

# 基于红外热成像的低压配电柜故障诊断方法研究

刘建山

中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452

**摘要:** 低压配电柜作为电力系统末端的关键设备,其安全运行直接影响工业生产与居民用电可靠性。基于此,本文简要介绍了低压配电柜接触器、断路器、母线排等常见故障,分析了基于红外热成像的低压配电柜故障诊断方法,涉及检测前准备、热像仪参数设置、关键部位扫描、数据分析方法以及诊断标准与分级等方面,以期为低压配电柜状态检修提供理论支持与实践指导。

**关键词:** 红外热成像; 低压配电柜; 故障诊断; 方法

## 引言

据相关统计,低压配电柜故障中,70%以上与接触不良、过载、绝缘老化等热缺陷相关,传统人工巡检依赖经验判断,存在效率低、漏检率高、安全隐患大等问题。红外热成像技术凭借非接触、实时监测、高灵敏度等优势,成为低压配电柜故障诊断的重要手段。该技术通过捕捉设备表面红外辐射,将温度分布转化为可视化热像图,结合故障发热特征与诊断算法,可快速定位故障点并评估严重程度。

## 1 低压配电柜常见的故障

### 1.1 接触器故障

接触器作为控制电路通断的核心执行元件,其触点在频繁的吸合与释放动作中承受着多重物理与化学作用的共同影响。(1)电弧产生的高温是触点损坏的主要因素之一,当触点断开电路时,由于电流突然中断,会在触点间隙产生强烈电弧,其温度可达数千摄氏度,足以使触点表面的银合金层熔化并重新凝固,长期作用导致触点表面形成凹凸不平的烧蚀痕迹,银层厚度逐渐减薄,甚至出现局部脱落现象。(2)触点表面在电弧高温作用下会与空气中的氧气发生氧化反应,生成氧化层,这种氧化层具有较高的电阻率,会进一步阻碍电流的传导,加剧接触不良问题。(3)接触器内部的弹簧在长期反复压缩与伸展过程中,其弹性系数会因材料疲劳而逐渐衰减,导致触点闭合时的压力不足,无法有效压紧触点以克服表面氧化层和不平整度的影响,使得接触电阻进一步增大。(4)线圈在长期运行中会受到供电电压波动的影响,当电压过高时,线圈中的电流增大,产生的电磁力超过设计值,可能导致线圈骨架变形或绝缘材料损伤;电压过低时,电磁力不足,触点无法可靠吸合,造成接触器频繁抖动,加剧触点磨损。(5)线圈绝缘材料在高温、潮湿或化学腐蚀环境下会逐渐老化,绝缘性

能下降,最终引发匝间短路故障,导致线圈电流异常增大,局部温升过高<sup>[1]</sup>。不仅使吸合无力或无法释放,还会使线圈烧毁,造成接触器彻底失效,电路失控,严重威胁设备安全与人员生命。

### 1.2 断路器故障

(1)触头系统作为断路器分断电流的核心执行单元,长期运行中触头压力不足会直接导致接触电阻增大,电流通过时产生焦耳热,当温升超过材料耐受极限时,触头表面金属熔化并形成熔焊点。并且,伴随电弧烧蚀产生的金属蒸气会加速触头表面氧化,形成高电阻氧化层,进一步加剧局部过热,最终引发触头永久性失效。(2)灭弧室污染是另一类典型故障,灰尘、金属微粒或绝缘介质分解产物在强电场作用下会引发局部电场畸变,导致真空灭弧室击穿电压下降,或SF<sub>6</sub>气体绝缘强度劣化,在分断短路电流时无法有效熄灭电弧,引发灭弧室爆炸事故。(3)漏电保护器故障集中体现于电磁感应元件性能退化,零序电流互感器铁芯磁率下降会导致漏电信号检测灵敏度降低,当发生接地故障时,二次侧输出信号不足以驱动脱扣机构动作,造成拒动隐患;反之,电磁线圈匝间短路或控制电路参数漂移可能引发误动作,在无漏电情况下切断电源,影响供电连续性。

### 1.3 母线排故障

(1)母线连接处作为电流传输的核心节点,若螺栓紧固力矩不足或长期运行后松动,会导致接触面压力下降,金属接触面积减小;同时,接触面在电弧作用下生成的氧化层会进一步增大接触电阻<sup>[2]</sup>。当负载电流通过时,接触电阻产生的焦耳热与电流平方成正比,局部温升急剧升高,不仅会加速接触面金属熔化形成熔焊点,还会使周围绝缘材料在高温下碳化脆化,最终引发相间短路或接地故障。(2)母线排加工过程中若存在平面度超差或镀层不均等问题,会加剧接触面微观凸起处的电

场集中效应,在潮湿或污染环境下易形成导电通道,导致接触电阻异常增大。(3)长期暴露于高湿度环境中的支撑件,其环氧树脂或SMC复合材料会因吸湿导致绝缘电阻下降,表面形成水膜后可能引发爬电现象;而机械应力作用下的微裂纹扩展则会降低材料介电强度,在过电压冲击时发生闪络击穿。

## 2 基于红外热成像的故障诊断方法

### 2.1 检测前准备

检测前准备是确保电气系统检测结果准确可靠的关键环节,需从环境条件、设备状态及操作规范三方面进行系统性控制。(1)环境温湿度对检测精度具有直接影响,因此,检测前需使用精密温湿度计监测环境参数,确保温度稳定在设备允许工作范围内,通常为 $5^{\circ}\text{C}$ 至 $40^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度控制在45%至75%之间,对于精密仪器检测还需将波动范围缩小至 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 5\% \text{RH}$ 以内<sup>[3]</sup>。若环境条件不达标,需通过空调系统调节温湿度,或采用局部加热、除湿措施,待参数稳定后方可开展检测工作,避免因环境因素导致测量误差或设备损坏。(2)检测前需确认设备处于空载或轻载状态,对于电机类设备,需断开其输出端连接,避免负载惯性或反电动势干扰检测数据;对于变压器类设备,需切断次级侧负载,防止二次回路电流影响绕组参数测量。若必须在带载状态下检测,需记录实际负载率并评估其对检测结果的影响。同时,需检查设备电源输入是否稳定,电压波动应控制在额定值的 $\pm 5\%$ 以内,频率偏差不得超过 $\pm 0.5 \text{Hz}$ ,避免因电源质量问题导致检测数据失真。(3)检测前需使用干燥压缩空气吹扫设备表面,重点清除散热片、接线端子及绝缘子等部位的积尘,对于顽固污渍可使用无水乙醇擦拭,但需避免液体渗入设备内部。对于高压设备,清洁后需等待至少15分钟确保酒精完全挥发,防止残留液体导致绝缘性能下降。此外,需核对设备标识与检测项目是否匹配,避免因设备误识别导致检测数据错位,对于多回路系统还需绘制接线图并标注检测点位置,为后续数据分析提供参考依据。

### 2.2 热像仪参数设置

(1)发射率作为物体辐射能量的关键参数,直接影响热像仪接收到的热辐射强度,不同材质的发射率差异显著。检测前需通过材质数据库或参考手册查询被测物体的发射率值,对于表面状态复杂的设备,如涂有油漆的金属外壳或存在氧化层的导体,需结合实际工况进行修正,必要时可采用接触式测温仪与热像仪同步测量,通过对比数据校准发射率设置,避免因发射率误设导致温度测量偏差超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>。(2)检测距离与热像仪的空

间分辨率密切相关,距离过远会导致被测目标在红外图像中占比过小,单个像素点覆盖的实际面积增大,从而降低温度测量的空间精度,甚至出现多个目标温度混合计算的情况。实际操作中需根据热像仪的最小聚焦距离和瞬时视场角确定合理检测距离,通常应保证被测目标占据图像有效区域的50%以上,对于小尺寸目标如接线端子或电容元件,需缩短检测距离至0.5米以内,并通过变焦功能放大图像细节。(3)环境温度补偿是消除背景辐射干扰的重要手段,当环境温度与被测物体温度差异较大时,周围物体反射的红外辐射会被热像仪接收,形成附加加热信号。现代热像仪通常内置环境温度传感器,可自动根据环境温度调整参考辐射值,但对于高温或低温极端环境,需手动输入环境温度参数以强化补偿效果。另外,湿度、风速等环境因素也会通过影响空气对流和辐射衰减间接改变温度测量结果,比如在潮湿环境中检测时,需将热像仪的湿度补偿功能开启,并适当缩短检测时间以减少水汽凝结对镜头的影响。

### 2.3 关键部位扫描

关键部位扫描是电气系统红外检测的核心环节,需针对母排、断路器、电缆接头及电容器等易发热元件进行系统性排查,以精准识别潜在过热缺陷。(1)母排作为电流传输的主通道,其连接处因螺栓松动、接触面氧化或加工精度不足易导致接触电阻增大,扫描时应重点覆盖母排搭接面、穿墙套管根部及绝缘支撑件附近区域,采用垂直于母排走向的扫描方式,确保接触面温度分布均匀性分析。(2)断路器扫描需覆盖进线端、出线端及触头系统,触头压力不足或灭弧室污染会导致分合闸时电弧能量增加,引发触头熔焊或绝缘材料碳化。检测时应观察断路器操作机构动作后的温度变化,对比三相触头温度差值,若单相触头温度超过环境温度 $30^{\circ}\text{C}$ 或相间温差超过 $10^{\circ}\text{C}$ ,需进一步检查触头磨损情况。(3)电缆接头是热缺陷的高发区域,其故障多源于压接工艺缺陷或密封失效导致的接触面氧化腐蚀,扫描时应沿电缆走向逐段检测,重点检查终端头、中接头及分支接头位置,采用环绕式扫描路径确保接触面全覆盖,同时关注电缆外护套与绝缘层的交界处,防止因密封不良导致潮气侵入引发爬电现象。(4)电容器扫描需区分介质损耗发热与接触电阻发热,检测时应对比同组电容器外壳温度分布,若单个电容器外壳温度高于同组平均值 $5^{\circ}\text{C}$ 以上,或接线端子温度超过环境温度 $25^{\circ}\text{C}$ ,需检查电容器容量衰减情况及连接紧固度,防止因电容器老化或接触不良引发膨胀变形甚至爆炸事故。

### 2.4 数据分析方法

(1) 绝对温度法通过直接对比设备实测温升与行业标准限值进行快速筛查,其核心在于建立设备类型与运行工况的映射关系,例如空气绝缘柜内裸铜排的允许温升通常不超过70K,而浸渍绝缘电缆终端头的温升限值则需根据导体材质和绝缘等级动态调整,该方法适用于对大量设备进行初级筛选,可快速识别出温度超标的疑似缺陷点,为后续深度分析提供重点目标。(2) 相对温差法则聚焦于设备内部或同类设备间的温度差异分析,通过计算同一设备三相间或同类设备对应部位的温度差值,消除环境温度和负载电流对测量结果的影响,当温差值 $\Delta T$ 达到15K及以上时,表明存在局部接触不良或介质损耗异常<sup>[5]</sup>。该方法尤其适用于负载率波动较大的场景,能够揭示绝对温度法难以发现的早期隐性缺陷。

(3) 时序分析法通过建立设备温度的历史数据库,分析温升变化速率与运行周期的关联性。当温升速率突破正常波动范围时,预示故障进入快速发展期,且增速呈指数级上升,可推断存在接触面持续氧化腐蚀,需立即安排停电检修,该方法能够有效提升故障预测的提前量,为状态检修决策提供量化依据。

## 2.5 诊断标准与分级

诊断标准与分级是电气红外检测结果转化的关键依据,需通过量化指标与风险等级的对应关系实现缺陷的精准分类管理。(1) 一般缺陷对应设备存在的轻微温度异常,其判定标准为同类设备或同一设备三相间相对温差不超过15K,且热点温度未超过设备正常运行允许值,此类缺陷通常由接触面氧化、螺栓轻微松动或环境因素导致,对设备安全运行影响较小,但需建立缺陷档案并纳入定期跟踪范围,通过周期性复测监控温升变化趋势,若在后续检测中温差持续扩大或出现新的异常特征,则需升级处理级别。(2) 严重缺陷的判定需同时满足温度阈值与相对温差双重条件,当热点温度超过110℃或相对温差超过95%时,表明设备存在显著的接触不良或介质劣化问题。此类缺陷可能引发局部绝缘损坏或导体熔断,需在24小时内制定检修计划并限期处理,处理

前应加强设备巡视并限制负载电流,防止缺陷进一步恶化,检修时需重点检查接触面压接工艺、绝缘材料老化程度及导体完整性,必要时进行紧固处理或部件更换。

(3) 紧急缺陷是直接威胁设备安全运行的重大隐患,其判定依据为热像图中出现熔焊、放电、电弧灼伤等特征性高温区,或温度超过设备材料耐受极限。面对此类缺陷需立即采取停运措施并启动应急检修流程,检修前应断开设备电源并做好安全隔离,检修过程中需彻底排查故障根源,对受损部件进行更换或修复。同时开展同批次设备专项检查,防止缺陷扩散,检修完成后需进行全面试验验证设备性能,确保符合运行标准后方可重新投运。

## 结语

综上所述,红外热成像技术能够快速、准确地检测出低压配电柜的温度异常,及时发现潜在故障,为故障诊断提供了有力支持。与传统诊断方法相比,该技术具有非接触、实时监测、高灵敏度等显著优势,大大提高了诊断效率和准确性,降低了故障漏检率。在实际应用中,合理设置红外热像仪参数、正确分析热图像特征是确保诊断结果准确的关键。未来,随着红外热成像技术的不断发展和创新,结合人工智能、大数据等先进技术,将进一步提升故障诊断的智能化水平,实现故障的早期预警和精准定位。

## 参考文献

- [1] 王志强,李晓峰.红外热成像技术在低压电气设备故障检测中的应用研究[J].电气技术,2022(7):52-56.
- [2] 刘强,张建.基于红外成像的配电设备故障诊断系统设计[J].电力系统保护与控制,2021,49(4):89-94.
- [3] 陈立,赵云.低压配电柜热故障检测的关键技术分析[J].电力设备管理,2023(5):66-70.
- [4] 孙明,胡志远.红外热成像在智能运维中的融合应用研究[J].智能电网,2023,11(2):41-45.
- [5] 吴文彬.现代低压配电柜的技术创新及发展趋势[J].光源与照明,2023(02):148-150.