

新一代智能变电站波分复用无源光通信网络性能研究

余萍,王宁

(华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003)

摘要:针对智能变电站通信系统中出现的网络时间同步、传输时延以及抖动较大的问题,对智能变电站通信网络复用方式进行了研究,提出了波分复用网络架构模式。新一代智能变电站波分复用无源光通信网络架构基于无源光网络和虚拟的点对点双向传输链路,采用业务隔离等技术,保证整个网络的稳定和可靠。通过仿真得到波分复用无源光网络的通信业务的性能指标并加以分析,证实了变电站业务对通信网络的要求均能够通过波分复用通信网络实现,该通信网络可用于变电站通信网。

关键词:智能变电站;通信;波分复用;无源光网络;业务隔离;可靠性

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.022

0 引言

通信网络是智能变电站重要的组成部分,承担着智能变电站的电网实时数据和设备状态数据的采集、传输、实时控制以及时钟同步等关键信息的交换,以实现继电保护等重要的实时控制,如断路器分合状态、跳闸命令等。目前,智能变电站通信平台有2种结构。

a. 基于工业以太网交换机技术的智能变电站通信网络^[1-2]。该网络采用多个交换机级联结构,以满足数量众多、功能不同的各类设备的接入与互联;这类通信网络结构需要更多的资源冗余^[3-4]来满足排队、时延的要求,对广播风暴等问题的处理比较简单粗放,在某些情况下,数据传输的可靠性变差,甚至会出现严重的丢包现象^[5]。

b. 基于时分复用(TDM)的无源光网络PON(Passive Optical Network)结构的新一代智能变电站通信网络^[6-7]。这种网络结构节省了大量的级联交换机,极大地简化了网络连接,其只需要1台中心交换机,并且采用分组传送网PTN(Packet Transport Network)交换技术即可完成核心交换,对解决拥塞问题的效果良好;该网络结构基于PON技术,需要精确定时,各设备只能在规定的时隙工作,等待时间较长;为了满足实时业务要求,该网络结构增加了优先级控制,以保障如采样值SV(Sampled Value)报文的优先传送。

智能变电站按照“三层两网”通信架构进行通信,其中,“三层”指站控层、间隔层、过程层,“两网”指站控层和间隔层间的站控层网络,以及间隔层和过程层间的过程层网络。新一代智能电网的规划对网络的性能提出了更高要求,需要实现业务报文间相互独立互不干扰,即业务隔离^[8]。文献[9]中设计了一种新型波分复用交换机,应用于智能变电站过程层,其利用波分复用技术实现了SV、面向通用

对象的变电站事件(GOOSE)和IEC61588三网隔离,在提高网络的可靠性和安全性方面具有一定的优势。文献[10]提出了智能变电站中PON结构网络的时间同步安全性问题,给出了防范中间人攻击的建议。文献[11]介绍了一种变电站通信网络中基于波分复用的全光交换的共网共口传输方法。文献[12]介绍了在变电站通信网络中几种虚拟局域网(VLAN)的划分方式并提出了新的优化方法。

数据传输时,GOOSE报文、SV报文、制造消息规范MMS(Manufacturing Message Specification)报文、地址解析协议ARP(Address Resolution Protocol)报文和对时报文等均在同一通信网络中传输,增加了网络负荷。交换设备的传输时延不固定、网络数据更加复杂,都可能带来新的问题。在智能变电站通信网络网采网跳应用方式下,采样数据同步需要依赖外部同步源实现,采样数据的不同步可能导致保护闭锁或误跳。在某些情况下存在的问题将影响变电站的安全运行^[13-14]。

本文针对智能变电站业务的需求,采用文献[7]中的PON结构及PTN交换技术,提出了基于波分复用无源光网络WDM-PON(Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network)的智能变电站通信网络,其综合考虑了通信系统的网络结构、虚拟局域网在通信网络的隔离性能,以及同步时钟的安全性和可靠性。本文提出的WDM-PON可以同时应用于站控层网络和过程层网络。以实际智能变电站为例,采用WDM-PON结构对通信系统的网络性能及指标进行了仿真研究,验证了本文所提方法的可靠性和实用性。

1 变电站波分复用通信网络架构

本文将波分复用技术和PON技术相结合,构建一种新型的智能变电站通信网络——WDM-PON,该网络基于虚拟的点对点双向传输链路,兼具波分复用技术和PON技术的优点,在解决变电站通信中存

在的业务串扰、业务性能相互影响等问题,以及降低传输时延和提高网络性能可靠性等方面具有明显的优势。基于 WDM-PON 的通信网络架构如图 1 所示,新型变电站通信网络通过光网络单元 ONU (Optical Network Unit) 将智能电子设备 IED (Intelligent Electronic Device) 连接至 PON,光网络单元通过分光器 ODN (Optical Distribution Network) 与中心交换机连接。

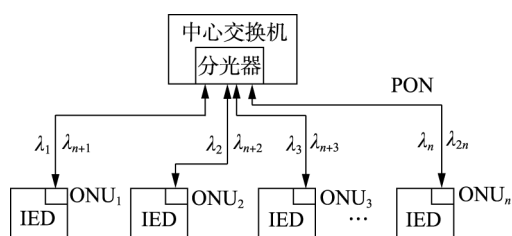


图 1 基于 WDM-PON 的智能变电站通信网络架构

Fig.1 WDM-PON-based communication network architecture for intelligent substation

每个 IED 与 ONU 相连,每个 ONU 分配 1 对波长,分别用于上行和下行传输,这样就建立了中心交换机到各个 ONU 的双向连接,将每个 IED 连接入通信网络中。进行上行传输时,IED 通过 ONU 上传数据,每个 ONU 使用一特定的波长传输业务报文,因此不需要定时和网络同步;进行下行传输时,中心交换机通过调制的方式将数据加到不同波长的载波上,通过波长路由分别传给 ONU₁、ONU₂、…、ONU_n。这样就完成了中心交换机与各个设备的双向通信。

2 组网技术及特点

IEC61850 标准^[15]定义了智能变电站通信网络中的 3 种业务报文。

a. GOOSE 报文,其包含跳闸、合闸、闭锁和解锁等信息。变电站内的开关发生变化,其状态、位置信号以及闭锁信号将通过 GOOSE 报文传递到相应的装置,或者当保护装置发布跳闸命令时,也由跳闸 GOOSE 报文发送到相应的智能终端。系统发生故障时 GOOSE 报文信息量将突发增长。

b. SV 报文由合并单元产生,主要处理各种采样值数据,将各间隔、主变及母线的各类参数经合并单元发送至保护、测控、计量等设备,其总量基本稳定。

c. MMS 报文主要为站控层与间隔层之间以及站控层设备之间的通信传输报文,其数据量大,对时延不敏感,但对数据完整性有严格要求。

不同的 IED 产生的业务报文通过 ONU 进入 PON 后,对于不同业务采用不同的波长承载,传输时相互之间无干扰,在经过 ODN 时将不同业务数据通过光复用模块复用至同一根光纤上,直至业务数据进入中心交换机。变电站业务可以在同一网络中通过不同波长实现变电站统一网络,实现 MMS、SV、

GOOSE 报文的完全业务隔离。在这种网络系统中,每个业务报文的发送和接收采用的波长不同,因此不需要网络同步,提高了通信系统的可靠性。

网络通信系统采用多协议标签交换 MPLS (Multi-Protocol Label Switching) 技术,MPLS 是利用标记进行数据转发的。在 PON 上行发送过程中,ONU 必须严格按照中心交换机的调度进行数据传输,在任意时刻都可以看作是任意一个 ONU 和中心交换机之间的点对点传输,不会发生冲突,因此中心交换机对某一个 ONU 的识别可以使用其时间参数,即作为时间标签,无需使用专门的 ONU 标识符,但需要采用分组标签表明该分组所属标签转发通道 LSP (Label Switching Path)。而进行下行传输时,数据是广播式发送,所有 ONU 都接收到同样的信息,此时则需要对 ONU 进行识别,以便 ONU 只接收属于其本身的数据。根据上述原因,可以将标签域和 ONU 标识域合并,进行上行传输时具有标签的含义,进行下行传输时具有 ONU 标识的含义^[16]。

3 仿真实验

3.1 实验网络构建

实验网络通过 Optisystem 仿真完成,多模光纤组成 PON 结构连接各个终端设备。

该实验网络使用马赫增德尔外调制器对 CW Laser 激光器的光进行调制,实验中共产生 8 个不同频率波长的载波。系统通过 1 个随机二进制码发生器和 1 个不归零码脉冲发生器产生 1 个待传输的数字基带信息,通过外调制器调制该数字基带信号对激光器产生的光载波,从而产生 8 路参与复用的光源。在复用器中将 8 个频率间隔为 0.1 THz 的光信号复合在一起送入光纤中。经过 20 km 的光纤传输(传输信道中还包括了掺铒光纤放大器、光纤等各种元器件),在接收端经解复用器将 8 个波长的光载波分离,最后由光接收机恢复原始信号。

3.2 对主要性能指标的仿真

仿真系统中,CW Laser 激光器平均发射功率为 0;马赫增德尔调制器消光比为 30 dB;光纤长度为 20 km,损耗为 0.2 dB/km,色散为 16.75 ps/(nm·km),零色散斜率为 0.075 ps/(nm²·km),有效面积为 80 μm²,非线性系数为 2.6×10⁻²⁰ m²/W;光检测器的暗电流为 10 nA,响应度为 1 A/W;仿真系统的分路比为 1:8,其他系统参数设置不变。影响网络性能的主要因素是误码率 BER (Bit Error Rate)、时延和丢包率。

3.2.1 吞吐量

吞吐量是指单位时间内对网络、设备、端口、虚电路或其他设施成功传送数据的数量。本文中的吞吐量指的是该通信网络系统中各设备之间的链路带

宽。为了保证服务质量,实现通信网络的零拥塞,通过对 PON 的合理设计和规划以及同时借鉴 TDM-PON 技术,将 ONU 上行带宽设置为固定带宽 128 MByte/s,峰值带宽设置为 200 MByte/s。

3.2.2 误码率性能

误码率是衡量系统性能的重要指标之一。对 WDM-PON 系统中存在的误码率的分析,主要涉及系统的光复用器中不同波长之间的干扰问题,可以借助眼图和 Q 因子进行研究。在波分复用系统仿真中,眼图是检验系统可靠性的重要手段之一,其能直观地反映系统的传输性能。 Q 因子是波分复用系统中衡量信号质量和系统性能的重要指标,较高的 Q 值意味有较好的误码率。

Q 因子和误码率与眼图的关系分别见图 2、图 3。观察频率为 193.1 THZ 波长的眼图可以发现,由于噪声和抖动等原因导致眼图上方信号线变粗,但是眼图整体依然清晰,噪声容限高,抗干扰性能好。

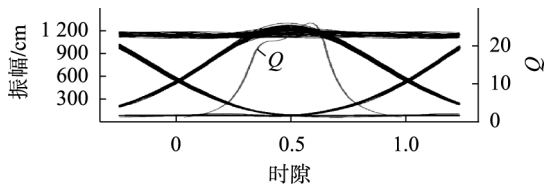


图2 Q 因子与眼图关系

Fig.2 Relationship between Q factor and eye diagram

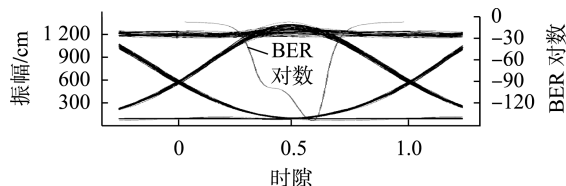


图3 误码率与眼图关系

Fig.3 Relationship between BER and eye diagram

由图 2、3 可以看出,在眼图张开处,其 Q 因子越大,对应的误码率就越小。通常情况下,当 $Q=6$ 时,误码率约为 10^{-9} ; $Q=7$ 时,对应的误码率约为 10^{-12} 。该通信网络在保证达到系统误码率要求(误码率小于 10^{-12})的条件下具有较大的判决范围。由图 2、3 可以看出在眼图的最佳采样时刻, Q 值已经接近 23,表明此时信号的信噪比很高,传输信号几乎没有失真和串扰。

3.2.3 时延性能

通过 OPNET 模拟 ONU 发送业务报文,并测试不同报文的时延。本文进行了多组测试(每组测试不超过 24 h),测试得到的各业务报文的最大时延、最小时延、平均时延如表 1 所示。

GOOSE 报文传输时延规定值为 3~10 ms,SV 报文总传输时延规定值小于 50 ms,MMS 报文传输时延规定值一般不超过 500 ms。由表 1 可见,该网络的报文传输时延远小于规定值。

表 1 不同业务报文的时延比较

Table 1 Comparison of time delay among different service messages

报文类型	最大时延/ μ s	最小时延/ μ s	平均时延/ μ s
GOOSE	689.76	23.65	264.25
SV	743.21	62.24	317.02
MMS	1 402.38	472.62	880.67

3.2.4 丢包率性能

在 3.2.3 节的仿真条件下,对丢包率进行了仿真研究,结果如表 2 所示。由表 2 可见,在正常运行情况下,该网络未出现网络丢包现象,可满足各种通信业务需求,保证了通信网络的可靠性与实时性。

表 2 不同业务报文的丢包率比较

Table 2 Comparison of service packet loss rate among different service messages

报文类型	丢包率/%
GOOSE	0
SV	0
MMS	0

以上仿真结果表明,该通信系统采用波分复用技术以及 PON 结构,可满足各种通信业务需求,具有良好的抗干扰性能,其低时延以及无丢包的优点,可较好地满足工程应用要求。传统以太网、局域网将级联交换机作为中间设备,具有容易被植入病毒程序、破坏时间同步的可能,而采用 PON 结构的网络中没有级联的交换机,时间同步安全性更好。同时,本文提出的 WDM-PON 既可应用于智能变电站中,也可以应用于需要交换机级联的普通局域网中,时间同步可靠,安全性好。

4 结语

通过对 WDM-PON 和虚拟的点对点传输链路的仿真,得到了较为理想的眼图、 Q 因子曲线以及误码率曲线,从而验证了新一代智能变电站 WDM-PON 可实现业务隔离和保证网络的可靠性。本文的研究结果简化了新一代智能变电站的通信网络结构,提高了网络可靠性、实时性,可为新一代智能变电站通信网络建设提供有力的支撑。

参考文献:

- [1] 刘频,陈立. 工业以太网技术在变电站自动化系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(23):65-68.
LIU Pin, CHEN Li. Application of industrial Ethernet in substation automation system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23):65-68.
- [2] 刘炬,刘晓明,陈宇恩,等. 基于工业以太网和实时操作系统的多 CPU 嵌入式变电站通信处理平台[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):123-126.
LIU Ju, LIU Xiaoming, CHEN Yuen, et al. Embedded multiple-CPU substation communication platform based on industry Ethernet and RTOS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):

- 123-126.
- [3] 许铁峰,徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.
XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.
- [4] 陈原子,徐习东. 基于并行冗余网络的数字化变电站通信网络构架[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 105-108.
CHEN Yuanzi, XU Xidong. Network control system based on OPC middleware technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 105-108.
- [5] 王海柱,蔡泽祥,张延旭,等. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 156-162.
WANG Haizhu, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu, et al. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 156-162.
- [6] 凌光,许伟国,王志亮,等. 基于 EPON+ 的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 89-94.
LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, et al. Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 89-94.
- [7] 孙海波,金乃正,马平,等. 新一代智能变电站通信网络关键技术[J]. 光通信研究, 2017(4): 1-3.
SUN Haiibo, JIN Naizheng, MA Ping, et al. Key technology of communication network for new generation intelligent substation[J]. Study on Optical Communications, 2017(4): 1-3.
- [8] 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): 139-144.
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): 139-144.
- [9] 鲍兴川,余勇. 波分隔离交换机及其在智能变电站通信组网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(4): 16-21.
BAO Xingchuan, YU Yong. WDM isolation switch and its application in smart substation communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015, 13(4): 16-21.
- [10] 张纯笑,徐嘉龙,张亮,等. 新型智能变电站通信网络时间同步脆弱性分析[J]. 光通信研究, 2017(3): 16-19.
ZHANG Chunxiao, XU Jialong, ZHANG Liang, et al. Analysis of the time synchronization's vulnerability of new intelligent substation's communication network[J]. Study on Optical Communications, 2017(3): 16-19.
- [11] 王玮. 变电站共网共口传输实现方法[J]. 电信科学, 2015, 31(增刊1): 222-226.
WANG Wei. Communication method of shared-port and shared-network in substation[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(Supplement 1): 222-226.
- [12] 邹俊雄,黄成巧,张延旭,等. 智能变电站通信网络虚拟局域网建模与优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 137-142.
ZOU Junxiong, HUANG Chengqiao, ZHANG Yanxu, et al. Modelling and optimization of VLAN for smart substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 137-142.
- [13] 张言苍. 智能变电站网络采样同步新技术[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 143-147.
ZHANG Yancang. Network sampling synchronization method for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 143-147.
- [14] 黄华勇,游步新,全智,等. 通信在线监视分析系统在智能变电站中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 124-127.
HUANG Huayong, YOU Buxin, QUAN Zhi, et al. Application of real-time monitoring and analyzing system in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 124-127.
- [15] IEC. Communication networks and systems in substation; IEC61850-2004[S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2004.
- [16] 郭勇. 基于 GMPLS 的智能无源光网络技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
GUO Yong. The study of GMPLS based intelligent passive optical network[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.

作者简介:



余萍

余萍(1963—),女,浙江富阳人,副教授,主要研究方向为电力系统通信、信息处理(E-mail: yuping63119@ncepu.edu.cn);
王宁(1993—),男,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统通信(E-mail: wangningncepu@163.com)。

Performance research of a new generation of WDM-PON for intelligent substation

YU Ping, WANG Ning

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at the problems of network time synchronization, transmission time delay and large jitter existing in the communication system of intelligent substation, the multiplexing mode of communication network in intelligent substation is studied and the WDM(Wavelength Division Multiplexing) network architecture mode is proposed. The structure of WDM-PON(Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network) in new generation of smart substation is based on passive optical network and virtual point-to-point bi-directional transmission links and adopts the business isolation technology, which ensures the stability and reliability of the entire network. The performance indexes of WDM-PON are obtained through simulation and analyzed. The analytical results prove that WDM communication network can satisfy the requirements of substation service on communication network and can be applied to the substation communication network.

Key words: intelligent substation; communication; WDM; passive optical network; business isolation; reliability