

高压电气设备的绝缘故障分析与预防措施

许 明

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310020

摘 要：高压电气设备绝缘故障是电力系统运行中的重大安全隐患。本文深入分析了绝缘故障的定义、分类、常见表现与危害，探讨了电场强度、绝缘材料老化、环境因素、设计制造缺陷及操作维护不当等故障原因。基于此，提出了提高绝缘材料质量、加强运行监测与维护、改善运行环境、优化操作规程与培训及引入先进检测技术与方法等预防措施，旨在保障高压电气设备的安全稳定运行。

关键词：高压电气设备；绝缘故障；预防措施

引言：高压电气设备的绝缘性能是确保其安全稳定运行的关键因素之一。然而，在实际运行中，绝缘故障时有发生，严重影响了设备的可靠性和电力系统的稳定性。本文将对高压电气设备的绝缘故障进行深入分析，探讨其产生的原因，并提出相应的预防措施，以期减少绝缘故障的发生、提高设备的安全性提供理论支持和实践指导，保障电力系统的平稳运行。

1 高压电气设备绝缘故障概述

1.1 绝缘故障的定义与分类

高压电气设备绝缘故障是指设备中用于隔离不同电位部分的绝缘材料或结构，因各种原因导致其绝缘性能降低或失效，从而引发电流异常流动或设备异常运行的故障。绝缘故障是高压电气设备运行过程中的一类严重故障，其直接影响设备的可靠性和安全性。

根据绝缘介质的不同，绝缘故障可以分为以下三类：（1）气体绝缘故障。高压电气设备中，常使用气体（如空气、六氟化硫等）作为绝缘介质。气体绝缘故障通常是由于气体绝缘强度不足、气体中含有杂质或水分、气体压力变化等原因引起的。例如，当气体中的水分含量过高时，会导致气体的绝缘性能显著下降，进而可能引发放电或击穿现象。（2）液体绝缘故障。在高压电气设备中，液体绝缘材料（如变压器油、绝缘油等）也常被用作绝缘介质。液体绝缘故障可能由于液体绝缘材料的老化、污染、变质或水分混入等原因导致。液体的绝缘性能会随着其化学成分的变化而逐渐降低，当降低到一定程度时，就可能引发绝缘击穿。（3）固体绝缘故障。固体绝缘材料（如绝缘纸、绝缘板、绝缘漆等）在高压电气设备中扮演着重要的角色。固体绝缘故障可能由于材料的老化、受潮、机械损伤、热应力等因素导致。固体绝缘材料的绝缘性能稳定性对于设备的长期安全运行至关重要^[1]。

1.2 绝缘故障的常见表现与危害

绝缘故障在高压电气设备中的表现多种多样，其危害也极为严重。（1）电弧放电与闪络现象。当绝缘被击穿时，设备内部可能形成电弧放电或闪络现象。电弧放电会产生高温和强烈的电磁辐射，对设备造成严重的物理损伤。而闪络现象则可能引发设备的异常响声和放电火花，严重时可能导致设备损坏。（2）设备损坏、短路与停电事故。绝缘故障还可能导致设备内部的电流异常增大，进而引发设备过热、烧毁等严重后果。此外，绝缘故障还可能引起电力系统的短路故障，导致大面积停电，严重影响人们的日常生活和生产活动。例如，变电站中的开关柜因绝缘故障引发短路，可能导致整个变电站停运，造成重大经济损失。（3）对人身安全的潜在威胁。高压电气设备中的绝缘故障还可能对操作人员的安全构成严重威胁。当设备发生绝缘击穿或放电现象时，可能产生电击危险，对接触设备的人员造成伤害。因此，对于高压电气设备的绝缘性能进行定期检测和维护至关重要，以确保设备的安全稳定运行和人员的生命安全。

2 高压电气设备绝缘故障的原因分析

2.1 电场强度与击穿现象

电场强度是决定绝缘材料是否能保持其介电性能的关键因素。当电场强度超过材料的耐受极限时，将引发击穿现象，从而导致绝缘失效。（1）电场强度过高导致的间隙击穿。在高压电气设备中，如果电场分布不均，特别是在电极间存在微小间隙或气泡的情况下，这些区域可能成为放电的起始点。当电场强度足够高时，间隙内的气体分子将被电离，形成导电通道，导致间隙击穿。这种击穿往往伴随着强烈的放电现象，可能对设备造成物理损伤。（2）不同电介质交界面的沿面击穿。不同电介质之间的交界面由于材料性质的差异，往往存

在电场分布不均的问题。在交界面处,由于电场强度的突变,容易引发放电现象。长时间的放电会侵蚀绝缘材料,降低其绝缘性能,最终导致沿面击穿。沿面击穿往往发生在绝缘材料的边缘或表面缺陷处。

2.2 绝缘材料老化

绝缘材料的老化是导致高压电气设备绝缘性能下降的主要原因之一。老化过程涉及多种因素,包括温度、电场、机械应力等。(1)热老化。高温会加速绝缘材料内部化学反应的速度,导致分子链断裂、交联点减少等结构变化。这些变化会降低材料的机械强度和电气性能,使其更容易受到电场和机械应力的影响。(2)电气老化。在高压电场的作用下,绝缘材料内部的电子和离子会受到加速,并与材料分子发生碰撞。这些碰撞会破坏材料的分子结构,导致局部放电和电离现象。长时间的电气老化会降低材料的绝缘性能,增加击穿的风险。

(3)机械老化。交变负荷和冲击应力会导致绝缘材料内部产生微小的裂纹和变形。这些损伤会降低材料的机械强度和电气性能,使其更容易受到电场和温度的影响。同时,机械老化还可能引发局部放电现象,进一步加速材料的老化过程^[2]。

2.3 环境因素与污染

环境因素对高压电气设备的绝缘性能有着不可忽视的影响。恶劣的环境条件和污染物附着都会降低绝缘材料的性能。(1)恶劣环境条件对绝缘材料的侵蚀。高温、潮湿、腐蚀性气体等恶劣环境条件都会加速绝缘材料的化学腐蚀和物理损伤。这些影响会降低材料的机械强度和电气性能,增加击穿的风险。(2)油污、灰尘等污染物附着导致绝缘性能降低。油污、灰尘等污染物附着在绝缘材料表面会形成导电通道或增加表面电阻,从而降低其绝缘性能。这些污染物还可能引发局部放电现象,进一步加速绝缘材料的老化过程。

2.4 设计、制造与安装缺陷

设计、制造和安装过程中的缺陷也是导致高压电气设备绝缘故障的重要原因。(1)绝缘结构设计不合理。不合理的绝缘结构设计可能导致电场分布不均、绝缘层厚度不足等问题。这些问题会降低设备的绝缘性能,增加击穿的风险。(2)制造过程中的质量控制问题。制造过程中的原材料质量问题、加工工艺不当或检验标准不严等都可能导致绝缘材料的性能不达标。这些质量问题会直接影响设备的绝缘性能和使用寿命。(3)安装时的误操作与不当处理。在安装高压电气设备时,如果操作不当或处理不当,如机械损伤、接线错误等,都可能影响设备的绝缘性能。这些操作失误会降低设备的可靠

性,增加绝缘故障的风险。

2.5 操作与维护不当

操作和维护的不当也是导致高压电气设备绝缘故障的原因之一。(1)操作规程执行不严。如果操作规程没有得到严格执行,如过载运行、违章操作等,都可能导致设备绝缘性能的下降。这些操作不当会加速设备的老化过程,增加绝缘故障的风险。(2)定期维护缺失或维护不当。定期维护是保持高压电气设备绝缘性能的关键。然而,如果维护计划没有得到有效执行,或者维护过程中存在操作不当、检查不全面等问题,都可能导致绝缘性能的下降。例如,未能及时清洁绝缘材料表面的污染物、未能及时发现并修复绝缘层的损伤等,都可能引发绝缘故障。

3 高压电气设备绝缘故障的预防措施

3.1 提高绝缘材料的质量与性能

(1)选用高性能绝缘材料。高性能绝缘材料具有更高的介电强度、更好的耐热性能和更长的使用寿命。在选购绝缘材料时,应优先考虑其电气性能、机械性能和热稳定性等指标,选择符合或超过设备设计要求的高性能材料。同时,还应注意材料的耐候性和抗老化性能,确保其在长期运行中能够保持良好的绝缘性能。(2)优化绝缘结构设计以增强绝缘强度。绝缘结构设计对于提高设备的绝缘性能至关重要。在设计过程中,应根据设备的额定电压、电流和运行环境等因素,合理确定绝缘层的厚度、形状和材料组合。通过优化绝缘结构设计,可以增强绝缘强度,提高设备的绝缘可靠性。同时,还应考虑绝缘材料的热膨胀系数和机械应力等因素,确保绝缘结构在运行过程中不会出现开裂、脱落等问题。

3.2 加强设备运行监测与维护

(1)定期进行绝缘电阻测试与泄漏电流检测。绝缘电阻测试和泄漏电流检测是评估设备绝缘性能的有效方法。通过定期测量绝缘电阻和泄漏电流,可以及时发现绝缘材料的老化、受潮或损伤等问题。在测试过程中,应确保测试设备的准确性和可靠性,遵循正确的测试方法和步骤,以获得准确的测试结果。对于测试结果异常的设备,应立即采取措施进行修复或更换。(2)对关键部位进行红外热成像检测以发现潜在热点。红外热成像技术可以检测设备表面的温度分布,帮助发现潜在的热点和过热区域。这些热点和过热区域往往是绝缘材料老化、接触不良或过载运行的迹象。通过对关键部位进行红外热成像检测,可以及时发现并处理这些问题,防止它们进一步恶化导致绝缘故障^[3]。(3)严格执行设备维护计划,及时更换老化绝缘部件。制定并执行严格的设

备维护计划,是保持设备良好运行状态的关键。在维护计划中,应明确绝缘部件的检查周期、更换标准和操作程序等内容。对于达到更换标准的老化绝缘部件,应及时进行更换,以防止其引发绝缘故障。同时,还应加强对维护工作的监督和考核,确保维护计划的得到有效执行。

3.3 改善设备运行环境与防护措施

(1) 保持设备运行环境清洁干燥,减少污染物附着。设备运行环境对绝缘性能有很大影响。应保持设备运行环境清洁干燥,减少油污、灰尘等污染物的附着。这可以通过定期清洁设备表面、安装防尘罩等措施来实现。同时,还应加强设备运行环境的通风和散热,以降低设备内部的温度和湿度,提高绝缘性能。(2) 对易受污染的设备部位采取防污闪措施。污闪是指设备表面附着的污秽物在潮湿条件下形成的导电通道,导致设备绝缘性能下降甚至击穿的现象。对于易受污染的设备部位,如套管、绝缘子等,应采取防污闪措施。这包括涂覆防污闪涂料、增加绝缘层厚度、采用复合绝缘结构等。通过这些措施,可以有效提高设备的防污闪能力,减少绝缘故障的发生。(3) 加强设备的密封性能,防止外部水分、灰尘等侵入。设备的密封性能对绝缘性能有很大影响。应加强设备的密封设计,采用密封垫、密封圈等密封元件,确保设备内部与外部环境的隔离。同时,还应定期对设备的密封性能进行检查和维护,及时发现并处理密封件老化、损坏等问题,防止外部水分、灰尘等侵入设备内部,影响绝缘性能^[4]。

3.4 优化操作规程与培训

(1) 制定并执行严格的操作规程。操作规程是指导操作人员正确、安全地操作设备的重要依据。在制定操作规程时,应充分考虑设备的特点、运行环境和操作人员的技能水平等因素,确保规程的科学性、合理性和可操作性。同时,还应定期对操作规程进行审查和更新,以适应设备的变化和运行环境的改变。在执行操作规程时,应严格要求操作人员遵守,防止误操作导致的绝缘故障。(2) 加强操作人员的培训与考核。操作人员的专业技能和安全意识对于预防绝缘故障具有重要意义。因此,应定期对操作人员进行培训和考核,提高他们的专业技能和安全意识。培训内容可以包括设备的基本原理、操作规程、绝缘材料的性能和维护方法等方面。考

核可以采用理论考试、实操演练等形式进行,以确保培训效果。对于考核不合格的人员,应进行再次培训或调整工作岗位。

3.5 引入先进检测技术与方法

(1) 应用在线监测与故障诊断技术。在线监测技术可以实时监测设备的运行状态和绝缘性能,及时发现潜在的绝缘缺陷。通过安装传感器和数据采集系统,可以实时采集设备的运行参数和绝缘性能指标,如电压、电流、温度、湿度等。利用故障诊断算法对采集的数据进行分析和处理,可以判断设备的绝缘状态是否存在异常,及时发出预警信号。这种方法具有实时性、准确性和高效性等优点,可以大大提高预防绝缘故障的效果。

(2) 采用局部放电检测等先进手段评估绝缘状态与寿命。局部放电是绝缘材料内部或表面微小缺陷在电场作用下发生的放电现象。通过检测局部放电信号,可以评估绝缘材料的性能和寿命。局部放电检测技术具有灵敏度高、定位准确等优点,可以及时发现和处理绝缘材料内部的微小缺陷。结合绝缘材料的性能参数和寿命模型,可以预测设备的绝缘寿命,为制定合理的维护计划和更换策略提供依据。

结束语

综上所述,高压电气设备的绝缘故障不容忽视,其有效预防对于电力系统的安全稳定运行至关重要。通过深入分析故障原因并采取针对性的预防措施,如提升绝缘材料质量、强化监测维护、改善运行环境等,可以显著降低绝缘故障的发生率。未来,随着技术的不断进步,应继续探索更加高效的绝缘故障检测与预防手段,为高压电气设备的长期安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]穆文静.基于机器视觉的变电站高压电气设备绝缘自动监测方法[J].绵阳师范学院学报,2024,(02):25-26.
- [2]姜效星.基于温变的煤矿变电站高压电气设备故障诊断方法[J].山东煤炭科技,2023,(11):120-121.
- [3]毛文增.高压电气设备检修技术研究[J].冶金管理,2021,(06):60-61.
- [4]李燕.高压电气设备故障诊断中红外检测技术的应用[J].光源与照明,2021,(08):59-60.