Modely synchronních generátorů a transformátorů pro Šimulátor ochran a protihavarijních automatik RTDS

Příspěvek popisuje tvorbu dynamických modelů elektrických strojů a transformátorů vhodných pro realizaci číslicového simulátoru ochran – Real Time Digital Simulator (RTDS), který je určen pro ověřování nových digitálních ochran a automatik pro elektroenergetické soustavy. Simulátor RTDS má mnoho výhod proti tradičním metodám testování činnosti ochran a analýz vlivu různých kyvů v soustavě na ochranná zařízení.Zahrnutí dynamiky strojů (setrvačnost generátorů, budící systémy, řízení turbín) v přechodových dějích je kritické pro správné chování ochran při mimořádných podmínkách, při spouštěcích a nápravných opatřeních, a jiných stresových podmínkách.

1. Úvod

Úzce spolupracující provozovatelé sousedních přenosových soustav ČEPS a.s. a SEPS a.s. se musí v blízké budoucnosti lépe připravit na stále častěji vznikající kritické stavy v elektrizační soustavě. Součástí přípravy je modelování a simulace ES a jejích prvků [1]. Potřebné dynamické modely (generátorů, systémů buzení, regulátorů) se mohou sestavit v různých simulačních programech.

Jednou z možností jak lépe analyzovat a řídit ES je sofistikovaněji využít možnosti poskytované moderními digitálními ochranami, ať již použitých jako ochrana lokální nebo jako ochrany jež jsou součástí topologicky rozsáhlejších tzv. "protikolapsových automatik". Další možnosti skýtá i propojení digitálních ochran, jednotek PMU (Phasor Measurement Unit) a aplikačních serverů PDC pro sběr synchronních dat přímo s dispečerským řídícím systémem SCADA/HMI. Digitální zpracování měřených dat a řešení aplikačních algoritmů, například v rámci distančních ochran, má velmi blízko k jednotkám měření synchronních fázorů PMU a jejich aplikačnímu využití, například v rámci systémů Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC). Jedním z technických prostředků pro výzkum a vývoj naznačených aplikací je právě Real Time Digital Simulator - RTDS [2].

Obecně lze modelovat synchronní generátor; základní prvek soustavy ES; několika způsoby. První možný přístup využívá přesný 3-fázový model generátoru s výpočtem fázových okamžitých hodnot napětí a proudů. V tomto modelu synchronního generátoru nejsou zanedbána tzv. "transformační napětí" indukovaná časovou zněnou proudů ve statorových obvodech. Pro modelování a simulační výpočet byl použit komerčně dostupný simulační jazyk MATLAB-SIMULINK a jeho Toolbox SimPowerSystem.

Druhý možný přístup naopak tato transformační napětí zanedbává a uvažuje jen tzv. "rotační napětí v napěťových rovnicích statoru, která jsou indukovaná pohybem magnetických polí. U tohoto modelu probíhá výpočet ve fázorových složkách (sousledné, zpětné a netočivé) a pouze v efektivních hodnotách.

Pro účely modelování ES nebo její části v rámci realizace RTDS je nutné popsat prvky ES prvním obecnějším způsobem s uvažováním téměř všech nelinearit. Další důvody volby tohoto modelu jsou systematičtěji uvedeny v literatuře [10].

2. Modely synchronních generátorů (SG)

Při vývoji modelu elektrizační soustavy jsou obvykle zavedeny určité zjednodušující předpoklady: neuvažujeme velmi rychlé "elektromagnetické" přechodné děje v soustavě, například přechodnou složku zkratových proudů, vyšší harmonické aj.; frekvence sítě, jakož i frekvence generátorů se liší od 50 Hz jen velmi nepatrně; zanedbáváme vlivy sycení, tj. nelinearit u indukčností; zanedbáváme vliv síťových indukčností, tj. mimo modelované bloky.

Nejdůležitějším modelovaným prvkem elektrizační soustavy je generátor. Přechodné děje v jeho obvodech totiž velkou měrou přispívají k dynamickým jevům v elektrizační soustavě na napěťových hladinách vn a vvn.

Pro účely modelování uvažujme úplný matematický model synchronního stroje se třemi statorovými vinutími, jedním budícím vinutím a dvěma tlumícími vinutími.

Okamžitá hodnota napětí v kterémkoli vinutí je obecně

$$u = \pm \sum ri \pm \sum \frac{d\Psi}{dt} \tag{1}$$

kde ψ je spřažený magnetický tok, *r* odpor vinutí a *i* proud ve vinutí.

Podstatné zjednodušení matematického modelu přináší Parkova transformace. Její výhoda spočívá zejména v tom, že elektrické parametry obvodu (zejména vzájemné indukčnosti) nejsou po transformaci funkcí času.

Parkovu transformaci pro složky abc
ightarrow heta dq definujeme transformační maticí:

$$[\mathbf{P}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix}$$
(2)

Provedeme transformaci napěťových rovnic ve složkách abc

$$\begin{bmatrix} u_{abc} \\ u_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{abc} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{FDQ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{abc} \\ \dot{\Psi}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Nabc} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(3)

kde *u_{Nabc}* představuje úbytek napětí na uzemnění uzlu.

Po transformaci vzniká tato soustava rovnic

.

$$\begin{bmatrix} u_{0dq} \\ u_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{0dq} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{FDQ} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{0dq} \\ \dot{\Psi}_{FDQ} \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{\dot{P}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \Psi_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{N0dq} \\ 0 \end{bmatrix}$$
(4)

V symetrické soustavě (resp. při symetrických poruchách) můžeme nulovou netočivou složku vynechat a tím snížíme řád matice o 1.

Napěťové rovnice musíme dále doplnit o dvě pohybové rovnice.

2.1 Modelovaní synchrónneho generátora **v MATLAB-SIMULINK**

Elektromagnetické přechodné jevy jsou spojovány se změnami či poruchami v systému a projevují se především v synchronních generátorech prudkými změnami generovaných proudů a momentů. Doba těchto jevů je velmi krátká (jedná se typicky o milisekundy) avšak velký moment setrvačnosti rotujících hmot (turbína, rotor) nedovolí žádnou významnou změnu jejich rychlosti, kterou proto během elektromagnetických přechodných jevů většinou pokládáme za konstantní. To ovšem nemusí nutně platit vždy a v případě potřeby lze elektromagnetické jevy za předpokladu rozšíření napěťových rovnic modelovat prakticky stejným způsobem jako jevy elektromechanické. Komplexní Parkova transformace může popisovat jevy jak elektromagnetické tak i elektromechanické, což je vidět z rozšířené rovnice statoru v obecném tvaru

$$u = \pm \sum ri \pm \sum \frac{dE}{dt} \pm \sum xi \pm \sum X \frac{di}{dt}$$
(5)

Dále budeme tedy popisovat tzv. děje elektromechanické, jejichž časové konstanty mohou být až o 4 řády vyšší než u jevů elektromagnetických.

Parkov trojfázový model

Parkův stavový model SG [4] získáme tedy syntézou 6 elektrických a 2 mechanických rovnic, čímž obdržíme následující soustavu 7.řádu



Výsledkem je nelineární stavový model v obecném tvaru

 $\dot{x} = f(x, u, t)$

přičemž stavové proměnné jsou i_d , i_q , i_D , i_Q , i_F , ω , δ a vstupní veličiny jsou u_d , u_q , u_D , u_Q , u_F , M_m (v prezentovaném případě vývoje modelu SG pro dispečérske tréningové simulátory je další veličinou ještě měnící se frekvence sítě).

Z Parkovy transformace vyplývají následující vztahy

$$\hat{U} = U_q + j \cdot U_d$$

$$\hat{I} = I_q + j \cdot I_d$$
(7)

A proto můžeme psát

 $E_{aa} = \hat{U} + (r + j\omega \cdot L_a) \cdot \hat{I}$ (8)

Uvedené rovnice jsou patrné z fázorového diagramu na obr. 1.

Parkův model SG v modifikaci podle literatury [5] byl s ohledem na specifické požadavky trenažéru vyvinut autory příspěvku individuálně v prostředcích SIMULINK.

2.2 Zjednodušené modely synchronních strojů

Ve složitějších soustavách, které obsahují mnoho alternátorů klade úplný model stroje vysoké nároky nejen na výpočetní techniku, ale i na získávání potřebných údajů o parametrech modelů. Možností řešení je zjednodušení modelů těch alternátorů, které jsou v celkovém modelu ES méně významné, avšak jejich dynamiku je třeba respektovat.



Obr.1 Fázorový diagram alternátoru

Prvním z řady těchto modelů je E" – model [4], který respektuje tlumící obvody a tedy i subtranzientní přechodné děje, nicméně uvažuje děje v tlumících vinutích symetrické. Platí tedy

 $x_d = x_a = x$

Stavové proměnné jsou v tomto modelu napětí v osách d a qe' – elektromotorické přechodné e" – elektromotorické rázové.

Rovnice rotoru vycházejí z Parkovy transformace a mají tvar

$$T_{d0}^{'} \cdot \dot{e_q} = e_{FD} + (x_d - x_d^{'}) \cdot i_d - \dot{e_q}$$

$$T_{q0}^{'} \cdot \dot{e_d} = -(x_q - x_q^{'}) \cdot i_d - \dot{e_d}$$

$$T_{d0}^{''} \cdot \ddot{e_q}^{''} = (x_d^{'} - x_d^{''}) \cdot i_d + \dot{e_q} - \ddot{e_q}^{''}$$

$$T_{q0}^{''} \cdot \ddot{e_d}^{''} = -(x_q^{'} - x_d^{''}) \cdot i_q + \dot{e_d} - \ddot{e_d}^{''}$$
(9)

Pro zkompletování modelu doplníme rovnice (9) ještě o 2 pohybové rovnice, čímž získáme soustavu 5.řádu.

Tyto rovnice dávají velmi spolehlivé výsledky.

Jiným zjednodušeným modelem je E'q - model, který zanedbává tlumící obvody zcela. Rovnice rotoru synchronního stroje je za těchto předpokladů popsán rovnicemi (10).

$$T_{d0}^{'} \cdot \dot{e}_{q}^{'} = e_{FD} + (x_{d} - x_{d}^{'}) \cdot i_{d} - e_{q}^{'}$$

$$T_{q0}^{'} \cdot \dot{e}_{d}^{'} = -(x_{q} - x_{q}^{'}) \cdot i_{d} - e_{d}^{'}$$
(10)

Po přiřazení 2 pohybových rovnic získáme obdobně jako v předchozím případě úplnou soustavu rovnic 3. řádu.

Tento model je známý v původních zemích Evropské unie E15 jako model "Behn-Eschenburg", podle Dr. Hans Behn-Eschenburga (1864-1938) – technického ředitele společnosti Oerlikon z Luzernu. Model je vhodný spíše pro střednědobou dynamiku, protože nedostatečně vystihuje průběhy sledovaných veličin např. bezprostředně po zkratu, je však vhodný pro zjišťování dynamické stability.

2.3 Parametry synchronních strojů

Synchronní stroj je popsán následujícími parametry, z nichž základní uvedené v tab. 1 se dají určit ze štítkových údajů jednotlivých strojů. Podle způsobu měření se většinou udává reaktance syceného stroje (x_{qs}) , někdy však i reaktance nenasyceného stroje (x_{qn}) podle účelu pro který mají parametry sloužit.

- *x_d* podélná reaktance
- $\dot{x_d}$ podélná reaktance přechodná
- $x^{"}_{d}$ podélná reaktance rázová
- x₂ zpětná reaktance
- x₀ netočivá reaktance $x_{d\sigma}, x_{q\sigma}, x_{f\sigma}$ rozptylová reaktance v ose d (resp. q a budícího vinutí)

x_q příčná reaktance

 $\dot{x_{q}}$ příčná reaktance přechodná

x_{"q} příčná reaktance rázová

r25 odpor statorového vinutí při 25°C

- odpor rotorového vinutí při 25°C r_F
- T_{d0} podélná reaktance
- mechanická časová konstanta T_m
- T''_d rázová časová konstanta v ose d
- T''_q rázová časová konstanta v ose q

V tab. 1 shrnuje parametry pro vybrané typy synchronních strojů provozované v České elektrizační soustavě používané pro modelování v různých projektech.

Parametr	235 MVA (EPOČ)	137.5 MVA (ELE 1)	62.5 MVA (EPO)	588 MVA (EMĚ 3)
$egin{array}{c} x_{ds} \ x_{dn} \end{array}$	1.65	2.18	2.23	2.44 2.66
$egin{array}{c} x_{qs} \ x_{qn} \end{array}$	1.59	2.06	2.10	_ 2.41
x_{ds} , x_{dn} ,	0.23	0.25	0.25	0.276 0.325
x_{qs} x_{qn}	0.38	0.42	0.42	
x_{ds} x_{dn}	0.17	0.15	0.15	0.226 0.266
x_{qs} " x_{qs} "	0.18	0.16	0.16	(0.286)
T_{ds} (s) T_{dn} (s)	0.83	0.70	0.85	1.10 0.85
T_{qs} (s) T_{qn} (s)	0.42	0.35	0.42	-
T_{ds} " (s) T_{dn} " (s)	0.03	0.025	0.02	0.038 0.022
$T_{qs}^{"}(s)$ $T_{qs}^{"}(s)$	0.02	0.015	0.013	-

Tab.1 Základní parametry vybraných typových generátorů (s hladkým rotorem)

2.4 Stručný popis využití modelu SG

Odladěný a provozně využívaný model SG v modelu elektrárenských rozvoden je realizován v prostředcích MATLAB-SIMULINK - viz [1]. Model SG musel být proti klasickým modelům na bázi Parkova modelu upraven s ohledem na neplatnost obvyklého předpokladu, že frekvence sítě i generátorů se liší od 50 Hz jen velmi nepatrně. Pro modelování "ostrovních provozů" může mít odchylka velikost až cca 3 Hz.

Tyto modely synchronních generátorů jsou modelované pomocí Parkova trojfázového modelu, který je numericky počítaný programem MATLAB-SIMULINK s použitím metody (Runge-Kutta) s krokem simulace 0,001 sec. Hlavní schéma modelu SG v programu SIMULINK je zobrazeno na obr. 2.

Pro modelování třífázového SG byla použita teorie obecného elektrického stroje v poměrných veličinách. Model je realizován blokem ...syno" v obr. 2.

Konkrétně pro stator transformace α , β , 0, kde rychlost otáčení vztažných souřadnic je nulová, takže umožňuje modelovat nesymetrii napětí, proudů i impedancí ve vnější síti.

Pro rotor je užito transformace d, q, 0, kde se vztažné souřadnice otáčejí s rotorem.

Pro převod z jedné soustavy do druhé a nazpět pak slouží Parkovy transformační vztahy realizované blokem "abcab0" v obr. 2. Transformační vztahy respektují okamžitou polohu rotoru vůči statoru. Tímto způsobem je vyloučena nutnost použití časově proměnných vazebních koeficientů v diferenciálních rovnicích.

Na obr. 3 je uveden blok simulující omezení P-Q diagramu, ve kterém jsou indikační výstupy HMP (horní mez činného výkonu), OMU (mez podbuzení), OSP (omezovač statorového proudu) a ORP (omezovač rotorového proudu).



Obr.2 Hlavní model SG v SIMULINK



Obr.3 Blok buzení s omezením P-Q diagramu



Obr.4 Originální diagramy P-Q firmy "ŠKODA Elektrické stroje" emulované v InTouch

Na obr. 4 je ukázka emulace originálních snímků P-Q diagramů budících systémů turbogenerátorů 6 x 57 MVA modelované elektrárny, dodaných společností ŠKODA Plzeň. Jedná se o emulaci v řídícím a vizualizačním systému InTouch firmy Wonderware a to formou zcela přesné repliky. Na P-Q diagramech jsou vidět výše uvedené meze OMU, HMP, OSP a ORP.

2.5 Jednoduchý model SG v Simulink

Pro různé požadavky na vlastnosti modelů synchronních generátorů jsou dostačující v různé míře zjednodušené verze. Parkův model (obecně 7.řádu) může být zjednodušen snížením na 5.řád výše uvedeným způsobem, jestliže indukované elektromotorické statorové napětí je zanedbáno. Model 3.řádu je vyhovující pro případ, kdy není nutné uvažovat vliv tlumení vinutí.



Obr.5 SIMULINK model synchronního generátoru 3.řádu

TEÓRIA A PRAX

Zjednodušený model 3.řádu z obr. 5 byl vyvinut jako jeden makroblok SIMULINK se stejnými vstupními a výstupními veličinami jako komplexní model SG podle Parka. Vzhledem k tomu mohou být různé modely SG modulově vyměnovány. I když detailní řešení není zřetelné, je na obr. 5 uveden makroblok SIMULINK a to pro ilustraci zmíněné jednotné blokové a vstupně-výstupní struktury.

2.6 Simulační výsledky

Obr. 6, 7 a 8 ukazují některé typy zkratů na generátoru.





Obr.7 Jednofázový trvalý zkrat,

resp. zemní spojení na svorkách generátoru



Obr.8 Třífázový zkrat v délce 10 ms na svorkách generátoru

3. Modely transformátorů

Matematicko-fyzikální popis transformátorů daný soustavou nelineárních diferenciálních rovnic; uvedených například v literatuře [4], [6] nebo [14]; se odvozuje stejným způsobem jako u všech elektrických strojů, tedy i u matematicko-fyzikálního popisu a v kap. 2 uvedeném modelování synchronních generátorů.

3.1 Modely v prostředcích SIMULINK

V příspěvku jsou na obrázcích 9, 10, 11 a 12 uvedena blokově orientovaná schémata z kterých vyplývá rozdíl při modelování bez a s uvažováním nelineární charakteristiky magnetického sycení.

Z uvedených schémat v jazyku SIMULINK je zřejmá bloková struktura modelů transformátorů a na základě simulačních výsledků lze konstatovat, že prostředí MATLAB a jeho toolboxy (SIMULINK, SimPower-System) jsou vyhovující pro modelování jak elektromechanických tak i elektromagnetických přechodových jevů – viz další typové ilustrativní časové průběhy veličin na obrázcích 13, 14 a 15. Na těchto časových



U(E) U

Obr.9 Trojfázový třívinuťový transformátor



Obr.10 Podmodely "Lock-Up Table": ABan_unit, BCbn_unit, CAcn_unit



ABan_unit, BCbn_unit, CAcn_unit



Obr.12 Podmodely "Linear": ABan unit, BCbn unit, CAcn unit

průbězích je evidentní výskyt vyšších harmonických, o jejichž využití v ochranách bude zmínka v následující podkapitole 3.2.

3.2 Aplikace modelování při návrhu a testování ochran

Ochrany transformátorů jsou ovlivňovány vyššími harmonickými, které se za určitých provozních podmínek a stavů v hodnotách veličin vysky-







Obr.14 Simulované průběhy proudů a zemního napětí



Obr.15 Simulované průběhy veličin na osciloskopu SIMULINK

tují, a lze je využít i pro zlepšení funkčností elektrických číslicových ochran.

Při modelování a využívání RTDS pro testování ochran je nutné modelovat realisticky transformátor s možností simulace následujících jevů:

- a) Transformátor s nárazovými proudy bohatými na harmonické složky, vyskytující se 2.harmonická se používá pro blokování ochran proti nárazu [3], [11], [12]. Možné variability řešení dokládá literatura [9], kde ve schématu blokování proti nárazu je uvedena kromě 2.harmonické i 5.harmonická.
- b) Přebuzení transformátoru s nelineárními magnetickými vlastnostmi, které generuje vyšší harmonické (3., 5., 7.harmonickou). Pro blokování ochran proti přebuzení se používá 3.harmonická [3], resp. 5.harmonická [11], [12]?

V literatuře [11] je uvedeno, že pro blokování lze použít kombinaci 2. a 5.harmonické. Jiná situace je však při "internal fault" – vnitřním zkratu, kdy vzniká v sekundárním vinutí 3.harmonická, která ale nemůže být použita pro blokování.

c) Přesycení proudových transformátorů, přičemž proudy v sekundárních vinutích PTP obsahují značné množství harmonických. Převládá při něm 3.harmonická – viz [3], resp. 2.harmonická ? – viz výsledky konkrétních zkoušek zapínání transformátorů a jejich rozklad Fourierovou analýzou [12].

Je tedy zřejmé, že na rozdíl od literatury [11], [12], je trochu odlišný popis provozních stavů a zahrnutí vyšších harmonických do algoritmů ochran uveden v literatuře [3]. Tam je řečeno, že nárazový magnetizační proud obsahuje výraznou 3.harmonickou, která vzniká díky nelinearitě magnetizační charakteristiky. V třífázovém systému vyvolá 3.harmonickou netočivá složka trojnásobné frekvence, která pokud se nemůže uzavřít přes neuzemněnou nulu – střed hvězdy, způsobí otáčení nulového bodu právě touto trojnásobnou frekvencí (Pozn: uzavřená nula nebo spojení do trojúhelníka tento problém vyřeší pouze částečně).

Další harmonickou v nárazových magnetizačních proudech je 2.harmonická, vznikající hlavně na začátku přechodného děje. Zjednodušeně lze říci, že při připojení transformátoru je v každé fázi jiná stejnosměrná složka, takže jde o fázovou nesouměrnost při níž zpětná složka, otáčející se proti sousledné složce dvojnásobnou frekvencí, vyvolá právě 2.harmonickou [13].

Uvedené variability řešení ochran jsou dány případ od případu konkrétním zařízením a soustavou, ale ani obecně nejsou všechny případy a možnosti systémově zpracovány a generalizovány. Proto je potřebné na základě provozních měření a simulačních výsledků ověřit širší možnosti řešení.

Například, transformátor ve stavu naprázdno můžeme popsat diferenciální rovnicí podle literatury [7]:

$$u = U_{\max}\sin(\omega t + \alpha) = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt}$$
(11)

kde R_1 je činný odpor primárního vinutí,

 L_1 – celková indukčnost primárního vinutí, t. j.

$$L_{\rm l} = L_{\rm \sigma l} + L_{\rm \mu} \tag{12}$$

pričemž $L_{\mu} = f(I_0)$, t. j. L_{μ} je funkcí magnetizačního proudu $I_{\mu} \cong I_0$. Tuto závislost lze určit z měření naprázdno tak, že pro každou naměřenou hodnotu napětí U a příslušného proudu I_0 vypočítáme reaktanci, resp. indukčnost

$$X_{\mu} = \frac{U_0}{I_0}$$
 resp. $L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f}$ (13)

Vypočtené hodnoty zpracujeme tabulkově nebo graficky (obr. 16). Odpor reprezentující ztráty v železe R_{Fe} zanedbáme. Na obr.16 je vidět souvislost závislosti $L_{\mu} = f(I_0)$ se závislostí $U_0 = f(I_0)$, která vyplývá z charakteristiky naměřené ve stavu naprázdno $I_0 = f(U_0)$, a je překreslená do souřadnic $U_0 = f(I_0)$.

Nejnepříznivější stav nastane, pokud připojení na síť se uskuteční v okamžiku nulového napětí, tzn. když časová změna napětí je největší. Podle vztahu (11) je ustálená složka proudu



Obr.16

a) charakteristika $U = f(I_0)$ ve stavu naprázdno s aproximací do nulové hodnoty proudu a napětí, b) závislost magnetizační indukčnosti od proudu naprázdno $L_{\mu} = f(I_0)$ vypočítaná z charakteristiky a), c) aproximační křivka magnetizační indukčnosti pro účely simulace

$$\dot{i} = \frac{U_{\text{max}}}{\omega L_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I_{\text{max}} \cos \omega t$$
(14)

a přechodná složka proudu

$$i'' = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} \sin \frac{\pi}{2} e^{-\frac{0}{L_1}t} = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} = I_{\max}$$
 (15)

má konstantní hodnotu rovnou maximální hodnotě ustáleného proudu x', protože neuvažujeme odpor, tedy tlumení je nulové. Na obr. 17 je znázorněný oscilografický průběh se silně vyvinutou jednosměrnou složkou [7], [8].



Obr.17 Priebeh prúdu naprázdno – oscilografický záznam

Uvedeme nyní typové průběhy nárazového magnetizačního proudu při zapnutí transformátoru naprázdno [14]. V prvním případě na Obr.18 je průběh připojení v okamžiku kdy napětí fáze a prochází nulou a to pro model bez uvažování hystereze.



Obr.18 Simulovaný průběh nárazového magnetizačního proudu při připojení v okamžiku kdy fáze a prochází nulou



Obr.19 Simulovaný průběh pouze prvních dvou amplitud nárazového magnetizačního proudu při připojení v okamžiku kdy fáze a prochází nulou a při maximální počáteční remanenci

V druhém případě na Obr.19 je také průběh připojení v okamžiku kdy napětí fáze a prochází nulou ale pro model s uvažováním hystereze.

Na popsané nárazové proudy musí být pochopitelně nastavena rozdílová ochrana RO transformátoru. Nabíjecí proud může mít hodnoty dvojnásobku jmenovitého proudu I_n pričemž nastavení ochrany je více než 0,3 I_n , protože v trojfázových transformátorech se vyvíjí 2.harmonická v každé fázi rozdílně. Abychom zabránili nežádoucímu vypnutí transformátoru je po dobu zapínání transformátoru na 1 sec rozdílová

Praktický důvod pro zkoumání a modelování uvedených dějů je skutečnost, že při zapínání transformátoru (i při dálkovém zapínání z centrálního dispečinku) může 2.harmonická prostřednictvím ochrany nežádoucím způsobem odepnout transformátor – viz odst. a).

ochrana blokovaná a nadproudová ochrana je v této době nastavená

4. Modelování a verifikace

Pro účely testování ochran a automatik, je důležité aby přilehlé úseky byly modelované co nejpřesněji, ale ostatní části soustavy mohou být modelované jako ekvivalentní modely. Abychom dostali akceptovatelný dynamický model je potřebné identifikovat a získat ostatní systémové údaje, především údaje o generátorech, které jsou zapojené blízko modelované oblasti.

První krok procesu verifikace představuje redukci plnorozsahového modelu vhodného pro plné testování dynamické stability na malou verzi modelu, která bude reprezentovat stejnou konfiguraci chráněného systému jako tradičně používaný model pro testování ochranných relé. Takový model detailně ověří ochrany vedení a vliv jevů (zkratů, vypnutí, atp.) se vzdálenými generátory nahrazenými pouze statickým zdrojem napětí. Tímto způsobem bude potvrzena správnost testování ochran tradičními způsoby, ale zároveň ukáže možnosti lepšího testování ochran a systémových ochranných automatik při použití digitálního simulátoru RTDS.

5. Závěr

na 2,5 In.

Předpokládané výsledky a efekty RTDS lze shrnout do následujících bodů:

- Spolupráce expertů na ochrany a expertů na dynamickou stabilitu s využíváním RTDS přináší významné zlepšení výsledků.
- Lepší pochopení jevů dynamické stability může pomoci pečlivěji studovat tyto jevy.
- Testovaní ochran může pomoci zlepšit nastavení ochran a návrh takovýchto ochran v České a Slovenské přenosové soustavě.

Každý simulační program má svoje specifická omezení. V tomto příspěvku bylo cílem v krátkosti ukázat možnosti programu MATLAB-SIMULINK-SimPowerSystem. Pomocí tohoto programu byly vytvořené modely SG a transformátorů. V příspěvku je ukázáno, že takové modely jsou využitelné i pro realizaci RTDS.

Literatura

[1] NEUMAN, P.: Dynamické modely vhodné pro simulaci elektrizační soustavy ve stavech blízkých kritickým pro analýzu i trénink dispečerů. Sborník odborného semináře Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, 12.ročník PODĚBRADY 2007.

[2] PLUMPTRE F. and S. BRETTSCHNEIDER: Validation of Out-of-Step Protection With a Real Time Digital Simulator – RTDS.

[3] JANÍČEK F., CHLADNÝ V., BELÁŇ V., ELESCHOVÁ Ž.: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. STU v Bratislavě, 2004.

[4] ARRILLAGA J. and C.P. ARNOLD: Computer Analysis of Power Systems. John Wiley & Sons, Chichester, 1994.

[5] HORA O., S. NAVRÁTIL, a kol.: Regulace elektrických strojů. SNTL Praha, 1976. [6] KUBÍN P., KYNCL J., BRETTSCHNEIDER Z.: Nonlinear time domain transformer model assessment. 4th International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007, Stará Lesná, Slovak Republic.

[7] HRABOVCOVÁ, V.; RAFAJDUS, P.; HUDÁK, P.; FRANKO, M.: Meranie a modelovanie elektrických strojov, EDIS – Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 80-8070-229-2, Žilina, 2004.

[8] BAŠTA J., CHLÁDEK J., MAYER I.: Teorie elektrických strojů. SNTL Praha, 1968.

[9] MEKIC F., et al: Power Transformer Characteristics and Their Effect on Protective Relays. 33rd Western Protective Relay Conference, October 17-19, 2006.

[10] MAYER D.: Elektrodynamika v energetice. BEN, Praha 2005.

[11] PHADKE A.G. and J.S. THORP: Computer Relaying for Power Systems. John Wiley & Sons, New York, 1994.

[12] HAŇKA L.: Rozbory vybraných poruch v energetické soustavě v uplynulém období. Seminář pro pracovníky v oboru ochran – středisko SOLA FIDE, Janské Lázně, 2007.

[13] MÜHLBACHER J., NOHÁČ K.: Vliv sycení magnetického obvodu třífázového transformátoru na nárazové magnetizační proudy bez uvažování hystereze. Energetika, ročník 54, č. 10, 2004.

[14] MÜHLBACHER J.: Vliv sycení magnetického obvodu třífázového transformátoru na nárazové magnetizační proudy s uvažováním hystereze. Energetika, ročník 54, č. 12, 2004.

Ing. Petr Neuman, CSc.

ČEPS, a.s., Praha, ČR e-mail: neuman@ceps.cz

Ing. Rastislav Šmidovič

SEPS, a.s., Žilina, SR e-mail: Smidovic_Rastislav@sepsas.sk

