

# 基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价标准研究

瞿发富 杨艾平 刘毅飞 梁迪团 郝佳琦  
中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局  
DOI:10.12238/etd.v6i6.16837

**[摘要]** 本文聚焦基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价标准研究,阐述了油纸绝缘老化机理,筛选出化学与电气特征参量,构建包含数据采集等多层的老化评价体系,确定参量权重与综合评分模型。并且制定老化等级划分标准,并针对不同工况适配调整。通过实际应用案例,与单一参量评估及设备实际状况对比,验证了该评价标准具有较高准确性与实用性,能为变压器安全运行提供保障。

**[关键词]** 变压器; 油纸绝缘; 老化评价; 多参量融合; 标准体系

**中图分类号:** TM406 **文献标识码:** A

## Research on Evaluation Standards for Aging of Transformer Oil-Paper Insulation Based on Multi-Parameters

Fafu Qu Aiping Yang Yifei Liu Dituan Liang Jiaqi Hao

Kunming Bureau, Extra High Voltage Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper focuses on the research of evaluation standards for aging of transformer oil-paper insulation based on multi-parameters. It elaborates on the aging mechanism of oil-paper insulation, screens chemical and electrical characteristic parameters, and constructs a multi-layer aging evaluation system including data acquisition. The parameter weights and comprehensive scoring model are determined, and the aging grade classification standards are formulated with adaptive adjustments for different operating conditions. Through practical application cases, comparisons with single-parameter evaluation and actual equipment conditions verify that the proposed evaluation standard has high accuracy and practicability, which can provide reliable guarantee for the safe operation of transformers.

**[Key words]** Transformer; Oil-Paper Insulation; Aging Evaluation; Multi-Parameter Fusion; Standard System

### 引言

变压器作为电力系统的关键设备,其油纸绝缘老化状态直接影响运行安全性与可靠性。传统单一参量评估方法存在局限性,难以全面准确反映绝缘老化程度。基于多参量的评价标准能综合多方面信息,更科学地评估老化状态。本文深入研究变压器油纸绝缘老化机理,筛选核心特征参量,构建评价体系,制定老化等级划分与评价标准,并针对不同工况进行适配调整,旨在为变压器运维提供更精准有效的依据。

### 1 变压器油纸绝缘老化机理与特征参量筛选

#### 1.1 油纸绝缘老化核心机理

油纸绝缘老化是一个复杂的物理化学过程。绝缘油主要由烷烃、环烷烃、芳香烃等碳氢化合物组成,在光、热、氧、电弧、电场等因素作用下,会发生热氧老化和电气老化。热氧老化中,光和辐射线切断分子链及交联作用力,使油粘度增加、浑浊并产生悬浮物及沉淀,同时发生自动氧化的游离基链式反应。电气老化则是电场、磁场、电弧或电晕等游离放电的电离作用,导致液

体电介质电性能和物理、化学性能变坏。绝缘纸由纤维素、半纤维素和木质素组成,在老化过程中受电、热、机械、化学等应力综合作用,发生热降解、水解和氧化降解。热降解使大分子链纤维素聚合物断裂,以一台运行15年的变压器绝缘纸为例,热降解后产生小分子链、CO、CO<sub>2</sub>等物质,CO含量从初始的5ppm升至30ppm;水解和氧化降解也使纤维素分子链断裂,生成小分子物质和酸性物质,酸值从0.02mgKOH/g升至0.2mgKOH/g。随着老化进行,绝缘物质结构变化,机械性能逐渐劣化,绝缘性能下降。

#### 1.2 老化特征参量筛选原则与方法

筛选老化特征参量需遵循科学性、代表性、可测性和独立性原则。科学性要求参量能准确反映油纸绝缘老化本质;代表性确保参量涵盖老化主要方面;可测性保证参量可通过现有技术手段准确测量;独立性避免参量间相互干扰。筛选方法包括理论分析、实验研究和文献调研。理论分析基于电介质物理、化学动力学等理论,分析老化过程中可能变化的参量;实验研究通

过搭建加速老化实验平台,模拟不同老化条件,测量各参量变化,分析其与老化程度的关系;文献调研收集国内外相关研究成果,借鉴已有经验。综合运用这些方法,可全面筛选出与油纸绝缘老化密切相关的特征参量<sup>[1]</sup>。

### 1.3 核心老化特征参量确定

综合研究,确定核心老化特征参量包括化学特征参量和电气特征参量。化学特征参量中,糠醛含量是反映绝缘纸老化程度的重要指标,绝缘纸老化裂解会产生糠醛,经检测,运行20年的变压器绝缘纸糠醛含量可达2mg/L,其含量与绝缘纸聚合度存在近似对数关系;酸值能体现绝缘油和绝缘纸的老化程度,老化过程中会产生酸性物质,使酸值升高,如运行10年的变压器绝缘油酸值可达0.15mgKOH/g;微水含量对油纸绝缘性能影响显著,水分会降低绝缘电阻、增加介质损耗,以某110kV变压器为例一般要求微水含量不高于35ppm。电气特征参量方面,介电常数是反映介质极化程度的物理量,老化会导致介电常数变化,运行多年后介电常数可能从初始的2.2升至2.5;介质损耗因数反映介质在交变电场下的能量损耗,老化时介质损耗因数通常增大,可由0.002增至0.01;回复电压峰值时间、主时间常数、极化谱峰值和初始斜率等时域特征参量,通过回复电压法和去极化电流法测量得到,能反映油纸绝缘老化状态。

## 2 基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价体系构建

### 2.1 评价体系框架设计

变压器油纸绝缘老化评价体系的构建,需搭建科学合理的框架,涵盖数据采集层、特征参量提取层、评估模型层和结果输出层四个关键部分。数据采集层是基石。借助频域介电谱(FDS)测试仪,能精准测量油纸绝缘在不同频率(如 $10^{-2}$ ~106Hz)下的介电响应特性。以某110kV变压器为例,经检测,在 $10^2$ Hz时,其介电损耗因数为0.005。油中溶解气体分析仪可检测油中氢气、甲烷等气体含量,某运行10年的变压器,氢气含量达120  $\mu$ L/L,甲烷含量为80  $\mu$ L/L。糠醛含量检测仪专门测定绝缘纸老化产生的糠醛浓度,运行15年的变压器,糠醛含量为1.8mg/L。特征参量提取层对采集的数据深度处理分析,运用专业算法和模型筛选核心特征参量。评估模型层为体系核心,基于数据挖掘与机器学习技术构建多参量融合评估模型。评估模型层则运用数据挖掘、机器学习技术构建基于多参量的老化评估模型,将提取的特征参量输入该模型,经过复杂计算分析得出老化程度评分。结果输出层会以直观的方式呈现评估结果,例如对某变压器进行评估后,明确划分其老化等级为三级,剩余寿命预测为5年,从而为运维决策提供可靠依据<sup>[2]</sup>。

### 2.2 参量权重计算方法

参量权重计算在变压器油纸绝缘老化评价体系中至关重要,常见方法有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法中的层次分析法,依据专家经验判断构建判断矩阵。在某变压器老化评估项目中,邀请5位专家对糠醛含量、介质损耗因数等6个特征参量的相对重要性评估比较。以糠醛含量和介质损耗因数对比为例,3位专家认为糠醛含量更重要,2位认为两者同等重要,构建出判

断矩阵。通过计算特征向量,确定糠醛含量权重为0.3,介质损耗因数权重为0.25。此方法能汲取专家知识经验,但主观性强,不同专家判断可能有差异;客观赋权法中的熵权法,依据参量变异程度确定权重。对某批变压器的5个特征参量分析,发现酸值的变异系数最大,为0.4,其权重确定为0.35。该方法能客观反映参量贡献,但忽略参量相关性。为综合优点,采用主客观结合的综合赋权法,如将层次分析法权重与熵权法权重加权平均。

### 2.3 多参量综合评分模型

多参量综合评分模型是评估变压器油纸绝缘老化程度的核心工具,采用加权求和法,将不同特征参量的标准化值与对应权重相乘后累加,得出综合评分。实际操作中,先对采集的各特征参量进行标准化处理,消除量纲和数值范围差异。像化学特征参量里的糠醛含量、酸值,电气特征参量中的介电常数、介质损耗因数等,都通过归一化或标准化算法转化为无量纲相对值,以便后续加权计算;标准化处理完成后,依据预先确定的参量权重计算方法,为每个特征参量分配权重。权重反映参量在老化评估中的重要程度,通常采用主客观结合的综合赋权法确定,既参考专家经验的主观判断,又结合数据变异程度的客观信息。例如,糠醛含量作为反映绝缘纸老化的关键指标,权重可能较高;介质损耗因数的权重则根据实际数据变异情况确定之后,将标准化后的各特征参量值与对应权重相乘,得到加权参量值,再累加所有加权参量值,得出变压器综合评分,范围通常为[0, 100],0分表示绝缘全新,100分表示绝缘完全失效,评分越高,老化越严重,需采取维护或更换措施;该模型优势明显,能综合考虑多个特征参量,避免单一参量评估的局限,更准确反映变压器油纸绝缘整体老化状态,为运维决策提供科学全面依据,且灵活性和可扩展性好,可根据实际需求调整参量权重和评分标准,适应不同变压器评估需求。

## 3 变压器油纸绝缘老化等级划分与评价标准制定

### 3.1 老化等级划分依据

老化等级划分依据核心老化特征参量的变化范围和综合评分结果。参考国内外相关标准和研究成果,结合实际运行经验,确定各参量的临界值和综合评分的分段阈值。以绝缘纸聚合度为例,当聚合度平均值在1200~1800时,变压器整体绝缘状态良好;下降到500时,处于中期;下降到250及以下,认为绝缘寿命已终止;下降到150时,绝缘纸机械强度几乎为零。综合评分方面,可根据评分范围将老化程度划分为不同等级,如0~20分为良好,20~50分为一般,50~80分为较严重,80~100分为严重<sup>[3]</sup>。

### 3.2 老化等级量化划分标准

根据老化等级划分依据,制定老化等级量化划分标准。将老化程度划分为五个等级:1级为油纸绝缘状态良好,核心特征参量均在正常范围内,综合评分0~20分;2级为油纸绝缘状态一般,部分参量接近临界值,综合评分20~50分;3级为油纸绝缘老化较严重,多个参量超出正常范围,综合评分50~80分;4级为油纸绝缘老化严重,参量明显恶化,综合评分80~100分;5级为油纸绝缘设备寿命终止,参量达到危险值,需立即处理。通过量化划分标

准,可直观判断变压器油纸绝缘老化程度,为运维决策提供明确依据。

### 3.3不同工况下的标准适配调整

#### 3.3.1高海拔地区适配

高海拔地区有着独特的环境特征,这里空气稀薄,气压明显低于平原地区。这种低气压环境对变压器的运行产生了多方面影响,首先便是散热条件变差,变压器产生的热量难以像在平原地区那样高效散发出去,进而导致油纸绝缘所处的温度环境更为恶劣,老化速度随之加快。而且,低气压会使油中气体溶解度降低,让油中溶解气体分析结果出现偏差。基于此,在高海拔地区,必须对老化等级划分标准和特征参量临界值进行适当调整。比如,降低综合评分中良好等级的上限,让达到良好等级的标准更为严格;提高较严重和严重等级的下限,确保能更精准地反映出高海拔地区变压器油纸绝缘实际的老化情况。另外,针对油中溶解气体分析,要充分考虑低气压对气体溶解度的影响,对分析结果进行科学修正。

#### 3.3.2高湿度地区适配

高湿度地区水分易侵入变压器内部,使油纸绝缘微水含量大幅升高,加速绝缘老化,还会干扰电气特征参量测量,导致介电常数、介质损耗因数等测量值出现偏差。因此,该地区要着重加强微水含量监测,适当降低其正常范围上限,以便尽早发现潜在问题。同时,评估模型需充分考虑湿度对电气特征参量的影响,合理修正测量结果。比如安装湿度传感器实时监测环境湿度,依据湿度与电气特征参量的关系,精准校正介电常数和介质损耗因数。

#### 3.3.3重载运行变压器适配

重载运行的变压器负荷大、产热多,高温会加速油纸绝缘热老化,威胁其安全稳定运行。这种情况下,要提高温度相关特征参量监测频率,增加油温、顶层油温等关键指标的监测次数,及时掌握温度变化。同时,调整老化等级划分标准,考虑重载对绝缘老化的加速作用,适当降低良好等级范围,提高较严重和严重等级范围。例如,长期重载运行的变压器,油温超一定数值,即便其他参量正常,也应提高老化等级评估,提醒运维人员加强监测维护。

## 4 实际应用案例与效果验证

为验证基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价标准的有效性,选取西南山区某变电站的多台变压器开展应用。该变电站地形复杂、气候多变,站内变压器运行年限跨度大,涵盖新投运到运行超20年的设备,运行工况多样,有正常负载、频繁重载及高温高湿等不同环境下的运行情况,样本丰富且具代表性<sup>[4]</sup>。

实际应用时,严格按评价体系进行数据采集、特征参量提取、模型计算和等级划分。与单一参量评估及设备实际运行状况对比,多参量评价标准能更准确反映变压器绝缘老化状态。如一台运行多年的重载变压器,传统方法依油温判断其绝缘尚可,但多参量模型综合多个参量后,准确评估出其绝缘老化处于较严重等级,提醒运维人员加强监测检修。此外,不同工况下标准适配调整也获验证,高海拔山区路段附近区域,调整后的老化等级划分标准能更合理反映实际老化情况;高湿度季节,对微水含量和电气特征参量修正,提高了评估准确性。该案例充分证明评价标准准确、实用,可保障变压器安全稳定运行。

## 5 结束语

本文开展的基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价标准研究,通过理论分析与实际应用验证,取得了阶段性成果。构建的评价体系、制定的老化等级划分与评价标准,以及针对不同工况的适配调整方法,有效提高了变压器绝缘老化评估的准确性与实用性。未来,随着技术的不断进步,还需持续优化和完善该评价标准,以更好地适应电力系统的发展需求,保障变压器的安全稳定运行,为电力系统的可靠供电提供坚实支撑。

## [参考文献]

- [1]刘春雨.基于多参量的变压器油纸绝缘老化评价标准研究[J].电力设备管理,2024(22):122-124.
- [2]黄正勇,周少喻,王向东等.配电变压器过载油纸绝缘老化特性研究[J].电气化铁道,2021,32(04):17-22.
- [3]范利明,杨陆卫.油浸式电力变压器纸绝缘老化特性试验分析[J].电工技术,2021(15):149-150+153.
- [4]林智勇,苏若杭,黄国泰,等.基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘状态评估[J].电力系统保护与控制,2025,53(03):140-147.