

发电机绝缘性能综合评估与智能故障诊断技术研究

胡金平

大唐观音岩水电开发有限公司 四川攀枝花 617000

摘要: 本文系统分析发电机绝缘系统的构成与特性, 深入研究绝缘电阻、介质损耗角正切值及泄漏电流等评估方法。在此基础上, 构建了基于多参数融合的故障诊断模型, 探讨了在线监测与人工智能技术的应用路径。通过典型案例分析, 验证了相关方法的有效性, 并提出了以状态评估为基础的预防性维护策略, 为提升发电机运行可靠性提供支持。

关键词: 发电机; 绝缘性能; 故障诊断; 在线监测; 人工智能

发电机作为保障电力系统安全稳定运行的核心设备, 其绝缘系统的性能直接关系到整个电网的可靠性。该系统不仅承担电气隔离与机械支撑的双重职责, 更在面对当前发电设备容量持续增长、运行环境日益复杂的挑战时, 成为维系安全的关键环节。据统计, 绝缘故障约占发电机故障总数的30%, 是引发非计划停机的主要因素之一。因此, 建立一套系统、精准的绝缘性能评估与故障诊断体系, 对预防事故发生、延长设备寿命、提升电力系统整体运行可靠性具有至关重要的意义。

一、发电机绝缘系统构成与特性分析

(一) 发电机绝缘系统结构组成

发电机绝缘系统由定子绝缘系统和转子绝缘系统组成。定子绝缘包括主绝缘、防晕层、股间绝缘和相间绝缘。主绝缘采用云母带和环氧树脂, 提供线圈与铁心的电气隔离; 防晕层均匀电场, 防止局部放电; 股间绝缘隔离同一线圈内不同导体股, 常用聚酯薄膜或云母薄片; 相间绝缘则用于相绕组间的电气隔离。转子绝缘系统简化, 主要包括转子绕组的匝间绝缘、对地绝缘和端部绝缘, 尽管绝缘厚度较薄, 但必须承受较大离心力和温度变化。绝缘系统设计需综合考虑电气性能、机械强度、热稳定性和化学稳定性, 确保可靠性和经济性。

(二) 绝缘系统电气与物理特性

绝缘系统的电气特性包括绝缘电阻、介电常数、介质损耗角正切值和击穿强度, 这些参数决定了绝缘性能。绝缘电阻随温度和湿度变化显著, 介电常数和损耗角反映绝缘材料的极化特性和能量损耗。绝缘老化分为热老化、电老化、机械老化和环境老化, 热老化最为常见, 温度每升高8-10℃, 绝缘寿命减半; 电老化由局部放电

引起, 机械老化由振动和热胀冷缩引起^[1]。环境因素如温度、湿度和化学污染物显著影响绝缘性能, 因此识别薄弱环节如端部电场集中区域和温度梯度较大区域, 对于预防绝缘故障至关重要。

二、发电机绝缘性能评估方法

(一) 绝缘电阻测试技术

绝缘电阻测试是评估发电机绝缘性能最基本和最重要的方法之一, 通过测量绝缘材料在直流电压作用下的电阻值来判断绝缘状态。测试通常采用兆欧表进行, 根据被测设备的电压等级选择合适的测试电压, 一般为额定电压的1-2倍, 对于大型发电机通常选用2500V或5000V兆欧表。测试时应注意环境温度和湿度的影响, 标准规定测试应在环境温度10-40℃、相对湿度不超过80%的条件下进行, 测试前需要充分放电并清洁绝缘表面。绝缘电阻值的评估通常采用最小允许值准则, 即 $R \geq U_n/1000+1 (M\Omega)$, 其中 U_n 为额定电压(kV), 同时还要结合历史数据进行趋势分析。影响测试结果的因素主要包括温度、湿度、绝缘表面污染、测试电压大小和加压时间等, 其中温度的影响最为显著, 绝缘电阻与温度呈指数关系, 通常需要将测试结果换算到标准温度下进行比较。此外, 还需要进行吸收比和极化指数测试, 吸收比为60秒与15秒时绝缘电阻的比值, 极化指数为10分钟与1分钟时绝缘电阻的比值, 这两个参数能够更好地反映绝缘材料的状态, 对于云母绝缘, 吸收比应大于1.3, 极化指数应大于2.0。

(二) 介质损耗角正切值测试

介质损耗角正切值($\tan \delta$)测试是评估发电机绝缘性能的重要手段, 能够敏感地反映绝缘材料的劣化程度

和缺陷情况。 $\tan \delta$ 值表示绝缘材料在交流电场作用下有功损耗与无功损耗的比值,其物理意义是绝缘材料将电能转换为热能的能力,正常绝缘材料的 $\tan \delta$ 值很小,当绝缘出现劣化或缺陷时,该值会显著增加。测试通常采用西林电桥或数字化介损测试仪进行,测试频率一般为50Hz或60Hz工频,测试电压通常为额定电压的一定比例。对于发电机定子绕组,不同绝缘等级和绝缘材料的 $\tan \delta$ 标准值不同,B级环氧云母绝缘的 $\tan \delta$ 值通常应小于0.5%,F级绝缘应小于0.8%。测试时需要进行温度修正,因为 $\tan \delta$ 值随温度变化较为明显,一般以20℃为基准温度进行换算。数据处理时还需要考虑电容量的变化,绝缘劣化通常伴随着电容量的增加。异常判断主要基于以下准则:绝对值判断,即 $\tan \delta$ 值超过标准限值;相对值判断,即与历史数据相比增长超过50%;三相不平衡判断,即三相间 $\tan \delta$ 值差异超过0.3%^[2]。

(三) 泄漏电流测试分析

泄漏电流测试是通过测量绝缘材料在直流电压作用下的电流变化来评估绝缘状态的一种重要方法,能够有效发现绝缘系统中的局部缺陷和劣化区域。直流泄漏电流测试通常采用逐级升压的方式进行,从较低电压开始,逐步升高至规定的试验电压,每个电压等级保持一定时间后读取稳定的泄漏电流值。测试电压一般选择为额定电压的1.5~2倍,升压步长为测试电压的10~20%,每级电压下稳压时间不少于1分钟。正常情况下,泄漏电流应随电压基本呈线性增长,且数值很小,通常在微安级别。当绝缘存在劣化或缺陷时,泄漏电流会出现非线性增长,特别是在某些电压点可能出现突跳现象。泄漏电流特性曲线分析是评估绝缘状态的重要手段,通过绘制电流-电压特性曲线和电流-时间特性曲线,可以判断绝缘的劣化程度和缺陷性质。绝缘劣化程度评估主要基于以下指标:泄漏电流绝对值大小、电流随电压的变化规律、电流随时间的稳定性以及与历史数据的对比分析。测试数据的趋势分析对于预测绝缘寿命具有重要价值,通过建立泄漏电流增长模型,可以预测绝缘系统的剩余寿命,为制定维护策略提供依据。

三、发电机绝缘故障诊断技术

(一) 综合诊断技术方法

综合诊断技术融合多种检测方法的信息,通过建立多参数综合评估模型提高诊断准确性。主要参数包括绝缘电阻、介质损耗角正切值、局部放电量、泄漏电流等,以及温度、湿度、运行时间等辅助参数。特征参数提取

是关键环节,常用参数有统计特征、频域特征和时频域特征。模式识别算法如支持向量机、决策树、随机森林、贝叶斯网络等在综合诊断中发挥重要作用,通过学习历史故障样本建立分类和评估模型。诊断结果可信度分析通过交叉验证、置信区间计算和敏感性分析等方法评估诊断可靠性,为决策者提供风险评估信息。

(二) 在线监测技术应用

在线监测技术实现对发电机绝缘状态的连续监测,提供实时信息。在线局部放电监测系统通过高频电流传感器或超声波传感器监测局部放电活动,具备数据采集、信号处理、模式识别和趋势分析功能。绝缘电阻在线监测在发电机停机期间自动测试绝缘电阻,监测其变化趋势。温度在线监测技术通过温度传感器监测绝缘系统的温度分布和变化,预防绝缘故障。振动信号绝缘故障诊断通过分析振动信号的频谱特征变化诊断绝缘故障,适用于匝间短路等难以直接检测的故障类型^[3]。

(三) 人工智能诊断技术

人工智能技术在发电机绝缘故障诊断中的应用日益广泛。神经网络故障诊断模型通过模拟人脑神经元的工作原理,建立多层网络结构,自动提取故障特征并建立诊断规则。专家系统诊断技术将专家知识编码成规则库,结合推理机制实现自动诊断,提供诊断依据和解释。数据挖掘技术通过关联规则挖掘、聚类分析、异常检测等方法,从大规模历史数据中发现故障模式和规律,提高故障预测和状态评估能力。机器学习算法优化通过特征选择、超参数调优、集成学习、迁移学习等方法提高诊断模型的泛化能力和鲁棒性,解决样本不平衡和标签缺失等问题,常用优化方法有遗传算法、粒子群算法、贝叶斯优化等。

四、绝缘性能评估与故障诊断实践应用

(一) 诊断流程与标准规范

发电机绝缘性能评估与故障诊断的标准化流程包括诊断准备、现场检测、数据分析、状态评估、诊断报告等环节。诊断准备阶段需收集设备信息、历史数据、运行记录,并制定检测方案及准备设备和防护用品。现场检测阶段按照方案进行绝缘测试,确保记录详细数据和现场情况。数据分析阶段运用各种方法处理测试数据,提取特征参数并进行趋势和异常分析。主要执行标准包括国内的GB/T1094系列、DL/T596等,国际的有IEC60034、IEEE43等。这些标准在测试电压、环境条件、判断限值等方面有差异,需根据具体情况选择合适标准。

检测周期与频次需考虑设备重要性、运行环境和历史故障情况。诊断报告应包含设备基本信息、检测项目与方法、测试数据与分析、状态评估结论和维护建议等，格式应标准化，便于数据库管理和历史对比分析^[4]。

(二) 典型故障案例分析

典型故障案例分析有助于理解故障机理、发展过程和诊断方法的有效性。某400MW水轮发电机定子绝缘故障案例显示，介质损耗因数 $\tan \delta$ 的变化趋势与局部放电活动呈现相关性，但在故障初期表现不够敏感。直到故障前6个月， $\tan \delta$ 值才开始出现明显上升，较局部放电活动的增长滞后约6个月。绝缘电阻值则在故障前2个月开始显著下降，机组最终在满负荷运行期间发生定子绝缘击穿事故。解体检查发现，故障点位于定子槽部区域，该处线棒主绝缘出现严重分层、碳化现象，并伴有明显的电腐蚀痕迹。进一步分析表明，绝缘劣化的主要原因是长期运行中的热循环效应和电磁振动共同作用，导致绝缘材料内部产生微裂纹，并在潮湿运行环境下逐步发展成贯穿性缺陷。

某核电站发电机局部放电案例历时3年，记录了放电量变化、放电模式演变和诊断参数响应特征，发现局部放电有稳定期、缓慢增长期和急剧恶化期，为维护策略提供了参考，及时预防性处理可延长绝缘寿命，处理时机选择至关重要。

(三) 预防性维护策略

基于状态的维护策略是发电机绝缘维护的发展方向，通过连续监测和定期检测获取绝缘状态信息，根据状态评估结果制定个性化维护计划，实现从周期性维护向状态维护的转变。状态维护策略的核心是建立科学的状态评估体系，将绝缘状态划分为正常、注意、异常、严重等等级，各等级对应不同的维护措施和检测周期。正常状态下按标准周期检测，注意状态下增加检测频次，异常状态下需制定专项监测方案并准备应急预案，严重状态下应立即停机处理。

通过建立绝缘劣化数学模型，结合历史数据和实时监测信息，预测绝缘参数变化趋势和剩余寿命。常用预测方法包括回归分析、时间序列分析、神经网络预测、灰色系统理论等。维护决策支持系统集成状态监测、数据分析、预测建模、决策优化等功能，为维护人员提供全面决策支持信息，包括设备状态评估、风险分析、维

护建议、成本效益分析等。系统采用B/S架构，支持多用户访问和移动端应用^[5]。经济性分析与优化是维护策略制定的重要考虑因素，通过综合评估维护成本、故障风险和停机损失，建立成本效益模型，寻求最优维护策略，合理的状态维护策略可显著降低总维护成本，提高设备可靠性和经济效益。

结论

本研究系统探讨了发电机绝缘性能评估与故障诊断技术，建立了完整的绝缘状态评估体系。针对传统单一参数评估方法的局限性，提出了融合绝缘电阻、介质损耗角正切值、泄漏电流及局部放电检测的多参数综合评估模型，显著提升了状态判定的全面性与准确性。在故障诊断方面，通过引入人工智能算法与在线监测技术，构建了智能化诊断系统，实现了故障的早期预警与精准定位。典型故障案例分析表明，该技术体系能够有效识别绝缘劣化特征，为预防性维护提供可靠依据。基于设备状态的维护策略可根据绝缘劣化不同阶段实施针对性干预，在保障安全运行的同时延长设备使用寿命，提升经济效益。随着新材料技术、物联网架构和人工智能算法的持续发展，发电机绝缘评估与故障诊断正朝着智能化、精准化、标准化方向演进。未来应进一步深化状态监测与智能诊断的融合应用，推动维护模式从事后检修向预测性维护转变，为构建安全高效的现代电力系统提供坚实的技术支撑和理论依据。

参考文献

- [1] 李春义. 浅谈风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(8): 2.
- [2] 杨增杰, 曾令龙, 谭尚仁, 等. 基于深度学习的水轮发电机定子绕组绝缘故障诊断[J]. 贵州电力技术, 2022(001): 025.
- [3] 李欣海. 探讨水轮发电机状态监测与故障诊断技术[J]. 电脑乐园, 2020(12): 1.
- [4] 高鹏. 风力发电机状态监测与故障诊断技术分析[J]. 现代盐化工, 2020, 47(5): 2.
- [5] 汪玉玲. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(11): 317-318.