

DOI: 10.7667/PSPC151326

基于 ARM 的 GOOSE 通信系统研究

段雄英, 尹睿涵, 孟 晗, 刘志恒

(大连理工大学, 辽宁 大连 116000)

摘要: 为实现 IEC61850 协议下的 GOOSE 通信, 首先分析 GOOSE 通信的映射方式、传输控制方法, 然后提出一种基于 ARM 的 GOOSE 通信系统, 介绍了系统的组成, 阐明其硬件架构和软件设计。通过实验, 详细分析 GOOSE 的协议数据单元, 验证报文重发机制, 测量通信时间。经测试, 该系统能够满足 IEC61850 协议下 GOOSE 通信的实时性和可靠性要求, 并且结构简单, 成本低廉, 在智能变电站领域有一定的应用前景。

关键词: GOOSE; IEC 61850; ARM; 智能变电站

GOOSE communication system based on ARM

DUAN Xiongying, YIN Ruihan, MENG Han, LIU Zhiheng

(Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: To implement GOOSE communication based on IEC61850, the mapping way and transmission control of GOOSE communication are analyzed firstly. Then a GOOSE communication system based on ARM is introduced. Furthermore, the hardware architecture and software design of the system are explained. During the experiment, protocol data unit of GOOSE is analyzed in detail, GOOSE repetition mechanism is verified, and time consumption of communication is measured. Through communication test, it is found that the system could meet the requirement of IEC61850 in real-time feature and reliability. In conclusion, the simple architecture and low cost of the system proposed make it useful in broad application in intelligent substation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51337001 and No. 51477024) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. DUT13YQ102, No. DUT14ZD201, and No. DUT15ZD234).

Key words: GOOSE; IEC 61850; ARM; intelligent substation

0 引言

为提高变电站设备之间的互操作性, 国际电工委员会(IEC)制订了变电站通信协议 IEC61850, 对设备的描述方式和设备间的通信进行了规定^[1]。GOOSE(通用面向对象的变电站事件)作为 IEC61850 协议中的重要通信模型, 实现了分布式功能, 可替代传统设备间的硬线连接方式, 为逻辑节点之间的通信提供了高效可靠的方法。GOOSE 被用来传输跳闸、联锁等控制信号, 因此实时性和可靠性是评估 GOOSE 通信系统的重要指标^[2]。文献[3-4]着眼于 GOOSE 的实时性和可靠性, 文献[2, 5]

讨论了 GOOSE 模型和机制, 文献[6-7]对 GOOSE 通信系统进行了仿真分析, 文献[8-11]重点研究了报文的安全通信。以上研究对 GOOSE 通信原理和仿真进行了广泛的讨论, 但并没有通信系统的硬件架构和软件设计。本文在 IEC61850 协议的框架下, 提出了一种基于 ARM 的 GOOSE 通信系统, 阐明其软硬件的设计, 系统地分析 GOOSE 的协议数据单元, 验证了报文重发机制, 并对通信时延进行测量。通过实验验证, 该系统能够满足 IEC61850 所规定的实时性和可靠性要求, 并且成本低廉, 通信时延小。

1 系统原理

区别于客户/服务器模式, GOOSE 通信采用对等模式(Peer-to-Peer), 即每个主机或程序的实例都可以同时作为客户端和服务端, 保证信息的可靠传

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51337001); 国家自然科学基金重点项目(51477024); 中央高校基本科研业务费专项基金(DUT13YQ102, DUT14ZD201, DUT15ZD234)

输。区别于 MMS(制造报文规范)的映射方式, GOOSE 报文的映射不经过会话层、传输层和网络层, 提升了传输的实时性。GOOSE 机制中还包含一系列报文控制参数来提升可靠性^[12-13]。

1.1 GOOSE 报文的映射

IEC61850-5 规定了四类报文, 分别是快速报文、中速报文、低速报文和原始数据报文。其中, GOOSE 属于快速报文 A 型, 总的传输时间应少于 3 ms[IEC 61850-5]。为提高实时性, GOOSE 报文在 OSI 七层模型中, 从表示层直接映射到数据链路层。该映射方式不经过 TCP/IP 协议, 避免通信堆栈造成传输的延迟, 从而保证了报文传输、处理的快速性。

GOOSE 报文的应用层是 PDU(协议数据单元), 由 ASN.1(抽象语法标记 1)表示。表示层对应用层 PDU 的编码, 采用 ASN.1 的基本编码规则 BER。数据链路层的传输遵循 IEC802.3 协议(以太网协议), 其以太网类型(EtherType)是 0x88b8^[14]。

1.2 GOOSE 传输控制

GOOSE 报文的触发形式是, 当预配置中的数据集成员发生变化时发送 GOOSE 报文。IEC61850 协议针对 GOOSE 报文建立了重发送机制, 如图 1 所示。在没有触发时, 以 T_0 为间隔发送 GOOSE 报文。触发后, 以 T_1 为间隔发送两次、再以 T_2 、 T_3 为间隔发送一次同样的报文, 以减少接收端丢包的概率, 提高可靠性。该重发送机制下的报文被称为心跳报文, 若“心跳”停止, 则说明相应装置出现问题, 为设备自检提供了一种可能的方式, 可增强系统的可靠性^[12-13]。

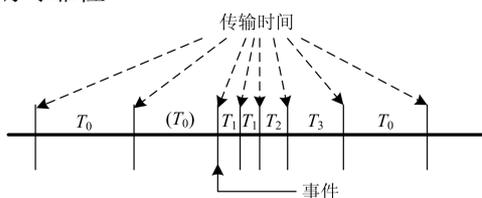


图 1 重发送机制示意图

Fig. 1 Mechanism of resending

GOOSE PDU 中, 参数 StNum(状态变化次数序号)、SqNum(重发序号)和 TimeAllowedToLive(报文存活时间)是报文传输的控制参数。以上参数可表明报文的更新情况, 提供了装置自检和网络入侵检测的依据, 确保了传输的可靠性。其详细作用会在后文的报文分析中加以说明。

2 系统硬件设计

2.1 方案选择

为实现 GOOSE 通信, 采用嵌入式解决方案。

目前可选用的主控芯片有 FPGA、微处理器、DSP、SoC 等。其中, FPGA 实时性较好, 但成本较高; DSP 的数学运算能力强, 本设计不涉及复杂的数学运算; 片上系统需将系统关键部件集成在一块芯片上, 实现难度较大。综合以上, 选择基于 ARM 的嵌入式微处理器 STM32F407 为主控芯片: 该芯片基于 ARM Cortex-M4 内核, 采用意法半导体的 NVM 工艺和 ART 加速器, 工作频率高达 168 MHz, 处理性能达到 210 DMIPS, 并且集成以太网 MAC 控制器, 价格低廉, 在市面上较为活跃。

主控芯片已集成 MAC 层功能, 与只具备物理层 PHY 的芯片相结合即可实现以太网功能, 因而不需要选用同时集成 MAC 层和 PHY 层的芯片, 进一步降低了成本。PHY 芯片选用 DP83848VYB, 其为单网口的以太网物理层收发器, 支持 10/100 Mb/s。

2.2 系统架构

GOOSE 通信系统主要由开关量输入、复位电路、电源、晶振电路、主控芯片 STM32F407VG、PHY 芯片 DP83848VYB、带隔离变压器的 RJ45 接口组成, 如图 2 所示。

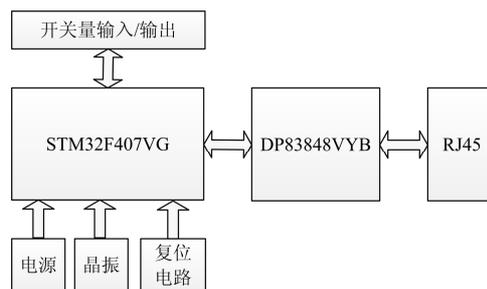


图 2 系统结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of the system

STM32F407VG 的 MAC(媒体访问控制)接口和 DP83848VYB 之间的连接方式可选择 MII(介质无关接口)和 RMII(精简的介质无关接口)。RMII 接口有 TXD<1:0>, TX_EN, RXD<1:0>, RX_ER, REF_CLK, CRS_DV 等 8 根信号线, 比 MII 接口的 16 根信号线节约了 8 个引脚。尽管 RMII 的数据传输宽度是 MII 的一半, 但其时钟频率是 MII 的一倍, 因此传输速率并没有降低。所以选择 RMII 接口连接 MAC 层和 PHY 层, 提高了主控芯片引脚的使用效率, 为日后的功能拓展提供了更大的可能性。

3 系统软件设计

3.1 报文重发送机制

按照 1.2 中的描述, 将 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 分别设置为 5 s、2 ms、4 ms、8 ms, 将 GOOSE 触发设置

为中断。在配置 GOOSE 的中断时,选择边沿触发,设定为优先级组三,抢占优先级(3-bit)为 7,响应优先级(1-bit)为 1。流程图如图 3 所示。

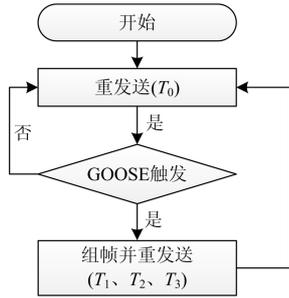


图 3 重发送流程图

Fig. 3 Flow chart of resending

3.2 网络标签设置

为了在交换机转发时更加高效,在 GOOSE 报文组帧时,需对网络标签进行设置。传输支持基于 IEEE802.1Q 的 VLAN/ 优先级标记,提供 QoS(Quality of Service, 服务质量)。在源 MAC 地址和以太网类型之间,有 TPID(标签协议标志)和 TCI(标签控制信息)^[13, 15]。

如图 4 所示,TPID 为 0x8100,表示遵循 IEEE802.1Q 协议。12 位的 VID 允许总共 4 094 个 VLAN ID(2 个保留)。设置 VID 后,交换机对数据包的转发大大减少,只会将其转发到属于该 VLAN 的端口,能够节约带宽,减少网络拥堵的可能性,从而提高实时性。同时,在逻辑上将不同 VLAN 进行隔离,提高了系统的安全性。

TCI 的前 3 位为优先级,一共可设置 8 个等级,GOOSE 报文默认为 4。遵循 IEEE802.1P,当交换机网络阻塞时,优先级高的报文会被提前处理,有助于提高 GOOSE 报文的实时性^[16]。

文献[11]在不同的网络流量下测量了 GOOSE 报文的传输时间,设置网络标签后的 GOOSE 报文传输总时间将节约 8.8%至 11.2%,且网络流量越大,优势越显著。

	8	7	6	5	4	3	2	1
1	TPID							
2	0x8100							
3	priority			CFI		VID		
4	VID							

图 4 基于 IEEE802.1Q 的 VLAN/优先级标记

Fig. 4 VLAN priority tag based on IEEE802.1Q

3.3 寄存器配置

数据出栈模式的选择。在 STM32F407 的 MAC 功能中,发送数据前,由 DMA(直接内存访问)将数据从存储器转移到 FIFO 中,再出栈传给 MAC 内核。

FIFO 出栈存在两种模式,阈值模式和存储转发模式。在阈值模式下,若 FIFO 中的字节数超过配置的阈值(或在超过阈值前写入帧结束),数据就准备好弹出并转发到 MAC 内核。而在存储转发模式下,仅当在 FIFO 中存储完整的帧后,才会向 MAC 内核弹出帧。显然,在报文较大时,阈值模式具有更好的实时性,因此将 ETH_DMAOMR 的 TSF 位设置为 0。

过滤器配置。由于 GOOSE 在交换机中的转发时基于组播技术,可屏蔽广播帧,将帧过滤寄存器中的 BFD 置 1。

3.4 报文解析

报文解析流程图如图 5 所示。

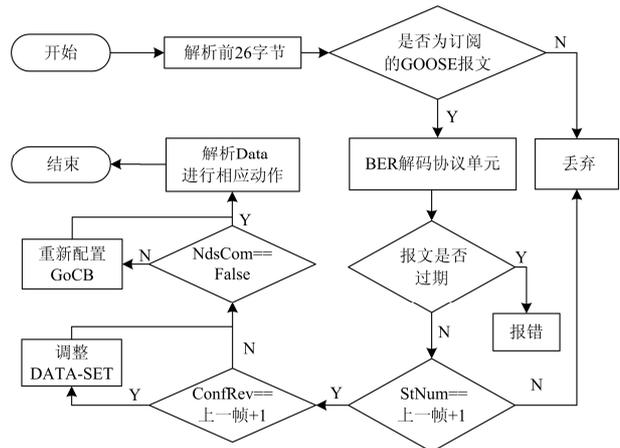


图 5 GOOSE 报文解析流程图

Fig. 5 Flow chart of GOOSE packet parsing

在接收到报文后,首先解析帧头,检查以太网类型、目的地址、源地址。根据以太网类型判断是否为 GOOSE 报文。IEC61850 建议的 GOOSE 组播的目的地址范围是 01-0C-CD-01-00-00 至 01-0C-CD-01-01-FF。通过源地址和 APPID 可判断出该 GOOSE 报文是否是接收端订阅的。以上环节都解析正确后,判定为合法 GOOSE 报文,再解析 GOOSE 协议数据单元。在解析时,对报文控制参数 StNum(状态变化次数序号)、SqNum(重发序号)、TimeAllowedToLive(报文存活时间)要进行记录和判断,如出现问题要报错。另外,要将初始化时的 GoCB(GOOSE 控制块)与协议数据单元部分的 GoCBReference、GoID、DataSet、ConfRev、NdsCom 等参数比较,若不匹配则进行相应操作。其中,ConfRev 是配置版本号,当数据集改变时,该值加 1。NdsCom 为 True 时,需按照此报文的内容更新 GoCB。在解析 alldata 部分时,应考虑到其数据类型的多样化,首先判断数据类型,然后调用不同的

解析函数。

4 实验分析

首先, 将 GOOSE 通信系统与 PC 通过网线连接, 测试在正常状况下的报文重发与 GOOSE 触发后的报文重发。用支持 IEC61850 的网络抓包软件 MMS Ethereal 在 PC 端监视报文的接收情况。另外, 将 GOOSE 通信系统与另一个具有以太网功能的开发板通过网线连接, 搭建一个 GOOSE 传输时间的测试平台, 测试 GOOSE 报文从一个终端传到另一个终端的总时间。

4.1 报文结构分析

GOOSE 通信开始后, 从 MMS Ethereal 在 PC 端捕获的报文中选取一帧, 截图如图 6 所示。通信系统发出的报文可以被成功解析, 说明系统对 GOOSE 报文的组帧是正确的, 将 GOOSE 的协议数据单元分析如下。

```
IEC GOOSE
{
  Control Block Reference*: IEDSim/LLN0$Go$Eval
  Time Allowed to Live (msec): 10000
  DataSetReference*: IEDSim/LLN0$Eval_DataSet
  GOOSEID*: GOOSE
  Event Timestamp: 2015-05-03 17:03.12.215988 T
  StateNumber*: 3
  SequenceNumber*: Sequence Number: 1
  Test*: TRUE
  Config Revision*: 1
  Needs Commissioning*: FALSE
  Data
  {
    BOOLEAN: TRUE
    VSTRING: GOOSE Publisher Test
  }
}
```

图 6 MMS Ethereal 捕获的 GOOSE 报文

Fig. 6 GOOSE packet caught by MMS Ethereal

A) Control Block Reference: GOOSE 控制块的引用, 为 GoCB 的唯一路径名, 格式为 LDName/LLN0.GoCBName。

B) Time Allowed to Live: 报文存活时间, 即收到下一帧报文前等待的最长时间, 配置为 $2T_0$, 为 10 s。

C) DataSetReference: 数据集引用, 为要传输的数据集的路径。

D) Event Stamp: 时间戳, 该 GOOSE 事件发生的时间, 而非报文传送的时间。

E) State Number: 状态变化次数序号, 表示 GOOSE 通信建立至今, 引用的数据集发生变化的次数。

F) Sequence Number: 重发序号, 表示同一帧报文处于第几次重发送。当 State Number 改变时, 该值重置为 1。

G) Config Revision: 配置版本号, 若数据集成员被删除、重新排序等, 需要将该参数加 1。

H) Needs Commission: 表示是否需要对 GoCB 进行重新配置。

I) Data: 数据集, 包含需要传送的数据, 可以是多重数据类型。

4.2 可靠性分析

GOOSE 通信开始后, 将 MMS Ethereal 捕获到的多帧 GOOSE 报文的时间按先后顺序排列, 如图 7 所示。报文 7、8、9 表示在没有 GOOSE 事件的情况下, 报文以 5 s 为周期重发送。报文 10 为 GOOSE 事件发生时, 跳出 5 s 周期的循环, 重新组帧发送的一次全新的 GOOSE 报文。之后, 分别以 2 ms、2 ms、4 ms、8 ms 为间隔重发四次报文, 再回到以 5 s 为周期重发送(报文 15)。

No.	Time	Source	Destination	Protocol
7	29.997331	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
8	34.996916	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
9	39.996498	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
10	42.735041	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
11	42.737000	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
12	42.739051	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
13	42.743068	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
14	42.751172	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE
15	47.750680	00:01	01:0c:4d	IECGOOSE

图 7 捕获报文的时刻

Fig. 7 Moment of capture

这样的重发送机制增强了 GOOSE 通信的可靠性: A) 当某一帧报文遗失时, 系统的功能将不会受到影响; B) 持续地监测 GOOSE 的发布者是否处于正常的工作状态; C) 结合重发送报文中的 State Number 和 Sequence Number 可以用来判断网络入侵情况, 在无加密的情况下最大程度地加强了网络安全。

4.3 实时性分析

在 IEC61850-5 中规定, 传输时间计时从发送方把数据内容置于其传输栈顶时刻开始, 直到接收方从其传输栈顶中取走数据时结束。本设计搭建的测试平台如图 8 所示, t_a 、 t_b 、 t_c 之和即为总的传输时间。

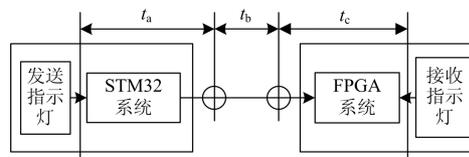


图 8 测试平台示意图

Fig. 8 Schematic diagram of test platform

本系统和具有以太网通信功能的 FPGA 系统之间通过网线连接, 直接组网。实验时本系统发送,

FPGA 系统接收。在发送端, 发送命令开始前点亮发送指示灯; 在接收端, 收到报文后, 点亮接收指示灯。示波器通道一探头连接发送指示灯, 通道二探头连接接收指示灯。在 GOOSE 事件到来时, 用示波器触发模式捕捉到波形如图 9。

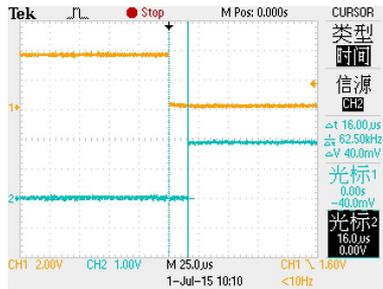


图 9 通信时间测试结果

Fig. 9 Test results of communication time

由图 9 可知, GOOSE 报文从发送到接收总共耗时 $16 \mu\text{s}$, 能够较好地满足 IEC61850 对 GOOSE 的实时性要求。

5 结论

分析了基于 IEC61850 的 GOOSE 机制, 重点阐述 GOOSE 的映射方式和传输控制。在此基础上给出基于 ARM 的 GOOSE 通信系统的硬件架构和软件设计方法。通过抓包实验验证了该系统 GOOSE 报文组帧的正确性和重发送机制; 通过通信试验测试该系统的通信时延为 $16 \mu\text{s}$ 。实验结果表明, 该系统能够满足 GOOSE 通信的实时性和可靠性要求。

与市面上基于 FPGA 的 GOOSE 通信系统相比, 本系统成本低, 系统集成度高, 通信时延小。FPGA 的 I/O 引脚多, 在开关量输入输出方面更有优势。当开关量输入输出较多时, 采用 ARM 和 FPGA 结合的方案^[17], 将 ARM 作为核心控制器, FPGA 作为引脚拓展, 能更好发挥各自的优势。

该系统结构简单, 成本低廉, 能较好地完成 GOOSE 通信任务, 在智能变电站领域有一定的应用前景。

参考文献

[1] CLAVEL F, SAVARY E, ANGAYS P, et al. Integration of a new standard: a network simulator of IEC 61850 architectures for electrical substations[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, 21(1): 41-48.

[2] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 45-50.

YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al.

Generic substation event model based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 45-50.

[3] 韩明峰, 郑永志, 李小滨. 基于 VxWorks 系统的 GOOSE 实现与可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 29(2): 49-52.

HAN Mingfeng, ZHENG Yongzhi, LI Xiaobin. A GOOSE realization method and reliability analysis based on the VxWorks system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 29(2): 49-52.

[4] 沈健, 黄国方, 周斌. IEC61850GOOSE 在变电站综合自动化系统中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 2): 433-436.

SHEN Jian, HUANG Guofang, ZHOU Bin. The application of IEC61850 GOOSE in substation automation[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 433-436.

[5] 宋丽君, 王若醒, 狄军峰, 等. GOOSE 机制分析、实现及其在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 31-35.

SONG Lijun, WANG Ruoxing, DI Junfeng, et al. Analysis and implementation of GOOSE mechanism and its application in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 31-35.

[6] 何瑞文, 钟康有, 陈超, 等. 变电站过程层报文分网传输性能的仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 17-22.

HE Ruiwen, ZHONG Kangyou, CHEN Chao, et al. Simulation analysis of packet transmission performance through different network in substation process layer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 17-22.

[7] 段雄英, 张军, 黄智慧, 等. 基于 OPNET 的 GOOSE 双网性能分析[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(3): 198-201.

DUAN Xiongying, ZHANG Jun, HUANG Zhihui, et al. Analysis of performance of double networks of GOOSE based on OPNET[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(3): 198-201.

[8] 高吉普, 徐长宝, 戴宇, 等. 交换机端口安全策略在智能变电站中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 117-122.

GAO Jipu, XU Changbao, DAI Yu, et al. Research on application of switch port access control in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 117-122.

[9] 汪强, 徐小兰, 张剑. 一种新的智能变电站通信业务安全隔离技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-6.

WANG Qiang, XU Xiaolan, ZHANG Jian. A new method of smart substation communication service security isolation

- technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-6.
- [10] 刘力政, 段斌, 黄生龙. 变电站安全通信密码计算的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 65-68.
LIU Lizheng, DUAN Bin, HUANG Shenglong. Design and implementation of cryptographic computation for substation security communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 65-68.
- [11] 罗钦, 段斌, 肖红光, 等. 基于 IEC 61850 控制模型的变电站防误操作分析与设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 61-65.
LUO Qin, DUAN Bin, XIAO Hongguang, et al. Analysis and design of anti-maloperation for substation based on control model in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 61-65.
- [12] 李永亮, 李刚. IEC61850 第 2 版简介及其在智能电网中的应用展望[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 11-16.
LI Yongliang, LI Gang. An introduction to 2nd edition of IEC 61850 and prospects of its application in smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 11-16.
- [13] MEKKANEN M, VIRRANKOSKI R, ELMUSRATI M, et al. Analysis and methodology for measuring the IEC61850 GOOSE messages latency: gaining interoperability testing[J]. Computer Applications and Information Systems (WCCAIS), 2014: 1-6, 17-19.
- [14] 郑新才, 周鑫, 王素华, 等. 数字化变电站的 GOOSE 网络测试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 85-89.
ZHENG Xincan, ZHOU Xin, WANG Suhua, et al. Research on test technology of GOOSE network in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 85-89.
- [15] 童晓阳, 李岗, 陈德明, 等. 采用 IEC 61850 的变电站间隔层 IED 软件设计方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 54-57.
TONG Xiaoyang, LI Gang, CHEN Deming, et al. IEC 61850 based software design scheme of bay level IED in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 54-57.
- [16] 李小滨, 韩明峰. GOOSE 实时通信的分析与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 59-62.
LI Xiaobin, HAN Mingfeng. Analysis and realization of GOOSE real-time communication[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 59-62.
- [17] 孙通. 基于 IEC61850 智能终端设计及其通信的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
SUN Tong. Research on intelligent terminal design and communication based on IEC61850[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

收稿日期: 2015-07-31; 修回日期: 2015-11-23

作者简介:

段雄英(1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能化高压电器及智能检测技术的研究, 着重研究高压电子式互感器和相控开关技术;

尹睿涵(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为基于 IEC61850 的智能变电站通信. E-mail: 09yrh@mail.dlut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)