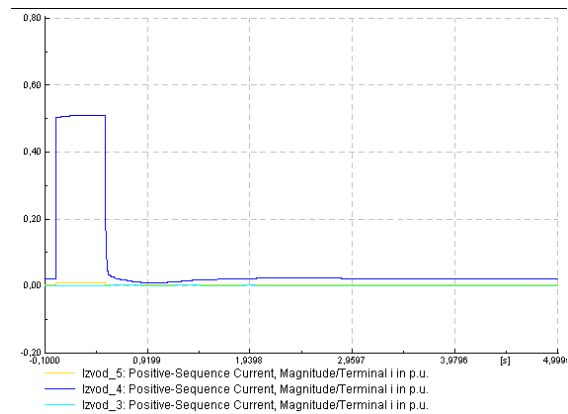
U slučaju kvara na sabirnicama vjetroelektrane u trajanju od 0,5 s ona će nakon eliminacije kvara nastaviti da injektira snagu u mrežu i napaja potrošače.



Slika 16. Vremenska promjena aktivne snage a) male hidroelektrane, b) vjetroagregata, c) solarne elektrane, pri trofaznom kvaru na sabirnicama vjetroelektrane u trajanju od 0,5 s

Sa sl. 16. vidimo da iako odata snaga vjetroagregata za vrijeme trajanja kvara pada na nulu, ona se nakon eliminacije kvara postepeno povećava i vraća na inicijalnu vrijednost prije kvara.

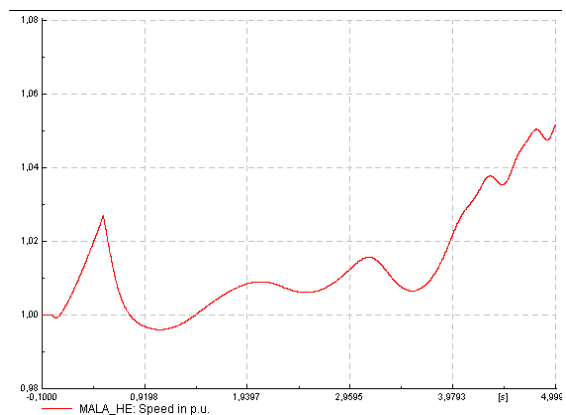
Na sl. 17. prikazane su vremenske promjene struja pojedinih izvoda mikromreže. Vektorska razlika struje izvoda sa vjetroelektranom (plava) i vektorskog zbira struja izvoda sa PV elektranom (žuta) i malom hidroelektranom (svijetlo plava) predstavlja struju kvara koja dolazi iz distributivne mreže. Doprinos distributivne mreže je dominantan.



Slika 17. Vremenska promjena struja pojedinih izvoda mikromreže pri trofaznom kvaru na sabirnicama vjetroelektrane u trajanju od 0,5 s

c) Tropolni kratak spoj na sabirnicama male hidroelektrane sa vremenom trajanja od 0,5 s

Za vjetroagregat nema problema što se tiče stabilnosti, dok na osnovu grafika promjene brzine obrtanja generatora male hidroelektrane sa sl. 18 vidimo da za nju to ne važi. Sinhroni generator gubi stabilnost i dolazi do njegovog isključenja zbog nedovoljne komponente prigušnog momenta.

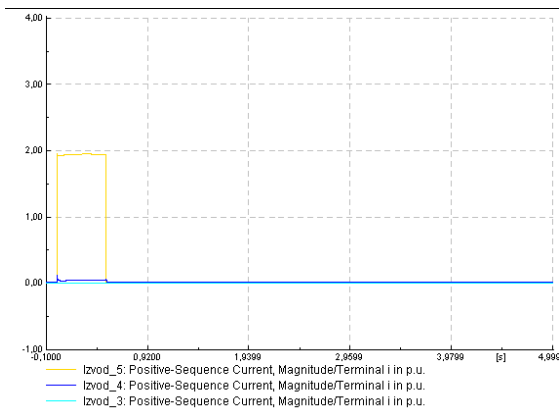


Slika 18. Vremenska promjena brzine obrtanja generatora male hidroelektrane pri trofaznom kvaru na sabirnicama male hidroelektrane u trajanju od 0,5 s

Kao i u prethodno analiziranom slučaju distributivna mreža daje dominantan doprinos struji kratkog spoja, dok se doprinos vjetrogeneratora i PV elektrane može zanemariti.

d) Tropolni kratak spoj na sabirnicama PV elektrane sa vremenom trajanja od 0,5 s

U ovom primjeru nema bitnih razlika u odnosu na sve prethodno rečeno. Kvar je sada električki bliži distributivnoj mreži i njen doprinos je u odnosu na prethodna dva slučaja znatno veći. To je posljedica manje impedanse petlje kvara nego u prethodnim slučajevima. Rezultat je prikazan na sl. 19.



Slika 19. Vremenska promjena struja pojedinih izvoda mikromreže pri trofaznom kvaru na sabirnicama PV elektrane u trajanju od 0,5 s

VI. ZAKLJUČAK

Prilikom modelovanja mikromreže u programskom paketu *DIgSILENT* izvršene su određene izmjene u odnosu na optimalni rezultat iz programskog paketa *HOMER*. Optimalno rješenje sadrži 5 vjetroagregata snage 330 kW. Međutim, pri modelovanju izabran je vjetroagregat snage 1 MW, a povećana je instalirana snaga solarnih elektrana i dodat je dizel agregat kao rezervno napajanje. Razlog za ove izmjene je isključivo mogućnost korišćenja gotovih modela implementiranih u programski paket *DIgSILENT*.

Rezultati analiza ukazuju da integracija distribuiranih generatora može značajno poboljšati naponske prilike u distributivnoj mreži (mikromreži) ukoliko postoji određeni nivo kontrolabilnosti. Kada su oni u pogonu ne postoji problem niskih napona na krajevima izvoda, dok se pojava previsokih napona sprečava dinamičkim apsorbovanjem reaktivne snage. Sa aspekta ugaone stabilnosti može se smatrati da svi priključeni generatori imaju zadovoljavajuću stabilnost. Najveći problemi se mogu javiti kod sinhronih mašina direktno priključenih na mrežu (malih hidroelektrana), jer je vrijeme reagovanja postojećih zaštita u distributivnoj mreži duže. Kao moguće rješenje ovog nedostatka nameće se ili nadogradnja ili zamjena zaštite na nekim mjestima u mreži.

Takođe, treba imati u vidu da na svim graficima u radu nije prikazan vremenski trenutak kada se sve vrijednosti vrate u početno stanje zbog bolje preglednosti grafika.

LITERATURA

- [1] V. Mijailović, "Distribuirani izvori energije-principi rada i eksploatacioni aspekti", Akademska misao, Beograd, 2011.
- [2] A. Keyhani, "Design of smart power grid renewable energy systems", Wiley-IEEE Press, July 2011.
- [3] HOMER Energy, www.homerenergy.com.
- [4] A national laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy "Getting Started Guide for HOMER Legacy (Version 2.68)", January 2011.
- [5] Ž. Đurišić, "Vjetroelektrane", Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za elektroenergetske sisteme, Beograd, 2013.
- [6] DIgSILENT Technical Documentation, "Doubly-Fed Induction Machine", DIgSILENT GmbH, Germany, 2007.
- [7] Ž. Đurišić, "Integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem", Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za elektroenergetske sisteme, Beograd, 2014.
- [8] M. Čalovoć, "Regulacija elektroenergetskih sistema", Tom 1, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997
- [9] N. Rajaković "Analiza elektroenergetskih sistema II", Akademska misao, Beograd, 2008.
- [10] D. Milošević, "Analiza stabilnosti vetroelektrana pri kvarovima u priključnoj mreži korišćenjem softvera DIgSILENT PowerFactory", Diplomski rad (Mentor Ž.Đurišić), Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2014.
- [11] I. Vidaković, "Analiza stabilnosti vetroelektrane priključene na radikalnu mrežu korišćenjem softvera DIgSILENT", Diplomski rad (Mentor Ž. Đurišić), Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2014.

ABSTRACT

In this paper was taken into account voltage and angle stability of microgrid with renewable energy sources. At first, microgrid is optimized in software HOMER and than model in software DIgSILENT was created. Created model was used for analysis. The main purpose of this paper is to determine how power disbalances and short circuits in microgrid affect its' stability.

VOLTAGE AND ANGLE STABILITY IN MICROGRID

Ivana Vidaković, Dejan Milošević