

电力变压器绝缘诊断方法

杨娟娟

安阳钢铁建设有限责任公司 河南 安阳 455000

摘要: 电力变压器绝缘诊断对保障电力系统安全稳定运行意义重大, 本文首先介绍了绝缘系统构成、劣化诱因及诊断目标原则, 接着说明了电气试验、油务分析、局部放电检测、新型智能诊断等核心方法及特点。然后分析现有方法在精度时效性、工程化应用、多方法融合协同性方面的局限性, 指出发展趋势。还提出工程应用优化方向, 包括流程标准化、设备小型化便捷化、人员技术水平提升。最后展望未来, 强调新型绝缘材料诊断、极端工况技术突破及智能运维一体化体系构建。

关键词: 电力变压器; 绝缘诊断方法; 技术发展

引言: 电力变压器作为电力系统关键设备, 其绝缘状态直接影响电网安全稳定运行。绝缘故障是引发变压器事故主因, 传统定期检修模式难以满足现代电网需求。绝缘诊断技术通过检测绝缘系统状态参数, 实现故障早期预警与状态评估, 对提升设备可靠性、优化运维策略具有重要意义。本文系统梳理电力变压器绝缘诊断方法体系, 分析现有技术局限与发展趋势, 提出工程应用优化方向, 展望未来技术发展方向。

1 电力变压器绝缘诊断概述

电力变压器是电力系统核心设备, 其绝缘系统由固体、液体(绝缘油)、气体(SF₆或空气)绝缘构成复合结构, 起隔离高压、防电击穿作用。全球超60%的变压器事故因绝缘故障引发, 绝缘老化、受潮、局部放电是主因, 传统定期检修在电网规模扩大和电压等级提升下难以满足需求, 绝缘诊断技术成为保障安全运行、延长寿命、降低成本的核心手段, 关乎电力设备可靠性及智能电网建设^[1]。固体绝缘用纤维素材料, 易受水分、温度影响水解与热老化; 绝缘油兼具绝缘与散热功能, 其性能反映绝缘状态; 气体绝缘多用于特殊结构, 要关注气体压力与纯度。绝缘系统有非线性电场分布等特性, 诊断需综合多维度信息。绝缘劣化是电、热、机械、环境多因素长期作用结果, 劣化有累积效应, 早期局部缺陷会扩展至整体失效。绝缘诊断核心目标是早发现缺陷、量化评估状态、预测剩余寿命, 需遵循非破坏性等原则, 通过系统性诊断实现从“定期检修”向“状态检修”转变, 提升电网运行经济性与安全性。

2 电力变压器绝缘诊断核心方法

2.1 电气试验诊断方法

(1) 绝缘电阻与吸收比测试, 测量绝缘电阻(R_{60s})和吸收比(R_{60s}/R_{15s})以评估绝缘受潮或老化程度, 当

绝缘受潮时绝缘电阻降低且吸收比接近1, 若绝缘老化则绝缘电阻可能正常但吸收比下降。(2) 介质损耗因数(tanδ)测试, tanδ反映绝缘材料能量损耗, 绝缘受潮或老化时tanδ会显著增大, 该方法对局部缺陷较为敏感, 不过易受外界温度、湿度等因素干扰。(3) 直流耐压与交流耐压试验, 直流耐压试验通过施加高压来发现绝缘局部缺陷, 交流耐压试验可模拟运行工况检测绝缘耐受能力, 但交流耐压试验可能会加速绝缘缺陷发展, 使用时需谨慎。(4) 绕组直流电阻测试, 通过检测绕组匝间短路或接触不良情况, 比较三相电阻值判断平衡性, 进而间接反映绝缘状态, 若三相电阻不平衡可能暗示存在绝缘问题。电气试验方法各有特点, 绝缘电阻与吸收比测试简单易行, 能初步判断绝缘状况; 介质损耗因数测试对局部缺陷敏感度高; 直流耐压试验利于发现局部缺陷; 交流耐压试验贴近实际运行; 绕组直流电阻测试可反映绕组相关绝缘问题。但电气试验也存在局限性, 多数试验需停电进行, 会影响供电连续性, 给用户用电带来不便, 而且部分试验方法如耐压试验, 在检测过程中可能对绝缘造成一定损伤, 增加设备后续运行风险, 因此在实际应用中需综合考虑各方面因素合理选择试验方法。

2.2 油务分析诊断方法

油中溶解气体分析(DGA)是重要方法之一, 检测H₂、CH₄、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆、CO、CO₂等气体含量, 依据三比值法、大卫三角形法等判断故障类型, 如过热、放电等, 它是早期缺陷检测核心手段, 不过仅依据当前气体含量判断不够准确, 需结合气体产生速率与历史数据综合分析。绝缘油介电性能测试也是关键环节, 测量击穿电压、介质损耗因数、体积电阻率等参数反映油的绝缘性能, 若击穿电压降低, 说明油中水分或杂质增多, 导致绝缘性能下降; 介质损耗因数增大则提示油老化或受

到污染,影响其正常绝缘功能。油中糠醛及水分含量测试各有作用,糠醛是纤维素材料老化特征产物,其浓度与绝缘纸聚合度相关,通过检测糠醛浓度能评估固体绝缘老化程度;水分含量直接影响绝缘电阻与 $\tan\delta$,运行油中水分含量需控制在 $\leq 30\text{mg/L}$,否则会降低绝缘性能^[2]。绝缘油老化程度综合评估要结合酸值、界面张力、闪点等参数,建立老化评分模型,以此量化油质劣化程度。油务分析虽有诸多优势,但也存在局限,需定期取样,不能实现实时监测,难以及时掌握绝缘油状态变化,而且取样位置、油循环等因素会影响检测结果,可能存在误差,需在实际应用中综合考虑这些因素。

2.3 局部放电检测诊断方法

(1) 脉冲电流法,它通过检测局部放电产生的脉冲电流信号来测量视在放电量(pC),该方法灵敏度高,不过主要适用于实验室或离线检测场景,且抗干扰能力较差,在复杂电磁环境下易受干扰影响检测结果。(2) 特高频(UHF)法,利用局部放电产生的高频电磁波(300MHz-3GHz),借助天线接收信号,其优势在于抗干扰能力强,还能对缺陷进行定位,但需要安装传感器,并且对设备结构较为敏感,设备结构不同可能影响信号接收效果。(3) 超声波法,检测的是局部放电产生的超声波信号(20kHz-200kHz),比较适用于气体绝缘设备,能实现缺陷定位,然而灵敏度相对较低,对于一些微弱的局部放电信号可能难以有效检测。(4) 局部放电信号特征提取与识别,提升诊断准确性的关键环节,通过时域、频域分析提取信号特征,如峰值、相位分布等,再结合机器学习算法,像SVM、CNN等,对故障类型进行分类。由于不同检测方法各有优劣,单一方法可能存在局限性,局部放电检测需结合多种方法,综合考量信号特征与设备结构,全面分析检测数据,避免因单一因素导致误判,从而更准确、可靠地评估绝缘状态,及时发现潜在故障,保障电力设备安全稳定运行。

2.4 新型智能诊断方法

基于人工智能的绝缘诊断是重要方式,借助深度学习中LSTM、GAN等模型处理DGA、电气试验、局部放电等数据构建故障预测模型,可自动提取特征分类,提升诊断精度,精准识别绝缘潜在问题。基于物联网(IoT)的在线监测通过传感器网络实时采集温度、湿度等关键数据,结合边缘计算技术能及时实现状态预警,减少人工干预,提高监测效率与及时性。多源数据融合诊断整合电气、化学、物理及运行数据(如负荷、环境温度),运用D-S证据理论等数据融合算法,消除数据不确定性,增强数据互补性,提高诊断可靠性,为绝缘状态判断提供

更全面依据^[3]。绝缘寿命预测与状态评估基于历史数据与Arrhenius模型、Weibull分布等退化模型,预测绝缘剩余寿命,结合风险评估制定科学运维策略,优化设备维护计划。不过,智能诊断发展面临挑战,数据质量参差不齐影响诊断准确性,算法可解释性不足使运维人员难理解和信任结论,工程化应用存在设备兼容性、成本等难题。但总体而言,智能诊断是未来电力变压器绝缘诊断重点发展方向,前景广阔。

3 电力变压器绝缘诊断技术发展

3.1 现有绝缘诊断方法的局限性分析

(1) 传统诊断方法的精度与时效性不足,电气试验必须停电操作,这使得它无法对绝缘状态进行实时监测,难以及时发现运行过程中出现的突发问题;油务分析取样周期较长,在等待取样分析的时间里,早期缺陷可能进一步发展恶化,从而错过最佳处理时机;局部放电检测容易受到外界干扰,导致误报率较高,影响对绝缘真实状况的判断。(2) 智能诊断方法的工程化应用瓶颈,人工智能模型的有效运行依赖大量标注数据,然而实际的故障样本却十分稀缺,这限制了模型的准确性和泛化能力;物联网传感器在长期运行过程中稳定性欠佳,需要频繁维护,导致维护成本居高不下;多源数据融合时缺乏统一标准,不同来源的数据难以有效协同,降低了诊断的可靠性。(3) 多方法融合诊断也存在协同性问题,不同诊断方法所采用的数据格式、采样频率以及评估标准各不相同,这给综合分析带来了困难,难以形成全面准确的综合诊断结论;而且部分方法如耐压试验可能会对绝缘造成损伤,因此需要优化测试顺序,在保证诊断效果的同时,最大程度减少对绝缘的损害。

3.2 绝缘诊断技术的发展趋势

在精准化与高效化方面,将着力开发高灵敏度传感器,像纳米传感器、光纤传感器等,这类传感器能极大提升信号采集精度,更精准捕捉绝缘状态的细微变化。同时,会优化算法,如采用压缩感知、稀疏表示等算法,在减少数据量的同时确保信息完整性,提高数据处理效率,使诊断结果更准确及时。智能诊断与大数据、人工智能的深度融合是重要方向。构建变压器绝缘知识图谱,借助其强大的知识关联和推理能力,实现故障的智能推理,快速定位故障原因。利用联邦学习技术,在保护数据隐私的前提下,整合多方数据资源,提升模型泛化能力,使其适用于不同场景和设备^[4]。开发自解释AI模型,让诊断过程和结果更具可解释性,增强运维人员对诊断结论的信任度。在线监测与远程诊断技术将走向普及化。大力推广无线传感器网络,降低安装成本和复杂度,便于

在更多设备和场景中部署。开发云平台实现数据共享与远程分析,打破数据孤岛,支持区域电网协同运维,提高整体运维效率。结合5G技术实现低延迟数据传输,确保数据实时、快速传输,提升对绝缘故障的响应速度,及时采取措施保障电网安全稳定运行。

3.3 工程应用中的优化方向

(1) 诊断流程标准化与规范化建设,需制定国际通用的诊断流程与评估标准,清晰界定不同诊断方法的适用场景以及所需数据要求,让诊断工作有章可循。同时开发标准化诊断软件,利用软件的固定程序和算法,减少人为操作带来的误差,提高诊断结果的一致性和可靠性。诊断设备的小型化与便捷化研发是重要趋势。(2) 设计便携式检测仪器,像手持式DGA分析仪、微型局部放电传感器等,这些设备便于携带到现场,能快速开展检测工作,及时获取绝缘状态信息。开发集成化在线监测装置,将多种监测功能集成于一体,减小设备体积,降低安装难度,提高在线监测的可行性和便利性。(3) 运维人员诊断技术水平提升也不容忽视。加强针对性培训,使运维人员深入理解新型诊断技术的原理和应用方法,提高实际操作能力。建立诊断案例库,收集各类诊断实例,分享成功经验与失败教训,为运维人员提供参考。推广数字化运维工具,借助大数据、人工智能等技术,对绝缘状态数据进行深度分析,为运维人员提供决策辅助,使其能更科学、准确地制定运维策略,保障电力设备的安全稳定运行。

3.4 未来研究重点与展望

针对新型绝缘材料对应的诊断方法研究将成为关键。随着环保理念推进,天然酯绝缘油、纳米改性绝缘纸等环保型绝缘材料逐步应用,这些材料特性与传统材料不同,需开发专门检测技术,精准评估其老化特性与故障模式,以保障设备安全稳定运行,为新型材料的大规模应用提供技术支撑。极端工况下绝缘诊断技术突破也迫在眉睫。电力设备常面临高温、高湿、高海拔、强电磁

干扰等极端环境,现有诊断方法在这些条件下可能失效,所以要研究适应极端环境的诊断方法,提升设备在复杂环境下的适应性^[5]。同时开发抗辐射、耐腐蚀传感器,满足核电站、海上风电等特殊场景需求,确保在这些恶劣环境中也能准确获取绝缘状态信息。绝缘诊断与智能运维一体化体系构建是长远发展方向。融合诊断、预测、决策功能,建立全生命周期管理平台,实现对绝缘状态的全面、动态管理。结合数字孪生技术,构建设备虚拟映射模型,进行状态仿真,提前发现潜在问题。推动诊断技术从“被动检测”向“主动预防”转变,通过精准预测和提前干预,降低设备故障率,提高电网运行的可靠性和稳定性,为智能电网建设提供坚实保障。

结束语

综上所述,电力变压器绝缘诊断对电力系统稳定运行至关重要。现有诊断方法各有优势与局限,智能诊断虽前景广阔但面临挑战。未来需紧跟精准高效、智能融合等发展趋势,在工程应用中优化流程、研发设备、提升人员水平。同时,聚焦新型绝缘材料诊断、极端工况技术突破以及智能运维一体化体系构建等重点,不断推动绝缘诊断技术进步,为电力设备安全运行和智能电网建设提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 咸日常,李云溟,刘焕国,等.电力变压器内部故障的递进分层诊断方法[J].电网技术,2025,49(4):1726-1734+I0079, I0080.
- [2] 张若泉,冉慧娟,谢军,汤铠铭.基于动态多模态融合的电力变压器故障诊断方法[J].绝缘材料,2025,58(5):107-115.
- [3] 史国君,赵培一,王汶超.电力变压器故障诊断方法的研究与应用[J].消费电子,2025(2):68-70.
- [4] 陈晓枫.基于深度学习的电力变压器故障诊断方法研究[J].现代工业工程,2025(8):119-122.
- [5] 于丹.电力变压器局部放电检测与诊断方法的研究进展[J].电子产品世界,2025,32(3):72-76.