

变电站变压器运行状态监测与故障预警

孔德成

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘要：变电站变压器运行状态监测依托技术手段采集参数，故障预警提前识别风险，二者紧密关联。监测涵盖电气、油液等多方面内容，运用传感器等技术。故障预警有阈值、趋势等多种逻辑，采用传统、智能等方法。优化路径包括完善监测体系、优化预警模型、推动监测预警与运维协同、加强人才建设与技术创新，以保障变压器稳定运行。

关键词：变电站变压器；运行状态监测；故障预警；监测技术；优化路径

引言：在电力系统中，变电站变压器是关键设备，其运行状态关乎电网稳定。随着电网规模扩大与智能化发展，传统运维模式难满足需求。对变压器运行状态监测与故障预警，能动态掌握设备健康状况，提前发现潜在故障，为运维决策提供依据，降低故障损失，提升电网运行可靠性与经济性，对保障电力供应意义重大。

1 变电站变压器运行状态监测与故障预警的核心内涵

1.1 核心概念界定

变压器运行状态监测是依托各类技术手段，对设备运行过程中的电压、电流、温度、振动等参数进行实时采集，通过数据处理与分析，动态掌握设备健康状况的系统性活动。这一过程涵盖参数采集、信号处理、状态评估等多个环节，既要捕捉设备正常运行时的基础参数，也要追踪参数随工况变化的波动情况，为判断设备是否处于稳定工作状态提供依据。变压器故障预警以监测获取的实时数据为基础，结合变压器常见故障的发生规律与特征表现，通过科学分析提前识别设备潜在故障风险，判断故障类型、严重程度及发展趋势，并及时发出警示信号的过程^[1]。其核心在于突破传统“事后维修”模式，转向“事前预防”，在故障尚未发生或处于萌芽状态时发出提醒，为运维处置争取时间。两者存在紧密关联性，监测是预警的前提与基础，缺乏全面准确的监测数据，预警便失去可靠依据；预警是监测的目标延伸，监测获取的数据通过预警体系转化为具有实际指导意义的信息，助力运维决策。二者相互衔接、协同作用，共同构成覆盖变压器运行全周期的健康管理体系，为设备稳定运行提供保障。

1.2 核心特征

实时性体现在对变压器运行参数的持续动态采集，借助传感器、数据传输等技术，实现参数采集与传输的不间断进行，及时捕捉设备运行状态的细微变化，避免因数据滞后导致状态误判。精准性依赖多维度监测与科

学分析，通过同步采集电气、热、机械等多方面参数，结合专业分析方法剔除干扰信息，准确判断设备运行状态，精准识别隐藏的故障隐患，减少对设备状况的误判。前瞻性是故障预警的关键特征，通过对监测数据的深度挖掘，结合故障发展规律，提前预判可能出现的故障风险，为运维人员制定处置方案预留充足时间，避免故障扩大造成更大损失。系统性体现在监测与预警工作涵盖变压器本体、附属设备及运行环境等多方面，不仅关注变压器自身的运行参数，还兼顾冷却系统、绝缘油等附属设备状态，同时考虑温度、湿度等环境因素对设备运行的影响，形成综合全面的监测与预警体系。

2 变电站变压器运行状态监测的核心内容与技术

2.1 核心监测内容

电气参数监测聚焦变压器运行中的关键电气指标，电压与电流反映设备电能传输效率，功率与功率因数体现负载匹配状态，绝缘电阻则关联设备绝缘系统可靠性，这些指标共同构成判断变压器电气性能是否稳定的基础。油液状态监测围绕绝缘油展开，油温与油位变化直接反映设备散热与密封情况，油中溶解气体成分及含量能揭示内部是否存在过热、局部放电等隐性故障，油质劣化程度则关系绝缘油绝缘性能与冷却效果。机械状态监测关注设备结构稳定性，铁芯振动异常可能源于磁致伸缩或部件松动，绕组变形会影响绕组绝缘与电磁性能，分接开关动作状态与接触情况则决定电压调节功能能否正常实现。环境状态监测兼顾外部影响因素，运行环境的温度与湿度会干扰设备散热与绝缘性能，粉尘浓度过高易造成部件积污，腐蚀性气体含量超标则可能加速设备金属部件腐蚀，这些环境因素均需纳入监测范围以全面掌握设备运行条件。

2.2 关键监测技术

传感器技术是数据采集的基础，电流电压传感器需适配变压器额定参数以确保测量精度，温度传感器根据

监测位置（如绕组、油温）选择合适类型，振动传感器则需结合安装场景确定布设位置与数量，选型与布设均以精准捕捉目标参数为核心逻辑。数据采集技术需区分应用场景，在线采集装置适用于需实时掌握的参数监测，可实现数据连续获取，离线检测设备则多用于周期性检测项目，适配无需持续监测的场景。数据传输技术需平衡稳定性与适用性，有线传输适用于固定监测点，传输速率与抗干扰能力较强，无线传输则适合不便布线的区域，不同无线方式根据传输距离、功耗需求选择适配方案。数据预处理技术旨在提升数据质量，通过降噪去除环境干扰带来的无效信息，去重消除重复采集的数据冗余，补全填补数据缺失部分，为后续数据分析与状态评估提供可靠的数据基础。

3 变电站变压器故障预警的核心逻辑与方法

3.1 故障类型与特征分析

电气故障中，绕组短路多由绝缘老化或机械损伤引发，表现为电流异常波动、局部温度骤升，可能从匝间短路扩大为相间短路，短路点电弧会加剧绝缘损坏；绝缘击穿伴随绝缘电阻骤降，故障前常出现局部放电，体现为油中特征气体含量异常，放电强度随绝缘劣化增强；铁芯接地故障因绝缘损坏导致，易引发铁芯局部过热，伴随损耗增加与振动异常，长期运行可能造成接地处金属熔化，形成恶性循环^[2]。油系统故障里，漏油源于密封件老化或接口松动，初期油位缓慢下降、油迹沿外壳蔓延，严重时影响冷却效果，甚至因油量不足引发绕组过热；油质老化与运行时间、温度相关，表现为介损值上升、绝缘性能下降，油色从透明变为深褐色并产生沉淀物；油中气体异常对应内部过热、放电等故障，局部放电使油中氢气浓度升高，高温过热则促使甲烷、乙烷等气体大量产生。机械故障方面，绕组变形多由运输或短路冲击引发，表现为直流电阻偏差增大、振动频率改变，严重时缩小绕组间绝缘距离，诱发匝间短路；分接开关卡涩因润滑不足或部件磨损导致，表现为电压调节困难、切换时产生异常声响，卡涩部位可能接触不良并引发局部过热；铁芯松动源于固定结构失效，运行中振动与噪音加剧，松动叠片会增加涡流损耗，进一步升高铁芯温度。

3.2 预警核心逻辑

阈值预警需结合设备特性与运行经验设定动态阈值，正常范围参考设备设计标准，如额定电压 $\pm 5\%$ 、油温 $\leq 85^{\circ}\text{C}$ ，同时依据设备服役年限（运行超10年油温阈值下调 5°C ）、季节环境（夏季油温阈值临时下调 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ）灵活调整。当监测参数超出阈值，直接触发预警，适用

于短路、泄漏等参数突变类故障的快速识别，及时提示运维人员关注异常。趋势预警通过构建参数变化趋势模型，采用滑动窗口法、线性回归等算法分析数据变化斜率，如油温日均升高 5°C 、油中乙炔浓度周均增长 $2\mu\text{L/L}$ 。若参数变化趋势斜率超出正常范围2倍以上，即便未超阈值也触发预警，聚焦捕捉绝缘老化、绕组轻微过热等故障萌芽阶段的渐变特征，避免忽视潜在风险。关联预警依托多维度数据协同分析，搭建贝叶斯网络等参数关联分析模型，梳理振动与油温、油中 H_2 与绝缘电阻等参数间的内在联系。单一参数异常可能受环境干扰，当振动幅值增大、油温升高、油中甲烷超标等多维度参数同步异常时，综合判断故障风险，排除干扰，提升预警准确性。

3.3 关键预警方法

传统预警方法依托长期积累的实践经验与行业总结，油中溶解气体比值法通过计算不同气体组分的比值，对照典型故障气体比值范围判断故障类型，操作简便但依赖经验数据，适用于常见故障的初步诊断，在缺乏复杂监测设备的场景中仍具有实用价值。智能预警方法借助算法模型挖掘数据深层关联，决策树模型通过梳理历史故障案例，构建参数与故障类型的关联决策规则，实现故障的快速分类；神经网络模型可处理复杂非线性数据，通过学习大量历史故障数据优化预警精度，能自动适应不同工况下的参数变化规律，适用于多因素影响的复杂故障预警，但需依托充足且高质量的历史数据进行模型训练。融合预警方法结合两类方法优势，以传统经验确定基础预警框架，确保对常见故障的可靠识别，利用智能算法处理多源数据、优化预警参数，通过算法迭代不断修正预警阈值与关联规则，弥补传统方法在复杂工况下的不足，通过传统经验约束智能算法的输出结果，避免算法因数据偏差产生误判，实现更全面精准的故障预警。

4 变电站变压器运行状态监测与故障预警优化路径

4.1 完善监测体系

推动监测数据标准化，需统一数据格式与接口协议，遵循IEC61850等国际标准，规范传感器、在线监测终端等设备的数据输出格式，明确采样频率、数据精度及存储要求，消除数据传输与整合壁垒。在此基础上构建一体化数据平台，实现电气、油液、机械、环境多维度监测数据的集中存储、分类检索与历史趋势回溯，为预警分析提供统一数据基础。优化传感器布局与选型，聚焦监测盲区与精度提升，针对绕组内部、分接开关触头、铁芯接地处等传统盲区，增设内置式光纤温度传感器、嵌入式振动传感

器等高精度设备。优先选用具备电磁屏蔽外壳、电流电压传感器精度达0.2级及以上,且适应-40℃-70℃工作温度、IP65防护等级的设备,每6-12个月开展校准与维护,清理油污、检查接线端子,确保监测无死角、数据稳定。强化数据质量管控,建立全流程校验与评估机制,采集环节通过双传感器交叉验证剔除异常数据,传输环节采用CRC校验与加密技术防丢失篡改,存储环节用插值法、趋势填补法处理缺失数据。设置数据完整性 $\geq 95\%$ 、准确率 $\geq 98\%$ 的评估指标,实时监控数据质量,从源头提升可靠性,为预警分析筑牢基础。

4.2 优化预警模型与方法

提升模型泛化能力需收集不同气候条件、负载变化、设备老化阶段等多场景下的运行数据,涵盖正常运行、轻微异常、故障前期等多种状态,用于预警模型的训练与迭代,让模型能适应复杂多变的实际工况,减少因场景单一导致的预警偏差^[3]。构建多维度融合预警要打破不同监测数据的孤立状态,整合电气参数、油液指标、机械振动等多源信息,通过特征融合算法提取综合特征,构建综合预警模型,通过多参数相互印证降低单一数据异常引发的误报、漏报概率。强化故障溯源功能需结合变压器内部结构与各类故障的发生机理,在预警模型中嵌入故障定位与成因分析模块,关联设备历史运维记录与故障案例,使预警不仅能识别故障风险,还能明确故障大致位置与可能诱因,为运维处置提供精准指引。

4.3 推动监测预警与运维协同

构建闭环运维机制需将预警信息实时推送至运维管理系统,标注故障风险等级与影响范围,与检修计划制定、备品备件储备管理直接联动,明确不同预警等级对应的响应时限与处置流程,形成从监测发现异常、预警发出信号,到运维人员处置、处置结果反馈的完整闭环,提升故障处置效率。搭建协同管理平台需打通监测预警系统与电网调度系统、设备全生命周期管理系统的数据通道,设置统一的信息交互标准,实现信息实时共享,让调度人员、运维人员、设备管理人员能同步获取设备状态,协同开展工作,避免因信息不对称导致的处置延误。开展全流程运维赋能要基于长期积累的监测预警数据,分析设备运行规律与故障发生特点,结合设备

服役年限、工况条件,为每台变压器制定个性化运维策略,定期评估运维效果并优化,避免盲目检修,实现精准运维。

4.4 加强人才队伍建设与技术创新

培养复合型人才需定期组织电力设备运维人员参加数据分析、智能算法应用等跨领域培训,引入实操性强的培训课程,结合模拟故障场景开展演练,同时邀请技术人员开展设备结构与故障机理的专项讲解,建立人才考核与激励机制,打造既懂设备运维又掌握数据技术的专业队伍。推动技术研发与应用要加大对新型传感器、边缘计算、数字孪生等前沿技术的研究投入,联合科研机构开展技术攻关,搭建技术试点平台,逐步验证新技术在监测预警中的实用性,提升监测的实时性与预警的智能化水平。促进行业经验共享可搭建线上线下结合的技术交流平台,定期举办专题研讨会,鼓励各单位分享监测预警的先进理念、实践成果与典型案例,整理形成行业经验手册,通过相互借鉴推动整个行业监测预警水平的提升。

结束语

变电站变压器运行状态监测与故障预警是保障电网安全的关键环节,需以系统思维统筹监测、预警与运维全流程。通过明确核心内涵奠定理论基础,依托多元监测技术获取精准数据,借助科学预警方法实现风险预判,再以针对性优化路径解决现存问题,可构建高效的变压器健康管理体系。未来,随着数字孪生、人工智能等技术的融入,监测与预警将向更智能、更精准的方向发展,持续为电力系统稳定运行提供坚实支撑,助力电网运维迈向更高水平。

参考文献

- [1]吕明利,向巴平措,平措次仁.变电站变压器检修安全风险评估与预测技术研究[J].电力设备管理,2025,(01):226-228.
- [2]宋磊,成鲁钰,郎哲.基于5G通信的变电站主变压器运行状态在线监测方法[J].电气技术与经济,2024,(12):315-317.
- [3]沙利柱.电力变压器安装调试运行技术要点分析[J].电力设备管理,2025,(01):220-222.