

NAPREDNA NADGRADNJA KONVENCIONALNE ZAŠČITE POD-FREKVENČNEGA RAZBREMENJEVANJA

Tadej Škrjanc^{1*}, Rafael Mihalič¹, Urban Rudež¹

¹ – Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
tadej.skrjanc@fe.uni-lj.si rafael.mihalic@fe.uni-lj.si urban.rudez@fe.uni-lj.si

Povzetek

Več desetletne izkušnje uporabe pod-frekvenčne zaščite razkrivajo, da so obstoječe sheme pod-frekvenčne zaščite hitre in robustne, a zaradi statičnih nastavitvev nesposobne prilagajanja svojega odziva spremenljivim obratovalnim pogojem. Posledica tega je, da v situacijah za katere zaščita ni bila dizajnirana, pride do napačno velikega odklopa porabnikov, kar pa lahko vodi v razpad elektroenergetskega sistema. Ta težava postaja z leti čedalje bolj izrazita, saj so obratovalni pogoji v sodobnem elektroenergetskem sistemu ves čas podvrženi hitrim in nepredvidljivim spremembam, ki jih povzročajo na novo, preko konverterja priključene proizvodne enote. Torej obstaja potrebna po rešitvi, ki bo omogočala zaščiti pod-frekvenčnega razbremenjevanja bolj natančno prilagajanje primanjkljaja delovne moči v sistemu v katerihkoli pogojih. S praktičnega in ekonomskega stališča je zaželeno postopno uveljavljanje izboljšav shem pod-frekvenčnega razbremenjevanja, saj na ta način ne ogrožamo stabilnosti elektroenergetskega sistema. Tako v tem članku predstavimo učinkovito nadgradnjo obstoječega koncepta, ki po eni strani zadosti obema zahtevama, po drugi strani pa je še vedno v skladu z zahtevami ENTSO-E Policy 5. Ideja je, da poleg obstoječih konvencionalnih zaščitnih relejev dodatno uporabimo manjše število pametnih elektronskih naprav, opremljenih s funkcionalnostjo strojnega učenja. To nam omogoči, da ohranimo obstoječe nastavitve pod-frekvenčne zaščite in vse njene pozitivne lastnosti, pri čemer pa uvedemo novo dodatno dinamično stopnjo. Le-ta se aktivno vključi v razbremenjevanje, ko konvencionalna zaščita že odpravi večino primanjkljaja delovne moči in je potrebna le bolj natančna nastavitve količine za odklop. Predlagani algoritem najprej s pomočjo metode glavnih komponent in k-najbližjih sosedov prepozna relevantne vzorce obnašanja frekvence ter s pomočjo modela frekvenčnega odziva elektroenergetskega sistema in metode najmanjših kvadratov pripravi napoved frekvenčnega poteka nekaj sekund vnaprej. Temu sledi določitev pričakovanega časa in frekvenčne meje do naslednje statične stopnje razbremenjevanja ter prilagajanje nastavitvev. Rezultati kažejo, da je predlagana rešitev ekvivalentna konvencionalni shemi z več kot 10 stopnjami razbremenjevanja.

Ključne besede:

stabilnost elektroenergetskega sistema, prilagodljivo pod-frekvenčno razbremenjevanje, metoda glavnih komponent, pametna omrežja, otočno obratovanje, pametna elektronska naprava.

AN ADVANCED UPGRADE OF CONVENTIONAL UNDER-FREQUENCY LOAD SHEDDING PROTECTION

Abstract

Decades of experience with under-frequency protection show that existing under-frequency protection schemes, while fast and robust, are unable to adjust their response to volatile operating conditions due to static settings. This results in inadequately sized load shedding in situations for which the protection is not designed, which can lead to collapse of power system. Over the years, this problem is becoming more and more evident as operating conditions in the modern power system are constantly subject to rapid and unpredictable changes caused by newly connected inverter-based generation sources. Thus, there is a need for a solution that enables the under-frequency protection to more accurately control the active power deficit under all conditions. From a practical and economic point of view, it is desirable to improve the under-frequency protection gradually, as in this way we do not jeopardize the stability of the power system. Therefore, in this paper therefore we present an effective upgrade of the existing approach, which on the one hand satisfies both requirements and on the other hand meets the requirements of ENTSO-E Policy 5. The idea is to use, in addition to the existing conventional protection relays, a smaller number of intelligent electronic devices equipped with the machine learning function. In this way, we can keep the existing settings of the under-frequency protection and all its positive features, while introducing an additional dynamic load shedding stage. This dynamic stage is actively involved in load shedding when the conventional protection has already eliminated most of the active power deficit and only more precise load shedding is required. The proposed algorithm first uses principal component analysis and

the k-nearest neighbor method to identify relevant frequency response patterns, and uses the frequency response model of the power system in combination with the least squares method to construct a frequency curve a few seconds in advance. Then, it determines the expected time and frequency limit for the next static load shedding stage and adjusts the settings. The results show that the proposed solution is equivalent to a conventional scheme with more than 10 load shedding stages.

Keywords:

power system stability, adaptive under-frequency load shedding, principal component analysis, smart grids, island operation, intelligent electronic device.

1 UVOD

Elektroenergetski sistem (EES) je eden od največjih umetnih sistemov kar jih je ustvaril človek in omogoča kakovost življenja, ki ga človeštvo še ni imelo. Električna energija je globoko vpeta v naše vsakdanje življenje zato ima vsak dolgotrajen izpad velike negativne družbene in gospodarske posledice [1]. To je tudi razlog zakaj si elektroenergetiki nenehno prizadevajo izboljšati njegovo zmogljivost in zanesljivost. Da ublažimo posledice okvar in najhujših incidentov v EES, uporabljamo systemske sheme za zaščito integritete EES (ang. *System Integrity Protection Schemes*, SIPS). Eden od zaščitnih ukrepov, povezanih s SIPS, je tudi zagotavljanje frekvenčne stabilnosti EES s pomočjo zaščite pod-frekvenčnega razbremenjevanja (PFR) [2]. Glavni cilj PFR je obnovitev ravnovesja med proizvedeno in porabljeno delovno močjo po nastanku velikega primanjkljaja, kar pa doseže s pomočjo odklapanja bremen.

Po mnogo letih uporabe PFR zelo dobro poznamo tako pozitivne kot tudi negativne lastnosti obstoječe (tj. konvencionalne/statične) sheme. Pozitivne so njena hitrost, robustnost in zanesljivost negativne pa togost in pasivnost. Analiza preteklih dogodkov je razkrila, da zaradi statičnih nastavitvev obstoječe PFR taktike običajno niso sposobne obvladovati primanjkljaja moči z zadovoljivo natančnostjo [3]. Čeprav se preverjanje in prilagajanje njihovih nastavitvev izvaja periodično vsako leto, pa na tak način ne zajamemo sprememb v pogojih delovanja, ki se dogajajo na dnevnem, tedenskem ali celo sezonskim nivoju. Tovrstne variacije postajajo čedalje bolj pogosta, za kar je razlog predvsem razvoj in dinamika trgov z električno energijo ter povečanje števila obnovljivih virov katerih proizvodnja je nepredvidljiva. Torej, če želimo, da se bo PFR uspešno prilagodila na novo nastale razmere, moramo sprejeti določene ukrepe in spremeniti koncept statične PFR.

1.1. Pregled obstoječih metod

Na podlagi [4], ki poda celovit pregled najnovejših PFR shem, lahko zaključimo, da obstajajo nekako trije pristopi za reševanje problema slabe prilagodljivosti konvencionalne PFR.

Prvi pristop je povečanje števila statičnih stopenj PFR, kar pa se izkaže za učinkovito le do določene mere. Vzrok za to je, da se zaradi lastnih in/ali namernih časovnih zakasnitev, statične stopnje PFR lahko začnejo prekrivati. Tako se v praksi običajno omeji njihovo število (npr. [2]) in shem z več kot 10 stopnjami skorajda ni moč najti [5]. Poleg tega bi takšna nadgradnja zahtevala ponovno nastavljanje celotnega nabora relejev, kar pa je dolgotrajen postopek.

Drugi pristop vključuje uporabo WAMS (ang. *Wide Area Measurement System*), ki zagotovi številne informacije potrebne za boljše odločanje. Tako so se pojavili napredni pristopi, ki določijo potrebno količino za odklop na podlagi: i) nihajne enačbe [6,7], ii) modela frekvenčnega odziva sistema (ang. *System Frequency Response*, SFR) [8], iii) sledenja pretoku delovne moči [9], iv) umetnih nevronske mreže (ang. *Artificial Neural Networks*, ANN) [10], v) mehke logike (ang. *Fuzzy Logic*, FL) [11] in vi) odločitvenih dreves (ang. *Decision Trees*, DT) [12]. Tovrsten pristop ponuja tudi več možnosti za porazdelitev zahtevane količine za odklop med porabnike. [7] uporablja mešano celoštevilsko programiranje (ang. *Mixed Integer Linear Programming*, MILP), pri čemer upošteva razpoložljivost bremen in cene nadomestil, ki jih ponujajo odjemalci. Metoda [12] s pomočjo izmerjenih podatkov napetosti in jalove moči izračuna prostran indeks, medtem ko [9] upošteva faktor porazdelitve in prioritete bremen, [10] izračunane električne razdalje do izvora motnje. Drugačen postopek so uporabili v [14], kjer poleg predhodno nastavljenega frekvenčnega praga za aktiviranje PFR uporabijo tudi napetostni prag. V [15] ves čas preverjajo, ali trajektorija predstavljena v $f(df/dt)$ fazni ravnini krši mejo stabilnosti, medtem ko v [6] primerjajo napovedano minimalno doseženo frekvenco z najnižjo dovoljeno frekvenco. Pri vseh teh metodah se odločitve sprejemajo na centralizirani lokaciji, kar pomeni, da obstaja nevarnost, da komunikacijsko omrežje ne bo pravočasno dostavilo točnih podatkov.

Tretji pristop pa predvideva temeljito in pogosto matematično zapleteno spremembo celotnega PFR, kar pomeni modifikacijo številnih pod-frekvenčnih relejev razpršenih po celotnem EES. Na primer, [16] predlaga decentraliziran sistem sestavljen iz več agentov (ang. *Multi-Agent System*, MAS), kjer vsak agent deli informacije o razliki med proizvedeno in porabljeno delovno močjo z vsemi sosednjimi agenti. Da optimizira koeficiente pri izmenjavi informacij, dodatno uporabi optimizacijo jate delcev (ang. *Particle Swarm Optimization*, PSO). Agenti končno odločitev sprejmejo s pomočjo uporabe teorema o povprečnem soglasju. [17] določi frekvenčne pragove vsakega pod-frekvenčnega releja na podlagi odstopanj napetosti na bremenskih zbiralkah, medtem ko [18] predlaga "neprekinjeno" PFR shemo, ki vrši odklapanje bremen proporcionalno z odstopanjem frekvence. Avtorji v [19] izvajajo prilagajanje polinoma drugega reda na izmerjen potek frekvence

zato, da vnaprej prilagodijo frekvenčne pragove glede na ocenjeno minimalno doseženo frekvenco. Tovrstne metode so večinoma problematične s finančnega stališča in potencialno slabe preglednosti

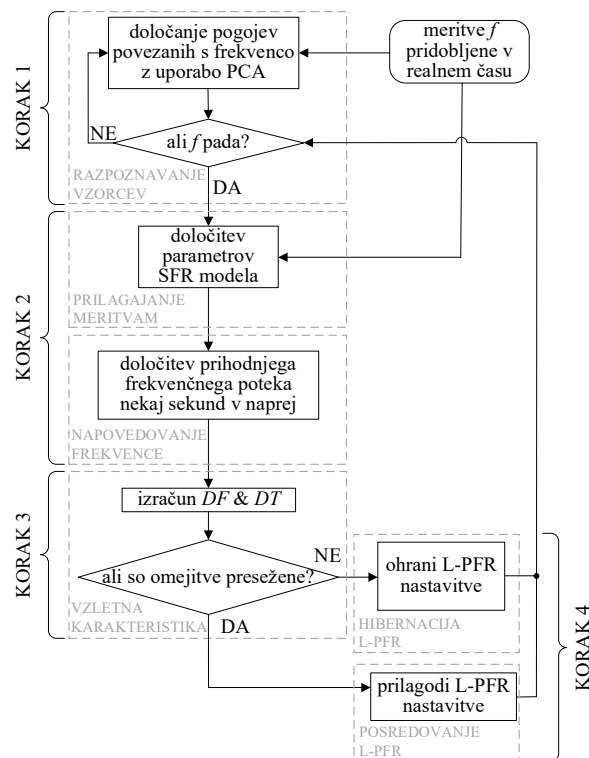
1.2. Doprinosa članka

Finančno in tehnično najprimernejši pristop je ohranitev obstoječe (statične) PFR skupaj z njenimi pozitivnimi lastnostmi in uvedba inovativne spremembe le za odpravo njenih pomanjkljivosti. Zato ta članek predstavlja nov in manj invaziven način,

Ideja predvideva uporabo posebne skupine med seboj neodvisnih inteligentnih elektronskih naprav (ang. *Intelligent Electronic Device*, IED), ki omogočajo implementacijo funkcij strojnega učenja. IED-ji delujejo skupaj z običajnimi releji pod-frekvenčnega razbremenjevanja in ukrepajo le, če njihov algoritem strojnega učenja prepozna potrebo po tem. Torej, IED-ji se odražajo kot dodatna dinamična stopnja PFR, medtem ko statične stopnje PFR ostanejo nespremenjene. Odjemalce, ki bi zagotavljali tako dinamično stopnjo, bi lahko vključili tudi v program uravnavanja povpraševanja (ang. *Demand-Side Management*, DSM) [7,14].

2 METODOLOGIJA

Zaradi naprednih sposobnosti in vodilne vloge pri obrambi pred frekvenčno nestabilnostjo, smo si sposodili termin iz odbojke in dinamično stopnjo poimenovali *libero stopnja PFR* (L-PFR). Vsak IED, ki je vpleten v L-PFR izvaja nov algoritem v realnem času. Kot prikazuje Slika 1 algoritem sestoji iz štirih glavnih korakov. V prvem meritve frekvence zajete v realnem času pošljemo skozi postopek razpoznavanja vzorcev, da določimo kateri frekvenčni pogoji so prisotni v trenutnem času. Na ta način zna IED v realnem času prepoznati več značilnih frekvenčnih pogojev. V drugem koraku iste meritve pošljemo še skozi postopek prilagajanja modela frekvenčnega odziva (ang. *System Frequency Response*, SFR) EES [20], kjer moramo parametre izbrati tako, da se odziv SFR modela tesno prilega vhodnim meritvam. Na ta način lahko ocenimo kakšen bo prihodnji potek frekvence, če se ne pričakuje posredovanje PFR. Velja omeniti, da se napaka napovedovanja povečuje z večanjem opazovalnega časa, a je ta napaka znotraj spremenljivih mej, če nas zanimajo pogoji le nekaj sekund vnaprej (glej Poglavlje 2.3). V tretjem koraku napoved pričakovanega frekvenčnega poteka uporabimo za to, da določimo pričakovan čas DT in frekvenčno mejo DF do naslednje statične stopnje razbremenjevanja. Oba parametra sta nato združena v posebno karakteristiko poimenovano kot *vzletna karakteristika*, ki zagotavlja končno informacijo o tem ali je statična PFR že obvladala večino neravnovesja delovne moči. Če je temu tako, potem v četrtem koraku L-PFR ustrezno prilagodi svoje nastavitve in posreduje pri regulaciji primanjkljaja moči.



Slika 1: Diagram poteka predlaganega algoritma L-PFR

2.1. Doseganje situacijskega zavedanja s strojnim učenjem

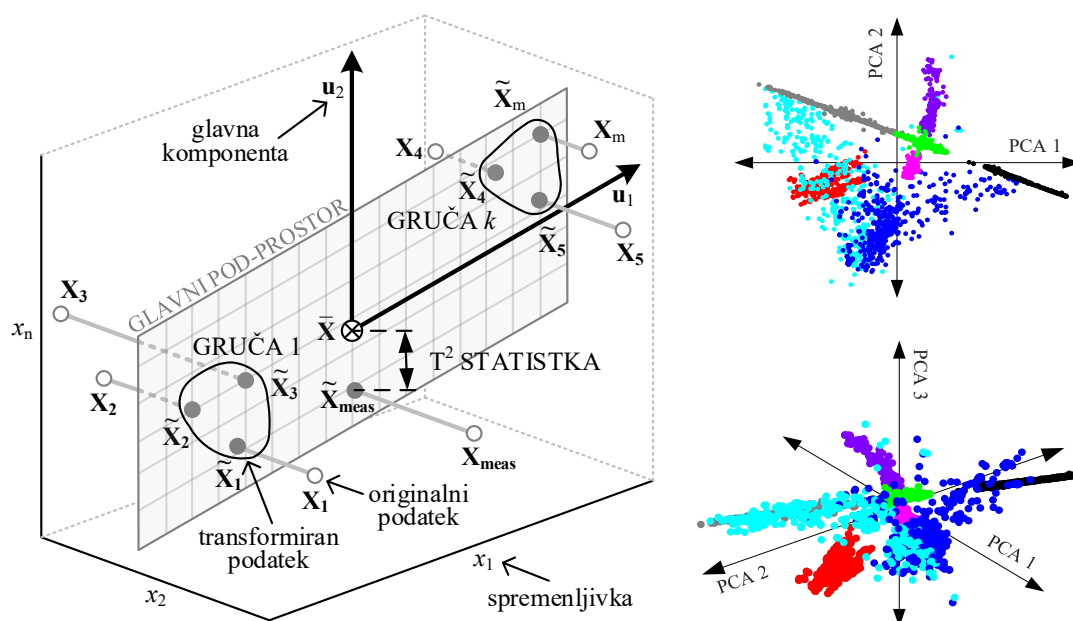
Zato, da lahko od IED pričakujemo razumno ukrepanje, mu moramo zagotoviti zadovoljiv nivo situacijske ozaveščenosti. Ker govorimo o pogojih povezanih s frekvenco, je najbolje, da kot glavni dogodek preučimo možnost odkrivanja incidenta neravnovesja moči. Literatura vsebuje več pristopov za odkrivanje začetnega padca frekvence. Lahko jih razvrstimo v več kategorij, in sicer tiste, ki uporabljajo: i) fiksne frekvenčne pragove [21], ii) spremembo frekvence in kopičenje frekvence s časom [7], iii) povprečno energijo izmerjenega frekvenčnega signala, izračunano s hitro Fourierjevo transformacijo (ang. *Fast Fourier Transform*, FFT), iv) *ROCOF* [23] in v) metode strojnega učenja [24]. Vse metode razen slednje zaznajo začetni incident, ko določena spremenljivka krši vnaprej nastavljen prag. Ker so incidenti, ki povzročijo padec frekvence, različnih vrst in velikosti, takšni pristopi pogosto ne zadoščajo za učinkovito odkrivanje [22,24]. Zato smo se osredotočili na tehnike na strojnega učenja, natančneje na analizo glavnih komponent (ang. *Principal Component Analysis*, PCA). PCA se je v preteklosti že izkazala kot primerna metoda za prepoznavanje na številnih področjih kot so obdelava slik, prepoznavanje vzorcev, klasifikacija in odkrivanje anomalij [25,26].

PCA [25,26] je statistično orodje s področja strojnega učenja, ki uporablja ortogonalno transformacijo, da pretvori m kompletov opazovanj $\mathbf{X} = [X_1 \dots X_m]$ opisanih z n spremenljivkami $\mathbf{X}_i = [x_1 \dots x_n]$ v nov, manjši linearen prostor $\tilde{\mathbf{X}}_i = [\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_n]$ imenovan glavni pod-prostor (sivo področje na levi Sliki 2). transformacija se vrši na takšen način, da ortogonalna projekcija originalnih podatkov (sive votle točke na levi Sliki 2) v glavni pod-prostor minimizira vsoto kvadratne napake projekcij (tj. razdalje med izvirnimi in preoblikovanimi podatkovnimi točkami, označeni s sivo črto na levi Sliki 2). $\tilde{\mathbf{X}}$ na levi Sliki 2 predstavlja srednjo vrednost transformiranih podatkov in vektorja \mathbf{u}_1 in \mathbf{u}_2 prvi dve glavni komponenti. Tako PCA razstavi matriko opazovanj \mathbf{X} na matriko rezultatov \mathbf{T} in matriko nalaganja \mathbf{P} :

$$\mathbf{X} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{P}^T + \mathbf{E} = \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{p}_1^T + \dots + \mathbf{t}_j \cdot \mathbf{p}_j^T + \mathbf{E}, \quad (1)$$

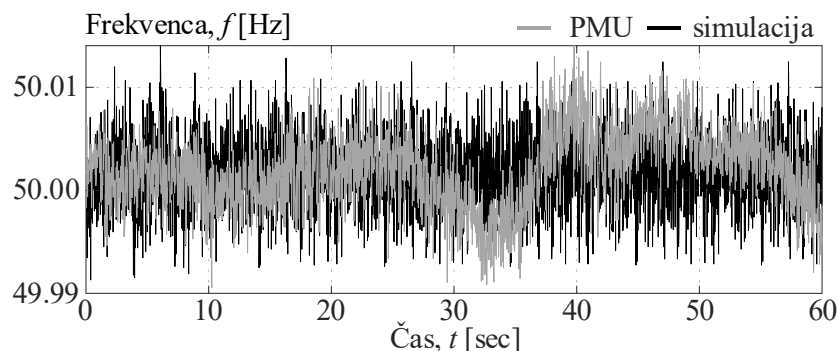
kjer so \mathbf{t}_i vektorji rezultatov, \mathbf{p}_i vektorji nalaganja, \mathbf{E} matrika residualov in j število glavnih komponent.

V glavnem pod-prostoru podobna opazovanja tvorijo gosto skupino točk (k). Če meritve zajete v realnem času \mathbf{X}_{meas} pretvorimo v isti pod-prostor, je mogoče podobnost s katerim koli prej znanim pogojem ugotoviti s pomočjo uporabe algoritma za izračun razdalje (npr. k -najbližji sosedi, Evklidska, Cityblock, kosinusna, itd.). Uspešnost prepoznavanja vzorcev na podlagi PCA je odvisna od kakovosti že obstoječe baze s podatki, ki se uporablja kot referenčni okvir za primerjavo. Zato mora zbirka s podatki vključevati čim večji nabor različnih frekvenčnih dogodkov zajetih med različnimi incidenti in v različnih razmerah. Ker nimamo na voljo realnih meritev, smo le-te pridobili s pomočjo številnih dinamičnih simulacij. Desna Slika 2 prikazuje nastalo bazo preslikano v glavni pod-prostor. Velja izpostaviti, da lahko bazo kasneje dopolnimo tudi z dejanskimi meritvami.



Slika 2: Grafična predstavitev PCA transformacije (levo) ter nastala baza s frekvenčnimi vzorci prikazana v dvo- in tri-dimenzionalnem glavnem prostoru (desno)

Slika 4a prikazuje primer frekvenčnega odziva EES po pojavu dveh zaporednih incidentov neravnovesja moči, oba v obdobju desetih sekund (čas simulacije $t = 4.80$ s in $t = 13.60$ s). Podrobnejši pregled razkrije, da se je konvencionalna PFR sprožila šestkrat (dvakrat po prvem in štirikrat po drugem incidentu), preden se je frekvenca dokončno stabilizirala. Poleg poteka frekvence je prikazanih še osem najbolj značilnih vzorcev, ki so bili vključeni v zbirko podatkov, označenih s številkami od 1 do 8. IED spremlja frekvenco v smislu drsečega okna in hitro se pojavi vprašanje kakšna dolžina okna je najbolj primerna za naše namene. Za odgovor na to vprašanje je treba upoštevati naslednja dejstva: i) IED-ji so nameščeni v posameznih postajah, kjer je izmerjena frekvenca podvržena lokalnim nihanjem [27], ii) meritve frekvence vsebujejo določeno količino šuma [28] in iii) trajanje prisotnosti različnih dinamičnih pojavov pri meritvah frekvence se lahko zelo razlikuje [28]. Da se približamo realnosti, smo simulirani frekvenci dodali Gaussov šum – glej Sliko 3. Primerjava s PMU meritvami pridobljenimi iz pravega EES potrjuje, da je dodan šum ustrezen. Naša preiskava je poudarila omejitve drsečega okna. Namreč, biti mora dovolj ozek, da na eni strani zazna hitre spremembe frekvence, na drugi strani pa dovolj širok, da nanj ne vplivajo elektromehanska nihanja in merilni šum. Izkaže se, da je za izpolnitev vseh teh pogojev potrebno uporabiti več drsniških oken, pri čemer ima vsak drugačno dolžino.



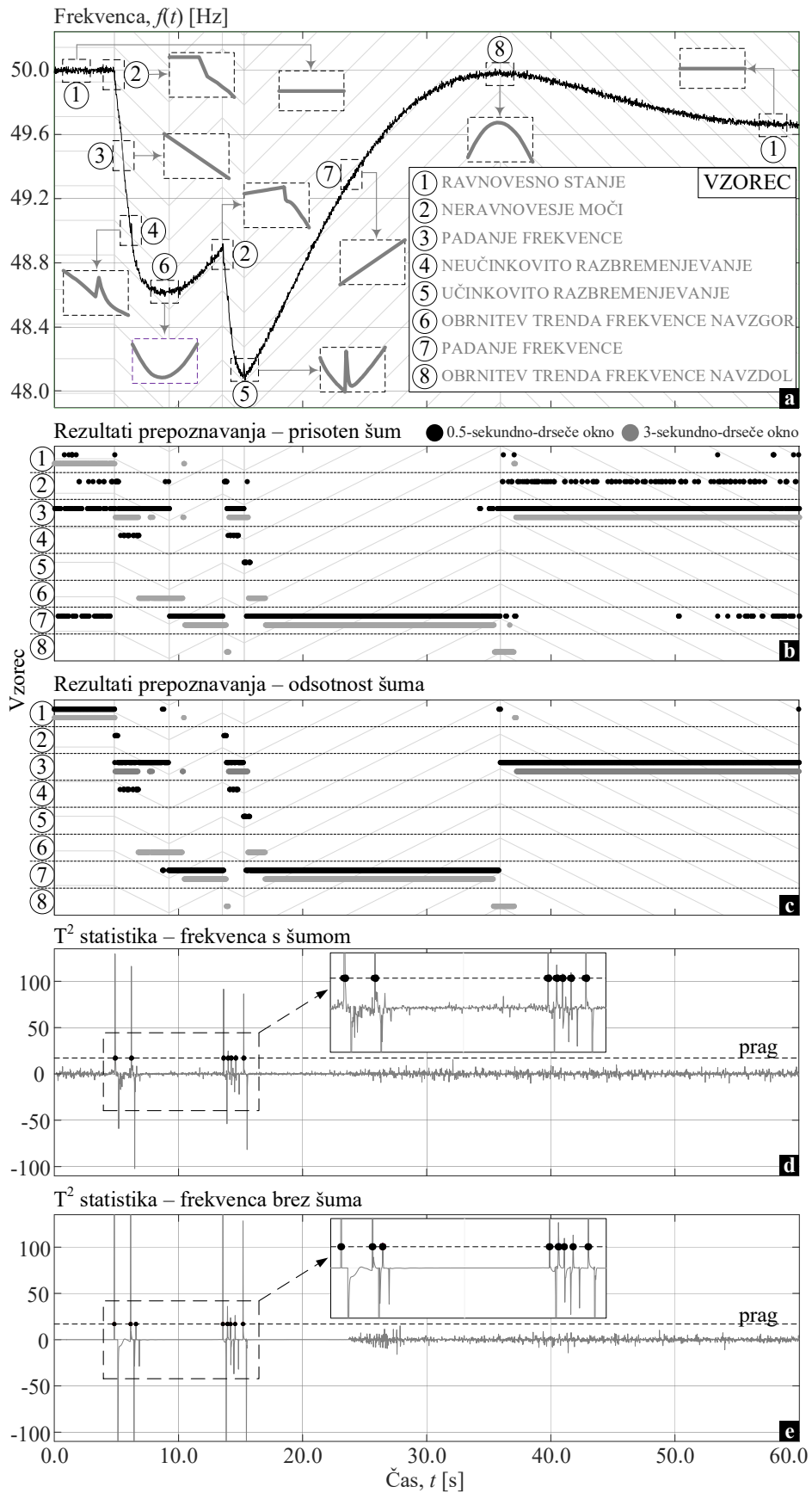
Slika 3: Dejansko izmerjena frekvenca EES in simulacija frekvence z dodanim Gaussovimi šumom

Slika 4b in Slika 4c prikazujeta tipično testiranje PCA algoritma za prepoznavanje, z in brez upoštevanega merilnega šuma pri vhodnih podatkih o frekvenci. Črne pike predstavljajo rezultate prepoznavanja z drsečim oknom dolžine 0.5 sekunde in sive pike z drsnim oknom širine 3 sekunde. Sive črte v ozadju označujejo dejanski frekvenčni trend in so uporabne za orientacijo na prvi pogled. Rezultati kažejo, da algoritem prepoznavanja z uporabo ožjega okna pravilno loči med vsemi frekvenčnimi vzorci, kadar v vhodnem signalu ni prisotnega šuma. Če pa je šum prisoten, postane velikost drsečega okna izrazitejša. Najprej se npr. osredotočimo na obdobje od 0 do 4.80 s. Algoritem s pomočjo širšega okna pravilno zazna vzorec 1 (ravnovesno stanje), medtem ko algoritem z ožjim oknom napačno prepozna situacijo bodisi kot vzorec 2 (neravnovesje moči), vzorec 3 (padanje frekvence) ali vzorec 7 (naraščanje frekvence). Slaba stran uporabe širšega drsečega okna je zakasnjeno prepoznavanje, kar lahko opazimo, ko pride do drugega neravnovesja moči. Širše okno zazna spremembo glavnega trenda (prehod iz vzorca 7 v 3) 180 ms kasneje kot ožje okno. Po pričakovanjih se zdi širše okno bolj primerno za spremljanje glavnega trenda frekvence, pri čemer pa ozko okno lahko zazna posamezne dogodke (na primer vzorec 2). Da premagamo vpliv šuma in odpravimo napačne klasifikacije, hkrati pa ohranimo dovolj visoko hitrost prepoznavanja, moramo združiti rezultate prepoznavanja iz obeh oken. Na primer, če ozko okno kategorizira dogodek kot neravnovesje moči, širše pa kot ravnovesno stanje, je smiselno zaupati klasifikaciji širokega okna.

Za dodatno povečanje robustnosti algoritma za prepoznavanje, smo dodatno uporabili še Hotellingovo T^2 statistiko, ki se pogosto uporablja za identifikacijo motenj [29]. T^2 statistika je pomanjšana, kvadratna 2-norma prvotnega vzorca glede na njegovo povprečno vrednost, kot je prikazano na Sliki 2. Izračuna se jo kot:

$$T_i^2 = \mathbf{t}_i \cdot \mathbf{\Lambda}^{-1} \cdot \mathbf{t}_i^T = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{\Lambda}^{-1} \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{x}_i^T, \quad (2)$$

kjer je \mathbf{t}_i i -ta vrstica vektorjev \mathbf{j} iz modela PCA, $\mathbf{\Lambda}^{-1}$ pa diagonalna matrika, ki vsebuje j lastnih vrednosti. Slika 4d in Slika 4e prikazujeta T^2 statistiko za izbrani primer z in brez šuma pri vhodnih meritvah frekvence. Ekstremne vrednosti pri obeh grafih kažejo na neravnovesje moči in razbremenitev. Za natančno zaznavanje teh dveh dogodkov je bil uporabljen fiksni prag in sicer tak, da smo se izognili lažnim detekcijam in pomanjkljivim zaznavanjem (kot je npr. na Sliki 4d, kjer druga razbremenitev ni bila zaznana).



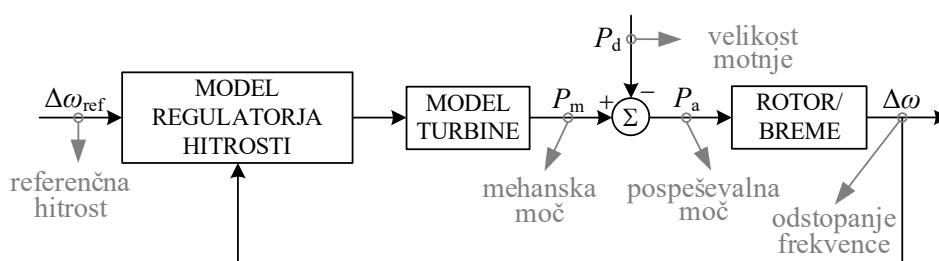
Slika 4: Vzorci frekvenčnega odziva EES uporabljenih med postopkom prepoznavanja (a), rezultati prepoznavanja glede na dolžine posameznih drsečih oken (b, c) in T^2 statistika (d, e)

2.2. Model frekvenčnega odziva sistema

SFR model je bil prvič predstavljen v [20]. Od takrat je bil uporabljen v več publikacijah, ampak nikoli pa se ni uporabljal za kratkoročno napoved frekvenčnega poteka. Kot je prikazano na Sliki 5, je SFR model sestavljen iz dveh glavnih delov. Prvi del opisuje povprečno obnašanje regulatorjev hitrosti in turbin, drugi del pa obnašanje EES in električnih bremen. SFR model s pomočjo enakovrednega nadomestnega generatorja opiše povprečno dinamično obnašanje več sinhronskih strojev, pri čemer filtrira vsa medgeneracijska nihanja in zagotavlja povprečen odziv EES. Namen postopka prilagajanja SFR frekvence $f_{SFR}(t)$ na vhodne meritve frekvence $f(t)$ je, da določimo parametre SFR modela v smislu najmanjše vsote kvadratov odstopanj:

$$\min \sum_{k=t_{\text{začetek}}}^{t_{\text{konec}}} (f(t) - f_{SFR}(t))^2 \quad (3)$$

Proces prilagajanja se prične šele, ko se zazna neravnovesje moči, ki definira trenutek označen s $t = t_{\text{začetek}}$. Oznaka $t = t_{\text{konec}}$ na drugi strani se nanaša na zadnjo razpoložljivo meritev zajeto v realnem času (glej Sliko 6). Matematična pravila narekujejo, da je treba za pridobitev prvih parametrov SFR modela po nastanku neravnovesja zajeti vsaj toliko meritev frekvence, kot je skupno število neznanih parametrov v SFR modelu. Da bi zagotovili, da je prilagajanje vedno možno izračunati, moramo določiti mejne vrednosti posameznih parametrov (glej Tabelo 1).



Slika 5: Konceptualni prikaz SFR modela [20]

Gonilna sila naše študije je bila vzpostavitev univerzalnega pristopa PFR, primerne za vse vrste omrežja. Namreč, dejstvo je, da v različnih državah po svetu prevladujejo različne tehnologije pridobivanja električne energije. Ti pa se zaradi različnih tehnoloških procesov različno odzivajo na neravnovesja moči. Tako je v literaturi možno najti več različnih modelov SFR. Pred izbiro enega od njih je potrebno opraviti temeljito analizo, zato v nadaljevanju predstavimo sedem različnih SFR modelov, ki so matematično opredeljeni s polinomi največ tretjega reda. Temu je tako predvsem iz dveh razlogov: i) zmanjšanje računske zahtevnosti in ii) zajetje glavnega trenda frekvence.

2.2.1. SFR model, ki upošteva prisotnost termoelektrarn

Eden prvih SFR modelov, ki jih najdemo v literaturi, sta predlagala Anderson in Mirheydar [20] leta 1990. Tovrstni model se pogosto uporablja pri analizi frekvenčne stabilnosti in zasnovi PFR zaščite. Ta model predpostavlja prevlado parnih turbin, pri čemer zanemarja učinek vzbujanja, odvisnost obremenitve od napetosti, nelinearnosti modela turbinskega regulatorja in vse razen največjih časovnih konstant. Frekvenčni odziv $\Delta\omega$ določimo z [20]:

$$\Delta\omega(s) = \frac{RP_d(T_R s + 1)}{(2HRT_R)s^2 + (2HR + DRT_R + K_m F_H T_R)s + (DR + K_m)}, \quad (4)$$

pri čemer R pomeni krmiljenje regulatorja, P_d velikost primanjkljaja v p.u., D faktor dušenja, H inercijsko v sekundah, K_m faktor mehanskega povečanja moči, konstanto, F_H delež celotne moči, ki jo ustvari turbina in T_R časovna konstanta ponovnega segrevanja pare v sekundah.

2.2.2. SFR model, ki upošteva hidroelektrarne

V mnogih državah velik del električne energije pridobivajo s pomočjo hidroelektrarn. Za predstavitev njihovega odziva uporabljamo lineariziran model IEEE3, ki vsebuje linearani model turbine [30]. Frekvenčni odziv je mogoče izračunati z:

$$\Delta\omega(s) = \frac{\frac{1}{2Hs+D}}{1 + \left(\frac{1}{2Hs+D}\right) \left(\frac{(1+T_R s)(1-T_W s)}{(1+T_G s)(1+(R_T/R_P)T_R s)(1+0.5T_W s \cdot R_P)} \right)}, \quad (5)$$

pri čemer je R_T začasna statika, R_P stalna statika, T_W inercijska časovna konstanta vode, T_R časovna konstanta dušenja in T_G časovna konstanta glavnega servomotorja.

2.2.3. Splošni SFR model

V realnosti imamo običajno opravka s kombinacijo več različnih vrst elektrarn. Zato so v [31] analizirali hkratno prisotnost različnih virov električne energije v obliki prenosne funkcije turbine in regulatorja hitrosti:

$$G_m(s) = \frac{\Delta P_m}{\Delta f} = \left(\sum_{j=1}^J b_j s^{J-j} / \sum_{i=1}^I a_i s^{I-i} \right), \quad a_1 = 1, \quad J = I - 1, \quad (6)$$

kjer sta a_i in b_j koeficienta prenosne funkcije. Frekvenčni odziv Δf se nato izračuna kot:

$$\Delta f(s) = \frac{P_d}{(2Hs + K_D) + G_m(s)}, \quad K_D = D + K_L, \quad (7)$$

kjer je K_L frekvenčni koeficient bremen. Vrednost I določa red prenosne funkcije. V nadaljevanju ga spreminjamo od 1 do 3 (v nadaljevanju uporabljeni kot indeksi).

2.2.4. Prenosna funkcija EES tretjega reda

Po navdihu prejšnjega model smo sestavili podobno prenosno funkcijo, katere red v števcu je enak redu v imenovalcu:

$$\Delta f(s) = P_d \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^3 a_i s^i}{\sum_{j=1}^3 b_j s^j} \right), \quad (8)$$

kjer sta a_i in b_j koeficienta prenosne funkcije.

2.2.5. Modeliranje frekvenčnega odziva v časovni domeni

Frekvenčni odziv EES v časovni domeni je odvisen od števila in vrste polov prenosne funkcije uporabljene za prikaz povprečnega obnašanja omrežja [32]. Glede na to lahko ocenimo/ugibamo kakšen bo odziv frekvence. Če predpostavimo realen in kompleksno konjugiran par polov, dobimo naslednji časovni odziv:

$$\Delta\omega(t) = A + B \cdot e^{Ct} + D \cdot e^{Et} \cdot \cos(F \cdot t + G), \quad (9)$$

kjer so A, B, C, D, E, F in G nastavitveni parametri.

2.3. Napovedovanje prihodnjega poteka frekvence in analiza napak pri napovedovanju

Ko smo zadovoljni s prileganjem izbranega SFR modela na meritve frekvence, dobimo model, s katerim lahko napovemo prihodnji potek frekvence, kadar se ne pričakuje aktivacija PFR. Da smo preverili kako točna je napoved frekvence pri uporabi različnih modelov opisanih v Poglavju 2.3, smo primerjali izračunano frekvenco f_{SFR} z dejansko frekvenco f dobljeno s pomočjo dinamičnih simulacij. Napako pri napovedovanju f_{ERR} smo opazovali za različne časovne horizonte ($T_{nap} = 1$ s, 5 s in 10 s) – glej Sliko 6, levo:

$$f_{ERR} = f_{SFR}(T_{nap}) - f(T_{nap}). \quad (10)$$

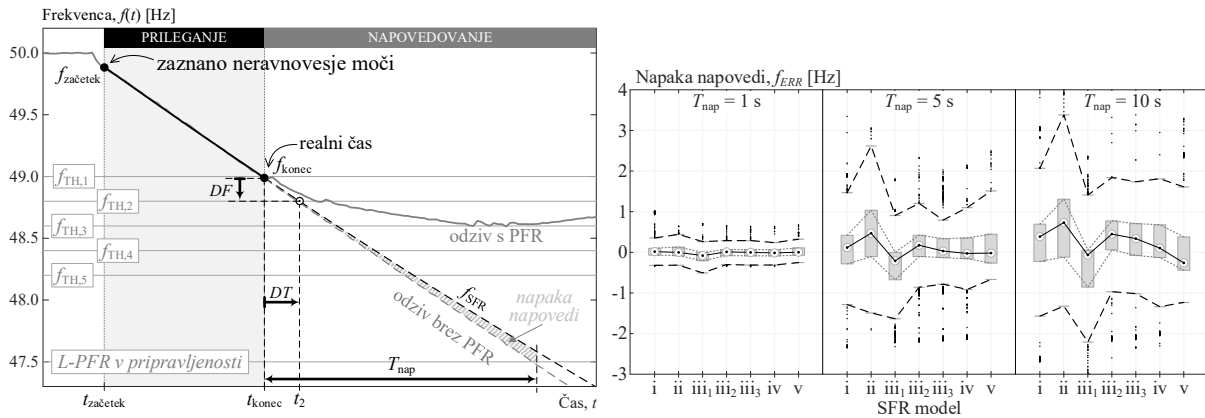
Na levi Sliki 6 do neravnovesja moči in padanja frekvence pride v trenutku $t = t_{začetek}$. Statični pragovi PFR $f_{TH, i}$ so porazdeljeni med 48.0 in 49.0 Hz in so neaktivni, medtem ko dinamična stopnja L-PFR v pripravljenosti čaka pri meji frekvenčne stabilnosti 47.5 Hz. Napoved prihajajočega frekvenčnega poteka izvedemo v trenutku $t = t_{konec}$. Vidimo lahko, da obstaja odstopanje med dejansko (siva črtkana krivulja) in napovedano (črna črtkana

krivulja) prihodnjo frekvenco. Dobljene rezultate prikazuje desna Slika 6, pri čemer smo pri prilagajanju SFR modelov upoštevali omejitve parametrov kot so podane v Tabeli 1. Pri analizi napake napovedi posameznih SFR modelov smo upoštevali številne primere, ki so se razlikovali v topologiji omrežja, vrstah elektrarn in tipih regulatorjev hitrosti.

Tabela 1: Omejitve parametrov različnih SFR modelov uporabljenih v procesu prilagajanja

SFR MODEL	OMEJITVE SPREMENLJIVK SFR MODELA									
i	P_d	H	D	R	K_m	F_H	T_R			
min	-0.5	3	0	0.03	0.8	0.1	4			
max	0.0	20	8	0.60	1.2	0.4	14			
ii	P_d	H	D	R_T	R_P	T_W	T_R	T_G		
min	-0.5	3	0	0.3	0.01	0	2.5	0.001		
max	0.0	20	8	20.0	0.30	5	25.0	1.000		
iii_1	P_d	H	K_D	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	
min	-0.5	3	4	10	/	/	3	/	/	
max	0.0	20	15	50	/	/	190	/	/	
iii_2	P_d	H	K_D	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	
min	-0.5	3	3	50	20	/	100	3	/	
max	0.0	20	15	300	50	/	200	20	/	
iii_3	P_d	H	K_D	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	
min	-0.5	3	4	0	60	15	0	20	5	
max	0.0	20	15	100	150	60	100	100	15	
iv	P_d	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	
min	-0.5	0	0	0	0.9	0	0	0	0.9	
max	0.0	100	100	100	1.1	100	100	100	1.1	
v	A	B	C	D	E	F	G			
min	0.00	0.00	-1	0.00	-0.30	0.0	-1			
max	0.01	0.08	0	0.08	-0.03	0.2	2			

Negativne/pozitivne vrednosti napak na desni Sliki 6 pomenijo, da je napoved predvidevala večji/manjši padec frekvence v primerjavi z dejanskimi pogoji. Razvidno je, da večji kot je čas napovedi T_{nap} , večja je napaka pri napovedovanju f_{ERR} . Povprečna napaka se giblje med -80.1 mHz do +16.9 mHz za $T_{nap} = 1$ s, od -210,2 mHz do +470.1 mHz za $T_{nap} = 5$ s in od -259.8 mHz do +733.1 mHz za $T_{nap} = 10$ s. Večina odstopanj (črne pike na desni Sliki 6) izvira iz prvih nekaj ocen frekvence, ko je število frekvenčnih vzorcev pomanjkljivo in je električno frekvenco izredno težko izračunati s pomočjo IED zaradi tranzientnih pojavov.



Slika 6: Napovedovanje frekvence in izračun časovnih razlik (levo) ter napaka napovedi pri uporabi različnih SFR modelov za različne časovne horizonte (desno)

2.4. Nastavitev vzletne karakteristike

Ko imamo na voljo pričakovan prihodnji potek frekvence (brez upoštevanja delovanja PFR), lahko IED opazuje preostali čas DT preden bo predvidoma dosežen vsak (i-ti) prihajajoči statični prag PFR f_{TH} (glej levo Sliko 6, kjer je prikazan DT za indeks $i = 2$):

$$DT = t_i - t_{konec}, \quad i = 1 \dots N_{PFR}, \quad (11)$$

kjer je t_i čas pričakovane kršitve statične stopnje PFR, t_{konec} dejanski čas in N_{PFR} označuje skupno število statičnih stopenj PFR. Če je frekvenca že presegla kakšen prag ali če se v prihodnje ne pričakuje kršitve praga,

času t_i pripišemo veliko privzeto vrednost (npr. 50 s). DT nam posreduje pomembne časovno povezane a ne zadostne informacije. In sicer, identičen DT namreč označuje različno alarmantne situacije, odvisno od frekvence pri tem določenem trenutku f_{konec} . Zato je potreben tudi podatek o tem, kakšen je preostali frekvenčni pas do naslednje i -te statične stopnje PFR:

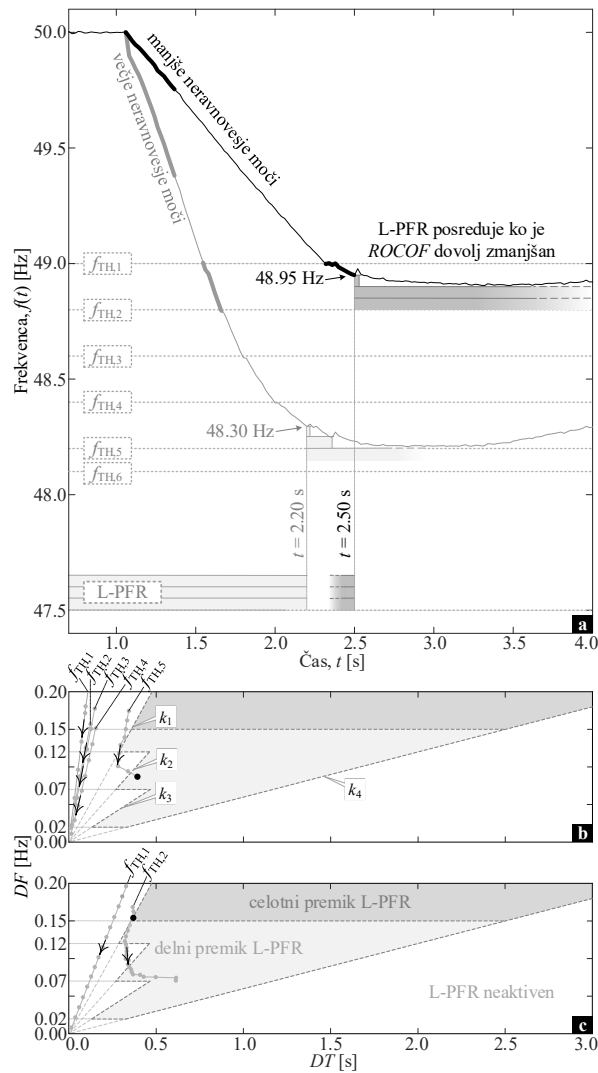
$$DF = f_{konec} - f_{TH,i} \cdot \quad (12)$$

Nekdo bi lahko trdil, da bi hkratno uporabo DT in DF preprosto zamenjali z *ROCOF* (ang. *Rate of Change of Frequency*), a naj poudarimo, da bi napovedovanje z uporabo *ROCOF* predvideval konstantno hitrost upadanja frekvence, medtem ko opisani postopek upošteva tudi potencialni vpliv vseh krmilnih mehanizmov (npr. delovanje regulatorja, vpliv bremen). To je pomemben prispevek saj ima za posledico manjše količine odklopov bremen in izboljšanje frekvenčnega odziva EES.

Informacije, ki jih posredujeta DF in DT , je mogoče združiti v DF - DT ravnino, v kateri lahko IED spremlja resnost frekvenčnih pogojev v realnem času. Primer ravnine DF - DT , v kateri je s senčenim območjem označena tako imenovana vzletna karakteristika, lahko najdemo na Sliki 7b in 7c. Slika 7a prikazuje frekvenčni odziv EES za večje (siva krivulja) in manjše neravnovesje (črna krivulja) moči.

Konvencionalna PFR shema, ki smo jo uporabili v tem prispevku je sestavljena iz šestih stopenj (10-10-10-10-10-5%) postavljenih med 48.0 in 49.0 Hz, pri čemer je med njimi 0.2 Hz. Toliko znaša tudi navpično območje DF - DT ravnine. Odločili smo se, da bomo L-PFR razdelili na tri enakomerno porazdeljene dinamične pod-stopnje, ki so 0.2 Hz / 4 = 0.05 Hz narazen, pri čemer pa vsota ustreza velikosti največje statične stopnje PFR (tj. 10%). Da bi se izognili prekrivanju statičnih PFR in dinamičnih L-PFR stopenj, smo morali določiti minimalno vrednost DF , ki je bila nastavljena na 0.02 Hz. Kljub temu, da se L-PFR aktivira, glede na DF ni nujno, da se vse tri stopnje prilegajo med dve sosednji statični stopnji. Najmanjša vrednost DF , ki je potrebna za aktiviranje vseh treh pod-stopenj, je 0.15 Hz, saj so ve tem primeru pod-stopnje L-PFR postavljene na $f_{TH,i} + [0.02, 0.07, 0.12]$ Hz (glej Sliko 8). Po drugi strani pa je za aktivacijo dveh pod-stopenj potrebna DF najmanj 0.12 Hz (pod-stopnje postavljene na $f_{TH,i} + [0.02, 0.07]$ Hz) in za eno pod-stopnjo najmanj 0.02 Hz (pod-stopnja postavljena pri $f_{TH,i} + 0.02$ Hz) – glej Sliko 8. Odvisno od tega, koliko pod-stopenj L-PFR se prilega med dvema zaporednima statičnima pragovoma, lahko obvladamo različno resne situacije, zato v vzletni karakteristiki potrebujemo tri (oznaka j) različne začetne omejitve (na Sliki 7b označene kot k_1 , do k_3 , kjer indeks 1 nakazuje na to da imamo na voljo vse tri pod-stopnje in indeks 3, da imamo na voljo le eno pod-stopnjo). Te omejitve predstavljajo konstantno razmerje DF/DT in so bile v tem prispevku nastavljene glede na izkušnje, pridobljene s številnimi dinamičnimi simulacijami, kot $k_1 = 0.42$, $k_2 = 0.26$ in $k_3 = 0.15$. Četrta končna omejitev $k_4 = 0.06$ predstavlja razmere v katerih se pričakuje, da se bo frekvenca izboljšala brez PFR.

Po motnji, ki povzroči izpad frekvence, začne delovna točka v ravnini DF - DT svoj potek pri $DF = 0.2$ Hz. V primeru hitrega upadanja frekvence (Slika 7b) se začetni potek nahaja na levi strani zasenčenega območja in je usmerjena proti izhodišču diagrama. V takih primerih L-PFR ostane v pripravljenosti pri meji 47.5 Hz in prepusti delovanje konvencionalni PFR. Ko je dosežen vsak statični prag, se potek nenadoma premakne od izvora diagrama nazaj na vrednost $DF = 0.2$ Hz, vendar vsakič bližje zasenčenemu območju. Ko potek doseže vzletno karakteristiko (po štirih konvencionalnih PFR stopnjah) se sproži L-PFR. V primeru zmerne upadanja frekvence (Slika 7c) zadostuje ena sama konvencionalna stopnja PFR preden se aktivira L-PFR.



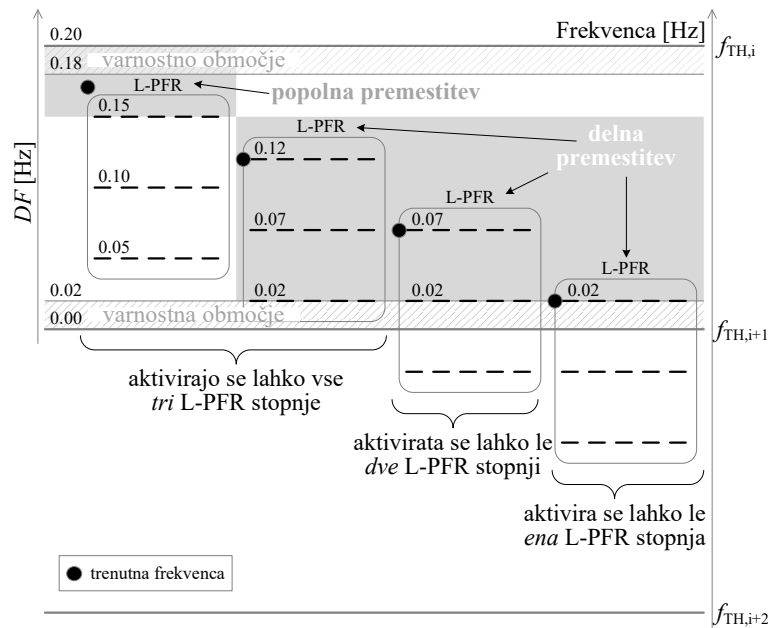
Slika 7: Ilustrativni primer delovanja L-PFR (a) in pripadajoča vzletna karakteristika za bolj (b) in manj (c) resen primer padanja frekvence

2.5. Samodejno prilagajanje nastavitve L-PFR

Sprva, ko čakamo na napoved potem, ko se v EES pojavi neravnovesje moči, je L-PFR nastavljen na mirovanje pod vsemi statičnimi pragovi PFR. V tem prispevku je bil prag mirovanja nastavljen na 47.5 Hz (glej tri sive pravokotnike na dnu Slike 7a). Takoj, ko s pomočjo funkcionalnosti strojnega učenja zaznamo trend padanja frekvence in ko pride do kršenja vzletne karakteristike (glej črno točko na Sliki 7b in Sliki 7c), L-PFR avtomatično prilagodi svoje nastavitve. Odvisno od DF vrednosti v tistem trenutku je izbrana ena od dveh možnosti prilagoditev:

- 1) popolna premestitev: če je $DF \geq 0.15$ Hz, (glej Sliko 7c in Sliko 8), se vse tri stopnje prilagodijo med dve zaporedni statični stopnji PFR – glej primer majhnega neravnovesja moči na Sliki 7a in Sliki 7c, kjer je prva od treh pod-stopenj L-PFR nastavljena na 48.95 Hz,
- 2) delna premestitev: če je $0.02 \text{ Hz} \leq DF < 0.15$ Hz (glej Sliko 7c in Sliko 8), potem je prva od treh pod-stopenj L-PFR nastavljena na vrednost frekvence v realnem času, saj se vse tri pod-stopnje ne prilagajajo med dve zaporedni statični stopnji PFR – glej primer velikega neravnovesja moči na Sliki 7a in Sliki 7b, kjer je prva stopnja nastavljena na 48.30 Hz.

Zelo pomemben vidik L-PFR je, da vsak IED vključen v L-PFR, deluje v skladu z lokalno izmerjeno frekvenco. Zato odločitve in dejanja IED niso sinhronizirani. Na ta način je izklop L-PFR bolj časovno razpršen, kar ima za posledico bolj stalno uravnoteženje moči v primerjavi s katerim koli usklajenim pristopom PFR.



Slika 8:Možne prilagoditve L-PFR nastavitvev

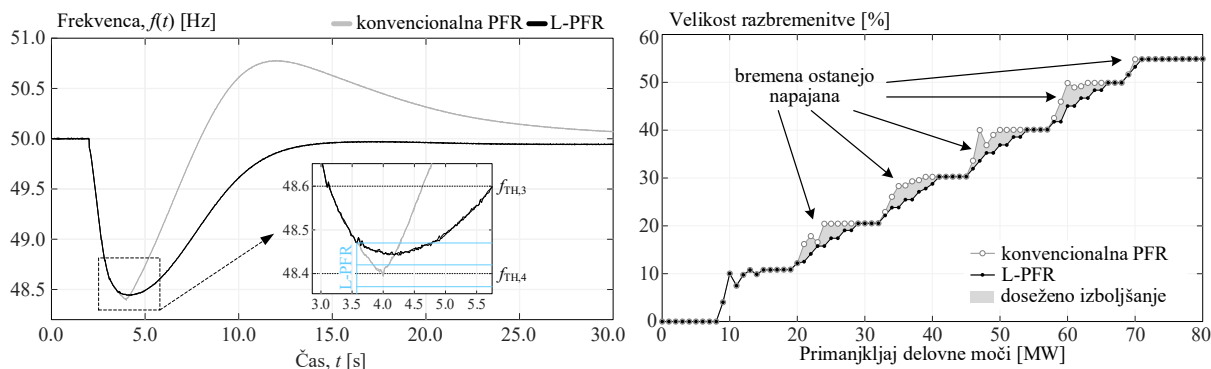
3 ŠTUDIJE PRIMEROV

Za testiranje predlaganega algoritma smo uporabili 110 kV model severnoprimske zanke [33]. Le-ta pogostokrat pritegne pozornost, saj zaradi specifik večkrat na leto doživi prehod v otočno obratovanje. Pretekli dogodki in posebnosti tega dela Slovenskega EES so nekako glavni razlog zakaj smo se odločili za tak študijski primer, ki vsebuje pet hidroelektrarn. Le-te zaradi slabe hidrologije pogostokrat obratujejo le z enim agregatom, kar pomeni, da je inercija sistema tudi velikokrat precej nizka. To naredi sistem precej občutljiv na spremembe obremenitve. Poleg tega je obremenitve omrežja pogosto velika zaradi industrije na tem področju, kar ima za posledico velik uvoz električne energije iz tujine. Pri nastanku nenamernega otoka to povzroči velike primanjkljaje moči, zato predstavlja idealen poligon za testiranje PFR.

Shema L-PFR je bila izvedena z dvema IED-jema, nameščenima v postaji Nova Gorica in Vrtojba. Zaradi razdelitve L-PFR na tri pod-stopnje, vsaka pod-stopnja L-PFR pokriva 3.3% odjemalcev. Baza podatkov namenjena za PCA je sestavljena iz 1000 dinamičnih simulacij in meritev frekvence (glej Sliko 2), ki se med seboj razlikujejo po velikosti primanjkljaja delovne moči, vrsti elektrarn, topologije omrežja in regulatorjev. Za prepoznavanje frekvenčnih dogodkov in izračun T^2 statistike smo uporabili drseče okno dolžine 500 in 3000 ms. Podobnost v smislu PCA je bila ocenjena na podlagi algoritma klasifikacije k-najbližjih sosedov in evklidske metrike razdalje. Za napoved prihodnjega poteka frekvence smo uporabili SFR model opisan v Poglavju 2.2.4.

3.1. Učinkovitost L-PFR

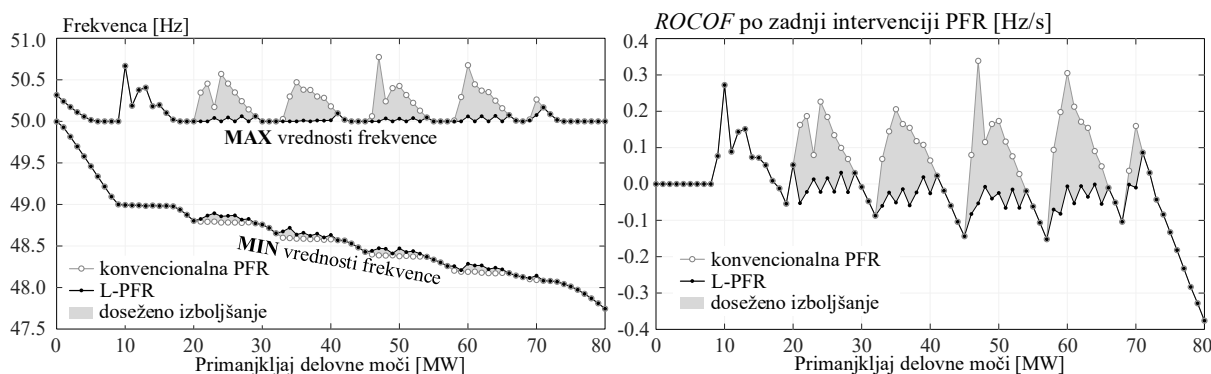
Inštalirana moč generatorjev znaša 152.45 MW. Simulirali smo prehod v otočno obratovanje, ki nastopi v 2 s po začetku simulacije. Učinkovitost L-PFR smo ocenili v razponu od 1 do 80 MW primanjkljaja delovne moči v korakih po 1 MW. Desna Slika 9 prikazuje odstotek razbremenjevanja EES z uporabo konvencionalne (prazni sivi krogci) in predstavljeno (polni črni krogci) PFR. Izboljšanje je označeno z sivo zasenčenimi območji, kar pomeni, da je L-PFR posredovala v 42% vseh primerov. Zaradi predpisov [2], ki prepovedujejo poseg PFR preden frekvenca preseže 49.0 Hz, L-PFR ne sme vplivati na delovanje prve statične PFR stopnje. Z uporabo L-PFR je razbremenjevanje bolj linearno odvisno od primanjkljaja delovne moči in je vedno manjše ali enako kot pri konvencionalni PFR. Največje znižanje znaša 6.43% in nastopi pri primanjkljaju 47 MW. Ta primer bolj podrobno predstavimo na levi Sliki 9, ki prikazuje frekvenčni potek za konvencionalno PFR (siva krivulja) in za L-PFR (črna krivulja). Vidimo lahko, da konvencionalna PFR uspešno ustavi padeč frekvence, vendar ko *ROCOF* postane bolj zmeren, odklopi preveč obremenitve in s slabo rešitvijo prvega problema (tj. primanjkljaj moči) ustvari popolnoma nov problem (tj. presežek moči). Kot vidimo na levi Sliki 9, to lahko povzroči precejšen prenehaj frekvence. Po drugi strani pa ob uporabi L-PFR, le-ta na začetku čaka v pripravljenosti pri minimalni dovoljeni frekvenčni meji 47.5 Hz in razbremenjevanje prepusti konvencionalni PFR. Ko v trenutku 3.58 s zazna, da je frekvenčni naklon dovolj znižan prilagodi svoje nastavitve pragov na 48.47 Hz, 48.42 Hz in 48.37 Hz in izklopi manjšo količino bremen (6.43%) v primerjavi s konvencionalno PFR. Rezultat tega je odprava prenehaja.



Slika 9: Odziv konvencionalne PFR in L-PFR ob primanjkljaju 47 MW (levo) ter velikost razbremenitve konvencionalne PFR in L-PFR (desno)

Torej negativni stranski produkt razbremenitve prevelike količine bremen je prenehaj. Zgornji niz polnih in praznih krogeev na levi Sliki 10 prikazuje te presežke za vse simulirane primere. Vidimo lahko, da v večini primerov L-PFR uspešno odpravi prenehaje. Po drugi strani pa je najnižja vrednost frekvence (nadir), ki ga prikazuje spodnji niz polnih in praznih krogeev na levi Sliki 10, nekoliko nižja.

Glavna naloga zaščite PFR je stabilizacija frekvence in povrnitev vrednosti $ROCOF$ čim bližje vrednosti nič [1,4]. Zato desna Slika 10 prikazuje tudi vrednosti $ROCOF$ po zadnjem posredovanju PFR. Vidimo lahko, da L-PFR znatno zmanjša to vrednost in jo ohrani nekoliko pod ničlo, z namenom, da prepusti regulacijo frekvence primarni regulaciji.



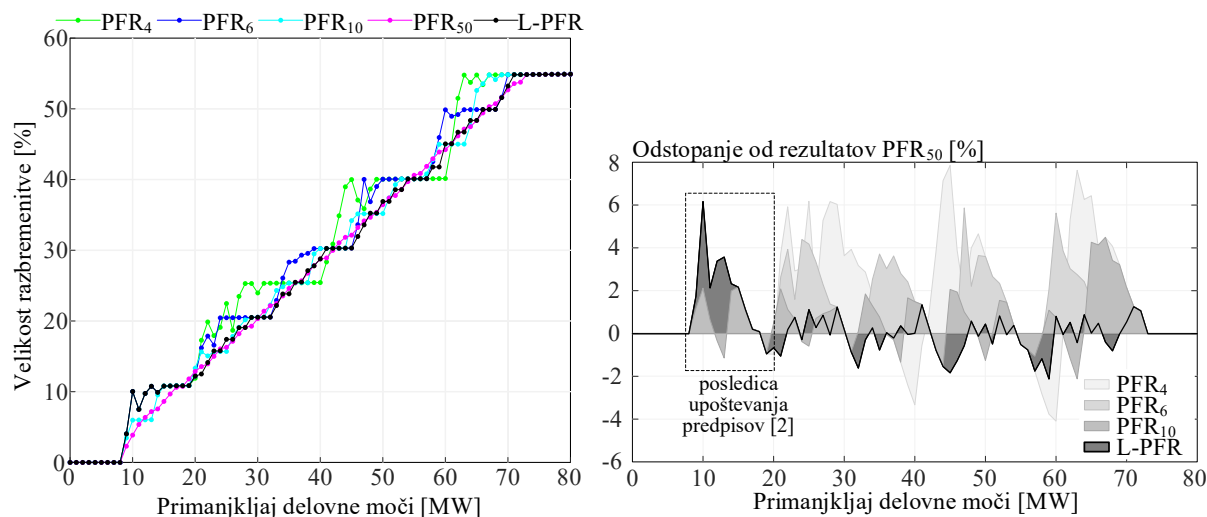
Slika 10: Največja in najmanjša dosežena frekvenca med frekvenčnim prehodnim pojavom (levo) ter $ROCOF$ po zadnjem PFR posredovanju (desno) pri uporabi konvencionalne PFR in L-PFR

3.2. Vpliv števila stopenj PFR

Na splošno je število pod-stopenj L-PFR odvisno od zelene natančnosti nastavitve neravnovesja moči. Vendar pa prave naprave IED potrebujejo nekaj časa, da se odzovejo na sprožilni signal, zato več pod-stopenj ne pomeni nujno boljše zmogljivosti, saj se lahko stopnje PFR prekrivajo. Zato ne priporočamo velikega števila pod-stopenj L-PFR. Da pokažemo, da zadostujejo že tri pod-stopnje L-PFR, primerjamo L-PFR s 4-stopensko (PFR_4), 6-stopensko (PFR_6), 10-stopensko (PFR_{10}) in 50-stopensko (PFR_{50}) konvencionalno PFR. Njihove nastavitve so podane v Tabeli 2. Kot lahko opazimo na levi Sliki 11, ki prikazuje količino razbremenitve za posamezne primanjkljaje delovne moči, med naštetimi konvencionalnimi PFR, PFR_{50} doseže najbolj natančno ravnovesje aktivne moči, zato jo uporabimo kot referenco za ocenjevanje drugih shem PFR. Desna Slika 11 prikazuje odstopanje od količine razbremenitve dosežene z PFR_{50} v odvisnosti od primanjkljaja delovne moči. Tako pozitivna/negativna vrednost pomeni večjo/manjšo količino izklopljenih bremen. Kot je bilo pričakovano, PFR_4 v večini primerov odklopi največjo količino bremen (tj. v 48.15% vseh primerov). Zaradi tega, ker imajo PFR_4 , PFR_6 in L-PFR enako prvo stopnjo (10% pri 49.0 Hz), je količina v območju primanjkljajev delovne moči od 0 do 20 MW, enaka. L-PFR odklopi manjšo količino bremen v 37.03%, PFR_{10} pa v 27.16% primerov v primerjavi s PFR_{50} .

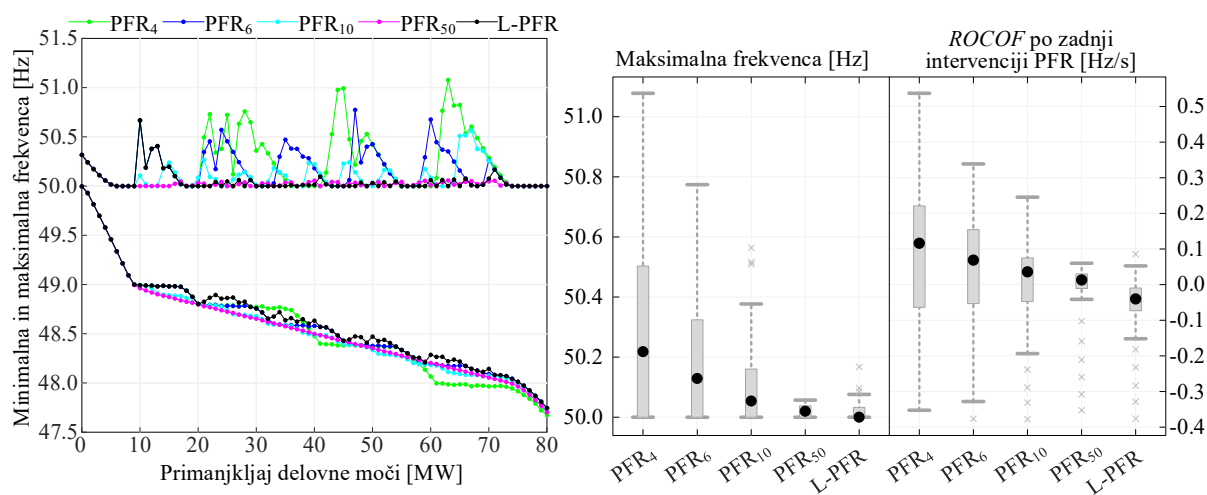
Tabela 2: Nastavitve konvencionalne PFR s 4-, 6-, 10- in 50-stopnjami

Število stopenj	Volumen stopenj	Skupna količina	Frekvenčni pragovi
4	1x10% + 3x15%	55% sistemske obremenitve	[49.0, 48.8, 48.4, 48.0] Hz
6	5x10% + 1x5%	55% sistemske obremenitve	[49.0, 48.8, 48.6, 48.4, 48.2, 48.1] Hz
10	9x5% + 1x10%	55% sistemske obremenitve	enakomerno porazdeljeni med 49.0 in 48.0 Hz
50	50x1.1%	55% sistemske obremenitve	enakomerno porazdeljeni med 49.0 in 48.0 Hz



Slika 11: Velikost razbremenitve (levo) ter odstopanje velikosti razbremenitve od tiste pri PFR₅₀ (desno)

Zanima nas učinkovitost L-PFR, ko je aktivirana dinamična stopnja. Zato Slika 12 prikazuje diagram z največjimi in najmanjšimi doseženimi frekvencami ter diagram kvantilov za največje frekvence in *ROCOF*-e po zadnjem posredovanju PFR za primanjkljaje moči, večje od 20 MW. Vidimo lahko, da večje kot je število statičnih stopenj, manjša sta največja frekvenca in *ROCOF*. Rezultati kažejo, da je učinkovitost L-PFR mogoče razvrstiti med PFR₁₀ in PFR₅₀. Tako lahko zaključimo, da L-PFR s tremi pod-stopnjami v kombinaciji s 6-stopenjsko konvencionalno PFR ustreza rezultatom, ki jih daje konvencionalna shema PFR z več deset stopnjami.



Slika 12: Največje in najmanjše dosežene frekvence (levo) ter diagram kvantilov maksimalnih frekvenc in *ROCOF*-ov po zadnjem delovanju PFR (desno) pri uporabi konvencionalne PFR s 4-, 6-, 10- in 50-stopnjami ter L-PFR

3.3. Primerjava z drugo napredno PFR

Opisana metoda dokazano izboljša delovanje konvencionalne PFR, pri čemer ne spreminja obstoječih nastavitve le-te. Da pokažemo kako se učinkovitost metode razlikuje od preostalih naprednih metod, ki pa v nasprotju z opisano metodo, spreminjajo nastavitve vsem obstoječim relejem PFR, smo naredili tudi primerjavo z napredno PFR opisano v [34,35].

Pri tej metodi se na podlagi lokalno izmerjenega *ROCOF*-a sproti na vseh lokacijah frekvenčnih relejev po EES. izračunava meja stabilnosti frekvence M :

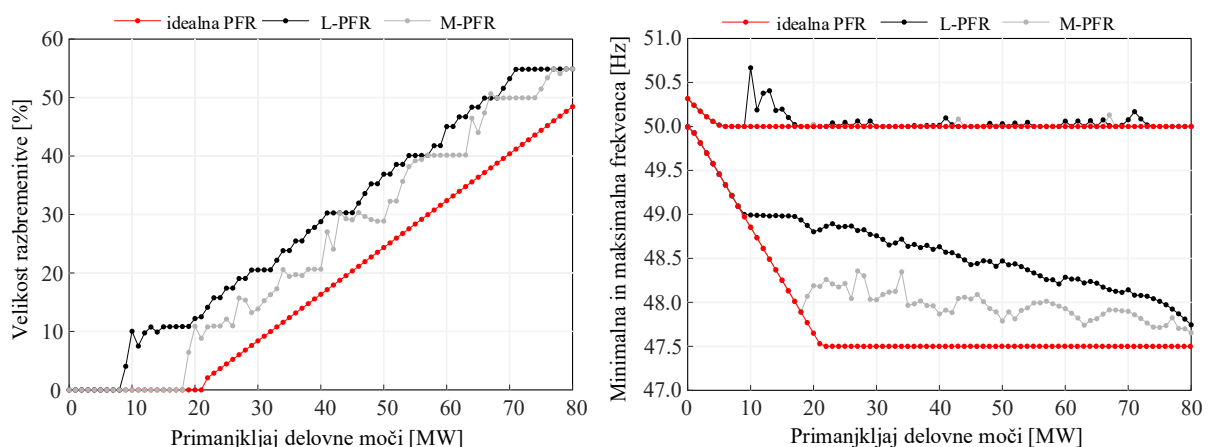
$$M(t) = \frac{f_{lim} - f(t)}{ROCOF(t)}. \quad (13)$$

Kriterij M je v bistvu časovno odvisna spremenljivka, ki podaja najhujši ocenjen čas pred kršitvijo predhodno določene stabilnostne meje f_{lim} . V kombinaciji z lokalno izmerjeno frekvenco $f(t)$ (v smislu karakteristike v $f(t)$ - $M(t)$ diagramu) omogoča zakasnjeno aktiviranje statičnih stopenj glede na trenutno strmino frekvence. Z drugimi besedami, ta shema PFR zablokira delovanje releja ko je padanje frekvence dovolj zmerno, in tako ne odklopi bremen takoj ko frekvenca prečka statične PFR stopnje, ampak počaka še nekaj časa in medtem opazuje trend frekvence. Če se trend obrne, potem razbremenjevanja ne izvede, v nasprotnem primeru pa sproži celotno statično stopnjo.

Slika 13 poleg rezultatov sheme L-PFR (črni poteki) prikazuje še rezultate napredne sheme PFR (sivi poteki), označene kot "M-PFR" in rezultate "idealne" PFR sheme (shema, ki izklopi v trenutku nastanka primanjkljaja tako količino bremen, da frekvenca ostane tik nad spodnjo dovoljeno mejo, glej rdeče poteke). Opaziti je mogoče vpliv zakasnjene delovanja in izpuščenih stopenj razbremenjevanje EES saj so pri M-PFR prisotne nižje minimalne frekvence in manjše količine razbremenitve pri vseh primanjkljajih moči.

Torej, konvencionalno PFR shemo je brez posega v njene nastavitve možno izboljšati v smislu, da je razbremenjevanje bolj linearno oz. časovno bolj razpršeno v odvisnosti od primanjkljaja moči. Na ta način preprečimo prevelike odklope bremen in odpravimo izrazite prenehaje. Po drugi strani pa lahko s korenitim posegom v nastavitve konvencionalne PFR dosežemo, ne le boljši frekvenčni odziv, ampak tudi manjše količine odklopljenih bremen. Razlog za to je, da z ustreznim zakasnjem sproženjem statičnih stopenj bolje izkoristimo primarno regulacijo frekvence.

Torej, na koncu je potrebno sprejeti odločitev, ali bomo šli v drag in dolgotrajen proces spremembe celotne zaščite PFR ali pa v relativno poceni in enostavno nadgradnjo obstoječega principa pri čemer se zavedamo, da bi količina odklopljenih bremen lahko bila manjša. Glede na to, da je delovanje PFR redko kdaj potrebno in da se je obstoječa zaščita PFR že mnogokrat izkazala za zanesljivo, je mogoče bolj smiselna uporaba L-PFR kakor M-PFR.



Slika 13: Velikost razbremenitve (levo) ter največje in najmanjše dosežene frekvence (desno) pri uporabi idealne PFR, L-PFR in M-PFR

4 ZAKLJUČKI

Ta članek predstavlja izboljšanje konvencionalne sheme pod-frekvenčnega razbremenjevanja. Predlagana rešitev ohranja obstoječe nastavitve relejev pod-frekvenčne zaščite (tj. frekvenčne pragove razbremenjevanja) in uvaja dodatno dinamično stopnjo PFR s pomočjo majhne in specializirane skupine IED-jev, opremljenih s

funkcionalnostjo strojnega učenja. Tako imenovana *libero* PFR je dodatno razdeljena na nekaj pod-stopenj, katerih sprožitveni kriteriji se samodejno nastavljajo. Zavedanje, da je treba neravnovesje moči natančno prilagoditi, zagotavlja mehanizem IED-ja za prepoznavanje vzorcev. S takim pristopom ohranimo hitrost in robustnost konvencionalnih PFR, hkrati pa zagotovimo želeno fleksibilnost. Raziskava pokaže, da je L-PFR shema s tremi dinamičnimi pod-stopnjami enakovredna konvencionalni shemi z več deset statičnimi pod-stopnjami. V primerjavi z obstoječimi naprednimi metodami je njena implementacija v EES manj vsiljiva in ne zahteva prostrane komunikacije. Dejansko, ima nesinhronizirano delovanje IED več ugodnih učinkov.

ZAHVALA

To delo je podprla Slovenska raziskovalna agencija z raziskovalnim programom Elektroenergetski sistemi št. P2-0356, mehanizmom financiranja mladih raziskovalcev in projektom LoLaG, J2-9232. Avtorji se zahvaljujejo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost RS za finančno pomoč.

REFERENCE

- [1] S. Matthewman, H. Byrd, "Blackouts: a sociology of electrical power failure," Soc. Space J., pp. 1-25, Jan. 2014.
- [2] ENTSO-E, "RG CE OH – Policy 5: Emergency Operations V 3.1," Sep. 2017.
- [3] H. H. Alhelou, M. E. H. Golshan, T. C. Njenda, P. Siano, "A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges," Energies, Vol. 12, No. 4, Feb. 2019.
- [4] L. Sigrist, L. Rouco, F. M. Echavarren, "A review of the state of the art of UFLS schemes for isolated power systems," Electr. Power and Energy Syst., Vol. 99, pp. 525-539, Jul. 2018.
- [5] M. Lu, W. A. W. ZainalAbidin, T. Masri, D. H. A. Lee, S. Chen, "Under-Frequency Load Shedding (UFLS) Schemes – A Survey," Int. J. Appl. Eng. Res., Vol. 11, No. 1, Feb. 2016.
- [6] H. H. Alhelou, M. E. H. Golshan, R. Zamani, M. P. Moghaddam, T. C. Njenda, P. Siano, M. Marzband, "An Improved UFLS Scheme based on Estimated Minimum Frequency and Power Deficit," 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, Jun. 2019.
- [7] W. Yao, S. You, W. Wang, X. Deng, Y. Li, L. Zhan, Y. Liu, "A Fast Load Control System Based on Mobile Distribution-Level Phasor Measurement Unit," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 11, No. 1, Jan. 2020.
- [8] G. Wang, H. Xin, D. Gan, N. Li, Z. Wang, "An Investigation into WAMS-based Under-Frequency Load Shedding," 2012 IEEE Power and Energy Soc. Gen. Meeting, San Diego, CA, USA, Jul. 2012.
- [9] F. Zare, A. Ranjbar, F. Faghihi, "Intelligent topology-oriented LS scheme in power systems integrated with high wind power penetration," IET Gener., Transm. Distrib., Vol. 14, No. 9, May 2020.
- [10] M. Prasad, K. N. Satish, K. Sodhi, R. Sodhi, "A Synchrophasor Measurements based Adaptive Underfrequency Load Shedding Scheme," IEEE Innovative Smart Grid Technol. - Asia (ISGT-Asia), May 2014.
- [11] J. A. Laghari, S. A. Almani, H. Mokhlis, J. Kumar, A. H. A. Bakar, "A Smart Under-Frequency Load Shedding Scheme based on Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System and Flexible Load Priority," (IJACSA) Int. J. of Adv. Comput. Sci. Appl., Vol. 9, No. 3, 2018.
- [12] D. Lopez, L. Sigrist, "A Centralized UFLS Scheme Using Decision Trees for Small Isolated Power Systems," IEEE Latin America Trans., Vol. 15, No. 10, Oct. 2017.
- [13] K. Mehrabi, S. Afsharnia, S. Golshannavaz, "Toward a wide-area load shedding scheme: Adaptive determination of frequency threshold and shed load values," Int. Trans. Electr. Energy Syst., Vol. 28, No. 1, Oct. 2017.
- [14] J. Wang, H. Zhang, Y. Zhou, "Intelligent Under Frequency and Under Voltage Load Shedding Method Based on the Active Participation of Smart Appliances," IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 8, No. 1, Jan. 2017.
- [15] L. Sigrist, I. Egidio, L. Rouco, "Principles of a centralized UFLS scheme for small isolated power systems," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 2, May 2013.
- [16] Y. Xu, W. Liu, J. Gong, "Stable Multi-Agent-Based Load Shedding Algorithm for Power Systems," IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 26, No. 4, Nov. 2011.
- [17] B. Hoseinzadeh, F. M. F. Silva, C. L. Bak, "Adaptive Tuning of Frequency Thresholds Using Voltage Drop Data in Decentralized Load Shedding," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 30, No. 4, Jul. 2015.
- [18] C. Li, Y. Wu, Y. Sun, H. Zhang, Y. Liu, Y. Liu, V. Terzija, "Continuous Under-Frequency Load Shedding Scheme for Power System Adaptive Frequency Control," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 35, No. 2, Mar. 2020.
- [19] B. Potel, V. Debusschere, F. Cadoux, U. Rudez, "A real-time adjustment method of conventional under-frequency load shedding thresholds," IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 34, No. 9, Dec. 2019.
- [20] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "A Low-Order System Frequency Response Model," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 5, No. 3, Aug. 1990.

- [21] P. Etingov, Z. Hou, H. Wang, H. Ren, "Cloud Based Analytical Framework for Synchrophasor Data Analysis," CIGRE Grid of the Future Symposium, Cleveland, Ohio, USA, Nov. 2017.
- [22] Arunan, J. Ravishankar, E. Ambikariajah, "Improved disturbance detection and load shedding technique for low voltage islanded microgrids," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 13, No. 11, Apr. 2019.
- [23] Derviskadic, Y. Zuo, G. Frigo, M. Paolone, "Under Frequency Load Shedding based on PMU Estimates of Frequency and ROCOF," 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technol. - Europe (ISGT-Europe), Oct. 2018.
- [24] Y. Zhu, C. Liu, K. Sun, "Image Embedding of PMU Data for Deep Learning towards Transient Disturbance Classification," *IEEE Int. Conf. on Energy Internet (ICEI)*, Beijing, China, May 2018.
- [25] S. B. Mohammed, A. Khalid, S. E. F. Osman, R. G. M. Helali, "Usage of Principal Component Analysis (PCA) in AI Applications," *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*, Vol. 5, No. 12, Dec. 2016.
- [26] M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*, New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2006.
- [27] U. Rudež, R. Mihalič, "Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 2, May 2011.
- [28] ENTSO-E, "Frequency Measurement Requirements and Usage – Final Version 7," RG-CE System Protection & Dynamics Sub Group, ENTSO-E: Brussels, Belgium, 2018.
- [29] Y. Guo, K. Li, D. M. Laverty, Y. Xue, "Synchrophasor-Based Islanding Detection for Distributed Generation Systems Using Systematic Principal Component Analysis Approaches," *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 30, No. 6, Dec. 2015.
- [30] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1st edition, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [31] H. Huang, P. Ju, Y. Jin, X. Yuan, C. Qin, X. Pan, X. Zang, "Generic System Frequency Response Model for Power Grids with Different Generations," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 14314-14321, Jan. 2020.
- [32] M. Raginsky, "Lecture XV: Inverse Laplace transform," BME 171: Signals and Systems, Duke University, Nov. 2018.
- [33] D. Kopše, U. Rudež, R. Mihalič, "Applying a wide-area measurement system to validate the dynamic model of a part of European power-system," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 119, pp. 1-10, Feb. 2015.
- [34] D. Sodin, R. Ilievska, A. Čampa, M. Smolnikar, U. Rudež, "Proving a Concept of Flexible Under-Frequency Load Shedding with Hardware-in-the-Loop Testing," *Energies* 2020, Vol. 13, pp. 3607, Jul. 2020.
- [35] U. Rudež, R. Mihalič "RoCoF-based Improvement of Conventional Under-Frequency Load Shedding," In *Proceedings of the 2019 IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 23–27 Jun. 2019, pp. 1–5.