

Uticaj integracije vetroelektrana na smanjenje inercije u elektroenergetskom sistemu Srbije

Milica Aščerić

Go2Power

Beograd, Srbija

milica.asceric@go2power.eu

Kristina Džodić, Željko Đurišić

Katedra za elektroenergetske sisteme

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

kristinadz@etf.rs; djurisic@etf.rs

Sažetak—U cilju zaštite životne sredine i problema iscrpljenosti fosilnih goriva prisutan je stalni rast instaliranih kapaciteta obnovljivih izvora energije. Mnoge zemlje, među kojima je i Srbija, su postavile ambiciozne ciljeve u pogledu izgradnje obnovljivih izvora energije. U ovom radu je dat osvrt na probleme gubitka inercionih masa u sistemu kroz sve veće učešće obnovljivih izvora energije (OIE). Na osnovu dostupnih podataka o vrednosti inercionih konstanti postojećih agregata i informacije o angažovanju svakog agregata u EES-u Srbije sa satnom rezolucijom, vršena je procena raspoložive sistemske inercije koja potiče od proizvodnih jedinica. Uticaj smanjene inercije na stabilnost sistema je analizirana preko dinamičkog modela sistema kreiranog u programu Matlab/SIMULINK. Demonstrirana je mogućnost i značaj uključivanja perspektivnih vetroelektrana u frekventijsku regulaciju.

Ključne riječi- veštački inercijalni odziv; konstanta inercije; regulacija frekvencije; vetroelektrane; bezinercioni izvori

I. UVOD

Masovna primena tehnologija OIE igra glavnu ulogu u procesu dekarbonizacije elektroenergetskog sistema (EES). Prema Međunarodnoj agenciji za obnovljivu energiju (IRENA), postizanje ciljeva definisanih Pariskim sporazumom zahteva da globalni udeo energije vetra u ukupnoj proizvodnji električne energije dostigne 21% do 2030. i 35% do 2060. godine [1]. Najčešće korišćene vetro turbine tipa 3 i tipa 4 rade pri promenljivoj brzini obrtanja kako bi postigle veću efikasnost konverzije energije vetra. Rad pri promenljivoj brzini obrtanja za posledicu ima da su brzina obrtanja generatora i mrežna frekvencija raspregnuti pretvaračem. Varijabilnost primarnog izvora energije, vetra, kao i način priključenja stavili su vetroelektrane u poziciju negativnog uticaja na frekventijsku stabilnost elektroenergetskog sistema [2].

Zbog povećanog udela OIE, mnogi konvencionalni izvori, kod kojih se elektromehanička konverzija vrši sa standardnim sinhronim mašinama direktno priključenim na EES, biće zamenjeni jedinicama koje su na mrežu priključene preko energetskih pretvarača. Kako se koncepti upravljanja i zaštite tradicionalnih EES-a zasnivaju na statičkim i dinamičkim karakteristikama sinhronih generatora, usled njihovog nedostatka javlja se opasnost od nepouzdanog i nestabilnog rada sistema [3]. Zemlje poput Irske, Danske, Ujedinjenog

Kraljevstva su već iskusile probleme povezane sa stabilnošću EES-a usled značajnog udela OIE u proizvodnom miksu. Unutar evropske interkonekcije, ENTSO-E (*European association for the cooperation of transmission system operators*) je prepoznala važnost problema smanjene inercije i objavila preporučene smernice i sprovedene studije na tu temu [4]. Kako bi se sprečilo ugrožavanje bezbednosti sistema kontinentalne Evrope, planira se definisanje minimalne vrednosti inercije koju svaka zemlja unutar sinhronne oblasti mora da pruži u svakom satu. U proizvodnoj strukturi Srbije do sada je relativno učešće OIE bilo značajno manje nego u zemljama Evropske Unije. Prema Planu razvoja prenosnog sistema Republike Srbije očekuje se značajna promena stanja po pitanju integrisanja bezinercionih izvora. Iz tog razloga je od velikog značaja izvršiti analizu uticaja smanjene inercije kroz sve veće učešće OIE.

II. INERCIJA ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Svaki obrtna mašina (motor ili generator) koja je direktno povezana na mrežu u određenoj meri obezbeđuje inerciju sistemu. U tom pogledu i industrijski potrošači sa svojim indukcionim motorima obezbeđuju određenu inerciju sistemu međutim, najveći deo potiče od sinhronih generatora unutar konvencionalnih elektrana. Inercija sinhronog generatora podrazumeva rotirajuće mase pogonske turbine, vratila i rotora generatora u kojima se nalazi uskladištena kinetička energija. Parametar koji se koristi za kvantifikaciju inercije naziva se konstanta inercije. Ona se izražava u sekundama i označava vreme koje je potrebno da se agregat zaleti iz stanja mirovanja do sinhronne brzine ako je pogonjen konstantnim momentom koji odgovara odnosu nominalne prividne snage i sinhronne brzine. Za sagledavanje inercijalnog odziva konstanta inercije se može definisati i kao vreme tokom kojeg mašina može obezbeđivati aktivnu snagu koja odgovara nominalnoj prividnoj snazi samo na račun uskladištene kinetičke energije. Ova konstanta je definisana sledećom relacijom:

$$H = \frac{J \cdot \omega_n^2}{2 \cdot S_n} \quad (1)$$

Gde je: J moment inercije zamajnih masa agregata, S_n nazivna prividna snaga generatora, a ω_n sinhrona brzina obrtanja. Sve sinhronne mašine povezane na mrežu, u stacionarnom stanju rade na istoj frekvenciji. Prilikom većeg poremećaja u sistemu, debalans snaga proizvodnje i potrošnje raspoređuje se na sve sinhronne mašine. Na početku prelaznog procesa svaka mašina će doživeti različitu promenu ugla snage i brzine rotora. Međutim uz pomoć prigušnih namotaja u rotorima i sinhronizacionih sila koje međusobno deluju, svi sinhroni generatori na kraju prelaznog procesa konvergiraju ka istoj brzina obrtanja. Kada govorimo o kapacitetu sistema u pogledu akumulisane kinetičke energije onda se agregati mogu posmatrati objedinjeno s obzirom da je sistemska frekvencija ista u svim čvorištima sistema. Iz tog razloga, svi generatori se mogu sjediniti u jedinstvenu inercionu celinu, a njihov zajednički frekvencijski odgovor posmatrati kroz jednačinu (2) [5]:

$$2 \cdot H_{sys} \cdot \frac{df}{dt} = P_G - P_L \quad (2)$$

Gde su P_G ukupna aktivna snaga generisanja u sistemu, a P_L bruto snaga potrošnje. Sistemska inerciona konstanta, H_{sys} je ekvivalentna inercija EES-a, koja se računa pomoću sledeće relacije:

$$H_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot S_i}{S_{sys}} \quad (3)$$

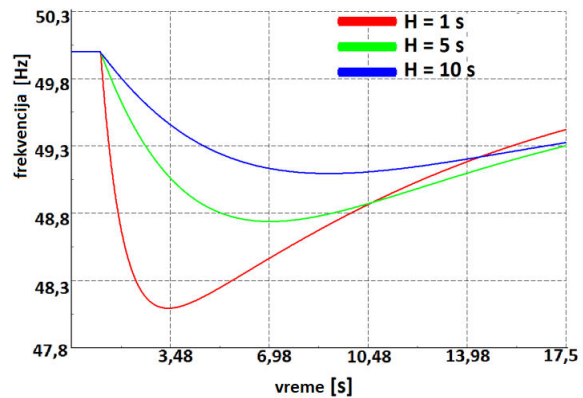
Gde su H_i i S_i inerciona konstanta i nazivna prividna snaga i -tog agregata. Pokazatelj H_{sys} nije konstantna veličina jer su broj i tip mašina povezanih na mrežu promenljivi u vremenu, shodno planu angažovanja proizvodnih jedinica. Ono što je bitno uočiti je da inerciona konstanta sistema ne zavisi od radnog režima agregata, odnosno da on pruža istu kinetičku energiju kada radi u praznom hodu i kada je opterećen. Ovo nije slučaj kod vetroelektrana jer se njihova brzina obrtanja menja.

Kada analiziramo odziv sistema na poremećaj balansa snaga proizvodnje i potrošnje, uz vrednost poremećaja snage, H_{sys} je najuticajniji parametar na dinamički frekvencijski odziv. Uticaj vrednosti H_{sys} na frekvencijski odziv je prikazan na primeru na Sl. 1. Što je vrednost H_{sys} veća to je sporija promena frekvencije u sistemu i maksimalna promena frekvencije je manja, ali je trajanje prelaznog procesa duže.

Uslov za stabilan rad mreže je da proizvodnja i potrošnja budu uravnotežene u svakom trenutku rada sistema. Kada dođe do debalansa snaga proizvodnje i potrošnje, izlazna snaga generatora priključenih na mrežu ne može se trenutno povećati zbog vremenskog kašnjenja u odzivu regulatora (3-4 s), stoga razliku snaga nadomešćuje kinetička energija rotirajućih masa i time usporava promenu frekvencije. Brzina obrtanja velikih i masivnih rotirajućih sistema ne može da se promeni trenutno, prilikom poremećaja u sistemu, zato sinhrona mašina apsorbira aktivnu snagu iz mreže ili injektira u nju protiveci se nastaloj

promeni. Na taj način, zahvaljujući svojoj inertnosti, doprinose da promena frekvencije bude sporija pri poremećaju i time daju dovoljno vremena sistemu regulacije da obezbedi balans snaga proizvodnje i potrošnje. Kada sistem ima dovoljno inercije, mehanički sistemi imaju vremena za pokretanje ventila i poluga kako bi promenili izlaznu snagu jedinica.

Sa Sl. 1 je jasno da prilikom istog poremećaja u sistemu smanjena inercija dovodi do veće brzine promene frekvencije (Rate of Change of Frequency - RoCoF) i niže minimalne vrednosti frekvencije (f_{min}).



Slika 1. Uticaj sistemske inercione konstante na frekvencijski odziv

III. STATUS VETROELEKTRANA U FREKVENCIJSKOM ODZIVU

U cilju boljeg razumevanja mogućnosti vetroelektrana (VE) u pružanju podrške frekvenciji, može se poći od Njutnove mehaničke jednačine (4) koja važi za bilo koji rotirajući sistem, pa se može primeniti kako kod SG-a tako i kod vetrogeneratora (VG). U jednačini M_m predstavlja pogonski mehanički moment turbine, a M_e otporni elektromagnetski moment generatora,

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e \quad (4)$$

Principi upravljanja elektromagnetskim i mehaničkim momentom se razlikuju kod SC i VG i njihova komparacija je prikazana u tabeli I [6].

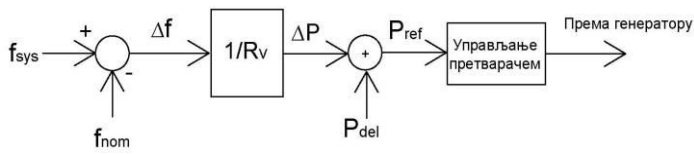
TABELA I. KOMPARATIVNA ANALIZA KONTROLE SG -A I VG-A

| | Sinhroni generator | Vetrogenerator |
|--------------------------|---|---|
| Mehanička snaga | -kontrola protoka -radnog fluida -turbinski regulator | -brzina vetra -brzina rotora -ugao lopatica |
| Električna snaga | -mehanička snaga -interakcija sa mrežom | -mehanička snaga -kontrola pretvarača |
| Inercijalni odziv | -neupravljiv | -upravljiv |

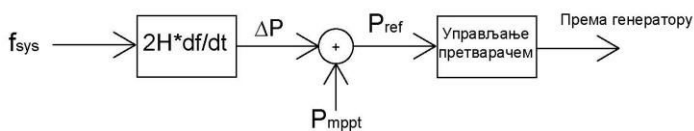
Kod vetroagregata izlazna snaga je diktirana ulaznom snagom od strane pogonske turbine i njome se može upravljati na račun promene brzine obrtanja. To upravljanje se vrši preko energetskog pretvarača koji raspreže mehaničku brzinu obrtanja vetrogeneratora od sinhronne brzine priključne mreže. Iz tog razloga izlazna snaga vetroagregata je nezavisna od

promene frekvencije u mreži, pa vetroagregati ne pružaju spontanu inercijalnu podršku pri promeni frekvencije, kao što to rade SG u konvencionalnim elektranama.

Nove tehnologije donose nove mogućnosti za pružanje sistemskih usluga. Jedna od takvih mogućnosti je i emulacija inercijalnog odziva kod vetroagregata (VA). Koncepti upravljanja VA-om, koji su korišćeni u radu, prikazani su na Sl. 2 i Sl. 3.



Slika 2. Metoda statizma



Slika 3. Veštački inercijalni odziv

Da bi VA učestvovali u regulaciji frekvencije potrebno je da se vrši upravljanje pretvaračem. Pretvaraču se dodaje upravljačka petlja osetljiva na frekvenciju. U konceptu veštačkog inercijalnog odziva dodatna snaga se dobija na račun smanjenja kinetičke energije obrtnih masa (usporavanja rotora). Režim praćenja tačke maksimalne snage predstavlja donja upravljačka grana i ona je aktivna tokom normalnog raga VG-a. Raspoloživa kinetička energija vetroturbine je funkcija zatečene brzine rotora i momenta inercije VA. Sa tim u vezi, treba imati u vidu da raspoloživa kinetička energija nije fiksna podatak, kao kod konvencionalnih sinhronih generatora, jer se brzina turbine menja sa promenom brzine vetra. Najveća raspoloživa kinetička energija je pri jakim vetrovima, kada je brzina obrtanja turbine maksimalna.

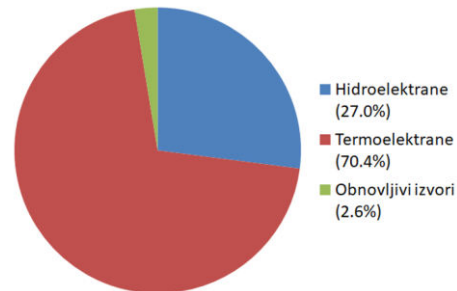
Metoda statizma zahteva rasterećeni režim rada VA, odnosno rad izvan tačke maksimalne snage. Uobičajno je da rezerva snage predstavlja 10% nazivne snage vetroagregata. Na ovaj način vetroagregat može doprineti regulaciji frekvencije u dužem vremenskom periodu, odnosno učestvovati u primarnoj i sekundarnoj regulaciji frekvencije.

Dosadašnje regulative u Srbiji ne zahtevaju od vetroelektrana učestvovanje u regulaciji frekvencije, kao ni pružanje veštačkog (virtuelnog) inercijskog odziva. Može se zaključiti da vetrogeneratori imaju povlašćen položaj poredići ih sa konvencionalnim generatorima. U većini drugih mrežnih pravila, pred VE se postavljaju zahtevi učešća u regulaciji frekvencije.

IV. MODELLOVANJE EES-A REPUBLIKE SRBIJE

Srpski elektroenergetski sistem povezan je sa EES-ima susjednih država i deo je ENTSO-E interkonekcije, sinhrona mreže kontinentalne Evrope. Prema podacima iz tehničkog godišnjeg izveštaja Elektroprivrede Srbije za 2020. godinu

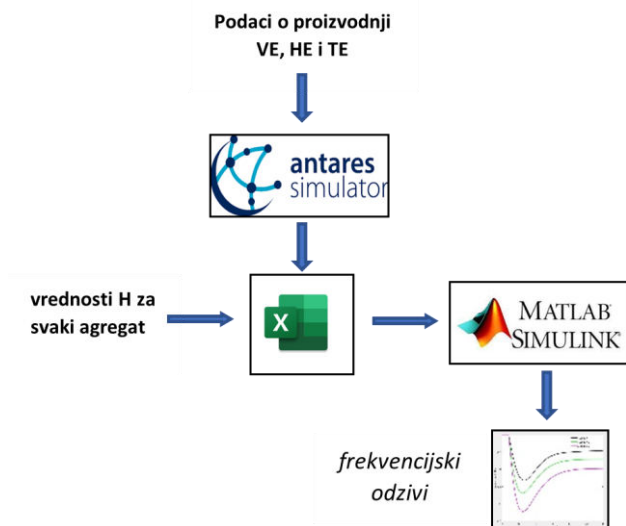
prikazana je struktura ukupne proizvodnje električne energije na Sl. 4. U planiranim projektima do kraja 2030. godine očekuje se priključenje višestruko veće snage u vetroelektranama, dok je sa druge strane predviđeno gašenje termoelektrana, i to prvo onih sa nižim stepenom efikasnosti. Prema Nacionalnom planu za smanjenje emisija glavnih zagađujućih materija koje potiču iz starih velikih postrojenja za sagorevanje (*Nerp opt out*) [7], planirano je gašenje TE Kolubara A i TE Morava do 2023. godine.



Slika 4. Struktura proizvodnje električne energije za 2020. godinu

Podaci o radu EES-a Srbije su preuzeti sa sajta [8]. Referentni vremenski period je 2020. godina. Informacije o radu agregata u svakom satu, o vrednostima njihovih naznačenih snaga i konstantama inercije su potrebne za procenu ukupne sistemske inercije. Kako bi se analizirala moguća perspektivna stanja u EES-u Srbije, korišćen je softverski alat ANTARES (*A New Tool for Adequacy Reports and Economic Simulations*), koji je namenjen za procenu adekvatnosti i analize ekonomičnog rada sistema. U modelu se razmatra sistem u kome su zanemareni gubici u prenosu. Cilj sprovedenih analiza je bio da se dobije realističan plan rada raspoloživih termoblokova uz očekivano povećanje potrošnje i kapaciteta za prekograničnu razmenu energije. Za hidroelektrane je usvojen dijagram proizvodnje koji je ostvaren tokom 2020. godine. Ukoliko se uzme u obzir da je većina navedenih hidroelektrana protočna, i da je njihova proizvodnja diktirana raspoloživim hidrološkim potencijalom, a da se po ovom pitanju, 2020. godina može okarakterisati kao prosečna, onda je ponavljanje dijagrama proizvodnje HE opravdano. Za ilustrovanje uticaja smanjenja inercije na frekvencijski odziv, u radu je korišćen jednostavan i linearizovan model hidroelektrana, termoelektrana i vetroelektrana sa promenljivom brzinom obrtanja kojim je obuhvaćeno dejstvo primarnih regulatora. Dinamički model sistema za analizu promene frekvencije implementiran u Matlab/SIMULINK-u, je formiran po ugledu na rad [9]. Model prikazuje elektromehaničke prelazne procese. U odnosu na elektromehaničke, brzi elektromagnetni tranzijenti se dešavaju skoro trenutno, pa u modelu nije potrebno dati prikaz energetske elektronike, upravljanja rotorom i brzih prelaznih procesa u statoru, te se njihova dinamika zanemaruje. U simulacijama je korišćen model vetroagregata sa konstantom inercije od 5 s, analiziran je rad oko nominalne tačke, i statizmom od -5% bez mrtve zone. U tabeli II dat je spisak vrednosti parametara korišćenih u modelu. Statizam elektrana prikazan je kroz veličine R_{te} i R_{hes} , element D je koeficijent prigušenja i predstavlja relativnu promenu opterećenja za 1% promene frekvencije, ostali faktori se odnose na dinamiku

elektrana. Parametri kao što su inercija sistema H_{sys} , udeo elektrana u ukupnoj proizvodnji i poremećaj sistema uzimaće različite vrednosti u zavisnosti od tipa scenarija koji se razmatra. Pristup u analizi frekventijskog odziva koji je korišćen u radu je ilustrovan na Sl. 5. U analizama je pretpostavljeno da model Srbije radi izolovano, odnosno da nema interkonektivne razmene snaga debalansa.



Slika 5. Procedura dobijanja rezultata dinamičkih simulacija

TABELA II. PARAMETRI SIMULACIJE

| Termoelektrane | | | | Hidroelektrane | | Sistem |
|----------------|---------|-----|--------|----------------|--------|--------|
| Rte [%] | Tsg [s] | Fh | Tr [s] | Rhe [%] | Tw [s] | D |
| 6 | 0.3 | 0.3 | 8 | 4 | 1 | 0.8 |



V. ANALIZA SCENARIJA

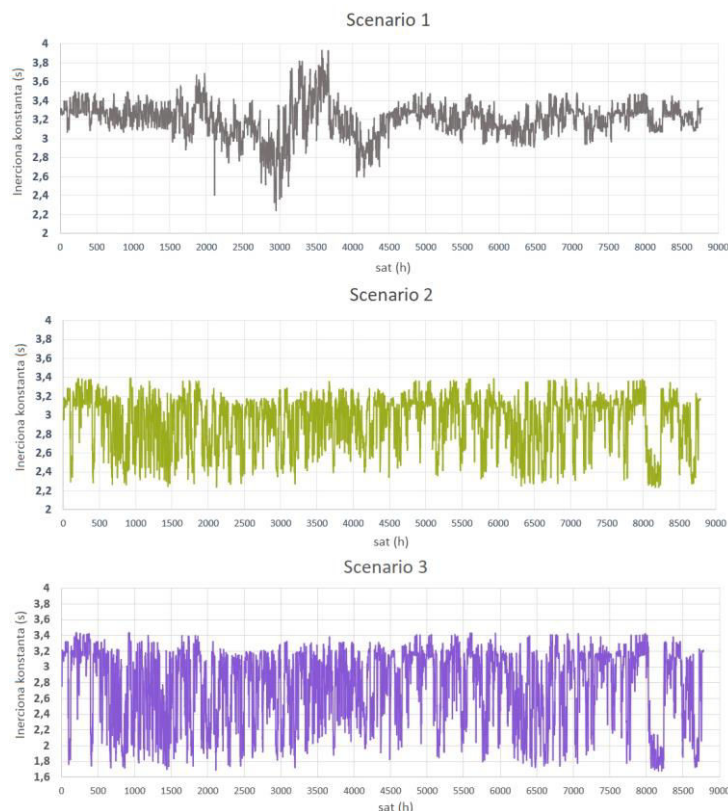
U programskom alatu ANTARES su menjani ulazni podaci o proizvodnji vetroelektrana i proizvodnji u termoelektranama, tako da je formirano 9 scenarija i to na sledeći način. Implementirana su tri različita profila proizvodnje vetroelektrana od 400 MW, 2000 MW i 4000 MW. Za svaki profil proizvodnje formirana su tri različita scenarija prema broju raspoloživih termoelektrana. Radi bolje preglednosti u nastavku rada biće prikazani rezultati za tri scenarija od ukupno 9 analiziranih, a njihov opis je prikazan u tabeli III. Scenario 1 opisuje trenutno stanje u sistemu, dok scenariji 2 i 3 opisuju perspektivno stanje u pogledu instaliranih kapaciteta vetroelektrana i određenog stepena dekarbonizacije.

Prvo je ispitana inercija sistema za tri različita scenarija. Obradom ulaznih podataka dolazi se do satne promene inercije u posmatranoj godini za svaki od scenarija, a njihove vrednosti su prikazane na Sl. 6.

Od interesa je zabeležiti najmanju vrednost inercione konstante sistema za analizu kritičnog dinamičkog odziva. Kako bi stekli bolji uvid u tabeli IV je dat prikaz korisnih podataka izdvojenih sa Sl. 6.

TABELA III. OPIS ANALIZIRANIH SCENARIJA

| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|---|-------------------------------|---|--|
|  | Sve TE su u pogonu | TE Kolubara i TE Morava se isključuju iz pogona | TE Kolubara, TE Morava, TENT A blokovi A1 i A2 su van pogona |
|  | 400MW instalisanog kapaciteta | 2000MW instalisanog kapaciteta | 4000MW instalisanog kapaciteta |



Slika 6. Promena srednje satne vrednosti sistemske inercije za 3 analizirana scenarija na godišnjem nivou

TABELA IV. NAJVAŽNIJI PODACI O SISTEMSKOJ INERCIJI ZA 3 ANALIZIRANA SCENARIJA

| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| H_{min} | 2.24s | 2.24s | 1.68s |
| $t(H_{min})$ | 04.maj 03:00h | 08.Dec 05:00h | 08.Dec 05:00h |
| H_{sr} | 3.21s | 2.94s | 2.76s |

Potiskivanjem termoelektrana i većim udelom energije vetra u ukupnoj proizvodnji, za očekivati je da inercija bude smanjena.

Sat sa najmanjom vrednošću inercione konstante (kritičan sat) sadrži i druge važne informacije, kao što su: udeo termoelektrana (K_{TE}), udeo hidroelektrana (K_{HE}), udeo vetroelektrana (K_{VE}) i termoblok sa najvećom snagom koji je u pogonu izražen u odnosu na ukupnu potrošnju u datom satu (ΔPL). Kritičan poremećaj u simulaciji predstavlja ispad najvećeg termobloka u kritičnom satu. Uvažavanje svih gore pomenutih informacija osigurava adekvatnu procenu

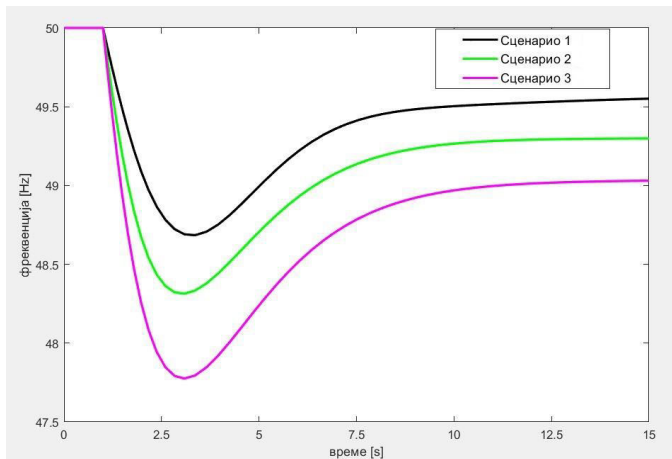
dinamičkih odziva, a pregled njihovih vrednosti prikazan je u tabeli V.

TABELA V. ULAZNI PARAMETRI DINAMIČKE ANALIZE

| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 |
|-------------|------------|------------|------------|
| KTE | 40 % | 62.8 % | 44.2 % |
| KHE | 32 % | 3.3 % | 2.4 % |
| KVE | 28 % | 33.9 % | 53.4 % |
| ΔPL | 0.1 r.j. | 0.16 r.j. | 0.16 r.j. |
| HMIN | 2.24 s | 2.24 s | 1.68 s |

Frekvencijski odzivi bez uključivanja vetroelektrana u regulaciju, dobijeni u Matlab/SIMULINK-u, za sva tri scenarija su prikazani na Sl. 7.

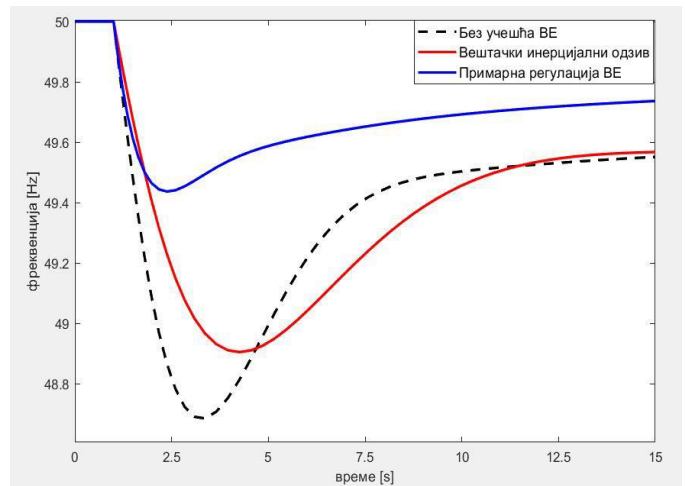
Minimalna vrednost inercije je u ovom slučaju dala najugroženiji frekvencijski odziv. Smanjena vrednost inercije utiče negativno na parametar kvaliteta odziva, ali ne mogu se donositi zaključci samo na osnovu nje. U tabeli V je nabrojano još pet elemenata koji deluju na frekvencijski odziv. Vrednost poremećaja je u scenarijima približno jednaka pa su i dobijeni rezultati uporedivi. U suprotnom najugroženiji scenario bi mogao biti onaj koji je pogođen najvećim relativnim poremećajem, a ne onaj sa najmanjom inercijom. Jasan je uticaj svakog faktora navedenog u tabeli V na kvalitet odziva, međutim promenom više ulaznih podataka ne može se sa sigurnošću tvrditi ishod scenarija što ukazuje na složenost problema inercije i frekvencijskog odziva.



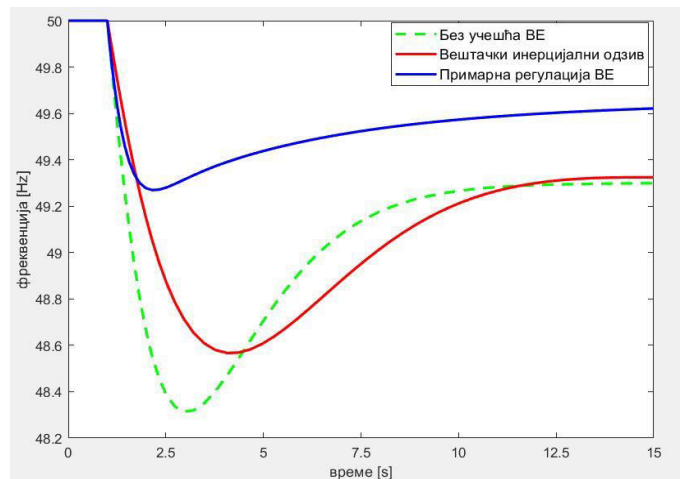
Slika 7. Frekvencijski odzivi bez uključivanja VE u regulaciju

Na Sl. 8, Sl. 9 i Sl. 10 je dat uporedan prikaz frekvencijskih odziva kada vetroelektrane učestvuju u regulaciji frekvencije kroz koncept veštačkog inercijalnog odziva i metode statizma (primarne regulacije) i kada ne učestvuju.

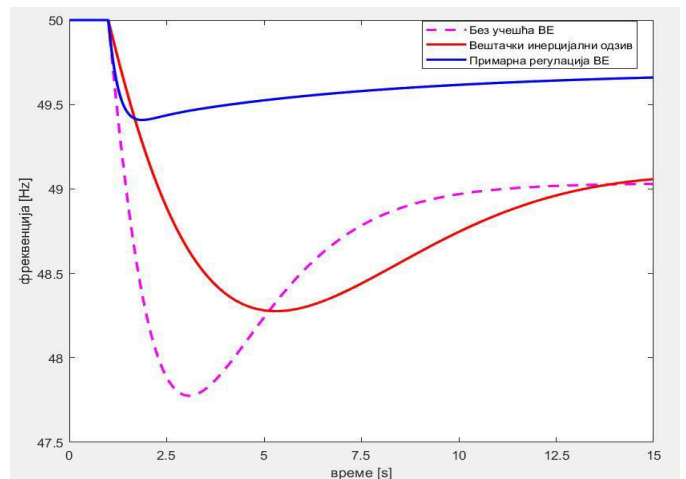
Radi poređenja različitih slučajeva, kvalitet frekvencijskog odziva kvantifikovan je kroz vrednosti tri parametra: RoCoF (brzina promene frekvencije u početnom trenutku), f_{min} (najmanja vrednost frekvencije tokom prelaznog procesa) i t_{min} (vreme za koje frekvencija padne na f_{min}). U tabeli VI su sumirane vrednosti najvažnijih parametara frekvencijskog odziva za sva tri scenarija.



Slika 8. Frekvencijski odzivi za scenario 1



Slika 9. Frekvencijski odzivi za scenario 2



Slika 10. Frekvencijski odzivi za scenario 3

TABELA VI. PRIKAZ NAJVAŽNIJIH PARAMETARA SIMULACIJA

| | | Bez učešća VE u regulaciji | Uključivanje VE kroz veštački inercijalni odziv | Uključivanje VE kroz primarnu regulaciju |
|-----------------------|-----------------|----------------------------------|---|---|
| Scenario 1 | RoCoF [Hz/s] | 1.12 | 0.68 | 1.11 |
| | fmin [Hz] | 48.68 | 48.9 | 49.44 |
| | Tmin [s] | 3.358 | 4.253 | 2.38 |
| | | | | |
| Scenario 2 | RoCoF [Hz/s] | 1.82 | 1.03 | 1.79 |
| | fmin [Hz] | 48.31 | 48.57 | 49.27 |
| | Tmin [s] | 2.96 | 4.07 | 2.15 |
| | | | | |
| Scenario 3 | RoCoF [Hz/s] | 2.45 | 0.93 | 2.45 |
| | fmin [Hz] | 47.75 | 48.28 | 49.41 |
| | Tmin [s] | 3.06 | 5.22 | 1.87 |
| | | | | |

VI. ZAKLJUČAK

Uz podatke o radu EES-a Srbije u 2020. godini i u skladu sa ciljevima elektroenergetike formirano je devet scenarija, koji obuhvataju postojeće stanje i perspektivne kritične događaje u sistemu. Analize su pokazale da se može očekivati pad sistemske inercije EES-a Srbije i ispod 2 s, ukoliko se ostvari planirani trend priključenja vetroelektrana i nastavi sa gašenjem termoblokova. Kroz dinamičke simulacije u razvijenom modelu prikazane su posledice velike integracije vetroelektrana ali i mogućnosti njihovog doprinosa u frekvencijskoj regulaciji. Uključivanjem vetroelektrana u kontrolu frekvencije rezultati simulacija su značajno poboljšani. Istaknut je značaj pokazatelja brzine promene frekvencije (RoCoF), kao elementa koji ukazuje na slabost sistema. U poređnom analizom doprinosa vetroelektrana usled veštačkog inercijalnog odziva i odziva analognog primarnim regulatorima, može se zaključiti da učešće vetroelektrana u primarnoj regulaciji bi doprinelo značajnom smanjenju dubine propada frekvencije. Međutim, ovakvo rezerviranje snage zahteva da elektrana radi van tačke maksimalne snage, a to direktno dovodi do smanjenja godišnje proizvodnje vetroelektrane..

Sposobnosti inercijalnog i primarnog odziva vetroagregata definisane su početnim uslovima pre poremećaja, pa je potrebno dodatno istraživanje ograničenja vetroagregata koja proizilaze iz početne/zatečene brzine rotora. Uticaj brzih tranzijentnih promena, kao i preopterećenja delova vetroagregata na životni vek vetroturbine takođe nisu dovoljno istraženi. U daljem istraživačkom radu biće izazovno istražiti koliko je vetroagregata potrebno da učestvuje u pružanju podrške frekvenciji, kako bi se pokazatelji frekvencijskog odziva održali na tolerantnoj vrednosti.

Treba istaći da uključivanje vetroelektrana u inercijalni odziv neznatno utiče na smanjenje godišnje proizvodnje, tako da pružanje ove usluge ne bi stvaralo bitne dodatne troškove vlasnicima vetroelektrana. Uključivanjem vetroelektrana u

sisteme primarne, sekundarne i tercijerne regulacije zahteva značajne gubitke proizvodnje, pa su takvi servisi skupi.

LITERATURA

- [1] Future of Wind. Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects. (A Global Energy Transformation Paper); International Renewable Energy Agency (IRENA): Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2019.
- [2] Analiza integracija nOIE u EES BiH, NOSBiH
- [3] Odbor za SANU, "Razvoj elektroenergetike Republike Srbije do 2050. godine"
- [4] "Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe –Requirements and impacting factors –." (2016).
- [5] Pieter Tielens, Pierre Henneaux, Stijn Cole, „ASSET STUDY on Penetration of renewables and reduction of synchronous inertia in the European power system – Analysis and solutions“, November 2018.
- [6] <https://youtu.be/hXv1uElfvgw>
- [7] <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/drugiakt/2020/10/1/reg>
- [8] <https://transparency.entsoe.eu/> (pristupljeno: januar 2022)
- [9] Krpan, M. and Kuzle, I. (2017), Inertial and primary frequency response model of variable-speed wind turbines. The Journal of Engineering, 2017: 844-848. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0449>
- [10] Tomislav Baškarad, Nenad Debrecin, Josip Đaković, Davor Grgić, Igor Ivanković, Matej Krpan, Igor Kuzle, Nenad Švarc, Tomislav Tomiša, "Regulacija frekvencije i radne snage te važnost konstante tromosti u elektroenergetskom sustavu s velikim udjelom vjetroelektrana (v.1.0)", Zagreb, 2019
- [11] Ђуришић Жељко, „Vjetroelektrane“, Београд, 2019.
- [12] WU, Z., GAO, W., GAO, T. et al. State-of-the-art review on frequency response of wind power plants in power systems. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 6, 1–16 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0315-y>

ABSTRACT

Having in mind the protection of the environment as well as the problem of fossil fuel depletion, there is a constant increase in the installed capacity of renewable energy sources. Numerous countries, including Serbia, have already established ambitious goals regarding the construction of renewable energy sources. The paper gives an overview of the problems of loss of inertial masses in the system through the increasing share of renewable energy sources (RES). In addition, an assessment of the available system inertia, generated from the production units was done. It was based on available data about the value of the inertia constants regarding the existing aggregates as well as the information on each aggregator's engagement in the RES of Serbia with an hourly resolution. The influence of reduced inertia on the system's stability was processed through a dynamic model of the system created in Matlab/SIMULINK. The possibility and importance of including future wind power plants in frequency regulation were demonstrated.

IMPACT OF WIND FARMS INTEGRATION ON THE REDUCTION OF INERTIA IN THE SERBIAN POWER SYSTEM

Milica Aščerić, Kristina Džodić, Željko Đurišić