



智能变电站多级树型光交换网络技术

张小建¹, 郑宇²

(1. 国网智能电网研究院, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 智能变电站网络承载站内监测和保护业务, 具有实时性和可靠性等要求。在分析智能变电站通信业务特征的基础上, 提出一种基于光突发交换机理的多级树型光交换网络架构。研究了光交换网络的主节点、从节点和边缘节点的结构和功能, 并对过程层网络中的 GOOSE、SV 业务数据流进行了分析。最后阐述了基于 Round-Robin 调度算法的主节点控制平面的通信过程。

关键词: 智能变电站; 多级树型光网络; 调度算法; 数据流分析

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015391

Multilevel tree optical switching network technology in smart substation

ZHANG Xiaojian¹, ZHENG Yu²

1.State Grid Smart Grid Research Institute, Nanjing 210003, China

2.Southeast University, Nanjing 210016, China

Abstract: Communication network in smart substation carries monitoring and protection services, with real-time and reliability requirements. Based on the analysis of communication services characteristics in smart substation, a multilevel tree optical switching network architecture was proposed based on optical burst switch mechanism. Then, based on the structure and function of the primary node, slave node and edge node of optical switching network, and GOOSE, SV data flow in process layer network was analyzed. Finally, the communication process of the master node control plane based on the Round-Robin scheduling algorithm was described.

Key words: smart substation, multilevel tree optical switching network, scheduling algorithm, data flow analysis

1 引言

全光交换技术是指光信号在通信网络中不经过任何光电转换, 直接由输入端交换到不同输出端, 具备实时性高、时延抖动小以及抗电磁干扰能力强等优点。目前主要

的光交换技术有光电路交换 (optical circuit switching, OCS)、光突发交换 (optical burst switching, OBS) 和光分组交换 (optical packet switching, OPS)。其中, OBS 技术采用数据分组和控制分组在时间上和信道分离的方式独立传送, 根据控制分组预留带宽资源, 在光域对突发数据分组直接

收稿日期: 2015-09-20; 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家电网公司科技项目“全光交换关键技术及电网应用研究”

Foundation Item: The Science and Technology Project of China State Grid Corporation: Research on Key Technologies of All-Optical Switching and Grid Applications



进行转发;OPS 交换节点无需光缓存单元,也无需对分组头进行更新与同步处理,比 OBS 网络更加贴近实用。智能变电站内存在大量一次设备,电磁环境非常复杂;站内监测和保护业务需要通信系统快速、可靠地信息传递。目前采用的工业以太网交换机通过增加电磁防护措施和冗余网络来保证通信系统的可靠性,增加了设备复杂度,提高了综合建设成本。因此研究采用基于突发分组光交换机理的智能变电站光通信网络,能有效保障继电保护的可靠性和灵动性。

2 智能变电站通信业务特征

智能变电站按照逻辑划分包括 3 层:过程层、间隔层和站控层。对其内部的通信网络,既有在同一层之间的数据交换,也有在不同层之间的数据交换。对于不同的数据流,其流量大小、传递时延要求都有所不同。具体而言,智能变电站的通信系统中传输的报文可分为 7 类,包括快速报文、中速报文、低速报文、原始数据报文、文件传输报文、访问控制命令报文和时间同步报文。表 1 为过程层网络中部分报文对传输时间的要求。

在这 7 类报文中,按时间发生的情况可分为 3 种类

型,分别是:周期性报文、随机性报文和突发性报文。采样值 SV 报文属于周期性报文,即合并单元把采集到的各间隔的电流电压值周期性上传到过程层网络中,其特点是时延抖动要小。GOOSE (generic object oriented substation event, 面向通用对象的变电站事件) 报文属于突发性报文,主要是由间隔层的保护设备通过过程层网络发送的保护跳闸信号、时间顺序(sequence of events, SOE)信号和开关变位的信号,当有数据进入传输网络时,大量的数据同时发送,当没有数据进入网络时,就持续一段空闲的时间没有数据传输,其特点是时延要小。

3 树型光交换网络组网架构

3.1 主—从—边缘三级树型网络结构

由于 GOOSE 信号在过程层网络中各 IED 设备间均有信息交换,并具备多播交换功能的特点,设计如图 1 所示的主—从—边缘三级树型组网结构。网络中每个间隔配置 1 个边缘节点,连接本节点的各 IED 和相应的从节点,负责间隔内各 IED 及与之相连接的从节点间的数据交换。从节点进行主节点与连接的各边缘节点间的数据交换,主节

表 1 过程层网络报文传输时间要求

报文类型		报文性能级别	传输时间要求	
快速报文	跳闸/闭锁	极快速	P1(配电间隔)	P2/3(输电间隔)
	其他	快速	10 ms	3 ms
原始数据报文	保护控制用	极快速	100 ms	20 ms
	计量用		10 ms	3 ms
具有访问控制的命令报文		低速/高速	若是对开关设备进行操作,需要满足快速报文的要求	

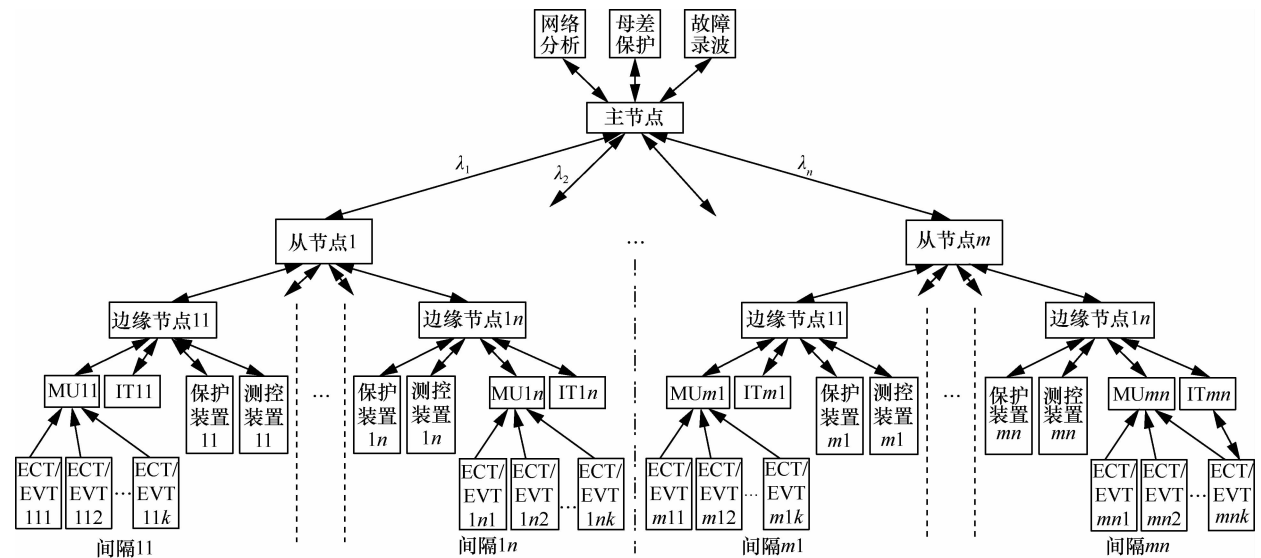


图 1 主—从—边缘三级树型组网架构

点进行各从节点与网络分析、母差保护、故障录播装置间的数据交换。考虑到网络建设成本问题,分别采用了主节点光交换、从节点电交换的方案。

3.2 边缘节点结构与功能

图 2 为网络中的边缘节点结构,业务数据(GOOSE 或 SV 业务)上行至从节点进行光交换之前需要添加相应的标签,表明其业务类型、多播域、源地址、数据长度等信息,以便主、从节点解析标签信息进行业务数据的交换;业务数据下行时,边缘节点解析标签信息,将业务数据正确发送至连接的合并单元、智能终端、保护装置和测控装置接收。间隔内的 IED 业务数据在边缘节点处进行内部交换,实现光交换或电交换,并考虑业务的优先级。边缘节点具有控制平面,负责控制各功能模块实现内部交换、标签处理、缓存调度等功能,并与从节点控制平面进行信息交互,实现网络中的链路配置,解决数据竞争问题。

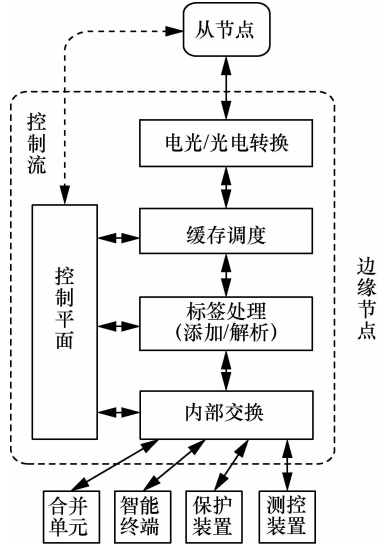


图 2 边缘节点结构

3.3 从节点结构与功能

从节点结构如图 3 所示,由缓存控制及标签处理模块、电光/光电转换模块及控制平面组成。各边缘节点与从节点解析载于业务数据上的标签,将控制信息传输至从节点控制平面,控制平面根据控制流信息和相应的调度算法对缓存中的业务数据进行调度,实现业务数据在各边缘节点和主节点间的多播传输。

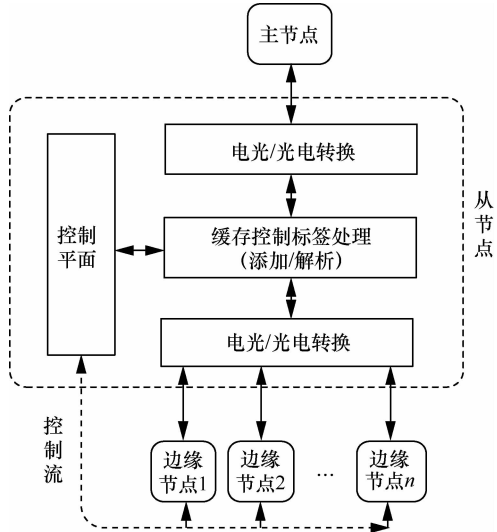


图 3 从节点结构

3.4 主节点结构与功能

主节点结构如图 4 所示,由高速多播光交叉连接器、缓存控制及标签处理模块、电光/光电转换模块及控制平面组成。各从节点和网络分析、母差保护、故障录波设备通过高速多播光交叉连接器进行多播交换,其中, n 个从节点使用 λ_1 至 λ_n 共 n 个独立的波长信道,网络分析、母差保护、故障录波设备通过缓存控制与标签处理模块解决数据竞争问题后共用 λ_{ms} 波长信道进行多播交换。各从节点与

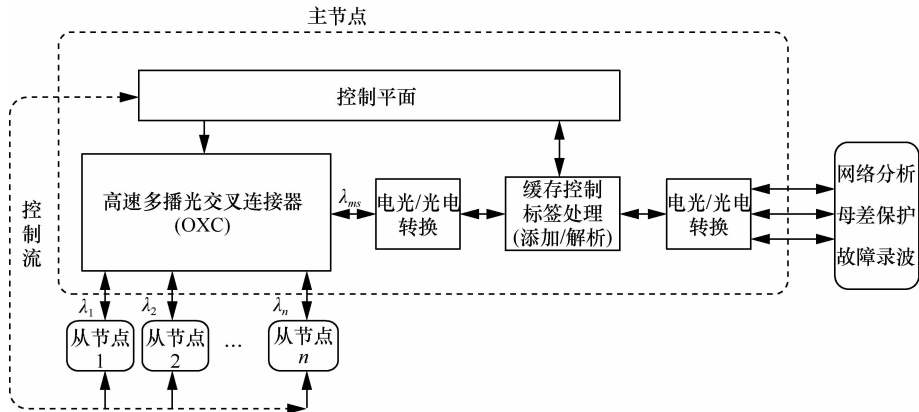


图 4 主节点结构



主节点解析载于业务数据上的标签,将控制信息传输至主节点控制平面,控制平面根据控制流信息和相应的调度算法配置高速多播光交叉连接器,实现业务数据在各从节点和网络分析、母差保护、故障录波设备间的多播传输。

4 高速多播光交叉连接器

通过控制平面配置高速多播光交叉连接器可以实现任意输入端对输出端的多播交换,其结构可以通过波长变换或者光开关选择实现,分别如图 5 和图 6 所示。

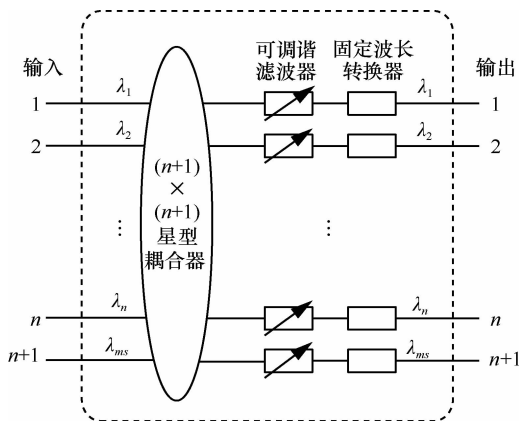


图 5 波长变换高速多播光交叉连接器

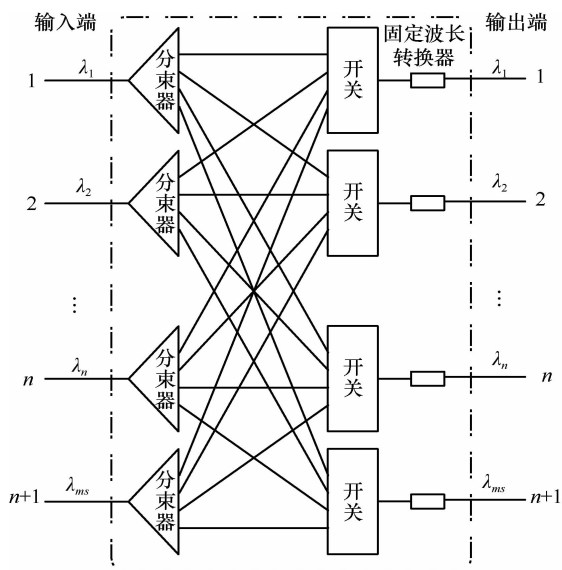


图 6 光开关选择高速多播光交叉连接器

波长变换高速多播光交叉连接器如图 5 所示,由 1 个 $(n+1) \times (n+1)$ 星型耦合器、 $n+1$ 个可调谐滤波器和 $n+1$ 个固定波长转换器组成。任意从输入端进入的光信号经过星型耦合器后功率被平均分配至 $n+1$ 个输出端,由控制平面控

制 $n+1$ 个可调谐滤波器选通任意路输出端输出,经固定波长转换器转换至固定的输出波长信道,实现业务数据的多播交换。

光开关选择高速多播光交叉连接器如图 6 所示,由 $n+1$ 个 $1 \times (n+1)$ 光分配器、 $n+1$ 个 $1 \times (n+1)$ 光开关和 $n+1$ 个固定波长转换器组成。任意从输入端进入的光信号经过光功分器后功率被平均分配至连接至各输出端固定波长转换器的 $n+1$ 个光开关,由控制平面控制 $n+1$ 个光开关选择需要输出的光信号,经固定波长转换器转换至固定的输出波长信道,实现业务数据的多播交换。

5 业务数据流

主一从一边缘三级树型组网架构中的各传输链路波长信道配置如图 1 所示(未标注的链路可用任意波长信道)。其中,SV 业务有如下数据交换过程:SV 业务由合并单元发出,经间隔边缘节点的内部交换发送至间隔内的保护、测控装置,并由边缘节点进行标签处理后发送至相连的从节点,经从节点缓存调度并发送传输请求至主节点,主节点控制平面根据调度算法将传输请求放入请求队列,待完成高速多播光交叉连接器配置后,发送确认信号至相应从节点,从节点发送 SV 数据至主节点,并由主节点传送至网络分析、母差保护和故障录波装置。

GOOSE 业务有如下数据交换过程:GOOSE 业务由间隔内 IED 装置发出,传送到网络分析、母差保护和故障录波装置过程,在边缘节点、从节点和主节点中的处理等同于间隔内 SV 业务的处理过程。跨间隔的各从节点接收到主节点发送的 GOOSE 业务,缓存调度该 GOOSE 业务数据发送至各目标边缘节点,最后边缘节点缓存调度并发送至各间隔内 IED;GOOSE 业务由母差保护发出,由主节点接收并缓存,主节点控制平面解析数据并对数据进行标签处理,得到传输请求并根据调度算法将传输请求放入请求队列,待完成高速多播光交叉连接器配置后,主节点发送该 GOOSE 业务数据至从节点,从节点缓存调度该 GOOSE 业务数据发送至各目标边缘节点,最后边缘节点发送至各间隔内 IED。

6 主节点控制平面调度算法

主节点解析本节点内业务数据标签并接收各从节点的控制流信息,得到如图 7 所示的传输请求队列以配置光路。SV 业务和 GOOSE 业务分别采用 Round-Robin 调度算法,SV 业务优先级高于 GOOSE 业务优先级。

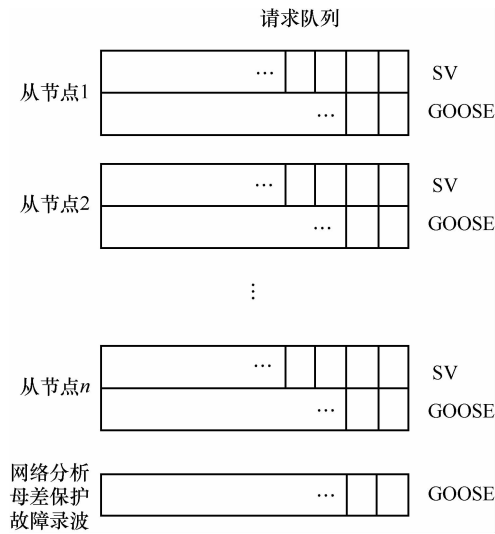


图 7 主节点传输请求队列

如图 8 所示,各从节点向主节点发送包含传送请求的控制流信息或主节点解析业务数据标签使用时间 t_{call} , 经过时间 $t_{propagate1}$ 传送至主节点,形成请求队列,控制平面经时间 $t_{process}$ 根据调度算法调度传送请求并配置高速多播光交叉连接器, 占用时间 $t_{response}$ 向从节点控制平面发送确认信号或向本节点缓存模块发送确认信号,经时间 $t_{propagate2}$ 传送到从节点或本节点缓存模块,其后从节点或主节点发送业务数据。

不考虑端机的接收速率,网络的吞吐量受主节点限制,为防止数据冲突,高速多播 OXC 器件每次只选通 1 路信号进行多播,导致每个主节点可处理的流量上限为单波长传输速率,本网络中取 2.5 Gbit/s,因调度需要保护时间,传输效率以 80% 计算,主节点的最大处理流量

为 2 Gbit/s,忽略 GOOSE 业务流量,仅考虑 SV 业务,以每个合并单元接入 6 个电压/电流互感器计,每个合并单元产生流量约为 $200 \text{ byte} \times 8 \times 6 \times 4\,000 = 38.4 \text{ Mbit/s} \sim 40 \text{ Mbit/s}$, $2\,000 \text{ (Mbit/s)} / 40 \text{ (Mbit/s)} = 50$ 个,即 1 个主节点最大可以连接 50 个合并单元,全网最多可接入约 50 个合并单元。

7 结束语

智能变电站网络承载了 SV 采样值和 GOOSE 跳闸控制报文,对电力系统可靠运行提供了重要保障。随着光交换和软件定义网络技术的发展,全光交换、自适应网络是未来智能变电站通信网络发展趋势。由于 GOOSE 业务在过程层、间隔层间传递信息,需要上行、下行均具备多播功能,根据智能变电站通信业务特征,本文设计了具有主节点、从节点和边缘节点 3 级的多播光交换网络,分析了过程层网络中的 GOOSE、SV 业务数据流,最后阐述了基于 Round-Robin 调度算法的主节点控制平面的通信过程,满足了智能变电站对通信网络实时性、可靠性要求。

参考文献:

- [1] 徐立子. IEC61850 对变电站自动化系统报文性能的要求[J]. 电网技术, 2002, 26(11):1-3.
- XU L Z. Requirement of IEC61850 to performance of messages for substation automation system [J]. Power System Technology, 2002,26(11):1-3.
- [2] 宁帆. 光突发交换 OBS 关键技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2009.

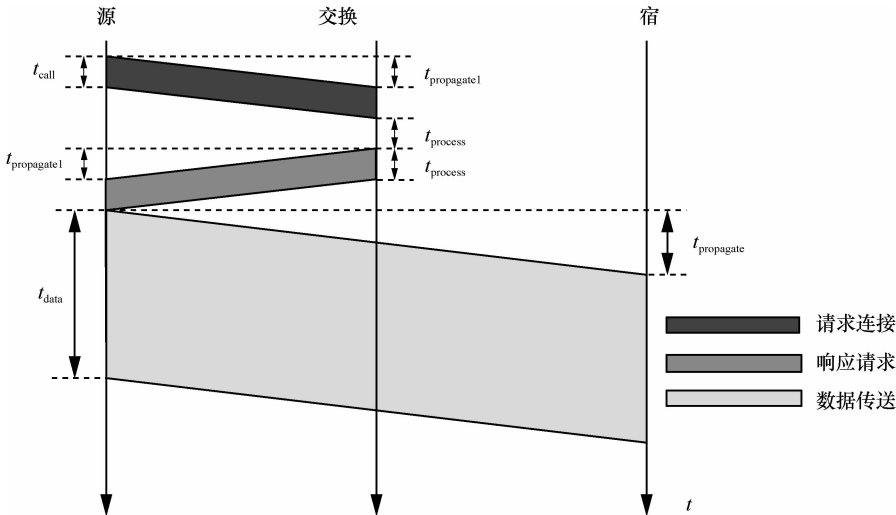


图 8 主节点/从节点通信过程



- NING F. Research on some key technology in optical burst switching networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [3] 沈俊元. 下一代全光网络的解决方案[D]. 上海:上海交通大学, 2002.
- SHENG J Y. Solution to next generation all-optical network[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2002.
- [4] CARCAGNI M, GALIMBERTI G. Distributed optical control plane architectures for handling transmission impairments in transparent optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(13): 2224-2239.
- [5] WANG H, ROUSKAS G N. An efficient algorithm for solving traffic grooming problems in optical networks [C] // IEEE ICC 2013, June 9-13, 2013, Budapest, Hungary. New Jersey: IEEE Press, 2013.
- [6] NUNES B, MENDONCA M, NGUYEN X, et al. A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1617-1634.
- [7] BHAUMIK P, ZHANG S, CHOWHURY P, et al. Software-defined

optical networks (SDONs): a survey [J]. Photonic Network Communications, 2014, 28(1): 4-18.

[作者简介]



张小建(1969-),男,国网智能电网研究院高级工程师,主要研究方向为电力系统通信。



郑宇(1992-),男,东南大学博士生,主要研究方向为光网络和光交换技术。