

Research on the fault diagnosis of transformer in electric power system and its automation

Jinxing Li

State Energy Technology (Zhengzhou) Group Co., Ltd., Kaifeng, Henan, 475000, China

Abstract

As the core equipment of the power network, the transformer undertakes the key functions of voltage conversion and electric energy distribution, and its health state directly affects the overall reliability of the power grid. In recent years, the scale expansion of new energy grid connection and the load characteristics are complicated, and the electromagnetic stress and thermal stress borne by transformers have been significantly enhanced, leading to the continuous accumulation of potential fault risks such as winding deformation and insulation aging. The traditional periodic maintenance mode is difficult to meet the real-time monitoring requirements of smart grid; the fusion application of intelligent sensing technology and big data analysis provides a new technical path for transformer status evaluation. Equipment fault diagnosis is gradually shifting from relying on manual experience to the intelligent decision-making mode of multi-source information fusion. This transformation is an inevitable choice for the upgrading of the security protection capability of the power system.

Keywords

power system; automation; transformer fault; diagnosis and research

电力系统及其自动化中变压器故障诊断研究

李金星

国能科技（郑州）集团有限公司，中国·河南 开封 475000

摘要

变压器作为电力网络的核心设备，承担着电压转换与电能分配的关键职能，其健康状态直接影响电网整体可靠性。近年来，新能源并网规模扩大与负荷特性复杂化，变压器承受的电磁应力与热应力显著增强，导致绕组变形、绝缘老化等潜在故障风险持续累积。传统定期检修模式存在滞后性缺陷，难以适应智能电网实时监测需求；而智能传感技术与大数据分析的融合应用，为变压器状态评估提供了新的技术路径。设备故障诊断正从依赖人工经验判断，逐步转向多源信息融合的智能决策模式，这种转变是电力系统安全防护能力升级的必然选择。

关键词

电力系统；自动化；变压器故障；诊断研究

1 引言

电力设备智能化运维体系的构建，推动着变压器故障诊断技术向精准化方向演进。现有研究聚焦于故障特征提取与诊断模型优化，但在实际工程应用中仍面临多维数据整合困难、故障类型交叉干扰等技术瓶颈。当前诊断体系需要兼顾传统电气试验方法的稳定性与新兴智能算法的适应性，这种双重需求促使研究人员探索更符合现场工况的复合诊断策略。本文着重分析绕组过热、铁芯多点接地等典型故障的形成机理，系统梳理油色谱特征气体判据与局部放电图谱的内在关联。文章尝试建立电气参数异常与机械结构劣化之间的映射关系，旨在形成覆盖变压器全生命周期的状态评估框架。

【作者简介】李金星（1989-），女，中国河南濮阳人，本科，工程师，从事电力系统及其自动化研究。

2 电力系统及其自动化中变压器故障类型

2.1 绕组故障

铜导线长期承受短路电流冲击时，相邻匝间绝缘纸在高温下逐渐碳化，局部放电产生的活性粒子加速纤维素分子链断裂（如图1所示）。轴向预紧力不足的绕组遭遇突发短路时，线饼间垫块可能发生位移，导致饼间电容分布异常引发局部过热。纠结式绕组端部漏磁集中区域，循环涡流效应使导线股间产生电位差，绝缘漆膜受损后形成环流腐蚀通道。绝缘油中溶解的酸性物质渗透至绝缘层，与微量水分协同作用引发层间介质损耗角正切值异常升高。绕制工艺缺陷导致的导线表面毛刺在电场集中点诱发爬电现象，持续放电产生的金属颗粒污染油质形成恶性循环。轴向幅向联合压紧结构出现松动时，绕组固有振动频率与铁芯磁致伸缩频率接近可能引发机械共振，加速绝缘紧固件疲劳断裂。绕组温度

梯度分布异常时,热膨胀系数差异造成导线应力集中,晶格滑移形成的微观裂纹逐步扩展为贯穿性缺陷^[1]。



图1 变压器绕组故障示例图

2.2 铁芯故障

铁芯故障的演化过程与磁路异常密切相关,硅钢片叠压工艺缺陷导致接缝处形成闭合涡流通路,交变磁场作用下产生环流过热。绝缘漆膜老化破损的叠片在油浸环境中逐步氧化,边缘毛刺在电场集中区域诱发局部放电,碳化产物沉积形成新的导电通道。铁芯接地铜片安装应力过大可能造成多点接地故障,不平衡电流在接地回路产生附加温升,加速绝缘垫块热分解。磁滞损耗异常增大时,铁芯内部磁畴翻转受阻产生机械应力,硅钢片间摩擦振动引发可听噪声频率变化。制造过程中残留的金属碎屑在油流带动下迁移至铁轭夹件间隙,交变磁通作用下反复切割磁力线形成微放电。温度梯度造成的热膨胀差异使铁芯夹紧螺栓预紧力下降,电磁振动幅值增大导致夹件绝缘垫移位。油中溶解的腐蚀性气体渗透至铁芯表面,与硅钢片氧化层发生化学反应,磁导率局部下降引发漏磁分布畸变。铁芯柱与旁轭连接部位存在气隙时,主磁通路径改变导致附加损耗激增,红外热像图显示异常温升区域呈蝴蝶状分布。长期过励磁运行状态下,铁芯饱和深度增加使得谐波磁通比例上升,加速绝缘材料的介质老化进程^[2]。

2.3 绝缘故障

油浸式变压器的密封结构存在微小缺陷时,空气中的水分子会逐渐渗透至绝缘油层,导致油纸复合绝缘介质的含水量突破临界值。环境湿度长期偏高状态下,绕组表面形成的凝露现象显著提升绝缘纸板的导电特性。设计阶段的电场仿真计算偏差可能使绝缘件承受超出预期的电气应力,加速固体绝缘材料的老化进程。制造环节遗留的绝缘纸褶皱或层间错位缺陷,成为局部放电活动优先发展的薄弱区域。温度循环引起的热机械应力在固体绝缘内部产生微裂纹,这些裂纹通道为放电产物的积累提供空间。运维人员未能及时更换失效的硅胶呼吸器,外界粉尘颗粒伴随呼吸作用进入油箱本体。绝缘套管表面沉积的污秽物在潮湿环境下形成连续导电膜,显著降低沿面闪络电压阈值。在线监测装置若未能准确捕捉介质损耗因子的渐变趋势,绝缘性能的渐进衰退容易被

常规检测忽略。多种致因的交互作用最终导致绝缘系统失去必要的介电强度,引发匝间短路或主绝缘击穿事故。

2.4 冷却系统故障

油泵轴承磨损会降低绝缘油的循环效率,散热器翅片表面积聚的尘埃层阻碍热量向空气的有效传递。潜油泵叶轮气蚀形成的空泡现象,使得油路内部产生异常涡流并伴随振动加剧。控制回路中继电器的触点氧化可能导致冷却装置启停指令的误动作,风冷系统变频器参数漂移会打破预设的温控曲线。散热器与本体连接部位的密封圈老化,使得外部潮气通过微小缝隙侵入油循环管路。设计阶段若未充分考虑极端环境温度的影响,高温时段散热余量不足容易引发油温超限报警。运维人员未能及时清理冷却器进风口的飞絮杂物,空气流通截面积的持续缩减导致热交换效率阶梯式下降。监测系统对油流传感器信号的解析偏差,可能将冷却油路半堵塞状态误判为正常工况。温度探头安装位置的选取不当,使得局部过热点的真实温度未能准确反映在监控界面。看似简单的冷却风扇润滑脂干涸问题,长期累积可能演变为转子卡滞的机械故障。

3 电力系统及其自动化中变压器故障诊断技术

3.1 油色谱分析技术

运维人员定期采集变压器油样时,注射器内残留的空气可能影响溶解气体浓度的检测精度。载气流量参数的设置需要匹配色谱柱的规格型号,柱箱温度的微小波动会改变乙烷与乙烯的流出顺序。热导检测器的桥路电压稳定性直接关系到氢气浓度的测量误差范围,火焰离子化检测器收集极的积碳问题可能导致碳氢化合物响应值漂移。样本预处理环节的振荡脱气时间不足,部分溶解气体未能充分释放至集气装置。色谱工作站对重叠峰的解析算法直接影响二氧化碳与一氧化碳的定量准确性,基线噪声的异常抬升可能掩盖微量乙炔的检出。诊断模型需要整合三比值法与大卫三角形法的优势,不同编码组合对应着放电性故障与过热性故障的差异化特征。特征气体产气速率的计算需考虑变压器负载率的动态变化,避免将正常工况下的短时过载误判为潜伏性缺陷。

3.2 局部放电检测技术

特高频传感器的检测频段通常选择 300MHz 至 3GHz 范围,这个区间能够有效避开变电站常规干扰源的频谱分布。脉冲电流法的分辨率需要达到 pC 级别,电流互感器的频响特性在 2MHz 带宽内需保持平坦响应。运维人员容易忽略的是,前置放大器的输入阻抗匹配程度直接影响微弱放电信号的保真度,50Ω 阻抗失配可能造成信号反射损耗。超高频检测装置的本底噪声控制在 -80dBm 以下时,才能可靠识别油纸绝缘中 0.5mm 级别的气隙放电。高速采集卡的采样率需满足 1GS/s 以上条件,才能完整记录纳秒级放电脉冲的波形细节。相位分辨模式需要同步工频电压信号,电压相位的采样精度应优于 0.1°。模式识别算法需要处理 PRPD 谱图中的散点聚类特征,卷积神经网络对三维谱图的识别准

确率比传统统计方法提升约 15%。现场环境中,无线通信基站的 2.4GHz 频段辐射可能淹没真实放电信号,这时需要启用带阻滤波器抑制特定频点。暂态地电压检测法的探头灵敏度设置为 60dB μ V 时,能够有效检测开关柜绝缘子表面的沿面放电。分布式光纤传感系统需要控制 FBG 栅区的温度灵敏度系数在 10pm/ $^{\circ}$ C 以内,避免环境温漂掩盖真实的应变信号。时频联合分析时,小波变换的分解层数选择影响放电脉冲的时域定位精度,通常选用 db4 小波进行 6 层分解。多源信息融合诊断时,特高频信号与超声波信号的时差定位误差需控制在 2ns 以内,对应的空间分辨率约为 0.6 米。

3.3 电气试验技术

直流电阻测试仪需要补偿环境温度对铜导体电阻率的影响,测试电流的稳定度应优于 0.5% 才能发现分接开关触头的微欧级接触电阻异常。绝缘电阻测试时,吸收比与极化指数的计算需消除环境湿度对表面泄漏电流的干扰,60 秒与 600 秒的定时测量误差需控制在 ± 3 秒范围内。介质损耗角测试仪施加 10kV 工频电压时,油纸复合绝缘的 $\tan\delta$ 值超过 0.5% 可能暗示局部受潮或老化加速。感应耐压试验中,200Hz 倍频电源的输出谐波含量需低于基波的 2%,避免高频分量引发铁芯磁饱和造成的试验数据失真。绕组变形测试仪依靠频响曲线的相关系数分析结构位移,1kHz 至 2MHz 范围内幅值差异超过 3dB 可能预示轴向或辐向的机械形变。有载分接开关的过渡波形录波装置需要捕捉 10ms 时间窗内的动态电阻变化,时间分辨率达到 0.1ms 级别才能识别触头弹跳现象。铁芯接地电流监测需要考虑夹件绝缘电阻的分布参数影响,10mA 的持续电流阈值设置需结合油中含水量指标综合判断。电容型套管末屏引线的接触电阻测量需采用四线制微欧表,测试导线长度超过 10 米时需修正线路电阻引起的系统误差。温升试验过程中,顶层油温与热点温度的换算模型需考虑散热器投运组数的动态调整,光纤测温系统的空间分辨率需达到 5cm 级别。

3.4 智能诊断技术

数据预处理环节需要解决油色谱数据与电气试验结果

的采样周期差异,时间序列对齐算法采用三次样条插量法补偿不同步采集带来的相位偏移。随机森林算法处理绕组变形频响曲线时,特征提取模块需要消除检测仪器型号差异导致的频点幅值系统偏差。长短期记忆网络对局部放电脉冲序列的处理能力,受限于放电事件间隔时间的统计分布特性,时间窗口长度通常设置为工频周期的整数倍。迁移学习技术能够缓解不同变电站设备数据分布差异带来的模型泛化问题,特征解耦模块需要分离设备固有特性与故障特征的相关性。知识图谱的实体关系定义需涵盖历史检修记录与家族缺陷信息,图谱推理引擎的响应延迟需控制在 200ms 以内以满足实时诊断需求。边缘计算节点的部署需要考虑暂态录波数据的压缩传输,小波包分解的层次选择影响特征信息的保留率。强化学习策略在诊断策略优化中的应用,需要平衡探索性随机动作与设备安全运行约束之间的冲突。对抗生成网络产生的合成数据,需通过油中溶解气体生成规律校验模块剔除物理规律矛盾的伪样本^[3]。

4 结语

变压器故障诊断技术的持续进步,为电力系统安全经济运行提供了有力支撑。研究证实,融合电气特征量与化学监测数据的综合诊断方法,可有效提升潜伏性故障识别率。建议运维单位建立设备状态数据的动态评价体系,将智能诊断结果与传统预防性试验有机结合。未来技术发展应重点关注多物理场耦合模型的构建,通过电磁-热-机械应力的协同分析提升故障预判能力。诊断知识库的持续完善与自学习机制的结合,有望形成具有进化能力的智能诊断生态系统。

参考文献

- [1] 张友. 电力系统及其自动化中变压器故障诊断研究 [J]. 模具制造, 2023, 23 (10): 166-168.
- [2] 湛牧晨. 浅析电力系统自动化中物理知识的应用 [J]. 中学物理教学参考, 2018, 47 (14): 75-76.
- [3] 陈歆技. 电力系统智能变电站综合自动化实验教程[M]. 南京东南大学出版社: 201803. 206.