

基于BOTDR技术的OPGW线廊环境灾变监测应用

李军¹, 李岩^{2*}

1. 中移铁通有限公司, 北京 100038

2. 国网辽宁省电力有限公司超高压分公司, 沈阳 110003

摘要 极端天气下光纤复合架空地线(OPGW)电缆状态的在线监测对电力通信系统的安全运行和预警具有重要意义。综述了布里渊光时域反射(BOTDR)技术监测线缆温度和应变的基本原理, 分析了其应用到电力灾变检测中的可行性, 结合具体应用场景以及在现场运行的BOTDR系统对实际OPGW线缆的监测情况, 通过理论和实际案例验证了利用BOTDR技术的测试装置对OPGW线路及周边环境实时监测的方法的可行性, 能够有效满足电路线廊环境灾变监测的需求。

关键词 光纤传感; 布里渊光时域反射; 应变; 实时监测; 光纤复合架空地线

电力高电压架空线路是输电网络的重要组成部分, 电线路廊由于受布设因素影响, 经过的线廊区域地形地况复杂多变, 如高海拔、多风、冰冻区, 这些微环境造成电力架空线路在多种恶劣环境下各类线路环境灾害频发, 如覆冰、山火、雷击、瞬间大风等。同时, 电力架空线需要长期运行, 除线路老化、断线等常见故障缺陷外, 还会与环境问题耦合引起导线舞动、杆塔倾斜甚至倒塌等严重事故, 严重威胁电力输电系统的安全稳定运行。架空线路所经过的区域地形复杂, 且跨度长达数百千米,

依靠传统的人工或者直升机巡检监测成本越来越高, 存在监测周期长、工作效率低等问题, 而且监测结果易受人为因素影响^[1-4]。

对于光纤复合架空地线(optical fiber composite overhead ground wire, OPGW)电缆的监测, 目前常用的方法主要包括通过在电缆上安装电子传感器进行监控^[5-6]和人工监测电缆上视频的方法^[7-10]。第一种方法需要在塔架上安装各种传感器, 例如测量张力和角度的机械传感器以及测量温度、湿度和风速的微型气象传感器。若两座塔之间的距离太

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-07-31

作者简介: 李军, 高级工程师, 研究方向为通信测试, 电子信箱: lijun@cmtt.chinamobile.com; 李岩(通信作者), 高级工程师, 研究方向为信息通信, 电子信箱: 9297624@qq.com

引用格式: 李军, 李岩. 基于BOTDR技术的OPGW线廊环境灾变监测应用[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 104-112; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.15.010

长,或者覆冰线路上的冰量不均匀,会使计算结果不准确,导致导线等效冰厚预测错误。第二种方法是沿着线路,将多个摄像头安装在塔上,捕捉到的实时图像被发送到监控中心。但显示器需要太阳能供电,在连续阴雨天情况下将无法工作,而且在大雪条件下,图像可能会变得模糊,难以清楚区分冰的厚度。这2种方法整体上获得了良好的监测效果,促进了输电线路监测的进展,但是它们都容易受到周围环境和构件本身精度的影响,使得监测结果存在一定的误差。

布里渊光时域反射(Brillouin optical time domain reflectometry, BOTDR)技术现阶段已可获得较远探测距离,通常超过30 km,一台设备可以探测整条线路,并已实现光纤上的米级测量。同时,它与当前的通信电缆兼容,不需要额外的光纤。因此,BOTDR技术非常适用于OPGW电缆的监测。

利用BOTDR技术的实时监测装置进行环境监测可以很好地解决当前电力线廊环境灾变监测中存在的问题。BOTDR技术利用线路中的一条冗余光纤作为传感介质,无需在线路中铺设其他传感装置,由机房单端进行部署,即可同时测量温度和应变参数,实现对火灾、覆冰、舞动、雷击、外破等电力线路常见灾害进行专项监测。利用BOTDR技术系统测量具有精度高、在线预警准确、监测范围广、可自动定位故障等优势,并且能够实现全线路、长距离、无盲区的监测,系统可以每天24 h扫描线路,实现长期不间断监控^[11-13]。基于分布式光纤传感的BOTDR技术,具有精度高、监测距离长、外部温度环境可控、单端测量、结构简单等优点,在电力系统测量和实时监测中具有广阔的应用前景。

1 BOTDR 技术原理

光纤中使用最广泛的介质材料是二氧化硅,当较强的光在光纤中传输时,由于介质的非线性极化而产生散射等非线性效应,如拉曼散射、瑞利散射以及布里渊散射等。布里渊散射可分为受激布里渊散射和自发布里渊散射(图1),BOTDR技术是单端法的自发布里渊散射技术,通过BOTDR实现光

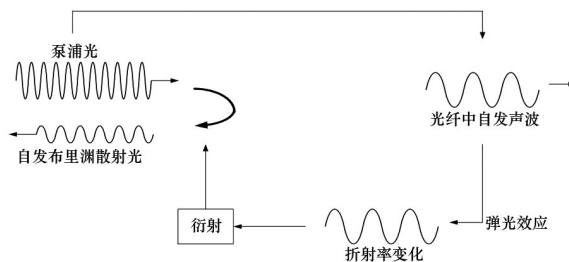


图1 自发布里渊散射的产生过程

纤分布式感知。

分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)发出的光信号在单模光纤中传送时产生的布里渊散射,只存在后向布里渊散射光,其布里渊频移与光纤折射率、声波速度、入射波波长相关。当被测光纤的物理参数如温度或应力发生变化,光纤材料物理特性也会发生相应变化,导致声速改变,从而布里渊频移发生相应变化,布里渊频移 ν_B 可表示为

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda} \quad (1)$$

式中, n 为折射率, V_A 为声速, λ 为DFB光波长。

对于单模光纤,常温下,当DFB波长在1550 nm附近时,布里渊频移约为11.2 GHz。

BOTDR与传统的光时域反射仪(optical time-domain reflectometer, OTDR)系统的基本构成类似,都是采用一维闭路雷达原理。不同的是脉冲光在光纤中传输时产生的后向散射光,BOTDR是布里渊散射光,OTDR是瑞利散射光。通过测量入射光和散射光的时间差,再与介质光速进行计算,即可实现散射点的距离测试。光纤应力和温度发生改变引起声波速度变化,进而反映为布里渊频移的变化,对布里渊散射信号的频移和强度进行测量,加上时间差定位,即可实现逐点的分布式温度和应变的测量。

1.1 基于BOTDR技术的温度和应变传感机理

BOTDR技术是获取分布式的布里渊散射频谱沿时间和空间的分布和变化实现温度和应变的分布式传感。传感光纤中的应变和环境温度发生改变时,可以检测到布里渊散射谱的频率和功率同时产生相应变化。布里渊散射谱功率测量更依赖装

置的探测灵敏度和稳定性,在实际应用中,一般多采用通过测量布里渊频移来解调温度和应变信息。因此光纤布里渊频移存在与温度和应变对应的数学关系^[14]。

声速表达为

$$V_A = \sqrt{\frac{(1-k)Y}{(1+k)(1-2k)\rho}} \quad (2)$$

式中, ρ 为光纤密度, Y 为杨氏模量, k 为泊松比。

当传感光纤的应变或温度改变,折射率 n 会发生变化,同时 ρ 、 Y 、 k 也会受到影响,光纤声速产生相应变化。因此布里渊频移可以表示为温度和应变相关的函数

$$\nu_B(\varepsilon, T) = \frac{2n(\varepsilon, T)}{\lambda} \sqrt{\frac{[1-k(\varepsilon, T)]Y(\varepsilon, T)}{[1+k(\varepsilon, T)][1-2k(\varepsilon, T)]\rho(\varepsilon, T)}} \quad (3)$$

当光纤温度为初始温度 T_0 时,在应变梯度小的情况下,可将式(3)在 $\varepsilon=0$ 处进行泰勒展开并忽略高阶项:

$$\begin{aligned} \nu_B(\varepsilon, T_0) &\approx \nu_B(0, T_0) + \Delta\varepsilon \cdot \frac{\partial \nu_B(\varepsilon, T_0)}{\partial \varepsilon} \\ &= \nu_B(0, T_0) + \Delta\varepsilon \cdot (\Delta n_\varepsilon + \Delta k_\varepsilon + \Delta Y_\varepsilon + \Delta \rho_\varepsilon) \\ &= \nu_B(0, T_0) + C_\varepsilon \Delta\varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\Delta\varepsilon$ 为应变变量, C_ε 为布里渊频移的应变线性系数。可见,布里渊频移随应变而发生线性变化。

当光纤在无应变状态($\varepsilon=0$)时,在温度梯度小的情况下,可将式(3)在 $T=T_0$ 处进行泰勒展开并忽略高阶项:

$$\begin{aligned} \nu_B(0, T) &\approx \nu_B(0, T_0) + \Delta T \cdot \frac{\partial \nu_B(0, T)}{\partial T} \\ &= \nu_B(0, T_0) + \Delta T \cdot (\Delta n_T + \Delta k_T + \Delta Y_T + \Delta \rho_T) \\ &= \nu_B(0, T_0) + C_T \Delta T \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ΔT 为温度变量, C_T 为布里渊频移的温度线性系数。可见,布里渊频移随温度改变而发生线性变化。

综合温度和应变的变化影响,光纤中的布里渊

频移 ν_B 可表示为

$$\nu_B(\varepsilon, T_0) = \nu_B(\varepsilon_0, T_0) + C_\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon_0) + C_T(T - T_0) \quad (6)$$

式中, T 和 ε 分别为改变后的温度和应变值, $\nu_B(\varepsilon, T_0)$ 为光纤中的初始布里渊频移, T_0 和 ε_0 分别为初始温度和初始应变值。

在普通单模光纤中,当入射光波长为1550 nm时, C_T 和 C_ε 的值约为1 MHz/°C和0.05 MHz/ $\mu\varepsilon$,即表示温度每上升1°C,布里渊频移增加约1 MHz,当应变增加1 $\mu\varepsilon$ 时,布里渊频移增加约0.05 MHz。

在BOTDR技术中,温度和应变的检测是通过检测传感光纤中的布里渊频移实现,产生温度和应变的位置信息 L 可通过脉冲飞行时间法获得,即

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (7)$$

式中, t 为探测脉冲从入射到被接收的时间差, c 为真空光速, n 为折射率。

1.2 BOTDR测试系统的基本原理

典型的BOTDR装置原理如图2所示。

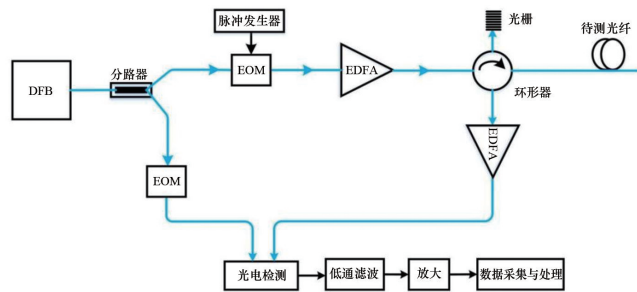


图2 BOTDR装置原理

BOTDR使用1550 nm中心波长的DFB激光器,通过光分路器将连续波信号分为信号通道和参考光。信号光经过电光调制器(EOM)被调制为脉冲光,脉宽可调整。通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,由光栅滤除放大自发辐射(ASE)的自发辐射噪声,再经环形器注入待测光纤。后向布里渊散射信号返回经环形器耦合再由EDFA放大,参考光与后向散射布里渊散射信号进入光电检测中进行相干检测,如式(8)所示。相干检测的频率信号进入数据外差接收机采集与处理模块进行信号的采集

与处理。

$$i = BE_{s0}E_{r0} \sin[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s)] \quad (8)$$

式中, φ_s 和 φ_r 分别表示信号光和参考光的初始相位, E_{s0} 和 E_{r0} 分别表示信号光和参考光强度, f_s 和 f_r 分别为信号光和参考光的频率, B 是光电转换系数。

当光纤上的某个位置发生温度变化或应变, 其布里渊散射光会发生频移, 利用参考光与光纤后向散射光混频后进入相干接收机测量后向布里渊散射。相干接收机只受散粒噪声影响, 灵敏度性能非常高, 一般情况下, 瑞利散射比布里渊散射高 20~30 dB, 通过相干接收可以消除瑞利散射, 从而得到足够窄的频率精度, 确保灵敏度。

1.3 BOTDR 传感系统的主要技术参数

1) 测量精度。在 BOTDR 系统中, 布里渊散射光谱遵循洛伦兹分布, 频谱特征可由布里渊频移和布里渊散射谱宽进行描述。频率分辨率决定测量布里渊频移的能力, 频移决定了温度和应力测试的精度。检测系统的动态决定了可检测总长度, 也决定了微弱信号检测精度。

2) 空间分辨率。空间分辨率的一般定义为, 有效分辨两个相邻的布里渊频移事件的最小空间间隔, 或者是在保证待测量的测量精度前提下, 最小可探测的空间长度。空间分辨率主要取决于信号光的脉冲宽度和电接收机的通道带宽, 其中, 脉冲宽度权重较大。理论上脉冲宽度越小, 其空间分辨率越小, 但是当光脉冲宽度减小时, 信号强度降低, 会造成布里渊散射强度降低, 从而造成降低动态监测范围。当脉冲宽度的极限为 10 ns 时, 对应空间分辨率约 1 m。实际系统中光电转换器的速率、带通滤波器的带宽和模/数转换器(ADC)转换速度等因素也会影响系统的空间分辨率。

3) 温度和应变分辨率。温度分辨率是指系统能检测到的光纤的最小温度变化量。应变分辨率是指系统能检测到的光纤受到的最小应力变化量, 光纤的应变用 ε 表示, 它是光纤形变量 ΔL 与光纤长度 L 的比值。由于光纤受到应力变化时的形变为微形变, 因此一般用 $\mu\varepsilon$ 表示形变量单位。例如应力检测精度为 10 $\mu\varepsilon$, 表示系统可以感知到

0.001% 的微小形变量。如前面所述, 温度和应变的分辨率取决于布里渊频移的分辨率。

4) 测量速度。测量速度是指系统对微弱的后向布里渊信号的检测时间。传统 BOTDR 技术利用扫频原理, 测量速度慢, 但精度和分辨率较高。本研究所用 BOTDR 技术采用非扫频分析法, 降低了复杂度, 节约了运算时间, 提高了测量速度, 虽降低了分辨率, 但足以满足测量需求。

2 风摆与覆冰监测应用实例分析

2.1 OPGW 光缆概况

OPGW 属于架空线路常用的电力光缆之一。OPGW 在不损害架空地线原有电气性能的前提下, 将光纤单元复合进架空地线中, 主要由光纤单元和外层金属绞线构成。其中, 光纤单元主要由光纤和保护套组成, 置于 OPGW 轴心处的光纤用来传输光信号。金属绞线部分主要由铝包钢、铝合金线等组成, 高强度的铝包钢是主要承力部分。铝包钢线和铝合金线都是传热的良导体。OPGW 不仅具有良好的机械性能, 也具有较好的光信号传输性, 目前 110 kV 及以上架空线路普遍采用 OPGW 光缆作为电力通信网络的传输介质。然而由于风摆、覆冰、雷击等外界复杂环境的影响, OPGW 光缆故障时常发生, 对电网的安全运行造成了严重威胁。因此, 实时监测 OPGW 中光纤的温度和应变情况, 及时发现并处理故障, 对提高电力通信的可靠性以及确保电网的安稳运行具有十分重要的意义^[15-16]。

实际 OPGW 中光纤的长度大于线缆长度, 有一定余长系数, 以克服 OPGW 线缆拉伸对光纤造成的过度应变。因此一般情况下光纤受到的应力很小, 几乎不产生形变。只有当光缆受到的拉伸力大于光缆的额定拉断力 (reted tensile strength, RTS) 的 60% 以上时, 光纤的应变径向效应才显现, BOTDR 系统才能检测到明显的布里渊频移变化。图 3 为层绞式外层铝合金 OPGW, 对于外层铝合金 OPGW, 额定拉断力约为 76 kN^[17], 当光缆拉伸力达到 45.6 kN 以上时, OPGW 内部光纤才开始产生明显形变。

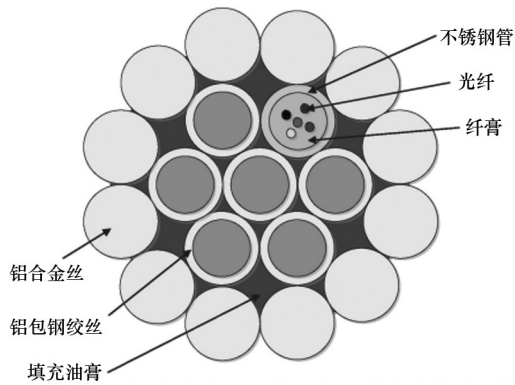


图3 外层铝合金OPGW光缆截面结构示意图

2.2 风摆监测的技术分析

相位敏感光时域反射仪(phase-sensitive optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR)的原理是将光的特性变化转换为承载光纤振动状态的信号,再进行模数转换。此外,它还可以同时检测多个点的入侵事件。 Φ -OTDR技术是利用瑞利散射的相干效应来检测振动,采用超窄线宽激光作为光源,将强相干光注入传感光纤,观察后向瑞利散射光在脉冲范围内的相干干涉结果,然后定位扰动事件的具体位置进行分布式检测。 Φ -OTDR具有许多优点,例如结构简单,定位精度高,远距离振动多点干扰的传感和同步定位等。然而,利用 Φ -OTDR监测OPGW电缆的风摆仍存在一些难点,如对超窄线宽激光器的要求及其影响干扰噪声和快速模式识别算法^[18-19]等方面。BOTDR和 Φ -OTDR不同特性的对比如表1所示。

表1 BOTDR和 Φ -OTDR分析与比较

技术方案	监测应变/温度信息	多点振动/定位	定位算法	灵敏度	应用难点
BOTDR	支持	不支持	简单	更高	容易
Φ -OTDR	不支持	支持	复杂	高	困难

此前研究普遍认为BOTDR对于电力线路只适合进行温度检测,不适合做应变检测。原因是传统的研究把分析模型定义为光纤的径向拉力形变,由于OPGW特殊的余长结构,小的拉力不足以产生能够被BOTDR检测到的应变(图4(a)),这是一种大尺度观察下的结果,如果进入小尺度分析,则应该

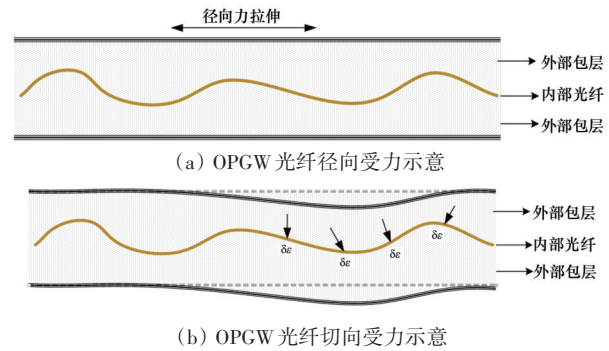


图4 光纤风摆效应与OPGW光缆的应变

会有不同的结论。

如图4所示,在OPGW光缆的剖面中,当光缆受到切面力(风力或舞动因素)作用时,虽然由于余长原因,需要超过较大的径向力才能产生应变,但是切向力在有限尺度下依然可以对光纤产生随机瞬间的挤压,导致微应变($\delta\epsilon$)反应。这些微应变 $\delta\epsilon$ 的积分形成不规则的快速频偏图谱,只要达到BOTDR的检测灵敏度以及有足够快的分析速度,就能捕获到这些微应变的片段,在一定空间、时间维度内展现这些微应变引起的频偏数据对比时,就能感知线路受到的扰动以及扰动程度。

BOTDR能否有效分析风摆效应,受装置的2个主要性能的影响。

(1) 分析速度的影响。传统BOTDR一次测量周期大于10 min,实际风摆周期是0.5 s到2~3 s,因此传统方式BOTDR的测量速度无法满足测试要求,只有仪表测试频率为2~10倍风摆频率,才能捕获微应变或观测到风摆过程的细节,否则只会有一定的捕获概率。检测频率越低则捕获概率越低,如仪表测试速度接近于风摆频率,只能是大概率捕获。

另外,测试速度还与光纤长度相关,根据光的波速,10 ns传递1 m,测试100 km耗时1 ms,如果仪表进行100次平均,即100 ms的测试速度,可以完全满足风摆测试要求。

(2) 灵敏度的影响。偏振衰落是光纤传感领域的常见现象。偏振衰落的原因之一是由于光纤的双折射,普通单模光纤中的光偏振状态(state of polarization, SOP)往往会随机波动。当外部干扰作用于光纤时,光纤中的双折射效应发生变化,从而

改变光的偏振状态,可能导致偏振衰落。偏振衰落的另一个原因是偏振状态的不匹配。在光纤传感系统中,当产生2个偏振状态彼此完全正交的光束拍频时,会出现偏振失配现象,导致偏振衰落^[20]。传感系统中的偏振衰落将降低信噪比,因此无法解调有效的传感信息^[21]。

由于单模光纤的非均匀特性,根据传播速度的不同,可将光纤的光传输分为快轴和慢轴两个垂直分量。以传统的基于后向散射光的光纤传感器为例,信号光按照2个垂直分量进行分解,

$$E_s = E_0 e^{i w_0 t} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \cdot e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, E_s 表示光电场的时变强度, E_0 表示光电场的原始强度, w_0 表示检测光的角频率, $\cos\theta$ 表示快轴分量的比例系数, $\sin\theta$ 表示慢轴分量的比例系数, δ 表示2个轴分量之间的相位差。

通过一维响应模型,可以分别获得2个正交分量对应的后向散射信号:

$$E_x(t) = \sum_{k=1}^N (E_0 \cos\theta) r_k \cos(w_0(t - \tau_k)) \quad (10)$$

$$E_y(t) = \sum_{k=1}^N (E_0 \sin\theta) r_k \cos(w_0(t - \tau_k) + \delta) \quad (11)$$

式中, N 是散射点的数量, r_k 是第 k 个散射点的强度系数, τ_k 是第 k 个散射点产生的相位差。

x 轴和 y 轴上后向散射光的信号功率可从式(10)和(11)中获得,

$$P_x(t) \propto \langle E_x^2(t) \rangle = K_x(t)^2 \cos^2\theta \quad (12)$$

$$P_y(t) \propto \langle E_y^2(t) \rangle = K_y(t)^2 \sin^2\theta \quad (13)$$

式中, $K_x(t)$ 和 $K_y(t)$ 分别是后向散射光在 x 轴和 y 轴上干涉结果的振幅,表示偏振衰减程度。

后向散射光的最终功率为

$$P_t = P_x(t) + P_y(t) \quad (14)$$

式(14)表明,后向散射光的功率与 $\cos\theta$ 和 $\sin\theta$ 有关,可以表示光纤中光的偏振状态,这也表明 SOP 会影响光纤传感器的检测结果。然而,光纤中光的 SOP 随传感时间和传感长度的变化而变化。在光纤的相同位置, SOP 可能是时变的。同时, SOP 可能在沿光纤的不同位置发生变化。这些特点给 SOP 的准确控制带来了很大的挑战。在实际测试中,由于 BOTDR 的偏振衰落,所以要耗时抑制

偏振衰落,增加测试平均的次数,如果按 100~200 次平均计算,最终系统测试 100 km 耗时 0.1~0.2 s,仍可以满足风摆信号捕获概率要求。

2.3 具备高速分析能力和高灵敏度的 BOTDR 装置测试风摆的试验验证

在某地电力杆塔上架设了实际 OPGW 光缆进行试验验证,布置示意如图 5 所示。

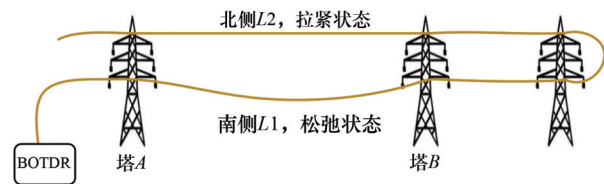


图5 BOTDR 实际监测试验线路

$L1$ 段和 $L2$ 段分别在同一电力杆塔的南北两侧, $L1$ 在南侧,布置时是松弛状态,有足够垂度,在超过 5 级风力时,就会发生左右或上下摆动。 $L2$ 在北侧,布置时是拉紧状态,在 7 级风力下,线路几乎不产生摆动。实际进行测试并截取了某一时刻 $L1$ 、 $L2$ 段的 BOTDR 频偏曲线沿时间分布的统计曲线(图 6、图 7)。



图6 南侧 $L1$ 段光缆对应的频偏曲线

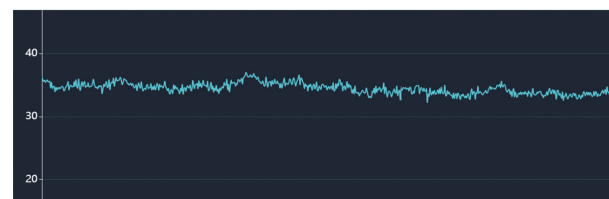


图7 北侧 $L2$ 段光缆对应的频偏曲线

测试时环境具有 6 级左右风力,由于 $L1$ 、 $L2$ 在同一空间,温度场是同场的,因此频偏曲线的温度贡献是相同的,可以差分消除,通过对比图 6 与图 7 的 2 条频谱曲线,可以发现, $L1$ 有明显频偏扰动, $L2$ 频偏则非常稳定。

因此,验证了线路出现摆动、舞动的情况,当

BOTDR 的检测灵敏度、检测速度满足捕获微应变的条件, BOTDR 就能够捕获到风摆或舞动的非连续应变信号。

2.4 风摆实际案例分析

在实际线路中, 也成功证实了 BOTDR 对线廊风力感知、线路摆动结果的监测。

(1) 图 8 是不同季节白天和夜晚的 BOTDR 实际风摆监测图, 可以观察到圈中曲线有明显频偏变化, 结合当时的天气情况, 证实该 BOTDR 技术可以用于风摆舞动的监测。



(a) 春季白天



(b) 夏季白天



(c) 夏季夜晚



(d) 冬季夜晚

图 8 BOTDR 实际风摆监测图

(2) 图 9 为甲客户的实际风摆监测结果。监测线路全长 122.75 km, 图 9 中为距离客户某变电站 12 km 处的频偏随时间变化曲线, 在圈中的时段频偏有明显扰动, 结合当时天气东风 5~6 级情况以及频偏变化曲线, 推算出发生风摆概率非常大。



图 9 甲客户的风摆监测结果

(3) 图 10 为乙客户的实际风摆监测结果。监测线路全长 67.25 km, 图 10 中为距离客户某变电站 12 km 处的频偏随时间变化曲线, 在圈中的时段频偏有明显扰动。结合当时天气南风 5~6 级情况以及频偏变化曲线, 推算出发生风摆概率非常大。



图 10 乙客户的风摆监测结果

2.5 覆冰监测

在中国部分地区, 输电线路覆冰是在冬季影响输电线路安全运行的主要隐患^[22-23]。当 OPGW 线路发生覆冰现象时(图 11), 在结冰发生期间, 从水结成冰的过程中会释放热量, 因此造成在结冰期间光缆反而温度上升, 当结冰完成后, 光缆温度又会逐渐恢复到环境温度。根据结冰时间和温度增加量, 再结合光缆材质的热系数等参数, 可以估算出

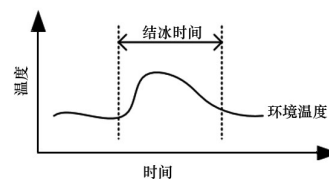


图 11 覆冰计算原理示意

光缆覆冰的厚度。

(1) 图 12 为甲客户的实际覆冰监测结果。监测线路全长 122.75 km, 图 12 为距离客户某变电站 4.9 km 处的温度随时间变化曲线, 约 17:50 分开始出现温度先下降后上升的趋势, 结冰至约 22:00 结束, 结合当时天气雨转雪情况以及温度变化曲线, 推算出结冰概率大于 80%。



图 12 甲客户的覆冰监测结果

(2) 图 13 为乙客户的实际覆冰监测结果。监测线路全长 67.25 km, 图 13 为距离客户某变电站 23 km 处的温度随时间变化曲线, 约 17:17 分开始有温度上升的趋势, 结冰至约 22:29 结束。结合当时天气雨转雪情况以及温度变化曲线, 推算出结冰概率大于 80%。



图 13 乙客户的覆冰监测结果

3 结论

BOTDR 是一种可用于 OPGW 线廊环境灾变监测的新型技术, 可以实现分布式长距离线路实时监测, 具有测量精度高、监测范围广、部署简易和自动定位故障等诸多优势。通过分析 BOTDR 技术的理论原理及实现机理, 并经过试验和实际案例验证了 BOTDR 技术对 OPGW 的监测, 可以实现良好的应用效果。结果表明, 对于风摆测量, 布里渊频偏的

变化遵循数学统计理论, 为后续 BOTDR 技术在 OPGW 线路的灾变监测应用研究提供了一种新的思路。本研究成果已经成功在辽宁电网实际部署, 并在冬季冰雪天气和夏季暴风雨天气过程中, 多次成功预报或监测到覆冰、线路风摆等灾害, 保障了电力线路安全稳定运行。同时, 获得了 2 年多部署线路的实时全线廊气象信息, 空间分辨率在 20 m 以内, 相当于每隔 20 m 建立一个气象站, 获得了线路走廊真实宝贵的气象信息, 为未来线路选址提供了第一手原始勘测信息。但是, OPGW 光缆架设在电力线缆之上, 如何在准确监测 OPGW 的基础上, 推导出伴随的电力线缆状态, 是一个巨大的难题。在取得初步成果的基础上, 我们正在研究如何攻克这个难题。

参考文献 (References)

- [1] 曹孟辉, 陈点, 夏辉. BOTDR 布里渊谱拟合方法改进研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(8): 188-190.
- [2] 黄晓维, 郑建国, 于永堂, 等. BOTDR 分布式光纤传感技术在桩基测试中的应用研究[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(5): 281-285, 293.
- [3] 陈芳, 李子凡, 李伯中, 等. OPGW 光缆覆冰监测与纤芯应变分析[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(10): 48-52.
- [4] 陈磊, 詹跃东, 田庆生. 基于 BOTDR 分布式传感系统的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(6): 96-100.
- [5] Yan H. Discussion on monitoring of icing status of high voltage transmission lines based on optical fiber sensing technology[J]. Low Carbon World, 2016(25): 50-51.
- [6] Huang W Q, Yao Z H, Liang W, et al. Data mining evaluation of reliability of overhead line iced tension tensor[C]// International Conference on Power System Technology. Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 3206-3212.
- [7] Ji K P, Rui X M, Lin L, et al. Dynamic response of iced overhead electric transmission lines following cable rupture shock and induced ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2215-2222.
- [8] Huang X B, Zhang F, Li H S, et al. An online technology for measuring icing shape on conductor based on vision and force sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 12(66): 3180-3189.
- [9] Lü Z, Hou H, Yi Z, et al. Grey prediction model application in early warning of ice-coating lines[C]//International

- Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 119-122.
- [10] Qiang L G, Xiao G H. Power line icing monitoring method using binocular stereo vision[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1905-1908.
- [11] 范海军, 李永倩, 张立欣, 等. 基于BOTDR的多模光纤温度传感[J]. 激光杂志, 2022, 43(1): 74-80.
- [12] 史尊伟. 基于BOTDR技术的架空输电线路监测系统研制与试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [13] Leal-Junior Arnaldo G, Theodosiou A, Marques C, et al. Compensation method for temperature cross-sensitivity in transverse force applications with FBG sensors in POFs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3660-3665.
- [14] 白清. BOTDR系统性能提升关键技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [15] 陈拽霞, 王颖, 姜辉, 等. 电力OPGW光缆覆冰性能研究及在线监测技术应用[J]. 软件, 2020, 41(1): 152-155.
- [16] 李浩, 王峰, 周霄, 等. 基于布里渊光时域反射计的紧凑型OPGW覆冰厚度监测[J]. 光子学报, 2021, 50(11): 80-87.
- [17] 范鹏, 王海涛, 张雪峰, 等. 基于BOTDR的OPGW应变实验研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(4): 60-62.
- [18] 朱辉, 周洋, 邵玮炜. Φ -OTDR分布式光纤传感器的振动应变监测[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(2): 74-79.
- [19] 杨纯, 李垠韬, 宋伟, 等. Φ -OTDR光纤传感电缆防外破监测数据预处理方法[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 486-492.
- [20] Zhang J, Li W. The study on the novel distributed vibration sensing system based on the adjacent FBGs reflected lights interference[J]. Optik, 2018, 169: 85-95.
- [21] Zhang X P, Wang Q, Xiong F, et al. Performance enhancement method for phase-sensitive optical time-domain reflectometer system based on suppression of fading induced false alarms[J]. Optical Engineering, 2020, 59(4): 046101.
- [22] 覃兆宇, 刘卫新, 潘哲哲, 等. 光纤布里渊分布式输电线路覆冰识别技术[J]. 光电工程, 2016, 43(10): 6-11.
- [23] Zhang M, Xing Y M, Zhang Z G, et al. Design and experiment of FBG-based icing monitoring on overhead transmission lines with an improvement trial for windy weather[J]. Sensors, 2014(14): 23954-23969.

Application of environmental disaster monitoring of OPGW corridor based on BOTDR technology

LI Jun¹, LI Yan^{2*}

1. China Mobile Tietong Co., Ltd., Beijing 100038, China

2. Super High Voltage Branch of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110003, China

Abstract The on-line monitoring of optical fiber composite overhead ground cable (OPGW) under extreme weather conditions is of great significance to the safe operation and early warning of power communication system. The basic principle of monitoring cable temperature and strain based on Brillouin optical time-domain reflectometry (BOTDR) technology is reviewed, and the feasibility of its application to power disaster detection is analyzed. Moreover, combined with the specific application scenarios and monitoring situation of operating OPGW cables with BOTDR system in the field, a method for real-time monitoring OPGW lines and surrounding environment using BOTDR technology test device is verified in both theory and practice, which can effectively meet the needs of environmental disaster monitoring of electrical route corridor.

Keywords fiber optic sensing; Brillouin optical time domain reflectometry; strain; real-time monitoring; optical fiber composite overhead ground wire ●



(责任编辑 傅雪)