

Research on Insulation Condition Monitoring and Life Assessment Methods for High-Voltage Electrical Equipment

Feifei Ma

Guoneng Jilin Electric Power Engineering Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130031, China

Abstract

As critical components of power systems, high-voltage electrical equipment directly impacts grid safety and power supply stability through operational reliability. The insulation system, serving as the core component of these devices, often experiences performance degradation that becomes the primary cause of failures. This study systematically reviews the principles and application scenarios of mainstream insulation condition monitoring technologies, analyzes key factors influencing insulation aging, and explores the implementation pathways of multi-parameter fusion and data-driven approaches in life assessment. By integrating operational characteristics of typical equipment, we propose a comprehensive evaluation framework tailored for engineering practice. Research findings demonstrate that assessment models incorporating multi-source information significantly enhance diagnostic accuracy and predictive reliability, providing robust support for equipment maintenance decisions.

Keywords

High-voltage electrical equipment; Insulation testing; Partial discharge; Condition assessment; Life prediction; Data fusion

高压电气设备绝缘状态检测与寿命评估方法研究

马菲菲

国能吉林电力工程技术有限公司, 中国·吉林 长春 130031

摘要

高压电气设备作为电力系统的重要组成部分,其运行可靠性直接关系到电网安全与供电稳定。绝缘系统作为设备的核心环节,其性能衰退往往是引发故障的主要原因。围绕绝缘状态检测与寿命评估问题,本文系统梳理了当前常用检测技术的原理与适用场景,分析了影响绝缘老化的关键因素,并在此基础上探讨了多参数融合与数据驱动方法在寿命评估中的应用路径。结合典型设备运行特征,提出了适用于工程实践的综合评估思路。研究结果表明,融合多源信息的评估模型能够显著提升诊断精度与预测可靠性,为设备运维决策提供支撑。

关键词

高压电气设备; 绝缘检测; 局部放电; 状态评估; 寿命预测; 数据融合

1 引言

随着电力系统规模不断扩大以及运行电压等级持续提升,高压电气设备面临的运行环境日趋复杂。设备长期处于电、热、机械及环境多重应力耦合作用下,绝缘性能不可避免地发生劣化。传统依赖定期检修的运维模式已难以满足当前对可靠性与经济性的双重要求,状态检修逐渐成为主流。如何准确获取绝缘状态信息并对其剩余寿命进行合理评估,成为电力设备管理中的关键问题。当前,绝缘状态检测技术不断发展,从单一电气量测量逐步拓展到多物理场信息融合。然而,不同方法在灵敏度、适用性及现场实施条件方面存在差异,导致检测结果存在不确定性。同时,绝缘老化机理复杂,寿命评估模型往往难以全面反映实际运行情况。因

此,有必要在系统梳理检测技术的基础上,构建更具针对性的评估方法体系,以提升诊断与预测水平。

2 高压电气设备绝缘系统及其劣化机理

2.1 绝缘系统构成及功能特性

高压电气设备的绝缘系统由固体、液体和气体三种介质共同构成,各自承担不同的功能。固体绝缘材料,如环氧树脂和电缆绝缘层,主要提供电气隔离,确保电流不发生泄漏。液体绝缘材料,如变压器油,除了起到绝缘作用外,还负责散热,维持设备的温度稳定。气体绝缘系统,尤其在气体绝缘开关设备(GIS)中,提供高效的电气隔离,且气体压力较高时有助于减少电气弧光。不同介质之间的界面结构复杂,尤其是固体与液体或气体的交界处,电场分布发生变化,局部电场的增大或不均匀性可能导致电气故障,因此,界面材料的选择与结构设计尤为关键。

【作者简介】马菲菲(1985-),女,中国吉林通榆人,本科,助理工程师,从事工程管理研究。

2.2 绝缘老化的主要影响因素

绝缘老化是一个多因素耦合作用的过程，电应力、热应力、环境因素等共同作用，逐渐导致绝缘材料的性能下降。电应力引起的局部放电会不断侵蚀绝缘材料的微观结构，随着时间的推移，这种侵蚀会加速绝缘劣化。热应力通过改变材料的分子链结构，降低其机械强度，进而影响设备的长期运行稳定性。环境因素如湿度、污染物等也会加速绝缘表面的老化，特别是在高湿或有腐蚀性气体的环境中。机械振动与操作冲击等因素可能在材料中产生微裂纹，这些裂纹逐步发展可能导致电气击穿，增加设备故障的风险。

2.3 典型劣化模式分析

随着设备运行时间的增加，绝缘系统表现出不同的劣化模式，这些模式各自具有独特的特征信号。例如，树枝状放电通常伴随局部放电幅值的增大，热氧化老化则表现为材料颜色变化及介质损耗的增加，电化学腐蚀则可能在金属接触点形成腐蚀性沉积。这些劣化模式的出现和发展可以通过监测绝缘性能变化来识别。及时识别不同的劣化模式，有助于提高故障诊断的准确性，并为设备维护与更换提供数据支持。通过对这些模式的研究和监控，可以有效预测设备的剩余寿命，防止由于绝缘老化引发的电气事故。

3 绝缘状态检测技术及应用分析

3.1 电气检测方法

电气检测是评估绝缘状态的基本手段，主要通过直接测量电气参数来获得设备运行状态的信息。介质损耗因数测试是一种常见的电气检测方法，通过测量介质损耗因数，可以反映设备绝缘材料的整体状况。这一方法适用于变压器、电缆等电气设备，能够有效检测其绝缘性能是否出现下降。局部放电检测是另一种重要的电气检测手段，其灵敏度较高，能够在设备早期出现缺陷时即进行预警。局部放电往往是绝缘缺陷的早期征兆，及时发现能够有效避免更大范围的故障发生。通过分析局部放电的相位分布特征，可以进一步判断缺陷的类型与位置，为设备维护提供精准的依据。尽管电气检测方法在检测精度和可靠性方面具有优势，但其应用仍然依赖于设备的运行状态和环境条件，特别是在高负载或复杂工况下，可能存在一定的检测难度。

3.2 非电气检测方法

随着技术的发展，非电气检测方法在绝缘状态评估中得到广泛应用。这些方法通常具备非接触特点，适合在设备运行过程中进行在线监测。红外热成像技术通过捕捉设备表面温度分布，能够识别局部过热区域，这些区域通常与设备故障或潜在损坏有关。通过及时发现过热现象，可以有效预防设备故障发生。声学检测则利用设备在运行过程中产生的声波信号进行监测，特别是在电气放电过程中，放电产生的声信号能够被捕捉并转化为可分析的数据。这种方法尤其适用于检测早期的电气缺陷。超声波技术在气体绝缘设备

(GIS)中的应用也表现出良好的效果，能够对设备内部的绝缘状况进行评估，及时发现气体泄漏或电气故障隐患。非电气检测技术的优点在于其非侵入性，适用于设备的在线监控，能够在不影响设备运行的情况下实时获取状态信息。

3.3 综合在线监测技术

综合在线监测技术是结合多种传感器和通信技术，实时采集设备运行数据，进行动态监控和状态评估。通过传感器网络，系统能够采集多维度的参数，如温度、湿度、压力、电流等，实时反映设备的运行状态。这些数据经过处理和分析，可以提供关于设备健康状况的全面信息，帮助管理者做出准确的维护决策。结合先进的数据处理和通信技术，综合在线监测系统可以构建远程监控平台，实现对设备的全时段监控。这种技术在智能电网背景下具有重要应用价值，通过远程监控与实时数据分析，可以优化电力设备的运行管理，提升系统的可靠性。然而，现有系统仍面临数据冗余与可靠性问题，如何有效筛选和处理大量数据，避免信息过载，以及如何保证数据在传输过程中的准确性与安全性，仍是当前技术发展的挑战。

4 绝缘寿命评估模型与方法

4.1 基于物理机理的评估方法

基于物理机理的评估方法从根本上解释了绝缘性能变化的原因，尤其是通过建立老化机理模型。这类方法往往侧重于揭示绝缘材料的退化过程，深入探讨不同因素对绝缘性能的影响。例如，热老化模型通过 Arrhenius 方程描述温度与绝缘寿命之间的关系，能够精确预测温度变化对设备老化的影响。这类物理机理模型具有明确的理论基础和物理意义，能够从宏观角度解释绝缘材料的退化过程。然而，这种方法的局限性在于，其参数获取往往依赖于精确的实验数据，而在复杂工况下，温度、湿度、负载等多种因素交织作用，导致准确参数的获取非常困难。此外，这些模型大多假设在某一单一因素下进行老化预测，而忽略了环境因素的动态变化，难以在实际工程应用中完全适用。因此，基于物理机理的评估方法虽然提供了理论支持，但实际应用时常需要结合其他评估手段以提高准确性。

4.2 统计与经验模型

统计与经验模型依赖历史数据与运行经验来进行评估，具有较强的实践性。通过对设备历史运行数据进行分析，可以建立寿命分布模型，例如 Weibull 分布被广泛应用于设备的可靠性分析。此类模型能够基于大量历史数据，描述设备在不同工况下的失效概率与寿命分布，从而实现了对设备寿命的估算和评估。统计模型的优点在于其较为简便，能够为设备寿命预测提供合理的定量依据，且适用于具有一定历史数据的系统。然而，经验模型则更多依赖于试验数据与运行经验进行拟合，能够在实际工程中快速应用，但其有效性较大程度上取决于数据的质量与代表性。若历史数据缺乏或存在

偏差,模型的预测结果可能会产生较大的误差。因此,统计与经验模型在工程应用中需要依赖高质量的数据和丰富的经验支持,才能发挥其优势。

4.3 数据驱动与智能评估方法

随着人工智能技术的快速发展,基于数据驱动的方法逐渐成为寿命预测领域的重要趋势。机器学习算法通过训练模型,识别多参数之间的非线性关系,能够在不依赖明确物理机理的情况下,自动从大量数据中提取规律。这使得数据驱动的寿命预测方法在复杂工况下表现出强大的适应性与预测能力。深度学习方法在特征提取和模式识别方面具有显著优势,尤其是在大数据环境下,能够通过多层神经网络模型自动捕捉设备老化与故障的微妙变化。然而,深度学习方法的一个挑战在于需要大量的标注数据进行训练,而对于许多设备或工况,标注样本的积累可能会受到时间与资源的限制。此外,数据驱动方法对于数据的质量要求较高,噪声和异常值可能对预测结果产生负面影响。因此,尽管基于数据驱动的智能评估方法具有强大的潜力,但仍需解决数据质量和样本量等问题,才能更好地应用于实际工程。

5 多源信息融合与综合评估策略

5.1 多参数融合机制

单一检测指标无法全面反映设备的绝缘状态,因而多参数融合成为现代评估方法的发展趋势。通过构建融合模型,将电气与非电气信息结合,能够从多个角度全面评估设备的绝缘性能,极大提高评估的准确性。不同类型的检测数据具有不同的特性和意义,单纯依赖某一参数往往无法有效识别潜在故障或异常状态。多参数融合机制能够综合各类信息,为设备的健康状况提供更加全面和精准判断依据。常用的多参数融合方法包括加权融合与特征级融合。加权融合方法通过为每个检测参数赋予权重,根据各自的影响程度进行综合分析,最终得出更为科学的评估结果。特征级融合则通过提取各个参数的特征,将其融合后用于评估,能够从数据的本质特征出发,增强评估的准确性和鲁棒性。这些方法在设备绝缘评估中具有广泛应用,尤其是在复杂电气设备的监控与评估中,能够提供更加可靠的决策支持。

5.2 不确定性处理方法

在检测过程中,数据难免受到噪声与不确定性因素的影响,这就需要采用有效的处理方法进行应对。模糊理论与概率统计方法是处理不确定信息的常用工具,在综合评估中发挥着重要作用。模糊理论通过将不确定性转化为模糊集合,能够在面对模糊、模糊不清或不完全信息时,提供较为精确的分析与判断。通过模糊运算,能够处理检测数据中的模糊性,避免因信息不完全或模糊性强而导致的评估误差。概率统计方法则可以通过对历史数据的统计分析,评估不确

定因素的影响,帮助确定设备绝缘状态的不确定性范围。此外,贝叶斯方法在评估过程中也具有重要应用,尤其在动态更新评估结果时,贝叶斯方法能够根据新获取的数据实时调整评估模型,以不断优化评估结果的准确性。通过这些方法的结合使用,能够有效处理检测数据中的不确定性,使评估结果更为可靠。

5.3 工程应用与优化路径

在工程应用中,选择合适的评估方法是提高评估效率和准确性的关键。不同类型的设备与运行条件要求采用不同的评估方法。对于高压设备、变电站及配电系统等关键设施,评估方法需要综合考虑设备的复杂性、运行环境及维护历史。选择合适的评估方法可以确保检测数据能够准确反映设备的真实状态。通过建立标准化流程与数据库,可以有效提升评估效率。标准化流程能够确保评估方法的一致性与可靠性,避免因人为因素导致的操作偏差,而数据库则为评估提供了历史数据支持,帮助在模型训练与优化中积累经验。随着数据量的增加,积累的数据不仅有助于增强评估模型的准确性,还能为设备故障预测与风险评估提供有力的依据。同时,数据积累与模型校验的结合,使得评估体系不断优化与完善。通过反馈机制与模型的自我修正,能够使评估方法在实际应用中不断提高其精度和效率。

6 结语

高压电气设备绝缘状态检测与寿命评估是保障电力系统安全运行的重要技术环节。随着检测手段的不断丰富与数据处理能力的提升,传统方法正逐步向多源信息融合与智能化方向发展。通过系统分析绝缘劣化机理与检测技术特点,并结合多种评估方法,可以构建更为科学的寿命预测体系。未来研究应进一步关注数据质量与模型泛化能力,同时推动在线监测技术与智能算法的深度融合,以实现更加精准与高效的设备管理。

参考文献

- [1] 杨忠君.高压电气设备绝缘在线监测技术在钢厂的应用[J].自动化应用,2025,66(S1):345-348.
- [2] 汪鹏.基于改进YOLOv5网络算法的变电站高压电气设备绝缘检测方法研究[J].电工技术,2024,(18):186-188.
- [3] 吕欣.高压电气设备绝缘预防性试验的重要性研究[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(二).国家能源集团乌海能源有限责任公司机电实验室,2024:193-194.
- [4] 张潮海,邹可园,张晓星.高压电气设备绝缘气体分解产物光学检测技术研究综述[J].高电压技术,2023,49(07):2806-2815.
- [5] 王义春,王文琦.基于改进模糊理论的电气工程设备绝缘状态检测方法[J].自动化应用,2025,66(17):128-130.