

基于数字孪生的电力变压器状态监测与故障预警

蔡润宇

南水北调中线信息科技有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4934

[摘要] 电力变压器作为电网中的关键设备,其运行状态直接关系到整个电力系统的安全稳定。传统状态监测方法在数据融合、实时性及预测能力方面存在局限。本文提出一种基于数字孪生(Digital Twin, DT)技术的电力变压器状态监测与故障预警方法。通过构建高保真度的变压器数字孪生体,集成多源异构传感数据、物理模型、人工智能算法与历史运维信息,实现对变压器全生命周期状态的动态映射与智能分析。文中详细阐述了数字孪生体的架构设计、多维数据融合机制、状态评估指标体系以及故障预警策略。所提方法可显著提升变压器状态感知精度与故障预警提前量,为智能电网设备健康管理提供新范式。

[关键词] 数字孪生; 电力变压器; 状态监测; 故障预警; 多源数据融合; 人工智能

中图分类号: TM41 **文献标识码:** A

Power Transformer Condition Monitoring and Fault Warning Based on Digital Twin

Runyu Cai

South-to-North Water Diversion Middle Route Information Technology Co., Ltd.

[Abstract] As a key device in the power grid, the operating condition of power transformers directly affects the safety and stability of the entire power system. Traditional condition monitoring methods have limitations in data fusion, real-time performance, and prediction capability. This paper proposes a power transformer condition monitoring and fault warning method based on Digital Twin (DT) technology. By constructing a high-fidelity digital twin of the transformer and integrating multi-source heterogeneous sensing data, physical models, artificial intelligence algorithms, and historical operation and maintenance information, dynamic mapping and intelligent analysis of the transformer's full lifecycle condition are achieved. The paper elaborates on the architecture design of the digital twin, multi-dimensional data fusion mechanism, condition evaluation indicator system, and fault warning strategy. The proposed method can significantly improve transformer condition sensing accuracy and fault warning lead time, providing a new paradigm for smart grid equipment health management.

[Key words] digital twin; power transformer; condition monitoring; fault warning; multi-source data fusion; artificial intelligence

引言

随着“双碳”目标推进和新型电力系统建设加速,电网设备智能化水平亟待提升。电力变压器作为输变电系统的核心枢纽,长期处于高电压、大电流、强磁场等复杂工况下,易受热、电、机械及化学老化等因素影响,导致绝缘劣化、绕组变形、铁芯松动等典型故障。一旦发生严重故障,不仅造成巨大经济损失,还可能引发电网连锁事故。传统变压器状态监测主要依赖定期巡检、离线试验(如油色谱分析、绝缘电阻测试)及部分在线监测装置(如油温、局放传感器)。然而,这些方法存在响应滞后、数据孤岛、缺乏协同分析等问题,难以实现对设备健康状态的全

面、实时、精准评估。近年来,随着物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)等技术的发展,设备状态感知能力显著增强,但如何有效整合多维信息并实现从“被动响应”向“主动预防”的转变,仍是亟待解决的关键问题。数字孪生作为一种新兴的数字化建模与仿真技术,通过在虚拟空间中构建物理实体的动态镜像,实现虚实交互、实时同步与智能决策,将其引入电力设备运维领域,有望突破传统监测手段的瓶颈。本文聚焦电力变压器,构建基于数字孪生的状态监测与故障预警体系,旨在提升设备可靠性与电网韧性。

1 数字孪生技术概述

数字孪生最早由Michael Grieves于2002年提出,其核心思想是在虚拟空间中建立物理对象的数字化副本,并通过数据驱动实现两者间的双向闭环交互。一个完整的数字孪生系统通常包含五大核心要素:物理实体、虚拟模型、数据连接、服务功能与孪生数据。在电力设备领域,数字孪生的价值在于实现设备全生命周期数据贯通,支持多物理场耦合仿真与异常行为推演,融合机理模型与数据驱动模型以提升预测准确性,并为运维决策提供可视化、可交互的数字平台。这种技术范式不仅改变了传统“事后维修”的运维逻辑,更推动了设备管理向“预测性维护”和“自适应优化”方向演进。

2 基于数字孪生的变压器状态监测体系架构

本文提出的数字孪生变压器系统采用“端-边-云”协同架构,整体分为四层:

2.1 感知层(物理层)

感知层是整个数字孪生系统的数据源头,其部署质量直接决定了后续分析的可靠性。在变压器本体及其周边环境中,需布设涵盖电气、热学、化学、机械及环境等多个维度的传感网络。具体而言,电气量传感器用于采集运行电压、电流及功率因数等基础参数;热学传感器包括顶层油温和基于光纤测温技术的绕组热点温度监测装置,能够反映内部热应力分布;油中溶解气体分析(DGA)在线装置则持续监测 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 等特征气体浓度变化,为绝缘状态评估提供关键依据;此外,振动加速度计与声学传感器可捕捉机械结构异常引起的微弱信号,而环境传感器则记录湿度、气压及负荷波动等外部扰动因素。所有这些传感器通过工业物联网协议(如IEC 61850或MQTT)将数据实时上传至边缘计算节点,形成覆盖全面、响应迅速的感知体系。

2.2 边缘计算层

边缘计算层位于变电站本地,承担着数据预处理与轻量化智能分析的重要任务。由于原始传感数据往往存在噪声干扰、采样频率不一致或传输延迟等问题,边缘节点首先执行数据清洗、时间对齐与异常值剔除等操作,以提升数据质量。在此基础上,边缘计算可运行轻量级算法模型,例如实时计算油温升速率以判断冷却系统效率,或通过小波变换初步识别局部放电脉冲特征^[1]。更重要的是,边缘层能够对高维数据进行压缩与摘要,仅将关键特征或异常事件上传至云端,从而显著降低通信带宽压力与云平台负载。这种“端-边-云”协同架构不仅提升了系统响应速度,也增强了在弱网或断网场景下的鲁棒性。

2.3 云平台层(数字孪生核心)

云平台是数字孪生体的核心承载环境,集成了模型库、数据湖、AI引擎与规则系统四大功能模块。其中,几何与物理模型库基于变压器的设计图纸与材料参数,构建包含电磁场、热场与流体场的多物理场耦合仿真模型,能够动态反映设备在不同工况下的内部状态演化。数据湖则汇聚了从出厂试验、安装调试、运行日志到历次检修记录的全生命周期数据,形成结构化与非结构化并存的统一数据资产。AI引擎作为智能分析中枢,融合深度学习、图神经网络与强化学习等多种算法,用于状态识别、趋势

预测与决策优化。同时,系统内嵌电力行业标准(如DL/T 596、IEC 60599)中的故障判据与阈值逻辑,通过规则引擎实现专家知识与数据驱动的有机结合,确保预警结果既具备科学依据,又符合工程实践规范。

2.4 应用服务层

应用服务层面向运维人员提供直观、高效的交互界面与智能服务。通过三维可视化技术,运维人员可在数字孪生平台上实时查看变压器内部温度场分布、气体浓度演变曲线及振动频谱特征,实现“所见即所得”的状态感知。当系统检测到潜在风险时,会自动通过短信、邮件或移动APP推送预警信息,并附带故障类型、置信度及可能原因分析。更进一步,系统可根据剩余使用寿命(RUL)预测结果,自动生成差异化维护建议,如“建议30天内安排红外测温复核”或“需在下次停电窗口期进行绕组变形检测”^[2]。此外,平台还支持故障场景回放与处置推演功能,运维团队可在虚拟环境中模拟不同应急方案的效果,从而提升实战响应能力。

3 数字孪生体建模与数据融合机制

3.1 多尺度建模方法

为准确刻画变压器复杂运行机理,数字孪生体需采用多尺度建模策略,在系统、部件与材料三个层级上分别构建相应模型。在系统层面,基于等效电路理论建立电气-热耦合模型,描述输入功率、铜损铁损与温升之间的动态关系,适用于宏观性能评估;在部件层面,利用有限元方法(FEM)对绕组、铁芯、套管等关键组件进行精细化建模,模拟电磁力作用下的机械形变、热膨胀效应及振动模态,从而揭示局部异常的物理根源;在材料层面,则引入绝缘纸老化动力学方程(如Montsinger模型),将运行温度、水分含量与氧气浓度等环境因素与聚合度(DP)衰减速率关联起来,定量评估绝缘寿命损耗。为兼顾模型精度与计算效率,还需采用模型降阶(MOR)技术与在线参数辨识算法,使数字孪生体既能反映真实物理过程,又满足实时仿真需求。

3.2 多源异构数据融合

变压器运行过程中产生的数据具有高维、异构、非平稳等特性,单一数据源往往难以全面反映设备状态。为此,本文提出一种“时空-语义”融合框架,实现多源信息的深度协同。首先,在时间维度上,采用动态时间规整(DTW)或样条插值等方法对不同采样频率的数据流进行对齐,确保各变量在相同时刻具有可比性;其次,在空间维度上,将变压器内部组件抽象为图结构节点,利用图神经网络建模组件间的状态传播与耦合关系,例如绕组过热可能引发邻近铁芯局部磁滞损耗增加;再次,在语义层面,将电力行业成熟的专家规则(如IEC三比值法、Rogers比值)转化为可计算的特征向量,赋予数据以工程意义;最后,通过注意力机制或多模态自编码器对融合后的高维特征进行加权与压缩,突出关键信息,抑制冗余噪声^[3]。这种融合机制使得系统能够在 C_2H_2 浓度轻微上升、热点温度异常与高频振动信号同时出现时,综合判断为“内部电弧放电”风险,而非孤立依赖某一项指标,从而大幅降低误报率。

4 状态评估与故障预警方法

4.1 健康状态指标体系

为实现对变压器整体健康状况的量化评估,本文定义健康指数(Health Index, HI)作为核心评价指标。该指数通过加权融合多个状态子指标计算得出,子指标涵盖油色谱异常度、热点温度裕度、振动能量熵、绝缘电阻衰减率等关键参数。其计算公式为:

$$HI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i$$

其中, S_i 为第 i 项状态子指标(如油色谱异常度、热点温度裕度、振动能量熵等), w_i 为权重,通过AHP(层次分析法)或熵权法确定。HI取值范围为0~100,数值越低表示健康状态越差。权重分配采用熵权法或层次分析法(AHP),既考虑各指标的信息熵贡献,也融入专家经验判断,确保评估结果的客观性与合理性。HI取值范围为0至100,数值越高表示设备状态越优。当HI低于某一阈值(如70)时,系统判定设备进入亚健康状态,需加强监测或安排检修。该指标体系不仅提供了统一的评估标尺,也为不同变压器之间的状态横向对比创造了条件。

4.2 故障预警策略

为兼顾预警的灵敏性与可靠性,本文设计了一套“三级阈值+趋势预测”双轨制预警策略。一级预警对应“注意”状态,当任一子指标超过行业标准规定的注意值(如H₂浓度大于150ppm)时触发,提示运维人员进行人工复核;二级预警对应“异常”状态,当健康指数显著下降或关键气体增长速率持续超标时启动,系统将自动调用远程诊断模块进行深度分析;三级预警则代表“严重”风险,当AI模型预测未来72小时内发生故障的概率超过80%时,系统将生成停运建议并推送至调度中心。在预测模型方面,短期预测(24小时内)采用LSTM或时间卷积网络(TCN)捕捉时序依赖关系,而中长期预测(一周以上)则结合物理退化模型与贝叶斯更新机制,动态修正剩余使用寿命估计。此外,为提升决策可信度,系统引入不确定性量化技术(如蒙特卡洛Dropout),为每次预警结果提供置信区间,避免因模型过拟合或数据噪声导致的误判。

5 讨论与挑战

尽管数字孪生在变压器状态监测中展现出巨大潜力,其大规模工程应用仍面临若干现实挑战。首先,高保真多物理场模型的计算开销较大,如何在保证仿真精度的同时满足实时性要求,需要进一步优化模型简化策略与边缘-云协同调度机制。其次,大量老旧变电站传感器覆盖率低、数据质量差,如何在小样本或缺失数据条件下构建有效孪生体,亟需研究迁移学习、生成对抗网络(GAN)等数据增强技术^[4]。第三,当前行业缺乏统一的数字孪生建模规范与接口标准,不同厂商设备的数据格式与通信协议差异较大,制约了系统的互操作性与可扩展性。最后,海量运行数据上传至云端可能带来网络安全与商业隐私风险,未来需探索联邦学习、差分隐私与区块链存证等技术,在保障数据价值释放的同时筑牢安全防线。上述问题的解决,将是推动数字孪生从“示范应用”走向“规模化落地”的关键。

6 结语

本文提出了一种基于数字孪生的电力变压器状态监测与故障预警方法。通过构建融合物理模型、多源传感数据与人工智能算法的数字孪生体,实现了对变压器运行状态的全景感知、精准评估与前瞻预警。该方法可有效提升故障早期识别能力,延长设备使用寿命,降低非计划停运风险。随着数字孪生技术标准体系的完善与算力成本的下降,其在智能电网设备资产管理中的应用前景广阔,将为构建安全、高效、韧性的新型电力系统提供重要支撑。

[参考文献]

- [1]艾红卫,王龙江,吴家欣.基于数字孪生技术的变压器状态监测研究与探索[J].黑龙江电力,2025,47(04):339-342.
- [2]柴天胜.数字孪生技术在电力变压器全生命周期运维中的应用[J].电力设备管理,2025,(01):171-173.
- [3]郝德天.基于数字孪生的电力变压器智能运维研究[J].通讯世界,2024,31(10):58-60.
- [4]刘云鹏,刘一瑾,刘刚,等.电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8636-8652.