

# 变压器故障检测中电气试验的应用分析

杨艾平 瞿发富 刘毅飞 张绍伟 梁迪团  
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.v6i6.16812

**[摘要]** 本文聚焦变压器故障检测中电气试验的应用。首先分析变压器绝缘、机械、热、电气等常见故障类型及特征;接着阐述绝缘特性、局部放电检测、油务分析等电气试验技术原理;深入探讨电气试验在故障定位、预防性试验与状态评估中的应用;同时指出传统试验技术存在灵敏度不足、时效性受限等局限,展望多传感器融合、人工智能等新技术应用前景。旨在为变压器故障精准检测与预防性维护提供理论支持与实践参考。

**[关键词]** 变压器; 故障检测; 电气试验; 绝缘诊断; 预防性维护  
**中图分类号:** TM408 **文献标识码:** A

## Application Analysis of Electrical Testing in Transformer Fault Detection

Aiping Yang Fafu Qu Yifei Liu Shaowei Zhang Dituan Liang

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

**[Abstract]** This paper focuses on the application of electrical testing in transformer fault detection. Firstly, it analyzes common fault types and characteristics of transformers, including insulation, mechanical, thermal, and electrical faults. Subsequently, it elaborates on the principles of electrical testing technologies such as insulation characteristic testing, partial discharge detection, and oil analysis. The application of electrical testing in fault location, preventive testing, and condition assessment is discussed in depth. Meanwhile, it points out the limitations of traditional testing technologies, such as insufficient sensitivity and limited timeliness, and prospects the application of new technologies like multi-sensor fusion and artificial intelligence. The study aims to provide theoretical support and practical reference for accurate fault detection and preventive maintenance of transformers.

**[Key words]** Transformer; Fault Detection; Electrical Testing; Insulation Diagnosis; Preventive Maintenance

### 引言

变压器作为电力系统的核心设备,其稳定运行关乎电网安全。然而,受电场、热应力、机械应力等因素影响,变压器易出现绝缘劣化、绕组变形等故障,严重威胁电网可靠供电。电气试验作为检测变压器故障的关键手段,能通过测量绝缘电阻、介质损耗因数等参数,精准定位故障点、判断故障类型。深入研究电气试验在变压器故障检测中的应用,对提升故障诊断效率、降低运维成本、保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

### 1 变压器常见故障类型

#### 1.1 绝缘故障

变压器绝缘故障是电力系统中最主要的失效模式之一,其发生比例在110kV及以上变压器事故中高达68%。绝缘劣化主要由电场、热应力、机械应力及环境因素共同作用引发。例如,长期过电压会导致绝缘介质极化加速,而油温异常上升至120℃时,油浸纸绝缘会发生裂解碳化。某500kV变压器因套管受潮,

放电量突增至150pC,经油色谱分析发现乙炔含量超标后及时更换,避免了爆炸事故。绝缘故障的典型表现为泄漏电流增加、局部放电及发热冒烟。检测手段包括绝缘电阻测试(一般110kV及以上套管主绝缘不应低于10000MΩ)。现代监测技术已发展出局部放电在线监测系统,可实时捕捉放电产生的脉冲电流或特高频电磁波。

#### 1.2 机械故障

机械故障主要由短路电磁力、振动或安装缺陷引发。短路冲击时,绕组可能承受达25kA的电流,导致绕组变形或绝缘损坏。变电站500kV变压器在经历短路冲击后,虽未立即故障,但累积效应导致3年后绕组绝缘击穿<sup>[1]</sup>。铁芯夹紧螺栓松动会引发剧烈振动,产生“叮叮当当”的异常声响,同时伴随油面波动。分接开关是机械故障的高发部件。操作误差、密封不严或过渡电阻烧毁均可能导致相间短路。

#### 1.3 热故障

热故障源于局部过热,按严重程度分为轻度过热(120-150℃)、低温过热(150-300℃)、中温过热(300-700℃)和高温过热(>700℃)。过热会导致绝缘材料聚合度下降,生成CO、CO<sub>2</sub>等气体。例如,匝间短路会使油温升高,电源侧电流增大,同时伴随“咕嘟咕嘟”的冒泡声。某变压器因分接开关接触不良,局部温度达350℃,引发油分解产生乙炔,最终导致重瓦斯保护动作跳闸。散热系统失效是热故障的常见诱因,蝶阀堵塞、风扇停转或油泵故障会阻碍热量散发,迫使变压器降负荷运行。变电站主变因冷却器故障,油温较平时升高15℃,经检查发现油流指示器卡滞,清理后温度恢复正常。热故障的预防需加强温度监测,如安装光纤测温系统,并定期清理散热通道。

#### 1.4 电气故障

电气故障包括高电场作用下的绝缘击穿和短路冲击导致的绕组变形。局部放电是电气故障的早期征兆,其能量密度可分为火花放电(10<sup>-6</sup>-10<sup>-4</sup>J)和高能电弧放电(>10<sup>-4</sup>J)。500kV GIS设备因内部气隙放电,产生特高频电磁波,被UHF传感器捕获后提前处理,避免了爆炸事故。短路故障对电气系统的破坏尤为严重,220kV变压器在经历出口短路后,高压绕组变形量达5mm,虽通过直流电阻测试未发现异常,但频响分析显示绕组电感变化超标,最终更换绕组恢复运行。电气故障的预防需完善保护配置,如差动保护、速断保护等,并加强短路容量计算,避免设备过载。

## 2 电气试验技术分类及原理

### 2.1 绝缘特性试验

绝缘特性试验是评估电气设备绝缘状态的核心手段,通过测量绝缘电阻、吸收比、介质损耗因数(tan δ)等关键参数,精准判断绝缘系统的健康程度。绝缘电阻测试采用2500V摇表,测量值需与设备历史数据纵向对比,各种设备要求不一致,一般若发现测量值低于上次值的70%,则需深入排查受潮、老化或机械损伤等问题。吸收比(R<sub>60s</sub>/R<sub>15s</sub>)通过比较15秒与60秒的绝缘电阻值,可有效反映绝缘材料是否受潮,正常值应大于1.3,若低于此阈值,则可能存在绝缘劣化风险<sup>[2]</sup>。介质损耗因数测试利用西林电桥测量tan δ,其数值与绝缘劣化程度呈正相关,例如35kV电缆因受潮导致tan δ从0.3%升至1.2%,经干燥处理后恢复至0.5%,验证了该参数对绝缘状态的敏感性。局部放电测试采用脉冲电流法或特高频法,可精准定位放电源并量化放电量,如110kV变压器在局放试验中检测到5pC的放电脉冲,经检查发现绕组端部存在毛刺,处理后局放量降至0.5pC,有效避免了潜在故障。

### 2.2 特性试验

特性试验聚焦于电气设备的核心性能指标,涵盖电气与机械双重维度。断路器分合闸时间测试通过开关特性测试仪,确保动作时间符合标准要求或厂家规定值,以保障系统快速切除故障的能力。电流互感器变比误差测试通过对比标准源与被试品输出,误差符合绕组精确等级,确保计量与保护的准确性。变压器直流电阻测试可敏锐发现绕组断线或接头开焊等隐蔽缺陷,如10kV变压器在预防性试验中,发现A相直流电阻较其他两相高

20%,经检查为分接开关接触不良,紧固螺栓后电阻恢复正常,避免了运行中发热烧毁的风险。发电机转子绕组绝缘测试采用500V摇表,绝缘电阻应大于0.5MΩ,若低于此值则需进行干燥处理,以防止转子接地引发振动或短路故障。特性试验通过量化关键参数,为设备安全运行提供数据支撑。

### 2.3 局部放电检测

局部放电检测通过捕捉放电产生的电磁波、超声波或化学产物,实现故障的早期预警与精准定位。高频电流互感器(HFCT)法可带电安装于电缆接地线,实时监测放电脉冲,如220kV电缆终端头因密封不良进水,HFCT检测到10kHz的放电脉冲,经紧固螺栓后脉冲消失,有效避免了绝缘击穿事故。特高频(UHF)法通过盆式绝缘子安装传感器,利用300MHz至3GHz的高频电磁波抗干扰特性,适用于GIS设备内部放电检测,如500kV GIS在局放监测中捕获300MHz的电磁波,定位至隔离开关气室,检查发现触头烧蚀,更换后局放量降至1pC,保障了设备可靠运行。超声波法通过分析声波传播时差与频谱特征,常用于变压器套管放电检测,可区分内部放电与外部干扰。局部放电检测技术通过多物理场融合分析,显著提升了故障诊断的准确性与时效性。

### 2.4 油务分析试验

油务分析通过检测油中溶解气体、含水量和击穿电压等指标,全面评估变压器油的物理化学性能及设备内部状态。气相色谱分析可识别故障类型:500kV设备乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)关注值为1μL/L,氢气(H<sub>2</sub>)含量高可能为局部放电,如500kV变压器油中乙炔达8μL/L,经三比值法判断为高温过热,停运检查发现铁芯多点接地,处理后乙炔降至0.2μL/L,验证了气体分析对故障类型的精准诊断能力。油中含水量测试采用库仑法,220kV变压器油含水量应<25mg/L,若超标会显著降低绝缘性能,导致局部放电风险增加。击穿电压测试使用标准油杯,500kV变压器油击穿电压应≥55kV,若低于此值则需进行真空滤油处理,以恢复油的绝缘强度。油务分析通过量化油质指标,为设备状态评估与检修策略制定提供了科学依据,有效延长了变压器使用寿命。

## 3 电气试验在故障检测中的应用分析

### 3.1 故障定位与类型判断

电气试验通过特征参数分析可精准定位故障点并判断故障类型。以35kV电缆终端头放电为例,高频电流互感器(HFCT)检测到15kHz脉冲信号,结合超声波传感器时差定位技术,将故障范围缩小至应力锥部位。解剖检查发现半导体层剥离导致电场畸变,引发局部放电,经修复处理后设备恢复运行<sup>[3]</sup>。油色谱分析结合相位分辨脉冲序列(PRPD)图谱可进一步细化故障类型:内部放电由于电场集中,其图谱通常呈现“兔子耳朵”状特征,放电脉冲在电压峰值附近密集分布;而表面放电因介质界面电场不均,放电脉冲多集中在电压过零点,形成周期性分布特征。变压器绕组变形检测采用频响分析法(FRA),通过注入扫频信号并测量响应特性,生成频响曲线。当设备经历短路冲击后,比较故障前后频响曲线差异,可量化变形程度。例如,220kV变压器在短路故障后,FRA检测显示500kHz频点处幅值下降10dB,结合三维

频响特征分析,判断为中压绕组轴向变形,更换绕组后频响曲线恢复标准形态,验证了检测结果的准确性。

### 3.2 预防性试验与状态评估

预防性试验通过周期性检测可提前发现设备隐患,避免事故扩大。以变电站主变为例,每年开展绝缘电阻、介质损耗因数( $\tan \delta$ )和局部放电测试,2023年试验数据显示 $\tan \delta$ 从0.8%升至1.5%,局放量从2pC增至8pC,结合油色谱分析发现乙炔、氢气等特征气体含量超标,综合判断为铁芯局部过热。停运检查发现铁芯夹件松动导致涡流损耗增加,经紧固螺栓并涂覆绝缘漆后,各项指标恢复正常。状态评估体系结合历史数据、行业标准及环境因素,划分设备健康等级。例如,110kV断路器分闸时间从25ms升至35ms,虽未超过标准限值( $\leq 40$ ms),但通过机械特性曲线分析发现操动机构分闸弹簧疲劳、辅助开关触点烧蚀,导致动作时间离散性增大。结合振动频谱分析,判断存在机构磨损风险,提前安排检修并更换关键部件,避免运行中拒动事故。状态评估通过量化参数变化趋势,实现了从“定期检修”向“状态检修”的转变,显著提升设备运行的可靠性与经济性。

## 4 电气试验的局限性及改进方向

### 4.1 现有技术的局限性

传统试验技术存在灵敏度不足、抗干扰能力差等问题。例如,脉冲电流法虽可定量放电量,但需停电试验,且易受背景噪声干扰。500kV变压器在线监测时,因附近电焊作业产生干扰,误报局放超标,经UHF法复测后排除故障。油务分析的时效性受限,油中气体扩散需数小时至数天,难以实时反映故障。某220kV变压器在短路后,油中乙炔浓度需6小时才达到峰值,期间可能错过最佳处理时机。现有标准按电压等级划分油质要求,未充分考虑设备重要性,如220kV枢纽变压器与末端变压器风险差异。

### 4.2 新技术应用展望

多传感器融合技术可提升诊断准确性。例如,结合UHF、超

声波和DGA数据,通过机器学习算法识别故障类型,准确率达92%。某变电站应用该技术后,成功预警3起潜在故障,避免经济损失约800万元。人工智能在局放图谱识别中表现突出,深度学习模型可自动分类内部放电、表面放电和电晕放电,处理速度比人工快10倍<sup>[4]</sup>。云平台与大数据技术可实现远程会诊,一区域电网将设备试验数据上传至云平台,专家通过比对历史数据和行业标准,实时提供检修建议。2024年,该系统协助处理12起复杂故障,平均修复时间缩短40%。未来,电气试验将向智能化、实时化发展,5G技术可支持高频采样数据传输,VR/AR技术可辅助远程检修,区块链技术可确保数据不可篡改。随着新材料(如纳米复合绝缘)和新技术(如量子传感)的应用,变压器故障检测将更加精准高效,为电力系统安全运行提供坚实保障。

## 5 结束语

电气试验在变压器故障检测中发挥着不可替代的作用,通过多种试验技术可精准定位故障、评估设备状态,为预防性维护提供有力依据。尽管传统试验技术存在一定局限性,但多传感器融合、人工智能等新技术的涌现,为故障检测带来了新契机。未来,随着技术的不断进步,电气试验将朝着智能化、实时化方向发展,进一步提高变压器故障检测的准确性与时效性,为电力系统的安全稳定运行筑牢坚实防线。

### [参考文献]

- [1]韩家英.变压器故障检测中电气试验的应用分析[J].科技资讯,2025,23(14):44-46.
- [2]李贤宁.电气试验在变压器故障分析中的应用分析[J].科学与信息化,2025(1):123-125.
- [3]王明海.电气试验在变压器故障检测中的应用探讨[J].电工技术,2024(z1):305-307.
- [4]曹睿.变压器故障检测中的电气试验分析[J].集成电路应用,2024,41(5):134-135.