

## PRIJEDLOG OPSEGA PODATAKA ZA MONITORING PROIZVODNIH JEDINICA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCIJE

Ognjen Kuljača<sup>1</sup>, Krunoslav Horvat<sup>1</sup>, Tomislav Plavšić<sup>2</sup>, Darko Nemeč<sup>3</sup>, Milan Stojsavljević<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Brodarski institut

<sup>2</sup>Hrvatski operator prijenosnog sustava

<sup>3</sup>Institut za energetiku i elektroprivredu

### Sažetak

Stabilan pogon elektroenergetskog sustava temelj je za sigurnu i pouzdanu opskrbu potrošača električnom energijom. Frekvencija, kao mjera usklađenosti između proizvodnje i potrošnje električne energije, ključan je parametar za osiguranje stabilnosti elektroenergetskog sustava. Sve proizvodne jedinice priključene na elektroenergetski sustav opremljene su sustavima za regulaciju djelatne snage i frekvencije, češće zvanima turbinski regulatori. Turbinski regulatori reagiraju na promjenu frekvencije elektroenergetskog sustava na način da reguliraju dotok pogonskog medija, pare ili vode, na turbinu agregata. Ovaj se regulacijski proces naziva primarna regulacija frekvencije. Primarna regulacija frekvencije osigurava brzu injekciju djelatne snage u elektroenergetski sustav u slučaju iznenadnog gubitka određene količine proizvodnje djelatne snage bilo gdje u elektroenergetskom sustavu, i posljedičnog pada vrijednosti frekvencije. Monitoring sudjelovanja proizvodnih jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije unapređuje mehanizme nadzora elektroenergetskog sustava i njegovih podsustava, a samim time i povećava sigurnost pogona elektroenergetskog sustava.

**Ključne riječi:** elektroenergetski sustav, primarna regulacija frekvencije, statičnost, turbinski regulator

### Abstract

Power system stability is the basis for the safe and reliable supply of electricity. Frequency, as a measure of the balance between production and consumption of electricity, is a key parameter of the power system stability. All production facilities are equipped with active power and frequency control systems, the so-called turbine controllers. Turbine controllers react to a change of frequency power system in a way that they control the supply of operating media, steam or water to the turbine. This process is called primary frequency

control. Primary frequency control provides sufficient amounts of active power reserve in case of a sudden loss of the certain amount of production in power system and subsequent frequency decay. Monitoring of production units participation in primary frequency control improves supervision of control systems.

**Key words:** power system, primary frequency control, droop, turbine governor

### 1. UVOD

Operator prijenosnog sustava (eng. Transmission System Operator, skraćeno: OPS) zadužen je, između ostaloga, za osiguranje systemske usluge regulacije frekvencije. Pri radu u povezanom elektroenergetskom sustavu – interkonekciji, svaka članica interkonekcije obvezna je sudjelovati u primarnoj regulaciji frekvencije proporcionalno svojem udjelu. Taj se udjel određuje u svakoj interkonekciji prema određenoj metodologiji. U interkonekciji Kontinentalne Europe, čija je članica i Hrvatska, sve članice zajedno moraju u svakom trenutku moći nadoknaditi hipotetski ispad 3000 MW proizvodnje, a udio svake članice proporcionalan je ukupnim instaliranim proizvodnim kapacitetima na njenom teritoriju. Sukladno tim obvezama, HOPS (Hrvatski operator prijenosnog sustava d.o.o.) kao operator hrvatskog elektroenergetskog sustava dužan je osigurati da u svakom trenutku ima na raspolaganju propisani iznos snage primarne regulacije. Iznos i dinamika angažiranja snage primarne regulacije propisani su Pogonskim priručnikom interkonekcije [1]. Za ostvarenje te zadaće OPS treba trajno pratiti stvarno raspoloživu rezervu snage za primarnu regulaciju u trenutno angažiranim proizvodnim jedinicama u okviru elektroenergetskog sustava (EES) pod svojom nadležnošću. Pri poremećajima s odstupanjem frekvencije operator treba pratiti dinamiku angažiranja primarne regulacijske rezerve. Davatelji usluge primarne regulacije frekvencije su proizvodne jedinice koje su osposobljene za tu funkciju. Prema Mrežnim pravilima elektroener-

getskog sustava ([2], točka 4.3.4.7.1), u primarnoj regulaciji frekvencije dužne su sudjelovati hidro proizvodne jedinice nazivne snage veće od 10 MW i termo proizvodne jedinice nazivne snage veće od 30 MW (iako je predviđeno da po dogovoru s operatorom prijenosnog sustava za tu zadaću budu osposobljene i jedinice manjih nazivnih snaga). Navedeni zahtjev odnosi se na nove i revitalizirane proizvodne jedinice.

Za uspješno i kvalitetno ispunjavanje zahtjeva koji se postavljaju na osiguranje primarne regulacijske rezerve nužan je preduvjet da OPS ima točne informacije o izvedenom stanju i stvarnim podešenjima sustava turbinske regulacije proizvodnih jedinica, a idealno bi bilo da raspolaže i dokazima o ispunjavanju kriterija za sudjelovanje u primarnoj regulaciji. U svjetskoj praksi, proizvodna jedinica koja se kvalificira za pružanje usluge primarne regulacije frekvencije mora deklarirati tražena svojstva i dokazati svoju sposobnost koja se provjerava odgovarajućim pokusima [3].

U radu je uvodno opisana svjetska praksa u provođenju i nadzoru primarne regulacije frekvencije EES-a. Opisani su postupci koji omogućuju procjenu kvalitete primarne regulacije, kao što je analiza odziva sustava, pojedinih regulacijskih područja i proizvodnih jedinica u slučajevima poremećaja koji rezultiraju znatnijim odstupanjem frekvencije od zadane vrijednosti.

## 2. MONITORING AGREGATA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCije - TEHNIČKI ZAHTEVI

### 2.1. Tehnički zahtjevi iz mrežnih pravila hrvatskog elektroenergetskog sustava

Prema Mrežnim pravilima ([2], točka 7.1, str. 122), definiran je minimalni opseg tehničkih podataka i tehničke dokumentacije koji je korisnik dužan dostaviti operatoru sustava u pojedinoj fazi realizacije priključka na sustav. Za elektrane se, između ostalog, posebno zahtijeva da dostave podatke o:

- udjelu u održavanju frekvencije
- primarnoj / sekundarnoj regulaciji
- komunikacijskim uređajima elektrana – mreža

U Mrežnim pravilima nisu detaljnije razrađeni zahtjevi na vrstu i opseg podataka koji su proizvođači dužni dostaviti operatoru prijenosnog sustava za svoje proizvodne jedinice. Za primarnu regulaciju od interesa je još zahtjev da se

dostave „sve zahtijevane informacije za provedbu proračuna stacionarnih i dinamičkih stanja sustava“ te „pregledna shema zaštite proizvodne jedinice s podešenjima uključivo s blok shemama sustava regulacije agregata“ (točka 7.1). U ovim se zahtjevima implicitno propisuje da se operatoru prijenosnog sustava mora dostaviti strukturni blok-dijagram sustava turbinske regulacije s podešenjima parametara.

Nadalje, u točki 4.3.4.5 zahtijeva se da proizvođač (subjekt za proizvodnju) mora dostavljati upravljačkom centru procesne informacije u stvarnom vremenu, i to mjerene vrijednosti aktualnih pogonskih veličina proizvodne jedinice:

- napon
- frekvencija
- djelatna snaga
- jalova snaga

dok se iz centra vođenja, od podataka važnih za primarnu regulaciju frekvencije, proizvođaču prosljeđuju najmanje:

- postavna vrijednost djelatne snage
- nalog za uključivanje / isključivanje primarne regulacije

Za ostale signale i informacije koji se razmjenjuju između operatora prijenosnog sustava i proizvođača predviđeno je da se reguliraju ugovorno u svakom konkretnom slučaju. Nisu specificirani nikakvi zahtjevi na procesne signale (točnost, frekvencija uzorkovanja, sinkroniziranost sa signalom točnog vremena).

## 3. MONITORING AGREGATA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCije - SVJETSKA PRAKSA

Posljednjih godina uočavaju se nastojanja operatora prijenosnih sustava da razviju metodologiju i uspostave kriterije za vrednovanje pomoćnih usluga, između ostalog i sudjelovanja proizvodnih jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije([4],[5],[6]). Nadzor i ocjena kvalitete primarne regulacije u principu se odvija na dva plana:

- trajno praćenje stanja i ocjena rezerve primarne regulacijske snage u stvarnom vremenu (on-line)
  - ocjena kvalitete odziva davatelja usluge primarne regulacije frekvencije naknadnom obradom pohranjenih zapisa (off-line)
- Metodologija ocjene kvalitete primarne regulacije frekvencije na temelju pohranjenih zapisa razvija

se u dva načelna pravca:

- analiza zapisa prilikom pogonskih događaja sa značajnijim odstupanjem frekvencije
- ispitivanje uvođenjem simuliranih signala frekvencije s točno određenim zakonom vremenske promjene na turbinske regulatore proizvodnih jedinica koje sudjeluju u primarnoj regulaciji frekvencije

Prvi postupak je prikladan jer se koriste samo pogonski zapisi koji se iz proizvodnih objekata mogu prikupljati automatski, putem sustava daljinskih mjerenja.

Za razliku od prvog postupka, u ciljanim ispitivanjima provjerava se pojedinačni agregat / proizvodna jedinica. Budući da simulirana promjena frekvencije ima točno određeni vremenski tijek (tipično: linearna promjena u 10 sekundi od nazivnog iznosa do iznosa za koji se zahtijeva angažiranje kompletne rezerve primarne regulacije), moguće je na konzistentan način provjeravati dinamička svojstva pojedinog agregata. Ovakav postupak iziskuje uvođenje simuliranog signala frekvencije u turbinski regulator (što mora biti tehnički izvodljivo) i stoga se tretira kao ispitivanje.

U nastavku su dani neki primjeri zahtjeva iz svjetske prakse.

### 3.1. Tehnički zahtjevi entso-e za priključak proizvodnih jedinica na elektroenergetski sustav

Dokument ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) Tehnički zahtjevi za priključak proizvodnih jedinica na elektroenergetski sustav, [7] završen je u listopadu 2011, a propisuje kod priključka u elektroenergetski sustav za kontinentalnu Europu, nordijske zemlje, Irsku, Veliku Britaniju i baltičke zemlje, dakle prema postojećim interkonekcijama. Kod kategorizira proizvodne jedinice i na njih postavlja različite zahtjeve. Dokument definira četiri tipa proizvodnih jedinica, tip A, B, C, i D. Svaki tip jedinice ima drugačije zahtjeve za priključenje u sustav, pa tako i u slučaju regulacije frekvencije. U kontinentalnoj Europi proizvodne jedinice tipa B su sve proizvodne jedinice od minimalno 0.1 MW do maksimalno 10 MW. Proizvodne jedinice tipa C su sve jedinice s najmanjom snagom od 10 MW, a koje su priključene na mrežu ispod 110 kV. Tip A su jedinice manje od 0.1 MW a tip D su jedinice koje su spojene na 110 kV nivou u sustav. Također. Kod TE-TO jedinica se njihov tip određuje na osnovu radne snage

koja se predaje u sustav.

Glavna je značajka novog prijedloga da on zahtijeva da sve jedinice, dakle i jedinice tipa A i tipa B sudjeluju u regulaciji frekvencije. Jedinice su podijeljene u tipove samo na osnovu snage, a ne i po tipu proizvodne jedinice (to se doduše odnosi na nove jedinice, ne na postojeće jedinice).

ENTSO-E dokument [7] zahtijeva real time monitoring slijedećih veličina kod djelovanja primarne regulacije frekvencije:

- signal koji pokazuje mod rada uključenosti regulacije frekvencije
- postavnu djelatnu snagu
- stvarnu vrijednost djelatne snage
- stvarnu postavnu vrijednost za frekvencijski odziv
- područje frekvencijskog odziva
- statizam
- zonu neosjetljivosti
- maksimalnu raspoloživu snagu

Dokument ne propisuje duljinu mjerenja niti vrijeme uzorkovanja za mjerenja kod monitoringa kod djelovanja primarne regulacije frekvencije.

### 3.2. Kontinentalna europa

U tehničkoj regulativi interkonekcije Kontinentalne Europe (KE, prije znana kao UCTE – Union for Coordination of Transmission of Electricity) [8] navedeni su signali koji se za proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije trebaju prenositi u nadležni upravljački centar:

- status primarne regulacije (uključeno/isključeno)
- način rada turbinskog regulatora (regulacija djelatne snage, regulacija brzine vrtnje, regulacija temperature za plinsko-parne blokove u spojnom procesu,...)
- stvarna mjerena vrijednost djelatne snage
- stvarna vrijednost referentnog signala turbinskog regulatora (primarnog regulatora)
- ostali signali po dogovoru između operatora prijenosnog sustava i proizvođača

Potrebni interval osvježavanja (vrijeme uzorkovanja) mjerenih podataka nije naveden u [8]. U dodatku 1 priručnika interkonekcije KE [9] pobliže je opisan način mjerenja performansi primarne regulacije regulacijskog područja postupkom određivanja mrežne frekvencijske karakteristike iz odziva karakterističnih veličina

pri poremećajima sa značajnim odstupanjem frekvencije. Angažirana snaga primarne regulacije u regulacijskom području / bloku se određuje iz promjene zbroja djelatnih snaga na vodovima razmjene. Preporučuje se analizirati svaki poremećaj s ispadom od 1000 MW ili više. Ni u ovom dokumentu se ne postavljaju zahtjevi na interval osvježavanja (vrijeme uzorkovanja) mjerenih veličina.

U pogonskom priručniku interkonekcije KE [9] u točki A-S5.3 navodi se vrijeme uzorkovanja za potrebe nadzora frekvencije u regulacijskom području (od preporučene vrijednosti od 1 sekunde do maksimalno 10 sekundi). Performanse primarne regulacije određuju se iz analize odziva na poremećaj (metodom mrežne karakteristike) i statističkom obradom mjerenja.

### 3.3. NERC (North American electric reliability corporation)

U dokumentu [10] definiraju se karakteristične vrijednosti koje se dobivaju analizom vremenskog tijeka frekvencije prilikom registriranog frekvencijskog poremećaja (Frequency Measurable Event – FME) na temelju kojeg se ocjenjuje odziv sustava primarne regulacije frekvencije. Posebno su navedeni kriteriji za zapis poremećaja. Pretpostavlja se da se za analizu koriste mjerni signali iz sustava vođenja na razini operatora prijenosnih sustava (Energy Management System – EMS) s vremenima uzorkovanja od 2 do 6 sekundi. Trajanje zapisa nije strogo propisano i ovisi o vremenskom tijeku frekvencije u periodu nakon poremećaja, tj. o oporavku frekvencije i postizanju novog stabilnog stacionarnog stanja.

### 3.4. Swissgrid

U metodologiji koju predlaže Swissgrid, švicarski operator prijenosnog sustava, nadzor i ocjena primarne regulacije frekvencije provode se putem on-line praćenja i off-line analize zapisa pri poremećajima.

On-line praćenje rezerve primarne regulacijske snage usmjereno je na trajni nadzor stvarnog iznosa zbirne rezerve na razini pružatelja usluge primarne regulacije (pool-a) koji u općem slučaju raspolaže s više proizvodnih jedinica osposobljenih za primarnu regulaciju frekvencije. Podaci koji se prikupljaju u stvarnom vremenu (on-line) namijenjeni su za korištenje u vođenju sustava, ali i za naknadnu statističku obradu u svrhu ocjene raspoloživosti regulacijske rezerve

pojednog pružatelja usluge primarne regulacije frekvencije. Za on-line praćenje veličina važnih za primarnu regulaciju propisan je interval osvježavanja podataka od deset (10) sekundi ili kraći (iznimno je za slučaj da su objekti pružatelja usluge opremljeni starijim akvizicijskim sustavima prihvatljiv interval osvježavanja do 1 minute). Za razliku od on-line praćenja, off-line analiza zapisa provodi se na razini pojedinačnog agregata / proizvodne jedinice. Pružatelj usluge primarne regulacije dužan je dostaviti odgovarajuće zapise za svaku svoju proizvodnu jedinicu u primarnoj regulaciji. Propisani su:

- mjerene veličine ( $P_g$ ,  $f$ ), međusobno sinkronizirane, svaka točka s vremenskom oznakom (markicom), odnosno barem jednoj točki zapisa pridružena vremenska oznaka sinkronizirana sa signalom točnog vremena
- format podataka (CSV), po jedan signal u stupcu
- minimalna frekvencija uzorkovanja (maksimalno vrijeme uzorkovanja 2 s)
- duljina zapisa (30 minuta, od čega 2 minute prije nastupa poremećaja)
- trajanje čuvanja pohranjenih zapisa
- način dostave – po zahtjevu swissgrid-a, u roku od 5 dana

U dokumentu [3] razrađuju se zahtjevi na ispitivanja injekcijom simuliranog signala (odstupanja) frekvencije u sumacijsku točku kruga regulacije brzine vrtnje/frekvencije turbinskog regulatora. Ovdje je interesantna specifikacija zahtjeva na snimanje:

- vrijeme uzorkovanja: 100 ms
- trajanje snimanja: 30 minuta
- klasa točnosti mjernih transformatora: 0,5 (poželjno: 0,1)

Budući da se radi o specijalnim namjenskim ispitivanjima, postavljeni su znatno stroži zahtjevi na vrijeme uzorkovanja nego što je to slučaj u ostalim preporukama iz svjetske prakse.

U istom se dokumentu kao alternativna metoda za ocjenu svojstava agregata/elektrane s obzirom na zahtjeve primarne regulacije frekvencije predlaže analiza frekvencijskih propada snimljenih tijekom redovnog pogona. Ova pojednostavljena metoda provodi se u slučaju kad ispitivanje s injekcijom simuliranog signala frekvencije nije tehnički provedivo ili je previše složeno.

### 3.5. TRE / ERCOT (Texas Reliability Entity / The Electric Reliability Council of Texas)

Texas Reliability Entity, Inc. (TRE) je izdao dokument pod naslovom „Primary Frequency Response Reference Document“, BAL-001-TRE-1 Performance Metric Calculation [5] kao regionalni NERC standard BAL-001-TRE-01. U tom dokumentu je detaljno razrađen postupak za evaluaciju (kvazistacionarnog) odziva proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije iz zapisa vremenskog tijeka djelatne snage snimljenih prilikom tzv. registriranog frekvencijskog poremećaja (Frequency Measurable Event – FME). Iz rezultata analize više frekvencijskih poremećaja izračunavaju se prosječni pokazatelji odzivnosti svake proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije usrednjeno na razini odabranog vremenskog perioda promatranja (12 mjeseci). Pritom se pretpostavlja da je u periodu promatranja registrirano najmanje osam (8) frekvencijskih poremećaja (FME) iz kojih se izvodi prosječni pokazatelj odzivnosti.

Metodologija uzima u obzir mrtve zone turbinskih regulatora i promjene snage po rampi koje mogu biti u tijeku kad nastupi frekvencijski poremećaj. Pokazatelj odzivnosti svodi se na omjer stvarnog odziva i očekivanog (računskog) odziva. Pritom se razlikuje početni (initial) i trajni (sustained) odziv na promjenu frekvencije. U izrazima za računanje očekivanih i stvarnih odziva vrlo se detaljno razrađuju neki dodatni utjecaji, npr. utjecaj promjene brzine vrtnje na snagu plinskih agregata ili promjene tlaka pare kod parnih agregata.

Gornja i donja granica trajno raspoložive djelatne snage (High / Low Sustained Limit – HSL / LSL) proizvodne jedinice definirane su kao vrijednosti koje se ažuriraju u realnom vremenu. Plinsko-parna proizvodna postrojenja u spojnom procesu (kombi postrojenja) tretiraju se kao ekvivalentna proizvodna jedinica ukupne snage jednake zbroju nazivnih snaga plinske i parne turbine.

Metodologija obrađena u ovom dokumentu implementirana je u obliku tabličnog proračuna u Excel formatu [11]. Pretpostavljeni interval uzorkovanja je dvije (2) sekunde. Maksimalno predviđeno vrijeme promatranja pojedinačnog događaja (FME) iznosi 60 minuta.

### 3.6. RTE

U mrežnim pravilima francuskog operatora prijenosnog sustava RTE navedeni su zahtjevi na razmjenu podataka između proizvodnih jedi-

nica i nadležnog centra vođenja. U svrhu trajnog praćenja dinamike rezerve primarne regulacije u nadređeni centar potrebno prenositi sljedeće informacije o proizvodnoj jedinici:

- granična djelatna snaga  $P_{lim}$
- bazna djelatna snaga  $P_{co}$  (zadana snaga za stanje pri nazivnoj frekvenciji)
- stvarna (trenutna) djelatna snaga  $P$
- udio proizvodne jedinice u sekundarnoj regulaciji frekvencije i snage razmjene,  $Pr$

U navedenom dokumentu nije specificiran traženi interval uzorkovanja.

U dokumentu u kojem se razrađuje vrednovanje proizvodnih jedinica u pružanju pomoćnih usluga [12] navedeni su, između ostalog, i zahtjevi s obzirom na primarnu regulaciju frekvencije. U prilogu 1 (Annexe 1) tog dokumenta specificirani su podaci koji se odnose na sudjelovanje u primarnoj i sekundarnoj regulaciji frekvencije i djelatne snage. Glede primarne regulacije, potrebno je navesti:

- $P_{max}$  (MW)
- pojačanje primarnog regulatora (MW/Hz) – recipročna vrijednost statizma
- mod rada turbinskog regulatora (npr. regulacija djelatne snage, regulacija otvora,...)

U prilogu 6 istog dokumenta (Annexe 6 Performances mesures par RTE et seuils de notification) definirani su kriteriji za provjeru udovoljavanja zahtjevima primarne regulacije frekvencije. Definiraju se statički (statizam i angažirana snaga za primarnu regulaciju) i dinamički kriteriji (brzina odziva, posebno za termo a posebno za hidro jedinice). Period promatranja odziva na frekvencijski poremećaj je 900 sekundi (15 minuta), a registriraju se frekvencijski poremećaji s odstupanjem frekvencije većim od 50 mHz u trajanju duljem od 120 sekundi. U ovom dokumentu ne navode se zahtjevi na uzorkovanje mjerenja.

### 3.7. Terna

U dokumentu [13] operator talijanskog prijenosnog sustava TERNA precizno specificira zahtjeve na interval osvježavanja signala u sustavu daljinskog vođenja. Za mjerenja djelatne snage jedinica koje sudjeluju u regulaciji frekvencije i djelatne snage traži se kontinuirano cikličko osvježavanje s maksimalnim vremenom uzorkovanja od dvije (2) sekunde.

### 3.8. Zaključni pregled primjera iz svjetske prakse

U sljedećoj tablici rezimirani su rezultati pregleda prethodno iznijetih primjera iz svjetske prakse:

Tablica 1. Usporedba zahtjeva na podatke za primarnu regulaciju iz svjetske prakse (osim ESCOT draft)

IZVOR	VELIČINE	TSAMP	DULJINA	NAPOMENA
Kontinentalna Europa	Pg, f	1-10 s	nije specificirano	preporuka: Tsamp=1 s analizirati ispade $\geq 1000$ MW
TRE/ERCOT	Pg, f	2 s	max. 60 minuta	duljina prema tabl. proračunu [11]
SWISSGRID	Pg, f	$\leq 10$ s (1 min)	trajno	on line
	Pg, f	$\geq 2$ s	30 min	off line, 2 min pretrigger
	Pg, f	0,1 s	30 min	pokus injekcije simul. $\Delta f(t)$
NERC	f	2-6 s	ovisi o dinamici prijelazne pojave	U [10] se razmatra samo odziv frekvencije radi definiranja karakterističnih vrijednosti frekvencije i vremena
TERNA	Pg	2 s	trajno	
RTE	Pg, f	nije specificirano	900 s (15 min)	evaluacija odziva pri poremećaju.

Pg, je djelatna snaga, a f je stvarna frekvencija. ENTSO dokument [7] zahtijeva real time monitoring većeg broja veličina, a u njih su uključeni i djelatna snaga i frekvencija.

U svim razmatranim primjerima za praćenje u stvarnom vremenu (on-line) predviđeno je trajno registriranje djelatnih snaga proizvodnih jedinica s vremenom uzorkovanja od jedne (1) do deset (10) sekundi. U jednom slučaju (TRE) se u tabličnim proračunima za ocjenu ispunjavanja zahtjeva primarne regulacije izričito zahtijeva fiksno vrijeme uzorkovanja od dvije (2) sekunde. Općenito, veća frekvencija uzorkovanja stvara preduvjete za kvalitetnije filtriranje i prikaz signala. Ograničenja na interval osvježavanja podataka mogu biti uvjetovana:

- vremenskim odzivom mjernih kašnjenjima u lokalnim procesno-informacijskim sustavima u elektrani
- ukupnih kašnjenjima u sustavu daljinskog prijenosa podataka u nadređeni centar mogućnostima akvizicije podataka u samom centru

Posebno važno za koreliranje podataka je sinkroniziranost mjerenja sa zajedničkom vremenskom referencom. U tu svrhu danas se najčešće koristi sinkronizacija s nekim od izvora signala točnog vremena (GPS, DCF).

Zaključno, na temelju provedene usporedbe zahtjeva iz svjetske prakse glede frekvencije

uzorkovanja mjerenja iz proizvodnih jedinica za potrebe monitoringa agregata u primarnoj regulaciji frekvencije, može se zaključiti sljedeće:

- uglavnom se zahtijeva registriranje signala djelatne snage, frekvencije, stvarne postavne vrijednosti djelatne snage, maksimalne i minimalne djelatne snage (raspoložive za primarnu regulaciju)
- Tipična zahtijevana i prihvatljiva perioda uzorkovanja za on-line nadzor je dvije (2) sekunde (samo u preporukama KE se navodi 1s)
- zapisi moraju biti sinkronizirani sa signalom točnog vremena
- za kvalitetnije snimanje dinamike relevantnih veličina pri frekvencijskim poremećajima ili namjenskim testovima preporučljivo je mjerenja uzorkovati s periodom od 100 ms
- zahtjevi na razlučivost i točnost mjerenja u pravilu nisu navedeni
- u slučaju promatranja frekvencijskih poremećaja zahtijeva se duljina zapisa od 15 do 60 minuta (tipično: 30 minuta), a frekvencijski poremećaj se detektira za odstupanje od 0,05-0,1% nazivne frekvencije

#### 4. PODACI POTREBNI ZA MONITORING AGREGATA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCije

##### 4.1. Podaci o sustavima turbinske regulacije proizvodnih jedinica

Za realizaciju funkcije monitoringa agregata u primarnoj regulaciji frekvencije operator prijenosnog sustava mora imati na raspolaganju potrebne informacije o izvedenom stanju sustava turbinske regulacije i relevantnih mjerenja.

Podaci o proizvodnoj jedinici / agregatu:

- nazivna djelatna snaga
- tehnički minimum
- eventualna ograničenja maksimalne djelatne snage ovisno o uvjetima u postrojenju

Podaci o stvarnoj izvedbi sustava turbinske regulacije:

- vrsta turbinskog regulatora
- proizvođač i tipska oznaka turbinskog regulatora
- strukturni blok-dijagram sustava turbinske regulacije
- osnovne tehničke karakteristike servo uređaja za upravljanje turbinom
- funkcijska specifikacija turbinskog regulatora
- mod regulacije aktivan u redovnom paralelnom radu na elektroenergetski sustav i način prijelaza između različitih modova rada turbinskog regulatora
- lista podešenja parametara turbinskog regulatora
- grafički prikaz podešene zone neosjetljivosti turbinskog regulatora
- način povezivanja s procesno-informacijskim sustavom u elektrani i razmjene signala
- način sinkronizacije sustava turbinske regulacije sa signalom točnog vremena
- vremenski odziv sustava turbinske regulacije s agregatom u paralelnom radu na EES i u redovnom pogonskom režimu na odgovarajuću brzu promjenu frekvencije

Podaci o raspoloživim mjerenjima djelatne snage i frekvencije agregata:

- mjesto mjerenja
- klasa točnosti naponskih i strujnih mjernih transformatora
- mjerni opseg i klasa točnosti mjernog

pretvornika djelatne snage

- tipično vrijeme odziva vrijeme osvježavanja izlaznog signala mjernog pretvornika djelatne snage
- mjerni opseg i klasa točnosti mjernog pretvornika frekvencije
- tipično vrijeme odziva ili vrijeme osvježavanja izlaznog signala mjernog pretvornika frekvencije
- sinkronizacija sa signalom točnog vremena

##### 4.1.1. Podaci za kontinuirano praćenje u stvarnom vremenu (on line)

Podaci proizvodnih jedinica / agregata za praćenje u stvarnom vremenu prikupljaju se u svrhu:

- evaluacije trenutnih rezervi primarne regulacijske snage
  - evaluacije odziva agregata u primarnoj regulaciji prilikom registriranih frekvencijskih poremećaja u sustavu
- Za realizaciju monitoringa ključno je utvrditi:
- vrstu i količinu signala koji se prikupljaju
  - učestalost i način osvježavanja podataka

Podaci predviđeni za kontinuirano praćenje mogu se okvirno svrstati u sljedeće skupine:

- statusni podaci koji opisuju režim rada regulatora
- promjenjivi parametri turbinskog regulatora ključni za funkciju primarne regulacije
- procesna mjerenja relevantnih veličina

##### 4.1.2. Statusni podaci i parametri regulatora

Sustav za nadzor agregata u primarnoj regulaciji frekvencije mora imati informaciju da je agregat u pogonu i u redovnom paralelnom radu s elektroenergetskim sustavom.

Mogući režimi rada sustava turbinske regulacije ovise o izvedbi turbinskog regulatora, točnije o njegovoj strukturi i funkcijskoj specifikaciji. Turbinski regulator može sadržavati više funkcija:

- regulaciju brzine vrtnje / frekvencije
- regulaciju djelatne snage
- nadređenu regulaciju neke druge veličine (npr. protoka)
- regulacijska ograničenja

Očekivani režim regulacije s agregatom u paralelnom radu na elektroenergetski sustav u normalnom pogonu jest regulacije djelatne snage s utjecajem promjene frekvencije. Za potrebe primarne regulacije frekvencije važni su podaci

- da li je turbinski regulator ispravan i u funkciji
- radi li turbinski regulator u režimu automatske regulacije i po kojoj reguliranoj veličini
- radi li turbinski regulator u režimu „s osjetljivošću po frekvenciji“.

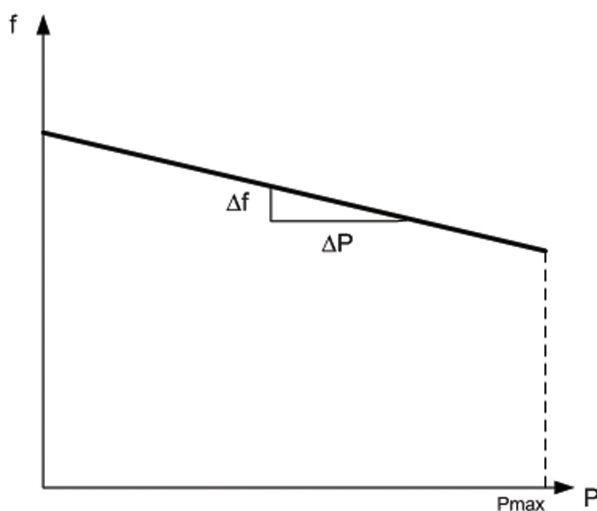
Odgovarajući signali trebaju biti pripremljeni na razini agregata u obliku prikladnom za prijenos u nadređeni centar vođenja.

#### 4.1.3. Statizam

Statizam ili nagib vanjske karakteristike snaga-frekvencija jedan je od ključnih parametara turbinskog regulatora. U paralelnom radu na elektroenergetski sustav, agregat pri odstupanju frekvencije od nazivne/zadane vrijednosti sudjeluje u korekciji tog odstupanja proporcionalno nagibu svoje statičke karakteristike. Ovisno o izvedbi turbinskog regulatora, statizam se u pravilu realizira kao:

- utjecaj brzine vrtnje / frekvencije u režimu automatske regulacije djelatne snage
- utjecaj djelatne snage u režimu automatske regulacije brzine vrtnje / frekvencije

Statizam se izražava u relativnim jedinicama ili postocima normirano na nazivnu vrijednost frekvencije i nazivnu djelatnu snagu proizvodne



Slika 1 Načelni prikaz statičke karakteristike agregata / Static characteristic of power unit

$$s = \frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P}{P_n}} 100\%$$

Na temelju statizama i nazivnih snaga svih agregata u regulacijskom području određuje se ukupna regulacijska konstanta nekog regulacijskog područja.

Podešeni statizam agregata u turbinskom regulatoru deklarirani je podatak koji se za paralelni rad agregata na sustav zadaje prema zahtjevima operatora prijenosnog sustava i na temelju kojega se procjenjuje očekivani doprinos agregata korekciji odstupanja frekvencije. Statizam se u pravilu ne mijenja u pogonu sve dok je agregat u paralelnom radu na elektroenergetski sustav.

Podatak o statizmu nije nužno periodički prenositi u nadređeni centar nego je samo potrebno prosljediti novu vrijednost u slučaju da je došlo do promjene.

Mrtva zona sustava turbinske regulacije  $i_x$  definira se kao područje između dviju vrijednosti regulirane veličine unutar kojega promjena regulirane veličine ne izaziva djelovanje turbinskog regulatora [4]. Neosjetljivost turbinskog regulatora  $i_x/2$  definira se kao polovica mrtve zone. U pojmovniku Mrežnih pravila [2] razlikuje se opseg neosjetljivosti regulacije frekvencije, „određen zajedničkim nesavršenim djelovanjem regulatora i pogonskog stroja“, od mrtve zone regulatora kao namjerno postavljene neosjetljivosti regulatora. U smislu monitoringa primarne regulacije frekvencije, pretpostavlja se da je inherentna neosjetljivost sustava regulacije uslijed konstrukcijskih nesavršenosti točno poznata i minimizirana u okviru tehničkih mogućnosti, a prati se samo namjerno uvedena mrtva zona regulatora. Podatak o ukupnoj neosjetljivosti turbinskog regulatora treba biti na raspolaganju operatoru prijenosnog sustava, a može se provjeriti pri puštanju u pogon sustava turbinske regulacije. U kasnijem pogonu će se posredno očitovati u odzivima djelatne snage agregata na promjenu frekvencije i može se pratiti / snimiti u trajnom pogonu.

Zona neosjetljivosti (mrtva zona) sustava turbinske regulacije podešena u turbinskom regulatoru mora biti dostupna operatoru prijenosnog sustava u obliku statičke karakteristike s jasno indiciranom histerezom ako je primijenjena. Aktualno podešenje parametara mrtve zone treba biti dostupno operatoru prijenosnog sustava.



Podatke o podešenoj mrtvoj zoni u sustavu za monitoring agregata u primarnoj regulaciji frekvencije potrebno je osvježavati samo u slučaju promjene podešenja ili statusa uključenosti mrtve zone.

Maksimalna trenutno raspoloživa djelatna snaga potrebna je za izračunavanje trenutnog iznosa rezerve primarne regulacije za slučaj smanjenja frekvencije sustava (primarna regulacija na više). Podatak mora biti pripremljen na razini proizvodne jedinice / agregata ili elektrane (turbinski regulator ili procesno-informacijski sustav na razini agregata ili elektrane), a prenosi se u obliku iznosa maksimalne trenutno raspoložive djelatne snage u [MW].

Podatak o trenutnoj maksimalno raspoloživoj djelatnoj snazi potrebno je osvježavati samo u slučaju promjene.

Minimalna trenutno raspoloživa djelatna snaga potrebna je za izračunavanje trenutnog iznosa rezerve primarne regulacije za slučaj porasta frekvencije sustava (primarna regulacija frekvencije s promjenom djelatne snage agregata na niže). Podatak mora biti pripremljen na razini proizvodne jedinice / agregata ili elektrane, a prenosi se u NDCu obliku minimalne trenutno raspoložive djelatne snage u [MW]. Potrebno ga je osvježavati samo u slučaju promjene.

Pod procesnim mjerenjima podrazumijevaju se mjerene veličine proizvodnih jedinica / agregata koje se u stvarnom vremenu trajno prate s odgovarajućom periodom uzorkovanja (intervalom osvježavanja).

Minimalno se u centar trebaju prenositi sljedeća mjerenja:

- stvarna trenutna djelatna električna snaga agregata
- postavna djelatna snaga (referentni signal) u turbinskom regulatoru
- frekvencija napona generatora ili sabirnica na koje je priključen

Postavljaju se sljedeći zahtjevi na mjerne pretvornike djelatne snage:

- klasa točnosti 0,3 ili bolja za mjerenje djelatne snage, priključeni na strujne i naponske mjerne transformatore klase 0,5 ili bolje (po mogućnosti klasa 0,3 ili bolja – klasa obračunskih mjerenja)
- ciklus osvježavanja mjerenja djelatne snage 100 ms (odnosno odgovarajuće vrijeme odziva

mjernog pretvornika ako se koristi uzorkovani analogni signal)

Kao izvori mjerenja mogu se koristiti:

- signali iz turbinskih regulatora
- signali iz namjenskih mjernih pretvornika

Za mjerenje frekvencija mogli bi se načelno koristiti postojeći signali raspoloživi u NDC-u. Nužan uvjet je da signali djelatnih snaga iz proizvodnih objekata budu sinkronizirani sa signalom točnog vremena i da budu uzorkovani s istom frekvencijom jer je za analizu reakcije primarne regulacije na poremećaj s odstupanjem frekvencije nužno osigurati sinkroniziranost signala snage i frekvencije. Alternativno, signal frekvencije može se prenositi iz proizvodnog objekta, uz uvjet da se mjerni pretvornik za frekvenciju odgovarajuće preciznosti (rezolucije), točnosti i vremena odziva odnosno vremena osvježavanja izlaznog signala. Mjerenje frekvencije treba zadovoljiti sljedeće minimalne zahtjeve:

- mjerni opseg najmanje 45-55 Hz
- točnost mjerenja: 10 mHz ili bolje
- ciklus osvježavanja 100 ms (odnosno vrijeme odziva ako se koristi uzorkovani analogni signal)

Pregled podataka za nadzor u realnom vremenu dan je u tablici 2.

Tablica 2. Pregled podataka za monitoring u realnom vremenu

PODAT- AK*	OZNA- KA	JEDINI -CA	OSVJEŽAVAN JE	IZVOR SIGNALA	SIGN- AL	NAPOME- NA
Status agregata – rad na mreži	MR	-	po promjeni	SCADA u NDC-u	binarni	
Status regulatora	TR_UK	-	po promjeni	turb. regulator agregata	binarni	
Regulacijski režim (mod rada regulatora)	TR_MODAL	1 - regulacija $\omega / f$ 2 - regulacija P 3 - ostalo	po promjeni	turb. regulator agregata	cjelobrojni	kategoriju „ostalo“ moguće detaljnije razraditi
Statizam po frekvenciji	s	% na bazi Pn i fn	po promjeni	turb. regulator agregata	realni	podešena vrijednost
Status uključenosti statizma	S_UK	-	po promjeni	turb. regulator agregata	binarni	
Konstanta regulacije (pojačanje)	K	MW/Hz	po promjeni	procesno-inform.sustav	realni	izračunata veličina
Mrtva zona po frekvenciji, pozitivni prag	DZP	Hz	po promjeni	turb. regulator agregata	realni	podešena vrijednost
Mrtva zona po frekvenciji, negativni prag	DZN	Hz	po promjeni	turb. regulator agregata	realni	podešena vrijednost
Status uključenosti mrtve zone	DZ_UK	-	po promjeni	turb. regulator agregata	binarni	
Trenutna maksimalna snaga agregata	PMAXT	MW	po promjeni	turb. regulator agregata ili procesno-inf. sustav	realni	izvedeni podatak (npr. iz status i praga prorade ograničenja)
Trenutna minimalna	PMINT	MW	po promjeni	turb. regulator	realni	izvedeni podatak

\*Svi podaci moraju biti sinkronizirani sa signalom točnog vremena i prenijeti s vremenskom oznakom („markicom“)

## 2. ZAKLJUČAK

Članak je iznio opis problematike monitoringa primarne regulacije frekvencije u elektroenergetskom sustavu. Analizirana je svjetska praksa monitoringa i zaključak je da ne postoji realizirani model monitoringa u realnom vremenu. Obzirom na rastuću složenost elektroenergetskih sustava pojavljuje se potreba za monitoringom primarne regulacije frekvencije kako bi se u najkraćem roku moglo reagirati na moguće problem. U članku je razrađen prijedlog skupa mjerenja i podataka koji moraju biti na raspolaganju sustavu monitoringa. Na osnovu ovdje iznesene analize moguće je pristupiti izradi tehničkog koncepta sustava monitoringa primarne regulacije frekvencije.

## 6. LITERATURA

- [1] „UCTE Operation Handbook, P1 – Policy 1: Load Frequency Control and Performance“ [C] V3.0 rev15 01.04.2009
- [2] „Mrežna pravila elektroenergetskog sustava“, „Narodne novine“, 31. 3. 2006.
- [3] „Test for primary control capability“, Ver. 1.1, swissgrid, April 2011 [https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/experts/ancillary\\_services/prequalification/D110426\\_test-for-primary-control-capability\\_V1R1\\_EN.pdf](https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/experts/ancillary_services/prequalification/D110426_test-for-primary-control-capability_V1R1_EN.pdf)
- [4] „Requirements for monitoring data“ Ver. 2.0, swissgrid, January 2010 [https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/experts/ancillary\\_services/prequalification/D100104\\_requirements-for-monitoring-data\\_V2R0\\_en.pdf](https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/experts/ancillary_services/prequalification/D100104_requirements-for-monitoring-data_V2R0_en.pdf)
- [5] „Primary Frequency Response Reference Document BAL-001-TRE-1“, Texas Reliability Entity, July 2011 (svi dokumenti vezani uz TRE standard BAL-001-TRE-1 dostupni su na stranici: [http://www.texasre.org/standards\\_rules/standardsdev/rsc/sar003/Pages/Default.aspx](http://www.texasre.org/standards_rules/standardsdev/rsc/sar003/Pages/Default.aspx))
- [6] „Référentiel Technique, Chapitre 4, Contribution des utilisateurs aux performances du RPT“, Article 4.7 – Echanges d'information et système de téléconduite, RTE, 15. 7. 2006
- [7] ENTSO-E „Draft Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators“, October 2011
- [8] „UCTE Technical Paper – Definition of a Set of Requirements to Generating Units“, September 2008 ([https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/news/Technical\\_Paper-Requirements\\_to\\_generators.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/news/Technical_Paper-Requirements_to_generators.pdf))
- [9] „UCTE Operation Handbook, A1 – Appendix 1: Load Frequency Control and Performance“ [E] V1.9, 16.06.2004
- [10] „NERC Frequency Response Initiative (FRI) Draft Terminology as of 5-30-10“ <http://www.nerc.com/docs/pc/Attachment%201%20-%20FRI%20Terminology%205-30-10.docx>
- [11] Armke, E. BAL-001-TRE-1 “Excel Primary Frequency Response Evaluation Model Version 1.9, - Manual“ <http://texasre.org/Standards%20Tracking%20Documents/Evaluation%20Model%20Manual%20Final%20Clean%2020100831.pdf>
- [12] „Documentation technique de référence, Chapitre 8 – Trames-type, Article 8.10 – Modèle de contrat de participation aux services système“, RTE 1. 3. 2011. [http://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/reftech/01-03-11\\_article\\_8-10\\_v1.pdf](http://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/reftech/01-03-11_article_8-10_v1.pdf)
- [13] „Guida tecnica – Criteri di telecontrollo e di acquisizione dati“, N° DR-RTX02034. Rev. 00, GRTN, 28-11-2002 <http://www.terna.it/LinkClick.aspx?fileticket=YXGOsVnwEVA%3D&tabid=381&mid=458>

## AUTORI



**Ognjen Kuljača** je diplomirao i magistrirao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu u 1994. i 1998. Godini. Doktorirao je na The University of Texas ar Arlington 2003. Između 2003. i 2010. radio je kao docent na Alcorn State University, Mississippi, SAD, gdje je također bio i zamjenik direktora Laboratorija za senzore i automatiku, Systems Research Institute. Od 2010. je ponovo u Brodarskom institut kao vodeći istraživač. Njegovi istraživački interesi su u području neizrazitog upravljanja, neuronskih mreža i upravljanja energetskim sustavima.



**Krunoslav Horvat** diplomirao je na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatike, Sveučilište u Mariboru, 1996., a magistrirao je i doktorirao na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu 2000. i 2006. Od 1996 radi u Brodarskom institutu iz Zagrebu gdje je trenutno vidjevši istraživač. Dr. Horvat je bio voditelj projekta za više od deset projekata izvođenja sustava turbinske regulacije u Hrvatskoj i svijetu. Dr. Horvat je dobitnik Državne godišnje nagrade za znanost za znanost Republike Hrvatske. Autor je mnogobrojnih radova. Njegovi istraživački interesi su u turbinskoj regulaciji, sustavima upravljanja otpornim na kvar, neuronske mreže i neizraziti sustavi.



**Tomislav Plavšić** rođen je 1971. godine u Zagrebu. Doktorirao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu 2008. godine. Od 2013. godine predaje na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu u naslovnom nastavnom zvanju predavača. Radi u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava, u Sektoru za vođenje elektroenergetskog sustava i tržište, kao pomoćnik direktora sektora. Područja znanstvenog i stručnog interesa su mu vođenje, analiza i optimizacija elektroenergetskog sustava, tržište električne energije, napredne mreže, i drugo. Objavio je više znanstvenih i stručnih radova u domaćim i međunarodnim časopisima, te znanstvenim i stručnim skupovima. Član je stručnih udruženja IEEE i CIGRE, te tajnik HRO CIGRE Studijskog odbora C2. Pogon i vođenje EES-a.



**Milan Stojsavljević** je rođen u Velikoj Popini, Hrvatska. Diplomirani inženjer elektrotehnike, smjer elektroenergetika postao je 1969. godine a

magistar elektrotehnike, smjer elektrostrojarstvo i automatizacija 1980. godine na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. 1969. godine se je zaposlio u Elektrotehničkom institutu "Rade Končar", Zagreb u Zavodu za regulaciju. Sudjelovao je i vodio realizaciju velikog broja projekata na području stabilnosti i regulacije elektroenergetskih sistema i postrojenja. U Elektrotehničkom institutu "Rade Končar", Zagreb bio je direktor Sektora za postrojenja i elektroenergetske sisteme od 1984 do 1991. Od 1991 do kraja 2013. bio je zaposlen u Institutu za elektroprivredu i energetiku d.d., Zagreb na mjestu direktora Odjela za analize elektroenergetskih postrojenja i sistema. Bio je stalni član CIGRE, Pariz i član radne grupe 38.01.09 Zahtjevi i svojstva sustava uzbude. Sada je angažiran od Instituta za elektroprivredu i energetiku, d.d. Zagreb kao savjetnik.



**Darko Nemeč** je rođen 1961. godine u Zagrebu, Hrvatska. Diplomirani inženjer elektrotehnike, smjer elektrostrojarstvo i automatizacija postao je 1983. godine a magistar elektrotehnike, smjer energetika 2000. godine na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Od 1983. do 1991. godine radio je u Elektrotehničkom institutu "Rade Končar", Zagreb na području modeliranja, analiza i ispitivanja elektroenergetskih postrojenja i sistema. Od 1991. godine zaposlen je u Institutu za elektroprivredu i energetiku, d.d., Zagreb Glavno stručno područje su mu dinamički modeli, analiza dinamike elektroenergetskih sistema i regulacija.