

Metodologija za kvantifikaciju vrednosti resursa za brzu regulaciju frekvencije u zavisnosti od lokacije u elektroenergetskom sistemu

Jelena Stojković Terzić, Predrag Stefanov

Elektrotehnički fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

jstojkovic@etf.rs, stefanov@etf.rs

Sažetak—Sve veća zastupljenost obnovljivih izvora doprinela je smanjenju ukupne inercije obrtnih masa u elektroenergetskim sistemima. To povećava osetljivost sistema na poremećaje u pogledu frekvencijske stabilnosti. Tradicionalni načini regulacije nisu dovoljno brzi i zbog toga se nameće potreba za novom sistemskom uslugom pod nazivom brza regulacija frekvencije (BRF) koja će biti brža od primarne regulacije i čiji je zadatak da uspori pad frekvencije. U ovom radu je razvijen kvantifikator za vrednovanje lokacije resursa za BRF koji omogućava upoređivanje različitih lokacija u pogledu doprinosa frekvencijskoj stabilnosti za različite poremećaje. Takođe, definisana je procedura za odabir najboljih lokacija resursa za BRF za listu poremećaja i za poznatu raspodelu inercije u sistemu. Simulacije su izvršene na test sistemu sa 68 čvorova i potvrđuju da doprinos resursa za BRF zavisi od njegove lokacije u sistemu.

Ključne riječi- regulacija frekvencije; frekvencijska stabilnost; dinamika elektroenergetskog sistema; elektroenergetski sistemi male inercije;

I. UVOD

Sve veća zastupljenost obnovljivih izvora energije (OIE) i uređaja energetske elektronike doprinela je smanjenju ukupne inercije obrtnih masa u elektroenergetskim sistemima (EES). Kao direktna posledica smanjenja inercije, sistemi postaju više osetljivi na poremećaje i beleže značajno veće i brže promene frekvencije.

Pored brzih i velikih promena frekvencije u sistemima male inercije, sve više postaju izraženi različiti frekvencijski odzivi kao posledica neravnomerne distribucije inercije u EESu. Razlike u frekvencijskim odzivima neposredno nakon poremećaja uočene su i od strane operatora prenosne mreže Velike Britanije nakon implementiranja WAMS sistema koji je omogućio sinhronizovana merenja frekvencije u različitim delovima sistema [1], [2]. U [2] je ukazano da različite promene frekvencije u sistemu nakon poremećaja mogu dovesti do velikih razlika u uglovima pojedinih delova sistema, što može rezultovati u razdvajanju delova sistema. U [3] su autori proučavali uticaj distribucije inercije na frekvencijski odziv sistema i sproveli analizu osetljivosti da bi dobili uvid u kojoj meri lokacija inercije u sistemu utiče na dinamičko ponašanje EESa neposredno nakon poremećaja. Nekoliko pokazatelja za

kvantifikaciju uticaja lokacije inercije na dinamičke performanse EESa je predloženo u [4], gde su autori pokazali lokalni uticaj inercije, naročito kada je mala inercija bliže poremećaju. Takođe, autori su ukazali da smanjenje regionalne inercije ima veći uticaj na lokalne pokazatelje, nego na ostatak sistema. Zaključak [4] je da je distribucija inercije važan faktor koji treba uzeti u obzir tokom planiranja elektroenergetskog sistema, postavljanja generatora i nekih drugih aplikacija u vezi sa frekvencijskom stabilnošću sistema. U [5] autori su analizirali uticaj heterogene raspodele inercije u sistemu i istakli potrebu da inerciju treba posmatrati lokalno, a ne kao globalan parametar, i da čak i uprošćeni dinamički modeli sistema moraju biti predstavljeni pomoći više oblasti odgovarajućih ekvivalentnih inercija.

Istraživači su uvideli da doprinos poboljšanju frekvencije zavisi od lokacije resursa koji pruža BRF. U [6] je pokazano da performanse BRF u velikoj meri zavise od distribucije inercije u sistemu i topologije mreže, kao i od udaljenosti od poremećaja. Uticaj lokacije baterije koja pruža uslugu BRF na minimalnu vrednost frekvencije sistema i brzinu promene frekvencije za različiti stepen i prostornu raspodelu penetracije vetroelektrana je prikazan u [7]. Različita cena rezerve za regulaciju frekvencije u zavisnosti od lokacije je predložena u [8], ali ne uvažava doprinos rezerve na poboljšanje frekvencije, već odražava samo lokalni marginalni trošak za obezbeđivanje rezerve.

Iako je lokacija resursa koji pruža uslugu BRF pokazana kao bitna u pogledu doprinosa poboljšanju frekvencije u sistemu sa heterogenom raspodelom inercije, nijedno istraživanje nije kvantifikovalo vrednost resursa u zavisnosti od lokacije. Performanse resursa za BRF zavise i od udaljenosti od mesta poremećaja i u ovom radu će biti predložen kvantifikator kojim se mogu porediti različite lokacije resursa za pružanje usluge BRF za određeni poremećaj i definisanu raspodelu inercije. Ovaj kvantifikator može pružiti koristan podatak operatoru prenosnog sistema o lokaciji rezerve koja najviše doprinosi poboljšanju frekvencijske stabilnosti za određeni poremećaj i specifično radno stanje. Pored definisanja kvantifikatora, u ovom radu je predložena i procedura kojom se rangiraju lokacije resursa za BRF u pogledu doprinosa za listu poremećaja i određenu raspodelu inercije. Rezultati ovog postupka mogu biti korisni operatoru prenosnog sistema prilikom postupka alociranja

rezerve za BRF za dan unapred kada je poznato angažovanje agregata u nekom vremenskom intervalu i sa tim očekivana raspodela inercije u sistemu.

II. ANALIZA LOKACIJSKOG UTICAJA RESURSA ZA BRF NA FREKVENCIJSKI ODZIV

U ovom poglavlju je predstavljen dinamički model sistema od dve oblasti na kome se može analizirati lokacijski uticaj resursa za BRF na frekvenijsku stabilnost, odnosno, uticaj na minimalnu vrednost frekvencije u sistemu.

Usvojeno je da je poremećaj ΔP u oblasti 1, dok se resurs za BRF nalazi u oblasti 2. Odstupanje frekvencije od nominalne vrednosti u oblastima 1 i 2, Δf_1 i Δf_2 , može se opisati sledećim izrazima:

$$\frac{d\Delta f_1}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H_1} (-K_1^D \Delta f_1 - \Delta P - \Delta p_{12}) \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta f_2}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H_2} (-K_2^D \Delta f_2 + \alpha_{12} \Delta p_{12} + BRF_2(t)) \quad (2)$$

gde je α_{12} odnos snaga ovih oblasti, a H_1 i H_2 predstavljaju ekvivalentne konstante inercije u oblastima 1 i 2. K_1^D i K_2^D su koeficijenti globalne samoregulacije potrošača ovih oblasti, a BRF_2 se odnosi na promenu aktivne snage resursa za BRF u oblasti 2. Δp_{12} odgovara promeni snage po spojnog vodu od oblasti 1 ka oblasti 2 koja se može izraziti kao:

$$\frac{d\Delta p_{12}}{dt} = m_s (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (3)$$

gde je m_s koeficijent sinhronizacione snage definisan izrazom:

$$m_s = \left. \frac{dP_{12}}{d\theta_{12}} \right|_{\theta_{120}} = \frac{U'_1 U'_2}{X'_{12}} \cos \theta_{12} \quad (4)$$

U prethodnom izrazu, U'_1 i U'_2 predstavljaju napone sabirnice na krajevima spojnog voda, X'_{12} je reaktansa voda, a θ_{12} je razlika u faznim uglovima napona na krajevima spojnog voda između oblasti 1 i oblasti 2. Koeficijent sinhronizacione snage je obrnuto srazmeran dužini spojnog voda i u slučaju slabih interkonekcija (dugih spojnih vodova) koeficijent m_s ima manju vrednost.

Doprinos aktivne snage BRF_2 resursa za BRF u oblasti 2 je definisan kao:

$$BRF_2(t) = \begin{cases} 0 & \left| \frac{d\Delta f_2}{dt} \right| < RoCoF_{gr} \text{ i } BRF_2(t_-) = 0 \\ \Delta P_{BRF_2} & \left| \frac{d\Delta f_2}{dt} \right| \geq RoCoF_{gr} \text{ ili } BRF_2(t_-) = \Delta P_{BRF_2} \end{cases} \quad (5)$$

Izrazom (5) je definisano da se BRF aktivira kada apsolutna vrednost RoCoFa u oblasti 2 dostigne graničnu vrednost RoCoFa $RoCoF_{gr}$, i u tom slučaju je promena aktivne snage resursa jednaka snazi ΔP_{BRF_2} . Zbog jednostavnosti je, a bez umanjenja opštosti, promena aktivne snage resursa za BRF modelovana kao stepena funkcija.

Uz pretpostavku da su frekvencije u oblastima 1 i 2 pre poremećaja bile jednake nominalnoj vrednosti, sistemu diferencijalnih jednačina (1) - (3) mogu se dodati početni uslovi:

$$\begin{aligned} \Delta f_1(0) &= 0 \\ \Delta f_2(0) &= 0 \\ \Delta p_{12}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Da bi se jasnije uvideo uticaj lokacije resursa za BRF, pri analizama je usvojeno da su oblasti 1 i 2 približno istih snaga ($\alpha_{12}=1$) i da su koeficijenti K_1^D i K_2^D jednaki i imaju vrednost 1.

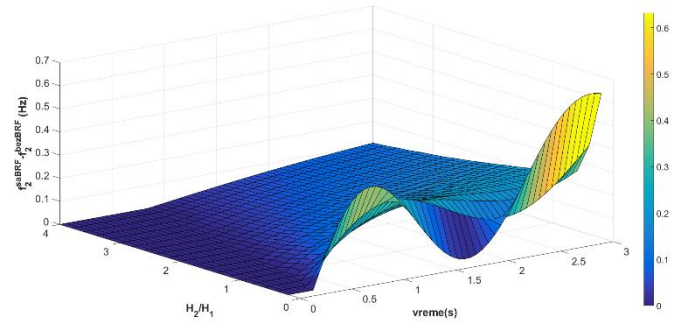
Usvojeno je da je poremećaj u oblasti 1 jednak ispadu koji odgovara 10% snage u sistemu. Za ovakvo usvojene parametre modela, numeričkim rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina dobijeni su frekvenijski odzivi oblasti za različite vrednosti sinhronizacionog koeficijenta, kao i za različitu raspodelu inercije.

Na Sl. 1 je prikazana razlika frekvencije u oblasti 1, za slučaj kad postoji resurs za BRF u oblasti 2 i kada ne postoji, za različite vrednosti koeficijenta sinhronizacione snage, na vremenskom intervalu od 3 sekunde neposredno nakon poremećaja. Ono što se može uočiti sa grafika jeste da je pri manjim vrednostima koeficijenta sinhronizacione snage, tj. većoj udaljenosti resursa za BRF od lokacije poremećaja, doprinos resursa za BRF manji. Neposredno nakon poremećaja, frekvencija u oblasti 1 je ista u oba slučaja jer je potrebno vreme da se poremećaj prenese do oblasti 2 i dovede do vrednosti RoCoFa koji je graničan za aktiviranje BRF. Nakon toga se može uočiti da razlika frekvencije u oblasti 1, za slučaj kada postoji resurs za BRF i kada ne postoji, veća pri većim koeficijentima sinhronizacione snage, odnosno kada je resurs za BRF bliži lokaciji poremećaja. Ovi rezultati upućuju na to da je doprinos resursa za BRF veći ukoliko se on nalazi bliže lokacije poremećaja. Na taj način, on i dodatno prigušuje poremećaj i sprečava da se proširi na dalje delove sistema. Sličan zaključak se može izvesti posmatrajući Sl. 2 gde je prikazana razlika frekvencije u oblasti 2, za slučaj kad postoji resurs za BRF u oblasti 2 i kada ne postoji, za različite vrednosti koeficijenta sinhronizacione snage. Neposredno nakon poremećaja, frekvencija u oblasti 2 je ista u oba slučaja jer je potrebno vreme da se poremećaj prenese do oblasti 2 i dovede do vrednosti RoCoFa koji je graničan za aktiviranje BRF. Nakon toga, doprinos frekvenciji u oblasti 2 će biti veći pri većim vrednostima koeficijenta sinhronizacione snage, odnosno manjim udaljenostima od lokacije poremećaja. Dobijeni rezultati ukazuju da je doprinos resursa za BRF na frekvenijski odziv sistema veći ukoliko se resurs za BRF nalazi bliže lokaciji poremećaja.

Sl. 3 prikazuje razliku frekvencije u oblasti 1, za slučaj kad postoji resurs za BRF u oblasti 2 i kada ne postoji, za različitu raspodelu inercije, na vremenskom intervalu od 3 sekunde neposredno nakon poremećaja. Ono što se može uočiti sa grafika jeste da ukoliko je inercija oblasti 2 manja od inercije

oblasti 1, doprinos resursa za BRF na poboljšanje frekvencije u oblasti 1, u kojoj je došlo do poremećaja, je veći. U slučaju da oblast 2 ima veću inerciju od oblasti 1, ona će kasnije osetiti poremećaj jer se RoCoF menja sporije u toj oblasti i onda će do aktivacije BRF doći kasnije jer je potrebno više vremena da RoCoF dostigne graničnu vrednost za aktivaciju BRF rezerve. Na Sl. 4 je prikazana razlika frekvencije u oblasti 2, za slučaj kad postoji resurs za BRF u oblasti 2 i kada ne postoji, za različitu raspodelu inercije na vremenskom intervalu. Doprinos poboljšanju frekvencije u oblasti 2 je sličan kao i za oblast 1. Dobijeni rezultati ukazuju da je doprinos resursa za BRF na frekvencijski odziv sistema veći ukoliko se resurs za BRF nalazi u delu sistema koji ima manju inerciju.

Izvršene analize potvrđuju da doprinos poboljšanju frekvencije u sistemu zavisi od lokacije resursa za BRF, pri čemu veći doprinos imaju resursi bliže poremećaju, kao i resursi u delovima sistema koji imaju manju inerciju.



Slika 4: Doprinos resursa za BRF frekvenciji u oblasti 2 za različitu distribuciju inercije

III. DEFINICIJA INDEKSA KOJIM SE OPISUJE VREDNOST RESURSA ZA BRF U ZAVISNOSTI OD LOKACIJE

Indeks kojim se valorizuje vrednost resursa za BRF na nekoj lokaciji u pogledu doprinosa frekvencijskoj stabilnosti je definisan kroz razliku minimalne vrednosti frekvencije u baznom slučaju kada ne postoji BRF, i u slučaju kada se resurs za BRF nalazi na određenoj lokaciji. Pošto je cilj BRF da spreči da frekvencija padne ispod vrednosti kada dolazi do podfrekventnog rasterećenja potrošnje, kao veličina od interesa je izabrana minimalna vrednost frekvencije. U slučaju heterogene raspodele inercije, ponašanje frekvencije se razlikuje u različitim delovima sistema i minimalna vrednost lokalne frekvencije će se takođe razlikovati. Ovde se indeks računa u odnosu na minimalnu vrednost lokalne frekvencije u celom sistemu, iako lokacija tih veličina u baznom scenariju i scenariju sa BRF može da se razlikuje. Indeks kada je BRF rezerva na lokaciji loc se dobija pomoću izraza:

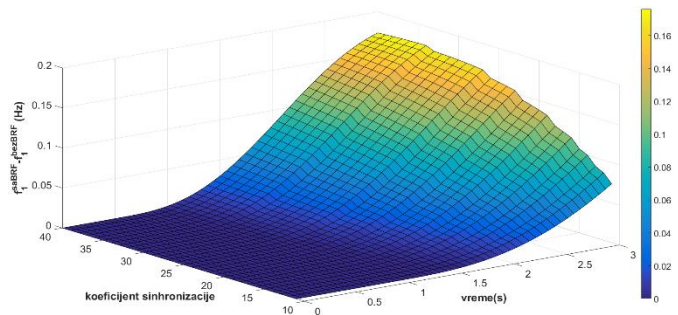
$$k_{loc} = f_{nadir_{BRFloc}} - f_{nadir_{base}} \quad (7)$$

Gde je $f_{nadir_{base}}$ minimalna vrednost frekvencije u baznom scenariju, a $f_{nadir_{BRFloc}}$ minimalna vrednost frekvencije u scenariju kada je BRF rezerva na lokaciji loc . Pomoću ovog indeksa se mogu porediti doprinosi rezerve za BRF na različitim lokacijama za određeni poremećaj i definisanu raspodelu inercije.

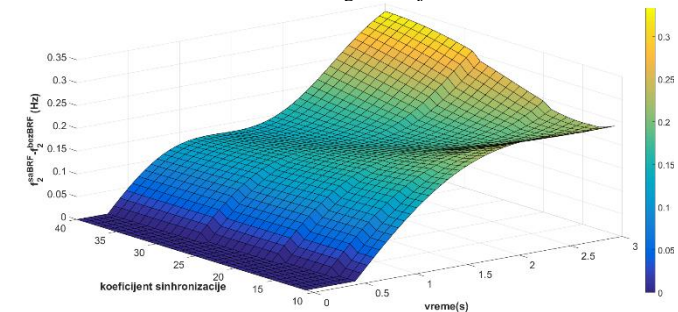
Određivanje najpovoljnije lokacije resursa za BRF za definisano radno stanje i specifičan poremećaj se sprovodi jednostavno. Za svaku potencijalnu lokaciju resursa se proračuna vrednost indeksa k_{loc} prema kom se potencijalne lokacije poredi. Najveća vrednost ovog indeksa ukazuje na najveći doprinos poboljšanju minimalne vrednosti frekvencije u celom sistemu i određuju najpovoljniji lokaciju resursa za BRF za taj poremećaj.

IV. PRORAČUN NAJPOVOLJNIJE LOKACIJE RESURSA ZA BRF ZA ODREĐENU RASPODELU INERCIJU I MOGUĆE POREMEĆAJE SA LISTE POREMEĆAJA

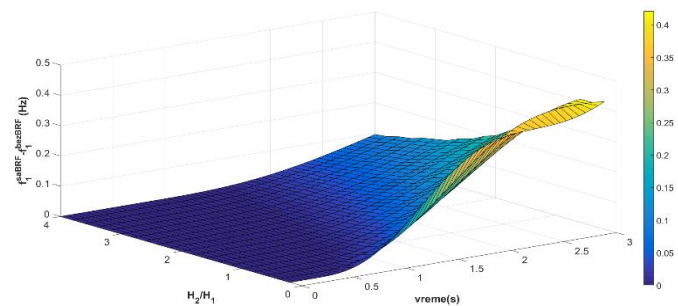
Procedura kojom se dobija odgovor koja lokacija resursa za BRF je najpovoljnija u pogledu doprinosa frekvencijskoj stabilnosti za poremećaje sa unapred definisane liste



Slika 1: Doprinos resursa za BRF frekvenciji u oblasti 1 za različite vrednosti sinhronizacionog koeficijenta



Slika 2: Doprinos resursa za BRF frekvenciji u oblasti 2 za različite vrednosti sinhronizacionog koeficijenta

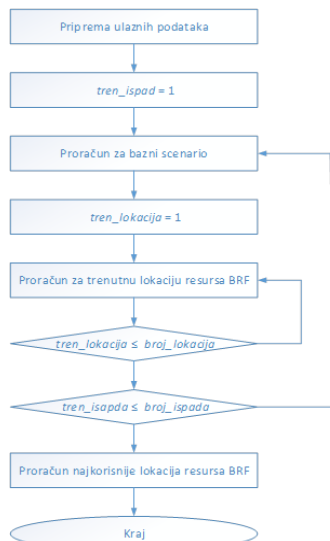


Slika 3: Doprinos resursa za BRF frekvenciji u oblasti 1 za različitu distribuciju inercije

poremećaja i specifično radno stanje sa definisanom raspodelom inercije se sastoji od sledećih koraka:

- Korak 1:** Priprema ulaznih podataka i definisanje radnog stanja kojim je određena raspodele inercije u sistemu. Definisanje potencijalnih ispada proizvodnih jedinica – formiranje liste poremećaja sa odgovarajućom verovatnoćom događaja.
- Korak 2:** Postavlja se brojač trenutnog ispada na vrednost 1 ($tren_ispad=1$).
- Korak 3:** Proračun parametara frekvencije za bazni scenario kada ne postoji BRF.
- Korak 4:** Postavlja se brojač trenutne lokacije resursa za BRF na vrednost 1 ($tren_lokacija=1$).
- Korak 5:** Proračun parametara frekvencije i indeksa za valorizaciju za trenutnu lokaciju resursa za BRF.
- Korak 6:** Ako je broj trenutne lokacije resursa za BRF manji od $broj_lokacija$, povećava se brojač trenutne lokacije za 1 i ponavlja se **Korak 5**, u suprotnom se nastavlja na **Korak 7**.
- Korak 7:** Ako je broj trenutnog ispada manji od $broj_ispada$, povećava se brojač trenutnog ispada za 1 i ponavljaju se koraci od **Korak 3**, u suprotnom se nastavlja na **Korak 8**.
- Korak 8:** Proračun najkorisnije lokacije na osnovu rezultati pojedinačnih potencijalnih ispada.
- Korak 9:** Prikaz rezultata i kraj algoritma.

Na Sl. 5 je prikazan celokupan algoritam za ovu proceduru.

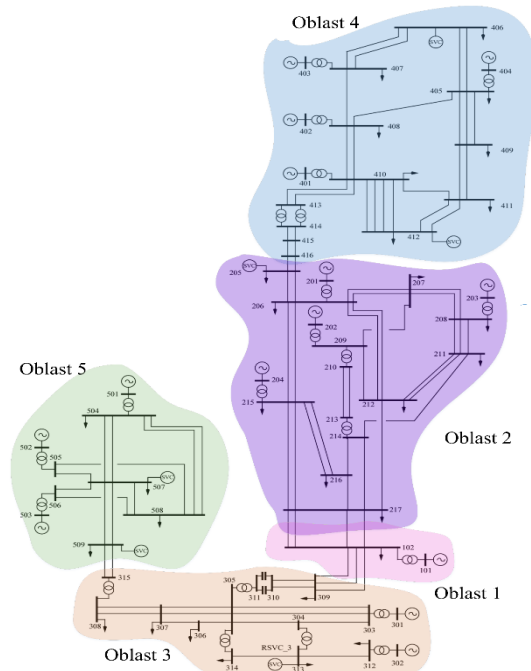


Slika 5: Proračun najpovoljnije lokacije resursa za BRF za određenu raspodelu inerciju i moguće poremećaje sa liste poremećaja

V. SIMULACIJE I REZULTATI

Za ilustraciju predloženih procedura korišćen je standardan test sistem zasnovan na sistemu jugoistočne Australije koji ima 59 čvorova i 14 generatora (Sl. 6) [9]. U ovim simulacija je

korišćen originalni test sistem razvijen u MATLAB/Simulinku [10].

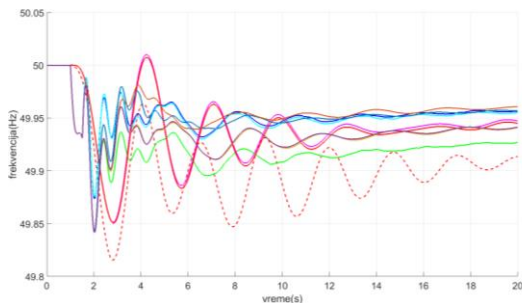


Slika 6: Test sistem jugoistočne Australije [9]

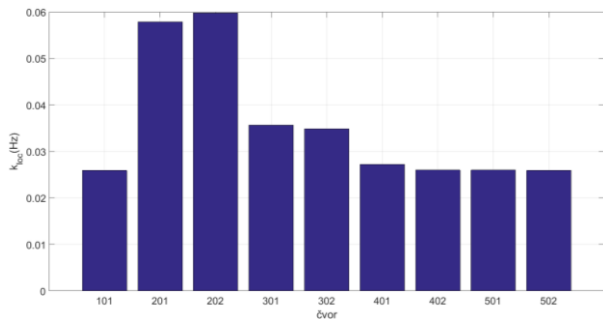
A. Proračun najpovoljnije lokacije resursa za BRF za određenu raspodelu inerciju i određeni poremećaj

Za demonstraciju proračuna najpovoljnije lokacije resursa za BRF za definisano radno stanje i određeni poremećaj korišćeno je radno stanje sa niskom potrošnjom detaljno predstavljeno u [11]. Simuliran je poremećaj - priključenje potrošnje u čvoru 214 ekvivalentno 2% ukupne potrošnje u sistemu. Prvo je posmatran scenario u kom ne postoji BRF. Minimalna frekvencija u celom sistemu nakon poremećaja iznosi 49.8156 Hz, i ona se dostiže u čvoru 503.

Zatim je za svaku potencijalnu lokaciju resursa za BRF simuliran frekvencijski odziv i dobijena minimalna frekvencija u sistemu koja je potrebna za proračun indeksa kojim se valorizuje vrednost resursa za BRF u zavisnosti od lokacije. Važno je napomenuti da su karakteristike resursa u pogledu brzine odziva iste za sve potencijalne lokacije i da je za svaku lokaciju usvojen kapacitet rezerve od 0.25% ukupne snage potrošnje u sistemu koja se aktivira kada RoCoF dostigne vrednost od 0.1 Hz/s. U simulacijama je izabrano 9 potencijalnih lokacija za BRF rezervu i to u čvorovima: 101, 201, 202, 301, 302, 401, 402, 501 i 502. Ova lista se može proširiti i svim čvorovima u mreži, ali je ovde izbor redukovano zbog preglednijeg prikaza rezultata. Na Sl. 7 prikazane su frekvencije u čvorovima gde se dostižu minimalne vrednosti lokalne frekvencije u celom sistemu za scenario kada ne postoji BRF i kada postoji rezerva u odgovarajućem čvoru za slučaj definisanog poremećaja.



Slika 7: Frekvencije u čvorovima gde se dostižu minimalne vrednost lokalne frekvencije u celom sistemu

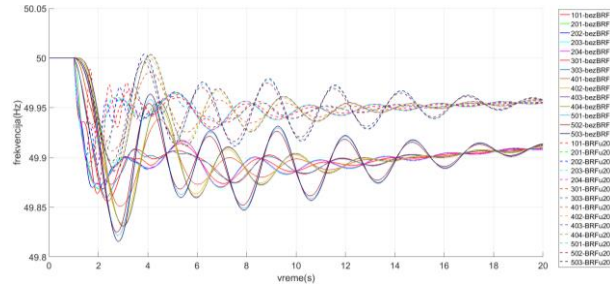


Slika 8: Grafički prikaz vrednosti indeksa za različite lokacije resursa za BRF

Sa Sl. 7 se može videti da se minimalne vrednost lokalne frekvencije dostižu u različitim čvorovima u zavisnosti da li postoji BRF, i u kom čvoru se nalazi resurs za BRF. U scenariju kada ne postoji BRF, minimalna vrednost lokalne frekvencije se dostiže u čvoru 503 i iznosi 49.8156 Hz. Ovaj rezultat nije toliko očekivan s obzir da je poremećaj nastao u oblasti 2. Međutim, karakteristika ovog test sistema je da je oblast 5 slabo povezana sa ostatkom sistema i poremećaj se zbog karakteristika međuzonskih oscilacija prenosi na oblast 5 i tu ima najveći efekat u pogledu propada frekvencije. Što se tiče lokacije resursa za BRF koja najviše doprinosi poboljšanju frekvencije, simulacijama je dobijeno da su to lokacije 202 i 201, odnosno čvorovi koji se nalaze u oblasti u kojoj je došlo do poremećaja. Aktivacijom BRF u čvoru 202, odnosno 201, omogućeno je usporavanje i ograničavanje propagacije poremećaja ka daljim delovima sistema. Kao rezultat toga dobijeno je da se minimum lokalne frekvencije ne dostiže u čvoru 503, već u čvoru 101, koji je bliži poremećaju. Što se tiče doprinosa resursa za BRF na drugim lokacijama, može se uočiti da resursi koji se nalaze u istim oblastima imaju sličan doprinos poboljšanju frekvencije i sličnu vrednost indeksa (Sl. 8). Ono što se isto može videti iz dobijenih rezultata jeste da resursi koji su bliže poremećaju doprinose više poboljšanju frekvencije jer ograničavaju dalju propagaciju poremećaja.

Na Sl. 9 su prikazane frekvencije generatorskih čvorova za slučaja poremećaja kada ne postoji BRF i kada je BRF na najpovoljnijoj lokaciji za taj poremećaj. Sa slike se može videti da generatori u istoj oblasti imaju slično ponašanje frekvencije

i u slučaju kada ne postoji BRF, a i kad se BRF nalazi u čvoru 202.



Slika 9: Frekvencija generatorskih čvorovima za slučaj poremećaja I kada ne postoji BRF i kad je BRF u čvoru 202

B. Proračun najpovoljnije lokacije resursa za BRF za određenu raspodelu inerciju i moguće poremećaje sa liste poremećaja

Za demonstraciju proračuna najpovoljnije lokacije resursa za BRF za određenu raspodelu inercije i moguće poremećaje sa liste poremećaja korišćeno je radno stanje sa niskom potrošnjom kao i u prethodnom potpoglavlju. Lista potencijalnih poremećaja se u realnim uslovima eksploatacije sistema definiše od strane operatora prenosne mreže, dok je u ovim simulacija definisana lista sa proizvoljnim poremećajima koji bi odgovarali ispadu jedne proizvodne jedinice u čvorovima u kojima su priključeni generatori. Lista potencijalnih ispada je prikazana u Tabeli I. Poremećaji se razlikuju prema lokaciji i veličini i shodno tome će se razlikovati i minimalne vrednosti lokalne frekvencije u sistemu kao i lokacija čvora gde se ona dešava. Da bi indeksi kojim se opisuje vrednost resursa za BRF u zavisnosti od lokacije mogli da se porede u pogledu doprinosa poboljšanju frekvencije, oni se normiraju prema odstupanju frekvencije za dati poremećaj, odnosno koriste se relativni indeksi. Usvojene potencijalne lokacije resursa za BRF su identične kao i u prethodnom potpoglavlju i nalaze se u čvorovima: 101, 201, 202, 301, 302, 401, 402, 501 i 502.

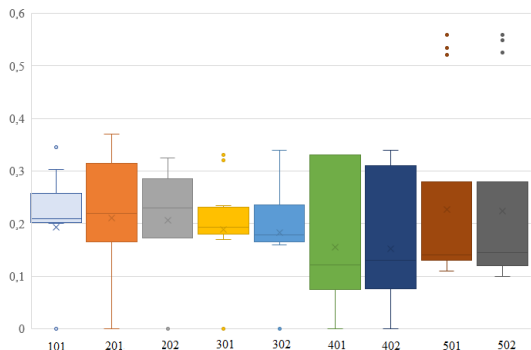
TABELA I. LISTA POTENCIJALNIH ISPADA

Redni broj poremećaja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Lokacija poremećaja	101	201	202	203	204	301	302	401	402	403	404	501	502	503
Veličina poremećaja(%)	0.5	1	1	0.5	0.7	0.5	1	0.5	1	0.5	0.7	0.5	1	0.5

a. procenat ukupne snage potrošnje u sistemu

Na Sl. 10 su prikazani rezultati proračuna za definisanu listu poremećaja i određeno radno stanje. Sa slike se može videti da resursi za BRF u istim oblastima imaju međusobno slične doprinose poboljšanju frekvencije za različite poremećaje. Prema sprovedenim simulacijama, najpovoljnija lokacija resursa za BRF je čvor 202. Ovaj rezultat se može objasniti činjenicom da je u oblasti 2 simulirano 4 poremećaja za koje se očekuje najveći doprinos upravo od resursa iz te oblasti. Takođe, u oblasti 4 koja je susedna oblasti 2 takođe je simulirano 4 poremećaja i tu je očekivan doprinos resursa iz

oblasti 2 veći nego iz oblasti 1, 3 i 5 koji su dalje od oblasti 4. Najmanji doprinos poboljšanju frekvencije imaju lokacije u oblasti 4 jer je ova oblast povezana samo sa oblašću 2 i udaljena je od drugih delova sistema. Sličan zaključak važi i za oblast 5 koja je slabo povezana sa ostatkom sistema i veliki indeksi upućuju na poremećaje u toj oblasti, dok je u slučaju poremećaja u drugim oblastima doprinos neznan. Doprinos resursa u oblasti 1 je sličan doprinosima resursa u oblasti 2, jer su ove oblasti jako električno povezane i mogu se posmatrati gotovo integralno.



Slika 10: Rezultati proračuna najpovoljnije lokacije resursa za BRF za određenu raspodelu inerciju i moguće poremećaje sa liste poremećaja

VI. ZAKLJUČAK

Ovaj rad daje odgovor na pitanje na kojoj lokaciji resurs za BRF najviše doprinosi poboljšanju frekvencije nakon poremećaja. Definisano je pokazatelj kojim se kvantifikuje doprinos resursa za BRF na određenoj lokaciji za definisan poremećaj i definisanu raspodelu inercije. Ovaj pokazatelj može biti koristan operatoru prenosnog sistema sa aspekta eksploatacije u realnom vremenu. Takođe, rezultati procedure kojom se određuju najpovoljnije lokacije resursa za BRF za listu poremećaja i definisano radno stanje mogu biti dragoceni operatoru prilikom alociranja rezerve za dan unapred. Uticaj lokacije resursa za BRF na frekvencijski odziv sistema može se posmatrati integralno sa dinamičkim karakteristikama resursa u pogledu kašnjenja i brzine promene aktivne snage i tako definisan indeks bi bio sveobuhvatniji u pogledu doprinosa frekvenciji, što će biti urađeno u nastavku istraživanja.

LITERATURA

- [1] P. Wall et al., "Deployment and demonstration of wide area monitoring system in power system of Great Britain," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 3, 2016, doi: 10.1007/s40565-016-0218-3.
- [2] D. Wilson, J. Yu, N. Al-Ashwal, B. Heimisson, and V. Terzija, "Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response requirements," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 113, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.034.
- [3] T. Xu, W. Jang, and T. J. Overbye, "Investigation of inertia's locational impacts on primary frequency response using large-scale synthetic network models," in 2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois, PECE 2017, 2017, doi: 10.1109/PECE.2017.7935742.

- [4] T. Xu, Y. Liu, and T. J. Overbye, "Metric development for evaluating inertia's locational impacts on system primary frequency response," in 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference, TPEC 2018, 2018, doi: 10.1109/TPEC.2018.8312056.
- [5] A. Adrees, J. V. Milanović, and P. Mancarella, "Effect of inertia heterogeneity on frequency dynamics of low-inertia power systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 14, 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6814.
- [6] F. U. Qureshi, G. Verbic, M. Garmroodi, A. Chapman, and A. S. Ahmadyar, "Using fast frequency response services to improve frequency stability of low inertia power systems," in Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2018, 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2018.8757957.
- [7] D. Al Kez, A. M. Foley, and D. J. Morrow, "A Comparative Assessment of Battery Energy Storage Locations in Power Systems with High Wind Power Penetrations," in Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, EEEIC / I and CPS Europe 2020, 2020, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160566.
- [8] G. Zhang, E. Ela, and Q. Wang, "Market Scheduling and Pricing for Primary and Secondary Frequency Reserve," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2889067.
- [9] C. Canizares et al., "Benchmark Models for the Analysis and Control of Small-Signal Oscillatory Dynamics in Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2561263.
- [10] Patrice Brunelle, "Australian simplified 14 generators IEEE benchmark (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51177-australian-simplified-14-generators-ieee-benchmark>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 5, 2021."
- [11] Claudio Canizares et al., "Benchmark Systems for Small-Signal Stability Analysis and Control; PES-TR18," *IEEE Power & Energy Society*, 2015.

ABSTRACT

This paper examines the challenges posed by the declining inertia in power systems due to the increasing integration of renewable energy sources. The reduced system inertia heightens sensitivity to frequency fluctuations following disturbances, rendering traditional frequency regulation methods inadequate. In response, we propose the adoption of Fast Frequency Control (FFC) as a more responsive solution to control the rate of frequency deviations. Our study introduces a novel analytical tool designed to strategically allocate FFC resources across various locations. This tool evaluates the effectiveness of different sites in contributing to frequency stability under disturbance scenarios. Furthermore, we have developed a methodology for optimal placement of FFC resources, taking into account diverse operational conditions. This approach is crucial for efficient allocation of FFC assets. The efficacy of our proposed methods is validated through simulations applied to a power system model comprising 68 buses, thereby demonstrating their potential in enhancing system resilience against frequency disturbances.

METHODOLOGY FOR QUANTIFYING THE VALUE OF FAST FREQUENCY CONTROL RESOURCES DEPENDING ON LOCATION IN THE POWER SYSTEM

Jelena Stojković Terzić, Predrag Stefanov