

# 变压器绕组变形电气试验方法对比及诊断精度提升

李嘉欣 马天乐  
国网中卫供电公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8675

**[摘要]** 变压器作为变电站一次设备的核心构成部分，其运行稳定性直接决定电力系统供电可靠性。绕组变形是变压器常见故障类型，若未能及时诊断处置，易诱发绝缘击穿、绕组短路等严重事故。本文围绕变压器绕组变形电气试验方法开展研究，选取频率响应分析法、低电压阻抗法、短路阻抗法三种主流技术手段，从试验原理、操作流程、适用场景等维度进行系统对比，明确各方法的优势与局限。在此基础上，结合试验数据预处理、多方法融合诊断等技术路径，提出诊断精度提升策略。实例验证结果表明，多方法融合诊断策略可有效弥补单一试验方法的不足，显著提升绕组变形故障诊断的准确性与可靠性，为变电站一次设备运维工作提供技术支持。

**[关键词]** 变压器；绕组变形；电气试验；诊断精度；频率响应分析法

## Comparison of Electrical Test Methods for Transformer Winding Deformation and Improvement of Diagnostic Accuracy

Li Jiaxin Ma Tianle

State Grid Zhongwei Power Supply Company

**[Abstract]** As the core component of primary equipment in substations, the operational stability of transformers directly determines the reliability of power supply in the power system. Winding deformation is a common type of fault in transformers. If not diagnosed and treated in a timely manner, it can easily lead to serious accidents such as insulation breakdown and winding short circuit. This article focuses on the research of electrical testing methods for transformer winding deformation, selecting three mainstream technical methods: frequency response analysis, low-voltage impedance, and short-circuit impedance. A systematic comparison is made from the dimensions of testing principles, operating procedures, and applicable scenarios to clarify the advantages and limitations of each method. On this basis, combined with techniques such as experimental data preprocessing and multi method fusion diagnosis, strategies for improving diagnostic accuracy are proposed. The verification results of the example show that the multi method fusion diagnosis strategy can effectively compensate for the shortcomings of a single experimental method, significantly improve the accuracy and reliability of winding deformation fault diagnosis, and provide technical support for the operation and maintenance of primary equipment in substations.

**[Key words]** transformer; Winding deformation; Electrical testing; Diagnostic accuracy; Frequency response analysis method

### 一、引言

在电力系统中，变电站是电能传输与分配的关键枢纽，变压器作为变电站一次设备的核心部件，承担着电压变换与电能传递的核心功能，其运行状态直接关乎电力系统的安全稳定。随着电力系统向高电压、大容量方向演进，330kV及以上等级变压器的应用愈发广泛，对其运行可靠性的要求也持续提升。绕组是变压器的核心构件，由导线与绝缘材料组成，在制造、

运输、安装及运行全流程中，易受电磁力、机械振动、温度波动等因素影响，产生绕组变形故障。绕组变形主要表现为轴向位移、径向形变、绕组扭曲等形式，这类故障初期具有隐蔽性，难以通过直观观测发现，但随着变形程度加深，会导致绕组间绝缘间隙缩小，引发局部电场畸变，进而加速绝缘老化、诱发击穿，甚至造成绕组短路，最终导致变压器停运，给电力系统带来重大经济损失与社会影响。

电气试验是诊断变压器绕组变形故障的核心技术手段，通过检测绕组电气参数的变化特征，间接判断绕组结构状态。当前，变电站一次设备电气试验中应用的绕组变形诊断方法种类繁多，不同方法基于的技术原理存在差异，在诊断精度、操作复杂度、适用场景等方面各具特点。如何科学选取试验方法、提升诊断精度，已成为变电站试验人员面临的核心问题。近年来，国内外学者围绕变压器绕组变形电气试验方法开展了大量研究并取得系列成果，但现有研究多聚焦于单一试验方法的优化，针对不同方法的系统对比及融合应用研究仍有待深化。基于此，本文对主流变压器绕组变形电气试验方法进行全面对比，剖析各方法的优劣特征，提出诊断精度提升策略，为变压器绕组变形故障的精准诊断提供理论与技术参考。

## 二、变压器绕组变形电气试验核心方法及原理

变压器绕组可等效为电阻、电感、电容构成的复杂无源线性网络，当绕组发生变形时，其等效电路参数会产生相应变化。电气试验方法通过检测这些参数的变化规律，实现对绕组变形状态的诊断。本文选取变电站一次设备电气试验中应用最广泛的三种方法：频率响应分析法、低电压阻抗法、短路阻抗法，对其核心原理与操作流程展开阐述。

### 2.1 频率响应分析法 (FRA)

频率响应分析法基于变压器绕组的分布参数等效电路，当绕组发生变形时，其分布电感、分布电容及串联电阻会发生改变，导致绕组对不同频率信号的响应特性产生差异。该方法通过向变压器绕组施加不同频率的激励信号，检测绕组两端的输出信号，生成绕组频率响应曲线（通常以幅值比和相位差为纵坐标、频率为横坐标）。通过对比绕组健康状态与待测状态下的频率响应曲线，分析曲线相似度（如采用相关系数、均方误差等指标），判断绕组是否发生变形及变形程度。

频率响应分析法的操作流程主要包括：试验前准备（断开变压器与电网的连接，对绕组进行放电，保障试验安全）、测试接线（将信号发生器与绕组一端连接，示波器或专用 FRA 测试仪与绕组另一端连接）、参数设置（设定激励信号频率范围，通常为 10Hz-1MHz，配置信号幅值）、数据采集（记录不同频率下的输入与输出信号参数）、曲线对比与分析。该方法的优势在于测试电压低（通常为几伏至几十伏），不会对绕组绝缘造成损伤，适用于变压器停运状态下的离线检测，且对绕组轴向位移、径向变形等多种变形类型均具备良好的识别能力。

### 2.2 低电压阻抗法

低电压阻抗法基于变压器绕组的等效阻抗特性，绕组等效阻抗由电阻与电抗组成，当绕组发生变形时，绕组匝数、间距等结构参数会发生改变，导致等效阻抗产生变化。该方法通过向变压器绕组施加低电压（通常为额定电压的 5%-10%）交流电，测量绕组的输入电压、电流及功率因数，计算绕组等效阻抗值（包括电阻值、电抗值及阻抗模值）。通过对比绕组健康状态与待测状态下的等效阻抗值，判断绕组是否发生变形。

低电压阻抗法的操作流程包括：试验前准备（断开电源，放电处理，清理绕组接线端子）、接线（将低电压交流电源与绕组输入端连接，将电压表、电流表、功率因数表接入测试回路）、施加电压（调节电源输出电压至设定值，保持电压稳定）、数据测量（记录电压、电流、功率因数等参数）、阻抗计算与对比分析。该方法操作简便、测试设备成本较低，适用于现场快速检测，但由于低电压下绕组磁路饱和程度与额定电压下存在差异，可能导致测试结果存在一定误差，对轻微变形的识别灵敏度较低。

### 2.3 短路阻抗法

短路阻抗法基于变压器短路试验原理，变压器短路阻抗主要由绕组电阻和漏抗组成，其数值与绕组结构参数密切相关。当绕组发生变形时，绕组漏磁路径会发生改变，导致漏抗变化，进而使短路阻抗产生波动。该方法通过将变压器一侧绕组短路，在另一侧绕组施加交流电压，使绕组中流过额定电流，测量施加的电压值，计算短路阻抗值（短路阻抗=施加电压/额定电流）。通过对比绕组健康状态与待测状态下的短路阻抗值，判断绕组是否发生变形。

短路阻抗法的操作流程包括：试验前准备（断开变压器与电网连接，对绕组放电，检查短路回路可靠性）、接线（将一侧绕组短接，在另一侧绕组接入电源、电压表、电流表）、施加电压（调节电源输出，使绕组电流达到额定电流）、数据测量（记录施加电压和电流值）、短路阻抗计算与对比。该方法测试原理简洁，测试结果直观，适用于变压器停运状态下的离线检测，对绕组严重变形具备良好的识别能力，但测试过程中需施加较大电流，可能产生一定热量，对绕组绝缘造成轻微影响，且对轻微变形的识别灵敏度较低。

## 三、变压器绕组变形电气试验方法对比分析

为全面评价三种主流电气试验方法的性能，从试验原理特性、操作难度、诊断灵敏度、适用场景、设备成本等维度进行系统对比，对比结果如表 1 所示。

对比指标	频率响应分析法 (FRA)	低电压阻抗法	短路阻抗法
原理特性	基于分布参数等效电路，响应特性全面	基于集中参数等效阻抗，原理简单	基于短路漏抗特性，与绕组结构关联紧密
操作难度	较高，需精确控制频率范围，接线要求严格	较低，接线简单，参数测量便捷	中等，需保障短路回路可靠，控制额定电流
诊断灵敏度	高，可识别轻微变形及多种变形类型	低，仅能识别较严重变形	中等，可识别中度及以上变形

适用场景	离线检测，适用于各类电压等级变压器，尤其适用于精准诊断	离线/现场快速检测，适用于低电压等级变压器初步筛查	离线检测，适用于中高压等级变压器常规检测
设备成本	高，需专用 FRA 测试仪及信号处理设备	低，仅需常规电压表、电流表、低电压电源	中等，需交流电源、电流控制器及精密测量仪器
绝缘影响	无影响，测试电压低	无影响，测试电压低	轻微影响，测试电流大，产生热量

通过对比分析可知，三种试验方法各有优劣：频率响应分析法诊断灵敏度最高，可实现轻微变形的精准识别，但操作难度大、设备成本高，适用于诊断精度要求较高的场景；低电压阻抗法操作简单、成本低廉，适用于现场快速初步筛查，但诊断灵敏度较低，难以识别轻微变形；短路阻抗法测试结果直观，适用于中高压变压器常规检测，但对轻微变形识别能力有限，且测试过程对绝缘存在轻微影响。在实际变电站一次设备电气试验中，单一试验方法难以满足不同场景下的诊断需求，因此需结合各方法优势，实现优势互补。

#### 四、变压器绕组变形诊断精度提升策略

针对单一电气试验方法存在的局限性，结合变电站一次设备电气试验的实际需求，从试验数据预处理、多方法融合诊断、基准曲线优化三个维度提出诊断精度提升策略。

##### 4.1 试验数据预处理

试验过程中，环境噪声（如现场电磁干扰、设备自身噪声）会对测试数据产生干扰，导致数据失真，影响诊断精度。因此，需对采集的试验数据进行预处理，消除噪声干扰。对于频率响应分析法，可采用小波变换去噪方法，通过小波分解将信号拆解为不同频率分量，剔除噪声对应的高频分量，再通过小波重构得到纯净的响应信号；对于低电压阻抗法和短路阻抗法，可采用均值滤波、中值滤波等方法，消除随机噪声对电压、电流数据的影响。同时，对数据进行归一化处理，将不同量级的参数统一到相同数值范围，便于后续对比分析与融合计算。

##### 4.2 多方法融合诊断

多方法融合诊断通过整合不同试验方法的测试数据，借助各方法优势实现精准诊断。具体实施路径为：首先，采用低电压阻抗法进行初步筛查，快速判断绕组是否存在明显变形，对于无明显变形的变压器，可精简后续测试流程，提升检测效率；对于存在疑似变形的变压器，进一步采用频率响应分析法和短路阻抗法开展精准检测，采集两种方法的测试数据；其次，构建多源数据融合诊断模型，采用加权平均法对不同方法的诊断结果进行融合，根据各方法的诊断灵敏度设定权重（如频率响应分析法权重设为 0.6，短路阻抗法权重设为 0.4）；最后，依据融合后的诊断结果，判断绕组变形状态及变形程度。

以某 220kV 变压器绕组变形诊断为例，采用低电压阻抗法测试得到阻抗变化率为 3.2%（超过 2%的预警阈值），初步判定存在变形；进一步采用频率响应分析法测试得到相关系数为 0.82（低于 0.9 的健康阈值），短路阻抗法测试得到短路阻抗变化率为 2.8%（超过 2%的预警阈值）；通过加权融合计算得

到综合诊断系数为  $0.82 \times 0.6 + 2.8\% \times 25 \times 0.4 = 0.776$ （其中将短路阻抗变化率转换为 0-1 区间的系数），根据综合诊断系数阈值判定绕组存在中度变形，后续解体检查验证了该诊断结果的准确性。

##### 4.3 基准曲线优化

现有诊断方法多以变压器出厂时的测试曲线作为基准曲线，但在长期运行过程中，变压器绕组参数会受温度、湿度等环境因素影响，导致基准曲线与实际健康状态存在偏差，影响诊断精度。因此，需对基准曲线进行优化更新：定期对健康运行的变压器开展电气试验，采集不同运行年限、不同环境条件下的测试数据，构建基准曲线数据库；采用趋势分析方法，剖析基准曲线随运行时间和环境条件的变化规律，建立动态基准曲线模型；在诊断过程中，根据变压器实际运行情况，调用对应的动态基准曲线进行对比分析，提升诊断准确性。

#### 五、结论与展望

本文对变压器绕组变形三种主流电气试验方法进行了系统对比，明确了各方法的优势与局限性：频率响应分析法诊断灵敏度高但成本高、操作复杂，低电压阻抗法操作简单但灵敏度低，短路阻抗法适用于常规检测但对轻微变形识别能力有限。在此基础上，提出的试验数据预处理、多方法融合诊断、基准曲线优化等策略，可有效提升诊断精度。实例验证表明，多方法融合诊断策略能够实现绕组变形状态的精准判定，为变电站一次设备运维提供可靠技术支撑。

未来研究方向可聚焦于在线监测技术研发，结合物联网、大数据等技术，实现变压器绕组变形的实时监测；同时，进一步优化多方法融合诊断模型，引入机器学习算法提升模型的自适应能力与诊断精度，推动变压器绕组变形诊断技术向智能化、精准化方向发展。

##### [参考文献]

- [1]朱德恒, 严璋. 电气设备绝缘在线监测与诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2]沈其工. 变压器绕组变形测试与诊断[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 145-150.
- [3]李军浩, 司文荣, 袁鹏. 频率响应分析法在变压器绕组变形诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1489-1496.
- [4]王绍禹. 变压器故障诊断与寿命评估[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [5]张血琴, 李金忠, 刘锐. 变压器短路阻抗法与频率响应法融合诊断绕组变形[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2785-2791.