

红外测温技术在配电设备故障检测中的应用

张禄进

扬州三新供电服务有限公司江都分公司 江苏 扬州 225000

摘要: 红外测温技术主要通过物体红外辐射特性实现非接触式温度检测,具有非接触、无干扰、可大面积扫描的特性,可以辅助配电设备进行故障检测。配电设备故障的发生多伴随温升异常的前置表征,红外测温技术可通过捕捉设备表面温度场分布特征,精准识别异常发热区域,实现导电回路、绝缘部件等关键部位故障的超前预警与定位。本文将系统阐述红外测温技术基本工作原理,探讨配电设备故障检测中影响检测精确度的因素,明确红外测温技术在配电设备故障检测中的具体应用。

关键词: 红外测温技术; 配电设备; 故障检测; 温升异常; 应用

引言: 配电设备在使用过程中要长期承受电、热、机械应力与环境侵蚀,可能会出现接触不良、绝缘劣化等问题。早期的预防性试验周期长,难以捕捉发展中的隐患,而停电试验成本高、影响供电可靠性^[1]。红外测温技术能够不停电、不接触地获取设备表面温度分布,将人眼不可见的设备热状态转化为直观的热图像,使巡检人员可在设备带电运行状态下远距离发现发热异常。随着红外热像仪成本下降与操作简化,该技术在配电巡检中得到普及。

1 红外测温设备基本工作原理

自然界中一切温度高于绝对零度的物体都会不断向外辐射红外线,物体的温度越高,辐射的红外能量就越强。红外测温设备通过接收物体发出的红外辐射,将其转换为电信号,再经过信号处理和计算,得到物体的表面温度^[2]。红外测温设备主要由光学系统、红外探测器、信号处理单元和显示输出单元组成。光学系统负责收集被测物体发出的红外辐射,并将其聚焦到红外探测器上。红外探测器是核心部件,能够将红外辐射能量转换为电信号。信号处理单元对电信号进行放大、滤波、模数转换等处理,并根据预设的算法计算出被测物体的温度。显示输出单元则将温度结果以数字、图像等形式呈现出来。

2 配电设备故障检测中影响检测精确度的因素

2.1 表面发射率设定的准确性

发射率是物体辐射能力与同温度黑体辐射能力的比值。红外测温仪依据设定的发射率值反算温度。配电设备表面材质繁杂,如裸露铜铝导体因氧化程度不同,发射率可在 0.2 至 0.8 之间剧烈波动;瓷套与环氧树脂表面

发射率虽较高且相对稳定,但老化后也会发生漂移;金属镀层与防锈漆膜的发射率截然不同。若现场不做比对校准,统一采用默认值,实测温度与真实温度将产生巨大误差。例如,对光亮金属表面未做处理而导致发射率设定偏高,仪器将低估物体实际温度,埋下事故隐患。

2.2 环境因素的衰减与干扰

检测环境中的大气传输衰减不可忽视,水蒸气与二氧化碳分子对特定红外波段具有吸收作用,尽管设备通常选择大气窗口波段以减小该影响,但在高湿度或雨雾天气下,测量误差仍会急剧增大。更为棘手的是背景辐射干扰,太阳直射及周边高温物体的热反射会叠加在被测物表面辐射中。特别是对于发射率较低的金属连接件,强烈的环境反射光可能被探测器错误解读为物体自身的高温辐射,造成虚假的高温假象。须采取遮挡措施或等待日落后的阴天进行检测,以避免此类干扰。

2.3 空间距离与检测角度的限制

红外测温仪的光学分辨率决定了其空间采样能力。随着检测距离增加,仪器的瞬时视场角所覆盖的物理面积扩大,若被测目标尺寸无法完全充满探测器的探测元,即出现“背景效应”,仪器接收到的能量将是目标与背景的平均值,导致小尺寸热点测温值偏低。同时,检测视角应尽量与被测表面法线保持一致,浅角度进行观测时,不仅路径辐射衰减增加,且物体表面的方向发射率会发生改变,金属表面尤甚,由此引入额外的测温误差^[2]。

3 红外测温技术在配电设备故障检测中的具体应用

3.1 裸露接头与导线连接件的精确测温

配电线路中存在大量裸露连接点,并沟线夹、铜铝过渡接头、跌落式熔断器动静触头、耐张线夹、T型线夹等都是配电系统热故障的高发区域。其故障根源主要在于电流通过接触电阻产生的焦耳热,而接触电阻的增大通常由安装时接触面处理不当、螺栓紧固力矩不足、长期运行中接触面氧化腐蚀、机械振动导致连接松动、铜铝接头电化学腐蚀等多种因素共同引起。由于裸露连接点直接暴露在大气环境中,受温度、湿度、风沙、雨雪等自然条件影响较大,故障发展速度较快,若及时发现处理,极易引发接头烧断、导线断线等事故^[3]。

此类元件的红外测温难点在于不同材质的发射率差异极大。纯铜、纯铝等金属材料在未氧化状态下的红外发射率极低,通常在0.05至0.2之间,而氧化后的金属表面发射率可升至0.6以上,不同氧化程度的表面发射率也存在明显差异。这种发射率的不均匀性会导致红外测温设备产生较大的测量误差,甚至出现温度显示偏低而实际发热严重的情况。为消除材质和表面状态的干扰,检测前宜采用表面涂覆专用红外黑漆或粘贴已知高发射率胶带的方式,人为建立统一的参照面。涂覆黑漆时应保证涂层均匀且厚度适中,过厚会影响热量传导,过薄则无法有效覆盖原有表面;粘贴胶带时应确保胶带与被测表面紧密贴合,无气泡和褶皱,处理完成后需等待一段时间,使涂层或胶带与被测表面达到热平衡后再进行检测。

在诊断判断方面,应优先采用相对温差对比法,对比三相相同位置连接点的温度,若某相接头相对另外两相对称点温差显著,或接头温度高于同回路导线本体温度过多,即可判定为接触缺陷,无需依赖绝对温度阈值即能给出定性判断。

3.2 封闭式开关柜内部发热的间接诊断

封闭式开关柜具有结构紧凑、占地面积小、防护等级高等优点,但全封闭的金属结构会直接阻挡内部元件的红外辐射,使得红外测温无法直接透过外壳钢板,开关柜内部断路器动静触头、母排搭接处、电流互感器、电压互感器、隔离开关触头、电容器等散发的热量难以排出,导容易加速绝缘老化,最终引发短路、爆炸等恶性事故^[4]。

红外测温技术中的红外线能够穿透某些高分子聚合材料和特定的红外光学材料,通过柜体表面预先开设的特质的红外观察窗可进行温度检测。红外观察窗的安装位置应选择断路器室、母线室等主要发热部位的对应位置,且尺寸应足够大,以覆盖尽可能多的检测区域。

对于未安装专用红外观察窗的开关柜,可采用“背面对比法”进行间接诊断。该方法的原理是并列运行的同型号、同负荷开关柜,其正常运行时的表面温度分布应基本一致。若某一开关柜的外壳局部温度显著高于相邻同负荷开关柜的相同部位,且排除阳光直射、空调出风口、相邻发热设备等外部环境因素的干扰后,即可间接推断该开关柜内部存在异常发热。在进行对比时,必须保证参与对比的开关柜处于完全相同的运行条件,包括负荷电流大小、运行时间长短、通风散热条件等,否则会导致误判。

此外,检测柜顶通风口金属隔栅的温度也是一种有效的辅助诊断手段。开关柜内部的热量主要通过自然对流和强制通风的方式排出,异常发热会导致柜内空气温度升高,热气流上升并通过柜顶通风口排出,从而加热通风口的金属隔栅。若某一开关柜的通风口温度明显高于其他开关柜,且通风口无堵塞现象,则说明柜内可能存在严重的发热缺陷。同时,还可以检测开关柜侧板、柜门密封条处的温度分布,不同部位的温度异常能够大致指示内部发热点的位置,为进一步的停电检修提供方向。

3.3 变压器及其套管的状态扫描

配电变压器的红外测温需全面覆盖本体、高低压套管及分接开关三个关键部分,每个部分的检测重点和诊断方法各不相同^[5]。

变压器本体部分的检测重点是检查油箱表面是否存在局部过热斑块。正常运行的油浸式变压器,其油箱表面温度分布应较为均匀,且呈现出上部温度高于下部、靠近散热器一侧温度低于远离散热器一侧的规律。若在同一高度的油箱壁上出现非对称的局部高温区域,且在排除太阳辐射、周围热源等外部干扰后依然存在,则应怀疑变压器内部存在局部故障。不同的内部故障会在油箱表面呈现出不同的温度特征:铁芯多点接地会导致铁芯损耗增大,通常表现为油箱下部的大面积均匀过热;绕组匝间短路会导致局部电流急剧增大,通常表现为油箱上部对应绕组位置的局部高温斑块;油道堵塞会阻碍变压器油的循环散热,通常表现为堵塞部位对应的油箱壁温度偏低;冷却系统故障则会导致变压器整体温度升高。

套管检测是变压器红外检测的重中之重,其故障发生率较高且后果严重。套管检测的重点在于瓷套头部与将军帽的隐蔽接点,该部位是电流与电位双重致热的敏感区。导电杆与将军帽之间的连接不良会产生电阻性

发热,而套管绝缘介质的劣化会产生介电性发热,两者的温度分布特征存在明显差异。导电杆连接不良引起的发热通常集中在将军帽部位,温度梯度较大;而介质损耗引起的发热则分布在整个瓷套表面,温度梯度相对较小。对于运行中的变压器,由于高低压套管间存在电位梯度与传导热的叠加效应,需要细致分辨温差的来源,避免将正常的电位梯度发热误判为故障。

无载分接开关通常安装在变压器油箱顶部,其接触不良产生的热量会通过油箱壁传导出来,在油箱顶部对应位置形成局部热点。有载分接开关具有独立的油箱和冷却系统,可直接检测其油箱表面的温度分布,判断内部是否存在触头烧损、油质劣化等故障。此外,通过纵向对比同一变压器在相近季节、相近负载条件下的历史热像图,能够有效发现缓慢发展的微弱温升趋势,这种趋势在单次检测中往往容易被环境因素掩盖,是早期发现潜伏性故障的重要手段。

3.4 电力电容器与电缆附件的红外普查

并联电容器组运行状态直接影响系统的功率因数和电压质量。电容器内部元件的故障主要表现为单个或多个元件击穿、内部熔丝熔断、介质老化等。正常运行的电容器,其外壳中部温度最高,并向四周均匀递减,整体温度分布较为均匀,且同组内各电容器的温度差异较小。

红外检测时,需对比整组电容器外壳中部的温度分布。若某一台电容器的中部无明显高温区,整体温度明显低于同组其他单元,且接线端子温度正常,则往往指示该电容器内部元件开路或熔丝熔断,已退出运行。反之,若某一台电容器呈现整体过热现象,且伴随外壳鼓胀变形,则预示其内部介质老化严重,介质损耗急剧增大,随时可能发生爆炸事故,应立即退出运行。对于电容器组的接线端子和连接母线,也应进行同步检测,排除外部接触不良导致的发热干扰。检测应在电容器投入运行至少半小时后进行,保证电容器的温度达到稳定状态,同时要确保所有参与对比的电容器处于相同的运行电压和环境条件下。

电缆附件的故障主要源于电场分布不均和绝缘劣化。红外检测时,应重点扫描屏蔽层切断处的应力锥部

位,此处电场畸变最为严重,也是发热故障的高发区。正常运行的电缆附件,其表面温度分布均匀,无明显局部热点。若检测到应力锥部位出现局部环状或非对称的热悬浮现象,则需高度警惕。局部环状发热通常指示应力锥与电缆绝缘之间的界面压力松弛,导致接触不良,产生局部放电。非对称热悬浮则通常指示附件内部存在气隙、杂质或绝缘损伤,引发局部放电和发热。若早期的发热现象若不及时处理,会逐渐发展为绝缘击穿,导致电缆附件爆炸。由于红外测温只能检测表面温度,对于内部深层的气隙或微弱局部放电,表面温度变化可能不明显,因此在红外检测发现异常后,须配合局部放电检测、直流耐压试验等其他绝缘诊断手段进行综合判断,确保故障诊断的准确性^[6]。

4 结语

红外测温技术作为成熟的非接触式温度检测手段,可以在不干扰设备正常运行的前提下精准识别设备的温升异常,实现故障隐患的超前预警与精准定位。随着电力系统的不断发展,对配电设备运行可靠性的要求越来越高,红外测温技术也在不断完善和发展。未来,红外测温技术可与人工智能、物联网等技术深度融合,实现配电设备温度的实时在线监测和智能故障诊断,进一步提升配电设备故障检测的自动化和智能化水平,为配电系统的安全稳定运行提供更加有力的保障。

参考文献

- [1] 范胜国,李泰.电力变电设备红外测温技术在故障诊断中的应用研究[J].中国设备工程,2025(18):173-175.
- [2] 刘怡.红外测温技术在变电运维电压致热型缺陷检测中的应用[J].光源与照明,2025(7):120-122.
- [3] 苏晓林,刘亮.红外测温技术在配电线路状态检修中的应用[J].光源与照明,2025(5):122-124.
- [4] 丛廷滋.红外测温技术在判断电气设备热故障中的应用研究[J].科技创新与应用,2020,10(17):171-172.
- [5] 刘法斌,宋光兴,严鼎.无线测温技术在抽屉式低压柜中的应用[J].电气时代,2025(1):148-150.
- [6] 朱月敏.35kv 高压开关柜无线测温技术应用分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(6):088-091.