

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180880

电弧光保护原理分析及其校验测试设备的研发应用

陈新美¹, 魏超², 刘园伟¹, 李杏彬², 刘贵华²

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 南京中凯光电科技股份有限公司, 江苏 南京 210018)

摘要: 通过对电弧光保护原理和相关标准的研究分析, 针对电弧光保护装置的使用特点和标准要求, 设计了电弧光保护装置校验测试设备。设备主要包括 DSP 主控单元、光源输出模块、电流输出模块、开关量输入模块等, 可以用来实现对弧光和电流的定量联动输出, 并对装置动作时间进行精确计时。该装置通过了计量检定机构认证, 并进行了实验室功能测试。测试过程和结果显示, 电弧光保护装置校验测试设备能够在实验室校验条件下, 满足相关标准对弧光保护装置主要技术性能的检定要求。

关键词: 电弧光保护装置; 校验测试设备; 检测认证

Analysis of electric arc flash protection principle and development application of its standard calibration equipment

CHEN Xinmei¹, WEI Chao², LIU Yuanwei¹, LI Xingbin², LIU Guihua²

(1. Xuchang Ketop Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. Nanjing ZONKA Optronics Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract: Based on the research and analysis of the arc flash protection principle and related standards, and aiming at the applied characteristics and standard requirements of arc flash protection device, the calibration equipment is designed. It mainly includes DSP control unit, light output module, current output module, and switch input module, which can be used to realize the quantitative linkage output of arc light and current and accurately timing the electric arc protection device's action time. The calibration equipment has passed the certification of metrological verification institutions and has carried out laboratory function tests. The test process and results show that the calibration equipment for arc flash protection device can meet the calibration requirements of relevant standards on main technical performance under the laboratory calibration conditions.

This work is supported by Special Funding Project for Henan Province Scientific and Technological Enterprise Cultivation (Science and Technology Little Giant) in 2017 (No. KPJJ-201701) and Emerging Industry Fund in Nanjing City (No. 2017NRC09197).

Key words: arc protection device; calibration equipment; calibration and certification

0 引言

电弧光保护装置采用弧光检测或弧光和过电流双判据原理来实现对中低压开关柜母线故障的保护, 能够快速检测并切除母线故障, 近年来已经在变电站得到应用和验证^[1-3], 通过开展相关研究和实验^[4], 已逐步形成一系列相关配套标准^[5-6]。目前市场上的继电保护测试仪只能模拟输出故障电流, 为

了对电弧光保护装置进行测试, 通常用强光手电筒照射模拟短路弧光^[7], 不能真实反映弧光保护装置的动作逻辑, 无法对电弧光保护装置的功能和性能进行定量检验, 因此有必要研制一种能够联动输出定量弧光和故障电流的校验设备, 对弧光保护装置进行统一认证。

1 电弧光保护装置的研究及原理分析

对于没有安装快速保护的中低压母线, 当出现母线或开关柜内部故障时, 电弧将产生巨大的闪光、冲击波和热量^[8], 由于后备保护延时会导致单组或多组开关柜严重损坏甚至爆炸^[9]。对于开关柜内部电

基金项目: 2017年河南省科技型企业培育(科技小巨人)专项资金项目资助(KPJJ-201701); 南京市新兴产业基金项目资助(2017NRC09197)

弧的检测有多种方法^[10], 相对于声波^[11]和射频^[12-13]等间接电弧检测方法, 直接对电弧光产生的强光进行检测的电弧光保护方法可以快速准确地判定母线电弧故障, 具有装设简便、成本较低的特点, 能够在电弧发展造成重大损失之前快速切除故障^[14]。随着电力系统保护和控制技术的快速发展, 新型检测技术的应用可以最大限度地减小母线故障对设备的损害, 提高供电可靠性, 使人身伤亡及设备损害降至最低。

当前市场上的电弧光保护装置的原理基本都是弧光和过电流检测^[15-18], 如图 1 所示。动作判据为故障时产生的两个条件, 即弧光和电流增量。当同时检测到弧光和电流增量时系统发出跳闸指令, 当仅检测到弧光或者电流增量时发出报警信号, 而不会发出跳闸指令。

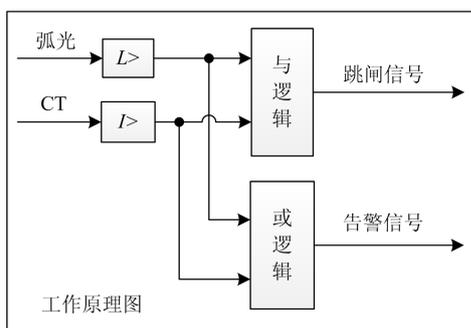


图 1 弧光保护装置动作逻辑

Fig. 1 Operating logic of arc protection device

电弧光保护装置主要由主控单元、辅助单元和弧光传感器几部分组成。主控单元用于管理、控制整套电弧光保护系统。通过检测弧光和电流增量信号, 并对收到的两种信号进行处理、判断。在满足跳闸条件时, 发出跳闸指令以切除故障。主控单元的跳闸及报警信号可根据不同母线结构和运行方式编程, 选择跳闸逻辑。此外主控单元根据弧光传感器或弧光单元输入的信号, 能准确地判断和显示故障点位置。辅助单元包括弧光单元和电流单元等。当主控单元弧光输入路数小于实际需求时, 可使用弧光单元进行扩展。弧光传感器先将检测到的弧光信号传输到弧光单元, 弧光单元再通过光纤将信号反馈给主控单元。电流单元用于检测三相电流信号, 检测到的电流值作为判据。弧光传感器一般选用无源透视镜式传感器, 主要安装在开关柜内。

目前, 弧光保护广泛安装于 110 kV 变电站中 35 kV、10 kV 开关柜内, 但现实情况中, 由于缺乏弧光保护的校验技术, 缺乏校验规程的指导, 也缺乏专用于弧光保护调试的试验仪器, 不能完全满足

国家标准的要求。本文通过分析弧光保护装置的现场运行状况, 在进一步研究弧光特性、电弧光传感器的校验方法和弧光保护动作时间测试方法的基础上, 研制电弧光保护装置校验设备, 并利用校验设备对各厂家的保护装置是否合格进行检验。为满足现场校验对使用灵活性的要求^[19], 还需要设计便携式弧光保护校验仪, 用以现场检修人员开展弧光保护装置的日常运行维护工作。

2 电弧光保护装置校验测试设备研制

2.1 设备系统需求分析

根据电弧光保护装置组成部分和工作原理, 按照相关标准要求, 电弧光保护装置校验设备须具有弧光和故障电流发生功能, 可以单独或并列运行, 实现弧光单判据和弧光、电流双判据校验试验; 校验设备的弧光强度和电流幅值须在量程范围内连续可调, 可以对电弧光保护装置的弧光阈值和电流阈值进行验证; 弧光和电流需要在时序上进行联动, 从而实现对跳闸动作时间的测试。

2.1.1 弧光光源输出需求分析

如图 2 所示的电弧光谱, 电弧光的能量主要集中在 300~400 nm 的紫外光波段和 500~600 nm 的可见光波段^[20], 中心波长分别为约 330 nm 和约 530 nm; 并且, 电弧光具有在紫外光波段的能量大于其在可见光波段的能量的趋势^[21]。有研究表明, 高压电弧中紫外成分比例更高^[22]。因此校验设备要能够输出强度可调的紫外光或可见光, 通过设置光源的阶跃式或脉冲发光模式, 满足对电弧光保护装置弧光检测灵敏度的测试要求。

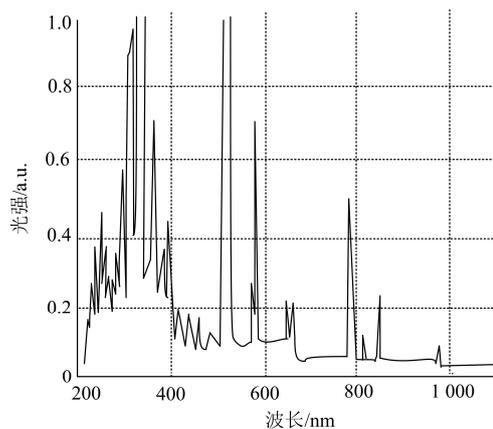


图 2 电弧光谱

Fig. 2 Electric arc spectrogram

2.1.2 交流电流输出需求分析

校验设备至少能够输出一路高精度交流电流,

提供给弧光保护装置校验或测试；具有偏磁谐波发生能力，可叠加谐波分量，且谐波幅值占比可调，以便模拟各种故障条件下的电流输出。

2.1.3 动作时间测试需求分析

开关柜发生内部弧光短路故障产生的短路功率很高，所产生的能量与电弧的燃烧时间、短路电流的平方值、柜体几何尺寸以及所使用的材料等因素有关，其中最主要的因素是短路故障电流及电弧燃烧的时间，电弧能量与有关电弧燃烧的时间的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出，电弧燃烧持续时间超过 100 ms，所释放的能量开始急剧增加，接着各种故障效应对开关设备的电缆、铜排以及钢材造成严重损坏^[22]，所以保护动作时间越快越好。

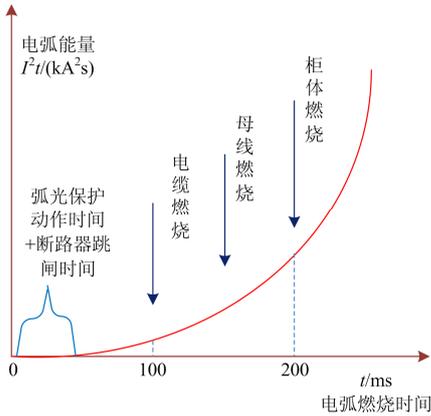


图 3 电弧燃烧时间及其危害示意图
Fig. 3 Burning time and harm of arc

弧光保护装置的动作，可以是弧光单判据，也可以是弧光过流双判据，根据相关标准，两种条件下的最大动作时间要求分别是 10 ms 和 20 ms，因此校验设备对动作时间的测试精度要求设定为 0.01 ms。

2.1.4 人机交互操作需求分析

用户可以通过人机交互界面设定标准校验装置产生相应的通道电流和光源模式、光强度值、电流值、输出模式等，并显示弧光保护装置是否有跳闸动作及动作反应时间。

测试设备需配有通信接口，可以与 PC 通信，通过后台软件进行控制，利用校验模板^[23]简化设置和操作，并自动生成测试报告。

2.2 设备硬件系统设计

电弧光保护装置校验测试设备由 DSP 主控模块、光源输出模块、电流输出模块、开关量输入模块、开关量输出模块、显示及操控模块、开关电源模块、通信模块及上位机操作系统组成，如图 4 所示。

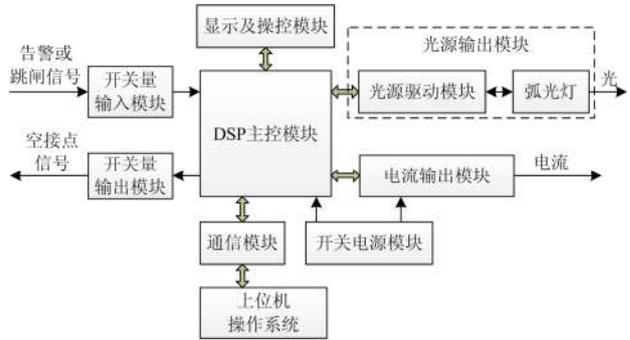


图 4 硬件功能模块示意图
Fig. 4 Hardware function module

其中 DSP 主控模块采用 275 MHz 高速集成浮点数字信号处理，该模块同时控制光源输出模块、电流输出模块输出定量幅值的光和电流，采集开关量输入模块检测的外部开入信号，控制开关量输出模块输出触发控制信号，与显示及操控模块通信实现人机交互，经过通信模块可与上位机操作系统连接。该模块的 Cycle Time 为 4 ns，满足计时的准确度要求。

光源输出模块包括光源驱动模块和弧光灯，其工作原理是光源驱动模块根据 DSP 主控模块发出的数据设定弧光灯的工作电压及电流，光源驱动模块检测弧光灯的光强度并实时反馈给 DSP 主控模块。选用光谱覆盖 200~700 nm 波长范围的弧光灯，通过控制弧光灯的工作电压及电流，使光源可提供的最大亮度不低于 20 000 lm，满足标准要求。

电流输出模块采用大功率集成电流输出模块，最大输出电流为 40 A，由 DSP 主控模块控制电流波形。

DSP 主控模块同时对光源输出模块和电流输出模块进行控制，在弧光过流双判据模式时，光源和电流可以根据时序无间隔同时输出。

开关量输入模块以高速光电耦合器为核心，信号传输时间为 ns 级，独立检测外部开关信号，并将信号传送给 DSP 主控模块，用于计算弧光保护装置动作时间。

开关量输出模块采用继电器接点输出，用于设备联动及测试。

显示及操控模块配置液晶触摸屏显示器和操作按键，用于用户交互操作。

开关电源模块为整个设备系统提供工作电源，输入电源为 AC 220 V，方便实验室和现场测试。

通信模块配有 RJ45 和 RS232 两种通信接口，与后台电脑连接。

2.3 设备软件系统设计

电弧光保护装置校验测试设备的嵌入式软件，

包括控制程序、实时检测程序、计时程序、显示程序和通信协议等部分。软件设计遵循“基础平台+应用平台”理念,采用模块化、层次化、组件化的开发思想,通过C++语言进行模块化的程序设计,主要程序逻辑控制流程如图5所示。

测试设备可以与后台应用软件通信,直接操作设备,并自动生成测试报告,测试报告的内容,包括实验日期时间、光强度值、光模式、输出模式、电流值、动作时间等详细信息。

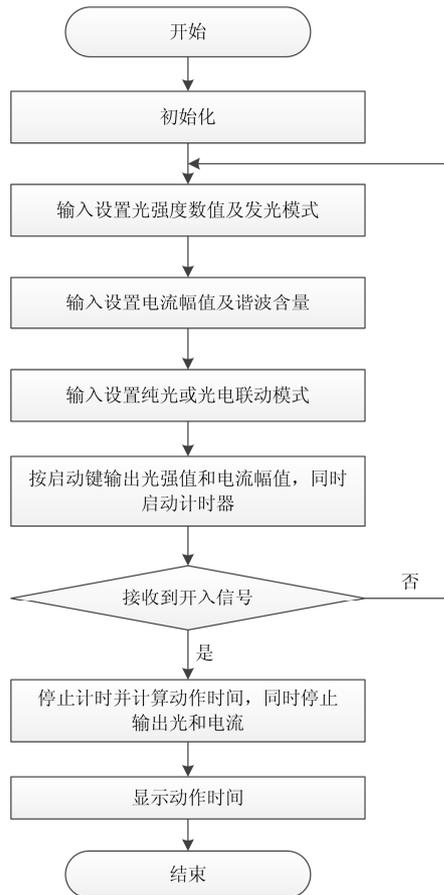


图5 嵌入式软件流程图

Fig. 5 Embedded software flow diagram

3 实验验证

为了验证校验测试设备功能及性能是否满足设计需求,进行了各项实验,包括实验室验证及计量检定机构认证、开关柜现场应用验证。

3.1 校验设备的检验验证

实验室验证及计量检定机构认证包括功能检验、技术指标检测、电磁兼容检验等,经江苏省计量科学研究院检测,均到达要求,证书编号为L2017-0050357。另外校验设备在中国计量院进行了对比测试,测试数据符合要求。

3.2 应用测试

电弧光保护装置标准校验设备按应用可分为实验室校验设备和现场用的便携式校验设备。

2017年11月9日使用实验室弧光保护校验测试设备,对不同厂家的弧光保护装置进行测试,现场见图6。将弧光传感器安装在光源出口,保护装置电流输入端连接至测试设备的电流输出端口,保护装置的跳闸或报警输出端连接至测试设备的开入量输入端口。首先利用光源单独输出进行弧光保护装置报警阈值的测试,动作阈值要在标准要求范围内,否则是不合格的,然后根据电流阈值,按照标准将校验装置设置为弧光过流双判据模式,输出电流设为电流阈值的两倍,输出光强度设为报警阈值的两倍,启动试验时,光电同时输出,弧光保护装置检测到弧光和电流后发出跳闸信号,跳闸信号被校验测试设备捕获后计算保护装置动作时间,满足标准要求的20ms内动作的保护装置即为合格。



图6 弧光保护装置的实验室校验实物图

Fig. 6 Physical diagram of laboratory verification for arc protection device

图7所示为校验某厂家弧光保护装置时用示波器监测的校验测试设备性能测试波形图。其中,示

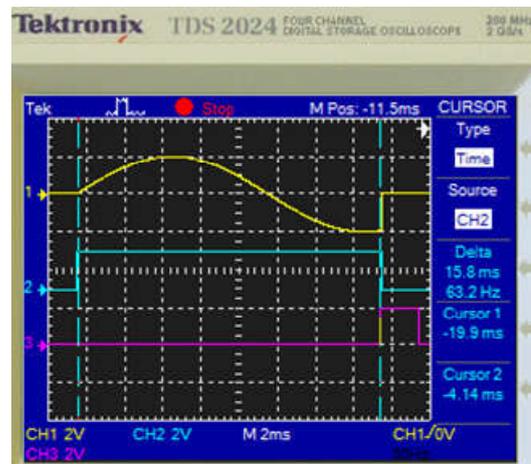


图7 校验测试设备性能测试波形图

Fig. 7 Performance test waveform of arc protection device

波器通道 1 为校验设备的电流输出波形, 通道 2 为校验设备的光源输出波形, 通道 3 为校验设备检测到的跳闸信号。

测试时, 电流和光源同时输出, 校验设备开始计时, 接收到跳闸信号后立刻停止电流和光源输出并计算弧光保护动作时间。从示波器记录波形可以测得弧光保护装置的动作为 15.8 ms, 同时校验设备显示动作为 15.89 ms。通过对不同厂家的多台弧光保护装置的相关测试, 校验测试效果均比较理想, 满足设计要求。

4 总结

针对电弧光保护装置的使用特点和标准校验要求, 研制了实验室电弧光保护装置校验测试设备。且通过了计量检定机构认证, 并在某电科院及检测机构对不同厂家的多台弧光保护装置进行功能测试, 测试过程和结果显示, 电弧光保护装置校验测试设备能够实现对不同厂家的弧光保护装置进行相关测试, 同时满足不同种类的可见光和紫外光传感器的相关测试要求, 符合弧光保护装置主要技术性能的检定要求。

参考文献

- [1] 万山景, 王坚, 张梓望. 电弧光保护系统配置方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 99-103.
WAN Shanjing, WANG Jian, ZHANG Ziwang. Discussion on configuration of ARC protection system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 99-103.
- [2] 王珏. 大型火电站厂用电系统弧光综合治理[J]. 华电技术, 2018, 40(1): 30-33, 78.
WANG Jue. Comprehensive management method about arc fault in power systems of large thermal power plant[J]. Huadian Technology, 2018, 40(1): 30-33, 78.
- [3] 任亚军, 宁楠. 一起弧光保护动作后的分析[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(1): 71-73.
REN Yajun, NING Nan. Analysis after the arc protection action[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(1): 71-73.
- [4] 张喜玲, 杨慧霞, 蒋冠前. 弧光保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 130-135.
ZHANG Xiling, YANG Huixia, JIANG Guanqian. Study on key technologies of electric arc protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 130-135.
- [5] 弧光保护装置通用技术条件: DL/T 1504—2016[S].
General specification for arc flash protection equipment: DL/T 1504—2016[S].
- [6] 弧光保护装置技术要求: GB/T 14598.302—2016[S].
Specification for arc flash protection equipment: GB/T 14598.302—2016[S].
- [7] 曾宪伟. 分布式弧光保护在箱式模块化变电站中的应用[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(9): 41-43.
ZENG Xianwei. Application of distributed arc protection relay in modularized substation[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(9): 41-43.
- [8] PARISE G, MARTIRANO L, LAURINI M. Simplified arc-fault model: the reduction factor of the arc current[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1703-1710.
- [9] 李玲, 刘成学. 中压开关柜内部故障电弧计算及防护措施[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 131-138.
LI Ling, LIU Chengxue. Calculation and prevention of internal fault arc in medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 131-138.
- [10] 蓝会立, 张认成. 开关柜内部电弧探测法的研究现状及趋势[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 496-499.
LAN Huili, ZHANG Rencheng. Current research and development trends on faults arc detection method in switch cabinet[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 496-499.
- [11] 吴振跃, 肖登明. 新型弧光保护装置的设计[J]. 电气技术, 2014(5): 5-11.
WU Zhenyue, XIAO Dengming. Design of new arc protection device[J]. Electrical Engineering, 2014(5): 5-11.
- [12] KAY J A, HUSSAIN G A, LEHTONEN M, et al. New preemptive arc-fault detection techniques in medium-voltage switchgear and motor controls[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 740-750.
- [13] 周加斌, 陈玉峰, 井雨刚, 等. 特高压变压器磁屏蔽接地线断裂引起局部放电异常的检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 110-115.
ZHOU Jiabin, CHEN Yufeng, JING Yugang, et al. Detection and analysis of abnormal partial discharge caused by the fracture of magnetic shielding ground line in UHV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 110-115.
- [14] KAY J A, KUMPULAINEN L. Maximizing protection by minimizing arcing times in medium-voltage systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1920-1927.
- [15] 刘柱揆, 丁心志, 陈福明, 等. 开关柜电弧故障及其测量方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1345-1349.
LIU Zhukui, DING Xinshi, CHEN Fuming, et al. Research on switchgear arc discharge fault and its measurement[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1345-1349.

- [16] 汪金刚, 林伟, 王志, 等. 基于紫外检测的开关柜电弧在线检测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 38(5): 128-133.
WANG Jingang, LIN Wei, WANG Zhi, et al. Online detecting device for switchgear arc based on ultraviolet detection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(5): 128-133.
- [17] 李丛飞, 陈凡, 鲁雅斌, 等. DPR360ARC 弧光保护系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 125-128.
LI Congfei, CHEN Fan, LU Yabin, et al. Design of arc protection relay system DPR360ARC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 125-128.
- [18] 杨建红, 张认成, 杜建华. 基于多信息融合的故障电弧保护系统的应用研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 194-196.
YANG Jianhong, ZHANG Rencheng, DU Jianhua. Study on application of arcing protective system faults based on multiple information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2007, 43(3): 194-196.
- [19] 田庆生, 刘二勇, 梁仕斌, 等. 配电网电能质量测试系统的设计与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 115-120.
TIAN Qingsheng, LIU Eryong, LIANG Shibin, et al. Design and simulation of power quality testing system for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 115-120.
- [20] 匡红刚, 张占龙. 基于紫外光功率法的电力设备电晕放电检测仪[J]. 现代科学仪器, 2009(4): 36-39.
KUANG Honggang, ZHANG Zhanlong. Corona discharge detector of electric equipment based on UV pulse power[J]. Modern Scientific Instruments, 2009(4): 36-39.
- [21] 刘柱揆, 严跃, 耿开胜, 等. 电弧光强度定量分析及其检测设备的标定方法[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 83-87.
LIU Zhukui, YAN Yue, GENG Kaisheng, et al. Quantitative analysis of arc light intensity and calibration method of its detector[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(8): 83-87.
- [22] VAYNER B, FERGUSON D C. Emission spectra of arc plasmas[M]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2217-2218.
- [23] 耿治, 张建忠, 陈昊. 智能变电站保护装置自动测试系统分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 121-125.
GENG Zhi, ZHANG Jianzhong, CHEN Hao. Research and design of automatic test system for protection device in intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 121-125.

收稿日期: 2018-07-16; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

陈新美(1970—), 女, 工程师, 主要从事继电保护测试技术及标准的研究;

魏超(1982—), 男, 工程师, 主要从事电力仪器仪表及测试设备技术的研究与应用;

刘园伟(1981—), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护专业测试工作。

(编辑 周金梅)