

Uporaba gradientnega merila pri podfrekvenčnem razbremenjevanju

Urban Rudež, Valentin Ažbe, Rafael Mihalič

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: urban.rudez@fe.uni-lj.si

Povzetek. Elektroenergetski sistemi so močno izpostavljeni zunanjim vplivom, ki lahko privedejo sistem iz normalnega obratovanja v moteno obratovanje. Med takšna stanja spada tudi otočno obratovanje posameznih delov elektroenergetskega sistema. Eden od pogojev za ohranitev otoka je vzdrževanje enakosti med proizvodnjo in porabo, kar je problematično predvsem v trenutku nastanka otoka. Članek raziskuje enega od ukrepov, ki ga lahko uvrstimo med precej drastične, vendar neizogibne rešitve – podfrekvenčno razbremenjevanje.

Najprej je podana obstoječa metoda razbremenjevanja skupaj z njenimi slabostmi. V nadaljevanju je raziskan vpliv raznih parametrov modela obravnavanega sistema na potek frekvence ob deficitu moči v otoku. Med te parametre spadajo model bremen, stopenjska porazdelitev razbremenjevanja, parametri turbinske regulacije in obseg rotirajoče rezerve. Razumevanje vpliva teh parametrov je ključen za razumevanje predloga metodologije razbremenjevanja, prikazane v nadaljevanju, ki temelji na merjenju gradienta frekvence. V naslednjem poglavju so prikazani rezultati simulacij za tri obratovalna stanja, skupaj s primerjavo z obstoječim modelom. V sklepnem poglavju so izpostavljene prednosti predlagane metode, predvsem s stališča manj obsežnih razbremenitev in ugodnejšega poteka frekvence ob prehodu v otočno obratovanje.

Ključne besede: podfrekvenčno razbremenjevanje, gradient frekvence, otočno obratovanje, rotirajoča rezerva

The Application of a Frequency Gradient for Underfrequency Load Shedding

Extended abstract. Dependency of modern societies on uninterrupted and secure electricity supply is considerable. As electricity blackouts are extremely critical for any region or country from the economic, political and security point of view, measures should be taken towards minimization of load tripping. One such measure is underfrequency load tripping during island operation. By using the method some of the consumers still remain supplied with electricity and moreover, EPS normal operation is resumed faster and easier.

The Slovenian EPS has adopted an islanding strategy for critical power-system situations as a sole policy allowing "survival" merely of the islands with power generation. However, when the island electricity consumption exceeds its generation, the frequency drops and underfrequency relays related trip a certain amount of its load according to a pre-defined pattern. The current strategy is based on the absolute value of the frequency drop (tripping in four stages, defined with an absolute frequency value). The used underfrequency relays also enable activation of a frequency-gradient criterion, for which detailed data about the island dynamic behavior need to be acquired. It should be noted that any island, as well as its operating conditions, is specific meaning that relay setting cannot be generalized.

In our investigation we studied the dynamic behavior of a selected island in Slovenia under various operating states. Four important impacting factors were recognized as crucial for computer analysis of the island operation: the load

modeling, level of load tripping at different stages, turbine governor parameters and amount of the spinning reserve. Results of our analysis were used as a basis in setting up of an underfrequency relay shedding scheme.

The simulation results showed that by using the developed scheme a considerable amount of the island load can be prevented from being tripped. The benefits regarding the island dynamic behavior (the frequency drop and the overshoot are lower) can also be recognized. When the gap between the island possible generation and consumption is large, the island cannot operate with the currently applied shedding scheme. This is made possible by using the proposed scheme in which the frequency-decay rate (i.e. the gradient) is utilized as an indicator of the amount of missing generation. Following the above, the total shedding volume of the proposed scheme is a variable quantity.

Keywords: underfrequency load shedding, frequency gradient, island operation, spinning reserve.

1 Uvod

Elektroenergetski sistem (EES) večino časa obratuje v normalnih razmerah obratovanja. V nenormalne razmere ga lahko privedejo le večje motnje, ki so neželeni dogodki v sistemu. Zaporedje takšnih dogodkov lahko privede tudi do izolacije določenih delov omrežja, torej do otočnega obratovanja. V otokih, predvsem manjših, je težavnost ohranjanja stabilnega obratovanja večja kot v velikih sistemih. To dokazuje eden od vzrokov povezovanja nacionalnih EE sistemov v interkonekcije, t. j. večja stabilnost obratovanja.

Avtorji se zahvaljujejo Ministrstvu za obrambo Republike Slovenije za financiranje projekta »Obratovanje slovenskega EES ob naravnih in drugih nesrečah«, v okviru katerega smo se prebili do spoznanj, objavljenih v tem članku. Posebna zahvala za spodbude in razumevanje ob izvajanju projekta velja vsebinskemu spremljevalcu g. Milanu Frankoviču.

Stanje obratovanja sistema določajo spremenljivke stanja sistema, kot so napetost, fazni kot in frekvenca. Frekvenca v EES je merilo odstopanja od ravnotežja proizvodnje in porabe električne energije. Pri pomanjkanju proizvodnje se manjkajoča energija zagotovi iz rotirajočih mas generatorjev, kar pomeni nižanje frekvence vrtenja. Takšno padanje frekvence je mogoče ustaviti le s ponovno vzpostavitev ravnotežja, pri čemer je zelo pomemben čas, v katerem do tega pride. Obratovanje proizvodnih enot, kot tudi določenih bremen, je namreč vezano na določeno območje frekvence. Prenizka vrednost frekvence lahko sproži delovanje podfrekvenčne zaščite agregatov, napajanje odjemalcev z električno energijo slabe kakovosti pa ima tudi lahko hude posledice.

Pri vzpostavljanju ravnotežja moči sodelujejo samoregulacija bremen, turbinska regulacija in podfrekvenčno razbremenjevanje. V članku smo se posvetili predvsem analizi zadnjega, zaradi njihovega kombiniranega vpliva pa je bilo tudi preostali dve nemogoče popolnoma prezreti. Prisilno zmanjševanje odjema je skrajni ukrep pri hujših motnjah, saj je električna energija dobrina, brez katere si življenja ne znamo več predstavljati. Poleg tega je treba t. i. strateško kritičnim odjemalcem poskusiti ohraniti napajanje.

Drugi razlog za ohranitev otokov je preprostejši in predvsem hitrejši postopek ponovnega vzpostavljanja normalnega obratovanja v primeru ohranjenih otokov. V članku smo se omejili na dinamično analizo prehoda v točno obratovanje.

2 Podfrekvenčno razbremenjevanje

Sistemska obratovalna navodila za prenosno omrežje električne energije - SONPO [1] določajo princip podfrekvenčnega razbremenjevanja, ki se trenutno uporablja v Sloveniji. Ta temelji na merjenju vrednosti frekvence, razbremenjevanje pa se izvaja v štirih stopnjah (Tabela 1). Skupni obseg zmanjševanja odjema je nespremenljiv in znaša 55 %. To pomeni, da v razmerah z večjim primanjkljajem moči opazovani otok ne bi obstal, stopnje razbremenjevanja so vedno enakega obsega, ne glede na resnost motnje.

Tabela 1: Obstoječa shema podfrekvenčnega razbremenjevanja

Table 1: Currently used underfrequency load-shedding scheme

Stopnja	Frekvenca [Hz]	Ukrep
I.	49,0	10% znižanje obremenitve
II.	48,8	dod. 15% znižanje obremenitve
III.	48,4	dod. 15% znižanje obremenitve
IV.	48,0	dod. 15% znižanje obremenitve

V preteklosti je bilo pokazano, da je mogoče z merjenjem gradienta frekvence df/dt izboljšati rezultate podfrekvenčnega razbremenjevanja [2]-[5]. Releji za

podfrekvenčno razbremenjevanje v Sloveniji imajo večinoma možnost merjenja in uporabe gradienta frekvence, vendar njihova uporaba še ni zaživila.

Gradient frekvence daje dobro indikacijo o resnosti položaja v otoku, s čimer je mogoče odpraviti pomanjkljivost obstoječega sistema.

3 Vplivni faktorji

Poglavje podaja pregled faktorjev, ki jih je treba upoštevati pri določanju sheme podfrekvenčnega razbremenjevanja. Prikazan je tudi njihov vpliv na trajektorijo frekvence pri primanjkljaju delovne moči.

3.1 Napetostna odvisnost bremen

Odstopanje frekvence v EES od njene nazivne vrednosti je odvisno od razmerja med proizvodnjo in porabo delovne moči. Večja ko je razlika med njima, hitrejša so spremembe frekvence. To pomeni, da se količina odstopanja od ravnovesja proizvodnje in porabe delovne moči neposredno odraža v višjih absolutnih vrednostih gradienta frekvence.

V trenutku nastanka otoka pa lahko hkrati pride tudi do pomanjkanja jalove moči. Posledica je padec napetosti na odjemnih vozliščih. V dejanskih EES se to pokaže z znižanjem odjemnih moči bremen, zato je treba modelirati bremena kot napetostno odvisna. Približek sta enačbi (1).

$$P = P_n \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^\alpha, \quad Q = Q_n \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^\beta \quad (1)$$

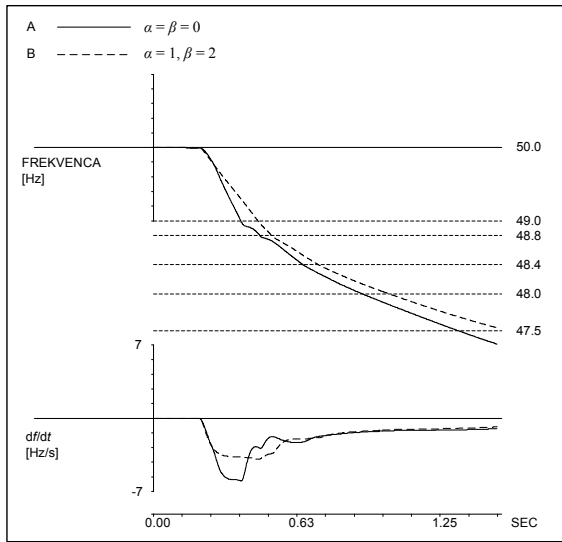
Za vrednosti α in β sta bili izbrani vrednosti 1 in 2, kar pomeni, da se delovna moč spreminja linearno s spremembo napetosti, medtem ko se jalova moč s kvadratom spremembe. Slika 1 prikazuje primerjavo frekvenčnega odziva z izbranim modelom (krivulja B) in konstantnim PQ bremenom (krivulja A, $\alpha = 0$, $\beta = 0$) otoka He Mavčiče – HE Medvode (Slika 6). Razlika v padanju frekvence znaša skoraj faktor 2. Ker je opisani model bližje realnemu stanju, je njegova uporaba za uporabo gradienta frekvence pri določanju sheme podfrekvenčnega razbremenjevanja nujna.

3.2 Stopenjska porazdelitev razbremenjevanja

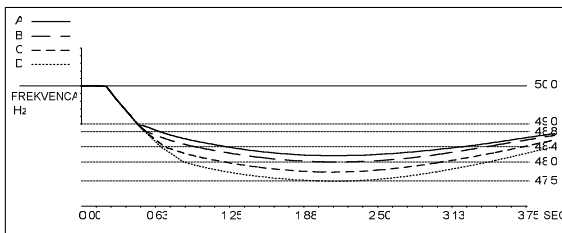
S simulacijami smo analizirali vpliv posameznih stopenj razbremenjevanja (če je teh več). Izkazalo se je, da je s stališča poteka frekvence bolje dati poudarek na zgodnejše stopnje, kar je bilo pokazano že v [3].

Obravnavali smo štiri primere z enakim skupnim obsegom razbremenitve (50 %, kar zadostuje v vseh štirih primerih), vendar z njihovo različno porazdelitvijo na stopnje. Podatke o posameznih primerih podaja Tabela 2.

Rezultati (Slika 2) kažejo, da je smiselno čim večji delež skupne razbremenitve izvesti v prvi stopnji, ki je bila v našem primeru pri 49,0 Hz. S tem se namreč zmanjša strmina upadanja frekvence ter tako omogoči dovolj časa turbinski regulaciji za ustrezen odziv.



Slika 1: Vpliv modela bremen na gradient frekvence
Figure 1: Load modeling impact on the frequency gradient



Slika 2: Vpliv porazdelitve razbremenjevanja po tabeli 2 na potek frekvence
Figure 2: Shedding steps impact (table 2) on the frequency trajectory

Tabela 2: Simulirane porazdelitve razbremenjevanja
Table 2: Different load shedding distribution simulations

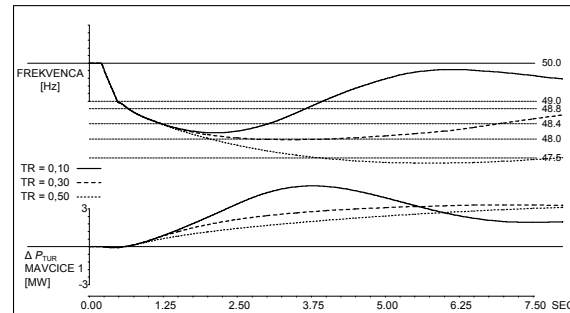
Primer	Frekvenco [Hz]				Skupni obseg razbr.
	I. st.	II. st.	III. st.	IV. st.	
A	49,0	48,8	48,4	48,0	50 %
B	20 %	30 %	-	-	50 %
C	10 %	20 %	20 %	-	50 %
D	10 %	10 %	15 %	15 %	50 %

3.3 Parametri turbinske regulacije

Simulacije so pokazale, da imajo parametri turbinske regulacije pomemben vpliv na dinamične pojave v otoku. Vzrok za to kaže iskati v dejstvu, da ostane ob prehodu v otok med seboj povezanih le nekaj agregatov, frekvenca otoka pa se zaradi manjše vsote vztrajnostnih mas spreminja zelo hitro. Ob hitrih spremembah frekvence pa pride do izraza predvsem vpliv tranzientne statike T_R .

Slika 3 prikazuje frekvenčni odziv pri prehodu v izbrani otok z določenim primanjkljajem delovne moči,

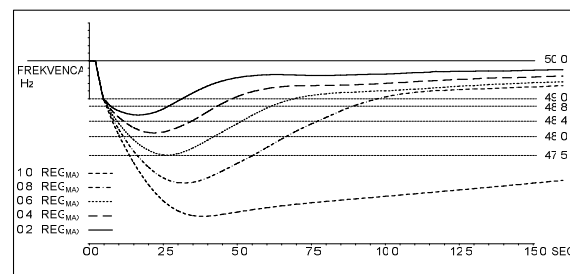
50 % razbremenitvijo ob prehodu frekvence pod 49 Hz ter tri različne vrednosti T_R ($T_{R1} = 0,1$ – polna krivulja, $T_{R2} = 0,3$ – črtkasta krivulja in $T_{R3} = 0,5$ – pikčasta krivulja). Jasno je vidna razlika v zakasnitvi odziva turbinske regulacije (ΔP_{TUR} za HE Mavčiče 1). To pa je faktor, ki močno vpliva na količino odjemalcev, katerim je napajanje zaradi premajhne količine proizvodnje prekinjeno. Simulacije, prikazane v poglavju 5, so bile izvedene za vrednost $T_{R1} = 0,15$.



Slika 3: Vpliv tranzientne statike na potek frekvence
Figure 3: Transient statics impact on the frequency trajectory

3.4 Obseg rotirajoče rezerve

Poleg parametrov turbinske regulacije je tudi njen razpoložljiv obseg pomemben dejavnik pri določanju frekvenčnega odziva. Z aktiviranjem rotirajoče rezerve je mogoče ohraniti napajanje več odjemalcev. Zaradi zakasnitve delovanja regulacije pa je ob padanju frekvence nemogoče celotno razpoložljivo rotirajočo moč uporabiti v ta namen. Slika 4 prikazuje potek frekvence pri uporabi različnega odstotka regulacijske moči. Ker je pokazano, da ima razbremenjevanje v zgodnejših stopnjah za posledico ugodnejši frekvenčni odziv, je ob prehodu frekvence pod 49 Hz prisotna enkratna razbremenitev v ocenjeni višini primanjkljaja delovne moči, ki se za posamezne primere na grafu zmanjša na račun izrabe različne količine regulacijske moči. Če je na primer razbremenitev v višini ocenjenega primanjkljaja moči zmanjšana za 20 % celotne razpoložljive rotirajoče rezerve, je potek frekvence prikazan s polno črto (Slika 4).



Slika 4: Vpliv uporabljenega obsega rotirajoče rezerve na potek frekvence
Figure 4: Impact of the used spinning reserve volume on the frequency trajectory

4 Metodologija razbremenjevanja z uporabo prvega in drugega odvoda frekvence

Pri določanju metodologije sta nam bila vodili za definiranje boljšega oziroma slabšega odziva:

- količina odjema, kateremu je napajanje z električno energijo ohranjeno, in
- padec frekvence.

S stališča teh vodil bi bilo pri prehodu v otočno obratovanje optimalno, da bi:

1. čim prej določili količino odvečnega odjema ($P_{\Delta} = P_{\text{LOAD}} - P_{\text{GEN}}$; P_{LOAD} je skupna obremenitev v otoku, P_{GEN} pa skupna proizvodnja delovne moči v otoku),
2. določili maksimalno količino rotirajoče rezerve, ki jo je mogoče izrabiti, da frekvenca ne pade pod spodnjo dovoljeno mejo ($P_{\text{REG.MAX}}$),
3. v enem samem koraku znižali odjem za vrednost $P_{\Delta} - P_{\text{REG.MAX}}$.

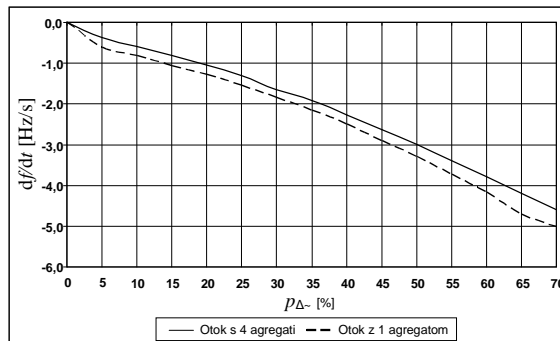
Pri predlogu metodologije smo ohranili prag frekvence, pri katerem pride do prve razbremenitve, kot je to določeno v obstoječem postopku (49,0 Hz). Pri tem smo ustreznost odziva frekvence določali glede na to, ali frekvenca pade pod mejo 47,5 Hz oziroma pojav prisotnosti prenehaja prek nazivne vrednosti frekvence (50 Hz) po razbremenitvi. Spodnjo mejo frekvence 47,5 Hz določa nastavitev delovanja podfrekvenčne zaščite turbin [2].

Za izvedbo takšnega postopka v enem koraku bi bilo treba poznati natančne vrednosti P_{Δ} , parametre turbinske regulacije in delovnih točk posameznih agregatov v otoku. Pri uporabi novejših tipov relejev bi bilo z vidika njihove zmogljivosti mogoče takšen postopek izvesti v realnosti, vendar le ob dobri komunikaciji relejev s centri vodenja. Postopek, ki ga opisujemo v članku, pa podobnih zahtev nima, zato je njegova uporaba preprostejša.

Določanje P_{Δ} nadomestimo z oceno $P_{\Delta-}$, in sicer z merjenjem df/dt . Poleg tega zaradi pripravnosti raje določamo oceno primanjkljaja v p.u. ($p_{\Delta-} = P_{\Delta-} / P_{\text{LOAD}}$) kot v MW. Na strmino upadanja frekvence vplivata namreč le dva parametra: P_{Δ} in vztrajnostna konstanta v otoku H [3]. Ob poznavanju vztrajnostnih mas postane df/dt edini še potreben podatek za izračun P_{Δ} . V ta namen smo simulirali množico primerov, iz katerih smo dobili krivuljo odvisnosti gradienta frekvence od primanjkljaja delovne moči (Slika 5). V nasprotju z literaturo [3] odvisnost ni linearna, saj je primanjkljaj moči (odstopanje med proizvodnjo in porabo) v našem primeru definiran drugače.

Razvidno je, da manjše število obratujočih agregatov povzroči hitrejše upadanje frekvence, saj je v takšnem primeru prisotne manj rotirajoče mase v otoku in je tako frekvenca bolj občutljiva na različne motnje. Za postopek ocenitve $p_{\Delta-}$ smo zgornji krivulji aproksimirali kar s skupnim polinomom drugega reda. V sklop

različnih obratovalnih stanj spada tudi različno število agregatov v obratovanju. Zato je tako izračunani $p_{\Delta-}$ dejansko le ocena in ne točna vrednost.



Slika 5: Odvisnost gradienta frekvence od primanjkljaja moči v otoku za štiri obratujoče (polna črta) in en obratujoč (prekinjena črta) agregat

Figure 5: Frequency gradient as a function of the generation lack for four working units (solid line) and one working unit (dashed line)

Tako dobljena vrednost $p_{\Delta-}$ je osnova za zmanjšanje odjema pri prehodu pod 49 Hz. Ta zaradi zavedanja o nenatančnosti ocene odjema ne zmanjša v celoti, temveč le v 80 % obsegu $p_{\Delta-}$. Ta vrednost je določena empirično na podlagi odstopanja aproksimacijske krivulje od meritev in povprečne vrednosti rotirajoče rezerve, ki jo je bilo mogoče izrabiti v množici simuliranih primerov.

Prva razbremenitev tako krepko zniža gradient padanja frekvence. Tako se podaljša čas, v katerem bi frekvenca brez delovanja turbinske regulacije dosegla spodnjo dovoljeno mejo 47,5 Hz. Ker podatkov o delovnih točkah agregatov ni na voljo, je to način, s katerim se lahko nadaljnje zmanjševanje odjema časovno zakasni in ponudi turbinski regulaciji dovolj časa za aktivacijo. Tako je mogoče preprečiti nepotrebno zniževanje odjema.

Za primere, ko rotirajoče rezerve ni na voljo ali pa je pre malo, da bi prvo zmanjševanje odjema zadostovalo za vzpostavitev bilance moči, je treba frekvenco spremljati tudi v nadaljevanju. Točke kontrole se ujemajo s tistimi iz obstoječe metode podfrekvenčnega razbremenjevanja (48,8 Hz, 48,4 Hz in 48,0 Hz). Te točke lahko frekvenca doseže le, če se njeno padanje nadaljuje.

Kontrola se izvaja po dveh merilih (enačbi 2 in 3). Če sta merili izpolnjeni, se naslednja stopnja razbremenitve izvede, drugače pa se le-ta izpusti. Kontrola nam da namreč podatek o zadovoljivi oziroma nezadovoljivi stopnji delovanja turbinske regulacije in hitrosti spreminjanja smeri trajektorije frekvence. Oznaki n in $n-1$ v enačbi (2) pomenita opazovani oziroma predhodni korak. Merili sta:

1. dvig gradienta glede na zadnjo kontrolno točko mora biti večji od neke vrednosti, npr. 15 %:

$$\frac{|\text{GRADIENT}_n| - |\text{GRADIENT}_{n-1}|}{|\text{GRADIENT}_{49\text{Hz}}|} \geq 15\% \quad (2)$$

2. drugi odvod funkcije (gradient gradienta) mora biti večji od nekega pozitivnega K :

$$\frac{d^2 f}{dt^2} \geq K \quad (3)$$

Vrednost 15 % je bila izbrana podobno kot delež potrebne razbremenitve na prvi stopnji. Ta vrednost je neposredno odvisna od parametrov turbinske regulacije, še posebno tranzientne statike. Zato je treba njeno določitev potrebno natančno proučiti skupaj z določanjem krivulje, ki jo prikazuje Slika 5.

Opisana kontrola se torej izvaja pri treh vrednostih frekvence. Če pogoji niso izpolnjeni v vseh treh točkah, si zmanjševanje odjema sledi v zaporedju 10–5–5 %, kar skupaj z razbremenitvijo v prvem koraku (80 %) pomeni celotno količino $p_{\Delta-}$.

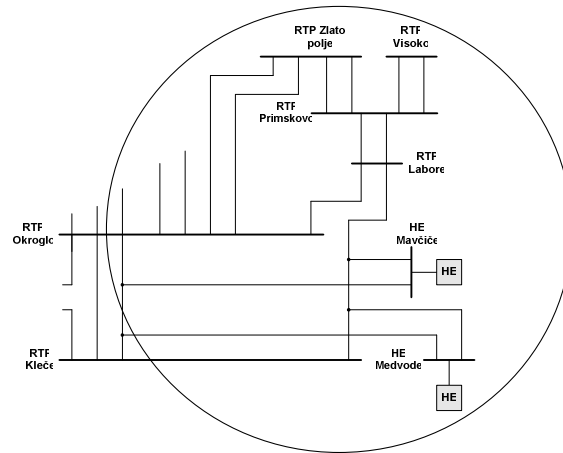
Zaradi težnje po ohranitvi energetskih otokov, saj je takšno stanje veliko ugodnejše pri ponovnem vzpostavljanju normalnega obratovanja EE sistema, smo pri sestavljanju metodologije uvedli še zadnjo kontrolo, in sicer natanko pri spodnji meji dovoljene frekvence 47,5 Hz. Če frekvenca to vrednost doseže, se ne glede na izpuščene stopnje med celotnim procesom odjem zmanjša vse do ocenjene vrednosti $p_{\Delta-}$. Takšna vrednost razbremenitve bo za obstanek otoka zagotovo zadoščala, saj je aproksimacijski polinom izbran tako, da ostanemo z njegovo uporabo »na varni strani« (ocenimo več, kot je treba).

5 Rezultati simulacij

Simulacije so bile izvedene na primeru energetskega otoka, v katerem sta dve HE s po dvema agregatoma, in sicer HE Mavčiče in HE Medvode. Skupna moč na pragu obeh elektrarn je 63 MW, odjemna mesta v otoku pa so RTP Medvode, RTP Labore, RTP Primskovo in RTP Zlato Polje.

Območje Gorenjske velja za deficitno, kar pomeni, da uvaža velik del električne energije iz prenosnega omrežja Slovenije. Zato so bila tudi opazovana obratovalna stanja temu primerna, saj je bil v prvem primanjkljaj delovne moči v trenutku nastanka otoka 57 % (52 MW), v drugem 41 % (20,3 MW) in tretjem 50 % (29 MW). Pri tem je bilo v prvem in tretjem primeru na voljo precej rotirajoče rezerve (19,9 ter 30,9 MW), v drugem primeru pa le 0,75 MW.

V grafičnih rezultatih vseh treh obratovalnih stanj sta prikazani po dve krivulji. Polna pomeni uporabo obstoječe metode podfrekvenčnega razbremenjevanja (oznaka A), prekinjena pa predlagane izboljšave (oznaka B). Prikazana sta potek frekvence v otoku in odstopanje turbinske regulacije od začetnega stanja agregata 1 v HE Mavčiče.

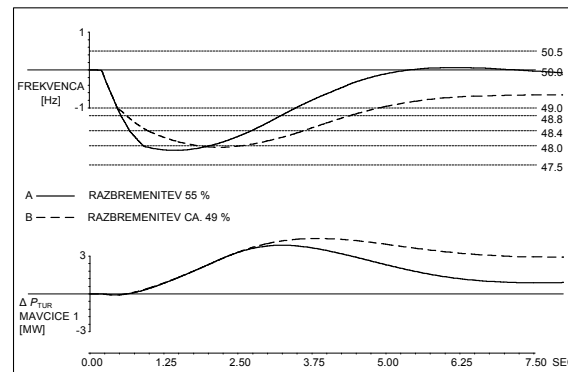


Slika 6: Shema analiziranega otoka
Figure 6: Analyzed island scheme

5.1 Obratovalno stanje 1

Rotirajoča rezerva v otoku znaša 22 % celotne porabe. Če bi lahko izkoristili celotno rotirajočo rezervo, bi bilo za uspešno otočno obratovanje dovolj zmanjšati odjem za približno 35 % (57 % - 22 % = 35 %). Ker pa ima turbinska regulacija pri svojem delovanju že omenjeno časovno konstanto, pride zaradi hitrega padanja frekvence v pošteve le majhen delež od razpoložljivih 19,9 MW.

Simulacije kažejo, da je glede na obstoječo metodo za izbrano obratovalno stanje mogoče z našim predlogom dodatno ohraniti napajanje za dobrih 5 % odjemalcev. Slika 7 kaže, da je z obstoječo metodo prekinjeno napajanje prevelikemu številu odjemalcev (55 %), saj je opazen manjši prenehaj frekvence po zadnji razbremenitvi. Da je bilo mogoče s predlagano metodo določen delež zadnje odvečne razbremenitve ohraniti, je razvidno iz ustrežnejšega poteka frekvence in višje vrednosti uporabljene rotirajoče rezerve.

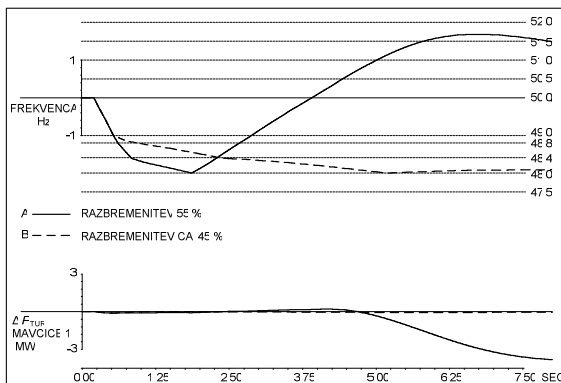


Slika 7: Rezultati simulacije za obratovalno stanje 1
Figure 7: Simulation results for operating conditions 1

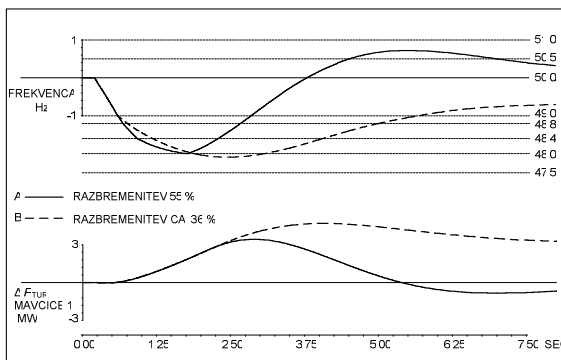
5.2 Obratovalno stanje 2

Obratovalno stanje 2 je posebno predvsem zaradi zelo majhne količine rotirajoče rezerve. V obratovanju sta namreč le po en agregat v vsaki HE (vzrok je lahko remont ali pa okvara), pri čemer obratujeta oba na polni moči. Zaradi takšnih razmer je določitev p_{Δ} -tista, ki je šibka točka metode, saj je obseg razbremenitve v prvem koraku (najpomembnejša razbremenitev s stališča omejitve strmine padanja frekvence) od tega neposredno odvisen. Ker je p_{Δ} -tgolj ocena, je njegova porazdelitev med več stopenj rešitev, ki zmanjša vpliv pogreška na celoten proces razbremenjevanja.

Uporaba predlagane metode omogoča za opazovano stanje ohranitev skoraj 10 % več odjemalcev, pri čemer se lahko izognemo tudi prenehanju do 51,69 Hz (Slika 8). Iz poteka frekvence je razvidno, da je razbremenitev v primeru B ravno še zadostna, saj je dviganje frekvence zelo počasno. Turbinska regulacija je v primeru B ohranila obratovalno točko agregatov na maksimumu, medtem ko v primeru A le-to zniža, ker smo po nepotrebnem izklopili preveč bremen.



Slika 8: Rezultati simulacije za obratovalno stanje 2
Figure 8: Simulation results for operating conditions 2



Slika 9: Rezultati simulacije za obratovalno stanje 3
Figure 9: Simulation results for operating conditions 3

5.3 Obratovalno stanje 3

Za prikaz je bilo izbrano stanje z najbolj opaznim izboljšanjem rezultatov glede količine ohranjenih odjemalcev. Z vidika bilance moči bi lahko celoten odjem v otoku pokrila proizvodnja v otoku (proizvodnja skupaj z rotirajočo rezervo znaša 58,9 MW, kar presega skupni odjem 57 MW). Izkaže se, da je mogoče z uporabo predlagane metode (B) ohraniti celo 19 % odjemalcev več kot pri obstoječi metodi (A) (Slika 9).

Poleg tega je potek frekvence v primeru B veliko ugodnejši, saj po preobsežni razbremenitvi v primeru A frekvenca preniha do 50,72 Hz.

6 Sklepi

Predlagana shema razbremenjevanja ima naslednje prednosti pred obstoječo: spremenljiv obseg razbremenjevanja poveča njeno fleksibilnost in uspešno delovanje v več obratovalnih primerih, prepreči odvečno razbremenitev in s tem poveča število napajanih odjemalcev, potek frekvence je ugodnejši, izrazi se večina rotirajoče rezerve.

Pri tem je potrebna uporaba merila, ki upošteva prvi in drugi odvod frekvence. Ker je vpliv določenih parametrov na gradient frekvence izrazit, so potrebni natančni podatki o turbinski regulaciji in vztrajnostnih masah v otoku. Predlagana shema se približa idealnemu postopku razbremenjevanja, za katerega smo predvideli, da v eni sami stopnji zmanjša odjem za potrebno vrednost. S stališča poteka frekvence je potrebno, da do te stopnje pride čim prej.

Različna testna obratovalna stanja so na primeru realnega otoka pokazala, da je s predlagano metodo mogoče ohraniti napajanih tudi do 19 % več odjemalcev. To ni zanemarljiva vrednost, zato bodo nadaljnje raziskave sledile izboljšavam opisane raziskave.

7 Literatura

- [1] *Sistemska obratovalna navodila za prenosno omrežje električne energije*, Ur. l. RS št. 49/07.
- [2] T. Tomšič, G. Verbič, F. Gubina: *Prenova sheme podfrekvenčnega razbremenjevanja v slovenskem EES*, Elektrotehniški vestnik 73(4): 167-172, 2006.
- [3] P. M. Anderson, M. Mirheydar: *An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- [4] C. Concordia, L. H. Fink, B. Avramovic, G. Poullickas: *Load Shedding on an Isolated System*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [5] D. Prasertijo, W. R. Lachs, D. Sutanto: *A New Load Shedding Scheme for Limiting Underfrequency*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994.

Urban Rudež je diplomiral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 2005-2007 je bil zaposlen v podjetju Korona, od leta 2007 pa je zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje zajema analizo elektroenergetskih sistemov.

Valentin Ažbe je diplomiral leta 1996, magistriral leta 2003 in doktoriral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2000 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko kot mladi raziskovalec. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo. Od leta 2005 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Ukvarja se z analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS, enosmernimi elektroenergetskimi sistemi, razpršeno proizvodnjo električne energije in zaščito elektroenergetskih sistemov.

Rafael Mihalič je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. Po diplomi je postal asistent na omenjeni fakulteti. Med letoma 1988 in 1991 je bil zaposlen pri Siemensu AG v Erlangnu. Trenutno je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in predstojnik Katedre za elektroenergetske sisteme in naprave. Je član CIGRE, član IEEE in predsednik ŠK B4 SLOKO CIGRE. Področje delovanja vključuje predvsem analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.

Marko Zlokarnik: Prenos merila Teorija in primeri s področja kemijske procesne tehnike

Zavod za tehnično izobraževanje, Ljubljana, 2007, ISBN: 978-961-6135-60-3

V slovenščini je izšla knjiga *Prenos merila* svetovno znanega strokovnjaka za procesno tehnologijo prof. dr. Marka Zlokarnika, ki je 35 let deloval kot raziskovalec v kemijski multinacionalki Bayer A. G. v Leverkusnu z obširno bibliografijo in nato kot profesor na tehniški univerzi Köln. Njegovo strokovno delo je zadevalo laboratorijske meritve najrazličnejših postopkov, katerih rezultate je bilo treba nato prenesti v industrijsko, tehnično merilo. Knjiga je skrajšana izdaja izvirnika, ki je izšel pri ugledni založbi J. Wiley – VCH v ZDA v letih 2000 oz. 2002 v angleščini pod naslovom *Scale-up in Chemical Engineering* in v nemščini pod naslovom *Scale-up – Modellübertragung in der Verfahrenstechnik*. Knjiga je bila v štirih letih razprodana, zato je sledila druga, za 100 strani razširjena izdaja. Kdor se bo želel razgledati po tem področju podrobneje, mu bosta ti dve knjigi v veliko oporo, kajti slovenska izdaja je samo tretjina izvirnika. Leta 2007 so Kitajci odkupili licenco za knjigo in izšla je v veliki nakladi v kitajščini, kar dokazuje njeno veliko uporabnost v tehničnem svetu.

Pri prenosu merila iz majhnega v veliko (ali pa tudi narobe!) je zahtevana popolna podobnost med modelom in tehnično izvedbo, in to v geometričnem, snovnem in procesno-tehničnem pogledu. Osnova metode je dimenzijska analiza, s katero se prenesejo relevantne veličine, s katerimi je proces popolnoma opisan, v brezdimenzijska števila. Teh je po eni strani manj, kot je dimenzijskih (t.i. pi-teorem), po drugi strani pa je predstava meritev v brezdimenzijskem prostoru "invariantna" glede na sleherno merilo, tako tudi glede na dolžinsko merilo. Zato je ta metoda edini zanesljivi prenos postopka iz majhnega v veliko.

Prva polovica knjige prinaša osnove dimenzijske analize in prenosa merila, druga prinaša praktične primere s področja prenosa impulza, toplote in snovi, pri čemer prikazuje, kako se s kombinacijo ustreznih procesnih karakteristik postopek tudi energetsko optimira.

Problem prenosljivosti eksperimentalnih rezultatov na realne velikosti ima osrednje mesto v procesnem projektiranju. V praksi snovnih sistemov se srečujemo z veliko negotovostjo zaradi izjemno velike kompleksnosti potekajočih procesov in s tem pogojenega velikega števila vplivnih veličin. Težavnost problema je nazornejša, ker se med procesom dogajajo pomembne spremembe lastnosti snovi. Ker je procesno področje zelo blizu tudi elektrotehničnim strokovnjakom, jim bo ta knjiga prišla zelo prav.

Dr. Marko Kos