变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术的运维应用分析

汪 恒 王海龙 刘华臣 张倩旭
国网河南省电力公司直流分公司 河南 郑州 450000

摘 要 随着电力系统智能化进程的加速，传统变压器呼吸器依赖人工巡检、硅胶更换的维护方式已难以满足高可靠性、低运维成本的现代电力设备管理需求。本文围绕变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术，系统分析了其在运维场景中的应用价值与实施路径。该技术通过集成高精度传感器、智能控制模块与可视化交互界面，实现对变压器呼吸状态的实时监测、数据存储与异常预警，显著提升了设备状态的透明化与运维决策的科学性。文章从技术原理、系统构成、运维流程优化等方面展开论述，并结合实际案例，探讨了该技术在降低人工干预频率、提升设备可靠性、推动电力设备数字化转型等方面的综合效益。研究表明，呼吸状态可视化技术不仅能够有效解决传统运维中的“盲区”问题，还为构建智能巡检体系提供了关键技术支撑，具有广阔的工程推广前景。

关键词 变压器；免维护呼吸器；状态可视化；运维应用分析

Analysis of the Operation and Maintenance Application of Visualization Technology for Transformer Maintenance-Free Breather Status

Wang Heng, Wang Hai-long, Liu Hua-chen, Zhang Qian-xu
DC Branch of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

Abstract With the acceleration of the intelligentization process in power systems, traditional transformer breather maintenance methods relying on manual inspections and silica gel replacement can no longer meet the modern power equipment management requirements of high reliability and low operation and maintenance costs. This paper systematically analyzes the application value and implementation path of visualization technology for transformer maintenance-free breather status within operation and maintenance scenarios. By integrating high-precision sensors, intelligent control modules, and visual interactive interfaces, this technology enables real-time monitoring, data storage, and anomaly warning of the transformer’s breathing state, significantly enhancing the transparency of equipment status and the scientific nature of maintenance decisions. The paper discusses the technical principles, system composition, and optimization of operation and maintenance processes, and combined with practical cases, explores the comprehensive benefits of this technology in reducing the frequency of manual intervention, improving equipment reliability, and promoting the digital transformation of power equipment. Research indicates that visualization technology for breather status not only effectively solves the “blind spot” problem in traditional maintenance but also provides key technical support for building intelligent inspection systems, holding broad prospects for engineering promotion.

Key words Transformer; Maintenance-Free Breather; Status Visualization; Operation and Maintenance Application Analysis

变压器作为电力系统中的核心设备，其运行状态直接关系到电网的稳定与安全。传统变压器呼吸器采用硅胶吸湿原理，需依赖人工定期检查硅胶颜色变化以判断是否饱和，不仅维护成本高、效率低，且存在因判断滞后或失误导致的设备绝缘下降甚至故障风险。随着传感器技术、物联网与数据分析技术的快速发展，变压器呼吸状态的智能化、可视化监测成为行业重要研究方向[1]。本文基于国网河南省电力公司直流中心开展的“变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化研究”项目，结合其技术方案与实施路径，重点探讨该技术在运维场景中的实际应用模式、成效与挑战。通过将呼吸状态以数据化、图形化的方式呈现给运维人员，该技术实现了从“被动检修”到“主动预警”的运维模式转变，为提升变压器运行可靠性、降低全生命周期运维成本提供了切实可行的技术路径。本文旨在系统梳理该技术的运维应用逻辑，以期为同类设备的智能化改造与运维体系优化提供参考。

1 技术原理与系统构成

变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术，是一种融合了传感技术、微处理器控制、数据通信与人机交互的综合性智能监测系统。其核心在于通过实时采集变压器呼吸过程中的关键物理参数，并基于预设算法进行状态判断与趋势分析，最终通过可视化界面直观展示。

1.1 系统工作原理与构成

该系统通过传感器模块实时采集呼吸管路内的湿度、温度以及油枕与外部环境的气压差。核心处理器（如STM32系列MCU）对采集数据进行处理，运用内置算法识别呼吸状态（呼气、吸气或待机），并智能判断除湿再生启动的必要性。执行机构主要包括用于硅胶再生的PTC加热器和用于低温防结冰的辅助加热垫。通信模块支持RS485（MODBUS协议）、蓝牙或USB数据导出。可视化终端则通过指示灯、液晶屏或移动终端App，展示实时数据、历史曲线及报警信息，从而构成完整的“感知—决策—执行—展示”闭环。

1.2 关键技术创新点

相较于传统方案，本技术的创新点显著。首先，它实现了多参数融合监测与智能决策，结合湿度与气压差信号精准判断呼吸时机，确保仅在呼气阶段加热，避免反向吸入湿气，并辅以温度监控防止设备过热[2]。其次，具备状态可视化与远程可读能力，通过本地指示灯实现状态快速初判，并借助USB或蓝牙接口支持远程数据调取与深度分析。再者，采用自适应控制算法后，系统能够学习并适应变压器的个体呼吸规律，动态优化除湿阈值与工作周期。最后，其模块化与高兼容性设计使得传感器易于更换，安装法兰可360°调节，极大提升了现场适配性与维护便利性。

1.3 软件系统架构

系统软件由嵌入式控制软件和上位机显示软件构成。嵌入式软件负责底层驱动、数据采集、控制逻辑与协议栈（如FreeMODBUS）运行，是设备的“大脑”。上位机软件（如基于LVGL开发的界面）则为运维人员提供图形化交互界面，直观展示压力、温湿度、设备状态图标及报警日志，二者通过标准协议协同，共同保障系统智能稳定运行。

2 运维应用场景与流程重塑

该技术的引入，彻底改变了传统依赖人工目视的运维模式，在多个场景下实现了流程优化与效率提升。

2.1 日常巡检模式的智能化转型

传统巡检依赖人工近距离辨认硅胶颜色，效率低下且主观性强。应用本技术后，日常巡检得以重塑：运维人员可进行“现场快速巡检”，仅需观察设备上的多色LED指示灯（如绿灯常亮表示正常，红灯闪烁表示报警）即可在数秒内完成状态初判。同时，可通过“移动端精细巡检”，利用蓝牙连接专用巡检仪或App，实时读取温湿度、压差、呼吸次数等详细数据与历史曲线，实现设备状态的深度、量化评估，大幅提升了巡检的效率和客观性[3]。

2.2 预防性维护与故障预警机制的建立

该技术为从定期检修转向预测性维护提供了数据基础。系统通过对呼吸频率、除湿周期等参数的持续趋势分析，可在出现异常迹象（如呼吸骤频提示内部可能产气）时提前预警，从而实现故障的早期干预。同时，当设备报警时，系统提供的具体错误代码（如传感器故障代码）能够帮助运维人员快速精准定位故障点，指导备件更换，显著缩短故障诊断与修复时间，其与传统模式的效率对比如表1所示。

表1 传统运维模式与可视化技术运维模式对比

对比维度	传统硅胶呼吸器运维模式	免维护呼吸器可视化技术运维模式
状态判断依据	人工观察硅胶颜色变化（蓝色→粉红色）	指示灯状态、实时数据读取、历史曲线分析
巡检效率	低，需近距离仔细辨认，受光线、经验影响大	高，可远观指示灯，快速扫码或蓝牙连接获取数据
维护频率与成本	高，需定期更换硅胶，涉及停电、耗材与人工成本	极低，硅胶在线加热再生，基本实现免维护
故障发现时效	滞后，通常在硅胶完全变色后才被发现	实时或近乎实时，系统自动监测并报警
数据记录与分析	无，依赖手工记录	自动记录存储，支持趋势分析和报表生成
对人员技能要求	较高，需经验判断	降低，状态直观明确，辅助以标准作业流程
扩展性与集成度	低，独立设备，难以融入智能系统	高，支持标准通信协议，易于接入物联平台或综合监控系统

2.3 远程集中监控与决策支持

对于接入站内网络的设备，其数据可上传至集控中心。运维人员可在SCADA系统或专用平台上实现所有变压器呼吸器状态的“一张图”全景监视，极大提升了无人值守站的设备状态透明度。此外，系统自动生成的健康度报表与维护建议，为管理人员制订维修策略、优化备件库存提供了科学的数据支撑，推动了运维管理向数字化、智能化决策的深刻转型。

3 应用效益综合评估

变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术的运维应用，产生了显著的经济与社会效益。

3.1 直接经济效益分析

直接经济效益主要体现在3个方面。首先是运维成本的大幅降低，该技术彻底消除了硅胶的定期采购、更换成本以及相关的停电作业成本，据估算可使单台呼吸器的年维护费用下降超过80%。其次是人工效率的显著提升，巡检时间从平均每台15～20 min缩短至2～3 min，并将运维人员从重复性劳动中解放出来[4]。最后是故障损失的减少，通过早期预警和精准诊断，有效避免了因呼吸器故障引发的变压器绝缘受潮等严重后果，减少了非计划停运带来的电量损失和昂贵的大修费用。

3.2 间接效益与管理提升

间接效益同样重要。该技术首先提升了设备与电网的可靠性，通过持续提供干燥空气，保障了变压器内部绝缘的长期稳定，延长了设备使用寿命。其次，它增强了作业安全性，减少了人员登高和近距离接触带电设备进行维护的频率。最后，作为变压器智能化的关键组件，该技术产生的数据流为构建设备数字孪生、实现全生命周期精细化管理奠定了基础，有力助推了电力系统的数字化转型。

4 实际应用案例深度分析

为展现变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术的实际效能，结合国内某省级电网公司试点应用情况进行分析。该公司在3个220 kV和5个110 kV变电站中选取50台主变压器，分批安装具备呼吸状态可视化功能的免维护呼吸器，并进行两年跟踪观测。

4.1 案例背景与实施概况

试点涵盖城市负荷中心、郊区及偏远山区等环境，变压器型号、投运年限各异，代表性良好。实施前均采用传统硅胶式呼吸器，年均每台更换硅胶2～3次，每次耗时约1.5 h，且存在硅胶过饱和案例。可视化技术改造于2022年初启动，内容包括安装新型智能呼吸器、部署数据汇聚单元、升级监控后台软件及专项培训。

4.2 关键技术应用细节

针对山区昼夜温差大、冬季低温特点，选配宽温域传感器并增大辅助加热垫功率；针对城市站电磁环境复杂情况，优化通信模块抗干扰设计。设备统一支持Modbus RTU over RS485协议，接入现有综合自动化系统。可视化界面提供本地液晶屏显示，并开发与移动巡检App集成的轻量化模块，方便现场扫码读取数据。

4.3 运维成效量化分析

两年运行成效显著：单台呼吸器状态检查时间由18 min压缩至3 min，巡检工时节省超80%；50台设备两年累计节省材料及人工成本约25万元，未发生因呼吸器导致的非计划停电；系统累计触发12次有效预警，均实现故障前处置；系统自动生成超100万条运行数据，初步构建区域变压器呼吸状态基准模型，提升异常检测准确性。

4.4 经验总结与问题反思

项目暴露的问题包括：约5%的传感器在严冬后出现测量偏差，与密封材料低温弹性下降有关，通过更换改进型密封圈解决；部分老员工对数据界面和报警规则适应较慢，反映出技能转型需更人性化的培训设计；不同批次设备的数据格式存在差异，凸显标准统一的重要性。总体而言，该技术在提升运维精益化水平、保障设备安全方面价值突出，长期数据与经验将为技术迭代与标准化提供直接输入[5]。

5 结束语

变压器免维护呼吸器呼吸状态可视化技术将隐性的呼吸过程转化为显性、可量化的数据，从根本上革新了运维管理模式。该技术有效解决了传统运维成本高、判断难的痛点，通过数据驱动为预测性维护和智能化管理奠定了坚实基础。尽管当前大规模推广仍面临初期投资较高、传感器长期可靠性需进一步验证、行业标准尚未统一、运维人员配套培训有待完善等挑战，但随着人工智能深度应用、云边协同架构的成熟以及与巡检机器人、无人机等设备的联动发展，技术前景广阔。通过与设备制造商深度合作，推动智能呼吸器成为变压器标准配置，将从源头提升设备智能化水平。随着技术不断成熟、成本持续优化及标准日趋完善，该项技术将在电力及其他工业领域发挥更大价值，成为保障关键设备安全、稳定、高效运行的重要技术支柱。

参考文献

[1]肖健,张付粤,张益珩,等.免维护呼吸器导通检测装置的研制与应用研究[J].四川电力技术,2024,47(2):94-98.

[2]沈刘玉,胡南,吴琳,等.变压器免维护吸湿器的设计与应用[J].通信电源技术,2018,35(6):169-171.

[3]侯坤.智能呼吸器在水电站的应用分析[J].科技与创新,2025(5):83-85.

[4]李林华,薛冰,霍天,等.浅谈变压器免维护呼吸器[J].农村电气化,2023(12):87-88.

[5]施润杰.基于自适应阈值分割的电力变压器呼吸器变色检测方法[J].江西电力,2022,46(8):36-41,44.

（本文编辑 曹 阳）