

ADAPTIVNO PODFREKVENTNO RASTEREĆENJE EES-A

ADAPTIVE UNDERFREQUENCY LOAD SHEDDING IN POWER SYSTEMS

Rešad Hajdarević¹, Mirza Kušljagić²

Sažetak: U radu je prezentirana usporedba djelovanja klasične podfrekventne zaštite i adaptivne podfrekventne zaštite, koja koristi gradijent frekvencije za ubrzavanje i gradaciju rasterećenja Elektroenergetskog sistema - EES.

Ključne riječi: frekvencija, gradijent frekvencije, podfrekventno rasterećenje EES-a, adaptivno podfrekventno rasterećenje EES-a, PLC – Programabilni Logički Kontroler.

Abstract: Comparison between classic UFLS (Underfrequency Load Shedding Scheme) and adaptive UFLS is presented in this paper. Adaptive UFLS uses gradient of frequency for increasing speed and selectivity of Load Shedding Scheme.

Keywords: frequency, gradient of frequency, Underfrequency Load Shedding, Adaptive Underfrequency Load Shedding, PLC – Programmable Logic Controller.

UVOD

Totalni raspadi elektroenergetskih sistema su prisutni od samog početka formiranja istih. Raspadi nastaju kao posljedica komparativno velikih iznosa deficita aktivne snage u odnosu na potrošnju, najčešće nastalih kao posljedica ispada velike generatorske jedinice. U takvim slučajevima ne postoji dovoljno brza rotirajuća rezerva pa je jedina mjera očuvanja integriteta sistema isključenje dijela potrošača kako bi se ponovo uspostavio balans aktivne snage u sistemu i zaustavio pad frekvencije. Ta mjera se zove podfrekventno rasterećenje EES-a (UFLS, engleski: Under Frequency Load Shedding). Podfrekventno rasterećenje se realizuje uz pomoć podfrekventnih releja koji djeluju na predefinisane potrošače, kada frekvencija sistema padne ispod podešenog nivoa. Parametrizacija podfrekventnih releja izvodi se simulacijom na modelu realnog sistema sa slučajnim (empirijskim) parametrima. Parametri koji daju najbolje rezultate za dati model sistema koriste se za podešenje releja na realnom sistemu. Takav način projektovanja i održavanja podfrekventnih releja uspješan je za izolovane sisteme sa malom promjenom režima rada sistema.

U današnje vrijeme kada su nacionalni sistemi povezani međusobno u interkonekcije (UCTE - Union for the Coordination of the Transmission of Electricity i ENTSO-E -

European Network of Transmission System Operators for Electricity), gdje se odvijaju ugovoreni transferi snage preko interkonektivnih vodova i gdje pojedini sistemi imaju međusobno ispomaganje u kritičnim uslovima, projektovanje podfrekventnih zaštita, i njihovo djelovanje postaje složenije. Svaki se poremećaj u jednom nacionalnom EES-u propagira u susjedne sisteme proizvodeći zagušenja na interkonektivnim linijama, i u pojedinim slučajevima neželjeno isključenje i razdvajanje sistema. U novoformiranim izolovanim sistemima obično se javlja debalans aktivne snage, pa je u slučajevima značajnijeg deficita UFLS zadnja kritična mjera koja zaustavlja potpuni raspad sistema. Stoga današnji EES-i zahtijevaju adaptivne UFLS prilagodljive velikim, promjenjivim EES-ima. Postoji povećan interes za korištenje gradijenta frekvencije df/dt za procjenu veličine poremećaja i ubrzanje UFLS reakcije za lokalizaciju deficita aktivne snage na nivou nacionalnog/geografskog EES-a. Ovaj rad analizira mogućnost korištenja df/dt kao lokalnog parametra za ubrzanje djelovanja podfrekventnih releja i korištenje istog parametra radi procjene iznosa poremećaja i automatske akcije za lokalizaciju poremećaja odvajanjem dijela potrošača niskog prioriteta u zoni poremećaja.

1. KLASIČNO PODFREKVENTNO RASTEREĆENJE (UFLS)

Kao osnovno sredstvo protivhavarijske zaštite u tradicionalnim EES-ima korišteni su podfrekventni releji. Ovi releji su imali podešenje na frekvencijama nižim od nominalne i djelovali su na isključenje unaprijed definisanog iznosa snage potrošača. Podešenja ovih konvencionalnih releja vršena su na osnovu simulacije odziva sistema za različita opterećenja EES-a i različite inicijalne deba-

¹ Elektroprenos BiH – Elektroprijenos BiH
Tuzla – Bosna i Hercegovina
r.hajdarevic@elprenosbih-optz.ba

² Univerzitet u Tuzli – Fakultet elektrotehnike
Tuzla – Bosna i Hercegovina
Rad dostavljen: 11.04.2014.; Rad prihvaćen: 23.06.2014.

lanse aktivne snage. Posebna je pažnja prilikom simulacija usmjeravana na koordinaciju interakcije rotirajuće rezerve (iznosa i brzine odziva) i vrijednosti početnog debalansa. Konvencionalni podfrekventni releji obično su imali i vremenske članove zatezanja djelovanja. Za izolovane sisteme (uglavnom nacionalne) simulacijom odziva sistema na prostom sistemu sa ekvivalentnom proizvodnjom i potrošnjom uspješno su podešavane vrijednosti frekvencija podfrekventnih releja. Konačan cilj podešenja bio je isključiti minimalni iznos snage potrošnje kako bi se izbjeglo isključenje generatora uslijed niskih frekvencija i osigurala stabilizacija frekvencije tokom djelovanja primarne regulacije snage. Konvencionalni podfrekventni releji uspješno su vršili funkciju zaštite sistema od totalnog frekventnog sloma kod izolovanih sistema.

Vremenom je, u cilju optimizacije koordinacije rotacione rezerve, dolazilo do povezivanja više nacionalnih sistema u složene interkonekcije (npr. u Evropi UCTE interkonekcija i ENTSO). Uslijed prirode dinamike frekvencije (pri čemu je frekvencija sistema globalna sistemaska varijabla) cijeli sistem je djelovao na pojavu početnih debalansa aktivne snage u jednom dijelu sistema. Tako su se sistemi, "ispomagali" u pokrivanju debalansa snaga što je prilikom poremećaja obično uzrokovalo povećanje tokova aktivne snage po interkonektivnim vodovima. Ponekad je dolazilo i do preopterećenja ovih vodova i njihovog isključenja. Ovakav razvoj događaja je obično uzrokovao nastanak još veće vrijednosti debalansa aktivne snage u povezanim nacionalnim sistemima sa naročito ozbiljnim posljedicama u sistemu sa deficitom snage, u kojima je ponekad dolazilo do pada frekvencije koji je uzrokovao isključenje generatora na taj način još više pogoršavajući stanje sistema. Sukcesivna pojava ovakvih događaja: inicijalni debalans, preopterećenje i isključenje interkonektivnih vodova i posljedično isključenje generatora obično je rezultirao formiranjem dvaju ili više ostrva u povezanoj interkonekciji. U pojedinim od ovih ostrva dolazilo je i do kaskadnog razvoja poremećaja i totalnog raspada funkcije sistema uslijed sloma frekvencije. Pojava ovakvih raspada sistema početkom 70-ih godina inicirala je istraživanja tzv. dugotrajnog dinamičkog odziva EES-a i razvijanje odgovarajućih simulacionih softvera. Ove vrste softvera obično su korištene za podešavanje konvencionalnih podfrekventnih releja uz uvažavanje ograničenja na preopterećenje interkonektivnih vodova. Po prvi put u projektovanju podfrekventnih releja koristi se df/dt član. Njegova je projektovana funkcija bila da utiče na prilagođenje podešenja vremena zatezanja podfrekventnih releja. Na ovaj način je jedna lokalna varijabla df/dt trebala biti korištena za adaptaciju djelovanja sistemске zaštite – podfrekventnih releja.

2. ADAPTIVNO PODFREKVENTNO RASTEREĆENJE

Konvencionalne sheme podfrekventnog rasterećenja su dizajnirane da spriječe pad frekvencije u sistemu nakon ispada značajnije proizvodne jedinice ili prekida značajne

interkonektivne linije, i kao takve imaju predefinisane parametre rasterećenja kao što su frekvencija i lokacija na kojoj relej djeluje na predefinisani iznos rasterećenja. U opštem slučaju kao posljedica djelovanja javlja se pre-rasterećenje/preskok (engleski: overshoot) ili nedovoljno rasterećenje sistema zbog ograničenog i diskretnog broja koraka rasterećenja i promjenjivih iznosa proizvodnje i potrošnje na lokacijama rasterećenja [1] - [3]. Pošto klasične sheme podfrekventnog rasterećenja prate samo frekvenciju kao lokalni parametar, reakcija releja je istovjetna za veće i za manje poremećaje u sistemu čime se gubi dragocjeno vrijeme za pravovremenu reakciju na zaustavljanju pada frekvencije sistema. U slučaju većeg poremećaja, ako se pad frekvencije ne zaustavi, dolazi do reagovanja podfrekventnih zaštita generatora i odvajanja generatora iz sistema, što vodi daljnjem progresivnom pogoršavanju prilika u sistemu i u krajnjem slučaju do razdvajanja sistema na ostrva s manjkom/viškom proizvodnje. Pojavom nove generacije numeričkih zaštitnih jedinica s poboljšanom logikom djelovanja, filtriranja ulaznih veličina, i praćenja lokalnih parametara na osnovu kojih se može identifikovati vrsta poremećaja koja se desila u sistemu, povećan je interes za praćenje brzine promjene frekvencije. Pošto je gradijent frekvencije centra inercije proporcionalan iznosu poremećaja, postoji ideja da se isti iskoristi kako bi se djelovanje releja prilagodilo promjenjivim uslovima u sistemu. Takve sheme rasterećenja koje djeluju u skladu s promjenama lokalne frekvencije i njenog gradijenta se nazivaju adaptivne sheme rasterećenja ili adaptivne UFLS.

Veza između gradijenta frekvencije i nastalog debalansa aktivne snage u sistemu može se prikazati prema blok shemi EES-a (ekvivalentni jednomašinski sistem) korištenjem jednačina prostora stanja.

Za poznate veličine promjena opterećenja ΔP_L , karakteristike regulatora R_{sys} i dinamičkih modela turbine M_{sys} , promjena frekvencije centra inercije sistema može se izraziti preko jednačine (1), [4]:

$$\Delta f = \Delta f_{sys} = \sum_{i=1}^N (H_i \Delta f_i) / \sum_{i=1}^N (H_i) \quad (1)$$

Veličine koje karakterišu ekvivalentni model sistema kao što su ukupna inercija sistema i ukupno prigušenje dati su formulom (2):

$$H_{sys} = \sum_{i=1}^N H_i \quad D_{sys} = \sum_{i=1}^N D_i \quad (2)$$

U prvim trenucima nakon poremećaja može se zanemariti uticaj regulacije frekvencije od strane regulatora broja obrtaja $\Delta P_C = 0$, stoga se frekventni odziv sistema može predstaviti jednačinom (3):

$$\Delta f(s) = \frac{1}{2Hs + D} (\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)) \quad (3)$$

Primjenom inverzne Laplasove transformacije, jednačina odziva u vremenskom domenu ekvivalentnog sistema glasi (4):

$$\Delta P_m(t) - \Delta P_L(t) = \Delta P_D(t) = 2H \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) \quad (4)$$

pri čemu $\Delta P_D(t)$ predstavlja iznos debalansa aktivne snage u sistemu (razlika između ukupne aktivne snage proizvodnje i potrošnje uključujući i gubitke).

Iznos totalnog debalansa snage u trenutku $t = 0^+$ nakon pojave poremećaja se može izraziti kao (5):

$$\Delta P_D = 2H \frac{d\Delta f}{dt} \quad (5)$$

pri čemu je Δf promjena frekvencije centra inercije ekvivalentnog sistema.

Jednačina (5) se može prikazati i u diskretnoj formi koja odgovara uzorkovanju analognih podataka (6):

$$\Delta P_D(T_s) = 2H \frac{[\Delta f_1 - \Delta f_0]}{T_s} \quad (6)$$

pri čemu je T_s period uzorkovanja podataka, dok su Δf_1 i Δf_0 ekvivalentne frekvencije sistema u trenucima t_0 i t_1 (granične vrijednosti navedenog intervala).

Jednačina (5) pokazuje da je gradijent frekvencije u EES proporcionalan debalansu aktivne snage u EES-u. Faktor proporcionalnosti je ekvivalentna inercija sistema, koja osim inercije generatora obuhvata i inerciju sinhronih motora spojenih na sistem. Na osnovu jednačine (5) može se zaključiti da, za određeni iznos debalansa aktivne snage u sistemu, brzina opadanja frekvencije je obrnuto proporcionalna inerciji sistema. Što je veća inercija sistema, manja je promjena frekvencije. Količnik gradijenta frekvencije i ukupnog debalansa snage u sistemu (koji se javlja u prvim sekundama nakon poremećaja i isključuje reakciju regulatora) predstavlja karakteristični frekventni odziv sistema.

Analogno prethodnoj analizi, može se izraziti veza između gradijenta frekvencije, ukupnog prigušenja sistema D i ukupne promjene opterećenja ΔP_L . Ako se zanemari uticaj regulatora u trenutku $t = 0^+$, ($\Delta P_m = 0$), jednačina (3) se može izraziti kao (7):

$$\Delta f(s) = \frac{1}{2Hs + D} (-\Delta P_L(s)) \quad (7)$$

Za diskretni iznos promjene opterećenja ΔP_L , Laplasova transformacija promjene opterećenja je data izrazom (8):

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s} \quad (8)$$

Ako se izraz (8) uvrsti u izraz (7) dobije se izraz (9):

$$\Delta f(s) = \frac{(-\Delta P_L/D)}{s[1 + (2H/D)s]} \quad (9)$$

Inverzna Laplasova transformacija daje (10):

$$\Delta f(t) = -\frac{(\Delta P_L)}{D} + \left(\frac{2H\Delta P_L}{D^2}\right) e^{-\left(\frac{t}{2H}\right)} \quad (10)$$

Prema tome, frekventni gradijent u trenutku $t = 0^+$ nakon poremećaja je proporcionalan $\Delta P_L/D$ prema (11):

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} \Big|_{t=0^+} \cong -\frac{(\Delta P_L)}{D} \quad (11)$$

Jednačine (5) i (11) predstavljaju dobru osnovu za procjenu iznosa debalansa aktivne snage u sistemu nakon poremećaja, odnosno za kreiranje adaptivne sheme podfrekventnog rasterećenja sistema. Jednačine (3) do (11) vrijede i za pojedinačnu generatorsku jedinicu, gdje se u tom slučaju veličine kao što su inercija, prigušenje, frekvencija i promjena frekvencije, promjena mehaničke snage i električna snaga odnose samo na tu jedinicu. Kao što je vidljivo iz jednačine (11) početna vrijednost gradijenta frekvencije u trenutku $t = 0^+$ zavisi od faktora prigušenja sistema D . Što je veći faktor prigušenja, manji je gradijent frekvencije, i u konačnici veća frekvencija na kojoj se sistem zaustavlja (12):

$$D = \frac{f_n}{P} \times \frac{\Delta P}{\Delta f} \text{ pu} \quad (12)$$

pri čemu f_n , P , ΔP i Δf predstavljaju nominalnu frekvenciju, trenutnu vrijednost aktivne snage, iznos promjene aktivne snage (pri poremećaju) i iznos promjene frekvencije usljed promjene iznosa aktivne snage, respektivno. Na osnovu jednačine (5), odnosno (6), primjenom odgovarajućeg algoritma za filtriranje promjene frekvencije od elektromehaničkih oscilacija, poznavajući ekvivalentnu inerciju sistema može se dobiti početni iznos debalansa aktivne snage u sistemu.

Problemi koji se javljaju pri upotrebi releja sa df/dt članom su:

- Promjenjivost df/dt zbog značajnih oscilacija frekvencije koje se javljaju nakon poremećaja usljed preraspodjele snage u sistemu, kao što se analitički može pokazati. Oscilacije frekvencije javljaju se kao posljedica elektromehaničkih oscilacija između generatora i generatorskih grupa u toku tranzijentnog procesa. S obzirom da su za djelovanje releja najbitnije prve sekunde nakon poremećaja, promjenjivost frekvencije izaziva velike varijacije df/dt , tako da je njegova trenutna vrijednost nerelevantna za procjenu pravog iznosa poremećaja.
- Uticaj promjenjive vrijednosti inercione konstante H i faktora prigušenja D EES-a na vrijednost df/dt (df/dt) nakon poremećaja. Promjena faktora prigušenja D neznatno utiče na promjenu gradijenta, ali utiče na konačnu frekvenciju zaustavljanja EES-a nakon poremećaja. Uticaj inercione konstante H na dinamiku sistema nakon poremećaja je značajan. Veća inerciona konstanta EES-a izaziva manju vrijednost df/dt pri istom iznosu deficita aktivne snage [4], [5].
- Problem tačnog iznosa rasterećenja nakon izvršene procjene poremećaja od strane releja, predstavlja dodatan problem u projektovanju adaptivne sheme rasterećenja. Za kvalitetno rasterećenje relej mora imati mogućnost finog podešavanja procenta rasterećenja. Najbolje rješenje predstavlja relej na nivou

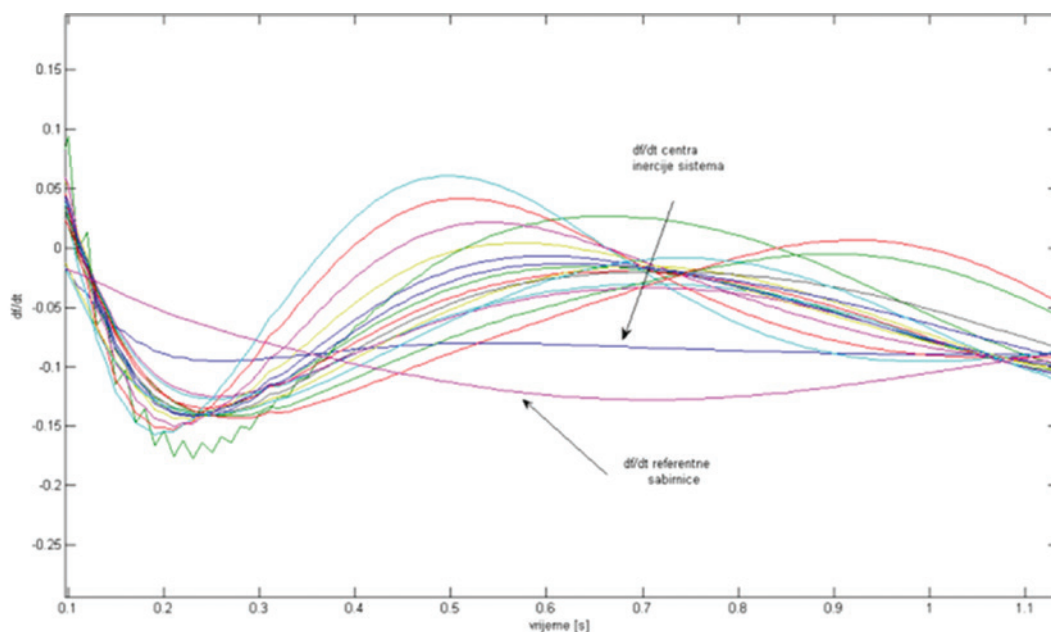
podstanice, koji bi posjedovao internu logiku koja prati stanje opterećenja na pojedinim vodovima i određuje kombinaciju vodova koji najbliže odgovaraju procjenjenoj vrijednosti rasterećenja (pod uslovom da ima dovoljno dobar izbor vodova za rasterećenje koji nisu ograničeni uslovima besprekdnog napajanja ili visokih troškova beznaponskog stanja za slučaj ugovorenih potrošača). Problem rasterećenja i logike procjene poremećaja može biti centraliziran i lokalni:

- a. Centralizirana shema bi podrazumijevala korištenje centralizirane logičke jedinice koja bi prikupljala mjerenja na nivou trafo stanice na kojoj se vrši rasterećenje i na osnovu njih vršila procjenu poremećaja kao i raspored rasterećenja po iznosu i lokaciji. Ovakva bi shema podrazumijevala korištenje novije tehnologije i brzog prenosa informacija uz rizik kašnjenja informacija i prekida komunikacije. Ovakve sheme se mogu realizovati korištenjem PLC uređaja ili korištenjem IEC 61850 protokola i modernih numeričkih zaštita.
 - b. Korištenjem lokalnih (distribuiranih) sistema za monitoring i izdavanje komande za isključenje, koji bi vršili procjenu poremećaja i izdavalali neophodne komande za isključenje. Ovakvi sistemi su pouzdani, ali ne omogućavaju realizaciju "tačnog" rasterećenja, i slični su klasičnim UFLS shemama [5].
- Otežano harmoniziranje podešenja djelovanja releja koji koriste gradijent frekvencije može se riješiti tako što će se izbjeći djelovanje releja u više koraka, pa bi se rasterećenje vršilo u jednom koraku. Time se dobiva na stabilnosti sistema jer se akcija rasterećenja ne odgađa. Posljedica takvog rješenja je pojava oscilacija usljed promjene ravnoteže snage u sistemu. Kod gradacije koraka rasterećenja, ove su oscilacije manjeg intenziteta.

U literaturi [3], [6], [7] predlaže se upotreba srednje vrijednosti brzine promjene frekvencije $\Delta f_i / \Delta t$ na intervalu Δt umjesto trenutne vrijednosti df_i/dt , kako bi se dobio trend promjene frekvencije. Korištenje raznih „moving average“ tehnika za usrednjavanje vrijednosti daje ograničene rezultate, zbog potrebnog perioda usrednjavanja koji se kreće od 1 do 1,5 [s], koje su ključne za procjenu. Srednja vrijednost df_i/dt člana, nakon poremećaja ima tendenciju rasta, tako da tehnike usrednjavanja ne daju dobre rezultate. Ova konstatacija ne važi za slučaj frekvencije centra inercije sistema. Pošto oscilacije frekvencije nastaju kao posljedica međudjelovanja generatorskih jedinica, za izolovan sistem njihovo ukupno međudjelovanje se zbirno poništava (ako se zanemari uticaj inercije opterećenja), pa su oscilacije frekvencije težinskog centra inercije zanemarive. Na slici (Slika 1) prikazan je vremenski dijagram oscilacija df_i/dt na potrošačkim sabirnicama, referentnoj sabirnici i df_c/dt centra inercije sistema, nakon ispada generatorske jedinice na sabirnici 30.

Filtriranje ulazne frekvencije korištenjem klasičnih filtera propusnika opsega frekvencija zahtijeva vremensko zatezanje (radi procesuiranja) u iznosu najmanjem koliko iznosi najveća vremenska konstanta oscilacija sistema, koja se može kretati i do nekoliko sekundi [8], [9].

Dodatne probleme uzrokuju tranzijenti u EES-u nastali kao posljedica kratkih spojeva i drugih poremećaja u sistemu koji mogu izazvati pad frekvencije i napona na lokalnom nivou, te pikove gradijenta frekvencije. Iz istog je razloga otežano korištenje i klasičnih podfrekventnih releja, te su podešenja prvog stepena klasičnih podfrekventnih releja relativno niska, s vremenskim zatezanjem kako bi se spriječilo nepotrebno djelovanje [3], [5], [8]. Korištenje trenutne vrijednosti df_i/dt , čak i u kombinaciji s frekvencijom ($f \cdot df_i/dt$) daje nepredvidljive rezultate, što je provjereno tokom ovog istraživanja na New England tes-



Slika 1: Oscilacije gradijenta frekvencije na generatorskim sabirnicama nakon ispada generatora na sabirnici 30.

tnom modelu, na softverskoj platformi PSS/E, korištenjem podfrekventne zaštite s trenutnim df_i/dt .

Sva navedena ograničenja su doprinijela da trenutno nigdje nije implementiran df_i/dt član, iako proizvođači podfrekventnih zaštita već duže vrijeme nude tu mogućnost [3].

3. VRSTE ADAPTIVNIH SHEMA RASTEĆENJA I NJHOVO DJELOVANJE

U literaturi postoje različiti prijedlozi za izvedbe adaptivnih shema rasterećenja, pri čemu se izvedbe kreću od lokalne adaptivne do integriranih adaptivnih shema rasterećenja: Wide Area Monitoring and Protection Scheme (WAMPS), System Integrity Protection Scheme (SIPS). U ovom dijelu rada dat je osvrt na izvedbe lokalnih adaptivnih shema rasterećenja.

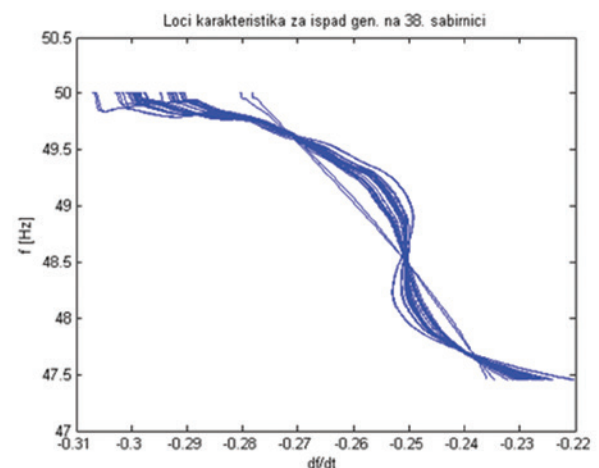
Adaptivne podfrekventne sheme rasterećenja se prema [10], [11] mogu izvesti na više načina: kombinovanjem frekvencije i brzine promjene frekvencije $f-df_i/dt$, kombinovanjem vremena zatezanja i brzine promjene frekvencije $t-df_i/dt$, te iznos rasterećenja vezan za brzinu promjene frekvencije $L-df_i/dt$.

Postoje izvedbe koje kombinuju klasično podfrekventno rasterećenje sa $L-df_i/dt$, gdje se klasično rasterećenje koristi za vraćanje frekvencije na nominalnu vrijednost nakon djelovanja adaptivne podfrekventne zaštite [12]. U prvom slučaju relej djeluje lokalno kada frekvencija i gradijent postignu manju vrijednost od zadane, a zaštitni uređaj (približno) rasterećuje prethodno projektovani iznos rasterećenja. Takva karakteristika releja je stepenasta i za manje iznose gradijenta frekvencije podešava se na veći iznos proradne frekvencije. Za slučaj korištenja $t-df_i/dt$ karakteristike, za manji iznos gradijenta frekvencije koristi se kraće vremensko zatezanje djelovanja releja, s tim da relej uvijek rasterećuje isti iznos opterećenja. Korištenjem $L-df_i/dt$ karakteristike povećava se iznos rasterećenja sa smanjenjem iznosa gradijenta (negativan predznak). Sve karakteristike s odgovarajućim vrijednostima nanešenim na apscisu i ordinate koordinatnog sistema imaju izgled stepenaste diskretne krive. Broj koraka rasterećenja kreće se od tri pa na više. U ovom je radu prikazana usporedba lokalne adaptivne sheme rasterećenja korištenjem kombinovane $f-df_i/dt-Ld$ karakteristike sa klasičnom shemom rasterećenja za testni sistem *New England* sa 39 sabirnica.

4. PODFREKVENTNO RASTEREĆENJE KORIŠTENJEM KARAKTERISTIKE RELEJA $F-DF_i/DT-LD$

U ovom radu je prezentirana adaptivna UFLS koja rasterećenje sistema vrši u jednom koraku koristeći „kombinovanu“ $f-df_i/dt-Ld$ karakteristiku. Adaptivna lokalna UFLS shema u ovom slučaju kombinuje promjenu frekvencije i brzinu pada frekvencije za detekciju ispada generatorske jedinice i iznosa manjka aktivne snage u sistemu, uz

uslov da frekvencija padne ispod određene granične vrijednosti. Pošto je gradijent frekvencije u dobro povezanom sistemu proporcionalan razlici (deficitu) aktivne snage proizvodnje i aktivne snage potrošača (5), na osnovu gradijenta frekvencije - moguće je grubo procijeniti veličinu poremećaja i time povećati selektivnost podfrekventnog releja. Za određivanje „tačne“ vrijednosti gradijenta frekvencije koristi se postmortem analiza trenutne vrijednosti gradijenta metodom najmanjih kvadrata. Time se eliminišu varijacije gradijenta usljed pojava navedenih u prethodnom poglavlju. Za procjenu gradijenta frekvencije u realnom vremenu do 0,5 s, s prihvatljivom tačnošću u literaturi se predlaže wavelet transformacija [13]. Da bi se izvršilo projektovanje „kombinovane“ adaptivne UFLS sheme, potrebno je izvršiti analizu mogućih izvora deficita aktivne snage u sistemu zbog ispada generatorske jedinice ili mogućeg razdvajanja sistema na ostrva s manjkom ili viškom proizvodnje. Za odabrane deficite na posmatranom EES-u potrebno je korištenjem odgovarajućeg simulacijskog programa (PSS/E) i modela EES-a snimiti promjenu frekvencije na sabirnici u funkciji brzine promjene frekvencije. Takva karakteristika se još naziva *hodograf* (engleski: *locus*; *loci*) i u opštem slučaju, za isti iznos poremećaja u sistemu, ta se karakteristika razlikuje za sve sabirnice tokom početnog razvoja poremećaja zbog oscilacija koje se javljaju između generatora i preraspodjele snage u sistemu. Ilustracije radi, na slici (Slika 2) prikazan je diskretan spektar *loci* karakteristika snimljen na svim potrošačkim sabirnicama sistema, nakon ispada generatorske jedinice na sabirnici 38.



Slika 2: Spektar *loci* karakteristika na potrošačkim sabirnicama

Na osnovu *loci* karakteristike snimljene za sve karakteristične poremećaje, te iznosa deficita nastalog kao posljedica poremećaja, vrši se kvantifikacija poremećaja (Tabela I). Kvantifikacija predstavlja pokušaj da se grupišu pojedini poremećaji po iznosu deficita i rezultirajućem df_i/dt . U praktičnim slučajevima grupisanje je ograničeno brojem stepena releja koje je moguće podesiti. Idealno bi bilo da ne postoji ograničenje u broju podešenja. Najveći

problem pri kreiranju adaptivnih shema rasterećenja predstavlja promjenjivost frekvencije, odnosno člana df_i/dt . Prilikom projektovanja potrebno je uzeti u obzir algoritme koje zaštitni uređaj koristi za mjerenje tih veličina, te isti tip filtracije koristiti za simulaciju. Promjenjivost df_i/dt predstavlja problem za koordinaciju djelovanja između pojedinih koraka rasterećenja u predloženim adaptivnim UFLS gdje se rasterećenje vrši u više koraka [10], [11], [14].

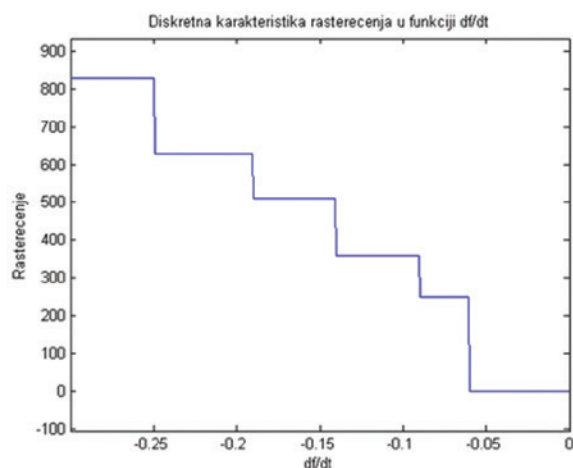
Zbog toga se u predloženoj shemi rasterećenje vrši u jednom koraku. Da bi se kvalitetno projektovala karakteristika djelovanja releja, potrebno je predvidjeti moguće režime rada generatora u EES-u, odnosno izvršiti kategorizaciju mogućih snaga ispada u svim režimima rada i promjene inercije sistema.

Osim toga, u slučaju kada postoji dovoljno velika rotirajuća rezerva, potrebno je uzeti u obzir mogućnost angažovanja brze rotirajuće rezerve, kako bi se smanjio potrebni iznos rasterećenja. Sveobuhvatno planiranje bi moralo uzeti u obzir i režime rada EES-a na dnevnoj, sedmičnoj i sezonskoj osnovi.

Za konkretan primjer testnog sistema *New England*, izvršeno je projektovanje sheme rasterećenja na osnovu jednog radnog režima uz zanemarenje male rotirajuće rezerve od 1.95%. U slučaju uzimanja u obzir rotirajuće rezerve, ista se jednostavno oduzme od procijenjene snage rasterećenja. Takav postupak vrijedi za slučaj manjeg iznosa rotirajuće rezerve. U slučaju većeg iznosa, mora se uzeti u obzir brzina aktiviranja rezerve, te prihvatljivost najmanje frekvencije koju doseže sistem poslije predviđenog rasterećenja i prije aktiviranja rotirajuće rezerve. U slučaju sporije reakcije rotirajuće rezerve, može se desiti da sistem nakon rasterećenja ostane na neprihvatljivoj vrijednosti frekvencije.

Na osnovu kvantifikacije graničnih vrijednosti df_i/dt pri pojedinim poremećajima formira se odgovarajuća stepenasta karakteristika prorade podfrekventnog releja. Karakteristika djelovanja releja napravljena na osnovu tabele (Tabela I) je prikazana na slici (Slika 3).

U konkretnom slučaju testnog sistema *New England*, podešenje releja je izvedeno na 5 stepeni djelovanja, prema slici (Slika 3), pri čemu podfrekventne zaštite pri poremećaju mogu odraditi samo jedanput na podešenom stepenu, nakon što se zadovolje uslovi podešenja.



Slika 3: Diskretna karakteristika rasterećenja releja u funkciji gradijenta frekvencije

Takav pristup olakšava koordinaciju djelovanja releja i sprječava neželjeno djelovanje releja pri rasterećenju, zato što se pri rasterećenju javljaju pikovi df_i/dt koji mogu poprimiti iznose jednake podešenim vrijednostima. Takođe, takav pristup bi morao uvažiti i mogućnost višestrukog ispada proizvodnih jedinica, te u skladu s tim formirati odgovarajuću karakteristiku releja. Za slučaj simultanog ispada dviju jedinica, javlja se veći iznos df_i/dt , pa bi karakteristika releja morala pokrivati i to područje. Za konkretan slučaj testnog sistema nije projektovana karakteristika koja uvažava višestruke ispade proizvodnih jedinica. Drugi stepen projektovane karakteristike djelovanja u konkretnom slučaju ne odgovara ispadu nijedne proizvodne jedinice za datu snagu EES-a. U slučaju proporcionalnog smanjenja snage EES-a za 30%, pri istoj inerciji pojedinačnih proizvodnih jedinica, drugi stepen približno odgovara ispadu proizvodne jedinice na sabirnici 31, 34, 36 i 37. Usporedni odziv za slučaj smanjene snage EES-a nije prikazan u ovom radu.

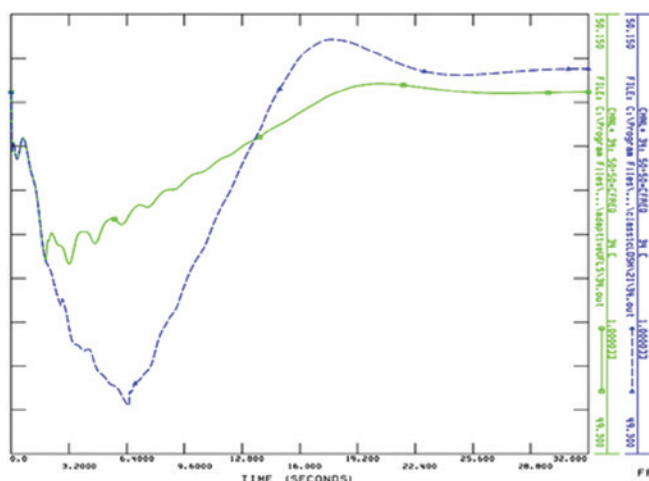
Na slici (Slika 4) prikazan je usporedni odziv sistema na adaptivnu UFLS (zelena) i klasičnu UFLS (plava) za slučaj ispada generatora na sabirnici 34.

Na slici (Slika 5) prikazan je frekventni odziv EES-a nakon ispada ključne grane 16-19.

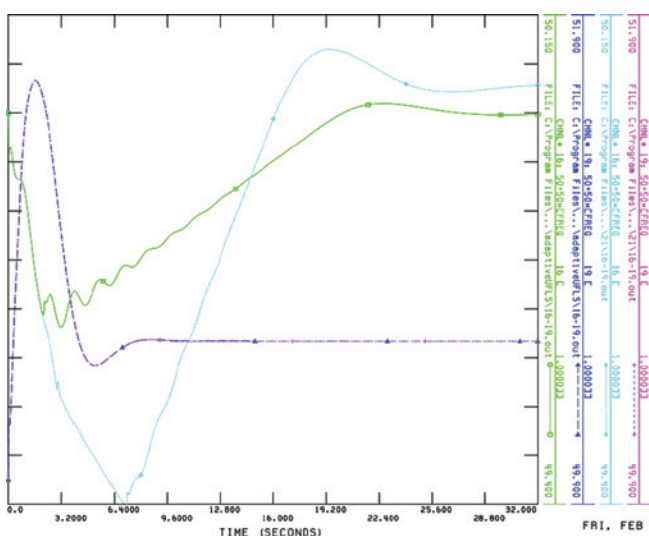
Na osnovu predloženih dijagrama i rezultata simulacije, adaptivna UFLS u svim slučajevima daje bolji odziv po kriteriju najmanje frekvencije koja se pojavljuje u sistemu

Tabela I: Tabela kvantificiranih ispada u EES-u

Grupe	1	2	3	4	5	3
Snaga[MW]	250	360	510	630	830	16-19
$-df/dt$ max	0.0784	-0.1025	0.1861	0.2056	0.2713	0.1575
$-df/dt$ min	0.06735	-0.1025	0.1568	0.1965	0.2713	0.1473
Abs(Max)	0.09	0.14	0.19	0.25	0.3	n/a
Abs(Min)	0.06	0.09	0.14	0.19	0.25	n/a
Proc.rast	0.0403616	0.058121	0.082338	0.101711	0.134001	0.082338



Slika 4: Ispad generatora na sabirnici 34.



Slika 5: Ispad ključne grane 16-19.

(engleski: nadir), a takođe i po kriteriju vraćanja frekvencije na nominalnu vrijednost. Jedini izuzetak predstavlja ispad generatora na sabirnici 31, gdje je zbog neadekvatnog podešenja adaptivne UFLS ne dolazi do vraćanja frekvencije na nominalnu vrijednost. Neadekvatno podešenje je nastalo kao posljedica ograničenja broja podešenja adaptivne UFLS na 5. Takođe, u pojedinim slučajevima klasični UFLS brže vraća frekvenciju na nominalnu vrijednost zbog većeg rasterećenja, ali se kao posljedica javlja prerasterećenje i porast frekvencije iznad nominalne vrijednosti (engleski: overshoot). Za slučaj prekida ključne grane 16 – 19, kada dolazi do razdvajanja na dva ostrva s deficitom i suficitom aktivne snage, odziv u ostrvu sa suficitom je identičan (zbog istih modela generatora i regulatora), dok u ostrvu s manjkom aktivne snage adaptivna UFLS daje bolji odziv i manje rasterećenje. Izvedena simulacija adaptivne UFLS pretpostavlja realizaciju tačno potrebnog rasterećenja po željenom iznosu, što bi na nivou distributivnih odvoda gdje se vrši rasterećenje zahtijevalo prisustvo uređaja sa PLC (CFC, Continous Function Chart) logikom koji prati opterećenje pojedinih vodova i pravi kombinaciju koja najbolje odgo-

Tabela II: Ukupno rasterećenje za sve slučajeve ispada generatorskih jedinica i slučaj ispada ključne grane 16-19 pri djelovanju adaptivne UFLS i klasične UFLS

		Adaptivna UFLS		Klasični UFLS	
Gen		Pr [MW]	Qr [MVar]	Pr [MW]	Qr [MVar]
	30	248,26	72,65	307,53	89,99
	31	506,41	148,2	658,55	192,68
	32	625,57	183,03	351,02	192,68
	33	625,57	183,03	658,55	192,68
	34	506,41	148,2	658,55	192,68
	35	625,57	183,03	658,55	192,68
	36	506,41	148,2	555,24	159,5
	37	506,41	148,2	605,62	181,97
	38	824,17	241,15	966,09	282,67
Line	16-19	450.42	139.72	585.74	181.65
	Ukupno	5799.42	1690.72	6371.74	2460.65

vara traženom iznosu rasterećenja. PLC (CFC unutar zaštitne jedinice) nadgleda raspoložive odvode predviđene za rasterećenje i pravi kombinaciju rasterećenja najbliže zahtjevanoj vrijednosti.

U tabeli (Tabela II) dat je usporedni prikaz rasterećenja adaptivne UFLS i klasične UFLS za sve razmatrane slučajeve poremećaja. Može se zaključiti da adaptivna UFLS vrši manje rasterećenje EES-a u pojedinačnim iznosima, kao i ukupnom iznosu za sve slučajeve rasterećenja.

Iako je usporedivost adaptivne UFLS i klasične UFLS (tri stepena djelovanja) upitna zbog broja stepena podešenja, na osnovu dijagrama sa sličnim iznosom rasterećenja, može se zaključiti da adaptivna UFLS uvijek daje bolje rezultate zbog ranijeg djelovanja na zaustavljanju pada frekvencije. U slučaju značajne promjene režima rada EES-a (inercije i ukupne snage), potrebno je izvršiti simulaciju za izmijenjeni režim inercije EES-a, zatim poznavati vozni red pojedinih generatora (većih jedinica), kako bi se izvršila kvantifikacija mogućih ispada i pojavnih gradijenata frekvencije. U slučaju značajnih promjena ukupne inercije EES-a, moguće je slati signal promjene grupe podešenja prema lokalnim distribuiranim podfrekventnim zaštitama. U suštini, ovakva rješenja s distribuiranim rasterećenjem nisu pogodna za velike promjene inercije EES-a. Ponuđena adaptivna UFLS shema prilagođena je za konkretni sistem u jednom režimu rada (za dati iznos snage), što nije realna situacija koja se javlja u pogonu EES-a. Gradijent frekvencije koji nastaje pri deficitu snage sistema mijenja se zavisno od ukupne snage sistema i njegove inercije, pa je pri gradaciji (Tabela I) uzeto u obzir podešenje 2, koje u konkretnom slučaju odgovara snagom i gradijentom ispadu generatorske

BIOGRAFIJA

Rešad Hajdarević rođen je 19.03.1977. godine u Tuzli. Srednju elektromašinsku školu, Smjer tehničar elektronike završio je u Lukavcu, 1995. godine kao učenik generacije. Diplomirao je 2003. godine na Fakultetu elektrotehnike u Tuzli, na Odsjeku za energetske elektrotehnike. Kao stipendista JP Elektroprivreda BiH od 2004. godine zaposlen je u Elektroprenosu Sarajevo, pogon Mostar, na mjestu inženjera za mjerno-relejnu tehniku i pomoćna napajanja. Magistrirao je 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Tuzli na temu "Adaptivno podfrekventno rasterećenje EES-a", pod mentorstvom prof. dr. Mirze Kušljuga. Trenutno radi na Sistemu daljinskog nadzora i upravljanja u Elektroprenosu BiH, Operativno područje Tuzla.

Mirza Kušljugić rođen je 23. juna 1955. godine u Tuzli. Osnovnu školu je završio u Tuzli 1970. godine, a Matematičku gimnaziju četiri godine kasnije. Diplomirao je 1978. godine na Fakultetu elektrotehnike u Tuzli. Magistrirao je 1986. godine, a titulu doktora nauka stekao 1989. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Bio je na specijalizaciji 1983/84. godine na Univerzitetu u Manchesteru (UMIST), u Velikoj Britaniji. Od 1979. godine radi na Fakultetu elektrotehnike u Tuzli i trenutno ima zvanje redovnog profesora. Od 1996. do 2001. godine bio je na funkciji dekana ovoga fakulteta.