

# 新型实时数字仿真继电保护测试系统的研究

李亚萍, 李志勇, 周鹏鹏, 王伟

(许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 研究了一种用于继电保护动模测试的新型实时数字仿真系统。该系统将实时 Linux 与高性能工控机相结合, 用 Matlab/Simulink 进行模型开发, 用 PCI 接口卡进行传统 I/O 输出, 用专用交换机分组技术实现点对点多间隔数据输出, 通过后台的灵活配置实现自动测试。同时解决了计算时间抖动、仿真数值振荡、多间隔同步输出等难题。该系统适用于常规保护、智能化保护及站域保护的实时仿真动模测试。

**关键词:** 实时数字仿真; 继电保护; 计算时间抖动; Matlab/Simulink; 多间隔同步输出; 自动测试

## Research of relay protection testing system based on new type real-time digital simulation

LI Ya-ping, LI Zhi-yong, ZHOU Peng-peng, WANG Wei

(Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** A relay protection dynamic testing system based on new type real-time digital simulation is presented. The system uses RT-Linux and high performance industrial control computer to compute, applies the Matlab/Simulink to develop the model file, adopts PCI interface card to I/O, employs special switch grouping technology to output peer-to-peer data, and uses flexible configuration program to achieve auto-test. It also can solve many problems, such as the calculation time jitter, simulation numerical oscillation, multi bays synchronous output and so on. The system is suitable for real-time dynamic simulation test of conventional protection, intelligent protection and station domain protection.

**Key words:** real-time digital simulation; relay protection; jitter of compute; Matlab/Simulink; peer-to-peer; auto-test

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0090-06

## 0 引言

电力系统实时数字仿真是研究电力系统运行特点、模拟各种扰动、产生多种特殊运行状态的技术手段, 在电力系统分析、继电保护动模测试等领域已经得到了广泛应用。

目前市场上的实时数字仿真系统普遍存在价格昂贵、建模复杂、操作繁琐的问题, 提高了用户的使用门槛; 随着智能化保护的发展, 其相关设备的动模测试要求、测试方法都发生了很大变化, 常规测试手段已经无法适应智能化保护的测试需求, 尤其是 SV 的多间隔同步输出问题已经成为制约智能化保护测试的关键因素。

基于上述问题, 本文所研究的新实时数字仿真继电保护测试系统(以下统称“新型仿真系统”)将实时 Linux 操作系统与高性能工控机相结合; 以 Matlab/Simulink 作为仿真模型的开发手段; 通过 PCI 接口卡实现模拟量的输出、开关量的输入输出;

通过交换机分组技术实现 SV 同步多间隔输出; 通过 Windows 下的后台程序实现对仿真过程的监控, 具有建模方便、测试操作简便的优点, 可以进行常规保护、智能化保护(同时支持点对点及组网模式)的闭环实时仿真动模测试。

## 1 新型仿真系统的技术要点

新型仿真系统包括实时计算单元、常规 I/O、IEC61850 报文、后台控制等部分组成。用 Matlab/Simulink 建立系统模型, 将编译生成的模型程序文件上传至实时计算单元进行仿真计算, 并将待测保护装置试验所需的电压、电流等模拟量经功率放大器或交换机送入待测装置。同时, 待测装置的响应信号再通过 I/O 单元或 GOOSE 报文实时反馈回计算单元, 形成完整的闭环动模测试, 其整体结构如图 1 所示。

新型仿真系统需要解决计算模块的实时性、自

定义模块及数值振荡、智能化保护 IO、模型封装及自动测试等技术要点。

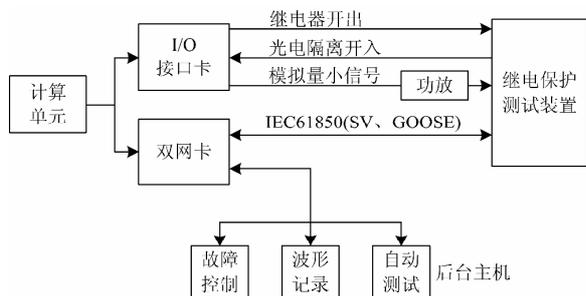


图 1 总体结构  
Fig. 1 Overall structure

### 1.1 计算模块的实时性

实时数字仿真的基础是保证计算单元的实时性，这需要解决实时操作系统以及计算时间抖动的问题。

通过研究实时操作系统的整体特征后发现，绝大多数实时应用都可分为实时和非实时两部分，而且这两部分分别具有如下特征：实时部分较少需要操作系统支持，甚至可以不需要这样的支持，至少应用程序的设计者可以做到这一点；而非实时部分一般则需相应的操作系统支持，基于这样的特征，构造一个简单的硬实时内核，而应用的实时部分作为实时进程直接运行在这个硬实时内核之上；原来的常规 Linux 核心这时就作为一个优先级最低的任务也为这个实时内核所调度，而应用的非实时部分作为非实时进程运行在 Linux 核心之上，从而可以获得 Linux 核心所提供的一切服务。其基本结构如图 2 所示。

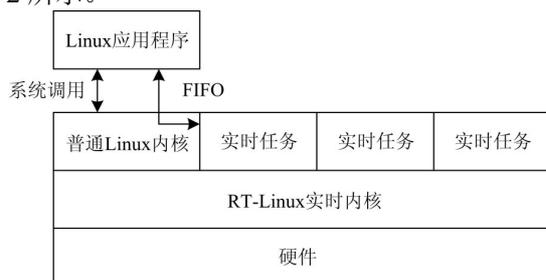


图 2 实时 Linux 操作系统的基本机构  
Fig. 2 Basic structure of RT-Linux

对 Linux 核心进行改动：将其与中断控制器隔离不再允许它任意关中断。此时中断控制器由实时核心来控制，所有的中断首先被实时核心所截获。核心首先进行相关的中断处理，然后再把中断“传”给 Linux 核心。这样 Linux 核心的一切活动都无法导致中断被关闭，也就无从影响实时核心的任务调度，从而保证了核心的硬实时性，同时容易看出，

这种方法依然维护了 Linux 核心中数据结构的完整性<sup>[1]</sup>。

改变时钟中断机制：RT-Linux 需用粒度更细的时钟，Linux 系统中一般的定时精度为 10 ms，而 RT-Linux 通过将系统的实时时钟设置为单次触发状态，从理论上说，可以提供十几个微秒级的调度粒度。RT-Linux 中实时进程是运行在核心空间，这样进程切换的开销远比常规的进程切换的开销要小得多，所以，RT-Linux 上有意义的最小实时进程周期可以达到 100 μs 以内。

实时操作系统保证了计算步长的稳定性，在不同的步长内模型的实际计算时间同样需要高度的稳定性，这就需要解决计算时间抖动的问题。

基于 intel 架构的硬件并不是为实时计算设计的，由于节能变频、热量控制、中断共享、Cache 抖动等原因，最终造成实时运算的时间抖动。时间抖动会造成每个计算步长内的实际模型计算时间有较大偏差，虽然没有计算溢出，但较大的抖动对实时仿真能力以及数字化报文输出的等间距性都有很大影响。

从图 3 可以看出，在统计的 50 个计算步长中会比较频繁地出现大的抖动，抖动时间能达到 30 μs 以上，通过反复研究比对，引入了多核任务协调机制，通过控制 CPU 非模型运算核的运算负载来降低模型运算核的时间抖动。

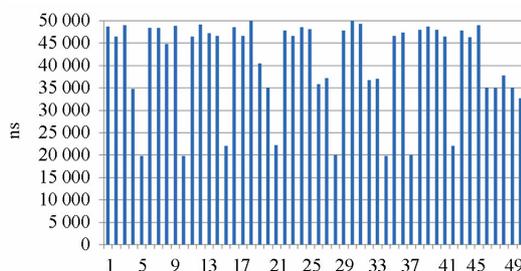


图 3 计算时间统计

Fig. 3 Computation time statistics

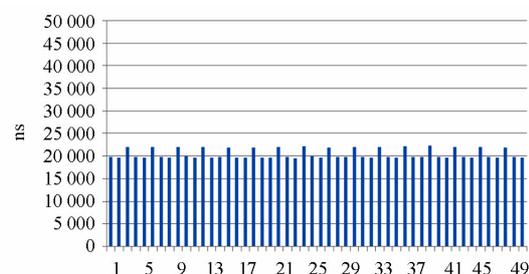


图 4 多核任务协调机制对抖动的改善

Fig. 4 Effect of multi-core task load coordination

图 4 中统计了 50 个计算步长的实际计算时间，

可以看出，通过多核任务协调机制，计算时间抖动缩减到 3 μs 以内，精确保证了计算的等时性，进一步提升了仿真计算能力，多间隔 SV 报文输出的等间距性得到了保证。

### 1.2 自定义模块及数值振荡

Simulink 提供了一个图形化的建模环境，整个建模过程操作简易、结构清晰。

Simulink 所提供的元件库并不能满足新型仿真系统的建模需求，这就需求用到 Simulink 中的 S-Function（自定义）函数功能。

S-函数是系统函数(System Function)的简称，是指采用非图形化的方式描述的一个功能块。每个 S-函数由一个输入向量  $u$ 、一个输出向量  $y$  和一个状态向量  $x$  组成，其中输出向量是仿真时间、输入向量和状态向量的函数，S-函数的结构如图 5 所示。

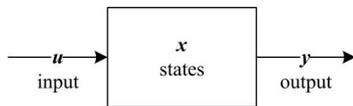


图 5 S-函数的组成

Fig. 5 Content of S-function

$u$ 、 $x$ 、 $y$  和时间  $t$  之间存在如下关系：

输出方程：
$$y = f_o(t, x, u)$$

连续状态方程：
$$dx = f_d(t, x, u)$$

离散输出方程：
$$x_{k+1} = f_u(t, x, u)$$

其中：
$$x = [dx \quad x_{k+1}]$$

状态向量  $x$  分为两部分：连续时间状态  $dx$  和离散时间状态  $x_{k+1}$ ，连续状态占据了状态向量的第一部分，离散状态占据了状态向量的第二部分。状态方程描述了状态变量的一阶导数与状态变量、输入量之间的关系。

由于所选择的状态变量不同，会导出不同的状态方程<sup>[2-4]</sup>。

通过 S-函数，开发了一系列的自定义元件，包括振荡控制模块、故障时序模块、内部录波模块、波形回放模块等，这些模块与电力系统元件库有机结合起来，供建模人员使用。

利用 Simulink 对动态系统进行仿真的核心在于，计算引擎对系统微分方程和差分方程的求解。

电力系统中各种元件的动态特性大都可以用微分方程来表达，事实上描述电力系统的数学模型就是一组高阶常微分方程，所以微分方程的数值解法

是电力系统故障仿真计算的数学基础。

求解微分方程的数值解常用的方法有很多，其中隐式梯形法是一种有效的数值离散方法，因其数值稳定性好、精度高、计算量小等优点，在电力系统故障仿真计算中得到了广泛的应用。但是，它有一个很大的缺点，即在网络结构发生突变(如断路器操作、某些短路故障等)时，会产生数值振荡。

后退欧拉法之所以不会引起数值振荡是因为其差分方程中不出现  $t-\Delta t$  时刻的非状态变量，因而非状态变量的突变不会形成不合理的等值注入电流源。但是后退欧拉法的精度不及梯形法，不宜用来计算仿真全过程。在暂态仿真计算中，该方法一般与其他离散方法结合使用，通常只是在断路器操作等扰动后，先用后退欧拉法计算若干步，再转入隐式梯形法继续计算。

阻尼法的基本原理是：对各元件的差分方程作适当的修正，使数值振荡在一定的时间内逐步衰减至零。通常的做法是在电感元件上并联一个小电导  $G$ ，而在电容元件上串联一个小电阻  $R$ 。数值振荡是一种高频振荡，其频率为  $1/(2\Delta t)$ 。同时由电感和电容元件的特点可知  $G$ 、 $R$  将对高频分量进行有效的衰减，而对低频分量影响较小。选定不同的  $G$ 、 $R$  可以获得不同的衰减速度。通过进一步的研究，隐式梯形法和后退欧拉法的加权混合算法就相当于在电感上并联小电导，在电容上串联小电阻。

新型仿真系统引入了阻尼法及后退欧拉法，通过不同的仿真模型采用不同的计算方法，解决了电磁暂态的数值振荡问题。

为了进行实时仿真，还需要分析 C 代码生成功能。对于实时应用开发，需要结合 Simulink 和 Real Time Workshop 使用。Simulink 用于建立仿真模型，Real Time Workshop 将建立的模型生成 ANSI C 代码，经特定 CPU 的编译器生成可执行程序。

### 1.3 智能化保护 I/O

新型仿真系统为了解决多间隔数据同步输出的难题，采用了整体数据打包再分组转发的模式，本文通过重写编写网卡驱动实现了数据的整体打包发送；通过专用交换机的分组技术实现了数据的分组转发。

通过对 SV9-2 报文格式和发送机制的分析，SV9-2 报文的帧长比较小（400 字节以下），但是发送频率很快（4000 帧/s）。而且本文将多个合并单元的报文通过一个千兆网卡发出，则网卡的帧速率将会达到数万帧/秒。

如果使用每发送一帧报文产生中断来通知 CPU 的方法，则 CPU 每秒要响应数万次中断，每

次响应中断保存现场需要花费时间, 所以使用中断接收的方法将花费大量的 CPU 时间来处理中断<sup>[5-8]</sup>。

本文采用屏蔽网卡中断的发送方式, CPU 将多个合并单元报文存入环形存储区, 然后通知网卡用 DMA 批量发送模式, 在下一个计算步长分析批量发送成功与否。

在 SV9-2 点对点测试模式下, 要求单个计算单元同步输出多间隔 SV 数据, 这就要求仿真系统具有多个网卡, 每个网卡输出 1 个间隔的数据, 这是理想的点对点模式。但这种模式给仿真测试带来了很大的难度, 不但增加了多网卡硬件的成本, 同时增加了网卡数据控制的难度, 这也是制约数字化测试以及站域保护测试的重要因素之一。

从图 6 可以看出, 计算单元通过网卡将多间隔的报文打包发出, 通过专用光交换机将接收到的报文转成光信号输出, 并通过 VLAN 分组技术将报文分成不同间隔的数据, 由于计算单元和专用交换机的时间抖动都很小, 仿真测试系统输出 12 个间隔数据的间隔抖动小于 10 μs, 满足标准点对点的要求。

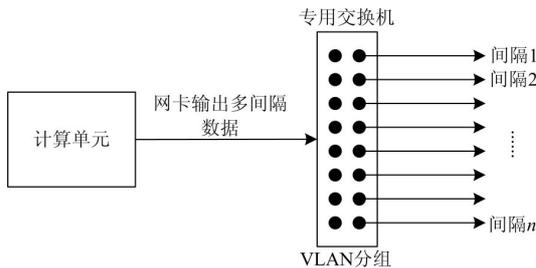


图 6 点对点数据发送示意图

Fig. 6 Peer-to-peer mode schematic diagram

### 1.4 模型封装及自动测试

用户面对一种动模仿真测试系统的时候, 首先要进行的就是模型的建立, 这往往需要用户从零开始, 经过模型搭建、参数修改、潮流检查以及运行测试等一系列环节, 这是一个不断修改、调试的过程, 不但耗时费力, 而且对用户的动模仿真能力有较高的要求。

为了达到通用、易用的目的, 在多年动模仿真测试经验的基础上, 依据《电力系统继电保护产品动模试验》(GB/T 26864-2011) 的国家标准, 新型仿真系统开发封装了一系列的模型, 包括各个电压等级的线路、变压器、母线等模型。用户可以根据需求自行选择模型或在模型的基础上进行二次开发。

继电保护等相关设备的动模测试是一个耗时费力的过程, 每一个测试项目都需要经过调整系统工况、设定故障条件、触发故障、录波、打开波形、统计动作时间等一系列环节, 人工操作容易出错而且过程繁琐。

新型仿真系统的后台监控程序一方面实现对模型运行的监视控制, 另一方面开创性地实现了动模仿真的自动测试。后台程序通过易用的界面实现对测试项目的灵活配置, 将具备相同触发条件的测试项目归为一个试验大组, 分别设定试验大组的试验前状态、试验后状态、试验前等待时间、试验后回归时间、动作时间参考项等属性; 将模型的多个状态操作组合成一个操作来触发, 以此来进行具体试验项目的设定; 试验项目结合所属试验大组的试验属性共同构成了一个试验项目的完整信息。

所有的试验大组及试验项目都通过清单的形式呈现, 如图 7 所示。用户选定试验项目, 只需一键即可完成该项目的测试, 同时还能对大组内多个试验项目以及多个大组进行多项目的自动测试。

试验项目名称	首次故障点	首次故障类型	首次故障时间
1 K2AB	K2	AB	0.1
2 K2BN	K2	BN	0.1
3 K2CN	K2	CN	0.1
4 K2ABN	K2	ABN	0.1
5 K2BCN	K2	BCN	0.1
6 K2CAN	K2	CAN	0.1
7 K2AB	K2	AB	0.1
8 K2BC	K2	BC	0.1
9 K2CA	K2	CA	0.1
10 K2ABC	K2	ABC	0.1
11 K3ABCN	K3	ABCN	0.1
12 K3AN	K3	AN	0.1
13 K3BN	K3	BN	0.1
14 K3CN	K3	CN	0.1
15 K3ABN	K3	ABN	0.1
16 K3BCN	K3	BCN	0.1
17 K3CAN	K3	CAN	0.1
18 K3AB	K3	AB	0.1
19 K3BC	K3	BC	0.1
20 K3CA	K3	CA	0.1
21 K3ABC	K3	ABC	0.1

图 7 试验项目清单

Fig. 7 Test items list

## 2 新型系统仿真测试实例

### 2.1 闭环仿真实例

根据国家标准 GB/T 26864 的要求建立 220 kV 长线路模型来对新型仿真系统进行测试, 验证系统的实时仿真性能。

在 Simulink 上搭建系统模型, 如图 8 所示。图中双回线路的左侧部分是一个自定义元件, 用来模拟发电机。左下角部分有 5 个功能块。“System”功能块实现系统运行工况的设置、模拟量开关量的输入输出以及 IEC61850 报文的生成; “Fault”功能块实现对故障的控制; “Hardware”功能块实现外接放大器放大系数的设置以及故障录波功能; “Breaker”

功能块实现对开关的控制；“Other”功能块实现频率偏移、系统振荡、定合闸角、经过渡电阻故障等

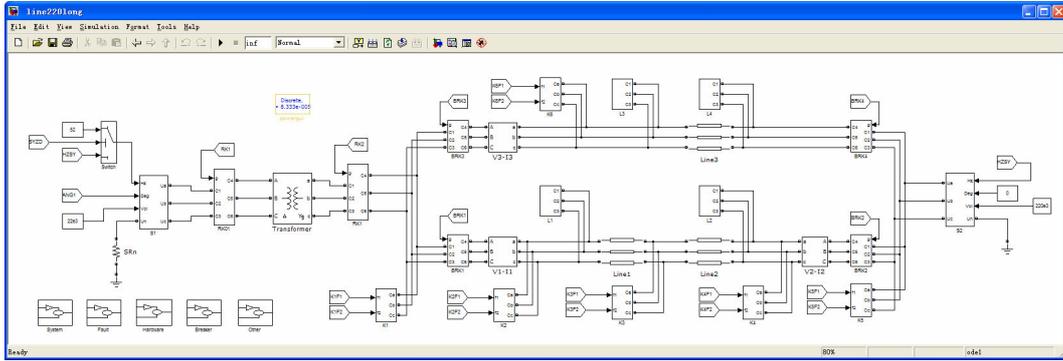


图 8 220 kV 线路仿真模型

Fig. 8 Simulation model of 220 kV line

将搭建好的模型进行编译，生成的 C 代码文件通过控制后台上传至计算单元。通过控制后台进行模型的启停、电压电流的监控、故障控制、下载录波等功能，该模型的计算时间接近 20 μs。

在该模型下进行了区内外金属性故障、转换性故障、经过渡电阻故障、系统振荡、弱馈、互感器断线、频率偏移、解合环及手合操作等试验项目的测试。从仿真波形及保护动作行为来看，其暂态特性满足动模试验的要求。

### 2.2 比对测试结果

在 RTDS 和新型仿真系统上分别建立相同参数的试验模型，对比相同条件下的故障波形，以此验证新型仿真系统的暂态特性。分别进行了区内外金属性故障、功率倒向、永久性故障等 700 多项试验，从仿真结果看，RTDS 和新型仿真系统的暂态过程一致，两者波形可以相互校核。以线路中点三相金属性短路故障为例，其波形比对如图 9、图 10 所示。

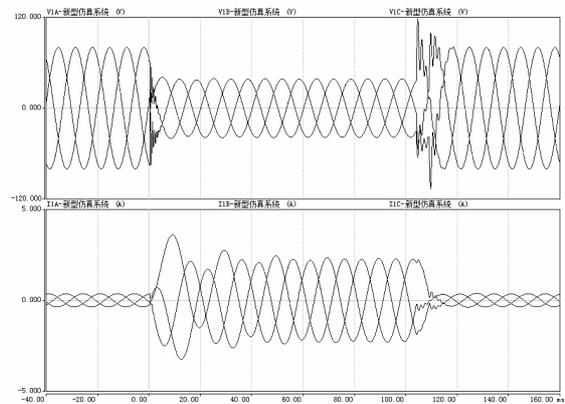


图 10 新型仿真系统波形

Fig. 10 New simulation system plot

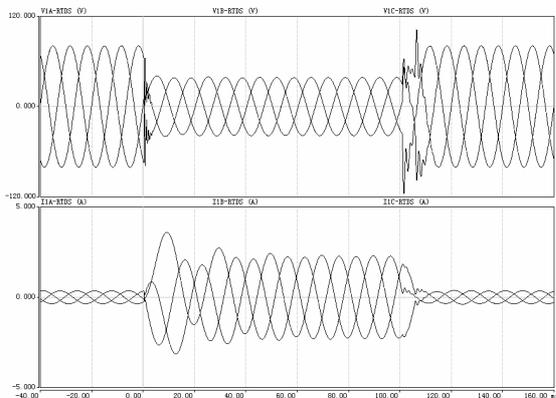


图 9 RTDS 波形

Fig. 9 RTDS plot

### 3 结论

本文所研究的新型实时数字仿真继电保护测试系统具有仿真计算能力强、暂态特性理想、模型封装完整、试验操作简易的突出特点。可开展常规保护、智能化保护及站域保护的动模试验，适用于继保企业、检测机构、培训机构、高等院校、科研院所等电力相关单位。

#### 参考文献

[1] 周鹏鹏, 李书琰, 李志勇, 等. 基于 IEC61850 的数字化新型仿真试验平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 120-124.  
 ZHOU Peng-peng, LI Shu-yan, LI Zhi-yong, et al. Research on digital new simulation test platform based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 120-124.

[2] 杨丽, 赵建国, PETER A C, 等. 全数字化保护系统性

- 能测试方案设计—系统运行特点与保护配置方案[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 38-43.
- YANG Li, ZHAO Jian-guo, PETER A C, et al. Design of performance testing scheme for all-digital protection systems part one systems characteristics and protection hardware setup[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 38-43.
- [3] 王涛, 高厚磊, 邹贵彬, 等. 基于 IEC61850 标准的数字化保护动模测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 133-136.
- WANG Tao, GAO Hou-lei, ZOU Gui-bin, et al. Dynamic simulation testing system for digital protection based on IEC61850 standard[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 133-136.
- [4] 冯善强. 基于实时数字仿真的数字保护测试系统的研究与开发[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- FENG Shan-qiang. Study and development of testing system for digital protection devices based on real time digital simulation[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [5] RTDS Technologies Inc. Real time digital simulation for the power industry manual set[Z]. 2007.
- [6] 李保福, 李营, 王芝茗, 等. RTDS 应用于线路保护装置的动模试验[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 69-70.
- LI Bao-fu, LI Ying, WANG Zhi-ming, et al. Comprehensive test of protective relays on different ends of long transmission line by RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(15): 69-70.
- [7] 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 Li-yi, GU Qiang. Power system digital simulation and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 1-6.
- [8] 徐科, 吴在军, 闵涛, 等. 基于 IEC1850 标准的新型数字保护平台研究与实现[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 79-84.
- XU Ke, WU Zai-jun, MIN Tao, et al. Digital protection platform based on IEC61850[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 79-84.

---

收稿日期: 2013-12-31

作者简介:

李亚萍 (1963-), 女, 博士, 高级工程师, 现从事继电保护检测和标准研究工作; E-mail: liyaping@ketop.cn

李志勇 (1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 现从事电力系统仿真试验研究工作;

周鹏鹏 (1982-), 男, 硕士, 工程师, 现从事电力系统仿真试验研究工作。