

KONCEPT ADAPTIVNEGA PODFREKVENČNEGA RAZBREMENJEVANJA V REALNEM ELEKTROENERGETSKEM SISTEMU

Denis Sodin^{1,2}, Rajne Ilievska³, dr. Andrej Čampa^{1,2}, Miha Smolnikar^{1,2}, dr. Urban Rudež³,

¹ – Institut Jožef Stefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

denis.sodin@ijs.si, andrej.campa@ijs.si, miha.smolnikar@ijs.si,

² – ComSensus d.o.o., Brezje pri Dobu 8a, 1233 Dob

denis.sodin@comsensus.eu, andrej.campa@comsensus.eu, miha.smolnikar@comsensus.eu,

³ – Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

rajne.ilievska@fe.uni-lj.si, urban.rudez@fe.uni-lj.si

Povzetek – Prehod iz konvencionalnih elektroenergetskih sistemov (EES) v pametna omrežja bo močno vplival na frekvenco električne napetosti. Podfrekvenčno razbremenjevanje (PFR) je zadnji mehanizem, ki v primeru padanja frekvence od nazivne vrednosti ščiti EES pred popolnim razpadom. V praksi se večinoma še vedno uporablja konvencionalna shema PFR, na raziskovalnem področju pa je precej aktivnosti za njeno izboljšanje v smislu adaptivnih shem PFR. Le-te za izboljšano delovanje pogosto uporabljajo hitrost spremembe frekvence (RoCoF), ki pa je po drugi strani, zaradi svoje oscilatorne narave, vpletenega šuma in skočnih sprememb, tudi glavni razlog zakaj so operaterji v praksi zadržani do uporabe rešitev povezanih z njim. Cilj tega prispevka je dvigniti raven tehnološke razvitosti ene izmed metod adaptivnega PFR za uporabo v praksi. V ta namen so avtorji implementirali omenjeno metodo na inteligentno elektronsko napravo, jo nadalje razvili in preizkusili njeno delovanje s pomočjo RTDS-a in testiranja v zanki.

Ključne besede: Podfrekvenčno razbremenjevanje, inteligentna elektronska naprava, dokaz ustreznega delovanja koncepta, strojna oprema v zanki, stabilnost rezerva, hitrost spremembe frekvence.

CONCEPT OF ADAPTIVE UNDER-FREQUENCY LOAD SHEDDING IN REAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Abstract – It is widely recognized that in the transition from conventional electrical power systems (EPS) towards smart grids, electrical voltage frequency will be greatly affected. Under-frequency load shedding (UFLS) is the last mechanism that protects EPS from complete blackout in case of a frequency drop event. In practice the conventional UFLS scheme is mostly used, whereas a significant effort is put in its improvements among research community in sense of adaptive UFLS schemes. These primarily use the rate of change of frequency (RoCoF) as a mean to improve performance, but are often challenged in practice due to RoCoF's oscillating character, involved noise and step changes. In this paper, the authors further developed and tested one of the new technologies related to under-frequency load shedding (UFLS) protection. Since the basic idea was to enhance the selected technology's readiness level, a hardware-in-the-loop (HIL) setup with an RTDS was assembled. The under-frequency technology was implemented in an intelligent electronic device (IED) and included in the HIL setup.

Keywords: Under-frequency load shedding, intelligent electronic device, proof of concept, hardware in the loop testing, frequency stability margin, rate of change of frequency.

1 UVOD

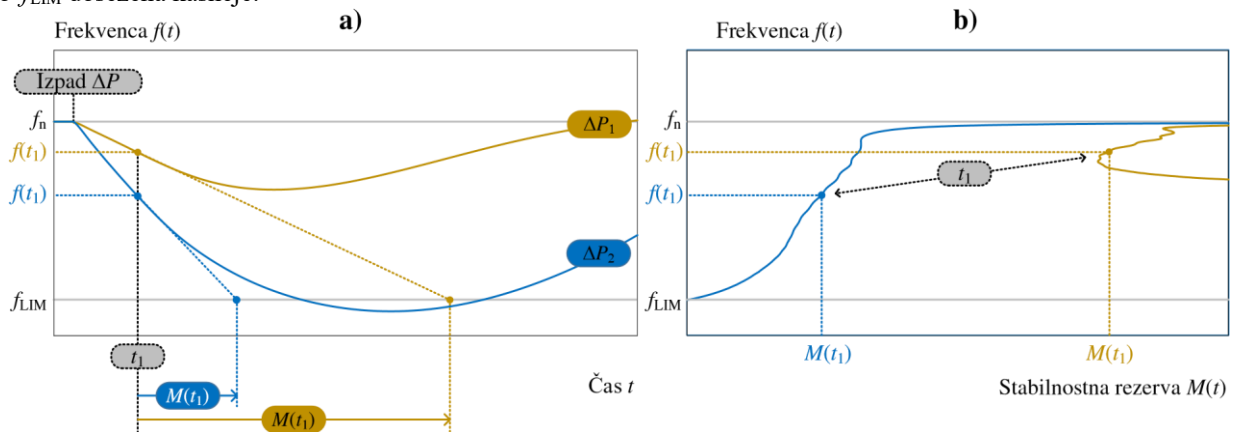
Stabilnost frekvence operaterjem prenosnih sistemov v zadnjih desetletjih ni predstavljala omembe vrednih skrbi. Očiten dokaz tega so sheme PFR, ki se uporabljajo v večini razvitih omrežij po svetu. Razen nekaj izjem v državah, katerih izolirani EES manjših dimenzij so asinhrono povezani z večjimi sistemi, jih velika večina še vedno uporablja pristop, uveden pred desetletji (znan kot konvencionalni ali tradicionalni koncept PFR). Raziskovalna skupnost je problem zanemarjanja razvoja PFR prepoznala že pred časom, kar je privedlo do precejšnjega števila znanstvenih publikacij (npr. najnovejše [1]–[6]). Vseeno pa se zdi, da je večina objavljenih metod zapletenih in zahtevajo uporabo zahtevnih matematičnih metod, od tega kar nekaj netransparentnih. Prav tako mnoge izmed metode temeljijo na komunikaciji med velikim številom zaščitnih naprav v realnem času čez [7], [8] ali predpostavki, o poznani vztrajnosti EES [9]–[11]. Posledično, razen nekaj posameznih pilotnih projektov, glede praktične uporabnosti RoCoF-a na področju PFR ni bilo bistvenega napredka.

V tem prispevku je predstavljen postopek dokazovanja ustreznega delovanja koncepta inovativne in praktično izvedljive sheme PFR [12] s pomočjo HIL (angl. hardware in the loop) simulacij [13]. V ta namen je bil uporabljen digitalni simulator v realnem času (RTDS) skupaj z IED (angl. intelligent electronic device), ki je služil izvajanju lokalnega algoritma PFR. Med HIL testiranjem inovativne metode PFR smo razvili kar nekaj izboljšav, ki jih lahko strnemo v naslednje točke: (i) izboljšano filtriranje meritev za boljšo ločljivost in filtriranje nepravilnosti, (ii) dokaz, da kljub filtriranju RoCoF-a uvedene časovne zakasnitve ne zmanjšajo hitrosti delovanja PFR in (iii) preprosta implementacija metode na obstoječe IED naprave.

2 INOVATIVNA UPORABA ROCOF-A

Uporabljena shema PFR, prikazana v tem poglavju, je bila obširno predstavljena v [12], [14] in ovrednotena s simulacijskim orodjem za dinamiko EES; PSS Netomac. Ker je za bralca pomembno, da se seznanijo z glavno idejo metode (od tod dalje označena kot inovativna metoda - IMPFR), je kratek povzetek podan tudi v tem referatu. Navsezadnje je namen pokazati, da (i) koncept deluje v okolju, ki je čim bližje realnemu in (ii) potrebne izboljšave metode za uporabo v praksi.

Prvi doprinos IMPFR je izračun stabilnostne rezerve $M(t)$ na vseh lokacijah frekvenčnih relejev v EES v realnem času. $M(t)$ je časovno odvisna spremenljivka, ki oceni čas v katerem bo frekvenca $f(t)$ EES presegla vnaprej določeno mejno frekvenco stabilnosti f_{LIM} . V ta namen se predpostavi, da bo v primeru, ko ne posreduje nobena izmed mehanizmov za nadzor / zaščito frekvence, sprememba $f(t)$ sledila poteku, ki ga nakazuje trenutna meritev $RoCoF(t)$. Na Sliki 1a modra in rumena krivulja prikazujeta frekvenčni odziv EES na dva različna izpada proizvodnje delovne moči ΔP . V trenutku $t=t_1$ sta vrednosti $RoCoF(t_1)$ krivulj različni, posledično pa sta različni tudi vrednosti $M(t_1)$. Očitno je, da je manjši izpad delovne moči ΔP_1 v primerjavi z večjim izpadom ΔP_2 povzročil manjšo odstopanje frekvence od nazivne vrednosti f_n . Slednje se kaže tudi v višji vrednosti $M(t_1)$, kar nakazuje, da bo f_{LIM} dosežena kasneje.



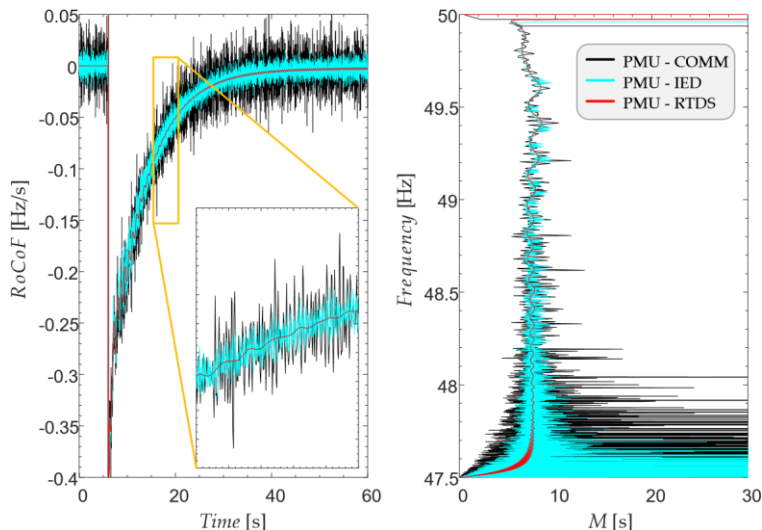
Slika 1: Frekvenčni odziv EES na različna izpada delovne moči ΔP (a) in pripadajoči graf frekvence v odvisnosti od stabilnostne rezerve (b).

Drugi doprinos IMPFR je inovativna predstavitev trenutnih razmer v EES z grafom $f(t)$ v odvisnosti od $M(t)$; glej Sliko 1b. Po izpadu ΔP se delovna točka po diagramu začne premikati vzdolž pripadajoče krivulje, ki je usmerjena v eno izmed dveh možnih smeri: (i) koordinatno izhodišče ($M=0, f=f_{LIM}$) v spodnjem levem delu grafa (modra krivulja) ali (ii) daleč stran od ordinate grafa (rumena krivulja). V skladu s tem lahko določimo nov, dvo-stopenjski kriterij za proženje sheme PFR. Prvi kriterij ostaja enak konvencionalnemu (kršenje vnaprej določenega praga f_{THR}), med tem ko drugi predstavlja kršitev vnaprej določenega praga stabilnosti M_{THR} in se spremlja neodvisno od prvega. Šele, ko sta dosežena oba pogoja hkrati se generira signal za izklop bremena.

3 PAMETNA ELEKTRONSKA NAPRAVA

V namen RTDS testiranja IMPFR metodologije (predstavljene v prejšnjem poglavju) smo uporabili IED, ki temelji na naši, znotraj podjetja razviti in popolnoma funkcionalni, PMU (angl. Phasor measurement unit) napravi; od tod dalje označeni PMU-IED. V prvem koraku smo preizkusili ali je primarna funkcija PMU-IED primerna za uporabo v IMPFR. Za primerjavo smo uporabili enega izmed komercialno dostopnih PMU-jev, imenovanega PMU-COMM. Oba PMU-ja sta skladna z zadnjo revizijo standarda [15]. Glavni razlogi za predelavo PMU naprave v IED za namen IMPFR so predvsem: visoka resolucija poročanja (do 200 Hz), visoka natančnost, kratki odzivni časi, vhodno/izhodni vmesnik in obdelava v realnem času. S prilagoditvijo PMU funkcionalnosti v skladu s potrebami IMPFR smo pridobili popolnoma funkcionalno IED napravo, ki je pripravljena za uporabo v praksi.

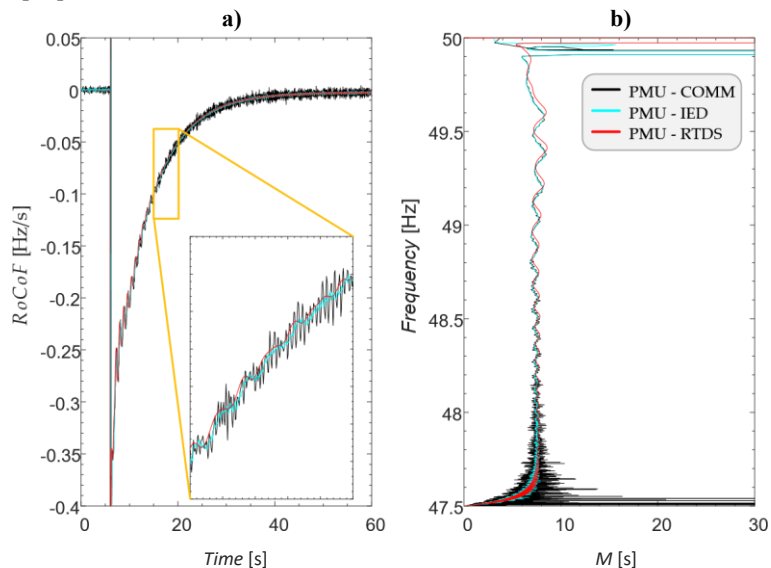
V prvem nizu testov smo obsežno preizkusili odziv PMU-IED in PMU-COMM v primerjavi s programskim PMU-jem simulatorja; PMU-RTDS. PMU-ji so bili nastavljeni na maksimalno resolucijo poročanja, to je 200 Hz za PMU-IED in PMU-RTDS ter 50 Hz za PMU-COMM. Prva ugotovitev testiranja je bila, da PMU-RTDS predstavlja idealen primer, kjer šum ne vpliva na izmerjene veličine, kar pa ne velja za ostala PMU-ja. V podporo tej trditvi smo izvedli simulacijo precejšnjega primankljaja ΔP , ki povzroči skočno spremembo RoCoF-a iz vrednosti 0 na približno -0.4 Hz/s, Slika 2.



Slika 2: Izmerjen časovni potek RoCoF-a vseh treh naprav s simulacijo izpada delovne moči (a) pripadajoči grafi frekvence v odvisnosti od stabilnostne rezerve (b).

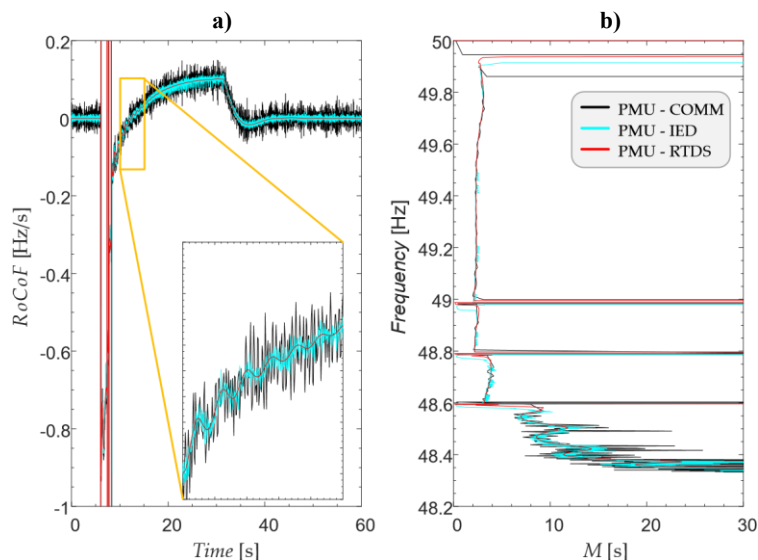
Po pričakovanih rezultat PMU-RTDS ne vsebuje šuma (rdeča krivulja), po drugi strani pa obe testirani fizični napravi, PMU-IED (modra krivulja) in PMU-COMM (črna krivulja), izkazujeta visoko stopnjo nihanja/šuma okoli pričakovanih vrednosti. Razlog za to je, da je RoCoF hitrost spremembe frekvence, zaradi česar so tudi majhne, hitre spremembe frekvence v RoCoF-u dosti bolj izrazite. Takšna nihanja imajo izjemen vpliv na uporabnost IMPFR, zaradi česar smo se najprej posvetili filtriranju RoCoF-a.

Na Sliki 3 je bil izračunu RoCoF-a dodan filter, ki povpreči vse vzorce (drseče povprečje) z dolžino okna 200 ms. Povprečenje zniža odzivnost sistema, saj se z daljšanjem okna omejuje dinamika signala (v limiti se prepusti samo enosmerna komponenta signala). Filter drsečega povprečja močno omeji nihanje RoCoF-a, vendar pa po drugi strani povzroči zakasnitev izhodnega signala (približno polovico dolžine okna, tj. ~ 100 ms, kar lahko opazimo kot zamik krivulj PMU-IED in PMU-COMM glede na PMU-RTDS), kar se odraža tudi na $f(t)$ - $M(t)$ diagramu; Slika 3b. Opaziti je tudi, da je znižanje nihanja RoCoF-a za primer PMU-COMM manj uspešno kot pri PMU-IED. Slednje je posledica nižjega F_s (50 Hz) in dejstva, da je uspešnost zmanjšanja šuma povezana s kvadratnim korenem točk v oknu [16].



Slika 3: Izboljšanje poročanega $RoCoF(t)$ po uporabi filtra drsečega povprečja (a) in pripadajoči grafi frekvence v odvisnosti od stabilnostne rezerve (b).

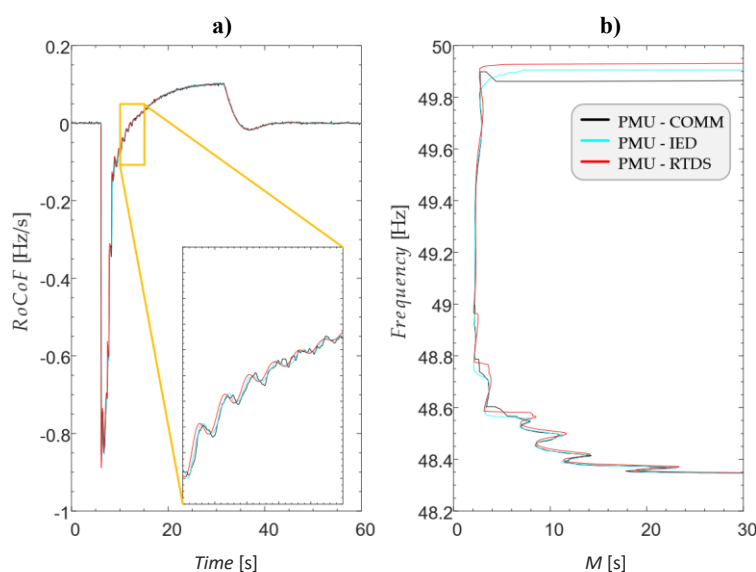
V naslednjem koraku smo se osredotočili na dinamiko RoCoF-a v trenutkih, kjer pride do skočne spremembe aktivne moči v EES (bodisi začetni izpad proizvodnje, bodisi poseg PFR). Takšni dogodki se namreč odražajo v začasno popačenih vrednostih izmerjenih električnih količin (napetosti, toka), posledično pa tudi v izračunanih vrednostih frekvence in RoCoF-a. V tem primeru smo v simulaciji uporabili dvakrat večji izpad proizvodnje delovne moči, ki povzroči tudi dvakrat višji začetni RoCoF (~ -0.8 Hz/s), prav tako pa smo v simulaciji omogočili delovanje PFR. Za lažje razumevanje smo niz neobdelanih meritev (brez filtra drsečega povprečja) za ta primer prikazali na Sliki 4. Podfrekvenčna zaščita je v tem primeru z odklopom porabnikov odreagirala trikrat (pri vnaprej določenih pragovih 49.0, 48.8 in 48.6 Hz).



Slika 4: Izmerjen časovni potek RoCoF-a vseh treh naprav s simulacijo izpada delovne moči in tri delovanja (odklop porabnikov) podfrekvenčne zaščite (a) pripadajoči grafi frekvence v odvisnosti od stabilnostne rezerve (b).

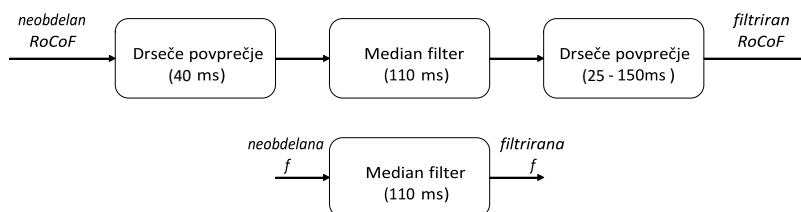
Po vsakem dogodku povezanim s hipno spremembo delovne moči v EES se tako v frekvenci kot v RoCoF-u pojavijo kratkotrajne numerične oscilacije, ki se v diagramu $f(t)-M(t)$ izkazujejo kot izrazita odstopanja od pričakovane poti krivulj. Drugi korak izboljšave IMPFR je bil tako posvečen filtriranju teh trenutnih oscilacij v frekvenci in zlasti v RoCoF-u. Izvedena raziskava je pokazala, da se vrednosti RoCoF-a med dogodki povečajo za več velikostnih razredov, kar je bilo vodilo za uporabo ene izmed tehnik nelinearnega filtriranja; samo z uporabo drsečega povprečja ali podobnega linearnega filtra bi se namreč neželena nihanja razpotegnila po časovni osi, kar bi zahtevalo dolgo dolžino okna filtra in bi botrovalo neželenim zakasnitvam delovanja metode.

Po skrbnem premisleku smo za filtriranje skočnih vrednosti izbrali median filter, katerega vpliv na RoCoF skupaj s filtrom drsečega povprečja je prikazan na Sliki 5. Slika 5b prikazuje, da opisan pristop uspešno odstrani tako težave s šumom kot tudi oscilacije, ki so posledica skočnih sprememb delovne moči.



Slika 5: Izboljšanje poročanega $RoCoF(t)$ po uporabi filtra drsečega povprečja in median filtra (a) in pripadajoči grafi frekvence v odvisnosti od stabilnostne rezerve (b).

Delovanje PMU-IED smo tako prilagodili in namesto privzetega izhodnega filtra uporabili kombinacijo filtrov; Slika 6.



Slika 6: Konfiguracija izhodnih filtrov frekvence in RoCoF-a

4 REZULTATI

Delovanje IMPFR smo primerjali s konvencionalno, šest-stopenjsko shemo PFR, ki se trenutno uporablja v Sloveniji, na referenčnem IEEE 9-vozliščnem modelu. Mejni pragovi obeh shem so podani v Tabeli 1. V stabilni

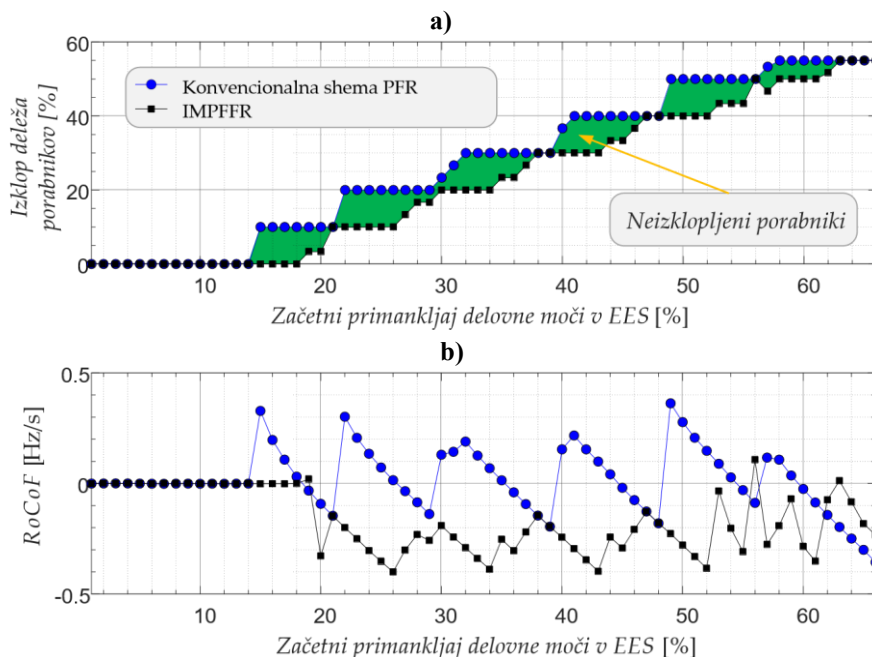
točki obratovanja je skupna obremenitev EES znašala 315 MW, skupna proizvodnja pa 319.6 MW. IEEE 9 modelu je bila dodana še toga mreža, odklop katere je predstavljal začetni primankljaj delovne moči v novo nastalem otoku. S spreminjanjem začetne obratovalne točke generatorjev in odklopom toge mreže je mogoče simulirati različne primankljaje delovne moči, ki povzročijo padanje frekvence v omrežju in posledično sprožijo

Tabela 1: Nastavitve konvencionalne sheme PFR (frekvenčni fragovi f_{THR}) skupaj z dodatnimi pragovi meje frekvenčne stabilnosti (M_{THR}) predlagane IMPFR

Stopnja zaščite	f_{THR} [Hz]	M_{THR} [s]	Izklop porabnikov [%]
1.	49.0	6.0	10
2.	48.8	5.0	10
3.	48.6	4.0	10
4.	48.4	3.0	10
5.	48.2	2.0	10
6.	48.1	1.0	5

delovanje podfrekvenčne zaščite.

Raziskava je vključevala 66 testnih primerov pri katerih se je skupna proizvodna zmogljivost pred izklopom toge mreže zniževala po 1 %. Na ta način smo zviševali količino energije, ki jo je zagotavljala toga mreža pred izklopom (in posledično neravnovesje med proizvodnjo in porabo delovne moči v trenutku izklopa). Zadnji (66.ti) primer prikazuje stanje, kjer frekvenca pade pod f_{LIM} navkljub popolnemu iztrošenju vseh razpoložljivih kontrolnih in zaščitnih mehanizmov za stabilnost frekvence (primarni nadzor frekvence in vseh 6 stopenj podfrekvenčne zaščite) in bi v praksi vodil v popoln razpad sistema.



Slika 7: Pregled rezultatov celotnega niza 66 simuliranih primerov HIL testiranja; skupni delež izklopljenih porabnikov v odstotkih (a) in RoCoF po zadnji odklopljeni stopnji podfrekvenčne zaščite.

Slika 7 prikazuje pregled rezultatov pridobljenih iz celotnega niza 66 simuliranih primerov. Zaporedna številka primera (istočasno tudi primankljaj delovne moči v %) je navedena na vodoravni osi. Rezultati konvencionalne sheme PFR so prikazani z modro bravo, rezultati IMPFR pa s črno. Na Slika 7a je prikazan odstotek vseh porabnikov, ki so bili zaradi delovanja podfrekvenčne zaščite začasno odklopljeni iz EES. Konvencionalna shema PFR se aktivira v 79 % (52 od 66) vseh simuliranih primerov. Izmed teh IMPR ohrani večji delež porabnikov

napajanih v 81 % (42 od 52) primerov, pri čemer pa je še vedno uspešen pri stabilizaciji frekvence EES. Delež porabnikov, ki (po zaslugi boljšega delovanja IMPFR napram konvencionalni shemi) ostane napajani je na sliki označen z zeleno površino.

Omeniti velja, da je nižji delež odklopljenih odjemalcev le ena izmed prednosti IMPFR. Pri ocenjevanju učinkovitosti shem PFR so različni avtorji upoštevali različne kriterije; od potrebnega časa, da se frekvenca vrne na nazivno vrednost, pa do primerjave odstopanja frekvence od nazivne vrednosti po prehodu v novo ravnovesno stanje (po dogodku). V [17] je bilo sklenjeno, da za učinkovitost ocenjevanja shem PFR ni enotne metrike, nekaj pa je zagotovo; glavni cilj PFR je po definiciji ustaviti nadaljnje padanje frekvence [18], oz. povedano drugače, obnoviti razmerje med proizvedeno in porabljeno električno energijo. To pomeni, da mora podfrekvenčna zaščita stabilizirati frekvenco, tj. vrednost RoCoF-a čim bolj približati vrednosti 0.

Iz tega razloga je na Sliki 7b prikazana vrednost RoCoF-a po zadnjem posegu PFR za vsak primer. Ta kriterij je popolnoma neodvisen od drugih vplivnih mehanizmov (predvsem od lastnosti in nadzora regulatorja), ki imajo po aktiviranju PFR pogosto pomemben vpliv na frekvenčni odziv. Primerom kjer podfrekvenčna zaščita ni delovala smo dodelili vrednost RoCoF-a 0. Iz slike je razvidno, da konvencionalna shema v 52 % (29 od 52) primerov ni bila uspešna, saj je zadnji izklop porabnikov povzročil presežek proizvodnje električne energije, kar bi v praksi lahko vodilo do nadfrekvenčnega problema in posledično izklopa elektrarn. Po drugi strani pa je IMPFR pred zadnjim izklopom uspešno ustavil svojo intervencijo, saj je uspešno prepoznal, da se bo frekvenca kmalu stabilizirala brez njegovega posredovanja. Vrednosti RoCoF-a po zadnjem posegu tako ostanejo pod 0 (povprečna vrednost -0.25 Hz/s) v 98 % (46 od 47) primerov, kjer je fino uravnavanje ravnotežja moči prepuščeno frekvenčni kontroli. Poudariti je potrebno, da začasna zaustavitev proženja določene stopnje podfrekvenčne zaščite ne pomeni, da je ta stopnja trajno blokirana. Ravno nasprotno; preprečitev izklopa stopnje traja samo dokler nista izpolnjena oba pogoja za njeno proženje (tako f_{THR} , kot M_{THR} kriterij). To pomeni, da se bo stopnja v primeru, ko je regulacija frekvence že popolnoma izčrpana sprožila nekoliko kasneje (posledično bo odziv v primerjavi s konvencionalno shemo v tem primeru nekoliko slabši). Tak slučaj prikazuje primer 56 na Sliki 7, iz katere je očitno, da so takšne situacije izjemno redke (~2 % oz. 1 od 52 primerov), kljub vsemu pa tudi v teh primerih IMPFR uspešno odpravi padanje frekvence.

5 ZAKLJUČKI

Kljub decentralizaciji proizvodnje električne energije v pametnih omrežjih so zaščitne sheme običajno še vedno centralizirane. V tem referatu smo dokazali koncept ustreznega delovanja IMPFR na osnovi RoCoF-a, ki ne zahteva centralizacije, še vedno pa zagotavlja visoko stopnjo učinkovitosti in prilagodljivosti. Glavni zaključek prispevka je, da je IMPFR izvedljiv za scenarije v praksi in da uporaba RoCoF-a ne vpliva na robustnost predlagane sheme v nobenih pogojih, če so uporabljene ustrezne tehnike filtriranja. Superiorno delovanje IMPFR napram konvencionalni metodi je opaziti predvsem pri zmernih vrednostih RoCoF-a, medtem ko pri visokih vrednostih IMPFR odreagira identično kot konvencionalna shema PFR.

ZAHVALA

V prispevku predstavljeno raziskovalno delo so delno sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru programa P2-0356 in projekta J2-9232, Evropska skupnost v okviru projektov Obzorja 2020 DEFENDER (pog. št. 740898) in RESOLVD (pog. št. 773715) ter Evropski sklad za regionalni razvoj prek projekta OIS-AIR s finančno podporo programa ADRION.

REFERENCE

- [1] S. Li, F. Tang, Y. Shao, and Q. Liao, 'Adaptive Under-Frequency Load Shedding Scheme in System Integrated with High Wind Power Penetration: Impacts and Improvements', *Energies*, vol. 10, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10091331.
- [2] R. Małkowski and J. Nieznański, 'Underfrequency Load Shedding: An Innovative Algorithm Based on Fuzzy Logic', *Energies*, vol. 13, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13061456.
- [3] L. Sigrist, 'A UFLS Scheme for Small Isolated Power Systems Using Rate-of-Change of Frequency', *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 2192–2193, Jul. 2015, doi:

10.1109/TPWRS.2014.2357218.

- [4] Y.-Y. Hong and M.-T. Nguyen, 'Multiobjective Multiscenario Under-Frequency Load Shedding in a Standalone Power System', *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 2759–2769, Jun. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2931934.
- [5] S. S. Banijamali and T. Amraee, 'Semi-Adaptive Setting of Under Frequency Load Shedding Relays Considering Credible Generation Outage Scenarios', *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 3, pp. 1098–1108, Jun. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2884089.
- [6] B. Potel, F. Cadoux, L. Garcia, and V. Debusschere, 'A Clustering-based Method for the Feeder Selection to Improve the Characteristics of Load Shedding', *IET Smart Grid*, vol. 2, Aug. 2019, doi: 10.1049/ietstg.2019.0064.
- [7] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, 'An Adaptive Wide-Area Load Shedding Scheme Incorporating Power System Real-Time Limitations', *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 759–767, Mar. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2016.2535170.
- [8] Y. Zuo, G. Frigo, A. Derviškadić, and M. Paolone, 'Impact of Synchrophasor Estimation Algorithms in ROCOF-Based Under-Frequency Load-Shedding', *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 1305–1316, Mar. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2936277.
- [9] P. He, B. Wen, and H. Wang, 'Decentralized Adaptive Under Frequency Load Shedding Scheme Based on Load Information', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52007–52014, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911665.
- [10] Y. Tofis, S. Timotheou, and E. Kyriakides, 'Minimal Load Shedding Using the Swing Equation', *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 2466–2467, May 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2614886.
- [11] J. Jallad, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and J. A. Laghari, 'Improved UFLS with Consideration of Power Deficit during Shedding Process and Flexible Load Selection', *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, Jan. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0170.
- [12] R. Urban, S. Denis, and M. Rafael, 'Estimating frequency stability margin for flexible under-frequency relay operation', *Electric Power Systems Research*, vol. 194, p. 107116, May 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107116.
- [13] D. Sodin, R. Ilievska, A. Čampa, M. Smolnikar, and U. Rudez, 'Proving a Concept of Flexible Under-Frequency Load Shedding with Hardware-in-the-Loop Testing', *Energies*, vol. 13, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13143607.
- [14] U. Rudez and R. Mihalic, 'RoCoF-based Improvement of Conventional Under-Frequency Load Shedding', in *2019 IEEE Milan PowerTech*, Jun. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/PTC.2019.8810438.
- [15] 'IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems - Measurements', *IEC/IEEE 60255-118-1:2018*, pp. 1–78, Dec. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8577045.
- [16] S. W. Smith, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego (Calif.): California Technical Pub., 1999.
- [17] A. Q. Santos, R. M. Monaro, D. V. Coury, and M. Oleskovicz, 'New scoring metric for load shedding in multi-control area systems', *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 5, pp. 1179–1186, Jan. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0927.
- [18] S. Matthewman and R. H. B., 'Blackouts: a sociology of electrical power failure', *Socialspace*, pp. 1–25, Jan. 2014.