

Rafael Mihalič*

Simuliranje elektroenergetskega sistema – zakaj in kako

POVZETEK

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 korake digitalne integracije (večinoma 50 μ s, za nekatere elemente močnostne elektronike, kot so na primer tiristorski pretvorniki, tudi do 1.5 μ s). Posebna strojna oprema omogoča uvoz in izvoz signalov do zunanje opreme, s čimer omogoča preizkušanje dejanskih naprav v zaprti zanki z računalniškimi modelom EES. Tako ima uporabnik na voljo analizo delovanja naprave same in tudi analizo vpliva delovanja te naprave na razmere v preostalem sistemu. Testirana naprava pravzaprav "ne ve" ali je priklopljena na simulacijski model ali v resničen EES. Napravo so prvotno razvili za testiranje krmilnih modulov konverterskih postaj visokonapetostnih enosmernih prenosov.

Uporaba ustrezne metode modeliranja homogenih vodov in ekstremno hitra komunikacija omogočata uporabo tehnik vzporednega procesiranja signalov, s katerim lahko pojave z ustrezno opremo izračunamo hitreje, kot bi se zgodili. 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.

Ključne besede: elektroenergetski sistem, simulacija, simulacija v realnem času, RTDS.

1. Uvod

Panta rhei (Vse teče). Ta moto, s katerim je pred približno dvema in pol tisočletjema grški filozof Heraklit (540–480 pr. n. št.) povzel svoj filozofski nazor, je osnovno vodilo pri dojemljanju dinamičnih pojavov v elektrotehniki. Svet, v katerem živimo, se neprestano spreminja, nič ni stalnega; tako kot nikoli ne moremo dvakrat stopiti v isto reko, saj se ta neprestano spreminja.

Tudi dogajanje v elektroenergetskem sistemu (EES) je v svojem bistvu podobno toku reke. Razmere se neprestano spreminjajo, nič ni statičnega. Stacionarna stanja, s katerimi največkrat želimo ponazoriti neko dogajanje v EES, so le bolj ali manj natančen približek dejanskih razmer, v realnosti pa prej izjema kot pravilo. V smislu inženirske prakse, katere vodilo je opis pojavov do natančnosti, ki omogoča rešitev nekega problema, je to velikokrat zadovoljivo. Vendar pa praviloma najvišje obremenitve v EES definirajo dinamični pojavi. Za upravljavce in načrtovalce EES in/ali električnih naprav je poznavanje in razumevanje dinamičnih pojavov v EES nujno.

Za obravnavo dinamičnih (prehodnih) pojavov in stabilnost EES obstajajo različni matematični pristopi in orodja za izvedbo izračunov. Dinamične pojave matematično opišemo s sistemi diferencialnih enačb. V primeru, ko so spremenljivke med seboj

linearno odvisne, ostali parametri pa konstantni (oz. lahko sistem z zadovoljivo natančnostjo na ta način predstavimo), imamo opravka z linearnimi sistemi. Matematične metode za linearne sisteme so razvite in izračun časovnih potekov veličin je bolj ali manj rutinska zadeva. Največkrat je v takih primerih moč do uporabnih rezultatov priti tudi brez simulacij in te služijo le za verifikacijo rezultatov.

Vendar pa je EES nelinearen in možnost njegove linearne predstavitve je prej izjema kot pravilo. Kakor hitro je systemska spremenljivka produkt ostalih spremenljivk (npr. moč), ne moremo več govoriti o linearnosti. Razen tega je v EES vrsta parametrov, ki so nelinearno odvisni od vrednosti sistemskih spremenljivk. Med tipične lahko štejemo npr. magnetilne krivulje transformatorjev, nasičenje generatorjev, fiksne in variabilne omejitve turbin in generatorjev, delovanje regulatorjev v najširšem smislu (turbinski, napetostni, spreminjanje odcepov transformatorjev, regulatorji elektronskih naprav), ki v splošnem tudi niso linearni, nadalje delovanje zaščitnih naprav, odvisnost bremen od sistemskih spremenljivk, frekvenčna odvisnost impedanc elementov EES itd.

Rešitev takih nelinearnih sistemov diferencialnih enačb je mogoča samo na numeričen način, in sicer s pomočjo ustreznih računalniških programov, torej s *simulacijo*.

*Fakulteta za elektrotehniko / Tržaška 25, Ljubljana

E-naslov: rafael.mihalic@fe.uni-lj.si

Tel.: +386 1 4768 438

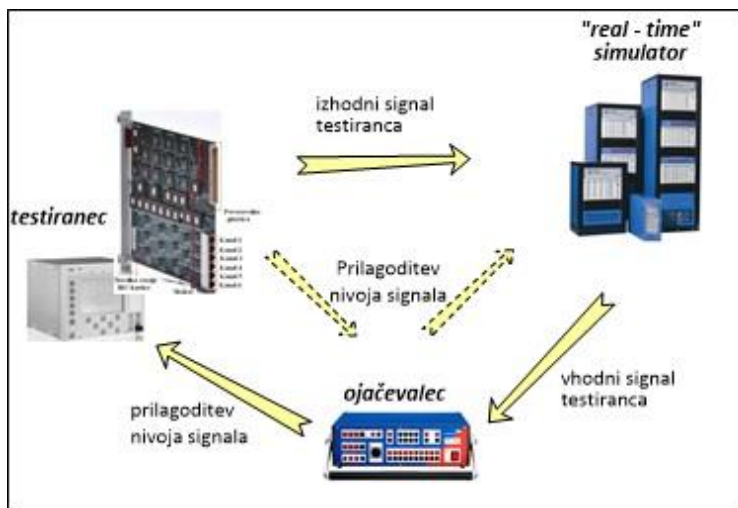
2. Simulacija elektroenergetskih sistemov v realnem času

Načeloma je pristop simulacije mogoče uporabiti pri vseh vrstah in frekvenčnih območjih prehodnih pojavov, s tem da je to ponekod edini uporaben način analize, v drugih primerih pa zopet služi za verifikacijo drugače pridobljenih rezultatov.

Zgodovina izvajanja simulacij je skoraj tako dolga, kot je zgodovina EES. Ko še ni bilo mogoče izvajati numeričnih postopkov simulacije, so v ta namen uporabljali pomanjšane fizične modele EES in do rezultatov prihajali z merjenjem spremenljivk takih modelov. Obstajali so tudi hibridni modeli, nekakšen križanec med pomanjšanim modelom omrežja in računalniško tehnologijo. Ker ima v splošnem pomanjšani model večje dušenje kakor realen sistem, so s hitrimi vezji simulirali npr. »negativne upornosti« in na ta način zmanjšali dušenje modela. To tehnologijo so uporabljali zlasti za testiranje dejanske opreme v pogojih t. i. simulacije v realnem času (npr. Siemensov Schwingungsmodell). Dandanes simulacije izvajamo skoraj izključno z digitalnimi računalniki, zato pogosto srečamo tudi izraz *digitalna simulacija* EES.

V veliki večini primerov izvajamo simulacije "off-line", kar pomeni, da je čas, kot parameter v simulaciji, neodvisen od dejanskega časa. Gre za "klasično" simuliranje z računalnikom, kjer je hitrost izračuna odvisna zgolj od hitrosti delovanja računalnika.

Pri natančnem ponazarjanju ali testiranju opreme pa pristop ni tako preprost. Načeloma lahko obnašanje naprav (npr. zaščitnega releja) modeliramo z neko regulacijsko logiko. Tak pristop je povsem korekten, če imamo dovolj podatkov o napravi. Pri pojavih, ki temeljijo na nepopačenih ali malo popačenih sinusnih veličinah, v splošnem naj ne bi bilo težav. Te pa nastanejo, ko zaradi elektromagnetnih prehodnih pojavov med okvarami naprava zajema močno popačene signale, ki s sinusnimi funkcijami osnovne frekvence nimajo več veliko skupnega. Težava ni v tem, da ne bi znali modelirati logike elektronskih naprav in regulacije, temveč da je programska oprema naprav (logika) poslovna skrivnost in do podatkov praktično ni mogoče priti. Torej tega, kako se bo npr. rele obnašal pri različnih dogodkih v EES, ni mogoče v popolnosti ugotoviti, razen s t. i. simulacijo EES v realnem času. S to je namreč v realnem času mogoče simulirati dogodke v EES in signale "peljati" na napravo, izhod iz te pa zopet zajeti kot sistemsko spremenljivko v simulaciji. V realnem sistemu seveda takih preizkusov ne bi mogli narediti (npr. kratkostične okvare na 400 kV, testiranje regulatorjev naprav močnostne elektronike, zlasti HVDC ...). Pri tem testirana naprava ne "ve", ali je priključena na simulator ali v resnični EES.



Slika 1. Princip "real-time" simulacije v zaprti zanki

Osnovno idejo simulacije v realnem času v zaprti zanki ilustrira slika 1. Simulator simulira razmere v omrežju, veličino, ki v realnem sistemu služi kot vhod v testiranec je potem potrebno prilagoditi nivoju testiranca, odziv (izhod) testiranca pa zopet uvedemo v računalnik (oz. prilagodimo nivo), kot spremenljivko, ki jo simulator upošteva v izračunih. Ključ te tehnologije predstavlja simuliranje sistema v realnem času, kar je težko uresničljiva naloga.

Začetne simulacije EES v realnem času so se izvajale na analognih TNA-jih (Transient Network Analyzer). To so bili pomanjšani modeli dejanskega sistema. V modelu so bili tokovi in napetosti manjše od tistega v resnici. Danes se analogne modele mreže še vedno uporablja, saj po svoji strukturi zagotavljajo delovanje v realnem času, poleg tega pa tudi pomanjšani tokovi in napetosti lahko zagotavljajo za preizkušano opremo v zaprti zanki dovolj realne delovne pogoje, saj se v pravem elektroenergetskem sistemu uporablja tokovne in napetostne zaščitne transformatorje. Njihova slabost je v tem, da je potrebno imeti fizični model in veliko znanja o stvareh, ki s problemom, ki ga opazujemo niso neposredno povezane. Tudi strošek TNA je lahko zelo visok, saj morajo biti elementi kalibrirani.

Pozneje so pogosto uporabljali hibridne simulacije, kjer so fizični modeli mreže, kot je prej omenjen analogni TNA nadomeščali en del omrežja, dopolnitev k temu modelu je bila pa simulirana. Ta način se imenuje hibridna simulacija in je bolj ali manj opuščena. Pozneje se je z razvojem mikroprocesorjev in predvsem signalnih procesorjev s tehnologijo plavajoče vejice (floating point) začelo pojavljati digitalno dinamično simuliranje. Prve digitalne simulacije v realnem času so se izvajale v osemdesetih letih prejšnjega stoletja na specializiranih digitalnih simulatorjih, ki so bili narejeni posebej za ta namen. Uporabljali so jih za preizkuse opreme v zaprti zanki. Pozneje so se začela pojavljati programska orodja za superračunalnike. Z razvojem hitrejših osebnih računalnikov, predvsem pa z večjedrnimi procesorji so postale simulacije v realnem času veliko bolj izvedljive na serijsko izdelanih osebnih računalnikih in simulatorjih. Zasnova simulacije na osebnih računalnikih se v literaturi [1] običajno omenja kot COTS (Commercial Off The Shelf). Danes obstaja več programskih orodij za simuliranje v

realnem času in posledično opravljanje zaprtizančnih preizkusov, ki izvajajo izračune simulacije na osebem računalniku. Za njihovo izvedbo je običajno potrebno imeti nek poseben vmesnik, ki ojači signal, zagotavlja A/D pretvorbo in prevzame nase breme komuniciranja in prevajanja podatkov.

Odločilen pospešek razvoju tehnike, ki omogoča simulacijo v realnem času je dala potreba po treniranju vojaških pilotov in pilotov potniških letal. V taki simulaciji tečejo podatki do osebe, ki se ukvarja s simulatorjem in nazaj, zato je tudi to simulacija v zaprti zanki. Sicer se naloge pilota in systemskega operaterja elektroenergetskega sistema skoraj v celoti razlikujejo, vendar so odločitve v izrednih razmerah obeh zasnovane na preteklih izkušnjah, na priučenih reakcijah iz treninga in na razumevanju dogajanja. V preteklosti so že izvajali projekte, kjer so uporabljali simulacije v realnem času tudi za treniranje systemskih operaterjev [2].

Kot je bilo že omenjeno je ključni pogoj za izvedbo simulacije v realnem času, da je izvajanje matematičnih operacij dovolj hitro. Pri tem imamo načeloma 2 možnosti, in sicer, da bodisi izvedemo računske operacije zelo hitro ali pa uporabimo paralelno procesiranje. Prvi pristop ima slabost, da potrebujemo zelo hitre računalnike (superračunalnike), in da sistem ne more biti poljubno velik. V drugem primeru pa seveda potrebujemo še vedno hitre računalnike, vendar lahko sistem širimo z dodajanjem novih procesorskih in komunikacijskih enot. Vendar pa je treba uporabiti metode, ki paralelno procesiranje omogočajo.

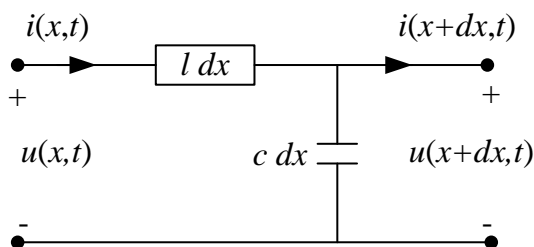
2.1. Matematična podlaga paralelnega procesiranja pri simulaciji EES

Računalniško zmogljivost paralelnega procesiranja je moč izkoristiti le, če reševanje problema na nek način porazdelimo med več procesorjev. Ključen element je t.i. homogen vod s porazdeljenimi parametri, zato si glavne ideje oglejmo nekoliko pogloblje.

Shemo infinitezimalno majhnega delčka voda in pripadajočih električnih veličin prikazuje slika 2. Za električni vod s porazdeljenimi parametri brez izgub veljata diferencialni enačbi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$



Slika 2. Diferencialni odsek brezizgubega voda

Ob vpeljavi :

$$n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{km_0 e_0}} \quad (\text{hitrost širjenja}) \quad (3)$$

$$\frac{u}{i} = \sqrt{\frac{l}{c}} = Z_0 \quad (\text{valovna impedanca}) \quad (4)$$

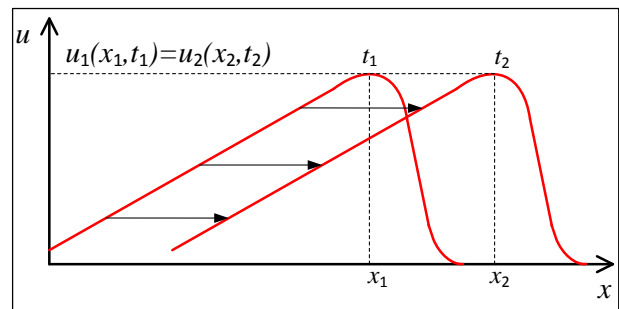
je mogoče s parcialnim odvajanjem posamezne enačbe (1) oz. (2) in s preureditvijo dobiti d'Alembertovo enačbo drugega reda. Nadalje s substitucijo spremenljivk, odvajanjem in vstavitvijo odvodov v prvotno d'Alembertovo enačbo dobimo pogoj, da mora biti mešani odvod toka oz. napetosti po novih spremenljivkah enak nič. To pomeni, da je analitična rešitev za tok oz. napetost seštevek nekih ločenih funkcij vpeljanih spremenljivk. Funkciji sta lahko poljubni, pomembno je le, da sta za enake vrednosti spremenljivk enaki. Dobimo:

$$i(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (5)$$

$$u(x, t) = Z_0 f_1(x - vt) - Z_0 f_2(x + vt) \quad (6)$$

Pri tem velja:

u	napetost
i	tok
t	čas
x	krajevna spremenljivka (lokacija),
k	faktor (permeabilnosti in dielektričnosti npr. kabel),
μ_0	permeabilnost praznega prostora,
ϵ_0	dielektričnost praznega prostora,
v	hitrost širjenja valov,
l	induktivnost na 1 km voda (L / dolžina v km),
c	kapacitivnost na 1 km voda (C / dolžina v km),
f_1, f_2	funkciji toka,
Z_0	karakteristična impedanca voda.



Slika 3. Potujoč napetostni val.

V bistvu dobimo potujoč val napetosti ali toka, pri čemer en člen predstavlja val v eno, drug člen pa val v drugo smer (v enačbah 5, 6 – t.j. "desno oz. levo").

Za posamično vozlišče (recimo A oz B) z upoštevanjem potovalnega časa voda lahko zapišemo enačbi toka in napetosti v vozliščih in dobimo:

$$i_A(t) = \frac{1}{Z_0} u_A(t) + i_B(t - t) \quad (7)$$

$$i_B(t) = \frac{1}{Z_0} u_B(t) + i_A(t - t) \quad (8)$$

Pri tem velja:

$$\tau \quad \text{čas potovanja vala}$$

Zadnji dve enačbi že vsebujeta mehanizem za razdelitev celotnega sistema na paralelne podsisteme. Vsaka od obeh enačb povezuje sedanji tok v enem vozlišču s sedanjo napetostjo v tem vozlišču in preteklo napetostjo oz. preteklim tokom v nasprotnem vozlišču voda s porazdeljenimi parametri. Zato se lahko računa pri takemvodu sistem ločeno na vsaki strani voda. Rešitev toka in napetosti na eni strani voda v nekem trenutku namreč ne vpliva na rešitev toka in napetosti na drugi strani voda v tem istem trenutku. Odvisnost med vozlišči je zajeta v delih, ki so odvisni od časa zamaknjene za potovalni čas v preteklost.

Vsak procesor lahko torej obravnava del sistema neodvisno, vendar pa mora pred naslednjim korakom izračuna dobiti podatek o razmerah na drugi strani voda v pravkar minulem časovnem koraku in nato izračunati razmere v naslednjem koraku. V realnem času se mora torej izvršiti, ne samo izračun, pač pa tudi komunikacija.

Izračune izvajajo hitri RISC procesorji, komunikacija pa poteka preko optičnih vlaken. Pri do sedaj doseženih hitrostih izračunov in komunikacije (računski korak 50 μ s) se lahko ločijo deli omrežij, ki jih povezujejo vodi 15 km (in več).

3. Računalnik za simulacijo dinamike elektroenergetskih sistemov 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 Facecard). 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 μ s (za tako imenovani »Small-time-step modeling« tudi do 1.5 μ s). 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.

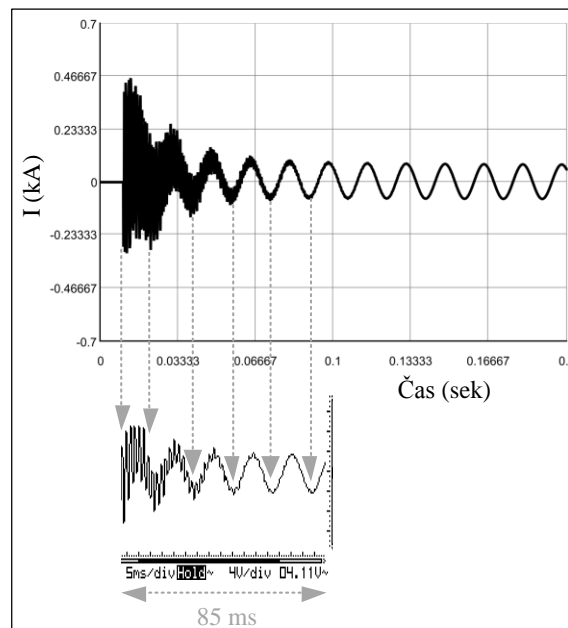
Simulator, ki ga imamo na voljo na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, vsebuje eno polico, na kateri so štiri procesorske kartice (vsaka s po dvema procesorjema) in ena kartica GTWIF. Poleg strojne opreme je sestavni del simulatorja tudi programska oprema RSCAD, prek katere je mogoče samo strojno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

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 Outputcard - GTAO) in digitalne izhodne kartice (angl. GT Digital Outputcard - GTDO) ali pa vmesnika na prednji plošči procesorske kartice GPC (slika 4a) [4]. 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 4. a) kartica GPC z vmesnikom na prednji plošči, b) ojačevalec (ojačevalnik signala)

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 5- zgoraj) kot tudi z osciloskopom prek vmesnika na prednji plošči procesorske kartice GPC (slika 5- spodaj). Kot že zapisano, je slednja v primerjavi skartico GTAO sposobna proizvesti signal s slabšim dinamičnim sledenjem dejanskemu signalu [5], kar je razvidno tudi iz primerjave obeh grafov – slika 5. 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 GTAO.



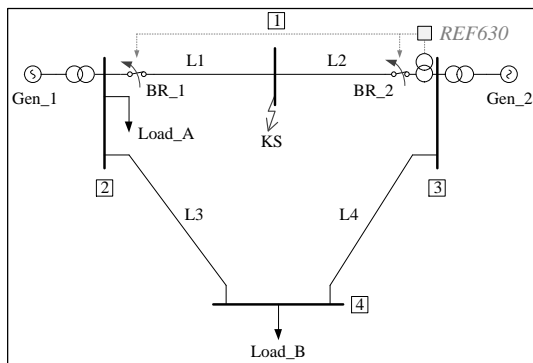
Slika 5. Časovni poteki toka faze A po vklopljenem vodu vzporedno k že obratujočemu vodu –RSCAD/RunTime (zgoraj) in ročni osciloskop (spodaj).

3.1. Simulacija v zaprti zanki z zaščitnim relejem

Kot rečeno je posebnost RTDS simulatorja 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 in digitalna vhodna kartica. Poleg teh je mogoče binarne signale v simulator uvesti tudi prek vmesniškega panela na prednji plošči simulatorja, ki je namenjen predvsem prenosu izklopnih signalov zaščitne opreme.

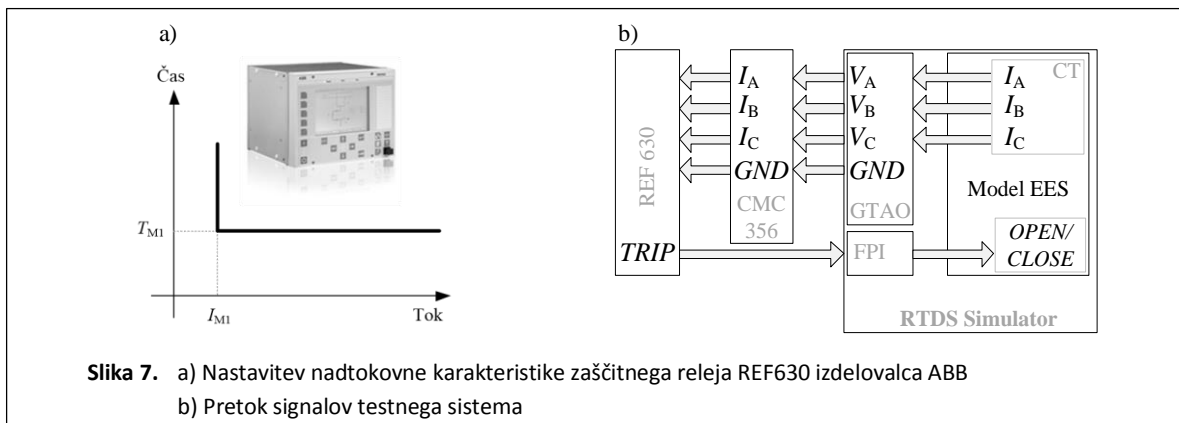
Kartica GTA0 ima razpon električnega signala na svojih sponkah v mejah ± 10 V, pri čemer pa je njena tokovna sposobnost do 25 mA. Iz tega sledi, da je pri testiranju zaščitnega nadtokovnega releja potrebna uporaba tokovnega ojačevalnika.

Za demonstracijo smo uporabili EES je sestavljen iz dveh sinhronskih generatorjev, ki prek štirih daljnovodov 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.



Slika 6. Model testnega EES.

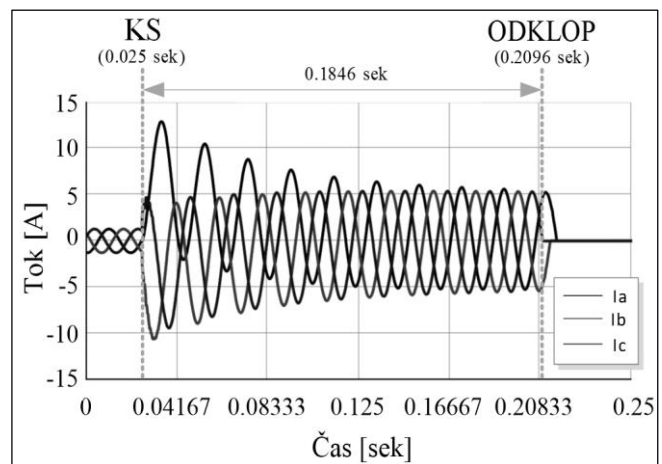
V nekem trenutku, ki ga interno sprožimo prek modula RSCAD/RunTime, pride na zbiralki 1 do tripolnega kratkega stika. Rele, ki ima najenostavnejšo tokovno neodvisno izklopno karakteristiko (slika 7a) prejme signal kratkostičnega toka in po nastavljenem času odda izklopni signal. Ta signal se uvede nazaj v računalnik in stikali BR_1 in BR_2 v modelu se ob prehodu toka skozi nič (simulacija obloka) izklopita. Shema pretoka signalov je ponazorjena na sliki 7b.



Slika 7. a) Nastavitev nadtokovne karakteristike zaščitnega releja REF630 izdelovalca ABB
b) Pretok signalov testnega sistema

Kot že rečeno ima kartica GTA0 razpon električnega signala na svojih sponkah v mejah ± 10 V. Ta signal je potrebno prilagoditi nivoju vhodnega signala naprave. V konkretnem primeru gre za nadtokovni rele, torej je vhodni signal tokovni, reda nekaj amperov. Tukaj trčimo na problem prilagoditve signala z ojačevalnikom. Moč je sicer uporabiti standardni generator signalov za testiranje zaščitnih relejev (npr. Omicron CMC 356), ki ga ustrezno krmilimo [7], vendar se moramo ob tem zavedati, da pride do zakasnitve signala reda 100 ms. Za relativno počasne pojave je to še sprejemljivo, za analizo hitrih pojavov in testiranje krmilnikov močnostne elektronike pa nikakor ne. Za verno ponazoritev hitrih pojavov nujno potrebujemo ustrezen ojačevalnik, katerega zakasnitev se nahaja v področju reda μ s, torej je reda 1000 x hitrejši. Ob tem ne smemo pozabiti, da vsak 3-fazni signal zahteva 3 vhode in 3 izhode. V primeru npr. distančnega releja to pomeni 3 tokovne in 3 napetostne izhode (in ravno toliko vhodov) ojačevalnika.

Rezultat simulacije kratkega stika in krmiljenja izklopa z dejansko napravo prikazuje slika 8.



Slika 8. Časovni potek tokov na sekundarju tokovnika.

4. Sklep

Cilj predstavljenega dela je predvsem ilustrirati pomen simulacije EES in demonstrirati uporabnost nove velike pridobitve laboratorijev LPEE in LEON na Katedri za elektroenergetske sisteme in naprave, Fakultete za elektrotehniko, UL, t.j. simulatorja za digitalno simulacijo elektroenergetskega sistema v realnem času RTDS. Slednje smo

izvedli na primeru preizkušanja opreme, preden bi jo vključili v dejanski elektroenergetski sistem. Tak simulator je v svetu nepogrešljivo orodje pri analizi obnašanja krmilne opreme (na primer regulacija pretvornikov HVDC) preden jo vgradijo v EES. 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 [8].

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 tiristorski pretvorniki in naprave FACTS) ta korak znižati tudi do 1.5 μ s. Ker lahko vsak procesor obdeluje le določeno število elementov, se uporabi Dommelova metoda modeliranja homogenih vodov [9] in na ta način sistem porazdeli na območja, ki jih lahko v okviru enega integracijskega koraka obravnavamo neodvisno od ostalega sistema, če imamo na razpolago podatke na zunanjih mejah omenjenega območja iz preteklosti (zakasnitev za potovalni čas svetlobe vzdolž povezav tega območja z ostalim sistemom).

Kot praktični primer uporabe 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 bližje 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 hitrega ojačevalnika tokovnih in napetostnih signalov, kar lahko predstavlja nezanemarljiv problem.

Zahvala

To delo je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v sklopu programske skupine Elektroenergetski sistemi, P2-356. Hvala!

Literatura

1. J. Bélanger, P. Venne, J.N. Paquin, The What, Where and Why of Real-Time Simulation, publikacija podjetja Opal-RT dostopna na spletnem naslovu : http://www.opal-rt.com/sites/default/files/technical_papers/PES-GM-Tutorial_04%20-%20Real%20Time%20Simulation.pdf
2. U. Spaniel, M. Kreutz, C Roggatz ; Simulator based operator training-ensuring the quality of power system operation; IEEE Power System Management and Control, 2002. Fifth International Conference on (Conf. Publ. No. 488)
3. RTDS Technologies, Real time digital simulation for the power industry - manual set, RSCAD version 2.024.2.
4. RTDS Technologies, <http://www.rtds.com/index/index.html>.
5. 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.
6. OMICRON, CMC356 Technicaldata, 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
8. 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.
9. 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.