

# 变压器常见故障诊断与检修方法研究

王睿阳 郑勇琦 卢 波

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

**摘 要:** 变压器作为电力系统关键核心设备, 运行稳定性直接影响电网供电质量与安全。本文结合变压器结构与工作原理, 系统归类电气、机械、油液温度等常见故障, 对比分析传统诊断、电气试验、油样分析及智能监测等技术的应用特点, 梳理标准化故障检修工艺。同时结合现场运维实际提出预防性管控策略, 有效提升变压器故障排查精度与检修效率, 为电力变压器安全可靠、长效稳定运行提供技术支撑。

**关键词:** 变压器; 常见故障诊断; 检修方法

**引言:** 当前电力电网负荷持续增长, 变压器设备长期高负荷运行, 受绝缘老化、机械振动、环境侵蚀等因素影响, 各类故障频发, 易引发电网跳闸、供电中断等安全隐患。传统故障排查方式较为依赖人工经验, 存在滞后性强、准确率低等问题, 难以适配智能化运维需求。为此, 本文系统研究变压器故障机理、诊断方法与检修技术, 优化运维防控方案, 对保障电网平稳运行具有重要工程应用价值。

## 1 变压器结构原理与常见故障类型分析

### 1.1 变压器基本结构与工作原理

(1) 变压器核心组成结构及各部件功能。变压器由铁芯、绕组、油箱、绝缘套管、分接开关及冷却系统等构成。铁芯为磁路通道, 由硅钢片叠制; 绕组实现电压变换; 油箱盛装绝缘油起绝缘散热作用; 套管引出导线并保证对地绝缘; 分接开关调节电压比; 散热器维持油温稳定。(2) 电磁感应工作原理与电力传输机制。依据法拉第电磁感应定律, 一次绕组通入交流电后铁芯产生交变主磁通, 匝链二次绕组感应出电动势, 电动势与匝数成正比, 通过匝数比实现升降压变换, 完成电能传输<sup>[1]</sup>。(3) 变压器正常运行工况参数标准。电压偏差不超过额定值 $\pm 5\%$ , 频率偏差 $\pm 0.5\text{Hz}$ 以内; 顶层油温限值 $95^{\circ}\text{C}$ , 温升限值 $55\text{K}$ (自然油循环); 绕组热点温度A级绝缘不超过 $98^{\circ}\text{C}$ ; 绝缘性能需满足预防性试验规程要求。

### 1.2 电气类常见故障

(1) 绕组短路、断路及绝缘老化故障。短路包括匝间、层间及相间短路, 由绝缘破损或过电压引发, 导致电流剧增、局部过热。断路因焊接不良或电动力拉断造成。绝缘老化体现为聚合度下降、介损增大, 最终击

穿。(2) 铁芯接地故障、磁饱和异常故障。铁芯必须一点接地, 两点及以上接地形成环流引起局部过热。磁饱和异常导致励磁电流剧增、波形畸变, 产生谐波, 可能引起保护误动。(3) 引线接触不良、套管闪络击穿故障。引线接触电阻过大时发热严重, 烧断引线或产生弧光。套管闪络因表面污秽受潮, 在过电压下沿面放电, 严重时贯穿击穿, 导致炸裂漏油。

### 1.3 机械类常见故障

(1) 铁芯松动、变形及振动异常故障。硅钢片压紧螺栓松动或运输冲击导致铁芯错位, 运行时振动加剧、噪声异常, 严重时损伤绝缘, 引发短路或接地。(2) 绕组移位、松动及机械损伤故障。短路电动力使绕组发生轴向或径向位移、扭曲变形, 绝缘磨损后发展为匝间短路或对地击穿。(3) 散热器、储油柜结构破损故障。焊缝疲劳裂纹或外力碰撞导致散热器渗漏油, 储油柜胶囊破损使绝缘油接触空气, 加速油质劣化。

### 1.4 油液及温度类故障

(1) 变压器油变质、受潮、杂质超标故障。油氧化生成酸性物质和油泥, 介损上升、击穿电压下降。潮气侵入使含水量超标, 固体杂质成为导电桥, 诱发局部放电。(2) 设备过热、温升异常故障。过负荷、冷却失效或局部短路导致温度超限, 按“六度法则”每升温 $6^{\circ}\text{C}$ 绝缘寿命减半, 严重缩短设备运行年限。(3) 漏油、缺油引发的运行故障。密封老化导致渗漏, 油位降至刻度以下时绕组裸露, 绝缘强度骤降, 易引发内部放电, 严重时瓦斯保护动作跳闸。

## 2 变压器常见故障诊断技术与方法

### 2.1 传统人工诊断方法

(1) 外观目视检查、听觉振动检测诊断。外观目视检查通过巡视油箱、套管、散热器等部件,观察渗漏油、裂纹、放电痕迹及锈蚀状况。听觉检测依靠人耳辨别运行声响,正常为均匀“嗡嗡”电磁声,出现“噼啪”放电声预示局部放电,剧烈振动则提示铁芯松动或绕组变形。该方法操作简便但受环境干扰大,依赖人员经验。(2) 温度、油位、压力人工巡检诊断。通过油位计读取油位高度,判断是否存在漏油或假油位。采用温度表监测顶层油温,结合负荷评估温升是否正常。检查压力释放阀动作痕迹、吸湿器硅胶变色程度及瓦斯继电器气体积聚情况,将巡检数据与规程限值比对,但受巡检周期制约,难以捕捉突发异常<sup>[2]</sup>。(3) 故障现象经验比对分析诊断法。运维人员将现场异常现象(油温突升、轻瓦斯动作、差动告警等)与历史典型案例进行特征比对,结合负荷、天气等环境因素综合推理,初步推断故障部位和性质。该方法快速实用,但准确性高度依赖诊断人员的业务素养。

## 2.2 油中溶解气体分析诊断技术

(1) 油中溶解气体检测原理与检测流程。变压器内部发生热故障或放电故障时,绝缘油和固体绝缘材料裂解生成氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、一氧化碳、二氧化碳并溶于油中。检测流程包括现场取油样、实验室气相色谱分析、数据处理与产气速率计算,通过组分含量及增长率判别设备异常状态。(2) 特征气体组分与对应故障类型判定规则。乙炔是放电性故障的标志产物,含量越高表明放电能量越强;乙烯反映高温过热;氢气指示低能放电和受潮;一氧化碳和二氧化碳大量生成提示固体绝缘参与裂解。总烃绝对量及特征气体比值构成故障判断核心依据。(3) 三比值法、大卫三角形法故障诊断应用。三比值法选取  $C_2H_2/C_2H_4$ 、 $CH_4/H_2$ 、 $C_2H_4/C_2H_6$  三组比值编码后对照故障类型表,区分局部放电、低能放电、高能放电及各类过热故障。大卫三角形法将甲烷、乙炔、乙烯归一化后投射于三角形坐标图,通过落点区域直观判定故障性质,两种方法联合使用可提高诊断可靠性<sup>[3]</sup>。

## 2.3 电气试验诊断技术

(1) 绝缘电阻测试、直流电阻测试诊断。绝缘电阻测试采用 2500V 或 5000V 兆欧表测量绕组间及对地绝缘电阻,通过吸收比和极化指数判断受潮或劣化程度。直流电阻测试测量各绕组直流电阻,分析三相不平衡率及历史变化量,检出断股、接头松动及分接开关触头烧蚀缺陷。(2) 变比试验、耐压试验故障检测方法。变比试验测量各分接位置下电压比并与铭牌值比较,

偏差超限提示匝间短路或接线错误。耐压试验包括工频耐压和感应耐压,考核主绝缘和纵绝缘强度,可发现局部缺陷但属破坏性试验需谨慎操作<sup>[4]</sup>。(3) 局部放电试验故障精准诊断技术。局部放电是绝缘劣化早期征兆,采用高频电流法、超声波法或超高频法检测放电脉冲信号,结合相位分辨图谱识别内部放电、沿面放电或电晕放电类型。该技术灵敏度高,可在贯穿性击穿前精准定位缺陷。

## 2.4 新型智能故障诊断技术

(1) 振动信号监测与故障识别技术。在油箱壁布设加速度传感器采集运行中振动信号,经小波包分解提取时频特征,建立振动与绕组变形、铁芯松动的映射关系,通过实时谱与基准谱差异实现机械结构在线评估。(2) 红外测温成像故障诊断技术。利用热像仪捕捉设备温度分布,快速定位套管接头过热、引线接触不良、散热器堵塞等缺陷,可在带电工况下远距离扫描,响应迅速、图像直观,适用于大面积巡视排查。(3) 大数据与人工智能故障预警诊断技术。集成油中气体、温度、负荷、振动等多源在线监测数据,运用深度神经网络等算法进行多参量融合分析,自动识别故障模式并实现早期预警,推动运维从“定期检修”向“状态检修”智能化转型。

## 3 变压器故障针对性检修方法与运维优化策略

### 3.1 电气故障检修方法

(1) 绕组绝缘修复、短路断路故障检修工艺。绕组短路故障需先通过直流电阻和变比试验准确定位短路匝位置,吊芯检查后更换受损线饼或线段,重新包裹绝缘纸并浸渍绝缘漆。对于匝间轻微短路,可采用局部绝缘恢复工艺,用绝缘带紧密缠绕再涂刷快干绝缘漆。断路故障需找到断点,重新焊接导线接头,包覆足够厚度绝缘层,并经耐压试验合格后方可回装。(2) 铁芯接地故障排查与修复方法。先用万用表或绝缘电阻表测量铁芯对地绝缘电阻,若阻值近零则判定存在多点接地。排查方法包括逐级解开接地片,采用交流伏安法或直流电阻法测定接地位置。常见修复措施有:用千分尺塞片清除铁芯与夹件间的金属异物,更换破损绝缘垫块,或在接地回路中串入限流电阻以抑制环流。(3) 套管、引线故障更换与检修流程。套管闪络或击穿后应整套更换,流程包括:排油至套管以下、拆除引线连接头、拆卸套管固定法兰、起吊旧套管并换装新套管,安装后必须进行真空注油和整体耐压试验。引线接触不良检修时拆开接头,打磨氧化层后重新压接或焊接,确保接触电阻合格并涂导电脂防氧化。

### 3.2 机械故障检修方法

(1) 铁芯松动、变形校正与固定检修技术。铁芯松动时按交叉顺序重新紧固压钉螺栓,使用扭矩扳手确保各点压紧力均匀一致。硅钢片翘曲或波浪变形时,用木质锤轻敲校正并用专用夹具压实,矫正后喷涂绝缘防锈漆。若个别硅钢片严重变形无法校正,需抽出更换同规格、同牌号优质硅钢片,组装后测量铁芯对地绝缘及空载损耗,确认合格方可继续组装。(2) 绕组移位复位、加固检修工艺。绕组轴向移位时使用液压千斤顶从端部均匀加压复位,在端圈处加装经干燥处理的绝缘压板,调整压紧弹簧恢复设计预紧力。径向变形时采用专用撑条由内向外撑开内绕组,或收紧外绕组端部绑扎带,严重变形线段需拆除更换,整体完成后浸渍固化,确保绕组动热稳定性能满足要求<sup>[5]</sup>。(3) 设备结构破损部件更换与修复方案。散热器薄板穿孔渗漏时,打磨渗漏点周围氧化层后用氩弧焊补焊,焊后打压至 0.05MPa 保持 30 分钟无渗漏,大面积破损则直接拆换整组散热片。储油柜胶囊破裂时先排空油位至柜体以下,打开端盖取出破损胶囊,装入同规格新胶囊并按标尺调整指示位置,同时检查呼吸器硅胶及连接管路畅通性。

### 3.3 油液与温度故障检修方法

(1) 变压器油过滤、净化、更换处理工艺。油质轻度劣化时采用真空滤油机循环过滤,在 50~60℃下加热、真空脱水脱气、精密滤芯过滤,至击穿电压  $\geq 50\text{kV}$ 、微水  $\leq 15\text{ppm}$ 。油质严重劣化或酸值超标时彻底更换,先热油循环冲洗油箱,排净残油后注入合格新油,静置 24h 后进行油中气体分析确认达标。(2) 设备漏油点位封堵、密封修复方法。阀门及法兰漏油时更换耐油丁腈橡胶密封圈,均匀涂密封胶并对角紧固螺栓,法兰间隙偏差  $\leq 0.5\text{mm}$ 。焊缝砂眼渗漏用高分子金属修补剂冷焊修复,较大裂缝打磨坡口后氩弧焊补焊。大修期内统一检查更换密封件,清除沟槽旧胶残留。(3) 过热故障溯源排查与散热系统优化检修。排查内部过热源时检查分接开关触头接触压力、引线压接点阻值及铁芯绝缘状态,发现缺陷立即修复。散热系统优化包括高压水枪清洗散热管内外壁,更换老化风机轴承及电容器,恢复额定冷却效率。根据顶层油温动态调整冷却器投切策略,大负荷时全部投入,轻负荷时轮换运行。

### 3.4 变压器日常运维优化与故障预防策略

(1) 常态化巡检制度与检测周期优化。建立标准化

巡检路线,明确巡视点位、项目内容和判断标准。日常巡检每日一次,重点巡检每周一次,全面巡视每月一次。根据设备健康状态实施差异化巡检策略,老旧设备或家族缺陷产品缩短巡检周期,状态良好的设备可适当延长周期,优化人力资源配置。(2) 设备定期预防性试验与养护措施。按 DL/T596 规程开展预防性试验,包括每年一次绝缘油简化试验,每三年一次全面绝缘试验。定期更换吸湿器硅胶、补充氮气或维护呼吸器,每年进行一次放水检查和冷却系统试运转。开展季节性养护,雷雨季前检查避雷器,迎峰度夏前清洗散热片,低温前检查油位防凝结。(3) 故障隐患预判与智能化运维管理优化。运用在线监测与离线检测数据融合技术,构建多维度设备健康状态评估模型,对关键参数趋势进行动态追踪与异常预警。部署变压器智能运维管理平台,实现数据自动采集、故障自动诊断、策略自动生成,推动从“事后抢修”向“事前预判”转变,全面提升设备管理的智能化水平。

### 结束语

本文全面梳理了变压器典型故障类型、精准诊断技术与专业化检修方法,形成了一套完整的故障处置与运维优化体系。通过对比各类诊断技术的优劣,结合实际工况制定针对性检修工艺与常态化运维策略,有效弥补了传统运维模式的短板。后续可深化人工智能、大数据技术在故障预判中的应用,持续优化检修方案,进一步提升变压器故障防控能力,保障电力系统安全高效平稳运行。

### 参考文献

- [1] 薛健侗. 基于 VMD 和 WOA-SVM 的变压器绕组松动故障诊断 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(08): 84-90.
- [2] 崔佳佳. 基于 CEEMDAN 小波阈值与 3D-CNN 的变压器铁芯松动故障诊断 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 112-118.
- [3] 冯健. 基于工业智能的电力变压器数字孪生故障诊断方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2025, 46(07): 22-29.
- [4] 龚文洁. 变压器声纹故障诊断研究综述 [J]. 电子与信息学报, 2026, 48(04): 1591-1607.
- [5] 邓祥力. 基于小样本扩展与多模态特征融合的变压器绕组故障诊断 [J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(18): 102-109.