

SIMULACE A REGULACE PROPOJENÝCH SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ (SG) NA BÁZI VLNOVÝCH MODELŮ, APLIKACE NA MECHANICKÝ MODEL SG

Neuman P.², Neusser Z.¹, Valášek M.¹, Nečas M.¹, Pelikán J.¹

¹ Fakulta strojní, ČVUT v Praze

²NEUREG, sdr., Praha

Abstrakt

Synchronní stroj je nejdůležitější součástí elektrizačních soustav, ve kterých se aplikují v současnosti principy chytrých sítí – Smart Grids. Aby byla zajištěna stabilita sítě je nutné regulovat elektrické zdroje připojené v soustavě společně s elektrickými spotřebiči. Bez regulace by byla způsobena nestabilita soustavy, protože požadavky na spotřebu elektrické energie mění podmínky v soustavě a energetické zdroje se musí takovým požadavkům přizpůsobit. V minulosti byly vlastnosti synchronních strojů zkoumány na mechanickém modelu, protože teorie elektrického stroje nebyla ještě plně formulována. Ale i v současnosti jsou mechanické modely synchronních generátorů používány, protože jsou lépe srozumitelné pro specialisty na teorii regulace, a to i pro neelektrotechnicky vzdělané.

1 Model synchronního elektrického stroje

Elektromagnetické systémy jsou popsány soustavou diferenciálních rovnic a přehled analogií mezi elektrickými a magnetickými veličinami je uveden v Tabulce 2. Analogické soustavy elektromagnetických rovnic lze nalézt v oblasti mechanických vibračních soustav [1], [17]. Parkova transformace parku zjednodušuje matematický model synchronních strojů. Výhodou je, že elektrické parametry (zejména vzájemné indukčnosti), po transformaci nejsou funkce času. Rovnice napětí musí být doplněna dvěma pohybovými rovnicemi [7], [9].

První rovnice obsahuje tlumící vinutí a časovou derivaci proměnných a tedy také popisuje elektromagnetické přechodné jevy.

$$-u_d = Ri_d + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(E + E_{rq})}{dt} + (1+s)E_{rd} + (1+s)x_q i_q + \frac{x_d}{\omega_0} \frac{di_d}{dt} \quad (1)$$

Podobná rovnice platí i pro napětí u_q .

Po zanedbání časových derivací a tlumícího vinutí získáme druhou rovnici

$$-u_d = Ri_d + (1+s)x_q i_q + (1+s)E_{rd} \quad (2)$$

Tento typ modelu je také známý jako model „Behn-Eschenburg“, v literatuře západních původních členů EU 15. Uvažujeme zde o tzv **$E'q$ – model**, který zcela zanedbává tlumící vinutí.

Rovnice statoru synchronního stroje je popsána následujícím vztahem.

$$\begin{aligned} T'_{d0} \dot{e}'_d &= e_{FD} + (x_d - x'_d) i_d - e'_q \\ T'_{q0} \dot{e}'_q &= -(x_q - x'_q) i_q - e'_d \end{aligned} \quad (3)$$

Tímto způsobem získáme systém 3. řádu, který je vhodný pro střednědobou dynamiku. Pro zkratové přechodové jevy už není dostatečně přesný. Je vhodný spíše pro dynamické výpočty stability, která je pro elektrizační soustavy zásadní a neustále se zvyšuje, zejména v chytrých Smart Grids [18], [19].

Tabulka 1: Elektrické parametry synchronního stroje.

Nominal power	Line-to-line voltage	Frequency	Inertia	Damping factor	Pair poles	Internal impedance	
P_n [VA]	V_n [V _{rms}]	f_n [Hz]	J [kgm ²]	K_d	p	R [Ω]	L [H]
1 000 000 000	315000	50	168870	58.7	1	1.9845	0.0632

Tabulka 2: Elektrické a magnetické analogie.

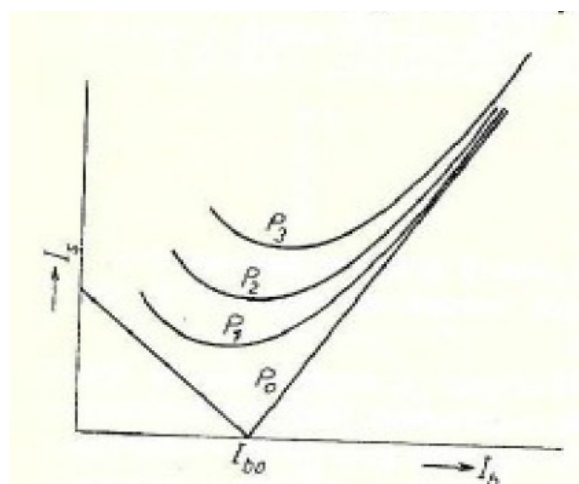
Elektrická veličina		Magnetická veličina	
napětí	u [V]	magnetomotorická síla	U_m [A]
proud	i [A]	magnetický tok	ϕ [Wb]
odpor	R [Ω]	reluktance	R_m [$\frac{1}{\text{henry}}$]
Ohmův zákon	$u = i \cdot R$	Hopkinsonův zákon	$U_m = \phi \cdot R_m$

2 Mechanický Model Synchronního stroje

Na základě analýzy elektrického modelu synchronního generátoru, např. rovnice (1), (2) a mechanického modelu SG lze dokázat, že použití mechanické analogie je oprávněné [5], [6]. Správné výsledky dosáhneme i u heuristických mechanických modelů SMIB (Single Machine Infinite Bus), kde je uvažován jednoduchý ekvivalentní mechanický model. Průtok zatížení je ekvivalentem mechanického točivého momentu. Regulátor napětí je ekvivalentem k systému "hmotné tyče" [16].

V elektrizační síti je udržován stálý kmitočet (50 Hz). Všechny synchronní stroje (generátory, alternátory) pracují synchronně se stejným kmitočtem. Alternátory, které spolu pracují, musí však mít i stejné napětí, nebo mezi nimi musí být zapojen transformátor s vhodným převodem. Sníží-li se napětí některého alternátoru, tak se tím napětí v síti nesníží, neboť toto napětí udržují ostatní alternátory. Do alternátoru začne téci takový proud, který svým točivým magnetickým polem doplní magnetický tok rotoru tak, aby výsledný tok indukoval do statorového vinutí napětí sítě. Změnou budicího proudu tedy neměníme napětí, nýbrž měníme proud ve statoru. Tento proud však nemůže vykonat žádnou práci, protože jsme nezvětšili výkon poháněcího stroje (nejčastěji parní turbíny). Říkáme, že je to jalový proud.

Budeme-li měřit proud statoru I_s i budicí proud I_b a vyneseme-li jejich závislost do grafu, dostaneme křivku P_0 na Obr. 1.



Obr. 1. V-křivky, I_s proud vinutí statoru, I_b budicí proud (Pavelka, 1965)

Z obrázku 1 je vidět, že od mezní hodnoty budicího proudu I_{b0} se statorový proud I_s zvětšuje a to jak při zvětšování, tak i při zmenšování budicího proudu I_b . Křivka na obr. 1. se nazývá „křivka V“.

Nyní si představme, že budeme snažit otáčet rotorem alternátoru rychleji. Ostatní alternátory nedovolí zrychlit otáčení našeho stroje. Dovolí jen, aby se rotor natočil o určitý úhel ε proti výslednému magnetickému poli Φ_V .

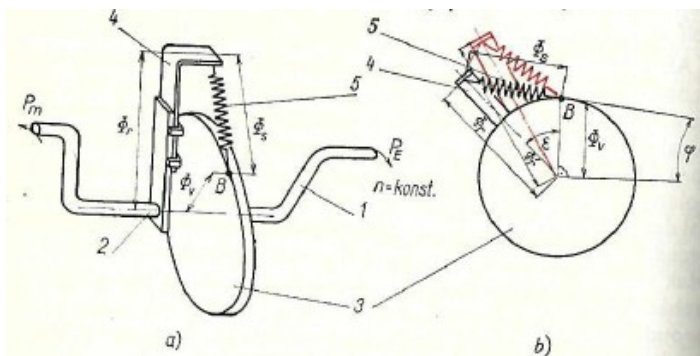
Zároveň začne statorovým vinutím protékat takový elektrický střídavý proud, který vytvoří magnetické pole Φ_S , které bude doplňovat pole rotoru Φ_r na potřebné pole Φ_V (obr. 2).

$$\Phi_V = \Phi_S + \Phi_r \quad \text{rovnice vektorového součtu (4)}$$

Čím větší bude výkon stroje, který otáčí rotorem, tím větší bude úhel ε na Obr. 2 a tím větší bude i skutečný činný výkon, který stroj do sítě dodává.

Budeme-li měnit ještě budící proud I_b , dostaneme pro různé výkony P , jimiž otáčíme hřídelem, křivky na obr. 1. Z těchto křivek můžeme snadno určit potřebný budící proud pro žádaný činný a zdánlivý výkon stroje.

Spolupráci alternátorů si můžeme názorně vysvětlit na mechanickém modelu na obr. 2 [6].



Obr.2: Mechanický model Synchronního stroje

Tento model se skládá ze dvou hřídelů 1 a 2, které mají společnou osu. Na hřídeli 1 je nasazen kotouč 3, na hřídeli 2 je nasazena páka 4. Délku páky Φ_r lze měnit. Páka 4 a kotouč 3 jsou vzájemně spojeny pružinou 5. Velikost průměru kotouče představuje magnetický tok Φ_V a tedy i napětí na svorkách alternátoru. Jeho směr si představíme jako spojnicí bodu B, v němž je uchycena pružina se středem kotouče. Délka ramene 4 představuje magnetický tok Φ_r , délka pružiny 5 představuje magnetický tok Φ_S .

Veličiny:

proud statoru	I_S (statorový proud, proud vinutí statoru)
budící proud	I_b
mezní hodnoty budícího proudu	I_{b0}
výsledné / potřebné magnetické pole	Φ_V (napětí na svorkách alternátoru, velikost průměru kotouče 3)
magnetické pole	Φ_S (délka pružiny 5)
magnetické pole rotoru	Φ_r (budící stejnosměrný proud rotoru, délka páky / ramene 4)
zátěžný / zatěžovací úhel	ε (vzájemný úhel mezi ramenem 4 vzhledem k bodu B na kotouči 3)
výkon	P
poháněcí mechanický výkon	P_m
skutečný činný výkon dodávaný do sítě	P_E

Měníme-li jenom délku Φ_r ramena 4, mění se délka pružiny Φ_S . Na hřídel se však nepřenáší žádný točivý moment. Dále spojíme hřídel 1 s takovým poháněcím zařízením, které bude jeho rychlost otáčení udržovat bez zřetele na velikost momentu na hřídeli. Budeme-li se snažit otáčet hřídelem 2 rychleji, než se otáčí hřídel 1, počne se napínat pružina 5, rameno 4 se začne vychylovat vzhledem k bodu B, zvětšuje se jejich vzájemný úhel, který představuje zátěžný úhel ε . Všimněme si, že čím větší bude Φ_r (tj. budící stejnosměrný proud rotoru), tím menší bude zatěžovací úhel ε pro přenesení stejného momentu z jednoho hřídele na druhý. Popsané souvislosti a výsledky lze shrnout do následujících tabulek.

Tabulka 3: Mechanické a elektrické analogie

Mechanical quantity			Electrical quantity	
	translational system	rotational system		
force torque	F [N]	M [Nm]	current	i [A]
position	x [m] $v = \frac{dx}{dt}$	φ [rad] $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$		
velocity	v [$\frac{m}{s}$]	ω [$\frac{rad}{s}$]	voltage	u [V]
acceleration	a [$\frac{m}{s^2}$] $a = \frac{dv}{dt}$	α [$\frac{rad}{s^2}$] $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$		
mass	m [kg] $F = m \frac{dv}{dt}$ Newton's law	J [kgm ²] $M = J \frac{d\omega}{dt}$	capacitance	C [F] $i = C \frac{du}{dt}$
stiffness	k [$\frac{N}{m}$] $F = k(x_1 - x_2)$ $\frac{dF}{dt} = k(v_1 - v_2)$	k [$\frac{Nm}{rad}$] $M = k(\varphi_1 - \varphi_2)$ $\frac{dM}{dt} = k(\omega_1 - \omega_2)$	inductance	L [H] $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(v_1 - v_2)$
damping	b [$\frac{Ns}{m}$] $F = b \frac{dx}{dt} = b \cdot v$	b [$\frac{Nms}{rad}$] $M = b \frac{d\varphi}{dt} = b \cdot \omega$	resistor	R [Ω] $i = \frac{1}{R}u$
power P[W]	$P = F \cdot v$	$P = M \cdot \omega$		$P = u \cdot i$

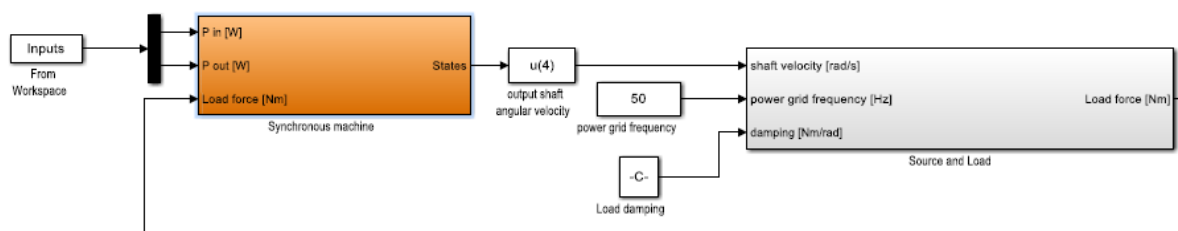
Tabulka 4: Parametry mechanického modelu synchronního stroje.

Rotor moment of inertia	Stator moment of inertia	Length of arm 4	Disk 3 radius	Damping	Stiffness
J_r [kgm ²]	J_v [kgm ²]	Φ_r [m]	Φ_v [m]	b [Nms/rad]	k [Nm/rad]
168 870	172 141	171	5 749	0.50	15.83

Tabulka 5: Popis činností mechanického modelu synchronního elektrického stroje

	Synchronní stroj pracující samostatně	Synchronní stroj pracující se sítí
Zvětšování budícího proudu	zvýšuje se napětí na svorkách	mění se jalový proud podle křivek V (Obr. 1)
Zmenšování budícího proudu	snižuje se napětí na svorkách	
Zvětšování výkonu poháněcího stroje	zvětšuje se rychlost otáčení rotoru a kmitočet	roste dodávaný činný výkon
Zmenšování výkonu poháněcího stroje	zmenšuje se rychlost otáčení rotoru a kmitočet	klesá dodávaný činný výkon

Mechanický model synchronního stroje je modelován v prostředí MATLAB-SIMULINK a jeho schéma je na následujícím obrázku.

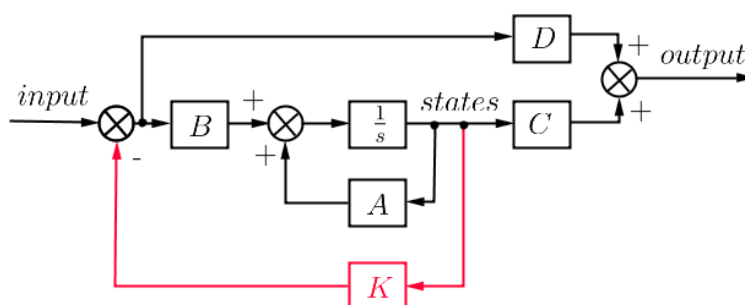


Obr. 3 Mechanický model v programu SIMULINK.

3 Stavová zpětná vazba

Existuje více způsobů, jak získat zpětnou vazbu [21].

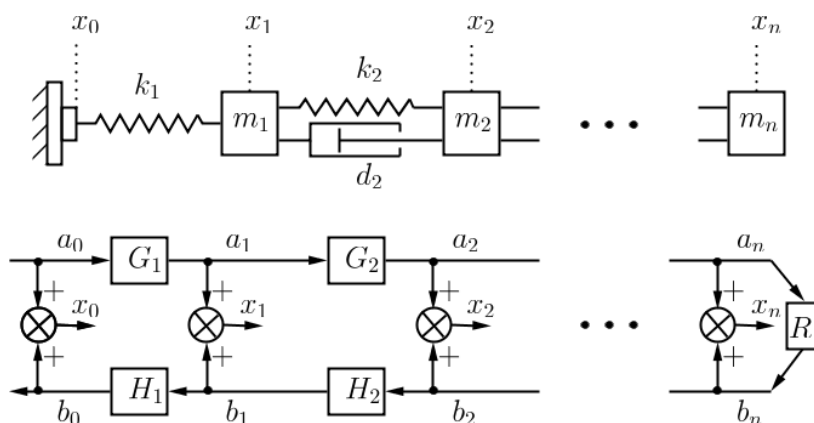
V této práci je vybrán Ackermanův vzorec [20], kde je specifikováno umístění pólů podle následujícího obrázku.



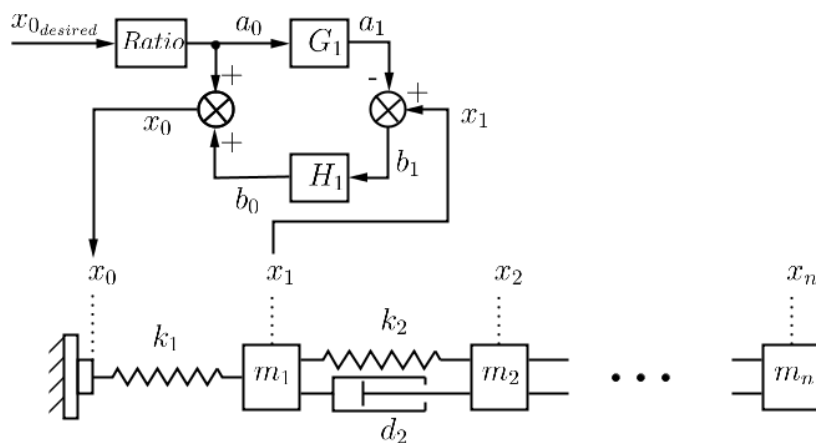
Obr. 4 Stavová stabilizační zpětná vazba

4 Vlnové řízení

Vlnové řízení je založeno na modelu vlny mechanické soustavy [12], [13]. Každý dynamický systém může být reprezentován modelem vlny [14], [15]. Způsob získání je odvozen v literatuře [22], [23].



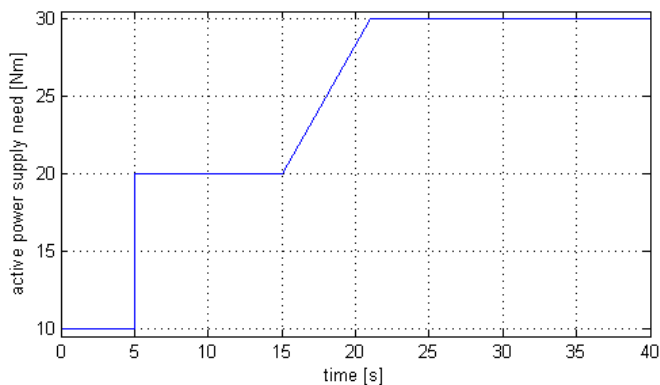
Obr. 5 Model se soustředěnými hmotnostmi vyhovující vlnovému řízení.



Obr. 6 Návrh regulátoru.

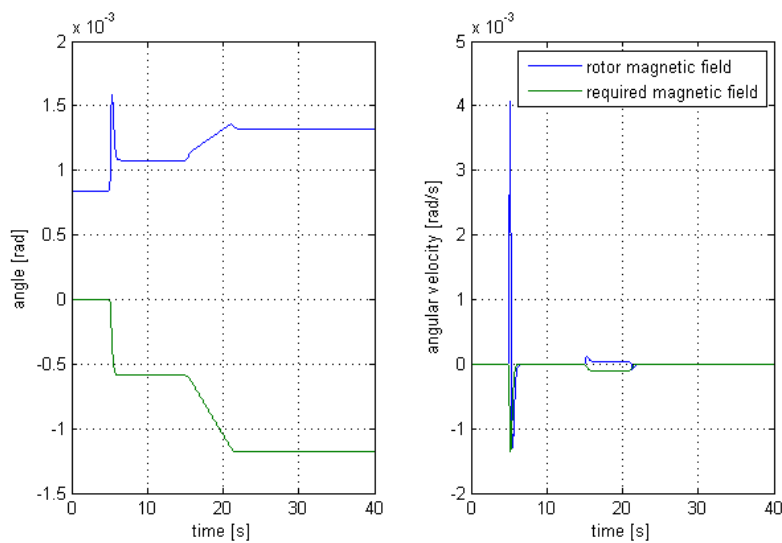
5 Simulační výsledky

Na následujícím obrázku je znázorněna odezva systému na skok a rampu použité jako zatěžovací moment reprezentující aktuální zatížení.

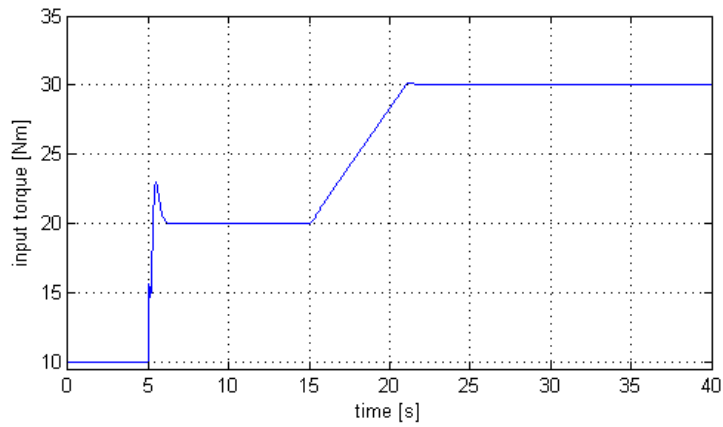


Obr. 7 Aktuální zatěžovací točivý moment.

Nyní uvedeme výsledky simulací se standardním stavovým regulátorem typu PI

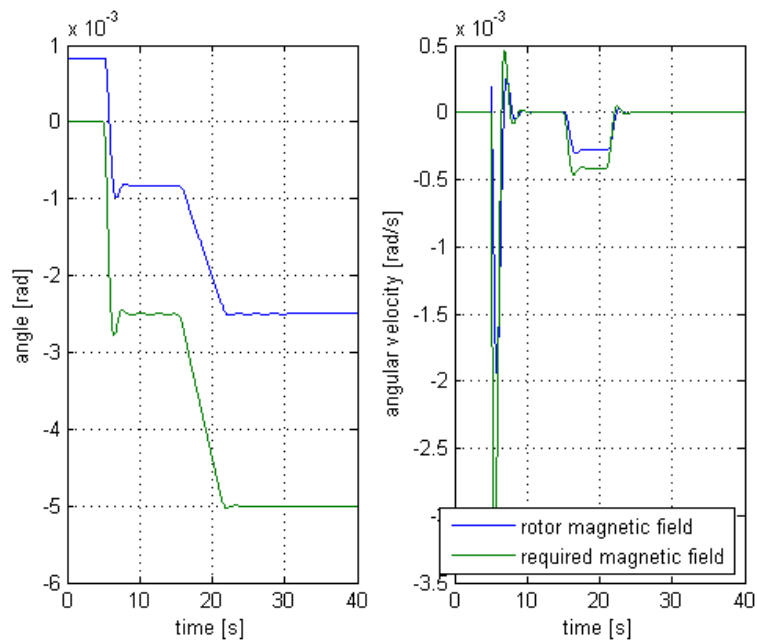


Obr. 8 Stavové průběhy s aplikovaným řízením.

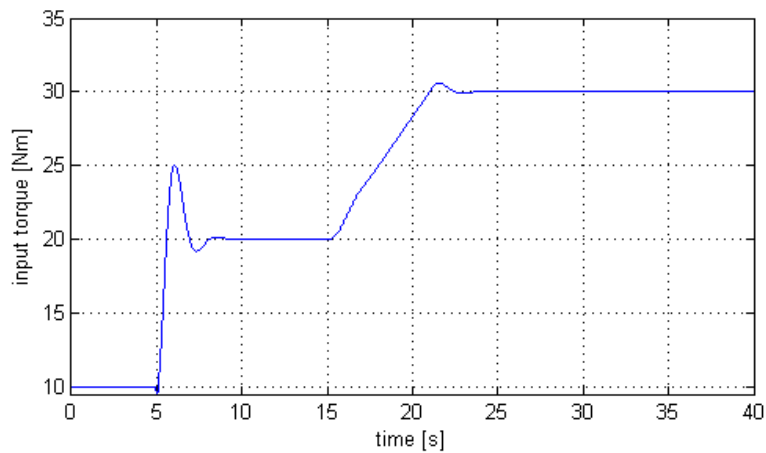


Obr. 9 Vstupní moment.

Pro porovnání následující výsledky simulací jsou při aplikaci vlnového řízení.



Obr. 13: Stav systému s aplikovaným vlnovým řízením.



Obr. 14: Vstupní točivý moment při aplikaci vlnového řízení.

6 Závěry

V projektu byly zkoumány vlastnosti regulace založené na vlnovém modelu mechanického systému, kterým může být reprezentován každý system [2]. V příspěvku budou porovnány simulační výsledky při použití konvenčního PD regulátoru ve stavové zpětné vazbě a při použití „vlnového“ regulátoru. Simulace jsou prováděny v prostředí MATLAB-SIMULINK.

Důvody pro výzkum a aplikaci metod automatického řízení na „mechanický model“ synchronního elektrického stroje sou následující. V minulosti byly vlastnosti SS zkoumány na mechanickém modelu, protože teorie obecného elektrického stroje ještě nebyla zformulována [3], ale i v době následující [4], [6]. Zkoumání vlastností SS bylo, ale i v současnosti je proto názornější a pochopitelnější na mechanickém modelu - MMSS. To nevybočuje nijak z technických zkušeností a časových posloupností, protože v technickém rozvoji vždy elektrotechnika následovala až za strojařinou. Nejprve museli strojaři vyrobit zařízení (součásti motorů, ložiska, ale i elektrické kabely, spínače) a teprve potom mohli elektrotechnici provádět laboratorní zkoušení, měřit a zaznamenávat data, a pak teprve mohli analyzovat výsledky, navrhnout teorie a formulovat technické principy.

V současnosti jsou již modely obecných elektrických strojů známé, např. Parkův model – Parkova transformace [8], [10] nebo podle jiného autora [9], [11]. Všechny tyto modely jsou však složité, komplexní a vyžadují hluboké znalosti elektrotechnické, ale i matematické a fyzikální. Takové hluboké znalosti mají studenti elektrotechnických fakult Technických univerzit s příslušnou specializací (elektroenergetika, elektrické pohony), nikoliv však studenti jiných fakult (strojních, informačních technologií, dopravních, apod.). Přitom do praktického provozního styku s elektrickými motory, generátory/alternátory, rozvody elektrické energie a elektrizačními soustavami přijdou do styku prakticky všichni technici a rovněž i hodně poučených laiků.

- I. Používání MMSS by přispělo k zlepšení výuky a všeobecnějšímu pochopení činnosti elektrických strojů všech studentů technických středoškolských a univerzitních škol, ale i ekonomických a informačně-inženýrských škol a fakult.
- II. Používání MMSS by specialistům na řízení, tzn. neelektrikářům, usnadnilo aplikaci moderních nestandardních metod (Wave-Based, adaptivních, prediktivních, apod.) na řízení, regulaci a optimalizaci provozu elektrických strojů (střídavých synchronních a asynchronních, stejnosměrných).
- III. Nahlíženo z druhé strany to také usnadní porozumění pokročilých algoritmů řízení i specialistům elektrotechnikům a energetikům, kteří pochopitelně nemají (nemohou mít !) hluboké znalosti metod řízení a regulace.

Výše uvedené „zprehlednění“ výuky a zvýšená flexibilita studentů by bylo ve shodě s požadavky, resp. s podmínkami současné IT a internetové společnosti, kdy „poločas rozpadu“ znalostí je mnohem menší než tomu bývalo a je tedy nutné učit „principy“ a nikoliv detailní a exaktní znalosti. ... tj. citace z dubna 2016 pana Prof. Jiřího Witzanyho – emeritního rektora ČVUT. V neposlední řadě by změna výuky provozu elektrických strojů a elektrotechniky mohla trochu řešit problém nižšího zájmu o studium FEL ČVUT, protože se studentům zdá příliš náročné. Je k tomu nutno říci, že naopak o studium na ČVUT Fakultu strojní a Fakultu stavební, je zájem dostatečný.

Literatura

- [1] M. Valášek, M. Nečas, Z. Neusser, J. Pelikán, P. Neuman: Synchronous Machine Electromechanical and Mechanical Analogy Model Comparison (English). ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, June 19 - 22, 2017, Prague, Czech Republic.
- [2] M. Valášek, Z. Neusser, P. Neuman, M. Nečas: Wave-based Modeling and Control of Interconnected Synchronous Machines - Application on Mechanical Model. IFAC and CIGRE/CIREP Workshop on Control of Transmission and Distribution Smart Grids, October 11-13, 2016. Prague, Czech Republic.
- [3] Bergvall, R. C., Quantitative Mechanical Analysis of Power System Transient Disturbances. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Volume 47, Issue 3, July 1928*, pp. 915-925.

- [4] List, V., Provazník, F. Electrical Machines I (in Czech). Technical Guide, vol. LVIII, 1953.
- [5] Blake, A. P., A Mechanical Analog for Synchronous Machine Transient Stability. *International Journal of Electrical Engineering Education*, June 1963, no. 1, pp. 125-128.
- [6] Pavelka, J. Synchronous Machines (in Czech), ed. SNTL, Prague, 1965.
- [7] Park, R. Two Reaction Theory of Synchronous Machines. *Transactions of the AIEE*, vol. 48, 1929, pp. 716-730.
- [8] Park, R. Method of improving the stability of interconnected power systems, U.S. Pat. 3515893 A, 1970.
- [9] Laible, T. Die Theorie der Synchromachine im nichtstationären Betrieb. Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag, 1952.
- [10] Concordia, C. Two Reaction Theory of Synchronous Machines with Any Balanced Terminal Impedance. *Transactions of the AIEE*, vol. 56, 1937, p. 1124-1127.
- [11] Měříčka, J. and Zoubek, Z., The general theory of electrical machines (in Czech). SNTL Prague, 1973.
- [12] O'Connor, W. J., Wave-based Analysis and Control of Lump-Modelled Flexible Robots, IEEE Conference, 2007.
- [13] Valasek, M., Marek, O. „The movement control of the elastic structures using the Wave-based method (in Czech)”, *Bulletin of Applied Mechanics* 4 (13), 34-38, 2008.
- [14] Valasek, M., Neusser, Z. „Wave-Based Control - stability without knowledge of the model (in Czech)”, 11th Conference ARaP, Prague, Czech Republic, November 25, 2015.
- [15] Valasek, M., Neusser, Z., and Gordon, T. „Wave-based control for intelligent longitudinal traffic column,” 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Road and Tracks, Graz, 2015.
- [16] Weber, H. „New Frequency and Power Oscillations in the Enlarged Westeuropean Interconnected Network Reasons and Counter Measures“, Preprints of the IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, Beijing, China, 1997.
- [17] Weber, H. Equivalent System of Frequency and Power Oscillations in European Interconnected Network. Internal workshop CEPS, Prague, September 1998.
- [18] Neuman P., Smart Grid methods of Transmission System Operators for improved Power System Control. Preprints of 18th World Congress IFAC, Milan, August 2011.
- [19] Neuman P. and Jirkovsky J., Power Systems: Synchronization of Synchronous Generator in Engineering and Training Simulators. *Transactions on Electrical Engineering*, Vol.4, No. 2, June 2015, pp. 42-50, ISBN 1805-3386.
- [20] Ackermann, J. E., 1977. On the synthesis of linear control systems with specified characteristics. *Automatica*, 13(1), pp. 89-94.
- [21] Franklin, G. F., Powell, D. J. & Emami-Naeini, A., 1994. *Feedback control of dynamic systems*. 7 ed. New Jersey: Prentice Hall.
- [22] O'Connor, W. J., 2005. Wave-based Modelling and Control of Lumped, Multibody Flexible. *Proceedings of Multibody Dynamics 2005, ECCOMAS Thematic Conference*.
- [23] Valášek, M. & Marek, O., 2016. Modelling and stability analysis of wave-based control.. *Kybernetika*.

Neuman Petr
 NEUREG, sdr.
 Studnická 2128/27, 193 00 Praha,
neumanp@volny.cz
 Mob.: +420 777 648 906

Neusser Zdeněk
 Fakulta strojní, ČVUT v Praze
 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, odbor mechaniky a mechatroniky
 Technická 4, 166 07 Praha
Zdenek.Neusser@fs.cvut.cz