

高海拔地区变压器可靠运行的系统研究

张伦权

特变电工京津冀智能科技有限公司 天津 301700

摘要: 针对高海拔地区 (3500 米及以上) 变压器气体继电器频繁报警、油箱压力异常及油中单氢含量升高的问题, 本文通过机理分析与实验验证, 提出外油式储油柜不锈钢波纹节结构优化、密封系统改进、器身干燥及在线监测技术等综合解决方案。研究结果表明, 这些措施的协同应用可显著抑制产氢速率, 提升设备运行可靠性。

关键词: 高海拔变压器; 外油式储油柜; 产氢机理; 密封优化; 在线监测

1 引言

在电力系统中, 变压器作为能量转换与传输的核心设备, 其运行可靠性直接关系到电网的安全稳定。高海拔地区由于独特的地理环境, 对变压器的性能提出了更为严苛的要求。相关研究显示, 高海拔地区因空气稀薄、昼夜温差大及紫外线辐射强等因素, 导致电气设备绝缘性能劣化加速^[1]。具体而言, 海拔每升高 1000 米, 变压器绝缘强度下降约 8%~15%^[2]。

本文聚焦于某型号变压器在 3500 米高海拔地区运行时出现的系列问题, 包括气体继电器误动、油箱压力异常及单一氢含量超标等, 结合热力学与电化理论, 展开系统性研究并提出解决方案。变压器在高海拔的差异无法用传统绝缘理论完全解释, 凸显了开展高海拔环境多因素耦合研究的迫切性^[1-3]。高海拔地区的电力供应对于当地经济发展和民生保障至关重要, 因此解决高海拔地区变压器运行可靠性问题具有重要的现实意义。

2 高海拔环境对变压器的影响机理

2.1 高海拔环境特性

高海拔地区的环境具有诸多独特特征, 这些特征相互作用, 共同对变压器的运行产生影响:

低气压: 随着海拔升高, 气压逐渐降低。低气压环境会导致变压器油中溶解气体的析出速率加快^[3]。这是因为气压降低使得气体在油中的溶解度下降, 原本溶解在油中的气体更容易逸出, 形成气泡。这些气泡可能会影响变压器的绝缘性能, 甚至引发局部放电等故障。

强紫外线: 高海拔地区由于大气层稀薄, 紫外线辐射强度远高于低海拔地区。强紫外线会加速变压器

绝缘材料的老化进程^[4]。绝缘材料在紫外线的长期照射下, 分子结构会发生变化, 导致其机械性能和绝缘性能下降。同时, 老化过程中还会产生裂解气体, 这些气体溶解在变压器油中, 会影响油的绝缘性能, 甚至引发故障。

昼夜温差大: 高海拔地区昼夜温差通常较大, 有时可达 20℃ 以上。这种剧烈的温度变化会引发储油柜的热胀冷缩效应^[5]。当温度升高时, 变压器油体积膨胀, 储油柜需要容纳更多的油; 当温度降低时, 油体积收缩, 储油柜内的油体积减少。频繁的热胀冷缩会导致储油柜的密封件受到反复的应力作用, 容易出现密封失效, 进而导致水分和空气进入变压器内部, 影响设备的绝缘性能。

2.2 外油式储油柜的泄漏问题

外油式储油柜作为变压器的重要组成部分, 其主要功能是通过波纹管补偿变压器油体积的变化, 以维持油箱内的压力稳定。然而, 在高海拔环境下, 其密封性能面临着双重严峻挑战:

气压差效应: 在高海拔地区, 外部环境处于低压状态, 而储油柜内部由于变压器油的存在和温度变化等因素, 容易形成微正压。这种内外气压差会加速密封圈的老化。密封圈在长期的压力差作用下, 会逐渐失去弹性, 导致密封性能下降, 进而出现泄漏现象。泄漏会使空气和水分进入储油柜, 影响变压器油的质量和绝缘性能。

膨胀量计算偏差: 传统的储油柜设计中, 未充分考虑海拔对油温膨胀系数的影响^[7]。在高海拔环境下, 由于气压和温度等因素的变化, 变压器油的膨胀系数与低海拔地区存在差异。这导致波纹管的膨胀量计算

出现偏差,使得波纹管频繁动作。频繁动作不仅会增加波纹管的磨损,还可能导致其出现卡涩现象。一旦波纹管卡涩,无法正常补偿油体积的变化,会进一步导致油箱内压力升高,严重时可能引发油箱变形甚至爆裂等严重故障。

2.3 变压器运行负荷的变化

变压器因负荷变化而使得其夜间油温骤降,吸入的冷空气易在呼吸器内壁结露,液态水直接滴入硅胶;此外高海拔地区昼夜温差大(夏季 15℃、冬季 25℃),油体积日变化量是平原的 2-3 倍,导致呼吸器换气次数激增,变压器储油柜所用呼吸器硅胶更容易出现饱和现象;若不及时更换呼吸器内硅胶,则变压器内容易吸潮。

2.4 绝缘吸潮与产氢机理

变压器器身的绝缘纸板在高湿度环境下容易吸收水分。在电场作用下,吸收的水分会发生电解反应^[6],反应式如下:



该电解反应在电场的作用下会进一步加剧。随着反应的进行,会产生大量的氢气(H_2)。这些氢气溶解在变压器油中,导致油中单氢含量异常升高。氢气的存在会影响变压器油的绝缘性能^[7],同时,氢气的积累还可能引发气体继电器动作,导致变压器误跳闸^[8]。

4 解决方案与技术创新

4.1 储油柜结构优化

4.1.1 不锈钢波纹节改进

材料升级:将常规的 304 不锈钢更换为 316L 不锈钢。316L 不锈钢含有钼元素,其抗腐蚀性能比 304 不锈钢提升 50%^[9]。在高海拔地区,由于环境中可能存在一些腐蚀性气体和水分,316L 不锈钢能够更好地抵抗腐蚀,延长波纹节的使用寿命。通过盐雾试验对比,316L 不锈钢在相同试验条件下的腐蚀速率仅为 304 不锈钢的一半。

结构设计:对波纹节的膨胀量计算公式进行修正,修正后的公式为:

$$\beta * (\Delta t + \Delta t') * M_{\text{油}} / \rho_{\text{油}}$$

β 为油体积膨胀系数, $0.0007\text{m}^3/\text{℃}$

Δt - 需考虑高海拔地区最高温度和最低温度,确

保储油柜油位不出现最高油位报警和低油位跳闸, ℃

$$\Delta t' - \text{温度随海拔的变化性 } 5 * (P - 1000) / 1000$$

℃

$M_{\text{油}}$ - 总质量 kg

$\rho_{\text{油}}$ - 计算时需考虑温度对密度的影响 kg/m^3

修正后的公式能够更准确地计算不同海拔和温度条件下的膨胀量,确保波纹节的动作更加合理,减少了因膨胀量计算偏差导致的故障。

4.1.2 密封系统升级

材料性能提升:将传统丁腈橡胶或丙烯酸酯密封圈替换为氟硅橡胶材质。氟硅橡胶兼具氟橡胶的耐高低温特性($-60\text{℃} \sim 200\text{℃}$)和硅橡胶的耐候性,其抗臭氧老化性能提升 3 倍以上,在强紫外线照射下的 5000 小时加速老化测试中,弹性保持率仍达 85% (传统材料仅为 40%),可有效抵御高海拔环境的侵蚀。

双冗余密封:采用双冗余密封结构,主密封圈采用氟硅橡胶,利用其线接触特性增强初始密封比压,辅助密封圈使用聚四氟乙烯(PTFE),依托其低摩擦系数特性补偿主密封的磨损量。氟硅橡胶具有良好的耐高低温、耐油和耐化学腐蚀性能,适合作为主密封圈;聚四氟乙烯具有优异的耐磨损和低摩擦系数特性,作为辅助密封圈可以进一步提高密封性能。双冗余密封结构使得即使主密封圈出现轻微泄漏,辅助密封圈仍能起到密封作用,双密封结构可使密封失效风险降低至传统设计的 15% 以下,显著提升系统冗余能力。

压力平衡阀:增设微压差传感器(精度 $\pm 0.001\text{MPa}$),用于实时监测储油柜内外的气压差,并通过压力平衡阀实时调节内外气压平衡。储油柜内部气压高于外部气压一定值时,压力平衡阀自动打开,释放部分气体,降低内部气压;当内部气压低于外部气压时,压力平衡阀打开,吸入外部气体(经过过滤和干燥处理),使内部气压保持稳定。通过这种方式,减少了气压差对密封圈的影响,延长了密封圈的使用寿命。

呼吸器:建议每月定期观察呼吸器硅胶的变色现象,测算预期更换硅胶的周期;有条件可采用电加热呼吸器,确保其硅胶能起到过滤潮湿空气的作用。

4.2 器身干燥与油处理

真空热油循环:采用真空热油循环的方法对器身

进行干燥处理。在 80℃ 的温度下进行 72 小时循环处理，通过真空环境降低水的沸点，使绝缘材料中的水分能够在较低的温度下蒸发出来，并被循环的热油带走。处理后，绝缘材料的水分含量降至 10ppm 以下^[10]。通过对处理前后的绝缘材料进行检测，发现其绝缘电阻和介损等性能指标得到了显著改善。

吸附剂改性：在呼吸器硅胶中添加纳米级氧化铝颗粒作为吸附剂。纳米级氧化铝颗粒具有巨大的比表面积和丰富的微孔结构，其吸湿能力比传统吸附剂提升 3 倍。这些纳米颗粒能够有效地吸附油中的水分和杂质，保持变压器油的清洁度和绝缘性能。通过对比实验发现，添加纳米级氧化铝颗粒后，变压器油的水分含量能够长期保持在较低水平。

4.3 在线监测技术

氢气传感器：通过在变压器油箱侧壁安装一氢气传感器（有条件可加在线色谱检测仪），成本较低，但可以实时监测油中氢气浓度的变化。当氢气浓度超过设定阈值时，传感器可通过手机 APP 发出报警信号，提醒运维人员及时采取措施。

压力释放装置：集成机械式与电磁式双触发机构的压力释放装置，其响应时间 <0.5 秒。当油箱内压力超过设定值时，机械式触发机构首先动作，快速释放压力；如果机械式机构出现故障，电磁式触发机构会在接到压力传感器的信号后动作，确保压力能够及时释放。双触发机构的设计大大提高了压力释放装置的可靠性，避免了因压力过高导致的油箱爆裂等严重事故。

5 效果验证

针对变压器，已采取了一系列改进措施：更换新型储油柜，将其波纹节材质更换为 316L 不锈钢，并按照前述技术要求对波纹节的膨胀量进行优化；对气体继电器等关键部件的法兰密封结构采用冗余设计，同时现场滤油处理结果符合标准。经持续运行超过 3 个月的监测表明，变压器油样的气相色谱分析（DGA）未发现异常，其中氢气含量处于正常范围，油箱压力稳定，气体继电器亦未发出报警信号^[10]。

6 结论与展望

本文针对高海拔地区变压器运行中出现的气体继电器频繁报警、油箱压力异常及油中单氢含量升高等

问题^[11]，通过机理分析与实验验证，提出了一系列系统性的解决方案，包括外油式储油柜不锈钢波纹节结构优化、密封系统改进、器身干燥及在线监测技术等。研究结果表明，这些解决方案能够有效解决高海拔地区变压器的运行问题，提升设备的可靠性和经济性。

参考文献

- [1] 王黎明，等．高海拔电气设备绝缘技术 [M]．北京：中国电力出版社，2018.
- [2] GB1094.3-2017 电力变压器 第 3 部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙 [S].
- [3] 张强等．高海拔变压器油中溶解气体分析 [J]．高电压技术，2020，46(3)：987-995.
- [4] Power transformers -Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers [S].
- [5] 刘伟，等．高海拔环境对变压器密封性能的影响 [J]．云南电业，2021(5)：45-49.
- [6] 赵晓峰等．变压器绝缘纸板吸湿特性研究 [J]．电力自动化设备，2019，39(8)：162-168.
- [7] IEEE C57.104-2019, Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers[S].
- [8] 王建国等．变压器故障诊断技术 [M]．北京：机械工业出版社，2020.
- [9] ASTM G48-11, Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance[S].
- [10] DL/T 573-2021, 电力变压器检修导则 [S].
- [11] 周建平．高海拔电力设备特殊环境适应性 [M]．北京：科学出版社，2020.（国家出版基金项目）

作者简介：张伦权（1974-），男，汉，江西省赣州市，学士，工程师，研究方向：变压器特殊工况下应用及其质量可靠性研究。