

新一代智能变电站 SV 直采和 GOOSE 共口传输方案研究

李宝伟^{1,2}, 文明浩², 李宝潭¹, 倪传坤¹, 李旭¹, 孟利平¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 阐述了 SV 采用点对点直采方式的收发处理方案和 GOOSE 的传输机制, 分析了 SV 和 GOOSE 的通信模型和报文结构。在此基础上, 提出一种 SV 直采和 GOOSE 共口传输的方法, 过程层设备对传输通道进行时分复用, 在 SV 报文传输的空闲时间完成 GOOSE 报文的发送; 间隔层设备利用以太网控制器的接收机制并采用 FPGA 对其直接控制, 解决了通用型以太网控制器无法区分 SV 和 GOOSE 报文导致的重采样时标混乱的问题。从理论分析和实际应用可知, 该方案不涉及硬件改动、软件处理简单、可靠性高、易于实现, 有着广泛推广的现实意义。

关键词: 新一代智能变电站; SV 直采; GOOSE; 共口传输; 重采样

Research of the scheme for SV direct sampling and GOOSE transmit in the same port in new generation smart substation

LI Bao-wei^{1,2}, WEN Ming-hao², LI Bao-tan¹, NI Chuan-kun¹, LI Xu¹, MENG Li-ping¹

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper expounds the receiving and dispatching scheme of SV using a point-to-point direct sampling and the GOOSE transmission mechanism, analyzes the communication model and the packet structure of SV and GOOSE. Based on this, a method of sharing the same port by SV direct sampling and GOOSE transmission is put forward. The equipment in the process level uses the time division multiplexing for the transmission channel, and sending the GOOSE message at the idle time of SV message transmission. The equipment in the bay level uses the receiving mechanism of Ethernet controller and adopts FPGA to control directly, and solves the problem that the general Ethernet controller cannot distinguish the SV from GOOSE message, which causes chaotic time scale in resampling. The theoretical analysis and practical application show that the scheme has practical significance for popularization, because it does not involve hardware changes, the software process is simple, it has a high reliability, and it is easy to implement.

Key words: new generation smart substation; SV direct sampling; GOOSE; transmit in the same port; resample

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0096-06

0 引言

新一代智能变电站以“结构布局合理、系统高度集成、技术装备先进、经济节能环保、支持调控一体”为技术特征, 遵循“功能集约、信息集成、设备智能、设计优化”的建设原则, 以高度可靠的智能设备为基础, 以协调互动的测控技术为支撑, 以高效便捷的运维模式为保障, 实现全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、应用功能互动化, 满足高可靠性, 高智能化, 易施工, 便扩展, 轻维护的建设、运行与检修的要求, 全面支撑调控一体, 助力电网发展方式转变。在此背景下提

出了110 kV及以下电压等级系统过程层智能终端和合并单元装置集成, SV (Sampled Value, SV) 直采报文和本间隔GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE) 报文传输共享网口。220 kV及以上系统处于安全性考虑仍要求过程层智能终端和合并单元独立配置。因此, 在110 kV及以下电压等级系统中, 需要在原SV直采链路上增加GOOSE报文的传输, 由于SV直采对过程层设备的报文发送时刻和间隔层设备的报文接收时刻都有很高的要求^[1-2], 在SV直采链路中再进行GOOSE报文传输会对间隔层设备和过程层设备都带来新的技术挑战。

本文分析SV直采方案和GOOSE传输机制, 并对SV和GOOSE通信模型及报文进行了进一步的研究, 在不改变硬件结构的基础上提出了一种SV直采和GOOSE共口传输方案。

1 SV 直采方案

智能变电站采用电子式互感器, 其输出的数字量采样信号经过合并单元数据同步之后供保护装置使用。SV可采用组网模式^[3], 也可采用点对点直采模式。当SV采用直采模式传输时, 合并单元输出的数字量采样值直接发送至保护装置, 采样同步在间隔层完成, 而合并单元需要将前端的采样延时标记在数字采样值报文中。

1.1 SV 直采时序分析

为了分析SV直采方案的关键技术, 首先对SV采用点对点直采方式时整个采样环节的时序进行分析^[4-5]。SV直采方式时序如图1所示。

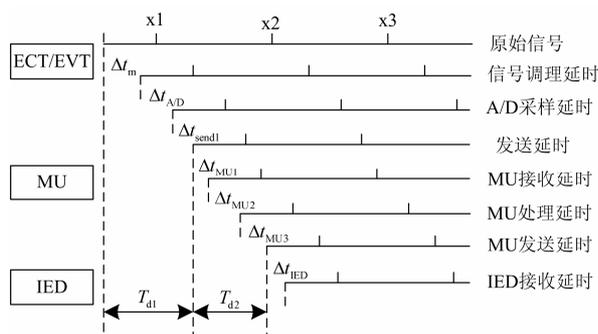


图1 SV 直采时序

Fig. 1 Time sequence of SV direct sampling

由图1可知, SV采用点对点直采方式时包括三个环节, 电子式互感器、合并单元和间隔层IED设备。电子式互感器、合并单元在传输采样值环节都会引入一定的延时, 电子式互感器带来的延时为 T_{d1} , 合并单元带来的延时为 T_{d2} 。延时 T_{d1} 由电子式互感器标记在其发送的采样值报文中, 合并单元将自身造成的延时 T_{d2} 与电子式互感器的延时进行累积, 所以合并单元发送采样值报文中的额定延时数值应为 $T_{d1}+T_{d2}$ 。

电子式互感器和合并单元之间传输规约固定采用FT3, 和后端采用直采和组网方式无关^[6], 本文不再对电子式互感器进行展开分析。

1.2 合并单元 SV 处理

SV采用直采方式时, 合并单元输出采样额定延时, 额定延时数值为从一次模拟量产生时刻到合并单元对外接口输出数字量的时间。因此合并单元SV处理的关键在于发送时刻和采样报文中额定延时数

值的准确性。

为了保证SV发送时刻的准确性, 合并单元一般采用“提前采样, 定时发送”的方法。合并单元内部采样处理时序如图2所示^[7-9], 完成重采样后不立即发送, 在距重采样时刻一个采样间隔后的时刻将提前准备好的采样值报文发送出去, 采样值报文中所带额定延迟数值为重采样时刻延时+一个采样间隔时间。工程应用中为了提高发送时刻的准确性, 采用FPGA来控制以太网控制器的发送, 可以保证SV报文发送时刻误差小于 $1\mu\text{s}$ 。

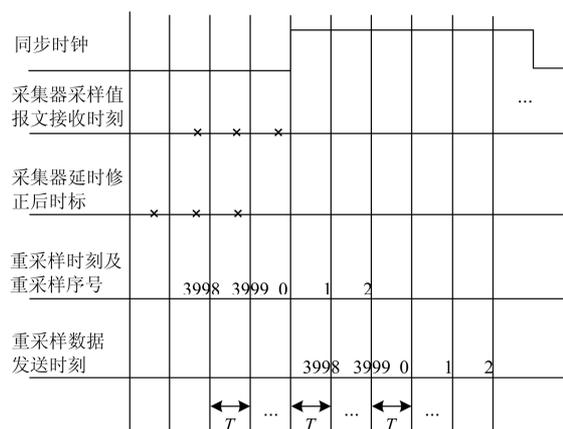


图2 合并单元处理时序

Fig. 2 Time sequence of merge unit sampling

1.3 间隔层 SV 处理

当间隔层IED设备同时接收多组SV时, 需要根据各组采样值报文的接收时刻和报文中所带额定延迟数据进行采样同步, 间隔层IED设备采样同步时序如图3所示。

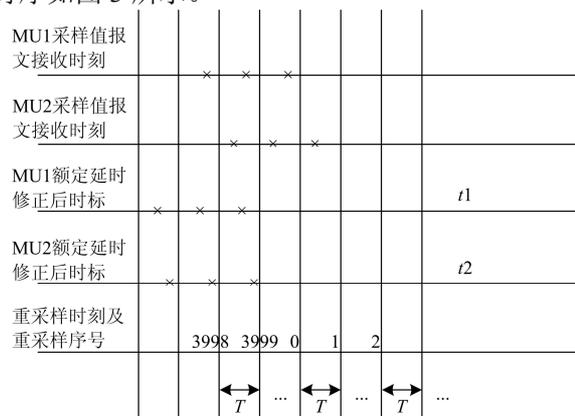


图3 间隔层设备重采样时序

Fig. 3 Time sequence of bay level device resample

由于额定延迟数值仅取决于合并单元, 所以为了提高采样精度, SV接收方需要准确地获取采样值报文的接收时刻。为了提高接收时刻的准确性, 工

程应用中使用 FPGA 记录 SV 报文的接收时刻^[10], 具体做法为通过配置以太网控制器的工作模式, 可以实现每收到一帧完整的以太网报文以太网控制器会给出一个中断信号, FPGA 检测到中断信号时记录下当前时刻作为 SV 报文的接收时标。CPU 根据 SV 报文接收时标和报文中额定延迟数值完成采样同步。按此做法可以保证 SV 报文的接收时标误差小于 1 μs。

由上述分析可知, SV 采用直采模式时采样精度主要取决于发送方发送时刻和接收方接收时标的准确性, 采用 FPGA 精确控制报文发送时刻和记录报文接收时刻并可达到很高的精度。但由于通用以太网控制器无法区分以太网报文的类型, 所以接收方只能接收一组 SV 报文, 否则会造成接收时标混乱, 对 SV 重采样同步造成影响, 所以在 SV 直采链路上无法传输其他数据。

2 GOOSE 传输机制

IEC61850-7-2 定义的 GOOSE 服务模型使系统范围内快速, 可靠地传输输入、输出数据值成为可能。其特殊通信服务映射使用一种特殊的重传方案以获得合适级别的可靠性。图 4 为 GOOSE 重传机制示意图。

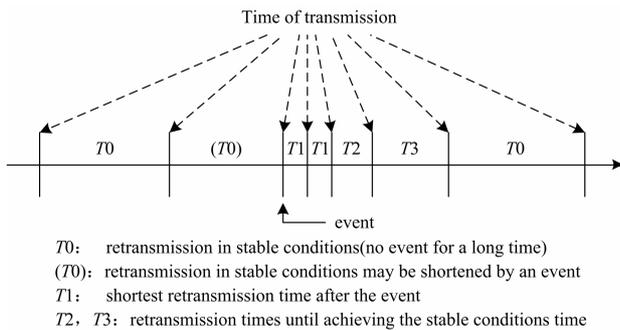


图 4 事件传输时间

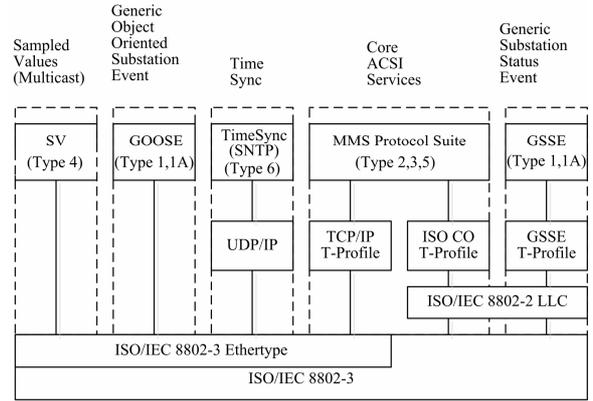
Fig. 4 Transmission time for events

图 4 中, T_0 为稳态重传延时, T_1 为突变重传 1 时限, T_2 为突变重传 2 时限, T_3 为突变重传 3 时限。工程应用中一般取 $T_0=5\text{ s}$, $T_1=2\text{ ms}$, $T_2=4\text{ ms}$, $T_3=8\text{ ms}$ 。正常情况下 GOOSE 报文每 5 s 重传一次, 产生的数据流量很小, 但在故障时, 可能多个开关量信号变位, 会产生较大的数据流量。

3 SV 和 GOOSE 报文分析

对 SV 和 GOOSE 的通信模型、传输机制和报文长度进行分析。图 5 为 IEC61850 规定的通信模型, 图中 GOOSE 和 SV 通信模型完全相同。表 1

为 SV 和 GOOSE 链路层报文帧格式, 表中 SV 和 GOOSE 的报文结构也完全相同。SV 的采样值和 GOOSE 的事件按照 ASN.1 编码在 APDU 中填充^[11], 因此 SV 和 GOOSE 报文长度是可以根据工程配置计算出来的。



(Type x) is the Message type and performance classe defined in IEC 61850-5

图 5 功能与框架概述

Fig. 5 Overview of functionality and profiles

表 1 SV 和 GOOSE 报文帧格式

Table 1 Message format of SV and GOOSE

Preamble		7 bytes
Start-of-Frame-Delimiter		1 bytes
Header	Destination MAC	6 bytes
	Source MAC	6 bytes
Priority	TPID	2 bytes
tagged	TCI	2 bytes
Ethertype		2 bytes
Header	APPID	2 bytes
	Length	2 bytes
	Reserved 1	2 bytes
	Reserved 2	2 bytes
APDU		<1493 bytes
CRC		4 bytes
Interframe Gap		12 bytes

SV 仅传输模拟量采样值类型数据, 其报文的格式很固定, 报文长度仅和配置的采样值通道个数有关, 对于 1 个线路间隔 SV 报文最大长度=基本长度 50 bytes+APDU 内部标识长度 93 bytes (最大)+采样数据长度 $17 \times 8\text{ bytes}=279\text{ bytes}$ 。

GOOSE 报文传输数据类型可以为: 状态信号 (1 bytes)、整形数值 (4 bytes) 以及浮点数值 (5 bytes), 同时每个数据还可以带品质 (2 bytes) 和时标 (8 bytes), 所以 GOOSE 的长度根据传输数据的不同报文长度差别很大。一帧含 32 个状态信号的

GOOSE 最大报文长度=基本长度 50 bytes+APDU 内部标识长度 255 bytes (最大)+32×3 bytes=401 bytes, 如果每个状态信号都带时标, 则 GOOSE 报文的最大长度为 721 bytes。

4 SV 直采和 GOOSE 共口传输方案

SV 报文和 GOOSE 报文使用同一以太网口传输, 可将通道看为一个全双工高速串行通道, 对其进行时分复用。由于 SV 采用直采模式时对发送和接收时刻都要求非常精确, 因此必须在保证 SV 传输的基础上合理安排 GOOSE 的传输时刻。

4.1 过程层设备处理方案

过程层设备需要在同一个网口上发送 SV 报文和 GOOSE 报文, 同时还要接收 GOOSE 报文, 因 SV 采用直采方式对发送时刻精度有着极高的要求, 因此过程层设备以发送 SV 报文为最高优先级, 其次发送 GOOSE 报文, 最后是接收 GOOSE 报文。考虑到过程层设备需要上送的状态量很多, GOOSE 发送按 5 组考虑, 接收 GOOSE 考虑间隔层设备为保护测控装置集成, 按 2 组考虑。

工程应用中直采 SV 采样率为 4 kHz, 因此将每 250 μs 作为一个时隙, 分析每个时隙的传输能力。以太网报文长度范围为 64~1522 bytes, 通信速率为 100 Mbit/s, 传输一帧最长的以太网报文需要 121.76 μs, 每个时隙可最少传输 2 帧以太网报文。

过程层设备根据配置文件可以获取在一个以太网口发送 GOOSE 报文帧数, 并且可计算出每帧 GOOSE 报文的最大长度, 装置上电初始化过程中根据配置文件计算出在两帧 SV 报文中插入的 GOOSE 报文帧数。

SV 以一个线路间隔为例, 最大报文长度为 279 bytes, 传输时间为 22.32 μs; 发送 GOOSE 以 32 个带时标状态量为例, 最大报文长度为 721 bytes, 传输时间为 57.68 μs, 因此每个 250 μs 的时隙最多可发送 1 帧 SV 报文和 3 帧 GOOSE 报文, 考虑可靠性每个 250 μs 发送 1 帧 SV 报文和 2 帧 GOOSE 报文。同时发送 5 帧 GOOSE, 最大发送延时为 750 μs, 考虑智能终端上送信号均带有变位时标, 所以 GOOSE 的发送延时并不对间隔层设备的遥信分辨率造成影响。GOOSE 重传机制中变位发送间隔一般设置为 2 ms, 所以两帧 SV 之间插入 2 帧 GOOSE 发送不会造成报文的积累问题。

图 6 给出了过程层设备内部处理时序。仍采用原合并单元的任务调度机制。在 FPGA 设置 250 μs 定时器, 定时器计时到立即执行 FPGA 发送任务并触发 CPU 的中断任务, FPGA 接收任务始终执行。

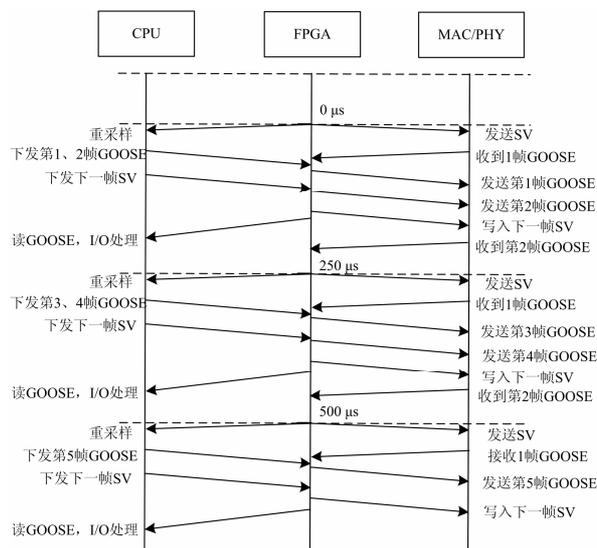


图 6 过程层设备处理时序

Fig. 6 Processing time sequence of process level device

CPU 中断任务流程:

- 1) 重采样;
- 2) 检查是否有 GOOSE 报文发送, 如果有, 将 GOOSE 报文下发至 FPGA 发送缓存区, 最多下发 2 帧 GOOSE 报文;
- 3) 将 SV 报文下发至 FPGA 发送缓存区;
- 4) 检查 FPGA 报文接收缓存区, 有报文读取并处理。

FPGA 发送任务流程:

- 1) 立即向以太网控制器写发送命令, 发送上一帧 SV 报文;
- 2) 实时监控以太网控制器发送, 发送完毕立即将 FPGA 发送缓存区下一帧报文拷贝至以太网控制器发送缓存区;
- 3) 检查 FPGA 发送缓存区是否为空, 非空就向以太网控制器写发送命令, 否则, 最后一帧报文为下一个间隔要发送的 SV, 不再写发送命令。

FPGA 接收任务:

FPGA 实时检测以太网控制器的接收, 当有 GOOSE 报文接收时, 读入 FPGA 开设的接收缓存区。

实际工程中过程层设备有多个以太网口, 可以将多个以太网控制同时打开, 一次性将发送报文写入多个以太网控制器。

4.2 间隔层设备处理方案

间隔层设备需要在同一个网口上接收 SV 报文和 GOOSE 报文, 同时还要发送 GOOSE 报文。因 SV 采用直采方式对报文接收时标精度有着极高的要求, 因此间隔层设备就需要优先处理以太网报文

接收，其次考虑 GOOSE 报文发送。

以太网控制器配置为仅接收产生中断信号，根据以太网控制器的内部机制，使用 FPGA 控制以太网控制器，当 FPGA 收到接收中断后记录当前时刻作为以太网报文接收时标，立即清以太网控制器的中断状态寄存器接收标志位，确保下一帧以太网报文接收完成后可以触发中断信号，然后将报文读入 FPGA 开设的接收报文缓存区，并将报文接收时标附在报文的尾部。

CPU 定时查询 FPGA 的报文接收缓存区，有报文就全部取走，判断是 SV 报文就将时标保存作为重采样时标，判断是 GOOSE 报文就将时标丢弃，因此 FPGA 不需要识别接收报文类型，仅需要将所有接收的以太网报文均打上时标即可。因一帧最短的以太网报文为 64 bytes，传输延时为 5.12 μs，足够 FPGA 完成记录时标并清以太网控制器中断标志寄存器操作。为减小 FPGA 内部缓存，设置 CPU 每 70 μs 查询一次。间隔层设备 GOOSE 发送策略为在每次任务的最后将需要发送的 GOOSE 报文全部提交给 FPGA，FPGA 检测以太网控制器的发送，以太网控制器发送空闲就立即发送 GOOSE 报文。

图 7 为间隔层设备内部处理时序。CPU 需要设置定时器任务，每次进任务就查看 FPGA 接收报文缓存区是否有数据，有数据就将其读空，然后执行报文解析、重采样和下发 GOOSE 报文。而 FPGA 仅需要实施接收报文、打时标、清中断状态寄存器接收标志和发送报文即可。

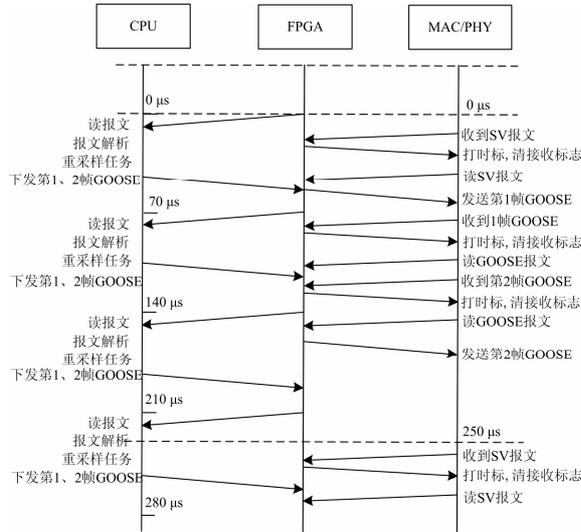


图 7 间隔层设备处理时序

Fig. 7 Processing time sequence of bay level device

5 实际应用

采用上述 SV 直采和 GOOSE 共口传输方案开

发了合并单元智能终端集成装置和间隔层保护测控集成装置。过程层设备采用 1 块 CPU 插件完成合并单元和智能终端功能，间隔层设备单独采用 1 块 CPU 插件用于 SV 和 GOOSE 的收发。过程层设备 CPU 插件和间隔层接口 CPU 插件采用相同的设计。CPU 采用 Freescale 的 MPC8377，以太网控制器采用 DAVICOM 的 DM9000C，FPGA 采用 Xilinx 的 Spartan-6 XC6SLX45，其硬件结构如图 8 所示。以太网控制全部交由 FPGA 控制，FPGA 通过数据总线操作各以太网控制器，CPU 不直接访问以太网控制器。每块板卡装 7 个 DM9000C，FPGA 对每个 DM9000C 开 5 kbytes 接收缓存区和 5 kbytes 发送缓存区。

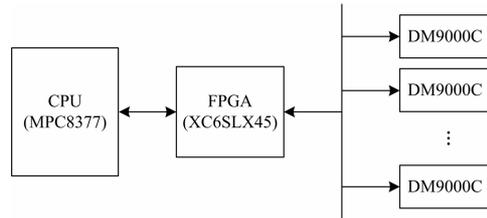


图 8 硬件结构示意图

Fig. 8 Schematic of the hardware structure

搭建如图 9 所示的测试系统对采用该方案开发的过程层设备 SV 进行校验。由于 SV 报文流量固定，所以采用 GOOSE 报文频繁变位方式模拟网络负荷，对设备在较大网络负荷下长期工作稳定性进行验证。间隔层 IED 通过点对点直连方式同时接入 3 套过程层设备。配置为：间隔层设备每个口发送 2 组 GOOSE，过程层设备发送 1 组 SV 和 4 组 GOOSE，链路上信息全接收。开关量频繁变位方法为：间隔层设备每隔 10 ms 开出分/合信号，触发 2 组 GOOSE 同时变位；过程层设备实时转发分/合信号给 I/O 设备，I/O 设备实时反馈接收信号；过程层设备根据 I/O 设备反馈接点触发所有 4 组 GOOSE 同时变位。

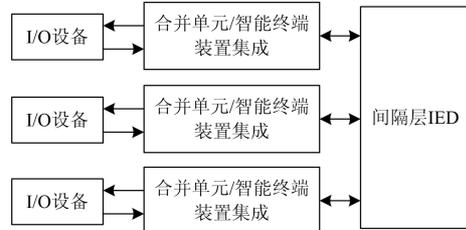


图 9 测试系统示意图

Fig. 9 Test system schematic

经过 72 h 连续运行测试，其结果表明，过程层设备直采 SV 报文发送间隔的误差小于 1 μs，间隔层设备直采 SV 报文时标的误差小于 2 μs。

该方案已在新一代智能变电站 110 kV 电压等级过程层设备和间隔层设备中成功应用, 其性能得到了充分的验证。

6 结论

本文提出了一种 SV 直采和 GOOSE 共口传输方案, 从理论分析和实际应用可知, 该方案不涉及硬件结构的改动, 过程层设备在保证 SV 发送时刻准确性的基础上, 对传输通道的时分复用, 在两帧 SV 报文之间进行 GOOSE 报文的收发, 并且根据具体工程配置文件可动态计算出两帧 SV 之间插入的 GOOSE 组数, 最大化地利用通道的传输带宽, 缩短 GOOSE 信号的传输延时; 间隔层设备利用以太网控制器报文接收机制, 通过 FPGA 对以太网控制器进行实时控制, 解决了通用以太网控制器无法识别 SV 和 GOOSE 报文导致的重采样时标混乱问题。该方案 GOOSE 传输延时小、不涉及硬件改动、软件处理简单、可靠性高、易于实现, 有着广泛推广的现实意义。

参考文献

- [1] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.
LI Meng-chao, WANG Yun-ping, LI Xian-wei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62.
- [2] 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.
- [3] 魏勇, 罗思需, 施迪, 等. 基于 IEC61850-9-2 及 GOOSE 共网传输的数字化变电站技术应用于分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 146-152.
WEI Yong, LUO Si-xu, SHI Di, et al. Research and application on digital substation based on IEC61850-9-2 and GOOSE communication in one network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 146-152.
- [4] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
HUANG Can, XIAO Chi-fu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.
- [5] 徐敏, 鲍有理, 李宝伟, 等. 智能变电站中点对点传输采样值延迟及延迟校验方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 145-149.
XU Min, BAO You-li, LI Bao-wei, et al. Delay of point-to-point transmission of sampled values in smart substation and its calibration scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 145-149.
- [6] 赵应兵, 周水斌, 马朝阳. 基于 IEC61850-9-2 的电子式互感器合并单元的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 104-106, 110.
ZHAO Ying-bing, ZHOU Shui-bin, MA Zhao-yang. Research and manufacture of merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 104-106, 110.
- [7] 乔洪新, 黄少锋, 刘勇. 基于二次插值理论电子式互感器数据同步的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 49-52.
QIAO Hong-xin, HUANG Shao-feng, LIU Yong. Discussion on data synchronization of electronic current transducer based on quadratic interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 49-52.
- [8] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 57-61.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. New method for implementing the synchronization of merging unit according to the IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [9] 曹团结, 尹项根, 张哲, 等. 电子式互感器数据同步的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(2): 108-113.
CAO Tuan-jie, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Discussion on data synchronization of electronic instrument transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 108-113.
- [10] 宴玲, 李伟, 曹津平. 采用 FPGA 实现合并单元同步采样的方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 126-128.
YAN Ling, LI Wei, CAO Jin-ping. Synchronized sampling of merging unit with FPGA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 126-128.
- [11] 廖泽友, 郭赞, 杨恢宏. 数字化变电站采样传输规约的综述与对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 113-118.
LIAO Ze-you, GUO Yun, YANG Hui-hong. The summary and contrastive analysis of sampled values transmission communication protocol in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 113-118.

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2013-09-11

作者简介:

李宝伟(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事继电保护的开发工作; E-mail: libaowei@xjgc.com

文明浩(1973-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制;

李宝潭(1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事继电保护的开发工作。