

Preizkus nadtokovne funkcije zaščitnega releja z uporabo strojne opreme za digitalno simulacijo elektroenergetskega sistema v realnem času

Urban Rudež¹, Peter Osredkar², Rafael Mihalič¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Elektro Ljubljana, Podjetje za distribucijo električne energije, d.d., Slovenska cesta 58, SI-1516 Ljubljana
E-pošta: urban.rudez@fe.uni-lj.si

Povzetek. V članku je predstavljen način za preizkus nadtokovne funkcije zaščitnega releja z uporabo strojne opreme za digitalno simulacijo elektroenergetskega sistema v realnem času (RTDS). Digitalni simulator RTDS je eden od simulatorjev, ki omogočajo izračun elektromagnetnih pojavov v realnem času, pri čemer dosega izjemno kratke časovne korake izračuna (50 μ s). Posebna strojna oprema omogoča uvoz in izvoz signalov do zunanje opreme, s čimer omogoča preizkušanje dejanskih naprav v zaprti zanki z računalniškim modelom EES. Tako ima uporabnik na voljo analizo delovanja naprave same in tudi analizo vpliva delovanja te naprave na razmere v preostalem sistemu. V članku so opisani postopek in rezultati preizkusa enostavne nadtokovne funkcije zaščitnega releja REF 630 izdelovalca ABB, ki demonstrira eno od možnosti uporabe simulatorja RTDS za ugotavljanje obnašanja dejanske opreme v EES ob različnih stanjih le-tega.

Ključne besede: digitalna simulacija elektroenergetskega sistema v realnem času, izračun elektromagnetnih pojavov v realnem času, nadtokovna funkcija zaščitnega releja, preizkušanje dejanskih naprav v zaprti zanki

Overcurrent protection relay testing with Real Time Digital Simulator hardware

Authors in this paper present overcurrent protection relay testing procedure by applying special simulation hardware for digital real-time power system simulation (RTDS). RTDS simulator enables real-time calculation of electromagnetic phenomena with calculation time step of even 50 μ s. Special hardware enables import and export of many signals from the simulator to external actual power system equipment and therefore so called closed-loop testing. In this way it is possible to have an insight both in equipment behavior and also the influence of this equipment to power system operation. In this paper a very simple definite-time protection function is tested on ABB protection relay REF 630 and at the end the results of this testing are provided. The testing has shown a remarkable usefulness of the RTDS simulator for determination of actual power system equipment behavior in various power system conditions.

1 UVOD

Tako sistemskim operaterjem kot tudi izdelovalcem opreme na področju zaščite in vodenja elektroenergetskih sistemov (EES) je v velikem interesu natančno preizkusiti delovanje naprav vodenja in zaščite pred samo uporabo/inštalacijo v dejanski EES. Glede na različno opremo, ki je na voljo za tovrstno testiranje, obstajajo po svetu zelo različni pristopi k takšnemu preizkušanju.

Doba digitalizacije in tehnološkega napredka je prinesla izboljšavo pri uporabi simulatorjev, predvsem elektromagnetnih prehodnih pojavov v EES. Analogne simulatorje so nadomestili digitalni, pri čemer pa je na trgu na voljo precej različne programske opreme, ki omogočajo podobne izračune. Takšni računalniški paketi izrabljajo numerične tehnike izračuna, ki so znane že več desetletij – kot primer naj omenimo najpogostejše uporabljeno, t. j. modeliranje reaktivnih elementov omrežja z vzporedno vezavo krmiljenega tokovnega vira in ohmske upornosti [1]. Tako je mogoče na preprost način nastaviti vozliščne enačbe sistema in posledično tudi vozliščno admitančno matriko ter izvajati izračun dinamičnih pojavov s sistemi algebrskih in ne diferencialnih enačb. Simulacija poteka sekvenčno po korakih ΔT , od nastavitve katerega sta odvisna tudi čas izračuna ter serija fizikalnih pojavov, ki jih je mogoče s simulacijo zajeti.

Tovrstne simulacije se ne izvajajo v realnem času, kar je v preteklosti pomenilo določeno oviro glede možnosti preizkušanja naprav. S »klasično« simulacijo obnašanje releja modeliramo z neko regulacijsko logiko. Načeloma je tak pristop povsem korekten, če imamo dovolj podatkov o releju. Seveda pri pojavih, ki temeljijo na nepopačenih ali malo popačenih sinusnih veličinah, ni problema. Ta nastane, ko zaradi tranzientov med okvarami rele prebere močno popačene

signale, ki s sinusnimi funkcijami osnovne frekvence nimajo veliko skupnega. Težava ni v tem, da ne bi znali modelirati logike relejev, temveč da je programska oprema relejev (logika) poslovna skrivnost in do podatkov ni mogoče priti. Torej obnašanja releja pri dogodkih v EES ni mogoče v popolnosti ugotoviti, razen s simulacijo EES v realnem času. S slednjo je namreč v realnem času mogoče izvajati dogodke v EES in signale "peljati" na napravo. V realnem sistemu takih preizkusov ne bi mogli narediti (npr. kratkostične okvare na 400 kV). Pri tem fizična naprava ne "ve", ali je priključena na simulator ali v resnični EES.

Razvoj tehnik vzporednega procesiranja signalov je omogočil pristop, s katerim lahko na primer milisekundne pojave z ustrežno opremo izračunamo v natanko takšnem času ali celo hitreje. Glavna težava pri razvoju takšne opreme je v doseganju dovolj velike hitrosti izračunov ob dovolj majhnem integracijskem koraku ΔT , saj manjši ΔT omogoča natančnejši izračun in zajemanje višjefrekvenčnih pojavov, po drugi strani pa zajetno povečuje potrebno število matematičnih operacij in posledično čas izračuna.

Digitalni simulator RTDS (angl. Real Time Digital Simulator) podjetja RTDS Technologies je eden od simulatorjev, ki omogočajo izračun elektromagnetnih pojavov v realnem času, pri čemer dosega izjemno nizke ΔT (večinoma 50 μs , za nekatere elemente močnostne elektronike kot so na primer tiristorski pretvorniki tudi do 1.5 μs) [2]. Z razvojem posebne strojne opreme sta omogočena tudi uvoz in izvoz signalov do zunanje opreme. Tako je mogoče preizkušanje naprav v zaprti zanki z računalniškim modelom EES. Uporabnik ima na voljo tako analizo delovanja naprave same kot tudi analizo vpliva delovanja te naprave na razmere v preostalem sistemu [3, 4], kar lahko pravzaprav razumemo kot zamenjavo realnega sistema z modelom v simulatorju RTDS.

RTDS je vrh tehnologije simuliranja EES in prvo tovrstno orodje v Sloveniji in tudi širši okolici. Izkušen skorajda ni, razen nekajtedenskega dela oz. izobraževanja pri Siemens AG Erlangen in v Kanadi. Cilj dela, predstavljenega v tem članku, je predvsem seznaniti strokovno javnost z vrhunsko tehnologijo na področju simulacij, t. j. pokazati kaj sploh simulator RTDS je, in poudariti možnosti, ki jih ta tehnologija ponuja pri preizkušanju dejanske opreme.

2 SIMULATOR ZA DIGITALNO SIMULACIJO EES V REALNEM ČASU

Na svetu je več izdelovalcev strojne opreme za simulacijo EES v realnem času. RTDS Technologies iz Kanade [5] je med njimi vodilna v proizvodnji kakovostnih simulatorjev, ki so modularne izvedbe in izjemnih karakteristik ter referenc povsod po svetu. Simulatorji RTDS so sestavljeni iz enot, poimenovanih kot »Rack« (polica). Vsaka polica vsebuje lahko do šest procesorskih kartic (Giga Processor Card– GPC ali

najnovejša serija kartic PB5) in vsaj eno kartico GTWIF (angl. Giga Transceiver Workstation Inter Face card). Slednja je nujno potrebna za komunikacijo med osebnim računalnikom in simulatorjem, ki jo izvaja prek komunikacije TCP/IP (Ethernet). Simulacija v realnem času je lahko kakovostna le s čim manjšim časovnim korakom integracije, pri čemer simulator RTDS lahko doseže časovni korak integracije tudi 50 μs (za tako imenovani »Small-time-step modeling« tudi do 1.5 μs). S takšno hitrostjo izračuna pa je nemogoče pričakovati, da bo osebni računalnik prek povezave Ethernet sproti prebiral vse podatke iz simulatorja in jih tudi v celoti v realnem času prikazoval na zaslon. Zato se prek modula RSCAD/RunTime opazujejo spremenljivke v celoti zgolj na ukaz. Več o modulu RSCAD/RunTime je zapisano v poglavju 2.2.

Simulator, ki ga imamo na voljo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, vsebuje eno polico, na kateri sta dve GPC kartici (vsaka s po dvema procesorjema) in ena kartica GTWIF. Poleg strojne opreme je sestavni del simulatorja tudi programska oprema RSCAD, prek katere je mogoče samo strojno opremo upravljati, ter je nameščena na osebnem računalniku. Simulator in osebni računalnik sta lahko povezana neposredno ali prek računalniškega omrežja, če simulator uporablja več uporabnikov.

2.1 Modul RSCAD/Draft

Programska oprema RSCAD ima na voljo več modulov, ki jih je mogoče/teba uporabiti za izvedbo simulacije. Prvi od teh modulov je RSCAD/Draft, v katerem je mogoče s pomočjo grafičnega vmesnika ustvariti model EES, ki ga nameravamo zagnati na simulatorju RTDS. Modul vsebuje risalno površino in tudi knjižnico večine najbolj uporabljenih elementov, in sicer tako EES kot tudi regulacijskih elementov.

Vsakemu od vnesenih elementov je mogoče spreminjati in vnašati poljubne parametre, poleg tega pa jim je mogoče tudi ročno določiti številko procesorja, na katerem naj bi izračun le-tega potekal. Ko imamo model ustvarjen, ga je treba s pomočjo ukaza »prevedi v strojni jezik« (angl. Compile) pretvoriti v obliko, ki jo je mogoče prenesti v simulator. Če smo med ustvarjanjem modela naredili kakšne napake, ki bi onemogočile simulacijo, procesa prevajanja ni mogoče končati. Napake lahko izhajajo tako iz samega vnosa tehničnih podatkov elementov, kot tudi iz neskladnosti vnesenih podatkov in razpoložljive strojne opreme.

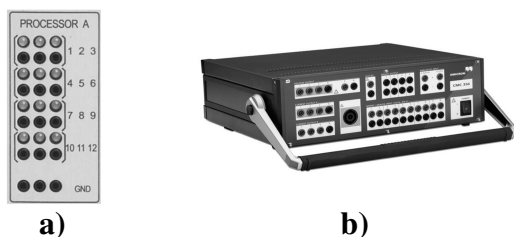
2.2 Modul RSCAD/RunTime

S pomočjo modula RSCAD/RunTime je mogoča neposredna komunikacija osebnega računalnika s programske opreme RSCAD in simulatorjem RTDS. V prvem koraku je treba izbrati spremenljivke, ki jih želimo opazovati, kot tudi dodati morebitne krmilne elemente, s katerimi lahko sprožamo dogodke v modelu med simulacijo (na primer odklopi, spremembe delovnih točk itd.). Nadalje se prenese in zažene

ustvarjeni model na simulator, ki tako začne simulacijo v realnem času. Modul RSCAD/RunTime torej služi uporabniku med samo simulacijo bodisi za opazovanje raznih pojavov v omrežju bodisi za interno sprožanje raznih dogodkov.

2.3 Izvoz signalov iz simulatorja RTDS

Spremljanje časovnega spreminjanja veličin v modelu EES, ki ga v realnem času izvaja simulator RTDS, je mogoče na več načinov. Prvi je prek modula RSCAD/RunTime (na primer prek grafa), drugi pa prek opazovanja električnega signala (npr. z osciloskopom), kar je pravzaprav posebnost takšnega simulatorja. V ta namen je mogoča uporaba analogne (angl. GT Analogue Output card - GTA0) in digitalne izhodne kartice (angl. GT Digital Output card - GTDO) ali pa vmesnika na prednji plošči procesorske kartice GPC (slika 1a). Slednji je namenjen predvsem opazovanju signalov z osciloskopom, medtem ko sta izhodni kartici sposobni proizvesti visokoresolucijski signal, potreben predvsem za povezovanje simulatorja in krmilnih oziroma zaščitnih naprav.

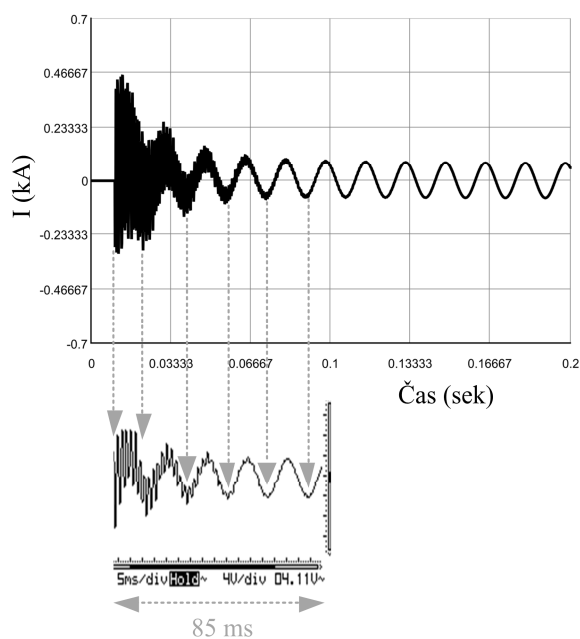


Slika 1: a) kartica GPC z vmesnikom na prednji plošči, b) naprava OMICRON CMC 356

Kot primer smo izvedli vklop dodatnega voda vzporedno k že obratujočemu vodu, pri čemer pa smo sočasno merili tok faze A skozi vklopljeni vod tako v modulu RSCAD/RunTime (slika 2- zgoraj) kot tudi z osciloskopom prek vmesnika na prednji plošči procesorske kartice GPC (slika 2- spodaj). Kot že zapisano, je slednja v primerjavi s kartico GTA0 sposobna proizvesti signal s slabšim dinamičnim sledenjem dejanskemu signalu [2], kar je razvidno tudi iz primerjave obeh grafov – slika 2. Treba se je zavedati, da je razlika med grafoma nastala kljub uporabljenemu ročnemu osciloskopu s frekvenco vzorčenja 40 MHz. Iz tega sledi, da je treba, če je potreben izvoz signala z boljšim dinamičnim sledenjem, uporabiti kartico GTA0.

Kartica GTA0 ima razpon električnega signala na svojih sponkah v mejah ± 10 V, pri čemer pa je njena tokovna sposobnost do 25 mA. Iz tega sledi, da je pri testiranju zaščitnega nadtokovnega releja potrebna uporaba tokovnega ojačevalnika. Za testiranje, opisano v tem delu, smo uporabili napravo CMC 356 podjetja OMICRON (slika 1b – [6]), in sicer s pomočjo strokovnjakov iz podjetja Elektro Ljubljana.

Običajno je naprava CMC 356 namenjena samostojnemu testiranju zaščitnih relejev, in sicer z generiranjem poljubnih tokovnih razmer. V našem primeru pa je bilo krmiljenje CMC 356 izvedeno na način, ki omogoča njeno delovanje kot pretvornik in ojačevalnik napetostnih signalov iz simulatorja RTDS. Prednost testiranja relejev prek simulatorja RTDS je v tem, da se preizkusi rele v razmerah, ki so krepko bližje dejanskim razmeram v EES, skupaj s harmonskim popačenjem vhodnih signalov, nihanjem frekvence itd.



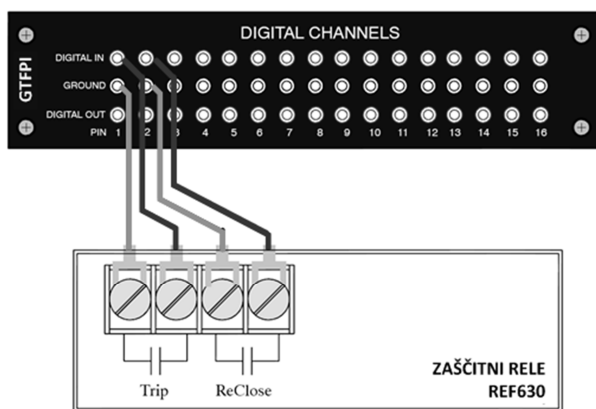
Slika 2: Časovni poteki toka faze A po vklopljenem vodu vzporedno k že obratujočemu vodu -RSCAD/RunTime (zgoraj) in ročni osciloskop (spodaj)

Pretvorbo iz napetostnega izhoda RTDS v tokovne signale ščitnih objektov smo opravili z uporabo programske knjižnice CMEngine, s katero je mogoče napisati poljubno programsko kodo [7], ki določi princip delovanja katerekoli naprave CMC. Glavna funkcija, ki jo za naše potrebe pri tem uporabljamo, se imenuje »multimeter«. Funkcija je namenjena merjenju in določanju vrednosti vhodnih signalov, pri čemer ugotavljamo najvišjo in učinkovito vrednost signalov, fazne zamike, frekvence, moči ipd. v merjenem intervalu. Hkrati uporabljamo še generatorske funkcije naprave CMC, da lastnosti merjenih signalov preslikamo v tokovne signale, ki jih usmerimo v merilne vhode zaščitnih naprav. Pri tem je ključno, da naprava CMC356 deluje kot samostojni vmesni pretvorni člen. Z uporabo RTDS v kombinaciji z napravo CMC smo tako ustvarili sistem, ki v realnem času izračunava razmere v modelu elektroenergetskega sistema, jih prek sekundarnih vrednosti modela zaščitnega sistema predstavi stvarni zaščitni napravi, ki s tem, ko vrne informacijo o izklopu v model, izklopi okvarjene naprave ob dogodkih.

2.4 Uvoz signalov v simulator RTDS

Posebnost RTDS simulatorja je možnost analize/testiranja določenih naprav v zaprti zanki z modelom preostalega EES (angl. Closed Loop Testing). Pri takšnih simulacijah se del modela EES nadomesti z dejansko napravo, ki se priključi na simulator RTDS. To mu med drugim omogočata analogna (GT Analogue Input Card - GTAI) in digitalna (GT Digital Input Card - GTDI) vhodna kartica. Poleg teh je mogoče binarne signale v simulator uvesti tudi prek vmesniškega panela na prednji plošči simulatorja (GT Front Panel Interface - GTFPI), ki je namenjen predvsem prenosu izklopnih signalov zaščitne opreme – slika 3.

Podobno kot pri izhodnih karticah je treba za regulacijo elementov močnostne elektronike (HVDC in FACTS tehnologija) uporabiti namesto vmesniškega panela kartico GTDI ter modeliranje elementov v RSCAD z majhnim časovnim korakom. V takšnih modelih je mogoče doseči simulacijo s časovnim korakom integracije celo nekje med 1.4 – 2.5 μ s.

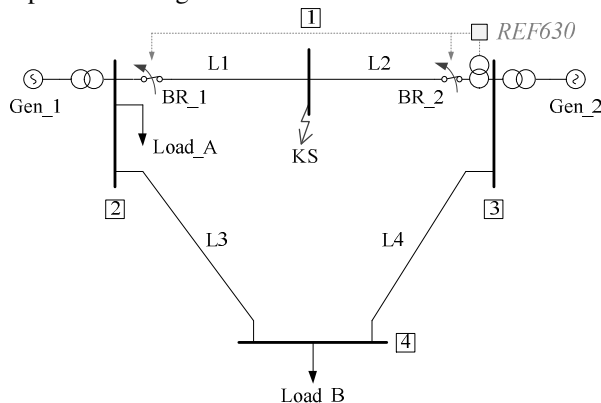


Slika 3: Vezava zaščitnega releja REF630 in GTFPI

3 TESTNI MODEL ELEKTROENERGETSKEGA OMREŽJA

Shemo uporabljenega modela EES prikazuje slika 4. Model je sestavljen iz dveh sinhronskih generatorjev, ki prek štirih daljnovidov napajata dve odjemni zbiralki. Uporabljeni nadtokovni rele, priključen na sekundarne sponke modela tokovnega transformatorja (CT) varuje vod L2 ter v primeru delovanja odklopi oba odklopnika BR_1 in BR_2. V stacionarnem stanju je efektivna vrednost toka faze A na vodu L2 enaka 111.1 A, kar ob prestavi tokovnika 120:1 ter upoštevani priključeni impedanci njegovega bremena pomeni 0.913 A na njegovi sekundarni strani. Kartica GTA0 je bila nastavljena na razmerje 5V \rightarrow 10A, kar pomeni, da bo v primeru toka na sekundarju tokovnika 10A napetostni signal na izhodu kartice GTA0 enak 5V. Zato je v stacionarnem stanju maksimalna vrednost signala, ki ustreza toku faze A na sekundarju, enaka 0.65V.

V nekem trenutku, ki ga interno sprožimo prek modula RSCAD/RunTime, pride na zbiralki 1 do tripolnega kratkega stika. Najvišja vrednost udarnega toka kratkega stika na sekundarju tokovnika je približno 15A, kar ustreza napetostnemu signalu GTA0 7.5V ter trajni tok kratkega stika približno 5A, kar ustreza napetostnemu signalu GTA0 2.5V.



Slika 4: Model testnega EES

4 PREIZKUS ZAŠČITNEGA RELEJA

Shemo celotnega postroja uporabljenih naprav prikazuje slika 5. V simulatorju RTDS je bil sestavljen model testnega omrežja, pri čemer pa so izhodne signale iz simulatorja pomenili vsi trije fazni tokovi na sekundarju tokovnega transformatorja I_A , I_B in I_C . Prek nastavitve pretvorbe/ojačenja kartice GTA0 je torej izhod iz simulatorja v obliki napetostnih signalov V_{IA} , V_{IB} in V_{IC} . Naprava CMC 356 te signale ustrezno ojači ter s tem proizvede tokove, ki ustrezajo I_A , I_B in I_C . Ti tokovi se vodijo v rele, ki skladno z nastavljenim tokovno karakteristiko proizvede signal za izklop. Le-tega se vodi prek FPI nazaj v simulator, ki neposredno vpliva na stanje modela odklopnikov BR_1 in BR_2.

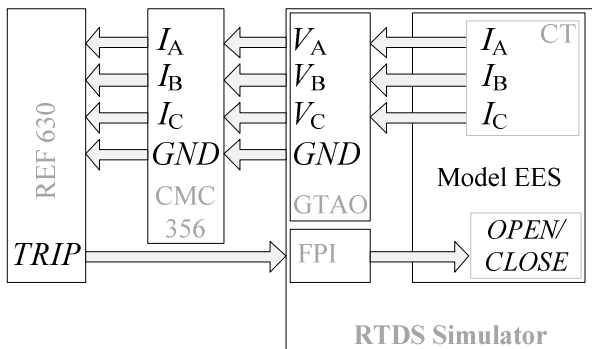
4.1 Nastavitve

Z uporabo simulatorja RTDS in tokovnega ojačevalnika je bilo treba simulirati dejanske razmere, v katerih bo zaščitni rele obratoval. To vključuje tako nastavljen razmerje tok–napetost na kartici GTA0 kot tudi razmerje napetost–tok na ojačevalniku. Ker ima kartica GTA0 na svojih sponkah razpon električnega signala v mejah ± 10 V, je treba v modulu RSCAD/Draft nastaviti faktor ojačitve, ki pokaže razmerje med napetostjo na uporabljenih sponkah kartice GTA0 in (v našem primeru) izmerjenim tokom na liniji L2 v amperih. Ker mora ojačevalnik proizvesti tok, ustrezen sekundarnemu toku tokovnega transformatorja, smo za skaliranje uporabili naslednjo formulo:

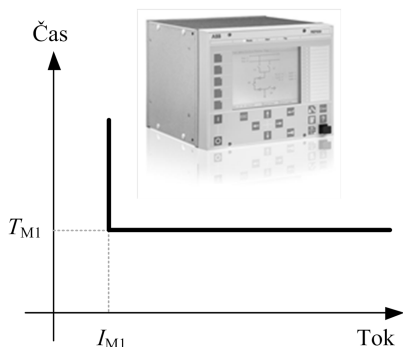
$$G_{AMP} = \frac{1}{G_{GTAO}}, \quad (1)$$

kjer je G_{GTAO} faktor ojačitve na uporabljenih sponkah kartice GTA0 in je enak 0.5 V/A ter G_{AMP} ojačitev

tokovnega ojačevalnika skladno z (1) nastavljena na 2 A/V. Nadtokovna zaščita naprave REF 630 je nastavljena tako, da rele proizvede izklopni signal ob prekoračitvi $I_{M1} = 3I_n$ faznega toka (trenutne vrednosti), pri čemer je I_n nazivna vrednost faznega toka na modelu 110 kV voda L2. Izklopni signal se proizvede ob pogoju, da omenjena prekoračitev traja dlje kot $T_{M1} = 20$ ms. Nastavljeno »definite - time« karakteristiko nadtokovnega releja prikazuje slika 6.



Slika 5: Shematičen pregled testnega sistema



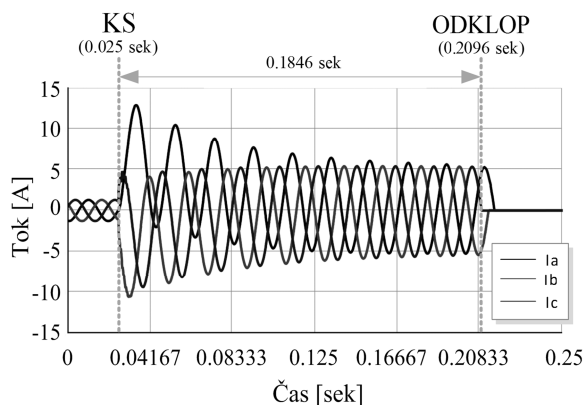
Slika 6: Nastavitev nadtokovne karakteristike zaščitnega releja REF630 izdelovalca ABB

4.2 Pojav kratkega stika

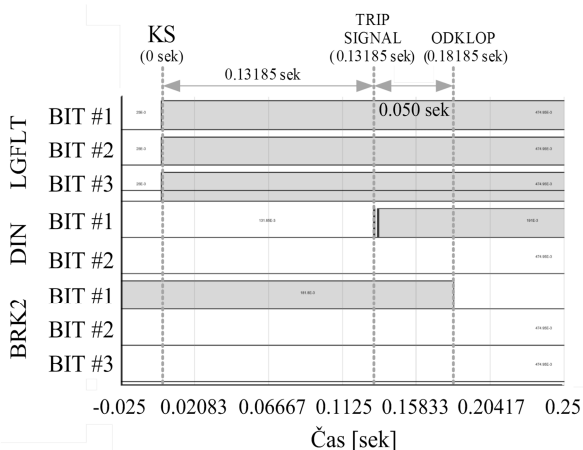
Z ročno aktivacijo tripolnega kratkega stika prek modula RSCAD/RunTime je bila simulirana napaka v testnem modelu. Časovni potek vseh treh faz toka na sekundarju tokovnega transformatorja prikazuje slika 7, medtem ko slika 8 prikazuje vrednosti binarnih spremenljivk (signalov), uporabljenih pri testiranju. Treba je opozoriti, da je časovna lestvica slik, na katerih so časovni poteki analognih signalov, drugačna od tiste, na kateri so časovni poteki binarnih signalov. Časovna lestvica slednjih definira čas $t = 0$ v trenutku nastanka motnje, medtem ko je pri analognih signalih 5 % celotnega časovnega razpona pred motnjo (ta čas je sicer mogoče prosto definirati v RSCAD/RunTime).

Slika 8 prikazuje na vodoravni osi časovno lestvico od 25 ms pred motnjo pa vse do 250 ms po motnji. Spremenljivka LGFLT je tribitna beseda, kjer posamezen bit pomeni stanje napake (kratkagega) stika v eni od treh faz. Iz slike je razvidno, da pride ob času $t =$

0 s do tripolnega kratkega stika, saj vrednosti vseh treh bitov zavzamejo vrednost 1. Prvi bit dvobitne besede DIN pomeni signal za odklop, drugi bit pa signal za vklop odklopnika v vseh treh fazah. Iz časovnega poteka faznih tokov (slika 7) je razvidno, da se odklop izvede šele ob prvem prehodu posameznega faznega toka skozi vrednost 0. Tretja po vrsti je prikazana tribitna beseda BRK2, ki pomeni stanje odklopnika BR_2. Vrednost 1 prvega bita pomeni zaprto stanje ter vrednost 0 odprto stanje vseh treh faz odklopnika, pri čemer je treba poudariti, da je zaradi poenostavitve uporabljen tripolni izklop (torej zgolj en bit kontrolira stanje vseh treh faz odklopnika).



Slika 7: Časovni potek tokov na sekundarju tokovnika



Slika 8: Vrednosti binarnih spremenljivk, uporabljenih pri testiranju

Iz slik je razvidno, da je od trenutka nastanka kratkega stika do popolnega odklopa prve od treh faz toka (prehod skozi 0!) po liniji L2 minilo 0.1846 sekunde. Signal za odklop je bil generiran 0.13185 sekunde po nastanku kratkega stika, nakar je preteklo še dodatnih 0.050 sekunde do zaključenega odklopnikovega delovanja (nastavljen čas delovanja odklopnika) ter 0.00275 sekunde do prehoda prve faze toka skozi vrednost 0. V časovnem intervalu 0.13185 sekunde so zajete večinoma tri časovne zakasnitve:

1. zakasnitev ojačevalne naprave CMC 356,
2. nastavitve zakasnitve nadtokovnega releja ($T_{MI} = 20$ ms)
3. zakasnitev delovanja nadtokovnega releja.

Glede na velikostni red prvih dveh zakasnitev lahko zadnjo zanemarimo. Iz tega sledi, da je zakasnitev ojačevalne naprave enaka slabih 112 ms. Ker pa je bilo med testiranjem opravljenih več enakih preizkusov, lahko na tem mestu podamo povprečno zakasnitev ojačevalne naprave, ki je celo večja ter znaša 157 ms. Izkaže se, da je glede na časovno zakasnitev CMC 356 v funkciji ojačevalne naprave manj ustrezna, saj vnaša v proces prevelike časovne zakasnitve. Iz tega sledi, da bo treba v prihodnje najti boljše alternative za ojačitev napetostnih signalov iz simulatorja RTDS.

5 SKLEP

Cilj predstavljenega dela je predvsem pokazati uporabnost simulatorja za digitalno simulacijo elektroenergetskega sistema v realnem času RTDS za preizkušanje dejanske opreme, kot tudi izvedba primera njegove uporabe pri preizkušanju zaščitnih relejev pred njihovo vključitvijo v dejanski elektroenergetski sistem. Takšen simulator je v svetu nepogrešljivo orodje pri analizi obnašanja krmilne opreme (na primer regulacija pretvornikov HVDC) za dejanske razmere, v katerih bo delovala. V realnem sistemu namreč tovrstnih preizkusov ni mogoče izvesti. Kot razlog za to trditev si predstavljajmo na primer regulator 5000 MW 800 kV aplikacije HVDC, ki ga je treba preizkusiti za primere okvar v EES zelo visokih napetosti.

Simulator RTDS omogoča testiranje dejanske opreme v zaprti zanki z digitalnim modelom preostalega elektroenergetskega sistema. Časovni korak izračuna elektromagnetnih pojavov, ki jih simulator RTDS omogoča, se giblje nekje do 50 μ s, medtem ko je mogoče za modeliranje elementov močnostne elektronike (na primer tiristori pretvorniki in naprave FACTS) ta korak znižati tudi do 1.5 μ s. Za to delo smo izvedli preizkus enostavne nadtokovne funkcije releja REF 630 izdelovalca ABB. Prednost testiranja relejev prek simulatorja RTDS je v tem, da se preizkusi rele v razmerah, ki so krepko bliže dejanskim razmeram v EES, skupaj s harmonskim popačenjem vhodnih signalov, nihanji frekvence in podobnim. Pri preizkusu se je izkazalo, da je v večini primerov poleg samega simulatorja potrebna tudi uporaba ojačevalnika tokovnih in napetostnih signalov. Pri preizkušanju, predstavljenem v tem članku, smo za ojačitev napetostnih signalov iz simulatorja uporabili dokaj neustrezno orodje, in sicer napravo CMC 356, ki je v povprečju v proceduro doprinesla nekje 150 ms časovne zakasnitve. Zato bo treba za resno delo vsekakor uporabiti ustreznejšo ojačevalno napravo.

6 ZAHVALA

To delo je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v sklopu programske skupine Elektroenergetski sistemi, P2-356. Avtorji članka se zahvaljujejo Elektru Ljubljana, podjetju za distribucijo električne energije, d. d., za pomoč in podporo pri preizkušanju ter pisanju tega članka.

LITERATURA

- [1] H. W. Dommel, Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, NO. 4, April 1969, pp. 388-399.
- [2] RTDS Technologies, Realtime digital simulation for the power industry - manual set, RSCAD version 2.024.2.
- [3] H. Duchen, M. Lagerkvist, R. Kuffel, R.P. Wierckx, HVDC Simulation and Control System Testing Using a Real-Time Digital Simulator (RTDS), RTDS Technologies internal library.
- [4] Ankush Saran, Padmavathy Kankanala, Anurag K. Srivastava, Noel N. Schulz, Designing and Testing Protective Overcurrent Relay Using Real Time Digital Simulation, RTDS Technologies internal library.
- [5] RTDS Technologies, <http://www.rtds.com/index/index.html>.
- [6] OMICRON, CMC356 Technical data, dostopno na http://www.omicron.at/fileadmin/user_upload/files/pdf/en/CMC-356-Brochure-ENU.pdf dan 09.02.2012.
- [7] Omicron: Programming interface for CMC test systems, CMENG.AE.6, 2007

Urban Rudež je diplomiral leta 2005 in doktoriral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 2005–2007 je bil zaposlen v podjetju Korona, v letih 2007–2011 pa je bil zaposlen kot mladi raziskovalec v Laboratoriju za preskrbo z električno energijo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Trenutno je zaposlen kot raziskovalec na isti fakulteti. Njegovo raziskovalno področje zajema dinamično analizo elektroenergetskih sistemov.

Peter Osredkar je leta 2008 diplomiral na področju avtomatike na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Ljubljani. V zadnjih letih študija in do danes je bilo njegovo glavno področje delovanja analiziranje, razvoj in funkcionalno preizkušanje zaščitnih sistemov distribucijskega elektroenergetskega omrežja podjetja Elektro Ljubljana, d. d., administracija podatkovne baze zaščitnih naprav ter razvoj novih pametnih aplikacij na področju funkcionalnih preizkusov naprav za avtomatizacijo postopkov in odpravo napak pri vnosu podatkov.

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.