

电气设备在线监测与故障诊断技术研究

关玉辉

安徽中科光电色选机械有限公司 安徽合肥 230000

摘要: 当特高压主干电网和分布式新能源并行扩容时, 电网运行状态由稳态向宽频带过渡, 传统的停电检修和周期性试验难以及时发现隐患。在线监测技术借助传感、通讯和算法的力量, 将设备内部的电、磁、热、声等多维信息转化为连续的数据流, 实现设备运行状态的透明化。基于大数据和人工智能的故障诊断技术, 实现对作业人员进行毫秒量级的特征提取、模式识别和风险预测, 为操作人员提供预测性的决策依据。二者的结合, 可以实现用电管理由事后抢修过渡到事前防控的转变, 为电网安全可靠经济运行打下技术基础。

关键词: 电气设备; 在线监测; 故障诊断

电力装备作为能量流动的枢纽, 其健康状况直接影响着电力供应链的韧性和低碳转型节奏。长期以来, 由于计划检修和经验判断很难与复杂运行工况相匹配, 在负荷峰值或系统扰动下, 潜伏缺陷会演化成级联故障, 造成大范围停电和巨大损失。在线监测和故障诊断技术的兴起, 为破解看不见、不确定、等不起的运营难题提供新的思路, 也可以促进设备管理从被动反应到主动治理的转变。因此, 研究电气设备在线监测与故障诊断技术具有重要意义, 可为构建全生命周期健康管理和源网荷储协同防御系统提供理论和工程依据, 对新能源系统高质量发展具有重要的理论意义和应用价值。

一、电气设备在线监测与故障诊断技术特征

(一) 核心技术构成

从感知层、传输层、处理层和应用层四个层次组成了电力设备在线监测与故障诊断的技术体系。感知层利用各种传感器实时采集设备的运行参数, 包括电参数(电压、电流、功率)、绝缘参数(局部放电、介质损耗、漏电流)、热态参数(温度、温升率)和机械参数(振动、局部放电)等。在传输层, 利用有线(光纤、工业以太网)和无线(LoRa、5G、WiFi)传输方式, 实现监测数据的高速可靠传输, 保证数据传输的实时性和完整性^[1]。

在此基础上, 通过滤波、去噪、归一化等手段提高数据质量, 通过时域、频域、时频分析等方法提取特征量, 并结合机器学习、深度学习等智能算法, 建立故障诊断模型。在应用层, 实现了对诊断结果的可视化展示, 故障预警, 支持运维决策, 并通过人机交互界面, 向运

维人员提供设备状态评价报告和针对性处理意见, 形成“数据采集-传输-处理-决策”闭环系统。

(二) 技术应用核心要求

电力设备的在线监测和故障诊断对可靠性、精确性、适应性和实时性提出更高的要求。高可靠性要求传感器、传输设备和诊断系统能够在高温、高湿、强电磁干扰等复杂环境中稳定工作, 高精度要求故障诊断正确率达到90%以上, 定位误差控制在元器件级。强适应能力要求该技术体系能适应不同电压等级(10kV-1000kV)设备的监控要求。

实时性要求数据收集周期以毫秒量级, 故障诊断响应时间控制在30秒以内, 保证运维人员能够及时获取设备状态信息, 及时采取措施应对。此外, 该技术还需要兼顾经济和安全两个方面, 在满足监控诊断需求的同时, 减少设备部署和运行维护费用, 并保证监控系统 and 主设备之间的电气隔离, 不影响设备的正常运行。

二、在线监测关键技术实施

(一) 监测参数优化与传感器选型

科学选取监测参数是保证监测效果的基础, 需要针对不同电气设备的结构特点和失效模式, 筛选出核心监控参数。对变压器而言, 主要监测变压器的局部放电, 油中溶解气体, 绕组温度, 铁芯接地电流^[2]。断路器的工作重点是分合闸线圈电流, 灭弧室温度, 机械振动, SF6气压, 对电缆线路进行局放、绝缘电阻、护套接地电流和敷设环境温度的监测。

传感器的选择要根据监测参数的特征和设备的工作环境进行匹配, 选择超高频传感器(UHF)和超声传感

器, 超高频300MHz—3GHz、超声20kHz—200kHz, 灵敏度大于5pC。采用红外测温传感器和光纤光栅传感器, 测量精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 响应时间在1秒以内, 采用罗氏线圈和霍尔传感器对电参数进行监测, 测量误差在 $\pm 0.2\%$ 以内。在保证设备正常运转的前提下, 采用非侵入式或微创的安装方法, 可以保证设备的绝缘性能和机械强度。

(二) 数据传输与预处理技术

数据传输系统需要根据电力设备部署场景进行优化设计, 将光纤作为变电站设备的首选, 充分发挥光纤的抗EMI能力和高传输率(≥ 1000 兆比特)的优势, 保证数据传输的稳定。基于5G+LoRa混合传输方式, 实现5G+LoRa的高速率传输, LoRa实现3~10km的低功耗长距离数据传输。为防止数据泄漏和传输误差, 在传输过程中使用加密技术和数据校验机制。

数据预处理技术主要针对数据中的噪音、缺失值和离群值等问题进行处理。利用小波分析和卡尔曼滤波技术对电磁干扰和环境干扰进行抑制, 将小波变换分解到3~5层, 使重建信号的信噪比大于20dB^[3]。在数据缺失的情况下, 采用线性插值和均值填充等方法对数据进行填充, 以保证数据的完整性, 采用 3σ 准则、箱型图等方法, 对异常值进行剔除, 以避免影响后续诊断结果。

(三) 监测系统校准与调试

监控系统在安装完成后, 需要对其进行全面的标定和调试, 以保证其工作精度满足要求。传感器标定采用标准信号源输入模式, 实现电压、电流和温度传感器的多点标定, 标定点覆盖0~100%, 标定误差小于 $\pm 1\%$ 。数据传输系统的调试过程中, 对数据传输速率、时延和数据完整性进行模拟测试, 可以验证传输时延 ≤ 50 毫秒, 丢包率 $\leq 0.1\%$ 。

可采用模拟故障实验的方法, 通过设置典型故障, 如变压器局放、断路器机械卡阻等, 对系统进行故障响应能力和诊断精度的测试。在调试过程中, 需要对各种故障类型的监测数据和诊断结果进行记录, 并对系统的缺陷进行分析和优化。

三、故障诊断核心技术应用

(一) 故障特征提取方法

故障特征提取是故障诊断中的一个重要环节, 时域法是利用统计量的均值、方差、峰值、峭度等统计量来反映故障信号在时间域的分布特征, 适合于对机械振

动、电流等信号进行特征提取^[4]。在频域分析中, 利用傅立叶变换和功率谱分析等方法, 实现从时域到频域的转变, 并提取了特征频率, 从而实现对局放、EMI等信号的分析。

将时域和频域分析相结合, 利用小波包变换、短时傅里叶变换等方法对非平稳信号进行特征提取, 可以有效地捕捉故障发生时频变化规律, 为故障诊断提供新的思路。针对复杂故障信号, 通过多维特征融合, 融合不同领域的特征量, 构建综合故障特征矢量, 提高故障识别精度。如将超高频信号的尖峰、上升沿时间和频域峰值频率等特征信息进行融合, 形成多维特征向量, 为故障诊断提供更加丰富的信息。

(二) 智能诊断算法应用

智能诊断算法是实现故障精确识别的核心, 基于规则的故障诊断方法, 可通过对设备正常工作和故障状态进行建模, 并将其与实际监测数据进行比较, 从而实现模型精度要求较高的设备的故障诊断。

基于数据驱动的故障诊断方法因其强大的特征学习能力和模式识别能力, 已成为目前故障诊断的主流方法。支持向量机(SVM)通过构造最优的分类超平面实现对小样本数据的故障分类, 随机森林通过融合多棵决策树提高诊断准确率和泛化能力, 可有效处理高维特征数据^[5]。深度学习(CNN、LSTM等)通过构建深度神经网络, 实现故障特征的自动提取和辨识, 适用于复杂故障和多故障并存的场景。在实际应用中, 可以利用算法融合的策略, 充分发挥各种算法的优势, 提高故障诊断的准确性和鲁棒性。

(三) 故障诊断工程验证

故障诊断技术在工程上的应用需要结合实际运行数据和故障案例, 采用现场测试和离线分析的方法来进行。选择不同类型和电压等级的电力设备, 建立包含正常、轻微和严重三个样本库, 在此基础上, 利用交叉验证的方法, 对不同设备和不同故障类型的诊断模型进行验证。

某变电站以110kV变压器、断路器和电缆为研究对象, 构建5种典型故障样本库, 基于随机森林和卷积神经网络融合算法, 实现故障诊断。工程验证表明, 所设计的故障诊断系统对各类故障的诊断正确率达92%以上, 定位误差控制在元器件级, 可实现故障早期预警和精确辨识, 有效减少故障带来的损失。

(工程应用的核心性能指标统计如表1)。

表1 该工程应用的核心性能指标统计

指标	数值
监测参数覆盖种类	12类
传感器平均无故障时间	8500小时
数据传输延迟	≤ 35ms
故障诊断准确率	≥ 92%
故障定位误差	部件级
故障预警响应时间	≤ 25秒

四、技术优化与工程应用保障

(一) 监测系统抗干扰优化

电气设备工作环境中存在着强电磁干扰、温变和湿度变化等多种干扰因素，需要对其进行技术优化以提高其抗干扰能力。采用屏蔽、接地和滤波三种方法对传感器和传输电缆进行屏蔽，监测装置的接地电阻应小于 4Ω ，采用单点接地的方法，有效地避免地电流的干扰，数据采集部分采用低通滤波器和带通滤波器对工频和高频噪声进行抑制。

温湿度干扰抑制采用宽温域和耐湿传感器，可在 -40°C - 85°C 范围内工作，相对湿度在5-95%（无凝露）。在监控装置内设置温度和湿度补偿模块，利用软件算法对环境温度和湿度的影响进行校正^[6]。在此基础上，通过冗余设计提高系统的可靠性，关键传感器和传输链路采用双备机结构，在主设备发生故障的情况下，自动切换到备用设备，以保证监控系统的正常工作。

(二) 诊断模型自适应升级

为提高故障诊断的泛化能力，需要对诊断模型进行自适应更新，通过实时采集设备运行数据和故障事例，不断扩充样本库，利用在线学习算法更新诊断模型，使模型具有自适应设备运行状态变化和新失效模式的能力。构建模型性能评价体系，定期从诊断准确率、召回率、精确率等多个维度对模型性能进行定期评估，当性能指标下降超过5个百分点时，启动模型优化过程。

在此基础上，结合设备运行状态反馈信息，调整诊断模型特征权值和决策规则，实现模型参数的优化配置。如为解决某一类新型故障诊断精度不高的问题，本项目拟通过增加样本数据、调整模型特征提取策略和分类边界等方法，提高模型对新类型故障的辨识能力，通过对诊断模型进行自适应更新，保证了其在整个生命周期中的高诊断能力。

(三) 工程应用标准化实施

电气设备在线监测和故障诊断技术在工程中的应用需要按照规范的流程进行，保证技术的标准化和有效性。在项目实施前，需要开展现场调查，针对设备种类、运行环境和故障模式等因素，制定个性化的监测方案，明确监测参数、安装地点和传输模式。

在施工过程中，严格遵循施工规范，在安装传感器、铺设电缆、设备调试等过程中，要对每一道工序进行质量控制，每一道工序完成后都要进行验收，通过之后才能进行下一道工序。项目建成后，将开展至少3个月的试运行，全面评价系统的运行状况，监测数据的质量，诊断结果的准确性，并依据评价结果对系统进行优化调整。

结束语

综上所述，电气设备在线监测与故障诊断技术研究，可以实现传感-诊断-决策一体化的实时闭环，实现设备缺陷在早期发现，系统风险在演化中被消除，其深度应用不仅可以大幅提高电网的安全裕度和资产性能，还能为能源绿色转型提供可靠的装备保障。面向未来，电力电子比例大、负荷多、极端气候复杂多变的应用场景，需要在量子感知、边缘智能、数字孪生和安全可信等方面不断突破，促进诊断技术向自适应、自学习、自演化跨越，实现装备-系统-环境的协同共生，为实现可持续能源发展贡献为提供参考。

参考文献

- [1] 贾学瑞. 高压电气设备状态检修技术研究[J]. 电力设备管理, 2024, (24): 48-50.
- [2] 肖晶晶. 带电检测技术在变电运维中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(12): 166-167.
- [3] 胡力友. 矿山电气设备在线监测与诊断系统的设计与实现[J]. 电工技术, 2024, (18): 222-224.
- [4] 李志锦, 黄腾鲲. 变电站电力设备声纹振动在线监测技术研究[J]. 流体测量与控制, 2024, 5(02): 97-100.
- [5] 申宝松, 许传敏, 刘腾飞. 智能技术在变电故障诊断系统中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(10): 132-133.
- [6] 王成, 刘先锋. 基于物联网技术的智能电气设备在线监测与故障诊断[J]. 信息记录材料, 2023, 24(09): 103-105+108.