

高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的应用

冀 敏 李东宁

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：本文探讨了高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的核心应用。文章首先分析变压器、GIS 等核心设备的故障机理与主流监测技术原理，阐述在线监测支撑状态检修的运行逻辑。随后，构建包含差异化传感配置、抗干扰优化及多参量同步采集的感知体系，并设计分层监测系统架构与故障智能诊断功能。最后，论述该技术在设备健康评估、隐性缺陷预警、检修计划优化及全生命周期管理中的具体应用，旨在推动变电站运维向数字化、智能化转型，提升电网供电可靠性。

关键词：变电站运维；高压电力设备；在线监测；状态检修

引言：随着智能电网建设的推进，变电站高压设备的运行稳定性直接决定了电网的供电可靠性。传统定期检修与人工巡检模式存在滞后性强、盲区多等弊端，难以应对变压器、GIS 等设备在强电磁环境下的复杂故障隐患。在线监测技术通过实时采集多源异构数据，为设备状态研判提供了精准依据。本文旨在深入探讨在线监测技术在变电站运维中的应用，从感知体系设计、系统架构搭建到具体运维场景落地进行系统分析，以期构建主动预判的运维新模式，解决传统运维痛点，提升设备管理的精益化水平。

1 变电站高压设备与在线监测基础理论

1.1 变电站核心高压设备及典型故障机理

变电站核心高压设备包含变压器、GIS 组合电器、高压断路器及隔离开关等，是保障电能传输与控制的核心载体，其运行稳定性直接决定供电可靠性。这些设备长期处于强电磁、温湿度交变及机械振动等复杂工况下，易产生潜伏性与显性故障。变压器典型故障为绝缘老化、油液劣化、铁芯过热及绕组短路，多由过载和局部放电引发，隐蔽性强；GIS 常见绝缘气隙缺陷、SF₆ 泄漏及触头接触不良，强电场下易致局放损伤；断路器故障集中于机械机构卡涩、灭弧能力下降及触头烧蚀，多因频繁操作与磨损所致。掌握各类设备故障的演化机理，是搭建在线监测体系、实现状态精准研判的核心基础。

1.2 在线监测主流检测技术原理

变电站高压设备在线监测依托多维度传感检测技术，实现设备运行状态参数的实时、不间断采集，摒弃传统定期停电检测的局限性，适配设备常态化运行监测需求。当前主流检测技术涵盖局部放电检测、油色谱在

线监测、SF₆ 气体状态监测、机械特性监测及红外测温监测等，各类技术依托不同物理、化学原理实现参数感知^[1]。局部放电检测通过超高频、超声波传感捕捉设备内部放电信号，精准识别绝缘缺陷隐患；变压器油色谱监测基于气相色谱分析原理，检测油中溶解故障特征气体组分与含量，预判内部过热、放电故障。SF₆ 监测依托气体传感技术，检测气体湿度、纯度与泄漏量，保障 GIS 设备绝缘性能。

1.3 在线监测支撑状态检修的运行逻辑

在线监测技术的核心价值是打破传统定期检修、故障抢修的运维模式，构建以设备实际运行状态为核心的状态检修体系，其运行逻辑贯穿数据采集、分析研判、检修决策全流程。系统通过前端传感设备持续采集高压设备运行动态参数，实时留存设备状态数据台账，替代传统人工巡检的碎片化、滞后性数据采集方式。依托后台分析算法，对实时数据、历史数据进行对比分析，识别参数异常波动趋势，精准区分设备正常损耗、潜伏缺陷与严重故障。基于数据研判结果，摒弃固定周期检修模式，对状态良好设备延长检修周期，对存在隐性缺陷设备提前安排针对性检修，对故障设备立即启动抢修流程。该逻辑实现“被动运维”向“主动预判”转变，有效规避过度检修、检修遗漏问题，大幅提升变电站运维的科学性与经济性。

2 变电站高压设备在线监测感知体系设计

2.1 变压器、GIS、断路器配套监测传感配置

为精准适配变电站核心高压设备监测需求，需针对变压器、GIS、断路器的设备结构与故障特征，差异化配置传感监测单元，构建全覆盖、针对性的感知网络。变压

器重点配置油色谱传感器、油温绕组温度传感器、局部放电超高频传感器及振动传感器,分别监测油液故障气体、温度工况、绝缘放电与铁芯振动状态,全面覆盖电气、热工、机械故障监测维度。GIS 设备配置 SF₆ 气体温湿度、压力、泄漏传感器及超高频局部放电传感器,聚焦气体绝缘性能与内部绝缘缺陷监测,适配 GIS 封闭式设备的监测特点。高压断路器配置分合闸线圈电流传感器、行程位移传感器、振动传感器及触头温度传感器,精准捕捉机械操动缺陷与电气接触隐患。所有传感器均按照设备安装规范选型布置,兼顾监测精度与设备运行安全性,实现三类核心设备关键状态参数的无死角采集。

2.2 强电磁环境下传感抗干扰优化方案

变电站高压设备运行过程中会产生高强度电磁场、高频谐波与瞬时冲击电压,极易造成传感信号失真、数据漂移、杂波干扰,严重影响在线监测数据的准确性与稳定性,因此需针对性开展抗干扰优化设计。硬件层面,选用屏蔽型传感设备,采用双层屏蔽线缆传输信号,对传感器接线端口做绝缘密封、接地处理,隔绝外部电磁辐射干扰。软件层面,搭建数字滤波算法,通过均值滤波、小波滤波剔除信号中的高频杂波与干扰脉冲,保留有效监测信号。另外,规范现场布线布局,将信号线缆与动力线缆分层敷设,避免线路交叉耦合干扰,同时设置信号容错机制,对异常干扰数据自动甄别剔除,全方位保障强电磁环境下监测系统稳定运行与数据精准输出。

2.3 多参量同步采集与数据预处理方法

变电站在线监测系统需同步采集温度、气体、振动、电气、局部放电等多类型参量,不同传感器采集频率、数据格式存在差异,易出现数据时序错位、冗余杂乱等问题,需搭建标准化同步采集与预处理体系。系统采用统一时钟同步机制,依托北斗对时技术,实现所有前端传感单元数据采集时序精准对齐,杜绝多参量数据时间偏差问题,保障多维度数据可联动分析^[2]。数据预处理阶段,首先完成数据清洗,剔除缺失值、异常突变值与干扰无效数据;其次进行数据标准化转换,将不同量纲、不同量级的监测数据统一转换为标准化数据格式。同时通过数据降维、冗余剔除技术,精简重复数据,保留核心有效信息,最终形成时序统一、格式规范、精准可靠的标准化数据集,为后续数据融合、故障诊断、状态评估提供优质数据支撑。

3 在线监测系统整体架构与核心功能

3.1 监测系统分层总体架构

变电站高压设备在线监测系统采用分层模块化架

构设计,整体分为感知采集层、数据传输层、平台存储层、分析应用层四大层级,层级分工明确、联动协同,保障系统高效稳定运行。感知采集层为底层核心,由各类监测传感器、采集终端组成,负责现场设备多参量原始数据的实时采集与初步转换。数据传输层依托电力专用通信网络,通过光纤、无线专网等方式,实现前端采集数据向后台平台的安全、高速传输,保障数据传输实时性与完整性。平台存储层搭载专用数据库,负责海量监测数据、设备台账数据、历史故障数据的分类存储与管理。分析应用层为核心功能层,集成数据融合、智能诊断、预警研判、运维管理等核心模块,可实现设备状态分析、故障识别、决策输出,分层架构设计有效提升系统扩展性、稳定性与运维便捷性。

3.2 数据传输、存储与多源数据融合技术

在线监测系统依托电力专用通信协议搭建安全稳定的数据传输体系,采用加密传输技术对现场采集数据进行脱敏处理,防止数据篡改、丢失与泄露,同时适配断点续传机制,保障复杂工况下数据传输的连续性。数据存储采用分布式数据库架构,分类存储实时监测数据、历史时序数据、设备基础信息与故障案例数据,通过分区存储、定期备份机制,提升数据存储效率与安全性,支持海量数据长期留存与快速调取。多源数据融合技术是系统核心关键,通过算法将设备电气参量、机械参量、环境参量等多维度异构数据进行关联融合,打破单一数据研判的局限性。通过数据特征提取、关联分析,挖掘多参量数据背后的设备运行关联规律,大幅提升设备状态研判的全面性与精准度,为智能诊断提供可靠数据支撑^[3]。

3.3 设备故障智能诊断与分级预警模块

设备故障智能诊断与分级预警是在线监测系统的核心应用模块,依托大数据算法与故障知识库,实现设备故障自动识别、精准定位与分级预警。智能诊断模块基于设备历史故障案例、运行标准参数构建诊断模型,通过对比实时监测数据与阈值标准,结合多参量关联分析,精准识别设备绝缘缺陷、机械故障、过热异常等各类隐患,同时实现故障类型判定与故障位置精准溯源。分级预警模块按照故障危害程度、发展速度,将异常状态划分为轻微隐患、一般异常、严重故障、紧急故障四个等级,对应触发不同级别预警信号。系统可通过平台弹窗、短信、后台推送等方式,及时告知运维人员设备异常信息,同时联动展示异常参数变化趋势,帮助运维人员快速掌握隐患态势,实现故障早发现、早处置,杜绝小隐患演变为重大设备事故。

4 在线监测技术在变电站运维中的应用场景

4.1 设备健康状态实时评估应用

在线监测技术可实现变电站高压设备健康状态的全天候、实时化评估,彻底解决传统人工巡检无法持续把控设备运行状态的痛点。系统通过持续采集设备各类运行参量,结合预设的设备健康评价标准与大数据评估模型,对变压器、GIS、断路器等核心设备的绝缘性能、机械性能、电气性能、热稳定性能进行多维度综合研判。通过量化评分的方式生成设备健康状态指数,将设备状态划分为健康、亚健康、轻微缺陷、故障四类状态,实时更新设备健康台账。运维人员可通过平台直观查看单台设备及全站设备的健康状态分布,精准掌握每台设备的运行工况。该应用实现设备状态从“定性判断”向“定量评估”转变,为日常运维管控、设备状态管控提供直观、精准的数据支撑,全面提升变电站设备常态化运维管控水平。

4.2 隐性缺陷提前预警与故障溯源应用

变电站高压设备多数故障存在潜伏期,隐性缺陷无明显外在表征,传统巡检难以提前识别,极易突发设备故障影响电网供电安全。在线监测技术依托高灵敏度传感采集与智能分析算法,可精准捕捉设备参数微小异常波动,提前识别绝缘老化、局部放电、气体微泄漏、机械卡顿等各类隐性缺陷。系统可实时跟踪缺陷发展趋势,根据异常变化速率预判故障发展周期,提前发出预警提示,为隐患处置预留充足时间。同时具备完善的故障溯源功能,故障发生后,系统可调取故障前后多维度时序数据,通过反向推演、关联分析,精准定位缺陷产生根源、发展过程与影响范围,区分设备自身老化、环境干扰、运维不当、电网波动等不同诱因,帮助运维人员精准处置隐患、制定整改措施,杜绝同类缺陷重复发生。

4.3 优化检修计划、减少停电运维应用

传统变电站运维采用固定周期停电检修模式,存在检修盲目性强、无效检修多、停电次数频繁、供电损耗大等问题。在线监测技术通过实时把控设备运行状态,为检修计划优化提供精准数据支撑,推动检修模式精益化升级。运维人员可根据设备健康状态、缺陷预警信息,差异化制定检修方案,对健康状态优良的设备延长检修周期,减少不必要停电检修;对存在隐性缺陷的设

备实施针对性专项检修,精准解决设备隐患,避免过度检修与检修遗漏。该模式大幅压缩无效运维工作量,有效减少设备停电次数与停电时长,降低停电运维对电网供电可靠性的影响,同时节约检修人力、物力成本,提升变电站运维效率与供电经济效益,适配智能电网精益化运维的发展需求。

4.4 设备全生命周期运维管理应用

在线监测技术贯穿变电站高压设备采购投运、日常运行、缺陷整改、检修维护、退役报废全流程,构建设备全生命周期数字化运维管理体系。设备投运后,系统持续采集存储运行数据,积累完整的设备运行台账,精准记录设备工况变化、缺陷处置、检修改造等全流程信息^[4]。依托全周期数据积淀,可分析设备老化规律、故障高发阶段、运行特性变化,为设备运维策略动态调整、备品备件储备、设备更新换代提供数据依据。同时,全生命周期数据可实现设备运维溯源管理,每一次缺陷、检修、异常均有数据记录留存,形成标准化运维档案。该应用彻底改变传统碎片化运维管理模式,实现高压设备从投运到退役的全过程、数字化、精细化管控,大幅提升变电站设备运维智能化、规范化水平。

结束语

在线监测技术是实现变电站运维数字化转型的关键驱动力。通过构建多维感知体系与智能诊断平台,该技术有效解决高压设备隐性缺陷难发现、故障难溯源的痛点,实现从“被动抢修”向“主动防御”的跨越。应用表明,实时健康评估与全生命周期管理不仅大幅降低运维成本,更显著提升供电可靠性。未来,随着多源数据融合与AI算法的深化应用,在线监测将进一步提升故障研判精度,为构建安全、高效、绿色的智能电网提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 魏霖, 裴宇豪. 高压电力设备在线监测技术在变电站运维中的应用研究[J]. 通信电源技术, 2024,41(1):231-233.