

变电站主变压器过载运行状态下温升变化规律与设备绝缘寿命影响研究

魏旭东 李鸿义

内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

【摘要】：为解决主变压器过载运行中温升规律不明、绝缘寿命衰减风险突出及管控不足等问题，本文结合实际工况，探究过载状态下主变压器各部件温升变化特征，分析温升对油纸绝缘系统的劣化机制及安全风险。采用动态热路模型、相对老化率-时间积分法等手段，精准量化温升变化规律与绝缘老化关联，提出涵盖实时监测、冷却优化、定期巡检的协同防护方案。研究明确了过载温升的阶段性与非线性特征，建立了科学的绝缘寿命评估方法，验证了防护方案的有效性，为过载工况下主变压器安全运维提供技术支撑，完善了相关运维理论。

【关键词】：主变压器；过载运行；温升规律；绝缘寿命；油纸绝缘

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.040

引言

主变压器作为变电站能量转换与传输的核心设备，其运行稳定性直接决定电网供电可靠性。随着用电负荷峰值攀升、新能源大规模并网及电网故障应急需求增加，主变压器过载运行场景日益频繁，过载引发的温升异常的问题愈发突出。温升过快会加速设备绝缘系统劣化，缩短绝缘寿命，甚至诱发绝缘击穿等重大故障，威胁电网安全稳定运行。当前针对过载工况下温升变化的动态规律、热点温度精准预测，以及温升与绝缘寿命衰减的内关联仍存在研究缺口，因此开展相关研究，明确温升变化特征、建立绝缘寿命评估方法并提出防护方案，具有重要的工程实践意义与理论价值。

1 主变压器过载运行温升及绝缘寿命问题提出

1.1 主变压器过载运行的实际工况及现存短板

主变压器过载运行多发生在用电高峰时段、电网故障倒闸操作期间或新能源并网冲击场景，实际工况中过载负荷多为短时骤增或持续超负荷，负荷波动幅度可达额定负荷的1.2至1.5倍，且常伴随环境温度变化、冷却系统工况不稳定等附加影响因素。实际运行中，过载状态下主变压器绕组、铁芯及油箱的温升速率存在明显差异，绕组温升因电流热效应增速最快，铁芯温升受磁滞损耗影响呈渐进式上升，油箱温升则受散热条件制约滞后于绕组和铁芯。现存短板集中体现在过载工况监测精度不足，多依赖传统测温手段，无法实时捕捉绕组内部热点温升，且缺乏针对不同过载时长、负荷等级的差异化温升控制策略，同时对过载过程中温升与绝缘老化的关联机制掌握不充分，难以提前预判绝缘性能劣化趋势，易因温升管控不当埋下设备安全隐患。

1.2 过载运行中温升变化的未知规律及核心难题

主变压器在各异过载倍数、持续时段及冷却条件耦合影响下的温升变化过程呈现明显非线性特质，内部各组件温度升高分布不均衡且动态反应存在较大差别，目前尚未建立统一精准的温升变化量化模式^[1]。绕组热点温度作为温升管控核心指标，过载各阶段的上升快慢、峰值大小与温度滞后现象难以依靠传统经验公式精准预估，不同负荷上升快慢对应的温升突变临界状态缺乏清晰判定标准。过载期间绝缘油对流换热特质、固体绝缘与油介质间的热传递效果会随温度攀升动态调整，复杂热传导与热对流耦合机理仍未彻底厘清，相关关联规律缺少长期试验数据佐证，热点温度临界值与过载允许运行时段的匹配仍有较多模糊之处，构成绝缘寿命损耗机理深入剖析的核心技术障碍。

1.3 温升作用下设备绝缘寿命的衰减问题及风险

主变压器绝缘系统以油纸绝缘为核心，其寿命与运行温度呈显著负相关，温升作用下绝缘寿命的衰减具有明确的不可逆性。当过载导致设备温度超过额定运行温度时，绝缘油会发生热氧化反应，生成酸类、胶质等劣化产物，降低油的击穿电压和绝缘性能，同时绝缘纸会出现纤维素降解、聚合度下降，导致机械强度降低、脆性增加，易出现开裂破损^[2]。温升还会加剧绝缘内部电场分布不均，引发局部放电现象，放电产生的高能粒子会进一步破坏绝缘分子结构，加速绝缘老化速率。此外，长期温升会导致绝缘材料热胀冷缩频繁，产生热应力，使绝缘层与绕组、铁芯的结合面出现缝隙，形成绝缘薄弱环节，一旦遭遇电网过电压等扰动，极易发生绝缘击穿，引发主变压器故障停运，造成重大经济损失和电网供电中断风险。

2 主变压器过载温升及绝缘寿命问题的解决研究

2.1 过载状态下温升变化规律的精准探究

过载工况下主变压器的温升演变呈阶段性推进特征,其变化过程与过载时长、设备内部导热路径及散热系统运行状态密切相关(见图1)。过载初期,绕组与铁芯因损耗急剧增加产生大量热量,热能先在绕组内部积聚,温升上升速度较快,绕组温升明显高于铁芯及油箱表面,内外温差显著。随着过载时间延长,热量通过绕组绝缘介质、铁芯叠片逐步传导至油箱,再经油箱散热部件与冷却装置向外界散发,温升增速逐渐放缓并向热平衡状态过渡。绝缘介质导热性能、绕组成型工艺均会影响温升分布,绕组端部及引线连接处因散热条件较差,温升高于绕组中段,且过载负荷越大,局部温升差异越明显。冷却系统运行效率直接决定温升稳定所需时间及最终稳定温升水平。

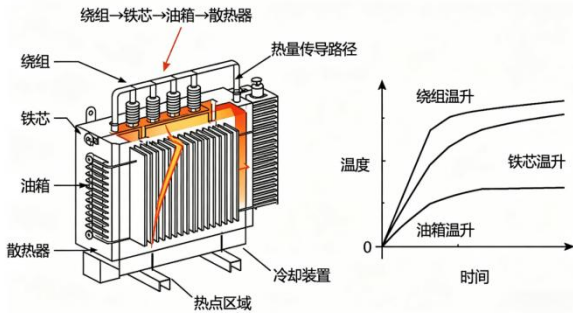


图1 主变压器内部热量传导路径及过载工况下各部件温升变化规律

2.2 温升对绝缘寿命影响的科学判定方法

在油浸式电力变压器运行管理中,绕组热点温度是决定绝缘老化速率的核心参量。依据蒙辛格规则的热老化6度法则,在80至140摄氏度温度区间内,油纸绝缘老化率随温度升高呈规律性变化:绕组热点温度每增加6开尔文,绝缘老化率增加一倍。以98摄氏度为基准参照点,此时相对老化率定义为1;当热点温度升至104摄氏度时,相对老化率增至2;降至92摄氏度时则减为0.5。基于这一量化关系,可采用“相对老

参考文献:

- [1] 黄正勇,周少喻,王向东,等.配电变压器过载油纸绝缘老化特性研究[J].电气化铁道,2021,32(04):17-22.
- [2] 刘梦娜,江翼,罗传仙,等.三元混合绝缘油变压器过载能力分析[J].绝缘材料,2023,56(01):77-81.
- [3] 杨喻清,刘君,付胜军,等.油浸式电力变压器过载能力评估算法及工程应用研究[J].电力大数据,2024,27(02):54-61.

化率-时间积分法”计算绝缘寿命损失。将变压器实际运行周期内的负载电流、环境温度及冷却装置状态等参数输入动态热路模型,即可实时计算绕组热点温度分布。将该温度值对应的老化率对运行时间进行积分或分段累加,所得数值即为该时段内的相对寿命损失值。此方法将绝缘劣化过程转化为可量化的数学表达式,为评估过载运行对设备寿命的累积效应提供了科学依据。

2.3 适配过载工况的绝缘寿命保护实施方案

适配过载工况的绝缘寿命保护实施方案需结合主变压器过载温升特性与绝缘老化机制,依托实时监测系统实现过载状态下的动态调控与精准防护。方案需搭建完善的温升实时监测体系,覆盖绕组、铁芯及油浸部位,实时捕捉过载过程中各关键部位的温度变化,结合绝缘老化特性设定分级预警阈值,避免温度骤升对绝缘材料造成不可逆损伤^[3]。优化主变压器冷却系统运行模式,根据过载时长、负荷强度动态调整冷却装置的投入组数与运行功率,通过强制风冷、油循环加速等方式快速散发热量,抑制温升过快上升。此外,需建立过载工况下的绝缘状态巡检机制,定期对绝缘油介损、绕组绝缘电阻等关键指标进行检测,及时发现绝缘劣化隐患并采取针对性处理措施,通过动态调控与精准防护的协同作用,最大限度降低过载运行对主变压器绝缘寿命的影响,保障设备在过载工况下的安全稳定运行。

3 结语

主变压器过载运行的温升变化具有显著阶段性与非线性特征,绕组、铁芯及油箱温升响应存在差异,热点温度是影响绝缘寿命的核心因素。研究明确了温升与油纸绝缘老化的量化关联,基于热老化法则建立的寿命评估方法,为绝缘损耗测算提供了科学支撑。适配过载工况的监测、冷却与巡检协同防护方案,可有效抑制温升过快上升,降低绝缘劣化风险。该研究破解了过载温升规律与绝缘寿命关联的核心难题,完善了过载工况下设备运维理论,为电网高峰负荷、故障倒闸等场景下主变压器安全运行提供技术保障,也为后续更复杂工况下的相关研究奠定基础。