

## 智能变电站 126 kV 智能终端设计与测试方案研究

王宾<sup>1</sup>, 黄磊<sup>2</sup>, 曹润彬<sup>1</sup>, 董新洲<sup>1</sup>, 康明才<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 过程层智能化是变电站智能化的前提和基础; 作为过程层核心设备之一, 智能终端在保障 GOOSE 通信可靠性、实时性的基础上, 一方面应具备传统断路器操作箱的逻辑功能, 另一方面还应实时监测断路器的运行状态, 为变电站过程层的高级智能化奠定基础。针对以上需求, 结合 126 kV 智能开关设备的结构特点, 采用 ARM+FPGA 的构架模式, 设计开发了一款智能终端, 实现了断路器的运行状态实时采集, 及断路器、隔离开关、接地刀闸等实时逻辑闭锁控制。设计中 ARM 主要负责过程层 GOOSE 通信、开入开出的采集处理等, FPGA 负责开入开出的扩展和装置内部逻辑控制, 以满足装置的实时多输入、多输出的需求。现场试验测试表明, 装置性能符合企业标准, 具有较高的现实意义和应用价值, 设计中也考虑了后续高级功能实现的有效接口。

**关键词:** 智能变电站; 智能终端; IEC61850; GOOSE; 操作箱

### Design and test of 126 kV intelligent terminal in smart substation

WANG Bin<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>2</sup>, CAO Run-bin<sup>1</sup>, DONG Xin-zhou<sup>1</sup>, KANG Ming-cai<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Intelligentization of process layer is the premise and basis of smart station. Intelligent terminal, as one of the core equipment in smart substation, should ensure GOOSE communication reliability and real-time request. Except for those, for one hand, it should possess the logic function of traditional circuit breaker operation box, for the other hand, it should real-time monitor the operation state of circuit breaker, supplying a foundation for the senior intelligentization of substation process layer. In response to the questions, combined with the structure characteristic of 126 kV intelligent circuit breaker controller and based on the chip frame of ARM+FPGA, a novel intelligent terminal is developed to implement the real-time monitoring of operation state of circuit breaker, and the logic blocking control of the circuit breaker, switcher, grounding switcher, etc. The ARM is mostly responsible for the GOOSE communication, and the collecting and processing of binary signals, while the FPGA is used to extend the I/O ports and the internal logic control to fulfill the requirements of real-time multi input and output to the intelligent circuit breaker controller. Practical tests show that the developed device keeps in accordance with the standards, and can be applied in field. In the design, the effective ports for implementing further senior functions are also considered.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51120175001), the Research Fund from State Key Laboratory of Power System Granted (No. SKLD13M11), and Grant for State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS13004).

**Key words:** smart substation; intelligent terminal; IEC61850; GOOSE; operating box

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0119-07

## 0 引言

一次设备智能化是变电站智能化运行的前提

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51120175001); 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室课题资助 (SKLD13M11); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助 (LAPS13004)

和基础<sup>[1-4]</sup>。在目前一体化智能高压设备尚未成熟的情况下, 采用智能终端实现对一次设备的智能化操作是较为现实的手段。智能终端采用电缆与一次设备连接, 采用光纤与测控、保护等二次设备连接, 采集并以 GOOSE 方式上传一次设备的状态, 同时接收来自二次设备的下行控制命令, 实现对一次设备的实时控制<sup>[5-6]</sup>。

智能终端目前已经实现了产品化, 国外 ABB、SIEMENS、ALSTOM 等企业相关产品常以成套的系统设备出现<sup>[6]</sup>, 相关功能主要在保护和监控装置中实现。国内企业产品以南瑞继保 PCS-9821 智能控制装置、国电南自 PSIU600 系列智能单元、许继电气 DBU-814 开关智能单元等为代表, 产品独立于其他一次、二次设备, 应用灵活, 已经在现场中得到了大量的应用, 但是也存在部分产品不具备断路器操作箱功能, 在闭锁告警、自诊断、对时方面也与标准存在差异等问题<sup>[7-9]</sup>; 此外, 上述设备对于后续实现一次设备的高级智能化功能考虑不足<sup>[10-12]</sup>, 只是完成了基本的实时采集和控制功能。

针对以上问题, 本文结合 126 kV GIS 智能开关设备的结构特点, 采用 ARM+FPGA 构架模式, 设计开发了一款智能终端, 实现了断路器运行状态实时采集, 以及断路器、隔离开关、接地刀闸等实时逻辑闭锁控制。

## 1 设计方案分析

### 1.1 设计需求分析

智能终端在整个智能变电站系统中的接入模式如图 1 所示<sup>[13]</sup>。

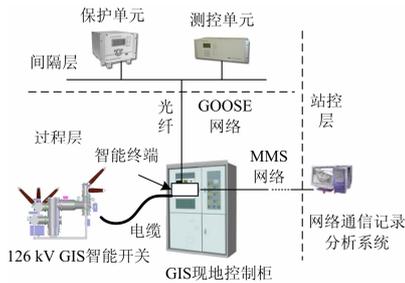


图 1 智能终端站内接线图

Fig. 1 Applications of intelligent terminal (IT) in smart substation

根据国家电网公司企业标准《Q/GDW428-2010. 智能变电站智能终端技术规范》的规定, 126 kV 智能终端应/宜具备以下基本功能<sup>[14]</sup>:

- 1) 具有断路器控制功能;
- 2) 支持以 GOOSE 方式上传一次设备状态, 接收来自二次设备的 GOOSE 下行控制命令, 实现实时控制功能;
- 3) 具有开关量和模拟量采集、开关量输出功能;
- 4) 有完善的闭锁告警功能及自诊断功能;
- 5) 具备接收 IEC61588 或 B 码时钟同步信号功能, 对时精度误差应不大于±1 ms;
- 6) 具备断路器操作箱功能;
- 7) 具备状态监测信息采集功能, 能接收安装于一次设备和就地智能控制柜传感元件的输出信号。

126 kV GIS 智能开关设备的外部接口可分为三类<sup>[15]</sup>: 开关量输入接口、开关量和模拟量输出接口以及操作箱主要接口。

开关量输入接收来自保护和测控单元发出的保护跳闸、保护合闸、同期合闸、闭锁重合闸、遥分、遥合、联锁等控制信号。

模拟量输出接口输出 4~20 mA 电流信号和 0~5 V 电压信号, 反映断路器的内部状态, 包括环境温度、湿度、压力、密度、绝缘、机械特性等; 开关量输出接口输出断路器分位、合位、隔离开关分位、合位、接地开关分位、合位、遥信、合闸压力低、跳闸压力低、手跳闭锁重合、控制电源消失、控制回路断线、检修等多组开关信号。

操作箱接口主要配合开出量联合实现手合、手跳、保护跳闸、跳闸保持、跳位监视、合闸保持、重合闸、防跳、合位监视等功能。

### 1.2 装置设计方案

针对以上设计需求及 126 kV GIS 智能开关设备的结构特点, 采用了如图 2 所示的整体设计方案, 共包含 13 个板卡, 具体说明如下。

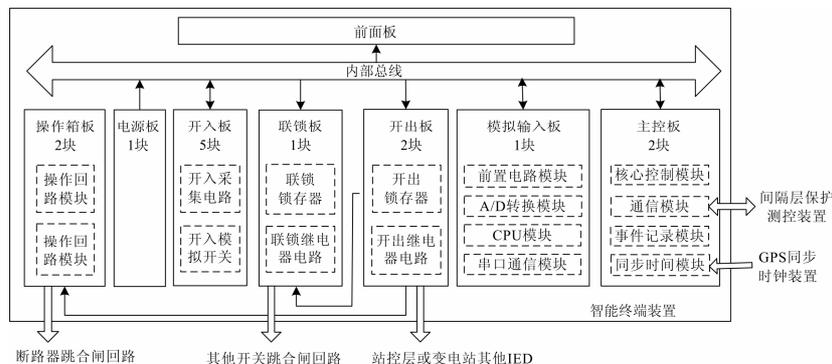


图 2 总体装置构架图

Fig. 2 Device framework diagram of IT

装置开关量的输入、输出存在回路多、实时性要求强和需要现场灵活配置的特点。针对该特点,装置采用多块开关量输入前置调理电路、输出驱动电路并列运行的方式;其中开入板将220 V/110 V高压直流信号转换为适用于数字电路采集的5 V/3.3 V信号,不仅可以提高开关输入量的可扩展性,也可将强电部分和弱电部分进行最大限度的隔离;而开出板独立设计能降低继电器动作对数字电路的电磁干扰。因此,设计方案中采用了5块开入板、2块开出板和1块联锁板的组合方式,联锁板与开出板配合保证开出逻辑的正确性。

设计了一块独立的模拟量采集板,采集模拟量并上传至站控层;单独设计了一块操作箱回路板,主要考虑到此部分输入和输出全部为强电信号,且只与开出板通过外部接线联系,更适合独立设计。

装置的核心算法,特别是对GOOSE报文的实时收发、解析等,以及所有信号采集和判断出口,及实时通信等都在主控板中实现。

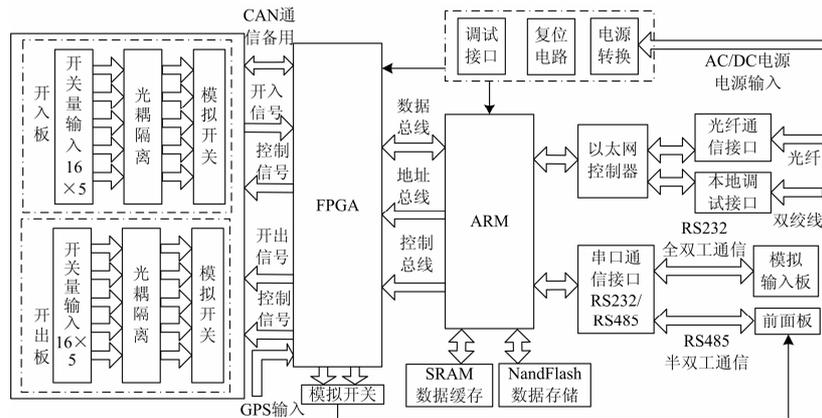


图3 主控板硬件框图

Fig. 3 Function block diagram of CPU card in IT

在以上设计基础上, FPGA 主要承担如下功能:

1) 开关量信号处理。实时接收开关状态信息并通过数据总线传给 ARM, 同时将 ARM 传递过来的开出信号传递给开出板。

2) 接收 B 码信号, 判别码元后传递给 ARM 控制器。

3) 实现以太网控制器片选功能。

ARM 主要完成的功能包括:

1) 接收来自保护和测控装置的 GOOSE 下行控制命令, 解析 GOOSE 报文, 发送跳合闸命令和联锁给开出板和联锁板, 实现对断路器的开合控制。

2) 定时采集 80 路开关量的信息, 并以 GOOSE 报文形式上传。

## 2 装置硬件关键设计实现

### 2.1 主控板设计实现

主控板采用嵌入式微处理器 ARM 芯片 STM32f103ZET6 和现场可编程门阵列 FPGA 芯片 EP2C8Q208C8 双 CPU 构架模式, 硬件框图如图 3 所示。ARM 芯片内嵌串口模块、定时器模块、ADC 转换模块, 只需简单配置就可实现相应功能, 具有较高的稳定性和执行效率; 同时也易于扩展外部以太网通信接口。FPGA 芯片具有良好的输入/输出接口扩展功能, 在通信时钟编码、解码及输入信号波形判别方面具有明显的优势, 可以分模块实时并行运行, 提高了整个监控平台的实时性。

为了实现开入开出变位后 SOE 事件实时记录, 主控板配置了一块 128 MB NandFlash 外部存储芯片保存, 毫秒级的擦除速度保证了记录的实时性。以太网通信接口采用 DM9000AE 芯片扩展, 其具备集成自适应 10/100 M 收发器、同时支持电口以及光纤接口且支持多播设置的特性, 很好地满足了智能终端多以太网实时通信的需求。

3) 接收 FPGA 传递的 B 码码元, 解析时间信息转换为 GOOSE 数组需要的时间格式。

4) SOE 事件存储, 记录收到 GOOSE 命令时刻、跳合闸变位信息, 并存储在 NandFlash 中。

5) 接收处理模拟输入板传递过来的 10 路 AD 采集数据, 并处理上传。

6) 闭锁告警。包括电源中断、通信中断、通信异常、GOOSE 断链等信号。

7) 装置自检功能。

### 2.2 开入板、开出板设计实现

开入板采用 4 个模拟开关并行同步触发, 实时采集 16 路开关输入量的设计思路, 每块开入板可监测 16 路开关量输入, 装置中的 5 块开入板控制选通信

号均来自主控板,一共实现对 80 路开入信号的监测。

开出板共设计 3 块(包括联锁板),每个开出板可给出 12 路开出信号。

### 2.3 操作箱板设计实现

操作箱板实现了跳合闸自保持功能、跳合位监视功能、跳合闸压力闭锁功能、防跳功能,采用磁保持继电器 KKJ 反应“合后位置”,解决了位置不对应启动重合闸的问题。

### 2.4 模拟输入板设计实现

模拟输入板上配置一块独立的 ARM 芯片,负责实时采集来自传感器的 4~20 mA 电流信号和 0~5 V 电压信号,并通过串行通信方式将采集的信号传递给主控板;同时在该板卡上也实现了 GPS 秒脉冲 PPS 信号的电平转化,保证与主控板上的 FPGA 芯片电平相配。

## 3 关键软件功能设计

装置软件设计主要分为三部分:主程序、定时中断子程序和外部中断子程序;其中主程序主要完成装置初始化和 NandFlash 的循环擦写工作,为后续的 SOE 功能做好准备;同时考虑到智能终端的高级功能,比如对模拟量采集信号的分析来确定智能开关的运行状态等,也在主程序中实现。定时中断子程序主要实现对 GIS 智能开关设备的状态巡检工作,每毫秒扫描一次开关变位情况,根据需要发送 GOOSE 报文;外部中断子程序实时响应来自继电保护和测控装置发出的 GOOSE 报文,实现报文的快速解析、SOE 存储等功能。

其中,图 4 给出了外部中断子程的流程图。

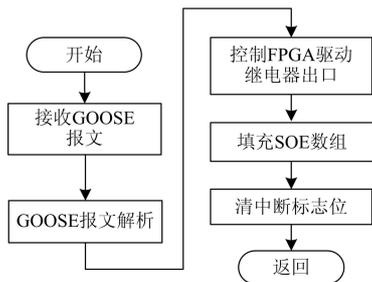


图 4 外部中断子程流程图

Fig. 4 Flow chart of external interruption subroutine

## 4 装置整体功能测试

基于以上方案,开发并功能测试了智能终端装置<sup>[16-17]</sup>,具体如下。

### 4.1 开入开出功能测试

测试系统如图 5 所示,在开入板输入端子上接 220 V 直流电压信号,装置能正确采集开入信号变

化;且通过 PC 机以太网抓包软件能够正确观察到开入量变化。

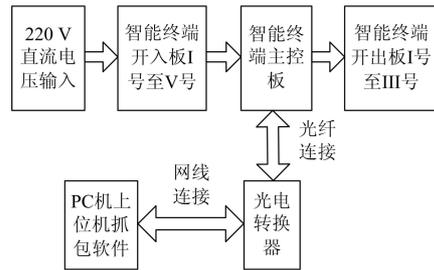


图 5 开入开出功能测试示意图

Fig. 5 Wire connection in binary signal collection tests

随后,利用自主研发的测试软件与主控板通信,逐路给出开出信号,智能终端能够正确驱动各路继电器动作,且同时驱动多路开出时,装置动作正确。

在此基础上配合国内某厂家保护测控装置进行实际系统测试,如图 6 所示。试验过程中,智能终端能有效、快速地接收保护测控装置发出的 GOOSE 跳闸报文,并驱动继电器出口;整个实验过程中的 GOOSE 报文通信均经过了抓包软件监控。图 7 给出了测控装置接收到智能终端以 GOOSE 报文发来的开入信息截图。



图 6 配合测控装置开入开出测试实物图

Fig. 6 Photo of binary signal collection tests to IT with communication to relay

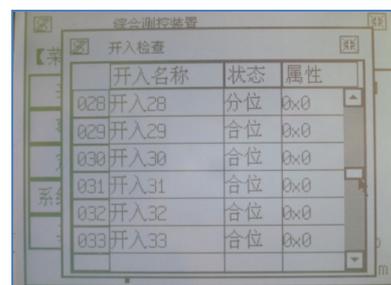


图 7 测控装置接收到开入信号显示截图

Fig. 7 Printed screen of binary data in relay received from IT

### 4.2 模拟量采集功能测试

模拟量采集测试系统如图 8 所示。智能终端分别采集 5 V 和 3.3 V 的电压信号,对电流模拟量的

采集测试也是通过在电流-电压转换电阻两端施加电压来进行的间接测量。采集信号经主控板处理后, 经 RS485/RS232 转换, 送至笔记本电脑, 在串口调试助手中显示, 如图 9 所示, 可见模拟量的采集结果符合要求。

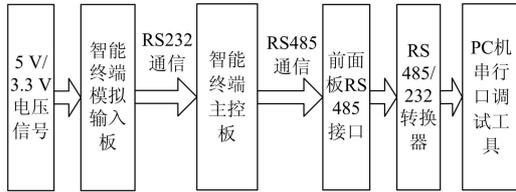


图 8 模拟量采集功能测试示意图

Fig. 8 Wire connection in analog signal collection tests

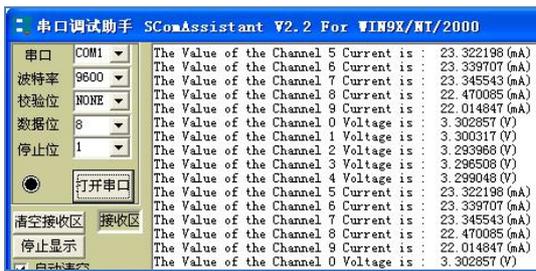


图 9 3.3 V 电压模拟量信号采集截图

Fig. 9 Printed screen of 3.3 V analog voltage signal measurement

### 4.3 GOOSE 报文发送功能测试

GOOSE 发送测试如图 10 所示, 7 个光纤接口经测试均可按照设定同时发送带有时标的 GOOSE 报文。报文截图如图 11 所示。

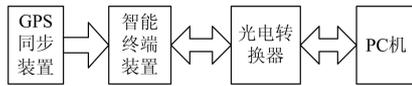
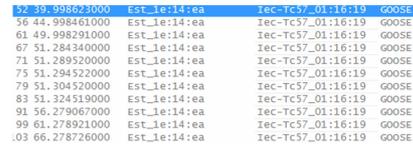


图 10 GOOSE 发送测试示意图

Fig. 10 Wire connection of GOOSE sending test

其中报文截图 11(a)中, GOOSE 52 号报文、56 号报文、61 号报文为无开关变位时的报文。67 号、71 号、75 号、79 号、83 号 GOOSE 报文为智能终端采集到的开关发生变位时发送的报文。分析测试报文可知, 当开入量无变位时, 智能终端可定时发送开关量状态, 时间间隔为 5 s; 而当检测到开关量发生变位时, 将按照设定的时间连发五帧报文, 时间间隔为 5 ms、5 ms、10 ms、20 ms<sup>[18-19]</sup>, 然后再改为 5 s 的定时发送, 满足标准要求。

观察图 11(b)所示的报文内容, 可见智能终端通过光纤采集到 IRIG\_B 码后, 可以获得正确时间信息, 且 GOOSE 开入量的变位时标可随报文正确上传。



(a) GOOSE 报文发送截图



(b) GOOSE52 号报文具体内容

图 11 GOOSE 报文测试截图

Fig. 11 Printed screen of received GOOSE message

### 4.4 操作箱回路功能测试

使用 220 V 直流电源输出信号对操作箱板的各个回路进行测量, 接线情况如图 12 所示, 具体测试如下。

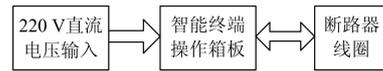


图 12 操作箱回路测试功能示意图

Fig. 12 Wire connection of operation box function test

合闸回路测试—测试操作箱合闸回路+断路器线圈 (线圈电阻为 94 Ω), 分别在重合闸和手合闸输入端施加 220 V 直流电压信号, 测试结果表明装置能够控制线圈正确吸合。

跳闸回路测试—测试操作箱跳闸回路+断路器线圈 (线圈电阻为 94 Ω), 分别在保护跳闸和手跳输入端施加 220 V 直流电压信号, 测试结果表明装置能够控制线圈正确吸合。

压力闭锁回路测试—跳合闸压力测试, 在合闸压力和跳闸压力不满足条件的情况下 (有外加 220 V 的直流电压信号) 进行手动合闸和跳闸操作, 结果为线圈均不吸合。

跳合闸全回路监视: 当给跳位监视回路和合位监视回路输入 220 V 直流电压信号时, 合位监视和跳位监视引出端子经测试, 能够正确反映开闸和跳闸的位置。

KKJ 继电器功能测试: 通过给手合和手跳增加 220 V 电压信号后, 可正确反映手合和手跳的状态。

## 5 结论

本文结合 126 kV GIS 智能开关设备特点, 采用

ARM+FPGA 的构架模式, 设计开发了一款智能终端, 试验测试表明, 该装置能够实现对断路器运行状态的实时监测和断路器、隔离开关、接地刀闸等实时逻辑闭锁控制, 同时也具备断路器操作箱的功能。但是, 本文设计没有涉及 MMS 通信功能, 无法与站控层直接通信, 待后续进一步完善。

### 参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
GAO Xiang. Application technology of digital substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 何世恩, 刘峻. IEC 61850 数字化变电站对继电保护专业的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 1-4.  
HE Shi-en, LIU Jun. Impacts of IEC61850 digital substation on relaying protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 1-4.
- [3] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.  
ZHU Lin, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [4] 和敬涵, 朱光磊, 薄志谦. 基于多 Agent 技术的电力系统集成保护[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 141-147.  
HE Jing-han, ZHU Guang-lei, BO Zhi-qian. Integrated protection for power systems based on the multi-Agent technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 141-147.
- [5] 章书剑. 智能变电站智能终端的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
ZHANG Shu-jian. The research of intelligent terminal in smart substation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [6] 黄益庄. 智能变电站自动化系统原理与应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.  
HUANG Yi-zhuang. Fundamental and application technology of smart substation automation system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [7] 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 Yong-hui, WANG Lei-tao, TAO Yong-jian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [8] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.  
LI Rui-sheng, LI Yan-bin, ZHOU Feng-quan. The functional frame and design principles of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.
- [9] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 112-116.  
LIU Hao-yu, ZUO Qun-ye, ZHANG Bao-shan. Process level network performance testing and analysis in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.
- [10] 黄智宇, 段雄英, 邹圆, 等. 基于 VLAN 技术的电子式互感器数字接口[J]. 电工技术学报, 2008, 23(3): 36-40.  
HUANG Zhi-yu, DUAN Xiong-ying, ZOU Yuan, et al. Digital interface of electronic transducers based on the VLAN technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(3): 36-40.
- [11] 王宾, 戈政, 董新洲, 等. 智能配电变电站过程总线信息共享通信特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 62-66.  
WANG Bin, GE Zheng, DONG Xin-zhou, et al. Analysis of communication characteristic with process bus data sharing for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 62-66.
- [12] 王宾, 董新洲, 许飞, 等. 智能配电变电站集成保护控制信息共享分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 4-9.  
WANG Bin, DONG Xin-zhou, XU Fei, et al. Analysis of data sharing for protection and control system in smart distribution substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 4-9.
- [13] 马辉. 数字化变电站技术丛书设计分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
MA Hui. The design of digital substation[M]. Beijing:

- China Electric Power Press, 2010.
- [14] 国家电网公司企业标准 Q/GDW428-2010. 智能变电站智能终端技术规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. No.Q/GDW428-2010 standard of State Grid Co., China. Technical specification of intelligent control device in smart substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [15] 李建基. 高压开关设备实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005. LI Jian-ji. Practical technology of high voltage switch equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [16] 冯军. 智能变电站原理以及测试技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011. FENG Jun. Fundamental and testing technology of smart substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [17] 高新华. 数字化变电站技术丛书测试分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. GAO Xin-hua. The test of digital substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [18] IEC Std 61850-7-2 communication networks and systems in substations-part 8-1: specific communication service mapping[S]. 2002.
- [19] 张燕涛, 黄伦, 王庆平, 等. IEC61850 标准一致性测试的方案和现场应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 98-102. ZHANG Yan-tao, HUANG Lun, WANG Qing-ping, et al. Scheme and application of IEC 61850 standard conformance test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 98-102.

---

收稿日期: 2013-04-15; 修回日期: 2013-09-02

作者简介:

王 宾 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、电能质量监测分析等; E-mail: Binw\_ee@mail.tsinghua.edu.cn

黄 磊 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能终端的研究工作;

曹润彬 (1986-), 女, 博士研究生, 主要从事智能变电站的相关研究工作。