

光纤分布式传感技术在海底电缆状态监测中的应用

周路遥¹, 刘黎¹, 蒋愉宽¹, 周自强¹, 朱承治²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;

2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007)

摘要: 光电复合海底电缆能够实现电能和信号传输的双重功能, 是海底电力电缆发展的必然趋势。海缆敷设环境特殊, 运行过程中会受到洋流、船锚等因素的影响, 因此, 对海缆的机械特性和温度状况进行监测意义重大。通过分析光纤分布式传感技术的特点, 以及其在海底电缆状态监测中的应用情况, 光纤分布式传感技术具有易植入、易组网、抗电磁干扰等优点, 能够实现长距离的分布式监测。根据光纤散射原理及光时域反射技术可实现多种海缆故障的诊断, 全方位地监测海缆运行状况, 对多种可能发生的故障进行预警和定位。

关键词: 光纤分布式传感技术; 光电复合海缆; 状态监测

Application of Distributed Sensing Technology of Optical Fiber in Submarine Cable Status Monitoring

ZHOU Luyao¹, LIU Li¹, JIANG Yukuan¹, ZHOU Ziqiang¹, ZHU Chengzhi²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: As an inexorable development trend of submarine cable, photoelectric composite fiber can transmit both electric energy and signals. It is important to monitor mechanical properties and temperature of submarine cables due to the special laying condition and the influence of ocean current, anchors and other factors during the operation. This paper analyzes the characteristics of distributed sensing technology and its application of optical fiber in submarine cable status monitoring. The result shows that optical fiber distributed sensing technology has the advantage of easy implanting, easy networking and anti-electromagnetic interference, and can achieve remote distributed monitoring, which meets the need of submarine cable status monitoring. Based on the principle of optical fiber scattering and optical time-domain reflection technology, submarine cable faults can be diagnosed and the operation condition can be monitored all around to warn and locate various potential faults.

Key words: distributed sensing technology; submarine photoelectric composite cable; status monitoring

0 引言

海底光纤复合电力电缆(简称光电复合海缆)能够实现电能和信号传输的双重功能, 是海缆发展的必然趋势。海缆结构复杂, 敷设环境特殊, 一旦发生故障易造成重大损失。由于潮汐、洋流、渔网、船锚以及海底地形变动等因素影响, 海缆机械故障时有发生; 同时, 海缆内部产生局

部放电、接地故障以及载流量过大会伴随着缺陷点的异常发热, 严重时会导致绝缘老化加速, 甚至发生热击穿^[1]。因此, 监测海缆的机械特性和温度状况对于确保线路安全稳定运行、构建坚强智能电网具有重要意义。

光纤分布式传感利用光纤一维空间连续分布特性, 可以在整个光纤长度上实现对沿光纤分布环境参数的连续分布式测量, 无测量盲区。光纤既是传输媒介, 又是传感元件, 具有电子式传感器难以比拟的优点, 适合工作于强电磁干扰和高电压场合中^[2-3]。激光在光纤内发生全反射, 其大

部分是前向传播的,但由于光纤并不是由单一物质组成,其中的非结晶材料在微观空间中存在不均匀结构,导致一部分光会发生后向散射。通过后向散射光的信息(如相位、光强、频移等)与光纤被测量(如振动、温度、应变等)的联系,可实现光纤传感特有的分布式监测^[4]。

通过对光电复合海缆的结构进行剖析,重点分析了用于海缆振动监测的相位敏感时域反射仪、用于海缆温度监测 Raman(拉曼)光时域反射技术、用于海缆应变监测的 Brillouin(布里渊)光时域分析技术的原理及系统结构。探讨多种光纤分布式传感技术的监测特点和构成海缆综合状态监测系统的必要性,为海缆状态监测的深入研究提供参考。

1 光电复合海底电缆结构

光电复合海缆的光纤单元经由两岸的 OPGW(光纤复合架空地线)连接到现有电力通信网络。以依托世界上首条 500 kV 交联聚乙烯绝缘海缆工程——舟山 500 kV 联网输变电工程研制的 500 kV 交联聚乙烯绝缘光电复合海缆(HYJQ71-F290/500 kV 1×1800+12B1)为例,海缆结构如图 1 所示。

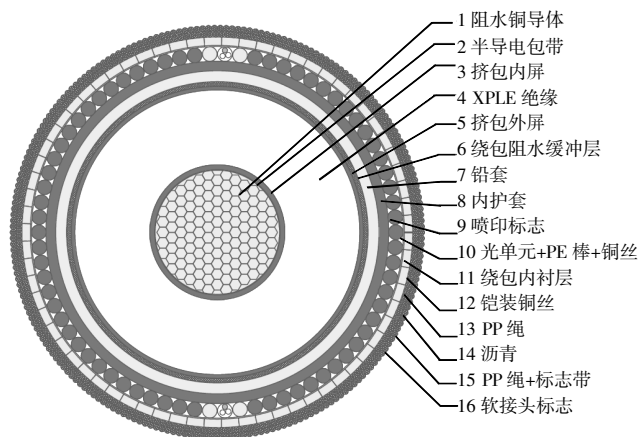


图 1 500 kV 交联聚乙烯绝缘光电复合海缆结构

选用 2 根直径 6.0 mm 的光单元对称分布于海缆绕包内衬层的两侧,每根光单元内置 12 芯单模光纤(10 芯 G.652D 常规单模光纤和 2 芯 G.655D 非零色散位移光纤)。光单元采用中心束管结构,光纤外套不锈钢管,再经过高强度磷化钢丝铠装后挤包 1 层高密度聚乙烯护套,有效增强光缆的

机械强度。不锈钢管内充满阻水纤膏,可阻止水和气体的侵入。光纤采用光纤色谱标志进行识别,在每根光缆两侧各放置 1 根铝合金丝,对光缆起保护作用,其余位置均填充直径 7.0 mm 的圆形聚乙烯填充条。光缆和填充条均采用绕制的方式卷绕到缆芯上,其外再绕包 2 层高强度的带材进行捆绑,避免光缆拱起。

2 海缆扰动监测

海缆在运行过程中会受到船舶违规抛锚、起锚等锚损行为引起的振动、摩擦等机械力作用,对海缆进行扰动监测可以预警海缆可能遭受的破坏。

2.1 监测原理

激光沿光纤传播,当遇到不匹配的介质时会发生散射,其后向散射部分会返回光纤入射端,后向散射光的功率衰减特征,特别是功率的不连续特征对应光纤线路中的事件。OTDR(光时域反射技术)利用光学雷达原理实现对光纤线路上异常散射事件的定位和识别,主要应用于光纤线路的损耗、接续点和断点的测量,它通过向光纤发射光脉冲并探测其后向 Rayleigh(瑞利)散射光强来进行传感。当光脉冲在光纤中传输时,其中一部分散射光经相同的路径返回入射端,则事件点与入射端之间的距离为

$$d=c\tau/2n \quad (1)$$

式中: c 为光在真空中的速度; n 为光纤纤芯的有效折射率; τ 为入射光脉冲与返回光脉冲的时间差。

Φ -OTDR(相位敏感光时域反射仪)具有获取光纤中后向 Rayleigh 散射所携带的光相位信息的能力,适合于振动信息的传感。采用窄线宽脉冲探测光,当外界扰动(压力振动)作用于传感光纤时,由于弹光效应,光纤的折射率会产生变化,引起 Rayleigh 散射光相位变化,通过光干涉仪,将光相位的变化转换为光强度的变化,从而实现携带振动信息的光信号的解调^[5]。

2.2 系统结构

海缆扰动监测系统采用 Φ -OTDR 光纤分布式传感技术,通过海缆内置式单模光纤实现,监测距离可达 70 km。 Φ -OTDR 系统结构如图 2 所示,将窄线宽脉冲探测光注入被测光纤,其后向 Rayleigh 散射经定向耦合器输出被光电探测器接

收, 经放大和模数转换后经信号处理得到探测曲线。当光纤收到外界干扰时, 对应位置的光纤折射率会发生变化, 继而导致该位置光相位的变化, 并引起后向 Rayleigh 散射光的干涉强度变化, 通过探测曲线的变动可判断扰动的发生^[6]。同时, 利用 OTDR 技术的回波延迟可获取散射的空域分布。

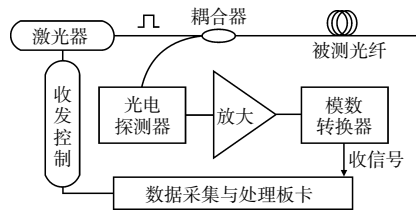


图2 Φ -OTDR 典型系统结构

3 海缆温度监测

温度是海缆安全运行的重要指标, 当海缆发生接地及局部放电故障时会引起缺陷位置的温度大幅度上升。对海缆出现的温度异常、温度尖峰以及温升过快进行预警, 可以避免海缆长期运行在过热状态下引起绝缘老化和绝缘失效。同时, 根据海缆光纤温度推算线芯温度, 可以掌握海缆载流量的动态信息。

3.1 监测原理

Raman 散射是光量子 and 介质分子相碰撞时产生的非弹性碰撞过程, 伴随着能量转换, 产生频移, 包括频率成分下移的 Stokes 分量和频率成分上移的 Anti-Stokes 分量。其中, Anti-Stokes 光比 Stokes 光具有更高的温度灵敏度, 且 Anti-Stokes 光强与温度成线性关系。将温度感知性差的 Stokes 光作为参考光, 以 Anti-Stokes 光功率 P_{as} 与 Stokes 光功率 P_s 比值的形式可计算出绝对温度值:

$$T = \frac{hcv_0}{k} \cdot \frac{1}{\ln a - \ln \left(\frac{P_{as}}{P_s} \right)}, \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度值; a 为与温度相关的系数; h 为普朗克常数; c 为真空光速; v_0 为入射光频率; k 为玻尔兹曼常数。

ROTDR (Raman 光时域反射仪) 根据 Raman 散射原理计算温度值, 采用 OTDR 技术来定位温度点, 又被称为 DTS (分布式光纤温度传感)。通过 DTS 监测海缆光纤温度, 结合海缆的各层热阻、环境参数等相关数据就可以计算出海缆的线

芯导体温度, 获取线路实际负载率, 对海缆的剩余复合能力进行在线评估, 确保海缆负荷水平处于安全状态, 为海缆的动态增容提供决策支持。国内张振鹏等人采用 DTS 测量了电缆隧道、直埋等典型敷设环境下施加相应负荷电流时的导体温度, 验证了 DTS 对导体温度和动态载流量计算的符合性^[7]。海缆的上岸段及接头处是线芯载流量提升的瓶颈, 也是海缆异常状况的多发位置, 对于此处的温度监测尤为重要。

3.2 系统结构

采用 ROTDR 光纤分布式传感技术进行海缆温度监测, 通过海缆内置式多模光纤实现, 测量距离可达 30 km, 通过在海缆两端同时设置测温主机的对测方式, 可将测量距离加倍, 达到 60 km。图 3 为 ROTDR 的典型系统结构, 收发控制单元控制激光器产生探测光脉冲, 探测光脉冲经过耦合器进入到被测光纤, 被测光纤中的后向 Raman 散射光经波分复用器分离出 Stokes 分量和 Anti-Stokes 分量, 再用光滤波器分别对其滤波, 经光电探测器采集带有温度信息的后向 Raman 散射光信号, 经信号处理可解调出实时温度信息。

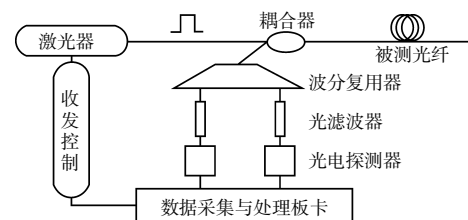


图3 ROTDR 典型系统结构

4 海缆应变监测

船锚缓慢、大幅度拖拽以及海底特殊地形地貌常造成海缆局部受力异常。对海缆上的静态应变分布状况进行监测可以对可能发生的故障进行预警及定位。

4.1 监测原理

光纤中的后向 Brillouin (布里渊) 散射是由入射光与光纤自身的声子相互作用产生的, Brillouin 散射光的频移量 Δf_B 与应变和温度呈线性关系:

$$\Delta f_B = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta \varepsilon, \quad (3)$$

式中: ΔT 为光纤的温度变化量; $\Delta \varepsilon$ 为光纤的应变变量; C_T 与 ΔT 分别为 Brillouin 频移的温度系数

与应变系数。

吕安强等人对复合光纤的 Brillouin 频移应变/温度系数进行了标定实验,表明不同光纤的频移应变/温度系数基本相同,约为 $1.05 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ 及 $0.05 \text{ MHz}/\mu\text{e}$ ^[8]。

基于后向 Brillouin 散射的光纤分布式传感技术根据其实现原理不同分为 BOTDR(Brillouin 光时域反射仪)和 BOTDA(Brillouin 光时域分析仪)。BOTDR 利用的是光纤的自发 Brillouin 散射原理,系统从一端输入泵浦脉冲,在同一端检测返回信号的散射光频率,使用方便,但散射光功率较小,限制了测量距离和精度;BOTDA 利用的是受激 Brillouin 散射原理,处于光纤两端的可调谐激光器分别将一脉冲光(泵浦光)与一连续光(探测光)注入传感光纤,散射光拥有更高的强度,显著提高了信噪比,从而使探测距离和精度大幅度提高。

基于 Brillouin 散射的 BOTDR/BOTDA 技术同样可以用来进行分布式测温,相比于 ROTDR 技术监测范围更广,但精度略有不足^[9]。为及时发现并判别光电复合海缆的故障,国内陈永等人采用 BOTDA 技术对海缆接地、锚害、局部放电等不同类型故障下引发的海缆光纤温度、应变信号变化进行仿真和计算,推导出光纤传感信息与海缆故障类型的关系,可为海缆的故障检测与诊断提供参考^[10]。

为解决 Brillouin 频移影响因素中温度和应变的交叉敏感问题,目前的解决方案及存在的不足主要有:

(1)采用松套光纤和紧套光纤相结合的方式,用松套光纤测温,然后剔除紧套光纤上温度的影响以获得应变数据,但这种方法需要提前设计传感光纤结构。

(2)采用第三方技术(如 Raman 散射技术)测量温度,并分离 Brillouin 散射中温度的影响以获得应变数据,但这种方法增加了额外的设备成本。

(3)利用 Brillouin 散射的频移/功率对温度/应变都呈线性关系的特性,根据二元一次方程组计算温度和应变,但这种方法中散射光功率的低信噪比大幅度降低了精度^[11]。

因此,如何更有效地解决温度和应变的交叉敏感问题,是 BOTDR/BOTDA 技术推广应用的

关键。

4.2 系统结构

以技术较为先进的 BOTDA 光纤分布式传感技术为例,通过海缆内置式单模光纤实现,探测距离可达 120 km。海缆中光单元的应变值与海缆的应变值满足线性关系,且小于海缆应变值,可以利用光单元的应变推算海缆的应变。图 4 显示了 BOTDA 的典型系统结构,激光器 1 产生的光信号被电光(强度)调制器调制成光脉冲经环形器注入被测光纤的一端以用作泵浦光,激光器 2 产生某频率的连续光注入被测光纤的另一端,用作探测光。当探测光和泵浦光的频率差落在光纤某处 Brillouin 区,将产生受激 Brillouin 散射效应,将泵浦光的功率转移给探测光,从而获得该频点的 Brillouin 散射曲线。使用激光器 2 连续扫频,通过测量返回的宽频带的布里渊谱上的离散频率点对应的光时域反射曲线,得到关于布里渊频率、功率和散射位置信息的三维曲线^[12-13]。通过与初始数据作对比得到光纤中各个散射位置的布里渊频移量,从而根据应变与布里渊频移的线性关系得出散射位置的应变分布。

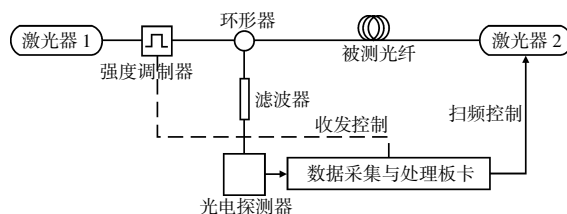


图 4 BOTDA 典型系统结构

5 海缆综合状态监测系统

总体来说,以上每种光纤传感技术的特点不同,适用于不同的监测对象,如表 1 所示。其中, Φ -OTDR 主要用于长距离分布式振动监测,精度高,成本较高;ROTDR 主要用于分布式温度监测,技术成熟,成本适中,测量距离相对较短;BOTDR/BOTDA 主要用于长距离分布式温度、应变监测,精度和空间分辨率较高,但系统复杂,成本较高。

目前,浙江舟山、福建平潭、广东南澳等地的海缆工程均建立了海缆综合状态监测系统,集海缆扰动监测、海缆应变监测、海缆温度监测、

表1 不同光纤传感技术的性能特点对比

原理	Φ -OTDR	ROTDR	BOTDR/BOTDA
监测物理量	振动	温度	应变、温度
光纤类型	单模	多模	单模
温度分辨率/ $^{\circ}\text{C}$	—	± 1	± 1
应变分辨率/ μe	—	—	± 10
空间分辨率/m	5	1	1~5
测量距离/km	80	30	120
测量响应时间/s	2.5	40	4

海缆载流量评估、AIS(船舶识别预警)等系统于一体,全方位地监测海缆的运行状况^[14]。当海缆出现故障时,光纤传感监测得到的数据会产生明显的变动,通过比对故障时的监测数据与标准监测曲线,系统以此判断故障类型并发出故障警报。同时,通过查找海缆敷设信息的数据库获取故障位置的经纬度和深度信息,从而准确定位故障点,为海缆的快速打捞和故障修复提供依据。

6 结论

总结分析了光纤分布式传感技术特点,并介绍了其在光电复合海底电缆中的典型应用情况,主要得到以下结论:

(1)光纤分布式传感技术具有连续分布式测量、抗电磁干扰等特点,可以实现长距离的监测覆盖范围和高效率的信息传输特性,迎合了海底电缆对先进传感技术的需求。

(2)基于 Rayleigh 散射的 Φ -OTDR 海缆扰动监测系统可以对船只落锚和挂缆拖拽引起的海缆扰动进行预警和定位。

(3)基于 Raman 散射的 ROTDR 海缆温度监测系统可以对温度异常进行预警和定位,并以此来计算海缆线芯温度,为海缆载流量评估、动态增容提供决策支持。

(4)基于 Brillouin 散射的 BOTDR/BOTDA 海缆应变监测系统可以对海缆静态应变进行预警和定位。利用 ROTDR 仅对温度敏感的特性可以补偿 Brillouin 频移对应变和温度的交叉敏感。

(5)海缆综合状态监测系统融合了多种光纤分布式传感技术的优势,能够全方位地预警海缆潜在运行风险,精确定位隐患位置,是保障海缆线路可靠运行的重要手段,有效地提升了智能输电水平。

参考文献:

- [1] 吴飞龙,杨力帆.光电复合技术在我国 110 kV 海底电缆中的首次应用[J].中国电力,2011,44(2):27-30.
- [2] 李强,王艳松,刘学民.光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):135-140.
- [3] 王传琦,伍厉文,刘阳.分布式光纤温度和应变传感系统研究进展[J].传感器与微系统,2017,36(4):1-4+7.
- [4] 李新华,梁浩,徐伟弘,等.常用分布式光纤传感器性能比较[J].光通信技术,2007(5):14-18.
- [5] 董向华.基于 Φ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2016(3):32-33.
- [6] 叶青,潘政清,王照勇,等.相位敏感光时域反射仪研究和应用进展[J].中国激光,2017,44(6):7-20.
- [7] 张振鹏,赵健康,饶文彬,等.电缆分布式光纤测温系统测量结果符合性的比对试验[J].高电压技术,2012,38(6):1362-1367.
- [8] 吕安强,李永倩,李静,等.基于 BOTDR 的光电复合海底电缆应变/温度监测[J].高电压技术,2014,40(2):533-539.
- [9] 王丽,罗建斌.城市电网高压电缆光纤传感在线监测技术比对试验研究[J].高压电器,2015,51(7):63-68.
- [10] 陈永,尹成群,吕安强,等.光电复合海底电缆故障检测与诊断方法[J].光通信研究,2014(3):56-59.
- [11] 吕安强,李永倩,李静,等.BOTDR 的已敷设传感光纤温度和应变区分测量方法[J].红外与激光工程,2015,44(10):2952-2958.
- [12] 郭经红,陈硕,吕立东,等.电力光纤传感技术及其工程应用[M].北京:科学出版社,2016:135-139.
- [13] 李世强,郑新龙,敬强.基于 BOTDA 的分布式光纤在线温度监控技术研究[J].华中电力,2011,24(6):14-17.
- [14] 胡文侃.110 kV 海底电力电缆在线综合监测新技术应用研究[D].杭州:浙江工业大学,2011.

收稿日期:2017-12-20

作者简介:周路遥(1992),男,工程师,主要从事输电设备状态监测分析及状态评价技术研究工作。

(本文编辑:童凯)