

电厂锅炉及辅机对电力系统动态频率影响的仿真研究

刘克天, 王晓茹

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 目前进行电力系统频率稳定研究主要是将系统进行单机单负荷等值, 采用单机单负荷模型。该模型主要是基于 Anderson 提出的低阶系统频率响应模型, 其忽略了锅炉及辅机对系统动态频率的影响。在低阶系统频率响应模型基础上, 建立了一个包含电厂锅炉、辅机及机组控制系统的简单闭环模型, 用于电力系统频率稳定研究。该闭环模型计及了由锅炉效应及厂用电驱动的辅机设备的频率效应。仿真对比了系统在遭受同一扰动时, 锅炉主蒸汽压力恒定、辅机由无穷大电源供电及考虑辅机由厂用电电源供电三种情况下系统的动态频率。仿真结果表明, 当系统所遭受的扰动较大时, 锅炉及辅机设备对系统动态频率的影响不应被忽视。

关键词: 低阶系统频率响应模型; 锅炉; 辅机; 火电厂闭环模型; 机组控制系统; 动态频率

Simulation study of influences of power plant's boiler and auxiliaries on power system dynamic frequency

LIU Ke-tian, WANG Xiao-ru

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The primary method for power system frequency stability study currently is to make the equivalent of the power system into a single-machine with centralized load which based on Low-order System Frequency Response (SFR) model proposed by Anderson. Usually, the influences of boiler and auxiliaries on power system dynamic frequency are ignored. A simplified close-loop dynamic model based on SFR model of coal fired power plant for power system dynamic frequency study is proposed. The boiler, auxiliaries and unit control system are included in this model. The induction motors' frequency characteristic of auxiliaries powered by plant power is also considered in the closed loop model. Simulations and comparisons of power system dynamic frequency have been done among the systems with constant steam pressure, auxiliaries powered by infinite power source and auxiliaries powered by plant-power. The simulation results show that the effect of boiler and auxiliaries should be taken into account when the power system is under large disturbances.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90610026).

Key words: low-order system response model; boiler; auxiliaries; closed loop dynamic model of power plant; unit control system; dynamic frequency

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0053-06

0 引言

目前我国电力工业的现状是“大电网、大电厂、大机组、高电压输电、高度自动控制”, 其提高了系统抵御故障的能力, 但系统在大扰动下维持频率稳定的能力却在不断的恶化^[1]。频率稳定问题的时间尺度从零点几秒到几分钟^[2]。汽轮机虽然能够利用锅炉蓄能很快改变发电机的出力, 但不能持久。由于调压系统响应慢, 在系统达到最终稳态前, 机前

压力的动态偏差较大^[3]。因此在进行系统中长期频率稳定研究时, 需要建立那些在暂态稳定和电压稳定研究中通常不需要考虑的设备、过程和控制动态模型, 如发电机的控制与保护、原动机的动态模型等^[4]。

在进行电力系统频率稳定分析时, 主要通过仿真或者等值模型获取系统在扰动后的动态频率^[5]。目前, 计算扰动后动态频率的模型主要是基于 Anderson 提出的简化的单机等值带集中负荷的低阶系统频率响应模型 (Low-order System Frequency Response Model, SFR Model), 其核心思想是将系统等值为单机单负荷模型^[6]。SFR 模型忽略了较小的

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (90610026)

时间常数,只考虑了系统惯性时间常数及再热时间常数的影响^[7]。文献[8-10]将多机系统进行单机等值,假设汽轮机前的主蒸汽压力恒定,利用单机模型来求取扰动发生时系统的动态频率,忽略了锅炉及辅机系统对系统动态频率的影响。文献[11]对比了某实际电网在发生功率脱落事件后的实际频率实测轨迹和 PSASP 仿真轨迹,结果显示实测频率轨迹与仿真频率轨迹相差较大,并且在频率恢复阶段,实测轨迹要低于仿真轨迹。主要是因为 PSASP 仿真中,没有考虑锅炉及辅机对汽轮机动态的影响,文中作者仅将锅炉主蒸汽压力侧的影响等效为一阶惯性环节,通过与实测轨迹进行拟合,来寻找合适的参数。文献[12]在理论上分析了调差系数及调速器死区参数设置与电网频率稳定性和调频能力的关联关系,但是仍没有考虑电厂辅机设备对系统频率特性的影响。文献[13]建立了一个包括汽轮机、锅炉、辅机及机组控制系统的火电厂的简化模型,但其并没有考虑辅机设备的频率效应及辅机设备功率变化对系统动态频率的影响,即没有在真正意义上形成一个闭环系统。

本文建立了一个基于单机模型的简单含辅机、锅炉的系统闭环模型,研究不同有功扰动情况下,发电厂锅炉、辅机等设备对系统动态频率的影响。

1 电厂动态模型

1.1 电厂闭环建模

当系统遭受较大有功功率扰动时,汽轮机控制阀前的蒸汽压力不再保持恒定,甚至在短时内发生较大的偏移。当系统频率偏移较大时,不仅影响用户设备的正常工作,也影响发电厂辅机设备的正常出力,进而影响锅炉的给煤量、给风量、给水量,进一步影响汽轮机的机械出力^[14]。同时,单元机组控制系统根据控制规则改变发电厂辅机系统的工作状态,调整锅炉的给煤量、给水量与给风量。由于发电厂辅机设备同样也是发电机负荷的一部分,故发电机所带的总负荷量也将发生进一步改变。图 1 显示电厂闭环模型示意图,可以看出,通过厂用电驱动电厂辅机设备,形成了一个闭环系统。

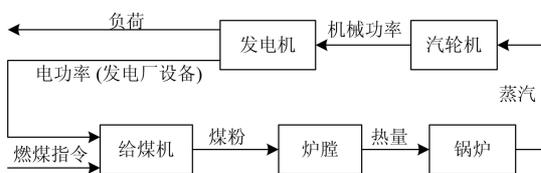


图 1 电厂闭环模型示意图

Fig. 1 Sketch map of power plant closed loop model

1.2 锅炉动态模型

锅炉动态模型采用图 2 所示的 IEEE 推荐的标准锅炉模型^[15-16],该模型考虑了燃料的燃烧动态,水冷壁动态、以及水冷壁和汽包的蓄热效应。因给水环节在火电厂的动态特性中所起的作用不大,故该模型省略了给水调节回路,通过选取不同的燃烧参数数值,该模型能够模拟燃煤和燃油火电厂的动态特性^[17]。

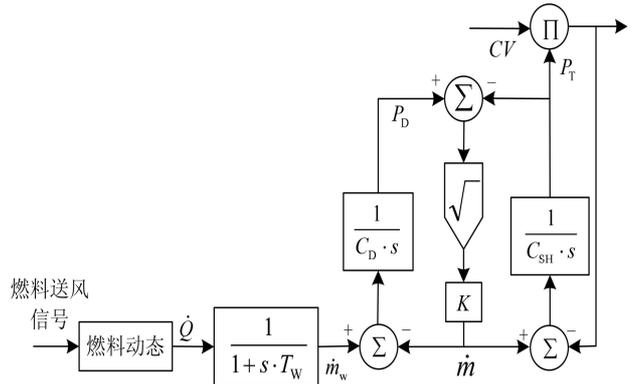


图 2 锅炉模型框图

Fig. 2 Block diagram of boiler

图 2 中: \dot{Q} 为燃料燃烧释放的热量; T_w 为水冷壁时间常数; m_w 为水冷壁中产生的蒸汽量; \dot{m} 为流出汽包的蒸汽量; C_D 为锅炉主蓄热时间常数; C_{SH} 为轮机侧等效蓄热时间常数; P_D 为汽包压力; P_T 为轮机前压力; CV 为汽轮机控制阀阀门开度; K 为摩擦衰减系数。

1.3 汽轮机发电机模型

汽轮机发电机模型采用文献[7]中所提出的 SFR 模型,该模型对系统进行单机等值,广泛地应用于电力系统动态频率分析及低频减载方案的整定。SFR 模型主要考虑了发电机惯性常数、汽轮机再热时间常数以及调速器调差系数对发电机动态频率的影响,忽略了一些较小的时间常数。

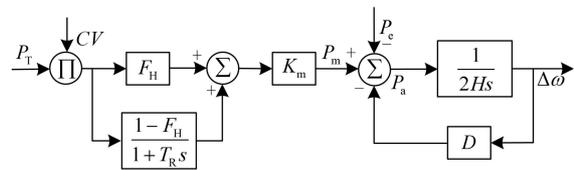


图 3 汽轮机模型框图

Fig. 3 Block diagram of steam turbine

图 3 中: F_H 为高压缸功率比例; T_R 为再热时间常数; K_m 为比例系数; P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; P_a 为加速功率; H 为汽轮机-发电机惯性时间

常数; D 为阻尼系数; $\Delta\omega$ 为角速度偏移量。

1.4 汽轮机调速系统模型

调速器模型只考虑频率调节系数 R 和阀门位置限制的影响。同时由于锅炉蓄热是有限的, 将负的压力偏差信号引入到汽轮机调速控制系统中, 以保证气压不致产生过大的偏差, 同时又充分利用锅炉的蓄热^[18]。汽轮机调速系统模型如图 4 所示。

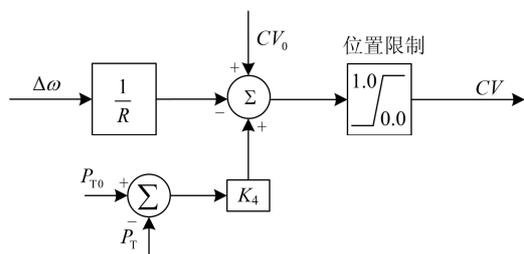


图 4 调速器模型框图

Fig. 4 Block diagram of speed governor

图 4 中: R 为汽轮机频率调节效应系数; CV_0 为控制阀初始开度; P_{T0} 为控制阀前设定压力; K_4 为比例系数。

1.5 锅炉控制器模型

锅炉控制器采用比例积分控制器, 以蒸汽压力偏差信号为输入信号, 通过一个比例积分环节来控制进入锅炉的给煤粉量^[19-20], 如图 5 所示。

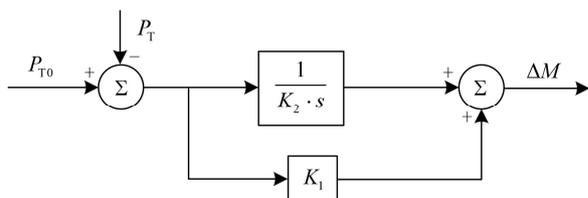


图 5 单元机组控制模型框图

Fig. 5 Block diagram of unit regulation system

图 5 中: K_1 、 K_2 为比例系数; ΔM 为进入锅炉的煤粉燃料改变量。

1.6 辅机动态模型

燃煤火电厂的辅机设备由以厂用电为电源的异步电机进行驱动。当系统遭受扰动时, 发电机端电压与频率都会发生波动, 由于异步电机出力具有电压与频率效应, 其驱动的辅机设备出力也相应地发生波动, 进而锅炉的给煤量、给风量与给水量也相应地发生变化, 影响汽轮机的出力。另一方面, 厂内辅机设备也是发电厂负荷的一部分, 当发电厂所带的厂外电网负荷发生波动时, 机组控制系统通过电厂辅机设备来相应地调节锅炉的给煤量、给风量与给水量, 故电厂辅机的功率也将发生相应的改变, 反过来影响发电机的出力, 辅机与发电机通过

电磁功率形成了一个相互作用的闭环系统。目前我国电厂在电力生产过程中, 电厂设备所消耗的厂用电率一般在 6%~10%之间, 本文中取厂用电率为 7%, 主要考虑辅机设备的频率效应, 并进行了如下假设:

a) 由于发电机一般装有快速励磁装置且本文频率动态所研究的时间段要远远大于励磁系统的动作时间, 故假设发电厂内以厂用电驱动的异步电动机端电压保持不变, 只有电源的频率发生变化;

b) 本文中假设锅炉的给煤量是通过调节驱动送粉系统的异步电动机转速来实现的, 假设异步电动机所拖动的机械力矩保持恒定。

由于异步电动机的频率效应, 辅机设备的实际转速和机组控制单元所计算出的转速有一个偏差, 故实际的给煤量、给风量、给水量与计算值比较, 都会存在一个相应的偏差。在频率偏差不大时, 异步电动机转差率与系统频率的关系用一个近似静态关系表示, 如式 (1) 所示^[21]。锅炉制粉系统采用中间储仓式制粉系统, 故只考虑送粉系统的惯性动态和异步电动机的频率效应, 用一个一阶惯性环节近似表示, 如图 6 所示。

$$\frac{s}{s_N} = \frac{\omega}{\omega_N} \quad (1)$$

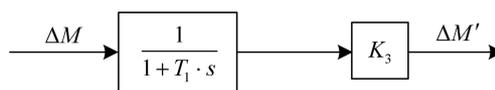


图 6 送粉系统模型框图

Fig. 6 Block diagram of powder feeding system

式 (1) 中: s_N 为在额定频率下, 异步电动机的额定转差率; ω_N 为系统额定频率; s 为在非额定频率时, 异步电动机的转差率; ω 为系统遭受扰动时, 系统频率。图 6 中: T_1 为送粉系统惯性时间常数; K_3 为由式 (1) 确定的与系统频率相关的变化系数; $\Delta M'$ 为实际燃料改变量。

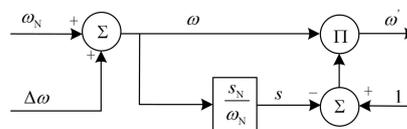


图 7 异步电机的实际转速

Fig. 7 Actual rotate speed of induction motor

图 7 中: $\Delta\omega$ 为系统遭受扰动时, 系统的频率变化量; ω 为系统扰动后的频率; ω' 为非额定频率下, 异步电机的实际转速。

电厂发电机所带负荷由厂外电网负荷和电厂辅机设备负荷两部分组成。当外部电网负荷发生扰动时，机组控制单元根据控制规则来调节厂用电设备，改变给煤量、给水量等参数。故发电机机端负荷的变化由厂外电网负荷变化量和厂内辅机设备负荷变化量两部分组成，如图 8 所示。

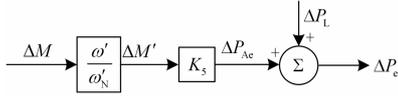


图 8 发电机端变化的总电磁功率

Fig. 8 Total electric power deviation of generator

图 8 中： ω'_N 为额定频率下，异步电机的转速； K_S 为厂用电率，其取值为 0.01； ΔP_{Ac} 为厂用电负荷的变化量； ΔP_L 为电厂外加到电厂上的负荷变化量； ΔP_e 为电厂总的负荷变化量。

2 动态仿真

2.1 测试系统介绍及数据

以单机带集中负荷系统为测试系统，以有功负荷的突然增加作为测试系统的有功功率扰动，负荷模型采用恒功率负荷，测试系统中各参数单位以发电机额定功率为基准取标么值。假设扰动前系统的初始负荷为 0.5，控制阀前蒸汽压力为额定值 1，控制阀开度为 0.5，燃料输入为标么值的 0.5。测试系统中其余参数取文献[7, 22]中所建议的典型值，参数取值如表 1 所示。

表 1 实验参数取值

Table 1 Parameter values in simulation

符号	F_H	T_R	K_m	H	D
数值	0.3	8	0.95	4	1
符号	R	C_D	C_{SH}	K	s_N
数值	0.05	180	15	3.5	0.05
符号	T_w	T_1	K_1	K_2	K_4
数值	6	20	2	33	0.3

2.2 仿真实验及分析

为了验证电厂辅机设备及系统频率对发电机动态频率的影响，分别仿真计算了三种系统在不同扰动功率情况下的发电机机端的动态频率。系统 1 为控制阀前主蒸汽压力恒定，即不包含锅炉及电厂辅机动态；系统 2 含锅炉及电厂辅机动态，但电厂辅机由无穷大电源供电；系统 3 同样含锅炉及电厂辅机的动态，但辅机由厂用电电源供电。图 9~图 14 为有功扰动分别为 0.1 p.u.、0.2 p.u. 与 0.3 p.u. 时三个

系统的频率仿真曲线。图 9、图 11、图 13 分别为三个系统在不同有功扰动情况下的前 30 s 频率响应曲线，其主要是为了观察锅炉及辅机对系统动态频率中最低频率的影响；图 10、图 12、图 14 为三个系统在不同扰动情况下 0~1 600 s 的频率响应曲线，其主要是为了观察锅炉及辅机对系统动态频率的终值频率的影响。

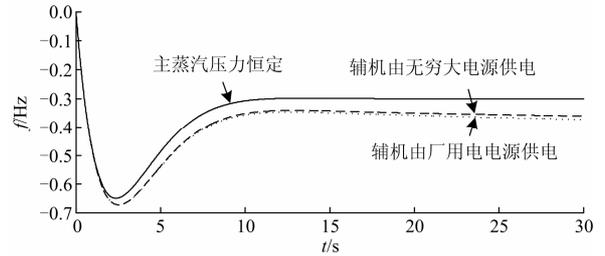


图 9 0.1 pu 扰动时前 30 s 频率偏移曲线

Fig. 9 Frequency deviation after 0.1 pu disturbance for 30 s

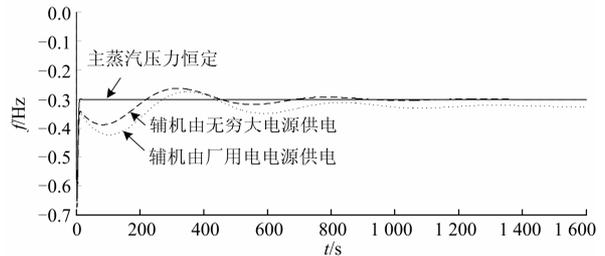


图 10 0.1 pu 扰动时 1 600 s 频率偏移曲线

Fig. 10 Frequency deviation after 0.1 pu disturbance for 1 600 s

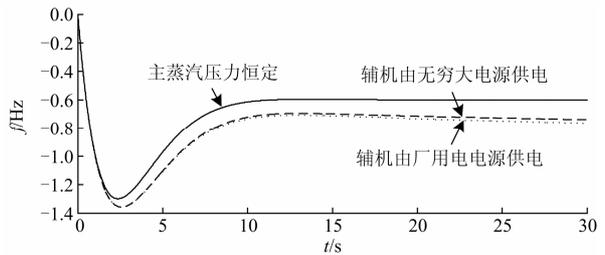


图 11 0.2 pu 扰动时前 30 s 频率偏移曲线

Fig. 11 Frequency deviation after 0.2 pu disturbance for 30 s

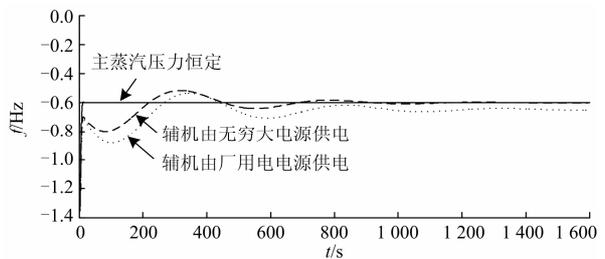


图 12 0.2 pu 扰动时 1 600 s 频率偏移曲线

Fig. 12 Frequency deviation after 0.2 pu disturbance for 1 600 s

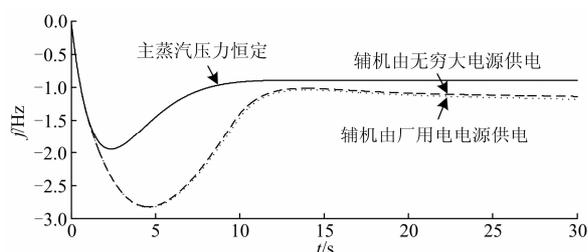


图 13 0.3 pu 扰动时前 30 s 频率偏移曲线

Fig. 13 Frequency deviation after 0.3 pu disturbance for 30 s

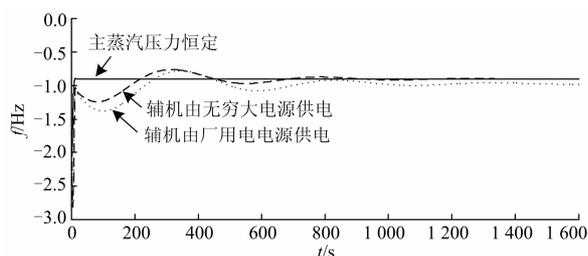


图 14 0.3 pu 扰动时 1 600 s 频率偏移曲线

Fig. 14 Frequency deviation after 0.3 pu disturbance for 1 600 s

当有功扰动为 0.1 p.u.时, 系统 3 与系统 1 最低频率差值为 -0.024 Hz, 终值频率差值为 -0.022 Hz; 有功扰动为 0.2 p.u.时, 系统 3 与系统 1 最低频率差值为 0.060 Hz, 终值频率差值为 0.050 Hz; 有功扰动为 0.3 p.u.时, 系统 3 与系统 1 最低频率差值为 0.882 Hz, 终值频率差值为 0.075 Hz。

3 结论

本文建立了包含锅炉、辅机及机组控制系统的发电厂闭环模型, 在不同扰动功率下进行仿真研究, 得出以下结论:

1) 当系统所遭受的有功扰动较小时, 锅炉动态及辅机效应对系统动态频率的影响很小, 系统 1 与系统 3 最低频率和终值频率相差不大, 故对于较小扰动及研究时间较短的稳定性研究, 可以忽略锅炉蒸汽压力变化的影响。

2) 当系统遭受的有功扰动较大时, 如 0.3 pu 有功扰动, 系统动态频率的最低值和终值之间的差异很大, 如图 13、图 14 所示: 系统 1 与系统 3 最低频率差值为 0.882 Hz, 终值频率差值为 0.075 Hz。所以特别是在紧急情况下的频率稳定控制, 应计及发电厂锅炉、辅机及机组控制系统的影响。

3) 火电厂辅机作为厂用电的负荷, 系统在遭受较小有功扰动时, 辅机功率的变化对系统动态频率的影响很小, 可以忽略; 当系统遭受较大的有功扰动时, 辅机功率的变化影响着系统动态频率的终值, 如扰动为 0.3 p.u.时, 系统 1 与系统 3 终值频率

差值为 0.075 Hz。此时, 辅机功率的变化应计及到发电机的负荷功率的变化当中去。

参考文献

- [1] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154.
ZHANG Jian-ming, BI Tian-shu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and classification of power system stability[R]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [3] 张培高, 李兴源, 李政. 孤网频率稳定与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 143-149.
ZHANG Pei-gao, LI Xing-yuan, LI Zheng. Research on frequency stability and control strategy in isolated power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 143-149.
- [4] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Heng-xu, LI Chang-gang, LIU Yu-tian, et al. Review on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [5] 李爱民, 蔡泽祥. 基于轨迹分析的互联电网频率动态特性及低频减载的优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 171-177.
LI Ai-min, CAI Ze-xiang. Frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the dynamic simulation trajectory of interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 171-177.
- [6] 李常刚, 张恒旭, 刘玉田, 等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 212-220.
LI Chang-gang, ZHANG Heng-xu, LIU Yu-tian, et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit under frequency relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,

- 28(2): 212-220.
- [7] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [8] 李秀卿, 蔡泽祥. 电力系统低频减载控制优化算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 23-25.
- LI Xiu-qing, CAI Ze-xiang. An optimal algorithm of low frequency load shedding in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25.
- [9] LARSSON M, CHRISTIAN R. Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurement[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002.
- [10] THORP J S, WANG X R, HOPKINSON K M, et al. Agent technology applied to the protection of power system, chapter 7 of the book: autonomous systems and intelligent agents in power system control and operation[M]. Springer, 2003.
- [11] 施翔, 刘洪波, 徐兴伟, 等. 电力系统频率动态过程仿真中锅炉动态特性影响研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 69-72.
- SHI Xiang, LIU Hong-bo, XU Xing-wei, et al. Study of impact of boiler's dynamic characteristics on dynamic frequency process in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 69-72.
- [12] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 91-95.
- JIN Na, LIU Wen-ying, CAO Yin-li, et al. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 91-95.
- [13] LIU K T, WANG X R. Dynamic frequency simulation and study on turbine-generator including the effect of boiler and fuel system[C] // Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), Aisa-Pacific, 2010.
- [14] 刘维烈, 珠峰, 李端超, 等. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 电力工业出版社, 2005: 8-12.
- [15] IEEE Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Dynamic models for fossil fueled steam units in power system studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 753-761.
- [16] FLYNN M E, O'MALLEY M J. A drum boiler model for long term power system dynamic simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 209-217.
- [17] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型-电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.
- TANG Yong, SONG Xin-li, LIU Wen-zhuo, et al. Power system full dynamic simulation part III: long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25.
- [18] 张栾英, 孙万云. 火电厂程控[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 20.
- [19] 丁轲轲. 热工过程自动调节[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 171-179.
- [20] 陈来九, 郑光华, 徐耀文. 汽轮机功频调节系统在单元机组负荷自动控制系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1982, 2(2): 9-20.
- CHEN Lai-jiu, ZHENG Guang-hua, XU Yao-wen. The application of turbine speed-power control system to the generation unit load control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1982, 2(2): 9-20.
- [21] 周希章, 周权. 节电技术与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 107-108.
- [22] 周立红. 电力系统运行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 8.

收稿日期: 2013-09-09

作者简介:

刘克天(1980-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统频率稳定与控制; E-mail: liuketian@tom.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制、电力系统保护与变电站自动化。