

# 长距离高落差 GIL 多参量集成监测研究与应用

张兆闯<sup>1</sup>, 陈建国<sup>2</sup>, 韦晓莹<sup>3</sup>, 张宝<sup>3</sup>, 刘玉鹏<sup>3</sup>, 王喜春<sup>3</sup>, 陈青涛<sup>3</sup>, 张孟辰<sup>3</sup>, 周涛<sup>3</sup>

- 溪洛渡水力发电厂, 云南 昭通 657300;
- 江苏南瑞恒驰电气装备有限公司, 江苏 无锡 214161;
- 航天光电科技发展(天津)有限公司, 天津 300192

**摘要:** 针对气体绝缘金属封闭输电线路 (Gas Insulated Transmission Lines, GIL) 外壳振动、温度、应变等多参量通过分布光纤传感技术完成数据采集, 并针对采集数据进行研究和应用。通过振动、应变、温度监测试验和数据分析, 系统可准确测得光纤感知的振动、应变和温度数据, 数据准确可靠。经测试系统测温精度 $\leq \pm 0.5$  °C, 温度空间分辨率 $\leq \pm 0.6$  m, 定位精度 $\leq \pm 0.3$  m; 系统应变测量精度 $\leq \pm 20$   $\mu\epsilon$ ; 系统振动定位精度 $\leq \pm 2$  m, 振动定位精度 $\leq \pm 2$  m。通过对 GIL 外壳振动、温度、应变等多参量进行集成监测研究, 在减少传感设备数量的前提下探索 GIL 运行规律。

**关键词:** GIL; 多参量监测; 分布式光纤传感; GIL 运行规律

**中图分类号:** TM7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230602

## 0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路 (Gas Insulated Transmission Lines, GIL), 与架空输电线路相比较更适用于高压和超高压远距离、大容量的电力传输, 其载流量很高, 电容比高压电缆小的多, 因而即使长距离输电, 也不需要无功补偿, 而且 GIL 安装方便、运行维护简单、故障率较低, 所以 GIL 线路现在越来越多的应用于国内外的项目中, 在大型水电站、升压站、高压电网中的应用也不断增加<sup>[1-5]</sup>。

GIL 的技术发展可分为三个阶段: 第一代 GIL 采用纯 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质, 充气压力为 0.3 ~ 0.4 MPa; 第二代 GIL 采用体积分数 20%SF<sub>6</sub> ~ 80%N<sub>2</sub> 混合气体作为绝缘介质, 充气压力为 0.7 ~ 0.8 MPa; 第三代的干燥洁净压缩空气, 充气压力为 1 ~ 1.5 MPa。第二代 GIL 与第一代 GIL 相比, 较大程度上简化了绝缘概念, 减少了绝缘材料的使用, 通过增大气压使得 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub> 气体可以混合稳定运行, 且使用了新的焊接工艺, 同时改善了敷设技术, 在环保水平上得到加强。第三代 GIL 则在环保技术水平上进一步加强, 降低污染。当前技术水平已达到第三发

展阶段, 市场上处于各阶段技术共存的局面<sup>[6-7]</sup>。

随着 GIL 制造工艺不断成熟, GIL 的安全性和可靠性也逐步提升。但是在实际应用中还会面临诸多问题, 如: 绝缘故障风险、SF<sub>6</sub> 气体泄露风险、异常发热风险、解产物/度超标风险、局部放电风险、基础沉降风险等。在 GIL 建设规模进一步扩大的情况下, 需要更有效的检测/监测手段解决 GIL 所出现的风险。

某电站左、右岸共布置 7 回 550 kVGIL 设备, 单相长度在 551 ~ 634 m 之间, 左岸及右岸垂直高落差为 475 m 和 480 m, 作为某电站的全部电力外送通道, 其运行的安全稳定对电站来说至关重要, GIL 出现故障会极大影响电力输送可靠性并将造成极大的经济损失<sup>[8-10]</sup>。

某电站 GIL 设备在运行中曾出现过异常声音及振动现象。为进一步加强 GIL 的监测运行, 同时减少大量传感设备对设备自身结构的影响, 针对前述情况, 文中拟对 GIL 外壳振动、温度、应变等多参量进行集成监测研究, 在减少传感设备数量的前提下探索 GIL 运行规律。

分布式光纤与传统的检测/监测技术相比, 在技

收稿日期: 2023-10-10; 修订日期: 2023-12-11

基金项目: 中国长江电力股份有限公司某项目 (Z412302008)

作者简介: 张兆闯, 男, 高级工程师, 主要从事水电站电气一次设备方面的研究。

术性能和实际应用方面具有绝对的优势,可以对温度、位移、振动、压力等物理量进行检测,具有灵敏度高、无电磁辐射、动态范围大、适应范围广等优点,是长距离安防监测技术发展的主流方向,同时在电力领域显示出巨大的发展潜力<sup>[11-15]</sup>。文中采用分布式光纤传感技术实现 GIL 外壳振动、温度、应变等多参量进行集成监测,填补了该领域的空白。

## 1 监测原理以及设计

分布式光纤传感监测技术主要基于光在光纤中传输时,由于光纤材料的密度、折射率等存在不均匀性,入射光会产生散射现象,包括瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。

分布式光纤振动传感系统是基于相干瑞利散射的分布式光纤传感器,超窄线宽激光器(Laser)发出来的脉冲光,通过电光调制器(EOM)的调制后,送入到光纤中去。利用光纤对振动敏感的特性,当外界振动作用于传感光纤上时,由于弹光效应,光纤的折射率、长度将产生微小变化,从而导致光纤内传输信号的相位变化,使得后向散射的干涉光强发生变化,该点的相干瑞利散射信号强度发生变化,通过测振动前后的瑞利散射光信号的强度变化,即可实现振动事件的探测,并精确定位。

分布式光纤温度应变传感系统(BOTDA)基于受激布里渊散射效应,利用两个超窄线宽的激光光源,分别为泵浦光(脉冲光信号)和探测光(连续光信号),在传感光纤的两端分别注入,在传感光纤的脉冲光端测量探测光信号,并进行高速数据采集与处理。当泵浦光与探测光的频率差与光纤中某个区间的布里渊频移相等时,该区域就会发生受激布里渊放大效应,两束光之间发生能量转移。通过扫描探测光频率,可获得光纤沿线任一点的布里渊频谱,从而得到分布式温度和应变测量。由于采用了受激布里渊放大效应,传感光纤末端的散射信号被有效放大,因此 BOTDA 可实现长达 120 km 测量距离的高精度测量,测量性能远远优于基于拉曼散射的光纤传感器。

## 2 GIL 管线参数分析

GIL 外壳和导体都是发热体,外壳和导体的电阻损耗所产生的热量使其温度升高,并向周围的环境散

热,当发热量与散热量相等时,GIL 处于热稳定状态。GIL 温升特性是 GIL 设计最关键参数之一,也是判断 GIL 运行状态最直观的特征参数。按照相关要求,GIL 壳体及可触及部位的温度不能超过 70℃。

工程中 GIL 实际运行情况与仿真计算、型式试验条件均有差异,除了故障时产生温升之外,应用环境对 GIL 影响较大。因此需要监测 GIL 带电时温升情况,充分验证理论计算结果和实际情况的差异性,提出合理有效的运维措施。

在整个系统运行过程中,管线(内部导体和外部外壳)将受到频率为 50 Hz 的电动力,在紧急情况下的频率可能达到 100 Hz。在设计过程中必须计算 GIL 的固有频率,使得产品的固有频率避开 50 Hz 与 100 Hz,以免发生共振现象。

以某电厂 GIL 工程中导体结构进行理论计算以及建模计算,代入参数为导体内径 160 mm,导体外径 180 mm,导体长度 11 500 mm,密度 2 700 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 78 GPa,泊松比 0.33。

固有频率的计算使用 COMSOL 软件中的“梁”物理量及特征频率求解器,在截面数据中选择端面类型“管”,将参数外直径与内直径填入,选择左侧端面作为固定约束,进行简单的离散化处理,将求解器中待求特征频率改为 12,求解,选择振型,可以得出简化 GIL 的 12 阶频率数值与振型。图 1 和图 2 分别为

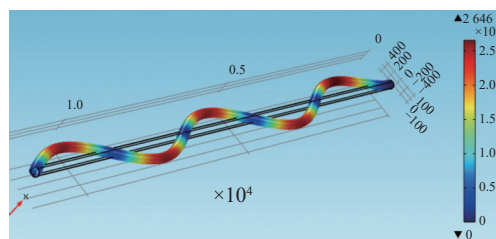


图 1 9 阶振型

Fig.1 9 order vibration type

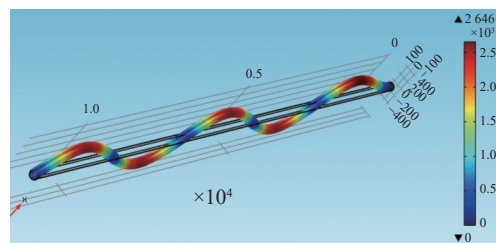


图 2 10 阶振型

Fig.2 10 order vibration type

9 阶和 10 阶振型图。

短路电动力主要频率成分为 100 Hz, 从表 1 中可以看出, 12 阶频率中第 9、10 阶频率与 100 Hz 非常接近。在设计中避免 GIL 100 Hz 的固有频率。

表 1 各阶频率

Tab.1 Frequency of each order

| Frequency order | Frequency/Hz | Frequency order | Frequency/Hz |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1 order         | 5.6266       | 7 order         | 64.571       |
| 2 order         | 5.626 6      | 8 order         | 64.571       |
| 3 order         | 18.199       | 9 order         | 98.201       |
| 4 order         | 18.199       | 10 order        | 98.201       |
| 5 order         | 37.875       | 11 order        | 110.48       |
| 6 order         | 37.875       | 12 order        | 110.48       |

某电厂 GIL 正常运行电动力接近 50 Hz 的特征频率为 42.7 Hz。幅度 1 kN/m、频率 100.77 Hz、阻尼 1% 将导致最大 1.3 mm 的位移和 17.6 N/mm<sup>2</sup> 的应力。

短路时电动力接近 100 Hz 的特征频率为 100.77 Hz。幅度 1 kN/m, 频率 42.7 Hz, 阻尼 1% 将导致最大 31.7 mm 的位移和 207 N/mm<sup>2</sup> 的应力。

除了管线短路时会引起位移的变化外, 基础沉降也会引起位移的变化, 通过应变实时监测, 能够随时掌握管线的健康状态。

### 3 系统架构

长距离高落差 GIL 多参量集成分布式光纤传感监测系统 (见图 3) 是利用多芯光缆作为传感单元, 通过计算机对数据进行采集和控制, 实现长距离、大范

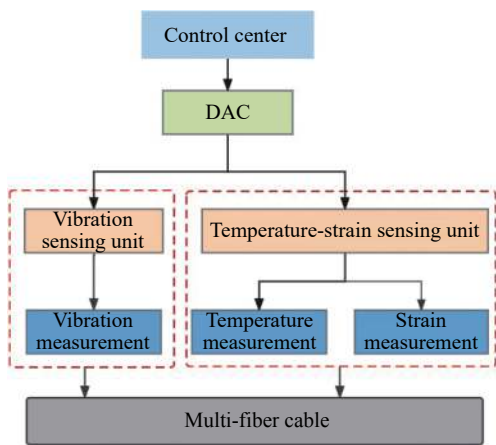


图 3 系统机构图

Fig.3 Figure of system mechanism

围管线安全监测。系统主要包括温度应变测量单元、振动测量单元、多芯光缆、数据采集中心和控制平台。

### 4 测试验证

该测试充分了解了不同电压等级下 GIL 运行状态, 以及故障类型, 研究适用于长距离高落差 GIL 监测关键参数制约技术, 使设备满足 220~1 100 kV 电压等级下 GIL 故障监测, 能够同时从多个维度进行监测, 提升系统故障监测能力。该测试中所得到的测量精度均为测试值和实际标定值之间的差值。

#### 4.1 温度测试验证

采用双芯传感光纤中的松套光纤进行温度测试。测试时实验室温度为 27 °C 左右。同时选取一段 1 m 的光纤放入温箱中, 以 1.5 °C/min 的速率将温箱升到 60 °C。稳定 5 min 后, 放入温箱加热的光纤显示最高温度为 60.7 °C, 如图 4 所示。通过查看历史曲线可以看出, 随着温箱温度的升高, 光纤感受的温度也在逐步上升, 最后温度稳定在 60 °C 左右。由此可以说明光纤能够实时精确反映温度的变化, 如图 5 所示。

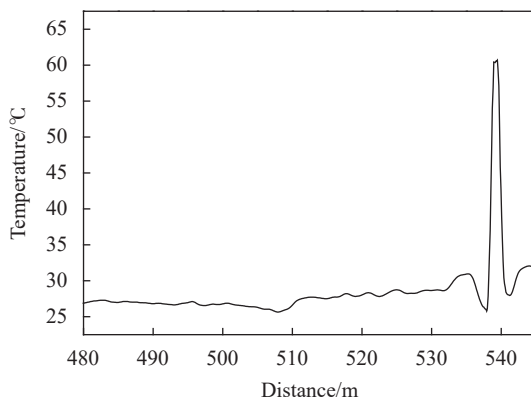


图 4 温度测量曲线

Fig.4 Temperature measurement curve

随后对系统温度精度进行了验证, 如图 6 所示。光纤置于环境温度中, 环境为误差小于 1 °C。查看历史数据, 选取光纤任一点在 20 min 之内温度, 查看温度变化趋势。通过历史数据曲线可以看出, 在一定时间内, 环境温度稳定的情况下, 光缆的温度在 27 °C 和 27.5 °C 之间变化, 变化值 ≤ 0.5 °C, 因此光缆的温

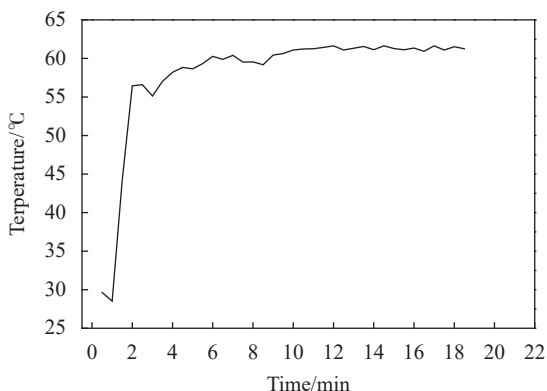


图 5 温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curve

度测温精度在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。

定位精度验证时,在光纤较远处任取一段 2 m 左右的光纤进行加热,从光纤测温显示系统读取显示该测量点的位置为 539.35 m(第一次测量值),在此测量的基础上,用标准尺沿光纤向后测量 10 m 位置再进行加热,从光纤测温显示系统读取显示该测量点的位置为 549.62 m(第二次测量值),第二次测量值 549.62 m 减去第一次测量值再减去 10 m,差值为 0.27 m 即为该系统定位精度值,如图 7 所示。

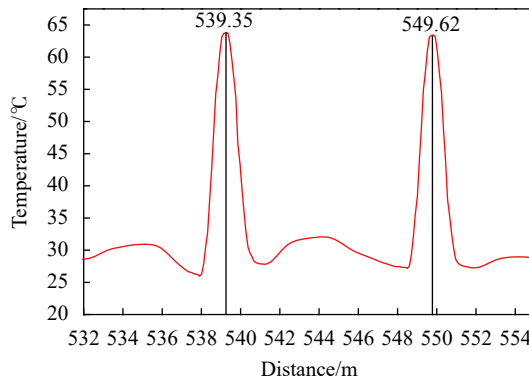


图 7 定位精度验证图

Fig.7 Figure of positioning accuracy verification

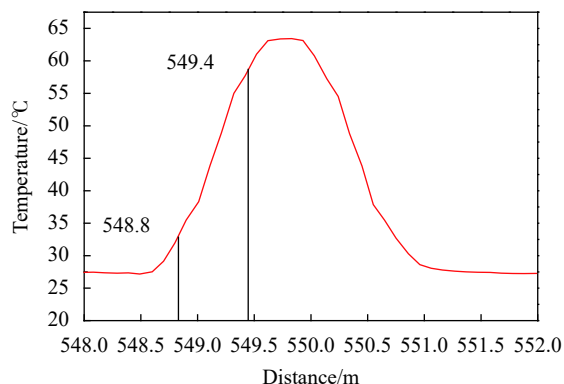


图 8 空间分辨率验证图

Fig.8 Figure of spatial resolution validation

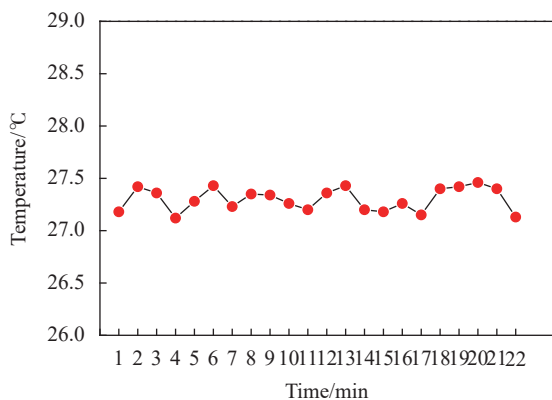


图 6 精度验证图

Fig.6 Figure of accuracy verification

将约 2 m 的光纤放入  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温箱中加热,根据测温显示系统结果读取  $30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $61.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  这一段光纤的长度,取温度上升 10% ~ 90% 这段长度,该段长度为系统的空间分辨率。经测试验证,如图 8 所示温度上升 10% 和 90% 处对应的距离值分别为 548.8 m 和 549.4 m,相距离为 0.6 m,因此该系统的空间分辨率为 0.6 m。

## 4.2 应变测试验证

选取 500 m 和 5 000 m 传感光纤,同时任意选取 3 m 的光缆安装在测试体上。将光纤固定好之后,标定选取的 3 m 位置。固定好的光缆在没有施加拉力时,应力曲线与对比参考曲线无变化,固定光缆处的应力显示约为  $1200\text{ }\mu\epsilon$ ,如图 9 所示。开始对固定好的光缆施加拉力,当施加 2 mm 的拉力时,应变变大,约  $1900\text{ }\mu\epsilon$ ;当继续施加约 4 mm 的拉力时,应变数值继续变大,约为  $2500\text{ }\mu\epsilon$ ,如图 10 所示。由此可以验证当给光缆施加相应的拉力,系统能够实时反映出应力的变化。

图 11 是施加 2 mm 和 4 mm 拉力下光纤重复性变化测试曲线图。在测试过程中,先给光缆施加 2 mm 的拉力,稳定 5 min 左右,将回到自然状态下,稳定 5 min 后,再施加 2 mm 的拉力,重复进行 5 次后,给光缆施加 4 mm 的拉力,稳定 5 min 后,再回到 2 mm 拉力的状态下,稳定 5 min 后再施加 4 mm 的拉力,重复进行 4 次。从测试结果可以看出,经过多次

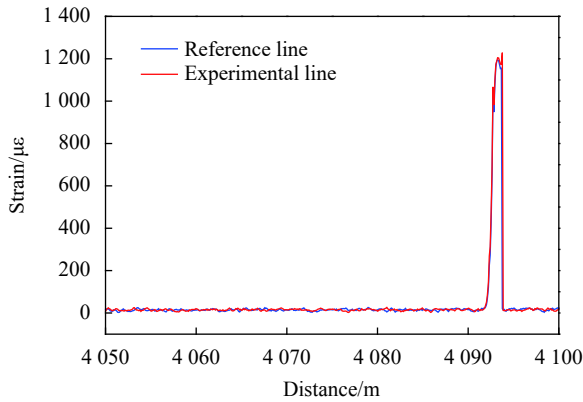


图 9 应变曲线图

Fig.9 Strain change curve

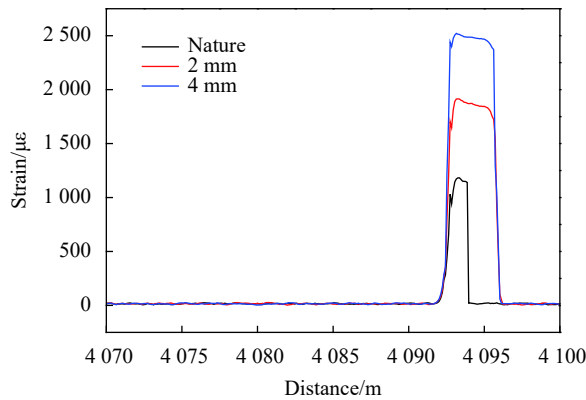


图 10 应变曲线图

Fig.10 Strain change curve

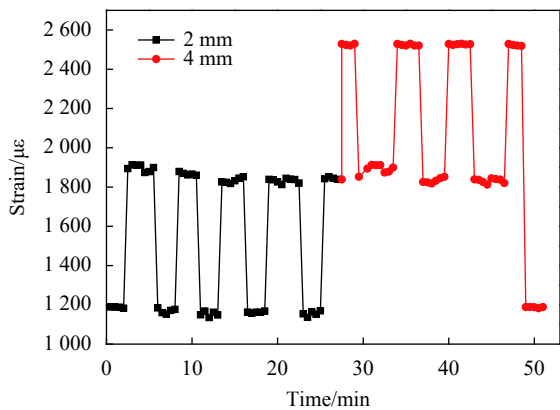


图 11 应变重复性验证图

Fig.11 Figure of strain repeatability verification

的反复测试, 光缆的应变性能是可逆的, 测试系统是稳定的。

随后对系统应变精度测量进行了验证, 如图 12 所示。光缆施加 2 mm 的拉力稳定后, 持续 30 min。

查看历史数据得到应变变化趋势。通过历史数据曲线可以看出, 在一定时间内, 施加拉力稳定情况下, 应变值在 1 872~1 892  $\mu\epsilon$  之间变化, 变化值不超过 20  $\mu\epsilon$ 。因此光缆的应变测量精度在  $\pm 20 \mu\epsilon$  以内。

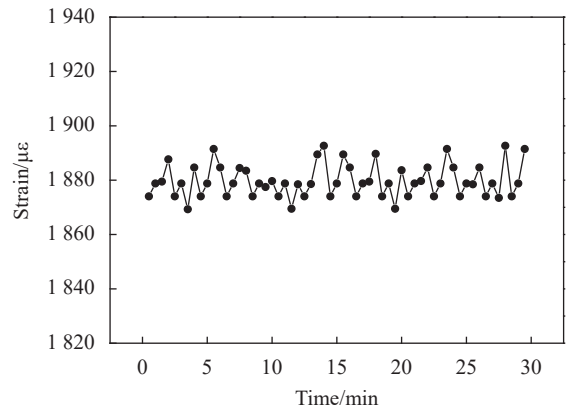


图 12 应变精度验证图

Fig.12 Figure of strain accuracy validation

### 4.3 振动测试验证

图 13 为系统检测到的振动信号原始数据, 通过算法解调后实现振动强度数据处理, 从图 14 可以看出, 原始振动数据通过移动平均等算法处理后, 未发生振动处基本为一条平线, 有振动信号处数据有明显的变化。

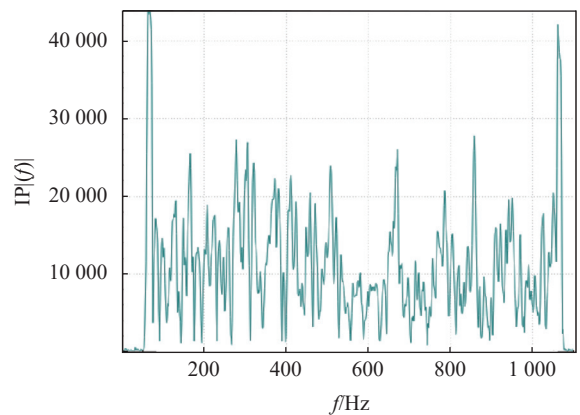


图 13 原始曲线

Fig.13 Primitive curve

通过手机模拟软件在光纤附近产生稳定频率 200 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz 振动信号, 通过系统软件频域分析解调后可确认系统分辨率  $\leq 2$  Hz、频率精度  $\leq \pm 1$  Hz, 如图 15 所示。

在光纤 1 009 ~ 1 011 m 处产生振动信号, 因为振

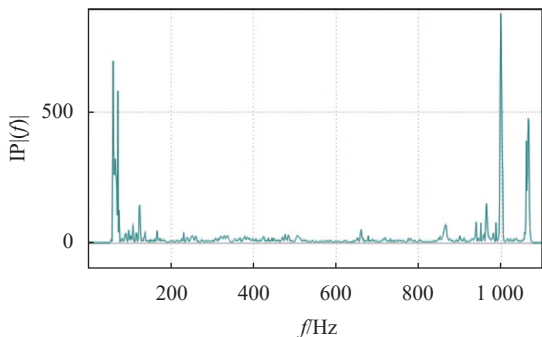


图 14 解调后曲线

Fig.14 Curve after demodulation

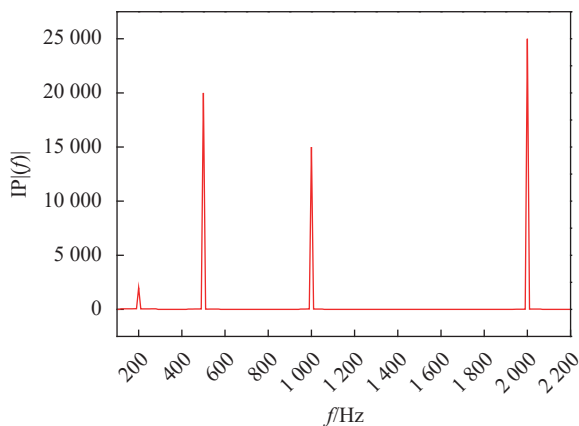


图 15 不同频率振动解析图

Fig.15 Analysis figure of vibration at different frequencies

动信号沿光纤传递,如图 16 所示软件解调约在 1 000 ~ 1 020 m 处检测到振动强度曲线图,波峰出现在 1 010 m 处,定位精度  $\leq 2$  m。

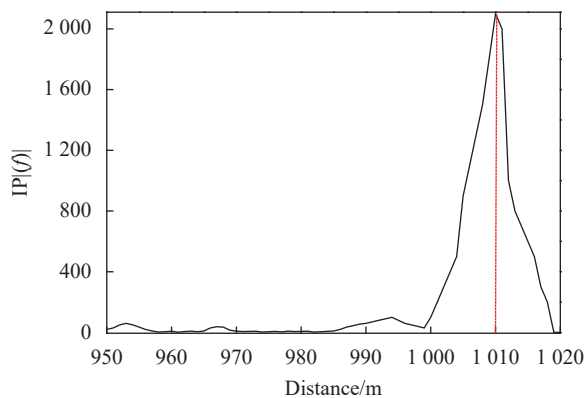


图 16 振动定位精度测试图

Fig.16 Figure of vibration positioning accuracy test

## 5 GIL 监测分析

图 17 为现场监测一天时间内、管线同一位置点

随时间变化温度曲线。从曲线可以看出,从凌晨到早上 8 点,温度由高变低,持续到下午 4 点左右,在晚上 10 点左右达到最高值。当管线负载量变大时,管线外壳的温度也会随之上升。在晚上 10 点左右用电量最大,因此温度最高。通过分析可知,系统能够实时监测管线温度变化情况。

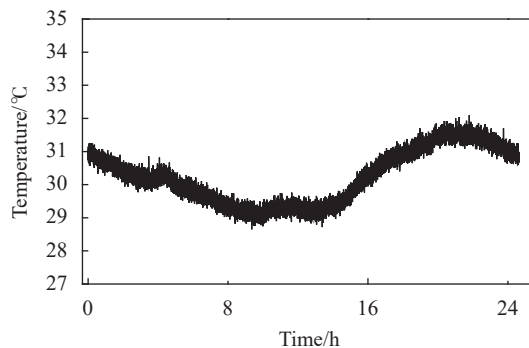


图 17 温度分布曲线

Fig.17 Temperature distribution figure

通过分布式振动系统对 GIL 管线上的振动频率进行检测,在正常运行时,监测的振动频率为 50 Hz,检测结果与正常运行电力频率 50 Hz 一致,如图 18 所示。

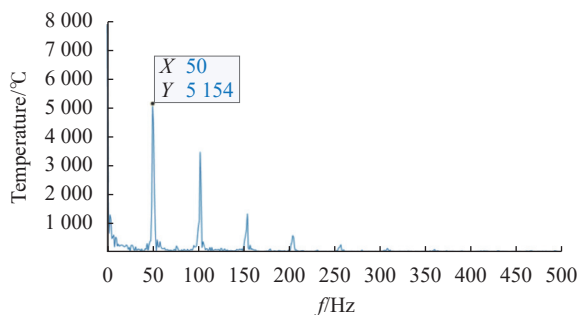


图 18 振动监测频率图

Fig.18 Figure of vibration monitoring frequency

通过现场测试结果分析表明,分布式光纤传感监测系统能够实时在线监测管线的温度、应变、振动情况,能够直观地将数据呈现出来供维护者查看,实施掌握管线的运行状态。

## 6 结 论

文中主要围绕基于分布式光纤传感技术,开展对 GIL 外壳的振动、温度、应变等多参量信号集成采集监测。结合应用环境和项目目标,在计算方法理论和

应用研究的基础上,通过测试验证数据分析,确保整机监测系统研制的可靠性,实现整机系统的性能指标,满足系统在长距离高落差 GIL 管线上多参量监测要求。一条光纤就可实现对 GIL 管线全程多点位的传感测量,直观展示 GIL 的运行状态。后续可继续深入开展管线故障识别优化研究,提高模型智能化,为 GIL 管线智能化运维提供技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] Ma Rongliang, Yang Shufeng, Weng Liting. Location and cause analysis of partial discharge due to temperature variation induced expansion and contraction of GIL pipeline [J]. *Hydropwer and New Enegy*, 2013, 37: 44-47. (in Chinese)
- [2] Wang Lixian, Ma Hongzhong, Dai Feng. Research on GIL mechanical fault diagnosis and early warning technology. [J]. *Electric Machines and Control Application*, 2021, 48(8): 106-113. (in Chinese)
- [3] Ruan Quanrong, Shi Wei, Sang Zhiqiang. Questions to be considered for using 750 kV GIL at laxiwa hydroelectric power station [J]. *High Voltage Apparatus*, 2003, 39(4): 66-69. (in Chinese)
- [4] Yang Qi. Research on fault location method of GIS busbar based on fault current distribution [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2011, 47(8): 72-74. (in Chinese)
- [5] 阮全荣, 谢小平. 气体绝缘技术封闭输电线路工程设计研究与实践 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2011.
- [6] 电力传输之 GIL:特高压中的 Alpha, 前景广阔静待花开 [EB/OL]. [2023-11-06]. <https://xueqiu.com/3797338236/233317855>.
- [7] 中国 GIL 输电行业市场现场分析 [EB/OL]. [2023-11-11]. <https://max.book118.com/html/2022/1208/7065042055005022.shtml>.
- [8] 高长玲, 谢强, 张世璐, 等. 特高频局放定位系统在 500 kV GIL 中的应用 [J]. *水电站机电技术*, 2014, 37(5): 1-4.
- [9] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 253-256.
- [10] Feiye. Research on temperature rise characteristics and ultrasonic fault location technology of UHV GIL [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)
- [11] Shi Cheng. Fault location system of GIL based on  $\phi$ -OTDR and optical interference[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018. (in Chinese)
- [12] Zhang Chuntao, Qin Zhen, Bai Dunquan, et al. Research and application of GIL integrated pipe gallery automatic deformation monitoring system based on IoT [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(1): 45-48. (in Chinese)
- [13] Lv Anqiang. Research on condition monitoring of optical fiber composite submarine power cable based on distributed strain and temperature sensing technology using optical fiber[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese)
- [14] Xiao Ju, Duan Pengfei. Research on optical fiber sensor network monitoring system for building structural health[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210263. (in Chinese)
- [15] Guan Liwei, Lu Yu, He Zhijie, et al. Design and development of an intelligent security alarm system based on optical fiber sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20200028. (in Chinese)

## Research and application of long-distance high-drop GIL multiparameter integrated monitoring

Zhang Zhaochuang<sup>1</sup>, Chen Jianguo<sup>2</sup>, Wei Xiaoying<sup>3</sup>, Zhang Bao<sup>3</sup>, Liu Yupeng<sup>3</sup>, Wang Xichun<sup>3</sup>,  
Chen Qingtao<sup>3</sup>, Zhang Mengchen<sup>3</sup>, Zhou Tao<sup>3</sup>

(1. Xiluodu Hydropower Plant, Zhaotong 657300, China;

2. Jiangsu Nari Hengchi Electrical Equipment CO., Ltd., Wuxi 214161, China;

3. Aerospace Photoelectric Technology Development (Tianjin) Corporation, Tianjin 300192, China)

#### Abstract:

**Objective** Compared with traditional detection/monitoring technology, the distributed optical fiber has absolute advantages compared with traditional method in terms of technical performance and practical application. It can detect the physical quantities such as temperature, displacement, vibration, and pressure, and has the advantages

of high sensitivity, no electromagnetic radiation, large dynamic range, and wide adaptation range. In order to further strengthen the monitoring and operation of GIL and reduce the influence of a large number of sensing equipment on the structure of the equipment, the integrated monitoring and research of GIL shell vibration, temperature and strain is carried out. An optical cable realizes multi-parameter signal sensing, and the operation law of GIL is explored on the premise of reducing the number of sensing equipment.

**Methods** Long-distance high-drop GIL multi-parameter integrated distributed optical fiber sensing and monitoring system uses multi-core optical cable as a sensing unit to collect and control data by computer to realize long-distance and large-range pipeline safety monitoring. The system mainly includes temperature and strain measuring unit, vibration measuring unit, multi-core optical cable, data acquisition center and control platform (Fig.3).

**Results and Discussions** The vibration, temperature, strain and other multiple parameters of the gas insulated metal closed transmission line called GIL are collected through distributed optical fiber sensing technology, and the data are studied and applied for the collected data. Through vibration, strain, temperature monitoring test and data analysis, the system can accurately measure the vibration, strain and temperature data of optical fiber perception, and the data is accurate and reliable. The temperature measurement accuracy of the test system is  $\pm 0.5$  °C, temperature spatial resolution is  $\pm 0.6$  m, positioning accuracy is  $\pm 0.3$  m, system strain measurement accuracy is  $\pm 20$   $\mu\epsilon$ , system vibration positioning accuracy is  $\pm 2$  m and vibration positioning accuracy is  $\pm 2$  m. Through the integrated monitoring study of GIL shell vibration, temperature, strain and other multiple parameters, the GIL operation rule is explored under the premise of reducing the number of sensing devices.

**Conclusions** Distributed fiber sensing technology is used to carry out multi-parameter signal collection and monitoring of vibration, temperature and strain of GIL shell. Combined with the application environment and project objectives, on the basis of calculation method theory and application research, the reliability of the development of the monitoring system of the whole system is ensured, the performance index of the whole system is realized, the multi-parameter monitoring requirements for the long-distance and high-drop GIL pipeline is met. A single optical fiber can realize the sensing and measurement of multiple points throughout the GIL pipeline, and intuitively show the running status of GIL. In the future, the system will continue to go deep into the pipeline fault identification, improve the intelligence of the model, and provide technical support for the intelligent operation and maintenance of the GIL pipeline.

**Key words:** GIL; multi-parameter monitoring; distributed optical fiber sensing; GIL operating rules

**Funding projects:** China Yangtze Power Co.,Ltd (Z412302008)