

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210643

继电保护装置检验测试智能体的研究与实现

彭桂喜¹, 袁思遥¹, 孙昊¹, 冯韵¹, 韩天轮¹, 滕捷², 陈前臣³

(1. 国网天津市电力公司, 天津 300450; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉市豪迈电力自动化技术有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着智能变电站技术的迅速发展, 针对继电保护装置的精确检验测试已成为必需的环节。然而, 面向大量的非就地化保护装置, 原有的检验测试模式往往缺乏灵活性与兼容性, 同时也无法实时、直观地向操作人员展示测试情况。为解决这一问题, 研究了一种继电保护检验测试智能体。该智能体具有基于 IEC61850 规约的多模块协同工作的系统架构, 有效提高了检验测试的效率及灵活性, 相应的检验测试系统软件确保了测试结果的可读性。给出了所提继电保护检验测试智能体的实现方案, 并展示了其在操作便利性上的优势。

关键词: 继电保护检验测试智能体; 系统架构; IEC61850; 测试效率; 测试灵活性; 操作便利性

Study and implementation of a test agent for relay protection devices

PENG Guixi¹, YUAN Siyao¹, SUN Hao¹, FENG Yun¹, HAN Tianlun¹, TENG Jie², CHEN Qianchen³

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300450, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Haomai Electric Power Automation CO., LTD., Wuhan 430074, China)

Abstract: Smart substation technology is rapidly developing and widely used, and the accurate test of relay protection devices is essential. However, for a large number of off-site relay protection devices, the current test mode often lacks flexibility and compatibility, and also cannot display intuitively the test situation to the operator in real time. To address this issue, this paper studies a relay test agent with a coordinated multi-module system architecture based on IEC61850. The agent improves the efficiency and flexibility of tests. Also the test system software ensures the readability of test results. The implementation of relay test agent is given and its advantage in convenience of operation is demonstrated.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229DK18002S).

Key words: relay test agent; system architecture; IEC61850; test efficiency; test flexibility; convenience of operation

0 引言

多年来, 智能变电站技术发展迅速并得到了广泛应用^[1-4], 其二次系统的设计方案在很大程度上改变了站内信息采集与共享模式。因而, 为适应该应用体系, 继电保护装置也不断完善与更新^[5-10]: 一方面, 一系列关于继电保护装置的产品标准(包括功能配置和性能要求、抗干扰水平、甚至外形尺寸等)被陆续推出; 另一方面, IEC61850 规约的应用使得站内二次设备的通信变得更为规范与高效^[11-12]。上述

发展对智能变电站的继电保护装置的检验测试系统提出了更高的要求。同时, 也为开发智能化的继电保护检验测试系统提供了良好机遇。

智能变电站的二次系统基于网络传输各类数字信号, 并采用了 IEC61850 规约, 所以, 站内的继电保护装置主要从 SV 报文获得电压电流信号的采样值, 从 GOOSE 报文获得开关量信息^[13]。常规测试模式往往需要人工操作配置通信及修改测试参数, 缺乏灵活性与兼容性。这一特点在客观上造成了现场测试过程繁琐、测试周期长等问题。例如, 对于线路保护装置和变压器保护装置的现场测试, 需要设计两套不同的测试方案, 不同厂家生产的保护装置的检验测试方案无法完全兼容等。因此, 对

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5229DK18002S); 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800)

于智能变电站内的大量保护装置, 往往需要多套检验测试系统, 大幅度地增加了检验测试的复杂程度、降低了检验测试的工作效率^[14-23]。近年来, 就地化保护装置得到了高度重视和广泛应用实践。有关就地化保护装置的自动化测试已经有厂家推出, 不仅具有较强的针对性, 而且使就地化保护装置的测试效率大为提高。借鉴就地化保护装置自动测试的做法, 针对大量的智能变电站遵循 IEC61850 规约的非就地化保护装置, 研究其智能化检验测试方法, 具有很高的应用价值。

基于上述背景, 本文研究了一种继电保护装置检验测试智能体。通过继电保护装置检验测试智能体的系统架构与关键技术的介绍, 阐明了所提智能体在提高检验测试效率、增强测试灵活性及测试结果可读性等方面的优势。本文还给出了所提继电保护装置检验测试智能体的实现方案, 展示了其操作的便利性。

1 系统架构

1.1 基于测试功能模块化的构建方法

所提出的基于测试功能构建的继电保护装置检验测试智能体(以下简称“智能体”)如图 1 中的红色虚线框内所示。

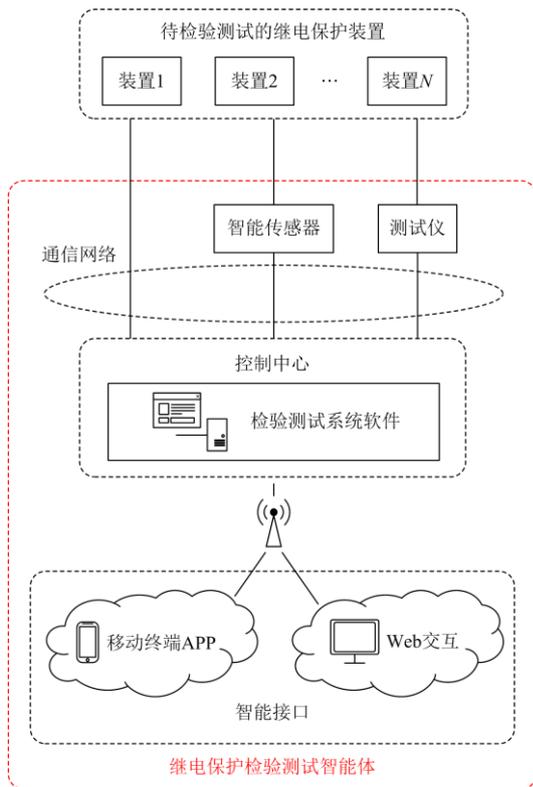


图 1 智能体系统架构

Fig. 1 System architecture of relay test agent

从图 1 可知, 所提智能体包含 5 个模块: 智能传感器模块、继电保护测试仪模块(以下简称“测试仪”)、检验测试系统软件模块、通信网络模块以及智能接口模块。连接继电保护装置(以下简称“装置”)后, 智能体可以通过检验测试系统软件模块自动识别待检验测试的继电保护装置的类型, 随后生成对应的测试模板, 进而计算出对应的试验数据。而智能传感器模块则获取检验过程中被测继电保护装置的运行数据, 并传送给检验测试系统软件记录和分析处理。在测试过程中, 各个模块之间使用 IEC61850 规约进行数据交换, 测试仪根据检验测试系统软件给出的试验数据与测试模板发送测试信号并捕获动作情况。测试结束后, 智能体将分析测试结果, 进而生成检验测试报告。此外, 智能体的智能接口模块提供了移动终端 APP 以及 Web 交互单元。通过智能接口模块, 操作人员可以更直观、更便捷且不受地点限制地实现对检验测试的灵活配置, 还可以随时掌握检验测试的结果。因此, 智能体各模块的协同工作, 有效提高了继电保护装置检验测试的效率以及操作的灵活性。

1.2 基于测试流程同步的构建方法

智能体还可以基于测试流程同步构建, 如图 2 所示。参与测试流程的三个主要单元分别为运行检验测试系统软件的上位机 PC、测试仪以及被测试的继电保护装置。

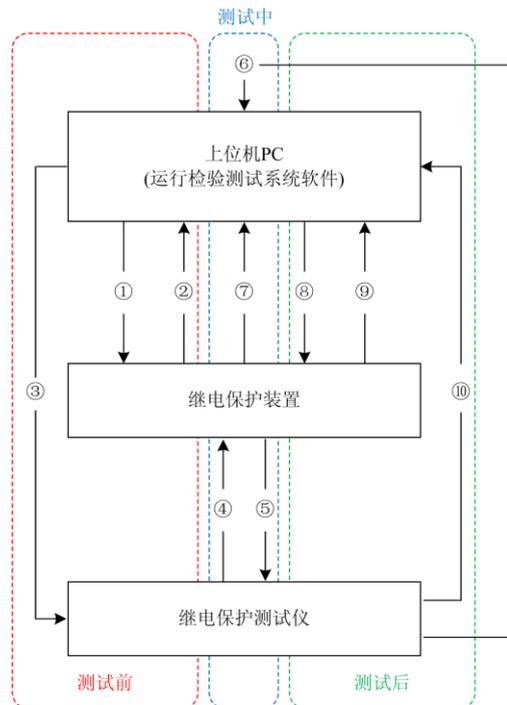


图 2 智能体测试流程

Fig. 2 Test flow chart of relay test agent

图 2 中，参与测试流程的三个单元之间的数据交换也是基于 IEC61850 规约的。上述三个单元间可以按照规约规定的通信模式建立连接，获取装置内部信息，并对其进行控制操作。其中，测试仪与被测继电保护装置通过 SV、GOOSE 报文通信；上位机 PC 则通过 MMS 报文与被测继电保护装置通信。在整个测试过程中，上述三个单元按照图 2 中 ①—⑩步骤的流程在测试前、测试中和测试后三个阶段进行操作。各步骤简述如下：

① 测试前，上位机 PC 建立与被测继电保护装置的连接。此时，获取被测继电保护装置的信息模型以及基本信息(例如，装置型号、生产厂家、软件版本号、所保护的线路、全部保护类型以及元件编号等)的请求由上位机 PC 发送给被测继电保护装置。

② 上位机 PC 接收并分析被测继电保护装置返回的基本信息数据集，调用各段保护的定值清单及对应的测试模板，生成测试方案，随后计算得到试验数据。

③ 上位机 PC 发送 SV、GOOSE 报文至继电保护测试仪。

④ 开始测试，测试仪向被测继电保护装置实时发送 SV、GOOSE 报文。

⑤ 测试中，测试仪在进行步骤④的同时，接收并解析由被测继电保护装置传回的 GOOSE 报文。

⑥ 当被测继电保护装置发出动作信号后，测试仪进行后期处理计算，并将测试结果发送给上位机 PC。

⑦ 被测继电保护装置将步骤⑥中的动作记录报告发送至上位机 PC；上位机 PC 比对来自被测继电保护装置的报告与步骤⑥中来自测试仪的报告，以此校验测试过程，并将比对结果记录到测试报告中。

⑧ 测试后，上位机 PC 校验测试有效后，复位被测继电保护装置。需要说明的是，即便是同一类型的被测继电保护装置，由于运行方式不同，存在多组定值以及多种保护配置方式，需要切换定值组或更改保护配置方式才能进行下一台继电保护装置测试。

⑨ 完成步骤⑧操作后，被测继电保护装置返回复位成功的消息。

⑩ 上位机 PC 发送指令安排测试仪准备进行下一次测试。

2 关键技术

在所提智能体中，检验测试系统软件扮演着关键角色，起控制中枢的作用。检验测试系统软件的

主要功能包含识别被测继电保护装置、整定测试模板、控制测试过程以及数据处理等。测试人员通过用户接口界面(Web 网页、移动终端 APP 等)操作检验测试系统软件时，可根据识别出的被测继电保护装置的型号，给检验测试系统软件下达自动设计检验测试方案的指令。后者则根据指令自动设计检验测试方案。

2.1 检验测试方案的自动设计与运行

为提高测试效率，检验测试系统软件基于测试模板自动设计检验测试方案，并自动运行。检验测试方案自动设计和运行过程如图 3 所示，主要步骤简述如下。

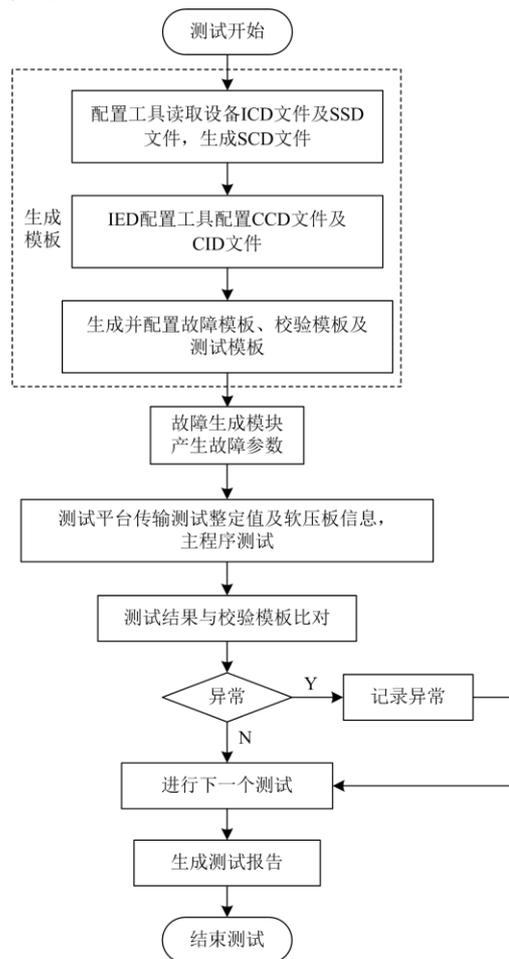


图 3 检验测试方案的自动设计与运行过程

Fig. 3 Automatic design and operation process of test program

1) 检验测试系统软件的配置工具读取，并解析被测继电保护装置的 ICD 文件与 SSD 文件用以配置 SCD 文件。根据需求功能，配置工具在装置功能模型类库中选取对应的类文件中所需的功能函数，再由系统的配置类文件生成内容所需的故障、校验以及测试的模板。

2) 根据测试模板的列表内容, 确定故障类型并生成故障模板, 调用故障生成模块生成对应故障类型的故障参数并配置故障模板。

3) 生成校验模板并从校验数据库提取相应数据, 将其加载至校验模板, 形成此次测试的参考。

以上测试、故障及校验三种模板共同决定了针对被测继电保护装置的测试方案。

4) 依据以上生成方案的测试项目, 检验测试系统软件, 将测试参数、整定值以及软压板信息发送至测试仪。

5) 最后, 检验测试系统软件将在上述步骤中接收到的测试数据与校验模板比对, 进而判断测试过程中是否产生异常, 最终生成此次测试报告。

2.2 测试模板与测试报告的自动生成

生成测试模板的核心是功能模型库。功能模型库由继电保护装置的各种保护原理抽象形成的类文件构成。类文件中包含功能函数成员及数据成员。其中: 功能函数成员用于描述装置, 实现软压板的投退、整定值修改等功能; 数据成员则描述测试属性, 用于实例化。因为类文件可以抽象一类保护功能, 所以, 通过对类文件的引用, 可以形成类的对象, 抽象出具体被测继电保护装置的模型。随后, SCD 文件中不同继电保护装置的参数配置被提取并用于配置由 ICD 文件确定的类文件, 形成对应的测试模板。需要指出的是, 类文件可以重复使用, 并且可以进一步开发所需的功能, 使得测试模板的生成具有良好的灵活性与可扩展性。

此外, 检验测试系统软件有效提升了测试结果的可读性。而生成的测试报告包含三个部分: 1) 测试项目种类; 2) 故障类别及参数; 3) 校验项目及校验结果。以上三个部分均有对应的模板, 由检验测试系统软件形成最终的测试报告。

3 实现方案

图 4 给出了所提智能体的实现方案。检验测试系统软件使用设备数据模型, 调用测试子模板库以及测试功能标准数据接口库, 智能生成测试方案。随后, 检验测试系统软件将测试方案与测试模板及报告模板相匹配, 生成测试流程及测试数据; 同时, 测试方案也可以通过智能接口模块进行显示, 以便于人工调整。对应的被测继电保护装置的测试方案加载至自动测试模块后, 生成的测试数据按照测试流程发送给测试仪, 由测试仪对被测继电保护装置施加测试信号。在整个自动测试过程中, 测试命令由测试仪执行。测试仪向被测继电保护装置发出相应指令的同时, 采集相应的测试数据并通过自动

测试模块传送给检验测试系统软件。测试仪与被测继电保护装置之间的通信遵循 IEC61850 标准规约。检验测试系统软件会自动生成 XML 和 WORD/EXCEL 测试报告以及系统测试记录。测试人员也可以通过移动终端 APP 及 Web 网页读取生成的测试报告。

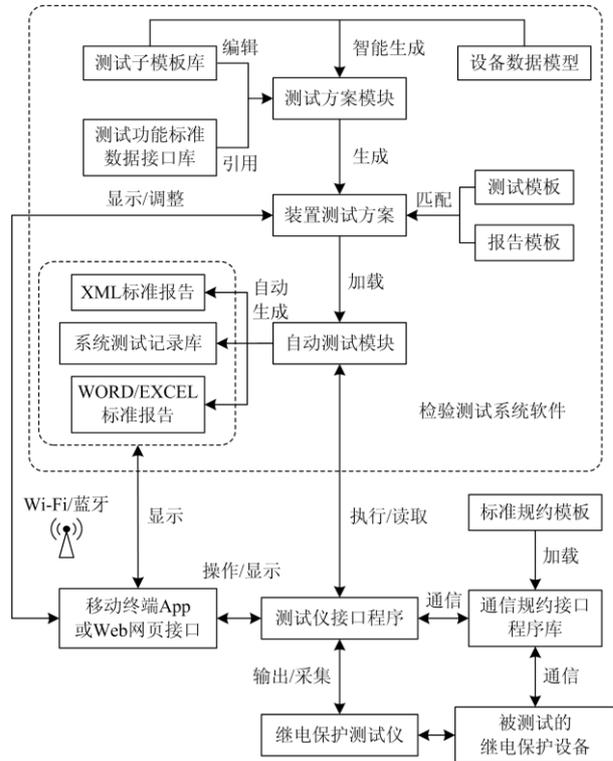


图 4 智能体实现方案

Fig. 4 Implementation of relay test agent

在智能体实现方案中, 由 Web 网页模块与移动终端 APP 组成的智能接口通过 Wi-Fi 或蓝牙连接至检验测试系统软件及测试仪接口程序。Web 网页模块与移动终端 APP 在实际工程中的应用界面如图 5、图 6 所示。Web 网页模块主要是进行测试方案的配置。通过 Web 网页, 测试人员可以读取生成的 XML 格式的方案配置文件, 并将其发送至移动终端 APP。测试人员读取测试方案后还可以通过 Web 网页界面根据保护厂家的保护装置做测试方案配置, 即: 依赖已有的测试模板进行编写和修改, 或针对每个测试项目做方案参数的修改和预置, 包括每个测试项目的软压板投退以及控制字的赋值, 为开展测试做好运行环境准备。移动终端 APP 接收到方案配置后, 启动时加载方案配置, 并在界面显示。同时, 测试仪也可以通过其蓝牙接口接收移动终端发送的方案配置。在测试时, 移动终端 APP 与测试仪界面也会实时显示测试数据, 以便根据导入的方案

可视化图形信息核对导入信息是否正确。此外，智能体还支持通过可视化图形界面进行参数修正和调整。



图 5 Web 网页模块实际界面

Fig. 5 User interface of Web page module



图 6 移动终端 APP 实际界面

Fig. 6 User interface of mobile terminal APP

相比已有的智能变电站继电保护测试系统，如文献[14-19]中所研究的自动测试系统主要针对就地化继电保护装置，而本文所实现的继电保护检验测试智能体则面向非就地化继电保护装置的智能化测试。所提智能体加入了 Web 网页模块与移动终端 APP 的智能接口模块，不仅提高了检验测试的可视化程度，更重要的是，为测试人员在变电站内任意位置根据实际的需求灵活地对测试做出调整操作提供了极大的便利。

4 结论

所提出的继电保护检验测试智能体，可以基于测试功能模块化构建，也可以基于自动测试流程的同步机制构建，包含智能传感器模块、继电保护测试仪、检验测试系统软件模块、通信网络模块以及智能接口模块。本文通过系统架构和检验测试流程分析，阐明了所提智能体在 IEC61850 规约下的协同运行机制以及有效提高智能变电站继电保护装置检验测试效率与灵活性的技术方法。所提智能体的检验测试方案自动设计与运行的功能给继电保护装置的检验测试带来很大便利。随着继电保护装置智

能检验测试技术的进一步发展，类似的功能将会得到不断拓展和推广应用。

参考文献

[1] 樊陈, 倪益民, 申洪, 等. 中欧智能变电站发展的对比分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 1-7.
FAN Chen, NI Yimin, SHEN Hong, et al. Comparative analysis on development of smart substations in China and Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 1-7.

[2] 唐卫华, 杨俊武, 欧阳帆. 新一代智能变电站技术综述[J]. 湖南电力, 2015, 35(5): 1-6.
TANG Weihua, YANG Junwu, OUYANG Fan. Review of new generation smart substation technology[J]. Hunan Electric Power, 2015, 35(5): 1-6.

[3] 李金, 张喜铭, 胡荣, 等. 变电站软件版本安全管控与溯源[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 206-213.
LI Jin, ZHANG Ximing, HU Rong, et al. Substation software version safety management and traceability[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 206-213.

[4] 李福阳, 李俊娥, 刘林彬, 等. 智能变电站嵌入式终端安全测试方法研究[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 126-136.
LI Fuyang, LI Jun'e, LIU Linbin, et al. Research on security testing technologies for embedded terminals in intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 126-136.

[5] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站继电保护在线巡检方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 58-65.
LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Research on online operation method for protective relay of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 58-65.

[6] 周文越, 李霞, 刘明忠, 等. 就地化保护检验机制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 162-167.
ZHOU Wenyue, LI Xia, LIU Mingzhong, et al. Research on outdoor installation protection inspection mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 162-167.

[7] 宋爽, 乔星金, 卜强生, 等. 智能变电站就地化继电保护技术方案研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 83-88.
SONG Shuang, QIAO Xingjin, BU Qiangsheng, et al. Research on technical scheme of outdoor-layout relay protection in smart substation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 83-88.

[8] 索江镭, 刘琨, 袁亮荣. 继电保护静态模拟并行测试系统构建[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 46-55.
SUO Jianglei, LIU Kun, YUAN Liangrong. Construction of parallel test system for relay protection static simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 46-55.

- [9] 刘琨, 黄明辉, 李一泉, 等. 智能变电站故障信息模型与继电保护在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 210-216.
LIU Kun, HUANG Minghui, LI Yiquan, et al. Fault information model and online monitoring method for relay protection system in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 210-216.
- [10] 张焕青, 雷鸣, 严利雄, 等. 面向智能变电站继电保护可靠性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 57-62.
ZHANG Huanqing, LEI Ming, YAN Lixiong, et al. Research on reliability evaluation method of relay protection for smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 57-62.
- [11] 陈德辉, 须雷, 赵希才, 等. 智能变电站自动化与保护核心 IEC 标准的进展与分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 229-239.
CHEN Dehui, XU Lei, ZHAO Xicai, et al. Development and analysis of core IEC standards for smart substation automation and relay protection[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2019, 43(21): 229-239.
- [12] 郑永康, 魏博渊, 张云华, 等. 一种闭环设计的 IEC61850 一致性测试系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 117-121.
ZHENG Yongkang, WEI Boyuan, ZHANG Yunhua, et al. A closed-loop conformance testing system of IEC61850[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(9): 117-121.
- [13] 刘大伟, 宋爽, 马泉. 基于云策略和 MMS 协议的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 159-164.
LIU Dawei, SONG Shuang, MA Quan. Automatic test system of relay protection device for intelligent substation based on cloud strategy and MMS protocol[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 159-164.
- [14] 茹东武, 李天泽, 侯俊飞, 等. 智能变电站测试系统研究与应用[J]. 电工技术, 2016, 7: 19-21.
RU Dongwu, LI Tianze, HOU Junfei, et al. Research and application of test system in smart substation[J]. Electric Engineering, 2016, 7: 19-21.
- [15] 高磊, 张鹏, 陈久林, 等. 智能变电站一体化集成测试平台设计[J]. 电力建设, 2013, 34(6): 31-35.
GAO Lei, ZHANG Peng, CHEN Jiulin, et al. Design of integrated testing platform of smart substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(6): 31-35.
- [16] 李志勇, 孙发恩, 瞿晓宏. 智能变电站综合测试仪的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 149-154.
LI Zhiyong, SUN Fa'en, QU Xiaohong. Research and implementation of integrated tester for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 149-154.
- [17] 王德文, 葛亮. 变电站在线监测智能电子设备的自动化测试[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 84-89.
WANG Dewen, GE Liang. Automated testing of substation on-line monitoring intelligent electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 84-89.
- [18] 刘鹏, 李兴建, 李忠安. 合并单元自动化测试方案设计与实现[J]. 智能电网, 2017, 5(3): 305-308.
LIU Peng, LI Xingjian, LI Zhong'an. Design and implementation of automatic test system for merging unit[J]. Smart Grid, 2017, 5(3): 305-308.
- [19] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛, 等. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.
CHEN Feijian, LÜ Yuanshuang, FAN Guosheng, et al. Automatic test system of relay protection device for smart substation based on information fusion technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- [20] 王治国, 于哲, 笃峻, 等. 基于测试数据深度解耦共享的继电保护测试系统研究[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 100-106.
WANG Zhiguo, YU Zhe, DU Jun, et al. Study on relay protection test system based on deep decoupling and sharing of test data[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 100-106.
- [21] 雷明, 陈一惊, 刘峰, 等. D5000 继电保护设备在线监视及分析应用提升[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1197-1202.
LEI Ming, CHEN Yicong, LIU Feng, et al. Online monitoring and analysis system based on D5000 for relay protections[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1197-1202.
- [22] 林道鸿, 吴强, 邵雷, 等. 基于改进编辑距离算法的保护装置测试模板开发[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 36-43.
LIN Daohong, WU Qiang, SHAO Lei, et al. Test template development for relay protection device based on improved Levenshtein distance algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 36-43.
- [23] 洪嘉炜, 杨剑友, 奚洪磊, 等. 基于移动互联网的变电站故障录波及报文分析装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 157-163.
HONG Jiawei, YANG Jianyou, XI Honglei, et al. Research on fault recording and message analysis device based on mobile internet[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 157-163.

收稿日期: 2021-05-30; 修回日期: 2021-07-03

作者简介:

彭桂喜(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: 103236135@qq.com

滕捷(1992—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: tengjie_@hust.edu.cn

(编辑 张爱琴)