



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**MODELOVÁNÍ A SIMULACE ZDROJOVÉ JEDNOTKY
ELEKTROCENTRÁLY**

Jaroslav Kalous¹

Abstrakt: V příspěvku je uveden jednak model vznětového motoru a jednak model synchronního generátoru s permanentními magnety s identifikací jejich parametrů. Model synchronního generátoru s permanentními magnety byl verifikován na základě praktických měření experimentálního generátoru při chodu naprázdno, při chodu nakrátko a při čistě odporovém symetrickém zatížení různé velikosti. Dále příspěvek prezentuje ukázkou výsledků simulace primární zdrojové jednotky elektrocentrály 3. generace, tvořené diesel-elektrickým soustrojím a šestipulsním diodovým usměrňovačem.

Klíčová slova: elektrocentrála, synchronní generátor, modelování, simulace

Úvod

Mobilní zdroje elektrické energie čili elektrocentrály 3. generace (zkr. EC3G) jsou zdroje, skládající se jednak z motor-generátorové jednotky a jednak z jednotky výkonové a řídicí elektroniky. Motor-generátorová jednotka, tvořená hnacím spalovacím motorem a synchronním generátorem s permanentními magnety (SGPM), pracuje s proměnnou rychlostí otáčení v závislosti na konkrétním zatížení EC3G. Díky tomu má výstupní napětí synchronního generátoru proměnnou velikost a také jeho kmitočet není stálý. Úkolem jednotky výkonové a řídicí jednotky je pak generované napětí přeměnit na harmonické napětí požadované velikosti a kmitočtu a dále pomocí řídicích obvodů optimalizovat rychlost otáčení motor-generátorové jednotky podle zadaného algoritmu řízení s cílem dosáhnout minimální spotřeby paliva. EC3G používají k pohonu SGPM zpravidla vznětového motoru (VzM), což je podmíněno především ekonomickými a logistickými důvody.

V tomto příspěvku je uveden způsob tvorby modelu soustrojí „VzM – SGPM“, včetně identifikace parametrů obou strojů a verifikace modelu SGPM na základě měření na skutečném generátoru.

Model vznětového motoru

Způsob vytváření simulačního modelu vznětového motoru, který vychází z katalogových údajů výrobce motoru a z výsledků termodynamických výpočtů, je podrobně uveden ve zprávě [1] a byl prezentován na konferenci IM2001. Model se skládá z následujících hlavních částí:

¹ Doc. Ing. Jaroslav Kalous, CSc., Vojenská akademie v Brně, katedra elektrotechniky a elektroniky, PS 13-K301, Kounicova 65, 612 00 Brno, e-mail: jaroslav.kalous@vabo.cz

Palivové čerpadlo s omezovačem dávky paliva, které je modelováno soustavou rovnic:

$$T_{pc} \frac{dd_p}{dt} + d_p = d_{pz},$$

$$d_{ps} = \begin{cases} d_{min} & \text{pro } d_p \leq d_{min}, \\ d_p & \text{pro } d_{min} < d_p < d_{max}, \\ d_{max} & \text{pro } d_{max} \leq d_p, \end{cases} \quad (1)$$

kde d_{ps} , d_{pz} jsou skutečná, resp. zadaná dávka paliva při jednom vstřiku,

d_{min} , d_{max} jsou minimální, resp. maximální dávka paliva při jednom vstřiku,

T_{pc} je časová konstanta palivového čerpadla, vyjadřující jeho setrvačnost.

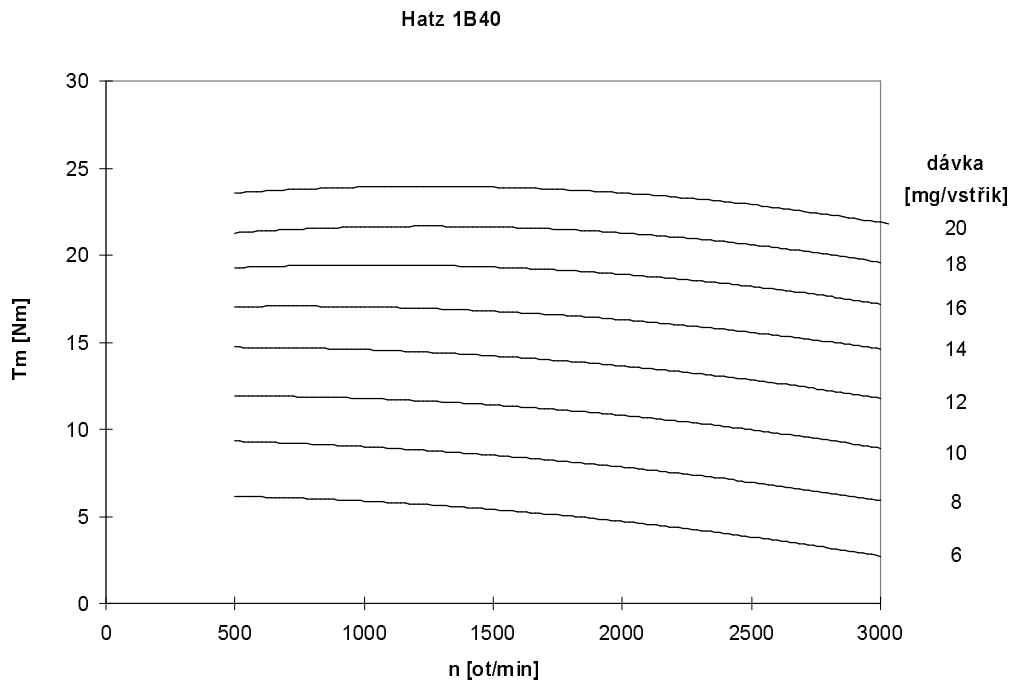
Zdroj hnacího momentu, který bere v úvahu známou skutečnost, že hnací moment motoru T_m závisí jednak na skutečné dávce paliva d_{ps} a jednak na úhlové rychlosti ω_m . Tato závislost může být s dostatečnou přesností vyjádřena polynomem druhého stupně s proměnnými koeficienty ve tvaru

$$T_m(\omega_m, d_{ps}) = a_2(d_{ps})\omega_m^2 + a_1(d_{ps})\omega_m + a_0(d_{ps}), \quad (2)$$

přičemž závislosti koeficientů $a_i(d_{ps})$ jsou modelovány polynomem třetího stupně ve tvaru

$$a_i(d_{ps}) = b_{3i}d_{ps}^3 + b_{2i}d_{ps}^2 + b_{1i}d_{ps} + b_{0i}. \quad (3)$$

Na obr. 1 je uvedena síť statických momentových charakteristik vznětového motoru, použitého ve fyzickém modelu elektrocentrály, pro dávky paliva v rozmezí od $d_{min} = 6 \text{ mg/vstřik}$ do $d_{max} = 20 \text{ mg/vstřik}$.



Obr. 1. Statické momentové charakteristiky vznětového motoru

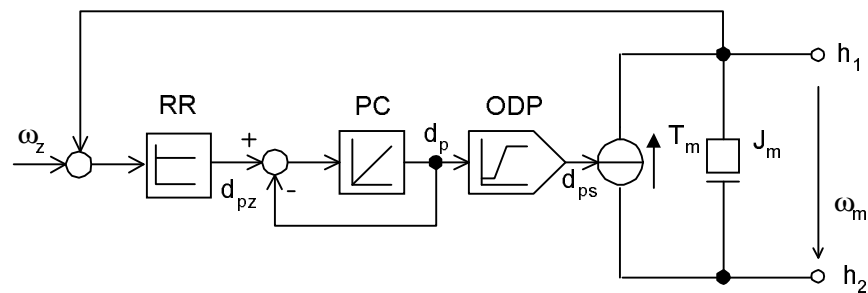
Rotor vznětového motoru je modelován všeobecně známou pohybovou rovnicí ve tvaru

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m(\omega_m, d_{ps}) - T_g, \quad (4)$$

kde J_m je celkový hmotný moment setrvačnosti rotoru motoru,

T_g je zatěžovací moment motoru, představovaný v elektrocentrálách elektromagnetickým momentem generátoru.

Na obr. 2 je nakresleno simulační schéma modelu vznětového motoru, které vychází z výše uvedených rovnic (1) až (4). Na vstup simulačního modelu byl zařazen proporcionální regulátor rychlosti RR . Vstupní veličinou modelu je žádaná úhlová rychlost ω_z , výstupní veličinou je úhlová rychlost motoru ω_m mezi svorkami h_1 a h_2 .



Obr. 2. Úplné schéma modelu vznětového motoru

RR - regulátor rychlosti, PC - palivové čerpadlo, ODP - omezovač dávky paliva, T_m - moment motoru, J_m - rotor motoru, d_{pz} , d_{ps} - žádaná a skutečná dávka paliva, ω_z , ω_m - žádaná a skutečná úhlová rychlost hřídele motoru

Model vznětového motoru byl sestaven účelově pro simulační analýzy soustrojí „VzM – SGPM“, pracujícího v rozmezí otáček od 1500 ot/min do 3000 ot/min, což je předpokládaný rozsah rychlostí motor-generátorové jednotky EC3G. Ověřovací simulace prokázaly, že model VzM dává vyhovující výsledky z hlediska pohonu SGPM.

Model synchronního generátoru

Synchronní generátor s permanentními magnety mění v EC3G mechanickou energii hnacího vznětového motoru na elektrickou energii, která se dále zpracovává v jednotce výkonové a řídicí elektroniky.

Vnitřní indukovaná fázová napětí jsou pro případ symetrického SGPM vyjádřena následujícími vztahy [2]:

$$\begin{aligned} u_{ia} &= U_{im} \sin \omega t, \\ u_{ib} &= U_{im} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right), \\ u_{ic} &= U_{im} \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Amplitudy vnitřních fázových napětí U_{im} jsou dány vztahem

$$U_{im} = \frac{p}{2} \Psi \omega_m, \quad (6)$$

kde p je počet pólů permanentního magnetu na rotoru SGPM a

Ψ je celkový spřažený magnetický tok vinutí každé fáze statoru.

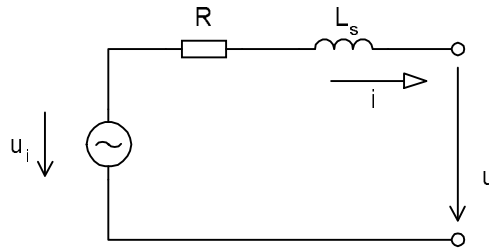
Úhlový kmitočet generovaných napětí je roven

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m. \quad (7)$$

Amplitudy svorkových fázových napětí generátoru U_j nejsou obvykle stejně velké jako amplitudy vnitřních fázových napětí U_{im} s výjimkou případu, kdy žádnou statorovou cívku neprotéká proud. Příčiny tohoto rozdílu jsou následující:

- reakce kotvy čili změna magnetického pole ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem SGPM při průchodu proudu statorovými cívkami,
- vlastní indukčnosti cívek statorového vinutí a
- elektrické odpory cívek statorového vinutí.

Protože svorková fázová napětí SGPM jsou, až na výše uvedenou výjimku, vždy menší než vnitřní indukovaná fázová napětí, lze vliv uvedených tří faktorů vyjádřit náhradním schématem pro každou fázi dle obr. 3.



Obr. 3. Náhradní schéma jedné fáze SGPM

V tomto schématu představuje rezistor R odpor cívky jedné fáze statorového vinutí. Indukčnost L_s se nazývá *synchronní indukčnost* a zahrnuje v sobě jednak vlastní indukčnost cívky jedné fáze statorového vinutí L a jednak indukčnost L_{rk} , reprezentující vliv reakce kotvy na tuto fázi čili

$$L_s = L + L_{rk}. \quad (8)$$

Náhradní schéma platí za předpokladu, že zátěž SGPM je lineární a symetrická. Nicméně lze je použít i pro případy nelineární i nesymetrické zátěže, představované v případě EC3G trojfázovým šestipulsním usměrňovačem.

Výstupní fázová napětí SGPM jsou potom vyjádřena modelujícími vztahy:

$$\begin{aligned} u_a &= u_{ia} - Ri_a - L_s \frac{di_a}{dt}, \\ u_b &= u_{ib} - Ri_b - L_s \frac{di_b}{dt}, \\ u_c &= u_{ic} - Ri_c - L_s \frac{di_c}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

za předpokladu naprosto symetrického SGPM.

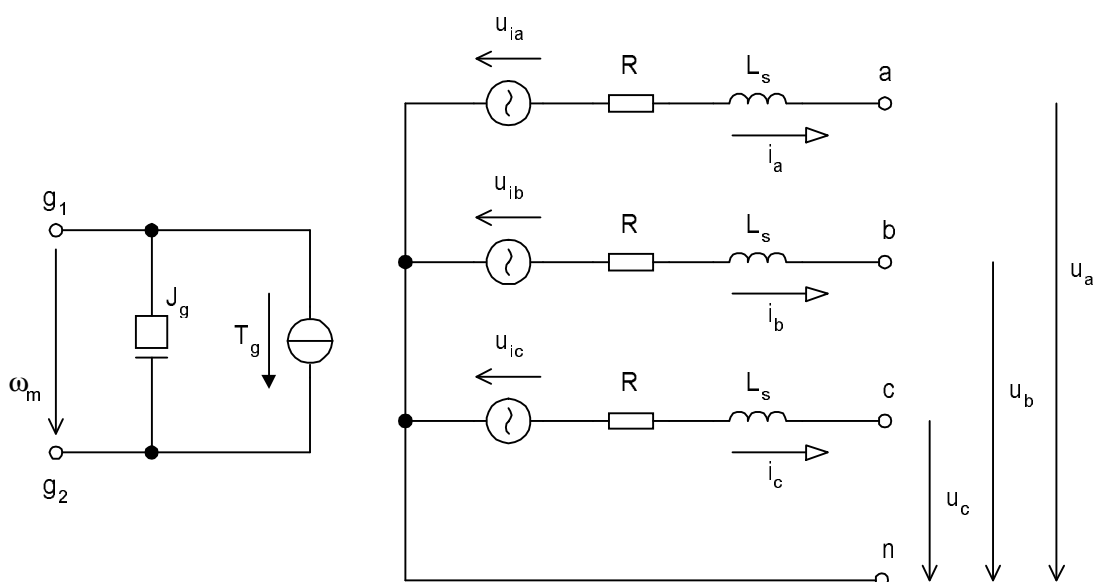
Indukovaný elektromagnetický moment SGPM, jímž je zatěžován hnací vznětový motor, je dle [2] roven

$$T_g = -T_{g0} - p\sqrt{\frac{3}{2}}\Psi \left[\frac{1}{\sqrt{2}}(i_b - i_c)\cos\omega t - \sqrt{\frac{2}{3}}\left(i_a - \frac{1}{2}i_b - \frac{1}{2}i_c\right)\sin\omega t \right], \quad (10)$$

kde T_{g0} je moment SGPM naprázdno,

i_a, i_b, i_c jsou fázové proudy ve satorovém vinutí SGPM.

Vztahy (9) a (10) jsou modelující vztahy pro symetrický SGPM. Na základě nich je možné nakreslit branové schéma na obr. 4 pro zapojení SGPM do hvězdy s vyvedeným středním uzlem. V tomto schématu je prvkem J_g označen hmotný moment setrvačnosti rotoru generátoru. Svorky $g1 - g2$ vymezují vstup modelu, který se spojí s výstupem modelu vznětového motoru VzM, svorky a, b, c a n jsou výstupními svorkami SGPM, k nimž se připojuje příslušná zátěž celého soustrojí.



Obr. 4. Branové schéma modelu SGPM

Výhodou modelu dle obr. 4, popsaného vztahy (9) a (10) je jeho jednoduchost a snadná realizovatelnost v libovolném programovacím prostředí. To jej předurčuje k užití zejména ve složitějších simulačních úlohách, jimiž je například simulace systému „VzM – SGPM – zátěž“.

Identifikace parametrů SGPM

Výše popsaný branový model SGPM obsahuje čtyři veličiny, jejichž velikost je třeba určit, aby bylo možné jej používat k simulačním analýzám. Jsou to:

- celkový spřažený magnetický tok,
- synchronní reaktance,
- odpor vinutí kotvy a
- moment generátoru naprázdno.

Protože SGPM má konstantní spřažený magnetický tok, daný užitím permanentních magnetů, je jeho výstupní napětí závislé pouze na úhlové rychlosti otáčení jeho rotoru. Jeho velikost snadno určíme ze vztahu (6)

$$\Psi = \frac{2U_{im}}{p\omega_m}. \quad (11)$$

Moment generátoru naprázdno je dán známým vztahem

$$T_{g0} = \frac{P_{g0}}{\omega_m}, \quad (12)$$

kde P_{g0} je výkon hnacího motoru při chodu naprázdno.

Ke zjištění velikostí těchto dvou parametrů byl experimentální SGPM poháněn otáčkově řízeným asynchronním motorem při chodu naprázdno. Měřeno bylo výstupní sdružené napětí U_{s0} , kmitočet f generátoru a také výkon hnacího motoru P_{g0} při různé rychlosti otáčení celého soustrojí n . V Tab. 1 jsou soustředěny výsledky měření závislosti sdruženého napětí U_{s0} , výkonu hnacího motoru P_{g0} a kmitočtu f na otáčkách n při chodu generátoru naprázdno.

Tab. 1. Naměřené a vypočítané veličiny při chodu naprázdno

Naměřeno				Vypočteno	
n	U_{s0}	P_{g0}	f	Ψ	T_{g0}
ot/min	V	W	Hz	Wb	Nm
307	42,4	147	29,1	0,1794	4,573
518	72	242	50,3	0,1806	4,462
882	127	393	88,2	0,1870	4,255
1178	170	528	118	0,1875	4,280
1476	213	672	148	0,1875	4,348
1774	254	828	177	0,1860	4,457
2071	297	981	207	0,1863	4,524
2369	339	1112	237	0,1859	4,483
2667	382	1260	267	0,1861	4,512
2958	421	1454	296	0,1849	4,694

Střední hodnota celkového spřaženého magnetického toku je $\Psi = 0,187 \text{ Wb}$, střední hodnota momentu generátoru při chodu naprázdno je $T_{g0} = 4,47 \text{ Nm}$. Kmitočet generovaného napětí f zřejmě vyhovuje ve všech měřených případech vztahu

$$f = \frac{n}{10} = \frac{pn}{120}, \quad (13)$$

což indikuje, že SGPM je dvanáctipólový ($p = 12$).

K určení velikosti synchronní reaktance, resp. synchronní indukčnosti byl SGPM měřen při chodu nakrátko, což je jedna z velmi často používaných a osvědčených metod [2]. Protože velikost primárního magnetického toku ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem je v případě SGPM konstantní, nemůžeme u takového generátoru změřit tzv. *charakteristiku nakrátko*, tj. závislost zkratového proudu libovolné fáze I_k na budícím proudu I_b při konstantní rychlosti rotoru čili $I_k = f(I_b)$, z níž by bylo možné zjistit velikost synchronní reaktance, resp. synchronní indukčnosti. Lze však měřit velikosti zkratového proudu libovolné fáze při různých rychlostech jeho rotoru a velikosti fázového nebo

sduženého napětí nezatíženého SGPM při stejných rychlostech a z toho pak vypočítat velikost synchronní reaktance či synchronní indukčnosti.

Jak vyplývá z náhradního schématu jedné fáze SGPM na obr. 3 je velikost zkratového proudu jedné fáze dána velikostí její vnitřní impedance. Na základě toho pak snadno vypočítáme velikost synchronní indukčnosti (za předpokladu, že odpor vinutí R je zanedbatelně malý) ze vztahu

$$L_s \doteq \frac{U_{f0}}{\omega_e I_k} = \frac{60}{p\pi} \frac{U_{f0}}{n I_k}, \quad (14)$$

kde U_{f0} je fázové napětí SGPM při chodu naprázdno.

V Tab. 3 jsou uvedeny výsledky měření proudů a napětí daného SGPM při třech různých rychlostech a vypočítané velikosti synchronní indukčnosti L_s podle vztahu (14). Střední hodnota synchronní indukčnosti je potom rovna $L_s = 1,09 \text{ mH}$.

Tab. 2. Naměřené a vypočítané veličiny při chodu nakrátko

Naměřeno			Vypočteno		
n	I_k	U_{s0}	U_{f0}	ω_e	L_s
ot/min	A	V	V	rad/s	mH
1788	122	256,5	148,1	1123	1,080
2384	121	342,1	197,5	1498	1,090
2980	120	427,6	246,9	1872	1,099

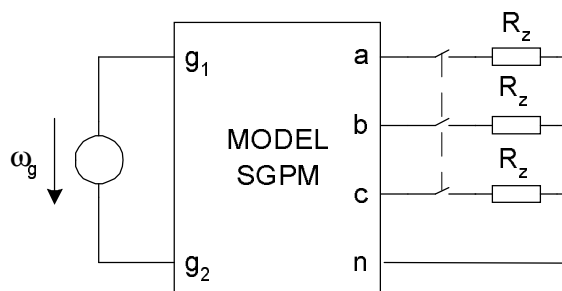
Odpor vinutí jedné fáze SGPM, změřený obvyklou stejnosměrnou metodou, dosahoval průměrné hodnoty $R = 0,8 \Omega$.

Verifikace modelu SGPM

K ověření správnosti matematického modelu SGPM byl v programovém prostředí DYNAST[®] sestaven a odladěn počítačový model SGPM, který pak byl použit k následujícím verifikačním simulačním experimentům:

- chod SGPM naprázdno při různých rychlostech,
- chod SGPM nakrátko při různých rychlostech a
- chod SGPM při různém odporovém zatížení a při různých rychlostech.

Simulační schéma modelu SGPM se zatížením je uvedeno na obr. 5. Přitom symetrická zátěž, tvořená trojicí stejně velkých zatěžovacích rezistorů R_z , je k vlastnímu modelu SGPM připojována spínačem až po skončení eventuálních přechodných dějů v modelu, takže simulační experimenty odpovídají chodu generátoru v ustáleném stavu.



Obr. 5. Simulační schéma modelu SGPM se zatížením

Výsledky těchto experimentů byly potom porovnány s výsledky korespondujících měření experimentálního SGPM [3] a zjištěny příslušné odchylky mezi simulacemi a měřeními.

a) chod naprázdno

Při tomto experimentu byla k modelu SGPM z důvodů stability simulačních výpočtů připojena symetrická zátěž o velikosti $3 \times 100 \text{ k}\Omega$, při které je možné považovat generátor za nezatížený (jí odpovídající proud je cca 2 mA). V Tab. 4 jsou uvedeny výsledky měření SGPM a odpovídajících simulačních experimentů při chodu SGPM bez zatížení.

Tab. 4. Naměřené a vypočítané velikosti napětí naprázdno

Naměřeno		Simulace	Výpočet		Odchylka
n	U_{s0}	$U_{s0\max}$	U_{f0}	U_{s0}	δ
ot/min	V	V	V	V	%
219,2	42,4	34,1	24,1	41,8	-1,38%
503,3	72	59,0	41,7	72,3	0,38%
882	127	103,4	73,1	126,6	-0,28%
1178	170	138,1	97,7	169,1	-0,51%
1476	213	173,1	122,4	212,0	-0,47%
1774	254	208,0	147,1	254,7	0,29%
2071	297	242,8	171,7	297,4	0,12%
2369	339	277,8	196,4	340,2	0,36%
2667	382	312,7	221,1	383,0	0,26%
2958	421	346,8	245,2	424,7	0,89%

Ze srovnání výsledků v Tab. 4 vyplývá, že odchylka mezi naměřenými a simulačně zjištěnými velikostmi sdruženého napětí nepřesahuje hodnotu $1,5 \%$, což lze oprávněně považovat za velmi dobrý výsledek.

b) chod nakrátko

Při tomto experimentu byla k modelu SGPM připojena symetrická zátěž o velikosti $3 \times 10 \text{ }\mu\Omega$, což prakticky odpovídá zkratu mezi příslušnou fází a středním vodičem. V Tab. 5 jsou uvedeny výsledky měření SGPM a odpovídajících simulačních experimentů při chodu SGPM nakrátko.

Tab. 5. Naměřené a vypočítané proudy nakrátko

Naměřeno		Simulace		Odchylka
n	I_k	$I_{k\max}$	I_k	δ
ot/min	A	A	A	%
1788	122	162,9	115,2	-5,58%
2384	121	165,2	116,8	-3,46%
2980	120	166,3	117,6	-2,01%

Ze srovnání výsledků v Tab. 5 vyplývá, že odchylka mezi naměřenými a simulačně zjištěnými velikostmi zkratových proudů je maximálně $5,6 \%$, což je sice řádově vyšší než v případě chodu SGPM naprázdno, ovšem i tento výsledek lze z hlediska modelování považovat za vyhovující.

c) chod při zatížení

Při tomto experimentu byla k modelu SGPM postupně připojována symetrická zátěž o různé velikosti, rychlost rotoru se nastavila tak, aby odpovídala rychlostem zjiš-

těným při měření SGPM. Při jeho vyhodnocování byla hlavní pozornost zaměřena na vzájemné srovnání velikostí napětí, proudů a výkonů SGPM. V Tab. 6 jsou uvedeny výsledky měření SGPM a odpovídajících simulačních experimentů chodu SGPM při zatížení.

Tab. 6. Naměřené a vypočítané napětí, proudy a výkony při zatížení

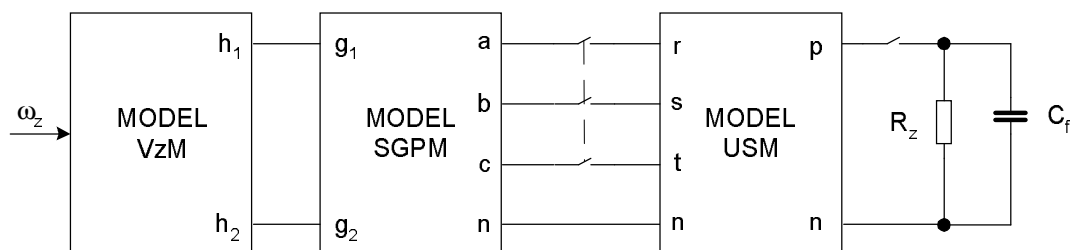
Naměřeno					Simulace		
R_z	n	U_s	I_f	P_{zat}	U_s	I_f	P_{zat}
Ω	ot/min	V	A	W	V	A	W
14	2850	389	16,1	10700	382,7	15,8	10460
21	2900	402	11,2	7590	399,0	11,0	7581
30	2930	410	7,92	5500	408,8	7,87	5572
40	2940	416	5,93	4160	412,9	5,96	4262
65	2950	417	4,31	3070	418,0	3,71	2686
81	2970	421	2,72	1950	422,0	3,01	2200

Je zřejmé, že rozdíly mezi změřenými a vypočítanými výsledky jsou zanedbatelné. Z toho vyplývá, že matematický model SGPM a jemu odpovídající počítačový simulační model lze považovat za modely, vyhovující stanovenému účelu.

Simulační experimenty s modelem zdrojové jednotky

K ověření součinnosti mezi modely VzM a SGPM byl sestaven simulační model diesel-elektrického soustrojí, doplněný modelem šestipulsního diodového usměrňovače USM a příslušnou zátěží, připojenou k výstupu USM.

Pro potřeby dalšího výzkumu byl mj. simulován případ, kdy po rozběhu soustrojí na rychlost cca 3000 ot/min je k výstupu SGPM připojen nejprve šestipulsní trojfázový diodový usměrňovač USM a poté je k výstupu usměrňovače připojena paralelní kombinace rezistoru o odporu 100Ω a filtračního kondenzátoru o kapacitě $50 \mu F$. Zvolená velikost zatěžovacího rezistoru odpovídá zatěžovacímu výkonu $P_{zat} = 3 \text{ kW}$. Na obr. 6 je uvedeno simulační schéma celého systému.

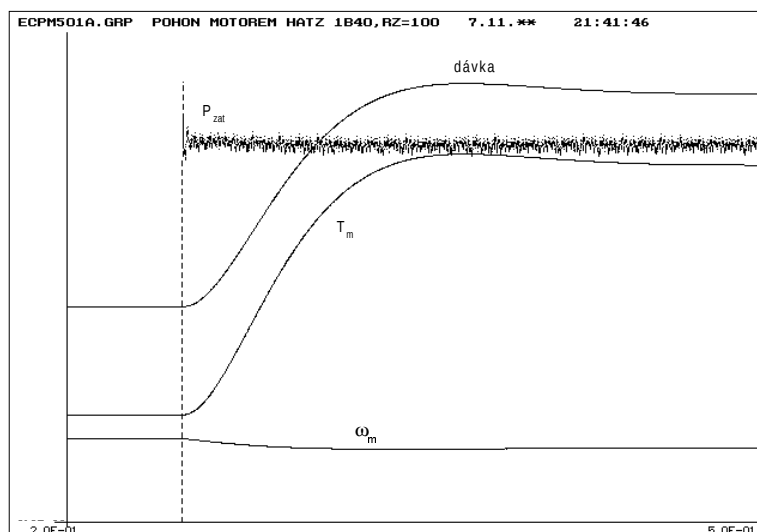


Obr. 6. Simulační model diesel - elektrického soustrojí s usměrňovačem

Simulacemi zjištěné časové odezvy *dávky paliva*, *úhlové rychlosti* ω_m a *hnacího momentu* T_m na časový průběh zatěžovacího výkonu P_{zat} na výstupu USM jsou uvedeny na obr. 7. Výkon P_{zat} není stálý, ale časově proměnný díky použitému zapojení zatěžovacího obvodu usměrňovače a velikosti jeho časové konstanty. Jeho střední velikost je však stálá.

Jak vyplývá z obr. 7, reaguje hnací VzM na skoky zátěže se zpožděním, což je dáno jednak jeho vnitřní dynamikou (časové zpoždění v palivovém systému a v pracovním válci) a jednak setrvačností celé rotorové části soustrojí. Simulacemi bylo

dále zjištěno, že elektromagnetické časové zpoždění v SGPM je zanedbatelně malé, což vyplývá především z malých velikostí odporu vinutí a synchronní reaktance jeho kotvy.



Obr. 7. Odezvy diesel - elektrického soustrojí na skok stejnosměrné zátěže

Kromě tohoto případu byly simulačně zjišťovány odezvy celého soustrojí na náhlý přírůstek a pokles zatížení různé velikosti s cílem vyhodnotit rychlost reakce soustrojí.

Závěr

V příspěvku je uveden jednak model vznětového motoru a jednak model synchronního generátoru s permanentními magnety s identifikací jeho modelových parametrů. Model SGPM byl verifikován na základě praktických měření experimentálního generátoru při chodu naprázdno, při chodu nakrátko a při čistě odporovém symetrickém zatížení různé velikosti. Dále příspěvek uvádí výsledky jedné ze simulací zdrojové jednotky EC3G, tvořené diesel-elektrickým soustrojím VzM – SGPM a šestipulsním diodovým usměrňovačem. Protože zdrojová jednotka je složitý elektromechanický systém, objevily se při simulacích některé problémy, které dokonce znemožňovaly řadu simulací uskutečnit. Tyto problémy vyplývají především ze skutečnosti, že na výstupu usměrňovače existuje časově proměnné napětí se základním kmitočtem 1800 Hz (při rychlosti 3000 ot/min), čemuž odpovídá perioda cca $550\text{ }\mu\text{s}$. To samozřejmě vyžaduje zvolit velmi malý integrační krok, což má za následek jednak značné prodloužení výpočtů a jednak vysoké požadavky na paměť počítače.

Uskutečněná řada simulačních výpočtů a následných analýz výrazně přispěla k řešení problémů, spojených s vazbou mezi zdrojovou jednotkou a navazujícími bloky výkonové elektroniky v EC3G.

Odkazy

- [1] Kalous, J. - Dolejší, B.: Simulační model vznětového motoru pro elektrocentrály. Výzkumná zpráva čís. 0917-1-2000. Vojenská akademie v Brně, září 2000;
- [2] Chapman, S.J.: Electric Machinery Fundamentals. WCB/McGraw-Hill 1999;
- [3] Melichar, M. – Leuchter, J.: Měření na modelu EC 3. generace. Výzkumná zpráva čís. 0917-4-2000. Vojenská akademie v Brně, prosinec 2000.

Tato práce byla vytvořena v rámci grantového projektu reg. č. 102/00/0917 GAČR s názvem „Výzkum mobilních zdrojů elektrické energie (elektrocentrál) 3. generace“.