

电气设备高温试验条件下性能变化的实验研究

李莹

(国网冀北电力有限公司廊坊供电公司, 河北 廊坊 063000)

摘要 本研究探讨高温环境对电气设备性能的影响。通过设计对比试验, 分析不同温度条件下电气设备的绝缘性能、导电性能和机械强度等关键指标的变化规律。实验结果表明, 随着环境温度的升高, 电气设备的绝缘电阻呈指数下降趋势, 导电性能略有提高, 但机械强度明显降低。基于实验数据, 建立温度与性能参数之间的数学模型, 为电气设备的高温应用和防护设计提供理论依据和技术支持。

关键词 电气设备; 高温试验; 性能变化; 绝缘性能; 导电性能

中图分类号: TM401

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)12-0100-03

随着工业技术的快速发展, 电气设备在高温环境下的应用日益广泛, 如冶金、石化等行业。然而, 高温环境对电气设备的性能造成显著影响, 可能导致设备故障、安全事故等问题。因此, 深入研究高温条件下电气设备的性能变化规律, 对于保障设备安全运行、延长使用寿命具有重要意义。本研究通过系统的实验设计和数据分析, 旨在揭示温度与电气设备关键性能指标之间的定量关系, 为相关领域的技术创新和实际应用提供参考。

1 实验设计与方法

1.1 实验对象选择

实验选取三种典型的电气设备作为研究对象: 高压断路器、变压器和电力电缆。这些设备在电力系统中扮演着关键角色, 其性能直接影响整个系统的安全性和可靠性^[1]。高压断路器选用额定电压为220 kV的SF6气体绝缘断路器, 具有优异的绝缘性能和灭弧能力。变压器采用110 kV/35 kV的油浸式电力变压器, 额定容量为50 MVA, 代表中等容量等级的变压器类型。电力电缆选择35 kV级交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆, 截面积为400 mm², 这种电缆广泛应用于城市配电网。

为确保实验结果的可靠性和代表性, 每种设备均选取3个样品进行测试。样品均来自知名制造商, 生产日期在近一年内, 且经过出厂质量检验。在实验前, 对所有样品进行预检, 确保其初始性能参数符合相关国家标准要求。例如, 高压断路器的绝缘电阻不低于10 000 M Ω , 变压器的空载损耗不超过额定容量的0.1%, 电力电缆的局部放电量小于5 pC。选取的样品规格和初始性能参数如表1所示。

1.2 实验环境设置

实验在专业的高温试验箱内进行, 以模拟电气设备在不同温度环境下的工作状态^[2]。试验箱的温度控制范围为-40 $^{\circ}\text{C}$ 至200 $^{\circ}\text{C}$, 控温精度达到 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$, 湿度控制范围为20% RH至98% RH, 控湿精度为 $\pm 3\%$ RH。为全面评估温度对设备性能的影响, 实验设置5个温度梯度: 常温(25 $^{\circ}\text{C}$)、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 和100 $^{\circ}\text{C}$ 。每个温度点均保持相对湿度为50% RH, 以消除湿度变化对实验结果的干扰。实验过程中, 采用阶梯升温方式, 每个温度点恒温时间为4小时, 以确保设备内部温度分布均匀。升温速率控制在2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 避免温度骤变对设备造成额外应力。在每个温度点进行测试前, 额

表1 实验对象规格和初始性能参数

设备类型	规格	绝缘电阻 (M Ω)	导电电阻 ($\mu\Omega$)	机械强度 (MPa)
高压断路器	220 kV SF6	15 000	40	450
变压器	110 kV/35 kV 50 MVA	12 000	0.5	380
电力电缆	35 kV XLPE 400 mm ²	10 000	0.0475	25

外等待 1 小时，使设备充分适应环境温度。整个实验周期持续 5 天，每天进行一个温度点的测试，以消除连续升温可能带来的累积效应。监测实验环境的稳定性，在试验箱内安装 4 个温度传感器和 2 个湿度传感器，分别位于箱体的四角和中心位置。传感器数据每 10 秒采集一次，通过数据采集系统实时记录。

1.3 测试参数与仪器

实验重点关注电气设备的三个关键性能指标：绝缘性能、导电性能和机械强度。对于每个指标，选用专业的测试仪器和标准化的测试方法^[3]。绝缘性能通过测量绝缘电阻来评估。使用型号为 Megger MIT1025 的绝缘电阻测试仪，测试电压设置为 5 000 V，测量范围为 10 kΩ 至 15 TΩ，精度为 ±5%。每个温度点进行 3 次测量，取平均值作为最终结果。导电性能则通过测量导体电阻来表征。采用 JHRC-2A 型回路电阻测试仪，测量范围为 1 μΩ 至 200 mΩ，精度为 ±0.5%。对于电缆，还使用四线法测量以消除接触电阻的影响。机械强度测试采用 WDW-100 电子万能试验机，最大试验力为 100 kN，精度等级为 0.5 级。对于断路器和变压器，主要测试其金属结构件的抗拉强度；对于电缆，则测试其绝缘层的抗张强度。为确保测量的准确性和一致性，所有测试仪器在实验前均经过校准，并在每个温度点测试前进行自检，测试过程严格遵循相关国家标准。表 2 列出主要测试参数和使用的仪器设备。

2 实验结果与分析

2.1 绝缘性能变化

实验结果显示，随着环境温度的升高，电气设备的绝缘性能呈现明显的下降趋势。绝缘电阻作为评估绝缘性能的关键指标，其变化最为显著。在 25 ℃ 至 100 ℃ 的温度范围内，高压断路器、变压器和电力电缆的绝缘电阻均呈现出指数级下降^[4]。对于高压断路器，其 SF6 气体绝缘特性受温度影响较大。在 25 ℃ 时，绝缘电阻为 15 000 MΩ，但当温度升至 100 ℃ 时，绝缘电阻降至 3 200 MΩ，降幅达 78.7%。变压器的绝缘油在高温下黏度降低，流动性增强，导致绝缘电阻从 12 000

MΩ 降至 2 800 MΩ，降幅为 76.7%。电力电缆的 XLPE 绝缘层在高温下分子链运动加剧，自由体积增大，绝缘电阻从 10 000 MΩ 降至 1 800 MΩ，降幅达 82%。

通过对实验数据进行回归分析，发现绝缘电阻与温度之间存在明显的指数关系。拟合得到的数学模型为： $R=R_0e^{-\alpha T}$ ，其中 R 为绝缘电阻； R_0 为 25 ℃ 时的初始绝缘电阻；T 为温度； α 为温度系数。高压断路器、变压器和电力电缆的 α 值分别为 0.016、0.015 和 0.018，反映不同设备绝缘性能对温度的敏感程度。此外，局部放电测试结果表明，随着温度升高，设备的局部放电起始电压降低，放电量增加。在 100 ℃ 时，高压断路器的局部放电量比 25 ℃ 时增加 2.5 倍，变压器增加 2.2 倍，电力电缆增加 2.8 倍。

2.2 导电性能变化

实验结果表明，温度升高对电气设备的导电性能产生显著影响，但影响程度和趋势因设备类型而异。导体电阻随温度升高呈现出增加趋势，这与金属导体的特性相符^[5]。然而，不同设备由于结构和材料的差异，其导电性能的变化存在一定差异。高压断路器的导电回路主要由铜导体和触头组成。在 25 ℃ 至 100 ℃ 的温度范围内，其导体电阻从 40 μΩ 增加到 52 μΩ，增幅为 30%。这种变化主要归因于铜的正温度系数效应。然而，值得注意的是，在 80 ℃ 以上，电阻增加率略有下降，这可能与触头接触电阻的非线性变化有关。变压器的导电性能变化较为复杂。其初级和次级绕组的电阻均随温度升高而增加。初级绕组电阻从 0.5 Ω 上升至 0.63 Ω，增幅为 26%；次级绕组电阻从 0.02 Ω 上升至 0.025 Ω，增幅为 25%。然而，变压器的短路阻抗随温度升高而略有下降，从 12% 降至 11.5%。

电力电缆的导体电阻变化最为显著。其单位长度电阻从 0.0475 Ω/km 上升至 0.0641 Ω/km，增幅达 35%。这种显著的增幅不仅源于铜导体的正温度系数效应，还与电缆结构中绝缘层和屏蔽层的热膨胀有关，导致导体截面积的微小变化。通过对实验数据进行分析，建立导体电阻与温度之间的线性关系模型： $R=R_0(1+\alpha T)$ ，

表 2 主要测试参数和仪器设备

测试项目	测试参数	测试仪器	测量范围	精度
绝缘性能	绝缘电阻	Megger MIT1025	10 kΩ ~ 15 TΩ	±5%
导电性能	导体电阻	JHRC-2A	1 μΩ ~ 200 mΩ	±0.5%
机械强度	抗拉 / 抗张强度	WDW-100	0 ~ 100 kN	0.5 级

其中R为导体电阻； R_0 为25℃时的初始电阻；T为温度变化量； α 为温度系数。高压断路器、变压器绕组和电力电缆的 α 值分别为0.00381、0.00386和0.00392，接近纯铜的理论值0.00393。此外，实验还发现温度对设备的动态导电特性有一定的影响。例如，高压断路器在高温下的分闸时间延长约5%，合闸时间缩短约3%。这可能与温度对机械机构和灭弧介质性能的综合影响有关。

2.3 机械强度变化

实验结果显示，随着温度的升高，电气设备的机械强度普遍呈现下降趋势。这种变化对设备的长期可靠性和安全运行具有重要影响。不同类型的电气设备，由于其结构和材料的差异，其机械强度的变化特征也存在显著差异。

高压断路器的机械强度主要体现在其操作机构和绝缘支撑结构上。在25℃至100℃的温度范围内，其金属结构件的抗拉强度从450 MPa降至385 MPa，降幅达14.4%。操作机构的弹簧刚度也出现约5%的下降，这可能导致断路器的操作特性发生变化。在80℃以上，强度下降速率有所加快，这可能与金属材料在高温下的微观结构变化有关。

变压器的机械强度主要涉及其绕组和铁心结构。实验发现，绕组的抗拉强度从380 MPa降至315 MPa，降幅为17.1%。同时，绕组的轴向和径向变形量分别增加7%和9%。这种变形可能导致绕组间隙减小，增加短路时的电磁力风险。铁心叠片间的摩擦系数随温度升高而减小，从0.3降至0.22，这可能影响铁心的稳定性和噪声特性。

电力电缆的机械强度变化主要反映在其绝缘层和外护套上。XLPE绝缘层的抗张强度从25 MPa降至18 MPa，降幅达28%。外护套的断裂伸长率从450%增加到520%，增幅为15.6%。这种变化可能导致电缆在高温环境下更容易发生永久变形，影响其长期使用性能。

通过对实验数据进行回归分析，建立机械强度与温度之间的线性关系模型： $\sigma = \sigma_0(1 - \beta T)$ ，其中 σ 为机械强度； σ_0 为25℃时的初始强度；T为温度变化量； β 为温度敏感系数。高压断路器、变压器和电力电缆的 β 值分别为0.00192、0.00228和0.00373，反映不同设备机械强度对温度的敏感程度。此外，实验还发现温度对设备的动态机械特性有显著影响。例如，高压断路器在100℃时的操作速度比25℃时降低约8%。

3 应用建议

基于实验结果和建立的数学模型，可为电气设备的设计、运行和维护提出以下应用建议：在设计阶段，应充分考虑高温环境对设备性能的影响，选用耐高温材料，如采用改性XLPE绝缘材料提高电缆的耐热性能。对于高压断路器，可优化SF6气体密度，提高其高温下的绝缘性能。变压器设计时，应增加绕组的冷却通道，改善高温下的散热效果。在运行管理方面，建议根据温度-性能模型动态调整设备的负载水平。例如，当环境温度超过60℃时，变压器的负载应降低至额定值的80%以下，以防止绝缘性能急剧下降。对于户外电力电缆，可考虑增设温度监测系统，实时调整允许载流量。在维护策略上，高温环境下应缩短设备的检修周期，特别关注机械强度的变化。建议在年度检修中增加绝缘电阻测试项目，并根据测试结果和温度-性能模型评估设备的剩余寿命。此外，对于频繁经历高温环境的设备，可考虑使用智能化监测系统，实时跟踪设备性能变化，实现预测性维护，从而提高电力系统的整体可靠性和经济效益。

4 结束语

通过对电气设备在高温条件下性能变化的系统研究，揭示温度对绝缘性能、导电性能和机械强度的影响规律。实验结果表明，高温环境会显著降低电气设备的绝缘性能和机械强度，但对导电性能影响较小。基于实验数据建立的数学模型，为电气设备在高温环境下的应用提供重要的理论指导。未来研究可进一步探索温度与其他性能参数的关系，以及开发新型耐高温材料，从而提高电气设备在极端环境下的可靠性和安全性。

参考文献：

- [1] 张超. 环境因素对造纸企业电气自动化维护的影响及控制策略研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(10): 22-24.
- [2] 曾乐业, 李翔. 电子设备热管冷板优化设计及试验研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(01): 109-113.
- [3] 苏淑华, 朱珈, 张宗取. 电工电子产品高、低温试验能力验证测试关键点分析[J]. 环境技术, 2022, 40(04): 85-88.
- [4] 同[2].
- [5] 杨世武, 扈瑞峰, 刘磊, 等. 高原铁路信号电气电子设备气候环境适应性试验分析[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(07): 1-6.