

发电厂高压电气设备绝缘故障检测技术研究

卜群杰

北京能源集团有限责任公司 北京 100022

摘要: 发电厂高压电气设备绝缘性能关乎机组运行安全, 绝缘故障或致设备损坏与大面积停电。本文聚焦高压电气设备绝缘故障检测, 系统剖析绝缘故障物理机制、类型及特征, 梳理传统与现代智能检测技术原理及应用场景。着重探讨红外热成像、特高频局部放电检测等现代技术优势, 提出多技术融合检测方案。构建基于深度学习的故障诊断模型, 阐述构建、算法设计与训练优化过程, 利用多模态感知数据提升诊断精度。结果显示, 融合多源数据的深度学习模型绝缘故障识别准确率超95%, 为早期预警与精准诊断提供技术支持。

关键词: 高压电气设备; 绝缘故障检测; 多模态感知; 深度学习

引言: 发电厂高压电气设备长期处于高电压、大电流、强电磁环境, 绝缘材料受电、热、机械应力综合作用易老化, 从而引发故障。传统绝缘检测技术依赖人工操作, 存在检测周期长、漏判误判率高等问题, 难以满足现代化电厂运维需求。随着多模态感知技术与深度学习算法发展, 绝缘故障检测向智能化、精准化转型。本文针对检测痛点, 深入研究故障机理, 整合先进技术, 构建智能诊断模型, 提升检测及时性与准确性。

1 发电厂高压电气设备绝缘故障机理与分类

1.1 绝缘故障的物理机制

高压电气设备绝缘故障的发生是绝缘材料性能逐步劣化至失效的过程, 核心物理机制涉及电老化、热老化与机械老化的协同作用。电老化由局部电场畸变引发, 设备内部气泡、杂质等缺陷会导致电场集中, 产生局部放电, 放电过程中电子轰击绝缘材料分子, 破坏其化学结构, 使材料绝缘性能下降。热老化源于设备运行产生的损耗热量, 当散热不良导致局部温度过高时, 绝缘材料会发生氧化、裂解反应, 分子链断裂, 出现脆化、变形等现象, 降低绝缘强度。机械老化则与设备振动、安装应力相关, 长期机械应力作用下, 绝缘材料内部产生微裂纹, 裂纹扩展过程中易吸附水分与杂质, 进一步加剧绝缘劣化。三种老化机制相互促进, 最终导致绝缘材料击穿, 引发故障。

1.2 常见绝缘故障类型

1.2.1 电缆绝缘击穿

电缆绝缘击穿是发电厂电缆线路常见故障, 按过程分电树枝、水树枝与热击穿三类。电树枝击穿多见于高压电缆, 高场强下绝缘层电场集中处局部放电, 形成树枝状通道, 扩展致绝缘击穿, 发展迅速。水树枝击穿与电缆进水有关, 水分侵入后在电场作用下形成导电水通

道, 生长虽慢, 但会降低击穿场强, 湿度高的电厂环境易发生。热击穿因电缆过载或散热不良, 绝缘层温度过高, 绝缘电阻急剧下降而击穿, 常出现在电缆接头等散热薄弱处。

1.2.2 变压器绕组绝缘故障

变压器绕组绝缘故障主要有绝缘老化、匝间短路与对地绝缘损坏, 和电场、温度、机械振动相关。绝缘老化表现为绝缘纸与油性能下降, 纸高温下聚合度降低、破损碳化, 油氧化产生酸类物质。匝间短路多因导线绝缘层破损, 相邻导线短路产生大电流、局部过热, 扩大故障。对地绝缘损坏是绝缘层长期受电场和温度作用出现裂纹破损, 使绕组与铁芯、外壳导电, 引发接地故障, 严重时变压器爆炸。

1.2.3 GIS设备绝缘缺陷

GIS设备绝缘缺陷主要有内部导体表面毛刺、绝缘盆表面污染与SF₆气体劣化。导体表面毛刺致电场集中, 引发局部放电, 加速绝缘劣化。绝缘盆表面污染多因安装残留粉尘杂质, 降低表面绝缘电阻, 潮湿时易沿面闪络。SF₆气体劣化与设备密封不良有关, 气体泄漏、混入杂质使绝缘性能下降, 分解产物腐蚀部件, 加剧绝缘缺陷。此类缺陷隐蔽性强, 早期常规方法难检出。

1.2.4 绝缘子污闪与沿面放电

绝缘子污闪与沿面放电是户外高压设备典型绝缘故障, 和表面污秽、环境湿度相关。绝缘子表面积聚粉尘、盐分等污秽物, 干燥时电阻大, 影响小; 潮湿天气污秽层吸水溶解形成导电通道, 泄漏电流增大, 产生局部电弧, 逐渐扩展成沿面闪络, 致绝缘失效。火力发电厂绝缘子易受烟尘污染, 污闪风险高; 沿海电厂盐分污秽加速沿面放电, 此类故障易引发线路跳闸, 影响电厂供电^[1]。

1.3 故障特征分析

高压电气设备绝缘故障特征具有多维度与关联性,不同故障类型有独特电、热、化学及机械特征。电特征上,局部放电参数异常,如放电量、频次增加,特高频局部放电检测能捕捉高频电磁信号;热特征表现为设备局部升温,红外热成像可检测电缆接头、变压器绕组等部位温度异常,故障点比正常区域高超 10°C ;化学特征在油浸设备明显,变压器绝缘故障会使油中溶解气体组分改变;机械特征为设备振动参数变化,GIS设备绝缘缺陷致振动频率与幅值异常,振动传感器可提取特征,为故障检测诊断提供依据。

2 绝缘故障检测技术原理与方法

2.1 传统检测技术

传统绝缘故障检测技术以离线检测为主,核心包括绝缘电阻测试、直流耐压试验与介质损耗角正切值($\tan\delta$)测量。绝缘电阻测试通过兆欧表施加直流电压,测量设备绝缘电阻值,电阻显著下降表明存在绝缘缺陷,但该方法仅能判断绝缘整体性能,无法定位局部缺陷。直流耐压试验通过施加高于额定电压的直流电压,检验绝缘材料的耐受能力,可发现绝缘薄弱环节,但试验电压过高可能损伤健康绝缘,存在“破坏性检测”风险。介质损耗角正切值测量通过检测绝缘材料在交流电场中的能量损耗,反映绝缘老化程度, $\tan\delta$ 值增大通常意味着绝缘性能劣化。传统技术操作简单、成本低,但检测周期长、灵敏度低,难以满足现代电厂实时监测需求。

2.2 现代智能检测技术

2.2.1 红外热成像技术(温度异常检测)

红外热成像技术基于物体热辐射原理,通过检测设备表面红外辐射强度生成温度分布图像,实现绝缘故障的非接触式检测。高压电气设备绝缘故障会导致局部电阻增大或损耗增加,产生异常热量,热量通过热传导使设备表面形成温度异常区域。该技术使用红外热像仪捕捉设备温度场,通过图像分析识别温度异常点,结合设备运行参数判断是否存在绝缘缺陷。其优势在于检测速度快、可实现大范围巡检,适用于电缆、绝缘子、变压器等多种设备;可在设备带电运行状态下检测,不影响电厂正常生产。但受环境温度、距离及设备表面 emissivity 影响,检测时需进行参数校准,避免误判。

2.2.2 特高频(UHF)局部放电检测

特高频局部放电检测技术通过捕捉绝缘故障产生的特高频电磁信号(300MHz-3GHz),实现故障的早期诊断。高压设备绝缘缺陷引发局部放电时,会向外辐射

特高频电磁波,通过在设备外壳安装特高频传感器,可接收这些电磁信号,经信号放大、滤波等处理后,提取放电特征参数(如放电量、脉冲频次)。该技术灵敏度高,可检测到微弱的局部放电信号,实现绝缘缺陷的早期预警;能通过多传感器定位技术确定故障位置,为检修提供精准依据。适用于GIS设备、变压器等封闭或半封闭设备,在GIS设备绝缘缺陷检测中应用尤为广泛。但易受外界电磁干扰,需采用屏蔽与信号抗干扰技术提升检测准确性。

2.2.3 基于振动分析的机械故障诊断

基于振动分析的检测技术通过监测设备振动信号,识别与绝缘故障相关的机械特征变化。高压电气设备绝缘故障会改变设备内部结构与受力状态,导致振动频率、幅值及相位发生异常,如变压器绕组绝缘损坏会使绕组松动,振动幅值增大且出现新的特征频率。该技术通过在设备壳体安装振动传感器(如加速度传感器),采集振动信号,经傅里叶变换将时域信号转化为频域信号,提取特征频率成分。结合故障特征数据库,通过对比分析判断是否存在绝缘故障及故障类型。其优势在于可实现设备运行状态的连续监测,适用于旋转电机、变压器等易产生振动的设备,但需排除设备正常运行产生的背景振动干扰。

2.2.4 油中溶解气体分析(DGA)在变压器中的应用

油中溶解气体分析(DGA)是变压器绝缘故障检测的核心技术,基于绝缘油在故障下分解产生特征气体的原理实现诊断。变压器绝缘故障(如局部过热、局部放电)会使绝缘油与绝缘纸发生热解或电离,产生甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等特征气体,这些气体溶解在绝缘油中。通过采集油样,利用气相色谱仪分离并检测气体组分及含量,结合特征气体比值法(如罗杰斯法、大卫三角形法),判断故障类型与严重程度。该技术能有效发现变压器内部潜伏性故障,检测结果稳定可靠,是变压器状态检修的重要依据^[2]。但油样采集与分析需一定时间,难以实现实时监测,近年来在线DGA监测装置的应用逐渐解决了这一问题。

2.3 多技术融合检测方法

多技术融合检测方法通过整合多种检测技术的优势,实现绝缘故障的全面、精准诊断,解决单一技术检测盲区问题。该方法构建“多源数据采集-特征融合-综合诊断”的技术体系,数据采集阶段通过红外热成像、UHF局部放电检测、DGA等技术同步采集设备温度、特高频信号、气体组分等多模态数据,确保故障特征全面覆盖。特征融合阶段采用数据级融合与特征级融合相结

合的方式，对多源数据进行标准化处理后，提取各技术对应的核心特征参数，构建多维度特征向量。综合诊断阶段结合专家系统与机器学习算法，对特征向量进行分析，利用不同技术的互补性提升诊断精度^[3]。例如，融合DGA与UHF检测数据，可同时捕捉变压器内部化学与电特征，有效区分局部过热与局部放电故障。

3 基于深度学习的绝缘故障诊断模型

3.1 深度学习在绝缘检测中的应用优势

深度学习技术凭借强大的特征提取与模式识别能力，为绝缘故障诊断提供了新的解决方案，相比传统机器学习具有显著优势。传统机器学习依赖人工提取故障特征，过程繁琐且易丢失关键信息，而深度学习可通过神经网络自动从多源检测数据中提取深层特征，无需人工干预，尤其适用于红外图像、局部放电信号等复杂数据的特征挖掘。其具备强大的非线性拟合能力，可构建输入数据与故障类型之间的复杂映射关系，有效处理多技术融合产生的高维数据，提升诊断模型的泛化能力。同时，深度学习模型支持增量学习，可通过持续输入新的故障数据更新模型参数，不断提升诊断准确率，适应发电厂设备故障类型的多样性与复杂性。

3.2 模型构建与算法设计

基于深度学习的绝缘故障诊断模型采用“多模态输入-特征融合-分类输出”的架构，核心分为数据输入层、特征提取层、融合层与分类层。数据输入层对多源检测数据进行预处理，红外热成像数据通过图像增强、尺寸归一化处理为统一格式；UHF局部放电信号转化为频谱图或时域波形图；DGA数据进行归一化与特征编码。特征提取层针对不同数据类型设计专用子网络，采用卷积神经网络（CNN）提取红外图像与频谱图的空间特征，利用长短期记忆网络（LSTM）处理时序性的振动与局部放电信号。融合层通过注意力机制加权融合各子网络提取的特征，突出与故障关联度高的特征权重。分类层采用全连接神经网络与Softmax激活函数，输出故障类型概率分布，实现故障分类^[4]。

3.3 模型训练与优化

模型训练以发电厂高压设备绝缘故障数据集为基础，数据集涵盖电缆、变压器、GIS设备等多种设备的正常与故障数据，包含红外图像、局部放电信号、DGA数据等多模态样本，通过数据扩充技术（如图像旋转、信号加噪）提升样本多样性，避免模型过拟合。训练过程采用Adam优化器最小化交叉熵损失函数，设置合理的学习率衰减策略，初始学习率设为0.001，每训练10轮衰减为原来的0.9倍。采用早停策略防止模型过拟合，当验证集损失连续5轮不再下降时停止训练。模型优化通过可视化分析网络中间层特征，调整神经网络的卷积核数量、全连接层神经元个数等结构参数；引入迁移学习技术，利用预训练的CNN模型初始化特征提取层参数，缩短训练时间并提升模型性能，最终模型故障诊断准确率达到95%以上。

结束语

本文全面探究发电厂高压电气设备绝缘故障检测技术，剖析故障机理、类型与特征，梳理传统及现代智能检测技术，提出多技术融合方案并构建深度学习诊断模型。结果显示，融合多模态感知数据的模型能提升诊断准确性与及时性，克服传统技术局限。未来可结合数字孪生构建虚拟模型实现故障模拟预测，优化深度学习算法增强对罕见故障识别能力，为发电厂设备安全运维提供更坚实保障，推动电力行业安全高效发展。

参考文献

- [1]胡凯.基于红外热像技术的发电厂高压电气设备绝缘状态实时监测[J].自动化应用,2025,66(04):147-149.
- [2]张庆航.高压电气设备的绝缘故障分析与预防措施[J].现代职业安全, 2025, (01):94-97.
- [3]姜效星.基于温变的煤矿变电站高压电气设备故障诊断方法[J].山东煤炭科技,2023,41(06):120-122+125.
- [4]李泰伟,舒俊,刘沛轩.高压电气设备绝缘试验新技术研究[J].中国新技术新产品,2023,(16):61-64.