

包含自动励磁单元的微水发电系统故障响应特性

孙海波, 叶林*, 李立成, 宋旭日

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 包含自动励磁单元的微水发电机组对提高基于可再生能源的多能互补发电系统的电压稳定性具有重要作用。该文根据微水发电系统的数学模型, 在电力系统电磁暂态平台上 EMTP/ATP 建立了微水发电系统的动态模型, 该模型包括水轮机、同步电机、励磁控制单元、电力系统综合负荷等模块。在故障工况下, 对微水发电系统的故障响应特性以及励磁单元进行了研究。仿真结果表明: 在短路故障导致微水机组端电压跌落的情况下, 自动励磁单元可以通过调节励磁电压, 快速增加励磁电流, 提高微水机组的端电压水平。

关键词: 水发电系统, 故障诊断, 计算机仿真, 电磁暂态, 自动励磁系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.029

中图分类号: TM612

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0166-05

孙海波, 叶林, 李立成, 等. 包含自动励磁单元的微水发电系统故障响应特性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 166-170.

Sun Haibo, Ye Lin, Li Licheng, et al. Transient response of pico-hydro power generation system with automatic excitation units under fault conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 166-170. (in Chinese with English abstract)

0 引言

微型水力发电(简称微水发电)是指利用电力负荷附近的微小水能资源发电、离网运行、无需整流逆变、直接向用户供电的小型水力发电系统。与大中型水力发电相比, 微水发电对推动中国农村经济发展起着重要作用, 尤其包含微水发电单元的分布式发电系统可以为农村村镇用户提供电力供应^[1-2]。

目前, 微水发电的主要研究热点集中在微水发电的经济和技术评估以及运行特性研究方面, 对微水发电暂态特性研究较少。文献[2]研究了微水发电系统接入地方电网后导致系统线损增大、电能质量及设备安全性下降等问题, 但没有给出解决方案。文献[3]建立了小水电的停运概率模型, 考虑了小水电接入的配电系统可靠性评估方法, 忽略了小水电停运之后的暂态特性。文献[4]重点研究了微型水力发电综合信息管理系统, 开发了小型水力发电机组控制器及控制策略。文献[5-6]对小水电系统的机电暂态过程进行了仿真研究。

本文针对微水发电系统, 在电力系统电磁暂态 EMTP/ATP^[7]软件平台上建立了一个通用的动态等值模

型, 该模型包括水轮机、发电机及励磁控制等模块。利用该模型对微水发电系统的在故障情况下的暂态运行特性及励磁系统的动态调节作用进行了研究, 仿真研究论证了该模型的有效性。

1 微水发电系统及其励磁系统的数学模型

1.1 微型水轮机系统模型

根据伯努利定理^[9]可以将微型水轮机的能量表达为^[8]

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = \frac{P}{\rho g Q} h \quad (1)$$

式中, v 为水的流速, m/s; g 为引力常数(取常数 9.81), m/s^2 ; h 为水面的高度, m; p 为水流的压强, N/m^2 ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; P 为水轮机获得功率, $kg \cdot m/s$, 相应的单位换算为 1 hp (马力) = 75 $kg \cdot m/s$ = 735 W; Q 为渠道的水流流量, m^3/s 。

如果忽略水的流速 v 和水流的压强 P 的情况下, 则根据式(1)得到微型水轮机输入的有效功率

$$P_i = \eta_i \rho g Q H_m \quad (2)$$

式中, η_i 为水轮机的简化效率系数(对于标准水轮机, 通常取值为 0.80); H_m 为水位高度, m。

1.2 同步电机模型

在电力系统动态过程的分析中, 同步电机的模型可以采用以下介绍的等值数学模型^[10], 首先假设

- 1) 忽略电机铁心的饱和;
- 2) 不计电机中的涡流和磁滞损耗;
- 3) 永磁铁在定子绕组中建立的磁通为正弦分布。

微型水力发电机组的同步发电机模型采用同步发电机的数学模型。在 $d-q$ 坐标系下的发电机磁链方程为^[11]

收稿日期: 2011-04-01 修订日期: 2011-11-07

项目基金: 高等学校博士点基金(博导类), 资助课题号为(20110008110042), 教育部新世纪优秀人才资助计划(NCET-08-0543); 教育部科学技术重点研究项目(109017); 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAJ04B03-005); 中国农业大学研究生科研创新专项资助(No.15050203)。

作者简介: 孙海波(1986—), 男, 汉, 黑龙江哈尔滨人, 目前从事新能源发电方面的研究。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

*通信作者: 叶林(1968—), 男, 汉, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 德国洪堡学者。长期从事电力系统自动化、新能源发电技术与超导电力应用方面的科研和教学工作。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。

Email: YL@cau.edu.cn

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -(L_{s\sigma} + L_{dm})i_{ds} + L_{dm}i_{fd} \\ \psi_{qs} = -(L_{s\sigma} + L_{qm})i_{qs} \\ \psi_{fd} = L_{fd}i_{fd} \end{cases} \quad (3)$$

式中， ψ_{fd} 为励磁绕组磁链，Wb； ψ_{ds} 为 d 轴磁链，Wb； ψ_{dq} 为 q 轴磁链，Wb； $L_{s\sigma}$ 为同步电感，mH； L_{fd} 为励磁绕组电感，mH； L_{dm} 为直轴电感，mH； L_{qm} 为交轴电感，mH； i_{ds} 为定子电流直轴分量，A； i_{qs} 为定子电流交轴分量，A； i_{fd} 为励磁电流，A。

同步发电机的四阶电压和功率模型为

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_m (L_{s\sigma} + L_{qm}) i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega_m ((L_{s\sigma} + L_{dm}) i_{ds} - L_{dm} i_{fd}) \\ P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， i_{ds} 、 i_{qs} 、 v_{ds} 和 v_{qs} 分别为 d 轴、 q 轴电流 (A) 以及 d 轴、 q 轴电压 V； R_s 为定子电阻， Ω ； ω_m 为发电机的电角频率，rad/s， $\omega_m = \omega_{gen}$ ； n 为发电机转子的极对数， p ； $L_{s\sigma}$ 同步发电机的定子电感，mH； L_{dm} 、 L_{qm} 分别为同步发电机 d 轴、 q 轴的等效电感，mH。

同步发电机模型是建立在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的，因此需要将 $a-b-c$ 静止坐标系下变换到 $d-q$ 同步旋转坐标系下^[12]，坐标变换矩阵过程如下^[13]

$$\dot{f}_{dq0} = \dot{P} f_{abc} \quad (5)$$

由式 (5) 得到逆变换表达式为

$$\dot{f}_{abc} = \dot{P}^{-1} \dot{f}_{dq0} \quad (6)$$

其中，变量 f 可代表电压 v 、电流 i 或者磁链 ψ ，向量矩阵 f_{dq0} ，向量矩阵 P ，向量矩阵 f_{abc} 向量代表的系数矩阵如下

$$\dot{P} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 励磁调节系统模型

采用传递函数来描述励磁系统输入、输出量之间的特性来建立等效励磁系统模型，励磁调节系统原理图如图 1 所示，主要包括检测比较单元、校正单元、调制-整形-放大-控制单元等模块^[14-15]。

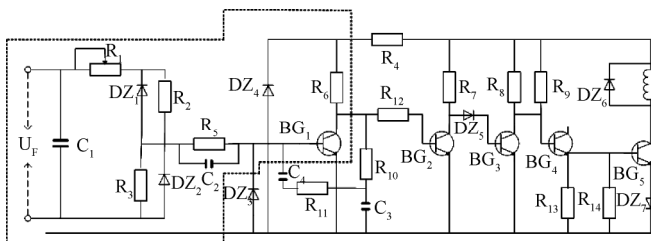


图 1 励磁调节系统原理电路图
Fig.1 Diagram of excitation control system

检测比较电路 (如图 1 中虚框所示) 的输入量是被

调电压 U_F (V)，输出量是指令电压 U_{abd} (V)，其传递函数

$$W_{sp}(S) = \frac{\Delta U_{bid}(S)}{\Delta U_F(S)} = \frac{K_{sp}}{\tau_{sp} S + 1} \quad (8)$$

串联校正回路的输入电压为 U_{abd} (V)，输出电压是 U_{bid} (V)，其传递函数

$$W_{se}(S) = \frac{\Delta U_{bid}(S)}{\Delta U_{abd}(S)} = \frac{K_{se}(\tau_2 S + 1)}{\tau_1 S + 1} \quad (9)$$

并联校正回路的输入电压为 U_{cid} (V)，输出电压是 U_{bid} (V)，其传递函数

$$W_p(S) = \frac{\Delta U_{bid}(S)}{\Delta U_{cid}(S)} = \frac{bS}{a_2 S^2 + a_1 S + 1} \quad (10)$$

调制-整形-放大-控制电路中的调制级的输入量是 U_{abd} ，而控制级的输出为 U_{jj} ， K_m 为调制-整形-放大-控制电路的静态放大系数，该电路的传递函数结构图，如图 2 所示^[16]。

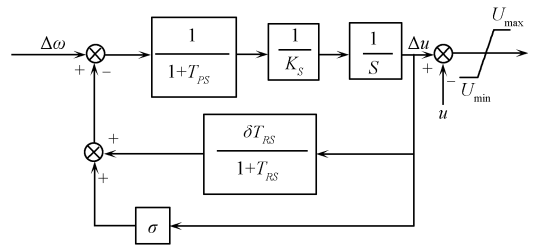


图 2 传递函数结构图
Fig.2 Block diagram of transfer function

2 微水发电系统的电磁暂态模型

本文在电力系统电磁暂态仿真软件 (electromagnetic transient program/alternative transient program, EMTP/ATP) 上，利用自定义开发工具和 Models 语言建立了微水发电系统的等值动态模型，该模型包括水轮机模块、同步发电机模块以及励磁系统模块。该元件模型是对 EMTP/ATP 软件元件库的补充，用户可以直接调用微水发电系统模块，来进行电力系统仿真研究^[17]。图 4 为微水发电系统模型 EMTP/ATP 示意图。

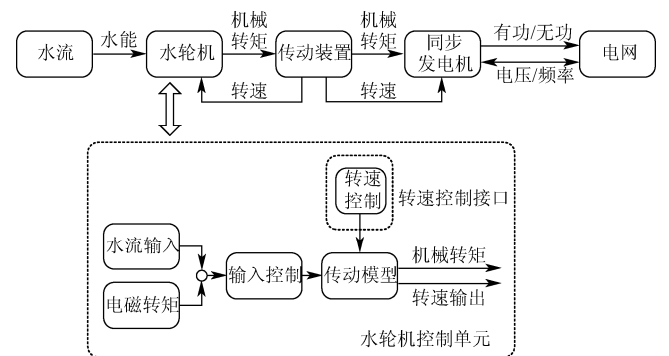
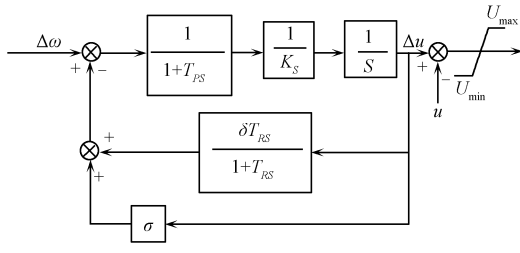


图 3 水力发电机组的 EMTP/ATP 模型
Fig.3 EMTP/ATP model of hydro turbine

图 4 为调速系统的控制模型^[8]



注: u 为导叶开度, ω 为电网角频率, rad/s ; T_P 为发动机活塞时间常数, s ; K_S 为增益; T_c 为反馈时间常数, s ; σ 为反馈放大倍数。

图 4 水轮机调速器模型

Fig.4 Model of hydro turbine speed-regulation

图 5 为同步电机模块示意图, 该模块是整个水力发电机组模型的核心部分, 输入量包括电流的反馈量、水轮机的转速与自动励磁控制系统的励磁电流, 输出量为电压, 由式 (8)、(9)、(10) 可得励磁系统的控制模块 (如图 6 所示)。

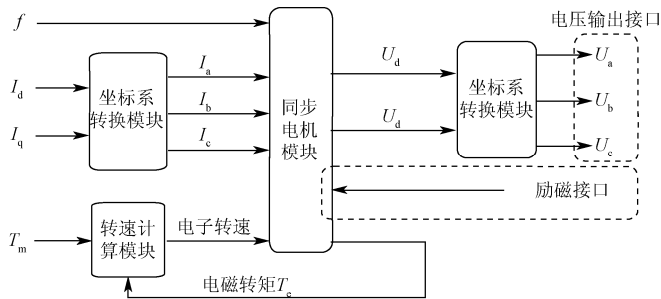


图 5 同步电机模型结构图

Fig.5 Structure of synchronous motor model

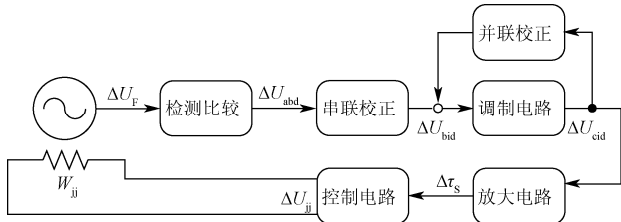


图 6 水力发电机励磁控制模型结构图

Fig.6 Structure of hydro turbine excitation control system

3 仿真结果与分析

在所建立的微水发电系统和自动励磁控制系统模型基础上, 利用电力系统电磁暂态 EMTP/ATP 仿真软件对微水发电系统的动态运行特性进行研究。包含微水发电系统的系统仿真图如图 7 所示。仿真运行时间设置为 2 s, 在 0~0.8 s 为微网系统稳态运行时间, 假设在 0.8 s 系统发生三相短路故障, 故障持续时间为 0.4 s, 在 1.2 s 时切除故障, 机端输出电压等级为 220 V。

图 8 和图 9 分别为系统在电网发生短路故障后发电机机端电压以及系统有功功率、无功功率随时间变化的情况。从图 8 中可以看出, 由于在 0.8 s 突发三相短路故障, 机端电压急剧下降, 短路故障持续了 0.4 s, 在 1.2 s 时刻故障清除系统逐渐恢复了正常的电压水平。图 9 表明在故障情况下, 系统的有功功率、无功功率随着故障的发生而增加, 当故障切除后经过 1~2 s 的调整逐渐恢复到正常值, 表明本文所建动态模型的有效性。

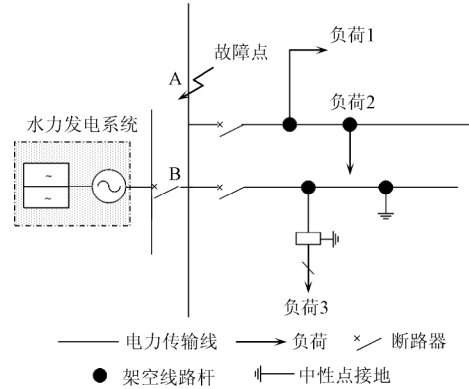


图 7 水力发电机组的 EMTP/ATP 系统仿真图

Fig.7 EMTP/ATP simulation network including micro-hydro unit

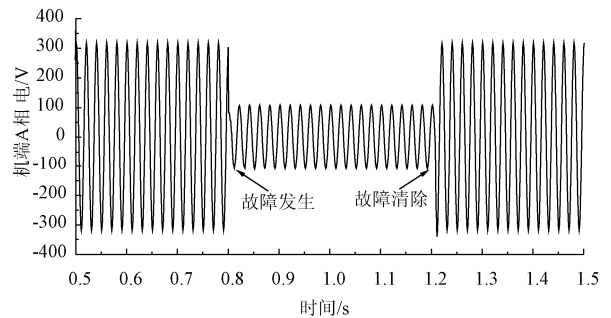


图 8 短路故障下发电机机端 A 相电压

Fig.8 Terminal voltage of phase A under fault condition

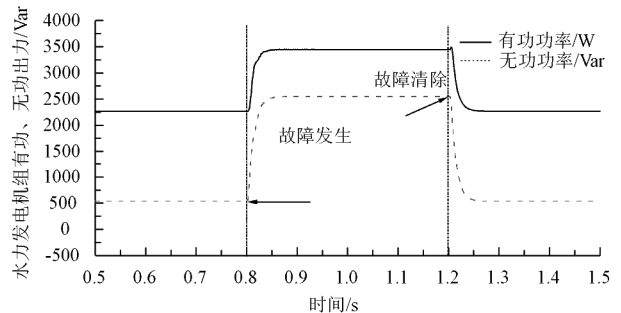


图 9 短路故障下水力发电机组的有功、无功出力

Fig.9 Active/reactive power of hydro turbine under fault condition

图 10 为 A 相定子电流曲线, 表明 A 相定子电流在稳态以及发生三相短路故障后的变化情况。从图 10 中可以看出, 在 0.8~1.2 s 的短路故障期间, 流过发电机定子的电流的瞬时值增大为额定值的 10 倍, 可能使发电机定子绕组过热, 对系统的正常运行造成影响。

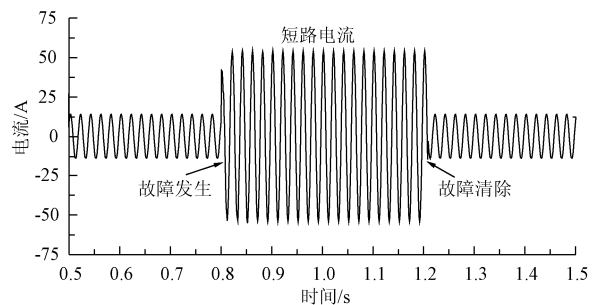


图 10 短路故障下发电机机端 A 相电流

Fig.10 Terminal current of phase A under fault condition

图 11 为微水发电机分别在有自动励磁、无自动励磁系统情况下的机端电压对比。从图 11a、图 11b 两图的对比可以看出，在 0.8~1.2 s 的短路故障期间，由于自动励磁系统的调节作用，当电力系统发生故障而使电网电压下降时，励磁系统快速强行励磁，提高了发电机的机端电压，保证了微水力发电机的正常运行，提高了系统的稳定性。

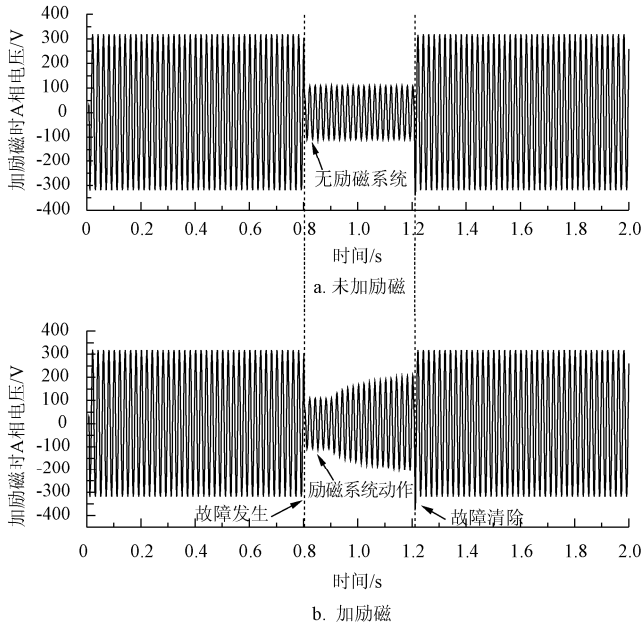


图 11 水力发电机两种情况下的机端电压曲线
Fig.11 Terminal voltage of hydro turbine under two conditions

图 12a、图 12b 分别为采用恒压励磁与包含自动励磁系统两种情况下的微水发电机励磁电流对比曲线。从图 12b 中可以看出，在 0.8~1.2 s 的短路故障期间，励磁系统快速励磁，起到了稳定电压的效果，通过与图 12a 无自

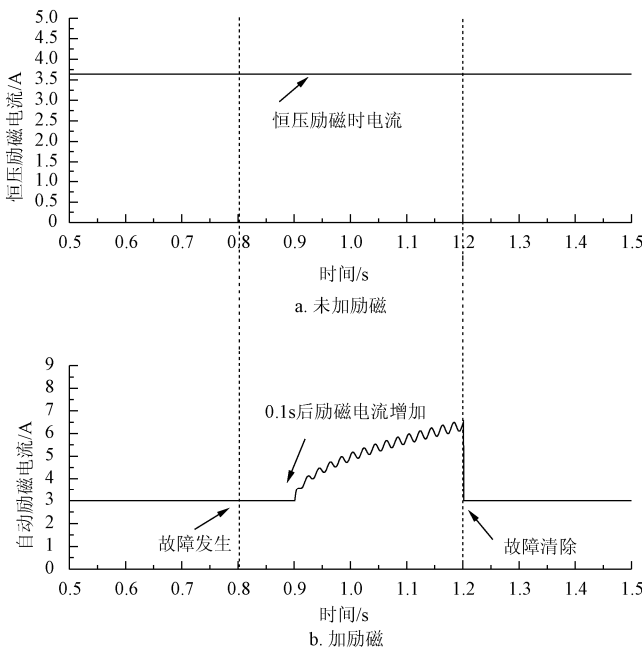


图 12 水力发电机两种情况下的励磁电流曲线
Fig.12 Excitation current of hydro turbine under two conditions

励磁调节系统相比较，在包含微水发电系统的微型电网故障工况下，如果采用自动励磁控制系统，能够通过调节励磁电流来维持机端电压水平，有利于增强电压的稳定性。

图 13a、图 13b 分别表示在有、无自动励磁调节系统情况下的机端电压有效值随时间变化情况。当没有安装自动励磁调节系统时（如图 13a），在 0.8~1.2 s 的故障期间，机端电压有效值明显降低于额定值；当安装自动励磁控制后（如图 13b），在短路故障导致电压下降时，励磁电流会自动增加来提高电压水平，维持机端电压稳定。该研究表明所搭建的微水发电单元的自动励磁调节模型能够有效的对机端电压进行有效的跟踪、调节，有利于改善故障态时机端电压的稳定性。

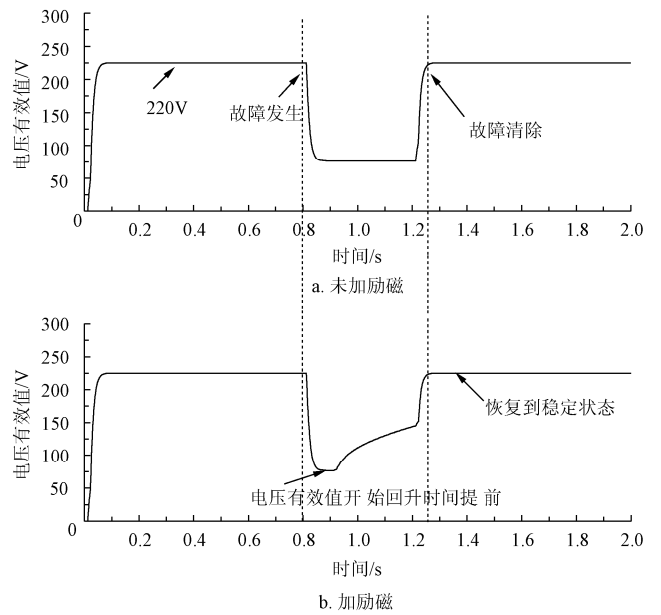


图 13 水力发电机两种情况下 A 相电压有效值曲线
Fig.13 RMS of hydro turbine under two conditions

4 结 论

本文根据微水发电系统的数学模型，在电力系统电磁暂态平台 EMTP/ATP 上建立了微水发电系统的通用动态等值模型，该模型包括水轮机、发电机、励磁控制等模块。利用该模型对微水发电系统的在故障情况下的暂态运行特性及励磁系统的动态调节作用进行了研究，仿真研究论证了该模型的正确性，仿真结果表明该模型适用于研究微型电网系统的暂态特性。

研究表明，为保证微水发电系统的正常运行，励磁系统需要稳定地提供同步电机从空载到满载以及过载时所需的励磁电流；当电网发生故障导致机端电压下降时，自动励磁系统快速调节发电机励磁绕组的励磁电流，提高机端电压，从而改善系统的电压稳定性。

[参 考 文 献]

[1] 刘晓亭. 大型水轮发电机组稳定性分析和故障诊断[J]. 湖北水力发电, 2002, 3: 3-7.
Liu Xiaoting. Analysis on stability and fault diagnosis of

- large hydroturbine-generator units[J]. *Hu Bei Water Power*, Number, 2002, 3: 3—7. (in Chinese with English abstract)
- [2] 白耀鹏. 小水电接入电网对系统运行影响的研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2010 年.
Bai Hepeng. Study on the Impact of System Operation Grid-accessed Small Hydropower Stations[D]. Beijing Jiaotong University. 2010. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘宗兵, 束洪春, 韩武, 等. 考虑小水电接入的配电系统可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2007, 35(2): 61—67.
Jiu Zongbin, Shu Hongchun, Han Wu, et al. Reliability evaluation of distribution system including small hydro power[J]. *Power System Protection and Control*, 2007, 35(2): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张昕, 周凌九, 熊鹰, 等. 微型水力发电关键技术研究与技术集成[J]. *建设科技*, 2010(2): 67—69.
Zhang Xin, Zhou Jiuling, Xiong Ying, et al. Technology research and integration of micro hydroelectric power system[J]. *Construction Science and Technology*, 2010(2): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [5] 储俊伟, 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 倪以信, 陈寿孙. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 基于 ATP-EMTP 的大型电力系统暂态稳定仿真[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(21): 54—56.
Gu Danzhen, Ai Qian, Chen Chen, et al. Transient stability simulation of a large power system based on ATP-EMTP[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(21): 54—56. (in Chinese with English abstract)
- [8] 朱建国. 水轮发电机组水机电联合动态过程仿真建模研究[J]. *水力发电*, 2008, 34(5): 43—45.
Zhu Jianguo. Simulation modeling for electro-hydro-mechanical dynamic process analysis[J]. *Water Power*, 2008, 34(5): 43—45. (in Chinese with English abstract)
- [9] Farret F A, Godoy Simões M. Integration of alternative sources of energy[J]. *Wiley Interscience*, pages: 57—60.
- [10] 陈建伟. 定/变桨距风力发电机组动态模型的研究[D]. 中国农业大学硕士论文, 2007 年.
Chen Jianwei. Model for Variable/Invariable Pitch Wind Turbines for Power System Dynamic Simulations[D]. China Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [11] Johannes Gerlof Slootweg. Wind power modeling and impact on power system dynamics: [PhD thesis], 2003.
- [12] 蒋志扬, 李颂伦. 飞机供电系统[M]. 西北工业大学出版社.
- [13] 高炜. 应用 MATLAB 构建水电机组测试系统开发平台[D]. 西安理工大学硕士学位论文, 2009 年.
Gao Wei. Application of MATLAB to Build Hydropower Generation Units test System'S Development[D]. Xi'an University of technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宁世国, 叶林. 户用风力发电系统离网运行控制策略的研究[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 232—239.
Ning Shiguo, Ye Lin. Research on control strategy of off-grid household wind power generation system[J]. *Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(5): 232—239. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张强, 张建文, 张勇. Park 矢量变换在异步电机故障诊断中的应用[J]. *煤炭技术*, 2006, 25(6): 35—36.
Zhang Qiang, Zhang Jianyi, Zhang Yong. Application of park vector transformation in fault diagnosis of asynchronous machine[J]. *Coal Technology*, 2006, 25(6): 35—36. (in Chinese with English abstract)
- [16] 齐学广, 李晓梅, 陶鑫, 等. 正交 Park 变换在同步电机分析中的应用[J]. *山东科技大学学报*, 2006, 25(2): 67—71.
Qi Xueguang, Li Xiaomei, Tao Xin, et al. The application of orthogonal transformation in the analysis of synchronous electrical machinery[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology*, 2006, 25(2): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李立成, 叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(17): 26—31.
Li Licheng, Ye Lin. Coordinated control of frequency and rotational speed for direct drive permanent magnet synchronous generator wind turbine at variable wind speeds[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(17): 26—31. (in Chinese with English abstract)

Transient response of pico-hydro power generation system with automatic excitation units under fault conditions

Sun Haibo, Ye Lin^{*}, Li Licheng, Song Xuri

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is important to improve voltage stability of hybrid generation system based on renewable energies by using automatic excitation units in pico-hydro generation system. Based on the mathematical model, an equivalent dynamic model of a pico-hydro power generation system including hydro turbine, synchronous generator, automatic excitation system was created in ElectroMagnetic Transient Program/Alternative Transient Program (EMTP/ATP) software package. Case study was carried out to investigate the operational characteristics of pico-hydro system under fault conditions in a micro grid. Simulation results showed that the automatic excitation regulation and control system could improve the voltage stability by increasing excitation current rapidly as low voltage occurs during fault conditions.

Key words: hydroelectric power, fault detection, computer simulation, pico-hydro power system; electromagnetic transient; automatic excitation system