

DOI: 10.7667/PSPC170776

继电保护装置测试用例智能生成技术的研究与实现

杨慧霞^{1,2}, 余姿雨³, 赵瑞辰³, 姚睿⁴

(1. 许昌开普电气研究院, 河南 许昌 461000; 2. 河南省继电保护及自动化重点实验室, 河南 许昌 461003;
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 4. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 目前变电站继电保护装置的测试环节仍停留在传统的方式上, 在整个测试过程中测试人员的个人经验和工作状态对测试结果有着较大影响。通过对继电保护装置测试用例的智能化自动生成技术的深入研究, 提出一种基于模块接口标准化的自动测试系统架构方法。采用开放式可扩展的结构的设计思路, 为不同种类的继电保护装置的测试提供保护基础模板库。应用案例分析表明, 该方法能够极大地提高测试模板的编辑效率, 同时克服现场测试效率低、过分依赖人工、测试数据格式不统一等问题。

关键词: 智能继电保护装置; 测试用例智能生成; 保护基础模板库; 智能变电站; 自动测试

Research and implementation of intelligent generation technology for test case of relay protection device

YANG Huixia^{1,2}, YU Ziyu³, ZHAO Ruichen³, YAO Rui⁴

(1. Xuchang Ketop Electric Research Institute, Xuchang 461000, China; 2. Henan Key Laboratory of Relay Protection and Automation, Xuchang 461003, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;
4. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: At present, the testing link of the substation relay protection device still keeps traditional way, where the personal experience and working status of the test personnel have a great influence on the testing results during the whole testing process. Through the study of the intelligent automatic generation technology of the test cases of the relay protection device, this paper puts forward a kind of automatic test system architecture based on standardized module interface, which adopts an open extensible structure design thought and can provide protection basic template library for the test of different kinds of relay protection device. Application case analysis show that the method can greatly improve the editing efficiency of test template, and at the same time overcome the problems such as low efficiency of field test, overdependence on manual operation, non-unified test data format, etc.

Key words: intelligent relay protection device; test case intelligent generation; protection basic template library; intelligent substation; automatic test

0 引言

近年来, 随着计算机技术、通信技术、信息技术的飞速发展, 智能继电保护装置得到了广泛的推广与应用, 智能变电站也从试点转向常规化应用^[1]。根据智能电网建设的整体部署, 智能变电站以 IEC 61850 标准为基础实现智能设备信息的数字化采集、网络化通信和标准化共享等功能, 这给不同厂家装置用同一套模板完成全部测试带来了可能^[2-3]。

同时, 随着超高压远距离输电以及大电网技术的出现, 整个电力系统对变电站继电保护装置的可靠性和高效性提出了更高的要求^[4-6]。

目前变电站继电保护装置的测试环节仍停留在传统的方式上, 在整个测试过程中测试人员的个人经验和工作状态对测试结果有着较大影响^[7-9]。另一方面, 现有的自动测试平台系统, 测试用例的编写需要大量的时间, 且测试用例的扩展性差, 需要维护的工作量大, 增加了测试人员的工作难度, 这给继电保护装置的测试工作带来了很大的影响, 增加了研发人员的工作量^[10]。

本文主要对继电保护装置测试用例的智能化

基金项目: 国家电网科技项目“继电保护设备与运行辅助决策技术研究”

自动生成技术进行了深入研究, 首先分析了 1161、1175、继电保护信息规范给不同厂家继电保护装置采用同一测试模板完成全部测试带来了可能, 进而提出一种自动测试系统架构方法, 该系统主要采用模块接口标准化的设计思路, 提出了专门针对站内继电保护装置的通用化、实用化的高效率闭环自动测试方案, 并采用开放式可扩展的结构, 为不同种类的继电保护装置的测试提供保护基础模板库。该智能化自动测试系统能够克服现场继电保护装置测试中测试工作效率低、过分依赖人工以及测试数据格式不统一的局限性, 达到提高测试工作效率、降低人工干预要求及规范数据格式的目的。

1 规范对自动测试的影响

为提高继电保护装置的标准化水平, 同时为继电保护的制造、设计、运行、管理和维护工作提供有利条件, Q/GDW 1161《线路保护及辅助装置标准化设计规范》与 Q/GDW 1175《变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范》规范了 220 kV 及以上电网的线路保护、变压器、高压并联电抗器、母线和母联(分段)保护及相关设备的输入输出量、压板设置、装置端子(虚端子)、通信接口类型与数量、报告和定值、技术原则、配置原则、组屏(柜)方案、端子排设计、二次回路设计; 继电保护信息规范规定了 220~750 kV 线路保护、变压器保护、母线保护、母联(分段)保护、断路器保护、高压并联电抗器保护等继电保护装置的信号触点、报文、人机界面以及日志记录等信息输出要求。

随着同一类型继电保护装置输入输出量、压板设置、装置端子、通信接口、技术原则、配置原则、信息描述的一致, 也统一了不同厂家对于同类型保护的测试要求、测试方法和技术要求; 同时, 规范也对装置的通用要求进行了统一, 这也推动了测试模块的判断条件的统一。以这为测试用例模块化和自动生成提供了条件, 给不同厂家装置用同一套模板完成全部测试带来了可能。

按照设计规范中的双重化原则, 继电保护装置的双重化以及与保护配合回路(包括通道)的双重化, 给现场测试增加了一倍重复测试的工作量, 再加上继电保护信息规范中, 对装置信息内容提出了要求, 进一步增加了新的测试项。在传统测试过程中, 测试人员的个人经验和工作状态对测试结果有很大的影响, 测试周期长, 效率很低^[16-17]。现场测试工作迫切需要规范易操作的自动测试用例系统来解决日益繁重的测试需求。

2 自动测试系统整体架构设计

继电保护装置的自动测试必须满足以下基本要求: 测试流程标准化、系统接口模块规范化、测试报告的标准化、测试闭环性与良好的可扩展性等^[18-19]。整体架构分为硬件结构设计与软件结构两部分。硬件结构体现了继电保护装置自动测试平台的整体布局, 实现了测试控制端与数字测试仪、数字式继电保护装置的有效隔离, 自动测试硬件接线图如图 1; 软件结构是实现继电保护装置自动测试的核心, 用于实现自动的闭环测试与测试用例的智能生成。

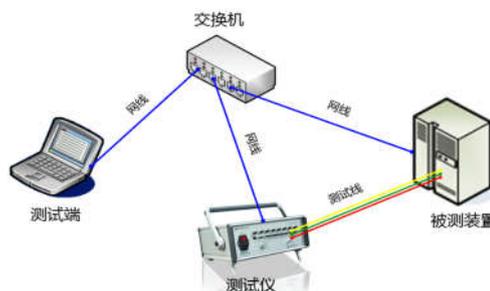


图 1 自动测试硬件接线图

Fig. 1 Wiring diagram of automatic test hardware

2.1 系统硬件结构

本自动测试系统硬件结构由测试主机、交换机、测试仪和继电保护装置组成, 结构图如图 2 所示, 在测试主机上安装自动测试系统软件平台, 测试主机与测试仪、继电保护装置经由交换机形成闭环测试的通信链路, 测试仪与继电保护装置之间通过光纤连接, 测试主机实现信息采集与各种测试命令与流程的控制。

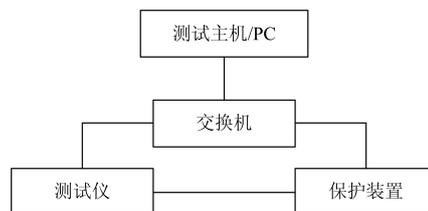


图 2 自动测试系统硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure of automatic test system

2.2 系统软件结构

在测试主机安装自动测试系统平台软件, 软件结构框架如图 3 所示。

继电保护装置自动测试系统平台软件划分为两层, 一层为测试方案开发层, 另一层为自动测试层。测试方案开发层包括保护基础模板库与测试模板智能生成模块; 自动测试层包括自动测试控制模块、测试仪控制模块以及 MMS 通信模块。测试模

板智能生成模块可以根据继电保护装置的 SCD 配置文件与设备数据模型进行快速编辑和智能生成, 输出继电保护装置测试用例。

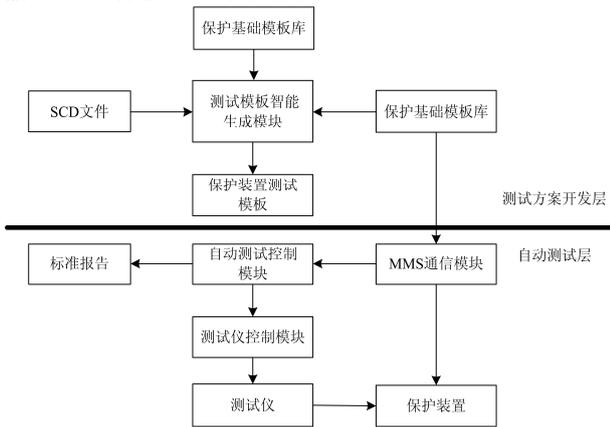


图 3 自动测试系统软件结构图

Fig. 3 Software structure of automatic test system

自动测试控制模块是整个软件系统的核心, 它通过网络控制整个自动测试系统的信息交换, 根据模板定义的测试流程完成各项功能的测试, 自动判断测试结果是否合格, 并将测试结果保存至标准的报告模块中。自动测试控制模块通过调用测试仪控制模块开放的外部访问接口函数实现连接测试仪、断开测试仪连接、开始测试、停止测试、修改测试仪配置、获取测试报告数据以及获取测试异常信息等功能。自动测试控制模块通过调用 MMS 通信模块开放的命令控制接口与数据访问接口实现与继电保护装置的通信, 命令控制接口包括继电保护装置定值参数的读取和修改、压板的投退操作、控制字的读取与修改以及保护测量值的读取; 数据访问接口包括继电保护装置的各种数据集数据和保护动作报告数据和告警报告数据等的读取访问。

现场运行的继电保护装置型号繁多, 即便是相同型号的装置在不同变电站的测试项目中也不尽相同。所以要实现继电保护装置的自动测试, 必须研究装置自动测试用例的智能生成方法。

3 装置测试用例智能生成技术与实现

继电保护装置智能生成方法的设计原理, 即根据变电站整站的 SCD 文件中对应的继电保护装置的 IED 信息以及从继电保护装置提取的设备数据模型, 生成装置测试用例。继电保护装置测试模板智能生成模块由 SCD 文件解析模块、保护模板智能生成模块、其他功能智能生成模块以及装置模板拼接模块组成。

设计智能生成模块, 需汇总分析继电保护装置

的保护类型, 将测试方法相同的基础测试功能抽象为测试基础模板, 测试基础模板库包含保护装置的基础测试项目集合和对应的标准报告格式; 根据保护装置的 SCD 文件, 提取对应保护装置 IED 信息, 根据分析结果智能生成对应功能测试模板, 最后通过拼接技术生成整套继电保护装置的测试总模板。

3.1 SCD 文件提取技术

SCD 文件解析模块通过解析 SCD 文件, 读取继电保护装置的 IED 信息, 保存测试所需的继电保护装置信息文件, 信息文件为 XML 格式; 信息文件主要用于测试仪的 IEC61850 配置, 映射测试仪接口的 SV 输出、GOOSE 订阅和 GOOSE 发布, 文件提取结构图如图 4 所示。

SVIN 记录继电保护装置的 SV 输入信息, 包括控制块的 MAC 地址、APPID、SVID 等信息以及控制块的通道详细信息(包括通道的外部通道路径、外部通道描述、内部通道路径、内部通道描述等)。

GOOSEIN 记录继电保护装置的 GOOSE 输入信息, 包括关联的 GOOSE 输出控制块的 MAC 地址、APPID、数据集名称、控制块索引、GOOSE 标识等, 以及 GOOSE 通道信息(包括通道的数据类型、外部通道路径、外部通道描述、内部通道路径、内部通道描述等)。

GOOSEOUT 记录继电保护装置的 GOOSE 输出信息, 包括控制块的 MAC 地址、APPID、数据集名称、控制块索引、GOOSE 标识等以及控制块的通道信息(包括数据类型、本数据类型的内部路径、内部描述等)。

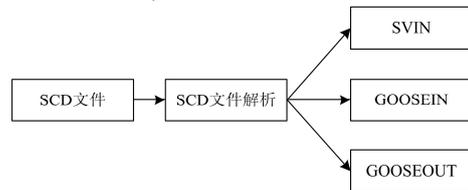


图 4 SCD 文件提取结构图

Fig. 4 SCD file extraction structure

3.2 保护模板智能生成技术

根据不同继电保护装置中的不同保护逻辑和不同测试项目, 保护基础模板库包含了过流保护、复压保护、差动保护、失灵保护、距离保护等多个测试基础模板, 流程图见图 5。单个测试基础模板实现了继电保护装置单类型保护相关测试功能的测试方法。以过流保护为例, 模板定义的测试流程和测试项目如下所述。

1) 保护模块的数据接口: 模块中用到的各测试

量的定义。

2) 测试前准备: 读取装置参数, 修改测试仪配置, 设置保护压板与控制字。

3) 功能测试: 根据测试模块定义的测试项目, 控制测试仪输出对应的测试量, 读取测试反馈量, 通过结果判断脚本进行结果判断。

4) 测试恢复: 恢复装置定值、压板与控制字到测试前状态。

智能生成算法及实现流程设计如下:

1) 智能分析继电保护装置配置文件的 SVIN、GOOSEIN、GOOSEOUT 数据定义和数据模型中对应的数据集, 根据分析结果建立两者的一一映射关系。

2) 智能分析继电保护装置数据模型中定值、压板、装置参数、动作信息, 根据分析结果与基础模板的数据接口建立映射关系。

3) 智能化的将映射关系与基础模板的数据接口进行匹配, 实例化生成继电保护装置保护功能测试模板。

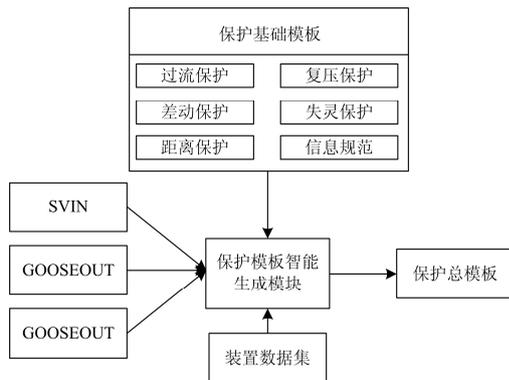


图 5 保护总模板生成流程图

Fig. 5 Generation flow chart of protection master template

3.3 模板智能拼接技术

整个装置模板的生成, 需要将各种保护模板、信息规范模板进行智能拼接。整个过程中将智能化的提取每个基础模块中的公共参数, 并对参数的描述和数据进行分析和进一步的处理。处理方式: 将参数相同的部分进行合并, 只保留一次; 将参数差异部分, 进行智能化的拼接整合。拼接完成后, 将所有测试项目按树形结构展开, 依次测试, 测试完成后自动生成整个装置所有项目的标准化设计报告。

4 应用案例分析

以 220 kV 变压器继电保护装置为例, 具体涉及差动保护、复压过流保护、阻抗保护、零序过流保护、间隙保护, 失灵保护及功能状态信息等测试基础模块。在制作总体的自动测试用例时, 通过勾选

220 kV 变压器继电保护装置所需的基础模块, 运用保护模板智能生成技术和智能拼接技术, 智能化的生成、合并和拼接各个基础模块, 可以大大减少总体测试用例中的重复结构和数据, 从而智能的生成总模板。

同时, 也可以根据继电保护装置程序的修改点, 在自动测试的总模板中只需要勾选部分项目, 运用保护模板智能生成技术和智能拼接技术, 智能化的选择测试项目, 从而大大提高工作效率, 增强使用自动测试模板的灵活性。

生成总模板如图 6 所示。

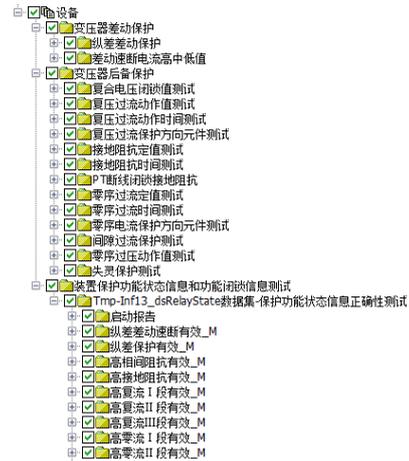


图 6 变压器保护自动测试总模板

Fig. 6 Master template of transformer protection automatic test

每个测试基础模板按照规范中要求的输入输出量、压板设置、报文等要求进行编写, 既满足保护测试与信息规范测试要求, 也提高了测试基础模板的通用性与可扩展性。保护基础模板与信息规范基础模板见图 7。

测试准备阶段, 需要根据电压等级及装置类型选择相关的标准, 确定测试方案。根据标准要求修改基础模板库中对测试结果脚本绝对误差、相对误差的判别要求, 一般除标准修订或特殊应用场合, 此处确认即可, 不需修改。在测试模板自动生成阶段, 导入整站 SCD 文件选取对应继电保护装置的信息文件, 通过装置模板智能生成模块自动生成整装置全项目测试总模板。

现场测试阶段, 只需搭好测试物理环境, 保证测试主机、测试仪及继电保护装置的链路通信正确完好, 然后点击“测试开始”, 便可以一键完成整套保护的现场测试。测试时, 根据现场实际情况填入装置型号、软件版本、校验码、装置唯一性编码等装置信息, 测试结束自动生成图 8 的测试报告, 通过查看测试结果判断测试是否合格。



图 7 保护基础模板与信息规范基础模板
Fig. 7 Protection basic template and information specification basic template

•220 kV变压器保护功能测试

•差动保护

•修改定值

名称	整定值
纵差保护启动电流定值	0.500
纵差保护速断电流定值	5.000

•A相比例制动

实验项目	差流理论值	实际动作值	相对误差	绝对误差	结论
A相启动值	0.500	0.506	0.012	0.006	合格
A相第1拐点	0.500	0.506	0.012	0.006	合格
A相第1折线点1	1.250	1.258	0.006	0.008	合格
A相第1折线点2	2.000	2.019	0.009	0.019	合格
A相第2拐点	2.750	2.767	0.006	0.017	合格
A相第2折线点1	3.500	3.522	0.006	0.022	合格
A相第2折线点2	4.250	4.330	0.019	0.080	合格

•220 kV变压器保护装置信息规范-功能状态信息和闭锁

•Tmp-Inf13_dsRelayState数据集-保护功能状态信息正确性测试

•纵差差动速断有效

序号	待测信息	实际报文检测			结论
		实际上送报文	多余报文	缺失报文	
1	有效状态检测	纵差保护有效 (1) 纵差差动速断有效 (1)			合格
2	退出保护功能压板	纵差保护有效 (1) 纵差差动速断有效 (1) 纵差保护有效 (0) 纵差差动速断有效 (0)			合格
3	无效状态检测	退出电流接收SV压板 纵差保护有效 (1) 纵差差动速断有效 (1) 闭锁主保护 (1) 纵差保护有效 (0) 纵差差动速断有效 (0)			合格
4	退出纵差差动控制字	纵差保护有效 (1) 纵差差动速断有效 (1) 纵差保护有效 (0) 纵差差动速断有效 (0)			合格

图 8 测试报告
Fig. 8 Test report

5 总结

本文针对智能变电站数字化继电保护装置的测试问题, 提出一套可自动生成测试用例的自动测试系统, 提出智能生成测试模板技术, 将重复、繁杂的测试模板编辑工作交给测试系统自动生成, 极大地提高了测试模板的编辑效率。同时克服了现场测试效率低、过分依赖人工、测试数据格式不统一的问题。自动测试系统势必会成为继电保护装置测试领域未来发展的趋势。

参考文献

[1] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135. WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhong'an, et al. Design of automated test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.

[2] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 91-96. ZHANG Xiaoli, LIU Huihai, LI Junqing, et al. Automatic test platform in smart substation for relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 91-96.

[3] 郑新才, 丁卫华, 韩潇, 等. 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): 70-76. ZHENG Caixin, DING Weihua, HAN Xiao, et al. Research and realization of autotest technology for protection relays based on test template[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 70-76.

[4] 应站煌, 胡建斌, 赵瑞东, 等. 继电保护装置自动测试系统研究和设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 142-146. YING Zhanhuang, HU Jianbin, ZHAO Ruidong, et al. Research and design of relay protection equipment automated test system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 142-146.

[5] 王治国, 李兴建, 王言国, 等. 基于统一建模的继电保护测试装置开发研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 180-184. WANG Zhiguo, LI Xingjian, WANG Yanguo, et al. Research on the development of relay protection tester based on unified building mode[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 180-184.

[6] 胡再超, 姚亮, 张尧. 智能继电保护装置的自动测试方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 53-55. HU Zaichao, YAO Liang, ZHANG Yao. Automatic testing

- method of intelligent relay protection device[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2013, 32(1): 53-55.
- [7] 董磊超, 刘昊昱, 浮明军, 等. 智能变电站间隔层设备自动测试系统研制[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 147-151.
DONG Leichao, LIU Haoyu, FU Mingjun, et al. Development of automatic test system for bay level equipment of smart substations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 147-151.
- [8] 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.
- [9] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强. IEC 61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现[J]. *电网技术*, 2006, 30(2): 80-86.
DOU Xiaobo, WU Zaijun, HU Minqiang. Information model and mapping implementation of merging unit based on IEC 61850[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(2): 80-86.
- [10] 李铁成, 郜向军, 郝晓光, 等. 数字化保护装置测试方法的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(3): 119-121.
LI Tiecheng, GAO Xiangjun, HAO Xiaoguang, et al. Research of the test method for digit protection device[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(3): 119-121.
- [11] 刘焕志, 胡剑锋, 李枫, 等. 变电站自动化仿真测试系统的设计和实现[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(9): 109-115.
LIU Huanzhi, HU Jianfeng, LI Feng, et al. Design and implementation of simulation test system for substation automation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(9): 109-115.
- [12] 宋丽群. 微机型保护测试装置与测试技术[J]. *南京工程学院报(自然科学版)*, 2006, 4(1): 33-38.
SONG Liqun. The microcomputer-based protection tester and testing technology[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 4(1): 33-38.
- [13] 于军, 熊小伏, 张媛. 数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]. *电网技术*, 2009, 33(4): 28-33.
YU Jun, XIONG Xiaofu, ZHANG Yuan. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(4): 28-33.
- [14] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. *电网技术*, 2006, 30(24): 73-77.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. System architecture of digitized substation[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(24): 73-77.
- [15] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. *电网技术*, 2006, 30(23): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(23): 67-71.
- [16] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2: 10pp.
DOI 10.1186/s41601-017-0047-z
- [17] 路光辉, 周钟, 雍明超, 等. 一种用于智能高压设备的分布式测试用例实现方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 111-117.
LU Guanghui, ZHOU Zhong, YONG Mingchao, et al. An implementation of system-level distributed test cases for smart high-voltage equipment system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 111-117.
- [18] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 53-59.
- [19] 贾晋峰, 易浩民, 夏向阳, 等. 分布式能源接入电力系统的新型计量系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 118-124.
JIA Jinfeng, YI Haomin, XIA Xiangyang, et al. Distributed energy power system access new metering system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 118-124.

收稿日期: 2017-05-23; 修回日期: 2017-08-01

作者简介:

杨慧霞(1977—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 从事继电保护与自动化设备行业的技术标准研究工作; E-mail: 13598953605@163.com

余姿雨(1988—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为继电保护装置与自动测试技术; E-mail: yuziyu@sgepri.sgcc.com.cn

赵瑞辰(1985—), 男, 工程硕士, 工程师, 研究方向为变压器继电保护技术研究和嵌入式设备研发。E-mail: zhaoruichen@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)