

DOI: 10.7667/PSPC171203

## 智能变电站就地化保护仿真测试系统设计与探讨

李刚<sup>1</sup>, 黄继东<sup>1</sup>, 倪传坤<sup>1</sup>, 樊占峰<sup>1</sup>, 李毅<sup>2</sup>, 何彦昊<sup>3</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400000;  
3. 宁夏送变电工程有限公司, 银川 750000)

**摘要:** 提出了一种基于智能变电站就地化保护设备的仿真测试系统设计方案, 通过仿真测试系统自动加载测试用例实现就地化保护装置的保护功能逻辑自动验证和二次回路正确性验证。仿真测试系统包括自适应测试仪系统、自动测试软件、仿真控制中心和网络设备等。自适应测试仪硬件基于架构可实现灵活定制输出的测试仪, 能够输出常规模拟量或 61850-9-2 规约的 SV 报文, 自适应测试仪通过即插即用的双端预制航插实现测试系统和待测设备的数据传送。自动测试软件基于 windows 系统开发, 内部设置有各类型保护的测试用例, 工程应用时根据待测对象选择相应的保护类型后, 能够自适应加载相应的测试用例并可根据工程具体情况对测试用例的数量灵活勾选测试用例条目。该仿真测试系统适用于智能变电站就地化保护工厂测试、工程联调以及改扩建调试, 自动测试可提高测试效率, 具有良好的经济效益和社会效益。

**关键词:** 智能变电站; 就地化保护; 仿真测试; 工厂式调试; 更换式检修

### Discussion on the construction scheme of intelligent substation on-site protection simulation test system

LI Gang<sup>1</sup>, HUANG Jidong<sup>1</sup>, NI Chuankun<sup>1</sup>, FAN Zhanfeng<sup>1</sup>, LI Yi<sup>2</sup>, HE Yanhao<sup>3</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Chongqing Power Maintenance Branch, Chongqing 400000, China, 3. Ningxia Power Transmission Company, Yinchuan 750000, China)

**Abstract:** This paper presents a design scheme for simulation test system based on smart substation local protection device, and verifies local protection function logic and secondary circuit's validity and reliability using test cases automatically loaded by simulation test system. This simulation test system includes adaptive tester system, automatic test software, simulation control center, network equipment, etc. The adaptive tester hardware is based on a tester designed for flexible and customized output, which can output regular analog and SV message for 61850-9-2 protocol. The data transmission between the test system and the equipment under test is achieved by plug-and-play double-ended prefabricated navigation in the adaptive tester. The development of automatic test software is based on windows system with test cases for various types of protection device. In engineering application, the corresponding protection type is selected according to the protection device to be tested. It can adaptively load the corresponding test cases and flexibly check the test case entry for the number of test cases according to the specific circumstances of the project. This simulation test system is suitable for intelligent substation local protection factory testing, engineering joint debugging and expansion debugging. Automatic testing can improve the efficiency of testing, so it has good economic and social benefits.

This work is supported by Science and Technology of Headquarter of State Grid Corporation of China (No. JSJX00YJJS1601932).

**Key words:** intelligent substation; local protection; simulation test; factory-style debugging; replacement maintenance

## 0 引言

智能变电站采用“常规互感器+合并单元”方

案, 导致继电保护系统传输环节多, 整组动作时间较常规保护长 8~10 ms, 保护速动性不满足规程要求; 合并单元、智能终端等公共设备故障率高(为常规保护 2 倍以上), 单一设备故障往往造成多套保护不正确动作, 继电保护的可靠性得不到保障。

为了解决上述问题, 就地化保护装置应运而生。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(JSJX00YJJS1601932)

“智能变电站就地化保护装置研制”

就地化保护直接采样、直接跳闸、采用航空连接器、无液晶屏幕显示,保护装置相当于一个“黑匣子”,这对继电保护的现场安装、系统调试、运维检修提出了新的问题和挑战。就地化保护实行“工厂式调试”和“更换式检修”是必然趋势<sup>[1-8]</sup>。

就地化线路保护依然两端各放置一台保护装置,但位置从主控室移至一次设备开关场。母线保护、变压器保护等跨间隔保护(母差、主变)采用分布式设计,子机无防护就地化安装,各保护子机互相独立。子机电缆直接采样,电缆直接跳闸,子机和子机间采用环网通信。

就地化保护运维相比于非就地化建设模式智能变电站优势如下:1)利用就地化保护便于安装和更换的优势,现场检修工作以快速更换为主,减少设备停电时间;2)无本间隔保护虚回路设计,简化全站SCD配置及管控难度;3)一键式下装,实现少维护、易维护;4)结合二次设备状态监测、虚回路可视化及配置文件管控,提高设备全生命周期管理质量、确保系统稳定安全运行。

## 1 就地化保护装置调试检修流程及内容

智能变电站应用就地化保护装置后,改变了现有的运维检修模式<sup>[9]</sup>,保护装置接口标准化,可以实现“工厂化试验、更换式检修”。更换式检修分为更换前工厂调试和更换后现场检查两部分内容。

### 1.1 工厂调试

同厂家同型号装置更换,在工厂调试阶段,主要工作内容为:检查备份文件的有效性<sup>[10-12]</sup>,一键式下装各种配置文件,确保保护装置的工作状态,完成保护装置的逻辑功能详细验证。如果是不同厂家同类型装置的更换,其配置方式不同。

### 1.2 现场检查

现场更换装置后的调试,侧重于二次回路连接有效性、可靠性、配置正确性、保护功能逻辑的检测。

在工厂调试和现场检查中均存在一个保护逻辑功能详细验证的环节,尤其是在进行更换或缺时,需要尽快完成,那么快速完成各种验证就成为当务之急。

由于就地化保护的各端子均密闭封装在具备IP67防护能力的保护装置中,通过航插对外联系,不再存在箱端子与屏端子,按照传统方法完成保护装置的保护逻辑功能验证几乎不可能。本文提出了一种智能变电站二次设备仿真测试系统设计方案,实现基于航插接线的就地化保护装置自动测试。

## 2 就地化保护仿真测试系统设计方案

就地化保护仿真测试系统需要适应当前就地化保护,取消了液晶、对外输出采用圆形航空插头的特征以及检修维护流程的变化。

### 2.1 系统架构

仿真测试系统包含:仿真测试管理单元、测试仪主机、智能端子箱、网络交换机等,可依据现有作业指导书的内容开展常规接口和数字化接口的就地化线路保护、母线保护、变压器保护的自动闭环测试,并出具测试报告<sup>[13-16]</sup>。仿真测试系统系统示意图如图1所示。

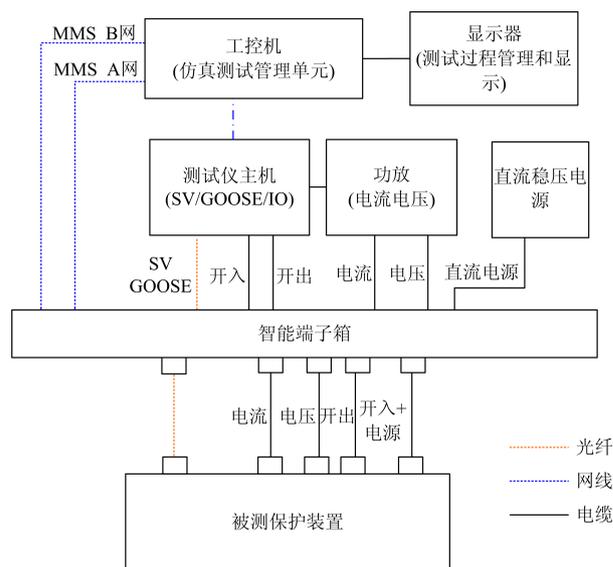


图1 仿真测试系统系统示意图

Fig. 1 Sketch map of simulation test platform system

测试平台通过预置电缆或光缆与就地化保护装置接口,电缆、光缆均采用双端预制方式。

仿真测试系统设计有如下对外接口:千兆光纤以太网接口、千兆以太网接口、电以太网接口、小信号模拟量、硬接点开入、空接点开出、光B码输入接口、光B码输出接口、测试仪主机和放大器接口、双端预制电缆、试验车和保护装置接口等。

### 2.2 结构设计

考虑就地化保护装置的生产、发货、调试均和现有保护装置不同,工厂式调试时大多情况下装置密集堆放,因此本项目仿真实验平台拟采用移动式试验车方式,测试时无需挪动被测装置,试验平台移动方便、接线简单、全自动测试。

仿真测试系统内集成各个测试设备模块,固化于一体式试验车。安装示意图如图2所示。以线路保护为例,不同电压等级的线路保护对输入输出的具

体端子定义不同,《就地化即插即用线路保护装置通用技术条件》中对各电压等级的就地化线路保护的端子定义和圆形航插的定义有明确要求,故测试平台均需要灵活支持。为了考虑平台的通用性,设计了一个复用接线板以满足不同电压等级就地化线路保护的测试需求,其示意如图3所示。

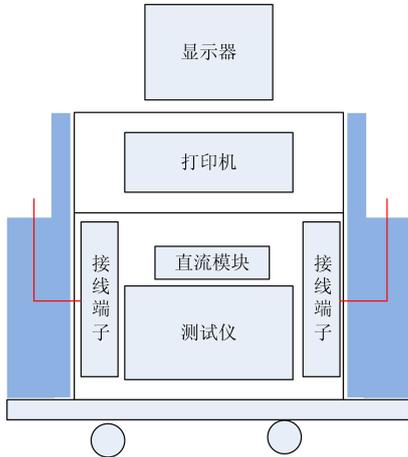


图2 仿真测试系统设备结构示意图

Fig. 2 Sketch map of equipment structure of simulation test platform

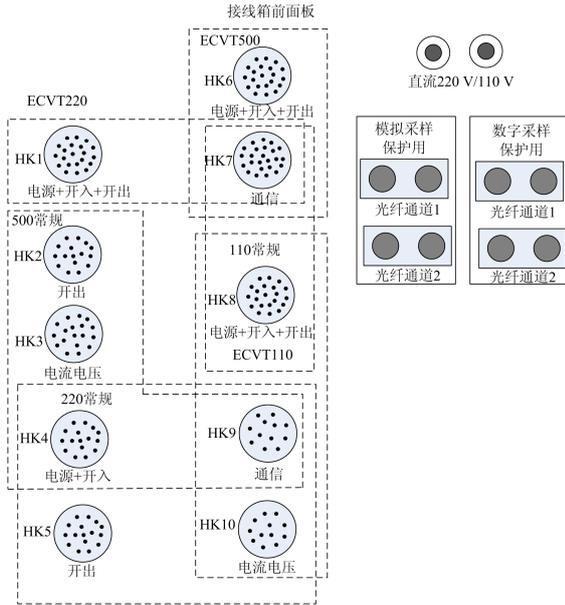


图3 复用接线板示意图

Fig. 3 Sketch map of multiplex wiring board

### 2.3 功能架构

通过以 MMS 对被测对象进行配置下载、定值修改和保护事件、告警的获取功能。

仿真测试系统虚拟机根据 SCD 文件模拟变电站相关 IED 装置的 GOOSE 和 SV, 可输出给被测

装置, 也可接受被测装置的 GOOSE 和 SV。

仿真测试系统功放及智能端子箱可以输出被测装置所需的电流、电压模拟量和开关量, 也可接收保护装置输出的动作接点。功放及 I/O 接口的规模可根据被测装置进行扩展。

获取到被测装置的内部采样、事件或告警信号, 仿真系统可以结合过程层数据和 MMS 信息进行 SV 采样、开入开出的自动测试。

管理单元可通过 MMS 将被测装置的定值单下载到装置, 并根据定值单进行自动校验。

仿真平台可测试保护装置的保护动作定值精度动作时间、保护逻辑正确性; 母线保护、主变保护等跨间隔保护应将环网中各子机看作一个整体进行测试; 仿真平台还可单独对保护子机功能进行测试, 测试其 SV 采样的精度以及跳合闸动作时间。

### 2.4 系统功能

智能变电站继电保护仿真测试系统主要功能如表1。

表1 智能变电站继电保护仿真测试系统主要功能

Table 1 Main functions of simulation test platform for relay protection in intelligent substation

| 序号 | 功能       | 说明  |
|----|----------|---|
| 1  | SCD 工具   | 支持 SCD 文件导入, CID、CCD 导出及对测试装置进行下载                                 |
| 2  | 装置配置管理   | 包括装置内部信息可视化(虚拟液晶)、装置定值参数设置、程序和配置等一键备份与还原等测试用例编辑和管理                |
| 3  | 保护功能自动测试 | 测试系统配置<br>测试仪控制<br>仿真主站/MMS 通信<br>测试报告模板定制和生成                     |
| 4  | 硬件检测     | 装置采样回路测试、开入开出回路验证、光强监测、网络通信功能测试, 快速诊断硬件回路可用性                      |
| 5  | 故障回放     | 导入 COMTRADE 格式的录波文件, 可通过仿真测试系统将录波数据转为模拟量输出提供给保护装置, 进行故障再现, 支持回放测试 |

仿真测试系统根据其支持的保护装置预植了海量测试用例, 工程应用时根据待测对象选择相应的保护类型, 测试系统软件能够自适应加载相应的测试用例。例如测试一台线路保护时, 测试系统软件能够自动弹出“差动保护测试模块”、“距离保护测试模块”、“零序过流模块”、“零序反时限模块”、“重合闸模块”、“过负荷模块”、“测距模块”等一级模块。每一个一级模块均展开为若干个二级模块, 二级模块的又可以分为逻辑、精度、信息上送、动作时间等, 展开每一个二级模块则是对应的测试用例,

如打开精度模块下时有以下测试用例:

- 1) 0.95 倍动作定值;
- 2) 1.05 倍动作定值;
- 3) 2 倍动作定值;
- 4) 5 倍动作定值。

具体应用时,如果是首次测试则建议加载全部测试用例;如针对某相特殊功能进行部门功能性验证,则找到相应三级模块勾选测试用例即可。

选择完测试用例后,点击“执行”命令,仿真测试系统可以顺序执行已勾选的测试用例。每执行完一个测试用例,仿真测试系统自动判别保护装置对每一个测试用例动作行为的正确性。

测试完成后,仿真平台应直接将测试结果以可视化形式展示,并自动生成 word 或者 pdf 格式测试报告。

## 2.5 仿真功能

该系统提供智能变电站设备仿真功能,可模拟变电站内过程层间隔层和站控层设备,与待测设备进行数据交互,进行变电站仿真实验。仿真系统示意如图 4 所示。

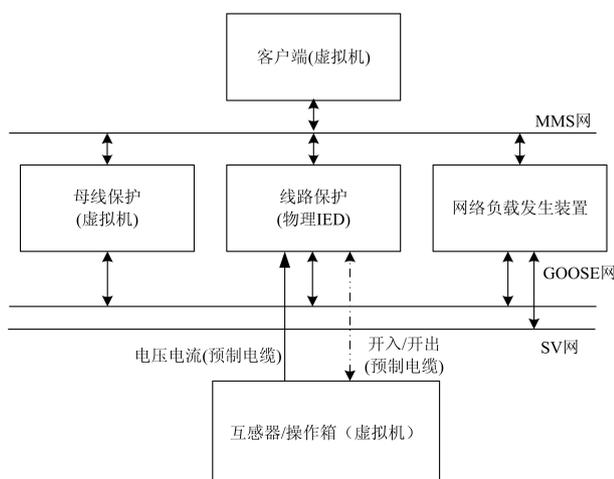


图 4 仿真系统示意图

Fig. 4 Sketch map of simulation system

系统包含客户端虚拟机、IED 模拟器、网络负载发生装置、过程层数据源等设备,这些设备按照变电站组网方式连接,构成一个仿真系统。待测设备接入仿真系统后,导入 SCD 文件,通过简单操作配置测试环境后,将需要仿真模拟的设备配置文件分发下装到各个虚拟机中,虚拟机即可模拟实例化的现场运行设备,和待测装置进行数据交互。

系统仿真功能是就地化保护自动测试系统的高级功能,可实现保护的规约接入性测试、装置性能闭环测试、子站仿真应用功能模拟等。

### 1) 规约接入性测试

智能变电站继电保护仿真测试系统可以仿真主站,对子站数据接入主站的能力进行傻瓜式测试,测试过程可以根据主站的规约规范按需进行测试命令的选择和配置,测试任务可步进显示,规约命令异常及时报警显示,测试往返报文自动存档,可在主站或通道不具备正常工作的条件下对子站的规约接入性能进行检验。

### 2) 装置性能闭环测试

装置性能闭环测试是在测试信号接入就地化保护 DIO 接口的基础上,将智能变电站继电保护仿真测试系统的通信接口接入就地化保护的通信接口,通过规约通信交换测试信息,实现部分指标的自动测试分析,该功能可实现站内 SOE 分辨率、遥信防抖参数和遥控 DO 接口参数、保护动作时间的自动测试和结果自动生成。

### 3) 子站仿真应用

子站仿真应用是在建立子站仿真模型的基础上,通过控制子站部分数据的变化机制,向主站发送一定格式的仿真数据,以检验主站的性能。目前开通的应用包括遥信风暴仿真、保护事件动作模拟、五防逻辑检查等功能。该子站仿真应用平台采用开放式结构设计,可根据需要添加不同模式的功能应用。

## 2.6 工程应用实例

以 220 kV 光纤电流差动保护为例,如果一台保护装置进行完整的功能测试,线路保护共包含“差动保护测试模块”、“距离保护测试模块”、“零序过流模块”、“零序反时限模块”、“重合闸模块”、“过负荷模块”、“测距模块”等一级模块。

在对智能端子箱接线后,首先执行“差动保护测试测试模块”,差动保护的第一个测试用例是 A 相动作门槛精度测试,仿真测试系统会自动根据测试用例配置相应的模拟量,将仿真测试系统的 A 相电流输出置为开放状态,其他相电流屏蔽输出。

模拟量配置完成后,仿真测试系统进入到参数准备环节,该环节主要是准备压板定值项下发,仿真测试系统会根据测试用例的配置将保护功能软压板“纵联电流差动保护”自动修改为投入,将控制字“纵联差动保护”自动整定为投入,将定值门槛“差动动作电流定值”整定为额定值 1 A,将跳闸出口压板“保护跳闸”整定为 1。

仿真测试系统将上述用于完成差动保护 A 相电流动作门槛精度的准备工作通过装置调试电口以 61850 规约下发到保护装置中,该过程取代了人工手动试验的操作步骤,保护装置执行完成上述修改

后反馈执行成功命令。

仿真测试系统收到定值准备返回命令时则进入自动测试环节, 仿真测试系统会依次自动输出 0.95 A、1.0 A、1.05 A、2 A。仿真测试系统对每一次测试用例的执行都设置保护动作作为判断条件。对于差动保护, 仿真测试系统接收保护动作的跳闸出口接点、动作 SOE 的参引、动作时间、动作相别等。

对于 A 相动作门槛精度测试, 仿真测试系统设置三次测试, 当仿真测试系统输出 0.95 A 时, 仿真测试系统执行动作行为的判别条件是: 跳闸出口接点不闭合、无动作 SOE 上送、无动作相别上送; 当仿真测试系统输出 1.0 A 时, 仿真测试系统执行动作行为的判别条件是: 动作接点闭合(仿真测试系统受到接点反馈)、差动保护动作 SOE 上送(通过参引判别)、动作时间小于 30 ms、A 相故障动作(通过参引判别); 当仿真测试系统输出 2 A 电流时, 仿真测试系统执行动作行为的判别条件是: 动作接点闭合、差动保护动作 SOE 上送、动作时间小于 20 ms、A 相故障动作。如果保护动作行为满足判别条件, 仿真测试系统在判别窗口里显示通过, 否则显示失败。

当完成第一项测试用例时, 仿真测试系统自动顺序执行 B 相电流精度测试, 仿真测试系统屏蔽 A 相电流输出, 开放 B 相电流输出, 动作行为判别条件修改为 B 相的相关识别。

当差动保护所有测试项目完成后, 仿真测试系统执行距离保护测试模块。仿真测试系统在执行距离保护的第一项测试用例时, 仿真测试系统的参数配置环节会自动退出差动保护的定值、压板和定值, 投入距离保护的定值、压板和定值。在下发参数配置时, 仿真测试仅下发需要修改的定值、压板和定值, 其他不需要修改定值则不需要下发。因此, 配置测试用例的参数准备时也非常简单, 只需要简单操作几个相应的参数项, 与手动操作完全一致, 不需要对所有的参数项操作一遍。

距离保护、零序过流保护等各项保护的测试用例的数据配置和动作行为判别与差动保护一致。

差动保护测试模块包含 87 个测试用例、距离保护测试模块包含 132 个测试用例、零序过流模块包含 28 个测试用例、零序反时限模块包含 13 个测试用例、重合闸模块包含 61 个测试用例、过负荷模块包含 46 个测试用例、测距模块包含 27 个测试用例, 总计 394 个测试用例, 执行完成整套测试用例仅需要 2 小时 25 分, 大大提高了工程调试效率。

### 3 结论

2016 年底就地化保护在严寒、高温、高海拔、

盐雾等具有代表性的 7 个地区(黑龙江漠河、新疆吐鲁番等)开展了挂网试运行。随着就地化保护的推广, 就地化保护仿真测试系统将得到广泛应用, 有益于提高现场检修工作效率, 减轻现场检修工作压力, 缩短检修停电时间。

### 参考文献

- [1] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.  
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [2] 裘愉涛, 徐凯, 陈福锋, 等. 基于双向环网的变压器保护就地化实现方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 41-45.  
QIU Yutao, XU Kai, CHEN Fufeng, et al. Implementation scheme of outdoor installation transformer protection based on bidirectional ring network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 41-45.
- [3] 李俊刚, 张爱民, 彭华夏, 等. 区域层次化保护系统研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 34-40.  
LI Jungang, ZHANG Aimin, PENG Huaxia, et al. Research and design of zone area hierarchical protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 34-40.
- [4] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-12.  
BO Zhiqian, ZHANG Baohui, DONG Xinzhou, et al. Intelligent relay network for the development of protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 1-12.
- [5] 刘伟, 倪传坤, 杨恢宏, 等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-141, 146.  
LIU Wei, NI Chuankun, YANG Huihong, et al. Implementation of distributed busbar protection applied to smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 139-141, 146.
- [6] 邓茂军, 樊占峰, 倪传坤, 等. 就地化分布式变压器保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 95-99.  
DENG Maojun, FAN Zhanfeng, NI Chuankun, et al. Research on scheme of outdoor installation distributed transformer protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 95-99.

- [7] 陈萍, 张继军, 郭文钟, 等. 数字化变电站中保护下放问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 98-100.  
CHEN Ping, ZHANG Jijun, GUO Wenzhong, et al. Analysis of the protection decentralization in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 98-100.
- [8] 牛强, 钟加勇, 陶永健, 等. 智能变电站二次设备就地化防护技术[J]. 电力建设, 2014, 35(9): 76-81.  
NIU Qiang, ZHONG Jiayong, TAO Yongjian, et al. In-situ secondary equipment protection of smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9): 76-81.
- [9] 王玉磊, 应黎明, 陶海洋, 等. 基于效能-成本的智能变电站二次设备运维策略优化[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 182-188.  
WANG Yulei, YING Liming, TAO Haiyang, et al. Operation-maintenance strategy optimization based on efficiency-cost sensitivity analysis for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 182-188.
- [10] 孙一民, 刘宏君, 姜健宁, 等. 智能变电站 SCD 文件管控策略完备性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 105-109.  
SUN Yimin, LIU Hongjun, JIANG Jianning, et al. Analysis on completeness of substation configuration description file control strategy for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 105-109.
- [11] 李岩军, 艾淑云, 王兴国, 等. 继电保护就地化及测试研究[J]. 智能电网, 2014, 2(3): 16-21.  
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al. Locally installed mode and test research of relay protection[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 16-21.
- [12] 熊华强, 万勇, 桂小智, 等. 智能变电站 SCD 文件可视化管理和分析决策系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 166-171.  
XIONG Huaqiang, WAN Yong, GUI Xiaozhi, et al. Design and implementation of visual management and analytical decision system for smart substation SCD files[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 166-171.
- [13] 刘宏君, 裘愉涛, 徐成斌, 等. 一种新的智能变电站继电保护架构[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 49-51.  
LIU Hongjun, QIU Yutao, XU Chengbin, et al. A new architecture of relay protection in smart substations[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 49-51.
- [14] 饶丹, 张成彬, 樊瑞. 继电保护装置自动测试体系设计之白盒测试[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 131-134.  
RAO Dan, ZHANG Chengbin, FAN Rui. White box testing for the design of automatic testing system of relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 131-134.
- [15] 郑三立, 范瑜, 黄梅, 等. 微机闭环测试继电保护装置的预仿真[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 97-101.  
ZHENG Sanli, FAN Yu, HUANG Mei, et al. Pre-simulation of PC based closed-loop testing for protective relays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5): 97-101.
- [16] 马杰, 李磊, 黄德斌, 等. 智能变电站二次系统全过程管控平台研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 62-72.  
MA Jie, LI Lei, HUANG Debin, et al. Research and practice on the whole process management platform of the secondary system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 62-72.

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

李刚(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站产品研制; E-mail: 13949833833@139.com

黄继东(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护产品研发;

倪传坤(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站继电保护。

(编辑 葛艳娜)