

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190969

## 便携式电弧光保护测试仪的设计及应用

潘本仁<sup>1</sup>, 魏超<sup>2</sup>, 桂小智<sup>1</sup>, 张丽萍<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330000; 2. 南京中凯电气技术有限公司, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 电弧光保护装置已在变电站得到应用和验证, 但目前对已施工完毕的电弧光保护装置的功能和性能缺乏测试设备进行定量检验。为了检测已安装的电弧光保护装置的性能, 通过相关研究, 设计了便携式电弧光保护测试仪。该设备主要包括主控模块、逆变模块、光源发生器、开关量检测模块、上位机软件等。测试仪可以实现输出定量的弧光强度和电流幅值, 并对保护装置动作时间进行精确计时。通过各方面功能测试, 其测试过程和结果显示, 便携式电弧光保护测试仪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; 便携式测试仪; 性能检测; 弧光过流双判据

### Development and application of a portable arc protection tester

PAN Benren<sup>1</sup>, WEI Chao<sup>2</sup>, GUI Xiaozhi<sup>1</sup>, ZHANG Liping<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanchang 330000, China;  
2. Nanjing Zhongkai Electrical Technology Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

**Abstract:** An arc protection device has been applied and verified in a substation. The in-field inspection and verification of the arc protection device lack test equipment. In order to test the performance of the arc protection device, a portable electric arc light protection tester is designed. It mainly includes the main control unit, inverter module, light source generator, switch quantity detection module, management software and so on. These can realize the quantitative linkage output of arc intensity and current amplitude, and measure the protection operation time accurately. The test process and result of the function test show that the portable arc light protection tester can meet the verification requirements of relevant standards for the main technical performance of an arc light protection device.

This work is supported by Science and Technology Special Fund of State Grid Corporation of China (No. 52182017001C) and Governmental Science and Technology Fund of Jiangxi Province (No. 20192BBE50007).

**Key words:** arc protection device; portable tester; performance test; arc overcurrent double criterion

## 0 引言

随着电力系统保护和控制技术的快速发展<sup>[1]</sup>, 新型检测技术的应用<sup>[2]</sup>可以最大限度地减小母线故障对设备的损害。电弧光保护装置能够快速检测并切除中低压开关柜中母线故障, 近年来已经在变电站得到应用和验证<sup>[3-5]</sup>。并且已逐步形成一系列相关配套标准<sup>[6-7]</sup>。但目前市场上的弧光保护装置的可靠性如何, 特别是已经施工完毕的弧光保护装置, 缺乏成熟可靠的测试设备来检测, 可靠性也是大家质疑的问题。目前市场上在现场使用的弧光保护测试

仪, 有的只能模拟输出故障电流, 有的只能模拟弧光, 不能真实反映弧光保护装置的动作逻辑, 无法对施工完毕的电弧光保护装置的功能和性能进行定量检验。本文在大量技术研究和实验的基础上, 开发了一种能够联动输出定量弧光和电流的便携式弧光保护装置测试设备, 运用此设备可以便捷、准确地对弧光保护装置的保护可靠性做出评判, 也方便现场检修人员开展弧光保护装置的日常运行维护工作。

## 1 测试仪需求分析及设计方案

### 1.1 测试仪需求分析

当前市场上的电弧光保护装置, 大多基于弧光和过电流检测的原理<sup>[8]</sup>, 文献[3]对实验室电弧光保

基金项目: 国家电网有限公司科技专项基金项目资助(52182017001C); 江西省政府科技基金项目资助(20192BBE50007)

护装置校验测试设备的需求已经做了详细的分析，包含光源输出需求，电流输出需求，时间测试需求等。与实验室校验设备侧重于高精度及多功能不同，现场测试设备侧重于便携性、实用性。本设计方案采用半导体激光器作为光源，克服了弧光灯光强度不易控制的问题，结合非球面双透镜光路设计，实现了线性可控的弧光强度控制。便携式校验设备在体积和重量上不到实验室校验设备一半，功能上进行精简，不用配置实验室校验设备的开关量输出功能及外部触发功能，只需配置弧光模拟和电流输出，以及动作时间检测功能。

### 1.2 测试仪设计方案

便携式测试仪进行了模块化设计，主要由主机和光源发生器组成，主机包括主控模块、逆变模块、开关量检测模块、显示及操控模块、开关电源模块、通信模块及上位机客户端软件，光源发生器包括光源驱动模块和弧光光源。测试仪光源发生器通过 5 m 长的控制导线连接至主机，光源就可以方便地放到弧光传感器上进行各项功能测试。设计总框图如图 1 所示。

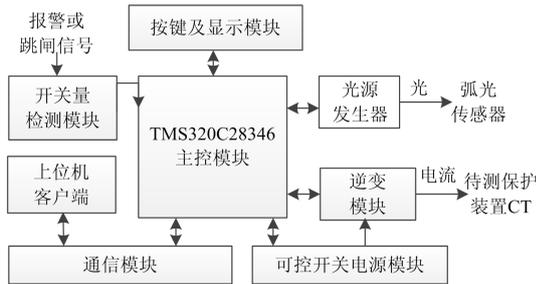


图 1 总体结构框图

Fig. 1 System structure diagram

主控模块控制光源发生器、逆变模块输出定量的光和电流；采集开关量检测模块检测的开关信号；与按键及显示模块通信实现人机交互；经过通信模块可与上位机客户端软件连接。

## 2 测试仪主要硬件设计

### 2.1 便携式测试仪光源设计

#### 2.1.1 便携式测试仪光源的电路设计

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<sup>[9]</sup>。有关金属导体在高压放电时电弧光能量光谱图研究表明：紫铜和铁、紫铜和铝放电弧光主峰在 330 nm 附近，铁和铝放电弧光主峰在 360 nm 附近<sup>[10]</sup>。开关柜内的母线、电缆及紧固件也主要是铜、铝、铁这三种金属。检测弧光时，较大的主波段能量会被第一时间检测

到。目前市场上的大部分紫外光传感器波长范围是 250~420 nm，宽光谱光电探头 300~700 nm。紫外光传感器均包含 330 nm、360 nm 波段。宽光谱光电探头均包含 330 nm、360 nm、530 nm 这三个波段。因此测试仪可选用这三个波段的光源器件来模拟弧光。便携式测试仪光源设计的特别之处在于采用了激光光源。本设计采用激光光源是因为激光器具有以下几个特点：1) 方向性好，散光角度小；2) 瞬时功率大，亮度高；3) 体积小，方便现场使用；4) 光强度有良好的线性曲线；5) 激光的波长有可选性。

半导体激光器的发射波长是由导带的电子跃迁到价带时所释放出的能量决定的，这个能量近似等于禁带宽度  $E_g(eV)$ 。

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g(eV)} (\mu m) \quad (1)$$

决定半导体激光器输出光波长的主要因素是半导体材料和温度。因此测试仪光源可根据弧光的光谱来选择合适的激光器，还可以用温度来控制激光器的波长。本文选取 330 nm、360 nm 和 530 nm 激光器模拟弧光光源，检测时根据现场情况选择使用。半导体激光器的输出光功率  $P$  的计算公式为

$$P = P_{th} + \frac{\eta_d hf}{e} (I - I_{th}) \quad (2)$$

式中： $P_{th}$  为激光器的阈值功率； $I$  为激光器的驱动电流； $I_{th}$  为激光器的阈值电流； $hf$  为光子能量； $\eta_d$  为外微分量子效率； $e$  为电子电荷。 $hf$  和  $e$  为常数， $P_{th}$  很小可忽略。由此可知，输出光功率主要取决于驱动电流  $I$ 、阈值电流  $I_{th}$  以及外微分量子效率  $\eta_d$ 。

由激光器  $P-I$  特性可以得出光功率可以用驱动电流来线性控制。激光器的驱动电路通常采用恒流驱动电路，瞬态的电压或电流尖峰脉冲，以及过压、过流都会损坏激光器，因此驱动电路中还应考虑特殊的抗电冲击措施和保护电路<sup>[11]</sup>。温度影响激光器的输出波长和功率，为了输出稳定的光，必须做好温度控制。

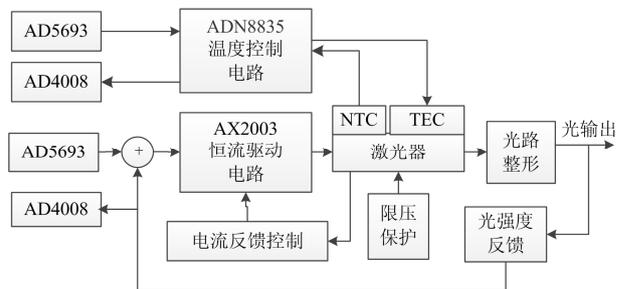


图 2 光源驱动模块电路框图

Fig. 2 Circuit diagram of light source driver module

本文设计的光源驱动模块电路如图 2 所示。控制器控制数模转换器 AD5693 输出设定值来设置驱动电路的输出电流, 电流反馈控制电路把激光器的工作电流反馈给驱动电路, 驱动电路输出高度稳定的电流给激光器。激光器发出的光经光强度反馈电路转换成电信号, 电信号一方面用于控制电流驱动电路的电流大小, 来稳定输出光强度。另一方面还用于 AD4008 模数转换器转换。恒流电路采用台湾亚瑟莱特公司生产的 AX2003 集成芯片来设计。此芯片可以输出 3 A 的驱动电流, 其原理图如图 3 所示。

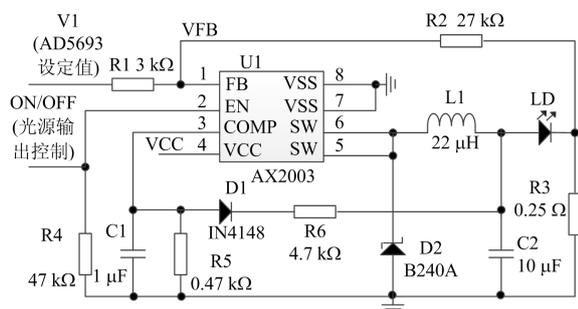


图 3 恒流电路图

Fig. 3 Constant current circuit diagram

图中 R3 是与激光器串联的精密采样电阻, 阻值为 0.25 Ω, 驱动电流  $I_{R3}$  计算公式为

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{V_{FB} - \frac{R_2 \times (V_1 - V_{FB})}{R_1}}{R_3} \quad (3)$$

电压  $V_{R3}$  经过 R16 反馈至芯片 FB 端, 与内部的 0.25 V 基准进行比较, 当  $V_{FB} < 0.25$  V 则增大电流, 当  $V_{FB} > 0.25$  V 则减小电流。主控模块可以控制 AD5662 的输出电压  $V_1$  来控制激光器的驱动电流。AX2003 的 2 脚 EN 端由主控模块控制, 完成光源与电流源的联动输出, 实现弧光电流双判据试验功能。

温度控制电路采用集成芯片 ADN8835 设计, 其是一款集成单芯片 TEC 控制器<sup>[12]</sup>, 通过测量 NTC 热传感器反馈电压, 并使用集成运算放大器作为比例积分微分(PID)补偿器来调理信号, 通过 TEC 驱动电流, 将连接至 TEC 模块的激光二极管的温度建立至可编程的目标温度, 温度的稳定性高达 0.01 °C, 温度设定值由 AD5693 输出出来设定。

### 2.1.2 便携式测试仪光源的光路设计

检测弧光传感器, 要使用分布均匀的光源覆盖其感光部分。本文的光源先经过非球面准直透镜对激光准直, 然后经自由曲面透镜输出。光路示意图如图 4 所示。

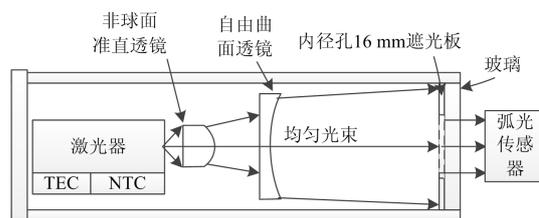


图 4 光路示意图

Fig. 4 Light path diagram

激光器整形有多种方法, 如衍射、折射整形法等<sup>[13]</sup>, 德国 LIMO 公司研制的非球面快轴准直镜, 其准直效果可以达到 mrad 量级<sup>[14]</sup>。自由曲面透镜可将束腰为 10 mm 的准直高斯光束整形为边长为 40 mm 的方形光束, 辐射照度均匀度可以达到 90.5%<sup>[15]</sup>。本文设计出光口的直径为 16 mm, 完全满足目前市面上弧光传感器的测试需求。光源出光口的示意图如图 5 所示。

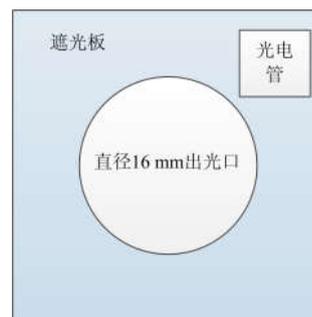


图 5 出光口示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light outlet

光电管把光强度转为电信号送给图 2 的光强度反馈电路, 用于控制及稳定光输出强度。

## 2.2 便携式测试仪电流源设计

便携式测试仪电流源的设计要考虑便携性, 体积小及重量轻。在现场使用时导线较长, 如果电流的输出功率不够, 就不能完成测试。本文经过研究, 级联 H 桥逆变器由于其高可靠性、低谐波、畸变率小、易实现等优点<sup>[16]</sup>, 近几年有了迅速发展, 可以在不同应用场景下应用<sup>[17]</sup>。多电平逆变<sup>[18]</sup>拓扑结构有二极管箝位型、电容箝位型、级联型等<sup>[19]</sup>。本文设计的测试仪采用混合级联<sup>[20]</sup>七电平逆变电路, 逆变模块原理框图如图 6 所示。

主控模块根据设定电流来控制可控电源输出适当的电压作为 H 桥的供电电源。主控模块控制驱动电路输出 PWM 波来驱动级联 H 桥, 输出电流经过 LC 滤波后输出正弦电流。采样电路采集滤波电感电流、负载电流及负载电压, 用于多环反馈控制<sup>[21]</sup>输出稳定的电流。

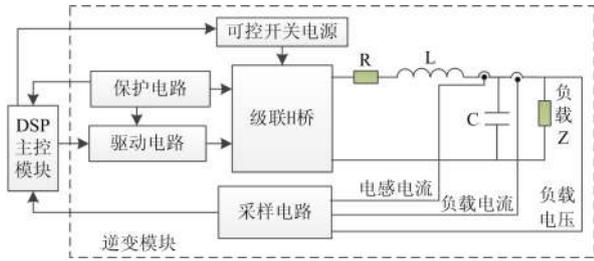


图 6 逆变模块设计框图

Fig. 6 Design block diagram of inverter module

H 桥 IGBT 采用 FGA120T65SPD-F085, 其  $V_{CES}$  是 650 V,  $I_C$  为 120 A, 完全满足输出电流的需求。逆变 H 桥主电路如图 7 所示。

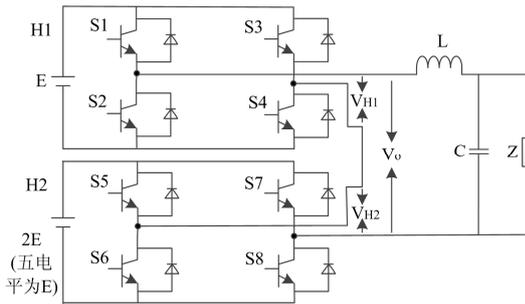


图 7 级联型 H 桥原理图

Fig. 7 Schematic diagram of cascade type H bridge

驱动电路采用 4 片 2ED020I12-F2 集成芯片<sup>[22]</sup>来控制 8 个 IGBT, 芯片是德国 Infineon 公司生产的具有无芯变压器集成的 IGBT 驱动芯片, 此芯片具有良好的驱动及保护功能。驱动芯片最大驱动电流为正负 2 A, 结合 FGA120T65SPD 的  $Q_g$  等参数, 驱动的功率  $P_G$ 、驱动平均电流  $I_{O(AV)}$ 、门极电阻  $R_G$  通过以下公式计算。

$$P_G = E \cdot F_{SW} = Q_G \cdot [V_{G(on)} - V_{G(off)}] \cdot F_{SW} \quad (4)$$

$$I_{O(AV)} = P_G / \Delta U_{GE} = Q_G F_{SW} \quad (5)$$

$$R_G(\min) = V_{G(on)} - V_{G(off)} / I_{G(max)} \quad (6)$$

本文通过控制 2ED020I12-F2 芯片的 6 脚和 16 脚复位端, 起到控制电流输出功能, 实现与光源同步控制功能。

级联 H 桥电路直流电压是 2:1, 两单元 H 桥电路则有 3E, 2E, E, 0, -E, -2E, -3E 这七个电平输出。应用广泛的多电平调制策略有: 载波移相 PWM 调制<sup>[23]</sup>、阶梯波合成调制及混合调制等。为了逆变有良好的性能及效果, 本文采用此混合频率调制方法, 调制原理如图 8 所示。

图中, 载波 1 和载波 3 是频率为  $f_1$  的三角波, 对 H1 单元调制。载波 2 是频率为  $f_2$  的三角波, 对 H2 单元调制。H1 单元在频率  $f_1$  和  $f_2$  之间交替工作,

H2 单元在 E 和 2E 区间内输出频率为  $f_2$  的 PWM 波, 其他区间输出方波。整个电路输出电压  $V_o$  就是频率  $f_1$  和  $f_2$  组合的 PWM 波。混合载波 PWM 方法有效地避免了低压单元存在的功率倒灌问题<sup>[24]</sup>, 且改善了单元之间功率分配不均的现象<sup>[25]</sup>。

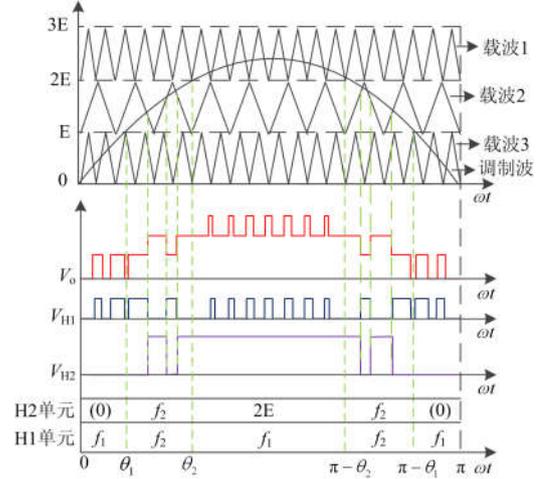


图 8 混合频率调制原理图

Fig. 8 Principle of the hybrid frequency modulation

### 2.3 测试仪主控模块与光源驱动模块和电流输出模块的接口设计

主控模块处理器采用高速 TMS320C28346 微控制器, 其主频为 300 MHz 的内核不仅可提供复杂控制算法执行、实时数据分析, 还可以提供快速中断响应, 以及最小化时延。内部设有 3 个 SCI、2 个 SPI 模块, 1 条 I<sup>2</sup>C 总线, 可针对系统提供便捷的通信管理连接, 设有 9 路 PWM 输出, 88 个多路复用的 GPIO 引脚。所以 TMS320C28346 完全满足测试仪主控模块的设计。光源驱动模块根据主控模块发出的数据设定激光器的工作电流。由主控模块设置逆变模块的输出电流波形及幅度。主控模块同时对光源驱动模块和逆变模块的输出进行控制, 在弧光过流双判据模式时, 光源和电流可以根据时序设置联动输出。测试仪主控模块与光源驱动模块和逆变模块的接口设计如图 9 所示。

### 2.4 测试仪其他模块的设计应用

开关量检测模块以高速光电耦合器为核心, 原理图如图 10 所示。

光电耦合器选用 HCPL2601, 信号传输时间为 ns 级, R1 为限流电阻, R2 和 R3 为上拉电阻, 外部开关信号由 IN 端接入, 输出 OUT 信号连接到 TMS320C28346 的 GPIO, 用于计算弧光保护装置动作时间; 光耦信号接收端和输出端采用隔离电源供电, 具有良好的电隔离效果。

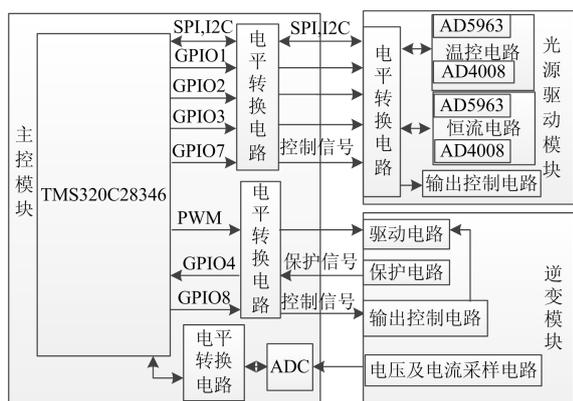


图 9 光源驱动和逆变模块控制原理框图

Fig. 9 Principle block diagram of light source drive and inverter module control

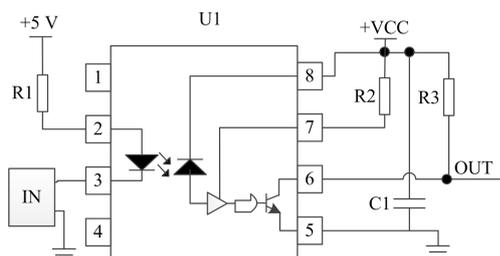


图 10 开关量输入检测原理图

Fig. 10 Schematic diagram of switch input detection

按键及显示模块配置带触摸屏的液晶显示器和轻触按键, 液晶显示器通过串口通信与主控模块实现显示数据传输, 实现用户交互操作、光源及电流源的参数设置、查看保护装置的报警及跳闸时间等; 轻触按键用于启动和停止设备光源及电流源输出。开关电源模块为整个测试仪提供工作电源, 其供电为 AC220V, 方便现场测试使用。

通信采用 RS-232 接口与后台 PC 连接, 通过客户端软件完成自动化的测试过程以及测试报告打印工作。

### 3 测试仪软件设计

便携式电弧光保护测试仪的软件设计, 主要包括下位机软件和上位机软件。

#### 3.1 下位机软件设计

测试仪的下位机软件, 包括液晶显示及按键控制程序、光源与电流源控制程序、信号实时检测程序、计时程序、RS-232 通信程序等部分。主要下位机软件流程如图 11 所示。

#### 3.2 上位机软件设计

电弧光保护测试仪可通过上位机软件直接操作设备。该上位机软件是基于 MFC, 负责与下位机进

行通信, 发送控制指令, 读取下位机的数据, 实现与数据采集设备之间的信息交换<sup>[26]</sup>。上位机软件自动生成测试报告, 报告的内容包含实验的详细信息, 并以.csv 文件格式保存在本地硬盘里, 可以方便调出及查看报告。

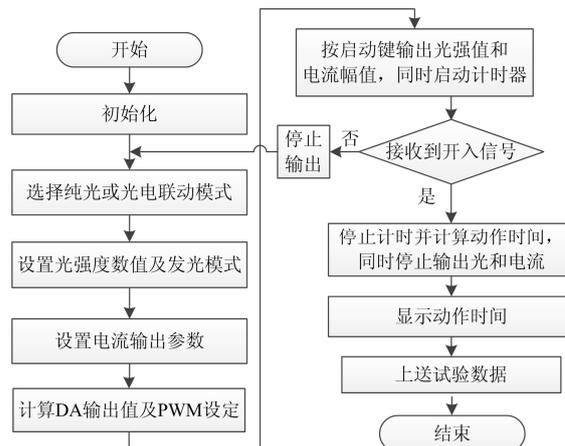


图 11 下位机软件流程图

Fig. 11 Lower computer software flow chart

## 4 实验验证及设备应用

2019 年 5 月 16 日使用便携式电弧光保护测试仪对已安装的不同厂家的多台弧光保护装置进行了测试, 保护装置的电流输入端口及跳闸或报警输出端连接至测试仪的对应端口。将外接式光源对准弧光传感器。检测现场见图 12。

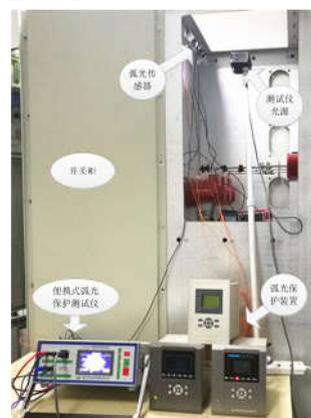


图 12 弧光保护测试仪测试现场实物图

Fig. 12 Test site physical map of arc protection tester

首先用光源做弧光单判据实验, 设置输出定量的光强度, 测试弧光保护装置的报警阈值, 报警阈值在文献[6]要求的 5~20 kLux 或 1~10 mw/cm<sup>2</sup> 范围内的, 即为合格; 然后做弧光过流双判据实验, 测得保护装置电流阈值后, 按照标准设定光强度为报警阈值的两倍, 输出电流设为电流阈值的两倍, 按

启动键启动试验后, 测试仪光电联动输出, 弧光保护装置检测到弧光和电流故障信号后发出跳闸信号, 跳闸信号被测试仪捕获后, 测试仪计算保护装置动作时间, 动作时间在标准要求的 20 ms 内的即为合格。

图 13 所示为测试弧光保护装置时, 用示波器监测的测试仪信号波形图。

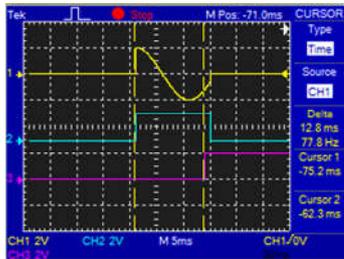


图 13 测试波形图

Fig. 13 Test waveform

如图 13, 示波器通道 1 是测试仪的电流输出波形, 通道 2 是测试仪的光源输出波形, 通道 3 是测试仪检测到的跳闸信号。从图中可以看出, 测试仪电流和光源联动输出后开始计时, 接收到保护装置的跳闸信号后, 立刻停止输出。从示波器记录波形可以测得弧光保护装置的动作时间为 12.8 ms, 同时测试仪显示动作时间为 12.78 ms。经多次测试, 测试结果都很稳定, 测试仪满足设计要求。

为了进一步验证测试仪的功能及性能, 进行了实验室验证及计量检定机构认证, 其包括技术指标、功能、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 L2019-0056829, 并在检测院做了对比测试, 测试结果均满足要求。主要检测技术指标及功能测试表格如表 1 所示。

表 1 主要技术指标及功能测试表

Table 1 Main technical index and functional test table

主要功能	测试项目	显示值	测得值
530 nm 光源输出	光强度/	4 000	3930
	Lux	12 000	11 890
		20 000	19 860
360 nm 光源输出	光功率/	2 000	1 950
	( $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ )	6 000	5 860
		10 000	9 920
330 nm 光源输出	光功率/	2 000	1 930
	( $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ )	6 000	5 820
		10 000	9 890
交流电流 输出	幅值/A	1	1.000 6
		5	5.002 6
		40	40.023
时间测试	时间/ms	1	1.001
		10	10.008

## 5 结论

通过分析电弧光保护装置的使用特点和标准校验要求, 设计了便携式电弧光保护测试仪。通过实验及验证, 便携式测试仪能够实现对已安装的弧光保护装置进行性能测试, 判断保护装置是否可以起到良好的保护作用, 并对弧光保护装置的防误动性能做出评估。确保弧光保护装置具有良好的保护性能, 不仅可以提高供电可靠性, 而且还可以最大限度地减小电弧光对人身及设备的损害, 保障设备和财产安全。

## 参考文献

- [1] 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(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 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.
- [3] 陈新美, 魏超, 刘园伟, 等. 电弧光保护原理分析及其校验测试设备的研发应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 160-165.  
CHEN Xinmei, WEI Chao, LIU Yuanwei, et al. Analysis of electric arc flash protection principle and development application of its standard calibration equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 160-165.
- [4] BORIS V, DALE C F, JOEL T G. Emission spectra of arc plasmas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2219-2227.
- [5] 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.
- [6] 弧光保护装置技术要求: GB/T 14598.302—2016[S]. Technical requirements of arc protection device: GB/T 14598.302—2016[S].
- [7] 弧光保护装置通用技术条件: DL/T 1504—2016[S]. General technical conditions of arc protection device: DL/T 1504—2016[S].
- [8] Recommended practice for bus and switchgear protection in industrial and commercial power systems: IEEE Std 3004. 11—2019[S].
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 张超. 调制型半导体激光器驱动电路设计[J]. 光电技术应用, 2013, 28(6):71-73, 96. ZHANG Chao. Drive circuit design of modulation semiconductor laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(6): 71-73, 96.
- [12] 左朋莎, 任欢, 任培安. 基于 ADN8834 的模拟激光器自动温度控制技术[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 74-76. ZUO Pengsha, REN Huan, REN Pei'an. Study on temperature automatic control technology for analog laser based on ADN8834[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(5): 74-76.
- [13] YU J, GUO L, WU H, et al. Beam shaping design for compact and high-brightness fiber-coupled laser-diode system[J]. Applied Optics, 2015, 54(18): 5759-5763.
- [14] BOURDET G L, HASSIAOUI I, MCBRIDE R, et al. High-power, low-divergence, linear array of quasi-diffraction-limited beams supplied by tapered diodes[J]. Applied Optics, 2007, 46(25): 6297-6301.
- [15] 彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 217-227. PENG Yameng, SU Zhouping. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam[J]. ACTA OPTICA SINICA, 2016, 36(5): 217-227.
- [16] 游云峰, 李媛, 方番, 等. 级联多电平准 Z 源逆变器的无差拍并网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 48-53. YOU Yunfeng, LI Yuan, FANG Fan, et al. Deadbeat grid-connected control strategy of quasi-Z-source cascaded multilevel inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 48-53.
- [17] 李瑞生, 徐军, 翟登辉, 等. 三电平 DC/DC 电源转换技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 73-80. LI Ruisheng, XU Jun, ZHAI Denghui, et al. Research of three-level DC/DC conversion technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 73-80.
- [18] BABAEI E, DEHQAN A, SABAH M. A new topology for multilevel inverter considering its optimal structures[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 103(8): 145-156.
- [19] MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, RODRIGUEZ J, et al. A survey on cascaded multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2197-2206.
- [20] CHINMAYI, SHIVALEELAVATHI B G. Performance analysis of cascaded multilevel inverter using modified multicarrier PWM technique[C] // 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications, February 21-23, 2017, Bangalore, India: 50-55.
- [21] HAN Yang, SHEN Pan, ZHAO Xin, et al. Control strategies for islanded microgrid using enhanced hierarchical control structure with multiple current-loop damping schemes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(8): 1139-1153.
- [22] 马立新, 费少帅, 张海兵, 等. 基于 2ED020I12-F2 的 IGBT 驱动电路设计[J]. 电子科技, 2015, 28(1): 5-7. MA Lixin, FEI Shaoshuai, ZHANG Haibing, et al. Design of 2ED020I12-F2-based IGBT driving circuit[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 28(1): 5-7.
- [23] IMAN-EINI H, BAKHSHIZADEH M, MOEINI A. Selective harmonic mitigation-pulse-width modulation technique with variable DC-link voltages in single and three-phase cascaded H-bridge inverters[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(4): 924-932.
- [24] 王毅, 石新春, 朱凌, 等. 基于混合频率载波调制的多电平 PWM 控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 188-192. WANG Yi, SHI Xinchun, ZHU Ling, et al. Research on the hybrid frequency carrier-based multilevel PWM control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 188-192.
- [25] 陈仲, 许亚明, 刘亚云, 等. 不对称两单元 H 桥级联逆变器的混合载波 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5584-5593. CHEN Zhong, XU Yaming, LIU Yayun, et al. A PWM method based on the hybrid carriers for an asymmetric inverter with two cascaded H-bridge cells[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5584-5593.
- [26] 张丽萍. 基于 ARM 和 GPRS 的微光安全监测预警系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(1): 93-97. ZHANG Liping. Design of faint UV light security monitoring and early warning system based on ARM and GPRS[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 93-97.

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-12-04

作者简介:

潘本仁(1983—), 教授级高工, 主要从事继电保护及测试技术研究; E-mail: pbr168@163.com

魏超(1982—), 工程师, 主要从事仪器仪表及测试设备产品的研发与应用; E-mail: weihnj1982@126.com

桂小智(1987—), 高工, 主要从事继电保护及测试技术研究. E-mail: gxz61612@163.com

(编辑 姜新丽)