

Daniela Perduková, Pavol Fedor

Úplný model malej vodnej elektrárne

Výskum, optimalizácia a praktická realizácia malých vodných elektrární ako zdrojov čistej elektrickej energie patrí medzi jednu z aktuálnych úloh súčasnej energetiky, ktorá je vzhľadom na silne nelineárny charakter takýchto systémov prakticky neriešiteľná bez silnej počítačovej podpory. V článku je uvedený úplný model malej vodnej elektrárne, modelovanie jeho jednotlivých podsystémov a verifikácia jeho dynamických vlastností v základných prevádzkových stavoch pri pôsobení hlavnej externej poruchy, ktorou je pokles frekvencie elektrickej siete. Pre verifikáciu vlastností úplného modelu MVE bol použitý programový balík MATLAB. Dosažené výsledky potvrdili správnosť navrhnutého modelu, ktorý môže byť použitý pre návrh riadenia MVE.

Kľúčové slová: modelling, small hydropower plant, hydraulic turbine, electric generator

Research, optimization and practical implementation of small hydroelectric power plants as a source of clean electricity presents one of the topical tasks in current energetics, which is virtually impossible to solve without powerful computer support due to the strongly nonlinear nature of such systems. The article presents a complete model of a small hydropower plant, modelling its individual subsystems and verifying its dynamic properties in basic operating modes. Also an influence of a major external fault, caused by a drop in the power grid frequency, was investigated. Full SHPP (Small-Hydropower Plant) model properties were verified using MATLAB software package. The obtained results confirmed correctness of the proposed model, which can be used for design of a SHPP control algorithm.

Keywords: modelling, small hydropower plant, hydraulic turbine, electric generator

I. ÚVOD

Súčasný trendy vo výrobe elektrickej energie sa snažia čoraz viac vyhovieť ekologickým kritériám, šetriacim naše životné prostredie. V prírode okolo nás je nahromadené množstvo obnoviteľnej energie, ktorá sa nachádza v okolitých vodných zdrojoch (jazerách, riekach, umelých vodných nádržiach a pod.). Túto energiu je z vody možné extrahovať vytvorením vhodných zásobníkov vodnej energie (buď nádrží s výškou hladiny alebo trás pre trvalý prietok vody), použitím strojov pre konverziu tejto energie na rotačnú mechanickú energiu (vodné kolesá, turbíny), konverziu mechanickej energie na elektrickú (synchronne a asynchronne elektrické stroje) a nakoniec riadením celej tejto premeny energií podľa požiadaviek koncového odberateľa elektriny. Takéto systémy voláme hydroelektrárne a pre výkony v IEEE Štandarde 1020-1988 sú tieto elektrárne približne popisované nasledujúcimi atribútmi:

- jednotkový výkon je v rozsahu medzi 100 a 5000 kW a menovité napätie od 480V do 13,8 kV;
- sú osadené buď synchronným alebo asynchronným generátorom;
- celkové náklady na úpravu okolia sú minimálne;
- sú navrhnuté pre úplne automatizovanú prevádzku;
- majú len minimálnu zásobníkovú vodnú nádrž s malou výškou hladiny (Run-of-River Hydroelectric Plant).

Počítačové modely energetických systémov umožňujú podstatne zjednodušiť a urýchliť ich projektovanie, ako aj ušetriť náklady pri ich realizácii. V súčasnosti existuje niekoľko modelov malých vodných elektrární, ktoré vychádzajú z konkrétnych požiadaviek na ich prevádzku a výskum. Niektoré z nich sú analyticky jednoduché [1, 2], iné boli navrhnuté z hľadiska zložitých robustných systémov a ich dynamických charakteristík [3, 4]. Rôzne modely vodných elektrární a techník používaných pre riadenie ich výkonu sú uvedené v [5, 6]. Model hydroelektrárne uvedený v [7] umožňuje navrhovať a vyšetrovať chovanie hydroenergetickej sústavy vo frekvenčnej oblasti. Okrem toho existujú modely lineárnych a nelineárnych

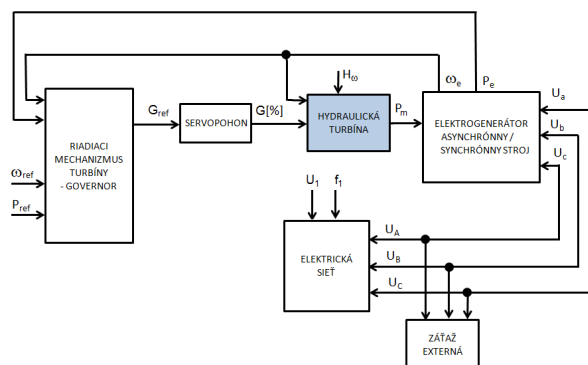
systémov hydroturbín s neelastickými a elastickými vplyvmi výšky vodného stĺpca [8, 9,10,11].

Je zrejme, že pri požiadavke na podrobnejšie vyšetrovanie elektromagnetických dejov MVE a vzájomného pôsobenia elektrickej siete s hydraulickou turbínou je nutné modelovať oveľa detailnejšie aj elektrické deje v elektrogenerátore [12, 13,14]. Príkladom môže byť veľmi podrobný a kvalitný model, uvedený v [15].

Predložený článok popisuje model malej vodnej elektrárne použiteľný pre návrh jej riadenia aj s využitím metód umelej inteligencie [16,17,18] alebo moderných metód riadenia [19]. Model je vhodný pre skúmanie jej dynamických vlastností vo vybraných prevádzkových stavoch. Tento model je postavený na jednotlivých fyzikálnych podsystémoch MVE a skompletizovaný ich vhodným pospájaním. Vlastnosti navrhnutého modelu boli verifikované simuláciou v programe MATLAB na reálnych parametroch malej vodnej elektrárne v Dobšinej.

II. MODEL MALEJ VODNEJ ELEKTRÁRNE

Model malej vodnej elektrárne (MVE) je pomerne zložitý nelineárny dynamický systém, ktorý sa skladá z podsystémov uvedených na Obr.1 ([20]).



Obr.1 Bloková schéma malej vodnej elektrárne

Základným podsystémom celej MVE je „Hydraulická turbína“, v ktorej sa premieňa energia vody na mechanickú energiu. Pre riadenie tejto premeny je ako akčný člen určený podsystém s názvom „Servopohon“, ktorým je možné ovládať prietok vody cez turbínu, prípadne tlak v turbíne. Riadenie turbíny má v podstate dve základné funkcie:

1. rozbeh turbíny na mechanické otáčky blízke elektrickej frekvencii siete,
2. a po prifázovaní do siete riadenie dodávaného výkonu.

Toto zabezpečuje podsystém riadenia turbíny, označovaný v literatúre ako „Governor“.

Premenu mechanickej energie turbíny na elektrickú zabezpečuje podsystém označený ako „Elektrogenerátor“, ktorým môže byť buď asynchrónny alebo synchronný elektrický stroj. Pri mikroelektrárňach môže byť táto premena zabezpečovaná aj statickými meničmi s batériovým medziobvodom. Pri použití synchronného generátora je potrebné modelovať aj jeho budenie samostatným podsystémom.

Výstupom z elektrogenerátora je trojfázové elektrické napätie, ktoré je možné využívať priamo do vlastnej záťaže alebo cez transformátor je možné pripojiť MVE aj na externú elektrickú sieť s externou záťažou. Najdôležitejšími parametrami siete sú napätie U_1 a jeho frekvencia f_1 (resp. uhlová rýchlosť ω_1).

Úplný model MVE sa získa modelovaním jej jednotlivých podsystémov a ich vzájomným prepojením podľa Obr.1. Presnosť modelovania jednotlivých podsystémov závisí od účelu použitia úplného modelu. Podľa miery presnosti modelov jednotlivých podsystémov MVE získame jej presnejší alebo menej presný celkový model.

III. MODELOVANIE PODSYSTÉMOV MALEJ VODNEJ ELEKTRÁRNE

A. Model hydraulickej turbíny

V článku budeme všetky veličiny uvažovať normované voči ich maximálnemu rozsahu, ktorému odpovedá hodnota 1, resp.100% (otvorenie servopohonu).

Mechanický výkon vodnej turbíny v ustálenom stave je úmerný výške H vodného stĺpca nad turbínou a aktuálnemu prietoku Q vody cez turbínu podľa vzťahu

$$P_h = \rho g Q H \quad (1)$$

$$P_m = \eta_t P_h \quad (2)$$

kde P_m je mechanický výkon na hriadieli turbíny, P_h je možný hydraulický výkon, ρ je hustota vody a η_t je účinnosť turbíny.

Normovaná zmena prietoku je daná vzťahom

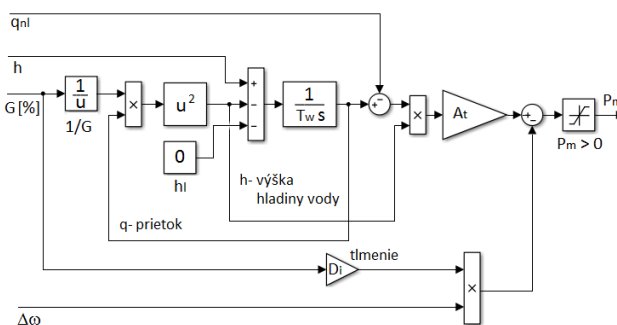
$$\frac{dq}{dt} = (1 - h - h_i)/T_w \quad (3)$$

kde T_w je časová konštanta tejto zmeny, pričom q je normovaný prietok (Q/Q_{max}), h je normovaná výška vodného stĺpca (H/H_{max}) a h_i je normovaný úbytok výšky ekvivalentný stratám v potrubí.

Výstupný mechanický výkon turbíny je závislý od súčinnu aktuálneho prietoku a výšky vodného stĺpca v turbíne podľa vzťahu

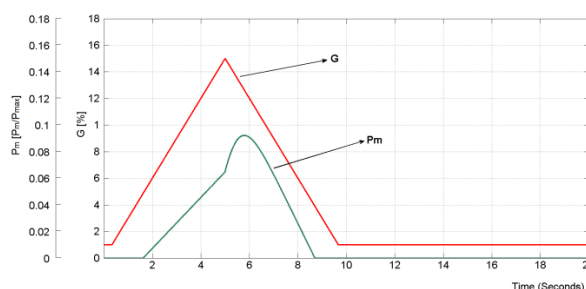
$$P_m = A_t h (q - q_{nl}) - D_i G \Delta \omega \quad (4)$$

kde A_t je zosilnenie turbíny, D_i je vnútorný priemer turbíny (tlmiaca konštanta záťaže), G je poloha servopohonu v %, q_{nl} je normovaný prietok vody pri nezaťaženej turbíne a $\Delta \omega$ je rozdiel otáčok hriadeľa a elektrickej siete. Rovniciam (1) až (4) zodpovedá model podsystému hydraulickej turbíny na Obr.2. Parametre pre modelovanie sú uvedené v Prilohe.



Obr. 2 Bloková schéma podsystému hydraulickej turbíny

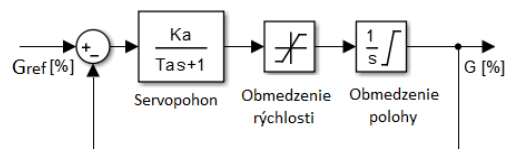
Odozva mechanického výkonu turbíny P_m na lineárne otvorenie a zatvorenie servopohonu klapiek je na Obr. 3.



Obr. 3 Priebeh mechanického výkonu na hriadieli turbíny P_m pri otváraní a zatváraní servopohonu

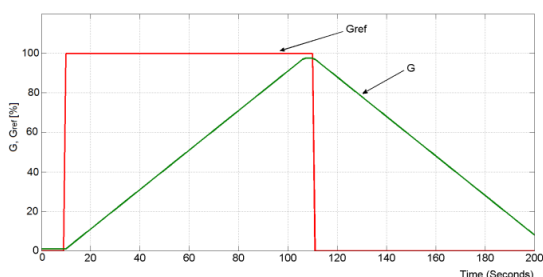
B. Model servopohonu

Subsystém servopohonu slúži ako akčný člen pre ovládanie prítoku vodnej energie do hydroturbíny. Modelujeme ho dynamickým systémom druhého rádu na Obr.4, ktorého stavové veličiny predstavujú rýchlosť otvárania lopatiek vstupnej klapky do turbíny a polohu otvorenia týchto klapiek.



Obr. 4 Bloková schéma podsystému servopohonu

Pri vyšších hladinách vodného stĺpca nad turbínou vznikajú pri otváraní a zatváraní vstupných klapiek turbíny silné tlakové vlny (tzv. vodné kladivo), ktoré môžu viesť až k deštrukcii turbíny. Preto sa z bezpečnostných dôvodov u servopohonu obmedzuje rýchlosť otvárania klapiek. Obmedzenie výstupnej polohy klapiek v modeli slúži na nastavenie reálnej pracovnej oblasti, v ktorej ešte turbína reaguje na otváranie servopohonu. Zosilnenie kotvy K_a a časová konštanta kotvy T_a sú parametre servomotora uvedené v Prilohe. Časový priebeh otvárania a zatvárania servopohonu je uvedený na Obr.5.



Obr. 5 Otváranie a zatváranie servopohonu

C. Model prepojenia elektrogenerátora a hydroturbíny

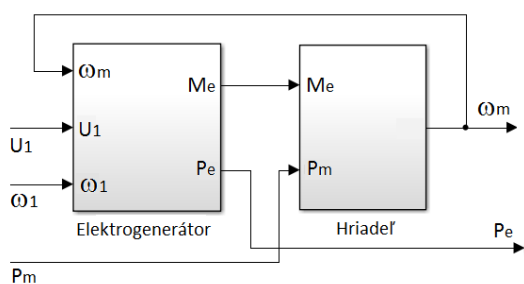
Elektrogenerátor je striedavý elektrický stroj synchronného alebo asynchronného typu. Podrobné modely týchto strojov sú nelineárne dynamické systémy vyššieho rádu, ktorých vnútorné elektromagnetické dynamické deje sa pohybujú v oblasti milisekúnd. Naproti tomu hydrodynamické deje v turbíne sú podstatne pomalšie a preto je vo väčšine prípadov možné zostavovať iba elektro-mechanický model generátora z hľadiska momentovej rovnice na spoločnom hriadeľi turbíny a generátora. Hydroturbína a elektrogenerátor sú mechanicky zviazané na spoločnom hriadeľi, pre ktorý platí rovnica momentovej rovnováhy

$$M_e + M_m - M_f = J_c d\omega_m / dt \quad (5)$$

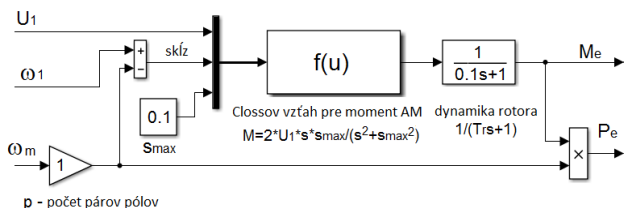
$$M_f = K_t \omega_m \quad (6)$$

$$M_m = P_m / \omega_m \quad (7)$$

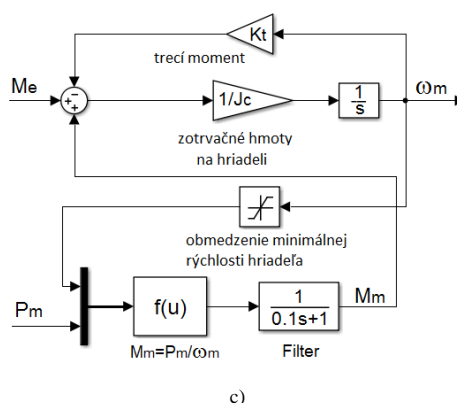
kde M_e je moment generátora, M_m moment turbíny a M_f je trecí moment úmerný mechanickej uhlovej rýchlosti ω_m , pričom konštanta K_t je v rovnici (6) koeficient trenia. Pravá strana rovnice predstavuje dynamický moment na hriadeľi, ktorý urýchľuje celkový moment zotrvačných hmôt hriadeľa J_c . P_e je generovaný elektrický výkon na hriadeľi, ktorý je pri asynchronnom stroji úmerný súčinu jeho momentu a uhlovej rýchlosti rotora ω_m . Uvedeným predpokladom vyhovuje spojený model asynchronného elektrogenerátora a hydroturbíny na Obr.6, kde T_r je časová konštanta rotora asynchronného generátora zodpovedajúca rotorovému odporu.



a)



b)

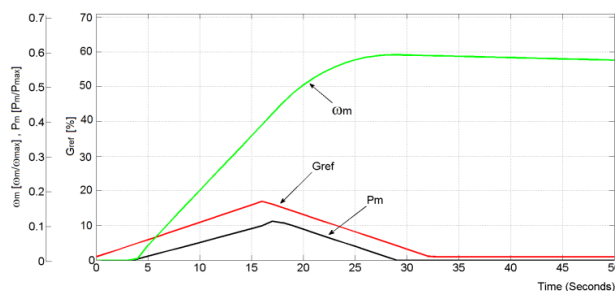


c)

Obr. 6 Elektromechanická bloková schéma podsystému generátor-záťaž

- a) celkové zapojenie
- b) model asynchronného elektrogenerátora
- c) model mechaniky na hriadeľi

Rozbeh turbíny na rýchlosť blízku frekvencii siete (hodnota $f_1=0.6$ zodpovedá frekvencii siete 50 Hz) je uvedený na obr. 7.



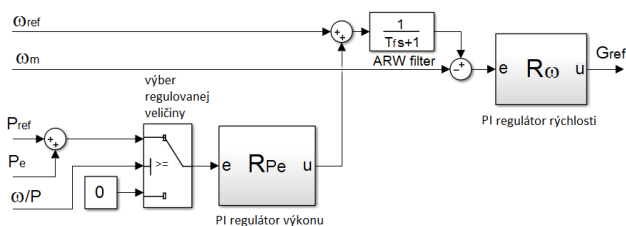
Obr.7 Rozbeh turbíny na frekvenciu siete

D. Model riadenia turbíny

Riadenie turbíny má dve úlohy:

1. riadenie otáčok turbíny v generátorickej oblasti elektrogenerátora,
2. riadenie dodávaného výkonu do elektrickej siete (ak je požadované).

Jednoduchý model takého riadenia je použitie dvoch štandardných PI regulátorov v zapojení podľa Obr.8.



Obr.8 Bloková schéma podsystému riadenia turbíny

Pri tomto riadení zabezpečuje riadenie mechanickej uhlovej rýchlosti ω_m PI regulátor R_ω a reguláciu výkonu generátora R_{Pe} . Prepínanie medzi týmito reguláciami zabezpečuje logický signál ω/P . Filter 1. rádu od referenčnej hodnoty ω_{ref} slúži na obmedzenie kmitania regulačných obvodov rýchlosti a výkonu. Pretože generovaný výkon sa dosahuje zvyšovaním otáčok turbíny nad frekvenciu siete, výstup regulátora výkonu reprezentuje zodpovedajúci prírastok mechanickej otáčok turbíny a pripočítava sa k referenčnej uhlovej rýchlosti ω_{ref} .

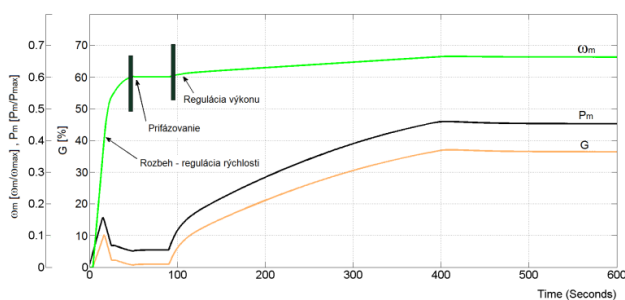
Pre získanie parametrov PI regulátorov bol použitý úplný model MVE podľa Obr.1. Celý priestor možných hodnôt parametrov proporčionalnej K_P a integračnej zložky K_I regulátorov bol s definovanou hustotou symetricky rozdelený a pre všetky kombinácie týchto hodnôt bola určená hodnota kritériálnej funkcie, ktorú predstavoval integrál z kvadratickej odchýlky želanéj a skutočnej uhlovej rýchlosti elektrogenerátora

$$J(K_P, K_I) = \int (\omega_{ref} - \omega_e)^2 dt \quad (8)$$

Za optimálne parametre PI regulátorov bola určená tá dvojica parametrov, pri ktorej kritériálna funkcia (8) vykazovala minimálnu hodnotu. Pre proces hľadania optimálnych parametrov regulátorov bol vytvorený m-file v programe MATLAB. Konkrétne parametre regulátorov sú uvedené v Prílohe.

IV. SIMULÁCIA ZÁKLADNÝCH PREVÁDZKOVÝCH STAVOV MVE

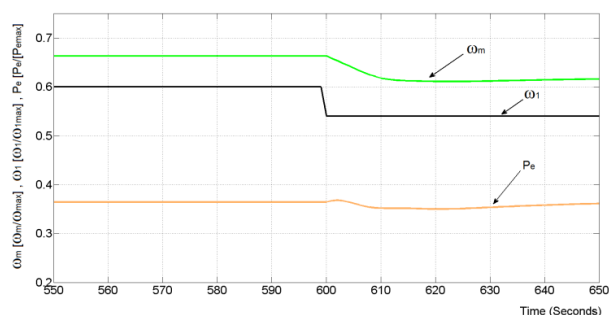
Základnými prevádzkovými stavmi hydroturbíny sú rozbeh na otáčky blízke frekvencii siete, prifázovanie elektrogenerátora a regulácia elektrického výkonu. Na Obr.9 je uvedený príklad modelovania týchto stavov pre malú vodnú elektrárňu v Dobšinej. (parametre sú uvedené v Prílohe).



Obr.9 Modelovanie rozbehu turbíny, prifázovania a riadenie výkonu

V čase $t=0$ sa turbína začne rozbiehať na rýchlosť siete bez pripojenia elektrogenerátora na sieť. Po dosiahnutí rýchlosti zodpovedajúcej frekvencii siete sa generátor prifázuje, t.j. pripne na elektrickú sieť. Po ustálení prechodového deja v čase $t=80$ s sa „governor“ prepne z riadenia rýchlosti na riadenie výkonu pomocou logického signálu ω/P . V čase $t=400$ s je turbína v prevádzke. Výkon sa ustáli na normovanej hodnote $P_m=0.36$ čo zodpovedá nominálnemu výkonu turbíny.

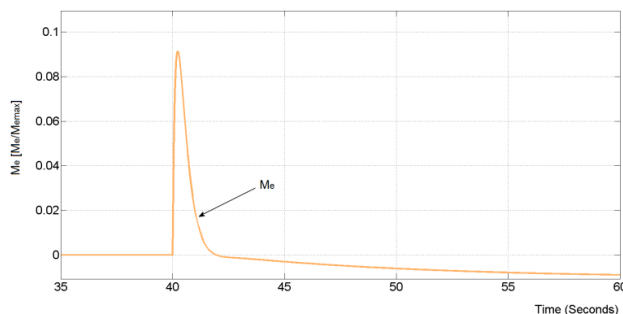
Na Obr.10 je ukázaná reakcia turbíny na pokles frekvencie siete, čo je základný typ externej poruchy pre hydrogenerátor.



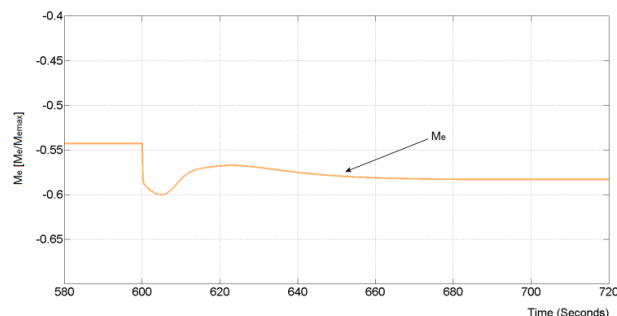
Obr.10 Reakcia turbíny na pokles frekvencie elektrickej siete

Vidíme, že v čase $t=600$ s poklesla frekvencia siete, na čo regulácia zareagovala znížením otáčok hydroturbíny a vyrovnaním výkonu generátora na žiadanú hodnotu.

Na obrázku 11 je ukázaný priebeh momentu generátora po prifázovaní a na Obr.12 je priebeh momentu generátora pri poklese frekvencie siete, čo sa prejaví prechodovými dejmi na momente generátora M_e .



Obr.11 Moment generátora po prifázovaní



Obr.12 Moment generátora pri poklese frekvencie siete

V. ZÁVER

V článku je ukázaný postup vytvorenia simulačného modelu MVE, ktorý pozostáva z troch základných podsystémov, a to hydraulického turbíny, elektrogenerátora a riadiaceho mechanizmu turbíny označovaného ako „governor“ spolu so servopohonom. Výsledný model bol zostavený z jednotlivých podsystémov, ktorých modely boli navrhnuté a verifikované v programovom balíku MATLAB samostatne. Dynamické vlastnosti úplného modelu MVE boli overované simuláciou pre základné prevádzkové stavy hydroturbíny, ako sú jej rozbeh na otáčky blízke frekvencii elektrickej siete, prifázovanie elektrogenerátora a regulácia elektrického výkonu a tiež pre pôsobenie základnej externej poruchy, ktorou je pokles frekvencie elektrickej siete. Dosiahnuté výsledky potvrdili správnosť navrhnutého modelu, ktorý môže byť použitý pre skúmanie jej vlastností v rôznych prevádzkových stavoch a predovšetkým pre návrh rôznych aj optimálnych riadiacich štruktúr s využitím inteligentných metód riadenia.

POĎAKOVANIE

Článok bol publikovaný s podporou projektu APVV-19-0210.

PRÍLOHA

Podsystem riadenia "Governor"

$$K_{PRc} = 0.15 \quad K_{IRc} = 0.00064 \quad K_{PR\omega} = 6.5$$

$$K_{IR\omega} = 0.068 \quad T_r = 10 \text{ [s]}$$

Podsystem servopohonu

$$K_a = 3.3 \text{ [}\Omega^{-1}\text{]} \quad T_a = 0.07 \text{ [s]}$$

Podsystem hydraulickej turbíny

$$L = 1255 \text{ [m]}$$

$$A = 1.54; \text{ [m}^2\text{]}$$

$$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad h_{base} = 51.7 \text{ [m]} \quad q_{base} = 4.6 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$T_w = ((L/A) * (q_{base}/(h_{base} * g))) \text{ [s]}$$

$$D_i = 1.4 \text{ [m]} \quad M_m = 2.1 \text{ [MW]}$$

$$A_t = 0.89 \quad q_{ai} = 0.0434 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Podsystem elektrogenerátora

$$M_e = 2.1 \text{ [MVA]} \quad J_c = 7.99 \text{ [kgm}^2\text{]} \quad K_r = 0.01 \quad T_r = 0.1 \text{ [s]}$$

$$p = 1 \quad s_{max} = 0.1$$

LITERATÚRA

- [1] C. Qijuan, X. Zhihui, "Dynamic modeling of hydro turbine generating set," in IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2000, pp. 3427-3430. DOI: 10.1109/ICSMC.2000.886538.
- [2] R.A. Naghizadeh, S. Jazebi and B. Vahidi, "Modelling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline," in International Review on Modelling and Simulations (IRE.MO.S), 2012, Vol. 5, No. 4., pp.780-1790.
- [3] D. Medved', M. Kolcun, Z. Conka, et al., "Simulation of Faults in the Power System and Their Elimination in the EMTP-ATP", Proc. of 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (Elektroenergetika), Tech. Univ. Kosice, Stara Lesna, Slovakia, 2013, pp. 484-487.
- [4] G. Singh, D.S. Chauhan, D. S., "Simulation and Modeling of Hydro Power Plant to Study Time Response during Different Gate States," in (IAEST) International Journal of Advanced Engineering Sciences And Technologies, 2011, Vol. No. 10, Issue No. 1, pp. 042 - 047.
- [5] IEEE Working Group., "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," in IEEE Trans on Power Syst., 1992, 7, pp.167-79.
- [6] J. Tiwari, et al., "Modelling and Simulation of Hydro Power Plant using MATLAB & WatPro 3.0.," in Intelligent Systems and Applications, 2015, 08, pp. 1-8. DOI: 10.5815/ijisa.2015.08.01.
- [7] Y.CH. Choo, K.M. MUTTAQUI, M. NEGNEVITSKY, "Modelling of Hydraulic Governor Turbine for Control Stabilisation," in ANZIAM Journal, 2007, 49, pp. C681-C698.
- [8] O.P. Malik, G. S. Hope, G. Hancock, L. Zhaohui, Y. E. Luqing and W.E.I Shouping, "Frequency measurement for use with a microprocessor-based water turbine governor," in IEEE Trans Energy Conv, 1991, 6, pp.361-6.
- [9] D.G. Ramey, J. W. Skooglund, "Detailed hydro governor representation for system stability studies," in IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89, pp.106-12.
- [10] M.A. Bhaskar, "Non Linear Control of STATCOM," proc. of IEEE International Conference on Recent Trends in Information Telecommunication and Computing, India, 2010, pp. 190-195. DOI: 10.1109/ITC.2010.79.
- [11] M. Sattou, "Simulation Model of Hydro Power Plant Using MATLAB/Simulink," in Journal of Engineering Research and Applications. 2014, Vol. 4, Issue 1, pp. 295-300.
- [12] P. Hocko, M. Novak, M. Kolcun, Z. Čonka, et al., „Influence of photovoltaic power plants on the power system to the prediction for year 2020“, proc. of 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEEIC), Krakow, Poland, 2014, pp. 116-121.
- [13] J. Kurimský, R. Cimbala, I. Kolcunová, "Multi-scale decomposition for partial discharge analysis," in Przegląd Elektrotechniczny, 2008, Vol. 84, no. 9, pp. 169-173.
- [14] I. Kolcunová, "Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material," in Acta Physica Polonica A, 2017, Vol. 131, no. 4, pp. 1135-1137, ISSN 0587-4246.
- [15] A. Acakpovi, E.B. Hagan, F.X. Fiftatin, "Review of Hydropower Plant Models," in Int. Journal of Computer Applications, 2014, Vol. 108, No. 18, pp. 33-38. DOI: 10.5120/19014-0541.
- [16] P. Girovsky, J. Timko, J. Zilkova, et al., "Neural Estimators for Shaft Sensorless FOC Control of Induction Motor," Proc. of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Ohrid, Macedonia, 2010. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606907.
- [17] P. Fedor, D. Perduková, "Fuzzy Model Based Optimal Continuous Line Controller," Proc. of the 8th Int. Scientific Symposium on Electrical Power Engineering Elektroenergetika, Stará Lesná, 2015, pp. 404-407. ISBN 978-80-553-2187-5.
- [18] D. Perduková, P. Fedor, "A Model-Based Fuzzy Control of an Induction Motor," in Advances in Electrical and Electronic Engineering, VSB-Technical University of Ostrava, 2014, Vol. 12, Iss. 5, pp. 427-434. ISSN 1336-1376.
- [19] D. Perduková, P. Fedor, V. Fedák, S. Padmanaban, "Lyapunov Based Reference Model of Tension Control in a Continuous Strip Processing Line with Multi-Motor Drive," in Electronics, 2019, Vol. 8, Iss. 1. ISSN 2079-9292. Doi:10.3390/electronics8010060.
- [20] A.M-H. German, P.M. Sa'ad, I.J. Dewi, Modeling and Controlling Hydropower Plants, Springer-Verlag, London: Springer, 2013, ISBN 978-1-4471-6221-6.

ADRESY AUTOROV

Daniela Perduková, Technical University of Košice, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Letná 9, Košice, SK 040 01, Slovak Republic, daniela.perdukova@tuke.sk
 Pavol Fedor, Technical University of Košice, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Letná 9, Košice, SK 040 01, Slovak Republic, pavol.fedor@tuke.sk

Tento príspevok je monitorovaný v rámci dopadov projektu "Inovatívne postupy testovania pre priemysel 21. storočia (kód ITMS:NFP313010T565), operačného programu Výskum a inovácie.