

# Nadzor primarne regulacije frekvencije zasnovan na sinkroniziranim mjerenjima fazora

---

Vinković, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:587364>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika**

**NADZOR PRIMARNE REGULACIJE FREKVENCije  
ZASNOVAN NA SINKRONIZIRANIM MJERENJIMA  
FAZORA**

**Diplomski rad**

**Petar Vinković**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 17.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime studenta:	Petar Vinković
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1279, 06.10.2019.
OIB studenta:	85669426095
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Predrag Marić
Sumentor:	Ružica Kljajić
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Član Povjerenstva 1:	Ružica Kljajić
Član Povjerenstva 2:	Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Naslov diplomskog rada:	Nadzor primarne regulacije frekvencije zasnovan na sinkroniziranim mjerenjima fazora
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	U EES u neravnoteža između proizvodnje i potrošnje uzrokuje odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti (50 Hz) koje prvi nastoje kompenzirati primarni regulatori frekvencije. Analiza rada pojedine proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji snage i frekvencije moguća je analizom mjerenja radne snage i frekvencije na proizvodnoj jedinici. Zahvaljujući vremenski sinkroniziranom mjerenju radne snage i frekvencije te visokoj frekvenciji uzorkovanja mjerenja WAM (eng. Wide Area Monitoring) sustav se nameće kao kvalitetno rješenje za analizu rada pojedinih proizvodnih jedinica u primarnoj regulaciji. U radu je potrebno teoretski objasniti načine regulacije radne snage i frekvencije u EES u odnosu na primarnu regulaciju snage i frekvencije.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	17.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 27.09.2021.

Ime i prezime studenta:

Petar Vinković

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1279, 06.10.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Nadzor primarne regulacije frekvencije zasnovan na sinkroniziranim mjerenjima fazora**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Predrag Marić

i sumentora Ružica Kljajić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Predragu Mariću i sumentorici Ružici Kljajić, mag. ing. el., koji su znanstvenim i stručnim savjetima pomogli u pisanju diplomskog rada.*

*Zahvalu upućujem i sumentoru iz HOPS-a Marku Rekiću, mag. ing. el., na neizmjernom strpljenju, razumijevanju, vremenu i nesebičnom dijeljenju znanja koje je pojednostavilo izradu diplomskog rada, ali i na mnoštvu upućenih prijateljskih savjeta.*

*Zahvaljujem se svojoj djevojci koja me uvijek podržavala, motivirala i znala prave riječi. Bez nje moje studiranje ne bi bilo isto.*

*Naposlijetku, posebnu zahvalu iskazujem roditeljima i bratu koji su mi pružili mogućnost studiranja. Neizmjerno im hvala na podršci, brizi i ljubavi koju su mi davali i na koju sam se uvijek mogao osloniti.*

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. UTVRĐIVANJE SUDJELOVANJA PROIZVODNIH JEDINICA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCije .....	3
3. REGULACIJA DJELATNE SNAGE I FREKVENCije.....	5
3.1. Frekvencijski odziv.....	6
3.2. Primarna regulacija.....	7
3.3. Astaticki regulator .....	9
3.4. Sekundarna regulacija.....	9
3.5. Tercijarna regulacija .....	13
3.6. Svrha regulacije frekvencije .....	14
4. PRIMARNA REGULACIJA DJELATNE SNAGE I FREKVENCije.....	16
4.1. Uredba Komisije (EU) 2017/1485 i Mrežna pravila prijenosnog sustava RH .....	17
4.2. Karakteristika proizvodnje .....	21
4.3. Karakteristika potrošnje.....	22
4.4. Zajednička karakteristika sustava .....	24
4.5. Primarna regulacija interkonekcije .....	26
4.6. Regulacija djelatne snage proizvodne jedinice i kruta mreža.....	28
4.7. Načelna shema primarnog regulatora i modeliranje.....	29
5. ANALIZA RADA PRIMARNE REGULACIJE FREKVENCije WAM SUSTAVOM.....	31
5.1. Opis WAM sustava.....	31
5.2. WAM sustav u hrvatskom elektroenergetskom sustavu.....	35
5.3. Nadzor primarne regulacije .....	36
5.4. Pozitivna iskustva povezivanja WAM sustava i primarne regulacije frekvencije .....	37
6. NADZOR PRIMARNE REGULACIJE I ANALIZA SUDJELOVANJA PROIZVODNIH JEDINICA U PRIMARNOJ REGULACIJI .....	42
6.1. Poremećaj 1 .....	42

6.2. Poremećaj 2 .....	51
6.3. Poremećaj 3 .....	52
7. ZAKLJUČAK .....	58
Literatura .....	59
Popis kratica .....	61
Popis oznaka.....	63
Sažetak .....	65
Abstract .....	66
Životopis.....	67

# 1. UVOD

Nikola Tesla se davne 1875. godine uputio na studiranje u Graz iz rodne Like. Gledajući demonstracije omiljenog profesora fizike, uvidio je da je komutator najveći problem istosmjernih motora, a rješenje je potražio u izmjeničnoj struji. Nekoliko godina kasnije, šetajući parkom s prijateljem Szigetijem došao je na ideju o izmjeničnom motoru. U Sjedinjene Američke Države seli 1884., a kasnije uz brojne napore i nadmetanja s Thomas Alva Edisonom „pobjeđuje u bitci“ izmjenične i istosmjerne struje. Uporabom izmjenične struje prijenos električne energije postaje jednostavniji i ona biva dostupna gotovo svima. Povezuju se elektrane i udaljeni potrošači, a elektroenergetski sustav (EES) s vremenom postaje razvijeniji i složeniji. Uz dostupnu električnu energiju i izmjenične motore dolazi do revolucije u vidu ljudskog rada, ali i zdravlja, jer proizvodnja više nije smještena u blizini konzuma. Tesla danas zaslužno nosi nadimak izumitelja električnog doba [1].

Od tada do danas mnogo toga se promijenilo, no suština EES-a je ostala ista, a to je opskrba potrošača električnom energijom. Kao što je i očekivano, došlo je do napretka po mnogo pitanja. Granice susjednih zemalja nisu granice električnoj energiji, barem ne na području europskog kontinenta, jer dvadeset četiri zemlje tvore sinkroni sustav kontinentalne Europe (prijasnji naziv UCTE engl. *Union for the Coordination of the Transmission of Electricity*) gdje pripada i elektroenergetski sustav Republike Hrvatske (EESRH). Interkonekcija je naziv za međusobno povezane EES-e. Interkonekciju karakterizira zajednička frekvencija, no moguće su razlike u frekvenciji pojedinih regulacijskih područja za vrijeme trajanja prijelaznih pojava. U interkonekciji postoje pravila kojih se svi moraju pridržavati kako bi taj sustav zadovoljavajuće radio. Jačanje stabilnosti EES-a, pouzdanost rada, veća krutost na kratkotrajne poremećaje, mogućnost razmjene energije po povoljnijim cijenama samo su neke od prednosti sinkronog povezivanja. Unatoč tome, mane poput prijenosa štetnih inicijalnih kvarova te njihanja energije uzrokovanih velikim kvarovima, mogu dovesti do havarije regulacijskog područja/bloka ili u krajnjem slučaju cijele interkonekcije. Kao što je spomenuto, povezivanjem je omogućena razmjena električne energije. Električna energija je postala standardizirana roba kojom se svakodnevno trguje. Svaka roba karakterizira se prema kvaliteti, a posebnost električne energije je što nije opipljiva i kao takva ima posebne zahtjeve. U domeni potrošača, dobra kvaliteta električne energije odnosi se onu koja ima sinusni napon i struju bez izobličenja te unaprijed zadanu amplitudu i frekvenciju. Kako bi se taj cilj ostvario, proizvodnja, prijenos, distribucija te u krajnjem slučaju potrošnja moraju skladno komunicirati i djelovati [2].

Vođenje pogona EES-a jest složeni spektar radnji s ciljem održavanja željenih parametara te optimiziranja rada sustava, a obavlja se od strane operatora prijenosnog sustava (OPS). Pravilno vođenje sustava nužno je za osiguranje dobre kvalitete električne energije. Za pravilno funkcioniranje EES-a potrebno je osigurati niz pomoćnih usluga, a to su usluge koje podupiru glavnu ulogu EES-a, što je



proizvodnja djelatne snage i opskrba potrošača električnom energijom. Pružaju ih subjekti koji se bave upravljanjem i prijenosom, proizvodnjom te u krajnjem slučaju potrošnjom električne energije (npr. rasterećenje sustava). Pomoćne usluge dijele se na mandatorne i komercijalne. U skupinu mandatornih pomoćnih usluga pripada primarna regulacija. Svi su veliki generatori primorani, u skladu s važećim mrežnim pravilima, osigurati tu vrstu pomoćnih usluga u određenoj mjeri i bez naknade. Regulacija frekvencije jedna je od pomoćnih usluga koje osigurava OPS. U skupinu pomoćnih usluga regulacije frekvencije spadaju (a) primarna, (b) sekundarna i (c) tercijarna regulacija frekvencije. Uz nabrojane regulacijske zahvate, važno je promatrati i inercijski odziv sustava koji se pojavljuje odmah nakon poremećaja [3, 4].

U ovome radu reći će se nešto više o primarnoj regulaciji, njenim karakteristikama te predloženoj metodi za nadzor primarne regulacije. Naime, u drugom poglavlju predstavljen je uvid u trenutnu praksu utvrđivanja sudjelovanja proizvodnih jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije.

U trećem su poglavlju objašnjene vrste regulacijskih zahvata uspostave frekvencije i održavanja ugovorene snage razmjene te je predstavljena svrha očuvanja frekvencije unutar propisanih raspona.

Nadalje, u četvrtom je poglavlju detaljno objašnjen pojam primarne regulacije s osvrtom na Mrežna pravila Hrvatskog operatora prijenosnog sustava te Uredbu Komisije Europske unije. Opisana je statička karakteristika sustava s pripadnom statičnošću te su prikazani zahtjevi primarne regulacijske pričuve EESRH u interkonekciji. Naposljetku, objašnjen je utjecaj promjene djelatne snage agregata uslijed regulacije frekvencije na napon i jalovu snagu te je dan pojednostavljeni model primarne regulacije.

Potom, u petom poglavlju, je predstavljen WAM (engl. *Wide Area Monitoring*) sustav, odnosno sustav nadzora i obrade podataka. Prikazane su mogućnosti i prednosti WAM sustava u odnosu na tradicionalni sustav nadzora. Jedna od mogućnosti je analiza sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji. Zatim je objašnjen način integracije WAM platforme u SCADA sustav te kako to dispečeru olakšava nadzor sustava. Naposljetku, predstavljena su pozitivna iskustva uporabe WAM sustava u vidu stabilnosti koje je omogućeno dijeljenjem RoCoF (engl. *Rate of Change of Frequency*) podataka između regulacijskih područja kako bi se poboljšala reakcija povezanih sustava na nastale poremećaje.

U posljednjem, šestom poglavlju u suradnji s Hrvatskim operatorom prijenosnog sustava (HOPS), na temelju zapisa iz WAM sustava, ocjenjivalo se sudjeluje li pojedina proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji. Promatrali su se zapisi četiri proizvodne jedinice uslijed tri poremećaja u sustavu. Pomoću grafičkih prikaza djelatne snage i frekvencije računala se statičnost agregata te je promatrana mrtva zona ukoliko je ugođena.

## **2. UTVRĐIVANJE SUDJELOVANJA PROIZVODNIH JEDINICA U PRIMARNOJ REGULACIJI FREKVENCije**

Prema važećim mrežnim pravilima, svaka hidro proizvodna jedinica snage veće ili jednake od 10 MW, odnosno termo proizvodna jedinica snage veće ili jednake od 30 MW, mora sudjelovati u primarnoj regulaciji frekvencije [5]. Zadatak OPS-a je utvrditi sudjeluje li proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije. Prema [6], predstavljena su važeća pravila koja propisuje svaka sinkrona zona na području Europe pojedinačno, a više je objašnjeno u potpoglavlju 4.1. EESRH dio je sinkrone zone kontinentalne Europe i kao takav mora osigurati određen iznos snage primarne regulacijske pričuve koji se izračunava na godišnjoj razini. Korištenje tradicionalnih sustava nadzora SCADA/EMS pri utvrđivanju sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji ne daje zadovoljavajuće rezultate. Razlog tomu su vremenska nesinkroniziranost mjerenja te postojanje mrtvih zona tijekom mjerenja. Primjerice, trajanje prijelazne pojave može biti kraće od vremena osvježavanja pa prorada primarne regulacije neće biti zabilježena [7]. Prema [8], metode utvrđivanja sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije mogu biti podijeljene na on-line i off-line metode. On-line metoda je metoda utvrđivanja sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije u stvarnom vremenu. Off-line metoda može biti podijeljena na analiziranje pohranjenih zapisa značajnijih događaja te na ispitivanje pomoću simuliranih signala. On-line metoda je prikladnija jer su rezultati iskazani u stvarnom vremenu te dispečeru daju sve potrebne informacije. Kao prikladno rješenje za analizu sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji pokazao se WAM sustav.

WAM sustav nadzora omogućuje uvid u stanje sustava nad velikim područjem u realnom vremenu. Sam sustav nadzora mogao bi se smatrati zastarjelim jer je prisutan od devedesetih godina prošlog stoljeća, no tek u prošlim petnaestak godina dobiva pravi značaj. Tehnologija je zasnovana na uporabi sinkrofazorskih mjernih uređaja, napredne telekomunikacije infrastrukture te računala za prikupljanje sinkrofazorskih podataka. Upravo zbog napretka tehnologije u vidu računalne opreme i telekomunikacijskih sustava, WAM sustav nadzora je postao moguć i dostupan. HOPS radi na instalacije većeg broja sinkrofazorskih mjernih uređaja, a do sada je oko desetak proizvodnih jedinica obuhvaćeno te se na njima analizira status rada proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije. Valja spomenuti da je prijenosna mreža EESRH komunikacijski vrlo dobro povezana optičkom vezom, a brzi komunikacijski sustav je osnova za širokopojasni sustav nadzora WAM. Uz analiziranje statusa rada proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije, WAM sustav se koristi pri nadzoru nesimetrije te za detekciju prekida vodiča. Nadalje, planira se dodatno uključivanje sinkrofazorskih mjernih uređaja na prekogranične vodove omogućujući tako bolji uvid u snagu razmjene te gubitke prijenosa [9].

U ovom radu predstavljeno je utvrđivanje sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije pomoću off-line metode. Analizirali su se pohranjeni zapisi pri značajnijem odstupanju frekvencije. Status rada proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji utvrđivao se grafičkom analizom ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice o vremenu, frekvencije o vremenu te izlazne djelatne snage proizvodne jedinice o frekvenciji. To je suvremena metoda koja pomoću jednostavne grafičke analize promatra sudjeluje li proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije. Osim toga, pomoću ove metode moguć je izračun statizma te je moguće ustanoviti postoji li mrtva zona. Kako bi se dispečerima olakšao rad i praćenje, u postojeći SCADA sustav integriran je WAM sustav poboljšavajući tako nadzor i vođenje EES-a.

Povećanjem integracije obnovljivih izvora energije smanjuje se tromost sustava, a tako dolazi do većih i bržih propada frekvencije. Moguće poboljšanje predloženo je u [10, 11], gdje je širokopolasni nadzor (WAM sustav) dobio dodatno značenje. U svrhu poboljšanja reakcije sustava predstavljen je širokopolasni sustav za dijeljenje RoCoF signala (WARS). WARS se temelji na dijeljenju RoCoF signala iz područja strmijih nagiba do drugih područja s ciljem ubrzanja reakcije udaljenih regulatora, što u cjelini doprinosi frekvencijskom odzivu.

Kako bi se dobila šira slika prethodno predstavljenog, u 3. poglavlju bit će predstavljena regulacija djelatne snage i frekvencije te njena važnost za sustav. Nadalje, u ovom radu bit će predstavljena i složenija tematika te naposljetku bit će odrađena analiza stvarnih reakcija primarnih regulacijskih turbina proizvodnih jedinica u EESRH.

### 3. REGULACIJA DJELATNE SNAGE I FREKVENCIJE

Sigurnost, kvaliteta i pouzdanost opskrbe električnom energijom temelj su društvenog i gospodarskog razvitka. EES je složena dinamička cjelina gdje odlučujuću ulogu u pogonu imaju potrošači. Frekvencija ( $f$ ) je najstroži kriterij kvalitete električne energije i reprezentativna je vrijednost brzine vrtnje sinkroniziranih proizvodnih jedinica. Stvarna vrijednost frekvencije je posljedica dinamičkog usuglašavanja proizvodnje i potrošnje iz svih istovremenih događaja odnosno djelovanja korisnika sustava, inercijskog odziva, statičke karakteristike, aktivacije operativnih rezervi, itd. Poznato je da je znatno veća ovisnost frekvencije o djelatnoj snazi ( $P$ ), nego o jalovoj ( $Q$ ). Regulacija frekvencije podrazumijeva kontroliranje frekvencije sustava s ciljem uspostave ravnoteže između proizvodnje i potrošnje djelatne snage u realnom vremenu. Dakle, kada se govori o regulaciji frekvencije, podrazumijeva se  $P$ - $f$  regulacija. Uz regulaciju frekvencije, važna je i regulacija napona koja je, za razliku od prethodne, lokaliziranog tipa i vezana je uz proizvodnju i potrošnju jalove snage. Stabilnost napona podrazumijeva sposobnost EES-a da održi iznose sabirničkih napona unutar predviđenih granica. Održavanje frekvencije i napona usluge su koje pruža EES kako bi se održala frekvencija u strogo utvrđenim granicama, točnije, kako bi se održao prihvatljiv naponski profil u prijenosnoj mreži. Uz spomenutu frekvencijsku i naponsku stabilnost, stabilnost EES-a obuhvaća i stabilnost kuta rotora.

Zbog razlike između proizvodnje i potrošnje djelatne energije dolazi do promjene frekvencije u sustavu. Zadatak elektrana jest proizvodnja upravo te električne energije koja je u tom trenutku potrebna, uvećano za neizbježne gubitke prijenosa. U slučaju da je razlika proizvodnje i potrošnje veća odnosno manja od nule, frekvencija sustava će biti veća, odnosno manja od nazivne. Kako bi se lakše uspostavilo ravnotežno stanje i nazivna frekvencija, na raspolaganju stoji regulacija frekvencije koja se obavlja pomoću regulacijske pričuve. Pričuva se definira kao neiskorišteni, raspoloživi kapacitet djelatne snage. Prema [12], regulacija frekvencije može biti podijeljena u tri stupnja:

- (a) primarna regulacija ili noviji naziv FCR (engl. *Frequency Containment Reserve*),
- (b) sekundarna regulacija frekvencije i snage razmjene ili noviji naziv aFRR (engl. *Automatic Frequency Restoration Reserve*),
- (c) tercijarna regulacija frekvencije i snage razmjene ili noviji naziv mFRR (engl. *Manual Frequency Restoration Reserve*).

OPS je zadužen za koordinaciju djelovanja primarne, sekundarne i tercijarne regulacije s ciljem ostvarivanja sigurnog i pouzdanog pogona EES-a. Prije odgovora primarne regulacije, koja je automatska i vrlo brza, djeluje inercija. Vrlo je nezahvalno, ali slikovito za reći da sinkroni generatori „osjete“ deficit snage te trenutno i prirodno, reagiraju tako da se kinetička energija rotacijskih masa pretvara u električnu

energiju nastojeći uspostaviti ravnotežu proizvodnje i potrošnje električne snage, odnosno održati frekvenciju nepromijenjenom. Opisano se naziva inercijski ili frekvencijski odziv.

### 3.1. Frekvencijski odziv

EES sastoji se od mnoštva rotacijskih strojeva (generatora/motora) s pripadnim kinetičkim energijama. Sustav s velikom kinetičkom energijom manje je sklon brzim promjenama frekvencije zbog nastalog poremećaja. Kinetička energija stroja  $\varepsilon_{kin}$  može biti određena:

$$\varepsilon_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J \omega^2 \quad (3-1)$$

gdje je  $J$  – moment inercije stroja,  $\omega$  – kutna brzina stroja.

Inercijska konstanta ( $H$ ) odnosno konstanta tromosti mnogo se češće upotrebljava kao mjerodavna vrijednost za inercijski odziv, točnije, za analizu stabilnosti. Dobiva se kao omjer kinetičke energije pri nazivnoj kutnoj brzini vrtnje ( $\omega_n$ ) i nazivne prividne snage stroja ( $S_n$ ):

$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_n^2}{S_n} \quad (3-2)$$

Ukupna inercijska konstanta sustava predstavlja omjer ukupne kinetičke energije sustava i ukupne instalirane prividne snage sustava:

$$H_{uk} = \frac{\varepsilon_{uk}}{S_{uk}} = \frac{\sum_i H_i S_i}{S_{uk}} \quad (3-3)$$

Jednadžbe (3-4) i (3-5) predstavljaju jednadžbu njihanja prema kojoj promjena brzine vrtnje stroja, odnosno promjena frekvencije ovisi o veličini rotora, tj. pohranjenoj kinetičkoj energiji te o razlici mehaničke snage turbine i zahtijevane električne snage. Sinkroni generatori usporavaju pretvarajući pohranjenu kinetičku energiju te tako dolazi do pada frekvencije u sustavu. Također, sve vrijedi i u suprotnom smjeru, točnije, kada bi postojao višak energije u sustavu, generatori bi konstantno ubrzavali. Dakle, sinkroni generatori protive se promjeni stanja nauštrb promjene pohranjene kinetičke energije, odnosno nauštrb promjene brzine vrtnje tj. frekvencije. Kako bi se spriječile takve neželjene pojave, na raspolaganju stoji primarna regulacija koja je zadužena za uspostavu ravnoteže između snaga proizvodnje i potrošnje.

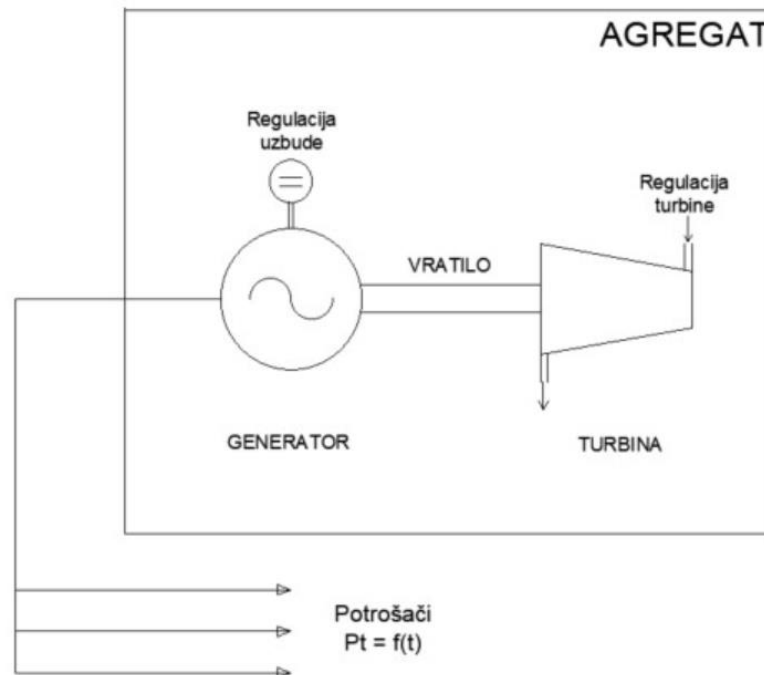
$$J \cdot \omega_n \frac{d^2 \omega}{dt^2} = P_p - P_t \quad (3-4)$$

$$\frac{d^2 \omega}{dt^2} = \frac{1}{J \omega_n} (P_p - P_t) \quad (3-5)$$

Gdje je  $P_p$  - mehanička snaga turbine, odnosno snaga proizvodnje,  $P_t$  - električna snaga, odnosno snaga opterećenja.

## 3.2. Primarna regulacija

Generator je stroj koji pretvara mehaničku snagu dobivenu preko osovinske spojnice od njegove pogonske turbine (vodna, parna, plinska...) u električnu snagu. Trenutačnu izlaznu djelatnu snagu moguće je regulirati samo protokom radnog medija, odnosno pogonskog sredstva kroz turbinu. Nasuprot tome, napon na stezaljkama generatora ovisi o uzbudi rotora. Promjenom uzbude generatora regulira se proizvedena jalova snaga. Generator može biti poduzbuđen ili naduzbuđen, ovisno o tome je li jalovu snagu potrebno „trošiti“ ili injektirati u sustav. Manjak jalove snage rezultira smanjenjem napona. U daljnjem radu promatrat će se samo regulacija frekvencije s fokusom na primarnu regulaciju. Na slici 3.1. prikazan je najjednostavniji slučaj gdje agregat napaja potrošače s vremenski promjenjivom snagom opterećenja. Prikazan je slučaj karakterističan za rad na vlastitu mrežu, tj. samostalan rad agregata koji napaja više potrošača. Do toga dolazi rijetko ili zbog posebnih razloga, no prezentiran je zbog jednostavnosti promatranja regulacije djelatne snage.

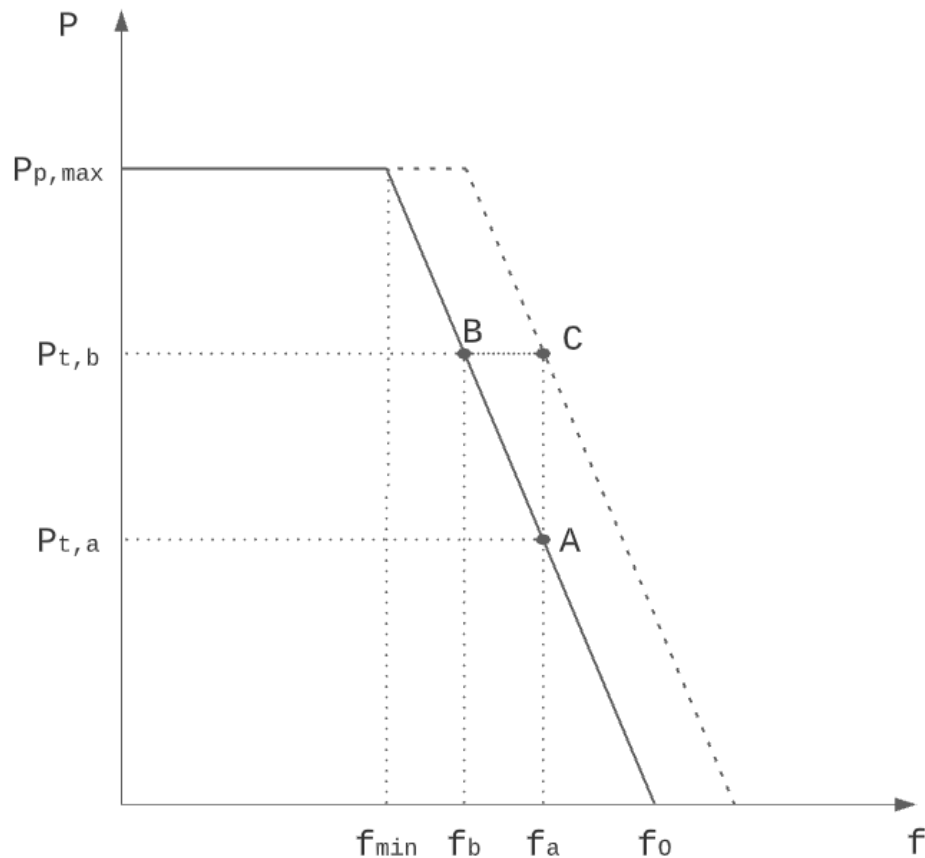


Slika 3. 1. Agregat na vlastitu mrežu.

Snaga opterećenja vremenski je promjenjiva i jasno je da se upravo tom zahtjevu u svakom trenutku treba prilagoditi turbina. Posljedično, agregat u svakom trenutku mora proizvesti toliku djelatnu snagu koliko potrošačko područje ukupno zahtijeva, uključujući i neizbježne gubitke prijenosa. Zato je važna stalna regulacija mehaničke snage koju daje turbina.

Primarna regulacija automatski je zahvat otvaranja i zatvaranja ventila koji obavljaju primarni regulatori turbina, tj. agregata, s ciljem uspostave ravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage.

Karakteristika primarnog regulatora turbine prikazana je punom crtom na slici 3.2. i naziva se statička karakteristika [3].



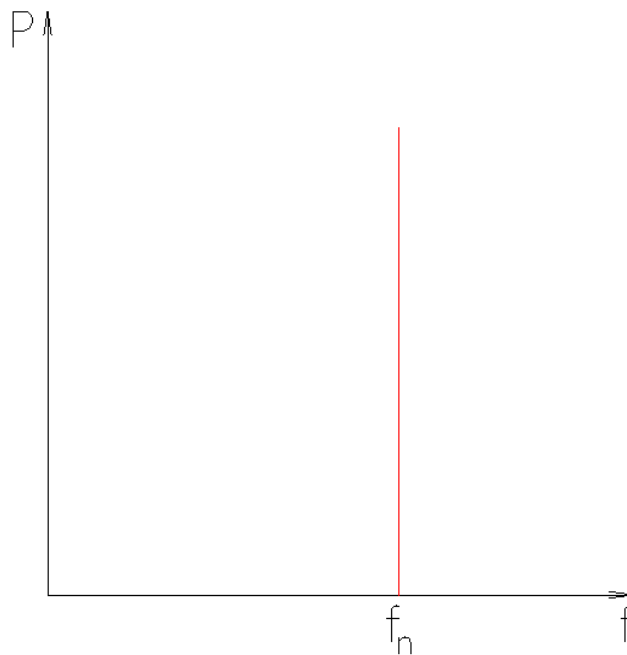
**Slika 3.2.** Karakteristika primarnog regulatora turbine.

Statička karakteristika najčešće se aproksimira pravcem. Generator se najbrže vrti u neopterećenom stanju, a frekvencija je tada jednaka frekvenciji praznog hoda  $f_0$ . Povećanjem zahtjeva za energijom potrošačkog područja, generator postaje opterećeniji, vrti se sporije, a frekvencija opada proporcionalno brzini. Kao što je vidljivo na slici 3.2., prilikom opterećenja  $P_{t,a}$ , do uspostave ravnoteže proizvodnje i potrošnje dolazi pri frekvenciji  $f_a$ , a pri opterećenju  $P_{t,b}$  do ravnoteže dolazi pri frekvenciji  $f_b$ . Frekvencija  $f_{min}$  pripada maksimalno proizvedenoj snazi koju generator može dati ( $P_{p,max}$ ). Opseg promjene frekvencije zbog promjene opterećenja najčešće se izražava u postotnoj vrijednosti i naziva se srednjom statičnošću regulatora, a navedeno je prikazano jednadžbom (3-6). U praksi je iznos tog opsega 4 - 6 %, drugim riječima, frekvencija praznog hoda  $f_0$  je 4 - 6 % veća od frekvencije koja pripada maksimalnoj snazi  $f_{min}$ . Prema tom postotku i nazivnoj frekvenciji od 50 Hz, raspon promjene frekvencije uslijed promjene opterećenja može biti 2 - 3 Hz. Moguće je i napraviti regulator sa strmijom karakteristikom, no smanjiti srednju statičnost ispod 2 - 3 % je rizično jer regulacija postaje sklona oscilacijama [3].

$$x = \frac{f_0 - f_{min}}{50} \cdot 100\% \quad (3-6)$$

### 3.3. Astaticki regulator

Astaticki regulator jest regulator zadužen za održavanje nazivne odnosno zadane frekvencije  $f_n$ . Moguća je prisutnost samo jednog astatickog regulatora u sustavu. U slučaju dva ili više astaticka regulatora, može doći do nepotrebnog njihanja uslijed interferencije rada dvaju ili više agregata jer astaticki regulator ima određenu grešku. Njihanja snage mogu imati razne negativne posljedice, a u krajnjem slučaju mogu dovesti do nestabilnosti sustava. Karakteristika astatickog regulatora prikazana je crvenom bojom na slici 3.3. i naziva se izohornom karakteristikom [13].



**Slika 3.3.** *Statička karakteristika astatickog regulatora.*

### 3.4. Sekundarna regulacija

Na odstupanje frekvencije prvi odgovaraju turbinski regulatori frekvencije, koji promjenom dotoka medija utječu na iznos proizvedene djelatne snage. Taj se regulacijski postupak naziva primarna regulacija frekvencije. Sljedeći korak uspostave ravnotežnog stanja je djelovanje sekundarne regulacije u koju su uključene regulacijske elektrane.

Elektrane se prema ulozi u elektroenergetskom sustavu razlikuju na one koje su u pogonu prema voznom redu i one koje služe za regulaciju frekvencije. Vozni red predstavlja opterećenje agregata (elektrana) od sata do sata koji se određuje za sljedeći dan. Time se pokušava zadovoljiti predviđena



potražnja električne energije uz minimalne troškove, no potražnja se mijenja iz minute u minutu i na raspolaganju trebaju biti elektrane za regulaciju radne snage i frekvencije.

Sekundarnu regulaciju najjednostavnije je objasniti na temelju pogona na vlastitu mrežu prikazanog slikom 3.1. Prema slici 3.2. sekundarnom se regulacijom karakteristika primarnog regulatora translatare lijevo – desno duž apscise paralelno sa samom karakteristikom. Bit je u tome da se pri promjeni opterećenja djeluje na postavke primarnog regulatora te da se uspostavi frekvencija što bliža iznosu nazivne frekvencije. Pomoću sekundarne regulacije korigiraju se odstupanja frekvencije od nominalne vrijednosti, ali se ne izjednačavaju trenutne oscilacije. Prema slici 3.2., nakon porasta opterećenja s  $P_{t,a}$  na  $P_{t,b}$  uspostavlja se frekvencija  $f_b$  koja je manja u odnosu na  $f_a$ . Ako se frekvencija  $f_a$  smatra nazivnom frekvencijom, intervencijom sekundarne regulacije statička karakteristika se translatare u desno (Slika 3.2., pravac prikazan crticama) te se tako uspostavlja željena frekvencija nakon povećanja opterećenja. Valja naglasiti da opisano vrijedi za pogon agregata na vlastitu mrežu.

Regulacijske elektrane su elektrane predviđene za automatsku sekundarnu regulaciju čija je zadaća održavanje ugovorene snage razmjene i frekvencije. Svaki OPS ima unaprijed poznat vozni red snage razmjene. tj. uvoza/izvoza električne energije. Opterećenje EES-a mijenja se tijekom sata, unatoč tome potrebno je održavati ugovorenu snagu razmjene. Za tu svrhu na raspolaganju stoje regulacijske elektrane kojima je moguće povećati ili smanjiti ukupnu proizvodnju unutar OPS-a za iznos regulacijske pričuve.

Nužno je predvidjeti iznos sekundarne regulacijske pričuve. Potrebna snaga regulacije ovisi o preciznosti predviđanja potražnje, kvaliteti napravljenog voznog reda i disciplini elektrana da se pridržavaju predviđenog voznog reda. Dakle, potrebna snaga za regulaciju frekvencije ovisi o kvaliteti upravljanja EES-om pa je nije moguće egzaktno odrediti. No, standardna devijacija slučajnih oscilacija snage potrebne za regulaciju frekvencije može biti prikazana kao:

$$SGP = \sqrt{M \cdot P_{max}} \quad (3-7)$$

gdje  $M$  predstavlja konstantu ovisnu o kvaliteti upravljanja sustavom te o karakteristikama potrošača, a  $P_{max}$  maksimalno opterećenje sustava [14].

Uz pretpostavku Gaussove razdiobe oscilacija snage i uz težnju za gotovo potpunom sigurnosti, snaga za regulaciju treba obuhvatiti sve slučajeve u intervalu  $\pm 4 \cdot SGP$ . To znači da za potrebe regulacije frekvencije ( $PRF$ ) treba osigurati iznos snage prema jednadžbi (3-8), dok je prema primjerima iz prakse potvrđeno da je za osiguranje dobre regulacije frekvencije potrebna snaga prema jednadžbi (3-9). Dakle, iz jednadžbe (3-9) se može zaključiti o iznosu konstante ovisne o kvaliteti upravljanja  $M \cong 0,098$  [14].

$$PRF = 8 \cdot \sqrt{M \cdot P_{max}} \quad (3-8)$$

$$PRF \cong 2,5 \cdot \sqrt{P_{max}} \quad (3-9)$$

Uz pretpostavku održavanja voznog reda i onda kada nema većih oscilacija u sustavu, maksimalno mogući višak snage jednak je  $PRF/2$ , odnosno maksimalno mogući manjak iznosi  $-PRF/2$ . Iz navedenog moguće je zaključiti iznos maksimalne promjene frekvencije  $\Delta f$ , naravno, uz zanemarenje mogućih kvarova u sustavu:

$$\Delta f = \pm \frac{PRF}{2 \cdot k_s} \quad (3-10)$$

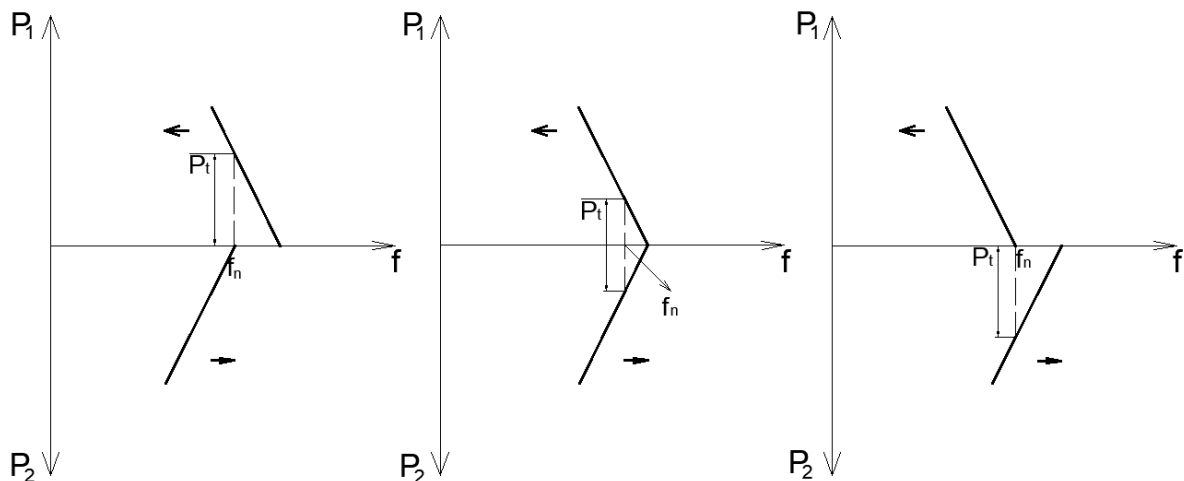
gdje je  $k_s$  regulacijska energija sustava.

U novijoj literaturi, prema [15], pronalazi se jednadžba za izračun potrebne snage sekundarne regulacijske pričuve (*SRP*):

$$SRP = \sqrt{aP_{max} + b^2} - b \quad (3-11)$$

gdje su  $a$  i  $b$  konstante ovisne o promatranom regulacijskom području. Za regulacijsko područje Republike Hrvatske vrijedi:  $a = 10$  i  $b = 150$ . U praksi se izračunata vrijednost pričuve sekundarne regulacije uvećava dva i pol puta zbog uračunavanja neraspodivnosti agregata za pružanje sekundarne regulacije.

Sekundarnom se regulacijom djelatne snage i frekvencije putem regulatora djeluje na postavke primarnog regulatora na način da se podiže ili spušta referentna vrijednost snage s ciljem uspostave nazivne frekvencije. Posljedično, tako se uspostavlja nova vrijednost frekvencije praznog hoda  $f_0$ , što se može iskoristiti za zamjenu jednog agregata drugim pri otočnom radu ili za priključenje agregata sustavu. Kod zamjene agregata s drugim agregatom koji ulazi u pogon, zamjenski agregat mora preuzeti opterećenje uz zahtjev za konstantnom frekvencijom. Na slici 3.4. prikazana su tri karakteristična koraka preuzimanja opterećenja. Lijevom je skicom predstavljen slučaj gdje agregat 1 opskrbljuje ukupno opterećenje uz nazivnu frekvenciju. Preuzimanje opterećenja agregata 2 prikazano je drugim korakom gdje se odvija istovremena sekundarna regulacija obaju agregata u suprotnim smjerovima. Stanje nakon savršenog regulacijskog procesa prikazuje skica s desne strane gdje je agregat 2 preuzeo ukupno opterećenje, a stroj 1 je u praznom hodu i može se isključiti te razbuditi.



Slika 3.4. Zamjena jednog agregata drugim u pogonu.

Uz zadaću uspostave frekvencije EES-a što bliže nazivnoj vrijednost, funkcije sekundarne regulacije različite su ovisno o tome je li sustav izoliran ili je dio interkonekcije. Prema [5], funkcije sekundarne regulacije u interkonekciji su:

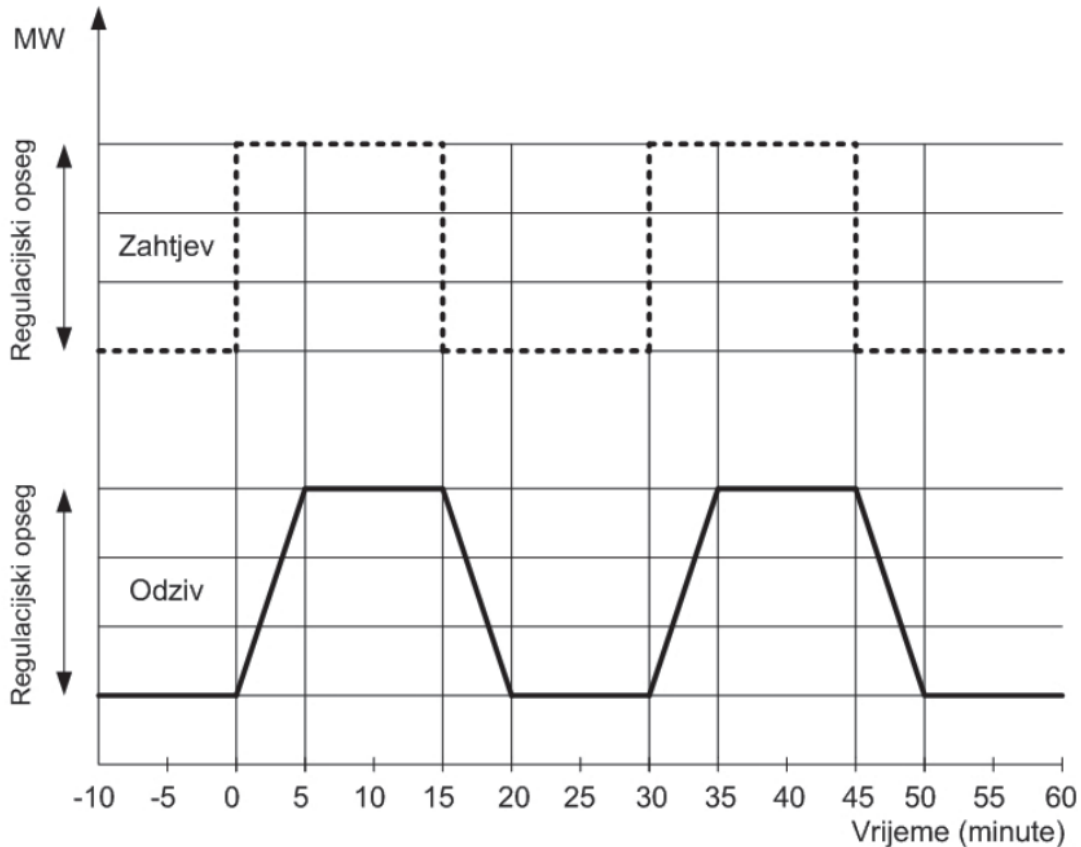
- (a) ostvarivanje plana razmjene snage između vlastitog i susjednih EES-a,
- (b) da cijela interkonekcija primarnom regulacijom pomaže u slučaju poremećaja u nekom od regulacijskih području interkonekcije, a zadaća je pogođenog područja da sekundarnom regulacijom, nakon poremećaja, oslobodi rezervu primarne regulacije cijeloj interkonekciji koja je primarnom regulacijom pomogla pogođenom regulacijskom području,
- (c) korekcija sinkronog vremena.

Slično tome, kada se radi o izoliranom sustavu zadaća sekundarne regulacije je:

- (a) oslobađanje primarne regulacijske rezerve regulacijskog područja,
- (b) korekcija sinkronog vremena [5].

Prema dogovoru, snaga razmjene regulacijskog područja je pozitivnog predznaka kada područje izvozi snagu razmjena, a negativnog kada uvozi. Odstupanjem od planirane razmjene narušavaju se tržišna načela trgovine električnom energijom regulacijskih područja. Sekundarna regulacija zadužena je za uspostavu prethodno ugovorene snage razmjene. Također, sekundarna regulacija je zadužena za korekciju sinkronog vremena. Nazivna vrijednost frekvencije sekundarnom se regulacijom ugađa na 50,01 Hz ili 49,99 Hz, ovisno o tome kasni li ili rani mrežni sat. Korigiranje sinkronog vremena mora biti postepeno.

Princip rada sekundarne regulacije je sljedeći. Algoritam sekundarne regulacije računa potrebnu promjenu vlastite proizvodnje s ciljem održavanja frekvencije na zadanoj vrijednosti te održavanja snage razmjene unutar prethodno dogovorenih vrijednosti. Regulacijska elektrana mora imati mogućnost promjene snage do 100% ugovorenog opsega unutar 5 minuta (Slika 3.5.). U slučaju pogona više regulacijskih elektrana, potrebno je prethodno izračunatu vrijednost djelatne snage prikladno podijeliti među njima.



**Slika 3.5.** Odziv sekundarne regulacijske pričuve [5].

### 3.5. Tercijarna regulacija

Primarna regulacija nastoji automatski uspostaviti ravnotežu djelatne snage proizvodnje i potrošnje. Sekundarnom se regulacijom mijenjaju postavke primarnih regulatora regulacijskih elektrana nastojeći uspostaviti nazivnu frekvenciju te se intervenira ukoliko snaga razmjena odstupa od ugovorenu vrijednosti snage razmjene. Tercijarna regulacija uključuje svako automatsko ili ručno korigiranje planiranog rada proizvodnih jedinica. Zadaća tercijarne regulacije jest oslobađanje sekundarne regulacijske pričuve i osiguravanje optimalne raspodjele sekundarne regulacijske snage između regulacijskih elektrana. To se ostvaruje promjenom koeficijenta razdiobe u sekundarnom regulatoru. Prema [15], pojam tercijarna regulacija obuhvaća:

- (a) uključenje elektrana s brzim odzivom,
- (b) upravljanje potrošnjom,
- (c) promjenu plana razmjene,
- (d) preraspodjelu snaga regulacijskih elektrana.

Tercijarna regulacijska pričuva može biti podijeljena na brzu i sporu. Brza se još naziva i minutna pričuva, a angažira se s ciljem osiguranja tražene sekundarne regulacijske pričuve. Spora je zadužena za optimizaciju proizvodnje te optimizaciju tokova snaga [15].

Ručno uključenje tercijarne regulacije podrazumijeva aktivaciju za to predviđenih elektrana na zahtjev OPS-a. Od zahtjeva OPS-a do punog ugovorenog opsega tercijarne regulacije smije proći najviše 15 minuta. Kod obračuna energije uravnoteženja, priznaje se energija uravnoteženja koja je aktivirana unutar intervala od zahtjeva do krajnjeg roka od 15 minuta. OPS definira [5], u skladu s potrebama, produkte tercijarne regulacije prema sljedećim karakteristikama:

- (a) opseg rezerve snage,
- (b) broj aktivacija u određenom vremenskom razdoblju,
- (c) minimalni iznos aktivacije,
- (d) minimalno/maksimalno trajanje aktivacije,
- (e) najmanji razmak između dvije aktivacije.

### **3.6. Svrha regulacije frekvencije**

Konstantnost frekvencije važna je za sve, krenuvši od najmanjih potrošačkih jedinica kojima je rad predviđen u određenom frekvencijskom rasponu pa sve do elemenata mreže EES-a i proizvođača s postavljenim nadfrekvencijskim i podfrekvencijskim zaštitama. Svrha regulacije frekvencije može se promatrati sa stajališta potrošača, proizvođača, mreže te tržišta.

Sa stajališta potrošača, kvaliteta električne energije usko je povezana s volatilnosti frekvencije. Kvaliteta električne energije treba odgovarati primjeni. Trošila, od žarulje u sobi pa sve do velikih industrijskih postrojenja, zahtijevaju očuvanje frekvencije u rasponu promjena koje neće naštetiti pouzdanosti uređaja ili kvaliteti njegovog rada. Osim toga, potrošači nemaju nikakvu kontrolu nad rizikom isključenja uslijed podfrekvencijskog rasterećenja.

Sa stajališta proizvođača, oprema za proizvodnju električne energije poput energetskih pretvarača zahtijeva očuvanje iznosa frekvencije unutar određenog raspona koji nema štetne posljedice za opremu. Štetne se posljedice očituju u pouzdanosti, kvaliteti ili životnom vijeku opreme. Gubitak dijela proizvodnje može uzrokovati daljnje poremećaje te u krajnjem slučaju raspad EES-a. Osim navedenog, konstantnost frekvencije važna je za izradu voznog reda tj. za raspodjelu opterećenja agregata.

Sa stajališta mreže, problemi se očituju posebno kod slabih vodova gdje može doći do preopterećenja, nestabilnosti ili poteškoća regulacije napona uslijed neusklađenih djelovanja korekcije frekvencije. Također, pogon pri niskoj frekvenciji može biti problematičan zbog visokih vrijednosti magnetskih tokova transformatora.

Sa stajališta tržišta, postoji rizik vezan uz međudjelovanje promjena frekvencije i djelovanja tržišta. Promjena frekvencije utječe na promjenu proizvodnje i potrošnje djelatne snage, a tako i na tržišne prilike, što za posljedicu može imati odstupanja od ugovorenih vrijednosti snaga razmjene.

## 4. PRIMARNA REGULACIJA DJELATNE SNAGE I FREKVENCIJE

Frekvencijska stabilnost, kao što je ranije opisano, ovisi o tromosti sustava, veličini i vrsti poremećaja te pričuvi snage. Po nastalom poremećaju dolazi do promjene ravnoteže proizvodnje i potrošnje, a tako i do promjene frekvencije koja je obrnuto proporcionalna tromosti sustava. Za ponovnu uspostavu ravnoteže proizvodnje i potrošnje zadužena je primarna regulacija frekvencije.

Za jasnije shvaćanje te regulacije polazi se od osnovne konstatacije da su snaga proizvodnje  $P_p$  i snaga opterećenja  $P_t$  u danom trenutku jednaki. Za ovakav referenti slučaj, frekvencija je jednaka nazivnoj, odnosno promjena frekvencije u vremenu jednaka je nuli:

$$\Delta P = P_p - P_t = 0 \quad (4-1)$$

$$\frac{df}{dt} = RoCoF = \frac{1}{2} f_n \frac{P_p - P_t}{S \cdot H} = 0 \quad (4-2)$$

Ako se u drugom trenutku opterećenje smanji, pojavit će se višak proizvedene snage koji rezultira ubrzanjem rotora, a time i povećanjem frekvencije.

$$\Delta P = P_p - P_t > 0 \quad (4-3)$$

$$\frac{df}{dt} > 0 \quad (4-4)$$

U slučaju suprotne promjene, opterećenje se povećava, a broj okretaja generatora i frekvencija padaju.

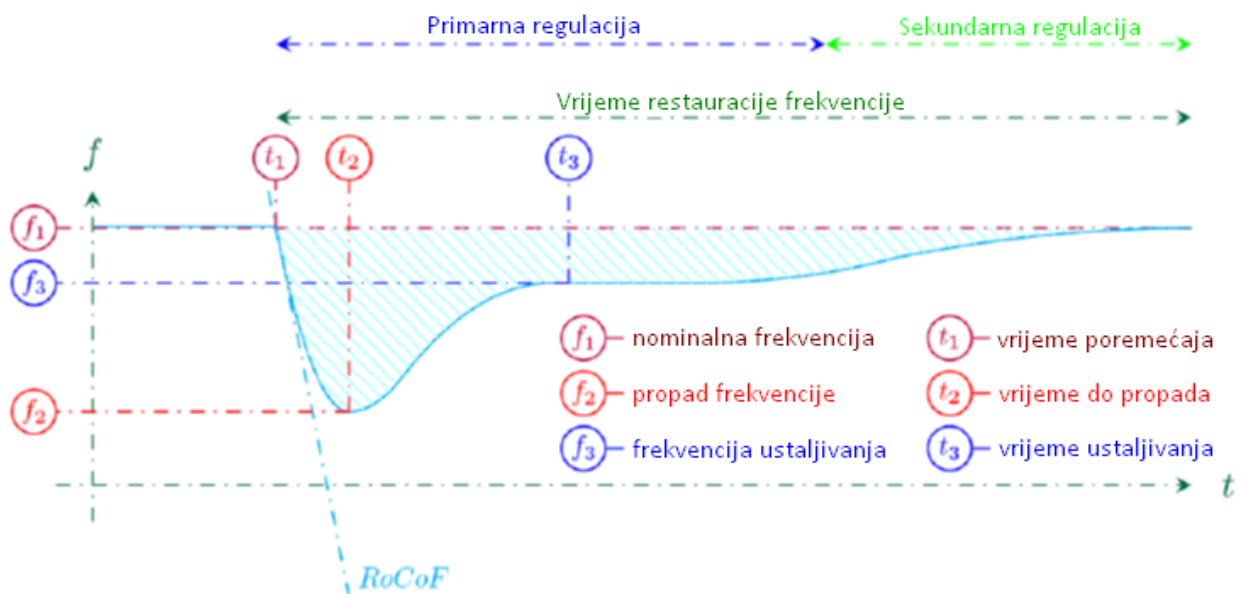
$$\Delta P < 0 \quad (4-5)$$

$$\frac{df}{dt} < 0 \quad (4-6)$$

Kako generatori ne bi konstantno ubrzavali zbog viška električne energije, tj. usporavali zbog manjka, na raspolaganju stoji primarna regulacija snage i frekvencije koja nastoji uspostaviti ravnotežu snaga proizvodnje i potrošnje nakon poremećaja. U slučaju viška proizvedene snage, frekvencija raste, a automatika ulaznih turbinskih ventila reagira prikladnim zatvaranjem te tako smanjuje dotok radnog medija turbini, a tako smanjuje i izlaznu djelatnu snagu generatora. U slučaju manjka proizvedene snage, frekvencija je niža od nazivne odnosno zadane, a reakcija primarnih regulatora je otvaranje ulaznih turbinskih ventila. Regulacijski zahvat otvaranja i zatvaranja turbinskih ventila naziva se primarna regulacija.

Na slici 4.1. prikazan je slučaj promjene frekvencije u vremenu i regulacijski odgovor uslijed ispada značajnije proizvodne jedinice. Kao što je obrađeno u drugom poglavlju, prvi odgovor na poremećaj u sustavu je frekvencijski odziv koji podrazumijeva pretvorbu kinetičke energije rotirajućih masa u električnu energiju, protiveći se tako promjeni frekvencije sustava. Frekvencijski odziv je opisan veličinom propada

( $f_2$ ) te vremenom od nastanka poremećaja do propada ( $t_2 - t_1$ ), a često i RoCoF vrijednosti koja predstavlja tangentu funkcije propada, odnosno nagib. Ulazni parametar primarnih turbinskih regulatora je brzina vrtnje (frekvencija) pa će turbinski regulator na smanjenje brzine vrtnje tj. frekvencije reagirati povećanjem dotoka pogonskog sredstva turbini. Tijekom uspostavljanja ravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage, točnije tijekom ustaljivanja frekvencije, javljaju se oscilacije. Uspostavljena frekvencija ( $f_3$ ) manja je od nazivne i određena je samo karakteristikom sustava, odnosno karakteristikama proizvodnje i potrošnje. Za ponovnu uspostavu nominalne frekvencije zadužena je sekundarna regulacija.



Slika 4.1. Promjena frekvencije u vremenu i regulacijski odgovor nakon nastalog poremećaja [10].

#### 4.1. Uredba Komisije (EU) 2017/1485 i Mrežna pravila prijenosnog sustava RH

Uredba Komisije (EU) 2017/1485 je službeni list Europske Unije koji definira pravila i norme sigurnog rada elektroenergetskih sustava na području Europske Unije. Između ostalog, definirana su pravila o strukturi i radu regulacije frekvencije i snage razmjene [6].

Mrežna pravila prijenosnog sustava Republike Hrvatske (u nastavku teksta: mrežna pravila) su skup definiranih pravila i normi za siguran rad EESRH. Također, jasno su definirani uvjeti frekvencijske stabilnosti te mogućnosti održavanja frekvencije. Nazivna vrijednost frekvencije u EESRH iznosi 50,00 Hz. Za stacionarno stanje vrijedi da iznos maksimalnog odstupanja ne smije biti veći od  $\pm 200$  mHz. Niti u jednom trenutku raspon frekvencijskog odstupanja ne smije premašiti  $\pm 800$  mHz nazivne vrijednosti. Nazivna vrijednost frekvencije može biti podešena na 49,99 Hz ili 50,01 Hz zbog korekcije sinkronog vremena. Za kontinentalnu Europu vrijedi standardni frekvencijski raspon  $\pm 50$  mHz [5, 6].



Primarni regulatori frekvencije moraju reagirati na odstupanja frekvencije veće od  $\pm 20$  mHz nazivne vrijednosti nastojeći uspostaviti ravnotežu proizvodnje i potrošnje. Ako prema procjeni OPS-a, pojedine proizvodne jedinice ne trebaju sudjelovati u primarnoj regulaciji, primarni regulatori tih proizvodnih jedinica ne smiju biti isključeni/blokirani, već moraju imati veći iznos ugođene neosjetljivosti primarne regulacije ( $\pm 200$  mHz) [5].

U proizvodnji električne energije sudjeluju brojne vrste elektrana poput hidroelektrana, termoelektrana, nuklearnih elektrana, plinskih elektrana te ostalih vrsta. Regulacija frekvencije za pojedinu vrstu elektrane nije ista. U primarnoj regulaciji bi trebale sudjelovati sve vrste elektrana regulacijskog područja osim vjetroelektrana, a razlog je stohastička priroda vjetra. Nuklearne elektrane pripadaju u skupinu temeljnih elektrana te su uglavnom opterećene blizu vlastitog maksimuma s proizvodnjom konstantne snage. Suprotno tomu, plinske elektrane pripadaju skupini vršnih elektrana koje su zadužene za pokrivanje vršnog dijela opterećenja. Ovo su razlozi zbog kojih se pri regulaciji frekvencije uglavnom promatra utjecaj hidroelektrana i termoelektrana.

Prema važećim mrežnim pravilima, svaka hidro proizvodna jedinica snage veće ili jednake od 10 MW mora nuditi uslugu primarne regulacije frekvencije. Isto vrijedi i za termo proizvodne jedinice snage veće ili jednake od 30 MW. Za usluge primarne regulacije proizvođači ne dobivaju naknadu. Proizvodne jedinice manjih snaga mogu biti osposobljene za primarnu regulaciju frekvencije uz prethodni dogovor s OPS-om [5].

Proizvođači po proizvodnoj jedinici imaju obvezu dostave sljedećih informacija OPS-u: (a) točnost mjerenja frekvencije, (b) neosjetljivost regulacije, (c) opseg primarne regulacije, (d) brzina odziva i (e) statizam te podesivost statizma. [5]

Tablicom 4.1. opisani su zahtjevi za opsegom primarne regulacije snage, statičnošću regulatora te neosjetljivosti regulacije. Zahtjevi se stavljaju prema mrežnim pravilima za hidro i termo proizvodne jedinice koje sudjeluju u primarnoj regulaciji.

**Tablica 4.1.** *Zahtjevi mrežnih pravila koji se stavljaju na hidro i termo proizvodne jedinice vezano za primarnu regulaciju frekvencije [5].*

	Termo proizvodne jedinice	Hidro proizvodne jedinice
Opseg primarne regulacije snage	Najmanje $\pm 2\% P_n$	Nije definirano
Raspon statike sustava	5 - 8 % prema zahtjevu operatora prijenosnog sustava	2 – 5 % prema zahtjevu operatora prijenosnog sustava
Neosjetljivost regulacije	$\leq 10$ mHz	10 mHz

Prema [6], svaki OPS sinkronog područja kontinentalne Europe mora osigurati da:

- (a) aktivacija primarne regulacijske pričuve ne bude umjetno odgođena te da regulacija počne djelovati u što kraćem roku od nastanka poremećaja,
- (b) kod odstupanja frekvencije većeg ili jednakog 200 mHz, 50 % ukupne primarne regulacijske pričuve bude aktivirano unutar 15 sekundi, a 100% ukupne primarne regulacijske pričuve unutar 30 sekundi s linearnim rastom od 15 do 30 sekundi i
- (c) kod odstupanja frekvencije manjih od 200 mHz, aktivirani kapaciteti primarne regulacijske pričuve budu proporcionalni vremenima reakcije iz stavke (b).

Tablicom 4.2. dana su svojstva primarne regulacijske pričuve u sinkronim zonama Europske Unije. Prikazani su zahtjevi koje pripisuje svaka sinkrona zona (kontinentalna Europa, Irska i Sjeverna Irska, Velika Britanija te nordijske zemlje) pojedinačno, a to su

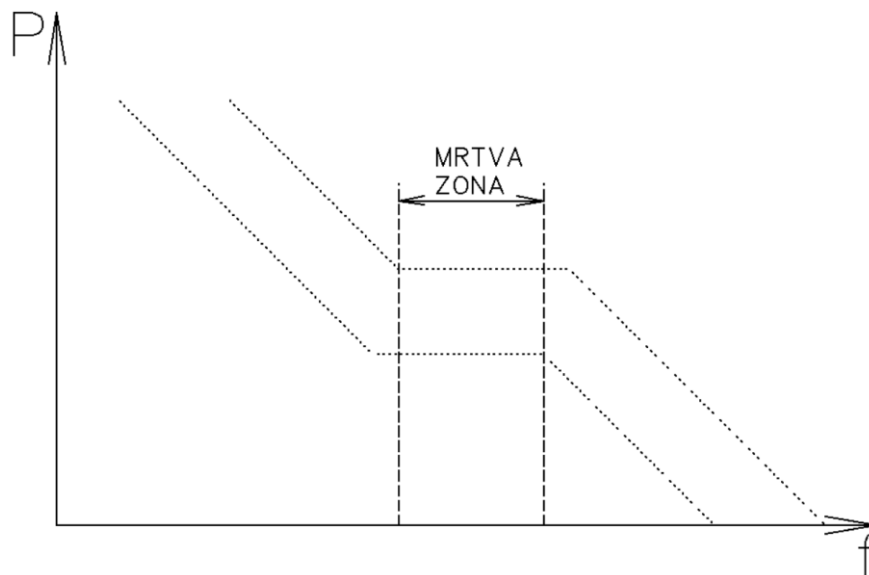
- (a) najmanja točnost mjerenja frekvencije,
- (b) maksimalni raspon u kojem regulator ne djeluje (zbroj inherentne neosjetljivosti frekvencijskog odziva i namjerne mrtve zone)
- (c) frekvencija pri kojoj se pruža puna primarna regulacijska pričuva s maksimalnim vremenom do pune aktivacije.

**Tablica 4.2.** Svojstva primarne regulacijske pričuve različitih sinkronih zona [6].

Najmanja točnost mjerenja frekvencije	Kontinentalna Europa, Irska i Sjeverna Irska, Velika Britanija te nordijske zemlje	10 mHz ili industrijska norma (u slučaju da je zahtjevnija)
Maksimalno zajedničko djelovanje inherentne neosjetljivosti frekvencijskog odziva i namjerne mrtve zone regulatora jedinica/grupa za pružanje primarne regulacije	Kontinentalna Europa	10 mHz
	Irska i Sjeverna Irska	15 mHz
	Velika Britanija	15 mHz
	Nordijske zemlje	10 mHz
Vrijeme do pune aktivacije primarne regulacijske pričuve	Kontinentalna Europa	30 s
	Irska i Sjeverna Irska	15 s
	Velika Britanija	10 s
	Nordijske zemlje	30 s (za odstupanje izvan standardnog frekvencijskog raspona)

Odstupanje frekvencije za punu aktivaciju primarne regulacijske pričuve	Kontinentalna Europa	$\pm 200$ mHz
	Irska i Sjeverna Irska	Dinamička primarna regulacijska pričuva $\pm 500$ mHz
		Statička primarna regulacija pričuva $\pm 1000$ mHz
	Velika Britanija	$\pm 500$ mHz
	Nordijske zemlje	$\pm 500$ mHz

U većini EES-a, primarni regulatori imaju ugođen raspon mrtve zone (zonu neosjetljivosti) koja se postavlja s namjerom da kod malih promjena frekvencije ne dolazi do promjene snage, što je vidljivo na slici 4.2. Ako je mrtva zona udešena, statička karakteristika regulatora predstavlja se s dva paralelna pravca (točkaste linije na slici 4.2.), jedan iznad, a drugi ispod pravca koji aproksimira statičku karakteristiku regulatora. Razmak dviju paralelnih pravaca određuje iznos udešene mrtve zone. Ukupna neosjetljivost primarnih regulatora (zbroj konstrukcijske neosjetljivosti i mrtve zone) u EESRH ugođena je na iznos  $\pm 20$  mHz [15].



**Slika 4.2.** Mrtva zona primarnog regulatora.

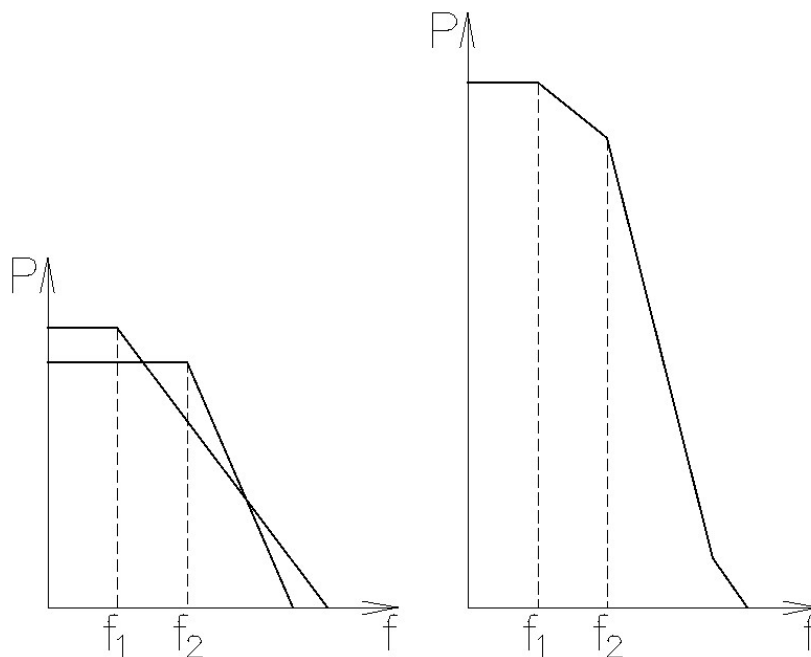
Svi OPS-ovi nordijskog sinkronog područja te sinkronog područja kontinentalne Europe moraju načiniti prijedlog minimalnog vremena aktivnosti pružatelja usluge primarne regulacije. Vrijeme mora biti u intervalu od 15 do 30 minuta [6].

U otočnom pogonu EES-a ili kod odvojenog dijela EES-a, primarna regulacija mora korigirati odstupanja proizvodnje i potrošnje u iznosu aktivne proizvodnje jedinici s najvećom snagom te osigurati da vrijednost frekvencije pri poremećaju bude veća od 49,20 Hz. Statička karakteristika primarnog regulatora

kod otočnog pogona prikazana je slikom 3.2, a za takav pogon karakteristično je da su promjene frekvencije pri promjeni opterećenja znatno veće. U interkonekciji, svako regulacijsko područje mora doprinosti rezervi primarne regulacije interkonekcije [5]. Više o primarnoj regulaciji u interkonekciji bit će rečeno u potpoglavlju 4.5.

## 4.2. Karakteristika proizvodnje

Ranije je prikazana statička karakteristika jednog agregata koji napaja promjenjivo opterećenje (Slika 3.2.) te se vrlo jednostavno može vidjeti da primarna regulacija ima problem pri uspostavi nazivne frekvencije. Dakle, neizbježne se promjene frekvencije u znatno većoj mjeri javljaju pri radu agregata na vlastitu mrežu. Unatoč tome, u velikim EES-ima oscilacije snaga promjenjivih potrošača u velikoj se mjeri izjednačavaju, pa se promjena frekvencije manifestira u uskom opsegu. Također, veliki sustav karakterizira mnoštvo proizvodnih jedinica. Statička karakteristika regulacije više agregata određuje se zbrajanjem snaga proizvodnje koje odgovaraju istoj frekvenciji. Takva karakteristika naziva se zajednička karakteristika regulacije proizvodnje, a na slici 4.3. prikazan je primjer određivanja zajedničke karakteristike regulacije proizvodnje dviju proizvodnih jedinica.



**Slika 4.3.** Sumarna statička karakteristika dvaju agregata.

Usporedbom slike 3.2. i slike 4.3. može se doći do zaključka da uz više agregata u sustavu uz jednaku promjenu opterećenja dolazi do manje promjene frekvencije, pa je održavanje frekvencije lakše. Dakle, zajednička karakteristika regulacije ima veći nagib nego karakteristika regulatora jednog agregata.

Karakteristika regulatora često se opisuje strminom ili regulacijskom energijom proizvodnje zbog funkcionalnosti, to jest:

$$k_p = -\frac{\Delta P_p}{\Delta f} \quad (4-7)$$

gdje je  $\Delta P_p = P_p - P_{pn}$  promjena snage proizvodnje,  $\Delta f = f - f_n$  promjena frekvencije u danom trenutku, a  $P_{pn}$  predstavlja nazivnu djelatnu snagu proizvodnje pri nazivnoj frekvenciji  $f_n$ .

Regulacijska energija proizvodnje predstavlja nagib karakteristike proizvodnje, a opisuje za koliko se mijenja iznos proizvedene djelatne snage promjenom frekvencije. Postojanje negativnog predznaka objašnjava se nagibom krivulje. Promjena proizvedene djelatne snage  $\Delta P_p$  i promjene frekvencije  $\Delta f$  uvijek su suprotnog predznaka, tj. smanjenjem frekvencije regulator povećava izlaznu snagu generatora regulacijom dotoka pogonskog sredstva turbini. Zbog toga, bročani iskaz regulacijske energije proizvodnje uvijek je pozitivan. Mjerna jedinica regulacijske energije proizvodnje je  $MW/Hz$ , no nerijetko je iskazana u  $MW/0,1 Hz$ .

Često se u literaturi može pronaći izraz statizam ili statičnost (engl. *speed droop*). To je parametar turbinskog regulatora koji je jednak recipročnoj vrijednosti regulacijske energije proizvodnje izraženoj u relativnim jedinicama (*per unit* ili %), što je vidljivo u jednadžbi (4-8).

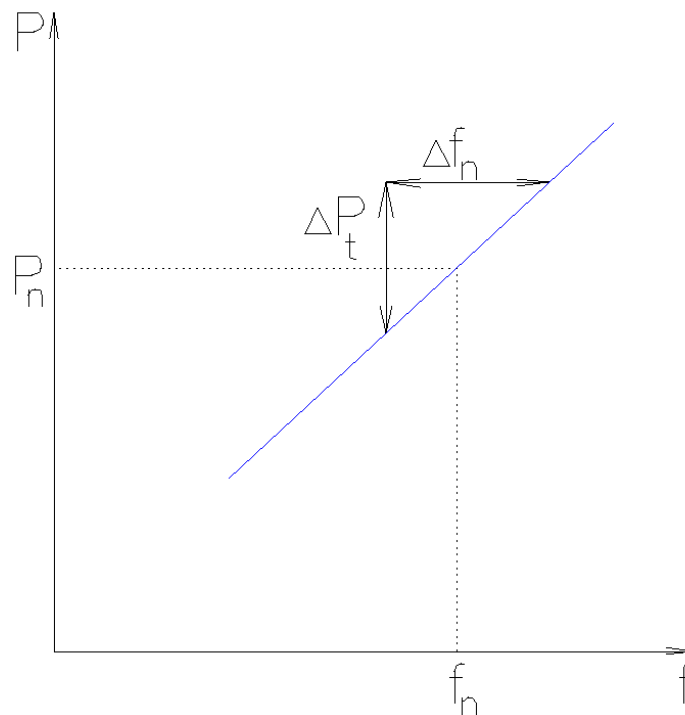
$$\sigma = -\frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P_p}{P_{pn}}} \cdot 100\% \quad (4-8)$$

Statičnost regulatora u teoriji predstavlja postotnu promjenu frekvencije za koju generator promijeni snagu u punom opsegu te daje informaciju o iznosu odstupanja frekvencije ustaljenog stanja nakon djelovanja primarne regulacije. Uobičajeno, termoelektrane imaju veću podešenu postotnu vrijednost statičnosti u odnosu na hidroelektrane, uglavnom zbog veće snage termoelektrana i užeg regulacijskog opsega. Nadalje, manja statičnost znači da pri promjeni frekvencije dolazi do značajnije relativne promjene izlazne snage agregata. Stvarna promjena snage ovisi o nazivnoj snazi agregata.

### 4.3. Karakteristika potrošnje

Dosadašnja su se razmatranja odnosila na osnovne principe regulacije snage agregata (ili elektrane) u EES-u. Pri tome se nije naglašavalo da u danom trenutku na snagu potrošnje utječe promjena frekvencija (funkcija snage opterećenja u ovisnosti o frekvenciji smatrala se konstantnom). No, snaga potrošača formira se s jedne strane u ovisnosti o frekvenciji (motorna trošila), a s druge o naponu (nemotorna trošila). Ovisnost motornih trošila može biti linearna (kompresori, dizala, itd.), kvadratna (crpke, mlinovi, itd.) i kubna (centrifugalne crpke, ventilatori, itd.). Ukupna karakteristika potrošnje jednaka je zbroju karakteristika

djelatna snaga – frekvencija ( $P$ - $f$ ) svih trošila priključenih na sustav napajanja. Kako bi se pojednostavilo promatranje navedenog, potrebno je poći od pretpostavke da pri promjeni frekvencije, regulatori napona u elektranama i mreži održavaju napon približno konstantnim. Iako funkcija potrošnje u ovisnosti o frekvenciji može biti složena, najčešće se prema iskustvu iz prakse uzima da je to linearna karakteristika s pozitivnim koeficijentom smjera (Slika 4.4.).



**Slika 4.4.** Karakteristika potrošnje.

Karakteristika potrošača najčešće se opisuje regulacijskom energijom potrošnje ( $k_t$ ), koja pokazuje koliko će se smanjiti zahtijevana potrošnja u slučaju smanjenja frekvencije za određeni iznos. Također vrijedi i obratno. Kao i u slučaju regulacijske energije proizvodnje, često je mjerna jedinica izražena u  $MW / 0,1 Hz$ .

$$k_t = \frac{\Delta P_t}{\Delta f} \quad (4-9)$$

Gdje je  $\Delta P_t = P_t - P_{tn}$  promjena snage potrošnje,  $\Delta f = f - f_n$  promjena frekvencije u danom trenutku, a  $P_{tn}$  predstavlja nazivnu snagu potrošnje pri nazivnoj frekvenciji definiranu dnevnim dijagramom opterećenja.  $k_t$  je pozitivnog iznosa i manje vrijednosti od  $k_p$ .

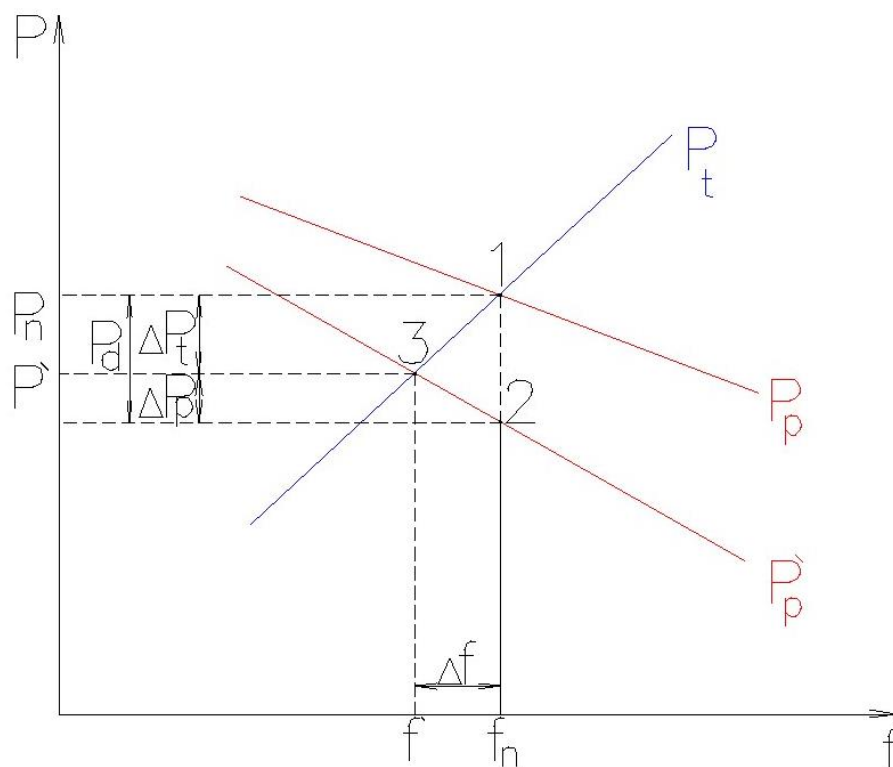
Treba naglasiti važnu ulogu ovisnosti potrošnje o frekvenciji jer u slučaju poremećaja ravnoteže snage upravo to može biti odlučujuća karika. Stoga je prijeko potrebno proširiti razmatranja primarne,

sekundarne i tercijarne regulacije s utjecajem frekvencije na snagu potrošnje kako bi se bolje prikazale stvarne prilike.

#### 4.4. Zajednička karakteristika sustava

Ravnoteža snaga proizvodnje i potrošnje nalazi se u presjecištu karakteristika proizvodnje i potrošnje (Slika 4.5., točka 1). Točku 1 karakterizira nazivna frekvencija  $f_n$  te jednakost snaga proizvodnje i potrošnje  $P_n$ . Poremećaj iznosa  $P_d$  razlog je pojave neravnoteže snage u sustavu. Pretpostavka je da je do poremećaja došlo zbog ispada proizvodne jedinice što za posljedicu ima strmiju karakteristiku proizvodnje  $P'_p$  u odnosu na karakteristiku proizvodnje  $P_p$  prije nastalog poremećaja. Karakteristika proizvodnje  $P'_p$  strmija je u odnosu na  $P_p$  jer se ispadom proizvodne jedinice smanjuje regulacijska energija proizvodnje. Karakteristika potrošnje ostala je ista. U prvom trenutku nakon nastalog poremećaja, radna točka se premješta iz točke 1 u točku 2, a nova radna točka određena je novonastalom karakteristikom proizvodnje i nazivnom frekvencijom. Razlog tome je tromost EES-a, tj. promjena frekvencije EES-a nije trenutna. Zatim se radna točka premješta u točku 3 koja označava novo presjecište karakteristika proizvodnje i potrošnje.

Kao što je vidljivo na slici 4.5., iznos poremećaja snage  $P_d$  djelomično je kompenziran promjenom proizvodnje zbog reakcije primarne regulacije  $\Delta P_p$ , a djelomično smanjenjem zahtjeva potrošnje uslijed smanjenja frekvencije  $\Delta P_t$ . Novu radnu točku karakterizira frekvencija manja od nazivne  $f'$  te snaga proizvodnje i potrošnje  $P'$  koja je također manje od nazivne.



Slika 4.5. Statičko vladanje sustava nakon poremećaja.

Djelovanje EES-a od točke 2 do točke 3 opisano slikom 4.5. nije određeno pravcem  $P'$ , nego su promjene snaga i frekvencija opisane prigušno oscilatornim prijelaznim pojavama. Dinamika prijelaznih pojava te krajnji iznos snaga i frekvencije najviše su ovisne o:

- (a) iznosu poremećaja djelatne snage,
- (b) konstanti tromosti EES-a,
- (c) dostupnoj pričuvi primarne regulacije te brzini uključenja,
- (d) regulacijskoj energiji sustava,
- (e) karakteristikama primarnih regulatora.

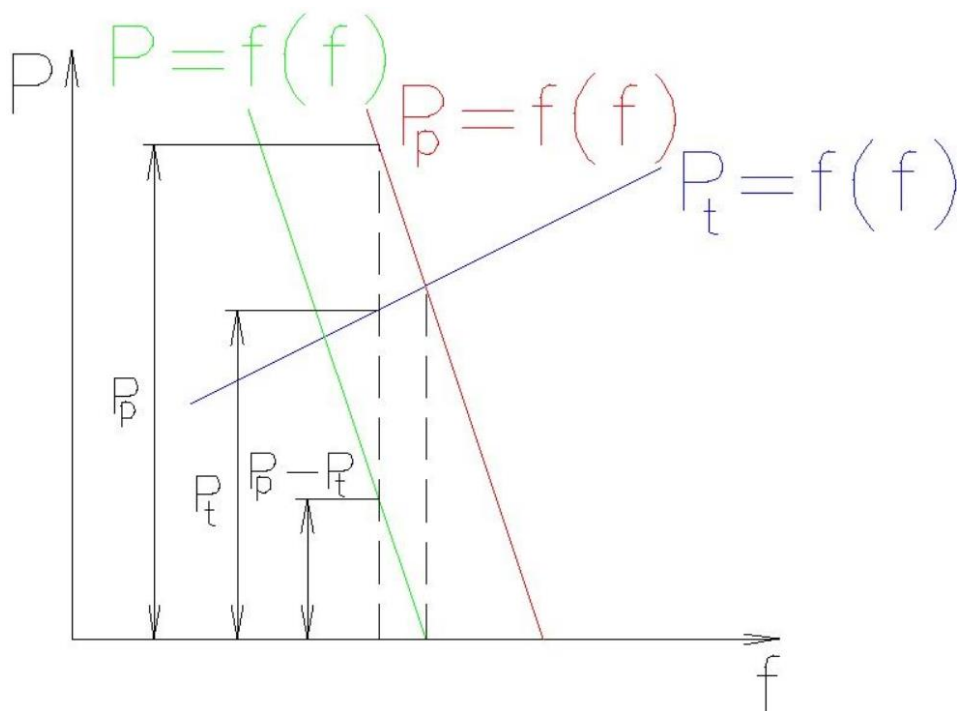
Zajednička karakteristika sustava prikazana zelenom bojom na slici 4.6. obuhvaća karakteristiku potrošača i karakteristiku proizvođača. Analitički se dobiva kao razlika regulacijske energije proizvodnje i regulacijske energije potrošnje te predstavlja regulacijsku energiju sustava:

$$k_s = k_p - k_t = -\frac{\Delta P_p}{\Delta f} - \frac{\Delta P_t}{\Delta f} = -\frac{\Delta P_p + \Delta P_t}{\Delta f} \quad (4-10)$$

Ukupna se promjena snage nakon nastalog poremećaja može izračunati preko regulacijske energije sustava i promjene frekvencije:

$$\Delta P = -k_s \Delta f \quad (4-11)$$

Regulacijska energija sustava stalno se mijenja ovisno o agregatima koji su trenutno u pogonu te profilu trenutno priključenih trošila.



**Slika 4.6.** Zajednička karakteristika sustava.

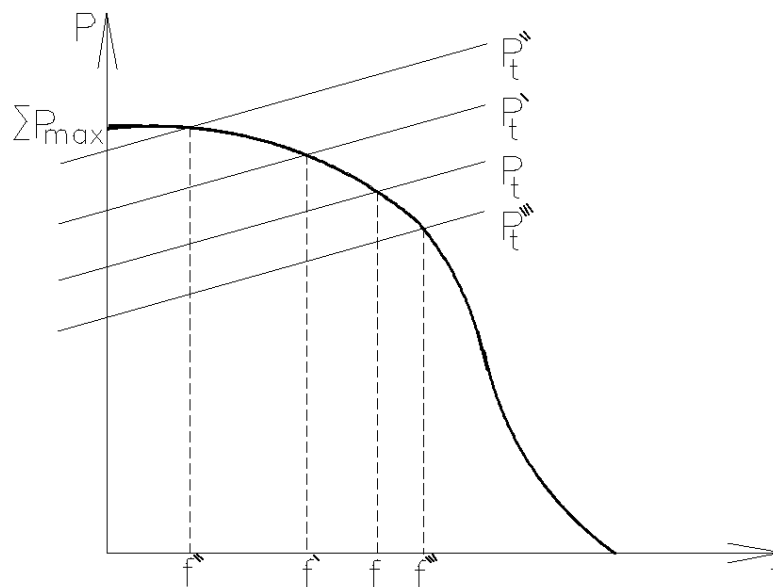


## 4.5. Primarna regulacija interkonekcije

Proširivši razmatranje regulacijskog područja na cijelu interkonekciju, dolazi se do sličnih zaključaka kao na primjeru regulacijskog područja. Cijela interkonekcija može se promatrati kao izoliran sustav s pripadnom regulacijskom energijom. Ukupna karakteristika interkonekcije mijenja se poremećajima unutar pojedinih regulacijskih područja, a tako se mijenja i frekvencija interkonekcije. Jednadžba (4-11) također može poslužiti za izračun statičkog odstupanja frekvencije uslijed nastalog poremećaja u interkonekciji nakon reakcije primarnih regulatora.

Nastankom poremećaja, pogođenom regulacijskom području ostala regulacijska područja u interkonekciji potpomažu zbog načela solidarnosti. Načelo solidarnosti znači da svako regulacijsko područje koje nije pogođeno nastoji primarnom regulacijskom pričuvom pomoći pogođenom području. Kod pogođenog područja također dolazi do reakcije primarnih regulatora, a zatim i sekundarnih regulatora koji nastoje uspostaviti nazivnu frekvenciju i osloboditi primarnu pričuvu regulacijskih područja koja pomažu.

Ako se proširi razmatranje s dva agregata (Slika 4.3.) na cijeli sustav uzevši u obzir međusobni pomak karakteristika zbog zahtjeva ekonomične raspodjele opterećenja, može se primijetiti da zbroj linearnih karakteristika točku po točku rezultira zaobljenijom zajedničkom karakteristikom (Slika 4.7.). Zajednička karakteristika primarnih regulatora i rezultatna karakteristika potrošača određuju ponašanje sustava, kako pri promjeni proizvedene snage, tako i pri promjeni snage potrošnje.



**Slika 4.7.** Rezultantna karakteristika primarne regulacije.

Na slici 4.7. vidljivo je kako sustav pri frekvenciji  $f$  opskrbljuje potrošače snagom  $P_t$ . U slučaju povećanog zahtjeva za potrošnjom  $P_t'$ , frekvencija se smanjuje na vrijednost  $f'$ . Na povećanje zahtjeva za

potrošnjom mogu reagirati samo oni agregati koji prethodno nisu radili punim opterećenjem. Daljnjim povećanjem potrošnje dolazi do izrazitijeg smanjenja frekvencije ( $f''$ ) jer je u sustavu sve više agregata koji rade pod punim opterećenjem. Krajnji je rezultat vodoravna karakteristika koja se postiže kada su svi agregati maksimalno opterećeni. U slučaju smanjenog zahtjeva za potrošnjom u odnosu na referentni slučaj, uz istu karakteristiku primarnih regulatora, frekvencija pri uspostavi ravnoteže snaga proizvodnje i potrošnje bit će veća ( $f'''$ ) od referentno postavljene vrijednosti. Radna točka velikih EES-a nalazi se na gornjem luku zajedničke karakteristike primarne regulacije frekvencije sustava. Na slici 4.7. upravo tako je i prikazano za frekvenciju  $f$ .

Rotirajuća pričuva u danom pogonskom stanju predstavlja razliku između zbroja maksimalnih snaga pojedinih agregata spojenih sinkrono sustavu te zbroja ukupne angažirane snage agregata. Sustav se samostalno koristi rotirajućom pričuvom, posredstvom primarne karakteristike agregata, uz moguću posljedicu neugodnog smanjenja frekvencije. Frekvenciju je potrebno korigirati pomoću sekundarne regulacije većeg broja agregata.

Prema [5], promjene ravnoteže snage EES-a mogu prema veličini i karakteru biti svrstane u četiri grupe, a to su:

- (a) ukupne promjene opterećenja potrošača relativno malog iznosa u usporedbi sa snagom sustava, gdje su promjene frekvencije vrlo malog iznosa i nedovoljne za aktivaciju primarnih regulatora agregata.
- (b) spore i predvidive promjene opterećenja koje se daju unaprijed prognozirati statističkim metodama, a takve promjene predstavljaju osnovu voznog reda opterećenja. Kompenzacije se vrše obustavljanjem, odnosno stavljanjem u pogon agregata i sekundarnom regulacijom agregata koji su u pogonu.
- (c) ispad proizvodnog postrojenja značajne snage ili potrošača značajne snage za što je karakteristična nagla promjena ravnoteže najčešće zbog kvara agregata, kratkog spoja sabirnica i sl. Primarna regulacija odmah reagira i uspostavlja se nova frekvencija koja se zatim sekundarnom regulacijom dovodi bliže nazivnoj.
- (d) nedostatak raspoložive snage u sustavu, a to je događaj karakterističan za ispad više elektrana kod teških pogonskih poremećaja gdje je u sustavu maksimalna snaga proizvodnih jedinica ispod zahtjeva potrošnje. Najprije reagira primarna regulacija aktivirajući puni iznos pričuve, a preostali dio deficita snage rješava se odbacivanjem tereta.

Održavanje frekvencije u velikim EES-ima mnogo je lakše jer su promjene frekvencije male i bez regulacije. Unatoč tome, regulacija frekvencije je potrebna jer je uvijek moguć kvar na proizvodnoj jedinici, vodovima, u transformatorskim stanicama ili pak kod velikih potrošača [14].

Hrvatska je dio sinkrone zone kontinentalne Europe i kao takva ima obvezu sudjelovanja u primarnoj regulaciji. Izračun inicijalne obaveze za sudjelovanje u primarnoj regulaciji za 2021. godinu provodi se na temelju podataka o proizvodnji i potrošnji električne energije u 2019. godini. Obavezan doprinos hrvatskog EES-a pričuvi primarne regulacije ( $P_{hr,t}$ ) izračunava se prema:

$$P_{hr,t} = FCR_{interkonekcije} \cdot \left( \frac{G_{hr,t-2} - L_{hr,t-2}}{G_{i,t-2} - L_{i,t-2}} \right) = 11,5 \text{ MW} \quad (4-12)$$

gdje je:

$FCR_{interkonekcije}$  izračunata vrijednost potrebne snage primarne regulacijske pričuve u cijeloj interkonekciji,

$G_{hr,t-2}$  proizvodnja električne energije u EESRH dvije godine prije promatrane,

$L_{hr,t-2}$  potrošnja električne energije u EESRH dvije godine prije promatrane,

$G_{i,t-2}$  proizvodnja električne energije u interkonekciji dvije godine prije promatrane,

$L_{i,t-2}$  potrošnja električne energije u interkonekciji dvije godine prije promatrane.

Vrijednost FCR-a predstavlja referentni incident koji za kontinentalnu Europu iznosi 3000 MW u pozitivnom i jednako toliko u negativnom smjeru.

OPS nastoji držati interkonekcijske vodove uključenima te tako omogućiti solidarnu ispomoc ugroženim regulacijskim područjima djelovanjem primarne regulacije frekvencije. Prije povezivanja u interkonekciju, pretežito se za iznos regulacijske pričuve uzimala snaga najveće elektrane (proizvodne jedinice) regulacijskog područja. U interkonekcijskom načinu rada, zahtjevi za pričuvom primarne regulacije znatno su manji.

#### 4.6. Regulacija djelatne snage proizvodne jedinice i kruta mreža

Agregati, odnosno elektrane priključuju se paralelno EES-u preko zamkaste visokonaponske prijenosne mreže. Sam odnos elektrane u usporedbi s cijelim sustavom ne može se nazvati kooperacijom ravnopravnih partnera, jer jedna elektrana nasuprot sustavu uzrokuje jedva primjetnu promjenu frekvencije [4].

Regulacijom djelatne snage generatora mijenjaju se prilike na dotičnom stroju. Za proučavanje tih prilika polazi se od prihvatljivog pojednostavljenja stvarnih prilika. Odnosno, snaga sustava u odnosu na dotični stroj smatra se beskonačnom, a napon mreže krutim. Beskonačna snaga sustava kazuje da je frekvencija neovisna o promjeni djelatne snage promatrane proizvodne jedinice, tj. da promatrana proizvodna jedinica zanemarivo doprinosi u usporedbi s cijelom mrežom.

Proučavajući povećanje djelatne snage, uz prethodno utvrđene prilike, pri konstantnoj transfer reaktanciji i konstantnoj uzbuđi, dolazi se do zaključka da za promatranu proizvodnu jedinicu kut

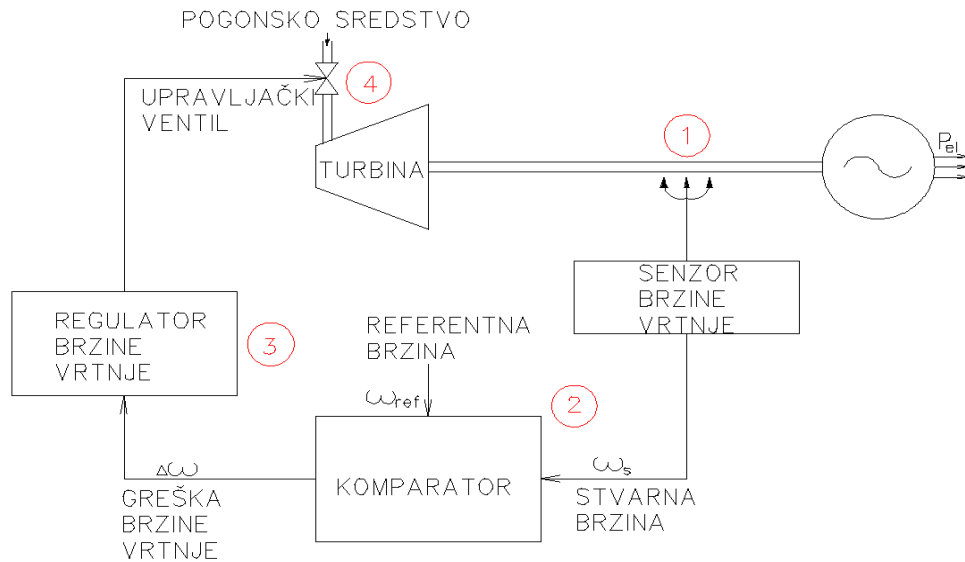
opterećenja raste, predana jalova snaga se smanjuje i napon sabirnica elektrane te napon stezaljki se smanjuje. Vrijede suprotne promjene u slučaju smanjenja djelatne snage generatora.

#### **4.7. Načelna shema primarnog regulatora i modeliranje**

Ulazni je signal u primarni regulator izmjerena vrijednost brzine vrtnje, tj. frekvencije sustava. Primarni regulator detektira odstupanje frekvencije od njezine nazivne vrijednosti te na temelju iznosa toga odstupanja mijenja snagu proizvodnje proizvodne jedinice sve dok se ponovno ne uspostavi ravnoteža snaga proizvodnje i potrošnje u interkonekciji. Regulator mijenja izlaznu snagu proizvodne jedinice prema krivulji karakteristike proizvodnje. Primarna se regulacija ostvaruje promjenom količine pogonskog sredstva (para, voda, gorivo) do koje dolazi zbog djelovanja regulatora na ventile, mlaznice, lopatice ili pumpe. Elektrane pod utjecajem primarne regulacije mijenjaju vlastitu proizvodnju za iznos snage koji je jednak iznosu uzroka neravnoteže, ali suprotnog predznaka.

Svakoj proizvodnoj jedinici pripada jedan primarni regulator koji ima dvojaku funkciju: u izoliranom radu generatora regulatori reguliraju frekvenciju sustava, a u radu generatora na mreži, regulatori kontroliraju proizvedenu snagu generatora i sudjeluju u održavanju frekvencije EES-a.

Na slici 4.8., predstavljena je načelna shema primarne regulacije. Brzina vrtnje generatora ujedno predstavlja frekvenciju sustava. U točki 1 se mjeri brzina vrtnje pomoću senzora brzine vrtnje. Informacija o brzini vrtnje šalje se do komparatora koji uspoređuje referentnu i stvarnu (izmjerenu) brzinu vrtnje, što je točka 2. Razlika referentne i izmjerene brzine vrtnje šalje se od komparatora do regulatora brzine vrtnje, a to je točka 3. Naposljetku, točkom 4 predstavljena je reakcija regulatora koji u slučaju greške brzine vrtnje izvan raspona mrtve zone, šalje signal do upravljačkog ventila, koji reagira prikladnim zatvaranjem/otvaranjem te tako preko turbine utječe na mehaničku snagu osovine, a posljedično i na djelatnu snagu proizvodnje generatora. Da bi primarna regulacija frekvencije bila moguća, potrebno je osigurati određen iznos snage rotirajuće pričuve. Tradicionalno, hidroelektrane su prva opcija kada je u pitanju primarna regulacija frekvencije zbog sposobnosti brzog mijenjanja protoka vode kroz turbinu [10].



**Slika 4.8.** *Pojednostavljena shema primarne regulacije.*

Prema vrsti izvedbe, primarni regulatori se mogu podijeliti na elektro-hidrauličke i mehaničko-hidrauličke. Centrifugalni regulator klasični je primjer mehaničkog regulatora. Općenito, mehanički regulatori su proporcionalnog (P) tipa. Upravljanje procesima pomoću regulatora tipa P pri skokovitoj promjeni upravljačke veličine, rezultira greškom u ustaljenom stanju. Iz tog razloga, nakon završetka djelovanja primarne regulacije, postoji odstupanje frekvencije sustava od nazivne vrijednosti. Noviji elektro-hidraulički regulatori su tipa PI (proporcionalni-integracijski) ili PID (proporcionalno-integracijsko-derivacijski) i njihovim korištenjem pri skokovitoj promjeni upravljačke veličine ne dolazi do pogreške u ustaljenom stanju, međutim, ti se tipovi regulatora proširuju s povratnom vezom kako bi se osigurala pogreška karakteristična za P tip regulatora. Razlog tomu je to da ako bi se primarni regulatori udesili tako da nakon poremećaja potpuno kompenziraju promjenu frekvencije sustava od nazivne vrijednosti, moguće su pojave dodatnih oscilacija (u krajnjem slučaju nestabilnosti sustava). Oscilacije bi bile uzrokovane istovremenim djelovanjem mnoštva primarnih regulatora koji nastoje kompenzirati odstupanje frekvencije. U izoliranom regulacijskom području, za potrebe primarne regulacije nužno je da najmanje jedan primarni regulator bude tipa P. Nasuprot tome, za regulacijsko područje u interkonekciji nužno je da svi primarni regulatori imaju P vladanje, inače bi često bili ograničeni jer pojedinačni regulator nema mogućnost regulacije frekvencije čitave interkonekcije [15].

## 5. ANALIZA RADA PRIMARNE REGULACIJE FREKVENCIJE WAM SUSTAVOM

Primarna regulacija frekvencije predstavlja osnovu frekvencijske stabilnosti, stoga je potrebno utvrditi sudjeluje li proizvodna jedinica/grupa u primarnoj regulaciji, s kakvim odzivom te kojim nagibom. Korištenjem standardnih mjernih metoda postoje određena ograničenja oko donošenja zaključka o sudjelovanju proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji, a to su vremenska nesinkroniziranost mjerenja te postojanje mrtvih zona tijekom mjerenja. Primjerice, prijelazna pojava u slučaju nekog poremećaja može trajati kraće od trajanja vremena osvježavanja pa tako prorada primarne regulacije neće biti zabilježena. Kod frekvencijskih odstupanja dužeg trajanja, standardne metode daju rezultat, no mrtva zona ne bi trebala biti postavljena. Također, frekvencija uzorkovanja trebala bi biti što veća, a njen iznos najmanje bi trebao biti 0,5 Hz [7].

Utvrđivanje sudjelovanja odnosno ocjene kvalitete pružanja primarne regulacije utvrđuje OPS, a odvija se na dva načina: on-line, što znači kontinuirano praćenje stanja i utvrđivanje primarne regulacijske pričuve u stvarnom vremenu i drugi način je off-line, gdje se utvrđuje kvaliteta odziva na temelju naknadne obrade prikupljenih i pohranjenih podataka. Off-line metoda se može podijeliti na analiziranje pohranjenih zapisa značajnijih događaja, točnije, većeg odstupanja frekvencije, te na ispitivanje pomoću simuliranih signala frekvencije (s definiranom vremenskom promjenom) koji se šalju kao ulazni signal na turbinski regulator proizvodnih jedinica. Postupak ispitivanja on-line jest prikladniji jer ima mogućnost automatskog prikupljanja pogonskih zapisa s proizvodnih jedinica pomoću sustava daljinskih mjerenja. Postupak ispitivanja off-line karakterističan je za ciljana ispitivanja proizvodnih jedinica jer zbog točno definiranog vremenskog slijeda ulaznih signala omogućuje provjeru dinamičkih svojstava točno određene proizvodne jedinice [8].

### 5.1. Opis WAM sustava

Općeniti trend iskorištavanja postojećih kapaciteta prijenosne mreže do granica stabilnosti posljedica je ekonomskih pritisaka zbog liberalizacije električne energije. Stabilnost i pouzdanost tako vođenog sustava moraju biti očuvane, stoga smjer djelovanja može biti izgradnja nove infrastrukture ili poboljšanje iskoristivosti sadašnjeg EES-a uz primjenu prikladnih novih metoda nadzora. Kao potencijalno rješenje nameće se nadzor dinamike rada sustava u realnom vremenu, tj. nadzor amplitude i faznog kuta struje i napona u cijeloj mreži, što omogućuje WAM sustav s pripadajućim sinkrofazorskim mjernim uređajima (engl. *Phasor Measurement Unit* – PMU). U tablici 5.1., prikazana je usporedba karakteristika različite mjerne opreme. Mikro PMU ( $\mu$ PMU) relativno je nova tehnologija koja se postavlja u distributivne mreže. Nadalje, RTU (engl. *Remote Terminal Units*), BCU (engl. *Bay Control Units*) i IED (engl.

*Intelligent Electronic Devices*) upotrebljavaju se u sustavima nadzora i upravljanja SCADA (engl. *Supervisory control and data acquisition*) i EMS (engl. *Energy Management System*). Klasično brojilo podrazumijeva uređaj za mjerenje potrošnje električne energije. USM (engl. *Unbundled Smart Meter*) pametni su mjerni uređaji koji pri primjeni u SCADA nadzoru smanjuju vrijeme sinkronizacije na manje od 1 sekunde.

**Tablica 5.1.** Karakteristike mjernih uređaja različitih sustava nadzora [16].

Vrsta mjerne opreme	PMU	$\mu$ PMU	RTU/ BCU/ IED	Klasično brojilo	USM
Sinkronizacijski zahtjevi	<1 $\mu$ s	<1 $\mu$ s	1-2 s	1-5 s	$\leq 1$ s
Broj izvještaja po sekundi [okvira/s]	50	100	1	1 - 0,2	> 1
Rezolucija frekvencije kod statičkih uvjeta [mHz]	<0,01	<0,01	10 - 100	10 - 100	10
Preciznost	Određeno	Određeno	Neodređeno	Neodređeno	$\approx 0,2$ %
Mjerne sposobnosti	Dinamičko stanje	Dinamičko stanje	Statičko stanje	Statičko stanje	Statičko stanje

U tablici 5.1. prikazani su uobičajeno upotrebljavani mjerni uređaji, a s naglaskom na mjerenja frekvencije, najbolje karakteristike pružaju PMU/ $\mu$ PMU i USM [16].

U svrhu analize kvalitete podataka u stvarnom vremenu, treba se razmatrati razlučivost i preciznost mjerenja. PMU-i i  $\mu$ PMU-i imaju zadanu preciznost i visoku razlučivost za mjerenje podataka poput frekvencije ili RoCoF-a u stvarnom vremenu. Zbog takvih karakteristika, ti su mjerni uređaji prikladni za nadzor i kontrolu promjenjivih uvjeta u mreži [16].

Tradicionalni SCADA/EMS sustavi prikazuju ograničenu dinamičku sliku prilika u mreži, no moguća su proširenja s novim funkcijama. Bitno je omogućiti integraciju novih funkcija kao samostalnih rješenja, uglavnom neovisnih o tradicionalnim SCADA/EMS sustavima. Kao dodatak SCADA/EMS sustavima nadzora i obrade podataka, nameće se WAM platforma koja omogućuje prikaz realne dinamičke slike prilika u mreži te veću točnost mjerenja u odnosu na tradicionalne sustave nadzora. Integracija

SCADA/EMS sustava WAM platformom omogućuje bržu i bolju analizu prilika u mreži što dispečerima nudi brojne opcije te jamči više vremena za reakciju pri održavanju stabilnosti sustava. U tablici 5.2., uspoređene su tradicionalne metode nadzora SCADA/EMS sustava i metoda nadzora WAM sustavom.

**Tablica 5.2.** WAM sustav u usporedbi s EMS/SCADA [17].

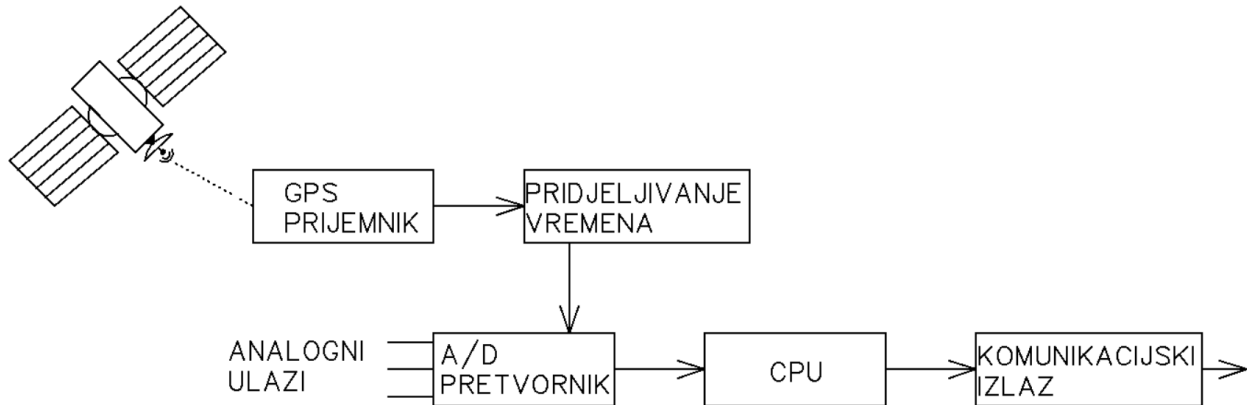
	WAMS	SCADA/EMS	Prednosti WAMS u odnosu na EMS
Vrsta mjerenja	Mjerenja fazora napona i struja, te trenutne vrijednosti frekvencije	Mjerenje efektivnih vrijednosti napona i struja, te srednje vrijednosti frekvencije	Veća točnost mjerenja
Brzina osvježavanja podataka	10-20 ms, dinamička slika sustava	1 s, statička slika sustava	Detaljnija obrada, mogućnost brže reakcije
Vrijeme sinkronizacije izmjerenih podataka	1 $\mu$ s	$\geq 1$ s	Realna slika trenutnog stanja EES-a

WAM je sustav nadzora koji omogućuje uvid u stanje sustava nad velikim područjem u realnom vremenu. Počeci integracije WAM sustava vežu se za devedesete godine prošlog stoljeća, a veći značaj primjene u zajednici prijenosnih sustava dobiva unazad petnaest godina. Tehnologija je zasnovana na uporabi PMU-a, napredne telekomunikacijske infrastrukture te računala za prikupljanje sinkrofazorskih podataka s pripadajućom aplikacijskom podrškom za obradu podataka. PMU-i mjere fazore struje i napona (tj. amplitudu i kut) u određenim točkama EES-a. Izmjerene vrijednosti dobivaju vremensku oznaku preko GPS-a (engl. *Global Positioning System*) s točnošću od jedne mikrosekunde. Upravo je GPS vremenska sinkronizacija podataka najznačajnija prednost jer je omogućena istovremena usporedba i analiza podataka iz različitih dijelova EES-a s velikom točnošću pridijeljene vremenske oznake. U prošlosti se ovakav nadzor činio nemogućim, no napretkom tehnologije u vidu računalne opreme i telekomunikacijskih sustava u kombinaciji s PMU, WAM sustav nadzor je postao moguć i dostupan.

PMU je inteligentni elektronički uređaj koji se smješta u elektroenergetska postrojenja ili proizvodne jedinice, s ciljem mjerenja fazora struje i napona. Iz prikupljenih se podataka računa djelatna i/ili jalova snaga te frekvencija. Princip rada PMU-a je prikazan na slici 5.1. Zabilježeni se analogni signali pretvaraju u digitalne impulse pomoću A/D pretvornika. Za uzorkovanje valnog oblika, A/D pretvornik koristi GPS signal kojeg funkcija pridjeljivanja vremena pretvara u slijed brzih vremenskih impulsa.

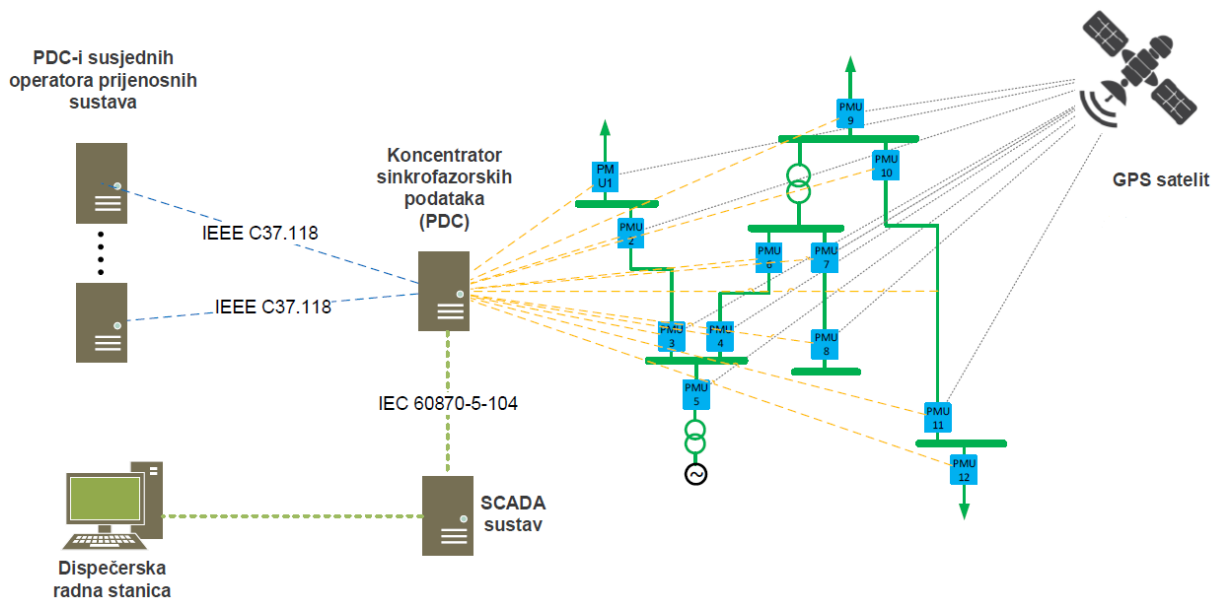


Pretvoreni digitalni signal šalje se do središnje upravljačke jedinice (engl. *Central Processing Unit* – CPU) koja preko diskretne Fourierove transformacije izvodi računanje fazora. Dobiveni fazor s vremenskom oznakom šalje se preko telekomunikacijskih kanala do koncentrataora sinkrofazorskih mjernih podataka (engl. *Phasor Data Concentrator* – PDC).



**Slika 5.1.** Princip rada PMU-a.

PDC je zadužen za prikupljanje, vremensko usklađivanje, obrađivanje, analiziranje, provođenje proračuna te u konačnici arhiviranje podataka dobivenih iz PMU. Podaci se od PMU-a do PDC-a mogu slati žično ili bežično, i to pomoću telefonskih linija, optičke veze, satelitske veze, komunikacije prijenosnim linijama i mikrovalne komunikacije. Obradeni podaci iz PMU-a šalju se IEEE C.37.118 protokolom do PDC-a. Također istim komunikacijskim protokolom podaci se mogu razmjenjivati između PDC-ova s drugim OPS-ima. IEEE C37.118 protokol je standard propisan od IEEE (engl. *the Institute of Electrical and Electronics Engineers*) koji definira metode razmjene sinkrofazorskih mjernih podataka između opreme EES-a. Obradeni podaci svakog PDC-a šalju se do centralne lokacije (IEC 60870-5-104 protokol) gdje se prikupljeni podaci svih sustava sinkroniziraju (Slika 5.2.). IEC 60870-5-104 ili IEC 870-5-104 je međunarodni standard propisan 2000. godine od strane IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*) koji omogućuje komunikaciju centralne lokacije i transformatorskih stanica TCP/IP komunikacijskom mrežom. Tako odabrani obrađeni podaci se putem IEC 60870-5-104 protokola prosljeđuju u nadležni SCADA sustav. Na taj način WAM sustav je integriran sa SCADA sustavom i omogućuje osoblju u kontrolnim sobama brzi uvid u WAM sustav u kojem se nalaze samo bitni podaci (smanjene vremenske rezolucije prikupljanja podataka) [9].



Slika 5.2. Arhitektura i povezivanje WAM sustava s drugim sustavima [9].

## 5.2. WAM sustav u hrvatskom elektroenergetskom sustavu

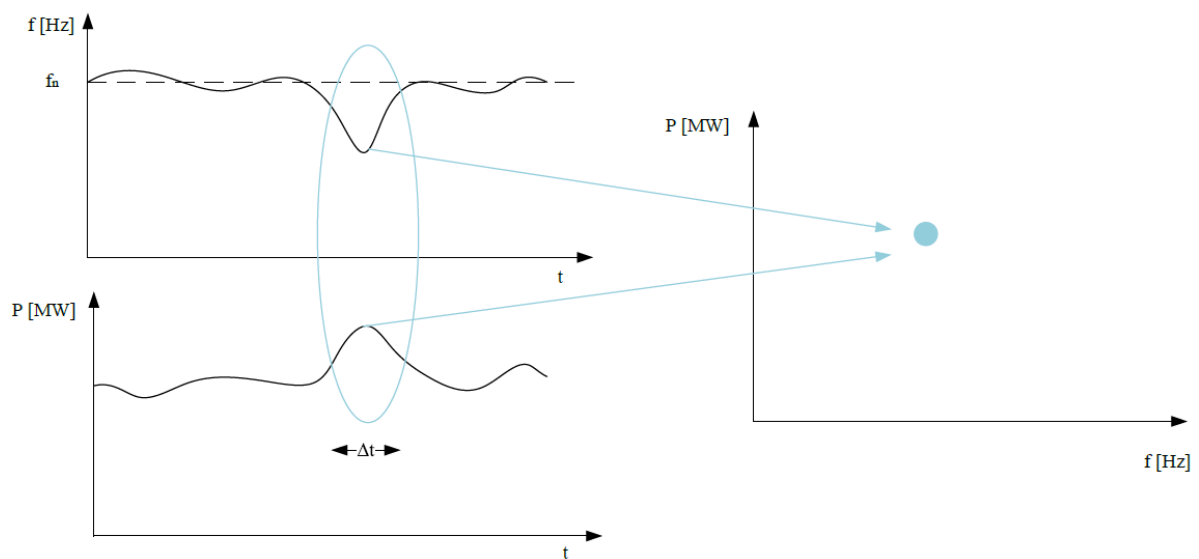
U dispečerskom centru, u svakom trenutku je u uporabi velikih broj sustava zaduženih za normalan rad pogona. Velik broj sustava za dispečere podrazumijeva korištenje i nadzor brojnih zaslona. Kako bi se olakšalo praćenje i rad, u postojeći SCADA sustav integriran je WAM sustav. WAM sustav daje dodatnu vrijednost vođenju EES-a jednoznačno upućujući dispečera na probleme. Za obradu podataka iz WAM sustava u uporabi su algoritmi za automatsko prepoznavanje događaja. Detekcijom prethodno definiranih događaja, u SCADA sustavu javlja se alarm dajući informaciju o novonastalom događaju te naglašava potrebu za analizom i djelovanjem. Zbog brže i jednostavnije početne analize, u SCADA sustavu je moguće sagledati samo osnovni prikaz WAM sustava. Ako prikazani podaci nisu dovoljni za analizu, na raspolaganju stoji direktan pristup WAM sustavu, gdje je uvijek moguće detaljnije analizirati situaciju. Takva integracija WAM sustava omogućuje dispečeru pravovremenu informiranost o pojavi događaja bez primoravanja stalnog nadgledanja WAM sustava [9].

Integracijom WAM sustava u SCADA sustav, pridonijelo se mnogim aspektima vođenja. Glede detekcije kvarova, omogućen je bolji nadzor nesimetrije transformirajući trofazni sustav u sustav simetričnih komponenti, jer kod ispravnog rada postoji samo direktna komponenta napona i struje. Nadalje, moguća je detekcija prekida vodiča praćenjem omjera inverzne i direktne komponente struje jer u slučaju prekida taj omjer raste. Poboljšanja su vidljiva i kod automatske sekundarne regulacije zbog veće rezolucije mjerenja, bržeg prijenosa te veće točnosti. Nadalje, planira se dodatno uključivanje PMU na prekogranične vodove kako bi se omogućile dodatne vlastite provjere te izračun gubitaka u stvarnom vremenu uslijed razmjene

djelatne snage na prekograničnim vodovima. Tako bi se pridonijelo smanjenju ukupne pogreške odudaranja ugovorene snage razmjene [9].

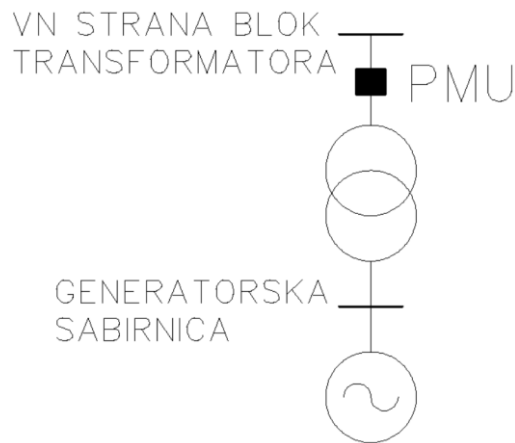
### 5.3. Nadzor primarne regulacije

Nadzor primarne regulacije pomoću WAM sustava nameće se kao vrlo zahvalna opcija zbog vremenske sinkroniziranosti mjernih podataka snage i frekvencije. Tako je moguća vrlo precizna usporedba mjernih podataka i iscrtavanje grafičke ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice o frekvenciji sustava (Slika 5.3.). Ako se dobiveni grafički prikaz vremenski sinkroniziranih mjerenja snage i frekvencije kreće prema unaprijed utvrđenoj statičkoj karakteristici proizvodnje promatrane proizvodne jedinice, zaključuje se da proizvodna jedinica sudjeluje u primarnoj regulaciji. Ako promjena frekvencije nema utjecaja na proizvodnju djelatne snage, smatra se da proizvodna jedinica ne sudjeluje u primarnoj regulaciji. Nadalje, osim vanjske karakteristike regulatora važno je promatrati maksimalnu snagu primarne regulacije te mrtvu zonu regulacije. Za detekciju statusa rada primarne regulacije osim spomenute vremenske sinkroniziranosti mjerenja, poželjno je imati visoku frekvenciju uzorkovanja.



**Slika 5.3.** Grafički prikaz vremenski sinkroniziranih mjerenja snage i frekvencije [18].

PMU koji je zadužen za utvrđivanje statusa rada primarne regulacije postavlja se u blizini proizvodne jedinice, odnosno u hrvatskom EES-u postavljen je na visokonaponskoj strani (VN) blok transformatora, što je prikazano na slici 5.4.



**Slika 5.4.** Način priključenja PMU-a.

Uspostavom i testiranjem nadzora primarne regulacije pomoću WAM sustava, odabrani se rezultati šalju i pohranjuju na PDC. Povezivanjem WAM platforme i SCADA sustava dispečer dobiva uvid u stanje primarne regulacije snage i frekvencije promatranog prijenosnog područja u realnom vremenu.

Kako je OPS prema mrežnim pravilima dužan nadzirati provedbu primarne regulacije radne snage i frekvencije, HOPS je u procesu instalacije većeg broja PMU-a na proizvodne jedinice. Trenutno je oko desetak proizvodnih jedinica pokriveno PMU-ima te se na njima analizira status rada proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije.

#### **5.4. Pozitivna iskustva povezivanja WAM sustava i primarne regulacije frekvencije**

Stabilnost frekvencije EES-a oslanja se na tromost rotirajućih masa gdje rotirajuća kinetička energija sprječava naglu promjenu frekvencije struje i napona pri pojavi poremećaja ravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage. Rotirajuća kinetička energija uvelike je sadržana kod sinkrono povezanih proizvodnih jedinica te manjim dijelom kod potrošačkih jedinica (motora).

Cilj elektroenergetskog sektora u vidu zaštite okoliša je smanjenje otiska ugljičnog dioksida zbog proizvodnje električne energije (proizvodnja električne energije iz fosilnih goriva), stoga je proizvodnja usmjerena k obnovljivim izvorima energije (OIE). U državama diljem svijeta predstavljene su mjere potpore integraciji OIE, a najznačajniji sustavi prema instaliranoj snazi su fotonaponske elektrane i vjetroelektrane.

Većina današnjih vjetroelektrana te sve fotonaponske elektrane spojene su na elektroenergetsku mrežu preko energetskih (učinskih) pretvarača. Pretvarači omogućuju proizvodnju električne energije pri nazivnoj frekvenciji neovisno o stohastičkoj prirodi sunčeva zračenja i brzini vjetra. Konvencionalne sinkrone jedinice od značajno drugačijeg su utjecaja u odnosu na uređaje spojene preko sučelja energetske

elektronike za stabilnost frekvencije. S jedne strane, sinkrono povezani generatori imaju značajnu količinu kinetičke energije sadržane u rotirajućim masama generatora i turbine te zbog krute veze s mrežom inherentno održavaju stabilnost sustava. S druge strane, proizvodne jedinice spojene preko sučelja energetske elektronike djelomično su ili potpuno odvojene od električne frekvencije mreže, a tako je smanjen ili u potpunosti uklonjen inercijski odziv [19, 20].

Integracijom OIE u sustav, smanjuje se angažiranost konvencionalnih sinkronih proizvodnih jedinica, a tako se smanjuje inercija sustava odnosno ukupna konstanta tromosti sustava. Posljedice smanjenja tromosti su veći propadi frekvencije te brže (tj. iznosom veće po sekundi) vremenske promjene frekvencije (RoCoF) uslijed poremećaja. Promatranje RoCoF vrijednosti sve više dobiva na značaju kako raste integracija OIE spojenih na mrežu preko izmjenjivača. Veće RoCoF vrijednosti sustava mogu rezultirati nestabilnosti uslijed aktivacije frekvencijske zaštite (odvajanje generatora, podfrekvencijsko rasterećenje, itd.). Osim navedenog, posljedice smanjenja tromosti očituju se i u drugim aspektima pogona i vođenja elektroenergetskih sustava, poput naponske stabilnosti i upravljanja, zaštite sustava, pružanja regulacijske rezerve i sl. Negativna svojstva OIE na stabilnost sustava značajnije se očituju kod vjetroelektrana jer su fotonaponske elektrane u pogonu tijekom dana kada je ujedno i veće opterećenje, a tada je i više sinkronih generatora u pogonu. No, vjetra ima i noću kada je opterećenje znatno manje, a unutar hrvatskog regulacijskog područja vjetroelektrane su povlašteni proizvođači s osiguranim tržištem [20, 21].

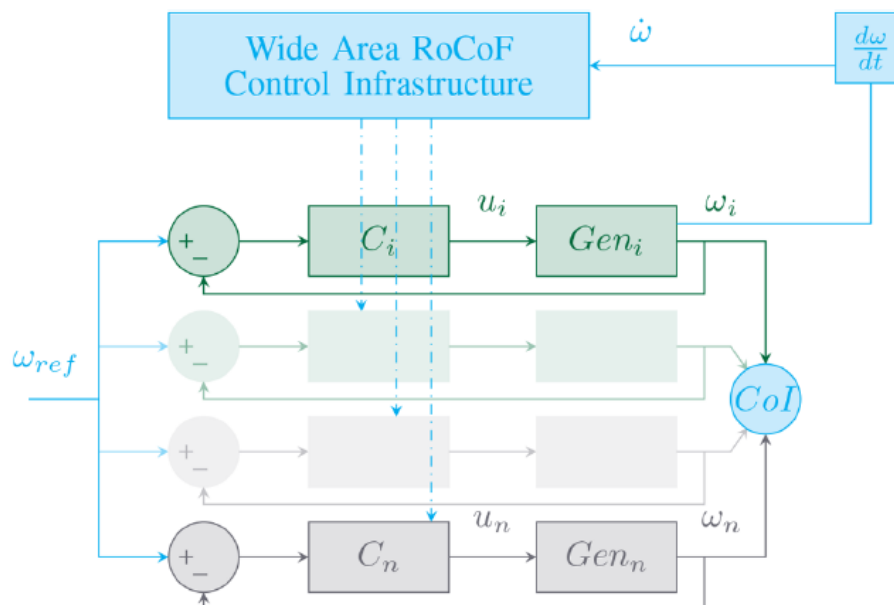
Bez obzira na mnoga ograničenja, integracija OIE je nužna i treba ustrajati u što boljem prilagođavanju. Još veći udio OIE u budućim EES-ima rezultirat će manjoj tromosti sustava, a posljedično i nestabilnosti frekvencije. Tako se javlja potreba uključivanja OIE u pomoćne usluge kako bi se osigurala stabilnost EES-a. Primjeri operatora sustava koji su u svoja mrežna pravila već primijenili zahtjeve regulacije frekvencije i djelatne snage su Velika Britanija koja zahtijeva primarnu i sekundarnu regulaciju frekvencije vjetroelektrana, Irska koja zahtijeva primarnu regulaciju frekvencije vjetroelektrana i Kanada koja ima zahtjeve za emulacijom inercijskog odziva vjetroelektrana ekvivalentnoj konstanti tromosti od 3,5 sekundi [20].

U većini ostalih sustava, vjetroelektrane moraju sudjelovati u tercijarnoj regulaciji u vidu smanjenja izlazne snage kada je u sustavu višak proizvodnje. No, vrlo je izvjesno da će i ostali sustavi mijenjati svoja mrežna pravila u vidu povećanja zahtjeva za stabilnosti, primjerice zahtijevanjem inercijskog odziva. Prema važećim mrežnim pravilima HOPS-a, od vjetroelektrane se zahtijeva posjedovanje upravljačkog sustava omogućujući zahtijevani frekvencijski odziv kako bi vjetroelektrana mogla sudjelovati u primarnoj regulaciji i da upravljački sustav mora moći u stvarnom vremenu prihvatiti i unutar jedne minute izvršiti zahtjev OPS-a za smanjenje snage u uvjetima poremećenog pogona [15, 19].

Prema [11], moguće poboljšanje reakcije sustava po nastalom poremećaju je WARS (eng. *Wide Area RoCoF Sharing*). Istraživanje koje je provedeno u nordijskom sinkronom području, koje ima znatno manji iznos konstante tromosti u usporedbi sa sinkronim sustavom kontinentalne Europe, pokazalo je da su propadi većeg iznosa te da su promjene frekvencije brže što se može i dokazati jednadžbom njihanja. WARS metoda nadzora temelji se na dijeljenju podataka o promjeni frekvencije u vremenu. Razlog dva različita RoCoF rezultata uglavnom je zbog lokacije nastalog poremećaja, što se može iskoristiti za bolju reakciju sustava. Zadovoljavajuća frekvencija uzorkovanja za RoCoF procjenu stanja je 10 Hz.

Do sada je maksimalna RoCoF vrijednost korištena za aktivaciju lokalne zaštite, a uviđena je moguća primjena prosječne i maksimalne RoCoF vrijednosti za poboljšanje frekvencijskog odziva interkonekcije. Ako RoCoF koji predstavlja odstupanje frekvencije ima strmiji nagib, mjerenje se može iskoristiti kao prednost za poboljšanje reakcije regulatora u drugim sinkrono povezanim sustavima, poboljšavajući tako odziv cijele interkonekcije. Polazi se od konstatacije o geografsko-električnoj neusklađenosti frekvencijskog odziva, što je utvrđeno prema RoCoF vrijednosti u nacionalnom sustavu Ujedinjenog Kraljevstva i u Irskoj elektroenergetskoj mreži Eirgrid. Prema tome, predloženo je inovativno rješenje širokopojsnog dijeljenja RoCoF vrijednosti između povezanih sustava u interkonekciji te su uspoređeni rezultati dijeljenjem prosječne i maksimalne RoCoF vrijednosti za poboljšanje frekvencijskog odziva. Obje funkcije uzimaju dijeljena mjerenja RoCoF vrijednosti i kombiniraju ga s lokalno mjerenim odgovarajućim regulatorima. Funkcija prosječne vrijednosti uzima prosjek oba mjerenja, dok funkcija maksimalne vrijednosti uzima najveću strminu između ta dva mjerenja [10, 11].

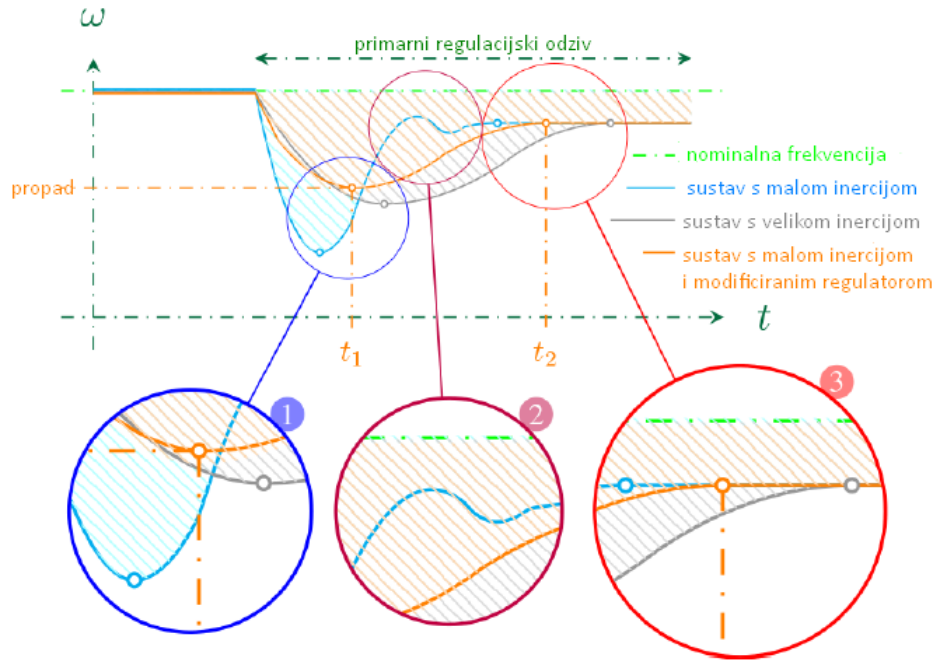
U te svrhe upotrebljava se širokopojsni sustav za dijeljenje RoCoF signala (WARS) iz područja strmijih nagiba do drugih područja, kako bi se ubrzala reakcija udaljenih regulatora što u cjelini doprinosi frekvencijskom odzivu u okviru središta inercije (engl. *Centar of Inertia – CoI*). Svako proizvodno područje mjereno je PMU-ima raspodijeljenim po sustavu te komunikacijskim linijama povezanih s glavnim PDC-om. Budući da smanjenje tromosti pogoduje strmijoj promjeni RoCoF vrijednosti i kraćem vremenu propada u usporedbi s ostalim područjima, dijeljenje tih mjerenja s ostalim područjima može poboljšati cjelokupni frekvencijski odziv u slučaju nepoželjnih poremećaja. Kako se vidi na slici 5.5., RoCoF iznos mjernog područja  $Gen_i$  poslan je ostalim područjima (od  $Gen_{i+1}$  do  $Gen_n$ ), odnosno njihovim regulatorima (od  $C_{i+1}$  do  $C_n$ ). Radi jednostavnosti, slika 5.5. prikazuje da je samo jedno područje bilo mjereno. Međutim, sva područja mogu biti mjerena i pojedinačne RoCoF vrijednosti mogu biti distribuirane ostalim područjima. Plave iscrtkane crte predstavljaju komunikacijske kanale između mjerenih područja [10].



**Slika 5.5.** Dijeljenje RoCoF mjerenja [10].

S instaliranom funkcijom RoCoF dijeljenja, svaka proizvodna jedinica moći će reagirati i pomoći sustavu tijekom velikih poremećaja. RoCoF vrijednosti iz PMU-a koriste se kao procesne vrijednosti funkcija koje su u interakciji s lokalnim regulatorima u svrhu modificiranja postavki regulatora. U [10] predstavljen je frekvencijski odziv na nastali poremećaj u Švedskom EES-u te reakcija Finskog i Norveškog sustava na nastali poremećaj. Dijeljena je prosječna i maksimalna vrijednost RoCoF-a i utvrđeno je da je vrijeme do propada pri dijeljenju maksimalne vrijednosti duže, što je prednost. Nadalje, vrijeme ustaljivanja pri dijeljenju maksimalne RoCoF vrijednosti kraće je, što je također prednost. Dakle, dijeljenje maksimalne RoCoF vrijednosti pokazalo se boljim.

Dijeljenjem RoCoF vrijednosti, frekvencijski odziv drastično se popravio, smanjujući iznos propada i vrijeme ustaljivanja. Slikom 5.6. predstavljena je karakteristika frekvencijskog odziva sustava s malom inercijom, što je prikazano plavom bojom, sivom je bojom obojena karakteristika sustava s velikom inercijom, a narančastom bojom karakteristika sustava s malom inercijom i modificiranim regulatorom pomoću dijeljenja RoCoF vrijednosti. Sustav s malom inercijom i modificiranim regulatorom ima manji propad u odnosu na druga dva prikazana (Slika 5.6, označeni prikaz 1). Nadalje, kod sustav s malom inercijom i modificiranim regulatorom prijelazna je pojava znatno tromija (označeni prikaz 2) u odnosu na sustav s malom inercijom, a vrijeme ustaljivanja frekvencije je manje u odnosu na sustav s velikom tromosti (označeni prikaz 3). Dakle, može se zaključiti da modificiranje postavki regulatora pomoću dijeljenja maksimalnih RoCoF vrijednosti donosi mnoge prednosti u vidu stabilnosti sustava.



**Slika 5.6.** *Frekvencijski odzivi sustava* [10].

Valja naglasiti da je istraživanje provedeno na nordijskom sinkronom sustavu koji, kao što je rečeno, ima značajno manju tromost u odnosu na sinkrono područje kontinentalne Europe. Ako se ovakav trend integracije OIE nastavi, vrlo je izvjesno da će se mrežna pravila pojedinih EES-a mijenjati kako bi se osigurala frekvencijska stabilnost sustava. Osim toga, potrebno je sagledati WARS kao moguću nadogradnju na WAM sustav jer je svakom EES-u glavna zadaća očuvanje stabilnosti.



## **6. NADZOR PRIMARNE REGULACIJE I ANALIZA SUDJELOVANJA PROIZVODNIH JEDINICA U PRIMARNOJ REGULACIJI**

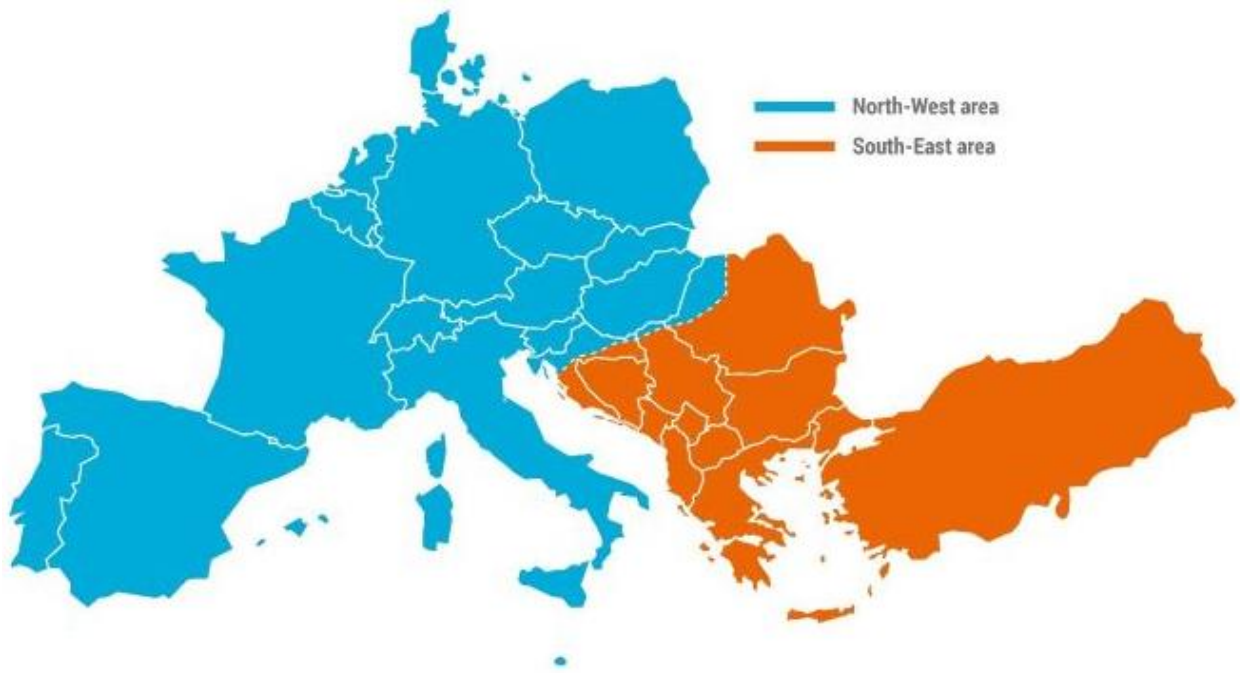
OPS, na temelju ostvarene proizvodnje u prethodnoj kalendarskoj godini, određuje i dostavlja iznos primarne regulacijske pričuve proizvođačima opremljenima za angažman u primarnoj regulaciji. Uz to, dužnost OPS-a je nadzor i provjera reakcije primarne regulacije koja se odnosi na aktivaciju iznosa primarne regulacijske pričuve od 0 do 50 % unutar 15 sekundi te od 50 do 100 % unutar 30 sekundi [5]. Postupak utvrđivanja sposobnosti primarne regulacije proizvodne jedinice provodi se provjerom odziva (promjena izlazne djelatne snage) simulirajući promjenu frekvencije ili nadzorom odziva kod evidentiranih promjena frekvencije.

HOPS na temelju zapisa iz WAM platforme utvrđuje sudjelovanje proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji. Promatrano je sudjelovanje u primarnoj regulaciji četiri proizvodne jedinice uslijed tri poremećaja u sinkronom sustavu kontinentalne Europe. Dakle, pomoću off-line metode analiziranja pohranjenih zapisa značajnijih događaja promatrao se status rada proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije. Radi se o zabilježenim poremećajima 8. siječnja 2021., 17. svibnja 2021. i 24. srpnja 2021. uslijed kojih je došlo do značajnijih odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti.

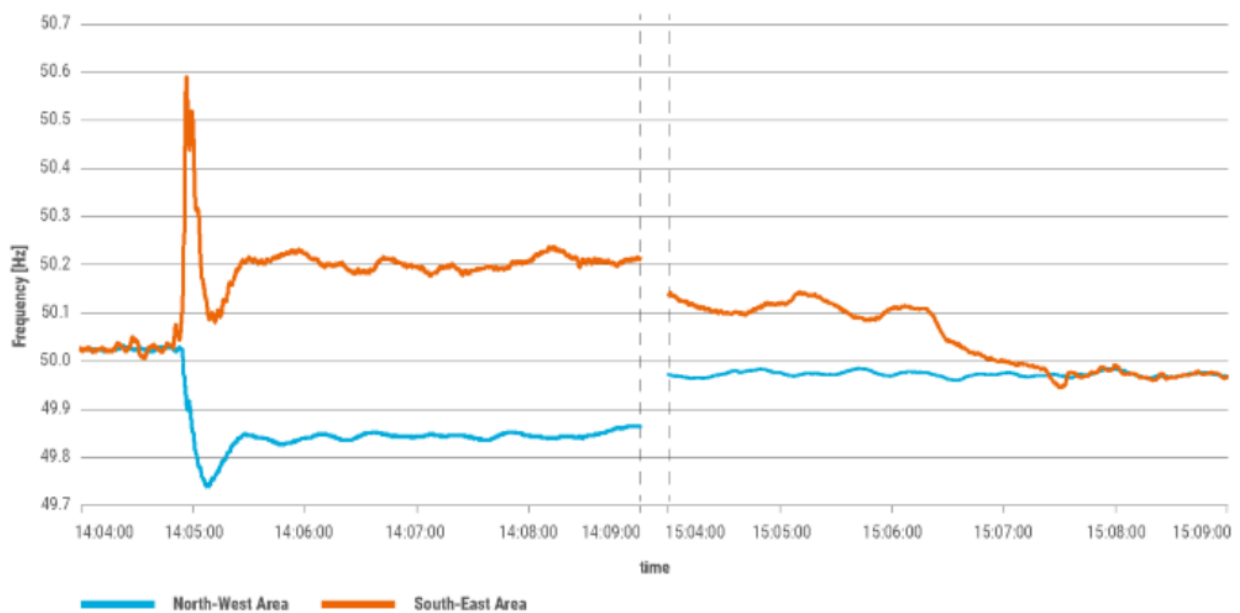
Na temelju grafičkog prikaza promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice u vremenu i grafičkog prikaza ovisnosti izlazne djelatne snage o promjeni frekvencije analizirano je sudjelovanje pojedine proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije. Proizvodne jedinice označene su oznakama A, B, C, D, a predstavljaju proizvodne jedinice priključene na prijenosni sustav Republike Hrvatske.

### **6.1. Poremećaj 1**

Događaj zabilježen 8. siječnja 2021. (u nastavku teksta poremećaj 1) opisuje poremećaj koji je nastao zbog ispada nekoliko elemenata prijenosne mreže u vrlo kratkom vremenu, što je rezultiralo odvajanjem sinkronog sustava kontinentalne Europe u dva dijela koja su na slici 6.1. označena plavom i narančastom bojom [22]. Narančastom bojom označeno je jugoistočno sinkrono područje, označeno koje je uslijed poremećaja bilježilo povećanje frekvencije (na oko 50,2 Hz), dok je sjeverozapadno područje, označeno plavom bojom, bilježilo smanjenje frekvencije (na oko 49,8 Hz). Ovisnost frekvencije o vremenu uslijed nastalog poremećaja za pojedina područja prikazana je slikom 6.2.



**Slika 6.1.** *Odvajanje sinkronog sustava kontinentalne Europe [22].*

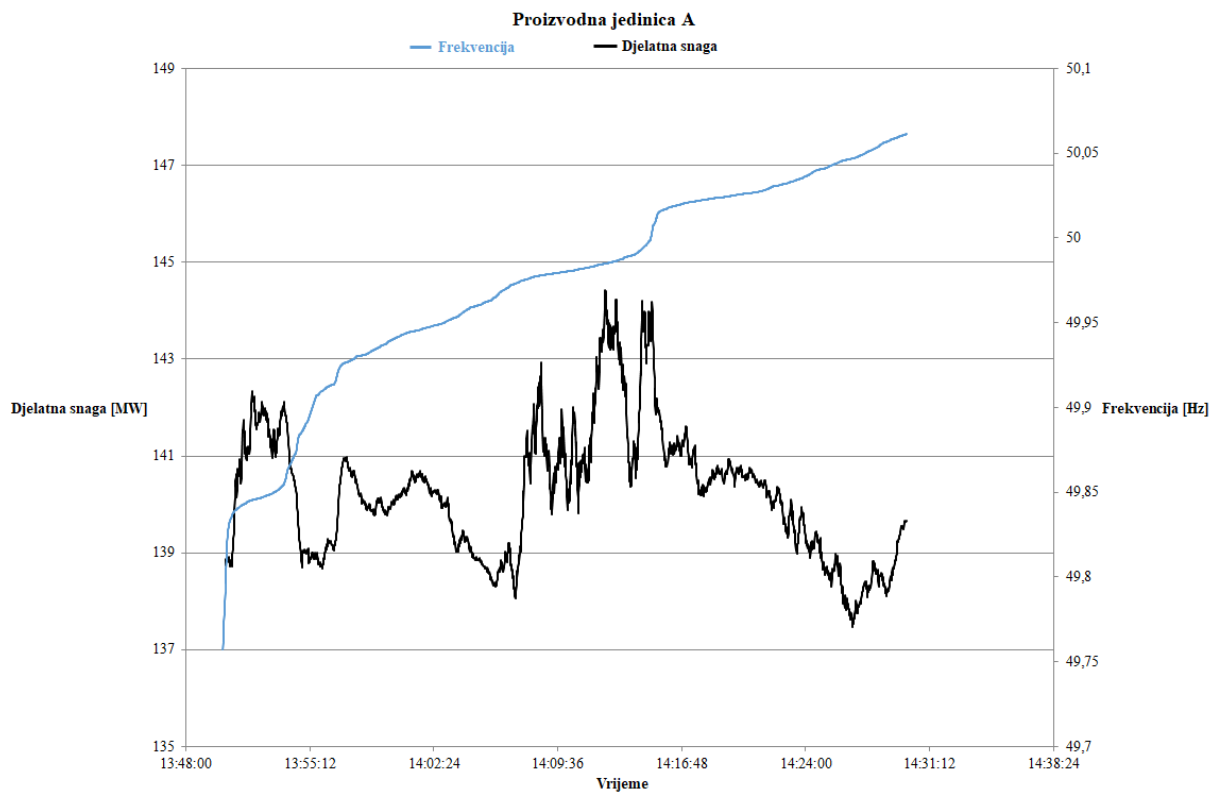


**Slika 6.2.** *Ovisnost frekvencije o vremenu uslijed poremećaja I [22].*

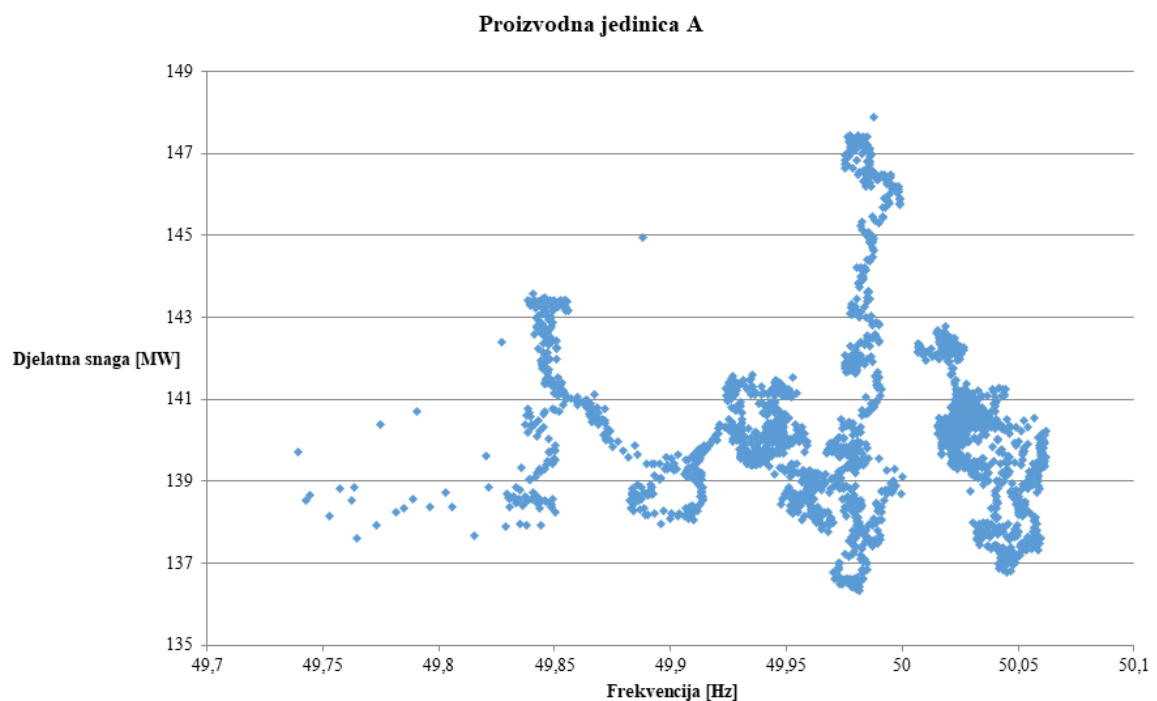
### *Proizvodna jedinica A*

Na temelju slika 6.3. i 6.4. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica A u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.3. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.3., ako proizvodna jedinica A sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do

smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A. Slika 6.4. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.4. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.3.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A u vremenu.

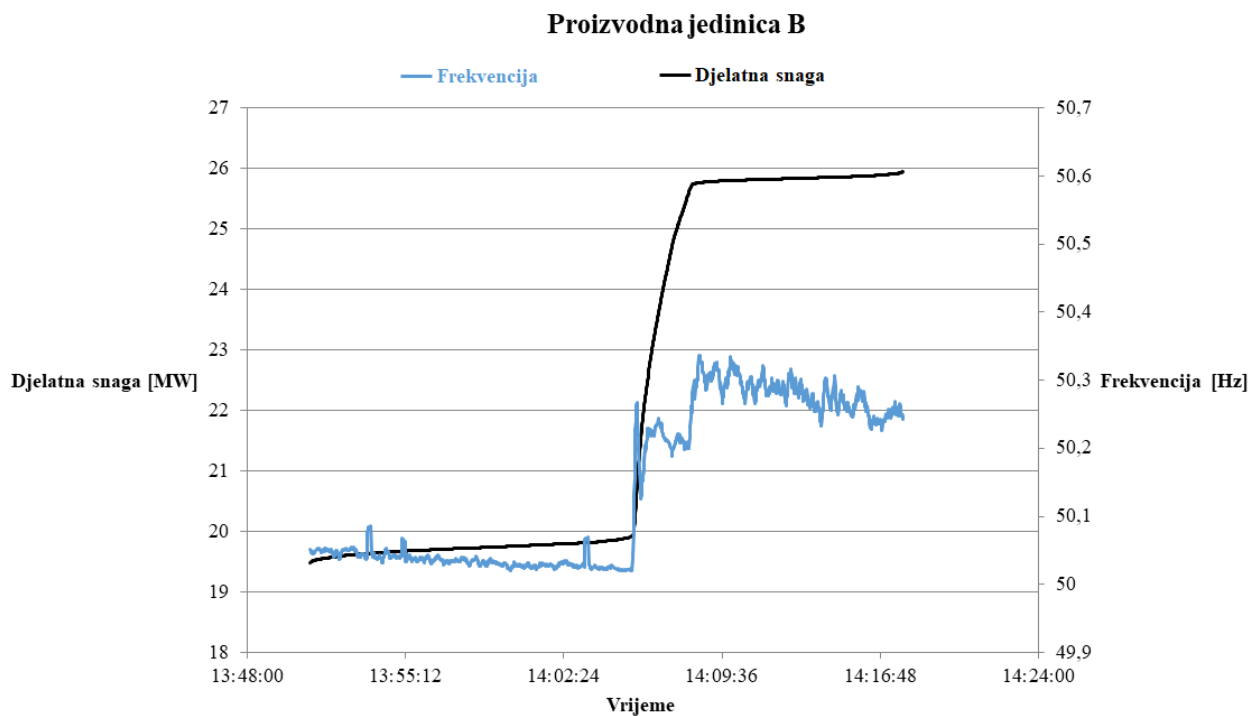


**Slika 6.4.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A o frekvenciji.

Na temelju prikaza sa slika 6.3. i 6.4. utvrđeno da je proizvodna jedinica A uslijed poremećaja 1 nije sudjelovala u primarnoj regulaciji frekvencije. Dakle, nije moguće odrediti statizam niti postojanje mrtve zone.

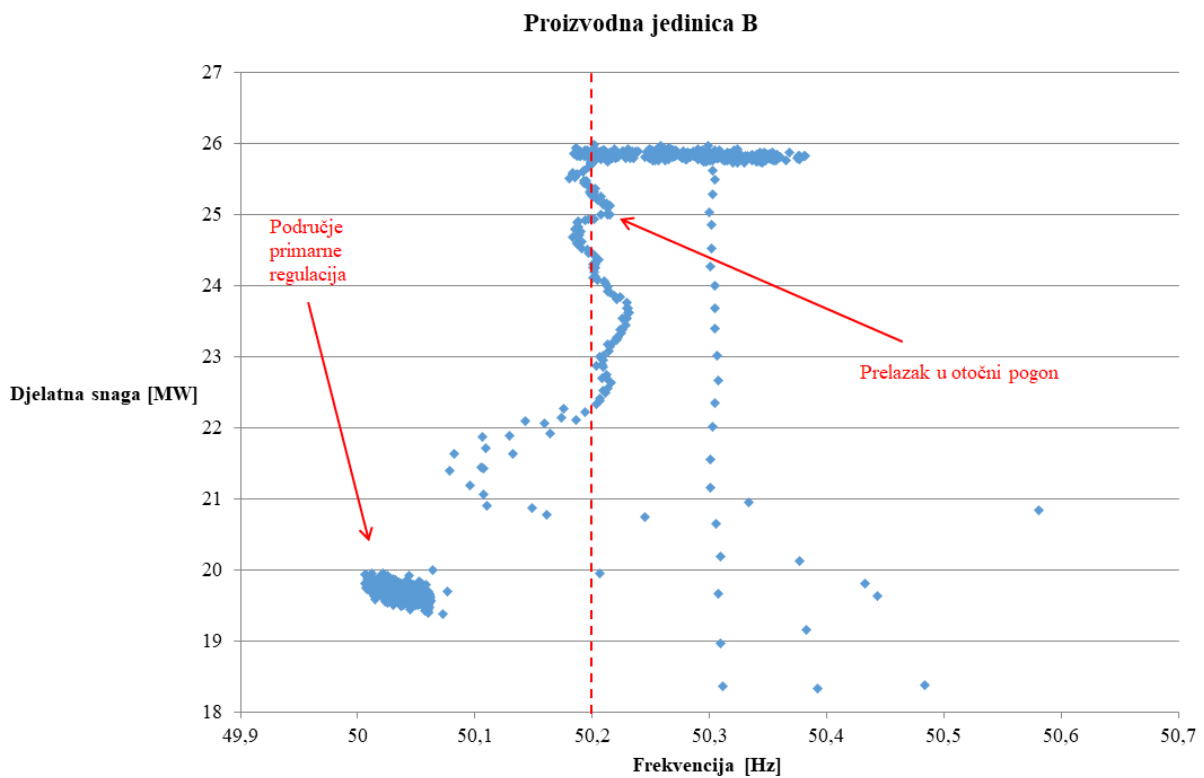
### Proizvodna jedinica B

Na temelju slika 6.5. i 6.6. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica B u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.5. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.5., ako proizvodna jedinica B sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B. Slika 6.6. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.6. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



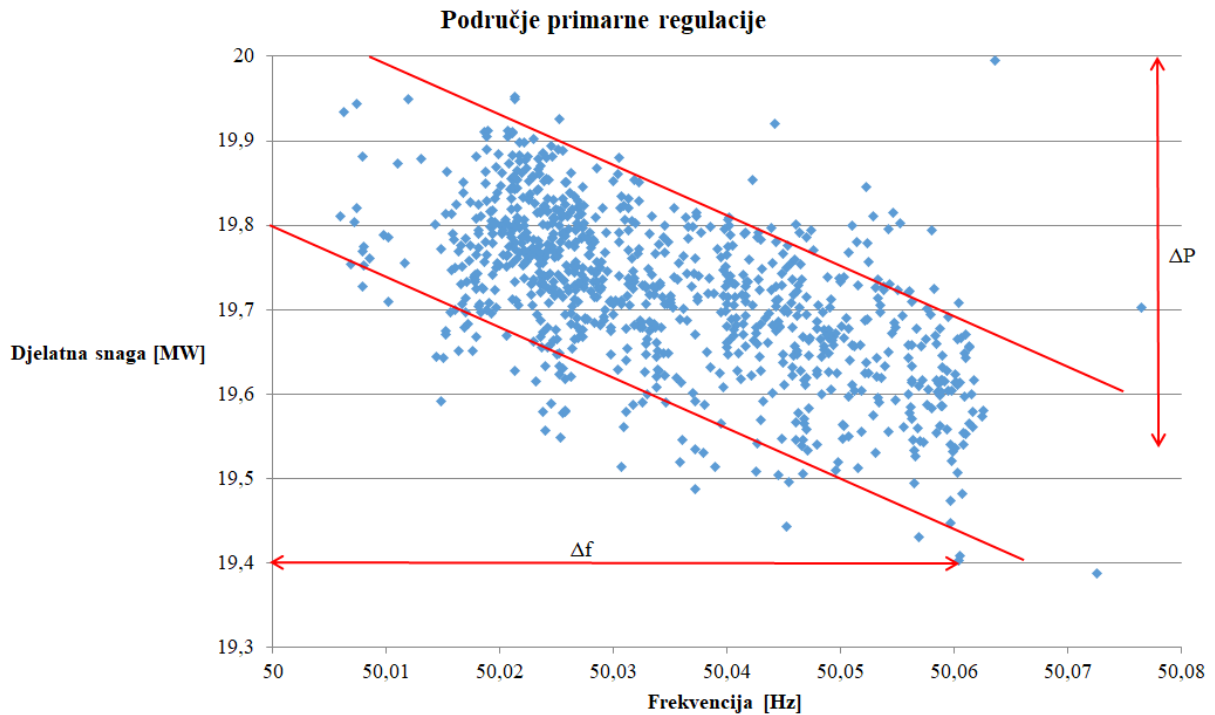
**Slika 6.5.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B u vremenu.

Na slici 6.5. može se primjetiti naglo povećanje izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B s oko 20 MW na približno 26 MW. Također, vidljivo je da je netom prije povećanja izlazne djelatne snage, frekvencija uslijed poremećaja naglo porasla, što je prethodilo proradi zaštite proizvodne jedinice B i odvajanja iz paralelnog pogona. Proizvodna jedinica B je nastavila raditi u otočnom pogonu. Otočni pogon je, prema mrežnim pravilima [5], definiran kao neovisan pogon cijelog sustava ili dijela sustava izdvojenog zbog isklopa od ostatka sustava s najmanje jednom proizvodnom jedinicom koja predaje snagu tom dijelu sustava.



**Slika 6.6.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B o frekvenciji.

Područje primarne regulacije i prelazak u otočni pogon naznačeni su na slici 6.6. Proradom zaštite proizvodne jedinice B ona se odvaja od sustava i prelazi u otočni pogon. Na slici 6.7. uvećano je područje primarne regulacije. Sa slike 6.7. vidljivo je da se povećanjem frekvencije smanjuje izlazna djelatna snaga proizvodne jedinice B što znači da proizvodna jedinica B sudjeluje u primarnoj regulaciji. Nadalje, jednažbom (6-1) određen je statizam proizvodne jedinice B te je utvrđeno da mrtva zona nije ugođena.

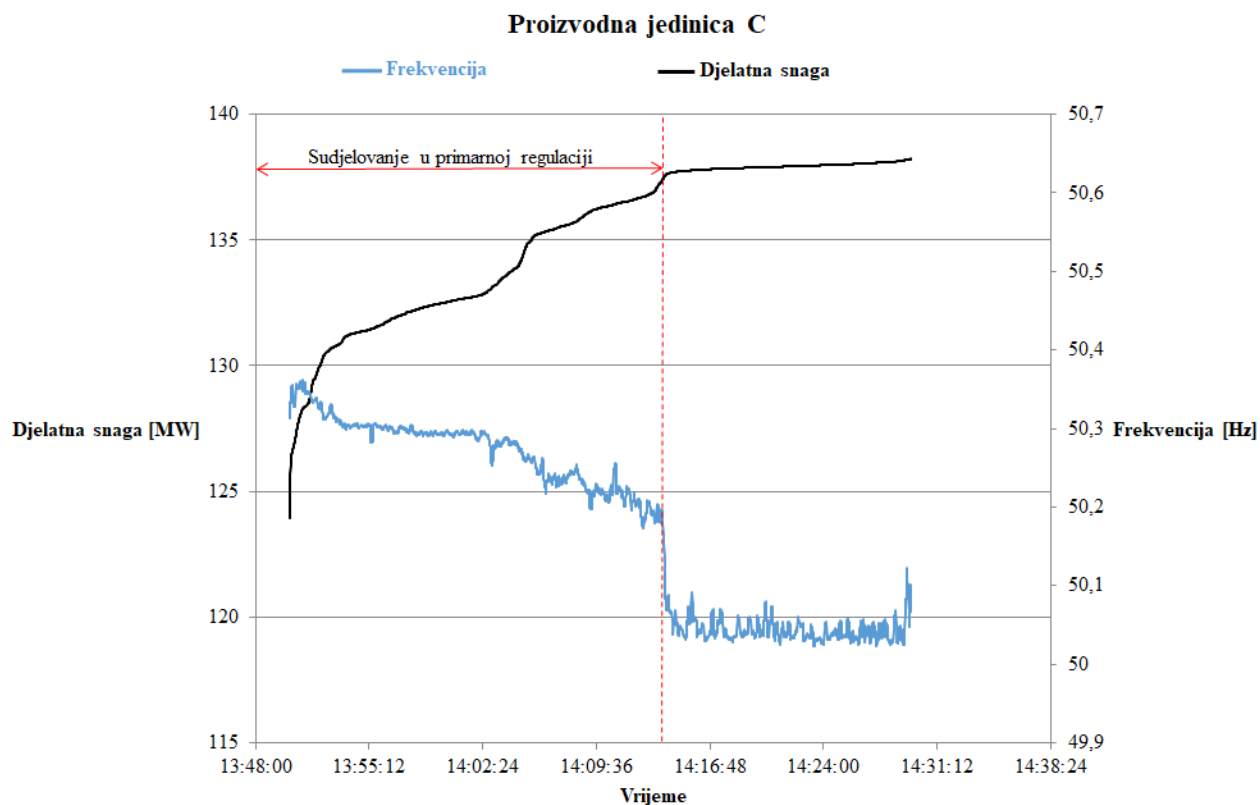


**Slika 6.7.** Područje primarne regulacije proizvodne jedinice B.

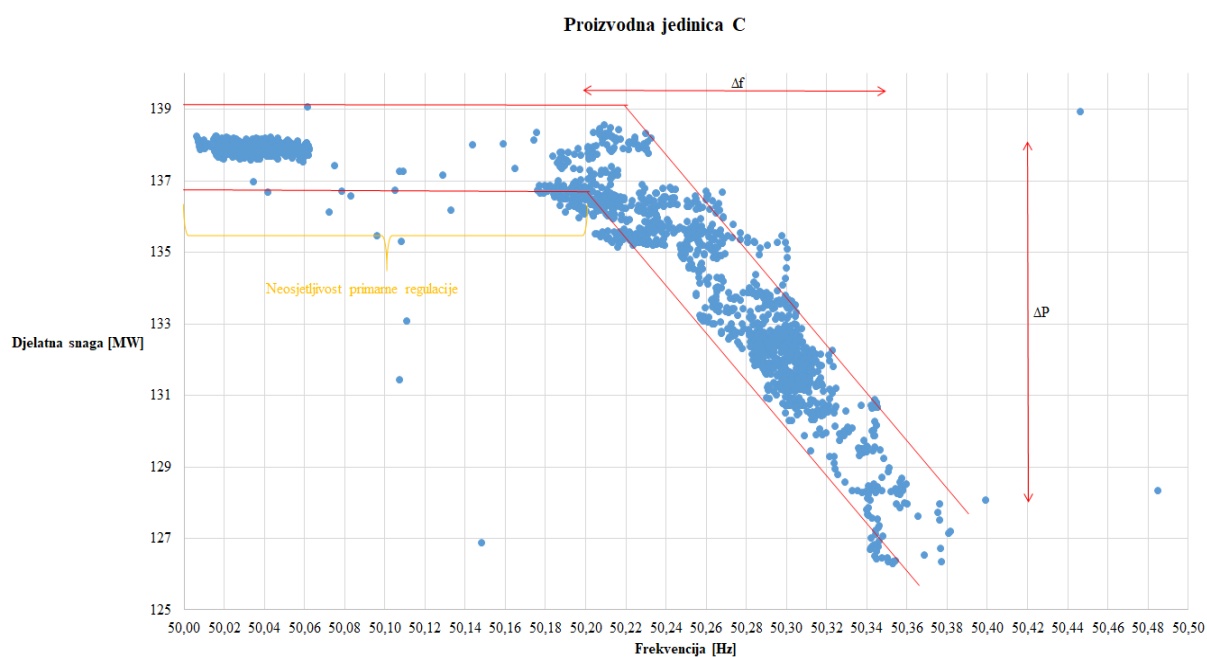
$$\sigma = -\frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P_p}{P_{pn}}} \cdot 100\% = -\frac{\frac{0,06}{50}}{\frac{-0,45}{20}} \cdot 100\% = 5,33\% \quad (6-1)$$

#### *Proizvodna jedinica C*

Na temelju slika 6.8. i 6.9. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica C u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.8. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.8., ako proizvodna jedinica C sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice C. Slika 6.9. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice C o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.9. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.8.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice C u vremenu.



**Slika 6.9.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice C o frekvenciji.

Proizvodna jedinica C sudjeluje u primarnoj regulaciji do određenog trenutka. Na slici 6.8. trenutak do kojeg je proizvodna jedinica C uključena u primarnu regulaciju označen je crvenim crticama. Ovo je primjer proizvodne jedinice koja prema zahtjevu OPS-a ne treba sudjelovati u primarnoj regulaciji, no primarni regulator te proizvodne jedinice ne smije biti blokiran/isključen, već ugođeni iznos neosjetljivosti primarnog regulatora mora biti veći ( $\pm 200$  mHz) [5].

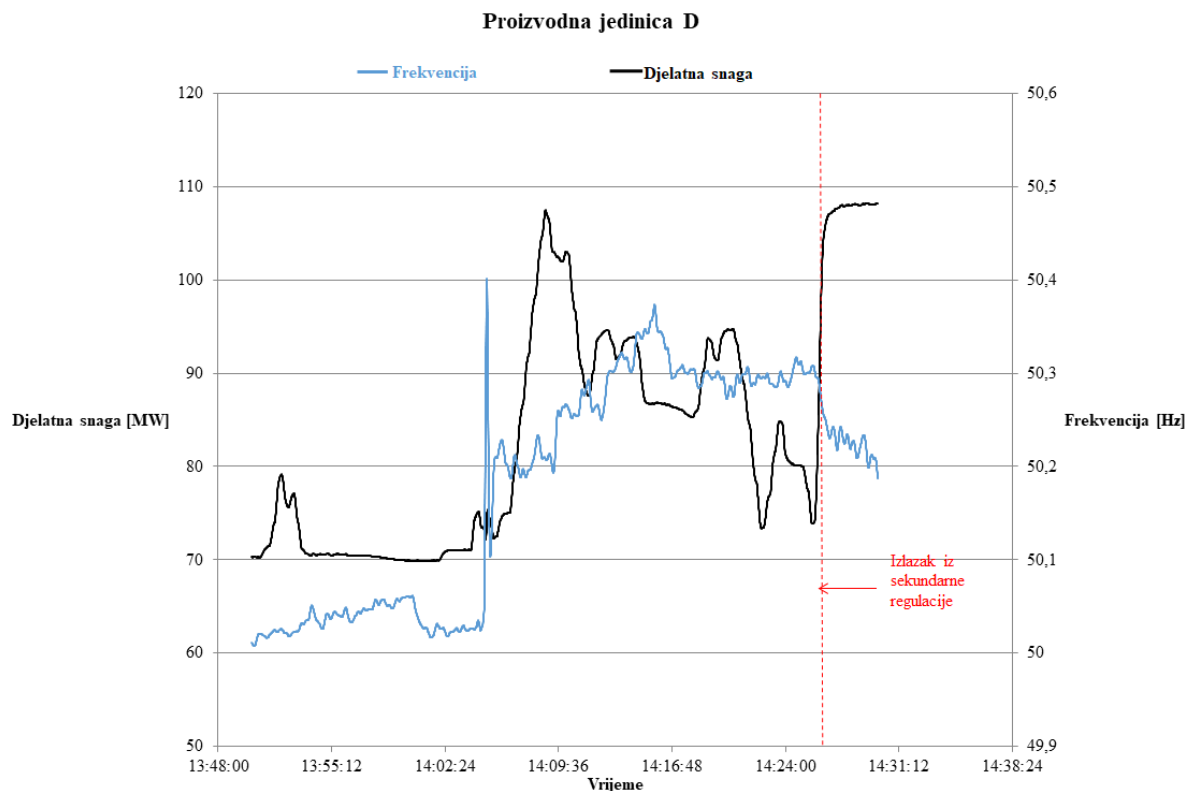
Sudjelovanje proizvodne jedinice C u primarnoj regulaciji jasnije je prikazano slikom 6.9. Na slici 6.9. je žutom bojom naznačena zona neosjetljivosti primarne regulacije, a s pomoću jednadžbe (6-2) određen je statizam proizvodne jedinice C:

$$\sigma = -\frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P_p}{P_{pn}}} \cdot 100\% = -\frac{\frac{0,15}{50}}{\frac{-10}{138}} \cdot 100\% = 4,14 \% \quad (6-2)$$

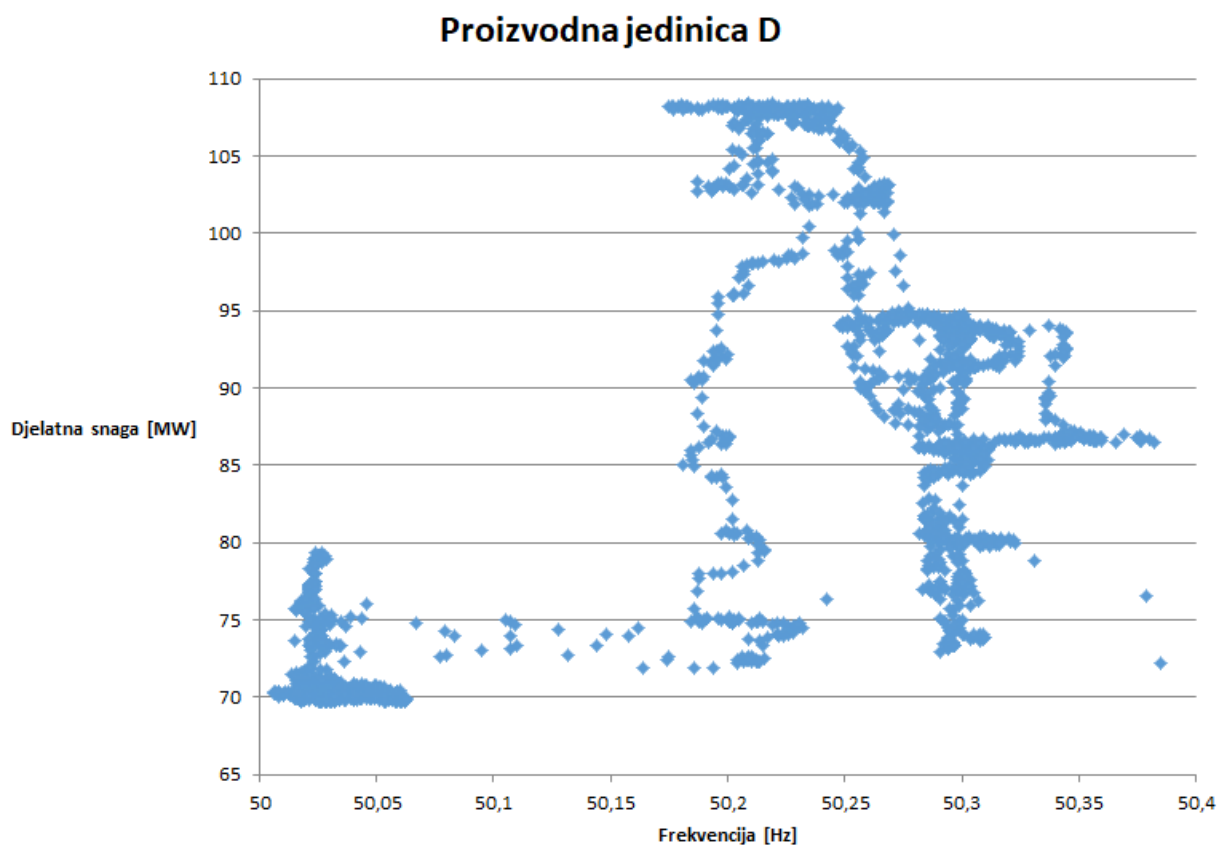
#### *Proizvodna jedinica D*

Na temelju slika 6.10. i 6.11. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica D u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.10. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.10., ako proizvodna jedinica D sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D. Slika 6.11. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.11. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.





**Slika 6.10.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D u vremenu.



**Slika 6.11.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji.

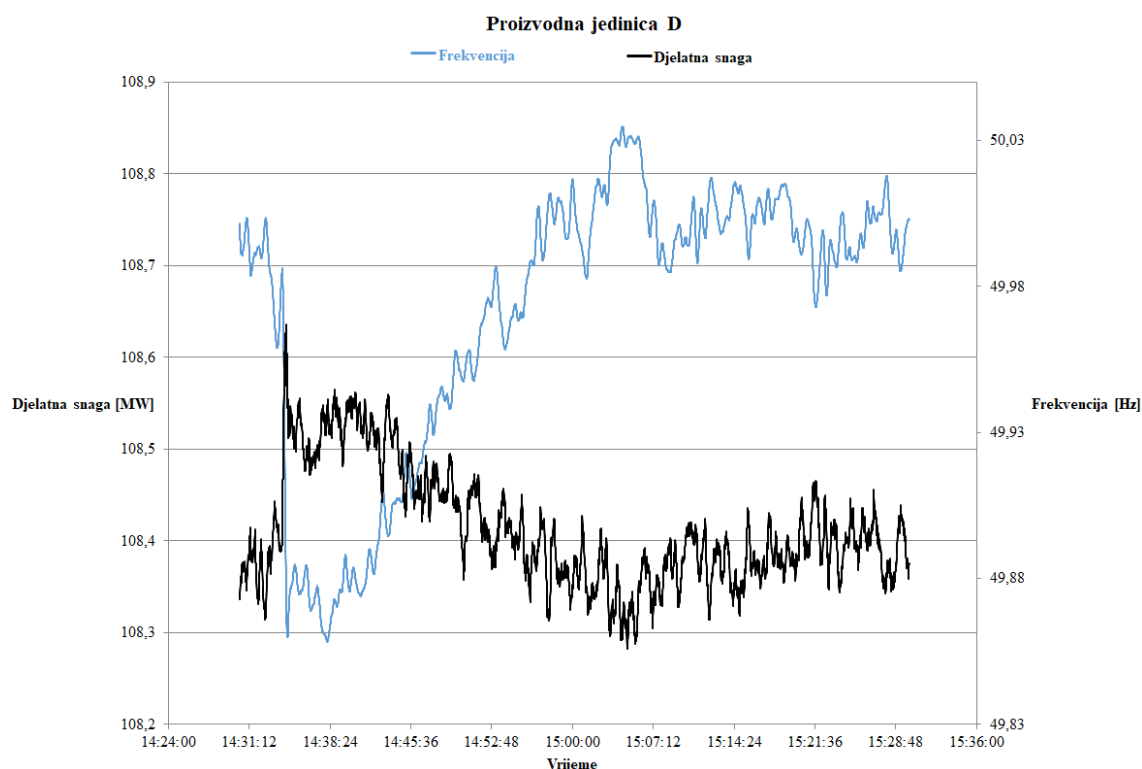
Proizvodna jedinica D ne sudjeluje u primarnoj regulaciji, jer kao što je vidljivo na slici 6.11. povećanjem frekvencije ne dolazi do smanjenja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D.

## 6.2. Poremećaj 2

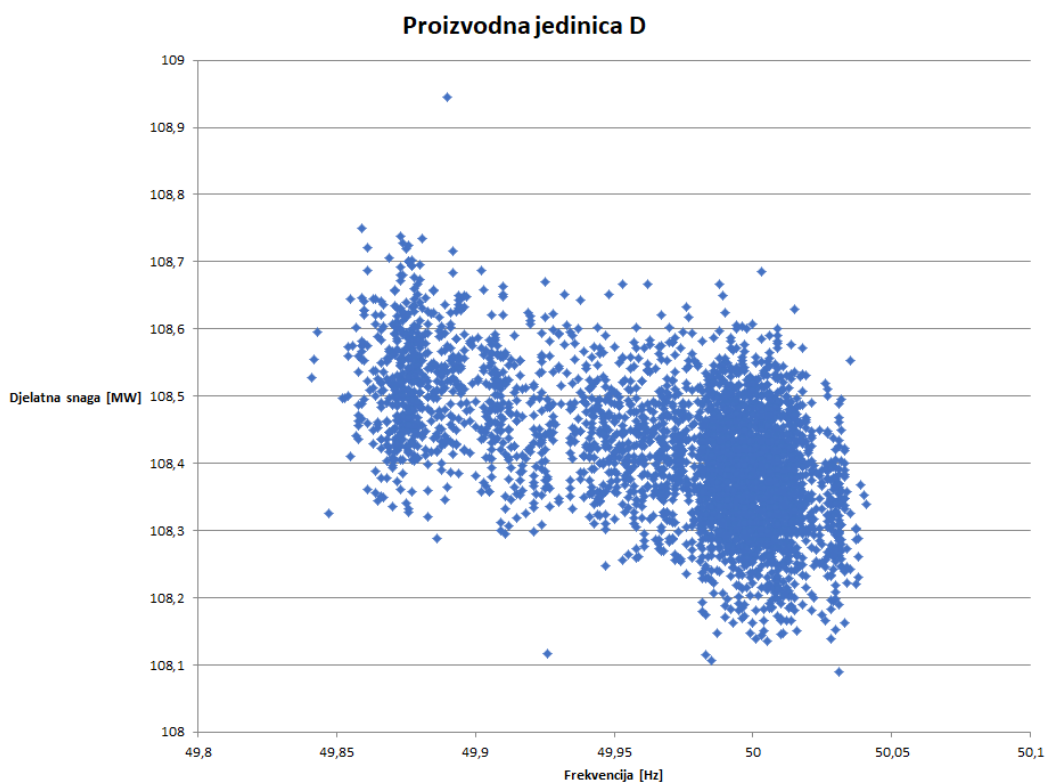
Za događaj zabilježen 17. svibnja 2021. nema službenih podataka (u nastavku teksta poremećaj 2), no pretpostavka je da je došlo do ispada određenih značajnih proizvodnih jedinica jer je zabilježeno smanjenje frekvencije na 49,88 Hz što je 120 mHz manje od nazivne vrijednosti frekvencije sustava. Za korekciju nastalog poremećaja i uspostavu nazivne frekvencije bilo je potrebno oko trideset pet minuta.

### *Proizvodna jedinica D*

Na temelju slika 6.12. i 6.13. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica D u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.12. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.12., ako proizvodna jedinica D sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D. Slika 6.13. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.13. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.12.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D u vremenu.



**Slika 6.13.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji.

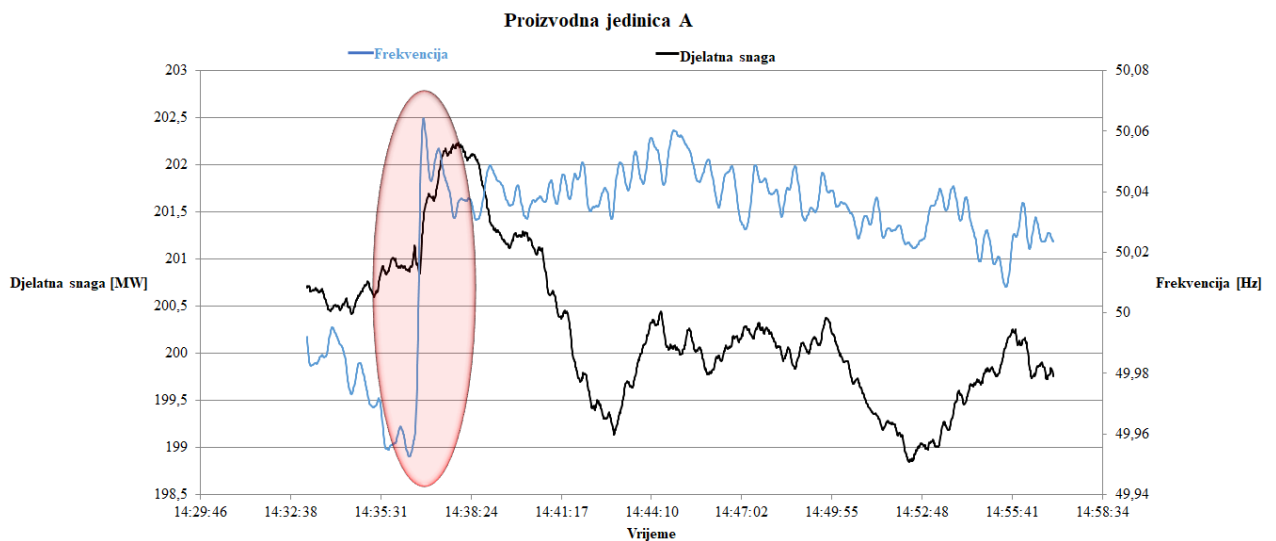
Iako bi se prema slikama 6.12. i 6.13. moglo zaključiti da proizvodna jedinica D sudjeluje u primarnoj regulaciji jer su promjene frekvencije djelomično popraćene promjenama izlazne djelatne snage u suprotnom smjeru, no povuču li se pravac na slici 6.12. statizam je približno jednak 80 %. Dakle, proizvodna jedinica D ne sudjeluje u primarnoj regulaciji.

### 6.3. Poremećaj 3

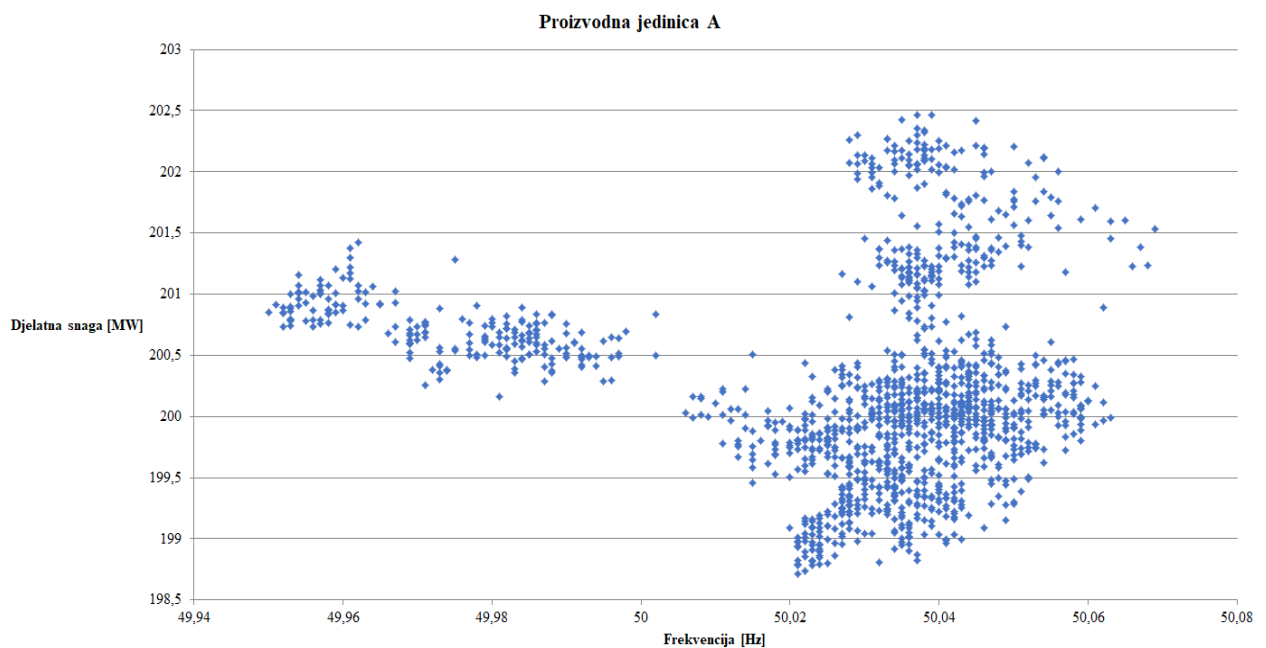
Događaj zabilježen 24. srpnja 2021. (u nastavku teksta poremećaj 3) označava poremećaj uslijed kojeg je došlo do odvajanja španjolskog i francuskog EES-a od sinkronog sustava kontinentalne Europe u 16:36 prema centralnom europskom ljetnom računanju vremena (CEST, engl. *Central European Summer Time*). Oba EES-a su vraćena u normalan pogon u 17:09 CEST. U grafičkim analizama korišteno je vrijeme prema UCT-u (engl. *Coordinated Universal Time*) koje je prema dva sata manje u odnosu na CEST. Trenutno je u tijeku istraga i provjera je li poremećaj nastao na prijenosnim vodovima zbog šumskog požara. Frekvencija sustava se povisila s 49,96 Hz na 50,07 Hz [23].

### Proizvodna jedinica A

Na temelju slika 6.14. i 6.15. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica A u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.14. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.14., ako proizvodna jedinica A sudjeluje u primarnoj regulaciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A. Slika 6.15. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.15. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.14.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A u vremenu.

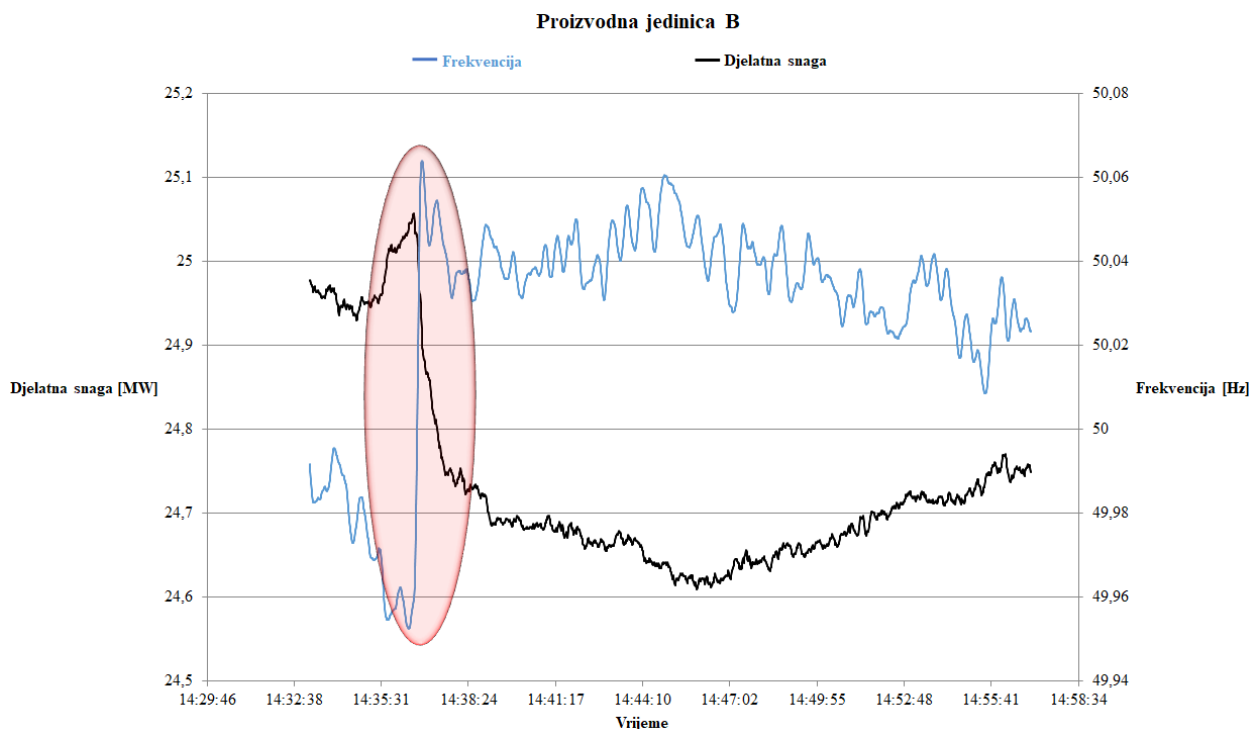


**Slika 6.15.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A o frekvenciji.

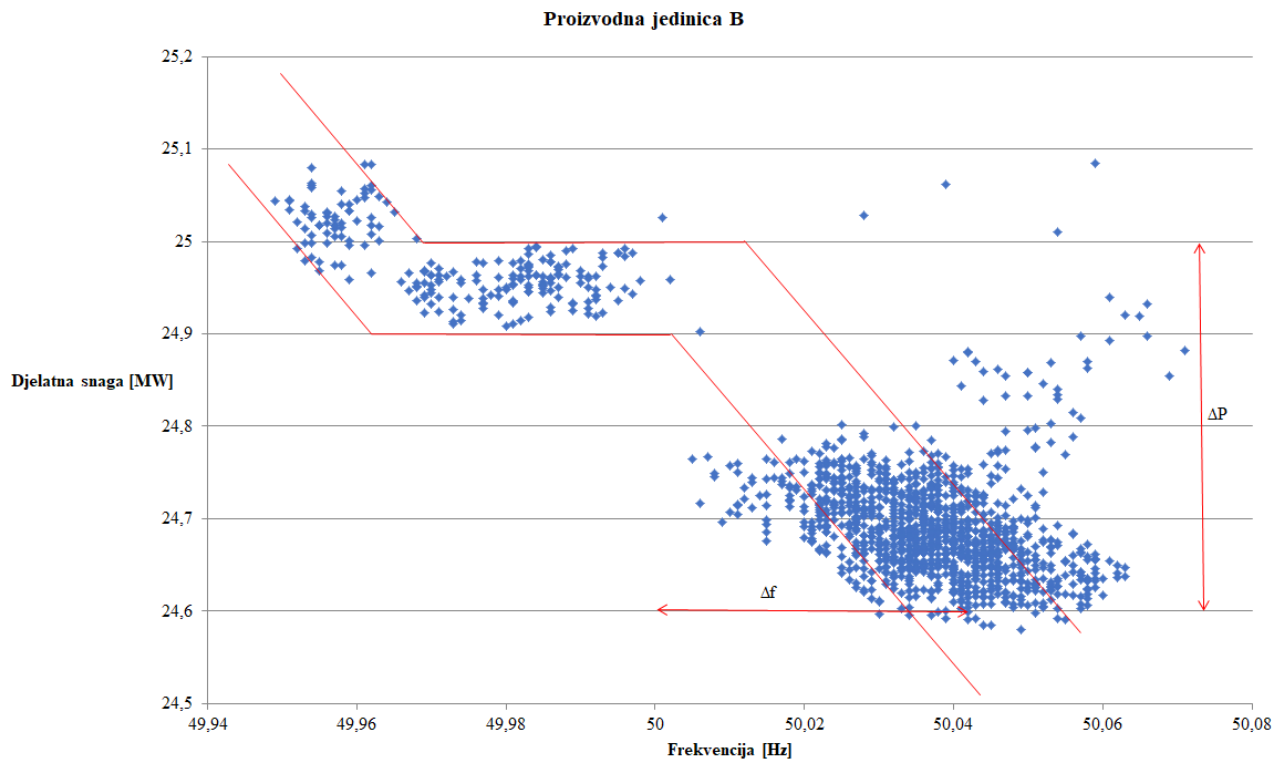
Na slici 6.14. crvenom je bojom naznačeno naglo povećanje frekvencije koje nije izazvalo naglo smanjenje izlazne djelatne snage proizvodne jedinice A. Dakle, može se zaključiti da proizvodna jedinica A ne sudjeluje u primarnoj regulaciji frekvencije. Do istog se zaključka dolazi slikom 6.15.

#### *Proizvodna jedinica B*

Na temelju slika 6.16. i 6.17. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica B u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.16. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.16., ako proizvodna jedinica B sudjeluje u primarnoj regulaciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B. Slika 6.17. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.17. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.16.** *Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B u vremenu.*



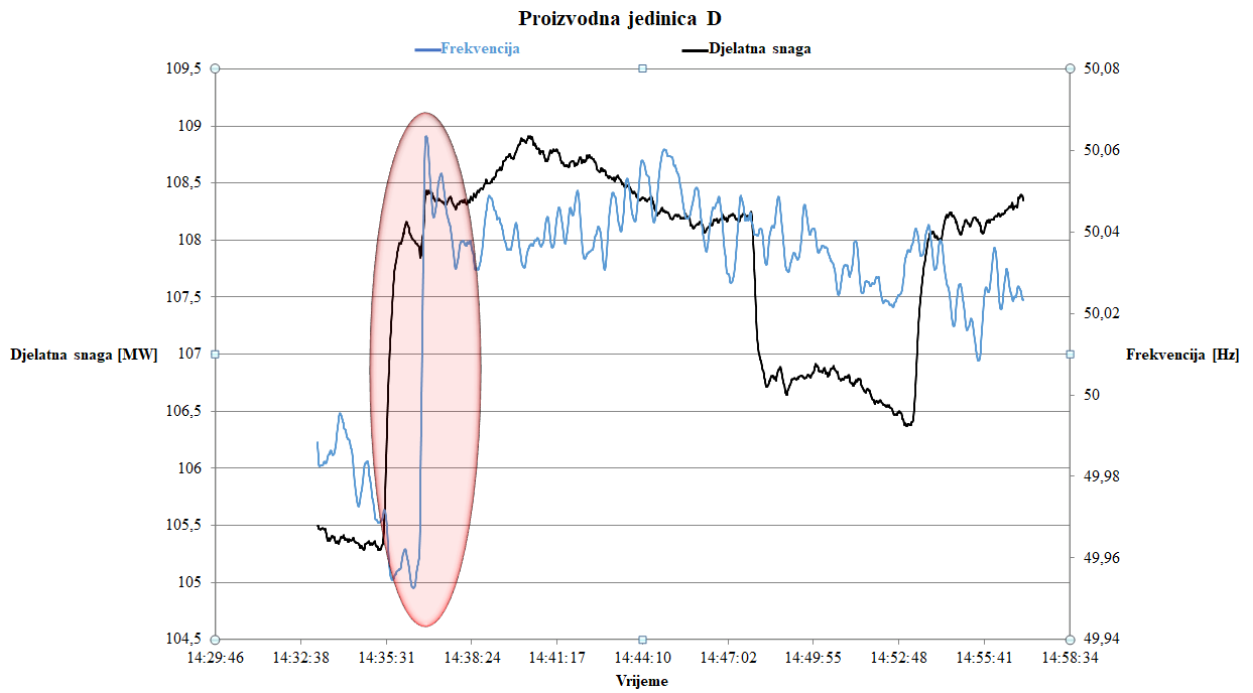
**Slika 6.17.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice B o frekvenciji.

Proizvodna jedinica B sudjeluje u primarnoj regulaciji frekvencije. Na slici 6.16. područje označeno crvenom bojom prikazuje da se s naglim povećanjem frekvencije izlazna djelatna snaga proizvodne jedinice B smanjuje. Slikom 6.17. moguće je uvidjeti da primarni regulator proizvodne jedinice B ima ugođenu mrtvu zonu te je moguće odrediti statizam primarnog regulatora pomoću jednadžbe (6-3).

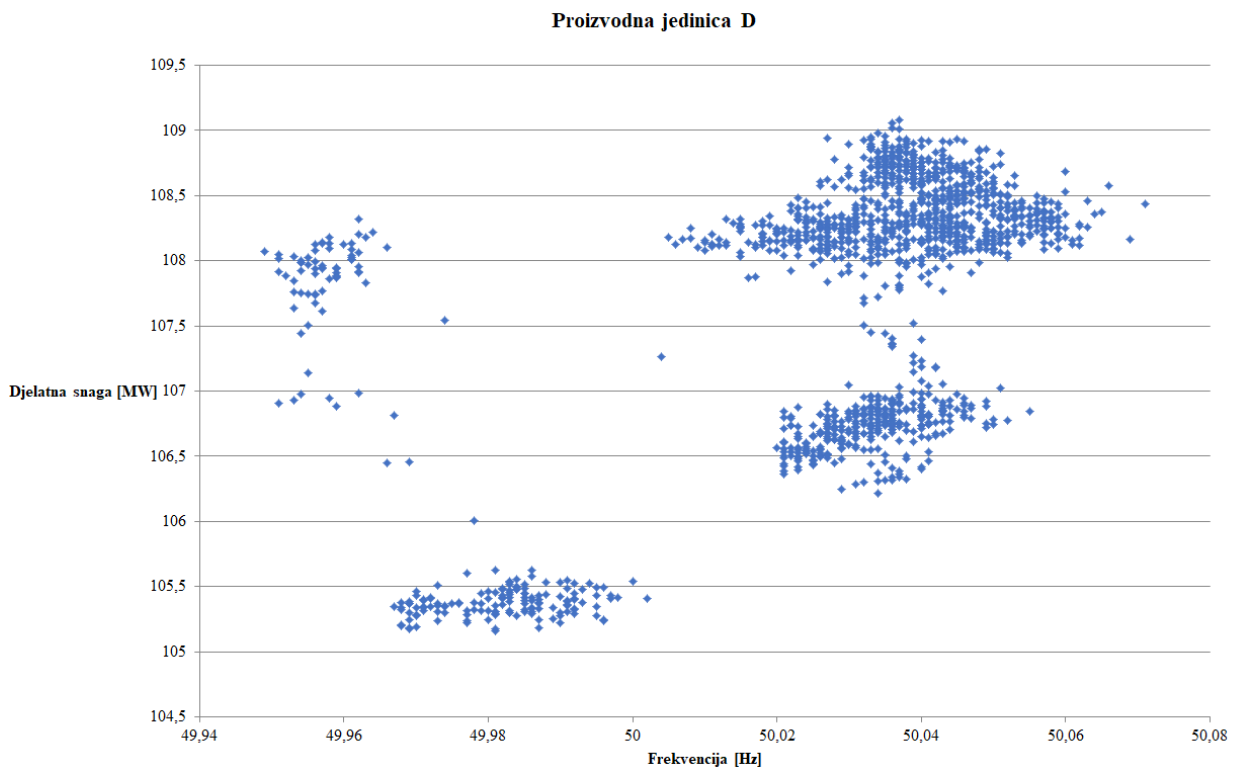
$$\sigma = -\frac{\frac{\Delta f}{f_n}}{\frac{\Delta P_p}{P_{pn}}} \cdot 100\% = -\frac{\frac{0,045}{50}}{\frac{-0,4}{25}} \cdot 100\% = 5,63 \%$$
 (6-3)

#### Proizvodna jedinica D

Na temelju slika 6.18. i 6.19. utvrđuje se sudjeluje li proizvodna jedinica D u primarnoj regulaciji frekvencije nastankom poremećaja u sustavu. Slika 6.18. prikazuje izlaznu djelatnu snagu proizvodne jedinice u vremenu i zabilježenu frekvenciju u vremenu. Prema slici 6.19., ako proizvodna jedinica D sudjeluje u primarnoj frekvenciji trebalo bi prilikom povećanja/smanjenja frekvencije doći do smanjenja/povećanja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D. Slika 6.19. prikazuje grafičku ovisnost izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji. Prema prikazu sa slike 6.19. moguće je odrediti statizam proizvodne jedinice i postojanje mrtve zone ukoliko je ugođena.



**Slika 6.18.** Grafički prikaz promjene frekvencije u vremenu i promjene izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D u vremenu.



**Slika 6.19.** Grafički prikaz ovisnosti izlazne djelatne snage proizvodne jedinice D o frekvenciji.

Crvenom bojom na slici 6.18. je naznačeno naglo povećanje frekvencije uslijed čega nije došlo do smanjenja izlazne djelatne snage proizvodne jedinice. Također, na slici 6.19. se ne vide obrisi karakteristike primarnog regulatora. Stoga se zaključuje da proizvodna jedinica D ne sudjeluje u primarnoj regulaciji.



## 7. ZAKLJUČAK

Utvrđivanje sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji pomoću WAM sustava nadzora i obrade podataka, suvremena je metoda koja daje zadovoljavajuće rezultate.

Frekvencija je najstroži kriterij kvalitete električne energije i posljedica je dinamičkog usuglašavanja proizvodnje i potrošnje djelatne snage iz svih istovremenih događaja. Promjene potrošačkih zahtjeva te mogući kvarovi u sustavu dovode do promjena frekvencije koje je nužno regulirati. Regulacija frekvencije podrazumijeva kontroliranje frekvencije sustava s ciljem uspostave ravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage u realnom vremenu. U tom procesu, prva nastupa primarna regulacija. Primarna regulacija je automatski regulacijski zahvat otvaranja i zatvaranja regulacijskih ventila koji obavljaju primarni regulatori turbina s ciljem regulacije proizvodnje djelatne snage odnosno uspostave ravnoteže proizvodnje i potrošnje djelatne snage. Prema važećim mrežnim pravilima, svaka hidro proizvodna jedinica snage veće ili jednake 10 MW mora nuditi uslugu primarne regulacije frekvencije. Isto vrijedi i za svaku termo proizvodnu jedinicu snage veće ili jednake 30 MW.

U ovome radu, prikazano je utvrđivanje sudjelovanja proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije pomoću WAM sustava nadzora i obrade podataka. Na temelju naknadne obrade prikupljenih i pohranjenih podataka, ocijenjeno je sudjeluje li proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije. WAM sustav olakšava proces utvrđivanja sudjeluje li proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije naspram tradicionalnih SCADA/EMS sustava. Razlog tomu je visoka frekvencija uzorkovanja te GPS pridjeljivanje vremenske oznake uzorkovanim signalima. Uz navedeno, WAM sustav pruža dinamičku sliku sustava što omogućuje bolju detekciju potencijalnih kvarova, a samim time olakšava nadzor i vođenje sustava. WAM sustav primjenjuje operator prijenosnog sustava čiji je zadatak utvrđivanje sudjelovanja proizvodne jedinice, odnosno ocjena kvalitete pružanja primarne regulacije frekvencije. Nadalje, predstavljeno je moguće poboljšanje primarnog regulacijskog odziva pomoću dijeljenja RoCoF vrijednosti (WARS) između regulacijskih područja koje će tek dobiti na značaju ako se integracija OIE nastavi u ovom smjeru.

Za četiri proizvodne jedinice i tri različita poremećaja prikazani su rezultati sudjelovanja u primarnoj regulaciji. Na temelju promjene djelatne snage uslijed promjene frekvencije utvrđeno je da proizvodne jedinice B i C sudjeluju u primarnoj regulaciji frekvencije. Posljedično, sljedeći korak trebao bi biti utvrđivanje razloga zašto preostale dvije proizvodne jedinice ne sudjeluju u primarnoj regulaciji frekvencije s obzirom na zahtjeve mrežnih pravila. Zaključno, WAM sustav pokazao se kao pogodno rješenje za utvrđivanje statusa kvalitete pružanja primarne regulacije frekvencije.

## Literatura

- [1] W.B., Carlson. *Tesla: Izumitelj električnog doba*. Školska knjiga, Zagreb, 2015.
- [2] M., Rekić, N., Mandić i R., Rubeša. *Može li mrežni sat kasniti*. Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ. 13. simpozij o sustavu vođenja EES-a, sv. 00-00, Rovinj, 2018.
- [3] L., Józsa. *Vođenje pogona elektroenergetskog sustava*. Elektrotehnički fakultet: Zavod za elektroenergetiku. Osijek, 2018.
- [4] I., Kuzle, D., Bošnjak i S., Tešnjak. *Pogon i vođenje elektroenergetskog sustava*. Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ. 8. Savjetovanje HRO Cigre, sv. C2-04, Cavtat, 2007.
- [5] Hrvatski operator prijenosnog sustava. *Mrežna pravila prijenosnog sustava*. »Narodne novine«, broj 22/13, 102/15 i 68/18.
- [6] Uredba komisije (EU) 2017/1485 o uspostavljanju smjernica za pogon elektroenergetskog prijenosnog sustava. Nezakonodavni akti, Službeni list Europske unije, kolovoz 2017.
- [7] I., Ivanković, R., Rubeša, M., Rekić, T., Plavšić i D., Brnobić. *Monitoring primarne regulacije frekvencije zasnovano na sinkroniziranim mjerenjima fazora*. Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ. 14. savjetovanje HRO CIGRÉ, sv. X-XX, Šibenik, 2019.
- [8] O., Kuljača, K., Horvat, T., Plavšić, D., Nemeć i M., Stojsavljević. *Prijedlog opsega podataka za monitoring proizvodnih jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije*. Polytechnic&Design, br.1, sv.2, 2014.
- [9] M., Rekić, Z., Bunčec, I., Šturlić, R., Rubeša, I., Ivanković i T., Šensić. *Nove primjene integracije sinkroniziranih mjerenja fazora u SCADA sustav*. Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ. 14. simpozij o vođenju EES-a, sv. X-XX, Opatija, 2020.
- [10] H.R., Chamorro, F.R.S., Sevilla, F., Gonzalez-Longatt, K., Rouzbehi, H., Chavez i V.K., Sood. *Innovative primary frequency control in low- inertia power systems based on wide-area RoCoF sharing*. IET Journals, sv.2, str. 151-160, ožujak 2020.
- [11] M., Persson i P., Chen. *Frequency evaluation of the Nordic power system using PMU measurements*. IET Journals, sv. 11, str. 2879-2887, srpanj 2017.
- [12] Hrvatski operator prijenosnog sustava. *Verifikacijski postupak za pružanje pomoćnih usluga aFRR i mFRR*. Zagreb, rujan 2018.
- [13] K., Benčić i V., Nemeć. *Dinamičko modeliranje fleksibilnih mikromreža i metode određivanja granica sigurnosti prilikom prelaska u otočni pogon*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2016.

- [14] H., Požar. *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima*. I svezak; Drugo, prošireno i potpuno pretrađeno izdanje. Informator, Zagreb, 1983.
- [15] K., Vrdoljak. *Primjena kliznog režima upravljanja u sekundarnoj regulaciji frekvencije i djelatne snage razmjene elektroenergetskih sustava*. Doktorska disertacija, Zagreb, 2009.
- [16] M., Sanduleac, A.M., Dumitrescu, L., Toma, C., Stanescu i M., Albu. *On the frequency measurement in Wide Area Measurement and Control Systems*. ATEE, The 10th International symposium on advanced topics in electrical engineering, Bukurešt, ožujak, 2017.
- [17] S., Nedić. *Nadzor, zaštita i vođenje elektroenergetskog sustava zasnovano na WAM platformi*. Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, veljača 2007.
- [18] I., Ivanković, R., Rubeša, D., Brnobic i M., Rekić. *Using Phasor Measurement Unit in Control Room for Monitoring Frequency Primary Regulation of Generator Unit*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.
- [19] M., Krpan. *Sudjelovanje vjetroelektrana u regulaciji frekvencije elektroenergetskog sustava*. Kvalifikacijski doktorski ispit. Fakultet elektrotehnike i računarstva: Zavod za visoki napon i energetiku, Zagreb, 2018.
- [20] T., Baškarad, N. Debrecin, J. Đaković i sur. *Regulacija frekvencije i radne snage te važnost konstante tromosti u elektroenergetskom sustavu s velikim udjelom vjetroelektrana*. Izvješčaj v.1.0. Windlips, Zagreb, 2019.
- [21] T., Baškarad, J., Đaković, I., Ivanković, N., Holjevac i I., Kuzle. *Važnost RoCoF-a u elektroenergetskim sustavima s visokim udjelom elektrana temeljenih na izmjenjivačima*. Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRÉ. 14. simpozij o vođenju EES-a, sv. X-XX, Opatija, 2020.
- [22] ENTSO-E (26.01.2021.) *System separation in the Continental Europe Synchronous Area on 8 January 2021 - 2nd update*. <https://www.entsoe.eu/news/2021/01/26/system-separation-in-the-continental-europe-synchronous-area-on-8-january-2021-2nd-update/> [pristupljeno: 14.9.2021.]
- [23] ENTSO-E (24.7.2021.) *A short outage of French-Spanish interconnection on 24 July 2021*. <https://www.entsoe.eu/news/2021/07/24/a-short-outage-of-french-spanish-interconnection-on-24-july-2021/> [pristupljeno: 14.9.2021.]

## Popis kratica

EES	elektroenergetski sustav
UCTE	prijašnji naziv za sinkroni sustav kontinentalne Europe (od engl. <i>Union for the Coordination of the Transmission of Electricity</i> )
EESRH	elektroenergetski sustav Republike Hrvatske
OPS	operator prijenosnog sustava
WAM	širokopojasni nadzor (od engl. <i>Wide Area Monitoring</i> )
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava
RoCoF	brzina promjene frekvencije (od engl. <i>Rate of Change of Frequency</i> )
FCR	primarna regulacija ili pričuva za održavanje frekvencije (od engl. <i>Frequency Containment Reserve</i> )
aFRR	sekundarna regulacija ili pričuva za ponovnu uspostavu frekvencije s automatskim uključanjem (od engl. <i>Automatic Frequency Restoration Reserve</i> )
mFRR	tercijarna regulacija ili pričuva za ponovnu uspostavu frekvencije s ručnim uključanjem (od engl. <i>Manual Frequency Restoration Reserve</i> )
PMU	sinkrofazorski mjerni uređaj (od engl. <i>Phasor Measurement Unit</i> )
μPMU	mikro PMU
RTU	vrsta mjernog uređaja (od engl. <i>Remote Terminal Units</i> )
IED	vrsta mjernog uređaja (od engl. <i>Intelligent Electronic Devices</i> )
BCU	vrsta mjernog uređaja (od engl. <i>Bay Control Units</i> )
USM	vrsta mjernog uređaja (od engl. <i>Unbundled Smart Meter</i> )
SCADA	sustav nadzora, mjerenja i upravljanja (od engl. <i>Supervisory control and data acquisition</i> )
EMS	sustav upravljanja energijom (od engl. <i>Energy Management System</i> )
GPS	globalni položajni sustav (od engl. <i>Global Positioning System</i> )
A/D pretvornik	analogno/digitalni pretvornik
CPU	središnja upravljačka jedinica (od engl. <i>Central Processing Unit</i> )
PDC	koncentrator sinkrofazorskih podataka (od engl. <i>Phasor Data Concentrator</i> )
IEC	međunarodno elektrotehničko povjerenstvo (od engl. <i>International Electrotechnical Commission</i> )
IEEE	institut inženjera elektrotehnike i elektronike (od engl. <i>the Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
VN	visokonaponska strana

OIE	obnovljivi izvori energije
WARS	širokopojasno dijeljenje RoCoF vrijednosti (od engl. Wide Area RoCoF Sharing)
CoI	središte inercije (od engl. <i>Centar of Inertia</i> )
CEST	centralno europsko ljetnom računanje vremena (od engl. <i>Central European Summer Time</i> )
UCT	univerzalno svjetsko vrijeme (od engl. <i>Coordinated Universal Time</i> )

## Popis oznaka

$f$	frekvencija
$P$	djelatna snaga
$Q$	jalova snaga
$\varepsilon_{kin}$	kinetička energija
$J$	moment inercije
$\omega$	kutna brzina
$H$	inercijska konstanta
$\omega_n$	nazivna kutna brzina
$S_n$	nazivna prividna snaga
$H_{uk}$	ukupna inercijska konstanta
$S_{uk}$	ukupna instalirana prividna snaga
$\varepsilon_{uk}$	ukupna kinetička energija sustava
$t$	vrijeme
$P_p$	mehanička snaga turbine, snaga proizvodnje
$P_t$	električna snaga, snaga opterećenja
$f_0$	frekvencija praznog hoda
$f_{min}$	minimalna frekvencija
$P_{p,max}$	maksimalna proizvedena snaga
$x$	srednja statičnost
$SGP$	standardna devijacija slučajnih oscilacija snage potrebne za regulaciju frekvencije
$M$	konstanta ovisna o kvaliteti upravljanja
$P_{max}$	maksimalno opterećenje sustava
$PRF$	snaga potrebna za regulaciju frekvencije
$\Delta f$	promjena frekvencije
$k_s$	regulacijska energija sustava
$SRP$	iznos snage pričuve sekundarne regulacije
$a$ i $b$	konstante ovisne o promatranom regulacijskom području za izračun iznosa snage pričuve sekundarne regulacije
$\Delta P$	promjena djelatne snage
$f_n$	nazivna, nominalna ili zadana frekvencija

$P_n$	nazivna djelatna snaga
$\Delta P_p$	promjena djelatne snage proizvodnje
$\Delta P_t$	promjena djelatne snage potrošnje
$k_p$	regulacijska energija proizvodnje
$\sigma$	statizam
$k_t$	regulacijska energija potrošnje
$P_{pn}$	nazivna djelatna snaga proizvodnje
$P_{tn}$	nazivna djelatna snaga potrošnje
$P_d$	iznos djelatne snage poremećaja
$P_{hr,t}$	doprinos hrvatskog EES-a rezervi primarne regulacije
$FCR_{interkonekcije}$	vrijednost potrebne primarne regulacijske pričuve u cijeloj interkonekciji
$G_{hr,t-2}$	proizvodnja električne energije u EESRH dvije godine prije promatrane
$L_{hr,t-2}$	potrošnja električne energije u EESRH dvije godine prije promatrane
$G_{i,t-2}$	proizvodnja električne energije u interkonekciji dvije godine prije promatrane
$L_{i,t-2}$	potrošnja električne energije u interkonekciji dvije godine prije promatrane

## Sažetak

U ovom radu opisane su osnove regulacije frekvencije u izoliranom sustavu te interkonekciji s fokusom na primarnu regulaciju frekvencije. Predstavljeni su zahtjevi mrežnih pravila prema proizvodnim jedinicama vezani uz primarnu regulaciju te obveze elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske prema interkonekciji. Nadalje, opisan je WAM sustav te su navedene brojne prednosti koje nudi u odnosu na tradicionalne SCADA/EMS sustave. U simulacijskom dijelu ovog rada utvrđivao se status rada četiri proizvodne jedinice u primarnoj regulaciji frekvencije uslijed tri različita poremećaja u interkonekciji. Pomoću navedenog WAM sustava, mjerila se djelatna snaga i frekvencija proizvodne jedinice u istom vremenskom trenutku. Na temelju grafičkih prikaza ovisnosti djelatne snage o vremenu i frekvencije o vremenu te međusobne ovisnosti djelatne snage i frekvencije, promatralo se sudjeluje li proizvodna jedinica u primarnoj regulaciji frekvencije. Dobiveno je da dvije od četiri proizvodne jedinice sudjeluju u primarnoj regulaciji frekvencije te se za njih izračunao statizam.

**Ključne riječi:** *primarna regulacija, mrežna pravila, PMU, WAM, WARS*



## **Abstract**

This paper describes the basics of frequency control in an isolated system and in interconnection with a focus on primary frequency control. The requirements of network rules towards generation units related to primary control and obligations of power system of the Republic of Croatia towards interconnection are presented. Additionally, WAM system is described and numerous advantages that it offers in comparison with traditional SCADA/EMS systems are listed. In the simulation part of this paper is determined the operating status of four generation units in the primary frequency control due to three different interconnection disturbances. Using the above WAM system, active power and frequency of generation unit were measured at the same time. Based on graphical representations of the dependency of active power on time, frequency on time and interdependence of active power and frequency, it was observed whether the generation unit participates in primary frequency control. Results indicated that two of four generation units participate in the primary frequency control and for those two, speed droop was calculated.

**Key words:** *primary frequency control, network rules, PMU, WAM, WARS*

## **Životopis**

Petar Vinković rođen je u Osijeku 1997. godine. Živi i odrasta u mjestu Tomašanci. Osnovnoškolsko obrazovanje stječe u Osnovnoj školi Gorjani, a zatim upisuje i završava Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer tehničar za računalstvo. Sveučilišni preddiplomski studij, smjer Elektrotehnika upisuje 2016. na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Godine 2019. stječe akademski naziv sveučilišni prvostupnik (lat. baccalaureus) inženjer elektrotehnike te iste godine na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija upisuje diplomski studij smjer Elektroenergetika s opredjeljenjem na elektroenergetske sustave.