

# 500kV升压站线路设备故障诊断与处理策略研究

王宁 胡勇

华能沁北发电有限责任公司 河南济源 459012

**摘要:** 本文以500kV升压站线路设备为研究对象,结合某电厂500kV升压站内50311刀闸C相静触头固定螺丝过热故障案例,深入分析500kV升压站线路设备常见故障类型及成因。通过对故障处理过程的研究,总结有效的故障诊断方法、处理措施以及预防策略,旨在提高500kV升压站线路设备的运行可靠性,保障电力系统的安全稳定运行,为相关电力企业在升压站线路设备运维管理方面提供参考和借鉴。

**关键词:** 电气原理 500kV升压站; 线路设备; 故障诊断; 处理措施; 预防策略

## 引言

500kV升压站作为电力系统中实现电能汇集与传输的关键枢纽,其线路设备的安全稳定运行对整个电力系统的可靠性和稳定性起着至关重要的作用。随着电力需求的不断增长,500kV升压站的运行负荷日益加重,线路设备面临着更严峻的考验,设备故障时有发生。一旦500kV升压站线路设备出现故障,不仅会导致局部电力供应中断,还可能引发连锁反应,对整个电力系统的安全稳定运行构成严重威胁。因此,深入研究500kV升压站线路设备的故障诊断与处理策略,提高设备运维管理水平具有重要的现实意义。

## 一、500kV升压站线路设备常见故障类型及成因分析

### 1. 过热故障

过热故障是500kV升压站线路设备运行中的高频故障类型,据某省级电力公司2022-2023年运维数据统计,过热故障占升压站线路设备故障总量的38%,主要集中在刀闸触头、母线接头、电缆终端等载流部位,其中刀闸静触头与固定螺丝连接处的过热问题最为典型,如某电厂500kV升压站曾发生50311刀闸C相静触头固定螺丝处过热,最高温度达132℃,远超GB/T 11022-2020《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》中规定的“运

行中设备接触点温度不超过90℃”的限值,若未及时发现,极可能引发触头熔焊、绝缘材料碳化等严重后果。

从故障成因来看,过热故障的产生并非单一因素作用,而是多种风险叠加的结果,具体可分为以下三类:

**接触不良引发过热:**这是过热故障最主要的诱因,占比超过60%。500kV线路设备的载流部位多采用螺栓连接,在长期运行过程中,受设备振动(如变压器励磁振动、风速变化引发的母线振动)、温度循环(负荷波动导致的热胀冷缩)等因素影响,螺栓易出现松动,导致接触面积减小、接触电阻增大。根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ ,当电流 $I$ 通过接触电阻 $R$ 时,产生的热量 $Q$ 与电阻值成正比,电阻越大,热量积累越快。以50311刀闸为例,其额定电流为3150A,当固定螺丝松动导致接触电阻从正常的 $50\mu\Omega$ 增至 $500\mu\Omega$ 时,仅该接触点产生的功率就达 $3150^2 \times 500 \times 10^{-6} \approx 4968W$ ,相当于5个1000W的电暖器同时工作,短时间内即可使温度飙升至危险水平。此外,连接部位的氧化、油污也是导致接触不良的重要原因——金属表面长期暴露在空气中,易形成氧化层(如铜氧化生成 $CuO$ 、 $Cu_2O$ ),氧化层的电阻率远高于金属本体,会显著增加接触电阻;而设备运维过程中若未清理干净接头处的油污、灰尘,也会在接触面形成绝缘层,阻碍电流传导,引发局部过热。

**设备老化导致过热:**500kV线路设备的设计使用寿命通常为20-30年,但在实际运行中,部分设备因长期处于高负荷、恶劣环境,内部材料性能会提前衰退,导致导电能力下降,进而引发过热。以母线为例,早期采用的铝制母线在长期运行中,其内部晶粒会逐渐长大,导致导电率降低;同时,母线表面的防腐涂层若出现破

**作者简介:** 王宁(1997—),男,黑龙江工业学院电气工程及其自动化专业本科毕业,现任华能沁北发电有限责任公司电气一次设备专责,具备助理工程师职称与电机高级工技能等级。长期深耕电气试验与电气运维领域,在保障设备稳定运行与技术创新方面积累了丰富经验。

损, 会引发电化学腐蚀, 腐蚀产物附着在母线表面, 不仅增加电阻, 还会加速材料老化。此外, 设备的导电回路部件在长期使用中, 会因磨损导致接触面减小, 或因弹簧弹力衰减导致接触压力不足, 这些都会使接触电阻增大, 成为过热隐患。某运维案例显示, 某运行15年的500kV刀闸, 其触指弹簧因金属疲劳导致弹力下降30%, 接触压力不足, 使得触指与触头的接触电阻增至正常水平的3倍, 在额定负荷下运行时, 触指温度持续超过100℃, 最终引发局部过热故障。

## 2. 绝缘故障

绝缘故障是500kV升压站线路设备的另一类重大故障, 其危害程度远高于过热故障——绝缘故障一旦发生, 往往伴随绝缘击穿、短路等问题, 可能直接导致设备损坏、线路停运, 甚至引发火灾、爆炸等安全事故。根据国家能源局发布的《电力安全生产信息报送统计分析报告》, 2023年全国500kV升压站因绝缘故障引发的停运事件占总停运事件的29%, 其中绝缘子击穿、电缆绝缘损坏、套管闪络是最常见的三种绝缘故障类型。

绝缘故障的成因复杂, 涉及电场、温度、环境、机械力等多个维度, 具体可归纳为以下几类:

**绝缘材料老化失效:** 绝缘材料是线路设备抵御电场、防止漏电的关键, 但其性能会随运行时间的延长而逐渐衰退, 这一过程被称为“绝缘老化”。500kV线路设备常用的绝缘材料包括陶瓷、交联聚乙烯、环氧树脂等, 不同材料的老化机理虽有差异, 但均受温度、湿度、电场的共同影响。以陶瓷绝缘子为例, 长期运行中, 绝缘子表面会积累灰尘、污秽, 在潮湿天气下, 污秽层会吸收水分形成导电通道, 导致绝缘子表面电阻降低, 泄漏电流增大; 同时, 泄漏电流产生的热量会加速绝缘子内部的化学反应, 使陶瓷材料出现开裂、剥落, 绝缘性能显著下降。而交联聚乙烯电缆在长期运行中, 受温度波动影响, 其内部的交联结构会逐渐分解, 产生小分子化合物, 导致绝缘层的介损增大、击穿场强降低, 当电缆承受的电压超过其剩余绝缘强度时, 就会发生绝缘击穿。某案例显示, 某运行12年的500kV交联聚乙烯电缆, 因长期处于高温环境, 其绝缘层的击穿场强从初始的40kV/mm降至15kV/mm, 在一次雷电过电压冲击下, 直接发生绝缘击穿, 导致线路停运。

**环境因素影响:** 500kV升压站的选址范围较广, 部分站点位于沿海、工业区、高海拔等特殊区域, 这些区域的环境条件会对设备绝缘性能产生显著负面影响。在

沿海地区, 空气中的盐分含量较高, 盐雾会附着在绝缘子、套管等绝缘设备表面, 形成导电层, 降低表面绝缘电阻, 易引发闪络故障; 同时, 盐分还会对金属部件产生腐蚀, 破坏绝缘材料与金属的结合面, 进一步加剧绝缘缺陷。在工业区, 空气中的硫化物、氮氧化物等腐蚀性气体较多, 这些气体与空气中的水分结合形成酸性物质, 会腐蚀绝缘材料的表面, 破坏其结构完整性——例如, 陶瓷绝缘子表面的釉层在酸性物质作用下会逐渐脱落, 露出内部的多孔陶瓷, 使绝缘子的抗污闪能力大幅下降。而在高海拔地区, 由于空气稀薄, 大气压力降低, 绝缘设备的击穿电压会显著下降, 原本在低海拔地区能正常运行的绝缘设备, 在高海拔地区可能因绝缘强度不足而发生击穿故障。

**过电压冲击破坏:** 过电压是导致绝缘设备瞬时损坏的重要原因, 分为雷电过电压和操作过电压两类。雷电过电压是由于雷击线路或升压站附近区域, 在设备上感应出的高电压, 其峰值可达数千千伏, 远超绝缘设备的额定耐受电压。例如, 当雷电击中500kV线路的杆塔时, 会在导线上产生感应雷过电压, 若线路的避雷器未能及时动作或性能失效, 过电压会沿线路传播至升压站, 作用于刀闸、断路器的绝缘部件上, 若电压超过设备的雷电冲击耐受电压, 就会导致绝缘击穿。操作过电压则是由于电网操作引起的电压暂升, 其峰值虽低于雷电过电压, 但持续时间较长, 同样会对绝缘设备造成损害。例如, 在切除空载变压器时, 由于变压器绕组的电感与电容形成振荡回路, 会产生操作过电压, 若变压器的绝缘性能已有老化, 就可能在操作过电压的作用下发生绝缘损坏。

## 3. 机械故障

500kV升压站线路设备中的一些机械部件, 如刀闸的拐臂、操作机构等, 在长期运行过程中会受到频繁的机械动作, 容易出现磨损、变形、卡涩等机械故障。机械部件的加工精度不足、安装不当以及长期缺乏维护等因素, 也会增加机械故障发生的概率。一旦机械部件出现故障, 可能会导致设备无法正常分合闸, 影响电力系统的正常运行。

### 二、500kV升压站线路设备故障诊断方法

#### 1. 红外测温技术

红外测温技术是一种非接触式的检测方法, 能够快速、准确地检测设备表面的温度分布情况。在500kV升压站线路设备故障诊断中, 红外测温技术具有重要的应

用价值。通过定期对设备进行红外测温，可以及时发现设备的过热故障。如案例中，运维人员在开展红外测温检查工作时，敏锐地发现50311刀闸C相静触头固定螺丝处出现明显过热现象。红外测温技术不仅可以检测出设备表面的温度异常，还可以通过对温度变化趋势的分析，预测设备故障的发展情况，为故障处理提供依据。

## 2. 电气试验

电气试验是诊断500kV升压站线路设备故障的重要手段之一，包括接触电阻试验、绝缘电阻试验、耐压试验等。接触电阻试验可以检测设备连接部位的接触情况，判断接触电阻是否在合格范围内，对于发现接触不良导致的过热故障具有重要意义。绝缘电阻试验和耐压试验则主要用于检测设备的绝缘性能，判断绝缘设备是否存在缺陷或损坏。通过电气试验，可以准确地诊断设备的电气性能是否正常，及时发现潜在的故障隐患。

## 3. 在线监测技术

随着信息技术的不断发展，在线监测技术在500kV升压站线路设备故障诊断中的应用越来越广泛。在线监测技术可以实时监测设备的运行参数，如电流、电压、温度、局部放电等，通过对这些参数的分析和处理，及时发现设备的异常情况。例如，通过监测设备的局部放电情况，可以判断设备内部是否存在绝缘缺陷；通过监测电流和电压的变化，分析设备的运行状态。在线监测技术具有实时性强、准确性高的特点，能够为设备的故障诊断和运维管理提供及时、准确的信息。

### 三、500kV升压站线路设备故障处理措施

#### 1. 故障设备更换

当500kV升压站线路设备出现严重故障，无法通过维修恢复正常运行时，需要及时更换故障设备。在更换设备时，应提前做好备件申报工作，确保所需备件及时到位，以最大程度缩短设备停运周期。如案例中，在设备停运后，运维人员有条不紊地更换了刀闸静触头铜棒以及均压环等相关设备。在设备更换过程中，要严格按照操作规程进行，确保新设备的安装质量，保证设备更换后能够正常运行。

#### 2. 故障修复

对于一些可以通过维修解决的故障，如螺丝松动、接触不良等问题，应及时进行修复。在修复过程中，要采取有效的措施确保故障得到彻底解决。例如，对于螺丝松动导致的接触不良问题，要对固定螺丝进行精确的

力矩紧固操作，使其达到规定的紧固标准，并在接触部位涂抹导电膏，进一步降低接触电阻，减少发热隐患。同时，在修复完成后，要对设备进行全面的检查和测试，确保设备性能恢复正常。

## 3. 设备调试与试验

在故障处理完成后，为确保设备能够安全稳定运行，需要对设备进行调试与试验。调试工作主要是对设备的各项参数进行调整，使其符合运行要求；试验工作则包括分合闸试验、接触电阻试验、绝缘电阻试验等，通过试验验证设备的性能是否正常。只有在设备调试和试验结果均合格的情况下，才能将设备投入运行。在设备投运后，还应持续对设备进行监测，观察设备的运行状态，确保故障处理措施有效。

## 结论

500kV升压站线路设备的安全稳定运行对电力系统至关重要。通过对某电厂500kV升压站内50311刀闸C相静触头固定螺丝过热故障案例的分析，我们深入了解了500kV升压站线路设备常见故障类型及成因，掌握了有效的故障诊断方法、处理措施以及预防策略。在实际工作中，电力企业应充分利用红外测温技术、电气试验、在线监测技术等故障诊断手段，及时发现设备故障隐患；采取科学合理的故障处理措施，确保故障得到及时、有效的处理；同时，加强设备巡检与维护、优化设备检修管理、提升运维人员专业素质，从多个方面预防设备故障的发生。只有这样，才能提高500kV升压站线路设备的运行可靠性，保障电力系统的安全稳定运行。未来，随着电力技术的不断发展，还需要不断探索和创新500kV升压站线路设备的故障诊断与处理技术，进一步提升升压站线路设备的运维管理水平。

## 参考文献

- [1] 彭昌文. 一次电气设备高压试验探讨[J]. 通信电源技术, 2020, 37(5): 279-280+282.
- [2] 国家能源局. DL/T 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [3] 李永刚. 电力系统运行与维护管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [4] 中国电力科学研究院. 电力系统运行维护技术发展[EB/OL]. (2024-06-20) [2024-12-27].