

Stabilizacija međuzonskih oscilacija elektroenergetskih sistema primenom regulatora na distribuiranim energetske resursima

PREDRAG Č. STEFANOV, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd
NIKOLA L. GEORGIJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Institut „Nikola Tesla“, Beograd

Stručni rad
UDC: 621.311:681.5

U radu se razmatra mogućnost povećanja prigušenja međuzonskih elektromehaničkih oscilacija regulacijom odate zbirne snage velikog broja distribuiranih energetske resursa mikromreža. Glavna ideja ovog rada je da se dodatnim regulatorima distribuiranih generatora i distribuiranih uređaja za skladištenje energije imitira konvencionalni stabilizator elektroenergetskog sistema, ali regulacijom aktivne izlazne snage, a ne napona, kao u standardnoj realizaciji stabilizatora u sistemima za regulaciju pobude generatora. Sinteza regulatora za stabilizaciju je testirana na četvoromašinskom dvozonskom sistemu, sa inverterom povezanim mikromrežama u svakoj oblasti. Simulacije izvršene na ovom test sistemu pokazuju da predloženi regulator omogućava značajnu stabilizaciju sistema povećanjem prigušenja razmatranih modova elektromehaničkih oscilacija.

Ključne reči: međuzonske oscilacije; distribuirani izvori energije; mikromreža, stabilizator sistema

1. UVOD

U elektroenergetskim interkonekcijama mogu se pojaviti elektromehaničke oscilacije između velikih, slabo povezanih područja, kada generatori različitih grupa osciluju jedni u odnosu na druge. Opseg učestanosti ovih međuzonskih oscilacija je obično od 0,2 Hz do 1,0 Hz, dok njihovo prigušenje zavisi od parametara mreže, kao i nivoa prenosa snage. U slučaju povećanja snage prenosa, nivo prigušenja oscilacija se smanjuje, što može dovesti do raspirujućih oscilacija i raspada sistema.

Uvođenjem deregulacije elektroenergetskih sistema i otvaranjem tržišta električne energije povećavaju se zahtevi za efikasnim korišćenjem prenosne mreže do krajnjih mogućih granica. Takvim korišćenjem mreže, čiji je osnovni cilj obezbeđivanje realizacije svih ugovorenih transakcija, dolazi do opasnosti narušavanja stabilnosti sistema. Zbog toga, povećavanje kontrolabilnosti u sistemu i obezbeđivanje prenosa povećanih tokova snaga ostaje i dalje značajan zadatak i veoma važna tema istraživanja čijim rešavanjem će se omogućiti stabilan fleksibilan rad savremenih elekt-

roenergetskih sistema.

Mikromreže (MM) predstavljaju novi koncept mreža kojim se obezbeđuje integracija distribuiranih generatora (DG) u elektroenergetski sistem (EES) uz povećanje pouzdanosti njegovog rada. MM su niskonaponske distributivne mreže koje se sastoje od distribuiranih energetske resursa (DER) i kontrolabilnih i nekontrolabilnih električnih opterećenja. DER, koji obuhvataju distribuirane generatore (DG) različitih tipova i distribuirane uređaje za skladištenje energije (DS) su uglavnom povezani na MM elektronskim konvertorima.

Ponašanje ovih izvora je zbog toga drugačije od konvencionalnih rotacionih mašina. Znatno veća fleksibilnost njihovog rada, brzina vremenskog odziva i zanemarljiva fizička inercija dovode do različitih varijacija frekvencije i napona MM. Stabilnost pri malim poremećajima MM u autonomnom režimu rada je detaljno istraživana [1-3], ali samo mali deo istraživanja se odnosi na uticaj povezanih MM na mrežu i na globalnu stabilnost elektroenergetskog sistema.

Ovaj rad daje razmatranja na ovu temu, istražujući stabilnost sistema kada je veliki broj MM priključen na električnu mrežu. Pošto su MM u intenzivnom razvoju, sa težnjom da dovedu DG u glavne tokove razvoja sistema, očekuje se u skorjoj budućnosti njihova zastupljenost koja će zahtevati da budu tretirane kao mali

Adresa autora: doc. dr Predrag Stefanov, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

Rad primljen: 19.05.2014.

Rad prihvaćen: 22.09.2014.

izvori energije ali sa velikim uticajem na ukupnu dinamiku sistema.

U cilju procene dinamičke interakcije MM i javnih elektroenergetskih mreža, u ovom radu je dat kratak prikaz standardne regulacije invertora MM. U radu su dalje istraživane mogućnosti obezbeđivanja dodatnog prigušenja karakterističnih modova elektromehaničkih oscilacija sistema modulacijom odate snage MM i predloženi odgovarajući regulator za stabilizaciju sistema.

U prikazanom postupku, dodatno prigušenje se postiže regulacijom injektirane aktivne snage u tački povezivanja MM na javnu mrežu. Stabilizaciona petlja se dodaje na invertore za povezivanje DER, a parametri regulatora se podešavaju tako da se maksimizuje prigušenje modova međuzonskih oscilacija. U predloženom rešenju se koriste lokalna merenja u tački priključenja, tj. stabilizaciona petlja se zatvara po merenju lokalne učestanosti.

Za test primer korišćen je modifikovani četvoromašinski dvozonski model sistema [6]. Analiza osetljivosti i definisanje optimalnih parametara regulatora je izvršeno na osnovu proračuna faktora participacije linearizovanog modela sistema, dok su proračuni na nelinearnom modelu sistema u programu MATLAB/Simulink korišćeni za simulacije u vremenskom domenu.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način. Prvo, u delu II, prikazana su dva standardna tipa regulacije invertora za povezivanje DER i MM. U istom delu izveden je i verifikovan generički model za studije stabilnosti elektroenergetskog sistema. Dalje, u III delu, analizom linearizovanog modela sistema istražene su dinamičke karakteristike ponašanja sistema na osnovu kojih su određeni parametri predloženog kontrolera, dok je u IV delu, analizom odziva sistema pri velikim poremećajima potvrđena njegova efikasnost. Zaključak je dat u V delu rada.

2. MODEL MIKROMREŽE

2.1. Detaljan model

Model MM razmatran u ovom radu formiran je od modela invertorom povezanih distribuiranih generatorskih jedinica (DG) i uređaja za skladištenje energije (DS) kojima se napaja opterećenje tipa impedanse, preko pasivne mreže sastavljene od elementarnih RLC grana [4]. U [1] je ukazano na potrebu definisanja dve različite regulacione šeme, što je detaljno razmatrano i u ovom radu. Ove dve regulacione šeme su: naponska regulacija (V_f) i regulacija struja (ili snaga) (PQ).

U V_f regulacionoj šemi se koriste tri regulacione konture: za regulaciju raspodele aktivne i reaktivne snage (slika 1) i naponska i strujna kontura (slika 2a) [2]. Raspodela snaga V_f metode se zasniva na imitiranju statičkih karakteristika napona i učestanosti

klasičnih izvora sa podešenim statizmom kojim se određuje učešće u raspodeli snaga proizvodnih kapaciteta u paralelnom radu.

Ove virtuelne statičke karakteristike sa statizmom primenjene za raspodelu snaga invertorski povezanih jedinica formirane su uvođenjem relacija

$$\omega = \omega^* - mP ; \quad (1)$$

$$V_{od}^{ref} = V_{od}^* - nQ \quad (2)$$

U (1) i (2), sa ω^* i ω su označene nominalna i proračunata referentna ugaona učestanost na krajevima invertorskih jedinica. V_{od} označava komponentu napona u d osi (usvojeno je da je ova osa kolinearna sa fazorom napona direktnog redosleda), dok superskript $*$ i indeks ref označavaju nominalnu i referentnu vrednost.

Vrednost ω se menja u zavisnosti od veličine nagiba karakteristike (m). Raspodela reaktivne snage između invertora je određena uvođenjem nagiba (n) naponske karakteristike (2). Vrednosti n i m su striktno pozitivne. P i Q su srednje vrednosti aktivne i reaktivne snage, dobijene filtriranjem trenutnih aktivnih (p) i reaktivnih (q) snaga pomoću niskopropusnog filtra (3) sa graničnom učestanošću ω_c , u cilju obezbeđenja boljeg kvaliteta ulaznih signala regulatora i same regulacije.

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} p, \quad Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} q \quad (3)$$

Kao u [3], dinamika naponske i strujne konture se modeluje izrazima:

$$V_d - V_{od} = I_d (R_f + sL_f) - \omega L_f I_q ; \quad (4)$$

$$V_q - V_{oq} = I_q (R_f + sL_f) + \omega L_f I_d ; \quad (5)$$

$$I_d - I_{od} = sC_f V_{od} - \omega V_{oq} C_f ; \quad (6)$$

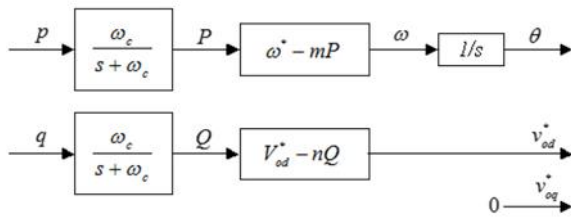
$$I_q - I_{oq} = sC_f V_{oq} + \omega V_{od} C_f \quad (7)$$

V_f regulacija se najčešće koristi u autonomnom modu, mada se prema [1] može koristiti i u režimu kada je MM povezana na javnu mrežu. Kada je DG priključena na čvrstu mrežu, vrednosti učestanosti ω_m i napona V_m u tački priključenja su nametnuti od strane mreže [1].

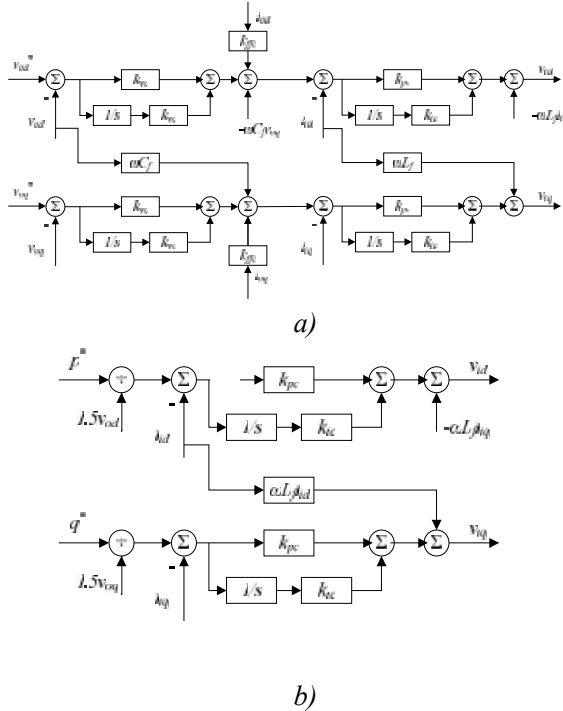
U ovom slučaju, prema [1], željene izlazne aktivne i reaktivne snage (P_I i Q_I) DG se mogu podesiti prepodešavanjem vrednosti ω^* i V_{od1}^{ref} iz (1) i (2), prema izrazima:

$$\omega_1^* = \omega_m + mP_I ; \quad (8)$$

$$V_{od1}^{ref} = V_m + nQ_I \quad (9)$$



Slika 1 – Regulator snage Vf regulacione šeme [2]



Slika 2 – Vf i PQ regulacione šeme: a) Naponska i strujna kontura Vf regulacione šeme; b) Kontura za regulaciju raspodele aktivne i reaktivne snage PQ regulacione šeme [4]

PQ regulacija se koristi u režimu kada je DG priključen na javnu mrežu. U PQ regulaciji se primenjuje samo strujna regulaciona kontura (slika 2b). Komponenta struje po d osi se koristi za regulaciju aktivne snage, dok se q komponenta koristi za regulaciju reaktivne snage. Detekcija faze i frekvencije napona mreže se postiže primenom kola za detekciju faze signala (PLL). Sinhronizacija preko PLL-a se koristi samo u PQ regulaciji, dok se u Vf regulaciji faza napona ne detektuje, nego se “zadaje” preko izlaza iz regulatora snage (ugao θ). Na slici 2, v_{id} i v_{iq} su referentne vrednosti napona na invertoru u dq koordinatnom sistemu, kojima se generiše odgovarajuće PWM upravljanje.

Kada regulator radi u režimu PQ regulacije, dodatno prigušenje karakterističnih modova elektromehaničkih oscilacija sistema može se postići variranjem signala referentne struje d-ose, kojim se određuje aktivna snaga konvertora, dodavanjem izlaznog

signala kompenzatora. Lokalno odstupanje učestanosti $\Delta\omega$, koje se dobija iz PLL-a, uzima se kao ulazni signal za kompenzator. U ovom radu je predložen kompenzator sličan višeopsežnom stabilizatoru EES-a [5], sa razlikom da se ovde koristi samo jedan frekvencijski opseg, koji odgovara kritičnom modu oscilacija. Prema [5], vremenske konstante i pojačanja jednog opsega diferencijalnog filtera (slika 3) se izvide pomoću jednostavnih jednačina:

$$K_1 = K_2 = \frac{R^2 + R}{R^2 - 2R + 1}; \quad (10)$$

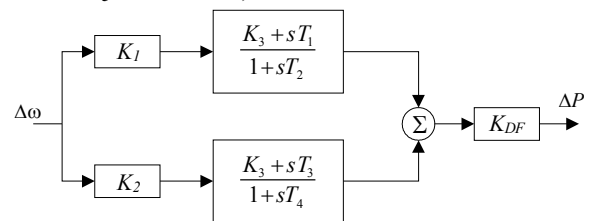
$$K_2 = K_3 = 1; \quad (11)$$

$$T_2 = T_3 = \frac{1}{2\pi F\sqrt{R}}; \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{T_2}{R}; \quad (13)$$

$$T_4 = T_3 \cdot R \quad (14)$$

Centralne vremenske konstante T_2 i T_3 , su direktno izvedene u zavisnosti od centralne učestanosti filtera (F), dok se simetrične vremenske konstante T_1 i T_4 proračunavaju na osnovu konstantnog odnosa R kojim se zadaje željena selektivnost diferencijalnog filtera (u radu usvojeno $R = 0,5$).



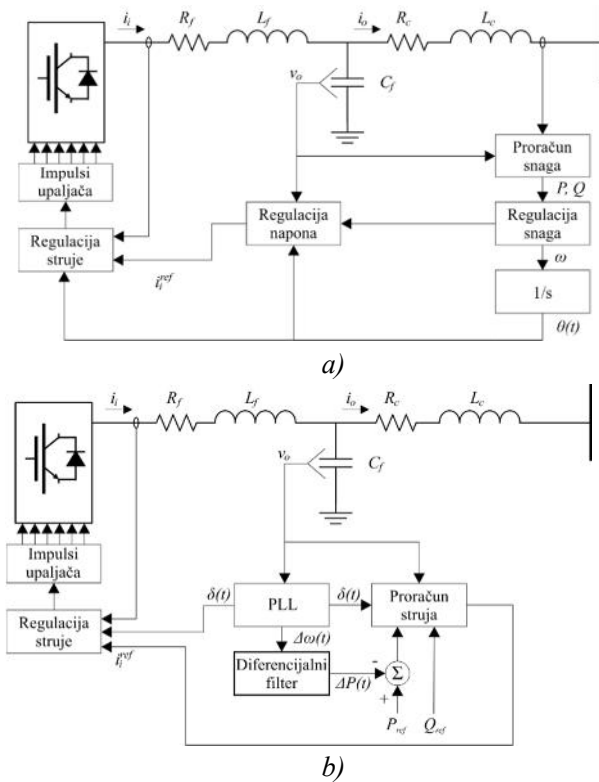
Slika 3 – Diferencijalni filter propusnog opsega

Strukturni dijagram razmatranog sistema i sistema regulacije pojedinačnog DER sa Vf i PQ tipovima regulacije prikazani su na slici 4, dok je na slici 5 prikazan detaljni model MM razmatran u ovom radu, gde su parametri mreže dati na samoj slici, dok su ostali parametri dati u Dodatku.

2.2. Generički model PQ regulacije za analizu stabilnosti sistema

Analiza globalne stabilnosti sistema razmatranjem detaljnih modela MM u povezanom sistemu i za današnje računarske mogućnosti predstavlja veoma zahtevan zadatak. Zbog toga se u analizama ovog tipa najčešće koriste ekvivalenti MM, čiji je osnovni zadatak da na zadovoljavajući način, zadržavanjem karakteristika originalnog sistema, omoguće pojednostavljene proračune. Pretpostavljeni ekvivalentni model MM se sastoji od ekvivalentnog konvertorom povezanog DER i paralelno povezanog opterećenja modelovanog konstantnom impedansom (slika 6). Aktivna i reaktivna

snaga su izlazi, a napon i frekvencija, mereni u tački priključenja MM, ulazi ekvivalentnog modela [7].

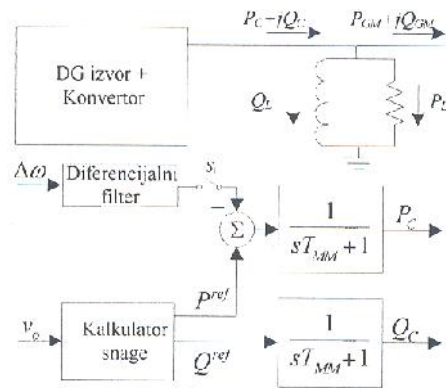


Slika 4 – Struktura distribuiranog izvora sa a) Vf [3] i b) PQ regulacionom šemom

U pojednostavljenom modelu sa slike 6, pretpostavlja se da unutrašnje strujne i naponske konture regulatora invertora brzo i precizno prate aktuelnu referencu i da nemaju uticaja na ukupnu stabilnost sistema. Zbog toga su, zajedno sa PLL, aproksimirane elementom kašnjenja prvog reda sa vremenskom konstantom T_{MM} .

Za procenu parametara ekvivalentnog modela mikromreže sa slike 6 korišćen je Levenberg-Marquardt algoritam [8]. Ovaj algoritam se koristi za rešavanje problema nelinearnih najmanjih kvadrata iterativnom

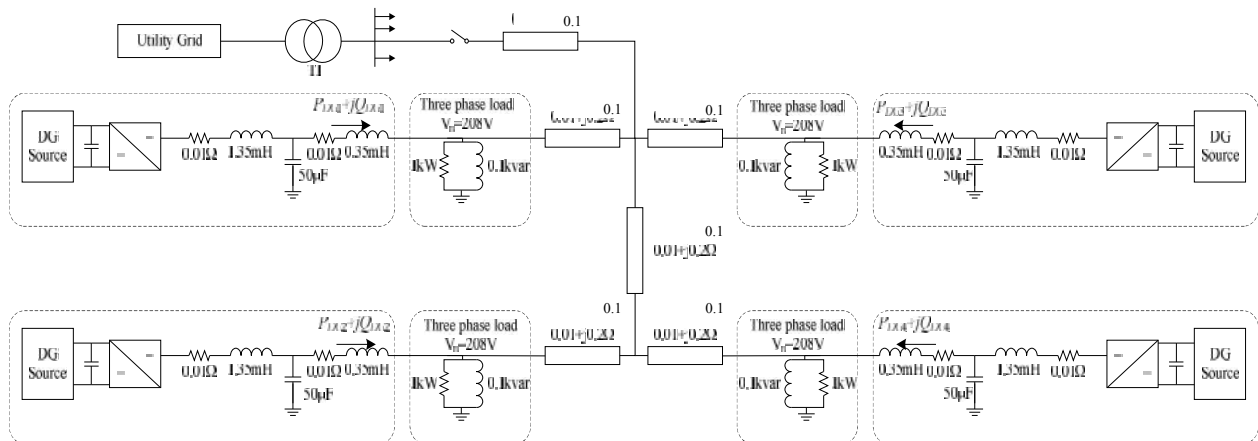
procedurom, na sličan način kao i Gaus-Njutnov algoritam i algoritam najstrmijeg pada. Svi ovi algoritmi, detaljno opisani u [8], traže zadavanje početnog rešenja, a zatim rešavaju problem rešavanjem niza problema linearnih najmanjih kvadrata dok se ne dobije zadovoljavajuća tačnost. Primenom Levenberg-Marquardt algoritama dostupnog u Matlab System Identification Toolbox-u za rešavanje problema male dimenzionalnosti kakav je ovaj, izbegnuto je proračunavanje Jakobijana nelinearne funkcije u procesu linearizacije, već se koristi njegova aproksimacija konačnim razlikama. Na taj način je omogućeno da se generički model definiše kao nepoznati nelinearni model, kome se menjaju parametri dok mu se odziv ne poklopi sa željenim.



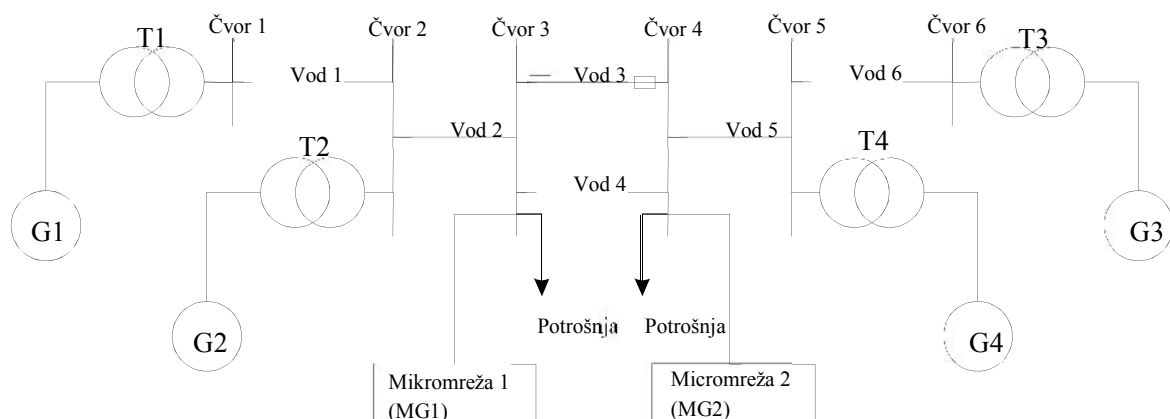
Slika 6 - Dijagram ekvivalentnog modela mikromreže

Pri određivanju parametara generičkog modela MM kao kriterijumska funkcija za minimizaciju, korišćena je suma kvadrata odstupanja između tačaka odziva detaljno modelovane MM (slika 5) i generičkog modela (slika 6) priključenih u nekom čvoru elektroenergetskog sistema, pri izabranim poremećajima u sistemu.

Kao test sistem razmatran je Kundurov četvoro-mašinski dvoznoski sistem [5], pri čemu je pretpostavljeno priključivanje MM u čvorovima 4 i 5, kao što je prikazano na slici 7.

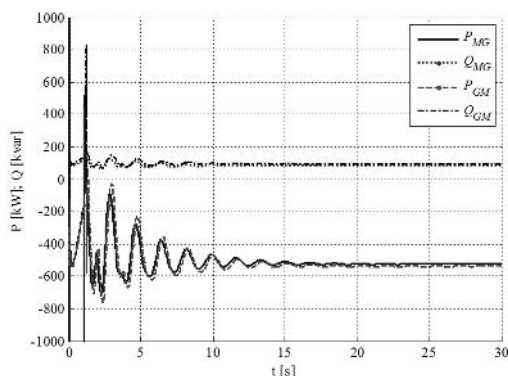


Slika 5 – Šematski dijagram primenjene mikromreže



Slika 7 – Kundurov četvoromašinski dvozonski test sistem sa mikromrežama u svakoj zoni

Dobijene vrednosti traženih pet parametara ekvivalentnog modela sa slike 6, na osnovu razmatranja obe tačke priključivanja i većeg broja poremećaja (promene opterećenja, promene topologije, kratki spojevi), date su u Dodatku. Odzivi aktivne snage P i reaktivne snage Q MM prikazani na slici 8 za slučaj priključivanja MM u čvoru 4, a pri pojavi bliskog trofaznog kratakog spoja na vodu 3 koji se isključuje posle 0,13 sekundi isključenjem prekidača sa obe strane voda, ukazuju na dobro slaganje odziva detaljnog modela MM i ekvivalenta dobijenog ovom procedurom i pri ovim jako poremećenim uslovima rada MM.



Slika 8 - Dinamički odzivi aktivne P i reaktivne snage Q detaljno modelovane mikromreže (MG u sabskriptu) i odzivi ekvivalentnog generičkog modela (GM).

3. ANALIZA STABILNOSTI

Za analizu stabilnosti korišćen je isti četvoromašinski dvozonski test sistem [5], pri čemu su klasični stabilizatori na generatorima isključeni a dodate mikromreže u svakoj oblasti, kao na slici 7. Generički model je korišćen za predstavljanje velikog broja MM koji rade paralelno u svakom od navedenih čvorova.

Generički modeli su uključeni sa nultom aktivnom i reaktivnom snagom razmene u tačkama njihovog

priključivanja u početnom stacionarnom stanju (usvojena je pretpostavka izbalansirane proizvodnje i potrošnje u svakoj MM). Ovakav izbor početnog uslova omogućava da se N mikromreža priključenih u istoj tački predstavi jednim generičkim modelom, takvim da je izlazna snaga modela konvertora pomnožena, a otočna impedansa podeljena sa brojem N . Pretpostavljeno je da je $N=10\,000$, tj. da svaka od mikromreža sa slike 7 sadrži po 10 000 mikromreža sa slike 6.

Za ovako definisani početni radni režim, bez regulatora za stabilizaciju sistema, ovaj sistem je nestabilan, pri čemu postoje tri dominantna moda oscilacija [5]:

Međuzonski mod ($f_n = 0,64\text{Hz}$, $\zeta = -0,026$)

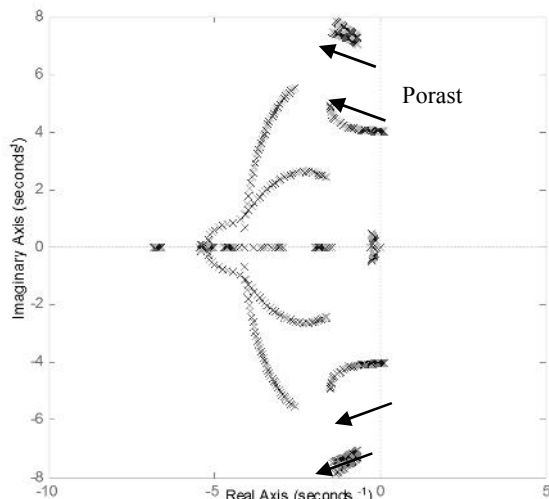
Lokalni mod zone 1 ($f_n = 1,12\text{Hz}$, $\zeta = 0,08$)

Lokalni mod zone 2 ($f_n = 1,16\text{Hz}$, $\zeta = 0,08$).

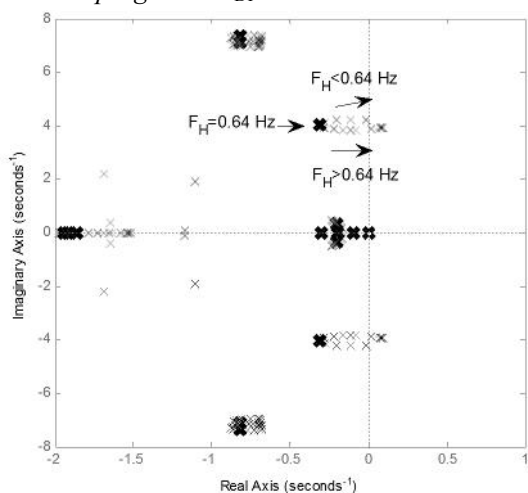
Diferencijalni filter, sa parametrima datim u Dodatku, dobijenim podešavanjem opsega filtera prema učestanosti međuzonskih oscilacija ($f_n = 0,64\text{Hz}$) je aktiviran uključivanjem S1 sa slike 6. Slika 9, na kojoj je prikazano geometrijsko mesto korena sistema, pokazuje da povećanje pojačanja diferencijalnog filtra K_{DF} od 0 do $4e05$ rezultuje u pomeranje nestabilnog para sopstvenih vrednosti iz desne poluravnine na levu, „stabilnu“ poluravninu, čime odgovarajući oscilatorni mod međuzonskih oscilacija, koji uzrokuje oscilovanje generatora zone 1 u odnosu na generatore zone 2, postaje stabilan.

Na slici 10 prikazan je položaj karakterističnih korena sistema u funkciji promene parametra diferencijalnog filtra F_H . Najveće prigušenje kritičnog oscilatornog moda se dobija upravo za $F_H=0,64\text{Hz}$, što opravdava sintezu regulatora postupkom sa zanemarenjem faznog kašnjenja generičkog modela MM sa inverterima u PQ režimu regulacije (element kašnjenja sa vremenskom konstantom T_{MM} na frekvenciji $0,64\text{Hz}$ unosi vrlo malo fazno kašnjenje od $2,4^\circ$).

Participacioni faktori dominantnih promenljivih stanja u karakterističnom modu međuzonskih oscilacija (PF) koji definišu učešće promenljivih stanja u karakterističnim modovima oscilacija [6]. Tabela 1 prikazuje najvažnije promenljive stanja i njihovu participaciju u inicijalno nestabilnom međuzonskom modu, pri čemu je usvojeno da je pojačanje $K_{DF} = 2e05$.



Slika 9 - Geometrijsko mesto korena sistema u funkciji promene pojačanja diferencijalnog filtra K_{DF} , u opsegu $0 < K_{DF} < 4e05$



Slika 10 – Promena položaja karakterističnih korena sistema u zavisnosti od promene parametra diferencijalnog filtra F_H , u opsegu $0,2 \text{ Hz} < F_H < 8 \text{ Hz}$. Koreni koji odgovaraju $F_H=0,64 \text{ Hz}$ su podebljani

Proračun PF ukazuje da diferencijalni filter mikromreže 2 ima veći uticaj na kritični par sopstvenih vrednosti, odnosno da čvoru 4 treba dati prednost za stabilizaciju na osnovu stabilizatora mikromreže. Treba takođe primetiti da je uticaj diferencijalnih filtera mnogo jači od uticaja unutrašnjih regulatora, što potvrđuje opravdanost njihovog pojednostavljenja.

Tabela 1. Participacioni faktori dominantnih promenljivih stanja u karakterističnom modu međuzonskih oscilacija

No	Promenljive stanja	PF kritičnog moda
1	G3 – ugaona brzina	0,1406
2	G3 – ugao snage	0,1359
3	G4 – ugao snage	0,1295
4	G4 – ugaona brzina	0,1002
5	G1 – ugaona brzina	0,0812
6	G1 – ugao snage	0,0786
7	MG 2 – dif. filter stanje 1	0,0483
8	G2 – ugao snage	0,0465
9	MG 2 – dif. filter stanje 2	0,0455
10	G2 – ugaona brzina	0,0370
11	MG 1 – dif. filter stanje 1	0,0164
12	MG 1 – dif. filter stanje 2	0,0155
⋮	⋮	⋮
26	MG 2 – strujni regulator	0,0036
32	MG 1 – strujni regulator	0,0012

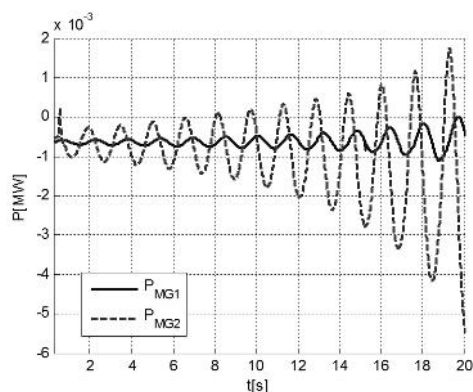
4. DINAMIČKE SIMULACIJE

Za dinamičke simulacije korišćen je model sistema prikazanog na slici 7, sa MM modelovanim prema slikama 5 i 6. U prvoj simulaciji, razmatran je slučaj sa po jednom detaljno modelovanim MM (sa slike 5) sa PQ i Vf regulacijom bez predloženog regulatora za stabilizaciju sistema. PQ regulacija je primenjena na svim inverterima mikromreže MG1, dok je Vf regulacija pretpostavljena na inverterima u MG2. Poremećaj u sistemu je modelovan isključivanjem i uključivanjem prekidača na vodu 3 u trenucima 8/60 s i 12/60 s respektivno.

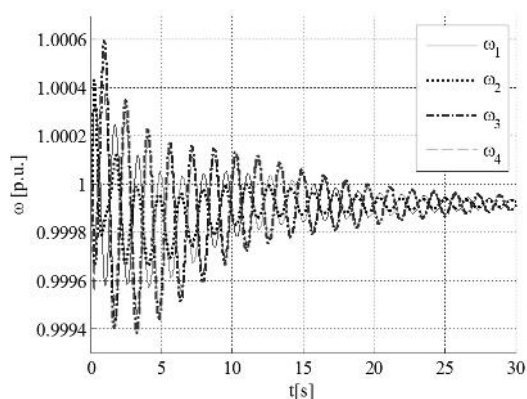
Promene aktivnih snaga na krajevima mikromreža simuliranjem navedenog poremećaja u sistemu sa detaljno modelovanim mikromrežama sa PQ i Vf regulacijom prikazane na slici 11, ukazuju na neprigušene oscilacije koje vode ka nestabilnom radu ovih mreža i pored velike brzine njihove regulacije. Šta više, nekorektan izbor nagiba karakteristika aktivne (m) i reaktivne (n) snage invertora regulisanih Vf regulatorima, može dodatno da destabilizuje njihov rad.

Predloženi PQ regulator sa diferencijalnim filtrom, implementiran na generičkom modelu koji predstavlja $N=10\,000$ MM u svakoj oblasti, testiran je kroz simulacije sa istim poremećajem. Prikazani odzivi na slikama 12–14 ukazuju na zadovoljavajuće prigušenje. Takođe je interesantno primetiti da je vršno aktivno injektiranje (slika 13), koje je angažovano od

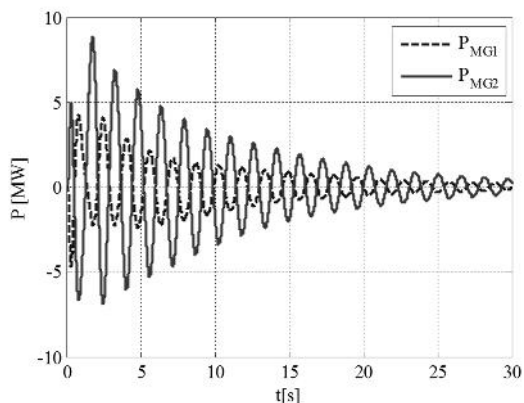
strane DER malo u odnosu na promenu snage klasičnih generatora sistema (slika 14), ali je dovoljno da značajno poboljša ukupnu stabilnost sistema. Sa slike 13 se vidi da ukupna snaga svih MM iz jedne zone ne prelazi 10 MW. Kako je uzeto $N=10\ 000$ MM po zoni, zaključuje se da su varijacije snage manje od 1 kW između distribuiranih energetskih resursa jedne MM i ostatka EESa dovoljne za prigušenje međuzonskih oscilatornih modova.



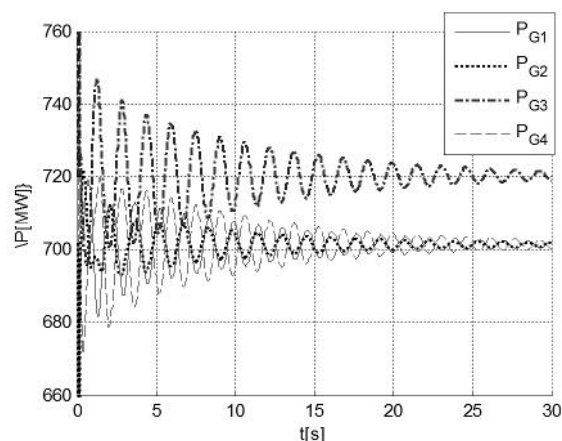
Slika 11 – Odzivi aktivne snage detaljnog modela mikromreže sa PQ i Vf regulacijom



Slika 12 – Odzivi ugaonih brzina generatora G1, G2, G3 i G4 u relativnim jedinicama u režimu sa uključenim regulatorima na DER



Slika 13 – Odzivi ukupnih aktivnih snaga ekvivalenata mikromreža priključenih na sistem



Slika 14 – Odzivi električnih snaga generatora G1, G2, G3 i G4 na delovanje prekidača postavljenih na vodu 3 sa slike 7

5. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati pokazuju da se promenom snage distribuiranih energetskih resursa primenom predloženog regulatora može povećati prigušenje kritičnih modova međuzonskih oscilacija. Takođe, pokazano je da ovakva stabilizacija može da se obezbedi brзом direktnom regulacijom snage ovakvih, praktično bezinercionih sistema.

Dobrim izborom parametara regulatora značajno povećanje stabilnosti sistema može se obezbediti i sa relativno malim regulacionim zahtevima. Ipak, treba naglasiti da se ovi zahtevi mogu obezbediti jedino priključivanjem velikog broja pojedinačnih distribuiranih resursa sa zadovoljavajućim stepenom regulacione rezerve na izvorima ili uređajima za storniranje energije mikromreža, kao što je u prikazanom radu pretpostavljeno. Daljim razmatranjima moraju se obuhvatiti stvarna ograničenja mogućnosti izvora, kao i određivanje potrebne veličine uređaja za storniranje energije i adekvatne raspodele regulacionog signala na pojedinačne uređaje, koje će obezbediti efikasno korišćenje potencijala i brze regulacije invertorski povezanih sistema svih distribuiranih energetskih resursa.

LITERATURA

- [1] J. Lopes, C. L. Moreira and A. G. Madureira "Defining control strategies for micro grids islanded operation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp.916 -924, 2006.
- [2] N. Pogaku, M. Prodanovic and T. C. Green "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp.613 -625, 2007.
- [3] A. Radwan and Y. Mohamed "Modeling, analysis, and stabilization of converter-fed ac microgrids with

- high penetration of converter-interfaced loads", IEEE Trans. Smart Grids, vol. 3, no. 3, pp.1213 - 1225, 2012.
- [4] G. Diaz, C. Gonzaalez-Moran and J. Gomez-Alexandre "Complex-valued state matrices for simple representation of large autonomous microgrids supplied by PQ and V f generation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 4, pp.1720 -1730, 2009.
- [5] R. Grondin, I. Kamwa, G. Trudel, L. Gerin-Lajoie and J. Taborda "Modeling and closed-loop validation of a new PSS concept, the multi-band PSS" in PES Gen. Meeting, 2003, IEEE (Vol. 3). IEEE.
- [6] P. Kundur, "Power system stability and control", Tata McGraw-Hill Education, 1994.
- [7] S. M. Zali, J. V. Milanovic "Generic Model of Active Distribution Network for Large Power System Stability Studies", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3126 – 3133, 2013.
- [8] W. Sun and Y.-X. Yuan "Optimization Theory and Methods: Nonlinear Programming", Springer-Verlag, 2006.
- [9] I. C. Ngamroo, C. S. A. Nanda, S. Dechanupaprittha, M. Watanabe and Y. Mitani "A robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillations based on wide area synchronized phasor measurements", Elect. Power Syst. Res., vol. 79, no. 12, pp.1738 -1749, 2009.

DODATAK

Parametri mikromreže:

Regulator snage: $m=1e-3$, $n=1,3e-3$, $\omega_c=34,14$.

Regulator napona: $k_{vp}=0,165$, $k_{vi}=400$.

Strujni regulator: $k_{cp}=50$, $k_{ci}=1500$, $k_{ffe}=0,75$.

Diferencijalni filter: $R=0,5$; $F=0,64\text{Hz}$.

Inicijalno stanje mikromreže: $P_{DG1}=1$ kW, $Q_{DG1}=0,5$ kvar; $P_{DG2}=0,5$ kW, $Q_{DG2}=0$ kvar; $P_{DG3}=1$ kW, $Q_{DG3}=0$ kvar; $P_{DG4}=1$ kW, $Q_{DG4}=0$ kvar

Parametri generičkog modela:

Snaga distribuiranog izvora: $P_c=3,511$ kW, $Q_c=0,490$ kvar.

Parametri opterećenja: $P_L= 3,988$ kW,

$Q_L= 0,398$ kvar.

Vremenska konstanta: $T_{MM}= 0,01065$ s.

SUMMARY

POWER SYSTEM STABILIZERS BASED ON DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES FOR DAMPING OF INTER-AREA OSCILLATIONS

This paper deals with inter-area power oscillations damping enhancement by distributed energy resources contained in typical microgrid. Main idea behind this work is to use distributed generation and distributed storage, such as battery energy storage to mimic conventional power system stabilizer, but with regulating active power output, rather than reactive power, as in standard power system stabilizer realization. The analysis of the small signal stability is established for four-machine, two-area system, with inverter based microgrids in each area. Dynamic simulation results are included in this work and they show that proposed controller provides additional damping effect to this test system.

Key words: inter-area oscillations, distributed energy resources, microgrid, power system stabilizer