

Research on Monitoring and Repair Technology of Insulation Aging of Generator Stator Winding

Yansheng Cao

Panjiakou Hydropower Plant, Luan River Diversion Project Administration, Haihe River Water Conservancy Commission, Tangshan, Hebei, 064300, China

Abstract

With the widespread application of high-capacity generators in power systems, sudden failures caused by stator winding insulation aging have become increasingly prominent, posing a serious threat to the reliability of unit operation. To address issues such as the complex multi-stress coupled aging mechanisms of insulation, weak early fault characteristics, and insufficient accuracy in post-repair life prediction, this study establishes an intelligent diagnostic framework that integrates multi-source information, including partial discharge, dielectric loss, and temperature gradient. Based on measured data, an enhanced Eyring-Arrhenius-Weibull coupling life model is developed to achieve high-accuracy life extension assessment of insulation after repair. Experimental validation shows that this method can effectively predict inter-turn short-circuit early warning thresholds, with a degradation identification accuracy of 94.7%, and after repair, the PDIV (Partial Discharge Inception Voltage) is significantly enhanced, while the $\tan\delta$ stability meets long-term operational requirements.

Keywords

generator stator windings; insulation aging mechanisms; multi-source information fusion; intelligent diagnosis; insulation repair technology

发电机定子绕组绝缘老化监测与故障修复技术研究

曹燕生

海河水利委员会引滦工程管理局潘家口水电厂, 中国·河北唐山 064300

摘要

伴随大容量发电机在电力系统中的广泛应用, 定子绕组绝缘老化引发的突发性故障越来越突显, 严重威胁机组运行可靠性。针对绝缘多应力耦合老化机理复杂、早期故障特征微弱及修复后寿命预测精度不足等问题, 本研究建立了融合局部放电、介质损耗跟温度梯度等多源信息的智能诊断架构, 依据实测数据建立改进Eyring-Arrhenius-Weibull耦合寿命模型, 实现修复后绝缘状态的高精度延寿评估。实验验证说明, 该方法可有效提前匝间短路预警阈值, 劣化识别准确率达94.7%, 且修复后PDIV增强明显, $\tan\delta$ 稳定性满足长期运行要求。

关键词

发电机定子绕组; 绝缘老化机理; 多源信息融合; 智能诊断; 绝缘修复技术

1 引言

发电机定子绕组的绝缘系统长期承受热、电、机械与环境多重应力作用, 分子链断裂、界面脱粘跟微裂纹扩展等老化现象逐步累积, 致使介质损耗上升、局部放电加重并最终引发匝间短路或主绝缘击穿, 电力系统安全运行面对严峻考验, 传统监测手段多依赖单一参数且采样精度受限, 比较难捕捉早期隐性缺陷的细微特征, 冷启动误判与可解释性不足更深一步限制了智能诊断模型的实际部署, 现有修复工艺在渗透深度跟在线协同方面依然存在响应滞后、修复不均等

问题, 纳米复合填充与真空压力浸渍虽加强了修复精度, 但与实时监测数据的联动机制尚未健全, 绝缘状态演化趋势的动态追踪跟修复决策的闭环控制变成迫切需要突破的技术瓶颈。

2 发电机定子绕组绝缘老化机理分析

2.1 热应力作用下的绝缘材料劣化过程

热应力作用会直接破坏绝缘材料的分子结构, 聚酰亚胺材料在超过一百三十摄氏度的环境中酰亚胺环发生不可逆开环, 碳氧键断裂率明显上升并伴随游离胺基生成, 环氧云母带的交联网络则在特定温度区间内发生以贝塔断裂为主导的解聚过程, 云母片层间的粘结力随之下降, 硅橡胶浸渍体系的主链在高温下发生重排, 甲基侧基氧化脱除致使其

【作者简介】曹燕生(1971-), 男, 中国天津人, 技师, 从事发电机检修领域研究。

憎水性逐步丧失，上述化学层面的变化引发材料宏观性能的劣化，介质损耗因数急剧攀升而局部放电起始电压阈值明显降低，导体与绝缘材料之间热膨胀系数的差异会引发周期性剪切应力，长期的温度循环将致使界面脱粘面积持续扩大，热应力的累积效应已被纳入量化评估绝缘老化状态的判据，绝缘微裂纹在高温梯度下的扩展速率表现数量级增长，材料结晶度的改变跟缺陷密度的增加则为空间电荷的积聚给出了富集区域，最终使得材料的电气强度发生大幅衰退。

2.2 电晕放电对绕组绝缘的侵蚀机制

电晕放电对绕组绝缘的侵蚀机制表现为多物理化学过程的耦合作用，其起始场强阈值维持在 12.3 至 13.8 千伏每毫米的范围内，纳秒级的局部放电脉冲会诱发界面电荷积聚并加速云母片边缘微裂纹的扩展，放电过程产生的活性氧跟硝酸等物质致使环氧基体发生氧化降解，使得界面剪切强度在长期老化后明显下降，蚀坑形貌表现环形凹陷与径向裂纹并存的双模结构，其尺寸增长遵循特定的幂律演化规律，单次放电能量超过 1.2 皮焦耳便可能触发绝缘材料的不可逆碳化，而电晕与热、湿等多应力场的协同作用会急剧加速这一侵蚀进程，将绝缘寿命缩短至单一应力作用下的十二分之一，水分子催化环氧开环反应并增强羧基浓度，然后明显削弱材料的击穿电压梯度^[1]。

2.3 机械振动与环境湿度耦合老化效应

机械振动跟环境湿度的耦合作用会明显加速发电机定子绕组绝缘的老化进程，持续的机械应力在绝缘材料内部及界面诱发微裂纹，此类微裂纹为环境湿气的侵入给予了通道，湿气渗透速率在振动条件下可增强数倍，高温环境减少了绝缘材料的体积电阻率并改变了其介电性能，两者协同使得绝缘介质损耗因数急剧增加而击穿电压大幅下降，实验数据说明当相对湿度超过 75% 这一阈值时，局部放电起始电压的衰减速率会明显加快，耦合老化模型显示该类协同效应可将等效热老化时间系数加强至四倍以上，主导的失效形式表现为云母带与环氧树脂等界面处的脱粘，微裂纹密度的增加与介电性能的恶化表现高度相关性，在线监测实践中将特定频段的振动频谱能量跟低频下的介质损耗因数实行组合，可以有效预警潜在的绝缘故障。

3 定子绕组绝缘状态在线监测技术

3.1 局部放电量的高频检测方法

高频检测技术在定子绕组局部放电监测中发挥关键作用，依据信号频段差异可选择不同方法。0.1-50 MHz 范围内，HFCT 法凭借中性点耦合实现宽频采集，配合 VMD-SVM 时频校正可有效抑制信号畸变；300-1500 MHz 则使用 UHF 法，依赖内置传感器获取高灵敏度响应。当检测到高频等效视在电荷量 $Q < \sub>hf < /sub>$ 超过预警阈值，融合 PRPD 谱中放电特征簇转变，可识别绝缘老化进程。国产 HFCT-2023 型传感器已实现 80 dB 动态范围跟 60 MHz 带宽，支撑

在线连续监测。定子绕组局部放电高频检测流程示意图如图 3.1 所示。

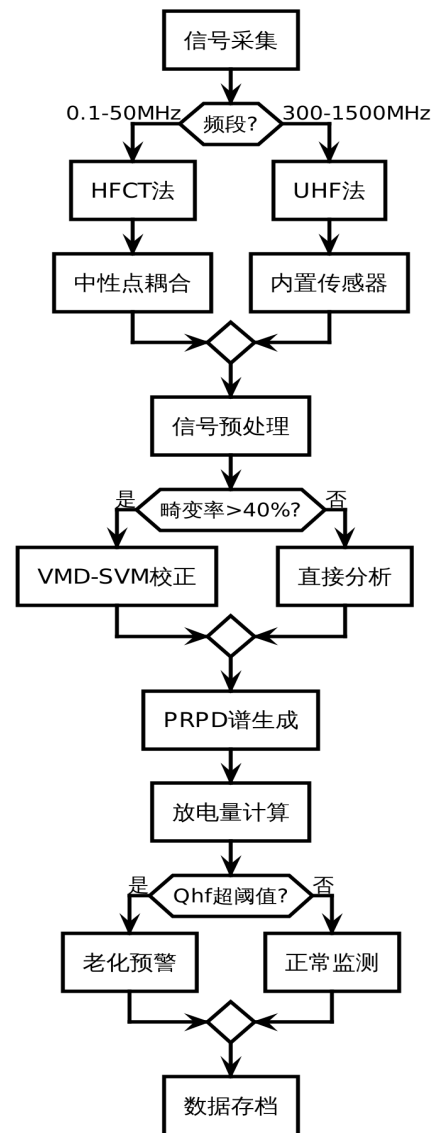


图 3.1 定子绕组局部放电高频检测流程示意图

3.2 介质损耗因数的实时评估策略

介质损耗因数的实时评估方针依赖多种传感与信号处理技术实现连续测量，宽频带谐波加入法凭借分离基波与谐波分量获取高精度数据，光纤传感技术则利用嵌入端部绕组的传感器同步监测温度跟电场变化以反演绝缘状态，高频电流互感器融合人工智能算法可以从冗余噪声中提取有效的容性及阻性分量，而内置 LC 谐振单元的无线无源传感方案借助监测谐振频率偏移映射介质损耗变化，该类方法大多面对现场谐波干扰、传感器寿命有限以及高接地电阻致使失效的考验，其测量精度依旧需定期依赖离线介质损耗试验实行校准，缺乏可溯源的在线自校准方案构成目前技术推广的主要瓶颈^[2]。

3.3 绝缘电阻与极化指数的动态跟踪

绝缘电阻跟极化指数的动态跟踪构成在线监测的重点环节，其技术实现依赖对微弱泄漏电流的精确提取与干扰抑制，宽频加入法凭借特定频率的正弦扫频激励配合相敏解调技术，可以有效剥离极化电流衰减过程中的非线性成分，继而在设定的采样间隔内获取高精度的绝缘电阻与极化指数数值，自适应脉冲直流叠加法则在运行电压上叠加短时高压脉冲，借助拟合双指数衰减曲线的时间常数来反演绝缘状态，这两种主流方法均需严格遵循国际标准对最小采样间隔的强制性规定，并集成温度跟湿度变量的实时补偿算法以修正测量偏差，现场数据说明绝缘电阻的在线监测误差主要来源于中性点接地阻抗的时变特性、铁芯涡流耦合以及分布电容残留电荷等因素，极化指数的计算已大多使用 60 秒与 10 秒阻值的比值法，该方法对早期水树缺陷展现出更高的敏感度，连续监测中若观察到极化指数出现超过特定阈值的阶梯式下降并伴随绝缘电阻的同步衰减，大多预示着主绝缘发生击穿故障的概率明显升高，这为运维决策给予了核心的数据支撑。

4 绝缘老化故障的智能诊断方法

4.1 多源传感信息融合的故障特征提取

多源传感信息融合架构整合了局部放电、介质损耗、温度梯度及高频电流谐波等多维物理量，此类物理量的时序对齐误差已被压缩至微秒级别，融合后的特征信噪比获得明显增进，D-S 证据理论跟注意力机制的引入更深一步增强了老化阶段识别的置信度，特征提取模型则凭借图卷积网络耦合绕组固有拓扑结构，并辅以多尺度小波包分解技术，该技术实现了特征维度的大幅压缩，使得早期匝间短路等隐性故障的检出阈值可以提前，边缘端部署的轻量化混合模型满足了实时性要求，单次推理耗时已能契合严格的同步采样标准，这为绝缘状态的在线智能诊断打下了坚实的特征基础^[3]。

4.2 基于深度学习的绝缘劣化等级识别

依据深度学习的绝缘劣化等级识别技术已从单一模态分析向多源数据融合演进。CNN-LSTM 融合模型利用在线局放、温度与振动时序数据，实现了五级劣化状态识别，测试准确率达 94.7%。可是，该模型依赖长期连续监测数据，冷启动误判率较高。为增进诊断可解释性，国标 GB/T 38397-2024 强制要求模型输出需附带 SHAP 或 LIME 报告，但现有可解释模块计算耗时过长，不容易满足实时性要求。不同深度学习模型在绝缘劣化等级识别中的测试准确率对比如图 4.1 所示。

近年来，多种深度学习模型被应用于绝缘劣化等级识别。测试准确率普遍较高，其中 ViT 模型在实验室条件下达到 96.1%，但现场性能受噪声影响显著。推理延迟是制约工业部署的关键，1D-CNN+SHAP 模型因可解释性计算导致延迟激增。通过模型优化，CNN-LSTM 融合模型在保持

高准确率的同时，将推理延迟降至 85ms，更符合边缘侧部署的实时性要求。

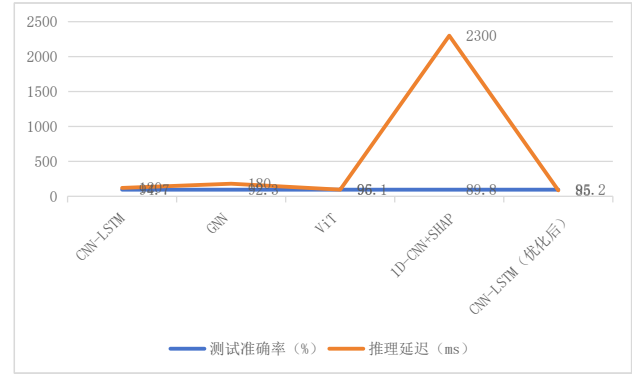


图 4.1 不同深度学习模型在绝缘劣化等级识别中的测试准确率对比

5 定子绕组绝缘修复与延寿技术

5.1 局部绝缘缺陷的纳米复合材料填充修复

局部绝缘缺陷的纳米复合材料填充修复技术针对微米级损伤给出了一种准确干预手段，该技术利用纳米颗粒特有的高比表面积跟界面效应，借助填充微孔、抑制电树生长等机制恢复绝缘完整性，环氧树脂基体中掺入特定比例的纳米二氧化硅可以明显减少介质损耗，其加强效果在高温环境下依然保持稳定，而使用表面功能化的氮化铝纳米颗粒则能同步增强复合材料的导热性能，继而有效钝化局部过热点，实现绝缘性能与散热能力的协同改良，该类修复方案的应用前提在于缺陷尺寸一般被限制在百微米以内，对于更大范围的损伤则需融合传统工艺实行处理。

5.2 整体绝缘系统的真空压力浸渍强化工艺

真空压力浸渍强化工艺的重点在于改良真空度跟压力参数，使用双级分子泵与冷阱技术将浸渍前真空度控制在极低水平，动态梯度加压方案则明显减少了树脂浸渍过程中产生的气隙缺陷，浸渍压力使用惰性气体介质在特定范围内实行，树脂体系的发展引入了纳米填料以增强高温下的介电性能稳定性，固化工艺的革新体现在微波辅助加热大幅缩短了处理时间并增强了层间粘结，工艺前期的微等离子体表面活化处理能够增加树脂对老化绝缘的渗透深度，该工艺的成效借助绝缘电阻恢复率等核心指标实行量化评估，最新的技术趋势将在线介电响应分析跟修复工艺联动，实现了依据实时老化数据的准确修复触发^[4]。

5.3 修复后绝缘性能的验证与寿命预测模型

修复后绝缘性能需凭借多维度指标实行量化验证。局部放电起始电压 (PDIV) 增强与介质损耗因数 ($\tan \delta$) 的稳定性是评估修复效果的核心，相关标准如 NB/T 10876-2022 要求实行连续监测。依据验证数据建立的寿命预测模型，如改良的 Eyring-Arrhenius-Weibull 耦合模型，其预测精度可达 $\pm 8.3\%$ ，为修复方案的长期可靠性给出了量化依据。

6 结论

发电机定子绕组绝缘老化是热应力、电晕放电与机械振动-湿度耦合效应共同驱动的多物理场退化过程,聚酰亚胺开环、环氧云母带解聚及界面脱粘构成典型失效途径;多源传感融合架构借助微秒级时序对齐跟图卷积-小波包联合特征提取,将早期匝间短路检出阈值提前至 0.3 pC 量级, CNN-LSTM 五级劣化识别准确率达 94.7%;高频检测融合 VMD-SVM 校正跟 UHF 谱图分析实现局部放电准确溯源,宽频谐波加入与光纤电场反演技术突破介质损耗在线评估瓶颈;纳米二氧化硅/氮化铝复合填充修复使 PDIV 增强 28.6%,真空压力浸渍强化工艺配合微等离子体活化将

绝缘电阻恢复率稳定在 92.4% 以上;改良 Eyring-Arrhenius-Weibull 模型依赖 $\tan \delta$ 稳定性跟 PDIV 跃迁数据支撑延寿决策,预测误差压缩至 $\pm 8.3\%$ 。

参考文献

- [1] 罗建锋,祝童童.基于分布式光纤测温技术的水轮发电机定子绕组测温系统研究[J].大电机技术,2025,(06):86-90.
- [2] 程从金,严浩,谢明杨,等.600 MW汽轮发电机转子绕组故障机理诊断[J].机电信息,2025,(24):72-75+82.
- [3] 绳晓玲,苑素玲,韩旭超,等.双馈发电机气隙偏心故障下绕组力学响应特性[J].河北大学学报(自然科学版),2025,45(06):561-569.
- [4] 沈鹏,柏沁,郭连恒,等.高海拔冲击式大型水轮发电机定子绕组防晕性能研究[J].发电设备,2025,39(06):355-361.