

超高压输电线路红外检修技术分析

刘 群 朱宝龙 卢俊杰

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘 要: 本文围绕超高压输电线路红外检修技术展开深入分析。首先阐述了超高压输电线路检修的重要性及传统检修方法的局限性,引出红外检修技术的优势。接着详细介绍了红外检修技术的原理、常用设备以及影响检测结果的因素。然后对超高压输电线路中常见的故障类型及其红外热像特征进行分析,并结合实际案例说明红外检修技术在故障诊断中的应用。最后探讨了红外检修技术的发展趋势,旨在为超高压输电线路的安全稳定运行提供有力的技术支持。

关键词: 超高压输电线路; 红外检修技术; 故障诊断; 热像特征

1 引言

社会经济快速发展,电力需求攀升,超高压输电线路对电力系统至关重要,其安全稳定运行关乎供电质量。但它长期暴露于自然环境,易受多种因素影响出现故障,若未及时处理,会造成严重后果。传统检修靠人工巡检和定期预防性试验,人工巡检劳动强度大、效率低且有安全风险;定期预防性试验需停电,影响供电且难以及时发现隐患。因此,急需高效、准确、安全的检修技术。红外检修技术作为非接触式在线检测技术,优势明显,能为超高压输电线路检修提供有效手段。

2 红外检修技术概述

2.1 红外检修技术原理

一切温度高于绝对零度的物体都在不停地向周围空间发射红外辐射能量,物体的红外辐射能量大小及其波长分布与它的表面温度有着十分密切的关系。红外检修技术就是利用红外探测器将物体发射的红外辐射能量转换成电信号,经过放大、处理等环节,转换成热图像显示在显示器上,通过分析热图像中各点的温度分布情况,来判断设备是否存在过热故障。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体单位面积辐射的总能量与物体绝对温度的四次方成正比,即:

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

其中, M 为物体单位面积辐射的总能量(单位: W/m^2); ε 为物体的发射率,取值范围在0-1之间,不同物体的发射率不同,例如金属表面的发射率一般在0.1-0.3之间,而氧化金属表面的发射率可达0.6-0.9; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T 为物体的绝对温度(单位: K)。通过测量物体辐射的红外能量,结合已知的物体发射率,就可以计算出物体的表面温度,从而实现对设备温度的检测和故障诊断。

2.2 常用红外检测设备

目前,常用的红外检测设备主要有红外热像仪、红外测温仪等。红外热像仪是一种能够将被测目标表面的温度分布以热图像的形式直观显示出来的设备。它具有高分辨率、高灵敏度、可实时测量等优点,能够同时测量目标表面多个点的温度,并生成详细的热图像和温度数据,便于对设备进行全面的温度分析和故障诊断。红外热像仪广泛应用于超高压输电线路的导线连接部位、绝缘子、金具等设备的温度检测^[1]。红外测温仪是一种通过测量物体辐射的红外能量来计算物体表面温度的设备。它具有操作简单、价格低廉、便于携带等优点,但只能测量目标表面单个点的温度,无法直观显示目标表面的温度分布情况。红外测温仪通常用于对一些简单设备的温度快速检测。

2.3 影响红外检测结果的因素

在实际检测过程中,有许多因素会影响红外检测结果的准确性,主要包括以下几个方面:(1)环境因素:环境温度、湿度、风速、光照等环境因素会对物体的红外辐射能量产生影响。例如,环境温度较高时,物体的散热条件变差,表面温度会升高;风速较大时,会加速物体的散热,使表面温度降低。因此,在进行红外检测时,应尽量选择在环境条件相对稳定的时间进行,如夜间或阴天,以减少环境因素对检测结果的影响。(2)物体发射率:物体的发射率是影响红外检测结果准确性的关键因素之一。不同物体的发射率不同,即使是同一种物体,在不同表面状态下发射率也会有所差异。在进行红外检测时,如果发射率设置不准确,会导致测量温度与实际温度存在较大偏差。因此,在进行检测前,应准确了解被测物体的发射率,并正确设置红外检测设备的发射率参数。(3)检测距离和角度:检测距离和角度会

影响红外探测器接收到的物体辐射能量^[2]。一般来说,检测距离越远,接收到的辐射能量越弱,测量误差越大;检测角度偏离垂直方向越大,接收到的辐射能量也越弱。因此,在进行红外检测时,应尽量保持合适的检测距离和角度,以提高检测结果的准确性。

3 超高压输电线路常见故障类型及红外热像特征分析

3.1 导线连接部位故障

导线连接部位是超高压输电线路中容易出现故障的部位之一。常见的故障原因包括连接螺栓松动、接触面氧化、接触压力不足等,这些因素会导致接触电阻增大,在电流通过时产生过多的热量,使连接部位温度升高。根据焦耳定律 $Q = I^2 R t$ (其中 Q 为热量, I 为电流, R 为电阻, t 为时间),当接触电阻增大时,在相同的电流和时间下,产生的热量会显著增加。例如,当接触电阻从正常值 0.01Ω 增大到 0.1Ω 时,在电流为 1000A 的情况下,每小时产生的热量将从 $Q_1 = 1000^2 \times 0.01 \times 3600 = 3.6 \times 10^7 \text{J}$ 增加到 $Q_2 = 1000^2 \times 0.1 \times 3600 = 3.6 \times 10^8 \text{J}$,增加了10倍。导线连接部位故障的红外热像特征表现为:连接部位的温度明显高于周围正常导线的温度,热像图中呈现出明显的热点。根据故障的严重程度不同,热点的温度也会有所差异。一般来说,故障初期热点温度可能只比正常温度高几摄氏度到十几摄氏度,随着故障的发展,热点温度会逐渐升高,甚至可能达到几百摄氏度。例如,某 500kV 输电线路导线连接部位在故障初期热点温度比正常温度高 8°C ,经过一个月的发展,热点温度升高到了 120°C ,最终导致线路跳闸。

3.2 绝缘子故障

绝缘子是超高压输电线路中用于支撑导线和隔离带电体的重要部件。绝缘子故障主要包括绝缘子劣化、污秽闪络等。

3.2.1 绝缘子劣化

绝缘子劣化会导致其绝缘性能下降,泄漏电流增大,产生过多的热量,使绝缘子表面温度升高。根据相关研究,当绝缘子的绝缘电阻从正常值 $1000\text{M}\Omega$ 下降到 $100\text{M}\Omega$ 时,泄漏电流会从微安级增加到毫安级,产生的热量会显著增加。绝缘子劣化的红外热像特征表现为:劣化绝缘子的表面温度分布不均匀,部分区域温度明显高于其他正常区域。例如,某串玻璃绝缘子中有一片绝缘子劣化,其表面最高温度比正常绝缘子高 5°C ~ 8°C ,热像图中可以清晰地看到温度异常区域。

3.2.2 污秽闪络

污秽闪络是由于绝缘子表面污秽积累,在潮湿天气下形成导电通道,导致闪络放电,产生大量的热量,使

绝缘子表面温度急剧升高。据统计,污秽闪络时绝缘子表面的温度可在瞬间达到上千摄氏度。污秽闪络的红外热像特征表现为:发生污秽闪络的绝缘子表面会出现高温区域,热像图中呈现出明亮的斑点或斑块^[3]。例如,某 220kV 输电线路在雾霾天气下发生绝缘子污秽闪络,红外检测发现闪络的绝缘子表面温度高达 1200°C ,热像图中呈现出明显的白色高温区域。

3.3 金具故障

金具是超高压输电线路中用于连接、固定和保护导线的各种金属部件,如耐张线夹、悬垂线夹、防振锤等。金具故障主要包括金具磨损、断裂、松动等,这些故障会导致金具的接触电阻增大或机械应力集中,产生过多的热量,使金具表面温度升高。例如,耐张线夹故障时,线夹与导线接触部位因接触不良导致接触电阻增大,在电流通过时产生热量。根据实际测量,当耐张线夹接触电阻增大到正常值的5倍时,接触部位的温度可比正常温度高 30°C ~ 50°C 。防振锤故障时,防振锤与导线连接部位的螺栓松动,导致接触电阻增大,温度异常升高,一般比正常温度高 10°C ~ 20°C 。金具故障的红外热像特征表现为:故障金具的温度明显高于周围正常金具的温度,热像图中呈现出局部高温区域。例如,某 330kV 输电线路的耐张线夹故障,红外热像图显示线夹与导线接触部位的温度比周围正常线夹高 40°C ,通过进一步检查发现线夹连接螺栓松动,及时进行了紧固处理,避免了故障的进一步发展。

4 红外检修技术在超高压输电线路故障诊断中的应用案例

4.1 案例一:导线连接部位过热故障诊断

某 500kV 超高压输电线路在运行过程中,通过红外热像仪检测发现某基杆塔的导线耐张线夹连接部位温度异常升高,最高温度达到 120°C ,而周围正常导线温度仅为 40°C 左右。进一步检查发现,该耐张线夹连接螺栓松动,导致接触电阻增大,产生过多的热量。检修人员及时对连接螺栓进行了紧固处理,处理后再次进行红外检测,耐张线夹连接部位温度恢复正常,消除了故障隐患。

4.2 案例二:绝缘子劣化故障诊断

在对某 220kV 超高压输电线路进行红外检测时,发现某串绝缘子中有几片绝缘子表面温度分布不均匀,部分区域温度明显高于其他正常绝缘子。经进一步分析判断,这些温度异常的绝缘子可能存在劣化问题。随后,检修人员对该串绝缘子进行了停电检查和试验,确认有几片绝缘子确实存在劣化现象,及时更换了劣化绝缘子,避免了可能发生的绝缘子击穿事故。

4.3 案例三：金具故障诊断

某330kV超高压输电线路在红外检测中发现，某基杆塔的防振锤与导线连接部位温度异常升高，最高温度达到80℃，而周围正常金具温度仅为30℃左右。经现场检查发现，防振锤与导线连接部位的螺栓松动，导致接触电阻增大，产生热量。检修人员对连接螺栓进行了紧固处理，处理后防振锤与导线连接部位温度恢复正常，保障了线路的安全运行。

5 红外检修技术的发展趋势

5.1 高精度、高分辨率红外检测设备的研发

随着红外技术的不断发展，未来将研发出更高精度、更高分辨率的红外检测设备。这些设备能够更准确地测量物体的表面温度，更清晰地显示物体的热图像，从而提高故障诊断的准确性和可靠性。例如，采用新型的红外探测器材料和先进的图像处理算法，可以提高红外热像仪的灵敏度和分辨率，使其能够检测到更微小的温度变化和更细微的故障特征。目前，一些科研机构正在研发量子阱红外探测器，其灵敏度比传统探测器提高了数倍，有望在未来应用于超高压输电线路的红外检测中。

5.2 智能化红外检修系统的应用

智能化红外检修系统将红外检测技术与人工智能、大数据、云计算等技术相结合，实现对超高压输电线路的自动化、智能化检修。该系统能够自动采集、分析和处理红外检测数据，自动识别设备故障类型和故障位置，并给出相应的处理建议^[4]。同时，通过对大量历史检测数据的分析和挖掘，可以预测设备可能出现的故障，提前采取预防措施，实现设备的状态检修，提高检修效率和降低检修成本。例如，利用深度学习算法对红外热像图进行训练和识别，可以准确判断设备的故障类型，识别准确率可达95%以上。超高压输电线路的状态检修是最近几年始终努力研究的检修模式，对整个线路的运行状态进行监视并进行诊断，获取设备的运行状态并判断故障的各种信息，以此来预测线路发生故障的发展趋势。所以，要在设备发生故障之前就按照平时的运行状

态和预测趋势对其进行有效且有针对性的检修。

5.3 多技术融合的检修方法

红外检修技术虽然具有许多优点，但也存在一定的局限性。例如，红外检测只能检测设备表面的温度分布情况，对于设备内部的故障无法直接检测。因此，未来将红外检修技术与其他检测技术，如超声波检测技术、X射线检测技术、局部放电检测技术等相结合，形成多技术融合的检修方法，能够更全面、准确地检测设备的故障，提高故障诊断的准确性和可靠性。例如，将红外检测技术与超声波检测技术相结合，可以同时检测设备的过热故障和内部缺陷，为设备的检修提供更全面的信息。

结语

红外检修技术作为一种非接触式的在线检测技术，在超高压输电线路的故障诊断中具有重要的应用价值。通过红外检测设备可以实时、准确地检测出设备表面的温度分布情况，及时发现设备存在的过热故障隐患，为线路的安全稳定运行提供了有力保障。在实际应用中，应充分考虑影响红外检测结果准确性的各种因素，正确分析常见故障类型的红外热像特征，结合实际案例不断提高故障诊断的准确性和可靠性。同时，随着红外技术的不断发展，高精度、高分辨率红外检测设备的研发、智能化红外检修系统的应用以及多技术融合的检修方法将成为未来红外检修技术的发展趋势，将进一步提高超高压输电线路的检修水平和供电可靠性。

参考文献

- [1] 朝潞蒙,张洋.超高压输电线路运行维护与管理探讨[J].中国信息界,2025,(03):167-169.
- [2] 王耀宇,李渊.红外成像技术在配电网输电线路检修运维中的应用[J].家电维修,2025,(03):122-124.
- [3] 陈泊远,刘宏杰.基于红外成像技术的配电网输电线路检修运维方法[J].电工技术,2024,(05):114-116+121.
- [4] 蒙寿山.基于500kV输电线路检修中红外诊断技术分析[J].电子世界,2021,(22):8-9.