



OTN 在电力通信中应用的问题探讨

陈新南¹, 连伟华¹, 马一宁²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663;

2. 南方电网能源发展研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 随着电网对通信带宽的需求逐步增长, 光传送网 (optical transport network, OTN) 在电力通信中的应用日益广泛、深入, 在应用过程中出现了一系列亟待解决的问题: OTN 的长距离传输问题、雷电导致 OPGW 承载的偏振复用 OTN 系统闪断问题、业务需求的发展趋势与 OTN 设备功能组合的匹配问题。简要梳理、介绍了这 3 个问题的背景、原理; 在实际的 OTN 系统建设工程中使用前后向拉曼放大器及后向遥泵放大器, 并将其光信号沿着光纤远传的功率分布进行了理论计算并以工程实测数据验证, 定量证明了前后向拉曼放大器及后向遥泵放大器对 OTN 系统的单跨段传输距离的增益; 对自然雷电导致光信号 SOP 旋转的速度进行了理论估算并在实际系统中进行测量, 提出了对 OTN 设备跟踪 SOP 能力的测试方法并进行了实际测试; 提出了应用分组光传送网 (packet optical transport network, POTN) 技术提升 OTN 带宽调度灵活性的思路。

关键词: 电力通信; OTN; OPGW; 超长距; SOP

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022149

Discussion on the issues of applying OTN in power grid communications

CHEN Xinnan¹, LIAN Weihua¹, MA Yining²

1. China Southern Power Grid Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510663, China

2. China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China

Abstract: With the gradual increase in the demand for communication bandwidth in the electric power grid, the application of optical transport network (OTN) in electric power communication has become increasingly extensive and in-depth. A series of problems to be solved have been found in the application process. The long-haul transmission problem, the interruption problem of OTN with polarization multiplexing carried by OPGW which is caused by lightning strikes, the problem of mismatch between trend of service requirement development and functions combination of OTN equipment. The background and principles of the above three issues were briefly sorted out and introduced. The forward and backward Raman amplifiers and remote optical pumping amplifiers were applied in the practical OTN system construction project. Theoretical calculations of the optical power distribution along the fiber were carried out and verified by field measured data, which quantitatively proved the gain of amplifiers mentioned



above on the single-span transmission distance of OTN systems. The speed of the rotation of SOP caused by natural lightning strikes was theoretically estimated and measured in the practical OTN system. A test method for the SOP tracking ability of the OTN systems was proposed and carried out. An idea of applying the packet optical transport network (POTN) to improve the flexibility of OTN bandwidth administration was proposed.

Key words: power grid communication, OTN, OPGW, ultra-long distance, SOP

0 引言

我国电网公司普遍建有电力通信专网,其底层是随输电线路架设的光缆组成的光缆网,这些光缆将安装在变电站、换流站、办公楼内的光通信设备连接在一起组成了电力光传输通信专网。早期的电力光传输通信专网一般采用同步数字体系(synchronous digital hierarchy, SDH),光链路带宽为 10 Gbit/s (STM-64)、2.5 Gbit/s (STM-16)、622 Mbit/s (STM-4)、155 Mbit/s (STM-1) 不等,主要承载继电保护、安稳控制、电力调度自动化等以 2 Mbit/s 带宽为主的生产控制业务和以 $N \times 100$ Mbit/s (N 一般为 1~10) 带宽为主的管理信息业务^[1-4]。

随着电网逐渐向智能化、数字化的方向发展,采集的数据越来越多。在这种情况下,我国电网公司正在建设越来越多的数据中心来存储和处理这些数据。因此,需要越来越大的通信带宽将这些数据从它们产生的地方传输到数据中心。以南方电网为例,在“十三五”规划期内,便开始出现带宽为 $M \times 1$ Gbit/s (M 一般为 1~10) 的数字化业务,其流向为南方电网主站—下辖各省级电网公司主站、省级电网公司主站—下辖各地区供电局主站,且需要配置通道级保护。联络南方电网主站及其下辖的各省级电网公司主站的通信网被称为主干通信网。联络省级电网公司主站及其下辖的各地区供电局主站的通信网被称为省干通信网。南方电网下辖多个省级电网公司,每个省级电网公司又下辖多个地区供电局,上述多条业务叠加在主干通信网、省干通信网后,经过光纤断面的流量达到 $L \times 10$ Gbit/s 级别 (L 一般为 10~40)。成熟商用的 SDH 设备支

持的单根光纤最大带宽为 10 Gbit/s (业界曾基于 SDH 发展单根光纤 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 的技术体制,但未实现标准化和普遍商用,其随着 OTN 技术的兴起而逐渐销声匿迹)。

此时,采用 SDH 技术体制建设的电力光传输通信专网无法提供足够的带宽以满足上述业务的需求。为了满足这样的需求,国内电网公司普遍选择自建光传送网(optical transport network, OTN)专网^[5-12]。然而,当 OTN 专网在电力行业应用时,针对公共电信运营商需求而设计的商用 OTN 设备遇到了 OTN 的长距离传输问题、雷电导致 OPGW 承载的偏振复用 OTN 系统闪断问题、业务需求的发展趋势与 OTN 设备功能组合的匹配等问题。本文将针对这些问题开展论述。

1 OTN 的长距离传输问题

在公网电信行业,单跨光缆的长度通常不超过 80 km。通过每隔一段不到 80 km 的光缆设置光放站的方式将光信号放大,光信号因而可以传输数千千米,并仍然保持可接受的光功率和光信噪比(optical signal noise ratio, OSNR)。相比之下,电力行业的单跨光缆要长得多。我国特高压输电线路单跨光缆长度超过 80 km 的现象十分普遍,以南方电网为例,500 kV 及以上电压的输电线路光缆平均长度都已超过 80 km,最长可达 420 km,而且光缆中间没有设置光中继站的条件。

用长距离光缆来建设 OTN 系统存在诸多困难。输电线路光缆衰减的典型值为 0.19~0.25 dB/km,经过长距离光缆的衰减,到达接收机的光信号

远低于接收机灵敏度(商用 OTN 设备 100 Gbit/s 光接收机灵敏度典型值为-14 dBm),无法被正确识别。为解决该问题,常用方法为在发送端使用掺铒光纤放大器—功放(EDFA-BA)对光信号进行放大,但受光纤非线性效应的支配,入纤光功率不能过大。如果在发送端应用前向拉曼放大器,使光信号的放大过程分布在光缆起始端的一小段距离内,既可以对抗衰减,又避免在某个光纤截面注入过高的光功率。在接收端使用掺铒光纤放大器—预放(EDFA-PA)对光信号进行放大也是有效的,但是光放大器在微弱光信号中引入的放大器自发辐射(amplifier spontaneous emission, ASE)噪声会劣化 OSNR,因而增益也受限。后向拉曼放大器使光信号的放大过程分布在光缆末端的一小段距离内,而不是仅在接收端进行放大,后向遥泵放大器由遥泵泵浦源和遥泵增益单元(掺铒光纤)组成,将遥泵泵浦源置于接收端,将遥泵增益单元置于离接收端有一段距离的位置,使光信号在未到达光缆末端时(即未被衰减到最弱时)被放大,因而均可起到提高增益、改善 OSNR 的效果。

光信号在光纤中传输的非线性薛定谔方程组^[13]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{1}{v_{gp}} \cdot \frac{\partial A_p}{\partial t} + \frac{i\beta_{2p}}{2} \cdot \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + \frac{\alpha_p}{2} A_p = \\ i\gamma_p(1-f_R)(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p + R_p(z,t) \\ \frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{1}{v_{gs}} \cdot \frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{i\beta_{2s}}{2} \cdot \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + \frac{\alpha_s}{2} A_s = \\ i\gamma_s(1-f_R)(|A_s|^2 + 2|A_p|^2)A_s + R_s(z,t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, A_p 是泵浦光的振幅, A_s 是信号光的振幅, v_{gp} 是泵浦光的群速度, v_{gs} 是信号光的群速度, β_{2p} 是泵浦光在光纤中的传播常数, β_{2s} 是信号光在光纤中的传播常数, α_p 是泵浦光在光纤中的衰减系数, α_s 是信号光在光纤中的衰减系数, γ_p 是泵浦光的非线性系数, γ_s 是信号光的非线性系数, f_R 反映拉曼效应对非线性极化的影响程度, $R_p(z,t)$ 反映泵浦光的受激拉曼效应, $R_s(z,t)$ 反映信号光的受激拉曼效应, z 是光纤轴向坐标, t 是时间。 $\frac{i\beta_{2p}}{2} \cdot \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2}$ 和 $\frac{i\beta_{2s}}{2} \cdot \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2}$ 反映了光信号的色散,在单波 100 Gbit/s 或以上的相干系统中可以通过 DSP 消减其影响。 $\frac{\alpha_p}{2} A_p$ 和 $\frac{\alpha_s}{2} A_s$ 反映了光信号的衰减,可以通过使用光放大器消减其影响,但光放大器的影响会通过 A_p 反映在非线性效应里。 $i\gamma_p(1-f_R)(|A_p|^2 + 2|A_s|^2)A_p$ 和 $i\gamma_s(1-f_R)(|A_s|^2 + 2|A_p|^2)A_s$ 反映了信号光和泵浦光的自相位调制和交叉相位调制这两种非线性效应,是目前限制传输距离的主要矛盾之一。

南方电网在工程实践中综合运用了 EDFA-BA、EDFA-PA、前向拉曼放大器、后向拉曼放大器、后向遥泵放大器,在距离 230 km、衰减 56 dB 的单跨光缆上开通了单波 100 Gbit/s 商用 OTN 系统,后向拉曼放大器接收的光信号的光功率为-18 dBm,光监控单元接收的光信号的信噪比为 23 dB(标称信噪比门限为 13 dB,预留 10 dB 的富裕度)。长距离传输中应用光放大器示意图如图 1 所示。

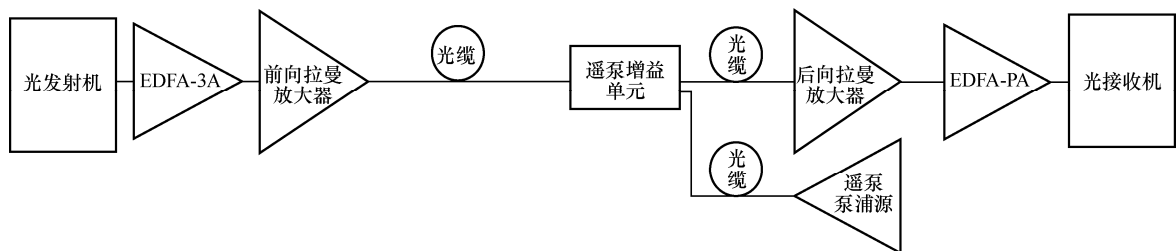


图 1 长距离传输中应用光放大器示意图



计算 EDFA-BA/EDFA-PA 对光信号影响的方法是：将进入 EDFA-BA/EDFA-PA 的光信号功率加上 EDFA-BA/EDFA-PA 相应的增益，就得到了离开 EDFA-BA/EDFA-PA 时的光信号功率；至于信噪比，则要根据 EDFA-BA/EDFA-PA 的噪声系数予以扣减。

计算拉曼放大器对光信号影响的方法比较复杂，因为拉曼放大器的工作原理是沿着光纤逐渐对光信号进行分布式放大，所以不能使用直接将放大器增益与光信号功率相加的方法进行计算。拉曼放大器对光信号的影响可用拉曼功率耦合方程进行描述：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s + g_R (P_p^+ + P_p^-) P_s + \\ 2h\nu_s \Delta\nu g_R (P_p^+ + P_p^-) \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_p - \nu_s)}{kT}} - 1} \right) \\ \frac{dP_p^+}{dz} = -\alpha_p P_p^+ - \frac{\nu_p}{\nu_s} g_R P_p^+ P_s - \\ 4h\nu_p \Delta\nu \frac{\nu_p}{\nu_s} g_R P_p^+ \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_p - \nu_s)}{kT}} - 1} \right) \\ \frac{dP_p^-}{dz} = -\alpha_p P_p^- - \frac{\nu_p}{\nu_s} g_R P_p^- P_s - \\ 4h\nu_p \Delta\nu \frac{\nu_p}{\nu_s} g_R P_p^- \left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h(\nu_p - \nu_s)}{kT}} - 1} \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

其中，s 代表信号，p 代表泵浦；+ 代表正向传输，- 代表反向传输；P 为光功率，z 为信号传输距离， α 为光纤损耗， g_R 为已考虑偏振影响（信号与泵浦之间的偏振态随机）与有效模式面积后修正的拉曼增益系数；h 为普朗克常量，k 为玻尔兹曼常量，T 为热力学温度； $\Delta\nu$ 为噪声带宽。代入各常量数值以及南方电网实际系统的光纤损耗、光功率等数据后，使用数值方法求解此微分方程组，可得到光信号沿着光纤远传的功率分布。至于信噪比，因为在整段光纤

中没有引入别的光放大器，故信噪比在整段光纤中没有变化，只需要在发送端和接收端考虑拉曼放大器本身的噪声系数将信噪比予以扣减。

而后计算遥泵放大器对光信号的影响。上述的南方电网实际系统使用了旁路遥泵放大器，遥泵增益单元位于距离接收端 75 km 的光缆接头盒位置的输电线路杆塔上，遥泵泵浦源以单独的（与信号光所在光纤不同的）纤芯连接至遥泵增益单元中，为其提供泵浦光。这种使用方式，相当于在距离接收端 75 km 的光缆接头盒之处的输电线路杆塔上部署了一个线路放大器，一方面进一步放大、提升接收光功率，另一方面也引入了 ASE 噪声、劣化了信噪比；但在相同的功率增益情况下，显然在光信号距离接收端 75 km 的位置以 EDFA 放大要比在光信号接收端以 EDFA 放大对信噪比要更好，因为在接收端时光信号更弱。计算旁路遥泵放大器对光信号功率的影响的方法很简单，在整段光纤中位于遥泵增益单元的位置，光功率有一个阶跃，阶跃的数值就等于 EDFA 的增益。至于信噪比，则也是要根据旁路遥泵放大器的噪声系数予以扣减。

综合考虑前向拉曼放大器、后向拉曼放大器、后向遥泵放大器的影响，计算得到光信号沿着光纤远传的功率分布。从实际系统中实测的接收光功率来看，计算得到的功率分布是可信的，使用前向+后向拉曼放大器+后向遥泵放大器时光信号功率分布如图 2 所示。

从图 2 可知，光信号在离开发送端 60 km 的距离内一直在被前向拉曼放大器放大，离开发送端 30 km 以内时，拉曼增益超过光纤损耗，光信号功率逐渐上升，至离开发送端 30 km 时达到最高；离开发送端超过 30 km 以后，拉曼增益开始低于光纤损耗，光信号功率逐渐下降。使用了后向遥泵放大器情况下，在距离接收端 75 km（即距离发送端 155 km 处）的遥泵增益单元处，光信号被放大，光信号功率有一个阶跃，而后继续被光纤损耗

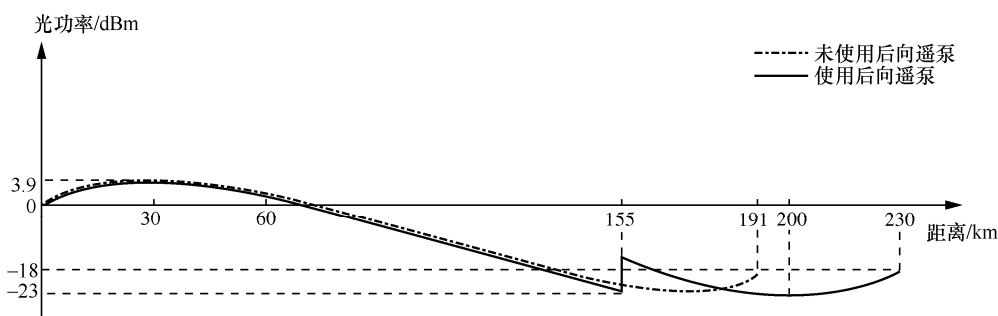


图2 使用前向+后向拉曼放大器+后向遥泵放大器时光信号功率分布

而逐渐降低，但光信号在距离接收端 60 km（即距离发送端 170 km 处）以内的距离被后向拉曼放大器放大；在距离接收端 30~60 km 时拉曼增益低于光纤损耗，因而光信号功率仍在下降，但下降的斜率逐渐减小，距离接收端 30 km（即距离发送端 200 km 处）以内时，拉曼增益超过光纤损耗，光信号功率又逐渐上升，直至到达接收端为止。

上述实际系统中较新的尝试是在商用的单波 100 Gbit/s OTN 系统中综合应用前向拉曼放大器、后向拉曼放大器以及后向遥泵放大器。作为对比，图 2 中还展示了不使用后向遥泵放大器情况下的光功率分布和极限传输距离。可见，在此实际系统中，使用后向遥泵放大器将极限传输距离扩展了 39 km，是有效的。

南方电网还有更长距离、衰耗更大的单跨光缆，但即便使用 EDFA-BA、EDFA-PA、前向拉曼放大器、后向拉曼放大器、后向遥泵放大器，也暂不具备在这些光缆上开通 OTN 系统的条件。这些长距离的光缆往往是跨省、跨地市联络的枢纽干线，不解决这个问题，OTN 专网的组网容量、可靠性将大受影响。针对长单跨光缆定制非线性抑制算法，有希望解决此问题，例如针对用于相位恢复的自适应均衡器改进其自适应算法，可以在一定程度改善非线性相位噪声的追踪能力，达到抑制交叉相位调制效应的效果。

2 雷电导致 OPGW 承载的偏振复用 OTN 系统闪断问题

我国电网公司的自有光缆中，光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW) 光缆占多数，因而国内电网公司建设的 OTN 专网广泛使用了电力 OPGW 光缆。OPGW 设置在输电线路最高处，起到引雷等作用，OPGW 光缆被金属绞线包裹在内，金属绞线则螺旋绞在光缆外圈。OPGW 的结构示意图如图 3 所示^[14-16]。

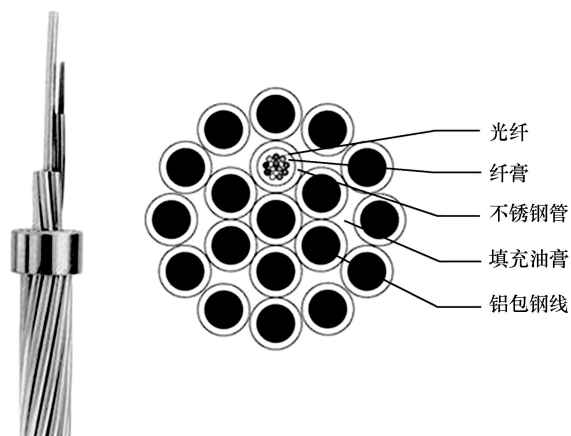


图3 OPGW 的结构示意图

当雷电击中 OPGW 附近时，OPGW 光缆外圈的金属绞线内会出现脉冲冲击雷电流，幅值为 $10^4 \sim 10^5$ A 数量级，持续时间为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ s 数量级，雷电流的变化率高达 $10^8 \sim 10^9$ A/s 数量级^[17-18]，根据麦克斯韦方程组，金属绞线内这样大的电流变化会产生平行于光纤轴向的强磁场。根据法拉第磁致旋光



效应,这一强磁场会导致光信号的 SOP 进行高速旋转^[19-22],法拉第磁致旋光效应示意图如图 4 所示。

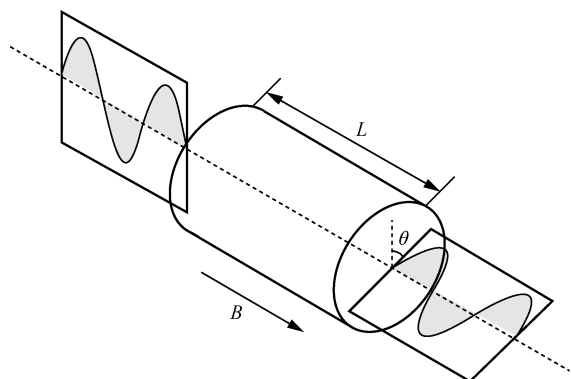


图 4 法拉第磁致旋光效应示意图

雷电导致 OPGW 中光信号 SOP 旋转速度的估算计算式为:

$$R_{\text{sop}} = \frac{VBL}{t} \quad (3)$$

雷电导致 OPGW 光纤中轴向的磁感应强度的估算计算式为:

$$B = \mu_0 nI \quad (4)$$

其中, V 为 Verdet 常数,取决于光纤本身的材料特性; B 为 OPGW 光纤中轴向的磁感应强度,可以用式 (4) 估算; L 为磁场作用长度; t 为磁场作用时长; μ_0 为真空磁导率; n 为 OPGW 金属绞线匝数; I 为 OPGW 中金属绞线中的雷电流。

将式 (3)、式 (4) 代入数据进行理论估算,雷电导致光信号 SOP 的偏转速度最高可达 $2 \times 10^7 \text{ rad/s}$ 。南方电网在实际自然环境下的真实输电线路上进行试验,利用投入运行的单波 100 Gbit/s OTN 专网,将来自真实输电线路 OPGW 光缆的 OTN 合波光信号分光后引入 SOP 测偏仪(该仪表可以实时测量当前的合波光信号的 SOP 偏转速度和相应的时间),风偏摇摆等因素导致光信号 SOP 偏转的速度不会超过 $1 \times 10^6 \text{ rad/s}$,没有其他已知因素会导致光信号 SOP 以超过 $1 \times 10^6 \text{ rad/s}$ 的速度偏转,故而将 SOP 测偏仪记录到的超过 $1 \times 10^6 \text{ rad/s}$ 的光信号 SOP 偏转归由雷电导致,试验记录显示,自然雷电导致光信号 SOP 的旋转速度最快可达 $2.93 \times 10^7 \text{ rad/s}$,符合理论估算

的范围。

对于未使用偏振复用的通信系统,例如单波 10 Gbit/s OTN 系统或 SDH 系统的光接收机只对接收光功率敏感, SOP 的高速旋转不影响光接收机的正常工作。但是对于使用偏振复用的通信系统,例如对单波 100 Gbit/s 或更高速率的 OTN 系统来说,雷电导致 SOP 的高速旋转超出光接收机跟踪 SOP 旋转的能力时,会使 OTN 系统出现持续时间为毫秒数量级的瞬断,直至此次雷电消失。虽然只有雷电流较大的情况才能导致(超出光接收机跟踪 SOP 旋转的能力的) SOP 旋转进而使 OTN 系统出现瞬断,且每一次雷电导致的瞬断时间仅为毫秒数量级,近似于一次正常的网络保护倒换造成的瞬断(50 ms 以内),但考虑雷电击中一条输电线路的频度每年可高达 10^2 数量级,一张 OTN 的光链路数量则一般为 $10^1 \sim 10^2$ 数量级,雷电导致 OTN 系统瞬断的影响仍然是不可忽略的。根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范(GB/T 50064-2014)》《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合(DL/T 620—1997)》,除西北地区之外的我国一般地区的雷电流及其概率可用式 (5) 估算:

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (5)$$

其中, P 为雷电流幅值概率, I 为雷电流幅值,单位为 kA。

根据式 (5), 计算得到雷电流幅值及其概率表见表 1。

表 1 雷电流幅值及其概率

雷电流范围/kA	概率
0~50	72.97%
50~100	19.72%
100~200	6.78%
200~300	0.49%
300~350	0.03%
>350	0.01%

南方电网在实验室环境下测试了商用 OTN 设备跟踪 SOP 旋转的能力。首先搭建一条完整的单波 100 Gbit/s OTN 系统,在其中一端下支路并挂误码表,在另一端环回。在合波后的光纤链路上串联 SOP 扰偏仪(该仪表可以将光信号的 SOP 进行周期性偏转,其最大偏转速度可以人工设置)。将 SOP 扰偏仪的偏转速度逐渐增大,直至误码表处于误码临界,此时的合波后的光信号的偏转速度即被测 OTN 设备跟踪 SOP 旋转的能力。2019 年,商用 OTN 设备跟踪 SOP 旋转的极限普遍在 3×10^6 rad/s 以下,到 2021 年,商用 OTN 设备跟踪 SOP 旋转的极限普遍提升至 8×10^6 rad/s,虽有大幅度的进步,但仍然低于完全免疫雷电影响的程度。相干 OTN 接收机中,采用了自适应滤波器以对抗光的色度色散、偏振模色散、偏振相关衰减,以及 SOP 旋转等线性效应的影响,自适应滤波器中采用了诸如最小均方差等算法来跟踪信号的变化,改善此类跟踪算法,有望进一步缓解此问题。

3 业务需求的发展趋势与 OTN 设备功能组合的匹配问题

近几年,OTN 专网增量业务需求的主要来源之一就是新建的数据中心。这类业务有以下两个特点:一是通道数量多,安全分区的要求使得每种业务被拆成多条通道(每个分区都有独立的通道),对支路端口的需求较大;二是通道带宽需求逐渐增长,起初相对较小,但随着时间推移会逐步变大。

通道带宽需求逐渐增长这一特点,会导致带宽利用率和通道扩容便利性之间存在矛盾。目前,电网公司建设的 OTN 普遍是传统 OTN,不含分组光传送网(packet optical transport network, POTN)功能^[23-24],开通吉比特以太网(giga bit ethernet, GE)通道就要捆绑一个完整的光通路数据单元(optical channel data unit, ODU),开

通 10 GE 通道就要捆绑一个完整的 ODU。即使业务流量达不到为通道捆绑分配的带宽,也要实际占用所有这些为通道捆绑分配的带宽。举例来说,假设某业务初期带宽需求是 3 Gbit/s,逐步增长到 10 Gbit/s,若初始提供 1 个 10 GE 通道,较长时间内利用率会不满 50%,挤占宝贵的线路带宽;若初始提供 3 个 GE 通道捆绑使用,虽然利用率更佳,但带宽需求增长时,相对不易进行通道扩容。

相比之下,POTN 的特性使得通道的带宽捆绑更灵活,例如 10 GE 通道可不必捆绑一个完整的 ODU,初始开通时捆绑相对小的容器,后期可较方便地调整为更大的容器,这样就缓解了带宽利用率和通道扩容便利性之间的矛盾。

为适应业务需求的上述特点,OTN 的规划建设有必要作相应的考虑:一是规划设计时多预留一些支路端口,二是建设时考虑配置 POTN 功能。OTN 的设计和制造也宜针对业务需求的上述特点考虑。

4 结束语

本文在理论计算、测试、实际应用等方面对解决 OTN 在电力通信中应用的问题做了一些工作,并对后续进一步研究改进的方向提供了一些意见供参考。在研究解决 OTN 的长距离传输问题方面,可考虑针对长单跨光缆定制非线性抑制算法。在研究解决雷电导致 OPGW 承载的偏振复用 OTN 系统闪断问题方面,可考虑改进相干接收机中自适应滤波器跟踪信号变化的算法。在研究解决业务需求的发展趋势与 OTN 设备功能组合的匹配问题方面,可考虑面向带宽调度灵活性研究在电力系统中应用 POTN 的功能规划和网络规划。我国电网公司期望通过发掘数据的价值成为价值链整合者,正在大力开展数据的采集、存储,对 OTN 专网的需求会日益增长。OTN 设备制造商若能面向电网公司的上述需求展开改进,可期电网公司、OTN 设备制造商达成双赢。



参考文献:

- [1] 王学睿, 周文生, 胡维华. 基于 SDH 的电力通信组网应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2003(4): 11-14.
WANG X R, ZHOU W S, HU W H. Application of private power communications network based on SDH[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2003(4): 11-14.
- [2] 章旺. 论电力通信系统中的常用光纤传输体系[J]. 电子技术, 2011, 38(1): 62-63.
ZHANG W. On common optical fiber transmission system used in power communication systems[J]. Electronic Technology, 2011, 38(1): 62-63.
- [3] 陈喆, 汪洋, 赵宏波, 等. 省级电力通信同步网优化方案研究[J]. 电力系统通信, 2011, 32(1): 42-46.
CHEN Z, WANG Y, ZHAO H B, et al. Optimized scheme for provincial power synchronization network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(1): 42-46.
- [4] 刘均乐. 数字光纤通信技术及其在电力通信中的应用[J]. 科技资讯, 2012, 10(8): 11, 14.
LIU J L. Digital optical fiber communication technology and its application in power communication [J]. Science & Technology Information, 2012, 10(8): 11, 14.
- [5] 温庆. 探讨 OTN 技术与电力通信的发展趋势[J]. 中国战略新兴产业, 2017(48): 63.
WEN Q. Discussion on the development trend of OTN technology and power communication[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017(48): 63.
- [6] 饶大均. OTN 技术在电力通信系统中的应用研究[J]. 中国新通信, 2020, 22(8): 25.
RAO D J. Research on application of OTN technology in power communication system[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(8): 25.
- [7] 陈李彬. OTN 技术在电力通信系统中的应用分析[J]. 技术与市场, 2021, 28(12): 127, 129.
CHEN L B. Analysis on application of OTN technology in power communication system[J]. Technology and Market, 2021, 28(12): 127, 129.
- [8] 石际. 关于应用 OTN 技术对电力通信网的网络优化[J]. 电力大数据, 2018, 21(6): 82-86.
SHI J. The application of OTN technology to the network optimization of power communication network[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(6): 82-86.
- [9] 赵阳, 金燊, 宋伟, 等. 基于 OTN 技术的电力通信传输网络优化研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(4): 132-134.
ZHAO Y, JIN S, SONG W, et al. Research on optimization of power communication transmission network based on OTN technology[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(4): 132-134.
- [10] 岳江生. OTN 技术在电力通信中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(11): 163-165.
- YUE J S. Application research of OTN technology in electric power communication[J]. Telecom Power Technologies, 2020, 37(11): 163-165.
- [11] 冯春盛. OTN 技术在电力通信传输网中的实践分析[J]. 中国新通信, 2019, 21(19): 13.
FENG C S. Practical analysis of OTN technology in power communication transmission network[J]. China New Telecommunications, 2019, 21(19): 13.
- [12] 石海丽. 浅谈 OTN 技术在电力通信网中的应用[J]. 数字通信世界, 2018(9): 192.
SHI H L. Application of OTN technology in power communication network[J]. Digital Communication World, 2018(9): 192.
- [13] HEADLEY C, AGRAWAL G P. Unified description of ultrafast stimulated Raman scattering in optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(10): 2170.
- [14] 张强, 黄俊华. 常规结构耐雷 OPGW[J]. 电力系统通信, 2006, 27(9): 10-13, 19.
ZHANG Q, HUANG J H. Conventional structure of lightning-endurance OPGW[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(9): 10-13, 19.
- [15] 许晓峰, 钱程, 郑隽杰, 等. 光纤复合架空地线光缆 OPGW 在电网工程建设中的应用[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 134-135.
XU X F, QIAN C, ZHENG J J, et al. Application of OPGW in power grid construction[J]. Electronic Technology, 2021, 50(3): 134-135.
- [16] 董军涛. 电力通信特种光缆技术应用研究[J]. 数字技术与应用, 2014(9): 31.
DONG J T. Research on application of special optical cable technology in power communication[J]. Digital Technology and Application, 2014(9): 31.
- [17] 崔弘, 夏成军, 张尧, 等. 光纤复合架空地线雷击电流数学模型的建立[J]. 广东电力, 2009, 22(3): 6-10, 14.
CUI H, XIA C J, ZHANG Y, et al. Establishment of mathematical models of lightning current on OPGW[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(3): 6-10, 14.
- [18] 沈平, 魏韬, 时磊, 等. 基于 OPGW 光传感输电线路雷击波形特点分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(3): 20-24, 36.
SHEN P, GUO T, SHI L, et al. Analysis of lightning stroke waveform characteristics of transmission line based on OPGW[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3): 20-24, 36.
- [19] 魏韬, 沈平, 杨渊, 等. 雷击条件下 OPGW 内光偏振态信号的形成和传播特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 2003-2009.
GUO T, SHEN P, YANG Y, et al. Formation and propagation characteristics of light polarization signal in OPGW under lightning condition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 2003-2009.
- [20] 曹春诚, 马超, 张哲民, 等. 基于 OPGW 的雷击点精确定位研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 111-116.

- CAO C C, MA C, ZHANG Z M, et al. Lightning-strike-point location of transmission line based on OPGW[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 111-116.
- [21] 李生福, 曾宪武. OPGW 光偏振态在输电线路雷击监测中的应用[J]. 农村电气化, 2019(7): 26-28.
- LI S F, ZENG X W. Applications of OPGW optic polarization used for lightning stroke monitoring in transmission lines[J]. Rural Electrification, 2019(7): 26-28.
- [22] 邓惠华, 张瑞琪, 陈俊武, 等. 基于 OPGW 光偏振态的雷击定位原理与方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 148-153.
- DENG H H, ZHANG R Q, CHEN J W, et al. Research on principles and methods of lightning strike location based on OPGW light polarization state[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1): 148-153.
- [23] 程明, 周洲, 朱俊, 等. 分组增强型 OTN 设备实现及组网研究[J]. 电信科学, 2014, 30(11): 159-165.
- CHENG M, ZHOU Z, ZHU J, et al. Research on packet enhanced OTN equipment and networking[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(11): 159-165.
- [24] 唐雄燕, 王海军, 杨宏博. 面向专线业务的光传送网(OTN)关键技术及应用[J]. 电信科学, 2020, 36(7): 18-25.
- TANG X Y, WANG H J, YANG H B. Key technologies and application of optical transport network for leased line services[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(7): 18-25.

[作者简介]



陈新南 (1963-), 男, 中国南方电网电力调度控制中心高级工程师, 主要从事光传输网承载电网生产实时控制业务的安全可靠模式等方面的工作。



连伟华 (1985-), 男, 中国南方电网电力调度控制中心高级工程师, 主要从事与光传输通信网承载电网业务相关的技术方面的工作。



马一宁 (1991-), 女, 南方电网能源发展研究院有限公司工程师, 主要从事信息化管理和大数据等方面的工作。

《电信科学》第六届编辑委员会

顾 问:

邬贺铨

邬江兴

刘韵洁

何 友

余少华

张 平

韦乐平

蒋林涛

主 任 委 员:

陈山枝

副主任委员:

滕 伟

刘华鲁

彭木根

赵慧玲

高 鹏

孙智立

王重钢

编 委: (按姓氏笔画排序)

马 炬

王卫红

王 桐

王继业

方景龙

艾 渤

卢光跃

曲 桦

刘 瑜

刘永祥

刘建明

江 涛

安建平

孙晓颖

孙爱晶

孙鹏飞

孙韶辉

阳小龙

纪越峰

李 赞

李长海

李玉峰

苏 洲

杨婷婷

吴 巍

吴大鹏

冷甦鹏

汪春霆

沈连丰

宋令阳

张云勇

张成良

张同须

张建军

陈芳炯

陈章渊

易东山

金 石

金耀初

周 亮

周一青

周华春

孟维晓

赵 楠

赵军辉

胡卫生

胡宇翔

段向阳

段晓东

敖 立

徐文渊

唐雄燕

黄永明

曹卫平

曹先彬

崔 勇

章坚武

梁宏斌

梁海滨

董振江

蒋 力

程 方

谢高岗

窦 笠

蔡 康

戴凌龙