

Tomislav Baškarad
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.baskarad@fer.hr

Ninoslav Holjevac
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ninoslav.holjevac@fer.hr

Josip Đaković
Fakultet elektrotehnike i računarstva
josip.djakovic@fer.hr

Igor Kuzle
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

Igor Ivanković
Hrvatski operator prijenosnog sustava, d.o.o.
igor.ivankovic@hops.hr

VAŽNOST ROCOF-A U ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA S VISOKIM UDJELOM ELEKTRANA TEMELJENIM NA IZMJENJIVAČIMA

SAŽETAK

Priključivanjem novih tehnologija u elektroenergetski sustav (EES) koje su uglavnom temeljene na izmjenjivačima, značajno se mijenjanju karakteristike konvencionalnog EES-a. Dolazi do smanjenja sinkrone inercije što uzrokuje bržu dinamiku promjene frekvencije. Sinkrona inercija izravno utječe na najveću vrijednost parametra brzine promjene frekvencije. Brzina promjene frekvencije (ROCOF) ima veliku važnost u EES-ima, jer se koristi kao glavni parametar releja za zaštitu od otočnog pogona elektrane na distribucijskoj razini, kao parametar u upravljačkim algoritmima za brzi frekvencijski odziv i sintetički inercijski odziv, kao parametar za podfrekvencijsko rasterećenje.

U radu će se detaljno opisati važnost ROCOF-a, predočiti trenutne svjetske odredbe mrežnih pravila vezanih uz ROCOF, te prikazati rezultati ispitivanja i analize ROCOF-a u hrvatskom EES-u s obzirom na budući scenarij visokog udjela proizvodnje iz obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi: ROCOF, inercija, dinamika frekvencije, EES temeljen na izmjenjivačima

THE IMPORTANCE OF ROCOF IN THE POWER SYSTEM WITH HIGH SCALE OF INVERTERS BASED POWER PLANTS

ABSTRACT

By integrating new generation technologies into the electric power system (EPS) which are mainly inverter-based, the characteristics of the conventional bulk EPS are significantly changed leading to a reduction of synchronous inertia which causes faster frequency dynamics. Synchronous inertia directly affects the maximum value of the rate of change of frequency (ROCOF). The importance of ROCOF is vital: ROCOF is the main parameter for Loss of Mains relay; ROCOF is used as an input parameter for Fast Frequency Response and Synthetic Inertial Response control algorithms; ROCOF can be used as a metric parameter for under-frequency load shedding.

In this paper, the importance of ROCOF in the inverter rich EPS will be described in detail, different grid code versions concerning ROCOF will be presented and the results of ROCOF analysis in Croatian EPS with respect to the future renewable energy source (RES) share scenarios will be shown.

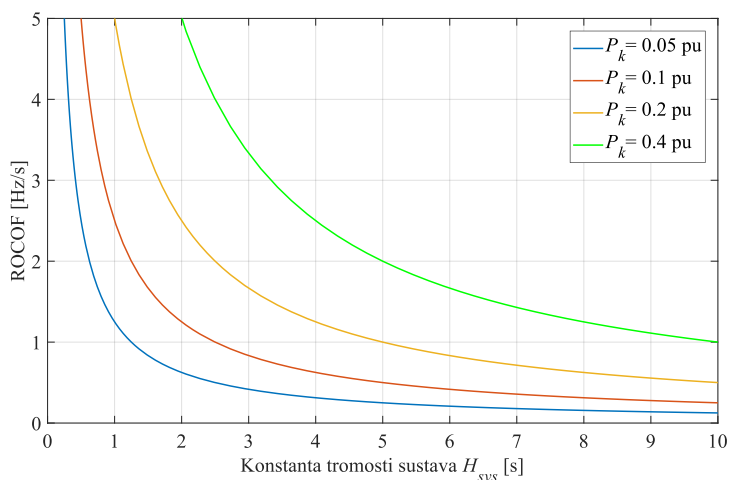
Key words: ROCOF, inertia, frequency dynamics, EPS inverter-based

1. UVOD

Elektroenergetski sustav (EES) prolazi kroz veliku promjenu paradigme, a trenutni je izazov osigurati održiv EES (niskouglični ili bez ugljika) uz uključivanje svih novih tehnologija koje su uglavnom temeljene na izmjenjivačima. Takvi uređaji uključuju proizvodne jedinice na obnovljive i konvencionalne izvore energije, trošila i spremnike energije. Povećana integracija ovih uređaja značajno mijenja karakteristike konvencionalnog EES-a te dolazi do smanjenja sinkrone inercije što uzrokuje bržu dinamiku promjene frekvencije. Sinkrona inercija izravno utječe na najveću vrijednost parametra brzine promjene frekvencije (ROCOF, engl. *Rate of Change of Frequency*). Ovaj parametar nije bio od velike važnosti u konvencionalnim EES-ima upravo zbog dostatne inercije sinkronih generatora koja ograničava i sprječava pojavu velikih vrijednosti ROCOF-a. Međutim u novije vrijeme ovaj parametar poprima sve veću važnosti jer s jedne strane sve većom integracijom elektrana temeljenim na izmjenjivačima koje inherentno ne doprinose inerciji sustava, te s druge strane isključivanjem sinkronih generatora dolazi do pojave velikih vrijednosti ROCOF-a uslijed poremećaja u sustavu. Odnos između udjela OIE spojenih preko izmjenjivača na mrežu i ROCOF-a nije eksplicitan te se zbog toga posljednjih godina provode brojna istraživanja kako bi se što jasnije ustvrdio taj odnos. Teoretski najviša vrijednost ROCOF-a, u trenutku nastanka poremećaja $t=0^+$, ovisi o ukupnoj inerciji sustava i veličini poremećaja [1]:

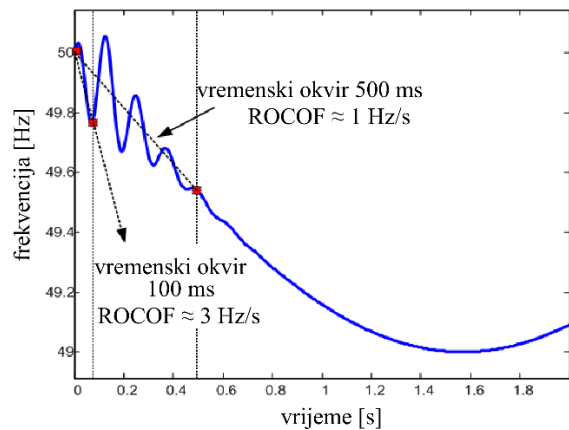
$$ROCOF_{t=0^+}^{max} = \frac{df}{dt} = \frac{P_k}{2 \sum_{i=1, i \neq k}^N H_i S_i} f_n \quad (1)$$

pri čemu je f_n nazivna frekvencija [Hz], P_k veličina poremećaja [MW] koja može predstavljati gubitak tereta ili proizvodnje, H_i i S_i konstanta tromosti [s] i prividna snaga sinkrone jedinice i [MVA]. Na slici 1, prikazana je ovisnost maksimalnog ROCOF-a o konstanti tromosti sustava za različite veličine poremećaja s obzirom na (1). Može se primijetiti kako se vrijednost ROCOF-a značajno povećava uz smanjenje konstante tromosti te povećanje veličine poremećaja.



Slika 1. Ovisnost ROCOF-a o konstanti tromosti sustava

S obzirom da je neizbježno filtriranje signala frekvencije prije obrade, izmjerene vrijednosti ROCOF-a uvijek će biti manje nego teoretski maksimum. Osim toga, uslijed njihanja rotora dolazi do osciliranja ROCOF-a te zbog tog vrlo važnu ulogu ima i vremenski okvir unutar kojeg se mjeri ROCOF. Izmjerene vrijednosti ROCOF-a mogu se uvelike razlikovati s obzirom na vremenski okvir kao što je prikazano na slici 2 [2]. Vremenski okvir nije jednoznačno određen, nego ovisi o vrsti fenomena koji se istražuje. Tako se kraći vremenski okvir koristi u slučaju istraživanja ROCOF-a na lokalnoj razini, dok duži vremenski okvir može se koristiti u slučaju istraživanja ROCOF-a na razini cijelog sustava.



Slika 2. Utjecaj duljine vremenskog okvira na izmjerene vrijednosti ROCOF-a [2]

Visoke vrijednosti ROCOF-a značajno utječu na održavanje stabilnosti frekvencije u EES-u. Prije svega, mogu prouzročiti nepotrebno aktiviranje releja za zaštitu od otočnog pogona te u tom slučaju isključivanje elektrane s mreže dovodi do još većih problema. Nadalje, u slučaju stvarnog poremećaja i pojave visokog ROFOC-a, može se dogoditi da konvencionalni algoritmi za podfrekvencijsko rasterećenje više nisu sposobni na vrijeme reagirati te tako održati stabilnost sustava. Osim toga, sve većom integracijom OIE dolazi do sve veće potrebe za omogućavanjem takvim izvorima pružanje sintetičkog inercijskog odziva koji se temelji na ROCOF-u kako bi se održala stabilnost sustava.

U nastavku rada, navedeni problemi i primjena ROFOC-a se detaljnije obrađuju. Predstavljeno je trenutno stanje mrežnih pravila nekih europskih i svjetskih EES-a vezanih uz otpornost na ROCOF, te na kraju su prikazani rezultati provedenih ispitivanja ROCOF-a na razvijenom modelu hrvatskog EES-a s obzirom na različite udjele proizvodnje iz vjetroelektrana.

2. PRIMJENA ROCOF-A

2.1. Zaštita od otočnog pogona

Uslijed poremećaja u EES-u, može se dogoditi da se dijelovi distribucijske mreže odvoje od glavnog sustava. Ako u dijelu mreže koji se odvojio od glavnog sustava postoji distribuirani izvor, tada on nastavlja napajati lokalne potrošače u tom dijelu mreže. Dakle, neovisan rad dijela distribucijske mreže nakon odvajanja od glavnog sustava naziva se otočni pogon. Iako je u nekim situacijama nastavak napajanja izdvojenog dijela mreže poželjan, u većini EES-a otočni pogon u distribucijskoj mreži je zabranjen. Razlog tome je što velik broj distributivnih izvora (vjetroelektrane, fotonaponske elektrane) nema sposobnost regulacije frekvencije i napona te u slučaju otočnog pogona takvih izvora neki od sljedećih problema mogu nastati: razlika u sinkronizmu (asinkroni uklop) prilikom povratnog uključivanja na glavni dio mreže može dovesti do velikih oštećenja pogonske opreme; loša kvaliteta napona na priključcima potrošača; ugrožena sigurnost radnika ako je dio mreže ostao pod naponom.

Jedna od najčešćih metoda zaštite od otočnog pogona je metoda temeljena na ROCOF-u. Metoda je razvijena na činjenici da će otočni sustav u početnim trenucima razdvajanja imati neravnotežu između proizvedene snage i potrošnje te će uslijed toga doći do pojave mnogo većih ROCOF-a nego što su uobičajene vrijednosti u normalnom sustavu. Dakle, zaštitni uređaji, nakon što izmjere ROCOF veći od podešenog praga, isključuje elektranu s mreže.

Međutim, u EES-ima sa sve većim brojem elektrana temeljenih na izmjenjivačima, dolazi do smanjenja inercije sustava te posljedično, do pojave većih ROCOF-a tijekom normalnog pogona. U takvim sustavima može doći do problema uslijed uklopa/isklopa većih tereta, prijelaznih pojava ili nekog kvara u mreži koji može uzrokovati proradu zaštitnog releja koji će nepotrebno isključiti generator s mreže. Podešenja ROCOF releja moraju biti takva da s jedne strane relej ne reagira na prijelazne pojave, a s druge strane da prepozna otočni pogon te pravovremeno isključi elektranu s mreže. U konvencionalnim EES-ima,

ROCOF prag na koji relej reagira mogao se odrediti npr. s obzirom na vrijednost ROCOF-a prilikom ispada najveće moguće jedinice. U EES-ima s velikim brojem elektrana temeljenih na izmjenjivačima taj podatak više nije relevantan zbog smanjene inercije sustava. Općenito, operator sustava bi trebao odrediti postavke releja uzimajući u obzir jedinstvena svojstva EES-a. Uobičajeni prag releja u konvencionalnim sustavima bio je oko 200 mHz/s, dok u današnjim sustavima s velikom integracijom OIE, taj prag može imati vrijednost do 1 Hz/s [3]. ENTSO-E preporuke s obzirom na mjerenje ROCOF-a nalažu točnost mjerenja do 0.05 Hz/s, mjerni interval između 180 ms i 240 ms, te maksimalno kašnjenje između 90 ms i 120 ms [4].

2.2. Podfrekvencijsko rasterećenje

Podfrekvencijsko rasterećenje je mjera operatora prijenosnog sustava za održavanje stabilnosti sustava i sprječavanje mogućeg raspada EES-a uslijed velikog odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti. Osnovna ideja ove mjere je isključivanje određenog dijela potrošnje nakon što frekvencija padne ispod određene vrijednosti. Na taj način smanjuje se nastala neravnoteža između proizvodnje i potrošnje. Prema mrežnim pravilima hrvatskog EES-a [5], isključivanje potrošnje izvršava se u nekoliko stupnjeva, a prvi stupanj je uobičajeno isključivanje oko 5% potrošnje nakon što frekvencija padne ispod 49.0 Hz.

Kao i u slučaju zaštite od otočnog pogona, u novijim EES-ima s velikom integracijom obnovljivih izvora energije koji se putem pretvarača spajaju na mrežu, dolazi do pojavljivanja situacija u kojima ove mjere više nisu dostatne te su nužne promjene i unaprjeđenja algoritama na kojima se temelje. Kao primjer može se navesti događaj koji je doveo do raspada EES-a Južne Australije u rujnu 2016. godine [6]. U trenutku nastanka poremećaja, vjetroelektrane su napajale 50% opterećenja, te je došlo do pada frekvencije od skoro 4 Hz u manje od jedne sekunde, uz procijenjeni početni ROCOF od 6.25 Hz/s. U ovakvim slučajevima pojave velike dinamike promjene frekvencije, konvencionalni algoritmi podfrekvencijskog rasterećenja koji se temelje samo na odstupanju frekvencije nisu sposobni zaustaviti daljnji pad frekvencije te spriječiti raspad EES-a.

U ovakvim EES-ima, napredniji algoritmi podfrekvencijskog rasterećenja temeljeni na ROCOF-u moraju se koristiti za uspješnu zaštitu od nepredviđenih događaja i poremećaja. U trenucima velike proizvodnje iz OIE u sustavu, tj. smanjenje inercije, nakon što se poremećaj dogodi, releji podfrekvencijskog rasterećenja temeljeni na ROCOF-u mogu aktivirati isključivanje određenog dijela potrošnje prije nego frekvencija padne ispod praga koji bi aktivirao isključenje potrošnje u slučaju uobičajenog algoritma podfrekvencijskog rasterećenja. U idealnom slučaju, pomoću izmjerene vrijednosti ROCOF-a i inercije sustava, te korištenjem osnovne formule za izračun ROCOF-a (1) mogla bi se odrediti veličina poremećaja tj. ispada proizvodnje te tako odrediti optimalni postotak isključenja potrošnje. Na ovaj način, prijevremeno isključivanje potrošnje ostavlja sustavu i generatorima više vremena za reagiranje.

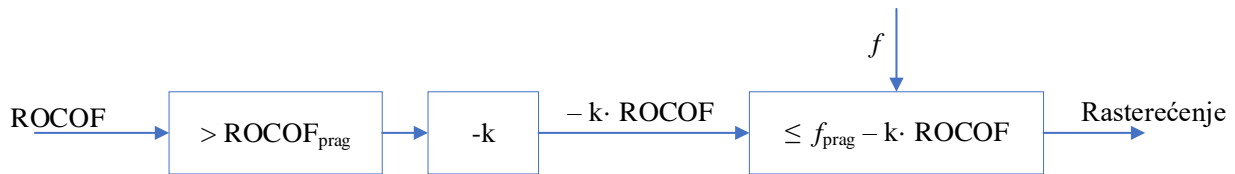
Nedostatak ove metode je, kao i u slučaju releja za zaštitu od otočnog pogona, mogućnost lažnog aktiviranja uslijed prijelaznih pojava u sustavu, stoga je potrebno detaljno istraživanje i razvoj ovih metoda kako bi se izbjegle nepoželjne reakcije. Osim toga, potrebno je i odrediti postotke rasterećenja s obzirom na vrijednost ROCOF-a. To uvelike ovisi o svojstvima i dinamici pojedinog EES-a, te se zbog toga postavke releja mogu značajno razlikovati u različitim EES-ima. Primjer mogućih postavki releja prikazan je u tablici 1 [7].

Tablica 1. Primjer plana podfrekvencijskog rasterećenja temeljenog na ROCOF-u

ROCOF [Hz/s]	0.3	0.4	0.6	0.7	1	1.2
Rasterećenje [%]	5	5	5	10	15	10
Ukupno rasterećenje [%]	5	10	15	25	40	50

U radu [7], autori koriste podatke iz tablice 1 kako bi analizirali podfrekvencijsko rasterećenje sustava IEEE 39 čiji je ukupni kapacitet približno 20 GW pri čemu je udio vjetroelektrana približno 10% ukupnog kapaciteta. Analizira se situacija ispada proizvodnje od 0.1 pu te se podfrekvencijsko rasterećenje temeljeno

na ROCOF-u pokazalo kao učinkovitije rješenje u odnosu na uobičajeno podfrekvencijsko rasterećenje. Još jedno zanimljivo rješenje naprednijeg algoritma podfrekvencijskog rasterećenja predloženo je u [8]. Autori koriste izmjerene vrijednosti i ROCOF-a i odstupanja frekvencije kako bi aktivirali potrebno rasterećenje. Shema algoritma prikazana je na slici 3. Osjetljivost algoritma može se regulirati podešavanjem vrijednosti koeficijenta k . Uobičajena vrijednost koeficijenta k je 0.1.

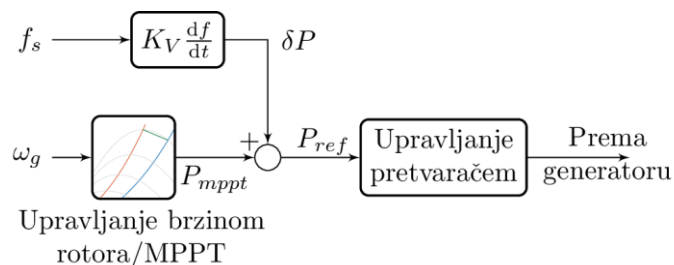


Slika 3. Shema algoritma podfrekvencijskog rasterećenja temeljenog na ROCOF-u i frekvenciji [8]

2.3. Sintetički inercijski odziv i brzi frekvencijski odziv

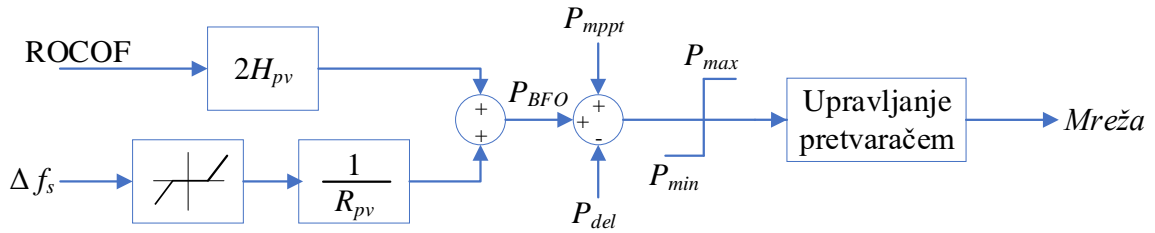
ROCOF signal može se koristiti kao ulazni parametar u upravljačkim algoritmima za sintetički inercijski odziv (SIO) i brzi frekvencijski odziv (BFO). Iako su ova dva pojma (SIO i BFO) često međusobno zamjenjiva, treba se napomenuti da SIO primarno označava injektiranje radne snage iz kinetičke energije agregata dodavanjem upravljačkih petlji osjetljivih na ROCOF (npr. vjetroagregati tipa III i IV), dok BFO je pojam vezan uz OIE koji nemaju rotirajućih dijelova (npr. fotonaponske elektrane), a koji zahvaljujući brzom odzivu pretvarača mogu reagirati u vremenskom okviru jednakom inercijskom odzivu sinkronih generatora.

SIO vjetroagregata proizvodi dodatnu snagu privremenim usporavanjem rotora turbine te se na taj način iskorištava kinetička energija spremjena u lopaticama turbine. Na slici 4, prikazan je uobičajeni koncept upravljanja vjetroagregata za omogućavanje SIO. Mjerenjem mrežne frekvencije f_s te na temelju ROCOF-a (df/dt) i koeficijenta pojačanja K_v , proizvodi se dodatna snaga δP koja zbrojena s optimalnom snagom P_{mppt} čini novu referentnu snagu koja se propagira u upravljački sustav pretvarača. Koeficijent K_v naziva se sintetičkom konstantom tromosti i važno je reći da ne predstavlja fizičko značenje kao što je slučaj s konstantom tromosti sinkronih generatora. Postavljanjem K_v na različite vrijednosti postiže se veći ili manji SIO, što znači da je SIO vjetroagregata potpuno upravljiv za razliku od inercijskog odziva sinkronih generatora s kojim se ne može upravljati.



Slika 4. Koncept sintetičkog inercijskog odziva vjetroagregata tipa III/IV

S obzirom da fotonaponske elektrane nemaju rotirajućih dijelova koji bi mogli smanjiti ili povećavati svoju kinetičku energiju, SIO kao kod vjetroagregata nije moguć u ovom slučaju. Postoji, međutim, rješenje koje omogućuje SIO fotonaponskih elektrana, a to se rješenje temelji na iskorištavanju spremljene energije kondenzatora na DC-spoju. Češće je rješenje ipak BFO fotonaponskih elektrana koje se temelji na radu u točki ispod maksimalne snage (engl. de-loading mode) kako bi se osigurala dodatna snaga koja bi se mogla injektirati u mrežu tijekom pada frekvencije. Na slici 5, prikazan je koncept upravljanja fotonaponskom elektranom za pružanje BFO.



Slika 5. Koncept brzog frekvencijskog odziva fotonaponske elektrana

R_{pv} predstavlja statičnost, a H_{pv} sintetičku konstantu tromosti FNE. Važno je napomenuti da su vrijednosti R_{pv} i H_{pv} proizvoljne i fleksibilne tj. nisu ograničene uskim intervalom mogućih vrijednosti te ovisno o željenoj brzini odziva, mogu se postaviti na niže ili više vrijednosti. P_{mpp} je trenutna maksimalna snaga, P_{del} je iznos snage rezerve, a P_{BFO} predstavlja dodatnu snagu proizvedenu tijekom BFO-a.

Kao što se vidi, mjerenje frekvencije i ROCOF-a ima značajnu ulogu za SIO i BFO. Od algoritama se zahtijeva razlikovanje ROCOF-a koji se može pojaviti uslijed pravog poremećaja od ROCOF-a koji se pojavljuje kao posljedica kratkotrajnih prijelaznih pojava ili sklopnih operacija u sustavu kako bi generator mogao ili pružiti SIO i BFO kad je zaista potrebno ili nastaviti normalan rad u drugim slučajevima. Problem koji se ovdje pojavljuje je taj što se s jedne strane ROCOF uobičajeno mjeri unutar vremenskog okvira od 500 ms kako bi se dobila što pouzdanija informacija o ROCOF-u i poremećaju koji se dogodio, dok s druge strane, što je duži interval mjerenja ROCOF-a, to je sporije djelovanje SIO-a i BFO-a te posljedično manji sveukupni doprinos sustavu. Dakle, potrebno je pronaći kompromis između duljine intervala mjerenja ROCOF-a te željene brzine djelovanja SIO-a i BFO-a.

3. MREŽNA PRAVILA – OTPORNOST NA ROCOF

Otpornost na ROCOF (engl. *ROCOF withstand capability*) podrazumijeva sposobnost proizvodne jedinice da ostane priključena na mreži sve dok je vrijednost ROCOF-a ispod granice definirane od strane OPS-a ili dok se isključenje ne dogodi proradom releja za zaštitu od otočnog pogona. Pri definiranju granične vrijednosti ROCOF-a treba uzeti u obzir karakteristike EES-a kao što su veličina, vrsta proizvodnih jedinica, povezanost s drugim EES-ima, konstanta tromosti itd. OPS može odrediti graničnu vrijednost ROCOF-a, pri kojoj proizvodna jedinica treba ostati priključena na mreži, na temelju detaljne analize i simulacije sustava pri poremećajima ili koristeći podatke koji su prikupljeni tijekom stvarnih poremećaja u sustavu. U slučaju simulacije sustava, najčešće se analizira referentni poremećaj radne snage koji može biti npr. ispad najveće proizvodne jedinice.

Općenito gledano, veliki EES-i trenutno još nemaju izraženih problema zbog smanjenja inercije sustava. Studija predstavljena u [9] analizira ROCOF u ENTSO-E CE sinkronoj zoni pri različitim poremećajima. Vrijednosti ROCOF-a dobivene pri poremećajima od 20% tereta unutar su intervala 500 mHz/s do 1 Hz/s, a vrijednosti iznad 1 Hz/s smatraju se kritičnim za pogon sustava. Ipak, simulacije za buduće scenarije predviđaju pojavu vrijednosti ROCOF-a do 2 Hz/s pri poremećajima od 40% tereta. Međutim, kinetička energija potrebna za održavanje ROCOF-a sinkrone zone CE unutar 1 Hz/s, pri referentnom poremećaju od 3 GW, procijenjena je na 75 GWs što je značajno manje od procijenjene kinetičke energije sadržane u sustavu te se može zaključiti da takav poremećaj ne predstavlja opasnost za prekoračenje kritičnih vrijednosti za pogon sustava. ENTSO-E još nije odredio zajednički standard za granične vrijednosti ROCOF-a nego je prepustio svakom pojedinom OPS unutar sinkrone zone da definiira vrijednosti unutar vlastitog EES-a. U tablici 2 prikazane su granične vrijednosti ROCOF-a za nekoliko europskih i svjetskih EES-a [10]. Sustavi koji se suočavaju s potrebom promjene mrežnih pravila u pogledu otpornosti na ROCOF uglavnom su mali i veliki otočni EES-i. Irski EES povećao je graničnu vrijednost otpornosti na ROCOF s početnih 0.5 Hz/s na 1 Hz/s mjereno unutar vremenskog okvira od 500 ms; EES Velike Britanije povećao je graničnu vrijednost otpornosti na ROCOF s početnih 0.125 Hz/s na 0.5 Hz/s za postojeće generatore te na 1 Hz/s za nesinkrone i sve nove generatore, također unutar vremenskog okvira od 500 ms [11]. U nekim otočnim sustavima, iako dolazi do pojave visokih ROCOF-a tijekom poremećaja,

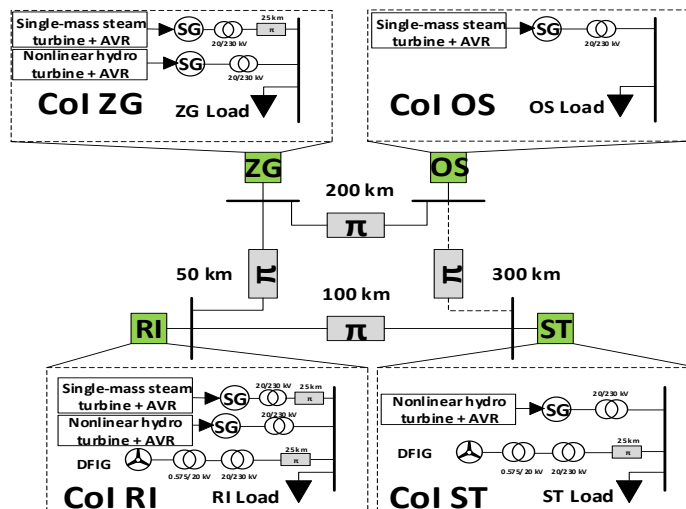
revizija mrežnih pravila u tom pogledu nije se još dogodila. Tako npr. poremećaj u EES-u Cipra uzrokovao je ROCOF od 1.3 Hz/s, u EES-u Novog Zelanda 0.73 Hz/s, u EES-u Havaja 0.38 Hz/s, međutim kao što je rečeno, još ne postoje odredbe vezane uz otpornost na ROCOF [12].

Tablica 2. Odredbe mrežnih pravila europskih i svjetskih EES u vezi otpornosti na ROCOF

EES	Otpornost na ROCOF
Njemačka	2 Hz/s (500 ms)
UK	1 Hz/s (500 ms)
Danska	2 Hz/s (500 ms)
Irska	1 Hz/s (500 ms)
Italija	2.5 Hz/s (100 ms)
Južna Afrika	1.5 Hz/s (samo za OIE)
Australija	Nema odredbi
Novi Zeland	Nema odredbi
USA	Nema odredbi

4. ROCOF U HRVATSKOM ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

Integracija OIE, prvenstveno vjetroelektrana, u hrvatskom EES-u također je u stalnom porastu. Prema posljednjem mjesečnom izvještaju o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj [13], u travnju 2020. godine je u Hrvatskoj u redovnom pogonu bilo 19 vjetroelektrana, s ukupno instaliranom snagom od 576 MW, dok su u probnom pogonu/izgradnji bile još 3 vjetroelektrane, ukupne instalirane snage od 162,25 MW. Osim ukupnog instaliranog kapaciteta VE, vrlo značajan podatak je udio proizvodnje VE u pokrivanju satnog opterećenja sustava. Prema navedenom izvještaju, najveći udio proizvodnje VE u pokrivanju satnog opterećenja hrvatskog EES-a iznosio je 41.2%, dok u prosjeku taj udio iznosi 15%. S obzirom na veliki porast integracije VE i njihovu sve važniju ulogu u pokrivanju dnevnog opterećenja, u [14] provedeno je istraživanje utjecaja različitih udjela proizvodnje VE na frekvencijsku stabilnost hrvatskog EES-a u otočnom pogonu s naglaskom na početnu vrijednost ROCOF-a. Osim utjecaja samog udjela proizvodnje iz VE, također je analiziran i utjecaj topologije mreže (radijalna i petljasta), električne udaljenosti te geografske rasprostranjenosti inercije u sustavu na ROCOF. Kako bi se sve to ispitalo, sustav je podijeljen na četiri dijela (Osijek, Zagreb, Rijeka, Split), pri čemu svaki dio predstavlja jedan tzv. centar inercije (engl. CoI). U svakom dijelu, sve hidroelektrane su modelirane kao jedna elektrana s agregiranim parametrima, isto vrijedi i za termoelektrane te vjetroelektrane. Vjetroelektrane su smještene u dijelovima Rijeka i Split, dok dijelovi Zagreb i Osijek se sastoje isključivo od sinkrone inercije. Na slici 6, prikazan je koncept modela hrvatskog EES-a.

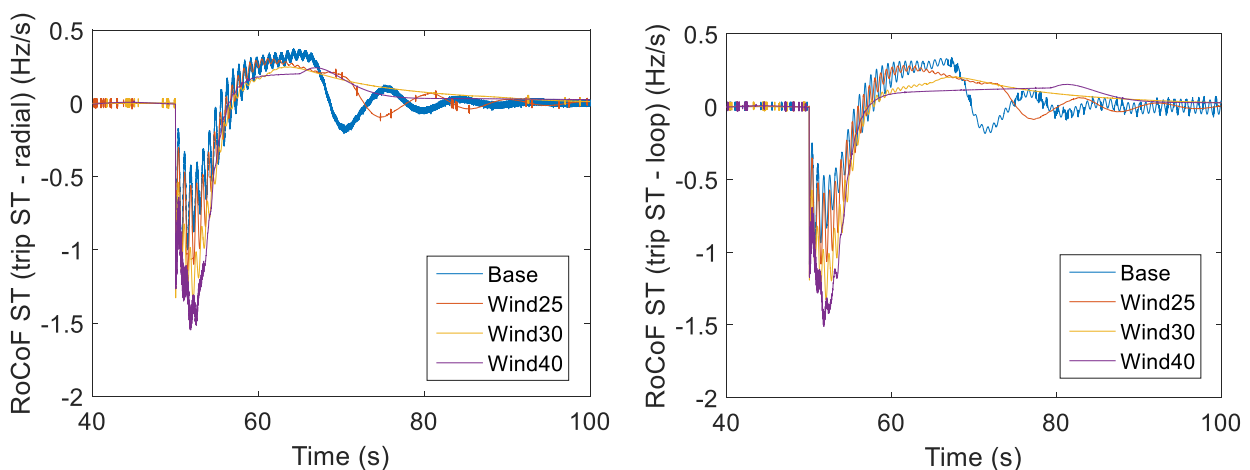


Slika 6. Koncept modela hrvatskog EES-a [14]

Glavna namjera je bila analizirati promjenu početnog ROCOF-a uz povećanje kapaciteta VE u sustava i posljedično smanjenje kapaciteta termoelektrana. Analizirana su četiri scenarija: 1) bazni scenarij koji predstavlja trenutno stanje sustava s 17% udjela VE u ukupnom kapacitetu, 2) povećanje VE kapaciteta na 25%, 3) povećanje VE kapaciteta na 30%, te 4) povećanje VE kapaciteta na 40%. Daljnje povećanje VE kapaciteta nije analizirano jer bi to podrazumijevalo isključivanje nekih hidroelektrana iz pogona što nije trenutno realan scenarij. Simulira se poremećaj porasta opterećenja za 250 MW (10%). Važno je napomenuti da radijalna mreža predstavlja stvarno stanje nakon prelaska u otočni pogon, dok petljasta mreža je modelirana dodavanjem zamišljenog voda koji bi spajao centre Split i Osijek. U tablici 3 prikazani su najznačajniji rezultati ispitivanja tj. minimalni i maksimalni ROCOF uzimajući u obzir lokaciju poremećaja te topologiju mrežu. Dodatno, na slici 7 prikazan je ROCOF mjeren na lokaciji Split u slučaju poremećaja u Splitu za sve četiri udjela VE. ROCOF je mjeren unutar vremenskog okvira od 5 ms. Rezultati su prikazani za tri scenarija, bazni scenarij VE 17%, scenarij VE 25% te scenarij VE 40%. Oznaka (lok.) predstavlja lokaciju mjerenja ROCOF-a.

Tablica 3. Rezultati analize ROCOF-a s obzirom na udio proizvodnje iz VE

		ROCOF [Hz/s]											
		Bazni scenarij (VE 17%)				2. scenarij (VE 25%)				3. scenarij (VE 40%)			
		radijalna		petljasta		radijalna		petljasta		radijalna		petljasta	
		min (lok.)	max (lok.)	min (lok.)	max (lok.)	min (lok.)	max (lok.)	min (lok.)	max (lok.)	min (lok.)	max (lok.)	min (lok.)	max (lok.)
Lokacija poremećaja	Os	-0.05 (St.)	-2.01 (Os.)	-0.23 (Ri.)	-1.59 (Os.)	-0.10 (St.)	-2.10 (Os.)	-0.26 (Ri.)	-1.72 (Os.)	-0.11 (St.)	-2.40 (Os.)	-0.43 (St.)	-1.83 (Os.)
	Zg	-0.18 (St.)	-0.65 (Os.)	-0.29 (St.)	-0.59 (Os.)	-0.27 (St.)	-0.72 (Os.)	-0.36 (St.)	-0.63 (Os.)	-0.33 (St.)	-1.25 (Zg.)	-0.43 (St.)	-1.18 (Zg.)
	Ri	-0.34 (Zg.)	-0.66 (Ri.)	-0.38 (Zg.)	-0.62 (Ri.)	-0.46 (St.)	-0.74 (Ri.)	-0.46 (St.)	-0.69 (Ri.)	-0.54 (St.)	-1.24 (Ri.)	-0.72 (St.)	-1.10 (Ri.)
	St	-0.31 (Os.)	-0.96 (St.)	-0.34 (Zg.)	-0.83 (Os.)	-0.34 (Os.)	-0.99 (St.)	-0.38 (Zg.)	-0.90 (St.)	-0.57 (Os.)	-1.12 (St.)	-0.70 (Zg.)	-1.04 (St.)



Slika 7. ROCOF u Splitu u slučaju poremećaja u Splitu, radijalna mreža (lijevo), petljasta mreža (desno) [14]

Analizirajući dobivene rezultate može se zaključiti sljedeće:

- Bez obzira na lokaciju poremećaja i mjerenja, kao i topologiju mrežu, s porastom udjela proizvodnje VE, povećava se i ROCOF
- Najveće vrijednosti ROCOF-a pojavljuju se u Osijeku. Razlog tome je činjenica da CoI Osijek u modelu ima najmanju vrijednost inercije, što je potvrda činjenice da inercija izravno utječe na ROCOF
- Vrlo visoki iznosi ROCOF-a, veći od 2 Hz/s, mogu se pojaviti već u trenutnom stanju u slučaju većih poremećaja
- Dodavanje novog voda smanjuje vrijednosti maksimalnog ROCOF-a, ali isto tako povećava iznose minimalnih ROCOF-a. Objašnjenje je to što boljom povezanošću mreže, iznosi ROCOF-a mjereni na različitim lokacijama teže u jednu zajedničku, prosječnu vrijednost ROCOF-a. Ta vrijednost poznata je kao ROCOF sustava (engl. system ROCOF)

ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je ROCOF, njegova važnost i primjena, u budućim EES-ima s visokim udjelom elektrana i uređaja temeljenim na izmjenjivačima. Jedna od značajnih razlika tih EES-a u odnosu na konvencionalne EES-e je dosta niža količina sinkrone inercije tj. konstanta tromosti sustava. U takvim sustavima dolazi do povećavanja početne vrijednosti ROCOF-a što prouzrokuje brojne probleme u sustavu u pogledu održavanja stabilnosti. Jedan od problema je mogućnost nepotrebne prorade releja za zaštitu od otočnog pogona jer sada uobičajene vrijednosti ROCOF-a mogu biti veće od postavljene proradne vrijednosti releja. Dodatno, vrlo visoke vrijednosti ROCOF-a stvaraju probleme za podfrekvencijsko rasterećenje koje u takvim slučajevima ne uspijeva dovoljno brzo reagirati kako bi se očuvala stabilnost sustava. Za ovakve sustave, od velike važnosti postaje ROCOF u primjeni sintetičkog inercijskog odziva ili naprednih algoritama za podfrekvencijsko rasterećenje za očuvanje stabilnosti. Osim toga, operatori sustava primorani su revidirati mrežna pravila u pogledu otpornosti na ROCOF. Općenito, mali i veliki otočni sustavi, kao što je EES Irske ili EES Velike Britanije, revidirali su mrežna pravila podizanjem granične vrijednosti otpornosti na ROCOF, na 1 Hz/s u slučaju navedenih EES-a, dok veliki EES-i, kao što je ENTSO-E CE sinkrona zona, nemaju još potrebu za tim. U slučaju hrvatskog EES-a, predstavljeni rezultati ispitivanja ROCOF-a s obzirom na trenutne i buduće udjele proizvodnje iz VE ukazuju na mogućnost pojave vrlo visokih ROCOF-a, preko 2 Hz/s, u slučaju otočnog pogona, stoga se može zaključiti da će do nužnih promjena u vođenju i pogonu sustava doći i u hrvatskom EES-u ako se nastavi trend povećanja integracije elektrana i uređaja temeljenih na izmjenjivačima.

ZAHVALA

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta WINDLIPS – WIND energy integration in Low Inertia Power System Hrvatske zaklade za znanost, br. HRZZ-PAR-02-2017-03.

LITERATURA

- [1] ENTSO-E “Rate of Change of Frequency (RoCoF) withstand capability” ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection,” 02.11.2017. Dostupno na: https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-4/user_uploads/5---igd-on-rocof.pdf
- [2] G. Rietveld, D. Colangelo, A. Roscoe, and K. Johnstone, “Evaluation report on the problem of ROCOF measurement in the context of actual use cases and the ‘wish list’ of accuracy and latency from an end-user point of view.” project report, dostupno na: <http://www.rocofmetrology.eu/wp-content/uploads/sites/21/2018/10/ROCOF-Uses-Cases-and-Test-Conditions-V1.pdf>

- [3] M. Lukač, Z. Matišić, “Primjena ROCOF zaštitne funkcije u distribucijskoj mreži” HO CIRED savjetovanje, Opatija 13.-16.05.2018.
- [4] ENTSO-E, RG-CE System Protection & Dynamics Sub Group, “Frequency Measurement Requirements and Usage”, - Final Version 7 published 29 Jan. 2018, Available on-line at: https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/2018/TF_Freq_Meas_v7.pdf,
- [5] Hrvatski operator prijenosnog sustava "Mrežna pravila prijenosnog sustava", 12.07.2017. dostupno na: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2017_07_67_1585.html
- [6] R. Yan, N. Al-Masood, T. Kumar Saha, F. Bai, and H. Gu, “The anatomy of the 2016 South Australia blackout: A catastrophic event in a high renewable network,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 5, pp. 5374–5388, Sep. 2018.
- [7] Y. Zuo, G. Frigo, A. Derviškadić, and M. Paolone, “Impact of Synchrophasor Estimation Algorithms in ROCOF-Based Under-Frequency Load-Shedding,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 2, pp. 1305–1316, Mar. 2020.
- [8] H. Bevrani "*Robust power system frequency control*". Springer, 2009. poglavlje 8., stranica 238.
- [9] ENTSO-E-RG-CE System Protection & Dynamics Sub Group, "Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe" 2016,
- [10] R. Brundlinger “Grid Codes in Europe - Overview on the current requirements in European codes and national interconnection standards.” NEDO / IEA PVPS Task 14 Grid Code and RfG Workshop, presentation, November 2019, Tokyo,
- [11] J. Riesz and J. Palermo, “International Review of Frequency Control Adaptation" Australian Energy Market Operator,” 2016.
- [12] B. Hartmann, I. Vokony, and I. Táczy, “Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketisation of services,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 12, Dec. 2019.
- [13] Hrvatski operator prijenosnog sustava “Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u Hrvatskoj” Travanj, 2020
- [14] J. Đaković, M. Krpan, P. Ilak, T. Baškarad, and I. Kuzle, “Impact of wind capacity share, allocation of inertia and grid configuration on transient RoCoF: The case of the Croatian power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, p. 106075, Oct. 2020.