

一种用于智能变电站的过程层光网络结构

陈旭宇¹,黄堃²,曾中梁¹,曾梦妤¹,樊鹤红^{3*}

(1.广东电网有限责任公司 佛山供电局,广东 佛山 528000;

2.国电南瑞科技股份有限公司,南京 211106;3.东南大学 光传感/通信综合网络国家(地方)联合工程研究中心,南京 210096)

摘要:为满足智能变电站通信网络“网采网跳”的性能需求,在充分考虑智能变电站过程层流量特性的基础上,基于分布式波长互组播技术,提出了一种用于电力网络通信的过程层光网络结构,并对该网络结构的业务隔离特性、时延、可扩展性和冗余保护能力等网络性能和特点进行了分析。分析表明:使用该网络可以实现近似光纤直连的端到端低传输延迟;支持流量组播和上行业务的物理隔离;同时可对光纤链路及光分配节点故障提供快速保护;网络覆盖范围可达几十千米,且对接入节点数没有限制。

关键词:智能电网;智能变电站;过程层光网络;分布式波长互组播;业务隔离

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)02-0050-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.02.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical process level network structure for smart substation

CHEN Xuyu¹, HUANG Kun², ZENG Zhongliang¹, ZENG Mengyu¹, FAN Hehong^{3*}

(1. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan Guangdong 528000, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. National Research Center for

Optical Sensing/Communications Integrated Networking, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To meet the performance requirement of "network mining network hopping" in smart substation communication network, based on distributed wavelength inter-multicast technology and taking full account of the process layer flow characteristics of smart substation, an optical process level network structure for power network communication is proposed. The network performance and characteristics such as service isolation, delay, scalability and redundancy protection capability of the network structure are analyzed. The analysis shows that the network can achieve end-to-end low transmission delay similar to direct optical fiber connection, support physical isolation of traffic multicast and business on board, and provide fast protection for faults of optical fiber links and optical distribution nodes. The network coverage can reach tens of kilometers without restrictions on the number of access nodes.

Key words: smart grid; smart substation; optical process level network; distributed wavelength multicast; business isolation

0 引言

通信网络是实现电网智能化的关键部分之一。为保证电网应用的正常运行,电力通信网络需要具备高可靠性、高安全性的特点,并且需要保证足够好的服务质量(QoS)^[1]。随着我国电网智能化的建设和发展,电网中信息的采集、监测和传输点增加,导致电网核

收稿日期:2018-10-17。

作者简介: 陈旭宇(1981-),男,广东兴宁人,工程师,毕业于华南理工大学,高级工程师,从事电力行业信息化技术研究14年,主要研究方向包括配电信息化技术、输配电网地理信息系统技术和变电站网络技术。

* 通信作者:樊鹤红(E-mail: fhh@seu.edu.cn)。



心业务流量的不断上升^[2]。此外,电网公司特高压电网架构方案的实施,使得对大协同控制范围的需求增长,进而导致承载电网的通信性能需要跳跃式增长^[3],对电力通信网络的容量要求越来越高。采用什么方案解决大网络负荷、采样值同步以及其它相关的网络通信问题,会对未来智能电网的发展产生直接的影响。

智能变电站通常采用“三层两网”网络架构。变电站自动化系统从功能逻辑上分为变电站层、间隔层和过程层三层;通信网络一般采用物理上独立的站控层网络和过程层网络,其中过程层网络用于连接过程层的一次设备和间隔层的测控、保护设备等,涉及变电站一次设备的数据传输和设备的实时控制,如数据采

集和保护跳闸等^[4], 具有网络业务流量大、通信性能要求高的特点, 过程层网络结构及性能在很大程度上决定了变电站全站以及智能电网总体运行的性能、稳定性和可靠性。

为应对智能变电站网络面临的性能挑战, 本文提出一种适用于智能变电站过程层通信的光网络结构。

1 过程层光网络

为了达到对变电站继电保护的技术要求, 传统变电站常采用点对点直连, 即“直采直跳”的方式对过程层和间隔层设备进行连接, 可以保证连接和通信 QoS 性能的可靠, 但其接线复杂, 维护困难, 需要智能电子设备提供多个网络电接口或光接口, 还会造成大量电缆或光缆的浪费, 且采样信息不能共享, 也缺少网络管理功能。采用继电保护的网络化, 即“网采网跳”, 可实现采样信息的共享, 并可简化光纤接线, 提高调试效率, 节约建设成本^[5], 但网络容量和实时性是“网采网跳”面临的最大挑战, 同时不同类型信号间还需要进行有效的隔离。

本文基于对智能变电站网络流量特性的考虑提出了一种适用于过程层网络的光通信网络结构, 如图 1 所示。过程层网络流量大、通信性能要求高, 既包

括持续、大流量的 SV (Sampled Value) 报文, 也包括具有突发特点、实时性要求高的控制命令 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) 报文, 且过程层上行流量远远高于下行流量, 组播是其典型的通信方式, 同时流量的路由具有确定性, 几乎不需要随机路由。这些特点使得其与通常的通信网络流量特性明显不同。鉴于此, 本文基于波长互组播技术^[6], 采用无源器件构建过程层光网络, 在简化网络设备间连接的同时, 实现网络的高性能、高可靠、可组播、可隔离和信息共享。

1.1 网络结构

如图 1 所示, 图中 λ 表示波长, Λ_1 表示过程层设备信号发送端光源的光谱范围, 该波长互组播型过程层光网络由两种中间光节点将过程层和间隔层网络设备根据需要实现按组互联。过程层设备侧的光节点称光接入节点, 过程层设备的上行信息通过光发送端发送并接入到光接入节点的上行输入端口, 光接入节点将各输入端口的光信号以分布式组播组合的形式输出到各间隔的分配节点的输入端。间隔层侧光节点称光分配节点, 用于实现各间隔信号的解复用。这样, 每个间隔的过程层设备信号可以发送到相应的间隔层单元, 并且该过程层网络中的组播是以全光及无源

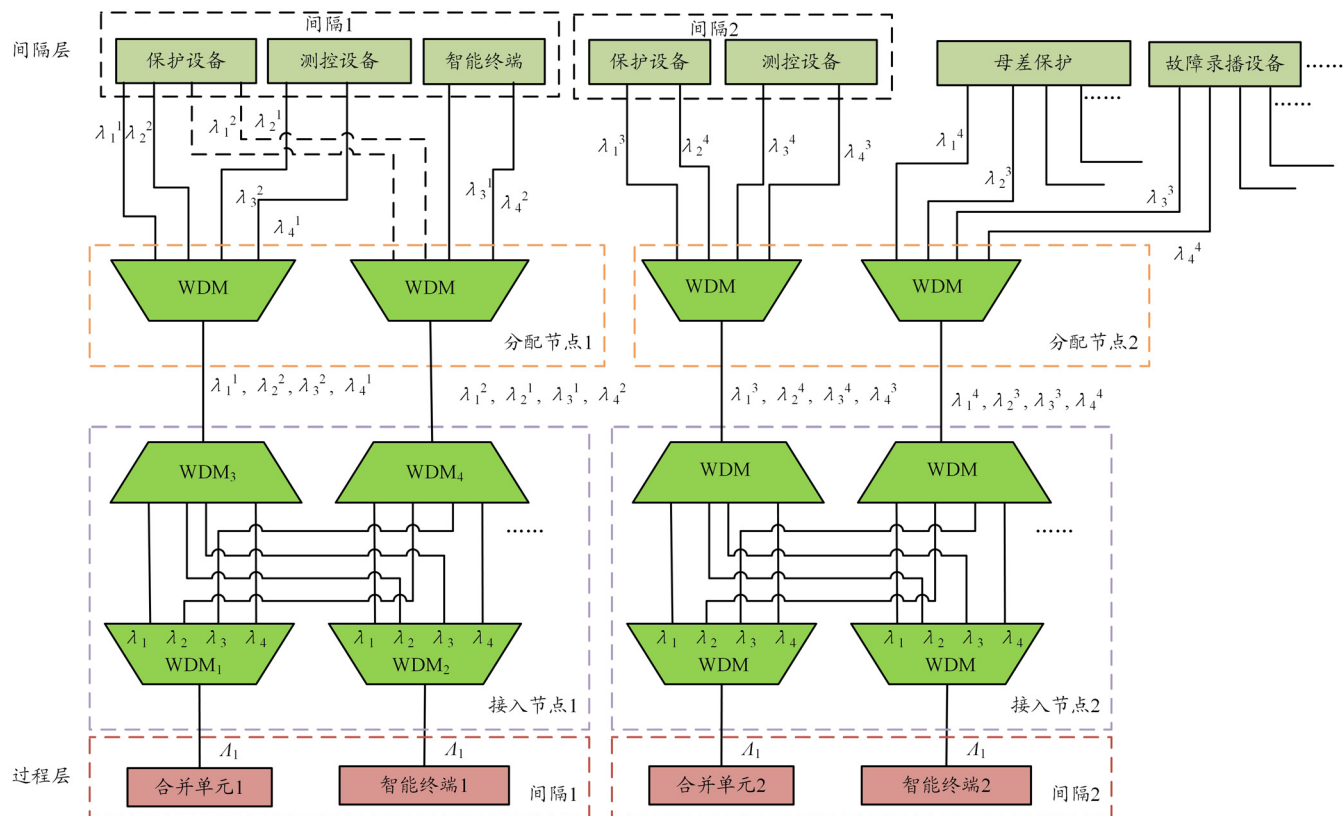


图 1 过程层光网络结构

的方式实现的。此外,从接入节点输出端出来的组合信号可以被送到不同的分配节点中以实现信号的共享和冗余。

考虑到 SV 信号的业务流量占据了过程层网络的绝大部分,本文仅以过程层到间隔层的上行业务为例进行网络性能分析。在下行方向,典型的业务是 GOOSE 业务,对给定节点而言,下行业务其可利用与上行相同的波长或者与上行相差 k 个自由谱范围 (FSR) 的波长实现通信,这里 FSR 为波分复用器的周期。由于不需缓存和交换,对于该无源光网络而言,下行传输延迟和上行相同。

1.2 节点结构

如图 1 所示,每个接入节点由 4 个 WDM 的解复用端口进行交叉互联来实现,通过这种交叉互联实现了波长互组播。

通过利用过程层设备较宽的光谱和具有波长互组播功能的节点,过程层智能设备的信号可以组播到不同的间隔层设备上,或通过不同路径汇集到同一间隔层设备上实现链路的冗余备份。同时不同智能终端的信号通过组合也可以送到同一设备中去。

1.3 波长利用方案

本结构中过程层设备使用的光源具有较宽的波长范围,可以覆盖 WDM 的 k 个端口对应的波长范围。如图 2 所示,

图中彩色(蓝、绿、红、紫色)窄谱线表示 WDM 的传输谱,信道带宽表示为 $\Delta\lambda_A$,中心波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$,图中 FSR 表示使用阵列波导光栅(AWG)情况下的自由谱范围;图中黑色宽谱代表过程层光源(即图 1 中合并单元 1)的光谱,其谱宽范围为 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{p1}'$,可表示为 $\Delta_1 = [\lambda_{p1}, \lambda_{p1}']$,则谱宽 $\Delta\lambda_p = \lambda_{p1}' - \lambda_{p1}$ 。

图 1 中示例了一种波长使用方案,图中节点旁边的符号表示相应链路上传输的波长,如 λ_i^j 表示第 j 个过程层设备的第 i 个波长。这里过程层设备的谱宽 $\Delta\lambda_p$ 为 4 倍的 WDM 信道宽度($\Delta\lambda_A$),即 $\Delta\lambda_p = 4\Delta\lambda_A$ 。这样从合并单元发出的光信号会被波长分割成 4 份,分别为波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 ,在图中表示为 $\lambda_1^1, \lambda_2^1, \lambda_3^1$ 和 λ_4^1 ,将分别从接入节点 1 的 WDM₁ 的 4 个解复用端口输出,与 WDM₂ 中输出的 4 路波长信号重新组合后通

过 WDM₃ 和 WDM₄ 复用到 2 个光接入节点的 2 个输出端,并被送到分配节点 1,并经过 WDM 最终被传送给两个间隔层设备。这里间隔 1 的保护设备收到了来自过程层间隔 1 的合并单元与智能终端的 2 份信号,这 2 份信号分别经过不同的光纤和 WDM,实现了冗余备份。类似地,利用相似的方法也可把同一过程层设备发送的同一信号分别送给保护设备、测控设备和故障录播设备等多个设备。

2 网络性能分析

2.1 业务隔离特性

由上面的分析可知,通过利用不同的波长或者不同光路中的相同波长,不同节点对之间的业务可以物理隔离开来。此外,SV 业务和 GOOSE 业务也可以通过利用接入层设备的不同端口而隔离开来。并且,上行数据之间没有冲突产生,不需要缓存和交换。

在下行方向,如果同一组内所有的间隔层设备都同时进行组播则可能会发生冲突。但由于变电站网络的下行数据流量非常小,使用常规方法即可解决这一问题。例如使用 G984.3 [7] 中给出的带宽分配方法,利用站控层网络在过程层设备之间进行同步和带宽分配。这样,下行业务的 QoS 也可以得到保证。

2.2 延迟特性

该过程层网络的延迟可以按照式(1)进行计算:

$$t_p = t_i + t_r + t_n \quad (1)$$

其中, t_{pi} 、 t_i 、 t_r 、 t_l 和 t_n 分别表示总延迟、光发送机的光电延迟、光纤传输延迟(约 $5\mu\text{s}/\text{km}$ [8])、光接收机光电延迟,以及接入节点和分配节点上的延迟。 $t_l = 5l_f$, l_f 表示光纤长度。

对于典型的光源模块、光检测器模块来说,其电光和光电延迟都在 ns 量级,可以忽略不计。由于本网络中没有使用路由器、交换机,而只有无源光器件组成,因此 2 种中间节点上的光延迟亦可忽略不计。总的来说,端到端的总延迟近似正比于光纤长度,10km 以内的光纤延迟不超过 $50\mu\text{s}$ 。

另外,该网络中的信号延迟并不随接入节点和业务流量的增加而增加,因为该网络中的信号传输在物理上和端到端的光纤连接一样,只是其利用了分布式的波长互组播技术实现了组播和信息共享,同时大大减少了过程层设备所需端口数量和网络中所需光纤的数量。

2.3 网络扩展性

网络扩展性主要由功率预算和传输容量预算决

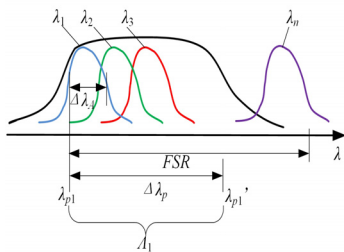


图2 节点光谱示意图

定。功率预算是网络中的可接入器件数目以及网络覆盖范围的关键限制因素。对网络中任意的端到端连接而言,接收端接收的光功率可以表示为:

$$P_r = P_t - L_{am} - L_f - 10 \lg k - L_{dn} \quad (2)$$

其中, P_t 、 P_r 、 L_{am} 、 L_{dn} 和 L_f 分别指信号发送端的发送光功率、接收端的单波长接收光功率、接入节点的附加损耗、分配节点的损耗和光纤的插损, k 为过程层设备波分的数量,即组播接收用户的最大数目。 L_f 可由式(3)得到:

$$L_f = \alpha_f L_t \quad (3)$$

其中, α_f 为光纤损耗系数。

由此,该过程层网络从过程层到间隔层的最大覆盖范围可以由式(4)计算:

$$L_{tmax} = [(P_t - P_r) - L_{am} - 10 \lg k - L_{dn} - M] / \alpha_f \quad (4)$$

其中, $(P_t - P_r)$ 为功率预算, M 为损耗裕度。

下面举例说明该过程层光网络的覆盖距离(最大光纤长度)与功率预算间的关系。对光接入节点而言,其损耗主要来自于 WDM 的插损。根据市面上现有产品的性能参数,这里保守估计 $L_{am} = 1\text{dB}$, $\alpha_f = 0.25\text{dB/km}$ (含接头损耗), $L_{dn} = 3.5\text{dB}$, $M = 3\text{dB}$, 则对应于 $k=4$ 时的网络覆盖距离 L_{tmax} 与功率预算之间的关系如图 3 所示,当功率预算为 20dB 时,网络覆盖距离可以达到约 25km; 如果功率预算可以达到 35dB, 则其覆盖范围甚至可以达到 84km。即使组播数 $k=10$ 时, 功率预算为 20dB 的网络覆盖范围也可以达到 9km, 远高于使用非光通信方案网络的覆盖范围。

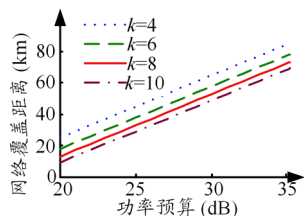


图3 网络覆盖距离与功率预算之间的关系

由于本方案中采用具有较宽谱宽的光源,且可以使用中等比特率和功率预算的器件,本方案所需光源和 WDM 的成本比需要高速窄线宽光源的方案明显降低。例如,使用 $P_t > 0\text{dBm}$ 的 FP 型激光器配合灵敏度超过 -30dBm 的 PIN 光电检测器, 功率预算即可达到 30dB; 使用输出功率只有 -10dBm 的 LED, 配合灵敏度 -30dBm 的 PIN 光电检测器, 功率预算也可以达到 20dB。

2.4 冗余和保护

该网络还可提供冗余保护功能,不仅可以保护链路故障,而且在使用如图 1 中虚线所示的冗余链路的情况下还可以保护分配节点故障。考虑到只有设备附近的光纤需要有冗余,这种保护相比常见的用 2 个完

全相同的网络来进行备份, 其所需光纤量大大减少,易于维护。当然,要实现保护,间隔层设备的端口数目也要有冗余。由于冗余信号和主用信号同时在网络上传输,该网络的故障保护时间主要取决于故障判断时间。举例来说,该网络的故障恢复时间 t_{tp} 可用式(5)来估计:

$$t_{tp} = t_d + t_p = (n \times t_f + t_{sp} + t_{pd}) + (m \times t_f + t_{sw} + t_{pd}) \quad (5)$$

其中, t_d 、 t_p 、 t_f 、 t_{sp} 和 t_{sw} 分别指故障检测时间、保护动作时间、帧发送间隔、信号处理时间以及保护倒换时间, n 和 m 分别指用于判断故障的帧数目和触发保护倒换命令之前需要等待的最大帧数目。本文利用 G984.3^[8] 中规定的 t_f 和 t_{sp} 值,即 $125\mu\text{s}$ 和 1ms ,并假设 n 和 m 分别为 2 和 4, 可以得到 $t_{tp} \leq (2 \times 125\mu\text{s} + 50\mu\text{s} + 50\mu\text{s}) + (4 \times 125\mu\text{s} + 1\text{ms} + 50\mu\text{s}) < 2\text{ms}$, 即网络故障恢复时间可以小于 2ms。

3 结束语

本文提出了一种用于智能变电站过程层网络通信的光网络结构。该网络对 10km 覆盖范围的通信延迟仅为 $50\mu\text{s}$, 故障保护时间小于 2ms, 覆盖范围可达几十千米,且对网络设备数没有限制;在简化网络设备间连接的同时,既可保持点到点直连的绿色、可靠、高通信性能、不需外部定时和路由交换,也可实现定向组播、信息共享和不同信息的隔离,因此是一种具有较高性价比的可靠、低时延的过程层网络方案。

参考文献:

- [1] SAUTER T, LOBASHOV M. End-to-End Communication Architecture for Smart Grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (4): 1218-1228.
- [2] 赵子岩, 张大伟. 国家电网公司“十二·五”电力通信业务需求分析 [J]. 电力系统通信, 2011, 32(5): 56-60.
- [3] 吴路明, 袁愉涛, 陈琦. 基于 SDN 的电力通信网络关键技术综述 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 134-144.
- [4] 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, 35(18): 67-71.
- [5] 刘永欣, 易永辉, 陶永健, 等. 智能变电站过程层网络同步对时方案优化 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 112-116.
- [6] 樊鹤红, 胡威漪, 孙小茜, 等. 一种波长互组播型过程层光网络结构: 中国, 201610027177.X [P]. 2018-03-05.
- [7] ITU-T. Gigabit-Capable Passive Optical Network (GPON): Transmission convergence layer specification: ITU-T G.984.3 [S]. Geneva: ITU-T, 2004.
- [8] GOMEZ M A, AMAYA F F, HINCAPIE R, et al. Optical access multi-service architecture with support to smart grid [C]// IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), May 22-24, 2013, Medellin, Colombia. Medellin: IEEE, 2013: 1-5.