

燃气-蒸汽联合循环机组的实时数字仿真建模

蒋松含¹, 李中豪¹, 张沛超¹, 郭强², 张建新²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网上海电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 为了弥补国内对燃气-蒸汽联合循环电厂(Combined Cycle Power Plant, CCPP)中机组动态模型研究的不足, 解决常用的电力系统仿真软件不提供 CCPP 仿真模型的问题, 针对国内 9F 级重型 CCPP 机组所具有的不补燃余热锅炉、单轴型结构、滑压运行等特点, 研究并建立了 CCPP 机组的实时数字仿真模型。首先在 Matlab/Simulink 环境下建立了非实时数字仿真模型, 然后将其转换为 C 语言代码, 并利用 CBuilder 工具将其封装为可以实时运行的仿真模型。最后, 在 RTDS 上对模型进行了仿真测试, 并与现场实测结果进行了对比验证。仿真结果表明, 所建立的 CCPP 机组模型在计算效率和模型精确性等方面均能满足电力系统的实时仿真要求。

关键词: 联合循环电厂; 建模; 实时数字仿真; 封装模型

Real-time digital modeling of gas-steam combined cycle power plant

JIANG Songhan¹, LI Zhonghao¹, ZHANG Peichao¹, GUO Qiang², ZHANG Jianxin²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China)

Abstract: At present, there is very limited research on dynamic modeling of gas-steam combined cycle power plant (CCPP) units domestically, and the commonly used power system simulation software still lack CCPP models, to build a CCPP units model based on the characteristics of the domestic 9F heavy duty CCPP units with unfired heat recovery steam generator, single shaft and sliding pressure control, a real time digital simulation model of CCPP units is established. Firstly a non-real-time digital simulation model is established in the Matlab/Simulink environment, and then the model is converted into C language code. Secondly by using CBuilder, C language code is encapsulated in a simulation model which can run in real time. Finally the model is tested on Real Time Digital Simulator (RTDS), and verified with the field test results, which demonstrates that the developed CCPP model can meet the real time simulation requirements of power system in terms of computation efficiency and model accuracy.

This work is supported by the National Science and Technology Supporting Plan (No. 2013BAA01B04).

Key words: combined cycle power plant; modeling; RTDS; encapsulation model

中图分类号: TM743; TM611.3

文章编号: 1674-3415(2015)20-0137-06

0 引言

燃气-蒸汽联合循环(gas-steam Combined Cycle Power Plant, CCPP)发电技术是一种具有高效率、低污染、低水耗、启动快、大容量等特点的清洁发电技术。CCPP 机组由燃气轮机、蒸汽机、余热锅炉以及发电机等四部分组成, 其工作原理是把高温区工作的燃气轮机布雷顿循环与中低温区工作的蒸汽机朗肯循环叠置^[1-2], 组成联合发电系统。由于 CCPP 机组充分利用了燃气轮机的平均吸热温度高和蒸汽

轮机平均放热温度低的特点, 其机组效率可以达到 60%左右^[1], 明显高于燃气机组和蒸汽机组。除了具有发电效率高、环境污染少^[3]等优点, CCPP 机组还具有优良的负荷调节性能, 其理论变负荷速率可以达到 10%MCR/min (MCR, 最大连续出力), 在实际应用中可以达到 5%MCR/min, 远优于常规燃煤机组 2%MCR/min 的调节特性, 仅次于水电机组^[4]。在未来智能电网中, 这种调节能力对于平滑风能等可再生能源的波动性具有重要作用。

从国家层面上, 加强天然气的勘探开采与应用、发展绿色低碳技术和循环技术已成为我国重要国策。到 2020 年, 我国天然气工业可以为 1.6 亿 kW

燃气-蒸汽联合循环电站提供足够的燃料^[5]。发展联合循环对改善国内环境、调整国家能源结构有着相当重要的意义。

但是，目前关于 CCGP 机组动态模型的研究仍非常有限。国内对联合循环的研究^[2,6]主要是从热力学角度进行仿真建模的。在电网分析与研究中需要 CCGP 机组模型时，常以燃气机组或蒸汽机组的模型替代。在 RTDS、PSCAD、PSS/E 以及 DigSilent 等常用电力系统仿真软件中，普遍缺乏针对 CCGP 机组的模型。

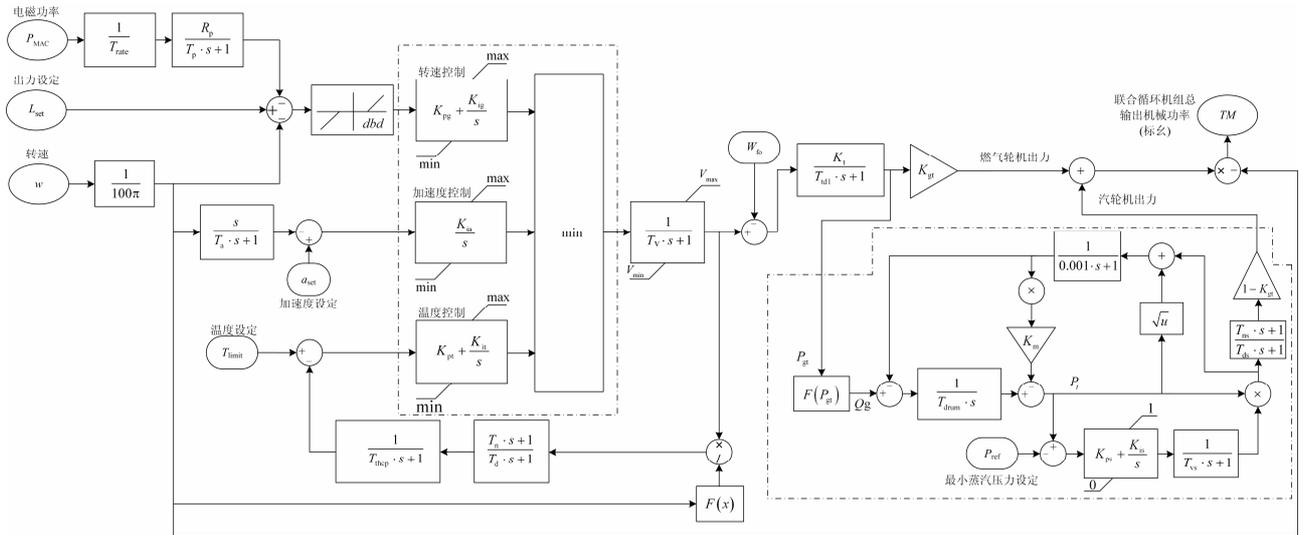


图 1 联合循环机组仿真模型

Fig. 1 CCGP simulation model

燃气轮机模型中考虑了加速度控制、温度控制、转速控制^[7]等三个动态控制环^[8-9]，其中转速和温度控制采用比例-积分(PI)控制，加速度控制采用积分控制。这三个控制环的输出通过最小值选择器后去控制燃料，如图 1 所示。转速控制的输入是电磁功率、转速、转速参考值，温度控制的输入是测量温度以及温度参考值，加速度控制的输入是转速和加速度参考值。

在滑压运行方式下，汽轮机的功率输出跟随燃气轮机。燃气轮机和汽轮机的出力比例接近 2:1。稳态运行时，不补燃余热锅炉型 CCGP 机组功率输出由燃气轮机输出功率决定。在动态情况下，机组的总体负荷响应速度主要受余热锅炉限制。

仿真模型中采用标么值。CCGP 模型最后将总机械转矩输出至发电机，但原动机和发电机的基准值不一样。其中，发电机以视在功率(MVA)为基准值，而原动机以额定功率(MW)为基准值。

1.1 转速控制

图 1 包含转速控制，它是燃气轮机控制中最重

针对以上问题，本文以国内广泛采用的 9F 级重型燃气-蒸汽 CCGP 机组^[5]为对象，在 RTDS 平台上建立了一个滑压运行、不补燃的单轴联合循环机组的实时数字仿真模型，并利用 CBuilder 工具对仿真模型进行了封装，以提高模型的可复用性。

1 燃气-蒸汽联合循环机组建模

根据国内 CCGP 机组的实际情况，本文针对的机组类型为单轴型，采用不补燃型余热锅炉，以滑压方式运行。本文建立的模型如图 1 所示。

要的部分，选择合适的参数 K_{pg} 、 K_{ig} 可以实现对燃气轮机响应速度的调节；参数 dbd 可以调节功率波动死区范围；参数 L_{set} 是转速/负荷参考值，可响应 AGC 指令 P_{AGC} 进行调节，以改变机组的基荷。

1.2 加速度控制

加速度控制是在机组转速变化率越限时控制燃烧系统。该控制在机组起机或者切负荷过程中尤为重要。在图 1 中，加速度控制根据加速度和加速度参考值 a_{set} 的差进行积分控制，积分系数为 K_{ia} 。

1.3 温度控制

温度控制在燃气轮机排出气体温度超过限值时起作用。在图 1 中，温度控制由温度测量模块、比较模块和 PI 控制器这三部分组成。其中温度测量模块中，参数 T_{thcp} 、 T_n 、 T_d 代表了热电偶和辐射屏蔽层^[9]对测量过程的影响， $F(x)$ 为反映转速对温度控制的影响的非线性函数。参数 T_{limit} 为温度限制值，测量温度和 T_{limit} 的差值经过 PI 控制器进行调节，其比例、积分系数分别为 K_{pt} 、 K_{it} 。

1.4 汽轮机控制^[9]

由于本模型采用不补燃型余热锅炉以及滑压运行方式, 因而汽轮机的控制相对简单。参数 T_{drum} 为余热锅炉的时间常数, 反应了余热锅炉的响应速度。 $F(P_{\text{gt}})$ 代表余热锅炉吸收的热量(Q_{g})和燃气轮机输出功率(P_{gt})的非线性映射关系。 P_1 则代表了汽轮机进气阀的主蒸汽压力。 P_{ref} 代表最小的蒸汽压力参考值。当 P_{ref} 很小时, 汽轮机的调速系统不起作用, 此时调节气门全开, 实现滑压运行。

2 基于 CBuilder 的联合循环封装模型

2.1 基于 Simulink 的 CBuilder 组件开发

RTDS 是一套利用多 CPU 并行处理技术和 EMTP 模型对电力系统电磁暂态过程进行模拟的计算机装置, 是目前世界上技术最成熟、应用最广泛的实时数字仿真系统^[10-11]。RTDS 可以进行实时仿真, 可以与外部设备构成灵活方便的数字-物理闭环回路^[12-14]。RTDS 仿真一次设备, 可以使参数与实际系统一致^[15]。

在 RTDS 中, 所有的控制组件及其参数都是全局的。如果利用控制组件建立图 1 的 CCPP 机组模型, 则建好的模型很难多次实例化, 无法以模块化的方式进行复用。为解决这个问题, 可以利用 RTDS 提供的组件自定义工具 CBuilder 对控制模型进行封装^[16-17], 封装好的模型具有一系列优点, 例如, 具有清晰的输入/输出接口, 可以多次实例化, 以及更高的执行效率等。

但是, CBuilder 要求人工编写 C 语言以实现控制模型, 在 CBuilder 环境下调试控制模型非常困难。与之对比, Matlab/Simulink 提供了高效的控制器建模与调试环境, 同时, 利用 Simulink/Embedded coder 工具, 可以将 Simulink 模型转换为支持浮点数运算的高性能 ANSI C 代码, 从而可以在宿主实时嵌入式平台上运行。RTDS 系统所采用的处理器芯片为 IBM PowerPC 750GX 或 Freescale PowerPC MPC7448。如果将上述处理器视为 Simulink 生成代码的宿主嵌入式平台, 就可以首先在 Simulink 环境下进行快速的模型开发与测试, 然后再将其迁移到 RTDS 平台中。

上述开发过程如图 2 所示。

2.2 CCPP 组件接口定义

首先需定义 CCPP 组件的外部接口, 这样在后续开发中, Matlab/Simulink 模型和 RTDS/CBuilder 模型才可以具有完全兼容的接口。本文定义的 CCPP 组件接口如图 3 所示, 其端口定义如下。

(1) P_{MAC} : 输入端口, 为来自发电机的输出电磁功率;

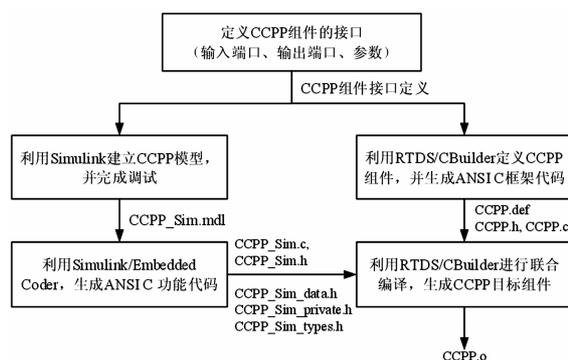


图 2 基于 Simulink 的 CBuilder 组件开发过程

Fig. 2 CBuilder component development process based on Simulink

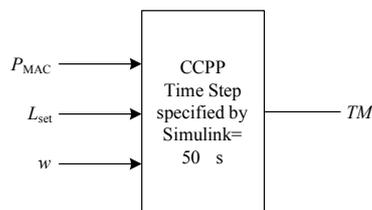


图 3 CCPP 组件的接口定义

Fig. 3 Interface definition of the CCPP component

- (2) L_{set} : 输入端口, 为机组负载/转速参考值;
- (3) w : 输入端口, 为发电机的转速;
- (4) TM : 输出端口, 为输入发电机的机械转矩。

另外, 本文还定义了 CCPP 组件可以配置的参数, 具体参数项目见本文的仿真测试部分。

2.3 Simulink 模型开发与自动代码生成^[18]

按照上述接口定义, 利用 Simulink 完成图 1 所示 CCPP 模型的开发。模型的仿真步长应设为固定步长, 如 $50 \mu\text{s}$ 。然后, 利用 Simulink/Embedded Coder 自动生成 ANSI C 代码, 如表 1 所示。

表 1 Simulink 生成的主要源代码

Table 1 Major source codes generated by Simulink

文件名	文件描述
CCPP_Sim.c	实现 CCPP 模型功能的主要文件
CCPP_Sim.h	包含模型参数和状态变量定义
CCPP_Sim_data.c	包含模型用到的初始参数值
CCPP_Sim_private.h	包含访问实时模型的私有指令的定义
CCPP_Sim_types.h	包含模型中所用的数据类型的定义

2.4 CBuilder 组件的创建和集成编译

利用 RTDS/CBuilder, 创建具有相同接口的 CCPP 组件, 并生成 ANSI C 代码。但该代码仅包含接口定义, 不包含功能实现。功能实现需要导入由

Simulink 生成的功能代码，形成构建 RTDS 平台上 CCPP 模型所需的所有源代码，如表 2 所示。

对上述代码进行集成编译，即可生成封装为自定义组件的 CCPP 模型，可在 RTDS 中被重复使用。

表 2 CBuilder 编译所需源代码

Table 2 Source codes needed for CBuilder compiling

文件名	文件描述
CCPP.def	RTDS CCPP 组件接口定义文件
CCPP.c	RTDS CCPP 组件的功能实现文件，其核心功能从 CCPP_Sim.c 文件导入
CCPP.h	包含 RTDS CCPP 组件的函数定义
CCPP_Sim_x	表 1 中由 Simulink 生成的其他代码
rtGetInf.c,rtGetInf.h	
rtGetNaN.c,rtGetNaN.h	
rtw_continuous.h	由 Matlab 提供的实时嵌入式系统公共支撑代码
rtw_solver.h	
rtwtypes.h,solver_zc.h	
rtGetInf.c,rtGetInf.h	

3 仿真测试

利用 RTDS 建立了图 4 所示的测试系统。机组的额定功率是 400 MW，发电机容量为 470 MVA。图中给出了本文开发的 CCPP 组件与发电机的连接关系。

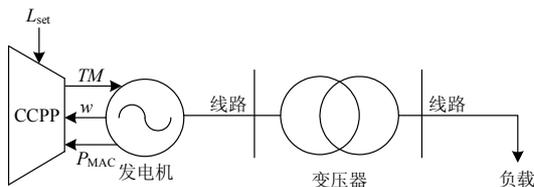


图 4 测试系统

Fig. 4 Test system

打开 CCPP 组件的参数配置对话框，可以配置表 3 所示的参数项。

表 3 联合循环模型主要参数

Table 3 Major parameters of CCPP model

参数名	取值	参数描述
R_p	0.045	燃气轮机调差系数
K_{pg}	4	调速器比例系数
K_{ig}	1.5	调速器积分系数
K_{ia}	10	加速度控制积分系数
K_{pt}	1	温度控制放大系数
K_{it}	0.2	温度控制积分系数
W_{fo}	0.2 p.u.	满速空载燃料量
K_{gt}	0.65	燃气轮机功率分配系数
T_{drum}	300 s	余热锅炉时间常数
P_{ref}	0.3 p.u.	最小蒸汽压力参考值

3.1 联合循环频率阶跃扰动测试

文献[19]给出了上海临港燃气电厂同型号机组的实测方法。本文仿真时采用同样的测试方法。机组带 80%以上负荷稳定运行，进行频率阶跃扰动实验。实测结果和仿真结果对比如图 5 所示，两者基本一致。在图 5(c)中，燃气轮机出力的仿真结果和实测结果基本一致，但当频率重新回到 50 Hz 之后，仿真出力比实测出力少了约 3 MW。这是因为在燃气轮机转速控制过程中存在转速死区，允许功率有 ±2.4 MW 的误差。从图 5(d)可见，汽轮机出力响应的仿真结果较之实测结果偏慢，而且动态过程中仿真出力比实测出力多了约 1 MW 的功率输出。但从图 5(b)可以看出，CCPP 机组的总出力轨迹的仿真结果与实测结果吻合的很好。

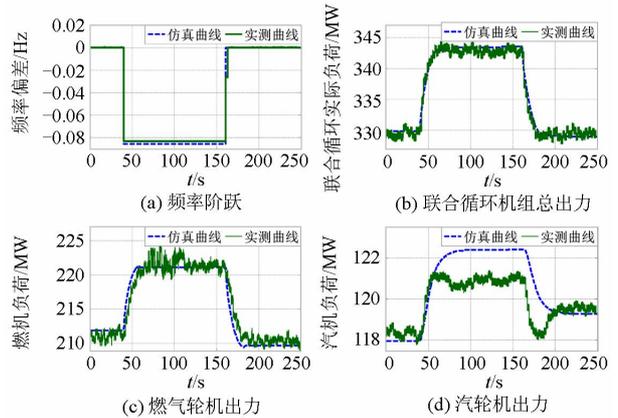


图 5 联合循环频率阶跃扰动测试

Fig. 5 Test of CCPP frequency step disturbance

3.2 联合循环频率动态特性测试

机组带 80%负荷，突然切掉 50 MW 负荷，机组出力从初始的 320 MW 减小到 270 MW，系统频率从 50 Hz 经历扰动后稳定在 50.25 Hz。频率变化过程如图 6 所示。由图 6 可计算出调速器下垂特性斜率为 $(0.25/50)/(50/400) \times 100\% = 4\%$ ，和实际机组的下垂特性斜率一致。

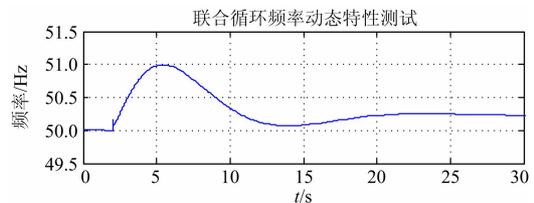


图 6 联合循环频率动态特性测试

Fig. 6 Test of CCPP frequency dynamic characteristics

3.3 加速度控制测试

机组带 95%负荷，突然切掉 120 MW 负荷，机

组出力从初始的 380 MW 减小到 240 MW。在切负荷初期, 发电机转子加速度为正, 当加速度超过加速度设定值时加速度控制开始起作用, 使加速度控制量减小。当加速度控制量小于转速控制量时, 加速度控制起主要作用去控制燃料。CCPP 机组加速度控制过程如图 7 所示。

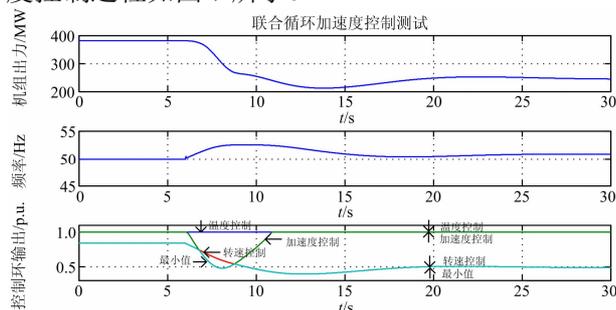


图 7 联合循环加速度控制测试

Fig. 7 Test of CCPP acceleration control

3.4 模型实时计算效率测试

测试时使用了 RTDS 的一块 GPC 处理器卡 (Giga Processor Card) 中的一个处理器。该处理器芯片是 IBM PPC750GX, 主频为 1 GHz。

利用 RTDS 的性能测试工具, 测得 CCPP 模型运行一次所需要的时间约为 5.5 μ s。即如果系统仿真步长为 50 μ s, 那么单个 RTDS 处理器中最多能同时运行 9 个 CCPP 机组模型。这表明该模型具有良好的实时计算效率。

4 结论

随着我国加强对天然气的开采与利用, 燃气-蒸汽 CCPP 机组的装机容量将不断扩大。在未来智能电网中, 作为一种清洁发电形式, 具有优良调节能力的 CCPP 机组可以实现与其他随机性可再生能源的协调运行。

根据 CCPP 机组在我国的实际运行情况, 本文在 RTDS 上开发了包括燃气轮机、余热锅炉和汽轮机的联合循环仿真模型。通过与机组实测结果进行对比, 验证了模型的有效性。

本文在开发 CCPP 模型时, 首先在 Matlab/Simulink 环境下完成建模与调试, 然后将其转化为 ANSI C 代码, 最后利用 RTDS/CBuilder 将该模型封装为可以多次实例化的自定义组件。经实时仿真测试, 证明了该组件具有良好的实时计算性能。

参考文献

[1] 姚秀平. 燃气轮机与联合循环[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
[2] 李帅. 燃气-蒸汽联合循环负荷分配控制策略研究与仿

真[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.

- LI Shuai. Researching and simulation of the load dis-patching control strategy on gas-stream combined cycle[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [3] 张彦涛, 苏峰, 汪洋, 等. 联合循环机组维护成本建模及求解[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 6-11, 32.
ZHANG Yantao, SU Feng, WANG Yang, et al. Maintenance cost optimization for combined cycle gas turbines[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 6-11, 32.
- [4] 柳红军. 9F 级燃气蒸汽联合循环机组参与电网自动发电控制的思考[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 68-70.
LIU Hongjun. Thinkings on participation of 9F gas-steam combined cycle unit in the AGC of power grid[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(9): 68-70.
- [5] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5096-5102.
JIANG Hongde, REN Jing, LI Xueying, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5096-5102.
- [6] 聂慧明. 联合循环机组仿真系统设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
NIE Huiming. Design and realization of CCPP simulation system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] 张辉, 蒲天骄, 王刚, 等. 基于实测频率轨迹的机组调速器参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 24-33.
ZHANG Hui, PU Tianjiao, WANG Gang, et al. Governor parameter identification of generation system based on measured frequency curve[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 24-33.
- [8] CENTENO P, EGIDO I, DOMINGO C, et al. Review of gas tur-bine models for power system stability studies[C] // 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering, Marbella, Spain, 2005.
- [9] GROBLER J H. Development and adaptation of dynamic models for new power generation source[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [10] 唐永红, 郑晓雨, 马进. 基于 RTDS 的负荷模型验证及分类研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 37-41.
TANG Yonghong, ZHENG Xiaoyu, MA Jin. Model validation and load classification based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 37-41.
- [11] 谢化安, 王永源, 万四维, 等. 东莞变电站链式

- STATCOM 控制保护的 RTDS 试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 117-122.
- XIE Huaan, WANG Yongyuan, WAN Siwei, et al. Research on the control and protection system of Dongguan Substation cascade static synchronous compensator based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 117-122.
- [12] 苏丽萍, 陈侃, 李国杰, 等. 基于 RTDS 的光伏并网系统实时仿真平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 110-115.
- SU Liping, CHEN Kan, LI Guojie, et al. Real-time simulation study of photovoltaic grid-connected system by RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 110-115.
- [13] 李罗, 朱静, 白云飞, 等. 基于 RTDS 的合并单元性能测试研究[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 24-30.
- LI Luo, ZHU Jing, BAI Yunfei, et al. Research on performance test of merging unit based on RTDS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 24-30.
- [14] 于力, 许爱东, 郭晓斌, 等. 基于 RTDS 的有源配电网暂态实时仿真与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(4): 18-25.
- YU Li, XU Aidong, GUO Xiaobin, et al. Real-time transient simulation and analysis of active distribution network based on RTDS[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(4): 18-25.
- [15] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
- YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [16] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 基于 RTDS/CBuilder 的电磁-机电暂态混合实时仿真方法[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 33-38.
- JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Electromagnetic transient and electromechanical transient hybrid real-time simulation method based on RTDS/CBuilder[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 33-38.
- [17] Simulink to RSCAD conversion an introductory tutorial[Z]. RSCAD, 2013.
- [18] 杨涤, 李立涛, 杨旭, 等. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [19] 临港 4 号机调速系统参数实测与建模试验报告[R]. 上海: 国网上海市电力公司电力科学研究院, 2014.
- Report of Lingang 4# speed control system parameter measurement and modeling test[R]. Shanghai: State Grid Electric Power Research Institute SMEPC, 2014.

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-03-30

作者简介:

蒋松含(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真、电力系统保护与控制; E-mail: bikong@sjtu.edu.cn

李中豪(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真、分布式发电; E-mail: zhonghao0303@163.com

张沛超(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能变电站、电力系统仿真。E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)