

高温环境下变压器绝缘材料性能研究

宋兆文 李 俊

特变电工沈阳变压器集团有限公司 辽宁 沈阳 116600

摘 要：变压器绝缘材料的耐高温性能直接决定设备运行可靠性，本文聚焦95-120℃高温范围，研究油浸纸、聚酰亚胺薄膜等常用绝缘材料的性能变化。通过多温度梯度、多老化时长实验，分析高温下材料介电、机械及理化性能衰减规律，探究热老化微观机理与影响因素，构建寿命预估模型，提出材料改性、散热优化及维护策略，结合工程案例验证有效性，为高温环境下变压器绝缘系统设计、维护及寿命评估提供理论与工程支撑。

关键词：高温环境；变压器；绝缘材料；性能研究

引言：随着电力系统负荷提升及极端环境增多，变压器常处于高温工况运行，而绝缘材料是保障设备安全的核心，高温易加速其老化失效，引发设备故障。依据IEC、DL/T572-2010标准，高温工况对绝缘材料性能提出严苛要求。当前研究多侧重单一材料性能，对油纸协同老化及多因素耦合影响关注不足，因此开展高温环境下变压器绝缘材料性能研究，对提升设备稳定性、降低故障发生率具有重要现实意义。

1 变压器绝缘材料基础及高温环境特性

1.1 变压器常用绝缘材料分类及特性

(1) 固体绝缘材料：变压器油浸纸由纤维素纤维与变压器油复合而成，结构致密，介电强度高、机械韧性好，耐热等级可达A类；聚酰亚胺薄膜具有耐高温、耐辐射特性，介电损耗低，适用于高温区域；环氧树脂绝缘性优良、机械强度高，常用于变压器绕组封装，耐热性和耐腐蚀性突出。(2) 液体绝缘材料：矿物油依靠分子极化实现绝缘，散热性好，常温下稳定性强，但高温下易氧化裂解，生成酸性物质影响绝缘性能；植物油环保无污染，绝缘和散热特性接近矿物油，高温稳定性更优，氧化速率远低于矿物油。(3) 气体绝缘材料：SF₆气体主要用于气体绝缘变压器，绝缘强度高、灭弧性能好，高温下绝缘性能略有下降，温度过高会出现少量分解产物，影响绝缘可靠性^[1]。

1.2 变压器高温环境的形成机制

(1) 内部热源：绕组铜损由电流通过绕组电阻产生，铁芯铁损源于磁滞和涡流效应，热量通过绝缘介质传导至器身，绕组端部和中部为热点区域，温度较其他部位高5-10℃。(2) 外部环境影响：环境温度升高会降低散热温差，散热器积灰、风扇故障会导致强制散热效率下降，负荷波动则会引发变压器内部温度频繁波动。(3) 高温等级划分：依据IEC、DL/T572-2010标准，正常运行

温度 ≤ 95℃，过载运行温度95-110℃，极端工况温度 > 110℃，本研究聚焦95-120℃高温范围。

1.3 高温对绝缘材料的作用机理基础

(1) 热老化的基本规律：根据阿伦尼乌斯定律及“8℃定则”“10度法则”，温度每升高8-10℃，绝缘材料寿命减半，呈现明显的指数衰减关系，高温会大幅加速老化进程。(2) 高温作用的核心路径：高温使绝缘材料分子热运动加剧，化学键断裂导致材料结构破坏，同时热老化与氧化、水解反应协同作用，进一步降低材料绝缘和机械性能，缩短使用寿命。

2 高温环境下变压器绝缘材料性能测试与分析

2.1 实验设计与方案

(1) 实验材料与仪器：选取变压器常用油浸纸（厚度0.1mm）、聚酰亚胺薄膜（厚度0.05mm）、矿物变压器油作为实验样本，确保样本无破损、性能均匀；实验仪器包括可编程式高温箱（控温精度±1℃）、介电性能测试仪（测量范围10⁻⁶~10⁻³）、拉力试验机（量程0~500N），以及酸值测定仪、聚合度测定仪等辅助设备，所有仪器提前校准合格。(2) 实验条件设置：设定60℃、80℃、100℃、120℃、140℃五个高温梯度，老化时间分别为24h、72h、168h、336h，模拟变压器正常、过载及极端高温运行工况；实验过程中控制环境湿度为50%±5%，施加额定电场强度，避免干扰因素影响测试结果。(3) 实验指标确定：核心测试指标涵盖三类，介电性能包括介电常数、介质损耗因数、击穿电压，反映材料绝缘能力；机械性能包括拉伸强度、弹性模量、断裂应变，表征材料力学稳定性；理化性能包括绝缘油酸值、油泥生成量及绝缘纸聚合度，揭示材料内部劣化程度^[2]。

2.2 高温下绝缘材料性能测试结果

(1) 介电性能测试结果：随高温升高和老化时间延长，三种材料介电常数均呈上升趋势，介质损耗因数显

著增大,击穿电压明显下降;120℃以上时,油浸纸击穿电压降幅达30%以上,聚酰亚胺薄膜介电性能衰减相对平缓,体现出更优的耐高温绝缘特性。(2)机械性能测试结果:高温老化后,油浸纸拉伸强度和弹性模量大幅下降,老化336h后140℃组拉伸强度降幅达55%,且出现明显变脆、开裂现象;聚酰亚胺薄膜机械性能衰减较小,仅在140℃、336h时出现轻微变形,无开裂情况。(3)理化性能测试结果:绝缘油酸值随温度升高和老化时间延长逐渐增大,140℃、336h时酸值达0.15mgKOH/g,伴随少量油泥生成;绝缘纸聚合度随老化加剧不断降低,110℃以上时聚合度下降速率加快,表明内部纤维素结构遭到严重破坏。

2.3 测试结果分析与讨论

(1)高温梯度对性能的影响:110℃以下时,绝缘材料各项性能衰减平缓;110℃以上为性能劣化临界区间,此时纤维素糖苷键断裂加剧,油浸纸和变压器油性能急剧下降,聚酰亚胺薄膜仍能保持较好稳定性。(2)老化时间对性能的影响:绝缘材料性能衰减随老化时间呈指数变化,前期(0~72h)衰减较快,后期(168~336h)衰减速率放缓,可建立性能衰减与老化时间的指数关联模型,为预测材料使用寿命提供依据。(3)不同类型绝缘材料性能对比:固体绝缘材料中,聚酰亚胺薄膜耐高温性能优于油浸纸;液体绝缘材料(变压器油)高温稳定性较差,易氧化劣化;聚酰亚胺薄膜适用于120℃以上高温工况,油浸纸和变压器油更适用于110℃以下常规高温环境。

3 高温环境下变压器绝缘材料热老化机理及影响因素

3.1 绝缘材料热老化的微观机理

(1)固体绝缘材料热老化机理:油浸纸主要成分纤维素在高温下,糖苷键断裂导致聚合度下降,同时氧化降解生成羧基、羟基等基团,使材料结构疏松、机械强度降低;聚酰亚胺薄膜高温下分子链段热运动加剧,化学键断裂后发生交联反应,初期可维持性能,长期高温则会破坏分子结构,导致脆化、绝缘性能衰减。(2)液体绝缘材料热老化机理:变压器油高温下烃类分子氧化裂解,生成脂肪酸、酚类等酸性物质,进而聚合形成油泥,同时产生氢气、甲烷等可燃性气体;酸性物质腐蚀绝缘材料,油泥堵塞散热通道,气体积累增加局部放电风险,引发二次危害。(3)油纸协同老化机理:高温下,绝缘油氧化产生的酸性物质渗透至绝缘纸内部,加速纤维素分子链断裂和聚合度下降;绝缘纸老化释放的水分融入绝缘油,催化油的氧化反应、降低其介电性能,二者形成协同效应,加速整个绝缘系统失效。

3.2 高温环境下绝缘材料老化的主要影响因素

(1)温度因素:温度越高,绝缘材料老化速度越快,符合阿伦尼乌斯定律;温度频繁波动会导致材料热胀冷缩,加剧分子结构损伤,缩短老化寿命;变压器绕组热点区域温度远高于平均温度,会导致局部材料老化速度显著加快,成为绝缘系统的薄弱环节。(2)环境因素:高湿度环境下,高温会加速绝缘材料吸潮,水分不仅降低材料介电性能,还会催化氧化反应,与高温协同加速老化;氧气含量越高,绝缘材料氧化降解速度越快,密封不良的变压器中,空气中的氧气渗入会显著加剧绝缘油和固体绝缘的老化^[3]。(3)自身因素:材料组成决定其热稳定性,聚酰亚胺因分子结构中含有芳香环,热老化抗性远优于纤维素类的油浸纸;材料结构越致密、制备工艺越精良,抗高温老化能力越强,反之,杂质含量高、结构疏松的材料,老化速度更快。

3.3 热老化寿命预估模型构建

(1)模型构建基础:基于3.2节实验测试数据,以绝缘材料性能衰减至临界值(如油浸纸聚合度降至200)作为寿命终点,结合阿伦尼乌斯方程,引入温度、老化时间等参数,构建热老化寿命预估模型,其中模型参数分别对应材料热老化活化能、频率因子,反映材料自身热稳定性和老化速率。(2)模型验证与优化:选取不同高温梯度、不同老化时间的实验数据代入模型,对比预估寿命与实际测试寿命,修正模型参数;考虑温度波动、湿度等多因素协同作用,优化模型结构,引入修正系数,提升模型对复杂工况下寿命预估的精度。(3)模型应用场景:将该模型应用于变压器绝缘材料寿命评估,通过检测材料当前性能参数,预估剩余使用寿命;结合设备运行工况,制定针对性维护计划,如在材料接近寿命临界值前进行更换,为变压器安全、稳定、经济运行提供理论支撑。

4 高温环境下变压器绝缘材料性能提升措施及工程应用

4.1 绝缘材料改性技术研究

(1)固体绝缘材料改性:针对绝缘纸,采用硼氮纳米粒子掺杂改性,利用纳米粒子的高导热性和绝缘性,填补纸内部孔隙,抑制高温下纤维素分子链断裂,同时提升机械强度和耐高温性能;对聚酰亚胺薄膜,采用新型环氧树脂共混改性,优化分子结构,增强化学键稳定性,降低高温下的介电损耗,延长热老化寿命。(2)液体绝缘材料改性:变压器油改性采用添加抗氧剂、金属钝化剂等复合添加剂,抑制高温下烃类分子氧化裂解,减少酸性物质和油泥生成;植物油通过精炼脱酸、脱杂改性,提升其高温抗氧化性和流动性,同时优化其介电性能,使其适

配高温工况下的绝缘需求,兼顾环保性与稳定性^[4]。(3) 改性效果验证:通过高温老化实验,测试改性后油浸纸、聚酰亚胺薄膜的介电性能、机械性能,以及改性变压器油的酸值、击穿电压等指标,对比改性前后数据发现,改性后材料高温下性能衰减速率降低40%以上,击穿电压提升25%左右,充分验证了改性技术的有效性。

4.2 变压器散热优化设计

(1) 内部散热结构优化:设计紧凑型低损耗绕组结构,采用换位导线减少铜损,选用高导磁、低铁损磁芯,从源头降低热量产生;优化油道布局,增加纵向油道数量、拓宽横向油道宽度,提升绝缘油循环效率,加快内部热量传导,避免热点区域温度积聚。(2) 外部散热系统改进:改进散热器结构,采用翅片式散热器增大散热面积,优化冷却风扇和油泵的运行参数,实现根据变压器运行温度自动调节转速,提升散热针对性;对变压器器身采用导热灌封工艺,增强热量传递效率,加速外部热量散发,避免温度过高。(3) 散热效果模拟与验证:利用仿真软件模拟优化后变压器的温度分布,明确热点区域温度降低幅度;通过实际负载实验测试,对比优化前后变压器内部平均温度和热点温度,验证优化方案可使变压器高温工况下温度降低10-15℃,散热效果显著,方案可行^[5]。

4.3 工程应用案例与效果分析

(1) 工程应用案例:选取热带地区某变电站变压器工程,该区域夏季环境温度长期高于35℃,变压器运行温度易超标,采用硼氮纳米粒子改性油浸纸和复合添加剂改性变压器油,同时优化散热器结构并加装智能冷却系统;选取新能源汽车车载变压器,采用改性聚酰亚胺薄膜和精炼植物油,优化内部油道设计,适配车载高温工作环境。(2) 应用效果分析:热带变电站变压器应用后,绝缘材料老化速度降低50%,设备连续运行稳定性提升,故障发生率下降35%;车载变压器应用后,高温下绝缘性能稳定,使用寿命延长至原来的1.5倍,不仅降低了

设备维护成本,还提升了运行可靠性,具有显著的工程价值和经济效益。

4.4 高温环境下变压器绝缘维护策略

(1) 定期监测方案:制定季度、年度定期监测计划,采用油中溶解气体分析、介电性能测试、聚合度检测等技术,实时监测绝缘油酸值、油中气体含量及绝缘纸聚合度变化,建立监测数据库,精准掌握绝缘材料老化状态,提前预警潜在故障。(2) 维护措施制定:针对高温工况,当绝缘油酸值超标时,及时进行油液过滤、再生处理;当绝缘纸聚合度降至临界值时,及时更换;定期清理散热器积灰、检查冷却风扇和油泵运行状态,及时维修故障部件,延缓绝缘材料老化,延长变压器整体使用寿命。

结束语

本文系统完成了高温环境下变压器绝缘材料性能的实验测试、机理分析及提升措施研究,明确了110℃为材料性能劣化临界温度,验证了改性技术与散热优化的有效性,构建的寿命预估模型可精准评估材料剩余寿命。研究虽取得阶段性成果,但对极端高温下材料长期老化规律研究不足,未来将进一步优化模型精度、研发新型耐高温绝缘材料,为电力设备安全高效运行提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1]李明.高温环境下绝缘材料性能研究[J].电力工程,2021,45(6):35-40.
- [2]王红.绝缘材料在高温环境下的应用与研究[J].电力科技,2020,39(4):50-55.
- [3]张瑞.电力变压器在实际应用中对于绝缘杂项的传感及检测特性研究[J].价值工程,2024,43(27):112-117.
- [4]桑旺,卢琴,王志同,等.新能效电力变压器的优化策略[J].变压器,2024,61(8):28-32.
- [5]高有华,孙玫维.绝缘材料电气性能对换流变压器电场影响的仿真研究[J].变压器,2020,57(10):47-51.