

雷击 OPGW 光缆对电力 100G OTN 系统影响分析

Analysis of Impact of Lightning Striking on OPGW to Electric Power 100G OTN System

解文明,李永嫚,张 艳(中通服咨询设计研究院有限公司,江苏 南京 210019)

Xie Wenming, Li Yongman, Zhang Yan (China Information Consulting & Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

摘要:

简要介绍了目前在电力骨干光通信网络中广泛应用的 OPGW 光缆的优缺点。电力通信 OPGW 光缆在雷雨天气较多的地区使用时,雷击 OPGW 导致光纤内所传输的光信号 SOP 剧烈波动,造成 100G OTN 设备误码。重点研究雷击 OPGW 对 100G OTN 系统的影响、雷击与 SOP 波动的关系、SOP 波动对 100G OTN 系统及承载业务影响、主流厂家 100G 设备抗 SOP 性能对比及改进思路,并提出了电力 100G OTN 系统的设计建议。

关键词:

光纤复合架空地线;偏振态;100G 光传送网;光信噪比

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2023.01.012

文章编号:1007-3043(2023)01-0059-05

中图分类号:TN913.7

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It briefly introduces the advantages and disadvantages of OPGW which is widely used in electric power backbone network. When the OPGW cable is used in area with heavy thunderstorm weather, the lightning striking on OPGW will cause the SOP of optical signal fluctuating violently, thus leading to the bit error of 100G OTN device. It focuses on the impact of lightning striking on OPGW to 100G OTN system, the relationship between lightning striking and SOP fluctuation, the impact of SOP fluctuation to 100G OTN system and bearer services, the anti-SOP performance comparison and improvement of main equipment maker, and the design suggestions of 100G OTN system for electric power are presented.

Keywords:

OPGW; SOP; 100G OTN; OSNR

引用格式:解文明,李永嫚,张艳. 雷击 OPGW 光缆对电力 100G OTN 系统影响分析[J]. 邮电设计技术, 2023(1): 59-63.

0 引言

近年来,100G OTN^[1]得到了大规模商用,电力行业也逐渐开始部署 100G OTN 骨干网络。但在雷雨季节,电力 100G OTN^[2-5]骨干网络部分链路多次随机闪报 OTN_LOF 告警,每次告警产生后立即消除,持续时间为 1~2 s,在为期几个月的雷雨季节里告警次数累积可以达到几十次。经分析,发现导致此异常的原因是雷击导致 OPGW (Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire) 中的光信号的偏振态(State Of Polariza-

tion, SOP) 波动,进而导致 100G OTN 设备误码。本文重点研究雷击 OPGW 对 100G OTN 系统的影响。

1 电力通信 OPGW 光缆介绍及其面临的挑战

1.1 电力通信 OPGW 光缆介绍

OPGW^[6]光缆也称光纤复合架空地线,具有地线与通信双重功能,已经在电力骨干光通信网络中广泛应用。OPGW 优点是适合在新建线路上架设,强度高、运行相对安全可靠,缺点是在雷雨天气较多的地区,因雷击造成 OPGW 光缆断股损坏的情况时有发生^[7]。

1.2 OPGW 光缆应用面临的主要挑战

打雷时,云层放电击中 OPGW 附近区域,OPGW

收稿日期:2022-11-03

导体内会产生高强度的瞬时雷电流。雷电流分为沿着 OPGW 的螺旋结构流过的螺旋分量和从 OPGW 表面直接流过的直通分量 2 部分。雷电流沿螺旋方向流过 OPGW 时将在 OPGW 光缆内部产生平行于 OPGW 轴线的磁场,在法拉第磁光效应的作用下光纤内所传输的光信号的 SOP^[8] 剧烈波动,波动速度超出系统容限后,接收端无法准确恢复信号偏振态,导致信号误码率增加甚至信号丢失。

2 SOP 及引起 SOP 偏转因素分析

2.1 光信号 SOP 概念

在垂直于光传输方向上,可以将光分解为 2 个相互独立的振动方向(偏振),偏振态(State of Polarization, SOP)则由 2 个偏振之间的振幅比值、相位差决定。理论上,可以用 3×1 矩阵(Stokes 矩阵)直观地表示光域上的 SOP 状态。假设分别以 S_1 、 S_2 、 S_3 为 3 维坐标系的 3 个坐标轴,则光场的每个 SOP 状态均可对应在一个球面的某个点上。光信号 SOP 的变化可以用光信号的 Stokes 矢量在邦加球上的运动表示。光信号 Stokes 矢量在邦加球上运动示意如图 1 所示。

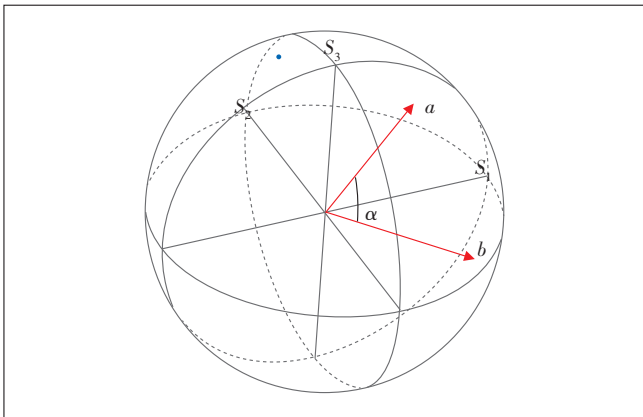


图 1 光信号 Stokes 矢量在邦加球上运动示意图

$$S_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2$$

$$S_2 = 2\text{Re}[E_x E_y^*]$$

$$S_3 = 2\text{Im}[E_x E_y^*]$$

光信号 t_1 时刻的偏振态为 a , 在邦加球上表示为点 a ; 光信号 t_2 时刻的偏振态为 b , 在邦加球上表示为点 b ; 偏振态 a 和 b 之间的角度表示为 α , 单位为 rad; 偏振态的变化速度为 $\alpha / (t_2 - t_1)$, 单位为 rad/s。

2.2 引起 SOP 偏转因素分析

引起 SOP 变化的因素较多,主要分为线性效应和

非线性效应 2 类。线性效应包括温度改变、振动、应力(挤压、形变)等机械扰动和强放电(雷击、闪电)等法拉第效应。非线性效应包括入纤光功率、光纤类型、波长数目、波长间距等造成的交叉偏振调制。

研究发现:直埋光缆环境稳定,SOP 变化速度一般在几十 krad/s 以下,因此使用直埋光缆一般不需要考虑 SOP 变化的影响。受风、温度和雷电等外界环境影响,架空、沿铁路铺设及电力 OPGW 光缆的 SOP 变化速度可从几百 krad/s 到几 Mrad/s,其中雷电对 OPGW 光缆的 SOP 影响最大,需特别关注其 SOP 变化带来的影响。

3 雷击与 SOP 波动关系分析

3.1 雷击强度及概率分析

根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620-1997)和《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),我国一般地区雷电流幅值及其概率的计算方法如下:

$$\lg P = -I/88$$

其中, P 为雷电流幅值概率, I 为雷电流幅值(kA)。

根据此标准,得出雷电流幅值及超过对应雷电流幅值的概率,如表 1 所示。

表 1 雷电流幅值及超过对应雷电流幅值的概率

雷电流/kA	超过此雷电流的概率/%
>50	27.03
>100	7.31
>200	0.53
>300	0.04
>350	0.01

由此可以得出雷电流发生的概率,如表 2 所示。

表 2 雷电流发生概率表

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

如果考虑雷击导致误码影响业务的概率,还要另外计算雷击发生的概率以及雷击直击 OPGW 的条件概率。

3.2 雷击电流对 SOP 变化影响

通常自然界雷电流有 2 种放电形式:脉冲冲击电流和长时间连续电流,其特点如表 3 所示。

表 3 脉冲冲击电流和长时间连续电流对比表

电流类型	特点	电流值	持续时间	SOP 影响
脉冲冲击电流	雷电流幅值高	$10^4 \sim 10^5$ A 数量级	持续时间短, $10^{-5} \sim 10^{-4}$ s	导致 SOP 剧烈瞬变
长时间连续电流	多数为直流电流,雷电流幅值低	几百 A	持续时间长, 0.5 s	基本不影响 SOP

根据《架空输电线路防雷技术导则》(Q-CSG 11077002-2018),雷电流波形用 2.6/50 μ s 的 Heidler 模型描述,即波头持续时间为 2.6 μ s,波尾持续时间为 50 μ s。

雷击导致 OPGW^[9-10]光信号 SOP 偏转的全过程包括以下 2 个阶段。

a) 波头阶段:持续时间为微秒级,在几微秒到几百微秒时间内,SOP 偏转角速度迅速上升到本次波动的最大值。

b) 波尾阶段:持续时间为毫秒级,在几毫秒到几百毫秒时间内,SOP 偏转角速度振荡衰减到无雷击时的较低水平。

基于保守估计原则,将雷击电流直接视为 OPGW 中电流,计算出 SOP 强度与雷击电流关系如表 4 所示。

4 SOP 波动对 100G OTN 系统及其业务影响

4.1 SOP 波动对 100G OTN 系统影响

100G 系统采用相干 PM-QPSK 技术,发送端通过偏振分束器将光信号分成 x 、 y 2 个垂直的偏振方向,分别对 x 、 y 偏振方向上的光信号进行 QPSK 调制,偏振合波器将 x 、 y 2 个偏振方向上已经调制好的信号合路成

表 4 SOP 强度与雷击电流关系表

雷电流大小/kA	雷电流大于该值的概率/%	SOP 变化率/(Mrad/s)
3.2	91.97	0.19
50	27.03	3.03
60	20.81	3.64
90	9.49	5.46
125	3.80	7.58
150	1.97	9.10
200	0.53	12.13
250	0.14	15.16
300	0.04	18.19
350	0.01	21.23

一路信号。接收端将接收信号分离到 x 、 y 2 个偏振方向上,通过相干接收将 x 、 y 偏振方向上的光信号转变为电信号,然后采用高精度 DAC 将电信号变成 0101... 数字码流,最后通过 DSP 高速数字处理去除色散、噪声、非线性等干扰因素,还原从发端发出的 100G 信号。

100G 光传输系统采用了数字相干接收技术,通过相位分集、偏振态分集技术将光信号的属性映射到电域,利用成熟的 DSP 技术在电域实现偏振解复用、信道损伤均衡补偿、时序恢复、载波相位估计、符号估计和线性解码。

对于普通直理的光缆而言,100G 数字相干接收机在设计的时候充分考虑了光传输链路噪声和干扰特性,系统具有足够的 CD 和 PMD 容限,无需考虑线路传输上的 CD 和 PMD 的影响。对于采用了偏振态复用的 100G 及以上速率的 OTN 光传输系统,相干接收机需要实时跟踪光信号的 SOP 状态,才能够有效地进行偏振态解复用、PMD 补偿以及信号恢复和数据提取操作。当光信号 SOP 变化速度超出 100G 相干接收机的容忍能力时,OTN 系统可能会出现瞬时闪断或误码,影响信息数据的安全可靠传输。相干码型对 SOP 变化的处理流程如图 2 所示。

相干码型通过 MIMO 算法跟踪 SOP 的变化,如果 SOP 的变化超过 DSP 的跟踪能力,则会出现纠后误码。具体实现原理如图 3 所示。

4.2 SOP 波动对承载业务的影响

根据业务功能、特点将电力通信业务划分为电网运行业务(运行控制业务、运行信息业务)和企业管理

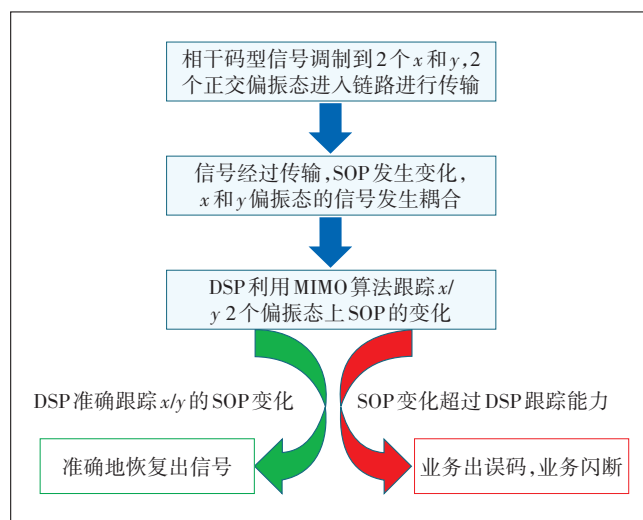


图 2 相干码型对 SOP 变化的处理流程图

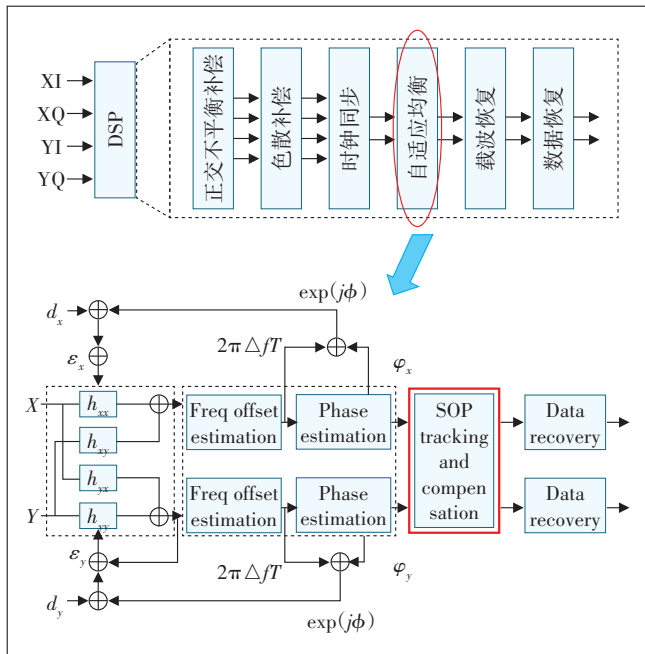


图3 相干码型跟踪 SOP 变化原理图

业务(视频会议、办公电话、办公自动化和远程培训等)。运行控制类业务要求通信误码率 $\leq 10^{-8}$,运行信息类业务要求通信误码率 $< 10^{-6}$,管理类业务要求通信误码率 $\leq 10^{-3}$ 。

目前,电力 100G OTN 只承载视频会议等企业管理类业务,暂未承载传统电力通信控制类业务。在发生雷击时对视频会议业务进行测试,视频会议业务出现瞬间卡顿/丢帧现象,测试最大误码率折算为 10^{-5} 数量级,暂时无法满足电力运行业务承载要求。

5 主流 100G 设备抗 SOP 性能及改进思路

5.1 100G OTN 设备 SOP 容限

给定 100G OTN 设备及相应板卡,其 SOP 容限并非是一个固定值。为 OTU 光接口预留的 OSNR 富余度越大,SOP 容限越高,反之亦然。

在二维坐标系上,SOP 容限和 OSNR 富余度的关系可用一条单调递增曲线描述。从横向比较,抵御

SOP 偏转能力越强的设备,这条曲线就越远离 y 轴、越平缓(即消耗较少 OSNR 富余度就能抵御很高速的 SOP 偏转);抵御 SOP 偏转能力越弱的设备,这条曲线就越靠近 y 轴,越陡峭(即消耗较多 OSNR 富余度也只能抵御较低速的 SOP 偏转)。

5.2 主要设备厂商抗 SOP 性能指标分析

为了解主流设备厂家抗 SOP 性能指标,需统一对抗 SOP 性能指标的理解,特定义以下指标。

抗 SOP 接收机 OSNR 容限(EOL)定义为在给定的 SOP 强度下测试得到的背靠背 OSNR 容限,本容限含 SOP 引入的 OSNR 代价值。其中:

OSNR 代价(SOP)=给定的 SOP 强度下测得的背靠背 OSNR 容限值-SOP 为 0 Mrad/s 时测得的背靠背 OSNR 容限值。

OSNR 代价(系统传输通道代价)=给定 SOP 强度时测得的过系统 OSNR 容限值-给定 SOP 强度时测得的背靠背 OSNR 容限值。

根据调研,在给定 8、9 Mrad/s SOP 强度时,各厂家 OSNR 容限(EOL)值、OSNR 代价(SOP)及接收 OSNR 最小值如表 5 所示。

5.3 SOP 容限改进思路及手段

SOP 容限改进主要是通过软硬件优化的手段提高 DSP 处理能力。

改进手段 1:调节 DSP 芯片的时域均衡(TDEQ)环路的跟踪能力(更大步长,和/或更快速度),实现对 SOP 的更快速跟踪,其缺点是会损失小部分 Bit OSNR 容限。

改进手段 2:在发端增加训练序列,实现 SOP 的瞬时值计算。

改进手段 3:采用动态预扭曲和整形技术,实现快速 SOP 跟踪。

由于 DSP 模块集成在 100G 线路盘上,不涉及设备平台,需要厂商推出容限更高的线路盘。

要提高设备忍耐 SOP 的能力,相应的代价如下。

表 5 给定 SOP 强度下不同厂家设备的 OSNR 性能指标

SOP 强度/(Mrad/s)	OSNR 容限(EOL)值/dB	OSNR 代价/dB	系统传输通道 OSNR 代价值/dB	接收 OSNR 最小值/dB	厂家
8	17.0	5.5	3.9	20.9	厂家 A
8	18.5	8.5	2.0	23.0	厂家 B
8	13.5	3.5	2.0	18.0	厂家 C
9	19.5	8.0	3.9	23.4	厂家 A
9	27.0	17.0	2.0	31.5	厂家 B
9	14.5	4.5	2.0	19.0	厂家 C

a) 轻微的OSNR容限损失(不超过0.5 dB)。

b) 雷击导致SOP高速偏转持续的ms级时间段内,会消耗OSNR富余度。举例来说,设计规范要求预留至少4.5~6 dB的OSNR富余度(实际执行时预留更多),雷击较弱时,预留的OSNR富余度足以消除误码;雷击较强时,预留的OSNR富余度不足以消除误码。

6 电力100G OTN系统设计建议

6.1 SOP强度取值建议

根据各厂家抗SOP指标分析,目前各厂家的抗SOP能力在8~11 Mrad/s的水平,在当前技术水平下,100G OTN设备无法完全避免雷击引起的超过该强度的SOP问题。

系统抗SOP能力越强,需要牺牲的OSNR代价越大,接收OSNR最小值就越大,单跨段最大传输距离就越短。当SOP变化速率超过一定程度后,系统无法通过预留足够的OSNR来抵御SOP变化。给定OSNR代价(SOP)值为10 dB时,可以抵抗的SOP强度最大为8 Mrad/s。

根据参考文献[11],现网SOP的最大值为5.1 Mrad/s。我国东南沿海是雷暴区,电力100G OTN系统建设时SOP强度建议按照8 Mrad/s考虑,即当雷击引起的SOP强度低于系统设定的SOP强度值8 Mrad/s时,系统不会产生误码或闪断。

6.2 OSNR裕量取值建议

受雷击影响,电力100G OTN系统需要抵抗的SOP大小没有设定依据,100G OTN系统OSNR指标没有规范依据,3%概率强雷击对生产性业务或者高质量要求业务的影响暂时无法验证。

根据《N×100G超长距离光波分复用(WDM)系统技术要求》(YD/T 3070-2016),OSNR裕量取4.5~6 dB。

在此基础上,电力100G OTN系统建设需考虑到雷击情况的影响,现有厂商已经验证,当系统OSNR富余度在8.5 dB左右时可抵御8 Mrad/s左右的SOP变化速率,对应每次雷击最严重情况下误码的概率为3.16%。另考虑到改进SOP后的板会存在轻微的OSNR容限损失,100G OTN系统的OSNR裕量建议按照大于8.5 dB进行预留。

7 结束语

100G OTN光传输系统采用偏振态复用技术,只有相干接收机实时跟踪光信号的SOP状态才能够有效地

进行偏振态解复用、PMD补偿以及信号恢复和数据提取操作。雷击OPGW光缆导致单波100G OTN光信号SOP瞬时高速变化,当光信号SOP变化速度超出100G相干接收机的容忍能力时,100G系统可能会出现瞬时闪断或误码,影响信息数据的安全可靠传输。

目前设备厂家已通过软硬件优化方式改进100G OTN设备SOP容限,可以有效地降低雷击OPGW对其影响。主要设备厂家抗SOP能力在8~11 Mrad/s的水平,当3%的雷击超过系统设定的SOP强度值时,系统会产生误码或闪断,影响100G系统承载生产性业务或其他高质量要求的业务。

电力100G OTN系统建设前建议对现网OPGW光缆进行SOP强度监测,统计获取SOP强度值,为100G系统建设提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 汤瑞,李允博,赵文玉,等. 100G传输技术及应用探讨[J]. 邮电设计技术,2013(5):35-37.
- [2] 马鑫. 大容量100G OTN关键技术及其在电力通信中的应用分析[J]. 通讯世界,2019,26(11):108-109.
- [3] 李玉芬,何志勇,刘天英. OTN技术在电力通信中的应用[J]. 数字通信世界,2016(1):30-33.
- [4] 孙雨潇,田照宇,杨帆,等. 国网典型100G OTN系统研究与应用[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(5):38-44.
- [5] 钱思源. OTN技术在电力通信网中的应用研究[J]. 信息通信,2018(12):221-222.
- [6] 刘凯. 关于OPGW光缆在输电线路中的应用探究[J]. 通讯世界,2018(11):58-59.
- [7] 朱亦振. OPGW光缆通信在输电线路在线监测信息传输上的应用初探[J]. 浙江电力,2011,30(7):10-12.
- [8] 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.
- [9] 李凌,闫娟,张华芳子. 电力系统OPGW光缆防雷接地技术的探讨[J]. 通讯世界,2017(19):134-135.
- [10] 王建宾,严红梅,樊欣欣. 浅析通信架空OPGW光缆防雷接地技术[J]. 电子世界,2019(19):208.
- [11] CHARLTON D, CLARKE S, DOUCET D, et al. Field measurements of SOP transients in OPGW, with time and location correlation to lightning strike[J]. Optics Express, 2017, 25(9):9689-9696.

作者简介:

解文明,毕业于东南大学,高级工程师,硕士,主要研究方向为光通信与网络技术;李永嫚,毕业于北京邮电大学,正高级工程师,学士,主要研究方向为光通信与网络技术;张艳,毕业于南京大学,研究员级高级工程师,硕士,主要研究方向为光通信与网络技术。