

DOI: 10.7667/PSPC201854

模拟式合并单元测试仪的设计

张喜玲¹, 蒋冠前^{1,2}, 马跃军¹

(1. 许昌开普电气研究院, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着模拟式合并单元在智能电网中越来越多的应用, 市场亟待出现一款方便快捷的合并单元测试工具。首先分析了当前市场上模拟式合并单元测试仪的缺点, 接着对模拟式合并单元测试仪进行了总体设计、硬件设计和软件设计, 最后对测试仪进行了试验和验证。结果显示所设计的测试仪, 具备自动测试功能, 能够提高检测效率、缩短测试周期, 并且可以提高测试的可靠性和测试结果记录的准确性。

关键词: 智能变电站; 合并单元; 自动测试

Design of an analog merging unit tester

ZHANG Xiling¹, JIANG Guanqian^{1,2}, MA Yuejun¹

(1. Xuchang Ketop Electrical Research Institute, Xuchang 461000, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the wide use of analog merging units in smart grids, the market is in urgent need of a convenient and quick merging unit test tool. Firstly, the paper analyzes the shortcomings of the analog merging unit tester in the present market. Then, it carries out the overall design, hardware design and software design of the analog merging unit tester. Finally, the test device is tested and verified. It proves that the tester designed in this paper has automatic test function, which enhances the detection efficiency and shortens the test period, and also can improve the reliability of the test and the accuracy of the record of the test results.

Key words: intelligent substation; merging unit; automatic testing

0 引言

智能变电站分为过程层、间隔层和站控层^[1-2], 合并单元属于过程层设备。智能变电站中一般采用新型光电式互感器或电子式互感器等数字化电气量测系统来采集电流、电压等电气量^[3-6], 并通过数字和模拟两种方式输出。自 2011 年以来, 由于电子式互感器事故频发, 国家电网已经暂停了电子式互感器的采购招标活动, 直到 2015 年, 智能变电站改造几乎全部采购模拟式合并单元。目前国内模拟式合并单元生产企业近 30 家, 型号达到 100 种以上。因此, 模拟式合并单元测试仪不仅来自电网公司的巨大质量保证需求, 也存在厂家的大量试验验证需求。

得益于我国近年来数字化及智能变电站项目的大规模发展, 合并单元在我国得到了广泛应用, 且中国已经基本主导了其最新发展。国外目前对模拟量输入式合并单元的应用和测试还比较少, 对于该类性能考核还缺少全面细致的测试方案和专

业的测试工具。2013 年以来, 少数适用于国外的模拟式合并单元产品均选择来中国的专业测试机构对装置性能进行摸底测试。

国内目前已有不少学者对合并单元或合并单元测试仪技术进行研究^[7-16], 也有部分厂家开发出了适用于模拟量输入式合并单元准确度测试的合并单元测试仪^[17-18], 可以从模数转换时的幅值误差、相位误差以及谐波含量误差等方面对模拟式合并单元的传变准确度进行考核。但总体来说, 目前市场上存在的合并单元测试仪普遍存在以下缺点:

- 1) 仅能对单一模拟量通道进行测试;
- 2) 测试项目单一;
- 3) 采用手工或半自动的测试方式;
- 4) 数据处理繁杂困难。

合并单元测试项目复杂、配置繁琐、数据处理繁杂, 没有自动化的手段辅助时, 无法快速有效地对数据进行分析, 因此一套稳定、可靠、具备自动测试功能的合并单元测试仪就显得弥足珍贵。

1 总体架构设计

本文设计的测试仪总体结构主要包括数据采集模块、时间同步模块、高性能控制器、结果显示、指令与人机操作模块、存储模块几个部分。其中时间同步部分负责接收外部的时间同步信号,完成测试仪本身的时间同步。数据采集部分负责对外部接入的模拟量和数字量信号进行同步采样。控制器部分负责计算模拟量和数字量之间的误差,并调用自动化测试程序完成合并单元稳态性能的测试。

该测试仪总体设计优点:采用模块化设计,模块化设计具有通用性、互换性和相对独立性的特点,各模块可以并行设计,减少了设计周期,也便于量产时元件的型号更换和升级。测试仪的模块构成如图1所示。

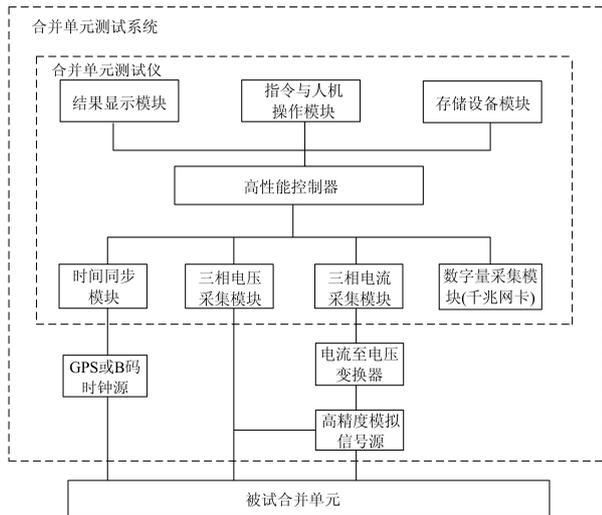


图1 总体设计图

Fig. 1 Overall design

1.1 数据采集模块

测试仪的数据采集模块由模拟量采集模块和数字量采集模块分别完成。模拟量采集模块是两块美国NI公司的高精度模拟量采集卡(NI PXI e-4300),具备±300 V大电压范围的差分电压采集,精度达到0.1%,并且具备外部触发采集能力。模拟量信号来自高精度模拟信号源,其中的电压信号直接接入装置的三相电压采集模块,由于采集卡采用的是电压信号,电流信号则通过电流/电压转换器转换成电压信号,然后接入装置的三相电流采集模块。

数字量采集模块是一个千兆以太网卡,其数字信号则来自被测合并单元。

1.2 时钟同步模块

本文设计的测试仪时钟同步模块对外负责接收

GPS或者主时钟的IRIG-B(DC)时间同步信号完成装置的同步对时,对内则为模拟量采集和数字量采集模块提供同步采样脉冲。

时钟同步模块采用美国NI公司NI PXI-6683H芯片,该时钟模块具备高时间精度的GPS信号解析能力和B码接收解析能力,板载晶振达到1 ppm精度。这些模块可以根据编程的未来时间和基于同步系统时间的标识输入事件生成触发和时钟信号,还能够在一台PXI机箱内部或多台机箱之间由时钟信号触发,为PXI系统提供了一个多设备同步方式。

1.3 高性能控制器

该测试仪的控制器采用高性能控制器,负责数据的处理和分析。控制器首先利用时钟同步模块的同步采样脉冲驱动模拟量和数字量采集模块,完成对模拟量和数字量数据的同步采样,其次采用采样0序号报文的时刻在时序上比较模拟量波形和数字量波形,最后按照设定的测试序列运行自动化测试程序,获得稳态性能各测试项目的试验结果。

1.4 结果显示、存储以及人工操作模块

结果显示模块、存储设备模块和指令与人工操作模块负责将控制器运行测试程序后获得的试验结果进行实时显示和存储,同时统计数据 and 结果判定信息提供给操作人员。

2 软件设计

测试仪的软件也采用模块化设计,软件系统如图2所示。

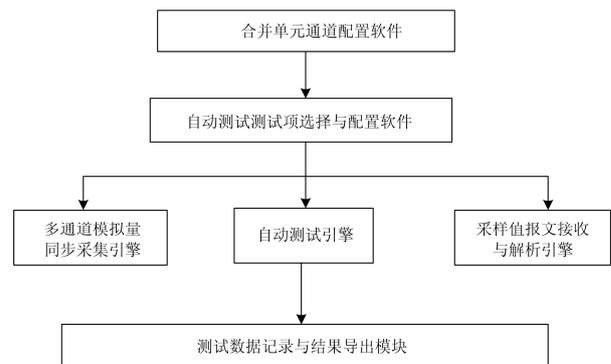


图2 软件系统图

Fig. 2 Software system diagram

2.1 合并单元通道配置软件

合并单元通道配置软件功能如下:

- 1) 读取或编辑被测合并单元的采样值报文(SV)通道配置。
- 2) 按照自动测试要求对各个通道进行必要的

属性注释和分类。

3) 可以导入、修改和保存配置文件。

2.2 自动测试案例选择与配置软件

自动测试案例选择与配置软件功能如下：

1) 根据测试方案中对测试案例的要求，选择测试大类，如标准大气条件下的采样值精度测试等。

2) 根据测试方案中对测试案例的要求选择测试项小类，如保护电压 57.73 V 等。

3) 配置测试参数，如电压值、电流值、谐波等。

4) 可以导入、修改和保存配置文件。

2.3 多通道模拟量同步采集引擎

多通道模拟量同步采集引擎功能如下：

1) 产生与外时钟同相位的高精度采样时钟。

2) 多通道模拟量的同步触发采集。

3) 多通道模拟量采集数据读取。

4) 标记每一个模拟量的时间戳。

2.4 采样值报文接收与解析引擎

采样值报文接收与解析引擎功能如下：

1) 快速抓取以太网报文并过滤出采样值报文。

2) 准确解析采样值报文的内容。

3) 对丢包等异常情况进行快速判断和筛查。

4) 标记每一个采样值报文中数字量的时间戳。

2.5 自动测试引擎

自动测试引擎功能如下：

1) 自动管理自动测试流程。

2) 高效抓取多通道模拟量同步采集引擎和采样值报文接收与解析引擎中的有效数据。

3) 实现针对各种测试项目的核心算法，完成各种运算处理功能。

自动测试引擎过程流程图如图 3 所示。

2.6 测试数据记录与结果导出模块

测试数据记录与结果导出模块功能如下：

1) 获得自动测试引擎中产生的测试数据，生成数据记录文件。

2) 在测试界面展示当前测试结果与统计结果。

3 试验与验证

本文所研究的关键技术是模拟式合并单元测试仪的自动测试。对测试工具本身的验证应包括两方面：一是数据采集精度的验证，二是合并单元自动测试功能的验证。试验结果表明，无论合并单元测试仪的模拟通道和数字精度通道，都能满足允许误差范围。自动测试程序也能正常运行。

3.1 数据采集精度校准

在进行数据采集精度的验证时，可以通过高精

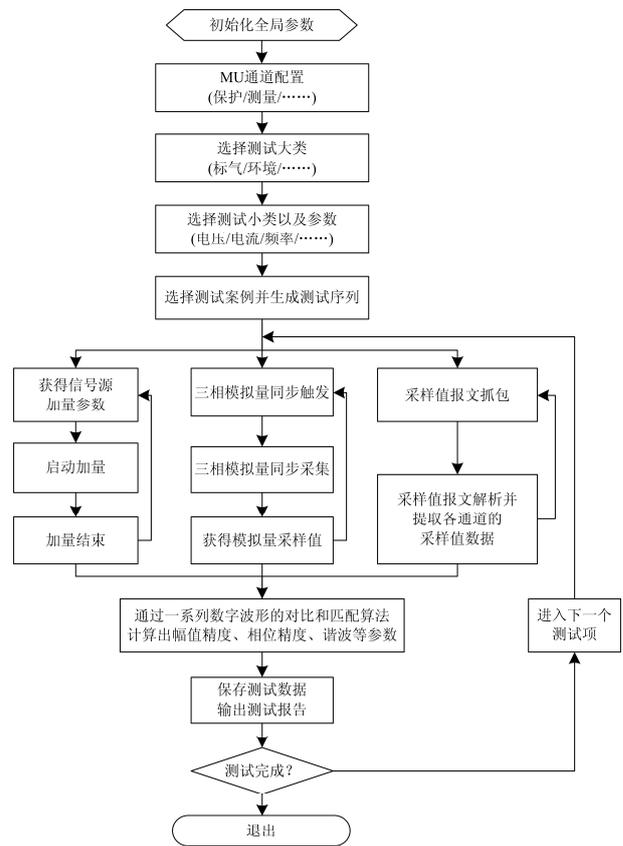


图 3 自动测试过程流程图

Fig. 3 Flow chart of automatic test process

度模拟量和数字量输出源为合并单元测试仪提供原始数据输入，经合并单元测试仪采集后，记录合并单元测试仪显示的采集数据，与原始数据进行比较，计算合并单元测试仪的数据采集误差。

数据采集试验数据分别见表 1—表 6。

表 1 模拟通道交流电压测量

Table 1 AC voltage measurement of analog channel

频率/Hz	标准值/V	指示值/V	误差/V	允许误差/V	结论
50	1.150 0	1.151	0.001 0	±0.005 8	P
50	2.890 0	2.892	0.002 0	±0.014 5	P
50	57.730 0	57.741	0.011 0	±0.288 7	P
50	69.290 0	69.306	0.016 0	±0.346 5	P
50	86.610 0	86.631	0.021 0	±0.433 1	P
50	109.710 0	109.742	0.032 0	±0.548 6	P
45	57.730 0	57.752	0.022 0	±0.288 8	P
55	57.730 0	57.742	0.012 0	±0.288 7	P

3.2 自动测试试验

本试验以某厂家合并单元作为被试合并单元，来验证合并单元测试仪的自动测试功能。

首先应进行装置的信息建模，信息建模时需要选取或输入被试装置的名称、型号、电压等级、报

表 2 模拟通道交流电流测量

Table 2 AC current measurement of analog channel

频率/Hz	标准值/A	指示值/A	误差/A	允许误差/A	结论
50	0.250 0	0.250	0.000 0	±0.000 3	P
50	1.000 0	1.000	0.000 0	±0.001 0	P
50	2.000 0	2.001	0.001 0	±0.002 0	P
50	3.000 0	3.001	0.001 0	±0.003 0	P
50	4.000 0	4.001	0.001 0	±0.004 0	P
50	5.000 0	5.002	0.002 0	±0.005 0	P
50	6.000 0	6.003	0.003 0	±0.006 0	P
45	5.000 0	5.002	0.002 0	±0.005 0	P
55	5.000 0	5.002	0.002 0	±0.005 0	P

表 3 模拟通道频率测量

Table 3 Frequency measurement of analog channel

标准值/Hz	指示值/Hz	误差/Hz	允许误差/Hz	结论
45.000	45.002	0.002	±0.048	P
50.000	50.000	0.000	±0.050	P
55.000	54.999	-0.001	±0.055	P

表 4 数字通道交流电压测量

Table 4 AC voltage measurement of digital channel

频率/Hz	标准值/V	指示值/V	误差/V	允许误差/V	结论
50	1.15	1.150	0.000 0	±0.005 8	P
50	2.89	2.891	0.001 0	±0.014 5	P
50	57.73	57.742	0.012 0	±0.288 7	P
50	69.290 0	69.303	0.013	±0.346 5	P
50	86.610 0	86.625	0.015 0	±0.433 1	P
50	109.710 0	109.731	0.021 0	±0.548 6	P
45	57.730 0	57.747	0.017 0	±0.288 8	P
55	57.730 0	57.745	0.015 0	±0.288 7	P

表 5 数字通道交流电流测量

Table 5 AC current measurement of digital channel

频率/Hz	标准值/A	指示值/A	误差/A	允许误差/A	结论
50	0.250 0	0.250	0.000 0	±0.000 3	P
50	1.000 0	1.000	0.000 0	±0.001 0	P
50	2.000 0	2.001	0.001 0	±0.002 0	P
50	3.000 0	3.001	0.001 0	±0.003 0	P
50	4.000 0	4.001	0.001 0	±0.004 0	P
50	5.000 0	5.001	0.001 0	±0.005 0	P
50	6.000 0	6.002	0.002 0	±0.006 0	P
45	5.000 0	5.002	0.002 0	±0.005 0	P
55	5.000 0	5.002	0.003 0	±0.005 0	P

表 6 数字通道频率测量

Table 6 Frequency measurement of digital channel

标准值/Hz	指示值/Hz	误差/Hz	允许误差/Hz	结论
48.000	48.001	0.001	±0.048	P
50.000	50.000	0.001	±0.050	P
55.000	55.001	0.001	±0.055	P

告号等信息对装置进行建模, 自动测试软件根据不同装置的建模信息对测试数据进行归档, 同时方便试验后期的数据筛选和厂家信息查询工作。测试仪装置信息建模参数配置如图 4 所示。



图 4 装置信息建模图

Fig. 4 Modeling diagram of device information

1) 数字通道建模

装置的信息建模完成后, 需要对输出 SV 采样值报文中的数字通道进行建模, 为每一个通道分配相关信息, 包括通道名称、模拟量类型、测试属性(测量级或保护级)、数据来源(级联或自采)及双 A/D 类型。同时, 对所有的数字通道进行分组处理, 实现分类考核。测试仪数字通道建模参数配置如图 5 所示。



图 5 数字通道建模图

Fig. 5 Modeling diagram of digital channel

数字通道建模完成后, 就可以对合并单元的各个测试子项进行配置了。以稳态测试子项为例, 其下面又分为采样值精度、同步精度、频率影响、谐波影响等各分子项。将其一一添加到试验项目中, 保存后生成自动化测试序列, 以便自动测试软件按照测试项中生成的测试序列依次进行测试。测试项目配置如图 6 所示。

信息建模、数字通道建模、测试子项配置完成后, 自动测试模块用于按照配置完成的各项信息选择装置进行考核, 依次进行选定项目的测试, 并在

主界面实时显示被测装置信息、当前测试项、剩余测试项、在测数字通道以及精度相关数据。同时，



图 6 测试项目配置图

Fig. 6 Configuration diagram of test project

能够实现测试结果的自动判定，并与原始波形文件同步存储，方便后期查看与溯源。

当测试项不合格时，测试结果显示红色，便于快速找到不合格项，当测试结果完全正确，则正常显示。测试不合格窗口如图 7 所示，合格窗口如图 8 所示。



图 7 不合格测试结果显示图

Fig. 7 Unqualified test result display



图 8 合格测试结果显示图

Fig. 8 Qualified test result display

测试仪还可以利用其离线处理软件实现对大批量试验数据的自动分析和处理，获得各种统计值，方便后期的报告编写和数据对比工作。

4 结论

本文设计的测试仪具备自动控制信号源产生检测信号量、自动保存测试数据和测试结果显示的功能，不仅能够满足国家电网智能变电站项目和厂家型式试验需求，并且可以提高测试效率，缩短测试周期，从而把检验工程师从繁琐重复的测试项目中彻底解脱出来。

参考文献

[1] 张冉. 智能变电站合并单元性能测试研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHANG Ran. Study on the performance test of the merging unit in the smart substation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[2] 田云杰, 程良伦, 罗晟. 基于 IEC61850 的嵌入式合并单元的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(10): 52-55.
TIAN Yunjie, CHENG Lianglun, LUO Sheng. Research on embedded system merging unit based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(10): 52-55.

[3] 徐丽青, 丁泉, 史志伟, 等. 合并单元的电快速瞬变脉冲群抗扰度分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 108-113.
XU Liqing, DING Quan, SHI Zhiwei, et al. Analysis on electrical fast transient/burst immunity of merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 108-113.

[4] 赵应兵, 周水斌, 马朝阳. 基于 IEC61850-9-2 的电子式互感器合并单元的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 104-106, 110.
ZHAO Yingbing, ZHOU Shuibin, MA Zhaoyang. Research and manufacture of merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 104-106, 110.

[5] 倪益民, 杨松, 樊陈, 等. 智能变电站合并单元智能终端集成技术探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 95-99.
NI Yimin, YANG Song, FAN Chen, et al. Discussion on integration technology of merging unit and intelligent terminal in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 95-99.

[6] 张明珠, 邹欣洁. 基于 FPGA&ARM9 合并单元的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 84-87.

- ZHANG Mingzhu, ZHOU Xinjie. Development of merging unit based on FPGA&ARM9[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 84-87.
- [7] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
- LI Yingming, ZHENG Tuofu, ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 93-98.
- [8] 梁晓兵, 周捷, 杨永标, 等. 基于 IEC 61850 的新型合并单元的研制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 85-89.
- LIANG Xiaobing, ZHOU Jie, YANG Yongbiao, et al. Development of a new type of merging unit based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 85-89.
- [9] 胡国, 唐成虹, 徐子安, 等. 数字化变电站新型合并单元的研制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 51-54.
- HU Guo, TANG Chenghong, XU Zian, et al. Development of a new type MU for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 51-54.
- [10] 唐毅, 江波, 李红斌, 等. 数字电能计量系统检定方法综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 372-377.
- TANG Yi, JIANG Bo, LI Hongbin, et al. Survey on the verification methods for digital electrical energy metering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 372-377.
- [11] 樊陈, 倪益民, 沈健, 等. IEEE 1588 在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 55-59.
- FAN Chen, NI Yimin, SHEN Jian, et al. Research on the application of IEEE 1588 in the merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 55-59.
- [12] 牟涛, 任志航, 樊占峰, 等. 基于高性能 FPGA 的合并单元设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 128-132.
- MU Tao, REN Zhihang, FAN Zhanfeng, et al. Realization of the critical technologies merging unit based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 128-132.
- [13] 唐志军. 基于 PI 的合并单元同步校准实用技术[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 165-170.
- TANG Zhijun. Practical technology of synchronization calibration based on PI for merging unit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 165-170.
- [14] 嵇建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110 kV 智能变电站合并单元异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 254-259.
- JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 254-259.
- [15] 李旭, 倪传坤, 李宝伟, 等. 基于自适应采样算法及数据处理的过程层设备时延优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 164-170.
- LI Xu, NI Chuankun, LI Baowei, et al. Optimal design of process level device delay based on self-adaption sampling algorithm and data processing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 164-170.
- [16] 刘晓胜, 庞继伟, 徐殿国, 等. 基于蛛网结构的智能变电站过程层 GOOSE 网组网可靠性与实时性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 1): 245-250.
- LIU Xiaosheng, PANG Jiwei, XU Dianguo, et al. Research on the reliability and real-time of process layer GOOSE network scheme in smart substation based on spider web topology structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S1): 245-250.
- [17] 倪兆瑞, 王延安. 智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 119-124.
- NI Zhaorui, WANG Yanan. Design of field testing instrument for merging unit delay characteristics in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 119-124.
- [18] 欧阳帆, 朱维钧, 陈宏, 等. 变电站合并单元测试设备校验系统及其实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 152-158.
- OUYANG Fan, ZHU Weijun, CHEN Hong, et al. Calibration system for substation merging unit test equipment and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 152-158.

收稿日期: 2018-05-21

作者简介:

张喜玲(1971—), 女, 工科学士, 高级工程师, 从事电力系统控制保护技术研究和标准研究工作; E-mail: zhangxiling@ketop.cn

蒋冠前(1978—), 男, 通信作者, 在读硕士, 工程师, 从事电力系统控制保护技术研究和标准研究工作; E-mail: guanqianj@dlwg.net

马跃军(1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统控制保护技术研究工作。E-mail: 543640028@qq.com

(编辑 葛艳娜)