

GIS 组合电器典型故障分析及改进策略

侯吉廷 马朝阳 李沅原

国网吴忠供电公司 宁夏吴忠 751100

摘要: 随着电力系统规模扩大与复杂度提升, GIS 组合电器因其卓越性能在电网建设中得到广泛应用, 然而绝缘劣化、气体泄漏、机械失效与控制系统故障等问题仍困扰着设备安全运行。本文系统分析了 GIS 设备四类典型故障成因机理, 并从智能监测诊断技术应用、设备质量管控体系优化、预防性维护策略创新及人员技术能力提升四个维度提出综合改进策略。这些创新方法通过构建多维监测网络、优化材料工艺标准、实施差异化维护与打造专业队伍, 有效提升了 GIS 设备运行可靠性, 为电网安全稳定运行提供了坚实保障。

关键词: GIS 组合电器; 故障分析; 绝缘故障; 气体泄漏; 改进策略

1 GIS 组合电器典型故障类型与成因分析

1.1 绝缘系统故障分析

作为 GIS 组合电器运行安全的关键保障, 绝缘系统长期承受电场应力与环境因素共同作用, 随着设备服役时间延长, 绝缘材料性能退化现象逐渐显现, 特别是当 SF₆ 气体中微水含量超过 40ppm 时, 气体绝缘强度显著下降, 形成潜在击穿隐患。金属微粒、绝缘材料碎屑、施工遗留杂质在高电场强度区域附着后, 导致局部电场畸变, 使特定位置场强超过临界击穿值, 引发持续性局部放电。持续放电过程生成腐蚀性分解产物, 加速固体绝缘材料老化, 形成恶性循环。绝缘子表面闪络构成另一类风险, 表面吸附的导电微粒降低表面电阻率, 绝缘子与金属法兰连接处微小气隙使局部电场强度剧增, 环境湿度变化引起的表面凝露形成水膜导电通道^[1]。

1.2 气体泄漏故障分析

SF₆ 气体作为 GIS 设备核心绝缘媒质, 其压力维持对确保绝缘性能与灭弧能力至关重要, 各类密封系统老化引发的气体泄漏问题日益突出, 成为影响设备安全运行的主要隐患。常用密封材料在温度波动、紫外线辐射、SF₆ 分解产物化学侵蚀共同作用下, 弹性模量逐步下降, 微观结构龟裂变形。安装维修环节中法兰面平行度偏差、螺栓力矩不均、密封槽道精度不足均造成应力分布不均, 产生局部薄弱区域。设备正常运行期间承受的温度循环与压力波动使密封部件反复变形。断路器操作机构轴封、活塞密封经历的相对运动引起材料磨损, 润滑状况直接影响密封寿命。操作机构行程

偏差导致部件承受过大机械应力, 低温环境下密封材料弹性下降。

1.3 机械操作故障分析

GIS 设备复杂的机械传动系统构成其功能实现的物理基础, 断路器与隔离开关等核心开关元件通过精密机构完成分合闸操作, 然而伴随运行年限增长, 机械部件磨损与性能衰退问题逐渐凸显, 影响设备安全可靠。连杆、轴承、齿轮等关键部件因反复运动产生累积磨损, 机械间隙渐增, 运动精度下降。润滑系统失效加剧传动部件磨损, 润滑脂老化干固或流失导致金属表面直接接触, 摩擦系数增大。机构行程调整参数偏离设计值, 过冲行程异常, 缓冲装置功能衰退, 均导致操作过程中产生额外机械冲击。辅助开关触点表面形成氧化膜, 接触电阻增加, 传动连杆或凸轮机构磨损变形引起行程偏差, 辅助开关触点位置无法准确对应主开关状态。联锁装置卡滞变形、序列设计缺陷、操作越位均可能导致联锁失效。

1.4 二次控制系统故障分析

现代 GIS 设备依靠精密二次控制系统实现状态监测与操作控制, 电气元件与信号系统共同构成智能化运行基础, 然而控制回路元件老化成为影响系统可靠性的主要隐患。继电器、接触器等开关元件经历大量通断循环后, 触点表面产生明显电蚀痕与氧化层, 接触电阻逐渐增大, 电流通路质量下降。设备智能化程度提升带来更多电子元器件应用, 在温度循环、湿度变化、电气应力长期作用下性能退化, 参数漂移超出设计允许范围。接线端子因设备振动松动, 线缆绝缘

材料老化开裂。传感器经历长期使用后灵敏度降低、精度下降甚至完全失效，变电站强电磁环境对信号形成干扰。控制逻辑设计存在盲区，软件升级后缺乏全面测试验证，人机界面设计不合理导致操作人员状态误解^[2]。

2 GIS 组合电器故障改进策略

2.1 智能监测与诊断技术应用

2.1.1 在线监测系统集成优化

面对 GIS 组合电器复杂的故障演变机制与潜在安全隐患，现代化智能监测诊断技术的应用已成为提升设备运行可靠性的核心策略，特别是构建基于多维感知、边缘计算与人工智能的综合监测体系，实现从被动检修向主动预防转变。智能监测系统采用多层级传感网络架构，将超声波传感器、UHF 部分放电检测单元、气体密度变化监测装置、SF₆ 成分分析仪等感知元件布置于 GIS 设备关键位置，形成立体化监测网络。系统创新性地引入分层数据处理机制，第一层现场智能终端负责信号采集与预处理，采用小波变换与自适应滤波算法消除环境干扰；第二层边缘计算单元执行特征提取与初步诊断，将原始大数据转化为特征向量，应用支持向量机算法识别异常模式；第三层云平台汇聚多站点数据进行深度挖掘，构建设备健康评估模型。监测系统摒弃传统固定阈值判断方式，研发环境自适应动态阈值技术，根据气温、湿度、负荷率等外部条件实时调整告警参数，显著降低误报率^[3]。

2.1.2 人工智能诊断算法应用

人工智能诊断技术突破了传统经验判断局限，通过深度神经网络挖掘设备运行状态与故障模式间隐藏关联。诊断系统构建了三维故障特征空间，横向融合不同传感器数据，纵向贯通历史与实时信息，立体映射设备健康状态。系统采用改进型卷积神经网络提取部分放电信号特征，引入长短期记忆网络捕捉泄漏率变化趋势，结合图神经网络分析设备内部温度场分布，实现多维度综合诊断。健康评估模块基于累积损伤理论，建立密封系统、绝缘部件、机械结构等关键组件的寿命预测模型，引入蒙特卡洛仿真方法评估各类工况下的可靠性演变规律。诊断系统植入自学习机制，每次故障处理结果自动反馈至知识库，不断优化诊断规则与阈值参数，实现诊断精度持续提升。系统集成移动应用平台，运维人员通过智能终端随时查看设备状态、接收告警信息、调阅历史数据，大幅提升运维效率与决策科学性。

2.2 设备质量管控体系优化

2.2.1 材料与工艺标准提升

长期运行数据与故障案例分析表明，GIS 组合电器可靠性提升必须从基础材料与工艺标准入手，实施严格的质量源头管控，建立从材料研发、零部件制造到整机装配的全流程精细化质量管理体系。电力科研机构与制造企业正联合开发新一代绝缘系统，采用纳米复合技术将 SiO₂、Al₂O₃ 等无机纳米粒子均匀分散于环氧基体中，形成三维网状结构，显著提高材料抗电晕能力与局部放电耐受性^[4]。密封系统革新采用分子设计方法，研制出含氟量达 65% 以上的改性氟橡胶，材料分子结构中引入交联网络增强热稳定性，耐温范围扩展至 -50℃ ~ 200℃，耐 SF₆ 分解物腐蚀性提高 300%。生产工艺方面，企业引入十万级洁净车间标准，工作人员采用全封闭无尘服作业，关键部件装配区实施正压送风，有效防止微尘颗粒污染。激光三维扫描技术实时监测法兰面平行度，智能化螺栓拧紧系统确保力矩精度误差控制在 $\pm 2\%$ 范围内，全面消除装配隐患。

2.2.2 供应链质量追溯系统

现代 GIS 设备生产涉及复杂供应链网络，建立覆盖全产业链的质量追溯体系成为确保设备长期可靠性的战略保障，电力设备制造商正与供应商共同构建基于区块链技术的新型质量管理生态。追溯系统设计采用三层架构：感知层部署 RFID、二维码、传感器等标识技术，为每个零部件赋予唯一数字身份；网络层构建基于联盟链的分布式账本，各参与方作为节点共同维护不可篡改的质量记录；应用层开发多终端访问界面，实现生产、检修、运维全流程数据共享。系统记录从原材料化学成分、生产批次、工艺参数到装配过程、试验数据、现场运行状态的全生命周期信息。供应商管理引入动态评价机制，建立包含技术创新能力、过程控制水平、产品一致性、售后响应速度等 25 项量化指标的评估体系，评价结果直接关联采购策略与价格系数。技术创新联盟平台汇集核心供应商形成虚拟研发团队，共享失效案例库与材料数据库，联合攻关行业技术瓶颈，成果转化为新一代产品标准规范。

2.3 预防性维护策略创新

2.3.1 状态评估与差异化维护

传统时间周期维护模式已无法满足现代 GIS 设备精细化管理需求，电网企业正大力推进基于设备实际健康状态的

差异化维护战略,通过多维状态监测数据驱动的科学决策流程取代传统经验判断,实现维护资源精准配置与故障风险最小化目标。新型评估体系融合历史运行数据、在线监测参数、离线检测结果等多源信息,建立包含 35 项关键指标的状态评价模型,每项指标按重要性赋予不同权重,形成百分制综合评分机制^[5]。模型引入模糊数学方法处理定性指标,采用主成分分析消除指标间相关性影响,最终计算设备健康指数。电网公司据此将 GIS 设备分为四级健康等级,制定差异化检修策略:健康级设备延长周期至 1.5 倍标准周期并减少检测项目;关注级设备保持标准周期但强化关键指标监测;预警级设备增加特殊状态参数检测频次并编制针对性处理方案;危险级设备则实施停运检修。维护决策系统应用贝叶斯网络算法,挖掘故障模式与维护措施间关联性,自动生成最优维护方案与处理时机。

2.3.2 创新检修技术与工艺

GIS 设备全密封结构给传统检修带来巨大挑战,各电力企业正积极探索无需大规模拆解的新型检修技术路线,微型机器人检测系统与增强现实辅助技术成为行业发展热点。创新研发的检测机器人采用模块化设计,主体直径小于 60mm,配备全向履带行走机构与气动爬壁装置,能够适应 GIS 内部复杂空间环境。机器人搭载超高清摄像头、红外热成像仪、超声波测距仪、激光轮廓扫描仪等多传感器系统,360 度全视角检测绝缘子表面状态、导体连接部位温度分布、触头接触状况。数据通过光纤实时传输至外部控制终端,检测图像经智能算法处理自动识别异常点。增强现实技术集成智能头盔与数字孪生平台,操作人员佩戴 AR 眼镜后,系统自动识别设备型号并调用三维模型数据库,将虚拟图像精确叠加至实际设备。拆卸步骤、关键参数、历史缺陷等信息直观呈现在视野中,系统还提供语音操作引导与远程专家支持功能。SF₆ 气体再生技术方面,研制的便携式净化装置采用分子筛吸附、低温冷凝、化学过滤三级处理工艺,将回收气体中水分含量降至 5ppm 以下,恢复绝缘性能达新气体标准。

2.4 人员技术能力提升

面对 GIS 设备日益复杂的结构特性与维护要求,电力企业正积极探索突破传统培训局限的人才培养新模式,构建覆盖理论学习、技能训练、实战演练的全方位人才发展体系,打造与设备技术升级相匹配的高素质专业队伍。虚拟仿真培训系统采用先进数字孪生技术,将实体 GIS 设备精确映射至

虚拟空间,模型精度达毫米级,内部结构与材质纹理完全还原。培训人员佩戴 VR 设备后可任意视角观察设备内部构造,系统模拟各类故障场景,如固体绝缘子表面放电、气体密度异常、机械操作不同步等典型问题,学员使用虚拟工具进行故障诊断与处理。系统嵌入 AI 评分模块,实时分析操作轨迹与标准流程偏差,给出详细改进建议。人工智能自适应学习平台根据学员知识结构画像,智能推送个性化学习路径,实时调整难度与内容深度。技能评估体系设立四级认证标准,每级认证包含理论考试、实操测试、案例分析与专家评审环节,考核内容涵盖设备原理、维护技术、故障处理、安全操作等全方位能力评价。企业实施“师带徒”计划与技术专家职级序列,形成人才梯队建设长效机制,营造持续学习文化氛围。

3 结束语

综上所述,文章通过系统分析 GIS 组合电器典型故障机理,从监测诊断、质量管控、维护策略与人才培养四个维度构建了全面的改进体系,形成了从源头预防到过程控制再到应急处置的全链条解决方案。随着人工智能、大数据、物联网等新技术深度融合,GIS 设备故障预测预防能力将进一步提升,基于数字孪生的远程诊断与虚拟维护技术有望实现突破。未来研究应聚焦环保型绝缘气体替代技术、设备老化机理与寿命评估模型、极端气候条件下的可靠性保障等方向,为 GIS 设备向更高电压等级、更智能化、更环保化方向发展奠定科学基础。

参考文献:

- [1] 潘先茂,马贤会,孔德虎.GIS 组合电器典型故障分析及预防措施探讨[J].科技创新与应用,2025,15(17):132-135.
- [2] 刘哲.变电一次设备典型故障分析与处理[M].湖南科学技术出版社:202203:550.
- [3] 马慧敏,张星宇,戴雨薇,等.特高压组合电器运行状况和典型故障分析[J].内蒙古电力技术,2021,39(05):27-30.
- [4] 马爱军.供电系统 GIS 组合器故障分析及改进[J].机电工程技术,2020,49(05):237-238.
- [5] 朱胜龙,陈忠,杨为,等.组合电器设备三类典型故障解析[J].供用电,2018,35(12):69-73+88.

作者简介: 侯吉廷(2001—),男,汉族,宁夏吴忠人,本科,班员,研究方向为电气试验。