

数字化变电站组网技术

李广华

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 数字化变电站 GOOSE、采样值传输对变电站网络传输性能提出了更高的要求。传统共享式的组播传输方式会造成网络冲突加剧, 终端设备组播误收增加, 已经不能满足数字化网络传输的工程化要求。对支持 IEEE802.1Q 的虚拟局域网(VLAN)划分技术、组播注册协议(GMRP)组网技术进行了探讨, 指出支持 IEEE802.1Q 的 VLAN 划分技术通过隔离广播域的方法和 GMRP 通过动态组播注册技术都能从理论上解决数字化变电站存在的组播流量问题。相比支持 IEEE802.1Q 的 VLAN 划分技术, GMRP 具有工程实施维护简单、流量控制精确等优点, 在工程化方面具有一定的优势。

关键词: 数字化变电站; 通信; GMRP; VLAN; 变电站

中图分类号: TM 73; TM 764

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.025

0 引言

随着 IEC61850 通信协议在变电站中的广泛应用, 尤其是 GOOSE^[1]、采样值服务^[2]的试点应用, 数字化技术正逐渐在变电站中得到推广应用。通过网络传输实现变电站信息共享是数字化变电站的一大特点, 网络技术也已成为数字化变电站的重要组成部分。

数字化变电站中使用 GOOSE、采样值服务来实现变电站的跳合闸、采样值信息传输。这些服务使用发布/订阅(Publisher/Subscriber)模型, 以组播方式在网络的数据链路层传输信息^[3]。组播报文的传输要求网络传输延迟小、稳定性高; 且采样值信息传输频率高, 会占用大量的网络带宽^[2], 造成网络载波冲突加剧。变电站跳合闸、采样值的信息传输, 对变电站网络提出了更高的要求。

随着传输的信息量激增、网络载波冲突加剧, 变电站网络易出现丢包、报文延迟不稳定的情况; 同时二次设备需要实时接收这些报文, 其嵌入式系统网络实时吞吐量也将面临考验。传统变电站交换网的共享式组播传输方式已经不能满足数字化变电站发展的要求。而 IEEE802.1Q 的虚拟局域网(VLAN)划分技术, 虽然可以实现网络流量控制, 但这种方式工程化实施相对复杂。基于通用属性注册协议(GARP)的组播注册协议(GMRP)技术, 通过动态创建交换以太网的组播映射关系, 实现精确网络流量控制, 同时也有利于工程化的实施。本文提出可以在数字化变电站中使用 GRMP 技术来解决组播的网络传输问题。

1 共享式组播传输

在初期的 IEC61850 数字化变电站中, GOOSE 服务主要用来传输间隔联锁信息, 其实时性要求较

低, 报文信息量也较少。在传统的变电站组网中, 该组播信息主要以共享以太网方式进行传输, 即任意终端的组播报文都在全网转发, 任意终端都能收到其他所有终端发送的组播报文, 如图 1 所示。

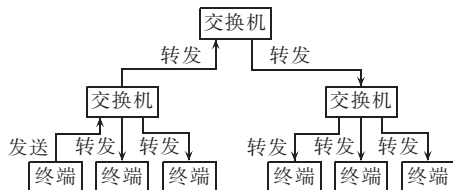


图 1 共享式组播传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of shared multicast communication

由于共享式组播传输实现简单, 在数字化变电站发展初期阶段网络报文量较小时, 这种方式得到了较为广泛的应用。

2 数字化网络传输面临的问题

随着 GOOSE 跳合闸、采样值服务在数字化变电站中的广泛应用, 网络传输的实时性要求大幅提高^[4], 网络负载急剧增加, 原有的共享式组播传输已经不能满足数字化变电站网络传输的要求。

2.1 网络冲突加剧

采用发布/订阅的组播传输模式的 GOOSE 跳合闸、采样值传输服务在数字化变电站信息中得到越来越广泛的使用。这些组播信息的传输, 尤其是采样值信息的传输, 使得变电站网络负载成倍增加, 对变电站网络的差错控制提出了更高的要求。

数字化变电站的组播传输不具备网络差错控制功能。众所周知, 虽然数据链路层网络传输具有一定的差错控制功能, 但由于该层不具备网络报文确认功能, 网络传输的差错控制功能多由网络终端实施^[5]。而 IEC61850 的 GOOSE、采样值的数据传输属于二层组播传输, 并且采用了发布/订阅传输模式,

终端间不具备信息交互能力^[3],因此 IEC61850 的组播传输无法完成差错控制功能。

虽然目前的网络通信质量越来越好,传输出错率越来越低,但随着网络负载剧增,网络传输的载波冲突、延迟抖动也随之加剧,甚至可能发生丢包现象,这将严重影响变电站自动化系统的安全性与稳定性,基于电力和通信系统同步仿真(EPOCHS)平台的变电站自动化系统仿真试验结果也证实了该问题的存在^[6]。在这种情况下,共享式组播传输已不能满足数字化变电站网络传输的需求。

在 IEC61850 组播传输无法实现网络差错控制功能的情况下,如何实现网络流量控制、有效降低网络负载、增强网络传输实时性与稳定性、尽量避免网络丢包现象发生,成为数字化变电站组网方案急需解决的问题之一。

2.2 终端设备组播过滤困难

使用传统的共享式组播传输方式,全站所有的组播信息都将传输到每个网络终端设备。每个终端需要从所有的组播信息中提取本终端所需的组播信息,终端承担了所有的组播过滤功能。即使使用其他技术,如 VLAN 划分,若交换机不实现全部组播过滤功能,终端仍要承担部分组播过滤功能。数字化变电站终端设备具备一定的硬件组播过滤功能,但通常不能满足系统需求。

变电站终端通过使用网卡实现硬件组播过滤功能,该功能通常有 2 种实现方式:查询高速缓存表方式和哈希算法过滤方式。

查询高速缓存表方式是指在网卡中有一张组播地址过滤表,该表存储了本网卡需要接收的组播地址。当网卡接收到组播报文后,通过查表的方式过滤掉不需接收的报文。这种方式过滤精确,处理速度快。但网卡资源有限,一般只能设定较少的组播地址,通常不能满足工程实际需要。

哈希算法过滤方式是目前广泛用于网卡的组播过滤方式。通过网卡自带的哈希算法,对每个将要接收的组播地址进行哈希计算,并将计算结果记录在网卡中。网卡每接收到一个组播报文,也对该组播地址进行哈希计算,并将计算结果与记录在网卡中的信息进行比对,决定丢弃还是接收该报文,从而实现过滤功能。哈希算法理论上支持设定无数个组播地址,但该方法可能存在组播误收的情况。例如在 MPC8247 的哈希滤波算法中,其接收 8 组组播时的误收率约为 12.5%^[7]。

在实际应用中,理论上可以利用具体哈希算法的特性,挑选特定的组播地址进行组网以尽量避免误收的发生。但不同厂家网卡的哈希算法不尽相同,有些算法甚至不公开,通过挑选特定组播地址的

方式不仅工程实施困难,在特定条件下甚至不能完全避免误收的发生。

误收的组播报文需要装置进一步的软件过滤。误收量的增加不仅会增加装置的处理负担,甚至会影响装置接收的实时性,进而影响装置的可靠性与稳定性。随着数字化变电站中网络数据的急剧增加,如何减少装置的组播误收,减轻装置网络处理负担,也成为数字化变电站组网方案急需解决的问题之一。

3 划分 VLAN 实现组播传输

目前,如何最大限度减少数字化变电站网络负载,精确控制网络报文接收已经成为数字化变电站组网技术需要解决的一个重要课题。支持 IEEE 802.1Q 的 VLAN 划分技术能有效解决数字化变电站在降低网络负载^[6]、减少网络终端误收报文方面所面临的问题,并在组网方案中得到了试用。

VLAN 是一种全新的子网划分技术,通过该技术可以将一个物理的交换式以太网划分成多个 VLAN。这些 VLAN 彼此独立,属于不同 VLAN 的终端间不能相互通信。把接收同一组组播的终端所对应的交换机端口划分为一个单独的 VLAN,可以实现这些端口之间的组播通信,且不影响其他交换机端口通信^[5]。图 2 中,终端 A、C 属于 VLAN1,终端 B、D 属于 VLAN2,终端 A 发送的组播报文,终端 C 可以收到,而终端 B、D 则收不到该报文。

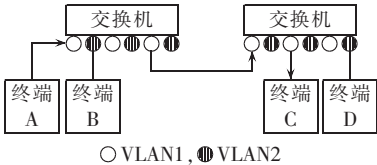


图 2 跨交换机 VLAN 传输示意图
Fig.2 Schematic diagram of VLAN communication over switches

VLAN 划分技术可以降低交换机网络负载,减少与交换机端口相连终端的无效报文接收。但是 VLAN 划分仍然有一个问题:交换机端口只能同时属于一个 VLAN。在数字化变电站中,通常一个网络交换机端口需要传输几组组播数据,单一的 VLAN 划分技术并不能满足数字化变电站组播通信的需求。

IEEE802.1Q 是 802 委员会为解决跨以太网交换机的 VLAN 内终端间的通信而制定的标准,包含 VLAN 标识字段的 MAC 帧结构称为 IEEE802.1Q 帧结构^[5],如图 3 所示。



图 3 带 VLAN 标识字段的 MAC 帧格式(802.1Q)
Fig.3 MAC frame format with VLAN identification fields

如果以太网交换机支持 IEEE802.1Q,从该交换机端口带来和发出的 MAC 帧必须携带 VLAN 标识符,以太网交换机根据该 MAC 帧携带的 VLAN 标识符确定用于转发该 MAC 帧的 VLAN。这种支持 IEEE802.1Q 的交换机的组播转发过程如图 4 所示。

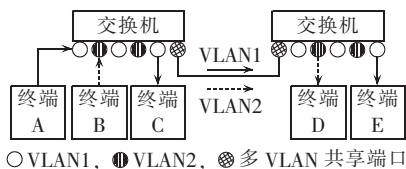


图 4 跨交换机 IEEE802.1Q 帧的 VLAN 转发示意图

Fig.4 Schematic diagram of VLAN transfer with IEEE802.1Q frame format over switches

由于 IEEE802.1Q 标准的引入,使得支持 IEEE 802.1Q 的交换机端口可以同时属于不同的 VLAN。根据整个变电站将要发送的组播个数,将整个变电站网络划分为同等数量的 VLAN,每个 VLAN 唯一对应一个组播地址;根据终端要接收的组播地址,设定对应交换机端口的 VLAN 配置,就可以实现整个变电站组播传输的完整映射。

在这种模式下,整个交换机网络的每个端口都只发送必要的组播报文,而与交换机端口相连的终端设备也只接收到需要接收的组播报文。这将大幅降低网络负载,减少网络抖动延迟,降低网络丢包率^[6];同时也大幅减小了终端设备的网络负载。

但是基于 IEEE802.1Q 的 VLAN 划分技术也有其局限性。在环网组网方案中,通常交换机只支持 STP/RSTP 等单生成树协议(SSP)。基于单生成树的 VLAN 网络,一旦由于某种原因网络重新拓扑,静态配置的 VLAN 划分不能随之动态更新,可能使部分 VLAN 通信链接中断^[8],造成通信故障。要解决这一问题,需要使用支持 MSTP 的多生成树协议的交换机组环网,但是支持该协议的交换机价格昂贵,且在变电站中很少使用^[9]。

另外,基于 VLAN 划分的数字化变电站网络,VLAN 划分数目多,并且由于 VLAN 划分出错造成的网络故障不易排查,不利于工程化实施;在更换故障交换机、变电站改扩建等情况下需要更新 1 个或多个交换机的 VLAN 配置,这些都可能会暂时影响整个交换以太网的稳定运行。

VLAN 划分的网络设计方案可从理论上最大限度地降低交换网的网络负载,实现流量精确控制,终端装置也不会误收组播报文,解决了数字化变电站组播传输的问题,但是该方案不利于工程化的实施。

4 GMRP 协议方案实现组播传输

GMRP 是 GARP 的一种应用,在标准 IEEE802.1D

中进行了详细描述^[10]。GMRP 提供了一种动态的通用框架,能使发布/订阅方式的组播信息在交换以太网内进行注册、注销、询问操作^[11]。通过这些操作,可以使属于同一组的多个终端在交换网的拓扑结构上(由生成树协议来创建、维护)动态构建 1 棵子树,该组组播将只在该子树上进行转发。

在 1 个支持 GMRP 的交换网上,当终端要接收 1 组组播时,将向交换网上发起 1 个申请加入的过程,该过程由组属性声明、组属性注册两部分组成。该申请过程为:

- a. 终端向相连端口发送 1 个以该组播地址为参数的加入请求报文,发起组属性声明;
- b. 接收到组属性声明的端口对该组属性进行组属性注册,并转发该组属性声明;
- c. 最终该申请以 b 的形式在整个网络上转发、注册。

申请过程如图 5、图 6 所示,其中图 5 表示 1 个终端(终端 A)加入 1 个组的过程,图 6 表示在终端 A 加入该组后,又一终端加入同一组的过程,图中 A 表示组属性声明,a 表示组属性注册,后同。

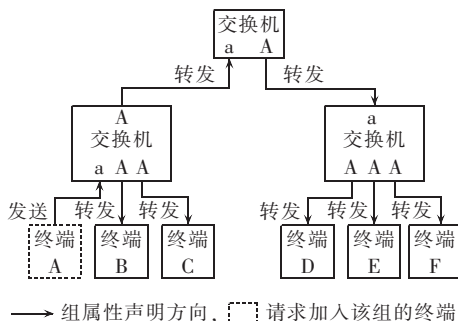


图 5 终端 A 的组声明传播图

Fig.5 Group declaration transmission of terminal A

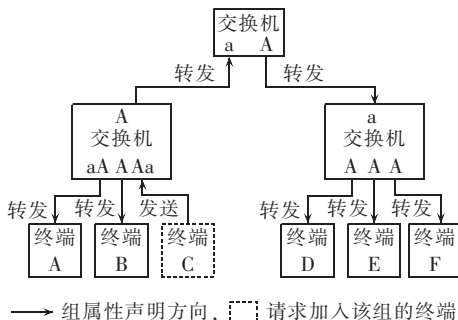


图 6 终端 C 的组声明传播图

Fig.6 Group declaration transmission of terminal C

一个组播报文在支持 GMRP 的交换网上的转发过程:

- a. 接收到该组播报文的端口将报文转发给本交换机上其他对该组播进行注册的端口;
- b. 对该组播进行注册并接收到报文的端口向外转发该报文;

c. 该组播报文按上述 2 个步骤在整个交换网上转发,并最终转发给所有对该组进行注册的终端。假设终端 E 发送终端 A、C 注册的组播,其组播传输过程如图 7 所示。

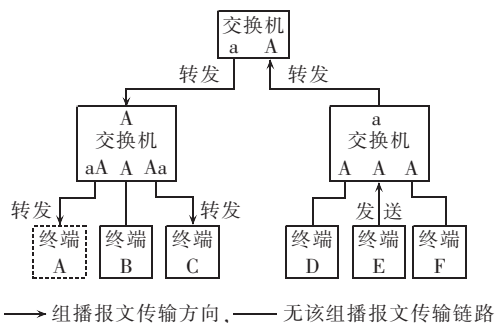


图 7 组播在 GMRP 网络上传输过程

Fig.7 Multicast on GMRP Network

同样,支持 GMRP 交换网也支持组播的退出注册操作,其过程跟注册申请过程相似。

GMRP 交换网支持同一终端进行多组组播注册,其每个交换机端口都有一个专用表,用来记录这些组播注册信息。并且,每个交换机端口都为其注册的每个组播注册信息建立了一个状态机,并用一个定时器驱动整个交换网内部的 GMRP 报文的交互,确保整个转发链路的畅通。

当交换网的拓扑结构发生变化时,退出拓扑结构的端口首先发送组播注册退出消息通知整个交换网络,再退出拓扑结构;然后终端或交换机注册端口再次发送加入组播申请信息,从而再次建立该组的整个网络拓扑子树。

GMRP 通过使用组播地址的注册、注销实现了组播传输的动态拓扑构建功能,并能很好地支持星形网、环网;GMRP 是二次交换协议,提供了对二层组播流量的精确控制,工作效率高,减轻了交换机、终端的网络负载。同时 GMRP 也解决了 VLAN 工程化实施带来的困难;GMRP 动态形成组播过滤机制极大简化了数字化变电站的工程实施;解决基于 VLAN 技术在数字化变电站维修、改扩建以及交换机更换带来的网络维护问题。

5 结论

GOOSE 跳合闸、采样值信息在数字化变电站中的广泛使用,对变电站组网方案提出了更高的要求。传统的共享式组播传输方式已不能满足系统需求。支持 IEEE802.1Q 的 VLAN 划分技术,在理论上解决了数字化变电站组播传输带来的网络负载问题,但不利于工程化实施。而 GMRP 技术不仅实现了交换网的精确流量控制,且极大方便了数字化变电站的工程化实施。在以后的数字化变电站组网中,建议使用 GMRP 技术实现变电站网络流量控制功能。

参考文献:

- [1] IEC. IEC61850-8-1 Communication networks and system in substation part 8-1:Specific Communication Service Mapping(SCSM)-mappings to MMS(ISO9506-1 and ISO9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S]. [S.I.]:IEC,2004.
- [2] IEC. IEC61850-9-2 Communication networks and system in substation part 9-2:Specific Communication Service Mapping(SCSM)-sample values over ISO/IEC8802-3[S]. [S.I.]:IEC,2004.
- [3] IEC. IEC61850-7-2 Communication networks and system in substation part 7-2:basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface[S]. [S.I.]:IEC,2003.
- [4] 段吉泉,段斌. 变电站 GOOSE 报文在 IED 中的实时处理[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):65-69.
DUAN Jiquan,DUAN Bin. Real-time processing of GOOSE message in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(11):65-69.
- [5] 沈鑫刺. 计算机网络[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [6] 丁力,王晓茹,童晓阳. 基于 EPOCHS 平台的 IEC61850 采样值传输仿真[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):67-72.
DING Li,WANG Xiaoru,TONG Xiaoyang. IEC61850 sample value transmission simulation based on EPOCHS[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):67-72.
- [7] Freescale Semiconductor Inc. MPC8272 PowerQUICC II (TM) family reference manual [M/OL]. (2009-05-13). <http://www.freescale.com>.
- [8] 郭彦伟,郑建德. 生成树协议与交换网络环路研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2006,45(增刊):301-304.
GUO Yanwei,ZHENG Jiande. Research on spanning tree protocol and circle of switch network[J]. Journal of Xiamen University:Natural Science,2006,45(Supplement):301-304.
- [9] 王军,吴志美. 交换式以太网上的多播协议[J]. 软件学报,2003,14(3):496-502.
WANG Jun,WU Zhimei. Multicast protocol over switch Ethernet [J]. Journal of Software,2003,14(3):496-502.
- [10] IEEE. IEEE802.11j Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-common specifications. part 3: Media Access Control(MAC) bridges[S]. [S.I.]:IEEE,1992.
- [11] 李晶,段斌,周江龙,等. 基于 GMRP 的变电站发布/订阅通讯模型设计[J]. 电网技术,2008,32(16):16-21.
LI Jing,DUAN Bin,ZHOU Jianglong,et al. Design of a publish/subscribe communication model based on GMRP for substation communication[J]. Power System Technology,2008,32(16):16-21.
- [12] 韩明峰,张捷,郑永志. IEC61850 GOOSE 实时通信的实现方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):143-146.
HAN Mingfeng,ZHANG Jie,ZHENG Yongzhi. Realization of IEC61850 GOOSE real-time communication[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):143-146.
- [13] 朱来强,陈新之,高志勇. 数字化变电站中广播风暴的防治[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):98-100.
ZHU Laiqiang,CHEN Xinzhi,GAO Zhiyong. Prevention of digital substation broadcast storm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):98-100.
- [14] 邱智勇,陈建民. 500 kV 数字化变电站组网方式及 VLAN 划分探讨[J]. 电工电能新技术,2009,28(4):60-65.

- QIU Zhiyong, CHEN Jianmin. Discussion of 500 kV digital substation network mode and VLAN partition[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 60-65.
- [15] 曹海欧, 严国平, 徐宁, 等. 数字化变电站 GOOSE 组网方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 143-150.
- CAO Haiou, YAN Guoping, XU Ning, et al. GOOSE networking scheme for digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 143-150.
- [16] 梁国坚, 段新辉, 高新华. 数字化变电站过程层组网方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 94-98.
- LIANG Guojian, DUAN Xinhui, GAO Xinhua. Networking schemes for process level of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 94-98.
- [17] 李强, 窦晓波, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络规划与实时特性改进[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 73-76.
- LI Qiang, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Communication network of digital substation and improvement of real-time performance [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 73-76.

作者简介:

李广华(1977-), 男, 河北冀州人, 工程师, 硕士, 主要从事电力自动化设备的研究与开发工作(E-mail: ligh@nari-relays.com)。

Digital substation networking technologies

LI Guanghua

(Nanjing NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The extensive application of GOOSE and sample data transmission in digital substations requires the high performance of communication networks. Traditional shared multicast communication mode is not suitable for digital substations because it may aggravate the network conflict and increase the receiving error. VLAN partition technology supporting IEEE802.1Q and GMRP networking technology are discussed and it is pointed out that both, the former together with the isolated broadcast domain method and the latter with the dynamic multicast registered technology, can be used in theory to avoid the overloaded multicast flow of digital substation transmission, while the latter is better because of its simple project implementation & maintenance and precise flow control.

Key words: digital substation; communication; GMRP; VLAN; electric substations

(上接第 141 页 continued from page 141)

Key techniques of multi-channel parallel communication equipment and system

WANG Mei¹, XU Jian¹, YANG Jian², WANG Jia², HUANG Biya³,

LI Jianqi³, LIU Guojun³, WANG Zhihui³

(1. Shanghai Power Supply Company, Shanghai 200122, China;

2. Shanghai Jiulong Power Group, Shanghai 200070, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A kind of multi-channel parallel power-frequency communication system is developed, which contains mainly the substation system and the user terminal equipment. Key hardware circuits and their connections are given. The key technologies of downlink signal transmission/detection, uplink signal transmission/detection are researched. Three-phase signal parallel transmission, single-phase six-channel signal transmission and multi-feeder signal parallel transmission are applied to enhance the transmission rate of system data. The terminal address code and communication protocol compatible with DL/T698-41 standards are designed. The multi-channel parallel communication system transmits data much faster than the single-channel communication system does, which satisfies the demands of electric energy data acquisition system.

Key words: power-frequency communication system; multi-channel parallel transmission; terminals(electric); filtering; protocols; communication