

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201329

## 智能变电站智能终端自动测试仪设计

陈光华<sup>1</sup>, 王朋飞<sup>2</sup>, 赵应兵<sup>3</sup>, 郑蓬<sup>2</sup>, 穆小亮<sup>2</sup>, 黄岩<sup>2</sup>

(1. 珠海开普检测技术有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000;  
3. 南京合智电力科技有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 电力行业缺少针对智能终端的专业测试设备, 现有测试系统庞杂、配置繁琐、接换线多、数据处理繁杂、误差点多, 制约了测试机构的检测效率和质量。为解决现有测试系统的弊端, 实现智能终端的闭环自动测试、简化测试系统、提高测试能力和效率, 研制一种智能终端自动测试仪。通过接口及配置规范化, 在开始测试前一次性完成所有接线和配置, 实现测试中零接换线。通过回路自动切换技术, 对测试回路进行预设计, 在测试中根据不同项目要求进行回路自动切换和构建, 实现自动测试和零换线。通过检测过程透明显示技术, 实现测试结果的实时处理和显示, 方便结果分析和判定。通过试验验证和工程应用, 证明智能终端自动测试仪的精度和抗干扰能力满足标准要求, 自动测试能力和效率相对传统方法明显提高, 满足应用需求。

**关键词:** 智能变电站; 智能终端; 测试仪; 自动测试

### Automatic test equipment design of intelligent terminals in a smart substation

CHEN Guanghua<sup>1</sup>, WANG Pengfei<sup>2</sup>, ZHAO Yingbing<sup>3</sup>, ZHENG Peng<sup>2</sup>, MU Xiaoliang<sup>2</sup>, HUANG Yan<sup>2</sup>

(1. Zhuhai Ketop Testing Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. Xuchang Ketop Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. Nanjing Hz-ieds Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Professional equipment is lacking when it comes to intelligent terminal testing in the power industry. The existing test system has complex structure, complicated configuration, heavy wiring and changing operation, complex data processing and multiple error sources. All of these restricts testing efficiency and quality. To overcome the disadvantages of the existing test system, an intelligent terminal automatic tester is developed. This can realize the closed-loop automatic test of an intelligent terminal, simplify the test system, and improve testing ability and efficiency. Through the standardization of interface and configuration, all wiring and configuration are completed before the start of the test, so as to realize zero line connection and change operation in the test. Using automatic circuit switching technology, the test circuit is pre-designed and the automatic circuit switching and construction are carried out according to the requirements of different projects in the test, so as to realize the automatic test and zero line change operation. Through transparent display technology of the test process, the real-time processing and display of the test results are realized. This is convenient for the analysis and judgment of the results. By test verification and engineering application, it is shown that the accuracy and anti-interference ability of the intelligent terminal automatic tester meet the standard requirements. The automatic test ability and efficiency are significantly improved compared with traditional methods, meeting the application requirements.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804252).

**Key words:** smart substation; intelligent terminal; test equipment; automatic test

## 0 引言

智能终端作为智能变电站伴随断路器智能化产生的特有设备, 是影响智能变电站二次系统可靠性

的决定性元件之一<sup>[1-4]</sup>。为保证入网设备安全可靠, 电力用户借助专业检测机构, 加强智能终端装置的检测, 严把质量关<sup>[5-7]</sup>。

目前, 因专业测试设备缺失, 针对智能终端的测试系统比较复杂。检测机构需要在继电保护测试仪的基础上辅助多种测试设备, 搭建复杂测试系统,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804252)

才能完成标准要求的试验内容。这种方式系统庞杂、配置繁琐、人工接线多、数据处理繁杂, 导致测试效率低、测试周期长、误差点多<sup>[8-10]</sup>。

因此, 有必要研究智能终端自动测试方案, 研制智能终端自动测试工具, 降低测试系统复杂性, 减少误差源, 提高自动测试能力和测试效率, 助力行业高效开展智能终端质量验证工作。

## 1 现状分析

根据标准要求, 智能终端测试内容较多, 涉及动作时间、动作门槛、SOE 分辨率、操作回路、信号采集等<sup>[11-13]</sup>, 检测人员需借助多种测试设备, 通过手动方式开展检测, 当前检测系统如图 1 所示。

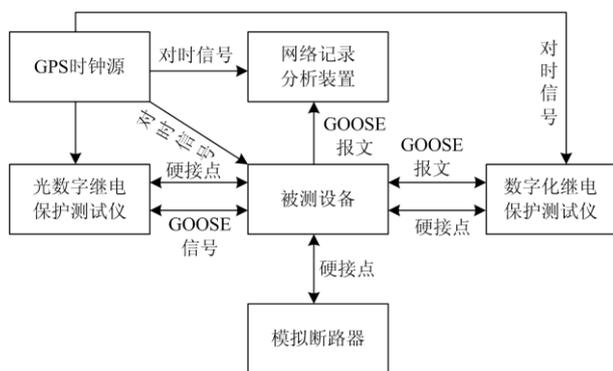


图 1 当前检测系统图

Fig. 1 Current inspection system

现有检测方法具有以下弊端: 1) 测试系统庞杂, 测试过程需要多种测试设备、误差源多; 2) 人工接线多且频繁, 容易出现接线错误情况; 3) GOOSE 订阅和发布配置工作量大, 过程中需反复修改; 4) 数据处理工作量大, 数据和结果提取不实时、不便捷, 且需对数据进行二次加工, 容易出现数据错误情况; 5) 测试周期长, 整个测试过程需要手动操作、测试效率低、人力资源消耗大<sup>[14-16]</sup>。

## 2 系统设计

目前市场上没有专用的智能终端测试仪, 也没有相关技术规范, 因此, 在进行系统设计时参考了数字化继电保护试验装置以及合并单元测试设备的要求<sup>[17-20]</sup>。同时, 在测试项目和案例设计上, 参考了智能终端相关技术和检测标准的规定<sup>[21-22]</sup>。

### 2.1 系统框架

智能终端自动测试系统框架如图 2 所示, 包括智能终端自动测试仪、GPS 时钟源、模拟断路器和被测设备。

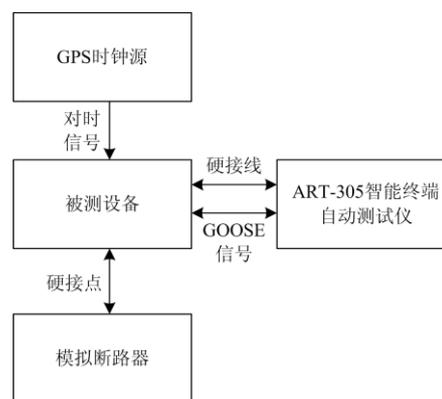


图 2 自动测试系统框架

Fig. 2 System framework of automatic test

GPS 时钟源为整个系统提供定时信号。模拟断路器与被测设备相连, 辅助智能终端自动测试仪验证被测装置的操作箱功能。自动测试仪则负责整个系统的控制和配置, 自动运行测试案例、分析测试数据、出具测试报告。

### 2.2 硬件设计

自动测试仪硬件结构如图 3 所示, 主要包括 CPU 插件、智能开入开出插件以及电源插件。自动测试仪共有 90 路开入、59 路开出和 15 个光以太网口, 满足目前电力行业内所有类别智能终端开入开出和 GOOSE 报文的测试需求。

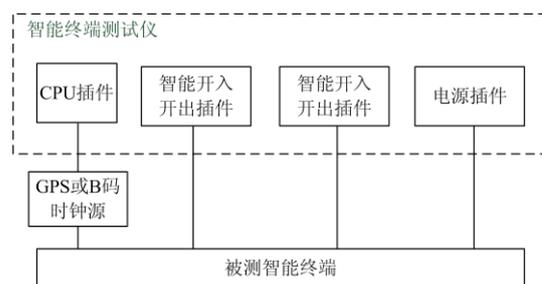


图 3 硬件设计图

Fig. 3 Hardware design

CPU 插件主要实现装置管理、GOOSE 发送接收、对时、事件记录以及人机界面交换等功能。

智能开入开出插件的开入包括高精度开入和普通开入。高精度开入时标精度误差小于  $100 \mu\text{s}$ , 主要采集智能终端跳合闸开出反馈信号以及电源回路监视等信号, 用于测试智能终端的动作时间性能等指标; 普通开入主要采集智能终端开出的反馈信号, 用于监视智能终端的开出状态。智能开入开出插件的开出包括无源空接点开出和快速空接点开出。空接点开出通过内部总线接收 CPU 插件送来的动作命令, 无源空接点开出驱动相应的出口继电器动作,

并且出口继电器的正电源经 CPU 启动闭锁;快速空接点开出驱动相应快速出口器件动作,出口时间精度误差小于  $50 \mu\text{s}$ ,其正电源经 CPU 启动闭锁<sup>[23]</sup>。

电源插件包括直流采集和装置电源。直流采集包括 6 组电流和 6 组电压,可根据需要选择接入电流(4~20 mA)、电压(0~5 V)的直流信号,并具有良好的抗干扰性能<sup>[24]</sup>。装置电源的输入范围为 88VDC~264VDC,两级高频 DC/DC 变换,采用 BOOST+FORWARD 电路,提高电源的稳定性。输出采用同步整流,提高效率,两级总效率大于 81%。具有良好的抗干扰性能。

### 2.3 软件设计

自动测试仪的软件采用模块化设计,模块之间相互独立,通过消息机制进行数据交互,软件框架如图 4 所示,主要包括时间同步模块、GOOSE 虚端子配置模块、报告显示模块、参数修改模块、数据分析处理模块以及高性能控制模块。

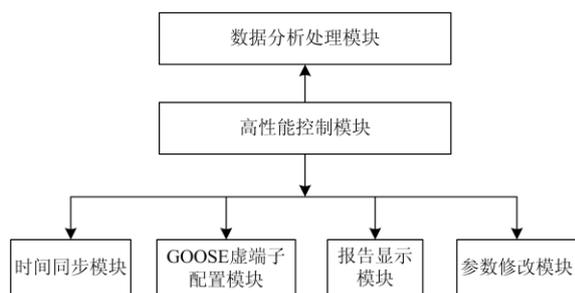


图 4 软件设计图

Fig. 4 Software design

时钟同步模块接收 IRIG-B 信号,完成装置对时。GOOSE 虚端子配置模块用于定义 GOOSE 输入和输出虚端子含义,实现 GOOSE 发布和订阅。报告显示模块负责显示动作/自检/变位报告和日志信息,展示自动测试仪运行及测试情况<sup>[25]</sup>。定值修改模块负责修改参数,选择/配置测试案例、修改测试定值。高性能控制模块负责配置下装和导出,控制运行、测试和切换过程,实现自动测试。数据分析处理模块负责处理测试数据,显示结果、生成报告。

### 2.4 自动测试流程

自动测试仪的测试流程如图 5 所示,启动测试仪和控制软件后,根据被测设备的特点和需求,进行参数配置操作并选定测试项目。

配置完成后,系统自动启动自检,包括测试仪自身和系统接线检查两方面,若有问题则告警提示并终止测试。若无问题则启动测试,按既定顺序自动执行测试项目并对项目执行情况进行提示。

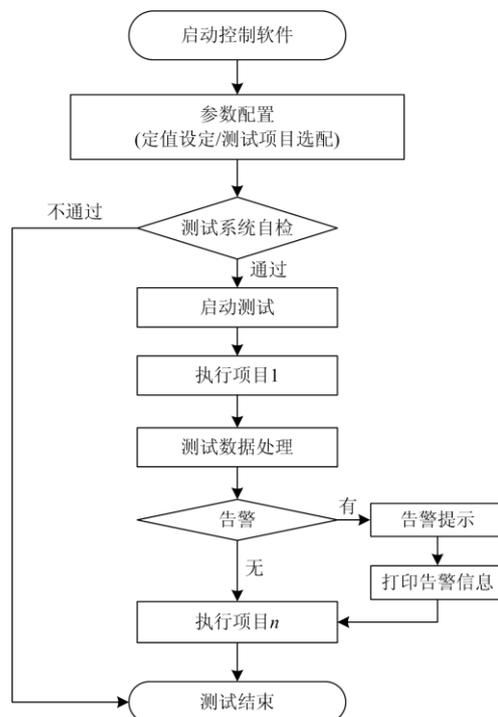


图 5 自动测试过程流程图

Fig. 5 Flow chart of automatic test process

## 3 关键技术

### 3.1 测试接口及配置规范化

自动测试仪与被测智能终端间的接口包括硬接线和光纤以太网口两种,为实现自动测试,必须针对硬接线和光纤接口进行规范化定义,在开始测试前,一次性完成所有接线和配置工作,测试过程中实现零换线。

1) 测试仪将测试用的硬接线端子,包括交直流电源端子、开入端子以及开出端子等固化,同时规范化端子命名和排列顺序,保证交直流电源相互隔离、强弱电相互隔离、遥电源和装置电源相互独立,保持自动化系统一侧不变,不同厂家样品都按照自动化测试系统统一规范接线<sup>[26]</sup>。测试仪接线端子规范化定义和布局如图 6 和表 1 所示。

试验时,实验室只需要提供标准要求文档,接线工作由被测设备厂家提前完成,测试期间不再需要任何接换线操作。

2) 由于自动测试是完全的闭环测试,发送的命令和接收的数据都需要有明确的含义才能最终判断测试行为的正确性。自动测试仪将测试用 GOOSE 虚端子规范化,即明确 GOOSE 输入和输出虚端子的含义,便于和被测装置 GOOSE 输入和输出间建立明确的连接关系<sup>[27]</sup>。比如被测装置参加开入分辨



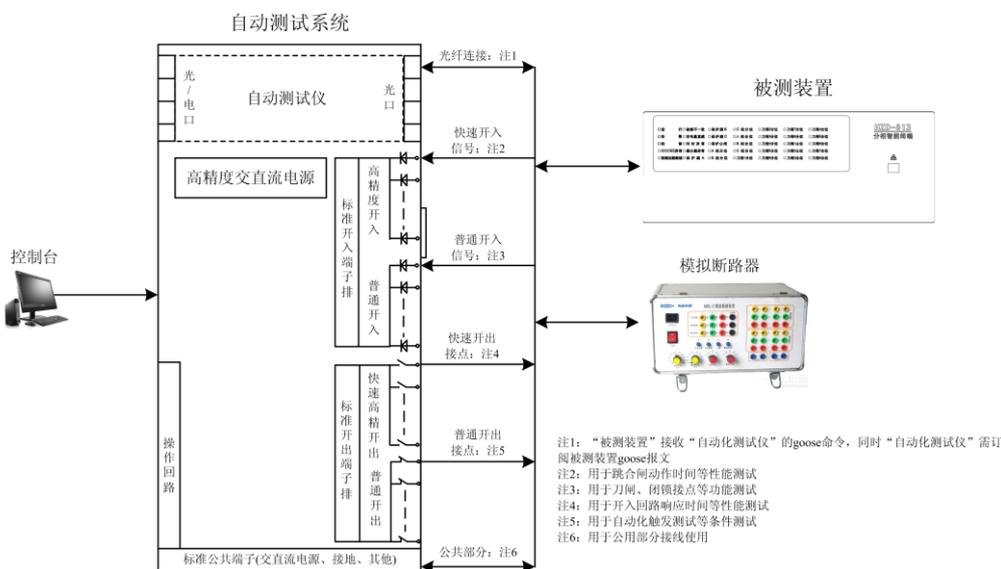


图 6 测试仪接线端子规范化布局示意图

Fig. 6 Normalization layout of tester connecting terminal

表 1 测试仪接线端子规范化定义

Table 1 Normalized definition of tester connecting terminal

| 序号 | 自动化系统端子定义 | 接线类型 | 接线编码 |
|----|-----------|------|------|
| 1  | 标准名称定义 1  | 端子排线 | 1    |
| 2  | 标准名称定义 2  | 端子排线 | 2    |
| ⋮  | ⋮         | 端子排线 | ⋮    |
| N  | 标准名称定义 n  | 端子排线 | N    |

率测试的 GOOSE 输出虚端子会直接拉到测试仪特定 GOOSE 输入虚端子上, 这样就不会因为订阅成员名称不同造成误解和不必要的麻烦。

以 GOOSE 发布为例(如表 2 所示), 定义好内部描述、信号路径、方向、厂家信号描述和信号路径等, 在测试前由厂家完成所有配置, 方便测试过程中的信号自动切换和数据分析。

表 2 GOOSE 发布虚端子规范化配置

Table 2 Normalized configuration of GOOSE publishing virtual terminal

| 序号 | 自动化系统规范化名称(内部描述) | 自动化系统信号路径                    | 方向   | 厂家信号描述 | 信号路径                                      |
|----|------------------|------------------------------|------|--------|---|
| 1  | 规范化内部描述 1        | ART/GGIOSS<br>T\$Ind1\$stVal | ---> | 样例名称 1 | RPIT/GOINGGI<br>O1\$ST\$SPCSO1<br>\$stVal |
| 2  | 规范化内部描述 2        | ART/GGIOSS<br>T\$Ind2\$stVal | ---> | 样例名称 2 | RPIT/GOINGGI<br>O1\$ST\$SPCSO2<br>\$stVal |
| ⋮  | ⋮                | ⋮                            | ---> | ⋮      | ⋮   |
| n  | 规范化内部描述 n        | ART/GGIOSS<br>T\$Indn\$stVal | ---> | 样例名称 n | RPIT/GOINGGI<br>O1\$ST\$SPCSOn<br>\$stVal |

GOOSE 虚端子规范化配置流程如图 7 所示。

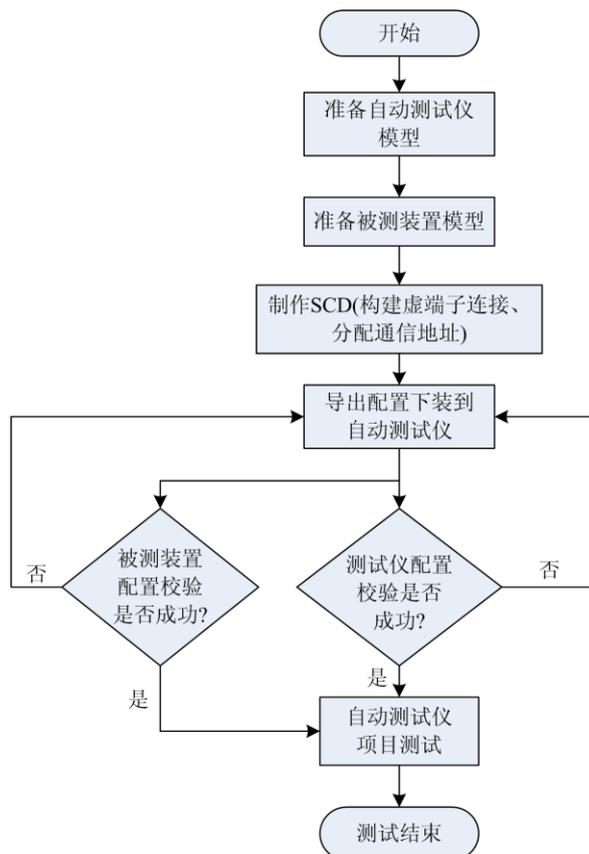


图 7 GOOSE 虚端子配置规范化配置流程图

Fig. 7 Normalized configuration process of GOOSE virtual terminal

### 3.2 回路自动切换和构建

测试仪根据被测装置测试用例要求，对测试回路进行预设计，在测试过程中根据不同测试项目的要求进行回路自动切换和构建，实现测试项目自动切换和测试过程零换线。

以断路器跳/合闸时间检验、分/合断路器和断路器位置开入功能检验为例<sup>[28-29]</sup>。为兼顾以上三项检测项目，预先设计回路如图 8 和图 9 所示。

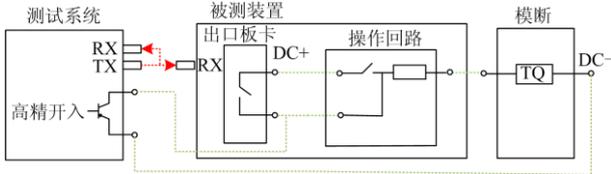


图 8 断路器跳/合闸回路接线图

Fig. 8 Wiring diagram of circuit breaker tripping / closing

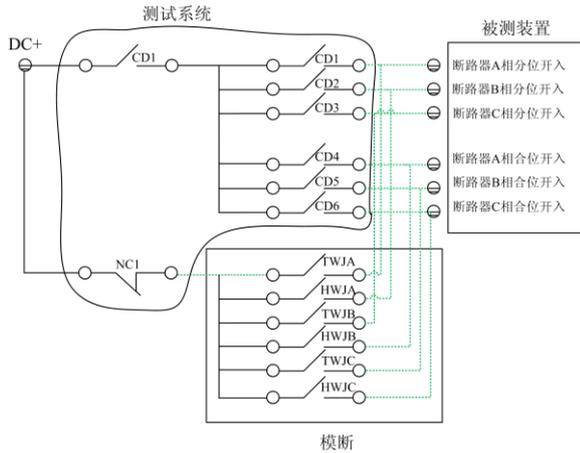


图 9 断路器开入接线图

Fig. 9 Wiring diagram of circuit breaker input

1) 断路器跳/合闸时间性能检验：测试系统通过 GOOSE 命令控制被测装置跳/合闸，通过测试系统的高精度开入记录跳/合闸动作时间。

2) 分/合断路器功能检验：测试系统将 CD1—CD6 断开，将 NC1 闭合，测试系统通过 GOOSE 命令控制被测装置分/合断路器，被测装置接入模拟断路器的 TWJ/HWJ 位置并反馈至测试系统，测试系统根据位置的状态判别被测装置分/合断路器是否成功。

3) 断路器位置开入功能检验：为了使被测装置的断路器位置采集可控，测试系统将 NC1 常闭接点置于打开状态。测试系统控制 CD1—CD6 开出接点状态，可检测被测装置接入 A/B/C 相断路器为分位/合位/无效等位置状态时，被测装置反馈位置状态是否正确。

### 3.3 检测过程透明化

测试过程信息可通过串口模块由常用串口工具

主动输出，测试结果以及测试异常情况通过测试窗口透明展示，如图 10 所示。

\*\*\*\*\*  
\*开始检验 通信正确性\*

试品已为检修态  
试品电源处于投入状态，正确！  
刀闸2合位状态为TRUE，正确！  
备用开入1状态为FALSE，正确！  
试品电源已按预期切断  
试品电源已重新处于投入状态，正确！

图 10 测试窗口展示图

Fig. 10 Test window display

测试完成后自动对测试数据进行处理，给出检验结果，并通过文件处理模块形成文档版的检验报告，如图 11 所示。

断路器跳合闸动作时间检验结果

| 序号 | 检验项目 | 最小动作时间(ms) | 最大动作时间(ms) | 平均动作时间(ms) | 检验结果 |
|----|------|------------|------------|------------|------|
| 1  | 测控合闸 | 5.500      | 5.500      | 5.500      | 合格   |
| 2  | 保护跳闸 | 3.600      | 3.700      | 3.633      | 合格   |
| 3  | 保护合闸 | 3.400      | 3.700      | 3.533      | 合格   |
| 4  | 测控跳闸 | 4.900      | 4.900      | 4.900      | 合格   |

图 11 测试报告展示

Fig. 11 Test report display

## 4 试验与验证

### 4.1 精度验证

在对智能终端装置进行时间性能测试时，自动测试仪的数据精度直接关系到测试结果的正确性。本文从 5 个方面对自动测试仪的精度进行验证，验证系统如图 12 所示。

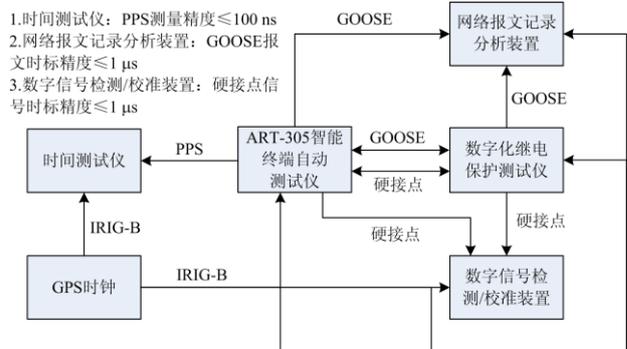


图 12 精度验证系统结构图

Fig. 12 Diagram of accuracy verification system structure

#### 1) 对时精度

如图 12 所示，将自动测试仪的 PPS 输出接入时间测试仪，验证结果如表 3 所示。

#### 2) GOOSE 时标精度

光数字继电保护测试仪整分时刻输出 GOOSE 变位报文，查看自动测试仪变位报告中接收到变位

GOOSE 报文的时标( $T_0$ ), 同时查看网络报文记录分析装置接收到此报文的时标( $T_1$ )<sup>[28]</sup>。验证结果如表 4 所示。

表 3 对时精度

Table 3 Timing accuracy

| 次数 | 测试结果/ms | 准确度要求/ $\mu$ s | 结论 |
|----|---------|----------------|----|
| 1  | 278     | 1              | 合格 |

表 4 GOOSE 时标准准确度

Table 4 Time scale accuracy of GOOSE

| $T_0$ 时标/ $\mu$ s | $T_1$ 时标/ $\mu$ s | 时标精度/ $\mu$ s | 准确度要求/ $\mu$ s | 结论 |
|-------------------|-------------------|---------------|----------------|----|
| 99                | 24                | -75           | 100            | 合格 |
| 99                | 56                | -43           | 100            | 合格 |

### 3) 开关量时标精度

自动测试仪开出接点接入数字信号检测/校准装置, 查看自动测试仪变位报告中的变位时间( $T_0$ )和数字信号校准装置中记录到的变位时间( $T_1$ ), 两者之差即为自动测试仪开关量输出时标精度<sup>[29]</sup>。验证结果如表 5 所示。

表 5 开关量时标准准确度

Table 5 Time scale accuracy of switch

| $T_0$ 时标/ $\mu$ s | $T_1$ 时标/ $\mu$ s | 时标精度/ $\mu$ s | 准确度要求/ $\mu$ s | 结论 |
|-------------------|-------------------|---------------|----------------|----|
| 99                | 44.5              | -54.5         | 100            | 合格 |
| 99                | 53.3              | -45.7         | 100            | 合格 |

### 4) 动作时间测量精度

设定光数字继电保护测试仪跳闸动作时间( $T_0$ ), 自动测试仪测试该动作时间。网络报文记录分析装置获得自动测试仪发出 GOOSE 报文时间( $T_1$ ), 数字信号检测/校准装置获得光数字继电保护测试仪空接点闭合时间( $T_2$ ), ( $T_2-T_1$ )- $T_0$  即为测试仪的测量精度。验证结果如表 6 所示。

表 6 动作时间测量精度

Table 6 Operating time measurement accuracy

| 设定值<br>/ms | $T_0$ 值/ms | $T_1$ 时标<br>/ms | $T_2$ 时标<br>/ms | 结果<br>/ $\mu$ s | 要求<br>/ $\mu$ s | 结论 |
|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|
| 0          | 0.2        | 40.793          | 40.888          | 105             | 200             | 合格 |
| 5          | 5.1        | 63.609          | 68.689          | 20              | 200             | 合格 |
| 10         | 10.1       | 46.704          | 56.787          | 17              | 200             | 合格 |

### 5) 开入响应时间测量精度

设定光数字继电保护测试仪硬开入响应时间( $T_0$ ), 自动测试仪测试该时间。数字信号检测/校准装置获得自动测试仪硬开出时间( $T_1$ ), 网络报文记录分析装置获得光数字继电保护测试仪发出变位 GOOSE 报文时刻( $T_2$ ), ( $T_2-T_1$ )- $T_0$  即为自动测试仪的测量精度。验证结果如表 7 所示。

表 7 开入响应时间测量精度

Table 7 Time measurement accuracy of input response

| 设定值/<br>ms | $T_0$ 值/<br>ms | $T_1$ 时标/<br>ms | $T_2$ 时标/<br>ms | 结果/<br>$\mu$ s | 要求/<br>$\mu$ s | 结论 |
|------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----|
| 1          | 1.1            | 25.053          | 26.091          | 62             | 200            | 合格 |
| 5          | 5.1            | 14.958          | 19.991          | 67             | 200            | 合格 |
| 10         | 10.1           | 29.246          | 39.274          | 72             | 200            | 合格 |

## 4.2 抗干扰性验证

考虑到除实验室外, 自动测试仪还应用于工业生产环境和变电站环境, 本文参考《DL/T 1501-2016 数字化继电保护试验装置技术条件等测试设备技术规范》的要求, 对自动测试仪开展电磁兼容试验, 验证其抗干扰能力, 试验要求和结果如表 8 所示。

表 8 EMC 试验结果

Table 8 Result of EMC test

| 序号 | 试验项目    | 试验要求                             | 试验结果 |
|----|---------|----------------------------------|------|
| 1  | 脉冲群干扰   | 严酷等级: 3 级                        | 合格   |
| 2  | 静电放电干扰  | 严酷等级: 3 级                        | 合格   |
| 3  | 辐射电磁场干扰 | 严酷等级: 3 级                        | 合格   |
| 4  | 快速瞬变干扰  | 严酷等级: B 级                        | 合格   |
| 5  | 传导发射限值  | 150 kHz~30 MHz 内传导<br>发射值不超过标准要求 | 合格   |
| 6  | 辐射发射限值  | 30 MHz~1 GHz 内辐射发<br>射值不超过标准要求   | 合格   |

## 4.3 自动测试能力验证

自动测试仪能够完成《GB/T 34231-2017 智能变电站智能终端装置通用技术条件》和《Q/GDW 11286-2014 智能变电站智能终端检测规范》标准规定的 80% 以上功能性能项目, 涵盖智能终端动作时间、操作回路、SOE 分辨率、检修、GOOSE 接收、开入动作电压等内容。

自动测试仪在国家电网和南方电网智能变电站智能终端装置入网检测中得到了应用, 自动测试能力满足使用需求。新旧系统测试效率的对比如表 9 所示。

由表 9 可知, 自动测试方案较原测试方案在测试时间、仪器使用量以及测试数据记录与统计等方面优化明显, 显著提高了测试效率。同时, 自动测试方案精简了测试系统, 减少了误差源, 提高了测试的可靠性和测试结果的准确性。

表 9 测试效率对比表

Table 9 Comparison of test efficiency

| 项目        | 原测试方案         | 自动测试方案             | 优化率  |
|-----------|---------------|--------------------|------|
| 测试时间      | 2 天           | 20 min             | 99%  |
| 仪器使用量     | 10 台          | 5 台                | 50%  |
| 测试数据记录与统计 | 纸质记录+<br>人工统计 | 电子记录+自动<br>统计+测试报告 | 100% |

## 5 结语

本文研制的智能终端自动测试仪具备智能终端功能和性能自动测试能力,满足智能终端技术和检测标准的要求。同时,自动测试仪具备自动数据处理、测试结果实时显示以及测试报告自动生成功能,大幅度提高了测试效率,缩短了测试周期。

本文研制的智能终端自动测试仪不仅成功应用于国网、南网智能终端产品入网测试,还可用于智能终端制造厂家产品的研发性测试和厂内产品测试,同时还可用于电力用户针对智能终端产品的现场验收和运行维护。

## 参考文献

- [1] 宗志亚. 基于扰动激励的智能变电站继电保护故障诊断关键技术[J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 63-69.  
ZONG Zhiya. Key technology of relay protection fault diagnosis in smart substation based on disturbance excitation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 63-69.
- [2] 朱建斌, 李宝伟, 倪传坤, 等. 一种应用于第三代智能变电站主设备就地模块的研究及开发[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 226-234.  
ZHU Jianbin, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Research and development of a local module applied to the main equipment of the third generation intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 226-234.
- [3] 宋晓帆, 樊庆玲. 模块化智能变电站智能组件与一次设备集成方案研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(9): 76-77.  
SONG Xiaofan, FAN Qingling. Research on modular intelligent substation intelligent component and primary equipment integration scheme[J]. Integrated Circuit Application, 2019, 36(9): 76-77.
- [4] 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.
- [5] 浮明军, 张玉中, 张文, 等. 智能变电站就地化保护自动测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 77-81.  
FU Mingjun, ZHANG Yuzhong, ZHANG Wen, et al. Research on auto-test technology for local protection in smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 77-81.
- [6] 张焕青, 雷鸣, 严利雄, 等. 面向智能变电站继电保护可靠性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 57-62.  
ZHANG Huanqing, LEI Ming, YAN Lixiong, et al. Research on reliability evaluation method of relay protection for smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 57-62.
- [7] 汪泉, 周玮, 王昊, 等. 面向电力测试装置远程校准的网络服务质量可靠性建模与分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 111-116.  
WANG Quan, ZHOU Wei, WANG Hao, et al. Modeling and analysis of network service quality reliability for power meter remote calibration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 111-116.
- [8] 宋璇坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 1-6.  
SONG Xuankun, LI Jingru, XIAO Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 1-6.
- [9] 刘海峰, 肖繁, 赵永生, 等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 157-164.  
LIU Haifeng, XIAO Fan, ZHAO Yongsheng, et al. Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 157-164.
- [10] 孙福寿, 汪雄海. 一种分析继电保护系统可靠性的算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 32-35.  
SUN Fushou, WANG Xionghai. A new method for reliability analysis of protection in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35.
- [11] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.  
ZENG Ke'e. Research on operation situation and reliability indices of protective relays in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85.
- [12] 禹海峰, 潘力强, 吴亚茹, 等. 储能提升含高比例风电电力系统可靠性分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 92-98.  
YU Haifeng, PAN Liqiang, WU Yaru, et al. Analysis of energy storage improving the reliability of power system with high proportional wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 92-98.
- [13] 易永辉, 王雷涛, 陶永健. 智能变电站过程层应用技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 1-5.  
YI Yonghui, WANG Leitao, TAO Yongjian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [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] 安永帅, 李刚, 樊占峰, 等. 新一代智能变电站控制保护一体化智能终端研究与开发[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 138-146.
- AN Yongshuai, LI Gang, FAN Zhanfeng, et al. Research and development on intelligent terminal units incorporated with control and protection functions in new generation smart substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 138-146.
- [16] 王槿. 智能变电站智能终端整改方案的分析与探讨[J]. *电工技术*, 2015(6): 26-27.
- [17] 李忠安, 沈全荣, 王言国, 等. 电力系统智能装置的自动化测试系统设计[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(8): 77-79.
- LI Zhong'an, SHEN Quanrong, WANG Yanguo, et al. Electrical power system intelligence installment automated test system design[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(8): 77-79.
- [18] 张晓莉, 刘慧海, 李俊庆, 等. 智能变电站继电保护自动测试平台[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(18): 120-125.
- ZHANG Xiaoli, LIU Huihai, LI Junqing, et al. Automatic test platform in smart substation for relay protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(18): 120-125.
- [19] 国家能源局. 数字化继电保护试验装置技术条: DL/T 1501—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [20] 国家能源局. 合并单元测试设备技术规范: NB/T 42087—2016[S]. 北京: 新华出版社, 2016.
- [21] 中国电力企业联合会. 智能变电站智能终端装置通用技术条件: GB/T 34132—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] 国家电网公司. 智能变电站智能终端检测规范: Q/GDW 11286—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [23] 李保恩. 智能变电站继电保护装置自动测试平台的研究和应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(7): 131-135.
- LI Bao'en. Research and application of automatic test platform for intelligent substation relay protection device[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(7): 131-135.
- [24] 李忠安, 沈全荣, 王言国, 等. 电力系统智能装置自动化测试系统的设计[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(8): 77-80.
- LI Zhong'an, SHEN Quanrong, WANG Yanguo, et al. Automated testing system for IED[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(8): 77-80.
- [25] 杨臻, 赵燕茹. 一种智能变电站一体化信息平台的设计方案研究[J]. *华北电力大学学报*, 2012, 39(3): 59-64.
- YANG Zhen, ZHAO Yanru. Design and study of an integrative information platform for smart substation[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2012, 39(3): 59-64.
- [26] 王竞, 夏加富, 刘晓晖, 等. 牵引变电站直流断路器机械状态监测与故障诊断研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(1): 33-40.
- WANG Jing, XIA Jiafu, LIU Xiaohui, et al. Research on mechanical condition monitoring and fault diagnosis for DC circuit breaker in traction substation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(1): 33-40.
- [27] 须雷, 李海涛, 王万亭, 等. 智能变电站中断路器选相控制技术应用研究[J]. *高压电器*, 2014, 50(11): 63-68.
- XU Lei, LI Haitao, WANG Wanting, et al. Application research on the technology of CB phase-controlled in smart substation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(11): 63-68.
- [28] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [29] 练椿杰, 韦化, 覃圣超, 等. 基于 SOA 与虚拟私有云的断路器状态可视化监测系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(17): 155-161.
- LIAN Chunjie, WEI Hua, QIN Shengchao, et al. A circuit breaker status visual monitoring system based on SOA and virtual private cloud[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(17): 155-161.

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-24

作者简介:

陈光华(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、智能配电网自动化设备及系统, 通信网络、时间同步及可靠性测试技术; E-mail: chenguanghua@ketop.cn

王朋飞(1988—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、通信网络测试技术。E-mail: wangpengfei@ketop.cn

(编辑 葛艳娜)