

Marijan Lukač
HEP-ODS d.o.o. Elektra Zagreb
Marijan.Lukac@hep.hr

Zdravko Matišić
HEP-ODS d.o.o. Elektra Koprivnica
Zdravko.Maticic@hep.hr

PRIMJENA ROCOF ZAŠTITNE FUNKCIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Referat će opisati problematiku mjerenja frekvencije te uputiti na moguće greške koje nastaju kod mjerenja frekvencije, a značajne su za ostvarenje zadaća frekvencijskih i ROCOF (eng. rate of change of frequency) zaštitnih funkcija. ROCOF je zaštitna funkcija koja djeluje na temelju mjerenja frekvencije i proračuna brzine njene promjene. Također će se iznijeti ideje IEC 60255–181 propisa kojim će se točno definirati funkcijski zahtjevi za zaštite bazirane na mjerenju frekvencije, kao što su točnost mjerenja frekvencije i načini ispitivanja frekvencijskih zaštita.

Referat će obraditi primjenu ROCOF zaštitne funkcije u zaštiti distribucijske mreže od otočnog pogona elektrana priključenih na distribucijsku mrežu. Također će se iskazati postojeća iskustva primjene ROCOF metode u našoj i drugim mrežama, sa prednostima i manama te zaštitne funkcije i perspektivom njenog korištenja u naprednim mrežama. Prikazati će se iskustva u ispitivanju ROCOF zaštitne funkcije prije puštanja elektrana u pogon.

Ključne riječi: frekvencija, ROCOF, IEC 60255-181, distribucijska mreža, otočni pogon

APPLICATION OF ROCOF PROTECTION FUNCTION IN DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

This article will describe the problem of frequency measurement and refer to possible errors occurring in frequency measurements that are significant for achieving the frequency and ROCOF protection functions. ROCOF is a protective function that operates by measuring the rate of change of frequency. It will also outline the ideas of IEC 60255-181 functional standard that will precisely define requirements for frequency-based protection, such as frequency accuracy measurement and frequency protection functional tests.

The article will process the application of ROCOF protective function in distribution grid protection from the islanding of distribution generations. It will also demonstrate the existing experience of applying ROCOF methods in our and other networks, with advantages and disadvantages of this protection function and the perspective of its use in future smart networks. Overall experience in testing the ROCOF protective function before putting into operation distribution generators will also be presented.

Key words: frequency, ROCOF, IEC 60255-181, distribution network, islanding

1. UVOD

Frekvencijom se mjeri učestalost periodičkog ponavljanja pravilnih pojava u prirodi. Mjerna vrijednost broja ponavljanja periodičke pojave u jednoj sekundi je Hertz (Hz), a izvedena je iz osnovne jedinice za mjerenje vremena - sekunda (s^{-1}). Izvedena jedinica za frekvenciju ime je dobila po njemačkom fizičaru Heinrich Rudolf Hertzu. Ako su prirodne pojava pravilne i stabilne u vremenu lako je mjeriti njihovu frekvenciju, dok je teško mjeriti frekvenciju pojava koje su pune nepravilnih i nepredvidljivih smetnji. Osnovna veličina po kojoj se mjeri kvaliteta električne energije u elektroenergetskom sustavu (EES) i distribucijskoj mreži kao njegovom djelu je napon. U EES-u bi signal napona trebao biti sinusna matematička pojava u kojoj se veličina napona u jednoj periodi mijenja od nule do maksimuma pa prema nuli i opet tako u obrnutom predznaku. Nazivna frekvencija napona u sustavu je 50 Hz, ali naponski signal iz mreže nadograđen je i nepravilnim naponskim signalima drugih frekvencija. Frekvencija nadograđenih signala je u najvećoj mjeri višekratnik osnovne frekvencije 50 Hz, ali postoje i frekvencije drugih iznosa. Pomak kuta napona također predstavlja smetnju u frekvenciji napona.

Svi električni uređaji koji rade u EES-u dizajnirani su za rad pod naponom u nekom frekvencijskom rasponu, stoga bi trebalo dopustiti pogon sustava sve dok je frekvencija napona zadovoljavajuća. Prema tome dovoljno bi bilo mjeriti frekvenciju i zaključiti da li je u dozvoljenim granicama. Promjena frekvencije upućuje na neke nepravilnosti koje mogu negativno utjecati na sustav. Frekvencija napona u sustavu je stabilnija što je sustav manje podložan promjenama tokova snaga u njemu, a na trenutnu vrijednost frekvencije može utjecati i pojava kvarova. Promjena frekvencije napona je pojava koja se može osjetiti lokalno, ali i u većem djelu sustava ako se radi o nekom većem poremećaju. Za velike agregate u sustavu može biti pogubno ako dođe do oscilatornih pojava u promjeni frekvencije. Kod većih i naglijih promjena u ravnoteži snaga u EES-u mogu se javiti torzione oscilacije frekvencije koje mogu oštetiti veće proizvodne agregate. Kod manjih distribuiranih izvora najčešće nije dozvoljen otočni pogon s dijelom distribucijske mreže pa se često mjerenje frekvencije koristi za isključenje izvora s mreže, a što može dovesti do nepotrebnih isključenja uvjetovanih promjenom frekvencije zbog nekih prijelaznih pojava u mreži. Iz tih razloga logično bi bilo da se mjeri i brzina promjene frekvencije koja bi onda pobliže upućivala da li je pojava opasna ili nije.

Ako postoji sustav izgrađen od velikih elektrana sa stabilnom proizvodnjom, i posebno dizajniranih elektrana za uravnoteženje proizvodnje i potrošnje, frekvencija će imati stabilnu vrijednost u EES-u. Omogućavanjem priključenja velikog broja malih proizvođača električne energije u sustav s nestabilnom proizvodnjom električne energije može dolaziti do češćih i većih potreba za uravnoteženjem snage pa samim time i promjena frekvencije u sustavu. U tom slučaju inercija sustava se smanjuje pa su oscilacije frekvencije veće, i zaključno sustav postaje nestabilniji. U nestabilnijem sustavu moramo točno mjeriti pojave kako bi znali što nam je činiti. Nažalost frekvencija napona s porastom elektroničkih potrošača i povećanjem udjela distribuirane proizvodnje sa elektroničkim izmjenjivačima sve je teže mjerljiva veličina jer dolazi do znatnijeg harmoničnog izobličenja u signalu napona, te naša ulazna mjerna veličina napona mora proći kroz razne filtre kako bi se mogla točnije mjeriti i aproksimirati kao periodična pojava, na temelju čega možemo nešto točnije zaključiti. Nakon što se dobije vremenski graf frekvencije u određenom vremenskom periodu može se izračunati i brzina promjene frekvencije tj. ROCOF kao promjena frekvencije Δf u određenom vremenskom periodu Δt . Što je manji interval Δt , a mjerenje frekvencije točnije približavamo se stvarnim vrijednostima promjene df/dt . Preciznije računanje frekvencije trebalo bi omogućiti širu primjenu zaštitne funkcije ROCOF.

2. MJERENJE FREKVENCIJE I PROMJENE FREKVENCIJE

2.1. Mjerne metode

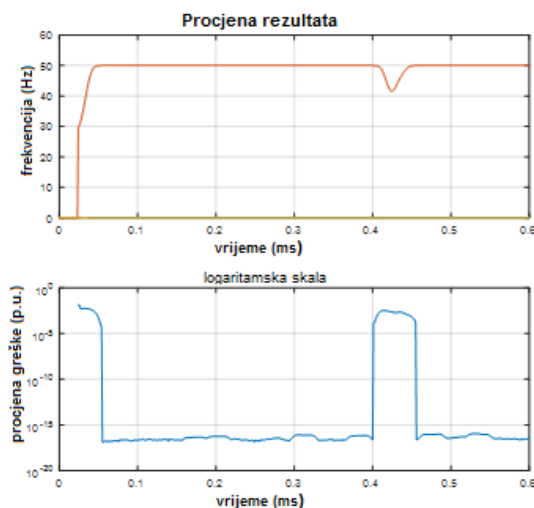
Točnost mjerenja električnih veličina ovisi o broju uzoraka trenutnih vrijednosti uzetih u jednoj periodi. Najprecizniji instrumenti koji su mjerili praktički trenutne vrijednosti veličina bili su osciloskopi. Razvojem digitalnih procesora i analogno digitalne pretvorbe u novije vrijeme uzima se manji broj uzoraka po periodi i na temelju njih se aproksimiraju raznim matematičkim metodama mjereni signal i izrađuje FFT signala, tj. prikaz harmoničnog izobličenja u odnosu na osnovnu frekvenciju 50 Hz. Takav signal se onda koristi u procesiranju logike zaštitnih funkcija. Brzi procesori omogućuju upotrebu kompleksnih matematičkih algoritama koji mogu točno izračunati potrebne vrijednosti električnih veličina kojima je opisan EES: struja, napona i frekvencije te kuta između napona i struje. Prilikom mjerenja struje i napona najčešće se može postići zadovoljavajuća točnost, a problemi nastaju kada se želi precizno izračunati

frekvenciju u kratkom vremenskom periodu zbog mogućih smetnji koje utječu na rezultat. Iskustva su pokazala da u prošlosti standardne metode mjerenja frekvencije, koje su koristili uređaji s manjim uzorkovanjem po periodu, mogu voditi ka krivim interpretacijama događaja u sustavu, jer je utjecaj smetnji na rezultat vjerojatniji. Pogrešno mjerenje frekvencije može poremetiti točnost izračuna brzine promjene frekvencije. Da bi se izbjeglo krivo računanje frekvencije neki postojeći uređaji mjere frekvenciju više puta kroz više perioda i onda vrše njeno usrednjavanje. Načelno kod uređaja koji se koriste u svrhu zaštite zasad nisu strogo definirana pravila koja oni moraju zadovoljavati pa je trenutno u izradi standard koji definira potrebne specifikacije za zaštitne uređaje koje koriste mjerenje frekvencije.

2.1.1. Problemi pri mjerenju frekvencije

Kod nepredvidljivih događaja u sustavu, kao što su trenutni pomak kuta napona, nagli skok frekvencije, jako harmonično izobličenje te nagli propad ili skok napona, teško je točno mjeriti trenutnu frekvenciju jer dolazi do kratkotrajne smetnje u signalu napona koja ometa mjerenje frekvencije i, posljedično, brzinu njene promjene. Stoga se razvijaju novi algoritmi koji moraju koristiti sofisticirane metode prepoznavanja takvih događaja u sustavu te ublažavanja njihovog negativnog utjecaja na mjerenje brzine promjene frekvencije.

Primjer mjerenja trenutne frekvencije starim algoritmom prolaska kroz nulu kod naglog pomaka kuta napona pokazuje problem kod dobivenog rezultata u mjerenju frekvencije [5]. Na slici 1 vidi se veliko prividno smanjenje izračunate frekvencije s procijenjenom greškom mjerenja prilikom nastanka događaja naglog pomaka kuta napona. Da bi se izbjegla tako velika greška morala bi se mjeriti frekvencija kroz duži vremenski interval tj. veći broj perioda.



Slika 1. Pogreška mjerenja frekvencije izazvana naglim skokom kuta napona mreži [5]

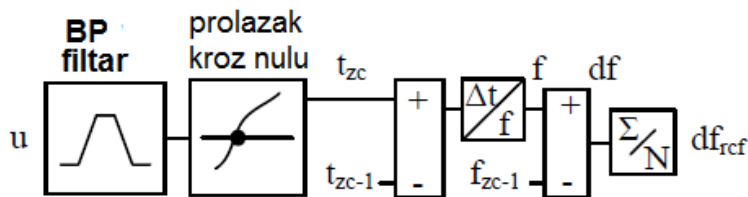
Uspješan algoritam za mjerenje ROCOF-a treba izbjeći zamke u mjerenju trenutne frekvencije uzrokovane naglim promjenama naponskog signala. Tek tada se može smatrati da je svladana prva prepreka, tj. spriječena kriva interpretacija događaja u sustavu zbog krivog rezultata mjerenja.

2.1.2. Napredni algoritmi za mjerenje promjene frekvencije

Kao primjer novijih metoda mjerenja frekvencije, koje se koriste za ROCOF zaštitu, možemo navesti iskustva prikazana u članku [2] gdje autori uspoređuju mjerne algoritme: fazorski, adaptivni fazorski i prolazak kroz nulu. Fazorski algoritam najprije dijeli uzorkovani signal napona na realnu i imaginarnu komponentu, koje određuju fazor ϕ . Temeljem vrijednosti fazora izvodi se prva procjena promjene frekvencije, dok minimum-maksimum (min-max) i nisko propusni (eng. low pass) filter pospješuju ovu procjenu. Adaptivni fazorski algoritam vrši procjenu promjene frekvencije iz više paralelnih fazorskih algoritama različite filtarske frekvencije. Razlika između frekvencije tijekom određenog vremenskog intervala daje procjenu ROCOF-a.

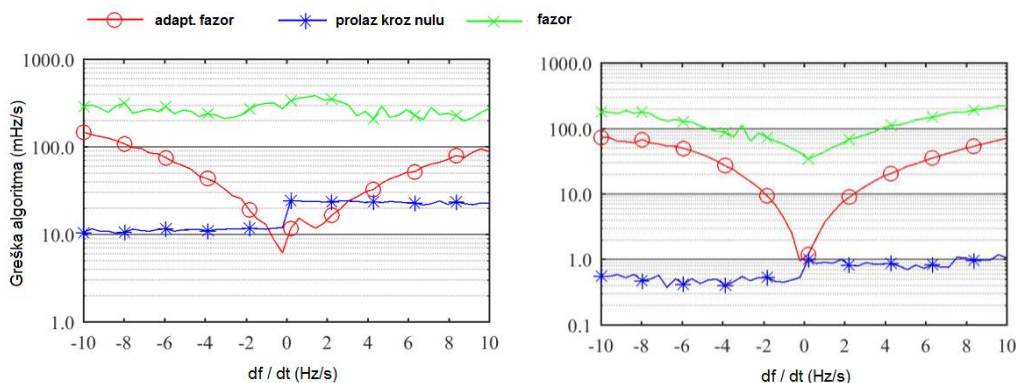
Novi algoritam prolaska kroz nulu prvo propušta naponski signal kroz pojasni (eng. band pass) filter te nakon toga vrši aproksimaciju prolaska kroz nulu i točno izračunava trenutak kada napon mijenja

predznak (slika 2), što određuje frekvenciju i procjenu ROCOF-a. Procjena ROCOF-a u simulacijama algoritma dobiva se u dvije periode i 20 različitih iteracija kroz te periode.



Slika 2. Dijagram toka za Algoritam prolaska kroz nulu [2]

Mjerenje promjene frekvencije ograničeno je mogućnošću uzorkovanja uređaja te jačinom šumova i količinom harmonika koji se nalaze u signalu napona. Na kraju su uspoređeni testni rezultati prikazanih algoritama i zaključuje se da je mjerenje frekvencije metodom prolaska kroz nulu s uzorkovanjem od 2 kHz najtočnije. Na slici 3 je usporedni prikaz točnosti tri algoritma uz uzorkovanje od 1 kHz (lijevi graf) i 2 kHz (desni graf), gdje se može vidjeti povećanje točnosti uz povećanje uzorkovanja za pojedinu metodu. Adaptivni fazorski algoritam bolji je od standardnog fazorskog algoritma.



Slika 3. Točnost mjerenja ROCOF-a uz uzorkovanje od 1kHz i 2 kHz [2]

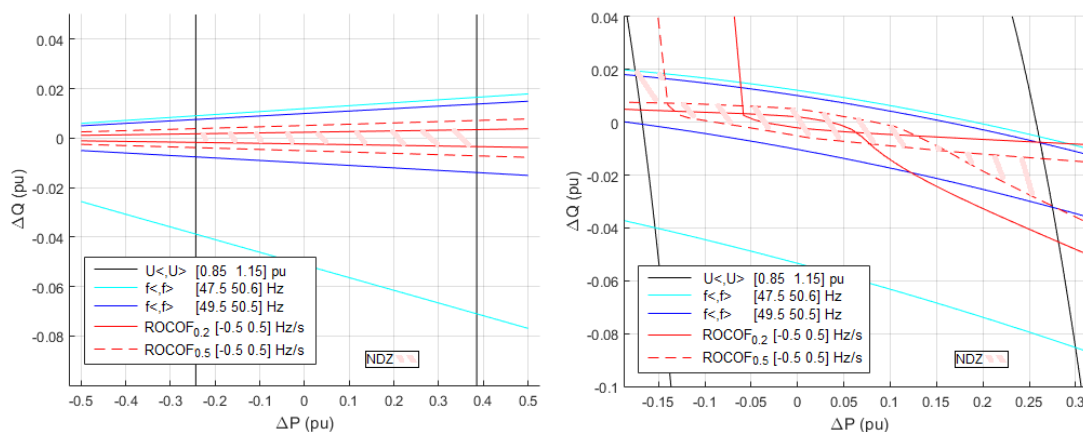
Za preciznije mjerenje frekvencije u budućnosti nužno je koristiti uređaje s većim uzorkovanjem točaka po periodu naponskog signala, boljim analogno digitalnim pretvaračima i jačim procesorima radi razvijanja sve kompleksnijih algoritama.

2.2. Zaštitne funkcije bazirane na mjerenju frekvencije i njihova primjena

Podfrekvencijska $f_{<}$, nadfrekvencijska $f_{>}$ i ROCOF su tri osnovne zaštitne funkcije zasnovane na mjerenju frekvencije naponskog signala u sustavu. Zaštitna funkcija ROCOF mjeri brzinu promjene frekvencije df/dt ili bolje rečeno na najbolji mogući način ju aproksimira kao $\Delta f/\Delta t$. Podfrekvencijska i nadfrekvencijska zaštita redovito se koristi na mjestu priključenja elektrana radi kontrole dozvoljenih odstupanja frekvencije. Ujedno se pod/nad frekvencijske zaštite ($f_{<}, f_{>}$) mogu koristiti kao pasivne zaštite od otočnog pogona distribuiranih izvora, ali u slučaju takve primjene nije ih dobro koristiti sa kratkim vremenima zatezanja prorade kada je frekvencija unutar dozvoljenih granica odstupanja. Podfrekvencijska zaštita koristi se i za rasterećenje distribucijskog sustava u slučaju pomanjkanja proizvodnje energije u EES-u. U novije vrijeme mjerenje frekvencije se koristi kao okidač za automatiziranu promjenu radne snage distribuiranih izvora. Upotreba ROCOF zaštite trebala bi se usmjeriti na prepoznavanje dinamičkih pojava u sustavu, jer bi se brzina promjene frekvencije upotrebom novih numeričkih algoritama s filterima mogla dosta točno aproksimirati u relativno kratkom vremenu, dok trenutnu frekvenciju kod takvih pojava ne možemo točno mjeriti.

Dosad primijenjeni algoritmi mjerenja frekvencije već su pokazali da je primjena ROCOF zaštite smanjila zonu ne-detektiranja otočnog pogona (NDZ, eng. non-detection zone) u blizini uravnoteženja snaga proizvodnje i potrošnje. Tako autori u članku [1] prikazuju analizu smanjenja NDZ primjenom ROCOF zaštitne funkcije, prikazujući u simulacijama rezultate ROCOF zaštite podešene na brzinu

promjene frekvencije od $\pm 0,5$ Hz/s. Usporedno su razmatrana dva podešenja vremenskog prozora ROCOF funkcije od 0,2 s i 0,5 s te prije korištena frekvencijska zaštita $f_{<,f>}$ (49.5 Hz, 50.5Hz) i nova frekvencijska zaštita $f_{<,f>}$ (47.5 Hz, 50.6 Hz) koja se trenutno koristi u kombinaciji sa ROCOF zaštitom. Razmatrana podešenja naponskih zaštita su $U_{<, >}$ (0.85 pu, 1.15 pu). Podešenjem rada ROCOF zaštite u kraćem vremenskom prozoru postiže se uglavnom bolji NDZ, ali i veća nestabilnost rada kod prolaznih dinamičkih pojava u mreži. Što je veća inercija dijela EES-a gdje koristimo ROCOF zaštitu može se primijeniti kraći vremenski prozor. U rezultatima simulacije pokazano je da NDZ ovisan o impedantnom karakteru potrošača i mreže. Na temelju rezultata može se zaključiti da manji faktor dobrote q_f ($q_f = \sqrt{QL \times QC} / P$), tj. manja izmjena jalove energije u mreži (QL je induktivna komponenta, a QC kapacitivna komponenta) u odnosu na ukupnu radnu snagu (P), daje bolje rezultate u smanjenju NDZ-a. Opseg NDZ-a također ovisi i o udjelu indukcijskih motora i njihovoj inerciji u otočnoj mreži. Simulacije su pokazale da se korištenjem ROCOF zaštite značajno smanjuje NDZ, ali također i da rezultati ovise o načinu na koji se ROCOF računa.



Slika 4. Prikaz NDZ-a djelovanjem ROCOF zaštite [1]

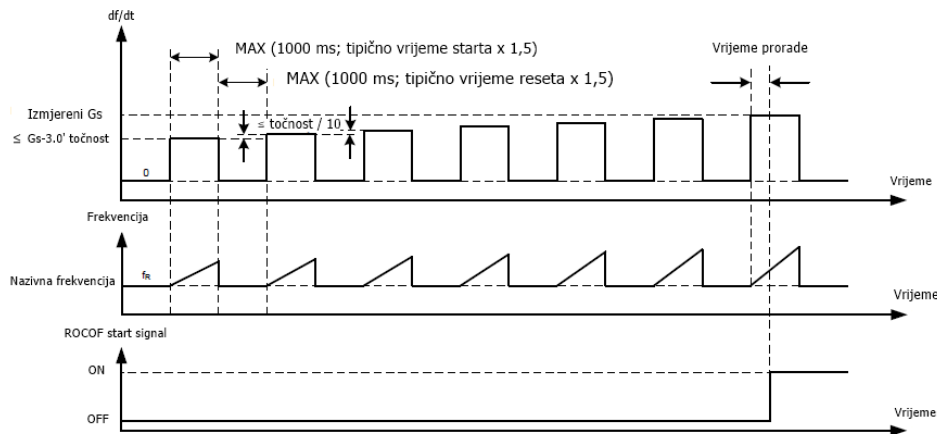
Grafički prikaz simulacija vidljiv je na slici 4 gdje su ΔP i ΔQ razlike radne i jalove snage između proizvodnje i potrošnje, a NDZ određuju podešenja frekvencijske, naponske i ROCOF zaštite. Grafički prikaz na lijevom djelu slike prikazuje NDZ za mrežu s faktorom dobrote $q_f=0,5$, dok desni graf prikazuje istu mrežu samo sa dodanim udjelom od 30% većih indukcijskih motora s faktorom inercije $H=0,5s$. Na slici 4 se može uočiti da korištenjem ROCOF zaštite ($\pm 0,5$ Hz/s) s frekvencijskom $f_{<, >}$ (47.5-50.6 Hz) dolazi do smanjenja NDZ-a u odnosu na period prije korištenja ROCOF zaštite. Grafovi ukazuju također da se u mrežama sa značajnim udjelom velikih motora mogu kombinirati vremenski prozori u svrhu smanjenja NDZ-a. Kombinacijom ROCOF zaštite sa funkcijom promjene napona ROCOV, mogu se postići još bolji rezultati u prepoznavanju otočnog pogona [6].

2.3. Definiranje standarda za frekvencijske zaštitne funkcije

Trenutno je u izradi funkcionalni standard IEC 60255–181 kojim će se odrediti zahtjevi za zaštite temeljene na mjerenju frekvencije [4]. Završetak rada grupe koja izrađuje standard očekuje se do kraja 2018. godine. Ovim standardom će biti pokrivena tri zaštitne funkcije zasnovane na mjerenju frekvencije; nadfrekvencijska, podfrekvencijska i ROCOF. Oznake zaštitnih funkcija su za pod/nad frekvencijsku zaštitu 81U/81O (ANSI kod) i TUF/PTOF LN (IEC 61850 standard) te za ROCOF zaštitu 81R (ANSI kod) i PFRC LN (IEC 61850 standard).

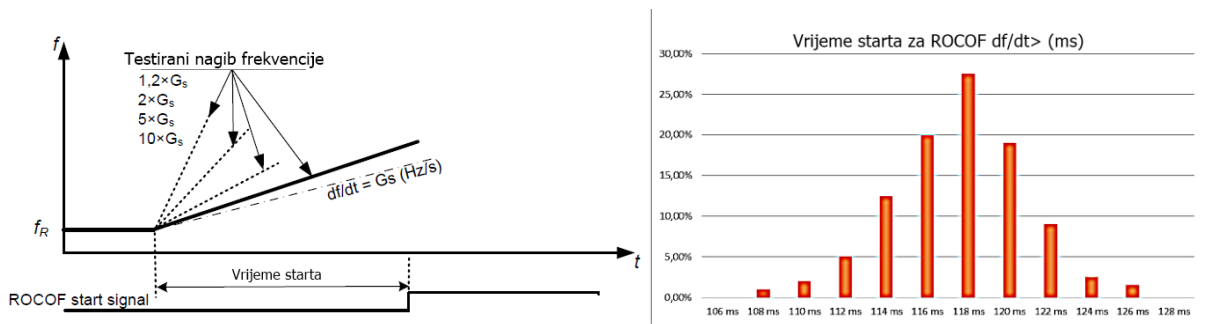
Standard IEC 60255–181 odredit će sve bitne karakteristike zaštitnih funkcija koje će morati zadovoljiti proizvođači, a također će biti propisani standardni tipski testovi koji će mjeriti ispunjenje traženih karakteristika. Time će biti olakšano provjeravanje i ispitivanje frekvencijskih zaštita, što smanjuje probleme u ocjenjivanju kvalitete tih funkcija, a korisnici će puno lakše moći uspoređivati kvalitetu pojedinih funkcija kod različitih uređaja. Neke od karakteristika koje će biti određene su: opseg rada zaštitne funkcije, točnost proradnih vrijednosti, otpusna histereza, vrijeme starta zaštite, točnost vremena zatezanja, vrijeme otpusta, utjecaji harmonika, stabilnost kod naglih promjena napona. Definiranje tih karakteristika će olakšati ocjenjivanje kvalitete zaštitnog uređaja i procjenu mogućnosti funkcija u

određenim složenim zadaćama, kao što je prepoznavanje otočnog pogona. Za ispitne testove će biti definirana metodologija, broj ispitnih točaka i ispitni izvještaji.



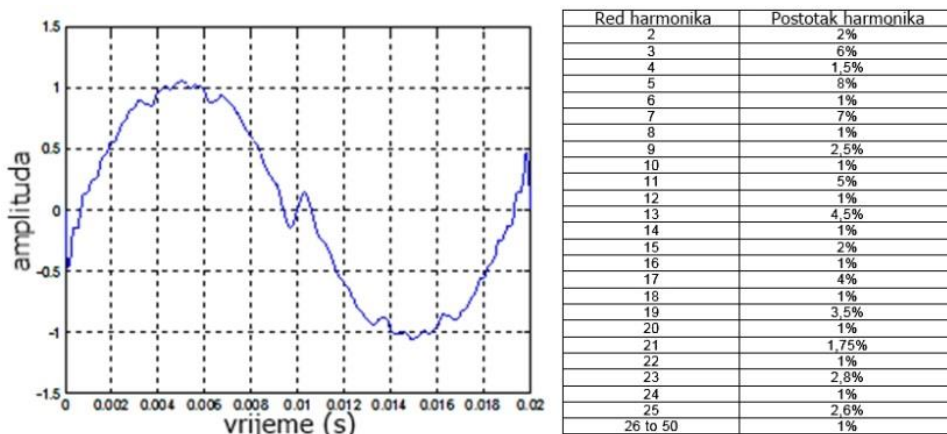
Slika 5. Standardom određeno ispitivanje za točnost proradne vrijednosti ROCOF zaštite [4]

Na slikama 5 i 6 su prikazani primjeri ispitnog testa za provjeru proradne vrijednosti i vremena starta zaštitne funkcije ROCOF prema standardu IEC 60255–181.



Slika 6. Standardom određeno ispitivanje vremena starta ROCOF zaštite [4]

Na slici 7 je prikazano mjerenje točnosti vrijednosti prorade frekvencijske zaštite uz prisutnost harmonika definiranih prema IEC61000-2-4. Test mora pokazati da je povećanje greške uz prisutnost definiranih harmonika u dozvoljenim granicama.

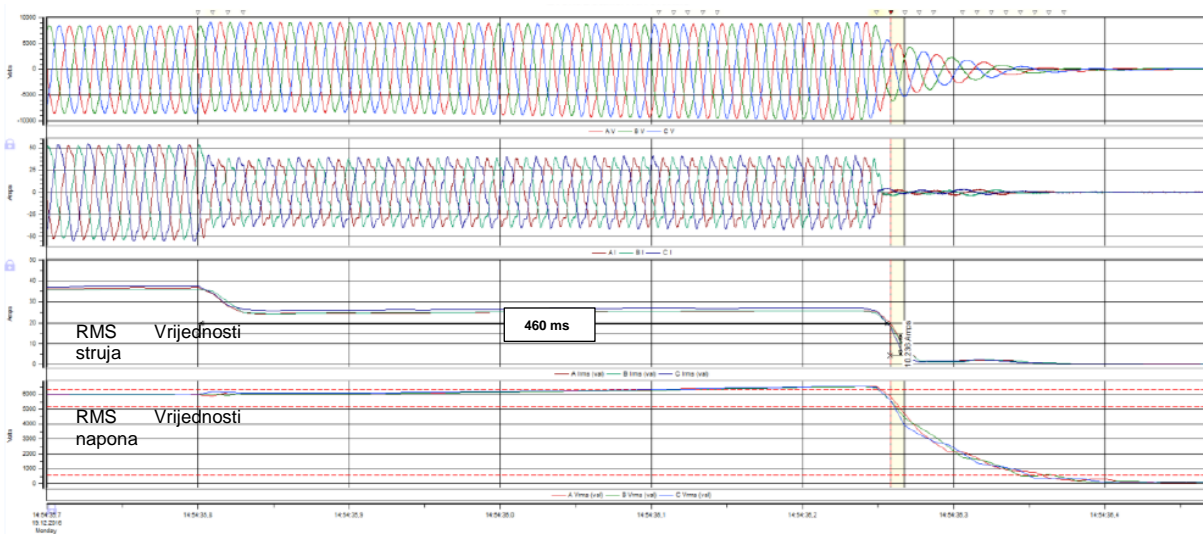


Slika 7. Standardom određeni harmonični signal za ispitivanje točnosti vrijednosti prorade [4]

3. ISKUSTVA U PRIMJENI ROCOF ZAŠTITE U PREPOZNAVANJU OTOČNOG POGONA

ROCOF zaštita je unaprijeđena primjena mjerenja frekvencije u svrhu ostvarenja zaštitnih funkcija. Tako je Francuski Enedis u članku [3] prikazao poboljšano djelovanje zaštite od otočnog pogona u distribucijskoj mreži EDF-a uključivši ROCOF funkciju u zaštitnu shemu na sučelju distribuiranih izvora i mreže. ROCOF funkcija blokira usko podešenu trenutnu frekvencijsku zaštitu $f_{<}, f_{>}$ (49.5 Hz, 50.5Hz) koja služi za prepoznavanje otočnog pogona distribuiranih izvora na vodovima koji koriste APU. Ako je ROCOF ispod 0,5 Hz/s, vrlo vjerojatno je došlo do poremećaja na prijenosnoj mreži (gubitak većih izvora, isključenje bitnih prijenosnih vodova) pa se uključuje šire podešena frekvencijska zaštita (47.5Hz, 51.5Hz) koja sprječava ispad većeg broja distribuiranih izvora u mreži i na taj način povećava stabilnost sustava.

U distribucijskoj mreži HEP-a proteklih nekoliko godina je priključen oveci broj elektrana koje proizvode električnu iz obnovljivih oblika energije. Prema važećoj legislativi, da bi elektrana zadovoljila uvjete priključenja i sigurnog rada predaje električne energije u mrežu, uz ostale uvjete paralelnog pogona, ne smije ostati u otočnom pogonu sa bilo kojim dijelom mreže. Prije puštanja elektrane u pogon vrši se probno ispitivanje prepoznavanja otočnog pogona elektrane. Pokus se izvodi tako da postizemo pogon elektrane i određenog dijela distribucijske mreže vrlo blizak uravnoteženju snaga i tada ostavljamo elektranu i taj dio mreže u otočnom pogonu. Svaki generator/rotor ima određeni moment inercije koji definira promjenu izlaznih električnih veličina na polovima generatora kada nastupi otočni pogon uz uvjet da postoji razlika proizvodnje generatora i potrošnje mreže u toku. ROCOF je pasivna metoda koja ima NDZ, te se u slučaju izvora s većom inercijom generatora može dogoditi da i s niskim podešenjima elektrana predugo ostane u nedopuštenom pogonu s mrežom. Neuspjela upotreba zaštitne funkcije događa se najčešće u mrežama s karakteristikama koje negativno djeluju na rad ROCOF funkcije, kao npr. nepovoljni tokovi jalove snage. U slučaju primjene APU-a na razmatranoj mreži elektrana se mora isključiti iz otočnog pogona u vremenu manjem od beznaponske pauze APU-a. Brzina isključenja elektrane ovisi o karakteru potrošača i otočne mreže te podešenjima ROCOF zaštitne funkcije.

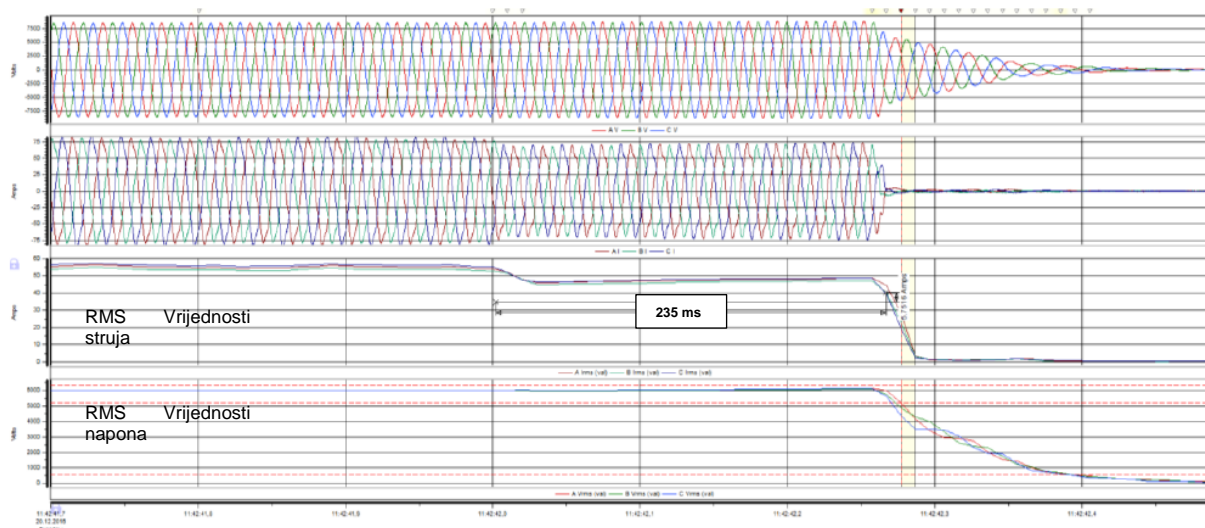


Slika 8. Prikaz električnih veličina za aktiviranu VECTOR SHIFT zaštitu

Podešenja ROCOF zaštite generalno su u intervalu od 200 mHz/s do 1Hz/s. Podešenja se razlikuju prema veličini generatora i prema osjetljivosti na prijelazne pojave u mreži uzrokovane sklopnim operacijama u blizini elektrane. Zaključeno je da parametri podešenja ROCOF zaštite uvelike ovise o dva uvjeta: da ne prorađuje na prijelazne pojave u mreži i da ipak isključi elektranu s mreže u uvjetima otočnog pogona. Ovaj postupak se provodi na način da se provedu računalne simulacije modela mreže zajedno s numeričkim modelom generatora koje rezultira inicijalnim podešenjima, a, naravno, na kraju slijedi ispitivanje u pokusnom/paralelnom radu generatora i mreže.

Slike 8 i 9 prikazuju primjer ispitivanja otočnog pogona elektrane na Bioplin Matvej Virje priključne snage 1 MW. VECTOR-SHIFT zaštita djeluje na izmjereni pomak kuta vektora napona $\Delta\phi$ koji nastaje zbog promjene napajanoog tereta prilikom nastanka otočnog pogona. Na slici 8 prikazan je grafički prikaz struja i napona u simulaciji otočnog pogona uz aktiviranu VECTOR-SHIFT zaštitu. U toj simulaciji otočnog pogona djelovala je nadfrekvencijska zaštita u vremenu 460 ms nakon isključenja prekidača 10 kV vodnog polja i odvojila elektranu od ostatka mreže isključenjem generatorskog prekidača. Nakon prvog

neuspjelog pokusa, izvršena je korektivna mjera prepodešenja zaštite aktiviranjem ROCOF funkcije. Slika 9 prikazuje proradu ROCOF zaštite za iste uvjete otočnog pogona u vremenu 235 ms, a to vrijeme isključenja zadovoljilo je uvjet na zaštitu od otočnog pogona da isključi elektranu u vremenu manjem od 300 ms zbog APU funkcije na vodu koji napaja elektranu. Podešenje VECTOR-SHIFT zaštite $\Delta\phi$ je bilo 6 stupnjeva dok je ROCOF zaštita bila podešena na $\Delta f/\Delta t$ 1Hz/s. ROCOF i VECTOR-SHIFT zaštite su specifične za elektrane na biomasu koje za proizvodnju električne energije koriste sinkroni generator, većina zaštitnih releja ima implementirane obje spomenute zaštite, uz napomenu da može biti aktivirana samo jedna od njih u jednofaznom ili trofaznom režimu rada. Mjerenja vrijednosti struja i napona te vremena prorade zaštita sa slika 8. i 9. izvršena su uređajem A klase proizvođača "Dranetz" na sučelju elektrane i distribucijske mreži, dok su prorade samih zaštitnih funkcija ($f >$ isklup i ROCOF isklup) očitane sa zaštitnog releja koji djeluje na generatorski prekidač.



Slika 9. Prikaz djelovanja ROCOF zaštite

Ovi primjeri pokazuju da već danas postizemo dobre rezultate u primjeni ROCOF zaštite, a daljinskim povezivanjem zaštitnih uređaja u naprednim mrežama biti će otvorene nove mogućnosti primjene ROCOF zaštite, kao što je uspoređivanje brzine promjene frekvencije na više točaka u mreži, te primjena ROCOF zaštite uz kontrolirani tok jalove energije.

4. ZAKLJUČAK

ROCOF funkcija prepoznaje događaje koji utječu na promjenu frekvencije na mjestu mjerenja pomoću algoritma koji mora što točnije procijeniti stvarnu promjenu frekvencije. Zbog naglih promjena i sve većeg izobličenja signala napona u EES-u teško je mjeriti trenutnu frekvenciju, stoga je potrebno u zaštitne uređaje implementirati nove algoritme koji će smanjiti negativne utjecaje na mjerenje frekvencije i što točnije procijeniti brzinu promjene frekvencije na temelju koje se može zaključiti o kakvom događaju u EES-u se radi.

Dosadašnja iskustva su pokazala da u slučaju osjetljivije primjene ROCOF zaštitne funkcije može doći do nepotrebnih isključenja prilikom naglih promjena u sustavu. Posljednjih godina se intenzivno radi na usavršavanju algoritama koji poboljšavaju mjerenje brzine promjene frekvencije i trebali bi u budućnosti povećati kvalitetu ROCOF zaštite. Trenutno je u izradi i novi funkcionalni standard IEC 60255–181 za frekvencijske zaštite koji bi trebao dodatno pomoći u poboljšanju korištenja uređaja koji koriste frekvencijske i ROCOF zaštitne funkcije.

5. LITERATURA

- [1] Olivier ARGUENCE, Florent CADOUX, Bertrand RAISON, Leticia DE ALVARO, "NDZ of an anti-islanding protection with ROCOF threshold", CIRED 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017.
- [2] Michael KLEEMANN, Vladyslav PISKAROV, "Rate of change of frequency protection: toward a viable algorithm for a protective relay", CIRED 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017.
- [3] Samuel EMELIN, Vincent GABRION, "New settings including rate of change of frequency for interface protection relays used for generators connected to MV grid", CIRED 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017.
- [4] Philippe ALIBERT, "Introduction of the future IEC60255-181", Session 3 – Round Table 14 – ROCOF function, CIRED 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017.
- [5] Holger KÜHN, Dr. Carsten BÖSE, Dr. Andreas JURISCH, "Determination of Grid-Frequency", Session 3 – Round Table 14 – ROCOF function, CIRED 24th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Glasgow, 12-15 June 2017.
- [6] Wen-Yeau CHANG, Hong-Tzer YANG * Department of Electrical Engineering *Department of Electrical Engineering St. John's University * National Cheng Kung University " An integrated passive islanding detection method for distributed generators", Taiwan, November 2009.
- [7] Dražen ARNAUT, Plan i program ispitivanja primjerenog paralelnog pogona elektrane bioplinsko postrojenje „Elektrana na bioplin Matvej 1MW“ s mrežom u pokusnom radu, Zagreb, Veljača 2017. godine