【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

基于光纤传感技术的电缆接头局部放电监测

皮昊书, 韦盈释, 陈金锋, 陈子涵, 吴 中, 马 楠

深圳供电局有限公司福田供电局, 广东深圳 518031

摘 要: 通过对电缆中间接头局部放电现象的监测可以及时判断其中间接头的绝缘状况, 并及早发现绝缘缺陷, 降低配电网电缆故障率. 提出一种基于相敏光时域反射仪 (phase-sensitive optical time-domain reflectometry, φ -OTDR) 的分布式光纤传感系统, 以相邻弱光栅间的光纤作为传感单元, 通过检测相邻弱光纤光栅的干涉信号, 可以得到电缆中间接头局部放电声波振动信号的频率、相位和位置等相关信息, 从而判断局部放电的强弱及放电位置. 实验模拟电缆中间接头局部放电情形, 搭建电缆接头局部放电光纤监测系统. 在 10 kV 电压等级下进行实时监测实验, 成功检测出局部放电产生的声波信号, 其频谱主要分布于 9 ~ 15 kHz. 将传感光纤与电缆复合, 或沿电缆铺设, 能够做到实时的分布式在线监测.

关键词: 光纤传感; 相敏光时域反射仪; 弱光纤光栅; 干涉信号; 电缆接头; 局部放电

中图分类号: TP211.6; TP23 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.01057

Partial discharge monitoring of cable joint based on fiber sensing technology

PI Haoshu, WEI Yingshi, CHEN Jinfeng, CHEN Zihan,
WU Zhong, and MA Nan

Futian Power Supply Bureau, Shenzhen Power Supply Bureau Co. Ltd., Shenzhen 518031, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Monitoring the partial discharge of the intermediate joint of cable can help to judge the insulation condition in time and find latent defects in cable joints as early as possible, so as to reduce occurrence of insulation fault. In this paper, we propose a distributed acoustic sensing (DAS) system based on the enhanced phase-sensitive optical time-domain reflectometry (φ -OTDR) technology. By detecting and analyzing the interference signals between the two adjacent weak fiber Bragg gratings (FBGs) in optical array which is paved along with cable, we can obtain the frequencies, phases, and positions of acoustic signals generated by partial discharge of the cable joint, and then determine the strength and location of partial discharge. In our experiment, by simulating partial discharge of cable intermediate connector in laboratory environment at the voltage of 10 kV, the fiber optic monitoring system is set up, and the acoustic signal by partial discharge is successfully detected. Experimental results show that the proposed DAS system can accurately distinguish weak signal with different frequency and have better frequency response from 9 kHz to 15 kHz. The DAS system can achieve the real-time distributed on-line monitoring of partial discharge by the combination of sensing fiber and cable.

Key words: fiber optics sensors; phase-sensitive optical time-domain reflectometry (φ -OTDR); weak fiber Bragg grating; interference signal; cable joint; partial discharge

Received: 2019-06-05; **Accepted:** 2019-09-25

Foundation: Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co. Ltd. (SZKJXM20170324)

Corresponding author: Engineer CHEN Jinfeng. E-mail: cjfwyl63@163.com

Citation: PI Haoshu, WEI Yingshi, CHEN Jinfeng, et al. Partial discharge monitoring of cable joint based on fiber sensing technology [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 57-62. (in Chinese)

交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)由于具有良好电性能、热性能以及结构简单、成本低等优势,已被广泛应用于配电网中,但在 XLPE 的安装和运行过程中,尤其是电缆中间接头部分,易受现场作业人员个人技术和复杂环境因素的影响,出现内部绝缘缺陷,导致局部放电现象的产生。局部放电会不断腐蚀电缆的绝缘层,使其绝缘性能出现大幅下降,从而引起电缆运行故障,造成停电事故。多数局部放电引起的电缆故障发生在中间接头部位^[1],因此,监测工作状态电缆的中间接头,监控其局部放电强度大小,对于在局部放电超出安全强度之前,对缺陷部分进行维护十分必要。

局部放电过程常伴随光辐射、热辐射、电磁辐射及超声波等现象。局部放电监测方法主要有电气测量和非电气测量两类,前者包括脉冲电流法、超高频检测法、无线电干扰电压法及介质损耗分析法等^[2-6]。其中,脉冲电流法虽灵敏度高,但测量频率低、频带较窄、信息量相对较少,抗干扰能力较弱;超高频检测法具有检测信号频率高、抗外界干扰能力强、测量准确及灵敏度高的优点,但受到超高频电磁波信号在沿电缆传播时衰减迅速的限制,该方法主要用于尺寸较小的 XLPE 电力电缆中,对附件绝缘缺陷产生的局部放电进行检测。非电气检测方法包括化学法、光测法及超声法等。其中,利用化学方法进行局部放电检测的灵敏度低于电测法和声测法,其检测也难以发现较短时间内发生的放电故障。光测法由于设备相对昂贵、灵敏度不高,特别是需要植入设备内部,这极大限制了其现场应用。近年来,光纤传感技术在声波检测领域得到快速发展,基于光纤传感技术的声波监测方法具有不受电磁干扰、本质安全及长期稳定的优点,光纤本身柔软易弯曲的特性也更符合电力电缆的铺设要求。2015 年,ROHWETTER 等^[7]首次提出利用准分布式光纤声音传感器监测电力电缆连接头和终端的局部放电。2016 年,ZHANG 等^[8]展开基于迈克尔逊干涉仪监测局部放电的研究。2017 年,LI 等^[9]提出基于 Sagnac 光干涉法的局部放电监测技术。上述方法将光纤传感技术运用到电力设备的健康安全监测中,已取得一定成果,验证基于光纤传感技术的声波检测法用于检测局部放电信号的可行性。这些方法均以传感探头形式监测电力设备的某些特殊位置,具有点式或准分布式结构,对电网整体的分布式实时在线监测是更理想的方法。

为解决对电力传输电网进行分布式实时在线监

测的难题,本研究提出一种基于相敏光时域反射仪(phase-sensitive optical time-domain reflectometry, φ -OTDR)光纤传感技术的声波监测系统,在单模光纤中嵌入弱光栅阵列,以相邻光栅之间的光纤作为传感单元,对整段电缆包括其中间接头进行分布式在线监测,成功检测出 10 kV 电压等级下电缆中间接头局部放电产生的声波信号。该系统能准确快速地解调出每个电缆中间接头的局部放电信号,实现大规模分布式实时在线监测。

1 局部放电监测原理分析

在电缆产生局部放电过程中,正负电荷中和会产生瞬时脉冲电流,在脉冲电流作用下瞬间局放区域因受热导致体积膨胀,在放电结束后又迅速恢复原有体积。这种局部体积的瞬时变化最终导致周围介质的瞬时疏密变化,从而形成声波。由于局部放电信号是一种周期性的脉冲信号,因此,由其产生的声信号也是一种周期脉冲信号,具有很宽的声波频谱,一般在 $10 \sim 10^7$ Hz,且产生的声波能量主要集中在信号的低频段。

基于 φ -OTDR 技术的分布式系统是一种融合光时域反射仪(optical time-domain reflectometry, OTDR)和光纤后向瑞利散射光干涉技术的传感系统,将窄带激光器产生的激光调制为脉冲光进入传感光纤中,在调制脉冲宽度内与后向瑞利散射光发生干涉。当传感光纤的某一位置发生扰动时,由于光弹效应,该处光纤的折射率发生改变,从而导致光相位发生变化。利用 OTDR 的时分复用原理,根据后向反射光在时域的先后顺序,推算外界扰动信号的位置。

在传统 φ -OTDR 系统中,通过解调光纤中后向瑞利散射光的干涉信号监测扰动信号。但瑞利散射信号较弱,存在系统信噪比低、定位精度差等缺点。本研究提出增强型 φ -OTDR 系统,在传感光纤中等间隔加入反射率极低的弱光纤光栅,形成弱光栅阵列。与瑞利散射光相比,弱光栅反射回来的反射光具有更高的光强,能够有效提高干涉信号条纹可见度,提高系统信噪比^[10-11]。采用迈克尔逊干涉仪结构,当其长短臂臂差与弱光栅阵列的固定间隔相同时,相邻弱光栅反射回来的光在 3×3 耦合器处相遇并发生干涉。若传感光纤受到外界干扰信号,发生干涉的两束光之间的相位差会发生改变,导致干涉信号的强度发生变化。

3×3 耦合器作为功率分配器将光信号分成 3 路的同时, 使每路输出信号之间具有 120° 的相位差, 其 3 路输出信号可表示为

$$I_0 = D + E_0 \cos\left[\varphi(t) - \frac{2\pi}{3}\right] \quad (1)$$

$$I_1 = D + E_0 \cos[\varphi(t)] \quad (2)$$

$$I_2 = D + E_0 \cos\left[\varphi(t) + \frac{2\pi}{3}\right] \quad (3)$$

其中, I_0 、 I_1 及 I_2 分别为 3 路输出信号的光强; D 为输出光强的平均值; E_0 为干涉条纹的峰值强度; $\varphi(t)$ 为相位. 利用 3×3 耦合器解调算法^[12-14]可得

$$V_{\text{out}} = \sqrt{3} \varphi(t) = \sqrt{3} [\varphi(t) + \psi(t)] \quad (4)$$

其中, V_{out} 为输出信号; $\varphi(t)$ 为相位差信号, 即待测信号; $\psi(t)$ 为外界扰动引起的相位差, 即干扰信号, 一般为低频信号.

2 系统搭建

基于 φ -OTDR 的分布式声波监测系统原理如图 1, 窄线宽光源用于产生中心波长为 1 550 nm 的连续激光, 半导体激光放大器 (semiconductor optical

amplifier, SOA) 将该连续激光调制成周期和脉宽可控的脉冲光. 掺铒激光放大器 (erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA) 用来提高入射光强度, 提高系统信噪比, 由于 EDFA 放大光信号的同时也会放大系统噪声, 所以, 在 EDFA 后面接入 1 个滤波器, 可以有效抑制 EDFA 对系统噪声的放大. 脉冲光经过弱光纤光栅传感器时, 部分光反射回来, 大部分光透过光栅继续向后传播. 相邻两个弱光栅反射光进入 3×3 耦合器中, 经过迈克尔逊干涉仪的长臂和短臂 (两臂差 L 与相邻光栅间距有关, 本系统 $L = 5$ m), 被法拉第旋镜 (Faraday rotator mirror, FRM) 反射回来, 在耦合器中发生干涉. 3 个光电探测器分别探测 3×3 耦合器的 3 路输出信号, 将光信号转化成电信号, 利用高速数据采集卡 (最大实时采样率为 250 MS/s) 进行数据采集, 然后将数据传送至上位机进行信号解调、数据处理及结果显示. 图 1 中现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 部分用来产生两路脉冲信号及相应延时, 一路脉冲信号用来驱动 SOA, 另一路脉冲信号用来触发采集卡进行采集, 通过控制两路脉冲光之间的延时, 实现对弱光纤光栅阵列中每个光栅的逐一检测.

图 1 解调系统原理图

Fig. 1 Diagram of the interrogation system

系统中将激光器的连续光调制成典型时分复用系统中的脉冲光, 局部放电点距入射点的距离 d 为

$$d = \frac{c\tau}{2n_e} \quad (5)$$

其中, c 为光在真空中的传播速度; τ 为入射光和反射光之间的延时; n_e 为光纤的有效折射率. 通过计

算 τ 可确定 d , 从而判断产生局部放电区域的位置.

3 实验结果及分析

在配电网 10 kV XLPE 电缆的实际运行过程中, 大部分故障发生点位于电缆中间接头处. 为了尽可

能模拟真实环境, 实验加工了一段带有中间接头的 XLPE 电缆, 并在接头处人为做出缺陷, 在电缆加电压时即能产生局部放电现象.

图 2 为局部放电模拟发生装置, 将整段待测试电缆架空, 用高压发生器 (电压产生范围为 0 ~ 250 kV, 频率为 50 Hz) 为其提供所需电压. 由于空气和光纤之间的声音阻抗不匹配, 光纤对空气中的声音敏感度低, 导致直接利用光纤测量局放产生的声音信号效果不理想. 参考使用光纤麦克风中的振动薄膜结构^[15] 匹配这种声音阻抗, 利用一段很薄的铝箔作为振动薄膜提高系统监测灵敏度. 首先, 将一段铝箔缠绕在电缆接头处, 然后再将传感光纤紧贴在铝箔表面, 利用高压发电对电缆接头施加电压, 通过检测系统对电缆中间接头进行局部放电实验监测.

图 2 局部放电模拟发生装置

Fig. 2 (Color online) Partial discharge analog generator

传感光纤中弱光纤光栅的阵列间隔为 5 m, 3 dB带宽为 1.64 nm, 反射率约为 -40 dB, 中心波长为 1 550.24 nm. 系统的扫描脉冲宽度设置为 20 ns, 脉冲重复频率为 50 kHz. 根据奈奎斯特采样定理, 理论可测得的信号最大频率为 25 kHz, 该频率包含在局部放电产生声波信号的低频部分. 弱光栅阵列间隔决定了系统对产生局部放电故障点的定位精度为 5 m.

使用光纤传感监测系统进行电缆中间接头局部放电的实验结果如图 3. 测试过程中, 首先测量一组未加电压时系统的环境噪声, 如图 3 (a). 可见, 系统正常运行时的噪声幅值在 0.2 V 左右, 源于系统的电信号及光信号传输. 将电压由 0 逐步加到 50 kV, 并用光纤传感系统实时监测这一过程, 其系统

解调图如图 3 (b). 可见, 在电压逐渐上升至 8 kV 附近时, 系统开始监测到局部放电信号. 当电压增至 10 kV 时, 已经可以检测到比较明显的放电现象.

(a) 未加电压时的系统噪声信号

(b) 电压由 0 kV 逐渐加到 50 kV 时系统解调图

图 3 局部放电监测结果

Fig. 3 Detection results of the partial discharge

将电压固定在 10 kV, 测试系统监测到的局部放电信号, 然后分析该信号特征, 结果如图 4. 其中, 图 4 (a) 为局部放电的时域信号, 图 4 (b) 为其中一个电缆接头的声脉冲波形图. 由图 4 (a) 可见, 系统能够测到明显的声脉冲扰动信号, 信号幅值为 4 V, 产生频率为 50 Hz. 由于实验中使用的高电压发生器产生的电压频率为 50 Hz, 测得的声波信号产生频率与施加电压频率相等, 验证系统监测信号的准确性. 由图 4 (b) 可见, 系统监测到的声脉冲持续时间约为 5 ms. 该系统能准确快速地解调出每个电缆中间接头的局部放电信号, 从而实现大规模分布式实时在线监测.

将图 4 (a) 的时域数据进行快速傅里叶变换, 得到其频谱图如图 5. 可见, 局部放电声波信号频谱主要分布于 9 ~ 15 kHz. 该监测系统能准确测量 10 kV 电压下电缆中间接头的局部放电声波信号的振动频率信息.

最后, 利用手持式暂态地电压 (transient earth voltage, TEV) 装置在局部放电点附近进行检测, 检测到的局放信号十分微弱, 平均幅值约为 20 dB μ V, 如图 6. 可见, 相较于手持式监测装置只能进行单点、非实时检测的缺陷, 该系统不仅监测结果准确, 且能实现实时的分布式在线监测.

(a) 时域信号

(b) 单个电缆接头声波信号

图4 10 kV 电压下监测到的局部放电信号

Fig. 4 The result of partial discharge at 10 kV voltage

图5 解调信号频谱图

Fig. 5 The frequency spectrogram of the demodulated signal

结 语

本研究提出一种基于 φ -OTDR 光纤传感技术的电缆中间接头局部放电监测方法。通过模拟局部放

图6 手持式 TEV 检测结果图

Fig. 6 The result of handheld TEV

电发生环境,搭建一套基于光纤传感技术的局部放电监测系统.实验成功探测出 10 kV 电压等级下电缆中间接头局部放电产生的声波信号,该系统的频率响应范围为 100 Hz ~ 25 kHz,验证该系统用于实际监测局部放电中的可行性.通过与手持 TEV 的检测结果相比,证实该系统能进行实时分布式在线监测,在配电网健康安全检测中具有很大优势.传感系统结构简单,以光纤作为传感单元,可与电缆进行复合,或沿电缆进行铺设,对整段目标电缆及其沿线中间接头进行实时分布式在线监测.

本研究目前仅针对电缆进行短时间的实时监测,后续研究需进行长时间监测,通过分析实验数据,明确绝缘层损坏程度与局部放电所产生声波信号特性之间的关系.在电缆实时监测过程中,利用模式识别和深度学习等相关技术,对局部放电产生的声波信号进行特性分析,达到实时监测电缆绝缘性能状况的目的.

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技研究资助项目(SZKJXM20170324)

作者简介:皮昊书(1985—),深圳供电局有限公司福田供电局工程师.研究方向:电气工程及其自动化. E-mail: phs0810@163.com

引文:皮昊书,韦盈释,陈金锋,等.基于光纤传感技术的电缆接头局部放电监测[J].深圳大学学报理工版,2020,37(1):57-62.

参考文献 / References:

[1] 张义龙,李立学,郑益慧,等.110 kV 电缆中间接头局部放电高频电磁检测与优化[J].电气自动化,2015,37(6):102-105.

ZHANG Yilong, LI Lixue, ZHENG Yihui, et al. High-frequency electromagnetic detection and optimization of

<http://journal.szu.edu.cn>

- partial discharge of 110 kV cable intermediate heads [J]. *Electrical Automation*, 2015, 37(6): 102-105. (in Chinese)
- [2] GROSS D W, SOELLER M. On-site transformer partial discharge diagnosis [C]// *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. San Juan, USA: IEEE, 2012: 558-564.
- [3] WANG Youchen, ZHU Chaojie, WANG Qiaohua, et al. Processing of partial discharge ultra-high frequency signals from a true size transformer [C]// *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Bologna, Italy: IEEE, 2013: 1012.
- [4] MA Guoming, LI Chengrong, MU Ruiduo, et al. Fiber Bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(1): 380-385.
- [5] POSADA-ROMAN J, GARCIA-SOUTO J A, RUBIO-SERRANO J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems [J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4793-4802.
- [6] 孙廷玺, 陈浩, 钱森, 等. 光纤传感技术在局部放电监测的研究进展[J]. *高压电器*, 2018, 54(11): 9-16.
- SUN Tingxi, CHEN Hao, QIAN Sen, et al. Research progress of optical fiber sensing technology in partial discharge monitoring [J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(11): 9-16. (in Chinese)
- [7] ROHWETTER P, EISERMANN R, KREBBER K. Distributed acoustic sensing: towards partial discharge monitoring [C]// *The 24th International Conference on Optical Fibre Sensors*. Curitiba, Brazil: SPIE, 2015, 9634: 96341C.
- [8] ZHANG Tongzhi, PANG Fufei, LIU Huanhuan, et al. A fiber-optic sensor for acoustic emission detection in a high voltage cable system [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2026.
- [9] 李晓敏, 高妍, 王宇. 基于光纤传感技术的局部放电超声信号检测方法研究[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(11): 5-10.
- LI Xiaomin, GAO Yan, WANG Yu, et al. Study on partial discharge ultrasonic signal detection method based on optical fiber sensing technology [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(11): 5-10. (in Chinese)
- [10] 黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 234-241.
- LI Wei, ZHANG Yongjia. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based weak grating array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 234-241. (in Chinese)
- [11] TANG Jianguan, LI Liang, GUO Huiyong, et al. Distributed acoustic sensing system based on continuous wide-band ultra-weak fiber Bragg grating array [C]// *The 25th International Conference on Optical Fiber Sensors*. Jeju, South Korea. IEEE, 2017: 1032304.
- [12] 刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分布式振动探测系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 313-318.
- LIU Sheng, HAN Xinying, XIONG Yuchuan, et al. Distributed vibration sensing system based on the weak fiber Bragg grating array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 313-318. (in Chinese)
- [13] 张晓峻, 康崇, 孙晶华. 3×3 光纤耦合器解调方法[J]. *发光学报*, 2013, 34(5): 665-671.
- ZHANG Xiaojun, KANG Cong, SUN Jinhua. Demodulation method on the 3×3 optical fiber coupler [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(5): 665-671. (in Chinese)
- [14] TODD M D, SEAVER M, BUCHOLTZ F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(15): 784-786.
- [15] IIDA T, NAKAMURA K, UEHA S. A microphone array using fiber Bragg gratings [C]// *The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*. Portland, USA. IEEE, 2002: 239-242.

【中文责编: 方圆; 英文责编: 溯心】