

Research on the Implementation Path of Safety Monitoring for High-Voltage Electrical Equipment in Smart Grids

Zhao Yang Cailing Lai Chen Yu Chuanguo Xu Jin Cheng

Shaanxi Public Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

With the acceleration of smart grid construction, the safe and stable operation of high-voltage electrical equipment has become the key to ensuring the reliability of the power grid. The safety monitoring of high-voltage electrical equipment in smart grids aims to achieve real-time perception, risk warning, and intelligent decision-making of equipment operation status through the integration of advanced technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence, thereby providing scientific basis for operation and maintenance decision-making. Based on this, this article explores and analyzes the implementation path of safety monitoring for high-voltage electrical equipment in smart grids, aiming to provide theoretical reference and practical guidance for the intelligent transformation of smart grid equipment operation and maintenance.

Keywords

smart grid; High voltage electrical equipment; Safety monitoring; implementation path

智能电网高压电气设备安全监测的实现路径研究

杨钊 来彩玲 余晨 徐传国 程锦

陕西公众电气股份有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

随着智能电网建设的加速推进, 高压电气设备的安全稳定运行成为保障电网可靠性的关键。智能电网高压电气设备安全监测旨在通过融合物联网、大数据以及人工智能等先进技术, 可实现对设备运行状态的实时感知、风险预警和智能决策, 从而为运维决策制定提供科学的依据。基于此, 本文就智能电网高压电气设备安全监测的实现路径展开探究分析, 旨在为智能电网设备运维的智能化转型提供理论性参考和实践性指导。

关键词

智能电网; 高压电气设备; 安全监测; 实现路径

1 引言

在智能电网中, 高压电气设备属于核心组成部分, 其运行状态直接影响到电网的供电可靠性和安全性。而传统监测手段则依赖于人工巡检和定期试验, 导致数据存在滞后性, 覆盖率严重不足等问题, 因此, 很难满足智能电网对设备精准的实时主动运维需求。而智能电网借助物联网、大数据和人工智能等技术, 能够为高压电气设备监测提供全新的解决方案, 通过部署智能传感器网络、构建数据驱动的分析模型, 以显著提高监测的准确性与时效性, 这为智能电网的安全经济运行提供了可行性的技术支撑。

2 智能电网高压电气设备“数据采集层多源异构融合”的安全监测实现路径

2.1 传感器网络部署

在智能电网高压电气设备的安全监测路径实现中, 不同的传感器有着不同的作用, 而数据采集层作为感知设备状态的基石, 需通过多源异构数据融合技术, 以实现全面、精准的信息获取, 并且传感器网络部署则需结合设备类型与监测需求进行差异化设计^[1]。首先, 温度传感器则采用红外热成像和光纤光栅技术, 前者可非接触式扫描设备表面温度场, 快速定位过热区域, 后者则可通过光信号变化实时监测关键点的温度, 当温度精确度达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 时, 则适用于变压器绕组、电缆接头等高温敏感部位。其次, 振动传感器集成三轴加速度计和 MEMS 芯片, 同步采集设备机械振动时的时域波形和频域特征, 通过 FFT 变换提取 10Hz~1kHz 频段内的特征频率, 以此有效识别轴承磨损、齿轮故障等机械性缺陷。最后, 局部放电传感器则结合超声波与特高频技术,

【作者简介】杨钊 (1991-), 男, 中国甘肃平凉人, 硕士, 工程师, 从事智能电网电力安全监测研究。

超声波传感器能检测到绝缘子表面放电产生的声波信号，而特高频传感器则通过接收纳秒级的脉冲电磁波，定位 GIS、开关柜等封闭内部的局部放电源。其电气参数传感器实时采集电流、电压、泄漏等电流电气量，结合同步相位测量技术，能够为设备过载、绝缘劣化分析提供基础的数据支撑。

2.2 数据预处理

在数据采集层，数据的多源异构数据融合可通过高效的数据预处理技术以保障数据质量。其中，噪声滤波环节可针对不同传感器特性采用差异化算法，其温度传感器数据受环境电磁干扰很容易产生高频毛刺，因此，需采用小波阈值去噪，并通过分解信号至尺度子带抑制噪声主导系数，在保留温度突变特征的同时，能有效消除随机噪声。而振动传感器数据因机械振动耦合很容易混入低频干扰中，在应用卡尔曼滤波算法构建状态空间模型时，结合设备历史振动特征动态估算最优滤波参数，能有效实现振动信号的平滑处理。同时，在局部放电传感器数据中，受电磁环境的影响，很容易出现脉冲叠加的现象，需采用基于相关性的脉冲分离算法，借助计算机信号自相关函数峰值间隔提取独立放电脉冲，有利于更好地提高放电模式识别和准确性^[2]。在数据对齐和补全方面，针对多传感器时间戳不同步的问题，可采用时间插值法统一到毫秒级的精确度，并通过动态时间规整算法以校正传输延迟。对于那些缺少的数据，可基于设备运行规律构建 LSTM 神经网络预测模型，并利用历史数据训练缺失值填充规则，以更好地确保数据序列的完整性，最终为后续分析提供足够的可靠性输入。

3 智能电网高压电气设备“传输层高效可靠通信”的安全监测实现路径

3.1 有线通信

传输层作为数据交互的核心基础设施，基于高压电气设备运行环境的特殊性，有线通信技术凭借其卓越的稳定性与高带宽特性，已成为支撑海量监测数据实时传输的首选技术路径。工业以太网作为当前主流的有线通信架构，采用星型或环型拓扑结构，可实现千兆至万兆级别的数据传输速率，有效满足多传感器并行数据采集与上传的业务需求^[3]。其端到端传输延迟严格控制在 1 毫秒以内，确保了设备状态参数的实时性与精确性，适用于变电站内设备密集区域的本地化通信场景。而在高压电磁环境的特殊工况下，光纤通信技术凭借其优异的抗电磁干扰能力，成为高压电气设备监测网络的关键传输介质。通过单模或多模光纤传输光信号，可完全消除强电磁场对数据传输的干扰，保障数据传输的完整性与可靠性。同时，光纤通信支持数十公里的长距离传输能力，适用于跨变电站或区域级监测网络的构建。通过引入波分复用技术，可进一步提升传输容量，为智能电网大规模高压电气设备监测提供高可靠性的通信保障。

3.2 无线通信

在智能电网高压电气设备安全监测系统中，无线通信

技术凭借其灵活的部署特性与低功耗优势，在偏远区域设备监测及复杂工况环境下的数据回传方面发挥着关键作用。5G 通信技术凭借其高带宽传输能力与低时延特性，可实现高压设备高频振动、局部放电等关键参数的实时采集与传输。通过网络切片技术，可为电力监测业务分配专用通信资源，确保关键监测数据的传输可靠性与服务质量保障。

LoRa 技术则以其长距离传输能力与超低功耗特性在山区、戈壁等偏远区域的设备状态监测中得到广泛应用^[4]。该技术采用扩频调制机制，显著提升了信号在复杂电磁环境中的抗干扰能力，有效满足了低成本、广覆盖的监测需求。此外，ZigBee 技术基于 IEEE 802.15.4 标准构建自组织网络架构，支持设备自动发现与动态路由功能，适用于变电站内部署的温湿度、烟雾等低速率传感器网络。其低功耗特性与 Mesh 网络拓扑结构，大幅降低了系统布线成本，实现了监测设备的灵活部署与可持续运行，为智能电网高压电气设备安全监测提供了可靠的技术支撑。

4 智能电网高压电气设备“分析层智能算法模型构建”的安全监测实现路径

4.1 特征提取

在智能电网高压电气设备安全监测系统的分析层，多维度特征提取与智能算法模型构建是实现设备状态精准表征的关键技术。时域分析方法通过统计特征参数表征设备运行状态，其中均值表征系统稳态运行水平，方差量化数据波动特性以识别异常工况，峰值则用于捕捉瞬时冲击事件，为设备过载或机械故障诊断提供直接依据。频域分析采用快速傅里叶变换将时域信号转换为频域，通过解析特定频段能量分布特征，实现对设备振动、放电等周期性特征的精确识别，例如，基于频谱能量占比可有效定位轴承磨损或绝缘缺陷，小波包分解技术则通过多尺度频带划分机制，适应非平稳信号分析需求，精准提取局部放电等瞬态高频特征成分。而时频联合分析采用希尔伯特-黄变换技术体系，通过经验模态分解自适应提取信号的本征模态函数，结合希尔伯特谱实现时频能量分布的可视化表征。该方法能够有效捕捉设备状态变化的时变特征，为故障早期预警提供多尺度特征支撑。通过上述多维度特征提取方法的协同应用，可实现对高压电气设备运行状态的全面、精准刻画，显著提升设备故障诊断的准确率与预警时效性，为智能电网安全稳定运行提供可靠的分析决策依据。

4.2 故障诊断模型

在机器学习领域，支持向量机凭借核函数映射机制，能够有效处理高维非线性特征空间，适用于局部放电模式识别等复杂分类任务^[5]。而随机森林算法通过集成多棵决策树的结构特性，显著降低模型过拟合风险，其特征重要性评分机制可精准筛选关键诊断参数，大幅增强变压器绕组松动等典型故障诊断的鲁棒性与可靠性。深度学习技术体系在故障诊断中展现出独特优势，卷积神经网络通过多层卷积核的自

动特征提取能力,可精准识别红外热成像中的设备过热区域特征及振动信号中的故障谐波模式。长短期记忆网络基于门控机制有效捕捉时序数据的长期依赖关系,为设备退化趋势预测提供可靠支撑。针对高压电气设备故障样本稀缺的现实挑战,迁移学习方法通过利用预训练模型进行目标域参数微调,仅需少量标注样本即可实现模型快速适配,有效解决新型故障模式识别与新设备监测中的模型泛化难题。

4.3 健康评估与寿命预测

在智能电网高压电气设备安全监测系统的分析层,健康评估与寿命预测技术通过数据驱动方法与物理机理模型的深度融合,实现了设备退化过程的精确量化表征与剩余使用寿命的科学预测。退化轨迹建模采用指数回归模型,通过对绝缘电阻、机械振动幅值等关键性能参数随时间演变规律的分析,构建指数衰减函数以表征设备从初始工作状态至失效状态的渐进退化过程,适用于线性退化工况的描述。Wiener过程则引入随机噪声项,建立带漂移项的随机微分方程,有效模拟设备退化路径中因环境波动、负载变化等因素引发的不确定性,更贴合实际运行条件下非线性退化的复杂特征。剩余使用寿命预测采用数据驱动与物理机理融合的预测框架,数据驱动部分基于历史监测数据训练深度学习模型,以捕捉设备退化过程的时序依赖特征。物理模型则结合设备材料特性、应力-寿命曲线等机理知识,构建退化速率与运行条件的定量关系模型。两者通过加权融合机制或联合优化策略,生成同时满足统计规律与物理约束的RUL预测结果,显著提升预测精度,从而有效支撑了智能电网高压电气设备的全生命周期健康管理。

5 智能电网高压电气设备“应用层可视化决策支持”的安全监测实现路径

5.1 三维可视化平台

在智能电网高压电气设备安全监测系统应用层,高精度三维可视化平台深度融合地理信息系统与建筑信息模型技术,构建变电站及输电线路的高保真虚拟场景,将温度传感器、振动传感器等多源实时监测数据精准映射至三维模型对应位置,依托数字孪生技术实现物理设备与虚拟模型的动态同步更新。运维人员可通过多视角交互界面实时观测设备运行状态参数,显著提升状态感知效率与决策质量。而故障风险可视化采用多参数风险量化模型,基于颜色梯度编码直观呈现设备故障风险空间分布特征,将局部放电强度、绝缘老化程度等关键参数转化为红-黄-绿三级风险热力图,以实现高风险区域的快速定位与精准评估^[6]。趋势分析模块通过整合历史监测数据,构建设备状态参数的时序演化模型,基于滑动窗口算法实现未来状态趋势的预测分析,为预防性维护策略制定提供量化依据。此外,系统深度集成专家知

识库与决策树模型,能有效构建基于规则引擎的智能决策机制。当监测到设备异常状态时,平台可自动生成针对性处置建议,实现从状态监测、风险评估到决策执行的闭环管理。该机制不但能显著提升设备运维的智能化水平,还为智能电网高压电气设备的安全稳定运行提供了科学、高效的决策支持,有效支撑了电网运维模式的数字化转型与智能化升级。

5.2 运维决策系统

运维决策系统是实现智能化算法修计划与资源管理的有效优化方式,检修计划智能生成模块基于设备健康评估结果与风险量化模型,综合设备故障概率、影响范围及运维成本等多维因素,采用层次分析法或模糊综合评价法进行风险等级量化,生成差异化检修策略。针对高风险设备实施紧急停运检修,对中风险设备执行状态监测下的预防性维护,对低风险设备延长巡检周期,实现关键设备资源的精准配置与高效调度。而备品备件库存优化模块融合设备故障历史数据与剩余使用寿命预测结果,构建动态需求预测模型框架,基于时间序列分析或机器学习算法预测未来3-6个月备件消耗量,同时考量供应商交货周期与库存成本约束,采用遗传算法求解最优库存水平。该机制在保障设备可维性的前提下,显著提升库存周转率,有效降低因备件短缺引发的非计划停运风险,实现运维成本与系统可靠性的动态平衡,为智能电网高压电气设备的全周期运维管理提供量化决策支撑。

6 结语

智能电网通过多源数据融合、智能算法赋能和协同平台构建等多种不同方式,可实现从“被动检修”到主动预警的运维模式转变。而随着5G技术、数字孪生、区块链等技术的进一步渗透,监测系统必然会向着更高精度、更强自适应以及更全的生命周期管理方向发展,才能有效推动监测技术与行业标准的深度融合,为助力能源行业的高质量发展奠定基础。

参考文献

- [1] 于杰,刘学林,张学智.变电站高压电气试验设备问题与技术改进探究[J].石河子科技,2025,(05):13-15.
- [2] 王帅.多台并联高压电气设备负荷频率容错控制方法[J].电气时代,2025,(09):159-161.
- [3] 刘园.变电站高压电气绝缘设备调试及管理方法[J].内蒙古科技与经济,2025,(03):150-153.
- [4] 曹慧,陈晓笑,刘海生.变电站高压电气试验设备现状与技术改进研究[J].电工技术,2025,(S1):43-45.
- [5] 苏佳华,丁翼,马剑勋,等.高压电网接地电位差干扰信号滤波算法研究[J].应用科技,2024,51(05):128-133.
- [6] 费凡,顾逸清.高压电气试验中的技术措施分析[J].集成电路应用,2024,41(06):174-175.