[开关柜]

基于光纤光栅测温技术的变电站开关柜故障诊断方法

文/李松
北京市京电博源供用电工程安装有限公司

为实现对开关柜运行状态的不间断监控，及时诊断并预防潜在的运行隐患，提升故障检测的准确性，确保开关柜的稳定可靠运行，利用光纤光栅测温技术，提出一种高效的变电站开关柜故障诊断方法。首先，布设故障监测点，安装光纤光栅温度传感器。其次，利用光纤光栅测温技术，实现对变电站开关柜温度的实时监测和准确测量。在此基础上，根据开关柜内部温度的变化，与正常温度范围进行比较，诊断故障。实验结果表明，该方法应用后，在涵盖的六种不同故障类型样本中，均展现出极高的诊断精准度，应用效果优势显著。

开关柜运行过程中，受到设备老化、人为操作失误以及外部环境的复杂多变影响，存在潜在的风险源。这些潜在的风险一旦转化为实际故障，若未能得到及时地察觉与处理，不仅将威胁变电站的稳定运行，更可能对整个电力系统造成不可估量的损害。因此，对开关柜的故障诊断，显得尤为重要。

传统的变电站开关柜故障诊断方法多数采用文献[1-2]提出的方法原理，在实际应用中仍然存在缺陷。其中，文献[1]提出利用神经网络提取故障特征，诊断故障类型和位置。在某些复杂情况下，诊断准确性较低。文献[2]提出方法依赖于对开关柜内部结构和工作原理的深入理解，通过建立数学模型来模拟开关柜的运行过程，进而诊断出异常或故障状态，难以适应实际运行环境中多变的条件和不确定性。

光纤光栅测温技术能够为故障诊断提供可靠的数据支持。该技术利用光纤光栅的波长编码特性，通过测量光纤光栅反射光的波长变化来感知温度的变化，进而实现对开关柜内部温度的实时监测，提高故障诊断的准确性。因此，本文利用光纤光栅测温技术，提出一种高效的变电站开关柜故障诊断方法，实时监测开关柜的运行状态，及时发现潜在故障，确保开关柜的可靠运行，减少因故障导致的停电时间和经济损失。

变电站开关柜故障诊断方法设计

1. 布设故障监测点

根据变电站开关柜的布局、工作条件以及历史故障数据，确定需要监测的关键部位和潜在故障点。制定监测点布设方案，见表1。

表1　监测点布设方案

序号	项目	参数
1	监测点数量	50个
2	监测点位置	母线触头、电缆接头、断路器、隔离开关等关键部位
3	传感器类型	光纤光栅温度传感器
4	测量范围	−55～+125 ℃
5	精度	±0.5 ℃
6	响应时间	小于1 s

根据开关柜的电气接线图和实际情况，确定需要监测的母线触头、电缆接头等关键部位。优先选择易发生故障或散热不良的区域作为监测点。使用导热硅胶将光纤温度传感器与需要监测的母线、触点等粘贴在一起，确保良好的热传导。对于某些难

以直接粘贴的部位，使用塑料套固定住传感器，避免其受到机械损伤或移位。需要注意，传感器的安装位置应便于后续的维护和更换。将传感器通过单模光纤光缆连接到数据采集器，确保每个监测点都能够连接到数据采集器并传输数据。根据开关柜的实际布局和光纤线路的走向确定光纤长度。光纤线路应避开高温、高压和高磁场等干扰源，确保信号的稳定传输且能够覆盖所有监测点，并连接到数据采集器。在此基础上，将数据采集器安装在开关柜面板或开关柜外其他低温低压地方，确保其在适宜的工作环境中运行。将监控主机安装在变电站的控制室内，便于工作人员进行实时监测和管理。启动光纤光栅测温系统，检查各部件的工作状态是否正常。

2. 基于光纤光栅测温技术的开关柜温度监测数据采集

启动光纤光栅测温系统的监控主机，进行系统自检和初始化。接下来，监控主机向光纤光栅温度传感器发出启动指令，使这些传感器从待机状态转变为活跃模式。监控主机首先生成一系列宽频脉冲光信号。这些信号随后经过光纤放大器的精密增强，确保信号强度足以覆盖至每一个光纤光栅温度传感器。当这些强化的光信号抵达传感器时，传感器会凭借其高准确度的感知能力，根据其所处环境的温度情况，反射出一个独特的窄频脉冲信号，该信号精确映射了当前环境的温度状态。鉴于开关柜中同时部署多个传感器，为确保这些传感器反射的信号能够有序、准确地被处理，引入光时延线进行调控。这一机制确保所有传感器的反射信号在返回途中得到有序排列，形成一个包含所有传感器温度信息的脉冲序列。在此基础上，通过光探测器将这些光脉冲信号精准地转换为电脉冲序列。一旦转换完成，数据采集器会迅速接收这些电脉冲序列，并进行初步的信号调整和放大，以确保数据的准确性和可靠性。在信号处理阶段，系统会对电脉冲序列进行采样和分析。通过运用特定的算法，提取出每个光纤光栅传感器的温度数据。这一处理过程遵循以下数学公式

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-P_e)\alpha + \lambda_B\xi\Delta T \tag{1}$$

式中，$\Delta\lambda_B$为反射光波长的变化量；λ_B为初始反射光波长；P_e为光纤的有效弹光系数；α为光纤的热膨胀系数；ξ为光纤光栅的热光系数；ΔT为温度的变化量。

利用式（1），根据反射光波长的变化量和已知的系数，计算出温度的变化量，从而得到当前的变电站开关柜温度值。

监控主机对采集到的温度数据进行进一步的分析和处理，不仅涵盖对温度数据的实时显示，还包含数据的安全存储以及历史数据的便捷查询。

3. 开关柜故障诊断

利用光纤光栅测温技术采集到开关柜温度监测数据后，对开关柜进行故障诊断。开关柜故障诊断流程如图1所示。

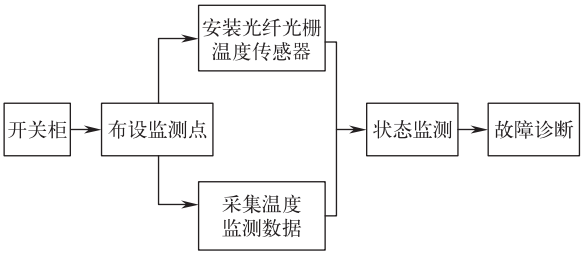

图1　开关柜故障诊断流程

首先，在开关柜内部或周围的关键位置布置光纤光栅传感器，确保能够实时捕捉并反馈开关柜内部温度的动态变化。接下来，为了实现对温度的精准控制，引入了恒温干燥箱作为专业的温度调节装置，能够覆盖从−19 ℃至室温以及室温至60 ℃的广泛范围，且恒温波动被严格控制在±1 ℃以内。在初始阶段，将恒温干燥箱的温度设置为室温，并将光纤光栅传感器置于其中。随后，按照预定的温度调整策略，从−20 ℃开始，每次递增10 ℃，并在每个温度点稳定后保持10 min，以确保温度达到稳定状态。在每个温度稳定点，都会通过光纤光栅传感器实时监测开关柜内部的温度变化，并将其与预设的正常温度范围进行对比。通过这一方法，能够及时发现开关柜是否存在过热等潜在故障，从而确保开关柜的安全稳定运行。

在变电站开关柜的运行管理中，为其设定明确的温度阈值以确保其稳定运行。具体而言，低压开关柜的安全运行温度区间被设定为15～35 ℃，而高压开关柜则要求更为严格，其正常运行温度应在20～40 ℃之间。一旦基于光纤光栅测温技术的监测系统检测到温度触及这一安全运行区间的上限，即低压开关柜的35 ℃或高压开关柜的40 ℃，立即判断该开关柜存在潜在的运行异常或故障风险，并触发一级报警机制[10]。此外，为保障设备在极端情况下的安

全，还设立二级故障诊断报警阈值。这些阈值在设备能够承受的极限温度之上，旨在为可能发生的紧急状况提供缓冲时间。因此，低压开关柜的二级报警阈值被设定为50 ℃，而高压开关柜则为55 ℃。这些数值的设定不仅基于正常运行温度的上限，还充分考虑设备的安全裕量和应对突发情况的能力。

在故障诊断流程中，将实时监测到的温度数据与这些预设的阈值进行比较。一旦触发报警，将根据报警级别自动执行相应的处理措施。特别是在触发二级报警时，将立即启动应急处理程序，迅速通知专业人员前往现场进行检查和修复，以确保设备能够迅速恢复正常运行。

实验分析

1. 实验准备

选取一个典型的10 kV户外高压开关柜作为实验样本对象。该开关柜具有完善的电气设备和保护系统，并广泛应用于各类变电站中。开关柜的参数见表2。

表2　开关柜参数

序号	项目	参数
1	额定电压/kV	10
2	额定电流/A	630
3	短路开断电流/kA	25
4	内部结构	包括断路器室、母线室、电缆室和仪表室等多个部分

在获取变电站开关柜的参数后，利用MATLAB模拟分析软件，模拟6种不同类型的开关柜故障，样本数据分布见表3。

表3　开关柜样本数据分布

标号	模式类型	信号样本
M-01	正常	710
M-02	母线室温湿度过高	624
M-03	缓冲器故障	563
M-04	电缆电流过大	617
M-05	电缆接头温度过高	625
M-06	合闸线圈电流过大	436

为全面监测开关柜内部温度的变化，使用专用夹具分别在断路器触头、母线连接处和电缆接头位置布置光纤光栅传感器。

2. 故障诊断结果分析

为验证实验结果的准确性，使用高准确度的温度检测器对开关柜对应位置的温度进行跟踪在线检测。采用对比实验，将上述提出的诊断方法设置为实验组，将文献[1-2]提出的两种常规诊断方法分别设置为对照组1与对照组2，实验以正确诊断故障数目为评价指标。三种方法的诊断结果见表4。

表4　故障诊断结果

	实验组		对照组1		对照组2	
样本标号	正确诊断/个	错误诊断/个	正确诊断/个	错误诊断/个	正确诊断/个	错误诊断/个
M-01	710	0	700	10	703	7
M-02	623	1	602	22	611	13
M-03	563	0	560	3	558	5
M-04	616	1	600	17	610	7
M-05	625	0	620	5	614	11
M-06	436	0	425	11	430	6

经过表4中的数据对比，得出如下结论：采用本文提出的光纤光栅测温技术所设计的变电站开关柜故障诊断方法，在涵盖的6种不同故障类型样本中，均展现出了极高的诊断精准度。即便在母线室温湿度异常偏高以及电缆电流显著超标的两种复杂情况下，该方法也仅出现了单次诊断偏差，其余所有诊断结果均准确无误。与既有的传统诊断方法相比，本方案在诊断精确性方面展现出更为卓越的性能，无疑为变电站开关柜的日常维护与管理开辟一种全新的、更为高效的解决途径。

结束语

综上所述，光纤光栅测温技术在变电站开关柜故障诊断领域展现出巨大的潜力和极高的研究价值。该技术不仅实现开关柜内部温度的即时、连续监测，更为关键的是，它能够对开关柜的运行状态进行全方位、高准确度地评估。这一创新方法极大地提升故障诊断的响应速度和准确性，为设备的预防性维护提供坚实的数据支撑和科学依据。**EA**

（收稿日期：2024-06-26）

参考文献

[1] 迟国峰．基于BP神经网络的高压开关柜机械故障智能诊断分析 [J]．中国机械，2023(31)：77-80．

[2] 汪理，张亦然，宋大治，等．城市轨道交通牵引变电所开关柜运行状态量预测与故障推断 [J]．城市轨道交通研究，2023，26 (6)：131-136．