

智能化变电站一次设备状态监测技术应用研究

毕永男 刘德霞

内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

【摘要】：智能化变电站运行环境复杂，一次设备长期承受电、热、机械与环境应力叠加影响，隐性缺陷易演化为停电故障，传统定检模式难以满足可靠性与经济性要求。研究围绕一次设备状态监测技术的工程化应用，提出多源感知数据获取、特征提取与融合分析方法，建立状态评价指标体系与健康度模型，形成基于趋势识别与异常检测的故障预警机制，并将监测结果与运维策略联动，支撑状态检修与风险管控。通过典型设备与场景的应用验证，结果表明该方法可提升缺陷识别准确性与预警及时性，降低运维成本，提高智能化变电站一次设备运行安全水平。

【关键词】：智能化变电站；一次设备；状态监测；多源数据融合；故障预警

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.020

引言

随着电网规模扩大与运行方式日益复杂，智能化变电站对供电可靠性与运维效率提出更高要求。一旦一次设备发生故障，往往引发连锁风险并造成显著经济损失。受设备老化、负荷波动与环境因素影响，缺陷具有隐蔽性和渐进性，依赖周期检修难以及时发现早期异常。状态监测技术通过在线感知设备运行信息，为健康评估与风险预警提供依据，但在数据质量、融合分析、评价模型与运维闭环方面仍存在工程应用难点。本研究聚焦一次设备状态监测的关键技术与应用路径，目标是提升预警有效性并支撑状态检修决策。

1 智能化变电站一次设备运行形态与监测需求演进

智能化变电站在二次系统数字化与通信网络化的支撑下，运行组织方式由传统“就地分散监视”转向“集中监控、信息共享与协同处置”。一次设备作为能量变换与传输的核心载体，其运行形态呈现出高负荷、强波动与多工况并存的特征：主变压器承受负荷峰谷频繁切换引起的热循环应力，断路器在故障切除与重合闸过程中经历电弧侵蚀与机械冲击叠加，隔离开关与母线连接部位在长期电流作用下易出现接触电阻增大与局部过热^[1]。站内电磁环境、温湿度变化、污秽与凝露等因素会加速绝缘劣化，导致缺陷由“隐性、渐进”向“突发、链式”演化的概率增加。在这种运行背景下，单一参数或离线试验难以覆盖设备状态变化的全过程，运维对在线化、连续化、量化的状态信息提出更高要求。

监测需求的演进集中体现在“从告警到评估、从单点到全域、从经验到模型”的转变。一方面，现场逐步从以故障后分析为主的被动模式，转向以趋势监测、异常识别和风险预警为核心的主动模式，需要对温升、振动、泄漏电流、局放、气体分解产物、触头磨损等关键表征量进行持续采集，并形成可追溯的时序数据。另一方面，设备运行状态不再仅由单一测量量决定，而是受到多源信息共同影响，例如主变的健康状态需综合油色谱、绕组热点温度、负载率、套管介损与局放特征；断路器状态需结合分合闸线圈电流、机械特性曲线、SF₆ 气体密

度与微水、触头电阻及操作次数统计。监测系统因此需要具备多源数据融合能力，对不同采样频率、不同量纲与不同可信度的数据进行对齐与清洗，建立状态指标体系与健康度评价模型，使监测结果能够直接服务于状态检修策略制定与风险分级管控。

在工程应用层面，智能化站内信息模型与通信机制的完善，使一次设备状态数据具备统一汇聚与共享的基础，但也带来数据体量增长与实时性要求提升。监测需求不止于“看得见”，更强调“看得准、看得懂、用得上”，要求监测结论具备一致性与可解释性，能够区分负荷变化引起的正常波动与绝缘缺陷导致的异常特征，能够将多参数异常映射为可执行的检修建议与备品备件管理需求。由此，一次设备状态监测从单纯的传感与告警系统，演进为贯穿感知、评估、预警与决策联动的综合在线状态管理体系。

2 一次设备状态感知与诊断体系的结构短板

一次设备状态感知与诊断体系在工程实践中仍存在较明显的结构性短板，集中体现为“感知链路不完整、数据体系不统一、诊断机理不闭环”。在感知层面，监测点位布设常受空间、带电安全距离与施工条件限制，导致关键薄弱部位覆盖不足，典型表现为连接点温度监测对风速、辐射与表面反射敏感，红外或测温贴片在高湿与污秽环境下稳定性下降；局部放电监测在复杂电磁干扰背景下易出现脉冲混叠与虚警，超声与特高频信号的传播路径受设备结构影响明显，定位准确性随工况变化波动较大；SF₆ 微水、密度等气体参数的采样与标定周期偏长，无法充分反映短时异常漂移。传感器本体与安装工艺的差异也会引入系统性偏差，使同类设备跨站点对比难以直接等价，削弱了状态量的可迁移性与一致性。

在数据层面，多源监测往往呈现“烟囱式”建设，数据接口、命名规则、时间戳精度与质量标识不一致，形成难以贯通的异构数据孤岛。部分在线监测装置输出以事件告警为主，缺少原始波形与细粒度采样数据，导致后续特征提取受限；不同厂家的算法封装在设备内部，阈值设置与告警逻辑不可追溯，

难以开展统一的校核与再训练。数据质量治理机制薄弱也是常见问题，包含缺测、漂移、噪声突增、异常点集聚等现象，若缺乏针对性的清洗、对齐与可信度评定，融合分析容易产生“伪趋势”，进而引发误判或漏判^[2]。运维侧对数据可用性的评价往往停留在“是否有告警”，缺少面向健康评估的连续指标，使状态监测与检修决策之间存在断层。

在诊断层面，结构性短板更突出地表现为模型与机理的耦合不足。一次设备失效机理由电热老化、局部放电发展、机械磨损、接触退化等多因素共同驱动，单指标阈值法难以描述缺陷的演化阶段与风险边界；而纯数据驱动方法若缺少物理约束与样本均衡，面对少故障样本与工况迁移时容易出现泛化失效。诊断结果的解释性不足会削弱运维人员信任，导致监测系统“能报不能用”。更关键的是闭环验证缺失，缺陷处置后的复测、检修解体证据与诊断结论缺少系统化对标，使算法迭代与阈值修正缺乏依据，难以形成持续优化的知识库。

3 多源融合驱动的在线状态评估与预警机制构建

多源融合驱动的在线状态评估与预警机制应围绕“数据可用、指标可算、风险可控”建立端到端的技术链路，使一次设备从原始监测量转化为可解释的健康结论与可执行的处置建议。机制构建的基础在于多源数据的统一治理，通过时间同步与事件对齐实现不同采样率数据的同域化表达，配合缺测修复、漂移校正、噪声抑制与异常点剔除，形成带有质量标签的可信数据流。针对一次设备典型状态量的物理含义差异，需建立分层特征体系：底层提取温升梯度、振动谱峰、局放相位分布、SF₆微水变化率、油色谱关键气体比值、分合闸电流特征量等可度量特征；中层构造反映退化机理的组合指标，例如接触退化指数、绝缘劣化指数与机构磨损指数；高层形成统一的健康度评分与风险等级，实现跨设备、跨站点的可比性。

在融合算法上，可采用“机理约束+统计学习”的混合框架：以设备热平衡、绝缘介质损耗、机械摩擦与电弧侵蚀等机理关系限定特征的合理区间与耦合方向，避免数据驱动模型在工况迁移时产生反常判别；在此基础上引入时序建模与概率推断，对状态演化进行趋势识别与不确定度量，输出健康度的置信区间^[3]。为提升预警的及时性与准确性，预警逻辑宜采用多级触发策略，将阈值越限、趋势突变与多参数协同异常分别映射为不同风险等级，并通过证据融合方法计算综合告警置信度，减少单传感器异常带来的误报。对局放、过热等高风险缺陷，可引入相似故障模式匹配与异常根因定位，给出“缺陷类型—影响部位—发展速度”的结构化结论，支撑现场核查与检修资源调度。

预警机制的工程价值取决于与运维业务的闭环联动。健康度评分应与检修策略规则库对接，自动生成建议处置等级、推荐试验项目与复测周期，并结合设备重要度与运行方式形成风险排序，实现“先高风险、后一般”的检修优先级。预警后续

需纳入闭环反馈，记录核查结果、解体证据与处置效果，将“告警—验证—修正”沉淀为可复用样本，驱动模型持续校准与指标阈值自适应更新，使在线评估与预警机制具备长期稳定性与可演进能力。

4 状态监测体系在典型设备中的应用验证

状态监测体系的有效性需要在典型一次设备上完成可验证的工程闭环，以“监测量—评估结论—现场证据—处置效果”形成一致链条。以主变压器为代表的核心设备，可通过油色谱在线监测、套管介损与局放监测、绕组热点温度与负载数据的联动，验证融合评估对早期缺陷的识别能力。运行中若出现关键气体含量缓慢抬升且气体比值呈现异常指向，同时热点温度在相近负载条件下出现偏离，健康度模型会给出绝缘风险上升的趋势结论，并将风险等级提升至需重点关注状态。现场通过针对性试验与外观检查可进一步确认潜在受潮、局部放电或过热隐患，处置后相关特征量回落并趋于稳定，预警闭环得到验证，避免以单一阈值越限为依据造成的过度检修或漏检。

断路器作为频繁动作与故障切除设备，其验证重点在于机械与电弧相关退化的可量化表征。体系可采集分合闸线圈电流、行程速度曲线、分合闸时间、操作次数与触头电阻等参数，建立机构摩擦增大、弹簧储能异常、触头烧蚀等模式的特征指纹。当线圈电流波形出现峰值抬升与持续时间延长、行程曲线拐点漂移且同期触头电阻缓慢上升时，评估模型可判定机构阻滞或触头接触劣化的概率增大，并给出需安排检修的建议^[4]。检修解体后可观察到润滑失效、连杆间隙增大或触头磨损等证据，与模型结论相互印证；完成调整或更换后，动作特性恢复至设计区间，告警置信度随时间衰减，体现状态监测对检修效果的量化评价能力。

气体绝缘设备与组合电器的应用验证更强调局放识别与定位可靠性。通过特高频、超声与暂态地电压等多源联合，体系可在干扰环境下提升事件判别置信度，并利用多点到达时差与幅值衰减特性给出疑似放电区段。现场复测若在同区段持续捕获相位相关特征，说明多源融合对抗干扰有效；完成缺陷处理后，局放事件计数与特征能量显著下降，系统能够将风险等级下调并记录处置结果用于模型校准。上述典型设备的验证表明，状态监测体系不仅能提供实时告警，更能在趋势研判、缺陷指向与效果评价三个层面支撑精细化运维，形成可复制的应用路径。

5 智能运维背景下一次设备状态管理发展趋势

在智能运维背景下，一次设备状态管理正由“监测驱动”迈向“资产全生命周期驱动”，核心趋势是把状态信息转化为可计算的风险与可优化的资源配置。随着感知层持续丰富，状态管理将从单设备健康度扩展到站域与网域的风险协同，评价对象由设备本体拓展到关键部件、功能单元与系统耦合关系，

形成面向重要度与运行方式的动态风险画像。数据侧将更强调语义一致与可追溯,监测、缺陷、检修、试验与运行方式数据需要在统一信息模型下闭环关联,建立“状态证据链”,使每一次告警、研判与处置都具备可核查依据,为指标阈值自适应调整与模型持续学习提供可信样本。

算法与模型的演进将突出机理约束、可解释性与不确定性表达。一次设备退化具有多因素耦合与样本稀缺特征,单纯依赖历史故障样本难以覆盖全工况,未来更倾向于采用物理机理与数据驱动融合的数字化模型,将热-电-机械应力状态映射到寿命消耗与失效概率,并通过置信度与风险区间输出支撑运维决策^[5]。预测性维护将成为重要方向,基于退化轨迹预测剩余寿命,结合检修窗口与备品备件周期,形成面向成本与风险的多目标优化策略,实现“何时修、修哪里、用什么资源”的量化决策。

在系统形态上,状态管理将与智能巡检、在线试验与远程

专家诊断深度融合,形成“在线监测—智能诊断—工单闭环—效果评估”的流程化体系。运维组织将从经验驱动转向模型驱动,标准化的状态指标库、缺陷模式库与处置策略库成为关键基础设施。与此同时,网络安全与数据可信也将成为状态管理的重要约束,需通过身份认证、访问控制、数据完整性校验与异常行为检测保障状态数据链路安全,确保智能运维在提升效率的同时维持一次设备状态管理的可靠性与可持续演进能力。

6 结语

围绕一次设备综合在线状态监测与评估体系,阐明了智能化变电站运行需求变化及感知诊断短板,提出多源融合的在线评估与分级预警机制,并在典型设备应用中验证其对缺陷识别与运维决策的支撑作用。面向智能运维发展,应持续完善数据治理与证据闭环,强化机理约束与可解释建模,推动状态管理向全生命周期与风险协同优化升级。

参考文献:

- [1] 张定华,刘鹏.基于 SD-WAN 技术的变电站一、二次设备智能化远程运维系统设计[J].内蒙古科技与经济,2025,(20):144-147.
- [2] 唐韬.变电站一次设备智能化技术研究与应用[J].大众标准化,2025,(18):142-144.
- [3] 杨延刚.变电站电气一次设备智能化问题的研究综述[C]//中国机电一体化技术应用协会.第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.滨化集团股份有限公司,;2025:109-110.
- [4] 严安.变电站电气一次设备智能化技术运用[J].电子元器件与信息技术,2024,8(10):242-244.
- [5] 王鹤鹏.变电站电气一次设备智能化技术的应用[J].集成电路应用,2023,40(12):359-361.