

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.053

基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率研究

陈小闽, 罗同春, 丛培杰, 乔亚军

(广东电网有限责任公司 广州供电局, 广东 深圳 510620)

摘要:为实现对变电站断路器液压机构中液压油水分含量的准确检测,研究基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率检测方法。选择符合测量范围和精度要求并能适应变电站现场环境的电导率仪器。从断路器液压机构的上、中、下部位置采集代表性液压油样本。在实验室预处理样品,去除悬浮固体颗粒和杂质。使用选定电导率仪器测试样品的电导率,结合标定曲线,间接推算液压油中的水含量。根据实验测得的电导率数值,计算出液压油中的水含量。通过与规定的含水率标准进行对比,可以判断样品的液压油是否满足要求。

关键词:电导率法;断路器;液压机构;液压油含水率

中图分类号:0657.11 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0290-05

Reserch of Hydraulic Oil Moisture Content in Hydraulic Mechanisms of Substation Circuit Breakers Based on Conductivity Method

CHEN Xiaomin, LUO Tongchun, CONG Peijie, QIAO Yajun

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Shenzhen 510620, China)

Abstract: In order to accurately detect hydraulic oil moisture content in transformer substation circuit breaker hydraulic mechanism, a method of hydraulic oil moisture content detection based on conductivity method is studied. Conductivity instrument meeting the measurement range and accuracy requirements and adaptable to the field environment of the substation is selected. Representative hydraulic oil samples are collected from the upper, middle and lower parts of the circuit breaker hydraulic mechanism. Samples are pretreated in laboratory to remove suspended solids and impurities. The conductivity of the sample is measured by the selected conductivity instrument, and the water content in the hydraulic oil is calculated indirectly by combining the calibration curve. The water content in hydraulic oil is calculated successfully according to the conductivity values measured by experiments. Comparison made with the specified water content standard determines whether the hydraulic oil of the sample meets the requirements.

Keywords: conductivity method; circuit breaker; hydraulic mechanism; hydraulic oil water content

0 引言

在电力系统的运行中,变电站断路器液压机构作为重要的组成部分,其稳定性和可靠性对于电网的安全运行至关重要。液压机构中的液压油不仅起到润滑、密封和传力的作用,还直接影响到机构的动作性能和使用寿命。液压油中不可避免地会混入水分,这些水分可能降低其绝缘强度、加速油质老化、增加腐蚀风险等。因此,对液压油中的含水率进行准确、高效地检测显得尤为重要。目前,对于液压油含水率的检测方法主要有化学滴定法、红外光谱法、电容法等^[1]。这些方法虽然在一定程度上能够实现含水率的检测,但各自存在着一定的局限性。例如,红外光谱法则对设备要求较高,成本较大,不适合现场快速检测。近年

来,电导率法作为一种新型的含水率检测方法,逐渐引起了业界的关注。本研究旨在探索基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率检测方法,以期解决现有方法存在的不足,为电力系统的安全稳定运行提供有力保障。

1 电导率仪器选择

在基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率检测过程中,电导率仪器的选择是至关重要的一个环节^[2]。这是因为电导率仪器直接决定了测量结果的准确性和可靠性,同时也影响着检测过程的效率和便捷性。

首先,需要确保所选电导率仪器的测量范围能够覆盖预期检测的液压油含水率范围。由于不同变电站的断路器液压机构中,液压油的含水率

第一作者简介:陈小闽(1994—),女,福建福安人,工程师,硕士,研究方向为电气工程,qyj121588@163.com。

可能存在较大差异,因此需要选择具有足够宽测量范围的电导率仪器,以确保无论液压油中的含水率高低,都能够得到准确测量结果^[3]。其次,测量精度是选择电导率仪器时另一个重要的考虑因素。在液压油含水率检测中,高精度的测量结果对于判断液压油的性能、预测其使用寿命以及指导维护检修工作都具有重要意义^[4]。因此,需要选择具有高测量精度的电导率仪器,以确保检测结果的准确性和可靠性。此外,变电站现场环境的特殊性也要求在选择电导率仪器时考虑其环境适应性。变电站通常位于室外环境,因此,需要选择能够在这种环境下稳定工作的电导率仪器,以确保结果的准确性。

综上所述,在选择基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率检测中,选择合适的电导率仪器,才能确保检测结果的准确性和可靠性。基于此,选择 DDS-307 型号电导率仪,该型号电导率仪的性能参数如表 1 所示。

表 1 DDS-307 型号电导率仪性能参数记录表

序号	性能参数	数值
1	TDS/(mg/L)	0.00~1 999.00
2	电导率	0.00(S/cm)~199.90 mS/cm
3	温度/(°)	0~60
4	功率/V	220
5	仪器质量/kg	1.5
6	测量精度/(μs/cm)	±1
7	外形尺寸/mm	280×200×80

应用该型号电导率仪器为后续含水率检测提供可靠依据。

2 获取变电站断路器液压机构液压油样本

样本的代表性直接影响到后续检测的准确性和可靠性。为了确保所取样本能够全面反映液压油的实际情况,需要从变压器的不同位置取得一定数量的液压油样本^[5]。获取变电站断路器液压机构液压油样本流程如图 1 所示。

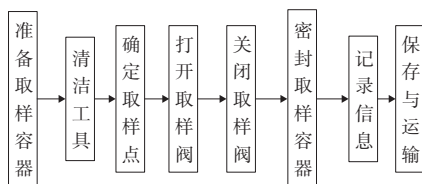


图 1 获取变电站断路器液压机构液压油样本流程

首先,需要确定取样点的位置。考虑到变压

器内部液压油的流动和分布情况,通常会从变压器的上、中、下部位置进行取样。这样可以确保样本涵盖了液压油在变压器内部不同位置的分布情况,从而更全面地反映液压油的性能。在取样时,需要使用专用的取样工具,如取样瓶或取样管,来确保取样的准确性和安全性^[6]。同时,为了避免污染样本,取样时,需要保证取得一定数量的液压油样本。样本的数量应根据实际检测需要进行确定,通常建议每个取样点至少取得一定体积的样本^[7]。同时,为了保持样本的原始状态,需要将样本保存在适当的条件下,如密封、避光、恒温等。

3 实验室条件下的液压油样品预处理

在进行基于电导率法的变电站断路器液压机构液压油含水率检测之前,对采集到的液压油样品进行预处理是确保检测准确性和可靠性的关键环节。预处理的主要目的是去除样品中的悬浮固体颗粒和杂质,使样品达到测试所需的纯净程度,从而避免这些杂质对电导率测量结果产生干扰^[8]。预处理过程需要在一个严格控制的实验室环境中进行,以确保操作的规范性和结果的准确性。实验室环境应保持恒定的温度、湿度和清洁度,以减少外界因素对液压油样品的影响。预处理的第一步是去除样品中的悬浮固体颗粒。这些颗粒可能来源于液压油在变压器内部循环时积累的灰尘、磨损的金属颗粒或其他杂质^[9]。去除这些颗粒的方法通常包括使用过滤纸、滤膜或离心机等设备对样品进行过滤。过滤时应选择适当的滤纸或滤膜,以确保能够有效去除颗粒,同时避免对样品造成污染。在去除悬浮固体颗粒后,还需要进一步去除样品中的其他杂质,如水分、气体和溶解性物质。对于水分的去除,可以采用干燥剂或真空干燥等方法。对于气体的去除,则可以通过摇晃或搅拌样品,使气体逸出。对于溶解性物质的去除,则可能需要使用特定的化学试剂或吸附剂^[10]。表 2 中记录了不同温度和含水率油样当中水分存在状态。

从表 2 的数据可以得出一个明显的界限,即当液压油的含水量达到 0.05% 时,其物理状态开始发生显著变化^[11]。在含水量低于 0.05% 的情况下,样品通常呈现出清澈且易于溶解的状态。然而,一旦含水量超过 0.05%,样品则倾向于呈现混浊的乳状外观。当含水量恰好处于 0.05% 的临界值时,特别是在 25 °C 的初始温度下,随着环境温度的逐渐升高,观察到样品的性质由乳化状态

逐渐转变为更易溶解的状态。

表 2 不同温度和含水率油样当中水分存在状态

温度/℃	含水率/%				
	0.20	0.10	0.05	0.01	0.00
35	乳化	乳化	溶解	溶解	溶解
30	乳化	乳化	溶解	溶解	溶解
25	乳化	乳化	略浑浊	溶解	溶解
20	乳化	乳化	略浑浊	溶解	溶解
15	乳化	乳化	乳化	溶解	溶解
10	乳化	乳化	乳化	溶解	溶解

4 液压油中水含量电导率测量

使用上述选择的电导率仪器对液压油中的水含量进行电导率测量。对预处理过的液压油样品进行电导率测试。电导率是液体导电性能的度量,其数值反映了液体中离子浓度的多少^[12]。对于液压油而言,由于其本身并不导电,但水作为良好的导电介质,当水分混入液压油中时,会显著提高其电导率。因此,可以通过测量液压油的电导率来间接得知其中的水含量。

在测试过程中,首先将电导率仪器的电极浸入液压油样品中,确保电极与样品充分接触。根据仪器的操作说明,启动测试程序,仪器会自动测量并记录样品的电导率值,仪器公共参数设置情况如图 2 所示。

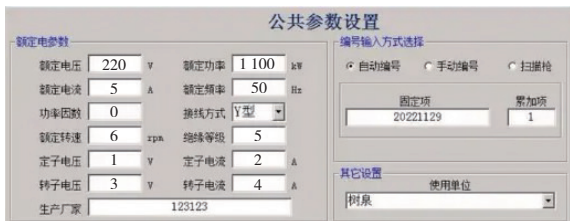


图 2 仪器公共参数

电导率与液体中溶解物的浓度通常成正比关系,这种关系可以用下式表示:

$$l=a \times C \quad (1)$$

式中: l 表示电导率; a 表示比例常数,即电导率系数; C 表示溶解物水的浓度^[13-15]。因此 C 可以视为水的浓度,即水含量。考虑到固定含水率下不同温度油样电导率可能存在一定差异,因此确定油品电导率与温度之间存在下述等式关系:

$$\lg K_{t_1}=N(t_1-t_2)+\lg K_{t_2} \quad (2)$$

式中: K_{t_1} 表示温度为 t_1 时的油品电导率; N 表示

温度-电导率系数; t_1 和 t_2 均表示不同时刻温度; K_{t_2} 表示温度为 t_2 时的油品电导率^[16-20]。根据上述公式可以看出,电导率的对数与温度呈现出一定线性关系,将 $\lg K_{t_2}-Nt_2$ 定义为 c ,则上述方程可以转化为

$$\lg K=Nt+c \quad (3)$$

c 值在特定情况下可能保持不变,因此通过测量某一温度下样品的电导率来推算出该油品在其他任意温度下的电导率。

5 测量结果分析

根据上述方法对油样电导率进行测量,表 3 中记录了不同温度下,添加不同体积分数水分后各油样电导率数据。

表 3 不同温度下含水率油样电导率记录表

温度/℃	不同含水率电导率/(S/m)				
	0.20%	0.10%	0.05%	0.01%	0.00%
35	5.40	4.93	12.10	5.47	4.26
30	4.22	3.90	9.16	4.98	3.44
25	3.42	3.13	5.82	4.39	2.80
20	2.87	2.50	3.93	4.14	2.32
15	2.40	2.27	3.13	3.78	1.08
10	2.20	1.96	2.64	3.56	1.78

根据表 3 中的数据,绘制不同温度下含水率与电导率的关系曲线,如图 3 所示。

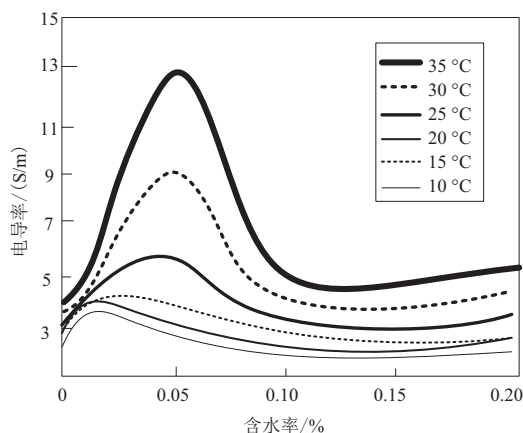


图 3 不同温度下含水率与电导率关系曲线图

从图 3 所展示的 6 条曲线中可以观察到,在固定温度下,随着液压油中含水量的增加,其电导率呈现出先上升后下降的趋势,形成了一个明显的峰值。经过深入分析,这种变化主要归因于样

品中水分赋存状态的变化。

在含水量较低的情况下,水分完全溶解于油中,这部分溶解的水分成为提高电导率的关键因素。然而,随着水分含量的增加,油液逐渐进入乳化状态,这一乳化现象显著地抑制了原油的电导率。虽然水分含量的增加本身会提高样品的电导率,但乳化作用的存在导致电导率总体呈现下降趋势。此外,当温度升高时,原油中水的溶解度增大,导致形成乳化状态所需的水分含量也相应增加,从而使得电导率曲线的峰值向更高含水量方向移动。

由于电导率在不同水分含量下随温度变化而显著变化,因此仅通过单一温度下的电导率值并不能直接、准确地转换为液压油中的具体含水量。因此,在采用电导法计算水分含量时,确保测量时的温度条件至关重要。

已知在 30℃ 时,含水量为 0.05% 的液压油样品电导率达到峰值,这一峰值相较于空白样品电导率增加到 2.67 倍。这一温度点恰好对应着样品由乳化状态向可溶性状态转变的临界点。也就是说,在 30℃ 下,含水量超过 0.05% 的样品将呈现乳化状态。

在实际应用中,首先应当通过油品在 30℃ 下的浑浊度来初步判断其水分含量是否超过 0.05%。对于呈现乳化状态的油品,需要进一步处理。而对于透明状态的油品,则需要测定其在 30℃ 下的电导率,并将其与脱水后样品的电导率进行对比。若该比值接近 2.67,则表明油品的水分含量已达到或接近 0.05% 的警戒值,此时应当进行脱水处理,以确保液压系统的正常运行和油品性能的稳定。

在计算出液压油中的含水量后,需要根据规定的含水率标准来判断样品的液压油是否满足要求。这些标准通常由相关的行业标准或技术规范所规定,旨在确保液压油在使用过程中能够保持其良好的性能和稳定性。如果计算得到的含水量超过了规定的标准值,那么就需要采取相应的措施来降低液压油的含水率。可通过更换新的液压油、对现有的液压油进行干燥处理或添加吸水剂等方式进行调节。通过及时检测和处理,可以有效地控制液压油的含水率,确保电力系统的安全稳定。

6 结语

通过本研究对基于电导率法的变电站断路器

液压机构液压油含水率检测方法的探讨与实践,成功地建立了一种新型的含水率检测方案。该方案不仅继承了电导率法测量速度快、操作简便的优点,而且通过优化测量条件、改进数据处理方法等手段,有效提高了测量的准确性和稳定性,为液压油的含水率检测提供了一种新的有效手段。此外,本研究还针对实际应用中可能出现的问题,提出了相应的解决方案和预防措施,为变电站断路器液压机构的维护和检修提供了有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 金昌键,邓永刚,刘文,等. 预压系统液压油含水率超标的故障分析与改进[J]. 农业装备技术, 2023, 49(6):31-33.
- [2] KIM M S, KANG S H. A study on improvement of IEC 61850 - based substation restoration scheme for minimizing outage area in case of breaker failure [J]. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2020, 69:396-401.
- [3] HASAN S. A hybrid circuit breaker based on current commutation approach for multi - feeder DC railway substations [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2):234-239.
- [4] HONG J, NUQUI R F, KONDABATHINI A, et al. Cyber attack resilient distance protection and circuit breaker control for digital substations [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7):4332-4341.
- [5] 乔志东,高自成,廖凯,等. 芦苇笋采收机举升俯仰机构液压系统的设计与研究[J]. 机械设计, 2024, 41(2):32-39.
- [6] ARIAS VELÁSQUEZ R M, MEJIA LARA J V. Circuit breakers 500 kV degradation in substation reactors caused by inductive current [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 90:64-81.
- [7] LU Y F, SU Y, WANG F F. Optimal design of converters and circuit breakers in high voltage substation system [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186:012054.
- [8] 程智余,黄战,于晓蕾. 基于智能一次设备构架的自动化模块变电站设计研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(4):135-138, 143.
- [9] 胥勇,王进,席管龙,等. 35 kV 变电站运行常见的问题和预防方式初探[J]. 中国设备工程, 2024(增刊1):94-95.
- [10] ZAREEI S A, HOSSEINI M, GHAFORY-ASHTIANY M. Evaluation of power substation equipment seismic vulnerability by multivariate fragility analysis: a case study on a 420 kV circuit breaker [J]. Soil Dynamics

- 收稿日期·2024-11-22

- [9] WANG K, DU F. Coal-gas compound dynamic disasters in China; a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 133: 1-17.
- [10] XU L J, FAN C J, LUO M K, et al. Elimination mechanism of coal and gas outburst based on geodynamic system with stress - damage - seepage interactions[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(1): 74.
- [11] SADEGHI S, SOLTANMOHAMMADLOU N, NASIRZADEH F. Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines [J]. Journal of Safety Research, 2022, 83: 8-25.
- [12] 贾林杰. 煤矿安全风险监测预警体系的设计及应用分析[J]. 西部探矿工程, 2025, 37(4): 188-191.
- [13] 王森. 人工智能技术在煤矿安全监测中的应用[J]. 信息记录材料, 2025, 26(5): 136-138.

- [14] 王喆. 煤矿火区远程快速隔离密闭灾害系统设计[J]. 能源与节能, 2024(3): 224-227.
- [15] 邵泽华, 李勇. 具有自学习功能的安全切断型智能燃气表[J]. 煤气与热力, 2022, 42(5): 39-40, 46.
- [16] 吴桐, 袁培燕. 一种基于指数移动平均的物联网边缘设备选择机制[J]. 应用科学学报, 2025, 43(1): 183-194.
- [17] 王梅, 任怡果, 刘勇, 等. 求解多核学习的自适应随机递归梯度下降法[J]. 计算机技术与发展, 2025, 35(7): 1-8.
- [18] 潘帅. 基于多传感器的煤矿通风智能监测系统的设计[J]. 能源与节能, 2025(1): 120-123.
- [19] 于建华. 煤矿机械设备智能化技术在安全生产中的应用[J]. 南方农机, 2024, 55(24): 144-147.
- [20] 王成, 周汝凯. 火灾引起煤矿瓦斯爆炸事故分析与反思[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025(1): 61-63.

收稿日期:2024-10-09