

数字化故障录波器试验方法研究

项灿芳, 周泽昕, 周春霞, 艾淑云

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Research on Test Method of Digital Fault Recorder

XIANG Canfang, ZHOU Zexin, ZHOU Chunxia, AI Shuyun

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Development of smart grid makes new requests to fault recorder, for this reason, referring to DL/T 663-1999 standard the performance characteristics of digital fault recorder (DFR) based on IEC 61850 standard are summarized. According to requirements for the appraisal of digital fault recorder during system-level testing of digital substation, the testing methods for digital fault recorder are researched. In allusion to the performance test of DFR, a testing system is constructed, and combining with related standards and testing experiences the test contents to be performed in overall testing of DFR are listed. In the listed contents, technical requirements of such testing items closely related to the performance characteristics of IEC 61850 as the inspection of the standard ability of GOOSE messages, the test of abnormal bit identification of the quality of sampled data, the test of abnormal bit identification of synchronization of sampled data, the inspection of synchronization of sampled value, the inspection of decoding of sampled value, the inspection of resolution of GOOSE events, the testing of time alignment and time-keeping accuracy, alarming of real-time monitoring of message and record inspection and inspection of switch signal alteration are emphatically analyzed. Typical problems existing in the testing process of DFR are discussed and corresponding solutions are given.

KEY WORDS: digital substation; digital fault recorder; sampled value; generic object oriented substation event (GOOSE)

摘要: 智能电网的发展对故障录波器提出了新要求, 为此参考 DL/T 663—1999 标准, 总结了基于 IEC 61850 的数字化故障录波器的性能特点。依据数字化变电站整体系统试验过程中对数字化故障录波器的考核要求, 对故障录波器的试验方法进行研究。针对数字化故障录波器性能测试搭建测试系统, 结合相关标准和检测经验总结录波器全面测试的项目, 重点分析了面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)报文规范性检查、采样数据品质位标识异常试验、采样数据同步位标识异常试验、采样值解码检查、采样值同步检查、GOOSE 事件分辨率检查、对时和守时精度测试、报文实时监测告警和记录检查、开关量变位检查等测试项目及其技术要求, 对数字化故障录波器测试过程中存在的典型问题进行分析并给出解决措施。

关键词: 数字化变电站; 数字故障录波器; 采样值; 面向通用对象的变电站事件

0 引言

随着智能电网的快速发展, 电子式互感器、智能操作箱、基于 IEC61850 的二次设备数字化保护装置、数字化故障录波器、电子计量装置及基于高速网络通信技术的过程层数字采样网络等新技术被广泛引入^[1-2], 将成为未来变电站自动化系统技术发展的趋势。数字化故障录波器的应用, 使得电网故障信息的分析和处理手段达到了一个新的层次, 将得到越来越广泛的应用^[3-4]。

录波器作为现代电网安全运行必不可少的分析手段, 可以记录短路故障、系统振荡、电压崩溃、频率崩溃等大扰动引起的系统电压、电流及其导出量, 如系统有功功率、无功功率及系统频率的变化全过程, 其记录的信息是分析电网事故、异常和继电保护动作行为的关键依据, 在重大事故的调查和分析中发挥了重要作用^[5-6]。基于 IEC 61850 的数字化故障录波器记录了面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)信息、开关量变位信息和采样值(sampled value, SV)信息, 是评价数字化保护动作行为及分析的关键设备^[7], 也是电网调度运行人员对系统异常故障的分析判断及处理的重要依据, 因此, 人们对其性能也提出了新的要求^[8]。

基于数字化故障录波器在数字化变电站中的重要性, 且随着数字化变电站的发展中组网方式的不同对数字化故障录波器的性能提出的新要求, 以及为保证数字化保护装置的可操作性, 需要进行一致性测试和性能测试, 本文主要对性能测试进行研究和探讨。

1 基于 IEC 61850 的数字化故障录波器的性能特点

数字化变电站系统分为站控层、间隔层、过程层 3 个部分，数字化故障录波器处于数字化变电站的站控层、间隔层，数字化故障录波器必须支持实现智能设备的互操作性、变电站信息共享和系统协调工作，在整个变电站网络中必须保证可靠性、开放性、实时性、安全性、同步性^[9-11]。为适应数字化变电站发展的新要求，数字化故障录波器与传统电力系统故障录波器相比应具有以下性能特点：1) 全面支持 IEC 61850 协议。设备之间的连接全部采用高速网络通信，并且通过网络实现数据共享、资源共享。2) 高速、灵活的通信技术。按照 IEC 61850 标准实现过程层总线方案，灵活适应各种不同的组网方式。3) 同步采样技术。实时接收合并单元的信息和保护控制单元的 GOOSE 报文信息，实现不同数据源的数据同步，支持不同的网络对时技术。4) 数据存储冗余技术。采用双硬盘设计，数据冗余备份，使数据的可靠性得到较大提高。5) 以数据文件方式实现信息远传，并具有极强的数据处理能力^[12-14]。

数字化故障录波器的技术发展和特点对其性能测试有了更新、更高的要求。

2 针对数字化故障录波器特性的试验

2.1 试验环境的搭建

参考 DL/T 663—1999 标准和 IEC 61850 标准，搭建数字化故障录波器功能测试系统^[15-16]见图 1。应用数字化继电保护测试仪、交换机(支持采样值及 GOOSE 组网方式的装置选用)连接数字化故障录波器进行测试，见图 1(a)；或通过传统保护测试仪、合并单元(merging unit, MU)、交换机(支持采样值及 GOOSE 组网方式的装置选用)、智能终端等连接数字化故障录波器进行测试^[17]，见图 1(b)。

数字化故障录波器测试项目中数据的记录方式检查、记录容量检查、大短路电流记录能力检查、故障测距，需要通过搭建电力系统动态模拟系统才能全面、正确地实现性能检查。动态模拟系统见图 2。动态模拟整组测试系统见图 3、4。

依据 DL/T 871—2004 标准和 IEC 61850 标准，电力系统动态模拟整组测试系统中互感器采用电子式电流互感器、电子式电压互感器。数字化故障录波器通过点对点或组网方式采集电流、电压、智能单元、断路器的分/合位置、保护装置动作信息等。

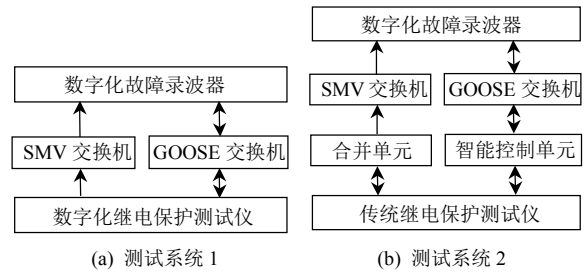


图 1 测试系统结构
Fig. 1 Structure of test system

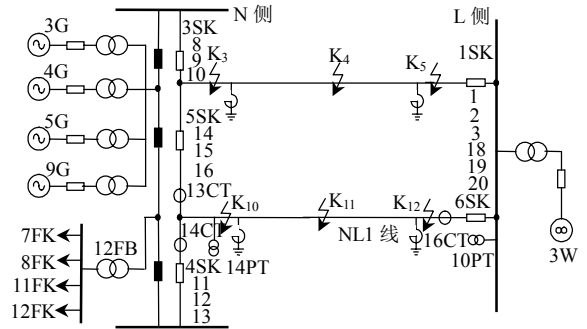


图 2 500 kV 电力系统动态模拟系统接线
Fig. 2 Dynamic simulation system of 500 kV power system

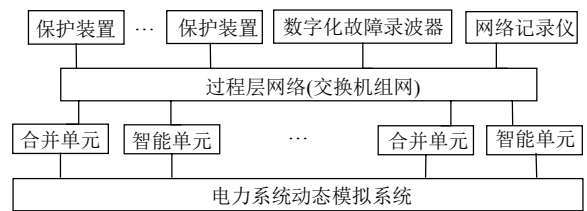


图 3 数字化故障录波器测试系统(过程层点对点方式)
Fig. 3 Test system for digital fault recorder (process level in point-to-point mode)

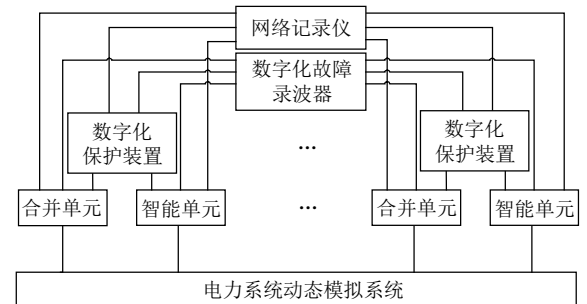


图 4 数字化故障录波器测试系统(过程层组网方式)
Fig. 4 Test system for digital fault recorder (process level in network mode)

其中对于运行环境的适应性测试，应用微机保护测试仪、干扰仪、专项测试仪等仪器设备就能实现性能检查。

2.2 试验项目

参考 DL/T 663—1999 标准，结合基于 IEC 61850 的数字化故障录波器的性能特点，依据数字化变电站整体系统试验过程中对数字化故障录波器的考核要求，数字化故障录波器的全面测试包括：

- 1) 常规测试项目。外观结构检查、功率消耗

测试、高低温试验、直流电源电压波动影响试验、温度储存试验、湿热试验、电磁兼容试验、绝缘性能试验、热稳定试验、动稳定试验、机械性能试验。

2) 性能测试项目。零漂检查、交流电压/电流的线性范围检查、交流电压/电流相位一致性检查、谐波的可观测性检查、有功及无功功率记录性能检查、频率记录性能检查、起动性能及起动值检查、长期低电压/长期低频率记录能力检查、记录数据的输出及传送功能检查、记录数据文件检索及查找方式检查、装置的远传功能检查。

3) 动态模拟测试项目。数据的记录方式检查、记录容量检查、大短路电流记录能力检查、故障测距。

4) 针对数字化故障录波器的性能测试项目。GOOSE 报文规范性检查、采样数据品质位标识异常试验、采样数据同步位标识异常试验、采样值解码检查、采样值同步检查、GOOSE 事件分辨率检查、对时和守时精度测试、报文实时监测告警和记录检查、开关量变位检查。

重点分析针对数字化故障录波器的性能测试项目，其试验方法如下：

1) GOOSE 报文规范性检查。数字化保护装置、智能终端、数字化故障录波器等智能电子设备间的相互起动、相互闭锁、位置状态等交换信息可通过 GOOSE 网络传输。数字化故障录波器通过交换机或直接接收来自其他智能设备的 GOOSE 开入信号，检查录波器是否正确接收和解析 GOOSE 信息。

2) 采样数据品质位标识异常试验。MU 发送采样值出现品质位无效，当采样值无效标识累计数量或无效频率超过允许范围，检查录波器是否起动。

3) 采样数据同步位标识异常试验。MU 发送采样值出现同步位无效，当采样值无效标识累计数量或无效频率超过允许范围，检查录波器是否起动。

4) 采样值解码检查。将一组采样值数据集接入数字化故障录波器，在测量范围内随机改变电压、电流值，观察数字化故障录波器实时显示的波形。

5) 采样值同步检查。将 2 组采样值数据集以秒脉冲(随机抽取一种方式，下同)同步方式接入到数字化故障录波器中，并设定这 2 组采样值中的各交流通道相位一致，手动起动录波；检查录波器是否起动，记录的各交流通道波形的相位是否一致。

6) GOOSE 事件分辨率检查。设定 GOOSE 事件的 ON/OFF 交替变化的时间间隔为 10 ms/10 ms，检查数字化故障录波器测量的 ON/OFF 交替变化时

间间隔误差是否符合要求。

7) 对时和守时精度测试。检查数字化故障录波器对时方式、守时精度是否满足要求。

8) 报文实时监测告警和记录检查。将 1 组或多组采样值数据集以秒脉冲同步方式接入到数字化故障录波器中，随机发生丢包、错序、重复错误，检查数字化故障录波器是否能实时检出这些异常。

9) 开关量变位检查。给数字化故障录波器发送开关量变位信号，录波器是否起动发 GOOSE 报文，GOOSE 虚拟触点闭合或断开是否能可靠起动。

2.3 技术要求

参考 DL/T 663—1999 标准和 IEC 61850 标准，结合检测积累的数据，重点分析针对数字化故障录波器的性能测试项目，提出技术要求：

1) GOOSE 报文规范性检查要求。数字化故障录波器正确接收和解析通过交换机或直接接收来自其他智能设备的 GOOSE 开入信号和信息。

2) 采样数据品质位标识异常试验要求。MU 发送采样值出现品质位无效，采样值无效标识累计数量或无效频率超过允许范围，录波器应告警。

3) 采样数据同步位标识异常试验要求。MU 发送采样值出现同步位无效，采样值无效标识累计数量或无效频率超过允许范围，数字化故障录波器应告警，并实时记录当时数据不加处理。

4) 采样值解码检查要求。将一组采样值数据集接入到数字化故障录波器中，在测量范围内随机改变电压、电流值，观察录波器实时显示波形。要求录波器实时显示波形中可及时显示相应数据变化，测量误差符合 DL/T 663—1999 标准的要求。

5) 采样值同步检查要求。将 2 组采样值数据集以秒脉冲同步方式接入到数字化故障录波器中，并设定这 2 组采样值中的各交流通道相位一致，手动起动录波；要求录波器记录的各交流通道波形的相位一致，相互间的最大相位测量误差不大于 5°。

6) GOOSE 事件分辨率检查要求。设定 GOOSE 事件 ON/OFF 交替变化的时间间隔为 10 ms/10 ms，要求数字化故障录波器测量的 ON/OFF 交替变化时间间隔误差不大于 1 ms。

7) 对时和守时精度测试要求。数字化故障录波器可通过 IRIG-B 码和脉冲对时，也可采用 IEEE 1588(IEC 61588)标准进行网络对时，对时和守时精度应满足 DL/T 860.5—2006 标准要求。

8) 报文实时监测告警和记录检查要求。将 1 组

或多组采样值数据集以秒脉冲同步方式接入到数字化故障录波器中,随机发生丢包、错序、重复错误;要求录波器能实时检出这些异常并给出告警;通告告警事件标签可提取对应时段的原始报文数据。

9) 开关量变位检查要求。给数字化故障录波器发送开关量变位信号,GOOSE 虚拟触点闭合或断开 2ms,录波器能可靠启动并记录相关信息。

另要求:数字化故障录波器在动态模拟系统整组测试时,系统异常、故障过程中能完整记录全部故障和振荡数据、数据记录内容正确;波形、GOOSE 信息、开关量节点、制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)等信息是否有异常或丢失;各时间段的采样频率、数据类型、记录长度、总录波时间、时间零坐标误差都符合标准要求;大短路电流记录能力要求首次短路第 1 峰值、第 1 峰值瞬时值测量误差符合标准要求,其中瞬时值测量误差=(测量电流峰值-系统短路电流峰值)/(系统短路电流工频有效值 $\times\sqrt{2}$);故障测距要求在线路 0、200、400 km 处模拟单相金属性接地、相间金属性短路、单相经 10 Ω 电阻接地、相间经 10 Ω 电阻短路接地时能判相正确,测距误差符合标准要求。

3 数字化故障录波器试验中遇到问题的分析

1) 在大电流短路时,数字化故障录波器显示波形在波峰部分会发生畸变,如图 5 所示。从上到下依次为某电压互感器(TV37)三相电压、某电流互感器(ECT7)三相电流、某电流互感器(ECT17)三相电流及零序电流。

问题分析:数字化故障录波器输出的文件是暂态数据通用格式(common format for transient data exchange, COMTRADE)的。标准 COMTRADE 文件中记录采样值是用 16 位数值表示,数字化故障录波器接收来自 MU 的采样值是用 32 位数值表示

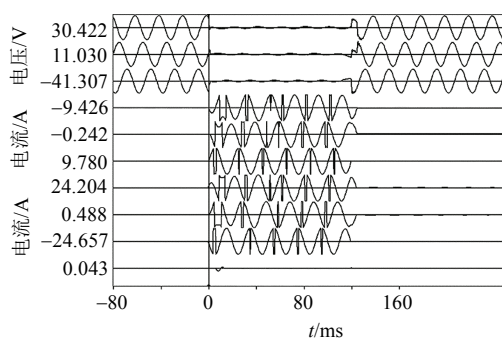


图5 数字化故障录波器在试验中波形异常截图
Fig. 5 The abnormal waves recorded by digital fault recorder

的。因此在形成标准 COMTRADE 格式文件时,数字化故障录波器对收到的 32 位的采样值通过一个系数折算到 16 位采样值后再进行记录。这个折算系数是由定值中设置的量程和额定值计算得到的,当超出量程范围时,记录数据溢出。从而导致在显示超出量程部分的波形时发生畸变。

解决方法:数字化故障录波器在设置量程范围时需放大可靠性系数倍数,充分考虑来自 MU 的采样值与标准 COMTRADE 文件采样值之间的折算系数,从而避免出现数据溢出情况。

2) 合并单元数据无效时,数字化故障录波器显示假波形,如图 6 所示。

问题分析:数字化故障录波器在处理未收到 MU 报文时的处理机制是将对应位置的采样值以缓冲区内数值写入记录文件中表示该段数据无效,而表现在记录文件中就是波形在无采样报文时波形以一定周期的重复显示相同的波形。

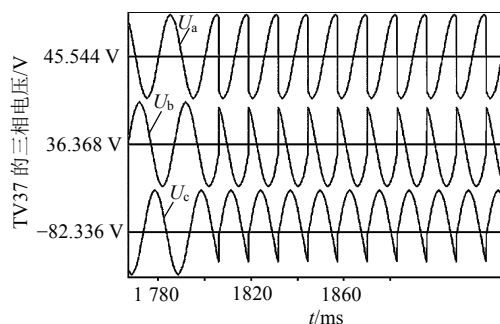


图6 MU 通信中断时对应通道记录的波形
Fig. 6 The waves recorded on the channels when interruption of communication with corresponding MU happened

解决方法:当 MU 通信中断时数字化故障录波器应给出硬件告警提示,并在生成的录波文件中标识无效采样部分;建议在分析软件中不绘制无效采样部分或将该部分采样值均写为 0 值。

3) 合并单元失步后,数字化故障录波器不能反映合并单元输出数据的真实情况。

原因分析:所接入多个合并单元失步时,各合并单元间的采样计数标号差别很大时,受录波器记录波形描点绘图机制的限制,数字化故障录波器会出现不能真实反映合并单元传输的采样值的情况。

4 结语

1) 本文通过对数字化故障录波器的检测试验和数字化变电站系统性试验中对数字化故障录波器的测试试验,提出了全面的测试项目,重点分析了针对数字化故障录波器的性能测试方法,为故障

录波器检测要求行业标准的更新提供试验依据。

2) 通过性能测试和系统性测试, 数字化故障录波器数字采样与录波器模拟量采样相比, 易出现波形畸变、显示假波形等问题, 本文列举了3个典型问题的分析, 供用户和厂家参考。

3) 针对合并单元失步后, 数字化故障录波器不能反映合并单元输出数据的真实情况, 建议数字化故障录波器厂家针对过程层数字采样的特点, 结合现有数字化故障录波技术和报文分析技术, 研究新的数据流处理机制, 转变记录方式, 实现全面灵活地适用于数字化变电站的数字化故障录波器。

参考文献

- [1] 张之哲, 李兴源, 程时杰, 等. 智能电网统一信息系统的框架、功能和实现[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 1-7.
Zhang Zhizhe, Li Xingyuan, Cheng Shijie, et al. Structures, functions and implementation of united information system for smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 1-7(in Chinese).
- [2] 樊唯钦. 数字化变电站的发展与应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 97-100.
Fan Weiqin. Development and application of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 97-100(in Chinese).
- [3] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 2-35.
- [4] 詹荣荣, 周春霞, 李仲青, 等. 浙江数字化变电站过程层数字采样动模试验报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [5] 肖辉耀, 姚建刚, 章建, 等. 电网安全评估体系分析[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 90-96.
Xiao Huiyao, Yao Jiangan, Zhang Jian, et al. Analysis on power grid safety assessment system[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 90-96(in Chinese).
- [6] 于军, 熊小伏, 张媛, 等. 数字化变电站保护系统新型可靠性措施及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 28-33.
Yu Jun, Xiong Xiaofu, Zhang Yuan, et al. Research and simulation on new reliability measures for digital substation protection system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 28-33(in Chinese).
- [7] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2009年国家电网公司继电保护装置运行统计与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 189-193.
Shen Xiaofan, Shu Zhihuai, Liu Yu, et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relays of state grid corporation of China in 2009[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 189-193(in Chinese).
- [8] 汪可友, 张沛超, 郁惟镛, 等. 应用 IEC 61850 通信协议的新一代故障信息处理系统[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 55-58.
Wang Keyou, Zhang Peichao, Yu Weiyong, et al. Research on a new fault information processing system using IEC 61850 communication protocol[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 55-58(in Chinese).
- [9] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波, 等. 基于 IEEE 1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.
Zhao Shanglin, Hu Minqiang, Dou Xiaobo, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102(in Chinese).
- [10] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
Huang Can, Xiao Chifu, Fang Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10(in Chinese).
- [11] 姚东晓, 周有庆, 高乐, 等. 基于 IEC 61850 的变电站间隔层保护监控设备硬件设计框架[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 84-88.
Yao Dongxiao, Zhou Youqing, Gao Le, et al. IEC 61850 based design framework of hardware for protection and monitoring devices of bay level in substation automation system[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 84-88(in Chinese).
- [12] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 基于特征挖掘的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 16-22.
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, et al. Method of power grid fault diagnosis based on feature mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 16-22(in Chinese).
- [13] 董新洲, 丁磊, 刘琨, 等. 基于本地信息的系统保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 7-13.
Dong Xinzhou, Ding Lei, Liu Kun, et al. System protection based on local information[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 7-13(in Chinese).
- [14] 杨永标, 丁孝华, 黄国方, 等. 基于 IEC 61850 的数字化故障录波器的研制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 58-60.
Yang Yongbiao, Ding Xiaohua, Huang Guofang, et al. Development of a digital fault recorder based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 58-60(in Chinese).
- [15] 周泽昕, 周春霞, 董明会, 等. 国家电网仿真中心动模实验室建设及继电保护试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 50-55.
Zhou Zexin, Zhou Chunxia, Dong Minghui, et al. Construction of dynamic simulation lab in SGCC simulation center and research of protective relay test[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 50-55(in Chinese).
- [16] 周春霞, 詹荣荣, 姜健宁, 等. 500 kV 数字化变电站动模试验研究[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 90-92.
Zhou Chunxia, Zhan Rongrong, Jiang Jianning, et al. Dynamic simulation test for 500 kV digital substation[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 90-92(in Chinese).
- [17] 吴俊兴, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 IEC61850 标准的智能电子设备及变电站自动化系统的测试[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 70-74.
Wu Junxing, Hu Minqiang, Wu Zaijun, et al. Testing of IEC 61850 based intelligent electronic device and substation automation system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 70-74(in Chinese).



项灿芳

收稿日期: 2011-05-24.

作者简介:

项灿芳(1976), 女, 高级工程师, 从事电力系统自动化和继电保护领域的研究工作;

周泽昕(1969), 女, 高级工程师, 从事电力系统自动化和继电保护领域的研究工作;

周春霞(1965), 女, 高级工程师, 从事电力系统自动化和继电保护领域的研究工作;

艾淑云(1969), 女, 工程师, 从事电力系统自动化和继电保护领域的研究工作。

(责任编辑 李兰欣)