

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210523

# 用于变电站就地化保护闭环测试和设备管理的智能化平台

刘海涛<sup>1</sup>, 牛健<sup>1</sup>, 陈涛<sup>2</sup>, 赫嘉楠<sup>1</sup>, 侯珏<sup>3</sup>, 石旭刚<sup>4</sup>, 罗双林<sup>4</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750002; 2. 国网宁夏电力有限公司石嘴山供电公司, 宁夏 石嘴山 753000; 3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074; 4. 豪迈电力自动化技术有限责任公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对变电站就地化保护装置的工作方式和运维模式, 提出一种新的闭环测试和设备管理智能化平台。所提智能化平台有效地避免了传统闭环测试模式的繁琐流程, 解决了就地化保护装置的设备管理难题。智能化平台包含三项关键技术: 信息获取与展示方法、就地化元件保护子机间的环网通信规范和自动测试流程的智能化实现技术。所提智能化平台已经在宁夏石嘴山供电公司长期使用, 运行稳定可靠、效果显著。应用结果表明, 所提平台保证了就地化保护装置闭环测试的质量, 大大减轻了运维人员工作负荷, 有效降低了运维成本。

**关键词:** 就地化保护装置; 闭环测试; 设备管理; 智能化平台; 环网通信规范; 自动化测试流程

## An intelligent platform for closed loop test and equipment management of on-site protection devices in a substation

LIU Haitao<sup>1</sup>, NIU Jian<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, HE Jianan<sup>1</sup>, HOU Jue<sup>3</sup>, SHI Xugang<sup>4</sup>, LUO Shuanglin<sup>4</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750002, China; 2. Shizuishan Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Shizuishan 753000, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Haomai Electric Power Automation Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Considering the operational condition and maintenance mode of an on-site protection device in a substation, a novel closed-loop test and equipment management intelligent platform is proposed. The proposed intelligent platform effectively avoids the tedious process of the traditional closed-loop test mode, and solves the equipment management problem of the on-site protection device. The platform includes three key aspects: an information acquisition and display method, a ring network communication criterion among on-site protection sub systems, and an intelligent implementation technology of an automatic test process. The proposed intelligent platform has been used in Ningxia Shizuishan Power Supply Company for a long time, with stable and reliable operation and remarkable effect. The application results show that the proposed platform ensures the quality of the closed-loop test of the on-site protection device, greatly reduces the workload of the operation and maintenance personnel, and effectively reduces the operational and maintenance cost.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229DK18002S) and National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

**Key words:** on-site protection device; closed loop test; equipment management; intelligent platform; ring network communication criterion; automatic test process

## 0 引言

在智能变电站中, 一次设备的智能化使得其自

身实现了部分二次设备的功能, 能够替代常规的一次设备。进而, 一次设备的信号传输种类由模拟信号变为了光数字信号, 同时节省了大量信号电缆, 信息交互能力得以提升, 具备明显的智能化价值<sup>[1-5]</sup>。然而, 智能变电站中装配有大量的中间环节, 譬如, 智能终端以及合并单元。此外, 中间环节与装置间

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)

采用网络通信模式, 延长了保护动作时间。同时, 由于中间环节设备普遍装配于户外的汇控柜中, 且就地设置在智能终端附近, 电磁信号干扰较为严重, 运行条件较为复杂, 从而导致其稳定运行效果不尽如人意。综上所述, 智能变电站传统保护方案的速动性和可靠性需要进一步提升<sup>[6-8]</sup>。

针对上述现状, 就地化保护技术应运而生。就地化保护技术应用于智能变电站的继电保护系统, 具有分布式装配、就地化安装的特点。就地化保护装置装配于受保护设备附近的户外箱、汇控柜或预制的设备舱内, 从而将一次设备的布局方案与继电保护装置的安装方式有机结合起来, 实现了单个单元的就地保护<sup>[9-11]</sup>。采用就地化保护装置, 不仅能减少安装调试工期, 加快变电站投产速度, 还能进一步提高智能变电站继电保护的可靠性<sup>[12-14]</sup>。此外, 就地化保护装置的体积较小, 与传统保护相比可靠性、防护性均显著提升。其贴近一次设备的就地化布局方案、就地采样、直接跳闸等设计有效缩减了智能终端的数量, 对于提高智能变电站继电保护装置的灵敏性和选择性具有重要意义<sup>[10-12]</sup>。

在 2018 年, 宁夏电网先后实施了 220 kV 芦花变、110 kV 通义变就地化保护试点工程, 同时开展了针对母线、变压器、线路等智能变电站一次设备就地化保护的试运行及运维工作。然而, 大量的就地化保护装置在智能变电站的试点应用, 衍生出来了一些问题和困难, 主要包含以下几个方面: (1) 智能变电站中, 就地化保护装置涉及到的设备类别、数量逐渐增加, 导致就地化保护的运维工作量显著增多, 运维工作中针对保护装置的测试工作愈发繁琐, 需要花费更多的人力物力予以支持; (2) 就地化保护装置的模拟量和跳闸出口信号采用了预制电缆的方式实现输入或输出, 然而, 诸如闭锁信号(命令)、跳闸信号(命令), 又以 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) 报文通过保护专网以网络信号的形式传输, 两种信号传输方式同时应用, 使得就地化保护的测试、维护工作比传统的继电保护更加复杂, 涉及到的测试步骤亦大相径庭; (3) 分布式环网冗余技术在就地化保护系统中的大量应用, 虽然保证了通信的及时恢复, 但却导致通信模式、通信协议以及保护功能设置与传统的树状网络产生显著区别。此外, 由于恶劣的工作环境, 就地化保护装置没有配备人机接口界面, 无法采用装置虚拟发送的功能进行对点工作, 现场的通信对点调试工作难以实现, 为运维工作带来了不少困难<sup>[15-17]</sup>。

因此, 针对就地化保护装置, 开展闭环测试系统的研究具有显著的应用价值。如今, 全国多个省

级电网已经进行了应用于就地化保护装置的闭环测试系统或平台的相关研究, 并开展了试点应用和示范工程。2016 年, 110 kV 及以上就地化线路保护、变压器保护、母线保护样机及对应的管理设备单元已通过中国电科院的检测, 相关样机系统已经先后在黑龙江漠河、浙江舟山、新疆吐鲁番等地区挂网运行。2017 年, 银川 110 kV 桃园变成功应用了宁夏首套站域保护。2018 年, 宁夏电网在 220 kV 芦花变和 110 kV 通义变开展就地化保护试点并按照试点应用要求组织开展定期巡检和状态记录<sup>[18-21]</sup>。然而, 受限于高昂的投资成本和人力成本, 且运维复杂, 一般很难在各生产单位开展就地化保护的动模仿真测试。而“继电保护测试仪+转换接口”方式的测试系统虽然能够开展就地化保护的输入输出数据模拟, 但无法开展就地化保护最为核心的智能管理单元的检测, 且检测思维还停留在传统继电保护设备阶段, 无法适应就地化保护不同的工作模式和相应的运维方式带来的挑战<sup>[22-24]</sup>。

综上所述, 为了满足就地化保护装置对高可靠性、实施便捷性、成本低廉性的闭环测试系统的巨大需求, 本文提出了一种新的用于变电站就地化保护装置闭环测试和设备管理的智能化平台。所提平台有效地避免了传统闭环测试模式的繁琐流程, 并解决了就地化保护装置的设备管理难题。

## 1 就地化保护智能化平台的关键技术研究

本文基于就地化保护装置测试平台的应用现状, 结合闭环测试和设备管理智能化平台的设计需求, 具体展开了三个方面的关键技术研究。

### 1.1 信息获取与展示方法

一方面, 传统测试仪器需要通过保护专用网络接口实现参数整定值下达装载及待测装置的状态查询与设备管理, 并未装配有三网合一网络模块, 只能依托于专用网口获取保护装置的大量状态量信息, 便捷性有待提高。另一方面, 传统的就地化保护装置是一个内特性不明确的“黑盒”系统, 在缺乏人机交互界面 MMI (Man Machine Interface) 的辅助下, 运维及检修人员无法直观地确定保护装置当前的状态并查明故障原因, 导致保护装置的测试效率受限。因此, 所研究的智能化平台, 需要分别解决信息获取和信息展示两种难题, 既能够实时、高效地获取保护装置的状态量信息, 又可以给运维检修人员提供人机交互界面以查看保护装置的状态信息。

本文提出的智能化平台装配有三网合一的网络模块, 具备高效获取保护信息的能力。通过其配套的人机交互界面, 运维人员能够方便地实时查看

保护设备的定值参数设置、硬/软压板状态、动作报文日志等信息。智能化平台采用报文虚拟发送功能进行对点测试, 极大地提高了现场的点对点调试工作便捷性。

### 1.2 就地化元件保护子机间的环网通信规范

应用于智能变电站内的就地化保护装置种类繁多, 往往由不同的厂家提供, 且不同用途的保护装置在组成上有较大差别。即使从智能变电站的众多设备中选取典型对象开展测试, 对于就地化保护管理单元来说, 与多种保护装置通信仍然是其功能实现的必要前提。然而, 由于不同厂家的保护装置采用的通信规约并非完全一致, 使其成为智能化平台的研制必须要解决的问题之一。

本文提出的就地化保护智能化平台采用统一的就地化元件保护子机间的环网通信规范, 基于 IEC61850 国际标准通信规约, 与过程层环形通信网络实现各就地化元件保护装置的通信, 将不同继电保护设备与智能化平台的通信效率显著提高。

### 1.3 自动测试流程的智能化实现技术

就地化继电保护装置相较于传统的继保设备, 接口形式和信号传输模式采用不同的设计方案, 传统的检测方法、试验方案以及调试设备已经无法应用在就地化继保装置上。目前, 就地化保护装置的检测内容、检测流程及检测模式主要还是基于工厂化的测试体系。即就地化保护装置的调试均在出厂前进行, 且当装置出现故障需要检修时, 大多采取整机替换的传统模式。

本文所研究的地处化保护智能化平台实现了便捷化装配及本地化测试, 集成了一种便捷的一键测试技术。其自动连接、自动配置、自动测试的功能真正实现了“就地测试”方案, 就地化保护装置闭环测试的实施便捷性与操作灵活性得以大幅提高。

## 2 就地化保护智能化平台的功能实现

本文从就地化保护的闭环测试需求出发, 先后从整体架构设计、具体功能实现提出了一种新型的就地化保护智能化平台。进而, 详细介绍了所研究的智能化平台采用的统一规范的信息交互模式。下文首先介绍智能化平台的总体结构, 再介绍其功能的实现技术。

### 2.1 智能化平台的总体结构

图 1 给出了就地化保护智能化平台的连接结构图。由图 1 可知, 其就地化智能管理单元、站控层网络以及就地化保护设备构成。其中, 智能管理单元配置了三网合一的网络通信模块, 能够实现就地化保护装置的自主化信息采集及测试指令下达。此



图 1 智能化平台的连接结构

Fig. 1 Connection structure of the intelligent testing platform

外, 智能管理单元还配置人机接口, 能够全景实时展示保护装置的告警信息、定值参数、动作日志、硬压板状态、软压板状态等状态量信息及参数。通过人机接口, 运维检修人员可以进行保护装置的定值整定和软压板投退等操作, 实现整个智能变电站保护装置的统一协调管控。基于站控层网络, 智能管理单元与就地化保护设备进行数据通信及信息交互。

在就地化保护闭环测试中, 基于统一的就地化元件保护子机间的环网通信规范, 智能化平台通过固定接口和通信规范与链路中各保护建立信息交互, 检验保护的正常输出。智能管理单元作为就地保护设备的上位机, 发出参数整定信号等设定、测试信号, 并实时接收保护装置上传的状态量数据, 通过人机接口界面输出。在进行测试时, 无论是采用单台调试还是多台联调的方案, 就地化保护装置与智能管理单元之间, 从信息链路的角度讲, 整个测试系统是维持闭环状态的, 如图 2 所示。

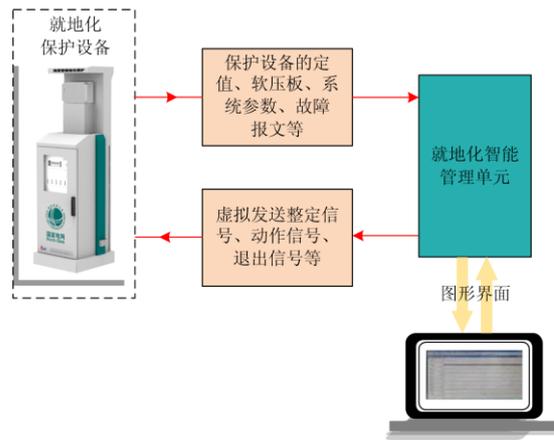


图 2 就地化保护闭环测试的信息闭环原理

Fig. 2 Information closed-loop principle of closed loop test of on-side protection devices

### 2.2 就地化保护智能化平台的功能设计

智能变电站采用面向对象的建模技术和高层抽象映射到低层的制造报文规范 MMS(Manufacturing Message Specification)技术, 旨在为智能变电站的多种智能设备提供统一的报文规范。目前, DL/T 860

通信规范得到广泛采用，通信链路中的设备通过接收和解析 MMS 报文完成相应的功能。MMS 报文包括客户端和服务端端的初始化连接、报告相关、定值相关、控制相关和录波相关等，通过 IEC61850 标准规范的 MMS 报文格式可以对保护装置模型进行读写控制，实现在线查看各个保护设备的定值、软压板、系统参数以及故障报文等信息。

本文所研究的智能化平台，基于同样的 MMS 统一报文规范，并且集成了多重功能，基本上实现了针对就地化保护装置的全功能覆盖。其主要功能如图 3 所示，分别为：(1) 能够分别模拟智能管理单元和就地化保护装置，从而实现两者之间的通信；(2) 具备在线监控及实时诊断功能，并能有效查询定值信息，检测装置故障状态并予以记录管理；(3) 具备对全站系统配置文件进行有效读取和解析，能对站内各就地化保护装置的状态信息来源进行剖析、对数据进行过滤及分类等相关处理；(4) 具备与差异化厂家产品之间使用相同的通信协议，设备间共享适应性良好；(5) 具有误操作识别及防护功能；(6) 具备模拟网络状态，对智能管理单元的通信性能、网络性能进行测试的功能；(7) 具备输入、输出数据可视化展示及比对分析功能，从而实现就地化保护闭环测试；(8) 具备验证就地化保护回路状态的功能。

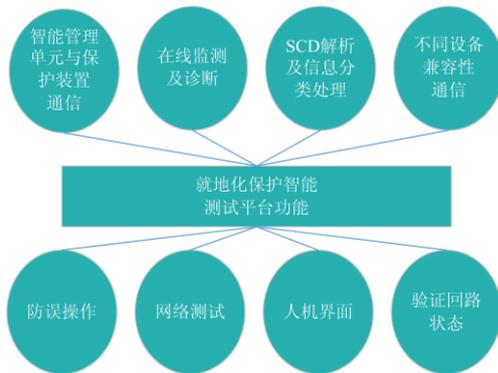


图 3 智能管理单元的主要功能

Fig. 3 Main functions of the intelligent management unit

### 2.3 基于统一环网通信规范的就地化元件保护子机间的信息交互模式

IEC61850 与传统规约的区别在于：变电站的通信体系被分为变电站层、间隔层、过程层。与 IEC60870-5-103/10 相比，在技术上 IEC61850 有如下显著特点：(1) 用面向对象建模技术，采用分布分层的体系结构，使用抽象通信服务接口 ACSI (Abstract Communication Service Interface) 和特殊通信服务映射 SCSM(Specific Communication Service Mapping) 技术，使得智能电子设备(Intelligent Electronic

Device, IED)间的互操作更加便捷；(2) 基于自我描述的数据对象，显著降低数据管理成本并简化数据维护流程，同时提供面向实时的服务；(3) 通过遵循标准化的规范，将整个电力系统进行统一建模，构建了开放的体系结构，并具备了面向未来的应用价值。上述设计优势，使得 IEC61850 在继电保护领域，成为了主流通信规约。IEC61850 标准的系统结构如图 4 所示。

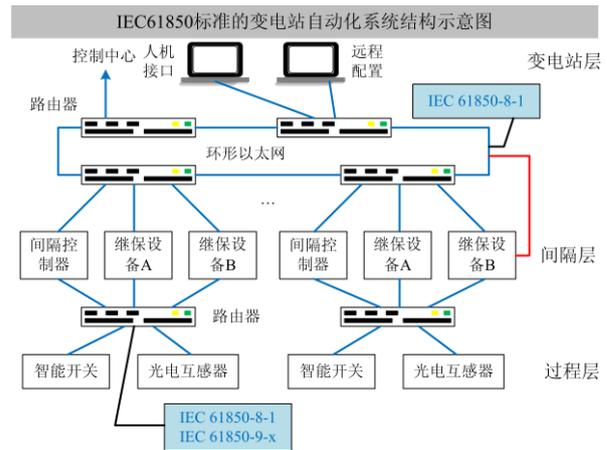


图 4 IEC61850 标准系统结构图

Fig. 4 System structure diagram of IEC61850 standard

本文提出的智能化平台基于统一的就地化元件保护子机间的环网通信规范，采用 IEC61850 通信规约，从而解决了不同厂家设备之间的信号通信兼容性难题。《就地化保护元件保护环网通信规范(讨论稿)》，由国家电网公司制定，适用于分布式主变压器保护装置以及积木式母差保护装置子机组成的过程层环网通信网络。为实现环网内设备的互操作，根据规范讨论稿中所述，明确了环网的拓扑结构、通信机制和报文格式等技术要求。如图 5 所示，

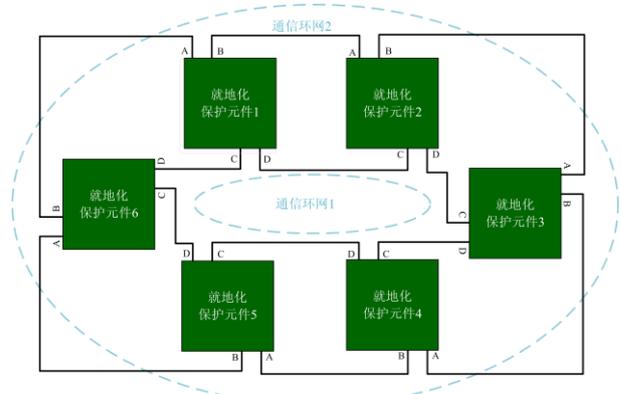


图 5 双向冗余双环网络拓扑结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bidirectional redundant double ring network topology



开关量的检查。将配置的全变电站 SCD 导入测试仪器,采用与数字化继电保护一致的方式检测 GOOSE 开关量的正确性。

(3) 双端线路保护的联调检查:线路光纤纵差保护的完整调试,需要与对侧变电站的线路保护配合,设定好本侧识别码和对侧识别码,保证光纤通道握手成功。断开被测线路保护一侧的断路器,或者将该侧线路保护的 TWJ 开入与正电源短死,通过测试仪在被测线路保护的一侧加入超过差动定值门槛的激励量,验证线路保护的光纤差动逻辑和出口的正确性。同时也进行了开关传动,以验证二次接线的正确性。

(4) 保护装置通信正确性检查。通信信号需上送至子站和各级主站,各主子站系统都需进行对点通信工作。本系统采集保护装置上传的信息,过滤并分析各类告警信息、动作信息等用于自动化测试的流程判断和事件显示。

## 4 结论

本文提出的智能化平台,实现了就地化保护装置的可靠、便捷和低成本的自动化闭环测试功能,以及设备管理的智能化。针对信息获取与展示方法、就地化元件保护子机间的环网通信规范和自动测试流程的智能化实现技术三个方面,所提智能化平台实现了技术层面的突破与创新:

(1) 具备检测保护装置状态信息的能力。通过其配套的人机交互界面,可以在线查看各个保护装置的参数定值、软压板状态、动作日志、故障报文等信息。采用虚拟发送功能进行对点调试,简化了现场的通信点对点检测工作流程。

(2) 基于统一的就地化元件保护子机间的环网通信规范,在过程层内的环形通信网络中实现各就地化元件保护装置的通信,将不同继电保护装置与智能化平台之间的通信效率显著提升。

(3) 实现了便捷化装配及本地化测试,集成了一键测试技术,使得就地化保护的闭环测试由“工厂化调试”改为“就地化测试”,极大地提升了测试的实施便捷性与操作灵活性。

## 参考文献

[1] 黄晓明,黄志华,张华娇,等. 变电站整站二次设备就地化及运维方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 173-178.  
HUANG Xiaoming, HUANG Zhihua, ZHANG Huajiao, et al. Research on the localization and maintenance scheme of secondary equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 173-178.

[2] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(7): 1-8.

[3] 王增平, 杨国生, 王志洁, 等. 继电保护相关的国内外分布式电源并网标准[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 112-119.  
WANG Zengping, YANG Guosheng, WANG Zhijie, et al. Relay protection-related domestic and foreign standards for interconnecting distributed resources with electric power systems[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 112-119.

[4] 郑玉平, 吴通华, 戴魏, 等. 变电站二次设备就地化系统网络架构探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 20-26.  
ZHENG Yuping, WU Tonghua, DAI Wei, et al. Discussion on network architecture of outdoor installation protection system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 20-26.

[5] 陈国平, 王德林, 袁愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Discussion on network architecture of outdoor installation protection system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.

[6] 郭晓宁, 尹剑仑, 庞杰锋, 等. 一种通用保护装置显示终端的设计与实现[J]. 华电技术, 2019, 41(10): 35-38.  
GUO Xiaoning, YIN Jianlun, PANG Jiefeng, et al. Design and implementation of a universal display terminal for protection devices[J]. Huadian Technology, 2019, 41(10): 35-38.

[7] 杨博, 吴易洋, 王家驹. 断路器闪络保护与变压器动稳定能力配合关系分析[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 172-175.  
YANG Bo, WU Yiyang, WANG Jiaju. Analysis of coordination relationship between circuit breaker flashover protection and dynamic stability of transformer[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 172-175.

[8] 王风光, 杜兴伟, 吕航, 等. 就地化母线保护在电力系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 155-161.  
WANG Fengguang, DU Xingwei, LÜ Hang, et al. Application of local busbar protection in power system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 155-161.

[9] 李颖超. 新一代智能变电站层次化保护控制系统方案及其可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
LI Yingchao. Research on scheme and reliability of hierarchical protect & control system for new generation of smart substation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[10] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and

- research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120.
- [11] 刘小虎. 变电站站控层无线接入就地化保护技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
LIU Xiaohu. Research on the on-site protection technology using wireless access technology in the control layer of a substation[M]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [12] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 121-135.
- [13] 傅振宇, 杨飞, 钱海, 等. 就地化保护更换式检修技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 182-187.  
FU Zhenyu, YANG Fei, QIAN Hai, et al. Research on replacement maintenance technology of on-site protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 182-187.
- [14] 岳峰, 史志伟, 董金才, 等. 智能电网继电保护控制设备硬件可靠性设计及测试[J]. 华电技术, 2020, 42(2): 50-57.  
YUE Feng, SHI Zhiwei, DONG Jincai, et al. Reliability design and test for relay protection devices applied in smart grid [J]. Huadian Technology, 2020, 42(2): 50-57.
- [15] 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.
- [16] 李满礼, 陈学通, 刘东洋, 等. 信息物理融合视角下的电流纵差保护可靠性分析[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 25-31.  
LI Manli, CHEN Xuetong, LIU Dongyang, et al. Reliability analysis of the current differential protection with integration of cyber and physical system[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 25-31.
- [17] 王德林, 裘愉涛, 凌光, 等. 变电站即插即用就地化保护的应用方案和经济性比较[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 12-19.  
WANG Delin, QIU Yutao, LING Guang, et al. Application scheme and economical comparison of plug & play and outdoor installation protection in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 12-19.
- [18] 宋福海, 翟博龙, 唐志军. 基于广域同步数据的就地化保护在线分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 156-163.  
SONG Fuhai, ZHAI Bolong, TANG Zhijun. On-line analysis method of installation protection based on wide-area synchronous data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 156-163.
- [19] 索江镛, 刘琨, 袁亮荣, 等. 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, et al. Construction of parallel test system for relay protection static simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 46-55.
- [20] YANG Zaixin, WANG Yunmin, XING Lixin, et al. Relay protection simulation and testing of online setting value modification based on RTDS[J]. IEEE Access, 2019, 8: 4693-4699.
- [21] 王智勇, 裘愉涛, 董新涛, 等. 基于冗余通信的就地化分布式母线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 158-164.  
WANG Zhiyong, QIU Yutao, DONG Xintao, et al. Research on outdoor installation distributed busbar protection based on redundant communication[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 158-164.
- [22] 吴通华, 郑玉平, 周华, 等. 基于功能纵向集成的无防护安装就地化线路保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 46-52.  
WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHOU Hua, et al. Vertically integrated outdoor installation line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 46-52.
- [23] 张春合, 陆征军, 李九虎, 等. 数字化变电站的保护配置方案和应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 122-125.  
ZHANG Chunhe, LU Zhengjun, LI Jiuhu, et al. Protection configuration scheme and application in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 122-125.
- [24] 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.

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-05-11

作者简介:

刘海涛(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事智能变电站二次设备测试与评价研究; E-mail: hetton@126.com

牛健(1993—), 男, 硕士, 主要研究智能变电站继电保护测试技术; E-mail: niuxiaojian01@163.com

侯珏(1994—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为配电网智能监控与评估。E-mail: houjue@hust.edu.cn

(编辑 张爱琴)