

某光伏电站 110 kV 主变有载调压开关轻瓦斯告警动作的深度分析与治理

戴星星, 詹鑫

(江西省水投数字能源技术有限公司, 江西 南昌 331600)

摘要:文中针对某光伏电站 110 kV 主变压器有载调压开关气体继电器的轻瓦斯告警事件进行深入剖析, 通过现场检测、理论分析和仿真验证, 深度揭示了因施工过程中气体排放不彻底, 管路设计缺陷导致的气体积聚原理; 结合电弧物理化学理论与流体动力学模型; 系统地构建了有载分接开关产气-排气动态平衡模型, 提出了基于坡度改造与管路优化的综合治理方案。结果表明, 整改后主变运行稳定性得到显著提升, 为同类设备的设计、安装及运维提供了重要参考依据。

关键词:有载调压开关; 气体继电器; 轻瓦斯保护; 产气机理; 光伏电站

中图分类号: TM 586 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2026)01-0062-05

0 引言

随着国家“双碳”目标的持续推进, 作为清洁能源的核心组成部分, 光伏电站的安全稳定运行对电网可靠性有着重要意义。110 kV 主变压器作为电站的核心设备, 其有载调压开关通过调整分接头实现输出电压控制。气体继电器作为变压器的非电量保护装置, 对变压器的内部故障(如电弧放电、绝缘老化)的早期预警具有不可替代的作用^[1]。然而实际运行中, 轻瓦斯告警事件时有发生, 原因可能是变压器内部轻微故障, 也可能是安装工艺缺陷、运维不当引发误报^[2], 这不仅影响变压器运行健康状态的评估, 还可能造成不必要的停电检修, 带来发电损失。

光伏电站有功出力具有明显的周期性波动特征。在白天光照充足时, 变压器满负荷运行, 夜间停机导致油温骤降, 形成剧烈的油体热胀冷缩循环, 易引发变压器油中溶解气体析出与积聚^[3]。功率间歇性激励变化还会导致主变负载频繁波动, 进一步加剧油温变化, 加速绝缘材料热老化进程^[4]。现有的研究多数聚焦于变压器内部故障引发的瓦斯告警, 如电弧放电

导致的变压器油分解产气规律^[5]、绝缘老化的特征气体识别等, 而对安装工艺缺陷与光伏电站特殊运行环境叠加导致的气体积聚问题关注不足。此外, 现有的解决方案多数采用单一管路坡度优化或定期排气等措施^[6-7], 未充分考虑流体动力学规律对产气-排气动态平衡的影响, 因此治理效果有限。

文中以某 80 MW 光伏电站 110 kV 主变有载调压开关轻瓦斯告警事件为研究对象, 运用油色谱分析、FLUENT 流体动力学仿真、MATLAB 数据可视化等方法, 结合垂直管内气液两相弹状流中长气泡运动规律^[8-9], 深入分析告警原因。提出多维度综合治理方案, 并结合全生命周期理念优化运维策略, 构建了产气-排气动态平衡模型, 为新能源场站核心设备的异常防控与智能运维可行性提供参考。

1 有载调压开关气体保护系统原理与结构特性

1.1 有载调压开关气体继电器工作机制

有载调压开关气体继电器主要由驱动机构、选择器、切换开关及油室组成, 其核心功能是在带负载状态下切换变压器分接头, 调节输出电压。由于负载电流

收稿日期: 2025-11-11

作者简介: 戴星星(1993), 男, 专科, 工程师, 从事新能源运维管理。

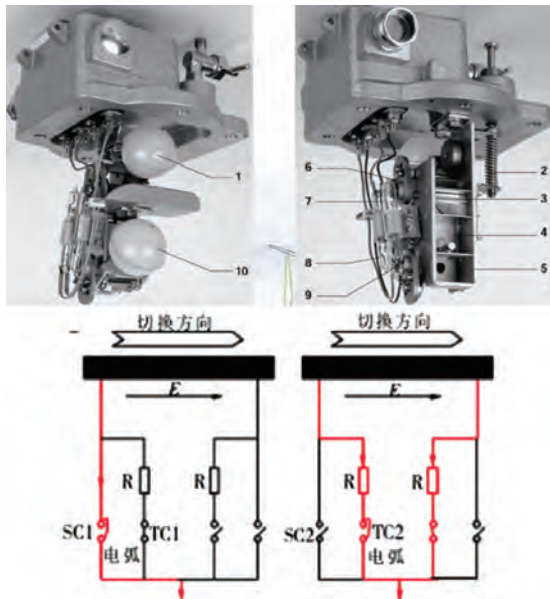
的存在,切换开关在操作过程中,在主弧触头(SC1)和过渡触头(TC2)上形成小电弧,电弧能量(Q)导致变压器油热分解,生成氢气(H_2)、甲烷(CH_4)等特征气体^[10],单次切换产气量约为0.1~0.3 mL。正常运行时,这些气体以长气泡形式在管路中迁移,通过气液两相弹状流运动向储油柜输送,经呼吸器排出,维持系统气体平衡。气泡在油中的动力学行为受电场、流场共同作用,其形变和迁移特性直接影响排气效率^[6]。

电弧能量计算公式为:

$$Q = \int_0^t U(t)I(t)dt \quad (1)$$

式中: Q 为电弧能量,J; U 为电弧电压,V; I 为电弧电流,A; t 为燃弧时间,ms。

现场有载调压开关气体继电器结构如图1所示。



1、10—浮子;3、6、9—永久磁铁;4—挡板;7、8—干簧管;SC1、SC2—主弧触头;TC1、TC2—过渡触头;R—电阻

图1 有载调压开关气体继电器结构示意图

气体继电器采用浮筒式结构,内部设置上下两个动作阈值:当积聚的气体达250~300 mL时,浮筒下降触发轻瓦斯告警,体积达1500 mL时,挡板动作触发重瓦斯跳闸,其动作可靠性在于气体迁移路径的通畅、管路坡度(推荐2%~4%)及安装工艺等。

1.2 光伏电站特殊运行环境影响

光伏电站主变压器运行的出力特征对气体迁移有显著的影响。白天满负荷运行时油温可达55~60℃,夜间停机后又降至20~25℃,甚至可能更低。剧烈的温度变化导致变压器油中溶解气体反复的析

出与溶解。

此外,光伏电站昼夜功率波动会导致有载调压开关切换频次增加,产气总量累积,再叠加大量电力电子设备介入带来的谐波影响^[11-12],导致变压器损耗增加、温升升高,间接影响油中气体的析出速率^[12],进一步增加了气体积聚的风险。

2 轻瓦斯告警事件的工程背景与初步排查

2.1 电站概况与故障现象

某80 MW光伏电站投运8个月,发生1号主变有载调压开关轻瓦斯告警。现场监控后台显示,当日光伏出力为78 MW(额定容量97.5%),主变上层油温为55℃(正常运行范围30~80℃);非电量保护装置报“调压轻瓦斯告警”。告警持续15分钟后自动复归,无其他异常信号。进行油色谱分析,判断特征气体含量均低于相关规定的标准值,排除内部电弧放电因素,数据如表1所示。

表1 油色谱分析数据对比

| 气体成分 | 实测值 | 标准注意值 | 产气类型 |
|----------|-----|-------|--------|
| H_2 | 52 | 150 | 局部过热前期 |
| 总烃 | 28 | 100 | 绝缘油分接 |
| C_2H_2 | 0 | 2 | 无电弧放电 |

2.2 现场排查流程与关键发现

2.2.1 二次回路检测

停电后,现场用万用表对气体继电器二次回路告警接点进行通断测试,测量接点阻值为0.1Ω,无虚接或短路问题;使用继保测试仪模拟250 mL、300 mL气体体积信号,非电量保护装置均能正确动作,数据如表2所示。

表2 二次回路检测数据对比

| 检测项目 | 测量值 | 标准 | 结果 |
|-----------|-----|---------|------|
| 接点接触电阻/Ω | 0.1 | ≤0.5 | 合格 |
| 告警触发体积/mL | 250 | 250~300 | 阈值正确 |
| 动作延时/ms | 18 | ≤25 | 响应正常 |

2.2.2 油位与密封性检查

检查有载开关油位计,油位显示处于正常刻度(环境温度28℃时对应油位40%);对油室及路径接口进行密封性检测,符合密封要求,排除油位异常及漏油原因。

2.2.3 气体继电器与管路状态评估

检查发现继电器内气体约200 mL,呈无色状态,现场提取气体通过点火试验,确认为非可燃性气体,

故障分析 FAULT ANALYSIS

且电量保护无异常波动,排除内部放电原因;检查油管安装工艺,发现主变油管存在90°直角拐角,易形成涡流死区(如图2所示),且从开关顶盖至储油柜的管路坡度仅为1%,低于行业推荐的2%~4%标准,会导致气泡迁移受阻^[9]。



图2 变压器油管路安装缺陷现场照片

2.2.4 安装工艺缺陷检查

查阅施工记录显示,有载开关注油前未按规范进行真空脱气(实际真空度200 Pa>标准值133 Pa,保持时间1小时<标准值2小时),导致油室内残留初始气体约500 mL。

当光伏电站昼夜油温波动达30~35℃,白天出力大油温升高时,溶解气体析出;夜间油温降低时,气体溶解度升高部分气体重新溶解。管路由于排放不畅,导致未溶解气体持续积聚,形成“产气—析出—积聚”的恶性循环,进一步增加了告警风险。

2.3 初步结论

结合上述测试结果,排除了变压器内部故障、油位异常及二次回路误动;初步判断告警信号由气泡迁移受阻导致的气体积聚效应引发,原因包括管路坡度不足,直角弯头设计导致的排气效率低下,以及注油工艺不规范残留初始气体,需从产气机理与排气路径展开深度分析^[8-9]。

3 轻瓦斯告警的深度原因剖析

3.1 产气-排气动态平衡模型

3.1.1 电弧产气量化分析

基于现场录波数据(电弧电压150 V、电流800 A、燃弧时间6 ms),代入式(1)计算电弧能量为720 J。单次产气量计算公式 $V=kQ+b$ 的拟合基于110 kV有载调压开关的切换产气特性试验。试验设计覆盖电弧能量300~

1000 J(对应切换电流500~1000 A、电压120~180 V),每组能量工况重复测试5次,记录电弧参数,气相色谱仪捕获产气量^[9]典型试验数据如表3所示。

表3 典型试验数据表

| 电弧能量/J | 300 | 450 | 600 | 720 | 850 | 1000 |
|----------|------|------|------|------|------|------|
| 单次产气量/mL | 0.19 | 0.23 | 0.28 | 0.31 | 0.35 | 0.40 |

采用最小二乘法得拟合方程 $V=kQ+b$,其中斜率 $k=0.0003$ mL/J(单位电弧能量产气量),截距 $b=0.1$ mL(初始溶解气体析出量),拟合优度 $R^2=0.987$,适用110 kV及220 kV电压等级、切换电流500~1000 A的有载调压开关。

代入电弧能量计算得单次产气量 $V=0.31$ mL,仿真曲线误差≤5%。通过MATLAB对试验数据进行可视化拟合,结果如图3所示。

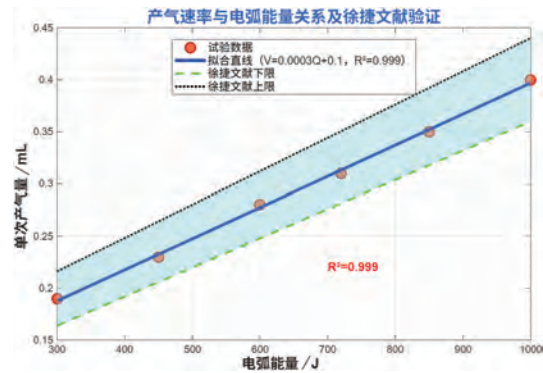


图3 产气速率与电弧能量关系及徐捷文献验证

拟合直线与文献[5]提出的产气系数区间(0.00028~0.00032 mL/J)高度重合,进一步佐证了模型的合理性。

3.1.2 流体动力学仿真与MATLAB验证

采用FLUENT软件,构建气液两相流仿真模型,模拟管路内流场特性,条件为管路长度50 m、气体密度1.2 kg/m³。通过MATLAB绘制管路坡度与气体迁移速度的关系曲线,如图4所示。

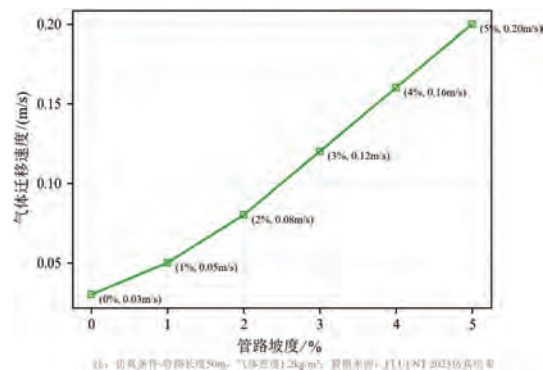


图4 管路坡度与气体迁移速度关系曲线

图4结果显示当坡度1%时,气体迁移速度0.05 m/s,滞留时间>30分钟;坡度3%时,速度提升至0.12 m/s;坡度优化至3.5%时,迁移速度达0.16 m/s,为最优值。而直角弯头处流场显示压力波动0.02 MPa,形成涡流死区,气体滞留概率将增加35%,加剧气体积聚。

3.2 气体积聚动态平衡方程

总产气率与排气速率的平衡关系为

$$dV/dt=Q_g-Q_e \quad (2)$$

式中: dV 为气体体积变化量, dt 为时间变化量, dV/dt 即单位时间内的气体积聚速率; Q_g 为总产气率,mL/天; Q_e 为排气速率,mL/天。

总产气率包含调压切换产气(日均0.0155 mL)及初始气体释放(日均0.67 mL,源于注油不规范残留气体缓慢释放),合计0.6855 mL/天。结合气体积聚动态平衡方程,管路缺陷下排气速率约0.05 mL/天,计算得日均净积聚量0.6355 mL。理论上,运行393天可达250 mL告警阈值,与现场240天(8个月)告警存在153天偏差。该偏差系光伏电站调压频次增加与昼夜油温剧烈波动共同加速气体析出所致,是气体积聚的核心趋势现象。

3.3 与同类故障成因差异

在现有研究分析中,轻瓦斯告警的常见因素包括内部故障产气、油位过低、二次回路误动及管路堵塞等。而文中坡度不足与直角弯头导致的气体迁移效率低下,叠加初始气体残留的累积效应,以及光伏电站周期性有功出力与油温波动加剧了气体积聚。这一系列特征在传统的火电厂、变电站主变故障中较少体现。

4 治理方案设计与实施效果验证

4.1 治理方案设计

为消除涡流死区,优化排气路径,将原直角拐角管路更换为45°斜角弯头,并且将油管坡度调整至3.5%,增强排气的驱动力。后续工程施工时,在注油前抽真空,真空度严格维持133 Pa以上并保持2.5小时(压降 ≤ 10 Pa/h);从开关底部缓慢注入变压器油,避免产生新气泡;注油完成后静置24小时,彻底排出残留气体。

配置油色谱在线监测装置,设置动态预警阈值(表4),实时监测氢气与总烃含量增长速率,实现多维度预警。

表4 动态预警阈值设置

($\mu\text{L/L}$)/周

| 监测项目 | 一级预警 | 二级预警 | 预警处置建议 |
|--------|------|------|--------------------------------------|
| 氢气增长速率 | >5 | >10 | 一级:加密监测频次(每3天1次);二级:立即核查管路排气状态及设备密封性 |
| 总烃增长速率 | >8 | >15 | 一级:连续2周跟踪数据趋势;二级:开展油色谱全分析+管路坡度复核 |

4.2 实施效果验证

4.2.1 运行数据改善

改造后连续12个月监测显示:气体积聚速率从15 mL/天降至3 mL/天,降幅80%;油温波动(20~60℃)对气体积聚的影响系数从0.8降至0.3(图5)。

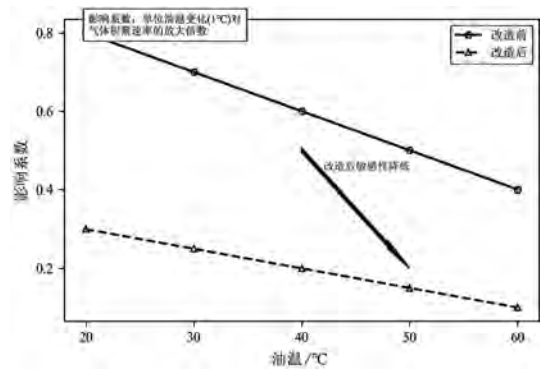


图5 油温波动对气体积聚的影响系数曲线

通过MATLAB模拟改造前后气体积聚趋势如图6所示。

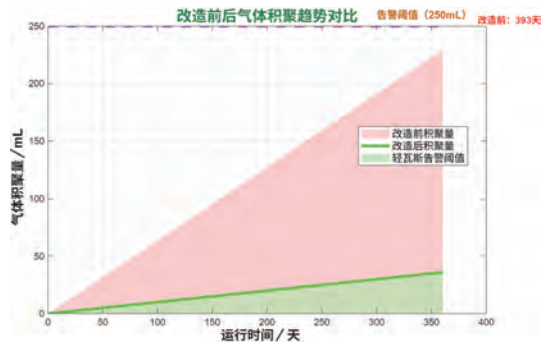


图6 改造前后气体积聚趋势对比

改造后,压力脉冲测试显示,45°弯头处压力波动幅值降至0.005 MPa,涡流死区现象完全消除。

4.2.3 经济效益评估

改造后12个月,未发生此类告警,避免非计划停电4次,年减少损失80万元;维护成本从25万元/年降至12万元/年,年综合收益93万元(表5)。

表5 经济效益对比表

| 指标 | 改造前 | 改造后 | 年收益 |
|------|--------|--------|-------|
| 停电损失 | 80万元 | 0 | +80万元 |
| 维护成本 | 25万元/年 | 12万元/年 | +13万元 |
| 合计 | - | - | 93万元 |

5 基于全生命周期的运维策略优化

5.1 设计阶段管控要点

设计制造时,管路布局需避免直角弯头,应优先采用大曲率弯头;气体继电器与储油柜间管路坡度设计值取3%~4%,并在图纸中明确标注;高纬度地区增设伴热装置,以应对低温环境下的油体黏度增加问题。

5.2 施工验收关键工序

制定严格的施工验收表格(表6),重点管控真空脱气工艺与管路安装精度,要求真空度 ≤ 133 Pa并保持2小时以上,管路坡度误差 $\pm 0.5\%$,还需通过内窥镜检查管路内壁清洁度,

表6 施工验收关键工序表

| 工序 | 操作要点 | 记录要求 | 合格标准 |
|------|---------------------------------|---------|-------------------|
| 真空脱气 | 抽真空至133 Pa,保持2.5 h | 真空-时间曲线 | 压降 ≤ 10 Pa/h |
| 管路坡度 | 经纬仪测量,每2 m设一测点 | 坡度测量记录表 | $3.5\% \pm 0.5\%$ |
| 内壁清洁 | 内窥镜检查,10倍放大观察 | 内壁检测照片 | 无焊渣、油污 |
| 注油工艺 | 底部缓慢注油,速率 ≤ 5 L/min,静置24 h | 注油记录单 | 无气泡残留 |

5.3 运维阶段监测体系

建立气体继电器检测台账,记录每次告警时间、气体体积及处理措施;配置在线油色谱监测装置,实时监测 H_2 、 CH_4 等特征气体浓度;联动集气盒液位数据;制定差异化维护周期,投运后首年每季度排气一次,次年起每半年一次,结合检修工作进行继电器校验。

6 结语

某光伏电站110 kV主变有载调压开关轻瓦斯告警事件主要由安装工艺缺陷和注油工艺不规范引发,通过理论分析、仿真验证与现场治理,构建的“产气-排气”动态平衡模型精准量化了气体积聚的规律;实施“管路优化+坡度调整+智能监测”综合治理方案后,该设备运行12个月再未发生无同类告警,效益

显著。

综上,通过多维度技术手段与全流程管理优化,全生命周期的运维策略(设计-施工-运维),为高负荷波动与低温环境下光伏电站变压器异常防控提供了相应方法,有效地解决了有载调压开关轻瓦斯告警问题,显著提升了光伏电站主变运行可靠性,为新能源场站重要设备的安全运维提供了有效案例参考。

参考文献:

- [1] 吴杰清,吕朝晖.有载分接开关气体继电器轻瓦斯频繁动作原因分析及处理[J].变压器,2013,50(01):53-55.
- [2] 李海贤,陈子辉,黎国华.一起有载调压开关轻瓦斯告警处理案例分析及对策[J].机电信息,2022(08):60-62.
- [3] 何勇.有载开关轻瓦斯动作的处理方法[J].变压器,2003(05):41-42.
- [4] 付豪,杨星磊,张斌,等.考虑大规模新能源接入的变压器热寿命损失分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(06):53-60.
- [5] 徐捷.变压器油中溶解气体产气速率法判断故障的介绍[J].电工电气,2014(09):58-59.
- [6] 罗宁.根据产气速率判断变压器内部故障[J].四川电力技术,2000(05):38-40.
- [7] 李鹏,李嘉熙,汪可,等.有载分接开关级间气泡形变规律及对电场分布的影响[J].中国电机工程学报,2023,43(06):2460-2471.
- [8] 夏国栋,周芳德,胡明胜.垂直管内气液两相弹状流中长气泡运动规律的研究[J].西安交通大学学报,1996,30(05):17-22.
- [9] 夏国栋,刘亮,马重芳.垂直上升弹状流中Taylor气泡上升流速的研究[J].北京工业大学学报,2000,26(04):58-62.
- [10] 张永泽,唐炬,潘成,等.流动变压器油中气泡动力学行为及电场分布仿真[J].高电压技术,2020,46(06):2004-2012.
- [11] 蒋佳霖.光伏变压器谐波损耗及绕组热稳定性分析与研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [12] 李朝晖,王骅,吴春红,等.高比例新能源接入引起的主变潮流上翻对河南电网运行的影响分析[J].河南电力,2020,48(增刊1):25-29.