

线路保护实时仿真自动测试平台设计

范宏¹, 朱牧之¹, 沈冰², 曾平², 邹晓峰²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 阐述了实时数字仿真的现状, 分析了数字实时仿真器 RTDS 的优缺点, 提出了一套线路保护设备实时仿真自动测试方法。利用实时数字仿真器、VB 语言和数据库, 设计开发了一个实时仿真自动测试平台。利用仿真平台的专业性、VB 语言的兼容性以及数据库信息存储的准确性和规范性, 考虑可靠性约束, 建立了简明的人机界面, 实现了线路保护设备测试流程自动化实现方法。通过线路保护设备测试验证了该系统的准确性、可靠性及实用性, 具有推广价值。

关键词: 线路保护; 实时仿真; 自动测试; RTDS; 数据库

Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation

FAN Hong¹, ZHU Muzhi¹, SHEN Bing², ZENG Ping², ZOU Xiaofeng²

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. Electric Power Research Institute, SNEPC, Shanghai 200437, China)

Abstract: This paper expounds the status of real time digital simulation, analyzes the pros and cons of real time simulator (RTDS), and puts forward a method for processing the test of equipment. Based on this, the paper introduces an automatic testing system for real time simulation combined with RTDS, Visual Basic# codes and databases. Exerting the professional platform of RTDS, strong compatibility of Visual Basic and standard storage feature of database, and considering the reliability constraints, it establishes a man-machine interface and figures out a method for processing the test of equipment. The accuracy of the system is provided by the line differential protection test. It shows that the system can realize the function of automatic testing, balance the reliability and flexibility, and is valuable to be popularized.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307104) and Shanghai Green Energy Grid Connected Technology Engineering Research Center (No. 13DZ2251900).

Key words: line protection; real time simulation; automatic test; RTDS; database

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0123-07

0 引言

实时仿真^[1]是集合了计算机科学、计算数学、控制理论和专业应用技术等众多领域而形成的一门新兴学科。电力系统的实时仿真按发展阶段可分为三种类型: 物理仿真、数模混合仿真^[2]以及数字仿真^[3]。

实时数字仿真仪(RTDS)^[4-5]是由加拿大 Manitoba 省高压直流(HVDC)研究中心开发, RTDS 公司制造, 为实现实时电力系统仿真功能而专门设计的并

行计算机系统^[6-7]。文献[8]中详细介绍了 RTDS 的硬件和软件结构以及它在诸多方面的应用。该装置是基于数字信号处理器(DSP)技术、计算机并行处理技术和数字仿真技术以及电磁暂态^[9]程序的全数字实时仿真装置, 可以对交直流系统进行实时准确的仿真^[10-11]。RTDS 具有建模周期短、灵活性强、频率特性范围大、仿真结果稳定精确等特点^[12], 已逐步替代传统的物理仿真和数模混合仿真方式, 在国内得到越来越多的认可。它可运行在 50 μs 级的步长上进行较大规模的电力系统实时仿真^[13], 其元件模型和仿真精度已获得仿真领域内较高的认可度^[14], 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^[15]。

基金项目: 国家自然科学基金资助(51307104); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

虽然 RTDS 具有诸多优点,但是它也存在着一些问题。如文献[16]所述:RTDS 的仿真建模平台和运行平台并不是同一个平台,无法直接将仿真的结果显示在模型图上。当仿真模型较为复杂的时候,需要在两个平台间不断地切换,以将运算结果和图形文件一一对应,这种建模和运行的方式使 RTDS 的方便性受到了极大的约束^[17]。因此,需要设计一个自动测试平台,使研究人员可以清晰地掌握仿真的参数和结果,便于进行观察和分析。

本文基于实时数字仿真系统 RTDS 平台设计开发了一个线路保护设备实时仿真自动测试平台,实现了对待测设备的自动测试,通过自动分析试验波形,自动生成测试结果,使设备测试更加简单、方便、高效,将测试人员从繁重、单一的测试项目中解放出来。

1 研究现状

随着电网规模的不断扩大,新设备及设备升级入网试验的数量逐年增加,特别是对于保护类试验如线路差动保护、母线保护、变压器保护、配网自动化测试、子站通信集成等试验,操作次数多、任务量大,而且多为重复性试验,操作人员读取实验结果的精度往往不高,使得试验的效率降低^[18]。以往的实验手段已经越来越难以满足配电自动化装置及保护装置测试的需要^[19]。实现入网测试海量任务的自动测试,获取自动测试结果,提高实时数字仿真系统的利用效率和试验的精确度已成为当务之急。

因此,当前各科研院所、高校、企业单位围绕电网实时数字仿真技术及其应用开展了很多卓有成效的工作,取得了众多科研成果。开展的诸如大电网的稳定和控制研究^[20]、继电保护和自动装置^[21]以及励磁控制器^[22]等二次设备的试验研究、电网事故分析与重现^[23-24]、智能变电站测试^[25-26]等应用工作,大大加强了对电网的仿真试验和分析研究能力,为电网的规划、设计、建设和运行提供了有效的指导意见。

对于自动测试系统,各大企业和研究机构也有一些研究成果,其中包括:开普电气研究院的实时数字仿真自动测试系统、南瑞继保电气有限公司的实时数字仿真自动测试系统以及中国电力科学研究院的数字仿真自动测试系统。

1.1 开普电气的实时数字仿真自动测试方法

许昌开普电气研究院在2010年发明了一种实时数字仿真自动测试方法,该方法在与可视化操作界面中的内容相对应的数据库中分别预设故障点、故

障类型;在可视化的操作界面中设置包括故障点、故障类型和故障时间来定制试验项目。根据试验项目清单将各试验项目的实时数字仿真脚本测试代码按时间顺序串接在一起,构成完整的脚本文件。执行上述生成的完整的脚本文件,即完成试验。

1.2 南瑞继保的实时数字仿真自动测试方法

南瑞继保电气有限公司对基于 RTDS 的自动测试系统有深入的研究与探索,直接将 RTDS 投入到了一系列控制和保护装置的测试中,并对线路保护装置的动模试验采用了自动测试方法。

1.3 中国电力科学研究院的实时数字仿真自动测试方法

中国电力科学研究院在 2009 年为了完善对继电保护进行验证分析的手段,开展了基于 RTDS 实时数字仿真系统的试验系统的开发,主要研究内容包括:建立了以动模试验系统为基础的线路继电保护闭环自动测试系统;实现按预先设定的故障序列自动执行保护试验项目;自动记录保护装置的动作时间,对试验结果即动作时间自动进行判断,并给出初步试验结论。

已有的自动测试系统具有一定的局限性,测试项目比较单一,模型内考虑的因素较少,适用度有限,而且,软件功能具有一定的局限性。

2 平台总体设计及配置

本文所设计开发的自动测试平台主要基于 VB、数据库和 RTDS 三个主要模块。通过三个模块功能的相互配合实现自动测试的功能。

2.1 平台总体设计原则

RTDS 是一种专业的实时数字仿真软件,利用 RTDS 进行线路保护建模仿真的过程非常复杂,也没有必要。因此,需要借助其他系统作为桥梁,将 RTDS 的操作简化,让使用者可以清楚地了解使用方法并进行所需的测试。

由于上述原因,对于自动测试平台的设计需要满足以下几个原则:

- (1) 自动测试平台界面友好,操作方便,操作规范;
- (2) 自动测试平台人机交互功能强,能实现全面测试功能;
- (3) 自动测试平台能缩短设备测试时间,提高测试精度,提高实时数字仿真系统的利用率,提高生产力。

2.2 平台总体结构及功能设置

平台总体功能体系结构主要包含如下:用户登录界面、自动测试选择界面、批处理脚本文件自动

建立、自动生成测试报告模块。利用这些模块功能形成自动测试系统的流程如图 1 所示。

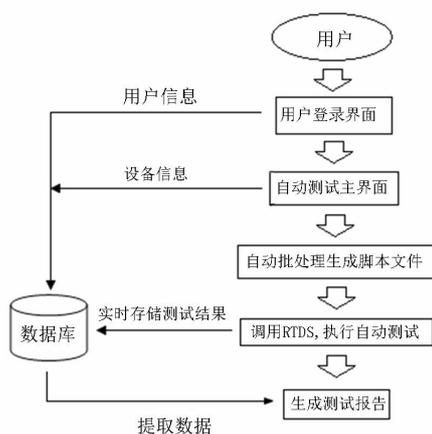


图 1 实时仿真自动测试流程图

Fig. 1 Flow chart of automatic testing system

用户登录界面：其功能包含已注册用户的登录平台、新建登录用户，其目的是保证系统数据安全。

自动测试主界面：其功能包含选择测试项目、测试模型、测试数据及波形保存路径。

批处理脚本文件自动生成：其功能是根据自动测试主界面所选择的一系列选项自动生成模型执行的脚本文件。

调用 RTDS，运行批处理脚本文件：其功能是根据生成的脚本文件自动在 RTDS 进行实验并将实验数据及波形保存至指定位置。

自动生成报告：其功能是将已保存的实验数据及波形整合在实验报告中。

3 检测项目介绍

目前自动测试平台可以实现的测试项目为线路保护。这种类型的继电保护试验可以充分地体现出自动检测平台在进行继电保护装置动模试验的过程中所发挥的重要作用。

线路保护测试使用的系统接线图如图 2 所示。G 侧 500 kV 电源侧，经过 G 侧单相断路器以及一段线路后，经过 S 侧单相断路器，接至 S 侧 500 kV 电源侧。区内故障有 3 点，分别为 F1、F2、F3；区外故障共有两点，分别为 F4、F5。测试项目包括 4 种类型：瞬时性和永久性故障、系统振荡、经过渡电阻短路故障、转移性故障。

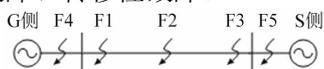


图 2 系统模型

Fig. 2 Model of testing system

3.1 瞬时性和永久性故障

该测试项目检测当保护区内发生瞬时性故障时保护的动作情况。具体的故障类型包括单相接地短路、两相短路、两相短路接地、三相短路，瞬时性故障时间一般设置为 0.2 s，永久性故障的故障时间一般设置为 2 s。

3.2 系统振荡

该测试项目主要检测系统振荡对保护装置的影响。

当系统振荡时，若无故障发生，保护不应动作；若有故障发生，应当按照正常逻辑动作，不出现拒动或误动情况。系统振荡情况下，对保护动作时间不做要求。

3.3 经过渡电阻短路故障

该测试项目检测系统经过渡电阻短路时保护的動作情况。具体的故障类型包括单相接地短路、两相短路、两相短路接地、三相短路。从故障时间上来分，也需测试瞬时性和永久性两类故障，保护应当按照正常逻辑动作，不出现拒动或误动情况。

经过渡电阻短路故障时，保护的動作时间不做要求。

3.4 转移性故障

该测试项目检测系统发生转移性故障时(区内转区外或区外转区内)，保护应当在区内故障发生后动作，而不能在区外故障发生后动作。此类型测试的故障类型包括单相接地短路、两相短路、两相短路接地、三相短路，对保护的動作时间不做要求。

4 平台界面设置

RTDS 是一种专业的实时仿真软件，利用 RTDS 进行线路保护建模仿真对于使用者的要求较高，不具有普及性。因此，需要利用其他软件作为桥梁，将 RTDS 的操作简化，让使用者可以清楚地了解使用方法并进行所需的测试。

4.1 用户界面设计方法

自动测试平台分为 6 个部分，分别为：登录界面、注册界面、待测设备信息界面、新增设备信息界面、测试类型选择界面以及测试参数设置界面。

4.2 用户界面实现

Visual Basic(以下简称 VB)是一种由微软公司开发的包含协助开发环境的事件驱动编程语言。从任何标准来说，VB 都是世界上使用人数最多的语言^[22]。程序员可以轻松地使用 VB 提供的组件快速建立一个应用程序。利用 VB 进行自动测试平台的设计，极大地节省了设计者在界面美化上所需的时间，从而将更多的时间投入在平台功能的设计中。

4.2.1 登录界面

在登录界面中，考虑到不同人员使用这个平台的目的不同，在用户类型中设置了“厂家”、“试验员”和“审核员”三个不同的使用群体，不同的用户类型登录进去后拥有不同的使用权限。系统中默认存在了七个常用的用户的用户名，分别为：南瑞继保、北京四方、国电南自、长园深瑞、许继电气、南瑞科技、金智科技。除了这七个厂家之外，其他厂家登录则需要先进行注册。

4.2.2 注册界面

该用户注册系统仅提供给厂家进行注册。如果有新的测试员和审核员要进行注册，可以在数据库中直接添加信息并给予权限。

4.2.3 待测设备信息界面

在待测项目一栏中是登录厂家的所有需要进行测试的项目的汇总。每当选择一个时，界面右侧所对应的待测设备的信息都会显示出来，这样可以清楚地看到所需测试的设备的所有情况。如果需要添加新的待测设备，可以点击测试项目下的“添加”按钮，可以在测试项目中添加新的条目。当提交了测试项目后，所有的项目都会进入测试员的待测设备信息界面中，交给测试员进行测试。

4.2.4 新增设备信息界面

新增设备信息界面如图 3 所示，厂家如果需要对新的设备进行测试，就可以在该页面中填入待测新设备的相关信息并提供待测设备的照片，照片会显示在右侧的图片框中，这样确保待测设备与信息是相匹配的。



图 3 新增设备信息界面

Fig. 3 Interface of new equipment information

4.2.5 测试类型选择界面

线路保护实时仿真自动测试系统提供三种类型的保护的仿真模拟，分别是线路保护、母线保护和变压器保护，通过点击不同的按钮可以选择不同类型的保护进行测试。

4.2.6 测试参数设置界面

在线路保护的参数设置界面中设置了 5 个故障点，其中 3 个在保护区域内，2 个在保护区外。线路保护实时仿真自动测试系统提供了 4 种仿真测试，分别为：瞬时性和永久性故障、系统振荡、经过渡电阻短路故障、转移性故障。

① 瞬时故障界面和永久故障界面

瞬时故障界面和永久故障界面如图 4 所示。界面的左边是选择需要进行测试的故障点、故障类型以及故障持续时间，点击添加按钮之后右边的汇总列表中就会将所有的测试项目都显示出来。

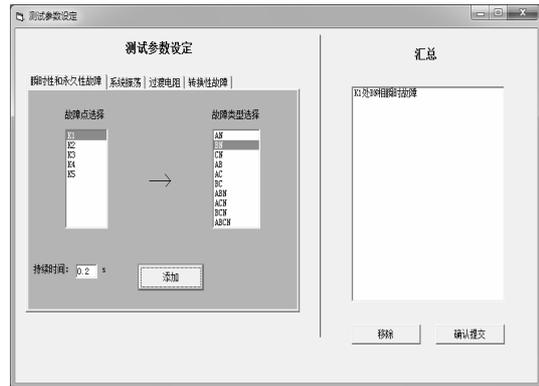


图 4 测试参数设定界面

Fig. 4 Interface of setting test parameter

② 振荡界面

在测试参数设定(振荡)界面中，测试员需要填写 G 侧和 S 侧的频率，当频率不同时则仿真系统会发生振荡。点击添加按钮之后右边的汇总列表中就会将所有的测试项目都显示出来。

③ 过渡电阻界面

经过渡电阻接地短路故障设置界面与“瞬时性和永久性故障界面”类似，在过渡电阻界面中测试员需要填写正常工作时的电阻值以及故障点处的过渡电阻值。点击添加按钮之后右边的汇总列表中就会将所有的测试项目都显示出来。

④ 转移性故障界面

转移性故障界面如图 5 所示，需要选择一次故障和二次故障的故障点、故障类型、故障持续时间以及转移时间。点击添加按钮之后右边的汇总列表中就会将所有的测试项目都显示出来。当所有的参数都设置好了以后，点击右下角的“确认提交”按钮，开始仿真实验。

将每次试验的波形以固定格式的名称保存在特定文件夹下，方便试验人员调取波形，分析结果，并将试验结果按照特定的格式以 TXT 格式的文本输出到波形文件所在的文件夹。

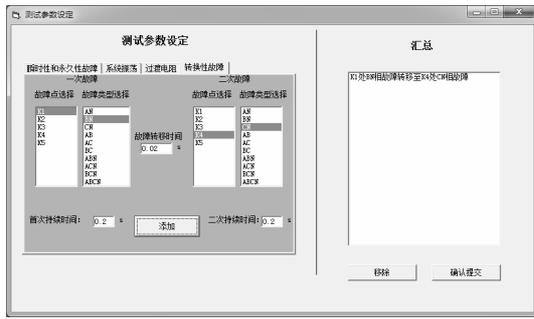


图 5 测试参数设定界面(转移性故障)

Fig. 5 Interface of setting test parameter (transfer fault)

4.3 案例

以 G 侧频率为 49.5 Hz, S 侧频率为 50 Hz 瞬时性故障区内故障 F1 点 AN 为例, 进行线路保护设备测试仿真模拟, 波形结果如图 6 所示, 实验结果分析如图 7 所示。

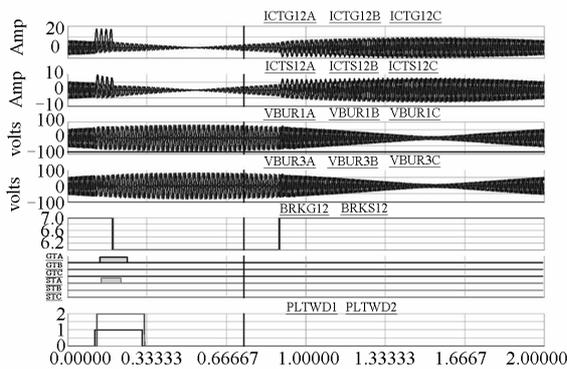


图 6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform

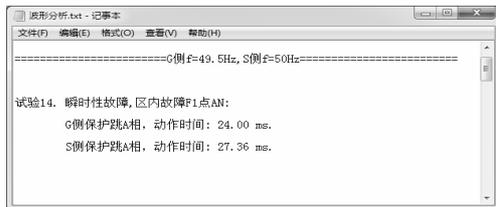


图 7 实验结果分析

Fig. 7 Analysis of experimental results

5 平台功能模块设置开发

线路保护实时仿真自动测试平台主要由信息数据库^[23]、用户界面以及 RTDS 软件程序三个模块构成。三个模块的相互配合以及调用实现了自动测试的功能。

在线路保护实时仿真自动测试平台的设计中, 使用 Access 创建标准的 Access 数据库文件, 然后

通过 VB 中 Data 控件完成对数据库的一系列操作。通过设置 Data Name 属性和 Record source 属性同时设置了约束控件的 Data source 属性和 Data Field 属性后, 就可以把 VB 的其他控件与 Data 控件结合在一起, 从而实现通过 VB 来访问 Access 数据库的目的。

数据库以设备的名称、型号、电压等级、版本号等为关键字, 可以通过不同关键字轻松地找到所需设备以及该设备所包含的所有信息, 如图 8 所示。

编号	设备名称	维护型号	电压等级	代码	版本号	厂家名称	供货日期/组	厂家联系人
1	数字式线路保护测控装置	CSC-100A	220kV及以上	2.00	19.10	北京四方继保自动化股份有限公司	2014/3/3	张三
2	数字式高压线路保护测控装置	CSC-100A	220kV	2.00	19.10	北京四方继保自动化股份有限公司	2014/3/4	李四

图 8 信息数据库

Fig. 8 Information database

5.1 信息数据库和用户界面

在用户登录界面中不同类型的登录人员有不同的权限, 厂家登录后可以在数据库中添加需要进行测试的设备信息, 而测试员则可以从数据库中读取该设备信息进而明确需要进行的测试类型。通过数据库的使用, 使得测试的过程更加精确, 减小了人为发生错误的可能性。

5.2 用户界面和 RTDS 软件程序

VB 可以实现文本文件的编辑、文件类型的改变以及可执行文件的运行, 通过这些功能的合理利用就可以实现 VB 和 RTDS 软件系统的交互。

测试员设置好了相关测试的各项参数之后, 点击测试参数设置界面右下角的“确认提交”按钮, 此时利用 VB 对于文本文件的可操作性, 可以根据参数设置界面的汇总表中的信息, 自动形成一个 RTDS 可以识别的批处理脚本文件的文本形式。为防止计算机运行时间过慢而造成不完整文本, 设置延迟 2 s。延迟 2 s 后, 利用 VB 可以改变文件类型的 name 指令, 将文本文件改成 RTDS 可以读取的 SCR 文件。再经过 2 s 的延迟, VB 利用打开可执行文件的 shell 指令打开 RTDS, 通过 RTDS 读取前面生成的 SCR 批处理脚本文件, 使 RTDS 开始进行仿真测试。

通过以上流程, 就可以实现在用户界面中自动运行 RTDS 并进行仿真测试。这样可以极大地简化测试人员的操作流程, 对于简单的重复性工作的处理能力明显提升, 提高了工作的效率。

5.3 数据库和 RTDS 软件

RTDS 可以将每次试验的波形以固定格式的名称保存在特定文件夹下形成波形的 JPEG 图片格式文件, 并将试验结果按照特定的格式以 TXT 格式的文本输出。

试验测试结束后,系统生成一份实验结果报告,利用VB打开文本文件open指令读取这份报告并将其存入数据库中对应测试设备的信息表中,形成一份完整的设备测试报告。

6 总结

针对设备入网测试时测试类型固定、重复性工作较多的特点,设计了一套可实现不同设备测试需要的自动化测试平台。该平台以RTDS实时数字仿真模拟系统为基础,通过VB编程,能生成实时数字仿真系统可运行的有效批处理脚本文件,实现入网检测海量任务的自动测试,获取自动测试结果,生成测试报告。通过实时仿真自动测试系统的研究可以帮助操作人员方便地完成大量的测试任务,缩短了设备测试时间,提高了测试的精确度和实时数字仿真系统的利用效率,满足实际电力系统的需要。

本自动测试系统结合RTDS的脚本程序和VB编程序整合成为了一个整体,能更好地实现自动测试系统的功能,其简洁、友好的人机交互界面使试验人员可以更方便、高效地完成各类测试项目,具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 罗建民, 戚光宇, 何正文. 电力系统实时仿真技术综述[J]. 继电器, 2006, 34(18): 79-86.
LUO Jianmin, QI Guangyu, HE Zhengwen. Research on power system real time simulation[J]. Relay, 2006, 34(18): 79-86.
- [2] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ± 500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.
- [3] 黄家裕, 陈礼义, 孙德昌. 电力系统数字仿真[M]. 北京:中国电力出版社, 1995: 1-5.
- [4] 陈礼义, 顾强. 电力系统数字仿真及其发展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 1-6.
CHEN Liyi, GU Qiang. Power system digital simulation and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 1-6.
- [5] 柳勇军, 梁旭, 阎勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 39-42.
LIU Yongjun, LIANG Xu, HE Yong. Power system real-time digital simulation technologies[J]. Electric Power, 2004, 37(4): 39-42.
- [6] CLAUS M, RETZMANN D, SCHMIDT M, et al. Development of real-time simulation technology — summary of experiences and results[C] // ICD S'99 Poster Session. Vasteras, Sweden: 1999.
- [7] KUFFEL R, GIESBRE CHT J, MAGUIRET, et al. RTDS-a fully power system simulator operating in real time[C] // Proceedings of IEEE 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery, Singapore, November 21-23, 1995, 2: 498-503.
- [8] 常浩, 张民, 马为民. 实时数字仿真器的应用[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 56-60.
CHANG Hao, ZHANG Min, MA Weimin. Real time digital simulation (RTDS) and its applications[J]. Electric Power, 2006, 39(7): 56-60.
- [9] 李秋硕, 张剑, 肖湘宁, 等. 基于RTDS的机电—电磁暂态混合实时仿真及其在FACTS中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 219-225.
LI Qiushuo, ZHANG Jian, XIAO Xiangning, et al. Electromechanical-electromagnetic transient real-time simulation based on RTDS and its application to FACTS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 219-225.
- [10] 魏明, 崔桂梅. 电力系统实时数字仿真器 RTDS 简介[J]. 装备制造技术, 2008(6): 128-130.
WEI Ming, CUI Guimei. Introduction of real time digital simulator-RTDS in power system[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(6): 128-130.
- [11] 许大光, 陈小川. RTDS 开发设计平台[J]. 软件导刊, 2007(7): 20-21.
XU Daguang, CHEN Xiaochuan. Better way to research and design RTDS tests[J]. Software Guide, 2007(7): 20-21.
- [12] 张树卿, 童陆园, 薛巍. 基于数字计算机和RTDS的实时混合仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 61-66.
ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, XUE Wei. Digital computer and RTDS based real time hybrid simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 61-66.
- [13] 梁志成, 马献东, 王力科, 等. 实时数字仿真器 RTDS 及其应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 61-64.
LIANG Zhicheng, MA Xiandong, WANG Like, et al. Real time digital simulator (RTDS) and its applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 64-64.
- [14] 张兴然, 王霞. 基于RTDS的电力系统实时仿真[J]. 陕西电力, 2008, 36(5): 54-56.

- ZHANG Xingran, WANG Xia. Real time simulation of electric power based on RTDS[J]. Shanxi Electric Power, 2008, 36(5): 54-56.
- [15] 赵学强. 基于 RTDS 的直流输电系统电磁暂态建模和实时仿真研究[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 46-50.
ZHAO Xueqiang. Electromagnetic transient modeling and real-time simulation for HVDC based on RTDS[J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 46-50.
- [16] 郭琦, 张海波, 韩伟强. 图形化 RTDS 在线实时仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 38-42.
GUO Qi, ZHANG Haibo, HAN Weiqiang. An online RTDS simulation system with graphical platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 38-42.
- [17] 巫玲玲, 张东英, 张海波. 基于 RTDS 的图形平台的研究和开发[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 6-11.
WU Lingling, ZHANG Dongying, ZHANG Haibo. Research and development of graphic platform based on RTDS[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(5): 6-11.
- [18] 郑新才, 丁卫华, 韩潇. 基于测试模板的继电保护装置自动测试技术研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 69-76.
ZHENG Xincan, DING Weihua, HAN Xiao. Research and realization of auto-test technology for protection relays based on test template[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 69-76.
- [19] 赖擎, 华建卫, 吕云, 等. 通用继电保护自动测试系统软件的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 90-94.
LAI Qing, HUA Jianwei, LÜ Yun, et al. Research on general relay protection auto-test system software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 90-94.
- [20] 倪以信, 陈寿孙, 卢卫星. 现代电网的稳定性和安全性[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(1): 51-57.
NI Yixin, CHEN Shousun, LU Weixing. Stable and security of modern power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(1): 51-57.
- [21] 李晋民. 继电保护和安全自动装置技术发展分析[J]. 电力学报, 2008, 23(1): 50-53.
LI Jinmin. Developing analysis for relay protection and security automatic equipment[J]. Journal of Electric Power, 2008, 23(1): 50-53.
- [22] 王明东, 刘宪林, 于继来. 同步发电机可拓励磁控制器[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 1-4.
WANG Mingdong, LIU Xianlin, YU Jilai. Extension excitation controller of synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(1): 1-4.
- [23] 徐汉平, 杨东俊, 黄涌, 等. 基于 RTDS 的电网故障分析平台的设计方案[J]. 华中电力, 2002, 15(5): 23-25.
XU Hanping, YANG Dongjun, HUANG Yong, et al. Scheme of fault analysis platform for power net based on RTDS[J]. Central China Electric Power, 2002, 15(5): 23-25.
- [24] 徐岩, 田鑫. 基于录波与保护信息的变压器事故分析系统的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 102-107.
XU Yan, TIAN Xin. Design of power transformer accident analysis system based on wave record and protection information[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 102-107.
- [25] 沈冰, 邹晓峰. 实时数字仿真技术在智能变电站测试中的应用[J]. 华东电力, 2012, 40(6): 39-41.
SHEN Bing, ZOU Xiaofeng. Application of real-time digital simulation in intelligent substation testing[J]. East China Electric Power, 2012, 40(6): 39-41.
- [26] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based on fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.

收稿日期: 2014-06-05

作者简介:

范宏(1978-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统仿真计算, 电网规划, 电网优化运行等;
E-mail: fan_honghong@126.com

朱牧之(1991-), 男, 本科, 研究方向为电力系统仿真;
沈冰(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统及智能变电站研究工作。

(编辑 葛艳娜)