

DOI: 10.7667/PSPC171803

智能变电站综合测试仪的研究与实现

李志勇¹, 孙发恩², 瞿晓宏²

(1. 许昌开普电气研究院, 河南 许昌 461000; 2. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 针对目前智能变电站功能复杂、产品多样、实时性要求高的特点, 设计了一种功能全面、测试可靠的综合测试仪。该测试仪支持站控层监控系统、间隔层 IED、过程层设备、交换机、校时等设备的性能测试。根据设定测例及流程自动进行正向、负向测试, 生成测试报告, 方便了后续测试缺陷的查询及修正。该测试仪解决了现有测试仪功能单一、性能测试缺失的问题, 提高了测试的效率和质量。通过对相关设备的测试及试验验证, 表明该综合测试仪性能优异, 达到了预期的目标。

关键词: IEC 61850; 智能变电站; 自动化测试; 综合测试

Research and implementation of integrated tester for smart substation

LI Zhiyong¹, SUN Faen², QU Xiaohong²

(1. Xuchang Ketop Electric Research Institute, Xuchang 461000, China;
2. Integrated Electronic Systems Lab Co. Ltd, Jinan 250100, China)

Abstract: Considering the characteristics of smart substation, such as complex functions, various products and high real time requirement, this paper designs an integrated tester with full functionality and reliable testing. The tester supports performance testing of the station control layer monitoring system, bay layer IED, the process layer device, switches, timing device, etc. On the basis of predefined test cases and process, it can automatically carry out the positive and negative test, and generate the test report which is convenient for searching and correcting the test defects. This tester significantly improves the efficiency and quality of test with solving the limitation and deficiency of test function. According to typical verification by testing in related equipment, the integrated tester shows good performance which meets the expected goal.

This work is supported by Shandong Technical Innovation Project (No. 201711901062).

Key words: IEC 61850; smart substation; automated testing; integrated testing

0 引言

随着 IEC 61850 标准在电力行业的推广普及, 我国已经完成多个智能变电站的建设及传统站智能化的改造工程, 成为智能变电站投运数量最多的国家^[1]。为保障智能变电站建设、运行、维护的可靠性, 国内外很多科研单位和高校开展了智能变电站设备的相关实验、测试研究与开发工作。

目前国内测试仪产品一般仅局限于单一的测试功能, 如通信一致性测试、通用测试等^[2-3], 未针对业务需求细化, 不能覆盖实际中复合测试的要求, 特别是综合测试、压力测试^[4]、负测试需求^[5]等。

而且, 面向间隔^[6]或系统的测试也较为缺乏。另外, 这些测试仪产品在测试过程中, 一般是手动测试或需要较多的人工干预, 无法满足自动化测试的需求。国外的测试仪产品较多地关注在 IEC 61850 规约测试方面, 无法满足 SV 和 GOOSE 测试的实时性需求。

为解决上述问题, 结合实际需要, 本文提出了一种满足自动化、一键式操作、测试场景覆盖全面的智能变电站综合测试仪, 以实现智能变电站的综合测试、调试和评估。该测试仪从测试项目设置至测试过程记录、测试报告编写全部由计算机系统自动完成, 同时能够对测试数据进行统计分析, 大大提高了测试效率和后期处理测试结果的能力。

1 技术要求

智能变电站综合测试仪测试对象应涵盖智能变电站三层网络中的一体化后台监控系统、测控和保护设备、合并单元、智能终端、电子式互感器、网络及交换机等设备的测试。针对不同被测试的产品，依据 IEC 61850 标准及国内相关规范，具有不同的细化测试项目，并包含有全面正、反向测试，因此需满足以下功能要求。

1) 全面的 IEC 61850 一致性测试^[7]功能：包含规约一致性和模型的一致性测试，其中规约一致性^[8]测试主要是指使用 MMS 协议通信的 61850 客户端、61850 服务器以及 GOOSE、SV 等协议的测试，包括正测试和负测试；模型的一致性测试实现基于 Schema 的语法和语义检查^[9]，双模型校核以及国内相关技术规范的符合性测试等。

2) 全面的智能变电站测试功能：智能变电站测试系统应具有仿真、信息安全、时间同步管理、设备测试、报文分析、场景的全景展现、自动测试等功能以及现场测试时的光纤匹配辅助功能。

3) 高精度、高实时性的数据交互及抗干扰能力要求：智能变电站综合测试仪实际运行环境复杂，设备之间数据交互频率高，传输速度快。作为测试设备，为保证测试的可靠性，智能变电站综合测试仪应保证内部之间通信、与外部设备之间通信的高精度与高实时性，以及较强的抗干扰能力。

4) 易于扩展的模块化设计方案：为提高可扩展能力，总体架构应该进行分层设计，可根据实际需求的变化增加或删除各种物理接口；同时，对于不同的测试功能应该相互独立，面向装置的测试模块由功能模块组合而成，应对快速变化的测试需求。

2 方案分解

2.1 场景分解

智能变电站综合测试仪从应用场景上可分为站控层测试场景、间隔层测试场景、过程层测试场景、网络设备测试场景以及面向功能串或者数据流的自动化测试场景。

1) 站控层测试场景^[10]是指智能变电站内的后台、远动以及通信管理机的功能、性能测试等，测试方法主要是通过 PC 加载多个不同的模型文件模拟单个或多个变电站间隔层设备，接收被测系统的连接、报告使能、遥控操作、定值操作、替代操作等，为分析站控层系统响应的正确性和及时性提供依据。

2) 间隔层测试场景是对智能变电站中的测控

装置、保护设备^[11-12]等的测试，主要分为两个方面：模拟站控层设备和模拟过程层设备，并对被测设备所加载的模型进行检查以确保其完全符合 IEC 61850 标准。

3) 过程层测试场景^[13]是智能变电站综合测试仪对合并单元、智能操作终端以及电子互感器等的功能、性能测试。

4) 网络设备测试场景是指智能变电站综合测试仪对网络及其相关通信设备的功能、性能测试^[14]，以保证网络环境的通畅性。

5) 自动化测试场景^[15-17]是指智能变电站综合测试仪根据 SCD、CID 文件自动生成测试序列，在简单设置参数后，按照预先设定的测试序列^[18]顺序对被测试设备的基本功能、性能等方面进行测试。测试过程降低了人员干预程度，提升了测试效率。

2.2 功能分解

根据实际使用场景要求，智能变电站综合测试仪由以下基本功能组成，如图 1 所示。



图 1 智能变电站综合测试仪功能模块分解图

Fig. 1 Function module separated result of integrated tester for smart substation

在图 1 中，MMS 测试功能、SV 测试功能和 GOOSE 测试功能为 IEC 61850 规约一致性测试功能。其中 MMS 测试功能包含 MMS 客户端测试和 MMS 服务器测试，通过不同的正、负测试用例完成对智能变电站站控层、间隔层和过程层系统或设备一致性测试。主要包括以下功能：

- 1) 应用关联测试；
- 2) 服务器/逻辑设备/逻辑节点/数据功能的测试，包括目录服务、数据请求以及相关的异常测试等；
- 3) 数据集功能测试；
- 4) 取代功能测试，包括取代的使能和品质位检测等；
- 5) 非缓存报告功能测试，主要包括可选域、触发条件等；
- 6) 缓存报告功能测试，主要包括处理可选域、触发条件、复杂数据、报告同步以及异常处理等；
- 7) 定值组选择功能测试；

- 8) 控制功能测试;
- 9) 日志功能测试;
- 10) 文件传输功能测试。

SV 一致性测试包括采样值订阅、发布以及可选域等能力测试。采样值订阅测试功能用于测试有效报文的接收、异常报文的告警等; 采样值发布测试包括报文格式测试、延时测试、动态采样率测试等; 可选域测试是指对订阅方施加是否包含数据集、刷新时间、采样率三个可选域的 SV 报文测试。

GOOSE 一致性测试与采样值测试有类似之处, 除上述之外, 支持双网收发、时标品质以及解码性能测试。

模型检查功能实现对 IEC 61850 工程模型文件的自动检查, 主要包括语法检查、数据类型模板测试、IED 通用检测、数据集检测、控制块检测、实例化检测、继电保护信息规范性检测和双模型校核等方面。

仿真功能主要是通过加载单个或多个不同的模型文件模拟变电站间隔层的单个或多个设备, 通过人工设定或导入实际运行数据文件, 使得服务器仿真具有实际含义的真实数据, 模拟出报告、日志、遥控、定值等 IEC 61850 规定的服务。

自动测试功能根据 SCD、CID 文件自动生成测试序列, 依据导入的模型文件判别设备类型, 针对不同应用场景生成所有测试序列。SCD、CID 模型文件中的逻辑节点等配置代表了被测设备具有的功能, 如遥控、遥信等以及使用的传输方式, 如报告、GOOSE 等, 测试仪根据模型自动生成与之对应的正向测试用例、负向测试用例以及与之有关的压力测试用例, 测试用例组成测试序列, 用户可手动增加、删除测试序列, 也可以导出至文件。用户可以启动测试按钮进行一键操作开始相关性能的测试, 测试进度直观可见, 测试完成后自动生成测试报告。测试报告中包含测试说明、测试项目、测试结论等, 每个功能的测试说明、测试项目根据功能不同有所区别, 其中测试说明描述测试概述及要求, 测试项目描述测试项及参数设置, 测试结论根据要求给出了初步的结果, 如果未通过则指明原因, 方便用户后续的查询和问题修复。

报文分析功能是对测试过程中的报文数据进行分析、统计、显示, 同时对测试过程中的数据进行实时记录, 对异常的数据进行存档显示等。

背景流量功能是指对测试设备发送无效网络背景流量和有效网络背景流量, 所有组网网口可施加 SV、GOOSE、ARP、PTP 等数据协议的背景流量、可调节报文占比及总报文带宽, 并实时测试信

号报文的延时。

通信性能测试功能主要包含事项传输正确率及时间测试、并发测试、雪崩测试以及相关的压力测试, 如正常压力报文、各种异常报文攻击测试等。

智能变电站综合测试仪除上述功能外, 还包含状态量定时触发功能、校时及授时功能是指遥信功能 光纤匹配检查等。

3 系统设计

智能变电站综合测试仪主要由上位机和下位机组成, 其中上位机主要用于测试功能和测试参数设置、测试命令的下发、测试结果的分析与展示等。而下位机接收上位机下发的测试数据、命令, 并在相应设备上执行。

3.1 上位机设计

为满足测试功能和应用场景的要求, 智能变电站综合测试仪上位机从逻辑上可分为人机交互子系统、测试应用子系统、模板管理子系统、指令编辑及解析子系统和底层数据收发子系统等, 它们的逻辑结构如图 2 所示。

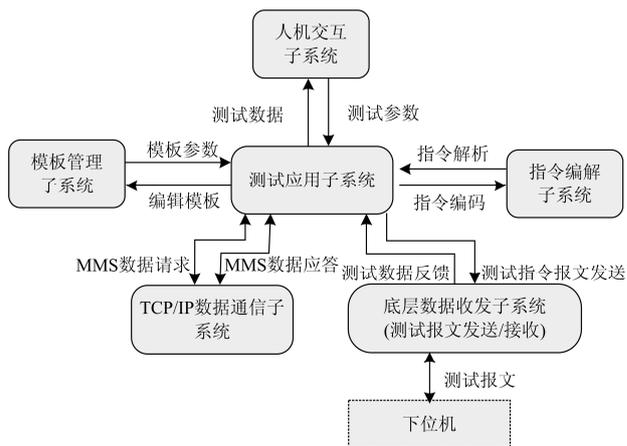


图 2 上位机逻辑结构图

Fig. 2 Logical structure diagram of upper computer

在图 2 中可以看出, 人机交互子系统通过测试应用子系统完成需要的测试, 并为测试应用子系统提供必需的参数, 测试应用子系统调用模板管理子系统完成测试报文的逻辑组包, 然后通过指令编解子系统完成上位机测试指令的编码工作, 最后通过底层数据收发子系统将指令发送至测试仪下位机装置。

人机交互子系统分为变电站后台测试模块、IED 测试模块、合并单元测试模块、电子互感器测试模块、智能操作箱测试模块、交换机测试模块、基本测试模块及基本测试工具模块, 主要处理测

试项目的选择、参数输入、测试过程控制以及结果显示。

测试应用子系统是测试系统的基本应用子系统，该部分通过模板管理子系统获取测试过程中所需要的各种测试模板，通过指令编解子系统完成测试过程的指令编解，即将测试流程转化成指令编码，同时将测试反馈由编码转换成测试数据。最终测试应用子系统将测试编码通过底层通信子系统发送到以太网上，传送给测试仪 FPGA 部分进行处理，同时接收 FPGA 处理过程中的编码数据，以完成整个测试过程的交互。

模板管理子系统用于处理测试过程中所需要的各种模板，支持模板的编辑、导入和导出。模板管理子系统分为 SMV 模板模块、GOOSE 模板模块、测试报文模板模块、MMS 测试脚本模块、交换机测试模板模块、模型检查模块。

指令编解子系统主要处理测试系统上位机软件与测试仪之间进行交互的指令，采用符合标准以太网通信格式的私有类型报文。指令编解子系统分为分板公共操作指令模块、交换板操作指令模块、GOOSE 发送指令模块、交换机发送指令模块、测试报文发送指令模块、Ft3 报文发送指令模块、状态量触发指令模块、SMV 发送指令模块、报文接收指令模块。

底层数据收发子系统主要负责上位机软件与测试仪之间指令报文的发送与接收，指令报文的发送与接收分别以注册回调和函数调用的方式实现。

对于 MMS 相关的测试，其通信交互是面向连接的，使用时通过测试应用子系统直接调用 TCP/IP 数据通信子系统进行交互。

3.2 下位机设计

如图 3 所示，下位机主要包括电源板、母板、信息交换板、网络通信板、信号采集板、DIDO 板以及 PTCT 板。其中母板为各分板提供电源通路、信息交互的数据通路及时间信号通路，各分板通过连接器与母板相连；电源板将外部输入的交流或直流电压转换为各分板的工作电压，通过接插件及母板提供给各分板。

DIDO 板与 PTCT 板分别负责数字量与模拟量的采集控制，两块板卡的信号通过数据线与信息采集板交互。信息采集板的主要功能是将外部采集的数据进行处理后组帧通过母板送往数据总线上的其他板卡，并解析母板传来的遥控命令，发送给 DIDO 板进行开出控制。其中，采集的数据主要包括 DIDO 板传来的开入量、PTCT 板传来的模拟量以及信息采集板上的光收发器接收的 FT3 报文数据。

网络通信板功能主要是发送或接收变电站过程层与间隔层设备通信的以太网数据帧，对接收的数据帧进行准确地时间标定并转发至上位机进行分析，这些测试数据帧主要包括 SV 9-2^[19]、SV 9-2LE^[20]、GOOSE 以及测试相关的背景流量信息。母板上有多多个网络通信板的插槽，可以连接多块网络通信板，增加通信的网络接口。网络通信板的测试数据帧内容分为两方面：一是实时采集数据，包括开入量和模拟量，主要来自数据总线上的信息采集板；二是仿真数据，该类数据主要由上位机器产生，通过网络发送给测试仪，由信息交换板转至网络通信板。

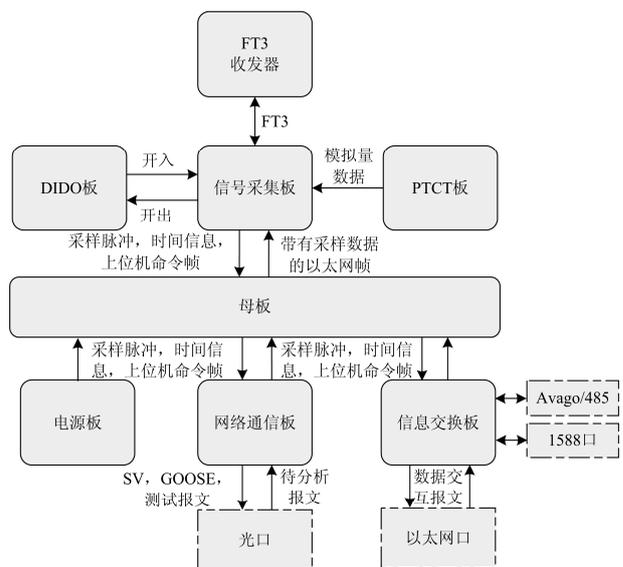


图 3 下位机硬件系统组成

Fig. 3 Structure of slave computer hardware system

信息交换板是测试仪所有数据交互的核心，负责测试仪内部各板卡数据的交换分发以及测试仪与上位软件的数据通信。另外，信息交换板是整个硬件系统的时钟源，接收外部 GPS 时钟的输入信息，解析后将时钟信息通过母板送往各分板。

4 性能及结论

智能变电站综合测试仪如图 4 和图 5 所示。与现有的测试仪相比，本文设计的测试仪是涵盖智能变电站过程层、间隔层、站控层的一体化多功能测试仪，一台设备即可满足站内设备的各种测试需求，提高了测试的便利性。本测试仪通过导入智能变电站全站 SCD 或单装置 CID 模型文件，自动生成相应设备的测试序列，用户无需设置复杂的测试参数，降低了用户使用的复杂度及难度，提高了测试效率。本测试仪的报文分析功能能够自动识别、智能过滤、

语义解析, 辅助用户对被测设备运行状态分析与评估, 已在智能变电领域进行推广使用, 效果显著。本测试仪不仅具有高精度的测试数据, 还具有较强的抗电磁干扰能力, 能够适应复杂的运行环境。另外, 本系统采用分层模块化设计, 可扩展能力强。



图 4 智能变电站综合测试仪导航图

Fig. 4 Navigation interface of the integrated tester for smart substation



(a) 前视图



(b) 后视图

图 5 智能变电站综合测试仪

Fig. 5 Integrated tester of smart substation

总之, 智能变电站综合测试仪功能全面, 技术先进, 运行可靠, 能够有效地降低建设成本, 减少设备故障检修时间, 提高测试效率。智能变电站综合测试仪的研究与应用对于我国智能变电站的建设和运行水平的提高具有重要意义。

参考文献

[1] 高翔. 智能变电站技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 1-14.
 [2] 崔厚坤, 汤效军, 梁志成, 等. IEC 61850 一致性测试研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 80-83, 88.

CUI Houkun, TANG Xiaojun, LIANG Zhicheng, et al. Study on IEC 61850 conformance testing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 80-83, 88.
 [3] 郑永康, 魏博洲, 张云华, 等. 一种闭环设计的 IEC 61850 一致性测试系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 117-120.
 ZHENG Yongkang, WEI Bozhou, ZHANG Yunhua, et al. A closed-loop conformance testing system of IEC 61850[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(9): 117-120.
 [4] 李大勇, 房亚因, 王洋, 等. 智能变电站网络压力性能测试研究[J]. 电子应用技术, 2015(增刊 1): 18-24.
 LI Dayong, FANG Yanan, WANG Yang, et al. Research on performance test of network pressure in intelligent substation[J]. Application of Electronic Technique, 2015(S1): 18-24.
 [5] 唐喜, 任雁铭, 孟岩. 基于 IEC 61850 的数字化变电站服务器端模拟系统及实现[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 46-49.
 TANG Xi, REN Yanming, MENG Yan. Digital substation server simulation system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 46-49.
 [6] 翟瑞聪, 谢善益, 范颖, 等. 基于 IEC 61850 的在线监测装置通信仿真系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 137-141.
 ZHAI Ruicong, XIE Shanyi, FAN Ying, et al. Development and application of the communication simulation system for the online monitoring device based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 137-141.
 [7] 变电站通信网络和系统第 10 部分: 一致性测试: IEC 61850-10[S]. 2012.
 Communication networks and systems for power utility automation – part 10: conformance testing: IEC 61850-10[S]. 2012.
 [8] 张燕涛, 黄伦, 王庆平, 等. IEC 61850 标准一致性测试的方案和现场应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 98-102.
 ZHANG Yantao, HUANG Lun, WANG Qingping, et al. Schema and application of IEC 61850 standard conformance test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 98-102.
 [9] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.
 MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J].

- Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.
- [10] 张小易, 彭志强. 智能变电站站控层测试技术研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 88-94.
ZHANG Xiaoyi, PENG Zhiqiang. Research and application on substation level test technology of smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 88-94.
- [11] 胡宝, 张文, 李先彬, 等. 智能变电站嵌入式平台测试系统设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 129-133.
HU Bao, ZHANG Wen, LI Xianbin, et al. Design and application of embedded platform test system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 129-133.
- [12] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [13] 纪陵, 李忠明, 蒋衍君, 等. 智能变电站二次系统仿真测试和集成调试新模式的探索与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 119-123.
JI Ling, LI Zhongming, JIANG Yanjun, et al. Exploration research of smart substation secondary system simulation testing and integration testing new mode[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 119-123.
- [14] 张小飞, 李佩娟, 王洁松, 等. 智能变电站网络应用及测试技术研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 31-38.
ZHANG Xiaofei, LI Peijuan, WANG Jiesong, et al. Study on smart substation network application and testing technology[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(4): 31-38.
- [15] 周成, 吴海, 胡国, 等. 基于 IEC 61850 第二版非侵入式自动测试系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 143-147.
ZHOU Cheng, WU Hai, HU Guo, et al. Non-intruding development of automatic test system based on IEC 61850 edition 2.0[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 143-147.
- [16] 耿治, 张建忠, 陈昊. 智能变电站保护装置自动测试系统分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 121-125.
GENG Zhi, ZHANG Jianzhong, CHEN Hao. Research and design of automatic test system for protection device in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 121-125.
- [17] 赵凤贤, 孟祥博, 周雷, 等. 基于变电站 SCD 文件的智能作业系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 92-96.
ZHAO Fengxian, MENG Xiangbo, ZHOU Lei, et al. Research of intelligent test system based on SCD file for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 92-96.
- [18] 杨慧霞, 余姿雨, 赵瑞辰, 等. 继电保护装置测试用例智能生成技术的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 124-129.
YANG Huixia, YU Ziyu, ZHAO Ruichen, et al. Research and implementation of intelligent generation technology for test case of relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 124-129.
- [19] 变电站通信网络和系统第 9-2 部分: 特定通信服务映射(SCSM)-基于 ISO/IEC 8802-3 的采样值: IEC 61850-9-2[S]. 2012.
Communication networks and systems for power utility automation – part 9-2: specific communication service mapping (SCSM) – sampled values over ISO/IEC 8802-3: IEC 61850-9-2[S]. 2012.
- [20] 李国杰, 张丹, 邓清闯, 等. 基于 IEC61850-9-2 LE 的子站一致性测试系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 115-118.
LI Guojie, ZHANG Dan, DENG Qingchuang, et al. Design and implement of conformance test system for sub-station based on IEC61850-9-2 LE[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 115-118.

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-01-04

作者简介:

李志勇(1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化设备技术标准与试验方法; E-mail: lzy2252@163.com

孙发恩(1983—), 男, 工程师, 主要研究方向为 IEC61850 标准及其在智能电网的应用; E-mail: sunfaen@ieslab.cn

瞿晓宏(1967—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、电力系统通信技术及相关测试系统及设备。E-mail: quxiaohong@ieslab.cn

(编辑 魏小丽)