

# 电气一次设备状态检修的运用

孙秀梅

国能民权热电有限公司 河南 商丘 476821

**摘要:** 电气一次设备状态检修通过在线监测、离线检测及多源数据融合技术,实时感知设备健康状态,结合层次分析、机器学习等模型评估设备状态并预测剩余寿命。基于风险与可靠性的决策方法优化检修计划,在变压器、断路器、GIS及电缆等设备中实现故障精准定位与预防性维修。该技术虽面临传感器可靠性、数据共享及成本效益量化等挑战,但通过标准化建设与数字孪生应用,可显著提升电力系统运行可靠性并降低全生命周期成本。

**关键词:** 电气一次设备; 状态检修; 运用

引言: 传统电气一次设备检修多采用定期巡检与故障后维修模式,存在过度检修、维修不足及停电损失大等问题。随着智能电网建设加速,设备复杂度与运行要求显著提升,基于状态感知与数据驱动的预测性维护成为关键需求。状态检修通过集成在线监测、故障诊断及寿命预测技术,实现设备健康状态的实时评估与检修决策优化,对保障电力系统安全运行、降低运维成本及提升供电可靠性具有重要实践价值,是电力行业数字化转型的重要方向。

## 1 电气一次设备状态检修理论基础

### 1.1 电气一次设备分类与特点

(1) 变压器、断路器、隔离开关、电缆等典型设备功能分析: 变压器核心功能为电压变换、电能传输与分配,保障电力系统电压匹配; 断路器用于正常运行时接通电路,故障时快速切断故障电流,防止事故扩大; 隔离开关主要实现电路隔离,形成明显断开点,保障检修安全; 电缆承担电力传输任务,具有敷设灵活、占用空间小等特点,适配复杂工况。(2) 设备故障模式与影响分析(FMEA): 通过系统梳理设备潜在故障类型,如变压器绕组老化、断路器机构卡涩等,分析故障发生机理、影响范围及严重程度,建立故障优先级排序,为状态检修重点方向确定提供依据,降低故障对电力系统的冲击。

### 1.2 状态检修核心技术体系

(1) 在线监测技术: 涵盖局部放电监测(实时捕捉设备绝缘缺陷信号)、油色谱分析(监测变压器油中特征气体含量,判断内部故障)、红外测温(非接触检测设备发热异常,及时发现接触不良等问题),实现设备状态实时感知。(2) 离线检测技术: 包括耐压试验(检验设备绝缘耐受电压能力)、绝缘电阻测试(评估设备绝缘状况)等,通过定期离线检测补充在线监测盲区,全面掌握设备健康状态。(3) 故障诊断与预测方法: 融合数据驱动

(基于历史数据挖掘故障规律)、模型驱动(通过设备机理模型推演状态变化)、混合智能算法(结合两者优势提升诊断精度),实现故障精准识别与剩余寿命预测<sup>[1]</sup>。

### 1.3 状态检修流程设计

(1) 数据采集与预处理: 整合在线监测、离线检测及设备运维数据,进行去噪、补充、标准化处理,保障数据质量,为后续分析奠定基础。(2) 状态评估与健康指数构建: 基于预处理数据,结合设备状态评价标准,构建健康指数量化模型,直观反映设备健康等级。(3) 检修决策模型: 采用基于风险或可靠性的决策方法,综合考量设备健康状态、故障影响及检修成本,制定个性化检修计划,实现检修资源优化配置。

## 2 电气一次设备状态检修关键技术实现

### 2.1 多源数据融合技术

(1) 传感器网络布局优化: 结合电气一次设备结构特性与故障高发部位,采用分层布局策略,在变压器绕组、断路器触头、电缆接头等关键区域精准部署局部放电、温度、振动等类型传感器。通过仿真模拟与现场试验优化传感器数量与安装位置,实现监测盲区全覆盖,同时降低数据冗余,保障监测数据的时效性与有效性,为多源数据融合提供高质量原始数据支撑。(2) 异构数据清洗与对齐方法: 针对传感器采集的多维度异构数据(如时序监测数据、离线试验数据、文本类运维记录),采用统计分析与智能算法结合的清洗方案,剔除异常波动、数据缺失等干扰项; 通过时间戳同步、数据格式标准化、特征维度统一等对齐手段,建立同源、同维的标准化数据集,解决多源数据异构性问题,提升数据融合的准确性<sup>[2]</sup>。

### 2.2 状态评估模型构建

(1) 基于层次分析法(AHP)的权重分配: 结合电气一次设备结构特点,构建“设备整体-核心部件-监测指标”的三级评估层次结构。通过专家打分与两两比较

矩阵计算,确定各监测指标(如绝缘电阻、局部放电量、油色谱特征值)的权重系数,突出关键指标对设备状态的影响,为精准评估提供权重依据。(2)模糊综合评价或机器学习模型应用:针对设备状态评估的模糊性与复杂性,可采用模糊综合评价模型,将定量监测数据与定性评价标准结合,实现设备状态等级的模糊判定;也可应用机器学习模型(如随机森林、支持向量机),基于标准化数据集训练模型,通过特征学习自动挖掘数据与设备状态的映射关系,提升评估的智能化与精准度。

### 2.3 剩余寿命预测技术

(1)时间序列分析:针对设备状态监测数据的时序特性,采用ARIMA模型捕捉数据线性趋势与周期性规律,实现短期剩余寿命预测;对于非线性、长时序的复杂数据,采用LSTM神经网络模型,通过门控单元记忆长时依赖信息,精准拟合设备状态衰减趋势,提升中长期预测精度。(2)物理-数据混合驱动模型:结合设备物理失效机理与数据驱动优势,构建混合驱动模型。以变压器为例,基于绝缘老化的物理机理(如热老化、电老化)建立基础模型,利用监测数据(如运行温度、绝缘介损)修正模型参数,实现对绝缘剩余寿命的精准预测,兼顾模型的解释性与预测精度<sup>[3]</sup>。

### 2.4 检修决策优化方法

(1)成本-效益分析模型:构建涵盖检修成本(人工、材料、停机损失)与效益(故障避免损失、设备寿命延长收益)的量化分析模型,通过对比不同检修方案的成本效益比,筛选出经济性最优的方案。同时结合设备重要度等级,差异化权衡成本与效益,确保决策的合理性。(2)多目标优化算法:针对检修决策中的多目标需求(如最小化检修成本、最大化设备可靠性、最短化停机时间),采用遗传算法、粒子群优化等智能算法,在满足设备运行约束条件的前提下,求解多目标优化问题的帕累托最优解,为检修计划制定提供多元化决策支持,实现资源的最优配置。

## 3 电气一次设备状态检修在典型设备中的应用案例

### 3.1 变压器状态检修实践

(1)在线监测参数选择:结合变压器“电-热-机械”多维度故障特性,选取油中溶解气体分析(DGA)、局部放电、绕组变形作为核心监测参数。其中DGA重点监测乙炔、氢气、一氧化碳等特征气体浓度及增长率,精准捕捉绝缘过热与放电故障前兆;局部放电采用特高频(UHF)传感器,实现绝缘缺陷的精准定位;绕组变形通过低频阻抗监测技术,反映短路冲击或运输过程中的机械结构损伤,三者协同构建全维度状态感知体系。(2)故障

诊断案例分析:某220kV电力变压器运维中,DGA监测显示乙炔含量从 $5\mu\text{L/L}$ 升至 $35\mu\text{L/L}$ ,伴随氢气同步增长,结合UHF局部放电信号定位及绕组变形测试数据,诊断为绕组匝间短路引发局部过热故障。立即安排吊罩检修,更换受损绕组并处理绝缘破损处,检修后特征气体浓度逐步降至合格范围,设备恢复正常运行。另一台110kV老旧变压器,连续6个月监测到介损值从0.5%升至2.3%,局部放电信号幅值持续增大,结合油质老化指标检测结果,判定为绝缘老化劣化,提前安排吊检进行绝缘整体翻新,避免了突发绝缘击穿事故。

### 3.2 高压断路器状态检修实践

(1)机械特性监测:针对高压断路器机械故障占比超60%的特点,部署机械特性在线监测系统,实时采集分闸时间、速度、弹跳次数、操动机构压力等关键参数。某500kV高压断路器监测数据显示,分闸时间从标准值50ms延长至85ms,分闸速度同步下降,经现场核查为操动机构液压系统密封件老化泄漏。及时更换密封件并补充液压油后,机械特性参数恢复正常,保障了断路器故障切断能力。(2)触头磨损预测模型:基于断路器历史分闸次数、开断电流峰值、电弧持续时间等运行数据,构建LSTM神经网络触头磨损预测模型。对某110kV真空断路器进行寿命推演,模型预测触头剩余磨损量达85%,剩余寿命约1.2年。据此制定个性化检修计划,在负荷低谷期提前更换触头组件,避免了因触头过度磨损导致的灭弧室失效、相间短路等严重故障<sup>[4]</sup>。

### 3.3 GIS设备状态检修实践

(1)SF<sub>6</sub>气体微水与分解产物监测:GIS设备绝缘与灭弧性能高度依赖SF<sub>6</sub>气体纯度,部署SF<sub>6</sub>气体在线监测系统,实时监测微水含量、气体压力及分解产物(SO<sub>2</sub>、HF、CO)浓度。某220kV GIS间隔监测数据显示,微水含量升至 $650\mu\text{L/L}$ (超标2倍),且SO<sub>2</sub>浓度持续上升,判断为气体泄漏伴随内部局部放电。停机检修发现盆式绝缘子表面存在裂纹,更换绝缘子并重新充装合格SF<sub>6</sub>气体后,各项监测参数恢复正常。(2)局部放电定位技术应用:采用超声波-特高频(UHF)联合定位技术,对某GIS设备局部放电信号进行协同分析。通过多传感器信号时间差计算与空间坐标拟合,精准定位故障点为母线筒内部导体尖端放电,放电位置误差不超过5cm。检修人员对导体尖端进行打磨钝化处理后,局部放电信号完全消失,有效消除了绝缘击穿隐患。

### 3.4 电缆线路状态检修实践

(1)分布式光纤测温系统应用:在10kV电缆隧道及直埋线路中敷设分布式光纤测温系统,实现电缆全程温

度实时监测,空间分辨率达1m。某工业园区电缆线路监测显示,某段电缆温度突升至82°C(远超70°C额定温度),定位为中间接头压接不良导致接触电阻过大。立即安排停电检修,重新压接接头并更换绝缘护套,检修后该段电缆温度恢复至正常运行范围,避免了绝缘热老化击穿<sup>[5]</sup>。(2)接地电流监测与故障预警:通过在电缆金属护层接地端安装电流传感器,在线监测接地电流幅值及谐波特征。某35kV电缆线路监测数据显示,接地电流从1.2A突增至5.8A,且三次谐波含量占比达35%,诊断为护层绝缘破损导致多点接地。系统立即发出故障预警,检修人员通过定位仪精准找到破损点并修复,防止了护层环流过大引发的电缆主绝缘损伤。

#### 4 电气一次设备状态检修实施中的挑战与对策

##### 4.1 技术挑战

(1)传感器可靠性问题:电气一次设备多运行于高温、强电磁干扰等复杂环境,现有传感器易出现信号漂移、数据失真甚至失效问题。长期运行后稳定性下降,无法持续提供高质量监测数据,导致状态评估与故障诊断出现偏差,影响检修决策准确性。(2)大数据存储与处理能力不足:状态检修涉及海量多源异构数据,数据增长快、格式多样。现有存储系统容量与读写速度难以匹配需求,且缺乏高效处理算法,无法快速完成数据清洗、融合与分析,制约智能化推进。

##### 4.2 管理挑战

(1)跨部门数据共享机制缺失:检修数据分散于生产、运维等多部门,各部门数据标准不一、平台独立,缺乏有效共享协同机制。数据孤岛导致无法实现全维度融合分析,难以全面掌握设备状态,影响检修系统性与连贯性。(2)检修标准与规程滞后:状态检修技术快速发展,但对应标准规程更新不及时。现有标准对新技术应用规范、评估指标等界定模糊,导致实际检修缺乏统一指导,易出现检修不到位或过度检修情况。

##### 4.3 经济性挑战

(1)初期投资成本高:状态检修需部署大量监测设备、搭建数据平台及开展人员培训,初期投资压力大。部

分企业对长期效益认知不足,影响状态检修全面推广。(2)效益量化评估困难:状态检修效益多体现为故障损失减少、设备寿命延长等间接价值,难以精准量化。现有评估体系缺乏科学核算方法,无法直观体现经济价值,不利于决策层认可投入。

#### 4.4 对策建议

(1)推进标准化建设与产学研合作:加快制定传感器选型、数据格式等系列标准,统一技术与管理规范;加强企业与高校、科研院所合作,联合研发高可靠性传感器与高效数据处理技术,提升技术成熟度。(2)构建基于数字孪生的虚拟检修系统:依托数字孪生技术构建设备虚拟模型,实现物理与虚拟实时映射,通过仿真分析优化检修方案;搭建一体化数据共享平台,打破数据孤岛,提升跨部门协同效率,降低检修成本与风险。

#### 结束语

电气一次设备状态检修作为电力系统智能化运维的核心手段,通过融合物联网、大数据与人工智能技术,实现了设备故障的精准预测与维修资源的动态优化。其应用不仅显著提升了电网运行的可靠性与经济性,更推动了传统检修模式向主动防御型转变。未来,随着数字孪生与边缘计算等技术的深化应用,状态检修将进一步突破数据壁垒、提升决策效率,为构建高弹性、低碳化的新型电力系统提供关键技术支撑。

#### 参考文献

- [1]武发全.电气一次设备状态检修的运用[J].自动化应用,2023,64(z1):62-65.
- [2]霍卫卫.电气一次设备状态检修应用分析[J].电力设备管理,2023(18):19-21.
- [3]贺红军.电气一次设备状态检修分析[J].光源与照明,2022(7):119-121.
- [4]陈玮.电气一次设备状态检修的应用分析[J].集成电路应用,2020,37(8):60-61.
- [5]徐翔.电气一次设备状态检修的应用分析[J].电力设备管理,2021,(8):87-88.