

# Primena balansne impedanse za održanje stabilnosti distribuiranih generatora

Dejan Milošević, Ana Đorđević

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Global Substation Solutions d.o.o.

Beograd, Srbija

[dejan.milosevic@gss.eu.com](mailto:dejan.milosevic@gss.eu.com), [ana.djordjevic@gss.eu.com](mailto:ana.djordjevic@gss.eu.com)

**Sažetak** — Tranzijentni procesi koji nastaju kao posledica kvarova u priključnoj mreži dovode do opasnih radnih režima koji mogu uzrokovati gubitak stabilnosti distribuiranih generatora. U ovom radu je analizirano korišćenje balansne impedanse koja privremeno ostaje sa sinhronim generatorom u ostrvskom radu tokom prolaznih kvarova i omogućava ponovnu sinhronizaciju generatora na mrežu odmah nakon eliminacije kvara. Kao dodatna upravljačka promenljiva je uvedena brzina generatora u pobudni sistem, kako bi se omogućila i kontrola frekvencije generatora. Rad opisanog sistema je ispitan formiranjem modela i dinamičkim simulacijama u softveru DiGSILENT PowerFactory.

**Ključne reči** – tranzijentni proces; stabilnost; distribuirani generatori; balansna impedansa; prolazni kvarovi; kontrola frekvencije.

## I. UVOD

Distribuirani izvori, kao što su male hidroelektrane, mikroturbine i elektrane sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem se uglavnom realizuju sa tradicionalnim sinhronim generatorima koji su direktno priključeni na distributivnu mrežu. Sa priključenjem ovakvih distribuiranih izvora na srednjenaponsku mrežu postaje aktuelno pitanje održanja stabilnosti sinhronih generatora pri kvarovima u priključnoj mreži. U srednjenaponskim distributivnim mrežama široko se primenjuju rekloseri, koji imaju ulogu sprovođenja sistema automatskog ponovnog uključanja (APU) koje omogućava eliminaciju prolaznih kvarova. Primena balansnih otpornika u specijalnim zaštitnim sistemima za održanje stabilnosti u visokonaponskim mrežama, kao i za prigušenje oscilacija je obrađena u radovima [1] i [2], respektivno.

Kod delovanja APU-a, usled privremenog isključenja dela distributivne mreže u kojoj se desio kvar, može doći do ostrvskog rada distribuiranog generatora, što obično dovodi do zaustavljanja generatora zbog nemogućnosti plasmana proizvedene energije, ali i tranzijenata koji mogu dovesti do povećanja brzine mašine i prenapona na priključcima generatora. Prolazni kvarovi koji izazivaju delovanje APU-a su relativno česti, tako da broj ispada generatora može biti veliki i samim tim značajno smanjena predata energija u mrežu. Da bi se eliminisale ove negativne tehničke i ekonomske posledice mora se obezbediti stabilizacija rada generatora tokom prelaznog procesa, a jedno jednostavno i praktično rešenje za ovaj problem je predstavljeno u ovom radu. Optimalno APU sa

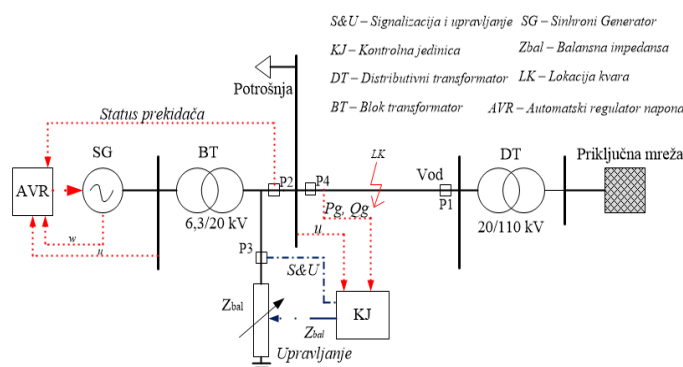
fuzzy kontrolisanim balansnim otpornicima je opisano u radu [3], dok je unapređenje stabilnosti velikih asinhronih generatora u vetroelektranama opisano u radovima [4]-[5].

Problem stabilnosti malih generatora tokom kratkog ostrvskog rada uzrokovanog kvarom nije dovoljno analizirano u literaturi. Za detekciju ostrvskog rada je razvijeno više algoritama, od kojih su neki šire poznati [6], dok se i dalje istražuju i razvijaju nove tehnike za ovu svrhu [7]-[10]. Najčešći razlog za gubitak mreže je kratak spoj koji uzrokuje rad relejne zaštite sa ili bez APU-a. Zaštita je obično u napojnim VN/SN trafostanicama ili se realizuje primenom reklozera u srednjenaponskoj mreži. U slučaju neuspešnog APU-a, generator ostaje bez mreže duže vreme i neminovno dolazi do njegovog isključenja.

U ovom radu je razmatrano da generator zadrži svoje parametre u prihvatljivom opsegu, sačuva stabilnost i obezbedi uslove za bezbednu resinhronizaciju sa mrežom nakon eliminacije prolaznog kvara. Realizacija prethodno pomenutog je moguća koodrinisanom kontrolom pobude generatora i balansne impedanse koja će ostati u ostrvskom radu sa generatorom dok se ne obezbede uslovi za ponovnu sinhronizaciju.

## II. TEORIJSKA OSNOVA

Koncept predloženog upravljanja i jednodna šema analiziranog sistema je prikazan na Sl. 1.



Slika 1. Jednodna šema sistema za uprošćenim blok diijagramom upravljanja

Kada se kvar desi na vodu, kao što je prikazano na Sl. 1 zaštita na početku voda prepoznaje kvar i isključuje prekidač na početku voda P1 i prekidač P4. Zaštita generatora od ostrvskog rada isključuje generator (prekidač P2), čime se sprečava ostrvski rad generatora sa potrošnjom, što je i zabranjeno postojećom regulativom operatora distributivnog sistema [11]. Ovakvi radni režimi u kojima se ne može plasirati proizvodnja generatora mogu dovesti do opasnih radnih stanja po generator, jer dolazi do povećanja brzine generatora koje neminovno dovodi i do isključenja generatora. Umesto isključenja generatora nakon kvara u distributivnoj mreži, može se uključiti balansa impedansa (prekidač P3 na Sl. 1) i aktivirati upravljačka petlja po brzini generatora koja se uvodi u regulator pobude. Na taj način se može obezbediti stabilan radni režim koji će sprečiti isključenje generatora i omogućiti "mekanu" sinhronizaciju nakon toga, što će u nastavku rada biti detaljnije izloženo.

Aktivna i reaktivna snaga generatora mogu varirati u zavisnosti od raspoloživosti primarnog resursa. Zbog toga se ne može jednoznačno definisati vrednost balansne impedanse tako da se obezbedi prihvatljivo radno stanje u svim tačkama pogonske karte generatora. Stoga je predviđeno predupravljanje balansom impedansom. Balansa impedansa se sastoji od paralelne veze otpornika i reaktanse i vrši se njihovo nezavisno upravljanje preko kontrolne jedinice (KJ) prikazane na Sl. 1. Predupravljanje aktivnim delom impedanse se vrši tako što se otpornost u vremenu podešava tako da u svakom trenutku može da prihvati aktivnu snagu generatora, pri čemu se kao referentan napon uzima napon sa VN strane blok transformatora, odnosno sa njim se računa potrebna vrednost otpornika. Na isti način se podešava i vrednost reaktivnog dela impedanse, odnosno reaktanse. Za definisanje ovih vrednosti se koriste aktivna i reaktivna snaga koje se mere na VN terminalima elektrane koje se uvode u KJ. U normalnim radnim stanjima prekidač između impedanse i mreže je isključen, odnosno impedansa nije pod naponom. Na taj način se omogućava promena impedanse u beznaponskom stanju, što značajno pojednostavljuje i smanjuje investiciono ulaganje u celokupan sistem. Na opisani način balansa impedansa je uvek "spremna" i "čeka" potencijalno opasno radno stanje kada će doći do njenog aktiviranja. Otpornost služi da se na njoj disipira aktivna snaga generatora i na taj način spreči opasno ubrzavanje mašine. Reaktansa povećava vremensku konstantu celokupnog sistema i na taj način ga usporava, čime smanjuje potencijalnu mogućnost za oscilatornu nestabilnost. Pored toga ograničavaju se vrednosti tranzijentnih prenapona nakon prelaska u ostrvski rad.

Sa uvođenjem brzine generatora kao upravljačke promenljive u pobudni sistem realizuje se održavanje napona u zahtevanom opsegu, kao i frekvencije veoma blisko nominalnoj vrednosti. Promenom pobudnog napona generatora menja se i napon na njegovim i terminalima na VN strani blok transformatora. Na taj način se menja i trošenje aktivne i reaktivne snage na balansnoj impedansi. Na ovaj način dva esencijalna parametra koja definišu stabilan rad generatora, napon i frekvencija održavaju se na vrednostima bliskim zahtevanim da se izvrši bezbedna resinhronizacija na distributivnu mrežu nakon eliminacije kvara. Treba napomenuti da je upravljačka petlja po brzini generatora koja

se uvodi u pobudni sistem aktivna samo kada je generator u ostrvskom radu, a kao indikacija rada petlje se koristi status prekidača P2.

### III. MODEL

#### A. Model distributivnog sistema

Na Sl. 1 je prikazana jednopolna šema sistema koji je korišćen u radu. Na njoj je prikazan automatski regulator napona, kontrolna jedinica za upravljanje balansom impedansom i ostala oprema koja je korišćena u predmetnim analizama. Ekvivalent priključne 110 kV mreže je modelovan sa snagom trolnog kratkog spoja od 1000 MVA i odnosom  $R/X=0,25$ . Na niženaponskoj strani distributivnog transformatora je modelovan samo jedan izvod, jer ostatak srednjenaponske mreže nema veliki značaj u vršenim analizama. Transformator 110/20 kV je sprege Yyn, sa sekundarom uzemljenim preko niskoomske otpornosti koja ograničava struju zemljospoja na 300 A. Distribuirani generator je na mrežu povezan preko blok transformatora prenosnog odnosa 6,3/20 kV. Potrošnja je modelovana kao naponski zavisna sa statičkim koeficijentima zavisnosti aktivne i reaktivne snage od napona 1,3 i 1,8, respektivno.

#### B. Model generatora

Distribuirani generator predstavlja ekvivalent male hidroelektrane sa sinhronom mašinom sa istaknutim polovima. U Tabeli 1 je dat pregled osnovnih parametara korišćenog generatora.

TABELA I. PREGLED PARAMETARA GENERATORA

| Parametar                    | Vrednost                              |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Nominalna prividna snaga     | $S=1.25$ MVA                          |
| Nominalni napon              | $U_n=6.3$ kV                          |
| Faktor snage                 | 0.8                                   |
| Sinhrona reaktansa           | $x_d=1.85$ p.u. ; $x_q=1.11$ p.u.     |
| Vremenska konstanta inercije | 3 s                                   |
| Tranzijentna reaktansa       | $x_d'=0.277$ p.u.                     |
| Subtranzijentne reaktanse    | $x_d''=0.16$ p.u. ; $x_q''=0.21$ p.u. |

Regulacija pobude generatora je modelovana i o njoj će više reči biti kasnije, dok turbinski regulator nije modelovan i tokom analiza je smatrano da je moment pogonske mašine konstantan.

#### C. Model balansne impedanse

U analizama je smatrano da je trenutna snaga disipacije na balansnoj impedansi (zavisi od kvadrata napona na njenim priključcima) jednaka aktivnoj, odnosno reaktivnoj snazi na VN priključcima blok transformatora. Tada bi vrednost otpornosti bila definisana formulom (1), a vrednost reaktanse formulom (2) na sledeći način:

$$R_{bal}=U^2/P_{gen} \quad (1)$$

$$X_{bal}=U^2/Q_{gen} \quad (2)$$

Gde je:

$R_{bal}$  – vrednost balansne otpornosti,

$X_{bal}$  – vrednost balansne reaktanse,

$U$  – napon na VN terminalima neposredno pre nastanka kvara,

$P_g$  – aktivna snaga generatora neposredno pre kvara,

$Q_g$  – reaktivna snaga generatora neposredno pre kvara.

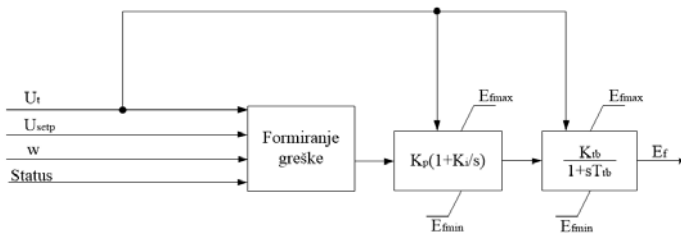
#### D. Model modifikovanog sistema regulacije pobude

U konvencionalnim elektranama regulacija pobude sinhronne mašine je isključivo vezana za regulaciju napona [12], odnosno reaktivne snage razmene sa elektroenergetskim sistemom. U ovom radu predložena je modifikacija u sistemu regulacije pobude generatora tako da se uvede brzina generatora kao još jedna upravljajuća promenljiva.

Na Sl. 2 je prikazan blok dijagram sistema regulacije pobude sa dodatnom modifikacijom koja se odnosi na formiranje greške na ulazu u regulator. Modelovanje regulatora sa svim parametrima i veličinama vršeno je u sistemu relativnih jedinica. Sastoji se od tri osnovna dela:

- Linearizovanog modela tiristorskog mosta koji se sastoji od pojačanja i vremenske konstante tiristorskog mosta ( $K_{tb}$  i  $T_{tb}$ , respektivno) sa ograničenjima maksimalne i minimalne pobude ( $E_{fmax}$  i  $E_{fmin}$ ),
- PI regulatora sa proporcionalnim i integralnim dejstvom ( $K_p$  i  $K_i$ , respektivno) koji takođe ima ograničenja maksimalnog i minimalnog integralnog dejstva regulatora, kao i maksimalne i minimalne vrednosti izlaza PI regulatora ( $E_{fmax}$ ,  $E_{fmin}$ ),
- Bloka koji služi za formiranje greške koja će omogućiti održavanje frekvencije i napona tokom ostrvskog rada što bliže propisanom opsegu za širok dijapazom radnih stanja.

U sistem za formiranje greške ulaze signali: merene vrednosti napona na terminalu generatora ( $U_t$ ), referentna vrednost napona generatora ( $U_{setp}$ ), brzina generatora ( $w$ ), status uključenosti generatorskog prekidača čije otvaranje znači prelazak u ostrvski rad sa otpornikom ( $Status=0$ , ako je prekidač otvoren i  $Status=1$  ako je prekidač zatvoren). Na osnovu ovih ulaza se dalje proračunava greška koja se sastoji od tri dela: greška po odstupanju napona od podešene reference, greška po odstupanju brzine generatora od referentne vrednosti i greška po izvodu brzine generatora.



Slika 2. Blok dijagram modifikovanog sistema regulacije pobude

Sledećim izrazima su date ove tri greške, respektivno:

$$\Delta u = \text{LIM}(U_{setp} - U_t, \Delta u_{min}, \Delta u_{max})^a \quad (3)$$

$$\Delta w = \text{IF} \{U_t > U_{min}, F[U_t < U_{max}, \text{IF}(\text{Stat us}=0, w - w_{ref}, 0), 0], 0\}^b \quad (4)$$

$$dw = \text{IF} \{U_t > U_{min}, \text{IF}[U_t < U_{max}, \text{IF}(\text{Status}=0, ((w - \text{delay}(w, T_d)) / T_d, 0), 0], 0\}^c \quad (5)$$

Greška po odstupanju napona je uvek aktivna, dok su greške po odstupanju brzine i izvodu brzine aktivne samo kada je prekidač P2 otvoren, odnosno samo kada se generator nalazi u ostrvskom radu sa balansnom impedansom. Greške po odstupanju napona i frekvencije služe da vrate ove veličine na željene vrednosti, dok greška po izvodu frekvencije detektuje brza odstupanja frekvencije i daje neophodni stabilizacioni član koji na bezbedan način vraća praćene veličine na stacionarne vrednosti.

Na osnovu prethodno definisane tri greške formira se izlazni signal koji se vodi na ulaz PI regulatora i može se predstaviti sledećim izrazom:

$$E_{rr} = K_{pu} * \Delta u + K_{pw} * \Delta w + K_{dw} * dw \quad (6)$$

Gde su:

$K_{pu}$  – koeficijent proporcionalnog dejstva po odstupanju napona,

$K_{pw}$  – koeficijent proporcionalnog dejstva po odstupanju brzine generatora,

$K_{dw}$  – koeficijent proporcionalnog dejstva po izvodu brzine generatora.

#### IV. ALGORITAM KOODRINISANE KONTROLE

Nakon nastanka kvara na vodu 1 potrebno je izvesno vreme (u zavisnosti od podešenja zaštite) za detekciju kvara i isključenje prekidača P1 i P4. Posle isključenja ovih prekidača generator ostaje u ostrvskom radu sa lokalnom potrošnjom i dolazi do njegovog isključenja sa mreže zbog ostrvskog rada, što će biti signal kontrolnoj jedinici da pokrene koordinisanu kontrolu stabilnosti generatora i upravlja prekidačima u posmatranom delu sistema, u skladu sa sl. 1. Nakon toga kontrolna jedinica zatvara prekidač P3, čime se balansna impedansa uključuje pod napon. Na taj način će tokom trajanja ciklusa APU-a generator biti odvojen od mreže, ali ne i isključen. Kada dođe do uključivanja voda pod napon (uključenjem prekidača P1 i P2) i utvrdi se da je kvar prolaznog karaktera, stekli su se uslovi da se generator ponovo sinhronizuje na mrežu. Sistem za sinhronizaciju generatora prati prisustvo mrežnog napona i u trenutku kada se on pojavi može početi ponovnu sinhronizaciju na mrežu. Ovde je potrebno obezbediti vremensko zatezanje između pojave napona na mrežnim priključcima i sinhronizacije, jer je moguće da kvar nije prolazan, pa će ponovo doći do isključenja voda. Ovo vreme mora biti veće od potrebnog da zaštita detektuje kvar (zemljospoj ili međufazni kvar).

<sup>a</sup> Funkcija LIM(x, xmin, xmax) predstavlja ograničenje promenljive x ako izlazi iz opsega xmin-xmax na granične vrednosti.

<sup>b</sup> Funkcija IF(condition, x, y) daje vrednost x ukoliko je uslov condition ispunjen, dok u suprotnom daje vrednost y.

<sup>c</sup> Funkcija delay(x, Td) daje vrednost promenljive x koja se imala u trenutku: trenutno vreme – Td.

Ako nije došlo do eliminacije prolaznog kvara sistem zaštite na vodu trajno isključuje vod. U tom slučaju generator će morati da bude isključen do ponovnog uspostavljanja napona sa strane mreže, jer je energija koja se može disipirati na balansnoj impedansi ograničena njenim dozvoljenim toplotnim impulsom. Trajno isključenje se može izvršiti kada se nakon unapred zadatog vremena (npr. nekoliko sekundi) ne dobije napon sa strane mreže. To je indikacija da je kvar trajan, odnosno da je sistem APU bezuspešno reagovao.

Vremenski tok prethodno opisanih događaja, koji je korišćen u simulacijama rada predloženog sistema se može definisati na sledeći način:

- $t_1=0$  s – nastanak kvara(u simulaciji je pretpostavljen jednofazni kratak spoj) na vodu 1,
- $t_2=0,2$  s - isključenje voda sa kvarom (isključuju se prekidači P1 i P4) i početak ciklusa APU-a, dok generator prelazi u ostrvski rad sa lokalnom potrošnjom,
- $t_3=0,5$  s – uključenje balansne impedanse i ostrvski rad generatora sa impedansom (prekidač P3).

## V. REZULTATI ANALIZA

U ovom poglavlju su prikazani rezultati dinamičkih simulacija vršenih u cilju da se demonstrira praktična primenljivost razvijenog algoritma upravljanja. U svim simulacijama je posmatran period od 5 s, koji je dovoljan da se može oceniti kvalitet predloženog koordinisanog sistema upravljanja.

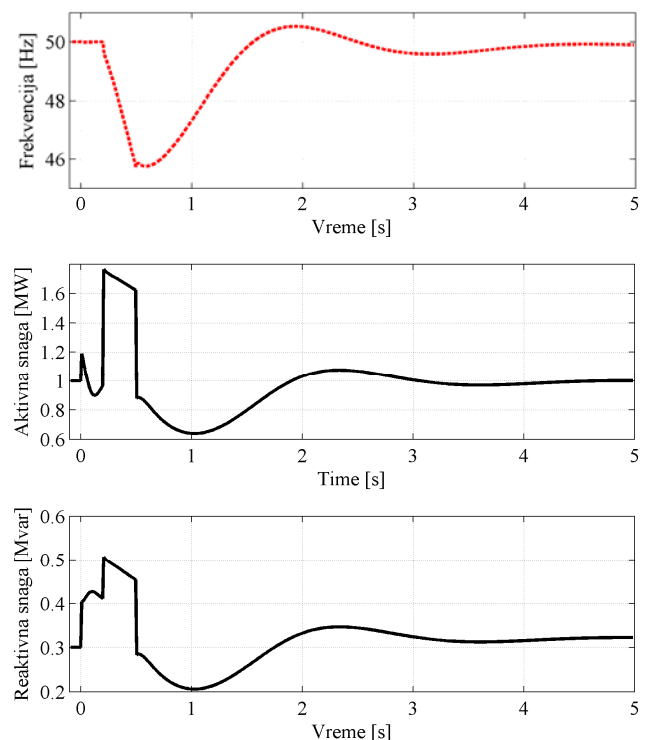
Kada je snaga lokalne potrošnje koja ostaje u ostrvskom radu sa generatorom veća od snage proizvodnje vrlo lako se može dogoditi ispad iz sinhronizma generatora. Tada je neophodno obezbediti ostrvski rad generatora sa balansnom impedansom. U ovom poglavlju će biti prikazani rezultati za jedan ovakav slučaj.

Aktivna i reaktivna snaga potrošnje na kraju izvoda iznose 2 MW i 0,5 Mvar, respektivno. Generator radi sa aktivnom snagom od 1 MW i reaktivnom od 0,3 Mvar. Predloženi sistem se može nadograditi tako što će omogućiti rad generatora sa potrošnjom, ali samo ukoliko je snaga potrošnje manja od proizvodnje generatora. Sistem za upravljanje balansnom impedansom može pratiti snagu razlike između snage generatora i snage lokalne potrošnje. Ako je ova razlika pozitivna, otpornost balansnog otpornika se prilagođava tako da može u svakom trenutku da preuzme razliku snage generisanja i potrošnje, dok je reaktansa jednaka razlici reaktivne snage generatora i potrošnje. Ukoliko je snaga potrošnje veća od snage generisanja, kao što je u ovom testiranom scenariju, debalans snaga je negativan, pa se impedansa podešava na vrednost da može preuzeti celokupnu snagu proizvodnje generatora, kao što je u prethodnim poglavljima i opisano.

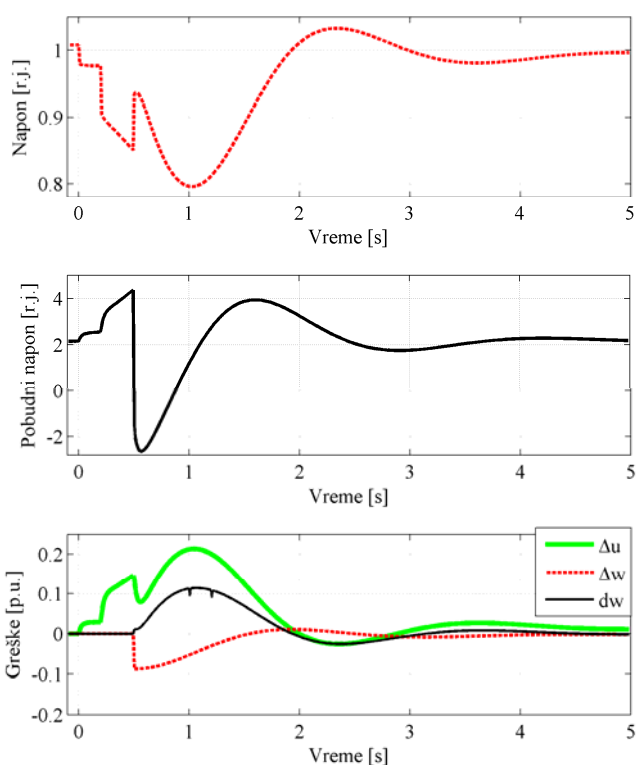
Na Sl. 3 prikazana je promena frekvencije u novoformiranom ostrvu, aktivna i reaktivna snaga generatora. Kako nakon isključenja prekidača P4 generator u ostrvskom radu ostaje sa većom aktivnom snagom lokalne potrošnje od njegove aktivne snage proizvodnje dolazi do propada frekvencije.

Na Sl. 4 je prikazan napon na priključcima elektrane (na 20 kV strani transformatora), pobudni napon generatora i greške po naponu, frekvenciji i izvodu frekvencije na ulazu u PI regulator. Pri isključenju napojnog dalekovoda (Vod 1) u novoformiranom ostrvu se javlja i manjak reaktivne energije i dolazi do pada napona u sistemu. To se reflektuje kao pojava greške po naponu na ulazu u PI regulator (zeleno kriva –  $\Delta u$ ) i povećanje pobudnog napona. Nakon prelaska u ostrvski rad sa impedansom pored greške po naponu javljaju se i greške po frekvenciji i izvodu frekvencije (crvena kriva –  $\Delta w$  i zelena kriva –  $dw$ ). Treba napomenuti da su ovo ukupne greške, koje su pomnožene odgovarajućim koeficijentima, prema formuli (6). Proporcionalno dejstvo po frekvenciji definiše potreban nivo greške da bi se eliminisao inicijalni poremećaj, dok diferencijalno dejstvo (po izvodu frekvencije) stabilizuje sistem i sprečava pojavu nestabilnosti. Kao rezultat svega toga frekvencija i napon se neposredno nakon pojave poremećaja održavaju u prihvatljivim granicama, a zatim se vraćaju veoma blizu vrednostima koje su se imale pre poremećaja i stižu se uslovi da se izvrši sinhronizacija sa mrežom u slučaju da je kvar prolazan.

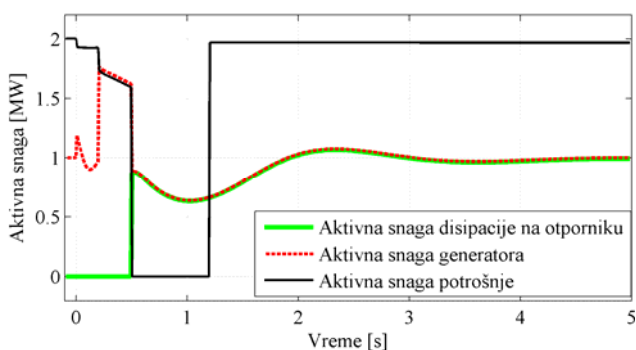
Na sl. 5 je prikazana promena aktivne snage disipacije na balansnom otporniku, aktivne snage generatora i aktivne snage potrošnje. Sa slike se uočava da balansni otpornik preuzima snagu generatora i na taj način sprečava akceleraciju obrtnih masa. Treba napomenuti da celokupnu regulaciju snaga preuzima balansna impedansa i pobuda generatora bez učešća turbinske regulacije.



Slika 3. Promena veličina u novoformiranom ostrvu: frekvencije, aktivne i reaktivne snage



Slika 4. Promena veličina u novoformiranom ostrvu: napona generatora, pobudnog napona i grešaka na ulazu u regulator



Slika 5. Promena aktivne snage disipacije na otporniku, aktivne snage generatora i aktivne snage potrošnje

Sl. 3-5 prikazuju da predloženi algoritam omogućava stabilan rad malih sinhronih generatora nakon isključenja sa mreže i prelaska u ostrvski rad sa balansnom impedansom. Radno stanje generatora je blisko onome koje se imalo pre nastanka kvara.

Iako predloženi regulacioni sistem analiziran u radu pretpostavlja kontinualnu kontrolu samo pobudnog napona, što predstavlja kontrolu samo po d-osi generatora prikazani rezultati pokazuju da je to dovoljno da se obezbede vrednosti napona i frekvencije koje su bliske nominalnim. Predloženi model se može dalje unapređivati uključujući kontrolu balansne impedanse pod naponom, čime se može nezavisno

upravljati strujama po d-osi i q-osi. Na taj način bi se omogućila još finija regulacija napona i frekvencije tokom tranzijentnog perioda.

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je predložen jednostavan koncept regulacije male elektrane sa balansnom impedansom koji može obezbediti bolju tranzijentnu stabilnost tokom poremećaja u priključnoj mreži. Posmatrana je situacija koja nastaje pri kvaru i automatskom ponovnom uključanju u distributivnoj mreži i mogućnost pojave ostrvskog rada distribuiranog izvora sa potrošnjom. Umesto isključenja generatora analiziran je njegov rad sa balansnom impedansom. Pored uvođenja balansne impedanse izvršena je modifikacija pobudnog sistema, tako što mu je dodata još jedna upravljačka promenljiva – brzina generatora, pa se ukupna greška u regulatoru pobudnog sistema formira na osnovu tri signala: greška po razlici napona (trenutnog i referentnog), greška po razlici brzine generatora (trenutne i nominalne) i greška po izvodu brzine generatora.

Iz priloženih rezultata se vidi da je razvijeni model za održanje stabilnosti generatora pokazao da ima sposobnost da odgovori na realne zahteve koji se dešavaju u praksi. Obezbeđena je dobra stabilizacija tokom prelaznog procesa i nakon toga stacionarno stanje čije su karakteristične veličine (frekvencija i napon) u propisanom opsegu, čak i veoma blizu nominalnim vrednostima. Ukoliko postoje potrošači koji ne trpe nikakve prekide u napajanju, malom modifikacijom modela može se to obezbediti uz odgovarajući kvalitet isporučene električne energije.

Prikazani algoritam se može koristiti za različite snage generatora, tipove pobudnih sistema uz adekvatnu modifikaciju za uvođenje brzine generatora u njih i pravno dimenzionisanje balansne impedanse. Prednost je što se funkcionisanje preliminarno može proveriti u softveru, kao što je prezentovano u radu. Za razliku od modela koji se javljaju u literaturi predloženi model ne zahteva dodatne kontrolne elemente za balansnu impedansu, osim jednostavne promene impedanse u beznaponskom stanju i male modifikacije pobudnog sistema.

Koncept uspešno prevazilazi nestanak mreže usled kvara tokom ciklusa automatskog ponovnog uključanja, čime se značajno povećava efikasnost malih elektrana i izbegavaju potencijalno opasna radna stanja usled iznenadnog gubitka mreže. Nije potrebna automatizovana mreža za realizaciju, već se celokupan upravljački sistem bazira na merenim signalima u tački priključenja distribuiranog izvora na mrežu.

## LITERATURA

- [1] D-H. Yoon, G. Jang and Y-H. Moon, "A study of the application of fast valving and braking resistor for an intelligent SPS", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, pp. 818-823, 2013.
- [2] J. Machowski, A. Smolarczyk and J. W. Bialek, "Damping of power swings by control of braking resistors", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 23, pp. 539-548, 2001.
- [3] M. H. Ali, T. Murata and J. Tamura, "Effect of Coordination of Optimal Reclosing and Fuzzy Controlled Braking Resistor on Transient Stability During Unsuccessful Reclosing", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 21, No. 3, pp. 1321-1330, 2006.

- [4] A. Causebrook, D. J. Atkinson and A. G. Jack, "Fault Ride-Through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, vol. 22, No. 3, pp. 966-975, 2007.
- [5] W. Freitas, A. Morelato and W. Xu, "Improvement of Induction Generator Stability Using Braking Resistors", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, vol. 19, No. 2, pp. 1247-1249, 2004.
- [6] Joint Working Group B5/C6.26/CIREC, "Protection of Distribution Systems with Distributed Energy Resources", 2015.
- [7] V.L. Merlin, R.C. Santos, A.P. Grilo, J.C.M. Vieira, D.V. Coury and M. Oleskovicz, "A new artificial neural network based method for islanding detection of distributed generators", Electrical Power and Energy Systems, vol. 75, pp. 139-151, 2016.
- [8] A. Samui and S.R. Samantaray, "An active islanding detection scheme for inverter-based DG with frequency dependent ZIP-Exponential static load model", Electrical Power and Energy Systems, vol. 78, pp. 41-50, 2016.
- [9] S. Shrivastava, S. Jain, R. K. Nema and V. Chaurasia, "Two level islanding detection method for distributed generators indistribution networks", Electrical Power and Energy Systems, Article in press, 2016.
- [10] A. Khamis, H. Shareef and A. Mohamed, "Islanding detection and load shedding scheme for radial distribution systems integrated with dispersed generations", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 2261-2275, 2015.
- [11] EPS Distribucija, "Pravila o radu distributivnog sistema", 2017
- [12] Kundur, P., S., "Power System Stability and Control", (McGraw-Hill Press, 1993)

#### ABSTRACT

Transient processes that occur as a result of fault in the connected network lead to dangerous operating modes that can lead to loss of stability of the distributed generators. This paper analyzes the use of a balance impedance which temporarily stays with the synchronous generator in island operation during transient faults and allows the synchronization of the generator immediately after the faults. As an additional control variable, the speed of the generator in the excitation system is introduced, in order to allow the control of the generator frequency. The operation of the described system was tested by modeling and dynamic simulations in the software DIgSILENT PowerFactory.

#### **APPLICATION OF BALANCE IMPEDANCE TO MAINTAIN THE STABILITY OF THE DISTRIBUTED GENERATORS**

D. Milošević, A. Đorđević