

MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ PRO DISPEČERSKÉ TRENAŽÉRY

Petr Neuman
ČEPS, a.s., Praha

Abstrakt

Základním předpokladem při vývoji dynamických modelů pro dispečerské tréninkové simulátory (DTS) je výpočetní simulace v „reálném čase“. Druhým důležitým požadavkem je naopak „dostatečná“ přesnost ustálených a přechodových dějů. Vzhledem k tomu je při modelování a simulaci potřebná „inženýrská intuice“ a zkušenosti. Pro ilustraci je uvedeno několik příkladů realizace submodelů synchronních generátorů pro jednotlivé typy dispečerských trenažérů.

1 Úvod

Prvním požadavkem při vývoji všech dynamických modelů pro použití v dispečerských tréninkových simulátorech (DTS) je výpočet simulace všech jevů v „reálném čase“ (což je hlavní rozdíl od tzv. síťových simulátorů), někdy je dokonce požadována i možnost realizace režimu FAST/SLOW vyžadujícího výpočet simulací i časově rychlejší než je „reálný čas“. Druhým nejdůležitějším požadavkem na dynamické modely je naopak dosažení „požadované přesnosti“ simulačních ustálených a zejména přechodových dějů. Většinou je „přesnost“ definována jako rozdíl mezi reálným průběhem určitého přechodového děje (naměřeným v provozu na technologickém zařízení pro které je trenažér vyvíjen) a simulovaným průběhem téhož děje. Obvykle je pro vybrané hlavní veličiny požadována přesnost, resp. odchylka 2 až 5 % ve všech časových okamžicích při současném požadavku na vždy správný „trend“, u vedlejších veličin je požadovaná přesnost menší, např. odchylka 10 % za stejných podmínek. Všem čtenářům je zřejmé, že tyto požadavky jdou proti sobě, protože požadavek „vyšší přesnosti“ vyžaduje přesnější matematicko-fyzikální popis modelovaných dějů s použitím zákonů zachování hmotnosti, energie a momentu, tzv. metod „first – principle“. Lze tedy říci, že disciplína modelování a simulace vyžaduje nejen matematicko-fyzikální znalosti a znalosti numerické, ale zejména je potřebná „inženýrská intuice“ a zkušenosti.

2 Modely synchronních generátorů SG

2.1 Model SG v toolboxu SimPowerSystem

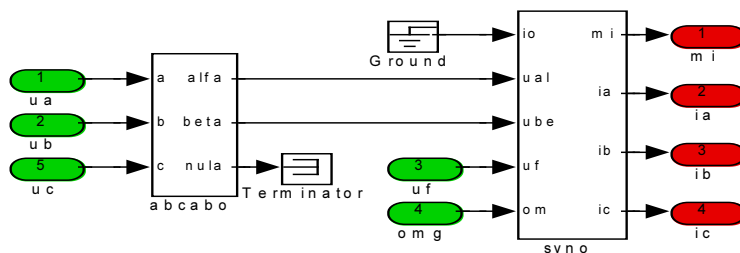
V toolboxu SimPowerSystem jsou k dispozici dva typy modelů synchronních strojů. Prvním je modul „Synchronous Machine“, který modeluje dynamiku třífázového generátoru (počet parametrů, které je nutné zadat je celkem 27). Model je matematicko-fyzikálně popsán soustavou tzv. Parkových rovnic a odpovídá tedy modelu vytvořenému týmem uvedeným v literatuře [1]. Tento model je stručně popsán v následující podkapitole 2.2. Model byl autory vyvinut v programu SIMULINK, protože v podstatě matematicko-fyzikálně shodný model SG z knihovny SimPowerSystem je už pouze jako samostatný model schopen se „rozběhnout“ pouze s proměnným krokem, což je pro realizaci DTS se simulací v konstantním real-time režimu nepoužitelné.

Druhým je modul „Simplified Synchronous Machine“ (počet parametrů, které je nutné zadat je celkem 8), který je matematicko-fyzikálně obdobný tzv. modelu „Behn-Eschenburg“, neboli „klasickému“ modelu (používanému např. v programu MODES autora Ing. Karla Másla – viz [2]) a mohl by být použit v modelech distribučních a přenosových soustav pro účely realizace DTS. Avšak i tento model může být spuštěn sice s pevným krokem, ale pouze kratším než 4 ms (při kroku 5 ms je již časový průběh fázového úhlu nepřijatelně zakmitaný, a při integračním

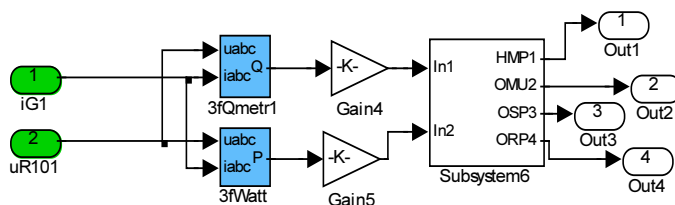
kroku 10 ms je již numericky nestabilní (časový průběh veličin je fyzikálně nesprávný). To tedy znamená, že i tento zjednodušený model SG je pro realizaci DTS prakticky nepoužitelný. Z těchto důvodů museli autoři vyvinout a odladit vlastní modely synchronních generátorů SG v programu SIMULINK, jak je uvedeno v následující podkapitole.

2.2 Model SG v programu Simulink

Prvním příkladem je model synchronního generátoru. Je-li modelován jako obecný elektrický stroj pak je generátor popsán tzv. „Parkovým“ modelem (Parkova transformace) a je vhodný i pro řešení krátkodobé dynamiky. Z hlediska numerického řešení je odladěný a provozovaný model elektrárenských rozvodů v elektrárně Opatovice (International Power Opatovice, a.s. - IPO) v prostředcích MATLAB-SIMULINK odladěný při použití metody ode4 (Runge-Kutta) s pevným integračním krokem 0,01 sec. – viz [3]. Model SG vytvořený v programu SIMULINK je na následujícím Obr. 1.



Obr. 1 – Parkův model synchronního generátoru v programu SIMULINK



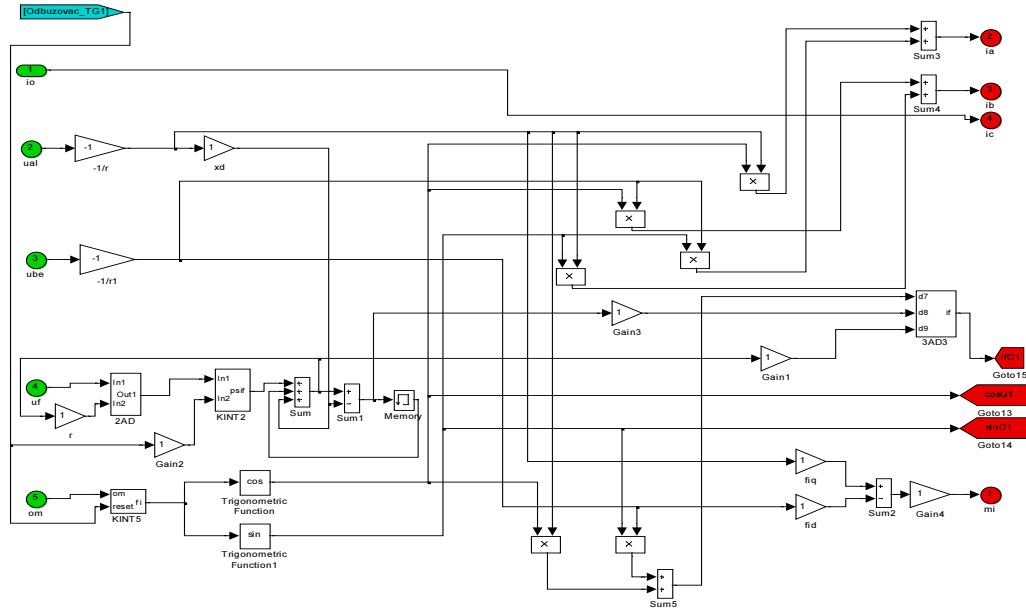
Obr. 2 – Blok buzení s omezením P-Q diagramu

Pro modelování SG byla použita teorie obecného elektrického stroje v poměrných veličinách, konkrétně transformace α , β , θ pro stator, 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 pomocné vztahy, respektující okamžitou polohu rotoru vůči statoru. Tímto způsobem vyloučíme nutnost použití proměnných vazebních koeficientů v diferenciálních rovnicích. Na Obr. 1 jsou dále vstupy u_f (budící napětí) a ω_{mg} (otáčky turbíny) [1].

Na Obr. 2 je uveden blok realizující omezení P-Q diagramu, kde jsou indikační výstupy HMP (horní mez činného výkonu), OMU (mez podbuzení), OSP (omezovač statorového proudu) a ORP (omezovač rotorového proudu).

2.3 Zjednodušený model SG v programu Simulink

Pro určité podmínky plně vyhovuje při menší náročnosti na simulační výpočet i modifikace Parkova modelu 7. řádu a to snížením na 5. řád zanedbáním indukovaného elektromotorického napětí, případně dalším snížením až na 3. řád zanedbáním vlivu tlumících vinutí na indukované napětí ve statoru i rotoru – viz Obr. 3.



Obr. 3 – Model synchronního generátoru 3. řádu

2.4 Ekvivalentní modely SG

Jinou možností je zvolit některou náhradu, například ekvivalentní model „Behn-Eschenburg“, který je vhodný pro řešení střednědobé dynamiky. Stator generátoru je nahrazen elektromotorickou silou E_{av} za rázovou reaktancí X_S . Je ale nutné, aby tento model byl připojený na síť obsahující nejméně jeden objekt počítající frekvenci sítě. Obdobný model generátoru, nazývaný klasický, je používán i u známého síťového simulátoru MODES používaného pro modelování krátko- a dlouho-dobé dynamiky elektrizačních (přenosových, distribučních) soustav ve společnosti ČEPS, a.s. – viz [2].

Model „Behn-Eschenburg“ je popsán rovnicí

$$V_A = (R_S + j \omega_S L_S) I_A + E_{av} \quad (1)$$

kde

R_S a $\omega_S L_S = X_S$ jsou nezávislé konstanty,

E_{av} je veličina proporcionalní frekvenci otáčení rotoru ω_S a budícího proudu I_r

Φ je fázový úhel

Model „Behn-Eschenburg“ nepracuje s jednotlivými fázemi, ale s „fázorem“ sousledné soustavy, který je popsán rovnicemi.

$$E_{vx} = U + R I \cos \Phi + L \omega I \sin \Phi \quad (2)$$

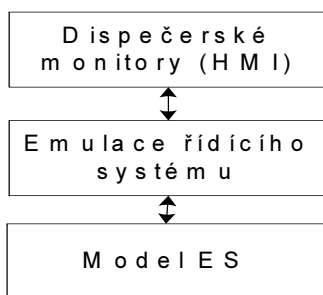
$$E_{vy} = - R I \sin \Phi + L \omega I \cos \Phi \quad (3)$$

Závěrem této kapitoly lze tedy říci, že podle požadavků lze modelovat generátor trojfázově (nutné např. pro posuzování vlivu zkratů na činnost ochran) nebo jednofázově (dostačující např.

pro realizaci jednofázových zkratů). Obecně lze model generátoru rozložit do tří složkových soustav a modelovat poté jenom souslednou složku, tzn. generátor modelovat jedním „fázorem“ – viz „Behn-Eschenburg“).

3 Model elektrizační soustavy

Druhým příkladem „inženýrské volby“ jsou možnosti modelování elektrizační soustavy (rozvodné, distribuční, přenosové). Jednou z možností je realizace komplexního plně dynamického „spojitého“ modelu. Plně dynamický „složité model“ je popsán soustavou nelineárních diferenciálních rovnic (NDR) a algebraických rovnic počítaných s časovým krokem cca 40 ms (nutným pro realistickou simulaci elektromechanických přechodových dějů s časovými konstantami $T=10^{-2}$ až 10^0 sec; řízení TG, ochranná relé, kývání rotorů, řízení stability systému). Výhodou tohoto modelu je skutečnost, že ho lze využívat i pro inženýrské analýzy a síťové simulace, jak před událostí, tak i postmortem - pro tyto účely se využije buďto pouze spodní úroveň „Model ES“ a střední „Emulace řídicího systému“ (resp. Stimulace řídicího, měřicího a telemetrického systému)“, nebo i horní úroveň „HMI“ – viz následující Obr. 4.



Obr. 4 – Konfigurace DTS

Alternativně k uvedenému dynamickému „spojitému“ modelu může být pro určité požadavky realizován tzv. pseudodynamický „středně složitý“ model skládající se ze „statického modelu ustáleného chodu sítě“ (počítaného např. jednou za 2 nebo 5 sec.) a ze vstupně/výstupně připojených dynamických submodelů (počítaných v časových intervalech 0.1 – 0.2 sec.), např. submodely synchronních turbogenerátorů (buzení, P-Q diagramy, kmitání rotorů elektrických strojů s uvažováním setrvačných hmot), model zatížení s uvažováním vlivu kmitočtu (frekvenční charakteristik odběrů), model kmitočtu sítě na základě balance výroby [2].

Dále pak v oblasti nastavení výroby/spotřeby a jejich pomalých změn lze počítat/nastavovat i logicko-časovými sekvenčními prostředky. Turbogenerátory, transformátory, synchronní kompenzátory nutno počítat i v tomto modelu dynamicky (popis nelineárními diferenciálními rovnicemi - NDR), ale zkraty a přechodovou stabilitu; vzniklou v důsledku nepředvídaných změn v topologii sítě; lze počítat zjednodušeně podle „scénářů“ (nadproudové a diferenční ochrany, kruhování a fázování, ztráta synchronismu, OZ). Na druhé straně však nejen chod sítě ale i pomalé dynamické děje s časovými konstantami $T=10^1$ až 10^4 sec mohou být počítány sekvenčně s časovým krokem např. 2 – 10 sec.

4 Konfigurace trenažerových simulátorů

Příspěvek popisuje trenažéry typu "Partially Stimulation", které jak již bylo uvedeno lze členit na tři základní části – viz Obr. 4. První je vlastní model elektricko-technologických zařízení (generátory, trať, rozvodny, sítě). Druhou částí je emulovaný řídicí systém, který „kopíruje“ reálné algoritmy řízení a blokády. Třetí částí je vlastní pracoviště trénovaného dispečera a učitele-instruktora (SCADA/HMI).

5 Příklad případového referenčního projektu

Všechny uvedené specifčnosti modelování lze dokumentovat na dodaném a provozovaném plnorozsahovém dispečerském trenažerovém simulátoru rozveden elektrárny International Power Opatovice, a.s., který zahrnuje šest turbogenerátorů, elektrárenské rozvodny všech

napětových úrovní (0.4 kV, 6.3 kV, 10.5 kV, 110 kV), linky na vyvedení výkonu do distribuční soustavy 110 kV ČEZ – VČE a blízké uzlové rozvodny Opočinek a Neznášov [3]. V současnosti jsou již získány zkušenosti s vývojem dynamických modelů soustav, s realizací a uváděním do provozu DTS, které budou využívány při dalších projektech.

6 Závěr

Na základě zkušeností s vytvářením dynamických modelů elektrizačních soustav a s komplexní realizací dispečerských trenažerových simulátorů v nízkonákladové verzi (Low Cost = Cost Effective) je možné konstatovat realizovatelnost takovým způsobem, aby byly vyvinuté DTS investičně akceptovatelné i pro český trh a trhy rozvojových zemí. V příspěvku by bylo též možné doložit i provozní zkušenosti a přínosy plynoucí z rutinního využívání DTS pro výcvik a trénink dispečerů, manipulantů a rozvodných, čemuž však brání omezený rozsah příspěvku.

Literatura

- [1] Neuman, P., Pokorný, M., Tušla, P., Varcop, L., Weiglhofer, W.: Vývoj a využití dispečerských simulačních trenažerů. Sborník 7. mezinárodní konference Automatizace energetických procesů 2006, 16.-18. 5. 2006, Zlín
- [2] Chmura A., Černohorský J., Máslo K., Neuman P.: Dispečerský trenažér přenosové soustavy České republiky, Sborník 7. mezinárodní konference Automatizace energetických procesů 2006, 16.-18. 5. 2006, Zlín
- [3] Neuman P. a kol.: Plnorozsahové dispečerské trenažéry, jejich přínos ke zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu technických zařízení elektráren. Energetika, č. 8-9, 2006, str. 261 – 265.

Ing. Petr Neuman, CSc.
specialista skupiny GDC a DTS

ČEPS, a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10

Tel.: +420 211 044 400
Fax: +420 211 044 330
Mobil: +420 777 648 906
E-mail: neuman@ceps.cz