

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201066

广域型保护控制设备分布式协同测试技术研究与应用

南东亮^{1,2}, 王维庆¹, 张路², 董雪涛², 李勇³, 任祖怡⁴, 李兴建⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430008; 4. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 安全稳定控制系统、广域保护等区域电网保护控制系统是保障电网稳定运行的重要手段。由于传统测试方法难以于装设现场实现广域型保护控制设备动态性能测试, 因此, 提出了基于实时仿真的分布式协同测试方法。通过融合全数字实时仿真装置(ADPSS)、电力调度数据网、基于GPS/BDS的卫星对时系统以及规约转换等多种技术, 研究分布式协同测试主站、数据接口装置以及测试终端等关键部件, 深入分析了协同测试的工程应用流程。以新疆某地区电网外送功率断面安全稳定控制系统为例, 完成现场远程联调测试, 验证异地多台保护控制装置运行的动态性能。

关键词: 广域型保护控制设备; ADPSS; 电力调度数据网; 分布式协同测试; 规约转换

Research and application of distributed collaborative test technology for wide-area protection and control equipment

NAN Dongliang^{1,2}, WANG Weiqing¹, ZHANG Lu², DONG Xuetao², LI Yong³, REN Zuyi⁴, LI Xingjian⁴

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China; 3. Central China Branch of State Grid Corporation, Wuhan 430008, China; 4. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Secure and stable control systems, wide-area protection and other regional power grid protection control systems are important means for ensuring the stable operation of a power grid. It is difficult for conventional test methods to complete a dynamic performance test of wide area protection control equipment at an installation site. Hence, a novel distributed collaborative test method based on real-time simulation is proposed. We integrate an Advanced Digital Power System Simulator (ADPSS), a power dispatching data network, a satellite time synchronization system based on the Global Positioning System (GPS) or the Beidou Navigation Satellite System (BDS), protocol conversion and other technologies. Then the distributed collaborative test master station, the data interface components, the test terminals and other key components are developed. The engineering application process of the proposed collaborative test is analyzed. Based on the security and stability control system of the power transmission section of the power grid in a certain area of Xinjiang, the on-site remote joint debugging test is completed, and the dynamic performance of remote multiple protection and control devices is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51667020).

Key words: wide area protection and control equipment; ADPSS; power dispatching data network; distributed collaborative test; protocol conversion

0 引言

性能优异的继电保护装置、安全稳定控制(以下

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51667020); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题资助(2018D04005); 新疆维吾尔自治区教育厅重点项目资助(XJEDU20191009); 教育部创新团队滚动项目资助(IRT-16R633)

简称稳控系统、广域保护以及广域各自投等保护控制设备是提高电网输送能力和供电可靠性的保障措施^[1-9]。但其一般分布在多个厂站, 由多台装置通过通信网络构成, 数据采集、控制策略及动作跳闸等功能分布在相距较远的不同地区, 难以实现系统级的全面测试^[10-11]。目前对于广域型保护控制设备协同测试主要基于离线数字仿真软件、实时数字仿真器、动模试验、故障录波回放和继电保护测试仪

等^[12-15]试验方法和设备。离线数字仿真可准确模拟电网暂态运行工况,仿真建模较为容易,使用方便且易于维护,其缺点是离线建模仿真缺乏实时性,不能直接与广域保护控制硬件设备连接进行闭环试验,仅对预想的保护控制功能进行开环测试。动模试验可直观反映被测试系统的动态物理特性,受实验室设备和场地等因素制约,无法模拟大型测试系统,仅用于部分逻辑判断验证试验,难以实现广域保护控制系统功能的全面测试。继电保护测试仪和故障录波回放仪具有成本低、规模小、便于携带、精度高等优点,常用于单设备测试,针对分布式协同测试,多台测试仪之间的故障模拟无系统关联,无法全面检验多厂站间装置的配合逻辑和实际动作效果。实时数字仿真技术是一种全数字化和超实时的仿真技术,具备电磁暂态仿真功能、可与常规和数字化控制保护设备连接进行闭环试验等优点,通常被用于广域型保护控制设备及系统的研发测试和出厂调试阶段^[16-18],然而,受目前测试装备水平限制,此类装备难以开展系统级测试,在设备安装、通信组网、策略制定、定值整定、现场调试过程中可能存在隐性故障。

本文通过对广域型保护控制设备现有测试方法研究分析,结合电力系统信息传输特点,基于全数字实时仿真装置(ADPSS)、电力调度数据网、基于GPS/BDS的卫星对时系统等技术研制了广域型保护控制设备分布式协同测试平台,能够对异地多台设备的运行性能进行仿真试验,解决了现有测试方法不能对广域型保护控制设备的功能进行全面验证的问题,减少了跨区域系统联调、检修涉及的人力物力投入,为提高广域型保护控制设备的可靠性和电网安全稳定运行水平提供有力支撑。

1 测试平台的框架结构

测试平台主要包括 ADPSS 仿真装置、数据接口装置、测试主站以及光数据测试终端等关键部件,平台结构如图 1 所示。

首先根据广域型保护控制设备的故障动作逻辑,采用 ADPSS 仿真装置对电网故障运行状态进行仿真,通过光纤将仿真结果数据传输给数据接口装置,利用数据接口装置的数据转换技术将数字量信息转换成基于 IEC60870-5-104 规约(以下简称 104 规约)的报文信息,发送给测试主站。其次,测试主站对接收到的 104 规约报文信息进行解析,加入时间触发控制信息后对其封装处理成 104 规约报文,通过调度数据网下装到光数据测试终端。然后,利用光数据测试终端的规约转换技术将基于 104 规约

的报文信息转换成基于 IEC61850 规约的过程层报文信息。最后通过 GPS/BDS 卫星对时系统进行对时,将故障信息进行统一触发,实现故障信息的同步回放。此外,光数据测试终端还能通过 IEC61850 规约引擎对保护控制设备的模型和动作报文进行上招,对其进行规约转换后通过调度数据网传回测试主站,进而实现广域型保护控制系统的闭环测试。

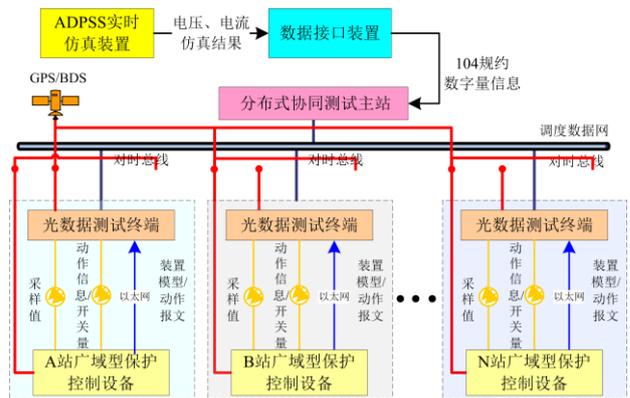


图 1 广域型保护控制设备分布式协同测试平台结构

Fig. 1 Structure of distributed collaborative test platform for wide-area protection and control equipment

2 测试平台的关键模块设计

分布式协同测试实施的关键是怎样对电网的故障运行状态进行仿真,仿真数据如何穿透地域,控制不同地点的保护控制设备进行同步测试,待测设备的动作出口节点以及动作报文如何跨越空间到达测试主站,为解决上述问题进行如下关键模块设计。

2.1 ADPSS 仿真装置

ADPSS 仿真装置具有可扩展性,可根据仿真系统的规模进行系统硬件扩充,从而实现大型电力系统的机电-电磁暂态的全数字混合仿真,并可实现 1.5~2.5 μs 小步长电磁仿真。该装置具有成熟的在线数据处理技术,能够将实际运行参数经过一台在线数据接口服务器与数字仿真装置进行数据交换,实现基于电网实际运行参数的仿真计算。另外,该装置可根据实际需求搭建电网正常或故障运行模型,能够满足广域型保护控制系统和设备的验证要求,因此本文选择基于 ADPSS 的仿真装置作为分布式协同测试平台的数据源。

2.2 数据接口装置设计

ADPSS 仿真装置以高性能的机群服务器为硬件基础,预置光纤接口装置和其他设备进行信息交互。由于 ADPSS 仿真装置输出的数据是离散采样点,不利于测试主站程序对其进行自动调用和分析,因此设计数据接口装置,通过其主控板 SFP 光纤接

口与仿真机群服务器的光纤网卡相连, 实现仿真机群和数据接口装置的数据交换, 按照 104 规约对仿真数据进行转换, 满足了测试主站对数据格式的要求。该装置硬件部分主要包括: 机箱、底板、主控板以及功能板等, 软件部分主要是基于高性能处理器 DSP 的 104 规约编码软件。通过数据接口装置实现 ADPSS 仿真装置和测试主站之间的数据贯通。

2.3 测试主站

测试主站主要负责人机交互, 对数据接口装置发送的数据进行解析、封装处理, 并通过调度数据网将其发送给光数据测试终端。因此选用工作站作为硬件基础, 对上接收数据接口装置发送的故障仿真报文信息, 对下将加入时间触发控制的报文信息进行封装处理, 通过调度数据网下装给光数据测试终端; 在软件方面测试软件采用 QT 在 Linux 系统下编写, 界面友好美观, 操作简单, 其主要功能是: 接收数据接口装置发送的报文信息; 接收光数据测试终端上招的保护装置模型文件、动作出口节点以及动作报文; 实现装置模型文件的自动解析, 并自动生成测试结果对比模板, 实现广域型保护控制设备功能的闭环校验。

2.4 光数据测试终端

光数据测试终端部署在各个待测厂站中, 需要具备以下功能: 1) 支持 GPS/BDS 卫星对时系统; 2) 通过 IEC61850 规约招送待测设备模型、动作出口节点以及动作报文; 3) 实现报文信息在 104 规约和 IEC61850 规约间的无差别相互转换; 4) 能够实现数据的解析分解, 并且能通过时间触发控制报文信息的下装。因此光数据测试终端包含四个主要功能: 卫星对时模块、报文信息主动招送模块、规约转换模块以及信息控制管理模块。

卫星对时模块可直接外接 GPS/BDS 卫星对时信号, 也可利用厂站内对时时钟装置的信号, 通过差分/光纤形式的 IRIG-B 码实现对时。

报文信息主动招送模块在接收到测试主站下发的待测设备模型上招控制命令后, 采用 IEC61850 规约将模型进行上传。另外该模块能够在待测设备动作后自动完成动作出口节点和动作报文的上传。

规约转换模块的功能是实现报文信息在 104 规约和 IEC61850 规约间的无差别相互转换, 通过规约转换模块, 将测试主站下装的基于 104 规约的报文信息通过规约转换模块转换成基于 IEC61850 规约的过程层报文信息输出到保护装置, 待测设备的模型文件、动作出口节点以及动作报文则转换成基于 104 规约的报文信息传回测试主站, 从而实现测试结果的闭环比对。

信息管理模块的主要功能是接收测试主站下装的数据信息进行解析: 一方面, 将解析得到的数据发送给规约转换模块转换成基于 IEC61850 规约的报文信息; 另一方面, 将解析得到的时间控制触发信息和授时系统的对时时标进行比对, 当时间达到预设的时间时, 将基于 IEC61850 规约的报文信息下装到广域型保护控制设备, 实现测试平台的同步测试。

3 关键问题解决方案

3.1 数据接口装置的数据转换方法

ADPSS 仿真装置通过数据接口装置将仿真结果的数字量信息转换成报文信息, 提供给测试主站。仿真装置和测试主站传输的数字量信息主要包括三相电流相量、三相电压相量以及开关量等。104 规约是新疆电网调度数据网采用的主要通信规约之一, 其数据组成结构如图 2 所示。

104 规约的 APDU(应用协议数据单元)结构由 ASDU(应用服务数据单元)和 APCI(应用规约控制信息)组成, 采用的传输控制方法是启停控制法。该规约适用于远距离信息传输, 误码率低, 采用标准的 TCP/IP 网络传输协议, 因此本文采用基于 104 规约的数据转换方法进行数据转换, 将仿真装置输出的模拟量数字信息转换成基于 104 规约的报文信息。

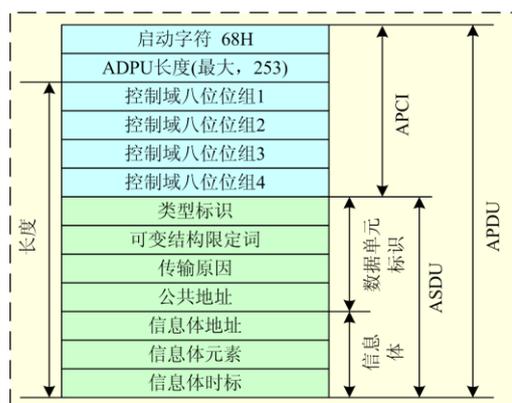


图 2 104 规约应用协议数据单元结构图

Fig. 2 Diagram of 104 protocol application protocol data unit

3.2 通信组网技术

电力调度数据网承载电网调度生产运行等多种业务, 覆盖新疆电网各电压等级厂站, 且能够高效、实时、可靠传输各厂站广域测试数据^[19-20]。为满足测试平台对通信网络的要求, 按照电力调度数据网网络布局结构, 考虑使用 I 区调度数据网、II 区调度数据网、III 区调度数据网等三种组网结构。根据实际现场调研以及网络功能需求可知, 变电站内设

备测试区域未接入 III 区调度数据网, I 区和 II 区调度数据网能够覆盖测试区域, 但考虑安全防护要求, I 区调度数据网不适合接入外来数据源, 调度数据网 II 区可满足本文提出的测试技术对通信网络对可靠性和传输效率的要求^[21-23], 且不会影响 II 区调度数据网原有的业务功能, 因此平台选用 II 区调度数据网, 其组网方式如图 3 所示。

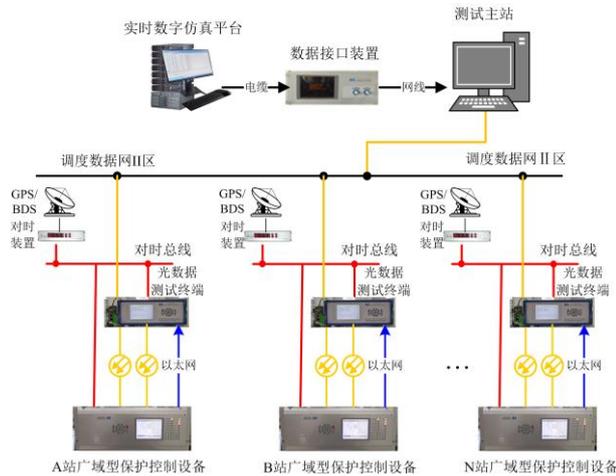


图 3 基于调度数据网的组网方式

Fig. 3 Networking mode based on dispatching data network diagram

3.3 规约转换技术

本文提出的测试系统不同模块对信息规约的要求不同, 规约转换技术下能够将 104 规约信息转换成基于 IEC61850 规约的 GOOSE 和 SV 信息; 对上能够将基于 IEC61850 的 GOOSE 和 MMS 信息转换成 104 规约信息。经分析研究可知两种规约建模方式不同, 其中 104 规约的建模方式是面向点, 而 IEC61850 规约的建模方式是面向对象, 因此提出通过采用规约转换模块来实现两种规约间的转换^[24], 该模块包括以下功能: IED 配置功能、规约转换功能、IEC61850 实时数据库以及 IEC61850 服务模块等四个功能组成, 其组成结构如图 4 所示。

104 规约向 IEC61850 规约信息转换, 需要建立两种规约之间的映射关系。首先进行相关信息的服务映射, 制定 104 规约与 IEC61850 规约间的映射规则, 如表 1 所示。利用规约转换功能配置解析 104 规约协议的报文信息, 获取相关模拟量和开关量信息, 根据建立的映射规则将这些数据写入 IEC61850 实时库, 进而利用 IEC61850 服务模块生成间隔层所需要的 IEC61850-8-x、IEC61850-9-2 服务子集, 从而实现 104 规约向 IEC61850 规约的过程层报文信息变换。

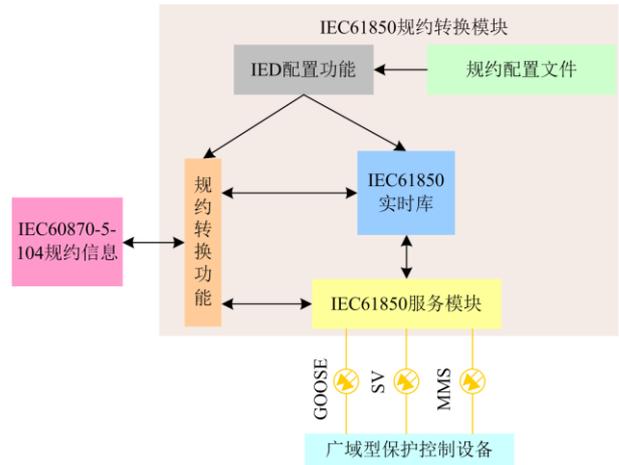


图 4 规约转换模块的框架结构

Fig. 4 Framework of protocol conversion module

表 1 104 与 IEC61850 规约服务间的映射基本规则

Table 1 Basic rules of mapping between 104 and IEC61850 protocol services

104 定义的 ASDU	IEC61850-7-X/8-X
类型标识符	隐含定义每个元素的信息类型作为 MMS/ASN.1 的标记传送
可变结构限定词	隐含定义
传送原因	包含原因/服务参数
发信方地址	关联/服务参数(发信方)
应用服务数据单元	LD、LN 数据对象
地址、功能类型、信息序号	属性(命名原理)
信息元素集(数据对象/品质描述比特位)	数据属性(VaLq)
时标	数据属性(t)

基于 IEC61850 的规约报文信息向基于 104 规约的报文信息的变换, 通过利用 IEC61850-80-1 中详细定义的两规约间的变换方法, 将 IEC61850 规约和 104 规约间的信息进行映射, 实现了基于 IEC61850 规约的 MMS 和 GOOSE 报文信息向 104 规约的报文信息变换。

4 测试流程

测试平台的测试流程如图 5 所示, 具体测试步骤如下。

步骤 1: 现场测试准备。梳理广域型保护控制设备需要校验的功能数 n , 并确定待测厂站, 做好安全措施。

步骤 2: 搭建测试系统。按照图 3 基于 II 区调度数据网的组网以及设备间的连线方式搭建测试系统。

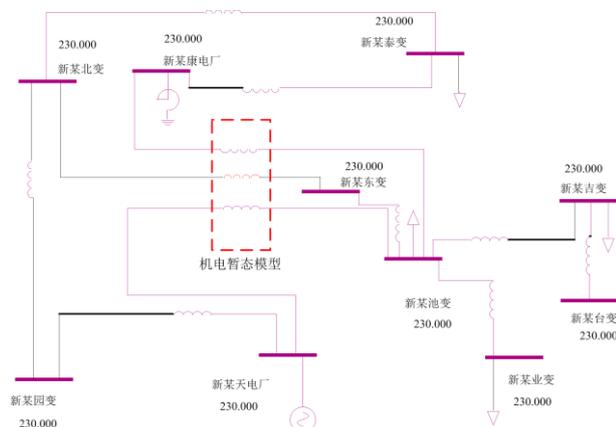


图7 机电—电磁暂态混合仿真模型

Fig. 7 Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation model

运行状态, 以及新某北变和新某东变联络双线+池天线断面断开时的故障运行状态进行仿真, 进而利用图5所示的测试流程进行实际操作测试, 现场试验结果表明稳控装置检测出断面功率大于490 MW, 并接收到新某北变和新某东变联络双线+池天线断面断开的信息, 装置发出切负荷指令, 切除该地区东部大工业100.1 MW负荷, 各厂站稳控装置动作报文自动上传到测试主站, 自动实现和动作结果比对模板进行比对分析并生成试验报告, 从而验证了稳控系统策略制定及装置安装的正确性和可靠性。

6 结论

本文充分研究了目前广域型保护控制系统的联合调试及功能全面验证存在的问题, 提出了一种基于实时仿真的分布式协同测试方法, 通过融合ADPSS仿真装置、电力调度数据网、GPS/BDS卫星对时系统以及规约转换技术, 搭建了广域型保护控制设备远程测试平台, 并为工程应用制定了详细测试流程。以新疆某地区电网稳控系统现场联合测试为例, 验证了测试方法的有效性。该平台可对广域分布的保护控制系统进行系统级动态性能校验, 有效提高现场测试效率和自动化水平, 同时为现场广域型保护控制系统的仿真和测试提供了规范化、高效化的技术方向。

参考文献

- [1] SABER A, EMAM A, ELGHAZALY H. Wide-Area backup protection scheme for transmission lines considering cross-country and evolving faults[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(1): 813-822.
- [2] 陈国平, 李明节, 许涛. 特高压交直流电网系统保护

- 及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.
- [3] 任罡, 李世倩, 季宁, 等. 智能电网层次化广域保护系统的关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 93-98.
- REN Gang, LI Shiqian, JI Ning, et al. Key technologies of hierarchical wide-area protection system for smart grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 93-98.
- [4] EISSA M M. Challenges and novel solution for wide-area protection due to renewable sources integration into smart grid: an extensive review[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(16): 1843-1853.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [7] EISSA M M. A new wide-area protection scheme for single-and double-circuit lines using 3-D-phase surface[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2613-2623.
- [8] 杨合民, 路小俊, 王军. 一种适用于串联电网接线的远方备自投装置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 94-97.
- YANG Hemin, LU Xiaojun, WANG Jun. A remote backup power automatic throw-in device for serial power grid connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 94-97.
- [9] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [10] ALI S M, JAWAD M, KHAN B, et al. Wide area smart grid architectural model and control: a survey[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 311-328.
- [11] DAS S, ANANTHAN S N, SANTOSO S. Relay performance verification using fault event records[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.

- [12] 南东亮, 王维庆, 任祖怡, 等. 基于多故障场景的大规模安全稳定控制系统可信测试方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 165-172.
NAN Dongliang, WANG Weiqing, REN Zuyi, et al. Reliability test method of large-scale security and stability control system based on multi-fault scenario[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 165-172.
- [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 intelligent substation relay protection equipment based on cloud policy and MMS protocol[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 159-164.
- [14] 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.
- [15] WANG Qingping, BO Zhiqian, ZHAO Yingke, et al. Integrated wide area protection and control for power grid security[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 206-214.
- [16] TIAN Fang, ZHANG Xing, YU Zhihong, et al. Online decision-making and control of power system stability based on super-real-time simulation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(1): 95-103.
- [17] 李兴建, 夏彦辉, 陈松林, 等. 分布式稳定控制仿真测试系统的研制及应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 163-168.
LI Xingjian, XIA Yanhui, CHEN Songlin, et al. Development and application of distributed simulation & test system for stability control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 163-168.
- [18] 王伟. 特高压直流输电控制保护系统实时仿真技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 142-147.
WANG Wei. Research and application of real-time simulation technology for UHVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 142-147.
- [19] 刘浩, 邢方勃, 李道豫, 等. 变电站调度数据网双平面改造技术要点分析及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(4): 98-105.
LIU Hao, XING Fangbo, LI Daoyu, et al. Analysis and application on technical points of dual-plane reconstruction of substation power dispatching data network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(4): 98-105.
- [20] JIANG Kai, SINGH C. New models and concepts for power system reliability evaluation including protection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 1845-1855.
- [21] 李芹, 卢长燕, 霍雪松, 等. 电力调度数据网测试模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 187-193.
LI Qin, LU Changyan, HUO Xuesong, et al. Test models of electric power dispatching data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 187-193.
- [22] 李高望, 鞠文云, 段献忠, 等. 电力调度数据网传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 141-148.
LI Gaowang, JU Wenyun, DUAN Xianzhong, et al. Transmission characteristics analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 141-148.
- [23] 徐迅, 梅军, 钱超, 等. 基于 IEC 60870-5-104 规约扩展的配电终端自描述功能实现方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 128-133.
XU Xun, MEI Jun, QIAN Chao, et al. Research method for implementation of the self-describing function of distribution terminals based on the extended IEC 60870-5-104 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 128-133.
- [24] 郭创新, 俞斌, 郭嘉, 等. 基于 IEC 61850 的变电站自动化系统安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 685-694.
GUO Chuangxin, YU Bin, GUO Jia, et al. Security risk assessment of the IEC61850-based substation automation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 685-694.

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2021-04-30

作者简介:

南东亮(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制、数据分析与挖掘; E-mail: ndl_hhu@126.com

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源并网控制; E-mail: wwq59@xju.edu.cn

张路(1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 15212593377@163.com

(编辑 周金梅)