

# 变电站运维中高压电力设备在线监测技术

张国东 姜燕坤

内蒙古电力（集团）有限责任公司阿拉善供电分公司 内蒙古 阿拉善盟 750300

**摘要：**随着新型电力系统建设推进，传统变电站定期停电检修模式已暴露出过修漏修、供电可靠性不足、运维成本偏高等痛点，难以适配高压设备智能化运维需求。本文围绕变电站运维场景，系统梳理高压电力设备在线监测的核心技术体系，覆盖多类型传感感知、多源数据预处理、机器学习智能识别、低延迟工业物联网传输等关键技术，结合变压器、断路器、电缆开关柜等典型设备落地工程方案，构建分级状态评估、动态预警阈值、智能运维决策机制，全面提升变电站高压设备隐患预判能力与运维精细化水平，为电网安全稳定运行提供技术支持。

**关键词：**变电站运维；高压电力设备；在线监测

引言：电力系统的安全可靠运行是支撑社会生产生活的核心基础，变电站作为电网电压调配与电能输送的关键节点，站内高压电力设备的运行状态直接决定区域供电稳定性。长期以来，传统定期停电检修模式受技术条件限制，依赖人工现场作业与离线检测，已无法适配当前高压设备大容量、高复杂度的运行工况，隐性故障难以及时发现、无效运维资源浪费等问题日益凸显。在此背景下，高压电力设备在线监测技术凭借全天候不间断、非停电式的监测优势，逐步成为变电站运维智能化升级的核心方向，对破解传统运维痛点、提升电网本质安全水平具有重要的现实意义。

## 1 变电站高压设备运维传统模式与痛点分析

### 1.1 传统定期停电检修模式的运行机制

传统变电站高压设备运维以定期停电检修模式为核心，遵循“周期固定、全员统筹、全面排查”的运行机制，是电力行业长期沿用的标准化运维方式。该模式依据国家电网运维规程、设备出厂技术标准，结合设备电压等级、投运年限、运行环境等基础参数，制定年度、季度、月度固定检修计划，统一安排全站高压设备停电作业。运维流程涵盖停电报备、安全措施布置、设备外观检查、绝缘性能测试、机械参数校验、零部件紧固更换、试验数据记录分析等全流程工序。检修工作采用批量集中作业模式，无论设备实时运行状态优劣，均按照统一周期开展全覆盖检修，作业周期、检修项目、试验标准均保持固定不变<sup>[1]</sup>。该运行机制依托人工现场操作、离线仪器检测、纸质台账记录落地，适配早期电网设备容量小、运行工况稳定、监测技术匮乏的运维场景，长期以来保障了变电站设备的基础安全运行，是传统电力运维体系的核心支撑模式。

### 1.2 传统运维模式在可靠性、经济性层面的核心缺陷

传统定期停电检修模式在电网规模化、智能化发展背景下，暴露出显著的可靠性与经济性双重缺陷，已难以适配现代高压设备运维需求。在运行可靠性方面，固定周期检修存在“过修、漏修”双重问题，部分健康状态良好的设备被频繁停电检修，造成设备不必要的启停损耗；而部分存在隐性缺陷、早期故障的设备，因未到检修周期无法及时排查，极易在运行中突发故障，引发电网跳闸、供电中断等安全事故。在经济性层面，定期检修需投入大量人工、设备、物料成本，批量无差别检修导致运维资源严重浪费，冗余检修工序大幅提升运维成本。另外，频繁停电会造成区域电力用户经济损失，设备反复启停、拆解检修也会加速零部件老化，缩短高压设备整体使用寿命，进一步增加设备更换、二次运维的长期成本，整体运维性价比偏低。

## 2 高压电力设备在线监测核心技术体系

### 2.1 多类型传感器技术：温度、局部放电、油色谱、振动等感知单元

多类型传感器感知技术是高压设备在线监测体系的底层核心，通过多元化感知单元实现设备运行状态全维度参数采集，为状态评估和故障诊断提供基础数据支撑。温度传感器主要采用光纤测温、红外测温单元，无电磁干扰，可精准采集变压器绕组、开关柜触头、高压电缆接头等关键部位温度数据，实时监测设备过热、温升异常问题。局部放电传感器依托超高频、超声波感知单元，捕捉设备绝缘内部微小放电信号，精准识别绝缘老化、气隙缺陷、局部击穿等隐性故障。油色谱传感器针对油浸式变压器、电抗器等设备，实时监测绝缘油中乙炔、甲烷、氢气等特征气体含量，判断设备内部过热、放电、氧化等异常工况<sup>[2]</sup>。振动传感器部署于断路器、变压器壳体等位置，采集设备运行振动频率、幅值

数据,识别机械松动、铁芯共振、传动卡涩等机械故障。各类传感器适配高压强电磁运行环境,具备高精度、高稳定性、抗干扰能力强的特点,可全方位覆盖高压设备电气、机械、介质状态的感知需求。

## 2.2 多源数据实时采集与预处理技术

多源数据实时采集与预处理技术是保障在线监测数据精准可用的关键环节,可实现各类传感器异构数据的统一采集、清洗、规整与标准化输出。高压设备在线监测系统需同步采集温度、局部放电、油色谱、振动、电压、电流等多维度异构数据,数据格式、采样频率、数值量级差异较大,且现场强电磁干扰易导致原始数据出现噪声、缺失、畸变、异常跳变等问题。实时采集模块采用分布式采集架构,适配不同传感器的通信协议与采样规则,实现毫秒级高频数据采集,保障数据的实时性与完整性。预处理环节通过数据筛选、缺失补全、噪声过滤、异常剔除、格式统一、量纲转换等系列算法,对原始多源数据进行深度优化处理。同时通过数据归一化处理,消除不同参数的数值差异,统一数据标准,剔除无效干扰数据,保留有效运行特征数据,为后续数据分析、算法识别、状态评估提供纯净、规范、可靠的数据基础,大幅提升后续智能分析的精准度。

## 2.3 基于机器学习的异常信号识别与降噪算法

基于机器学习的异常信号识别与降噪算法,是破解高压设备监测数据噪声干扰大、故障信号辨识度低难题的核心智能技术。变电站现场电磁干扰、设备工况波动、环境温度湿度变化,会导致在线监测原始信号掺杂大量随机噪声与干扰信号,极易掩盖微弱的早期故障特征,造成故障漏判、误判。该技术依托机器学习模型的自主学习与特征提取能力,搭建针对性降噪与识别算法体系,通过训练海量正常运行数据、典型故障数据样本,让模型精准区分噪声信号与有效故障信号。降噪算法可自适应过滤高频噪声、随机干扰信号,最大程度保留设备早期故障的微弱特征信号,提升信号纯净度。异常识别算法通过对信号时域、频域特征的深度挖掘,自主识别局部放电异常、温升突变、油气体超标、振动异常等各类故障信号,相较于传统阈值比对方法,具备更强的自适应能力与泛化能力,可精准识别隐性、轻微、复合型故障信号,有效降低运维误判率,提升故障诊断的智能化水平。

## 2.4 5G/光纤工业物联网的低延迟数据传输架构

5G与光纤融合的工业物联网低延迟传输架构,是高压设备在线监测系统稳定运行的网络支撑,解决了传统传输模式延迟高、稳定性差、带宽不足的问题。高压

设备在线监测需高频、海量、实时的数据传输,传统有线网络传输速率低、抗干扰弱,无线网络存在延迟波动大、数据丢包等缺陷,无法满足实时监测需求。该架构采用光纤主干传输+5G边缘接入的融合模式,光纤网络承担全站核心监测数据的主干传输任务,具备带宽大、稳定性强、传输损耗低、抗电磁干扰的优势,保障大批量结构化数据稳定传输<sup>[3]</sup>。5G工业模组依托低时延、广连接、高可靠的技术特性,适配现场分散式传感器的终端数据接入,实现毫秒级数据上传。整套传输架构可实现监测数据实时上传、指令实时下发、状态实时同步,保障在线监测、智能预警、远程运维的高效落地,适配智能变电站的全域监测需求。

## 3 典型高压设备在线监测的工程应用方案

### 3.1 油浸式变压器:油色谱分析+光纤绕组测温联合监测

油浸式变压器核心故障诱因是绝缘油劣化与绕组过热,行业普遍采用油色谱与光纤绕组测温联合监测方案。油色谱监测单元实时采集绝缘油中特征气体含量及增长率,通过分析组分配比与浓度规律,精准判断内部过热、局部放电及绝缘老化等隐患。光纤测温单元将传感器预埋于绕组关键位置,直接采集实时温度与分布场数据,精准识别过热与过载故障。两者协同互补,全方位覆盖核心故障场景。该联合方案实现24小时不间断在线监测,无需停电作业,有效规避传统检修盲区,精准支撑变压器状态检修工作。

### 3.2 高压断路器:机械特性与局部放电协同监测

高压断路器故障多集中于机械传动与绝缘局部放电,采用两者协同监测可实现全方位管控。机械特性监测通过部署传感器,实时采集分合闸时间、动作速度及振动等参数,精准识别机构卡涩、弹簧疲劳等机械故障,解决动态监测难题。局部放电监测依托超高频传感单元,排查灭弧室及套管等部位的绝缘老化、受潮等缺陷,避免击穿跳闸。两套系统数据互通协同分析,有效区分机械振动干扰与故障放电信号,降低误判率。该方案实时追踪动作性能与绝缘状态,精准预判老化趋势,为运维与更换提供数据支撑。

### 3.3 高压电缆与开关柜:温度场与绝缘状态全周期监测

针对电缆与开关柜高发的接头过热及绝缘老化故障,采用温度场与绝缘全周期监测方案。电缆监测采用分布式光纤测温构建完整温度场,精准定位过热点位,并结合介损与泄漏电流评估绝缘老化程度。开关柜监测聚焦触头与母线等部件,通过红外测温、局放及湿度监

测,及时发现接触不良与受潮隐患。整套方案实现设备全生命周期不间断监测,覆盖日常运行、负荷波动及极端天气等全工况场景,精准捕捉早期隐性故障,杜绝小隐患演变为电网事故,全面提升设备运行稳定性。

#### 4 在线监测系统的智能预警与状态评估机制

##### 4.1 设备健康状态分级评估模型构建

设备健康状态分级评估模型是在线监测系统实现精准状态研判的核心。该模型以各类高压设备运行规程、故障判定标准及历史运行数据为基础,筛选温度、局部放电、油色谱、振动、绝缘损耗等核心评估指标,搭建多维度评估指标体系。结合设备投运年限、运行工况、环境条件、检修历史等辅助参数,采用层次分析法、加权评分法确定各指标权重系数,明确核心与次要指标的评估优先级。模型将设备健康状态划分为健康、亚健康、异常、故障四个等级,明确各等级指标判定阈值与状态特征,通过实时监测数据与模型参数动态比对,自动判定设备当前健康等级。同时模型具备自适应迭代能力,可依托新增运行数据、故障案例持续优化指标权重与判定标准,提升评估精准度,为差异化、精细化运维策略制定提供核心依据。

##### 4.2 多级故障预警阈值的动态设定方法

多级故障预警阈值动态设定方法突破传统固定阈值适配性差的局限,可根据设备工况、环境变化、运行周期动态调整预警标准,提升故障预警的精准性与灵活性。传统固定阈值仅适用于标准工况,无法适配负荷波动、季节温差、设备老化等动态场景,易出现误预警、漏预警问题。该方法依托设备历史运行大数据,统计不同负荷、环境温度、投运年限下的设备正常运行参数区间,构建阈值自适应计算模型。将预警等级划分为提醒、预警、告警、紧急告警四个层级,结合设备实时运行工况动态修正各层级预警阈值,实现工况适配性调整<sup>[4]</sup>。同时引入故障演变趋势参数,根据监测数据变化速率、波动幅度预判故障发展态势,提前上调隐患设备的预警灵敏度,既规避正常工况波动引发的无效预警,又能精准捕捉早期渐进式故障,保障故障预警的及时性与准确性。

##### 4.3 基于历史案例库的运维决策自动生成机制

基于历史案例库的运维决策自动生成机制是变电站运维智能化、自动化的核心关键,可依托大数据案例支撑快速输出精准运维方案。该机制首先整合全站高压设备历年故障案例、检修记录、缺陷处置方案、专家运维经验,构建标准化、结构化的运维案例数据库,覆盖各类设备、各类故障的诱因、特征、处置流程、整改措施、预防方案等核心信息。当在线监测系统识别到设备异常、触发故障预警后,平台自动提取当前故障的参数特征、工况信息,与案例数据库进行智能匹配检索,筛选相似度最高的历史故障案例。依托匹配结果自动分析故障根本原因、风险等级、发展趋势,结合设备健康状态评估结果,自动生成针对性运维决策,包含现场排查项目、检修工艺、整改方案、风险防控措施、运维时间规划等内容,替代传统人工经验研判模式,大幅缩短故障处置响应时间,提升运维决策的科学性、规范性,助力变电站实现智能运维、精准运维。

#### 结束语

高压电力设备在线监测技术是变电站运维从传统定期检修向状态检修转型的核心支撑,通过多维度感知、智能分析与闭环决策的技术体系,有效破解了传统运维模式下可靠性与经济性难以兼顾的长期难题。随着传感技术、人工智能与工业物联网的持续迭代,在线监测系统将进一步向更高精度、更低误判率、更强自主决策能力方向演进,全面覆盖变电站所有高压设备的全生命周期运行场景,为构建安全、高效、智能的现代变电运维体系筑牢技术根基,持续助力新型电力系统的稳定可靠运行。

#### 参考文献

- [1]吴易,陆喆涛.变电站运维中高压电力设备在线监测技术[J].电力设备管理,2024(15):18-20.
- [2]董典帅.高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的应用[J].科技视界,2024,14(8):25-27.
- [3]乔真,潘利.高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的应用[J].中国科技纵横,2024(24):11-13.
- [4]吴佩轩.高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的应用[J].电力设备管理,2025(24):61-63.