

高海拔高寒地区高压电气设备绝缘试验异常缺陷分析与防控技术研究

塔晓龙

国网青海省电力公司海北供电公司 青海 海北 812200

摘要：高海拔高寒环境下高压电气设备绝缘试验异常缺陷频发，威胁电网安全。本文利用不同海拔放电试验，揭示了低气压、低温及强辐射对绝缘性能的影响机理，分析了接地不良致介质损耗异常、直流电阻不合格、泄漏电流超标及局部放电与温升异常等缺陷成因，提出了绝缘性能提升、散热优化及安全管理的综合防控体系，为高原设备安全运行提供技术支持。

关键词：高海拔；高寒地区；高压电气设备；绝缘试验；异常缺陷分析；防控技术

引言

我国西部高海拔高寒地区电网规模持续扩大，低气压、强低温及强辐射等极端环境严重削弱电气设备绝缘性能，绝缘试验中异常缺陷频发，威胁电网安全运行。目前多因素耦合下绝缘劣化机理及系统防控技术研究尚显不足。本文可依托常规高海拔的电气试验平台，系统研究环境因素对绝缘性能的影响规律，剖析试验异常缺陷成因，并构建涵盖性能提升、散热优化与安全管理的综合防控体系，为高原电力设备运维提供科学依据。

1 高海拔高寒环境对电气设备绝缘性能的影响机理

1.1 低气压环境下空气绝缘强度的衰减规律

高原环境由于气压降低，空气密度下降，气体分子间距增大。电子在电场作用下更容易加速并引发电离，使得空气的绝缘能力下降，导致以空气为绝缘介质的电工电子产品的绝缘强度降低^[1]。本次研究依托常规高海拔电气试验平台，分别在海拔2000m、3000m和4000m的气压环境，在温度20℃、相对湿度50%的条件下，采用GB/T16927.1规定的升降法，在球头棒电极（ $\phi 10\text{mm}$ ）-板空气间隙300mm、400mm、500mm、600mm下进行U50工频放电试验，每个海拔点每个间隙下进行30次放电试验。试验数据表明，在模拟海拔2000米、3000米和4000米的环境下，击穿电压值均出现下降。随着电气间隙的增大，击穿电压值的下降幅度也在增大，说明随着电压等级越高，海拔对其影响越大。海拔高度每上升1000米，空气密度大约降低10%，这种变化会直接使得外绝缘的放电电压随海拔增高呈现下降趋势。高海拔地区空气间隙的绝缘强度呈现过饱和特性和大分散性特点，间隙放电电压随海拔升高逐渐降低。

1.2 低温环境对绝缘材料性能的影响

高寒地区的低温环境对绝缘材料的物理性能产生直接作用。温度降低导致绝缘材料变硬、变脆，介电常数和介质损耗角正切值发生变化。在相同环境下，温度越高，泄漏电流越明显，温度变化对电流的影响超出阻性分量。当环境温度不能满足试验要求时，绝缘电阻值随温度变化而改变。因检流计具备较高灵敏度，需待环境温度稳定至设定标准值、且被测设备温度与环境温度趋于一致后，才能开展试验作业。低温还会导致绝缘油粘度增大，流动性降低，影响变压器等油浸式设备的绝缘性能。在海拔4000米地区，普通变压器的故障率比平原地区高出3倍以上。当海拔达到3000米时，传统变压器的局部放电量增加50%，温升超标现象频发。

1.3 强辐射与湿度变化对绝缘试验结果的干扰

高海拔地区强紫外线辐射加速绝缘材料老化，表面电阻下降。湿度方面，随着盐污等级升高，电气设备的爬电距离需求随之升高。高海拔地区温度、空气密度与湿度不断降低，高压电气设备的外绝缘强度随之降低。湿度对试验结果的影响需要进行校正处理，校正到相同湿度标准下，才能明确高海拔地区湿度对外绝缘放电电压的影响参数。选用配电装置GIS设备，以SF6作为绝缘气体，需对高压电气设备外绝缘水平进行海拔修正处理，获取高原地区外绝缘水平海拔修正值。

2 高压电气设备绝缘试验中的异常缺陷分析

2.1 接地不良导致的介质损耗异常

在高电压的绝缘测试过程中，最常见的问题就是接地不足，尤其是在像电容型设备这样的地方，比如变压器的电压部分、电容式的套管和耦合电容器等等。如果这些设备的接地状况不好，就会导致大量的介质损失，并引发过多的能源消耗，从而给电力系统的运作带来潜

在的风险^[2]。而当出现接触不良的情况时,就好像把等效的电阻连接到了相关部件上一样。当测试设备接地不良时,电容器的损耗随电容增大而增大,若电容较大,测试设备的介电损耗会超标,从而影响测试结果。介质损耗因数的测量对接地回路的完整性要求较高,接地引下线与接地体之间若存在氧化层、松动或虚接,会在测试回路中引入附加阻抗分量,使 $\tan\delta$ 测量值偏离真实值。在实际测试中,接地不良导致的 $\tan\delta$ 偏大往往伴随测试数据重复性差的特征,同一设备多次测量结果离散性增大。接地开关问题主要指滤波器相关参数显示异常,接地开关问题相对突出。接地开关接触电阻过大会导致设备外壳电位升高,在进行绝缘电阻和介质损耗试验时,泄漏电流经异常接地路径分流,造成测量值失真。对于GIS设备,外壳接地不良还会引起悬浮电位放电,在局部放电测试中表现为背景噪声增大,掩盖真实放电信号。

2.2 直流电阻不合格与泄漏电流超标

直流电阻不合格是高压电气试验的主要异常问题。原因包括:分接开关接触问题,主要有电镀层脱落、分接开关触头较脏以及触头弹簧压力不足,导致接触电阻增大,测量直流电阻时阻值偏高;焊接不良,焊接不牢固导致绕组焊接处及引线处焊接脱落,增加阻值,焊点虚焊在大电流运行时发热,进一步恶化接触状态;绕组断线,三角线连接时相断线会增加阻值,范围在1.5至3倍之间,星型连接时断线表现为某相电阻显著增大,其余两相基本不变。变压器直流电阻若过小,匝间易出现短路,圈数减少,电流增大,发生烧毁现象;若电阻过大,每部导线出现异常,易导致过热。变压器直流电阻不合格的原因还包括绕组导体结构问题导致电阻无法达到相对平衡,截面出现偏差,多股并绕导线中个别股线断裂也会引起三相电阻不平衡率超标。避雷器泄漏电流超标与避雷器和引线接头之间的连接直接相关,影响电网安全。避雷器阀片老化或受潮后,泄漏电流中阻性分量增大,在直流1mA电压下的泄漏电流值超过标准限值。

2.3 局部放电异常与温升超标

高海拔环境下,绝缘带问题对高压试验造成影响。在高压柜内电缆中间增加绝缘隔板后,送电过程中隔板内发生放电问题,即由绝缘带问题对高压电压造成的影响。随着电压升高,达到极限后产生新问题。交流电压下的绝缘试验产生的离子在迁移过程中受到不同程度阻挡,粒子运动速度随电压增大建立正比关系。局部放电量与带电、接地电极表面的场强有关,进行局部放电试验时必须保证试验环境安静。高海拔地区由于气压降低,气体放电起始电压下降,同一绝缘结构在高海拔

条件下更容易发生电晕放电,局部放电起始电压和熄灭电压均低于平原地区^[3]。试验数据显示,各测量点温升随海拔升高而递增,且温升绝对值越大,海拔变化对其影响越显著。在温升值处于0至20K和20K至40K区间,海拔每升高1000m温升值增加在2K以内;在40K至60K区间,海拔每升高1000m温升值增加在3K以内;温升值大于60K区间时,海拔每升高1000m温升值增加在6K以内。4000m比3000m平均增加99.3%,5000m比4000m平均增加130.6%。海拔对温升的影响呈现加速效应,每千米影响强度随基础温升值提高而增大。温升超标导致绝缘材料加速老化,绝缘油氧化速率增加,绝缘电阻下降,形成温升与绝缘劣化之间的正反馈循环。对于干式变压器和环氧浇注设备,高温还会引起浇注体内部微裂纹扩展,进一步降低绝缘强度。

3 高海拔高寒地区绝缘试验防控技术体系

3.1 绝缘性能提升与试验方法优化

绝缘性能提升方案包括:增加电气间隙和爬电距离,高海拔地区空气间隙绝缘强度呈过饱和特性,不能简单放大低海拔端部金具,需准确计算间隙增大比例;在不同极间或极对地间增加绝缘隔板等辅助绝缘材料。针对外绝缘,需优化换流站屏蔽金具尺寸参数,为高海拔特高压直流工程外绝缘设计提供技术支持。试验方法方面,首先开展谐振耐压试验,针对容性、感性小电流设备进行分析。操作中选用大容量试验变压器配合电容、电感负载,建议在变压器出口并联电容器实现电源容量补偿,减少电压波动影响。感性负载可选变压器高压绕组或高压可调电抗器。套管局部放电测量需合理控制试验回路背景,建议采用400mm铝铜双环结构完成高压连接,提高试验稳定性。绝缘预防性试验分为两类:绝缘特性试验为非破坏性试验,通过测量绝缘电阻、介质损耗角正切值、泄漏电流等参数判断内部缺陷;耐压试验为破坏性试验,施加超过工作电压的高电压,可发现危险性较大的集中性缺陷。绝缘电阻试验规定加压60s后的读数即为绝缘电阻值,该参数直接反映设备绝缘整体状况。吸收比测试主要反映大型机电设备与变压器绝缘的受潮程度,常温下吸收比小于规定值时即可判断绝缘受潮或存在缺陷,测试成果灵敏度较高。介质损耗角正切值测量能有效反映绝缘的分布性缺陷,如运行中绝缘的广泛受潮与老化问题,为评估设备绝缘状态提供重要依据。

3.2 散热系统优化与设备设计改进

散热性能下降是高海拔地区设备面临的核心问题。空气密度低导致热传导和对流散热效率下降,空气分子

间距大,可用于传递热量的介质减少,散热困难,温升升高。散热系统优化方案包括:增加载流导体尺寸增强散热性能;采用强迫风冷方式弥补散热性能下降;按制造厂定的海拔降容系数降低容量使用。技术创新方面,复合绝缘系统采用纳米改性环氧树脂与特殊陶瓷填料结合的新型绝缘材料,将击穿电压强度提升40%,通过介电常数梯度设计有效抑制高海拔环境下的局部放电现象。气-固协同绝缘结构通过在关键部位设置微型气压补偿腔,自动调节内部气体压力,保持稳定绝缘性能,在5000米海拔环境下仍能保持与平原相当的绝缘水平^[4]。多维度立体散热系统包含仿生散热鳍片结构使表面积增加60%,热管-相变复合技术利用特殊工质在相变过程中吸收大量热量,将关键部位温升控制在安全范围内。在4000米海拔条件下,该系统仍能维持与平原地区相近的散热效率。对于低压成套柜,96个测试点分布在断路器进出线端、母排连接处、热继电器进出线端、抽屉功能单元出线端、绝缘手柄和金属外壳上,代表不同发热量和温度区间。试验表明散热不足将导致绝缘材料和内部元件加速老化,电气连接失效,使用寿命缩短,引发安全事故。

3.3 安全管理与人员技术保障

高压电气试验的安全管理需从以下方面落实。首先严格恪守电力安全相关规程规范,严格执行工作票、工作许可、现场工作监护、工作间断、工作转移及工作终结等各项安全管理制度。由班组长或上级管理部门统一签发工作票,配齐现场监护人员全面管控作业现场整体情况,严禁无关人员擅自进入作业区域。人身安全防范方面,试验前需将设备充分放电,派遣专业人员进行监护,佩戴绝缘手套、安全帽、绝缘靴,将接地刀闸提前闭合确保设备充分放电。电力电缆直流耐压试验过程中,完成降压放电后需断开所有试验设备电源,才可进行试验引线拆除工作。试验结束后对所有设备进行科学放电处理,按相关规定穿戴全套绝缘防护装备并在技术

人员监督下进行。人员技术培训方面,需优先选派实践经验丰富、责任心强的工作人员参与。定期开展高压试验专业技术培训,全面提升业务操作水平。试验前制定完善的试验规划,包括操作步骤、试验内容等,对设备状态进行全面检查,准备安全警示牌。强化人员安全防范意识,使其在试验过程中将安全置于首要位置^[5]。试验中所有操作必须按照电力部门相关规定执行,危险点控制需编制过程控制卡,对全部流程进行控制,逐个确认危险点防范措施并签字确认,从准备工作到试验结束严格按程序开展,杜绝操作隐患。

结语

高海拔高寒环境通过低气压衰减空气绝缘强度、低温劣化材料性能及强辐射加速老化等多重机理,显著影响高压电气设备绝缘试验结果。本文系统揭示了接地不良、电阻异常、局部放电及温升超标等缺陷成因,并从绝缘优化、散热改进与安全管理三维度构建了防控技术体系。纳米改性复合绝缘与气-固协同结构等创新方案有效提升了设备耐受能力。研究成果可为高原特高压工程设备选型、试验规范制定及运维策略优化提供重要参考。

参考文献

- [1]杨旭,王海菠,张晋寅,韦晓星,李红元,黎卫国,张长虹,彭翔.高海拔地区电气设备典型回路系统抗震性能研究[J].电瓷避雷器,2025(2):42-48.
- [2]段鸿飞.高海拔风电场的电气设备绝缘性能研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(6):172-175.
- [3]魏庆翱,梁美玲,高淑清,邵明明,廖银宏,黄康宁,钟思,秦红波.基于电流特征的电气设备故障监测[J].装备制造技术,2026(1):24-27.
- [4]应佳峰.电气设备安装工程质量控制与技术优化探讨[J].中国建筑,2026,9(8):54-56.
- [5]徐则诚,欧阳友,杨麟,杨杰.高海拔环境对西藏扎拉水电站电气设备选型的影响研究[J].水利水电快报,2024,45(6):99-102.