

Možnosti simulace zařízení SYNCHROTAKT u trenážerů elektráren a elektrárenských soustav

Petr Neuman, NEUREG, Praha
neumanp@volny.cz
Jaroslav Jirkovský, HUMUSOFT, Praha
jirkovsky@humusoft.cz

Úvod

Problematika **modelování a simulace SYNCHROTAKTu** v prostředcích **MATLAB-SIMULINK** bude demonstrována na zkušenostech s dlouhodobě využívaným Dispečerským simulačním trenážerem elektrárenských elektro-rozveden, který zahrnuje všechny napěťové rozvodny od 0.4 kV až po 110 kV s linkami připojenými do sítě 110 kV ČEZ Distribuce (dříve VČE). Jedná se o elektrárnu s kombinovanou **výrobou elektřiny a tepla**, s výrobními bloky o výkonu 60 MWe. V příspěvku kromě ukázky praktického modelování zařízení SYNCHROTAKT pro trenážer, bude také prezentovat možnosti výběru vhodné numerické metody. Tato analytická část bude demonstrována na příkladu modelu jednostrojové soustavy (generátor – transformátor) v **SimPowerSystems**.

Využití trenážeru rozveden pro procesy

- **ruční fázování s využitím SYNCHROTAKTu**
- regulace napětí na transformátorech
- regulace napětí generátoru buzením
- vlastní spotřeba, chod naprázdno, ruční manipulace, přepínání spínačů a odpojovačů, vypnutí a zapnutí vedení
- změna činné a jalové zátěže

Model synchronního generatoru SG v programu Simulink

- Model SG vyvinutý na základě Parkových rovnic,
- Je vhodný i pro řešení elektro-mechanických a elektro-magnetických dějů,
- odladěn při použití numerické metody ode4 (Runge-Kutta) s pevným integračním krokem 0,001 sec,

Pro modelování SG byla použita teorie obecného elektrického stroje v poměrných veličinách

- transformace $\alpha, \beta, 0$ pro stator, kde rychlost otáčení vztažných souřadnic je nulová
- modelování nesymetrií napětí, proudů i impedancí ve vnější síti
- pro rotor transformace $d, q, 0$, kde se vztažné souřadnice otáčejí s rotorem
- pro převod z jedné soustavy do druhé slouží pomocné vztahy, uvažující okamžitou polohu rotoru vůči statoru

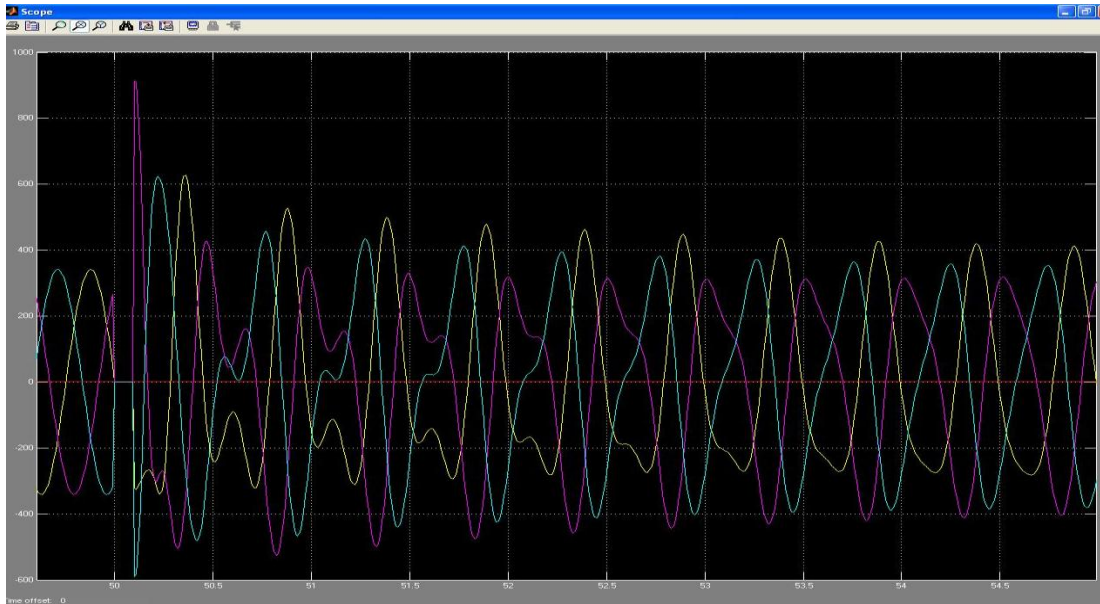
- podobně jako SG jsou sestaveny i modely transformátorů, vypínačů, odpojovačů a všech ostatních prvků rozveden
- simulace pro účely **DTS** musí vždy běžet v **reálném čase**
- model rozveden musí postihnout nejen ustálené provozní režimy, ale i rychlé elektromagnetické (trvání řádově 10^{-1} až 10^0 sec) a elektromechanické přechodné děje (trvání řádově 10^0 až 10^4 sec)
- simulace rychlých elektromagnetických jevů je nutné s ohledem na simulaci průběhu zkratů a jiných poruch na které musí reagovat například elektrické ochrany
- krok integrace musí být 10^{-3} sec, nebo kratší

Simulace v reálném čase

- výpočet simulace všech jevů v „reálném čase“ (což je hlavní rozdíl od tzv. **síťových (inženýrských) simulátorů**)
- „přesnost“ je rozdíl mezi reálným průběhem přechodového děje (naměřeným v provozu) a simulovaným průběhem, obvykle je požadovaná přesnost dána maximální odchylkou v % ve všech časových okamžicích při současném požadavku na vždy správný „trend“,
- tyto požadavky jdou proti sobě, protože vyšší přesnost vyžaduje podrobnější matematicko-fyzikální popis dějů a tudíž simulace vyžaduje „inženýrskou intuici“ a zkušenosti.

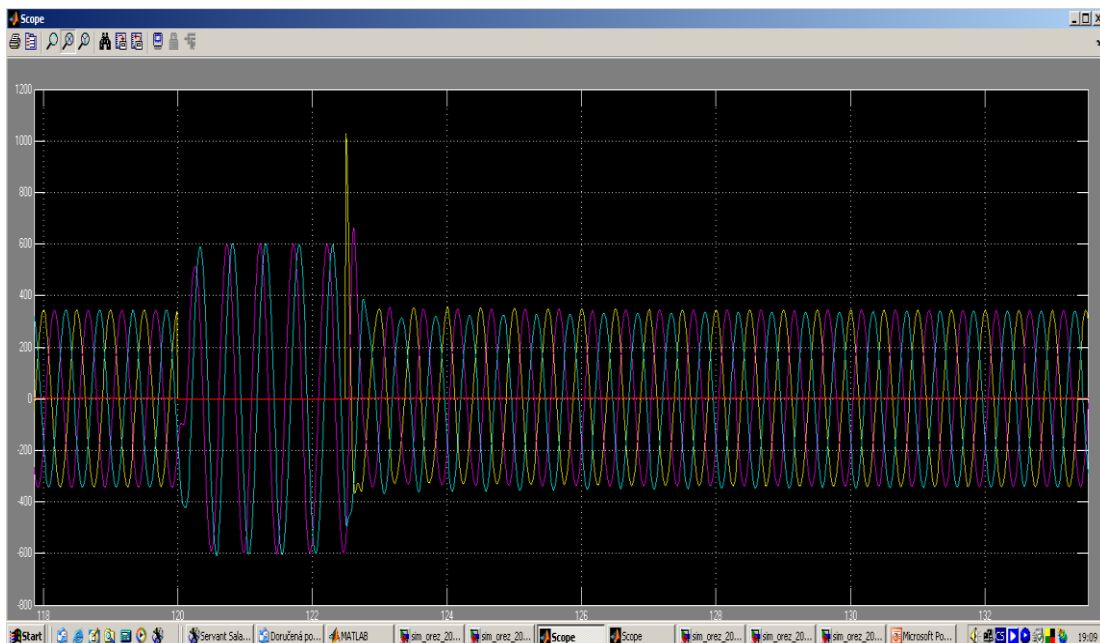
Modely a simulační prostředky

- Referenční projekt EOP byl modelován v prostředcích MATLAB-SIMULINK.
- Jsou uvedeny ilustrační simulované průběhy veličin při **jednofázovém a třífázovém zkratu** na svorkách generátoru, a to ve **třífázovém modelu SIMULINK**.



Srovnávací třífázový zkrat 5 ms na svorkách – průběh napětí

Pozn: časové měřítko neodpovídá (od zkratu přechodový děj po dobu 250 ms)



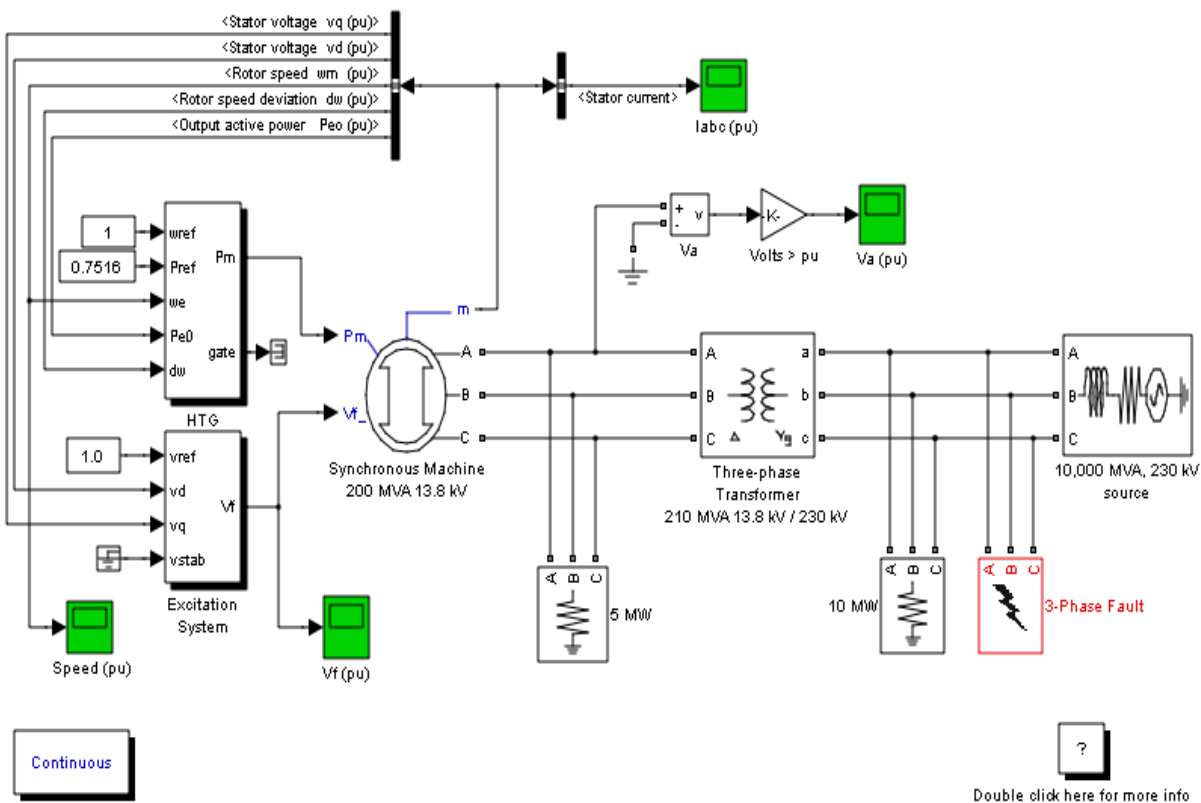
Srovnávací 1fázový zkrat 100 ms na SG (zemní)

Numerické řešiče v MATLAB – SIMULINK

- **Variable methods:**
- ode23tb – implicit RK(2), trapezoidal (1.stage) – backward BDF (2) /Gear's formulas (2.stage) → cca MODES
- ode23t - trapezoidal, stiff/adams-Moulton, one-step solver
- ode23s - implicit, stiff/Rosenbrock, one-step solver
- ode15s - stiff/NDF, variable order, multistep solver
- ode45 - explicit RK (4,5), one-step solver, Dorman-Prince
- ode23 - explicit RK (2,3), one-step solver, Bogacki-Shampine
- **Fixed step methods:**
- ode14x – implicit Newton (4 → 3,2), extrapolation / stiff
- ode1 - Euler's method
- ode2 - Heun's (RK 3) = Improved Euler (RK 2 – modified)
- ode3 - ode23, Bogacki-Shampine
- ode4 - RK 4
- ode5 - ode45, Dorman-Prince
- ode8 - Dorman-Prince

Porovnání řešičů Simulinku na modelu s využitím knihoven SimPowerSystems

Synchronous Machine



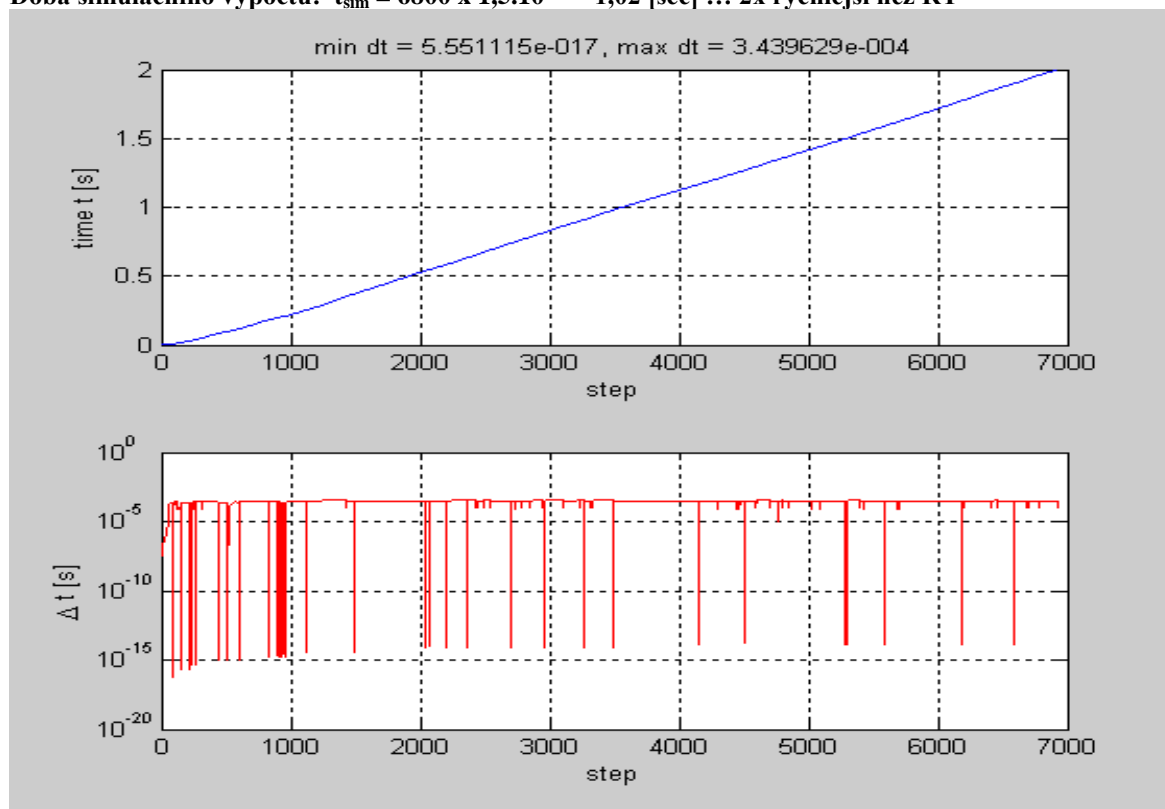
Popis grafů na následujících stránkách a v Tabulce

Doba simulace: 2s

Nastavení v bloku Powergui – určuje typ výpočtu schématu SimPowerSystems Nastavení řešiče v Simulinku Doplňující komentář k nastavení, výsledkům, ...	
Závislost simulačního času na krocích řešiče. Umožní si udělat představu o časové linearitě průběhu simulace (pozn. ne každý krok se však počítá stejně dlouho, proto nemusí nutně odrážet vztah simulačního průběhu vůči reálnému času)	
Délka jednotlivých kroků řešiče. Zde je vidět, kde musely variable-step řešiče zjemnit krok z důvodu udržení zadané přesnosti	
Rychlost motoru	Vf
Iabc	Va

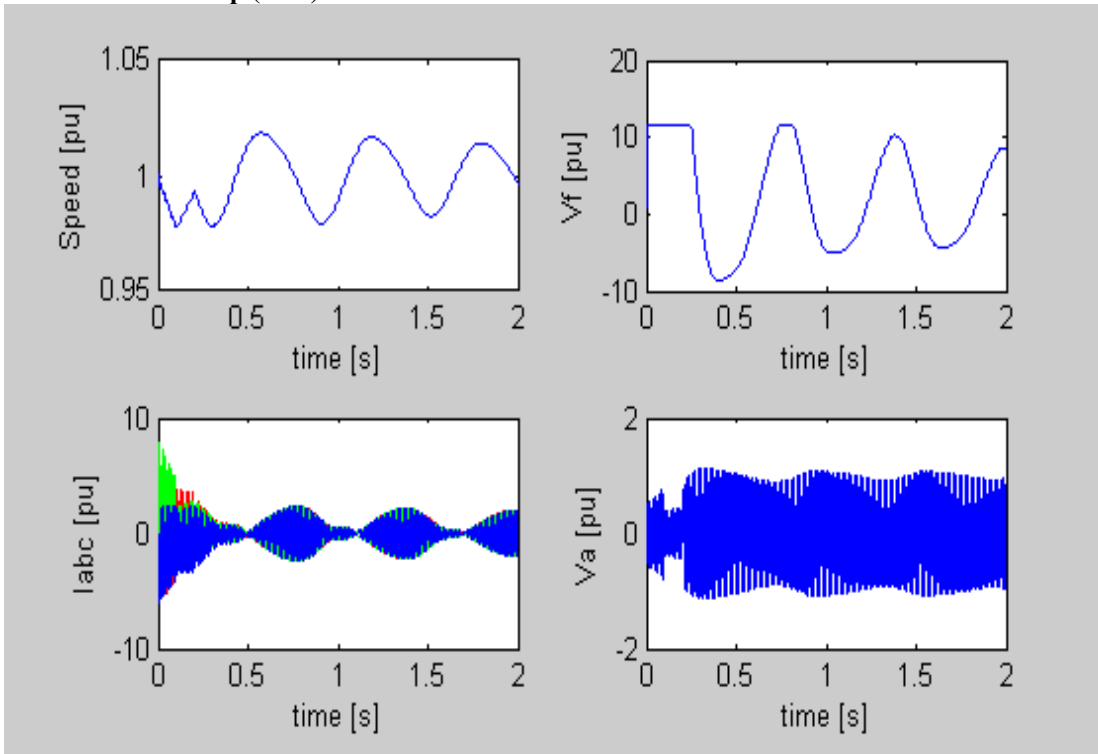
Powergui: Continuous, solver: Variable Step (auto) - ode23tb

Doba simulačního výpočtu: $t_{sim} = 6800 \times 1,5 \cdot 10^{-4} = 1,02$ [sec] ... 2x rychlejší než RT



Powergui: Continuous

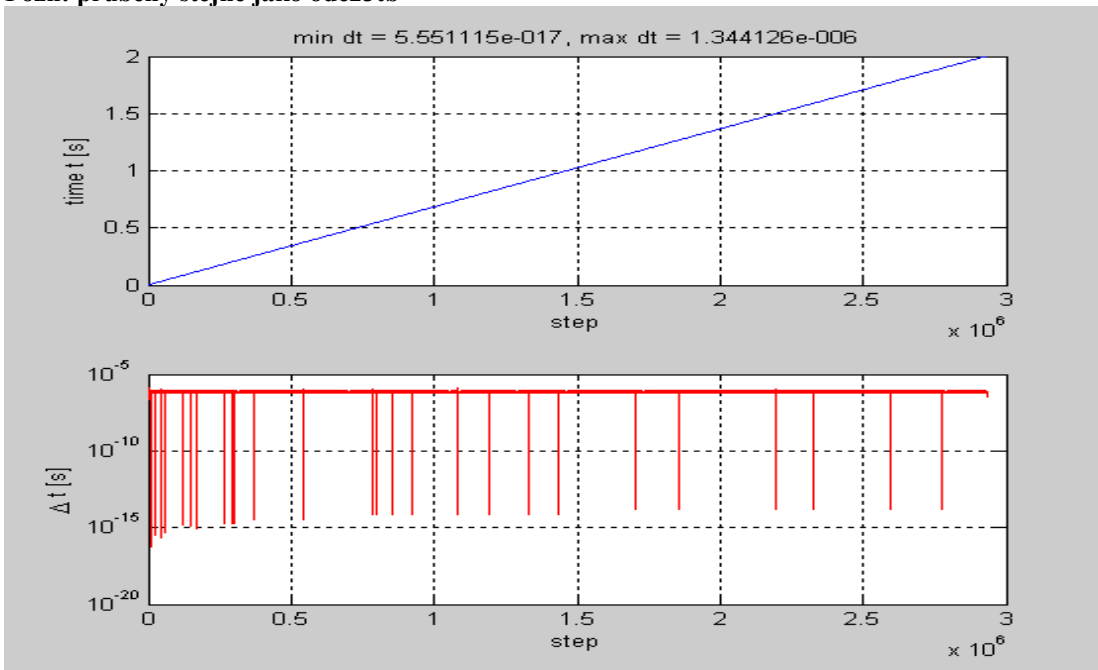
solver: Variable Step (auto) - ode23tb



Powergui: Continuous, solver: Variable Step (auto) - ode45

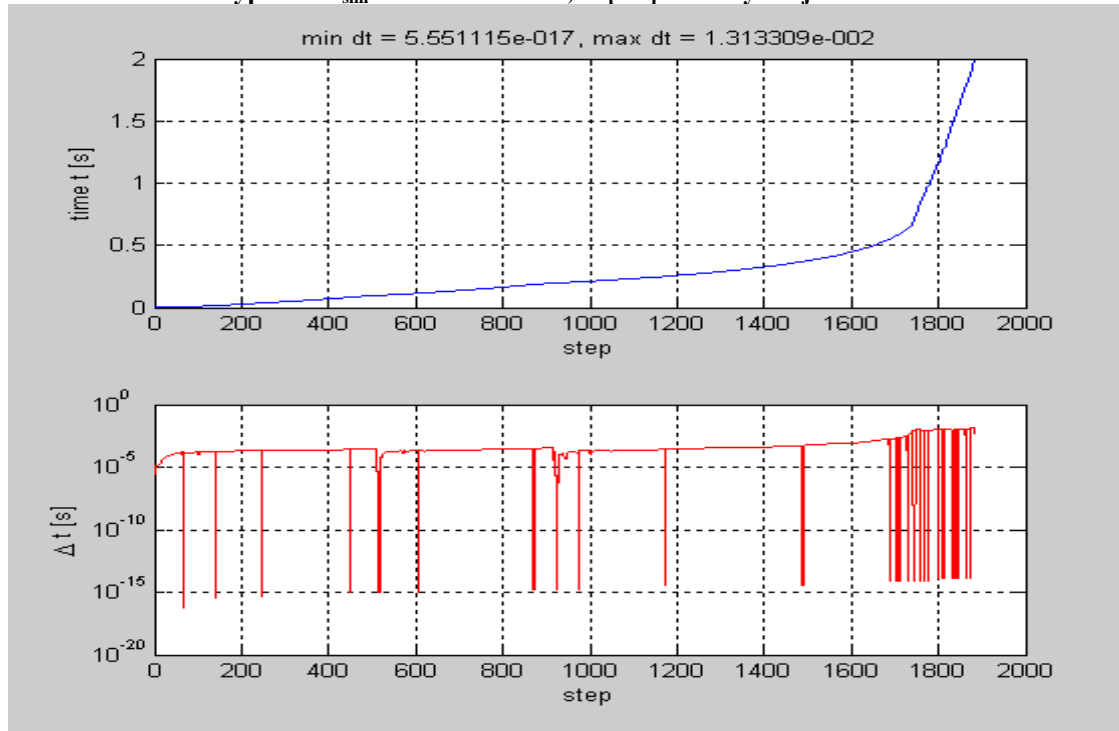
Doba simulačního výpočtu: $t_{sim} = 2,8 \cdot 10^6 \times 10^{-6} = 2,8$ [sec] ... 2x pomalejší než RT

Pozn: průběhy stejné jako ode23tb



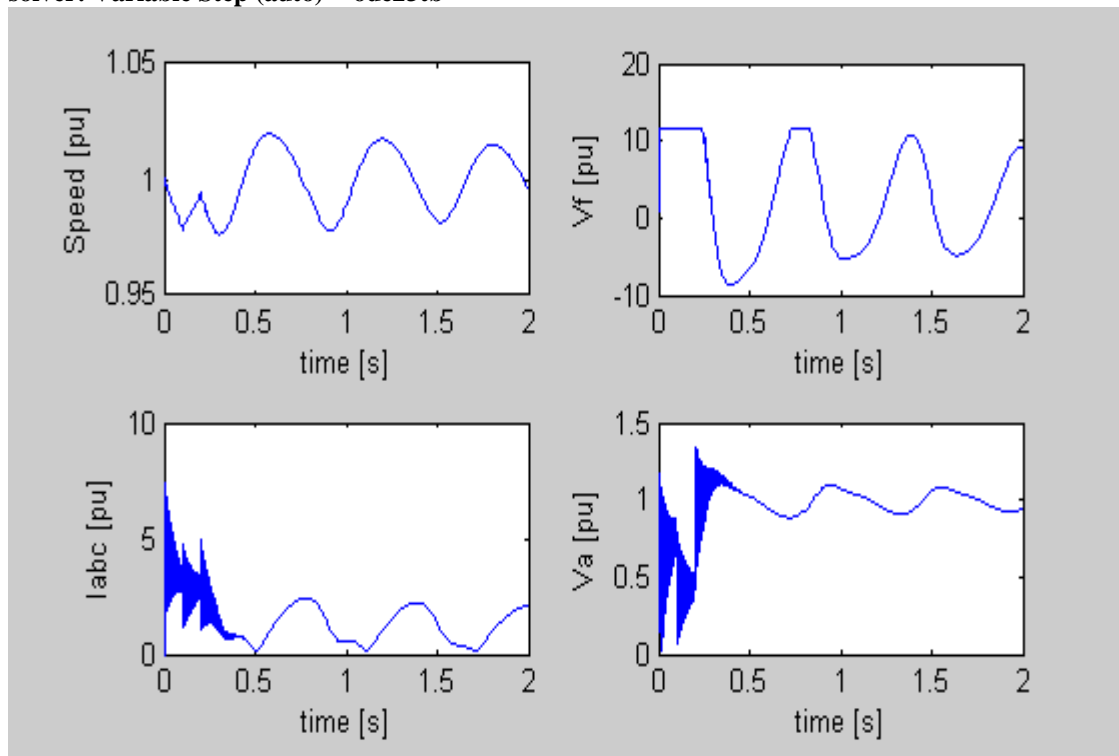
Powergui: Phasor, solver: Variable Step (auto) - ode23tb

Doba simulačního výpočtu: $t_{sim} = 1900 \times 10^{-4} = 0,19$ [sec] ... 5x rychlejší než RT



Powergui: Phasor

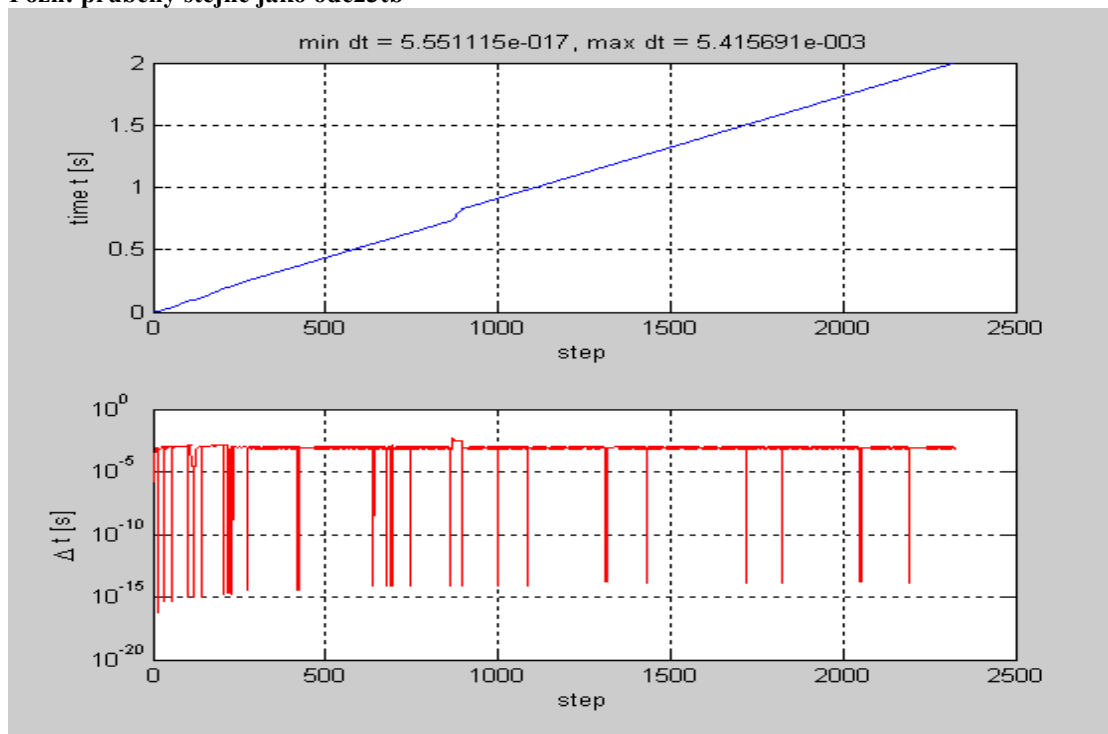
solver: Variable Step (auto) - ode23tb



Powergui: Phasor, solver: Variable Step (auto) - ode45

Doba simulačního výpočtu: $t_{\text{sim}} = 2300 \times 10^{-4} = 0,23$ [sec] ... 4x rychlejší než RT

Pozn: průběhy stejné jako ode23tb



19. ročník setkání uživatelů a příznivců systémů MATLAB & Simulink
 Mezinárodní konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2011, 8. 11. 2011
 Kongresové centrum ČVUT, Praha 6 - Dejvice, Česká republika

metoda 1.V_ode23tb	max dt $3,4 \cdot 10^{-4}$	počet kroků 7000	simulace	metoda 2.V_ode23tb	max dt $1,3 \cdot 10^{-2}$	počet kroků 1900
1.V_ode23t	$2,6 \cdot 10^{-4}$	9000	OK	2.V_ode23t	$9,1 \cdot 10^{-3}$	2500
1.V_ode23s	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^4$	OK	2.V_ode23s	$1,4 \cdot 10^{-2}$	1800
1.V_ode15s	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^4$	OK	2.V_ode15s	$1,09 \cdot 10^{-3}$	3000
1.V_ode45	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^6$	OK	2.V_ode45	$5,04 \cdot 10^{-3}$	2500
1.V_ode23	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^6$	OK	2.V_ode23	$5,01 \cdot 10^{-3}$	3500
1.F_ode14x	10^{-5}	xxx	chybná	2.F_ode14x	10^{-3}	2000
1.F_ode1	10^{-7}	---	dlouhá	2.F_ode1	10^{-5}	$2 \cdot 10^5$
1.F_ode2	10^{-7}	---	dlouhá	2.F_ode2	10^{-4}	$2 \cdot 10^4$
1.F_ode3	10^{-7}	---	dlouhá	2.F_ode3	10^{-5}	$2 \cdot 10^4$
1.F_ode4	10^{-7}	---	dlouhá	2.F_ode4	10^{-4}	$2 \cdot 10^4$
1.F_ode5	10^{-7}	---	dlouhá	2.F_ode5	10^{-4}	$2 \cdot 10^4$
1.F_ode8	10^{-6}	$2 \cdot 10^6$	OK	2.F_ode8	10^{-3}	2000

1.continuous, V.variable, F.fixed

2.phasor, V., F.

Provozní aplikace SYNCHROTAKT

Parametry synchronních strojů ŠKODA Plzeň

- Synchronní stroje **ŠKODA Plzeň** jsou specifikovány následujícími parametry, z nichž některé jsou počítány ze štítkových hodnot strojů a další udává výrobce ve své dokumentaci. Vybrané parametry jsou uvedeny v Tab.1.
- POZN: Hodnoty parametrů v tabulce jsou pro bloky 235 a 137.5 MVA, pro bloky 71.25 MVA z provozních pokynů dodavatele [1], [2].

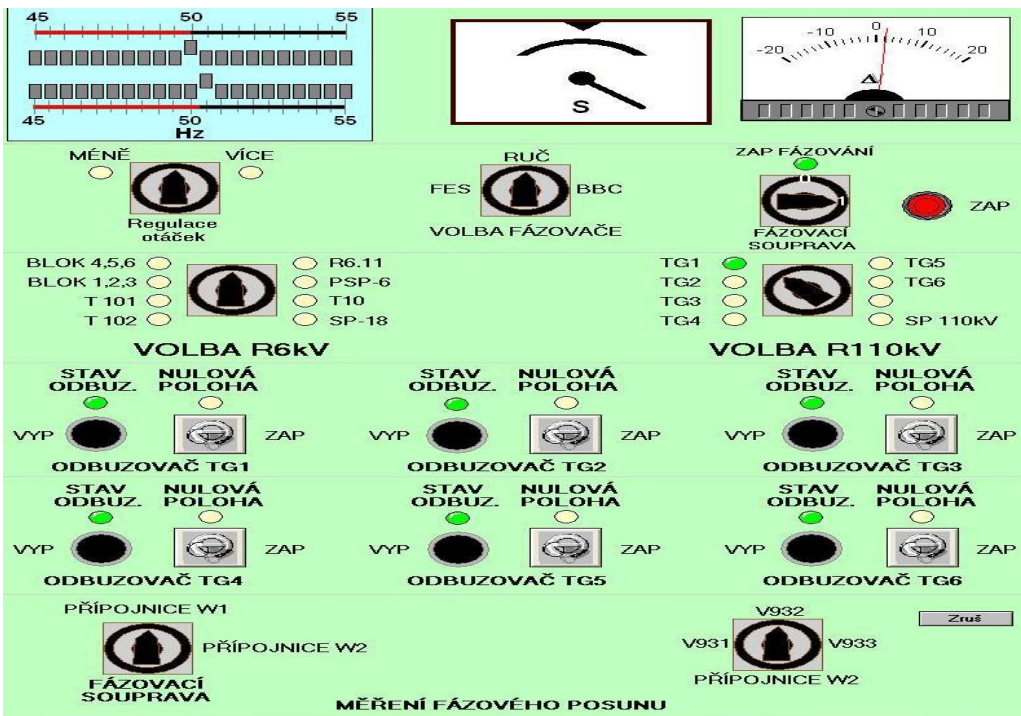
[1] Hlaváč: Pokyny pro budicí soupravu Opatovice 6 x 57 MW. ŠKODA Elektrické stroje, s.r.o., Plzeň, 1997.
 $x_d = 2.23$, $x_q =$ ještě neuváděno (cca 2.10)

[2] Hlaváč: Pokyny pro budicí soupravu PRISMIC A50-S7.2C, Opatovice 71.25 MVA. BRUSH SEM, s.r.o., 2006.
 $x_d = 2.37$, $x_q = 2.22$

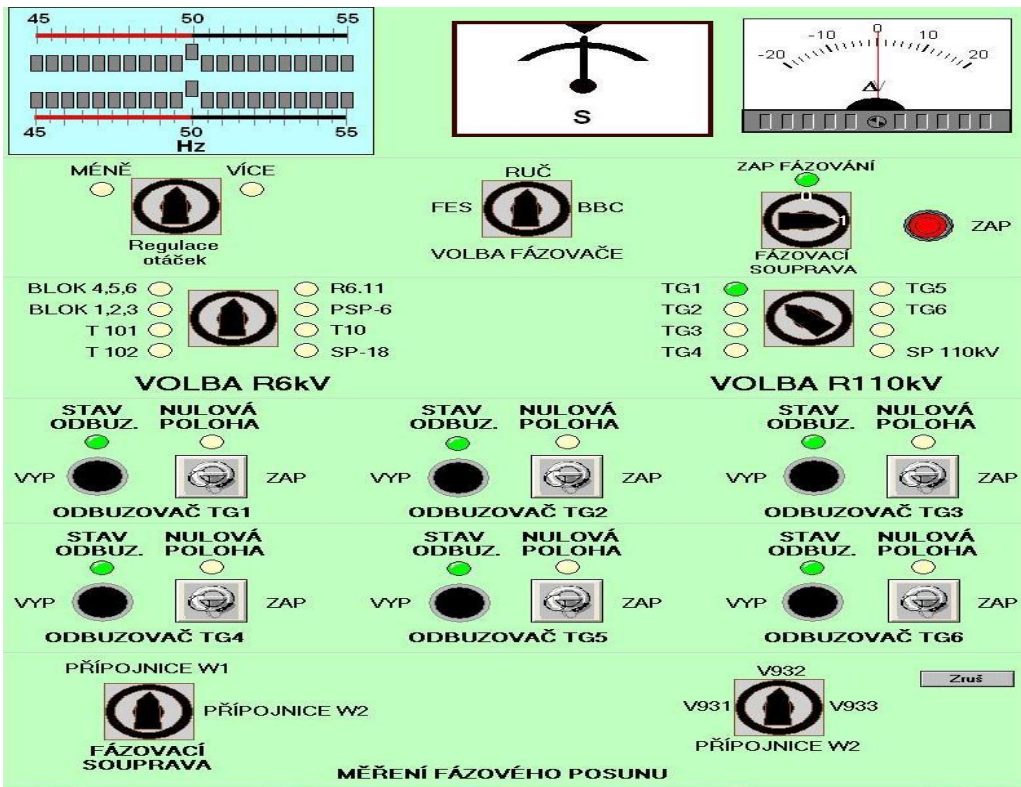
TAB.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VYBRANÝCH GENERÁTORŮ

Parameter	Machines with smooth-core rotor		
	235 MVA	137.5 MVA	71.25 MVA
x_d	1.65	2.18	2.23
x_q	1.59	2.06	2.10
x_d'	0.23	0.25	0.25
x_q'	0.38	0.42	0.42
x_d''	0.17	0.15	0.15
x_q''	0.18	0.16	0.16
T_d' (s)	0.83	0.70	0.85
T_q' (s)	0.42	0.35	0.42
T_d'' (s)	0.03	0.025	0.02
T_q'' (s)	0.02	0.015	0.013

19. ročník setkání uživatelů a příznivců systémů MATLAB & Simulink
 Mezinárodní konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2011, 8. 11. 2011
 Kongresové centrum ČVUT, Praha 6 - Dejvice, Česká republika



Emulace skříně fázování v InTouch – stav „Před přifázováním“



Emulace skříně fázování, žák – stav „Přifázováno“

19. ročník setkání uživatelů a příznivců systémů MATLAB & Simulink
Mezinárodní konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2011, 8. 11. 2011
Kongresové centrum ČVUT, Praha 6 - Dejvice, Česká republika

Fázování TG

- V praxi při stanovení přípustné chyby fáze se obvykle vychází z požadavku, aby počáteční točivý moment při zapnutí generátoru na síť byl menší než jeho jmenovitý moment. Tomu obvykle odpovídá chyba fáze **8 – 12 °**.
- Realistický model SYNCHROTAKTu musí být vícefázový (trojfázový), protože reálné zařízení má funkci odvozenou z měření dvou fází, z těch je po jejich digitálním zpracování (filtrace, rekonstrukce 1.harmonické 50 Hz) stanoveno rozdílové napětí mezi těmito jednotlivými fázemi, a to na straně obou spínaných objektů.
- Z průběhu rozdílového napětí se stanoví „rozdíl fázových napětí **dU** (sítě i generátoru)“, ale také rozdíl úhlů **dfi** (je-li $d\mathbf{f}_i = \text{konst}$, jedná se o „kruhování“), a rovněž rozdíl frekvencí **df** („fázování“).
- Zapínací čas t_z „fázovacího spínače“ zpožďuje zapínací povel.
- Za čas t_z se vzájemná poloha fázorů U_1 a U_2 změní o úhel

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{d}(\omega) \cdot t_z = 2 \cdot (\pi) \cdot \mathbf{d}(\mathbf{f}_i) \cdot t_z$$

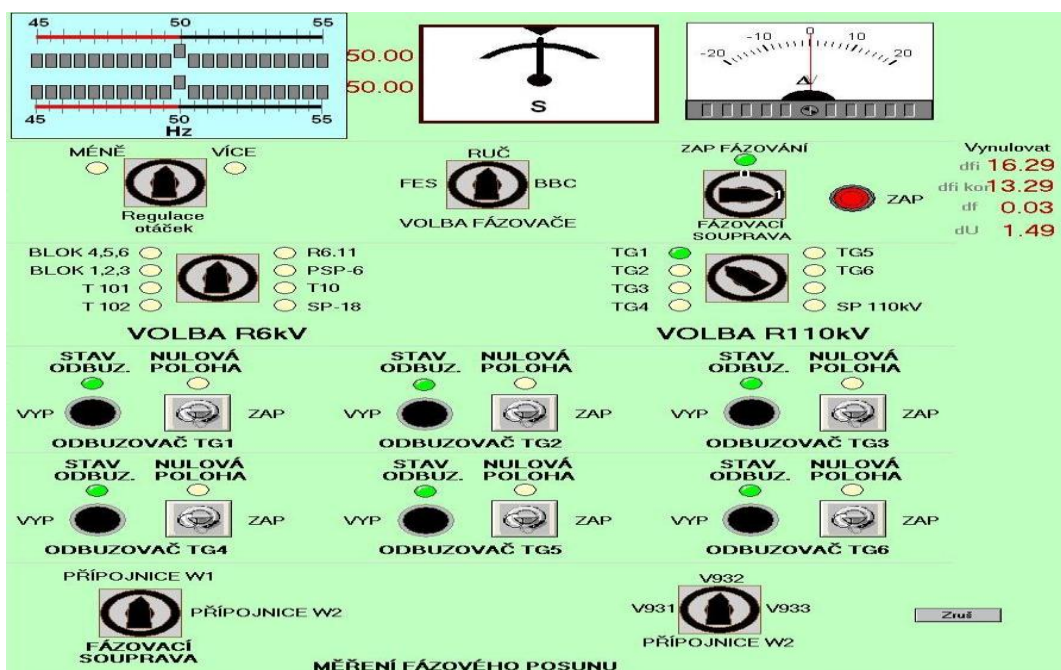
- Fázovač musí vyslat zapínací povel s předstihem \mathbf{f}_p .
- Dovolенý rozdíl kmitočtu $\mathbf{d}(\mathbf{f}_i)_{\max}$ je tedy omezen zapínací dobou spínače t_z , což musí realisticky modelovaný SYNCHROTAKT respektovat – viz dále.
- SYNCHROTAKT musí také nastavit kmitočet TG tak, aby zrychlovací moment vytvářený turbínou, nebyl přijatelné hodnoty pro fázování.
- Dynamický náraz při fázování je závislý na velikosti rozdílu kmitočtu a na nedostatku nebo přebytku zrychlovacího momentu turbíny. Pokud by byl zrychlovací moment větší, může TG přejít přes synchronní stav tak rychle, že sfázování nenastane (okamžitá rychlost bude mít tak velký překmit na přechodové charakteristice, že do oblasti „synchronního stavu“ po překmitu se dostane až po čase delším než je přípustný čas, nastavený na SYNCHROTAKTu).

Synchronizace: Podmínky pro ruční fázování TG

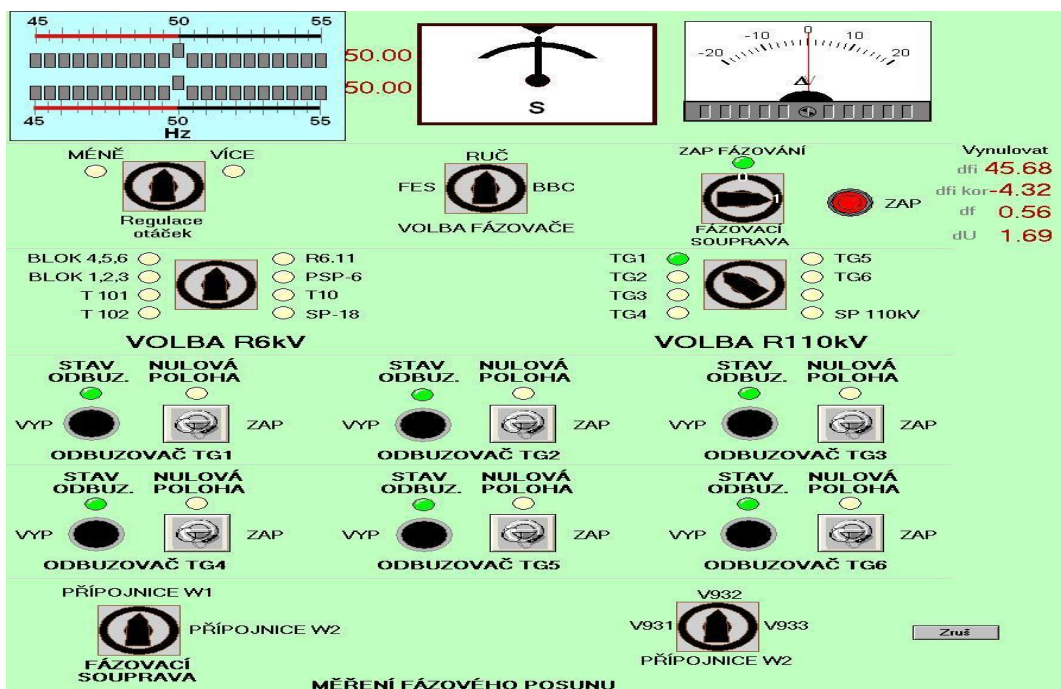
- **Rozdíl fázových úhlů** (v okamžiku stisku fázovacího tlačítka):
 $\mathbf{d}(\mathbf{f}_i) \leq 12^\circ$... závisí na hodnotě rázové reaktance x''_d
- **Korigovaný rozdíl fázových úhlů:**
 $\mathbf{d}(\mathbf{f}_i)_{\text{kor}} \leq 15^\circ$
mnemo-pomůcka „za pět minut dvanáct“
- **Rozdíl frekvencí dvou synchronně spojovaných soustav:**
 $\mathbf{d}(f) \leq 0,5 \text{ Hz}$
- **Rozdíl napětí:**
 $\mathbf{d}(U) \leq 6 \text{ kV}$

POZN: Neúspěšné fázování znamená, že ochrany (např. rozdílová R30) po sepnutí okamžitě vypnou „fázovací spínač“

19. ročník setkání uživatelů a příznivců systémů MATLAB & Simulink
 Mezinárodní konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2011, 8. 11. 2011
 Kongresové centrum ČVUT, Praha 6 - Dejvice, Česká republika



Emulace skříně fázování, instruktor – stav „Přifázováno“, Př.1



Emulace skříně fázování, instruktor – stav „Přifázováno“, Př.2

Závěr

Příspěvek i praktická aplikace „Modelování zařízení SYNCHROTAKT jako součásti trenážerů DTS elektráren a elektrárenských rozvodů“ prokazuje, že MATLAB-SIMULINK je velmi vhodný prostředek pro inženýrskou i trenážerovou simulaci. Jeho „síla a efektivita“ je dána kromě jiného i možností výběru z mnoha „numerických řešičů“, jak bylo ukázáno v analytické části příspěvku.