

电气工程设备在线监测技术应用

王志勇 王硕文

扬州三新供电服务有限公司江都分公司 江苏 扬州 225200

摘要：电气工程设备在线监测技术通过传感器实时采集多参数数据，运用信号处理、智能算法进行状态评估与故障诊断。该技术广泛应用于变压器、开关设备、电机及电缆等监测，涵盖机械、电气性能追踪。系统架构融合硬件采集、通信传输、软件分析及用户交互，实现高效、精准监测，提升设备运行安全性与维护效率，推动电气工程智能化发展。

关键词：在线监测技术；信号处理；故障诊断；系统架构；电气工程设备

引言：随着工业生产对电气工程设备可靠性的要求日益提升，传统定期检修与事后维修模式已难以满足需求。在线监测技术通过实时捕捉设备运行中的物理与化学参数变化，结合智能算法分析，能够提前识别潜在故障，优化维护策略。该技术不仅涵盖数据采集、信号处理、状态评估等核心环节，还涉及电力变压器、高压开关、电动机发电机及电缆输电线路等多类设备的监测应用，为电气工程领域的智能化运维提供了关键支撑。

1 在线监测技术核心原理

1.1 数据采集技术

数据采集技术是在线监测系统的基础环节，通过各类传感器捕捉电气设备运行过程中的物理量与化学量变化。温度传感器实时追踪设备关键部位的发热情况，及时发现因接触不良或过载引发的温度异常。振动传感器捕捉电机变压器等旋转或静止设备的机械振动特征，反映内部部件的磨损或松动状态。电流与电压传感器持续监测回路中的电气参数波动，为判断电路是否正常运行提供依据^[1]。局部放电传感器专注于检测设备内部绝缘缺陷产生的局部放电现象，提前预警绝缘老化趋势。多参数融合采集能够突破单一参数监测的局限性。不同参数之间存在内在关联，例如温度升高可能伴随局部放电强度增加，振动异常可能与电流波形畸变相关联。综合多种参数可构建更全面的设备运行状态画像，减少单一参数误判的可能性。高速采样是应对瞬态信号捕捉的关键。电气设备故障往往伴随短时脉冲信号，只有通过足够快的采样速度才能完整记录信号的瞬态特征。高精度测量确保采集数据的准确性，微小的参数变化可能预示潜在故障，测量精度不足会导致早期故障特征被掩盖，影响后续分析的可靠性。

1.2 信号处理与分析方法

时域分析通过提取信号的波形特征反映设备状态。观察信号的峰值、脉冲宽度、上升沿斜率等时域参数，可直接识别如电弧放电等突发性故障的瞬时特征。波形的周期性变化规律也能揭示设备运行的稳定性，非周期性波动常暗示异常工况的出现。频域分析将时域信号转换为频率域表征，通过频谱分布识别信号中的谐波成分与特征频率。设备正常运行时频谱分布呈现特定规律，当内部部件发生故障，频谱中会出现新的频率成分或原有频率幅值发生显著变化。谐波分析分离出电网或设备自身产生的谐波分量，评估其对设备绝缘和寿命的影响。时频联合分析适用于处理非平稳信号。小波变换能够在不同时间尺度上分解信号，同时保留时间与频率信息，有效提取短时冲击信号的特征。希尔伯特-黄变换通过自适应分解将信号分解为固有模态函数，更精准地捕捉信号随时间变化的频率特征，适合分析电机启动或负载突变时的动态信号。智能算法在信号处理中发挥重要作用。机器学习模型通过训练识别正常与异常信号模式，自动筛选出具有故障特征的数据片段。深度学习模型借助多层神经网络结构，直接从原始信号中提取高阶特征，减少人工特征选择的偏差，提升复杂信号的分析效率。

1.3 状态评估与故障诊断模型

阈值比较法通过设定参数界限判断设备状态。静态阈值基于设备出厂参数或行业标准确定，适用于参数变化范围相对稳定的场景。动态阈值根据设备运行环境与历史数据动态调整，更贴合设备在不同工况下的实际状态，降低因环境波动导致的误判。趋势分析法通过追踪参数随时间的变化轨迹，识别设备性能的退化趋势。连续监测数据形成的曲线中，斜率变化或拐点出现往往预示设备状态的转变。通过对趋势曲线的拟合与延伸，可

提前发现设备从正常状态向异常状态过渡的迹象。模式识别技术依赖预先构建的故障特征库开展诊断。将实时采集的信号特征与库中存储的典型故障特征进行比对,匹配度达到一定程度时即可判定对应故障类型。特征库需不断纳入新的故障案例进行更新,以覆盖更多复杂的故障模式。剩余寿命预测基于数据驱动模型估算设备在当前状态下的可持续运行时间。通过分析设备历史退化数据与实时监测数据,建立退化轨迹模型,预测设备性能降至可接受下限的时间点。这类模型需综合考虑设备使用年限、运行环境、维护记录等多方面因素,提高预测结果的适用性。

2 在线监测技术的主要应用方向

2.1 电力变压器监测

电力变压器监测聚焦于关键性能指标的实时追踪。绝缘状态监测通过捕捉局部放电信号和测量介质损耗,反映绝缘材料的老化程度和潜在缺陷。局部放电产生的电磁脉冲和声波可被特定装置捕获,介质损耗的变化则直接关联绝缘系统的整体性能。不同位置的局部放电信号特征存在差异,能帮助定位绝缘缺陷的大致区域^[2]。绕组温度与油温监测覆盖变压器内部核心区域,绕组温度直接受负载电流影响,油温分布则反映整体散热效率,两者的协同监测可避免因过热导致的绝缘劣化。绕组温度过高会使绝缘纸加速老化,油温异常升高可能意味着冷却系统出现堵塞或泵体故障。负载能力评估基于实时温度、绝缘状态和历史运行数据,结合环境条件调整允许负载范围,过载预警则在接近极限值时发出提示,防止长期过载引发的设备损伤。环境温度升高时,散热效率下降,负载能力评估需相应下调允许值以维持设备安全。

2.2 高压开关设备监测

高压开关设备监测围绕机械与电气性能展开。机械特性监测关注分合闸过程中的时间参数和速度变化,分合闸时间偏差可能导致灭弧不及时,速度异常则暗示传动机构卡涩或弹簧性能衰退。分合闸速度过慢会延长电弧燃烧时间,加剧触头损耗;速度过快则可能产生过大机械冲击,影响设备使用寿命。触头磨损与电寿命评估通过监测触头接触电阻和电弧持续时间,推断触头表面的烧蚀程度,电寿命消耗与操作次数及电弧能量相关。接触电阻增大表明触头表面氧化或烧蚀严重,可能导致局部发热加剧。SF₆气体压力与泄漏监测针对气体绝缘开关设备,压力下降直接影响绝缘和灭弧能力,泄漏检测可定位泄漏点并评估泄漏速率,保障设备的绝缘强度和运行安全。SF₆气体泄漏不仅影响设备性能,还需及

时补充以维持正常运行压力。

2.3 电动机与发电机监测

电动机与发电机监测侧重于机械振动和温度变化。定子绕组温度监测覆盖不同相位绕组,温度分布不均可能源于绕组短路或冷却系统故障,持续高温会加速绝缘老化。绕组各相温度差异过大,可能是三相负载不平衡或某相绕组存在匝间短路的迹象。转子动态平衡监测通过分析振动信号的频率成分,识别转子质量偏心或轴系不对中问题,振动幅值增大常伴随机械应力上升。特定频率的振动信号增强,可能对应转子某部位的磨损或松动。轴承状态监测结合温度和振动频谱特征,温度异常提示润滑不良或轴承磨损,振动频谱中的特定频率峰值可对应滚珠、滚道的损伤类型,提前发现潜在的机械故障。润滑油劣化会导致轴承温度升高且振动幅值增大,不同类型的轴承损伤在振动频谱中呈现独特的特征模式。

2.4 电缆与输电线路监测

电缆与输电线路监测适应户外复杂环境条件。导线温度与弧垂监测相互关联,温度升高导致导线热膨胀,弧垂增大可能引发与下方物体的安全距离不足。导线接头处的温度往往高于导线本体,是监测的重点部位。绝缘子污秽与放电监测通过检测表面泄漏电流和局部放电信号,评估污秽程度和绝缘性能,潮湿环境下污秽层导电会加剧放电现象。绝缘子表面积累的污秽在干燥时可能影响较小,遇雾、露或小雨时则易形成导电通道。线路覆冰与舞动监测针对恶劣天气影响,覆冰增加导线负重可能导致杆塔受力超限,舞动产生的周期性应力会引发导线疲劳断裂,实时监测可辅助制定除冰和抗舞动措施。不同地形和风速条件下,覆冰厚度和舞动幅度存在差异,监测数据能为差异化应对提供依据。

3 在线监测系统的架构设计

3.1 硬件层

硬件层是在线监测系统的物理基础,支撑数据采集与初步处理。传感器网络布局优化需结合设备结构特点,在关键监测点实现全面覆盖同时避免信号干扰。不同类型传感器需合理分布,温度与振动传感器应靠近发热源和振动源,局部放电传感器需避开强电磁干扰区域。布局需考虑设备运行时的电磁环境,减少传感器之间的信号串扰^[3]。数据采集终端承担信号转换与初步处理功能,抗干扰设计至关重要。终端内部电路需采用屏蔽措施,防止外部电磁辐射影响信号精度。外壳材料选择需兼顾防护性能与散热需求,适应户外或高温环境长期运行。高可靠性体现在元器件选型与电路设计上,需耐

受电压波动和温度变化,降低故障概率。边缘计算模块部署于数据采集终端附近,负责本地预处理与压缩。原始信号中包含大量冗余信息,通过滤波和特征提取可减少数据量,降低后续传输压力。模块可对异常信号进行初步判断,仅将关键数据上传至云端,提升系统响应速度。本地处理能力还能减少对远程服务器的依赖,适合网络条件不稳定的场景。

3.2 通信层

通信层连接硬件与软件平台,实现数据高效传输。有线与无线传输技术各有适用场景,光纤传输具备高带宽和抗干扰能力,适合变电站等固定设备密集区域。4G/5G适用于广域覆盖,支持高速移动场景下的数据传输。LoRa技术则以低功耗和长距离传输优势,适用于偏远地区的分散式监测点。数据加密与安全传输机制贯穿通信全过程,防止信息泄露或篡改。传输前需对数据进行加密处理,密钥管理需定期更新,避免长期使用同一密钥带来的风险。通信协议需具备身份认证功能,确保只有授权设备能接入系统,抵御非法访问。低功耗设计针对偏远地区设备,通过优化电路结构和休眠机制降低能耗。设备可根据监测周期调整工作状态,非采集时段进入休眠模式,减少电量消耗。电池选型需匹配设备功耗特性,结合太阳能辅助供电,延长更换周期,适应无人值守环境。

3.3 软件层

软件层是系统的核心处理单元,实现数据管理与智能分析。数据存储与管理需采用时序数据库,适应监测数据按时间序列生成的特点,提高查询效率。分布式存储可将数据分散存储于多个节点,避免单点故障导致的数据丢失,同时提升大规模数据的处理能力。存储策略需区分实时数据与历史数据,对高频采集的数据进行分层存储,平衡性能与空间占用。实时监控平台提供可视化界面,将设备运行状态以图表形式直观展示。界面需清晰呈现关键参数变化趋势,异常情况通过颜色标识和声音提示实现报警管理。报警规则可根据设备类型灵活配置,确保不同场景下的异常都能被及时捕捉。智能分

析引擎集成多种算法库,支持模型训练与更新。算法库涵盖信号处理、故障诊断等基础算法,可根据实际需求调用。模型训练需基于历史数据不断优化,提升故障识别准确率。引擎需具备自适应能力,能根据新出现的故障模式调整分析策略,增强系统的适用性。

3.4 用户交互层

用户交互层连接系统与使用者,提供便捷的操作与决策支持。移动端与PC端协同操作实现随时随地的状态查看,移动端适合现场巡检时的快速访问,PC端则便于开展深度分析与系统配置。两者数据实时同步,确保操作一致性。定制化报表生成可根据用户需求提取关键信息,呈现设备运行趋势和故障统计。报表格式需简洁明了,突出重点内容,辅助制定维护计划。决策支持功能基于分析结果提供建议,结合设备状态和维护成本,给出合理的处理方案。多级权限管理确保数据访问安全,不同角色分配不同操作权限,避免非授权修改系统设置或查看敏感信息。数据共享功能允许授权用户间交换信息,促进协同工作,提升问题处理效率。权限调整需经过审核流程,确保变更记录可追溯。

结束语

电气工程设备在线监测技术通过多参数融合采集与智能分析,实现了设备状态的实时感知与故障精准诊断,显著提升了设备运行的可靠性与维护效率。随着物联网、人工智能等技术的深度融合,在线监测系统将向更智能化、自适应化方向发展,为工业生产提供更全面的安全保障。未来,该技术将在能源转型与碳中和目标下发挥更大作用,推动电气工程领域向高效、可持续方向迈进。

参考文献

- [1]罗敬元,卢宗杞.电力系统电气设备绝缘状态在线监测与评估技术研究[J].光源与照明,2024,(10):60-62.
- [2]殷忠,张磊,王树义.电气设备绝缘在线监测技术的应用与思考[J].贵州水力发电,2005,(02):57-59.
- [3]王辉.电气设备在线监测与状态检修技术分析[J].集成电路应用,2022,39(05):110-111.