

变压器绕组变形故障溯源及处理对策研究

贾俊杰¹ 戴龙成² 刘勇³ 杨乐³ 侯峰⁴

1. 国网宁夏电力有限公司超高压公司 宁夏银川 750002

2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院 宁夏银川 750002

3. 中原工学院 河南郑州 450007

4. 国网宁夏电力有限公司培训中心 宁夏银川 750002

摘要: 变压器作为电力系统关键设备,其绕组的机械稳定性对安全运行至关重要。绕组变形是潜伏性高、危害性大的常见缺陷,可能导致绝缘失效甚至设备爆炸。本文旨在系统研究变压器绕组变形的根源机制与精准有效的应对策略。通过深入剖析绕组变形的物理成因、表现形式及检测识别手段,厘清主要诱导因素及其耦合作用过程。重点探讨当前在变形故障精确定位、成因精准区分及变形程度定量评估等方面面临的技术难点与复杂性。针对性地提出了涵盖智能监测、多源协同诊断、精细修复工艺及主动预防体系在内的一体化综合治理对策。研究成果致力于提升变压器状态感知与运维智能化水平,为电力系统安全稳定运行提供切实可行的技术支持。

关键词: 变压器绕组变形; 故障溯源; 诊断技术; 处理对策; 状态监测

引言

电力变压器的长期可靠运行是维系现代电力系统稳定性的基石。变压器绕组在服役过程中,长期承受包括短路电动力、机械振动、热应力及运输冲击等多种动态载荷的综合作用,其几何形状与内部结构极易发生偏移、屈曲或松散等形式的变形。因此,实现对绕组变形的早期精准探测、成因有效追溯以及制定科学得当的处理措施,是保障变压器本质安全、实现设备精益化管理的核心课题。本文聚焦于变压器绕组变形的内在机理探索,力图清晰刻画其发展演化路径与关键特征参量,并据此构建一套从智能监测、精准诊断到高效修复与主动防御的系统化闭环处理体系,以期为变压器资产的智能化运维与风险管控提供强有力的理论支撑与实践指导。

一、变压器绕组变形概述

(一) 绕组变形的类型与表征特征

变压器绕组变形主要呈现为轴向压缩与拉伸、幅向失稳(鼓包或内凹)、整体扭曲倾斜及局部匝间或饼间移位等多种复杂形态。机械应力变形主要由突发性短路

产生的巨大轴向与幅向电动力冲击、运输过程中的剧烈颠簸磕碰、安装调整不当引起的异常机械力或长期运行振动累积造成,其典型特征是绕组几何结构的连续性破坏与固有刚度下降。热效应变形则源于长期过载或散热不良导致的绝缘材料热膨胀受限、热应力积聚,以及伴随的绝缘收缩与劣化,常表现为绕组整体的轴向尺寸收缩或不均匀热膨胀导致的局部隆起。电磁因素变形涉及不平衡漏磁场分布引起的局部电磁力异常、导线涡流发热不均及其与结构件涡流产生的附加力作用,该变形通常更为渐进且与结构谐振存在潜在关联。各类变形的形态差异可通过频率响应变化图谱、短路阻抗偏差量、振动频谱特征、超声反射信号异常等多种物理量或信号模式进行表征与区识别,为后续溯源分析奠定基础。

(二) 绕组变形检测识别技术现状

对变压器绕组潜在变形缺陷的识别是状态监测的重要内容,现有主流技术包含基于电气响应的频响分析法(FRA)与短路阻抗法(SCI),基于机械响应的振动特征分析法(VSA),以及基于物理特性的超声波扫描法。频响分析法通过输入扫频信号比较绕组在宽频域内的传输或激励响应谱线,对绕组整体结构变化极为敏感,是国际公认的最有效方法之一。短路阻抗法通过测量特定工频或高频下的阻抗值或电压电流相位偏差,可直接反映绕组机械完整性的变化量。

基金项目: 宁夏自然科学基金项目“变压器绕组变形的扫频阻抗多参量融合智能诊断方法研究”(编号:2024AAC05101)。

二、绕组变形故障溯源的关键问题与挑战

(一) 变形诱因的多因素耦合与作用机理复杂性

绕组变形的诱发因素极少孤立存在,多种应力源的协同作用、交叉影响构成了溯源分析的首要难点。一次短路冲击作为最剧烈的直接诱因,其巨大的电磁力瞬间作用于绕组各个部位,可能导致撑条断裂、垫块移位甚至导体永久形变。然而,短路冲击的后果不仅取决于其短路电流幅值和时间常数,更与设备本身的历史累积损伤程度密切相关,存在显著的路径依赖效应。长期运行中持续的负荷波动、热循环效应导致导线材料蠕变、绝缘材料逐步收缩硬化,使绕组预紧力缓慢衰减,抗短路能力持续下降。

(二) 诊断结果的不确定性与模式精确定义困难

现有检测诊断技术在面对复杂现场工况时仍难以达到绝对精准的溯源水平。频响分析法结果受测试接线方式、外部接线寄生参数、地网干扰及参考图谱选择的主观性影响显著,图谱差异的定量评价标准尚存争议;轻微变形或局部变形有时特征并不明显,或受多种干扰因素影响导致图谱畸变,增加了误判风险。短路阻抗法的分辨率对于微小变形相对不足,且其变化有时难以与铁芯饱和状态等非变形因素清晰区分^[1]。振动特征分析法的信号易被环境振动、冷却系统风扇噪声或铁芯磁致伸缩振动所掩盖,信噪比较低,信号特征提取难度大,对振动传感器布置位置要求严格。超声波法则对复杂绕组内部结构的穿透能力有限,且需设备处于停运状态进行测试,实用性与全面性受限。

(三) 修复介入时机与现场工艺实施难度

在判定绕组存在变形后,如何选择最优的修复介入点并安全高效实施现场修复构成了重要的运维决策难点。轻微变形若未显著影响电气强度,结合加强监测可能有暂缓处理的空间,但该暂缓期预判存在技术困难且伴随风险。对于确认需修复的情况,现场修复的工艺要求极高,传统解体大修耗时长成本巨大,非计划停运将带来严重经济损失。现场不解体修复如带材加压紧固、绝缘树脂浸渍加固等技术虽有应用,但涉及内部空间狭窄、操作视野受限,修复材料与工艺需要保证在带油狭小空间内的可靠性及长期性能稳定性,技术要求非常苛刻。

三、绕组变形故障的综合性处理对策

(一) 构建分层智能在线监测与预警系统

提升绕组变形防治能力的基础在于构建融合先进传感与智能分析的早期预警系统。核心策略是实施分层部署状态感知架构,即在变压器本体关键部位部署分布式

高精度多维传感器网络,实时采集绕组运行温度热点分布、振动频谱特征、油中特征气体浓度及局部放电强度等多维状态量。具体方案包括在绕组压板、油箱特定位置安装高动态响应压电式或光纤加速度传感器,连续监测轴向与幅向振动谱线变化特征;在绕组内部高温风险点嵌入高稳定性光纤测温传感器,精准捕捉异常温升模式;在变压器油箱本体集成高灵敏度超声信号接收阵列,结合特定的激励源如内置脉冲发生器或巧妙利用运行中固有振动源,尝试在特定工况下获取绕组内部结构信息^[2]。将采集的海量异构数据进行标准化预处理后,输入基于深度学习构建的多时标特征提取与关联分析模型,通过分析运行环境变化下特征参量的动态演变规律,识别与绕组结构稳定性退化的细微关联模式。重点开发基于长短期记忆网络与自注意力机制的序列预测模型,用于从历史数据中学习正常模式,并对当前状态进行拟合与异常值预测,生成可量化的早期劣化概率指数。

(二) 研发高精度多源协同智能诊断算法

为克服单一诊断手段局限性,需整合多源数据开发高鲁棒性协同诊断平台。核心策略是构建一个集成频响法、短路阻抗法、振动分析法及运行工况数据的智能诊断核心引擎。具体实现路径首先需建立涵盖不同制造厂、不同绕组结构、不同典型缺陷类型(例如不同程度的轴向压缩、幅向鼓包、局部移位)以及不同运行年限的数字化基准图谱数据库,为模式识别提供标准参照。在此基础上,研发基于多通道深度卷积神经网络的FRA图谱自适应特征提取算法,通过迁移学习从海量标准图谱与现场异常图谱中学习深层判别特征。对于振动分析数据,采用图论变换融合小波包分解提取对绕组松动或接触不良高度敏感的高维时频域特征向量。构建基于证据理论或改进加权D-S规则的知识驱动融合框架,将来自FRA的结构变化特征、SCM的总体偏离值变化趋势、VSA的振动能量密度谱变化以及运行电流冲击次数的统计信息进行关联度加权与概率合成,输出绕组整体状态健康指数以及具体形变模式分类置信度区间与概率分布值^[3]。平台设计人机交互验证机制,允许专家在线调阅原始图谱特征点对比分析结果,结合智能算法判据进行交互审核,形成人机协同增强的闭环验证流程,最大化提高诊断结果的专业认可度与实际操作性。

(三) 精进绕组修复加固工艺与质量评估技术

针对确认变形的绕组,开发高效、可靠的修复与加固工艺是恢复设备安全运行能力的关键环节。核心策略在于依据变形位置类型及严重程度制定精细化修复方案

并配套工艺优化与质量监控手段。对于仅表现为轴向压力松弛导致绕组松动情况，可优先尝试现场在线带材加压紧固技术。具体操作要求开发专用液压或机械式多点施压系统，利用预留孔道在器身不解体状态下，通过精确调控对绕组顶部压板施加规定梯度与时间的均匀稳定压力，并辅以超声波或微应变监测反馈压力传递效果与形变恢复程度。对辐向变形尤其是局部鼓包区域，在可访问性允许的条件下，考虑采用空间固化型高性能改性耐热环氧树脂进行真空浸渍定点注射加固。其关键是选择低黏度、高渗透性、固化收缩率低且电气性能匹配的树脂材料，配合三维可控微注射泵及多点监测传感器网络，确保树脂在预定区域均匀填充、充分浸润间隙并形成均匀固化体^[4]。

（四）强化全生命周期主动预防机制构建

根本性减少绕组变形风险，需要将预防措施嵌入设计、制造、安装、运维全链条进行系统性管理升级。设计制造阶段的主动预防核心在于优化绕组动态稳定性设计。要求设计环节采用先进的电磁-结构耦合有限元仿真平台，精确计算不同短路工况下绕组各部位的瞬态电磁力分布与结构响应，重点验证轴向预压紧力设置、导线的固持强度设计、垫块布放密度与强度、撑条尺寸布局选择的合理性，减少结构谐振风险。制造执行阶段引入绕组装配过程智能化控制装备，例如采用激光跟踪仪自动校准导线排布位置一致性，利用多点压力反馈系统自动调控绕组预压紧力施加过程，确保满足设计精度要求。在设备投运后的运维阶段，构建预防性短路保护强化系统与运行环境主动干预机制是必要举措^[5]。具体操作包括在继电保护系统中增设自适应加速跳闸功能逻辑，在检测到近端短路冲击时提前触发保护动作以大幅缩短故障电流流经时间；安装带触发锁止功能的智能相间电抗器，在高风险位置旁路接入用以主动限制涌入短路电流幅值；对变压器安装基座实施振动状态在线监测并配套高阻尼隔震基脚改造，削弱环境振动输入水平。

（五）推广数据融合驱动的状态评估与预测性维护

充分利用设备运行数据与历史维修经验，构建预测性维护体系将有效提升风险管控效率。实现方法是建设企业级变压器群状态全景感知与智能决策分析平台。平台应实现跨部门数据的自动化汇集与质量管控，涵盖实时监测数据、定期预防性试验结果、历次检修记录参数、负荷运行曲线、短路历史档案、环境气象条件以及制造商原始技术资料等多维度数据仓库。对历史数据进行清

洗融合后，开发基于集成学习框架的多维特征退化轨迹构建技术，提取状态参量与运行应力之间的关联特征演化路径。实施核心策略是建立变压器绕组健康状况的动态综合评价指标，该指标由上述在线监测异常指数、关键预防性试验项目阈值偏离度评估等级、当前运行环境应力加权因子及设备服役年限调节系数等多个维度共同加权融合而成并动态刷新。结合短路承受能力寿命累积模型的输出，预测未来时段内因绕组变形导致风险等级跃升的关键时间窗口^[6]。据此采用强化学习算法模拟不同运维干预策略下的经济性投入与风险降幅之间的平衡点选择过程，生成针对每台变压器的定制化、差异化运维任务建议书与资源调度方案。

结束语

本文系统研究了变压器绕组变形故障的产生机理、诊断难点及综合应对策略。研究明确了绕组变形的多维诱因及其复杂耦合作用机制，揭示了当前诊断技术在面对不确定性及复杂模式识别中存在的挑战。在溯清源头与找准问题的基础上，本文提出并阐述了一套深度融合智能感知、多级协同诊断、精微现场修复以及全周期主动预防理念的系统化处理对策框架。综合应用本文所倡导的技术手段与管理措施，将显著提升电力变压器绕组变形故障的预防、诊断与治理水平，有力保障电网骨干装备的安全可靠性及经济运行效能。

参考文献

- [1] 马旭聪, 唐文虎, 牛哲文, 等. 非均衡数据集下基于孪生卷积网络的变压器绕组变形故障识别方法[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 120-128.
- [2] 陈忠贤, 谢虎波, 任文军, 等. 基于FBG的35kV油浸式变压器绕组变形监测研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 115-122.
- [3] 邓于婷. 一起110kV变压器绕组变形故障综合分析和解体验证[J]. 江西电力, 2023, 47(6): 25-27.
- [4] 段明辉, 刘力卿, 姚创, 等. 变压器绕组变形的脉冲频率响应法检测技术[J]. 电力设备管理, 2023(6): 260-263.
- [5] 唐轩, 成俊杰, 吴琳, 等. 基于信号距离度模型和SVM的变压器绕组变形诊断方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 27-36.
- [6] 张旭. 频率响应法变压器绕组变形试验[J]. 石油化工建设, 2023, 45(7): 55-57.