

# 电力变压器电气和结构设计常见问题及处理方法分析

何云飞

保定天威集团特变电气有限公司 河北 保定 071000

**摘要:** 电力变压器电气设计常见问题包括空载损耗、负载损耗超标, 多因硅钢片材质、叠片工艺、绕组导线选型及杂散损耗控制不当所致, 可通过优化材料、改进工艺、合理设计绕组结构解决。结构设计问题主要有动稳定性不足、密封老化渗漏等, 需强化短路电动力分析、改进紧固工艺、选用耐老化密封材料。故障处理应结合油色谱分析、电气试验等手段, 精准定位故障点并采取针对性措施。

**关键词:** 电力变压器; 电气; 结构设计; 常见问题; 处理方法

## 引言

电力变压器是电力能源转换与传输的核心枢纽, 其性能优劣直接关乎电网的稳定运行。但在实际工程应用中, 受设计理念、制造工艺及运行环境等多重因素制约, 变压器电气设计常面临损耗偏高、绝缘缺陷等问题, 结构设计则易出现密封失效、散热不良等隐患。本文聚焦电气与结构设计中的典型问题, 结合实际案例剖析成因, 并提出针对性处理措施, 为提升变压器设计质量提供技术参考。

## 1 电力变压器电气设计常见问题及优化策略

### 1.1 损耗问题与设计优化

#### 1.1.1 空载损耗问题

(1) 影响因素: 硅钢片材质的磁导率直接决定磁滞损耗大小, 高导磁材料可显著降低损耗; 叠片工艺中叠片对齐度与紧实度影响磁路完整性, 松散叠片会增加磁阻; 接缝设计的间隙宽度直接关联漏磁损耗, 间隙越大损耗越高; 磁滞损耗与硅钢片的磁滞回线面积正相关, 涡流损耗则与硅钢片厚度的平方成正比。(2) 典型案例: 某220kV电力变压器出厂检测时, 空载损耗较设计值超出18%。拆解检查发现, 铁心叠片接缝平均间隙达0.3mm(设计值0.1mm), 漏磁导致涡流损耗激增, 且部分硅钢片毛刺超标造成叠片绝缘破坏, 最终需重新拆解叠装才满足标准要求。(3) 优化措施: 采用步进搭接结构使接缝错位分布, 减少连续漏磁通道, 可降低接缝损耗15%以上; 通过精密裁切控制硅钢片毛刺高度 $\leq 0.02\text{mm}$ , 避免叠片间绝缘损伤; 选用35W250等高导磁率硅钢片, 其比损耗较普通材料降低20%-30%。

#### 1.1.2 负载损耗问题

(1) 绕组导线直流电阻损耗: 优先选用电阻率 $\leq 0.017241\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 的无氧铜材, 替代普通电解铜降低基础损耗; 根据额定电流与温升限制优化横截面积, 采用

电流密度 $2.5\text{-}3.5\text{A}/\text{mm}^2$ 的设计区间, 避免过细导线导致损耗超标<sup>[1]</sup>。(2) 杂散损耗与涡流损耗: 通过三维仿真模拟漏磁通分布, 优化绕组排列抑制漏磁扩散; 对大电流绕组采用多股并联换位导线, 将涡流损耗控制在直流损耗的5%以内, 避免导线尺寸过大引发的集肤效应损耗。

(3) 典型案例: 某500kV大型变压器试运行, 低压绕组温度较设计值偏高 $22^\circ\text{C}$ 。经场路耦合仿真分析, 发现低压绕组导线单根截面积过大( $120\text{mm}^2$ ), 集肤效应导致局部涡流损耗激增, 改为4股 $30\text{mm}^2$ 导线并联换位后, 温度恢复正常。

#### 1.1.3 附加损耗控制

(1) 引线设计: 采用绕组与引线复合漏磁场仿真模型, 优化引线路径使其避开夹件等金属结构件的高漏磁区域; 对大电流变压器采用引线重合布置方式, 使漏磁场相互抵消, 可降低结构件损耗69%以上。(2) 冷却系统效率提升: 按油流路径优化散热器间距与排列角度, 确保散热面积利用率 $\geq 90\%$ ; 选用能效等级2级以上的潜油泵, 其运行损耗较普通油泵降低30%, 同时匹配智能调速系统避免冗余能耗。

## 1.2 噪音与振动问题

### 1.2.1 空载噪音来源

(1) 磁致伸缩效应: 将硅钢片工作磁密度控制在 $1.55\text{-}1.6\text{T}$ 区间, 避免接近饱和磁密导致磁致伸缩量激增; 采用斜接缝与全斜结构铁心, 减少接缝处的磁致伸缩应力集中, 可降低噪音 $3\text{-}5\text{dB}$ 。(2) 结构共振: 在油箱底部与基础间设置 $50\text{mm}$ 厚弹性防震胶垫, 选用肖氏硬度 $50\text{-}60$ 的丁腈橡胶材质, 有效吸收低频振动; 在油箱内壁敷设 $30\text{mm}$ 厚离心玻璃棉隔音层, 配合阻尼涂层抑制结构振动传递, 可降低辐射噪音 $8\text{-}10\text{dB}$ <sup>[2]</sup>。

### 1.2.2 负载噪音控制

(1) 线圈振动抑制: 采用频谱分析技术识别线圈

固有频率，通过调整导线张力改变刚度常数，避开11-13kHz等敏感频率区间；对绕组进行预紧处理，提升整体刚度，减少电磁力引发的振动幅值。（2）典型案例：某110kV自冷式变压器投运后，周边居民投诉噪音超标（实测62dB）。检测发现冷却系统散热片与油箱共振，通过在散热片连接处加装阻尼垫片、优化油道结构提升散热效率，最终噪音降至52dB，满足居民区标准要求。

### 1.3 绝缘与接地设计问题

#### 1.3.1 主绝缘结构缺陷

（1）绕组间绝缘：采用薄纸筒小油隙结构，油隙宽度控制在5-8mm，利用油的高耐电强度优化电场分布；通过有限元仿真调整绝缘间距，使绕组间电场不均匀系数 $\leq 1.2$ ，避免局部场强集中。（2）绕组端对地绝缘：在绕组端部设置2-3级静电环，配合锥形角环形成梯度电场；选用介损 $\leq 0.5\%$ 的绝缘纸板，严格控制加工精度避免毛刺，将局部放电量抑制在5pC以下。

#### 1.3.2 接地系统设计

（1）功能性接地与保护性接地分类：功能性接地包括工作接地（保障电压稳定）、信号接地（抑制干扰）；保护性接地涵盖防雷接地（泄放雷电能量）、安全接地（防止设备漏电），两类接地需独立引线避免干扰。（2）接地电阻值要求：共用接地装置时，单台容量 $> 100\text{kVA}$ 的变压器工作接地电阻 $\leq 4\Omega$ ； $\leq 100\text{kVA}$ 的变压器接地电阻 $\leq 10\Omega$ ；土壤电阻率 $> 1000\Omega\cdot\text{m}$ 的地区可放宽至 $30\Omega$ ，且需定期检测确保长期稳定。

## 2 电力变压器结构设计常见问题及改进方案

### 2.1 机械稳定性问题

#### 2.1.1 动稳定性不足

（1）短路电流冲击下的绕组变形：采用三维场路耦合仿真进行动态电动力分析，精准计算径向压应力与轴向压缩力分布，径向力需重点校核外绕组拉应力与内绕组弯曲应力。抗短路能力强化可采用成型硬纸筒支撑、增加绕组撑条密度（间距 $\leq 150\text{mm}$ ），低压绕组选用宽截面导线提升刚度，配合恒压干燥工艺（3MPa压力保持20h）确保绕组紧实度<sup>[3]</sup>。（2）典型案例：某110kV变压器发生出口三相短路，短路电流达额定值28倍，因低压绕组未采用拉紧装置，线饼松动产生轴向位移，导致绕组间绝缘磨损击穿，器身烧毁。拆解发现撑条间距超200mm且未预密化处理，垫块收缩造成绕组间隙过大。

#### 2.1.2 结构件疲劳与松动

（1）铁芯夹件、穿心螺杆松动：优化紧固工艺，夹件螺栓采用力矩扳手按 $120\text{N}\cdot\text{m}$ 标准紧固，螺杆两端加装防松螺母与弹性垫圈。应用振动加速度传感器实时

监测，设定预警阈值 $\geq 0.5\text{g}$ ，结合频谱分析判断松动部位，可提前6个月发现潜在故障。（2）波纹管安装偏差：采用激光对中仪控制同心度误差 $\leq 0.5\text{mm}$ ，在波纹管两端设置限位螺栓，螺栓与法兰间隙留设2mm补偿量，避免热胀冷缩导致的轴向受力变形。

### 2.2 密封与防渗漏问题

#### 2.2.1 密封胶垫老化

（1）材料选择：选用氟橡胶或丁腈橡胶垫片，要求耐油等级 $\geq \text{GB/T528}$ 标准，在 $120^\circ\text{C}$ 热油中浸泡72h体积变化率 $\leq 5\%$ ，压缩永久变形 $\leq 20\%$ ，使用寿命延长至10年以上。（2）安装工艺：制定分级紧固力矩标准（法兰直径 $\leq 300\text{mm}$ 为 $80\text{N}\cdot\text{m}$ ， $300-500\text{mm}$ 为 $150\text{N}\cdot\text{m}$ ），采用平面度检测仪控制密封面公差 $\leq 0.02\text{mm/m}$ ，装配前涂抹硅酮密封胶增强密封性。

#### 2.2.2 阀门与连接件缺陷

（1）阀门无开闭指示：强制采用304不锈钢材质阀门，耐受压力 $\geq 1.6\text{MPa}$ ，在阀体醒目位置设置红（关）绿（开）双色标识，配备旋转式指针刻度盘，指示精度 $\pm 5^\circ$ ，并标注操作方向箭头。（2）典型案例：某220kV变压器投运前，瓦斯继电器连接阀门未完全开启，运行中油流阻塞导致油箱内压力升至 $0.15\text{MPa}$ ，触发压力释放阀动作，油液渗漏。经核查为阀门无明确指示，操作人员误判开闭状态所致<sup>[4]</sup>。

### 2.3 散热与油路设计问题

#### 2.3.1 冷却系统效率低下

（1）散热器堵塞：优化滤网结构为双层不锈钢网（外层孔径2mm，内层0.5mm），滤网面积扩大至油道截面积的1.5倍，设置压差报警装置（压差 $\geq 0.03\text{MPa}$ 时报警），规定每6个月进行高压水冲洗维护。（2）油流分布不均：采用流线型导油板设计，在绕组上下端设置环形集油腔，导油板倾斜角度 $15^\circ$ 引导油流，根据绕组热负荷分布匹配油泵流量（每 $100\text{kVA}$ 损耗对应流量 $\geq 0.5\text{m}^3/\text{h}$ ），通过仿真确保油流均匀系数 $\geq 0.85$ 。

#### 2.3.2 油位与油温监测缺陷

（1）空心油位计浮球破裂：改进为双层不锈钢浮球结构，内层充氮气（压力 $0.02\text{MPa}$ ），外层壁厚 $\geq 0.8\text{mm}$ ，在真空注油时采用阶梯式降压工艺（从 $-0.1\text{MPa}$ 逐步回升至常压），避免浮球内外压差过大导致破裂。（2）油温计误差：采用铂电阻温度传感器（精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ），每季度进行校准，传感器插入深度 $\geq 150\text{mm}$ 且避开油流死角。设定顶层油温限值 $\leq 95^\circ\text{C}$ ，温升超过 $55\text{K}$ 时自动启动冷却辅助装置，误差控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内。

## 3 电力变压器故障诊断与综合处理措施

### 3.1 故障分类与特征分析

#### 3.1.1 显性故障

(1) 外观异常: 防爆筒破裂多伴随喷油现象, 通常因内部短路导致压力骤升(超过压力释放阀动作值 0.15MPa)引发, 需立即核查内部故障源; 套管闪络表现为瓷裙表面出现烧伤痕迹或放电通道, 潮湿环境下更易发生, 严重时伴随套管破裂漏油; 渗漏油按部位可分为法兰接缝、阀门接口、散热器焊缝渗漏, 油迹扩散速率  $\geq 0.5\text{mL/h}$  即为严重渗漏, 需定位密封失效点。(2) 声音异常: 内部短路产生的爆裂声具有突发性, 伴随电流骤升与保护动作, 短路点高温会导致油质迅速劣化; 绝缘击穿的放电声呈“噼啪”持续性声响, 分接开关接触不良时还会夹杂“滋滋”声, 可通过听音棒在油箱壁不同位置判断故障大致区域, 放电声越清晰表明故障点越靠近检测点。

#### 3.1.2 隐性故障

(1) 气体继电器动作: 轻瓦斯动作多因注油时空气未排净或呼吸器堵塞导致油位下降, 气体体积聚量达 250-300mL 时触发报警, 此时油色通常无明显变化; 重瓦斯动作由内部严重故障引起, 故障点产生的大量气体推动油流冲击挡板, 动作时间  $\leq 0.5\text{s}$ , 同时伴随油温和油位异常波动, 需立即停运检查。(2) 油色谱分析: 采用三比值法判断故障类型,  $\text{H}_2$  含量  $> 100\mu\text{L/L}$  且  $\text{CH}_4$  增长率  $> 5\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{d})$ , 提示绝缘纸轻度老化; 若出现  $\text{C}_2\text{H}_2$  (乙炔) 且含量  $> 5\mu\text{L/L}$ , 大概率存在放电故障; 总烃含量  $> 150\mu\text{L/L}$  时, 需结合介损测试进一步评估绝缘状态, 绝缘老化时介损值会较初始值上升 30% 以上。

### 3.2 故障处理流程与案例

#### 3.2.1 紧急停运条件

严格遵循“两票三制”原则, 出现以下场景立即停运: 严重漏油导致油位低于油位计下限且无法补油; 油箱冒烟着火, 火焰高度超过 1m; 内部发出持续爆裂声, 伴随绕组温度骤升 (10min 内升温  $\geq 10^\circ\text{C}$ ); 套管爆炸或闪络接地, 出现明显接地电流; 瓦斯继电器重瓦斯动作且差动保护同时跳闸, 严禁强行送电。停运操作需先断开低压侧断路器, 再拉高压侧隔离开关, 悬挂“禁止

合闸”标示牌。

#### 3.2.2 典型案例分析

(1) 案例1: 某 500kV 变压器运行中轻瓦斯连续动作, 每日排气后次日仍报警。检查发现呼吸器硅胶全部受潮变色(正常为蓝色, 受潮后呈粉红色), 且呼吸管存在弯折堵塞, 导致油箱内形成负压, 空气从密封薄弱处渗入。处理时先释放油箱内积聚气体, 更换粒径 3-5mm 的变色硅胶(填充量为呼吸器容积的 80%), 理顺呼吸管并测试通气性, 重启后观察 72h, 轻瓦斯未再动作, 油色谱分析特征气体含量恢复正常。(2) 案例2: 某 220kV 变压器投运后出现异常“咕噜”声, 顶层油温较同类设备偏高  $12^\circ\text{C}$ , 过流保护多次发预警。油色谱检测显示总烃含量  $180\mu\text{L/L}$ 、乙炔含量  $8\mu\text{L/L}$ , 直流电阻测试发现低压绕组 A 相电阻较 B、C 相低 4%。吊罩检修可见 A 相绕组第 12-15 线饼绝缘纸碳化, 匝间导线绝缘破损。更换同规格导线重新绕制故障段, 经  $80^\circ\text{C}$  真空干燥 12h 后复装, 注油后开展耐压试验(施加 1.3 倍额定电压持续 1min), 试运行 48h 后声音、油温均恢复正常, 油色谱指标达标。

#### 结束语

电力变压器电气与结构设计的质量, 直接决定了其在电力系统中的运行效能与安全性。本文通过系统分析损耗控制、绝缘优化、动稳定性强化、密封防渗漏等关键环节的典型问题, 结合工程实践提出了材料选型优化、工艺改进及智能监测等解决方案。未来需进一步融合数字化仿真技术与新型材料, 推动变压器向高效、低噪、长寿命方向发展, 为构建高可靠性电网提供坚实设备支撑。

#### 参考文献

- [1] 侯义明, 张亚杰, 刘新颜, 张韶承, 刘晓亮. 变压器引出线结构研究[J]. 变压器, 2024, 61(02): 17-19.
- [2] 翁凌云, 戴伟, 魏星, 等. 箱式电力电子变压器功率阀塔结构设计[J]. 机械与子, 2020, 38(9): 37-40.
- [3] 朱晓清, 王焯, 宋瑞宏. 大型变压器器身装配架的结构设计与制造[J]. 科技创新与应用, 2020, (31): 79-80.
- [4] 吕圣永. 优化变压器结构设计与制造工艺的措施研究[J]. 数码设计(下), 2020, 9(3): 99.