

智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现

杨贵¹, 吕航¹, 袁志彬², 刘井密¹, 郑超¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 国网吉林省电力有限公司
松原供电公司, 吉林 松原 138000)

摘要: 为解决智能变电站过程层网络装置过分依赖对时网络问题, 及智能变电站过程层网络SMV报文间、SMV和GOOSE报文间及GOOSE报文间的相互干扰问题, 提出了通过在交换机上实现延时可测技术和业务流量管理技术有效解决过程层网络现存的两个主要问题。延时可测技术通过GOOSE、SMV报文携带经过交换机的延时值实现时间同步。业务流量管理技术通过基于目标MAC地址的流量控制方法解决过程层网络报文间相互干扰问题。

关键词: 智能变电站; 交换机; 过程层; 流量控制; 延时可测

Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method

YANG Gui¹, LÜ Hang¹, YUAN Zhibin², LIU Jingmi¹, ZHENG Chao¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Songyuan Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Company, Songyuan 138000, China)

Abstract: This paper aims to solve the problems of intelligent substation process layer network devices over relying on the synchronous network, and the mutual interference between two SMV packets, between SVM and GOOSE packets as well as between two GOOSE packets. Through realizing delay measured technology and business traffic management technology, two major problems existing process layer network are effectively solved. Delay measure technique realizes time synchronization by using the delay value carried by GOOSE, SMV packets through switch. Traffic management technology is used to solve the problem of mutual interference of process level network packets through the flow control method of destination MAC address.

Key words: intelligent substation; switch; process layer; flow control; delay measure

中图分类号: TM769; TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)11-0070-05

0 引言

当前国内电力系统大力推广的智能变电站过程层网络 SMV 报文的传输已经逐步地由点对点通信方式向组网通信方式转变^[1-2]。点对点通信方式由于通信链路延时固定, 因此, 保护测控等 SMV 报文接收设备可以可靠工作。但是, 点对点方式组网存在组网混乱, 设备光口过多的问题, 非常不利于后期的运行维护检修工作。由于点对点通信方式均为一对一通信, 信息共享性很差, 不利于后期的业务扩展及数据的共享。

通信方式转变为组网方式以后, 由于目前智能变电站过程层网络的组网方式主要采用二层以太网交换机双网热备份方式工作, 组网示意图如图 1 所示。有效地解决了过程层网络组网混乱, 设备光口

过多及信息共享性差等问题。但是由于二层交换机自身的特点, 导致智能变电站过程层网络必须解决如下问题。

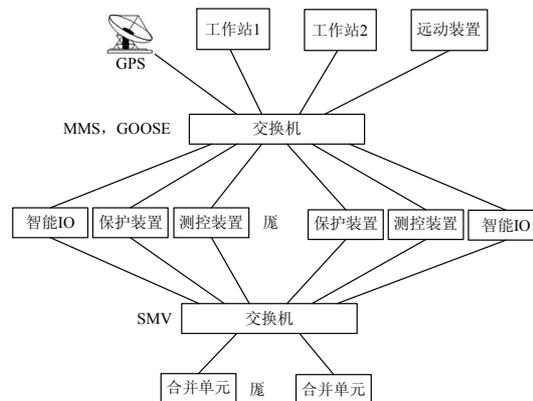


图 1 智能变电站组网框图

Fig. 1 Intelligent substation network diagram

1) 报文间干扰问题, 在现有的过程层网络中同时存在多路 GOOSE 报文和多路 SMV 报文, 每路报文不可避免地在网络上会与其他路报文存在资源竞争现象, 例如, 级联口传输报文需要排队, 同一接收端口需要同时接收多路报文时也存在排队现象; 交换机内部缓存资源的抢占等问题是不可避免的。

2) 过分依赖对时网络问题, 组网后保护测控等装置需要在同一端口上同时接收多路 SMV 报文, 导致 SMV 报文在接收端口处不可避免地出现排队现象, 导致 SMV 报文传输延时不确定、存在延时抖动。为了有效地解决延时抖动问题, 目前的智能变电站通过对过程层设备进行高精度对时的方式解决该问题^[3]。

3) 过程层网络交换机无法监视问题, 目前过程层网络交换机基本上没有有效的监视手段, 当交换机出现故障时, 无法有效地发现^[4-5]。

新研制开发的交换机有效地解决了过程层网络交换机现存的问题, 并为过程层交换机的研究探索做了大量有益的尝试。对于交换机监视已在文献[4]和文献[5]中进行了有效尝试, 本文将不涉及这部分内容。下面将详细介绍智能变电站过程层交换机如何解决现存交换机的问题。

1 流量控制技术

1.1 VLAN 技术

当前的智能变电站过程层采用组网方式后, 由于过程层存在的 GOOSE、SMV 报文流量总和超过了百兆, 大型站点甚至达到了 400 Mbps 的流量。而交换机与 IED 设备的接口采用的是百兆光口, 当不进行任何管理的情况下将导致过程层网络无法正常工作。为了解决过程层网络流量问题, 目前过程层交换机采用 IEEE802.1Q VLAN 技术和千兆口级联的方式解决现存的问题。

在工程实施时, 为每个 SMV、GOOSE 报文分配一个指定的 VLAN ID^[6], 并在交换机上划分相应的 VLAN, 形成各自独立的虚拟网络, 不同的 SMV、GOOSE 报文在各自的虚拟网络中传输, 而保护、测控等接收设备仅接收指定 VLAN 的 SMV、GOOSE 报文, 从而确保了保护、测控等设备仅能接收指定 VLAN 的报文, 同时限制了接收端口的流量^[7]。

VLAN 技术虽然解决了有效报文的隔离, 但是由于 VLAN 仅能够实现 VLAN 间的隔离, 无法对 VLAN 内的报文进行有效的区分, 如果 VLAN 内部出现其他干扰报文或同一 VLAN 内的个别报文出现异常而产生风暴的情况, 必将导致整个 VLAN 域

内的全部报文无法正常接收。因此, VLAN 技术并不能彻底解决过程层网络报文相互干扰的问题。

1.2 组播管理技术

为了解决 VLAN 技术无法有效解决报文间相互干扰的问题, 提出了采用静态组播或 GMRP 方式对过程层网络的 SMV、GOOSE 报文进行细致的管理^[8]。由于 GMRP 技术存在动态注册过程, 在智能变电站投入运行后动态过程依然存在, 当 GMRP 机制出现异常等情况时, 非常容易导致保护等装置的异常退出, 这里不推荐采用。静态组播技术由于采用静态配置方式, 不存在动态学习过程, 因此, 可靠性明显优于 GMRP, 下面将以静态组播技术进行详细介绍。

静态组播技术是在交换机上采用目标组播 MAC 地址来进行转发方向的管理实现流量管理。由于智能变电站过程层网络的 SMV、GOOSE 组播 MAC 地址唯一, 当针对每个组播地址进行转发管理后, 可唯一地确定每个 SMV、GOOSE 报文在交换机上的转发方向, 同时可以对未设置静态组播的条目进行丢弃处理, 可有效地净化过程层网络环境。但是, 仅采用静态组播技术无法解决同时接收多路 SMV、GOOSE 报文的端口干扰问题。虽然采用静态组播技术可以限制 SMV、GOOSE 报文的转发方向, 但是对于同时接收多路 SMV、GOOSE 报文的端口来说, SMV、GOOSE 报文间的干扰依然存在, 当某路 SMV 报文或 GOOSE 报文发生风暴而产生大量的无用报文时, 接收端口流量将超过百兆速率而产生丢包现象。

1.3 基于组播流控技术

为了彻底地解决 SMV、GOOSE 间的相互干扰问题, 本文提出了在过程层交换机中实现基于组播地址的流控技术。针对每路 SMV、GOOSE 报文进行最大流量管理方式来限制每路 SMV、GOOSE 报文在交换机上的最大流量。对于每路 SMV 报文流量是非常稳定的, 每秒 4 000 帧报文, 报文长度固定, 因此正常情况下每路 SMV 报文的流量是固定的。由于交换机存在延时抖动可能会导致 SMV 报文存在瞬间的流量稍微上升一点。因此在对 SMV 报文进行流控时只要计算 SMV 的稳定流量并留有一定的裕度即可。GOOSE 报文由于存在突发流量情况, 因此需要考虑突发情况下可能达到的流量值, 并结合交换机的突发流量门槛来限制 GOOSE 报文的流量, GOOSE 流量限制速率不宜过高, 否则达不到预定的效果。

在交换机上实现 SMV、GOOSE 报文的组播流量限制可以采用 FP(Field Processor)方式实现基于

每个组播地址的精确流量控制, 在进行 FP 设置时以目标 MAC 地址为匹配关键词, 精准地匹配每个组播地址并设置适当的流量阈值。

如图 2 所示, IED1 发送 SMV 报文到 IED3, IED2 发送 SMV 报文到 IED3。正常情况下, SMV 报文总流量小于 IED3 接收端口的百兆流量, 因此两路 SMV 报文均可正常接收。

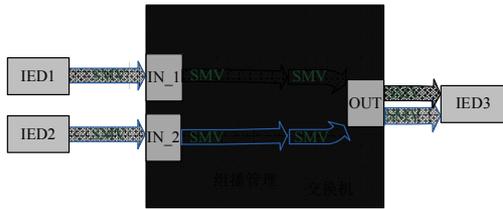


图 2 正常情况下的流量
Fig. 2 Normal case flow

如图 3 所示, 在没有流控功能的情况下, 当一路 SMV 报文发生风暴情况下, 由于两路 SMV 报文的优先级相同, 因此, 交换机在 IED3 端口处由于流量超过端口百兆最大流量而出现了报文丢失现象, 不但故障 SMV 报文丢包, 正常的 SMV 报文受到故障流量影响也出现了大量的丢包现象, 最终导致 IED3 接收的两路 SMV 报文均丢包。

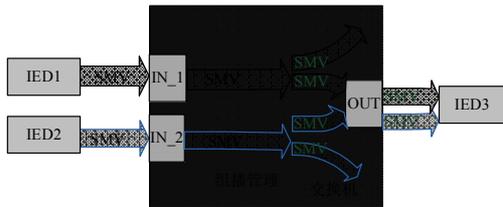


图 3 风暴情况下的流量
Fig. 3 Storm case flow

如图 4 所示, 在开启流控功能的情况下, 当一路 SMV 报文发生风暴情况下, 交换机内部的流控策略启动, 故障 SMV 报文流量被限制在门限值下。交换机在 IED3 端口输出的正常的 SMV 报文和受限制的 SMV 报文, IED3 接收到了故障的 SMV 报文和正常的 SMV 报文。

在正常情况下每路 SMV 报文的流量是恒定的,

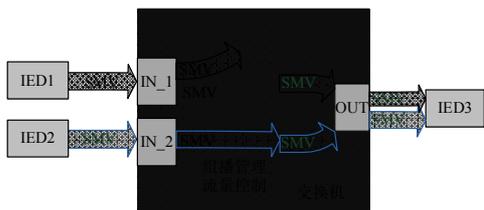


图 4 风暴情况下带流控的流量
Fig. 4 Traffic flow control storm case

只有在合并单元异常情况下才有可能导致输出的 SMV 报文流量激增, 这种情况下的该路 SMV 报文流量中已经无法区分正常报文和异常报文了, 因此采用流量控制技术方式将故障报文流量限制在指定带宽范围内, 可有效地确保其他正常 SMV 报文免受干扰。

GOOSE 报本身存在突发机制, 当发生雪崩情况下将导致某路 GOOSE 报文流量瞬间变大, 针对 GOOSE 报文的特点, 采用为每路 GOOSE 报文设定较大流控门槛或增加每路 GOOSE 报文缓存的方式防止有效报文被流控限制而丢弃, 从而实现 GOOSE 报文的正常传输。

流控技术彻底解决了过程层网络上各种组播报文间的相互干扰问题, 最大限度地减少了故障报文对正常网络报文的影响。大大提升了智能变电站过程层网络的可靠性。

目前流量控制技术已经在武汉未来城 110 kV 变电站得到应用, 武汉未来城采用三网合一组网方案, 过程层 SMV、GOOSE 和站控层 MMS 构成一张网络传输, 为了有效地隔离各种不同报文, SMV、GOOSE 报文开启了基于静态组播的流量控制技术, 每路 SMV 分配 10 Mbps 的最大带宽, 每路 GOOSE 分配 2 Mbps 的最大带宽, MMS 报文按照协议类型 0x0800 进行流量控制, 共分配带宽 20 Mbps。在这种流量限制下, 单路的 SMV、GOOSE 风暴均不会对网络造成冲击, 而 MMS 放生风暴时同样不会对网络造成冲击而导致实时性要求苛刻的 SMV 报文受到影响, 从而确保了三网合一后网络的安全性, 在大大简化网络结构的同时, 提升了网络的可靠性。

2 延时可测技术

智能变电站过程层网络目前主要采用 IRIG-B 码对时技术和 IEEE1588 对时技术实现网络上设备的同步^[6,9-10]。如图 5 所示, 由于 IRIG-B 码对时需要提供额外的对时网络^[11]。为了提升过程层装置对时可靠性, 对时装置为每台过程层装置提供独立的

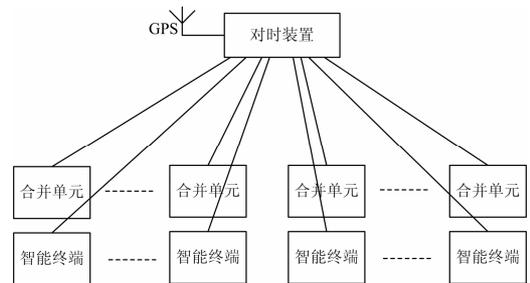


图 5 过程层 IRIG-B 对时网络
Fig. 5 Process layer IRIG-B time synchronization network

光纤对时接口,这导致过程层的对时网络组网复杂,不便于维护。当 IRIG-B 对时网络出现故障时将直接导致保护测控等装置工作异常或保护退出,这将严重影响智能变电站的安全可靠运行。

IEEE1588 对时网络需要构成智能变电站过程层网络的保护、测控、合并单元、智能终端及交换机支持 IEEE1588 对时协议^[12], IEEE1588 对时网络组网如图 6 所示,该对时网络采用现有的过程层网络完成对时功能。目前的 IEEE1588 对时协议存在如下缺陷无法得到根本解决。

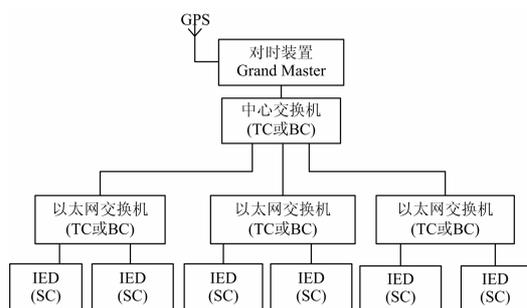


图 6 IEEE1588 过程层组网框图

Fig. 6 IEEE1588 process level network diagram

1) 受网络风暴的影响,可能导致 IEEE1588 对时报文丢失,导致对时短时失效^[13]。

2) 交换机及 IED 设备本身的 IEEE1588 算法有问题,导致对时出现跳变或其他异常情况,最终导致保护退出。

3) 没有权威机构对各厂家的 IEEE1588 实现机制及各种极端情况进行测试,导致交换机或 IED 设备对 IEEE1588 的支持程度及可靠性不一致^[9]。

4) 受交换机或 IED 设备的处理能力影响,当交换机或 IED 设备由于负荷过高或其他异常情况导致 CPU 异常,将导致 IEEE1588 对时异常。

5) 由于网络断链等情况发生时,如果交换机采用 BC 模式工作,将导致站内时间不统一,最终导致母差等接收多间隔数据的设备工作异常^[9]。

由上文分析可知 IEEE1588 在智能变电站过程层应用存在大量的安全隐患和不确定因素,因此无法在智能变电站过程层网络中应用。

为了有效地解决智能变电站过程层网络过分依赖对时系统的缺陷,本文提出了在交换机上实现延时可测技术,通过交换机补偿自身传输延时的方式,由接收设备倒推出报文的发送时刻,从而使接收设备能够获得报文相对本装置的发送时间,实现各报文的时间同步。

对于智能变电站过程层的报文来讲,只有 SMV 报文的发送需要严格同步。为了能够让 SMV 报文携带交换机补偿的延时值,考虑将延时值保存到 SMV 报文中 4Byte 的 Reserve 字段中。接收装置以本地接收报文时间减去 SMV 报文中的 Reserve 字段的延时值回推出报文发送时刻值。通过这种方式将各路 SMV 报文发送时刻转换为接收装置本地时间系下。并通过差值算法等对各路 SMV 报文内容转换到指定时刻的内容,满足后续保护计算等对数据的要求。

如图 7 所示,以一级交换机级联为例进行介绍, MU 发送 SMV 报文确保 reserve 字段为 0。交换机输入端口收到 SMV 报文并记录接收报文时刻 T_0 ,用 Reserve 字段原有值减去 T_0 值并更新到 Reserve 字段中。交换机输出端口输出 SMV 报文时记录输出时刻 T_1 ,并用 T_1 减去 Reserve 字段中的原有值并将计算结果更新到 Reserve 字段中。IED 设备接收到 SMV 报文时刻记录为 T_2 ,用 T_2 减去 Reserve 字段中的延值得到基于 IED 设备时间系的 SMV 报文发送时刻。

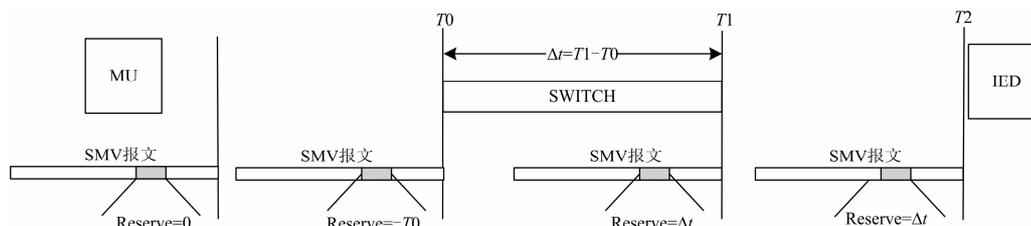


图 7 延时可测示意图

Fig. 7 Delay measurement schematic diagram

该技术现已实现样机开发,并在国家权威测试机构国网科院进行了摸底测试。延时可测技术确保交换机的延时测量精度高达 50 ns,远远高于设计之初的指标要求 250 ns 的精度要求,在交换机发生

拥塞等情况下依然能够保持 50 ns 的测量精度,真正做到对时精度与网络流量无关。从而可以大大提升过程层网络的可靠性,最大限度地减弱过程层网络依赖外部对时系统的问题。

3 总结

目前的智能变电站已经开始大面积地推广应用,在推广过程中出现了很多需要改进的地方。本文从提升过程层网络可靠性出发,提出了基于静态组播的流量控制技术和延时测量技术两项关键技术,关键技术的采用大大提升了过程层网络的可靠性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 樊陈,倪益民,窦仁辉,等.智能变电站过程层组网方案分析[J].电力系统自动化,2011,39(18):67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhu, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 39(18): 67-71.
- [2] 莫峻,谭建成.基于并行冗余协议的高可靠性过程总线通信研究[J].电工技术学报,2012,27(4):263-268.
MO Jun, TAN Jiancheng. Highly reliable process bus communication parallel based on redundancy protocol[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 263-268.
- [3] 朱林,段献忠,苏盛,等.基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J].电工技术学报,2011,26(1):154-161.
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [4] 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.
- [5] 张小建,吴军民.智能变电站网络交换机信息模型及映射实现[J].电力系统保护与控制,2013,41(10):134-139.
ZHANG Xiaojian, WU Junmin. Information model and mapping implementation of Ethernet switches in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 134-139.
- [6] 高吉普,徐长宝,戴宇,等.智能变电站 IEEE1588 以太网交换机故障案例复现测试及分析[J].电力系统保护与控制,2014,42(14):146-150.
GAO Jipu, XU Changbao, DAI Yu, et al. Fault case analysis of IEEE1588 switch application in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 146-150.
- [7] 王璐.智能变电站过程层组网分析与应用[J].电力自动化设备,2012,40(2):141-144,150.
WANG Lu. Analysis and application of the smart substation process level network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 141-144, 150.
- [8] 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 Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Process level network performance testing and analysis in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.
- [9] 黄鑫,王永福,张道农,等.智能变电站 IEC61588 时间同步系统与安全评估[J].电力系统自动化,2012,36(13):76-80.
HUANG Xin, WANG Yongfu, ZHANG Daonong, et al. IEC 61588 time synchronization system and security evaluation for smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 76-80.
- [10] 张兆云,陈卫,张哲,等.一种广域差动保护实现方法[J].电工技术学报,2014,29(2):297-303.
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [11] 陈宏辉,蔡泽祥,王海柱.基于 IEEE 1588 的变电站过程层采样值同步技术研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(12):141-145.
CHEN Honghui, CAI Zexiang, WANG Haizhu. Analysis of sample value synchronization in process level based on IEEE 1588[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 141-145.
- [12] 樊陈,倪益民,沈健,等.IEEE 1588 在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中的应用[J].电力系统自动化,2011,35(6):55-59.
FAN Chen, NI Yimin, SHEN Jian, et al. Research on the application of IEEE 1588 in the merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 55-59.
- [13] 刘巍,熊浩清,石光,等.IEEE1588 时钟同步系统应用分析与现场测试[J].电力自动化设备,2012,32(2):127-131.
LIU Wei, XIONG Haoqing, SHI Guang, et al. Application analysis and field test of IEEE1588 clock synchronization system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 127-131.

收稿日期:2014-07-12; 修回日期:2014-08-29

作者简介:

杨贵(1976-),男,硕士,工程师,主要从事变电站自动化系统、智能变电站系统及交换机研发工作; E-mail: yangg@nari-relays.com

吕航(1971-),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作;

袁志彬(1972-),男,学士,高级工程师,主要从事电网调度运行及其自动化。

(编辑 周金梅)