

# 绝缘油溶解气体分析在电力设备故障诊断中的应用

王秉乾

内蒙古电力(集团)有限责任公司乌兰察布供电分公司 内蒙古 乌兰察布 012000

**摘要:** 绝缘油溶解气体分析技术在电力设备故障诊断中发挥着至关重要的作用。该技术通过检测绝缘油中溶解的气体种类和浓度,能够及时发现电力设备内部的潜在故障,如过热、放电、受潮等。本文综述了绝缘油溶解气体分析技术的改进与创新,包括提高分析准确性的方法、在线监测技术以及综合诊断方法。这些技术的应用不仅提高故障诊断的准确性和效率,还为电力设备的预防性维护和安全运行提供有力支持。

**关键词:** 绝缘油; 溶解气体分析; 电力设备; 故障诊断

## 1 绝缘油与电力设备运行关系概述

### 1.1 绝缘油的功能特性

绝缘油在电力设备中发挥着多重关键作用,这些功能特性共同确保了电气设备的安全、稳定和高效运行。绝缘油最主要的作用就是提供良好的绝缘性能。在高压电气设备中,如变压器、电容器等,绝缘油能够有效地阻止电流的泄漏,从而确保设备正常运行。绝缘油的高绝缘强度能够有效地隔离带电部分,防止因电气短路而引发的设备故障和安全事故。在电气设备运行过程中,由于电流的热效应,设备会产生大量的热量。绝缘油能够吸收并带走这些热量,起到冷却设备的作用。这种冷却效果对于维持设备的稳定运行至关重要,因为它可以防止设备因过热而损坏。在高压开关设备中,当发生电气故障时,可能会产生电弧。电弧的高温和能量会对设备造成严重的损害。绝缘油能够迅速熄灭电弧,降低电弧对设备的破坏作用,从而保护设备免受进一步损害。绝缘油还具有良好的防腐和防潮性能。在潮湿的环境中,电气设备容易受潮而导致性能下降或损坏。绝缘油能够形成一层保护膜,防止潮气和腐蚀性物质侵入设备内部,从而延长设备的使用寿命。绝缘油在低温下仍能保持流动性,不会因为低温而变得黏稠,从而保证电气设备在低温环境下的正常运行。绝缘油具有良好的氧化安定性,能够长期保持其化学性质不变,不会因为氧化而产生酸性物质,从而保证电气设备的安全运行。

### 1.2 电力设备运行中绝缘油的变化

在电力设备运行过程中,绝缘油会受到电、热、化学等多种因素的影响,从而发生一系列变化。绝缘油同固体绝缘材料一样,在电、热、化学等的作用下,会不断地被氧化(也称“老化”),逐渐失去绝缘性能。一般油温从60摄氏度起,每增加10摄氏度,油的氧化速度增加1倍。当油温达100摄氏度以上时,油会热分裂。油

在阳光照射下,由于阳光中紫外线的作用,也会使油很快氧化成酸性。电力设备在制造过程中环境不清洁,使微小金属、杂质颗粒附着在变压器绕组和铁芯上,注油时混入气泡,某些有机绝缘材料溶解在油中等,这些杂质对油的氧化都起到触媒作用,加速了油的氧化<sup>[1]</sup>。氧化后的油颜色由淡黄色变为深暗红色,由透明变为浑浊,黏度、含水量、酸价和灰分都有所增加,甚至有大量油泥从油中析出,这些都会严重影响电力设备的安全运行。绝缘油的绝缘性能变坏,击穿电压显著降低,介质损耗显著增加。

## 2 绝缘油溶解气体来源及与故障的关联

### 2.1 溶解气体的产生来源

绝缘油在电力设备中的溶解气体主要来源于以下几个方面:(1)设备制造与加工过程:绝缘油在加工过程中会与生产环境中的大气接触,从而吸收一定量的空气,包括氧气(O<sub>2</sub>)和氮气(N<sub>2</sub>)。这些气体在油中溶解,成为溶解气体的一部分。在变压器等电力设备的制造过程中,由于工艺需要,油液可能会与设备内部的金属部件接触,导致油中溶解了一些金属元素及其化合物产生的气体。(2)设备运行过程中的变化:在电力设备运行过程中,绝缘油会受到电、热、水分等多种因素的影响,发生化学变化,产生各种低分子烃类气体,如甲烷(CH<sub>4</sub>)、乙烯(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)、乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)、乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)等,以及二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和一氧化碳(CO)等气体。这些气体大部分溶解在油中。当设备内部存在过热或放电故障时,会加速这些气体的产生速度。(3)材料老化与分解:绝缘油是由许多不同碳氢化合物分子组成的混合物,在电或热的作用下,其中的某些化学键会断裂,产生自由基和氢原子等,这些自由基和氢原子会经过复杂的化学反应重新生成氢气和烃类物质。设备内部的固体绝缘材料(如纤维素)也会因老化而分解,

产生一氧化碳和二氧化碳等气体。(4)水分与化学反应:绝缘油中的水分会与油中的某些成分(如铁)发生化学反应,产生氢气等气体。水分还会加速油的氧化过程,进一步产生更多的气体。

## 2.2 常见溶解气体与故障类型对应关系

在电力设备中,绝缘油溶解气体的种类和含量与设备内部的故障类型有着密切的对应关系。氢气( $H_2$ ):氢气是局部放电和电弧放电的主要产物之一。当设备内部存在放电故障时,绝缘油会分解产生大量的氢气。当设备内部存在高温过热故障时,油中的某些成分也会分解产生氢气。甲烷( $CH_4$ ):甲烷是油在低温下氧化的主要产物之一。当设备内部存在低温过热故障时,油会分解产生甲烷。甲烷也是局部放电的产物之一,但产量相对较低。乙烯( $C_2H_4$ )和乙烷( $C_2H_6$ ):乙烯和乙烷是油在高温下氧化的主要产物之一。当设备内部存在高温过热故障时,油会分解产生乙烯和乙烷。当设备内部存在电弧放电故障时,也会产生乙烯和乙烷<sup>[2]</sup>。乙炔( $C_2H_2$ ):乙炔是电弧放电的主要产物之一。当设备内部存在电弧放电故障时,绝缘油会分解产生大量的乙炔。乙炔的产生量通常与放电故障的严重程度成正比。一氧化碳( $CO$ )和二氧化碳( $CO_2$ ):一氧化碳和二氧化碳是油中固体绝缘材料老化的主要产物之一。当设备内部存在固体绝缘材料老化故障时,会产生大量的一氧化碳和二氧化碳。当设备内部存在高温过热故障时,油中的某些成分也会分解产生一氧化碳和二氧化碳。

## 3 绝缘油溶解气体分析在其他电力设备故障诊断中的应用

### 3.1 互感器

互感器作为电力系统中重要的电气设备,承担着电流、电压的变换和传输任务,其运行状态直接影响到电力系统的稳定性和安全性。绝缘油溶解气体分析技术在互感器故障诊断中发挥着重要作用。在互感器内部,绝缘油不仅起到绝缘和冷却的作用,还作为溶解气体的载体,能够反映出互感器内部的运行状态。当互感器发生故障时,如局部放电、过热或受潮等,绝缘油中的化学成分会发生变化,产生各种溶解气体。这些气体的种类、含量和比例与故障的类型和严重程度密切相关。例如,当互感器内部发生局部放电时,绝缘油会分解产生氢气( $H_2$ )和甲烷( $CH_4$ )等气体。随着放电的持续发展,乙烯( $C_2H_4$ )和乙烷( $C_2H_6$ )等气体的含量也会逐渐升高。通过分析这些气体的种类和含量,可以判断互感器内部是否存在局部放电故障,以及故障的发展程度。当互感器内部存在过热故障时,绝缘油中的烃类气

体会发生热分解,产生乙烯、乙烷等气体,同时一氧化碳( $CO$ )和二氧化碳( $CO_2$ )的含量也会发生变化。通过分析这些气体的变化趋势,可以及时发现互感器内部的过热故障,并采取相应的措施进行处理,防止故障进一步发展。在互感器的维护过程中,绝缘油溶解气体分析技术还可以用于判断互感器的绝缘状态。通过对绝缘油中溶解气体的定期检测和分析,可以及时发现互感器绝缘性能的下降情况,为互感器的维护和更换提供科学依据。

### 3.2 断路器

断路器是电力系统中用于控制和保护电路的重要设备。其内部填充的绝缘油在断路器运行过程中起着绝缘、冷却和灭弧的作用。绝缘油溶解气体分析技术在断路器故障诊断中同样具有重要意义。当断路器内部发生故障时,如电弧放电、过热或受潮等,绝缘油中的化学成分会发生变化,产生各种溶解气体。这些气体的种类、含量和比例与故障的类型和严重程度密切相关。例如,当断路器内部发生电弧放电故障时,绝缘油会分解产生大量的氢气( $H_2$ )和乙炔( $C_2H_2$ )等气体。通过分析这些气体的含量和比例,可以判断断路器内部是否存在电弧放电故障,以及故障的发展程度。还可以根据气体的变化趋势,预测故障的发展趋势,为断路器的维护和更换提供科学依据<sup>[3]</sup>。当断路器内部存在过热故障时,绝缘油中的烃类气体会发生热分解,产生乙烯、乙烷等气体,同时一氧化碳和二氧化碳的含量也会发生变化。通过分析这些气体的变化趋势,可以及时发现断路器内部的过热故障,并采取相应的措施进行处理,防止故障进一步发展。在断路器的维护过程中,绝缘油溶解气体分析技术还可以用于判断断路器的灭弧性能。通过对绝缘油中溶解气体的定期检测和分析,可以及时发现断路器灭弧性能的下降情况,为断路器的维护和更换提供科学依据。

### 3.3 其他高压电器设备

除了互感器和断路器外,绝缘油溶解气体分析技术还可以应用于其他高压电器设备的故障诊断中。在高压开关中,绝缘油溶解气体分析技术可以用于判断开关内部的绝缘状态和灭弧性能。当开关内部发生故障时,绝缘油中的化学成分会发生变化,产生各种溶解气体。通过分析这些气体的种类和含量,可以及时发现开关内部的故障情况,并采取相应的措施进行处理。在变压器中,绝缘油溶解气体分析技术同样可以用于判断变压器的绝缘状态和过热情况。当变压器内部发生故障时,绝缘油中的烃类气体会发生热分解,产生乙烯、乙烷等气

体。通过分析这些气体的变化趋势，可以及时发现变压器内部的过热故障，并采取相应的措施进行处理，防止故障进一步发展。在电抗器等高压电器设备中，绝缘油溶解气体分析技术也可以用于判断设备的绝缘状态和过热情况。通过对绝缘油中溶解气体的定期检测和分析，可以及时发现设备内部的故障情况，为设备的维护和更换提供科学依据。

#### 4 绝缘油溶解气体分析技术的改进与创新

##### 4.1 提高溶解气体分析准确性的方法

绝缘油溶解气体分析技术的准确性对于电力设备故障的早期发现与诊断至关重要。为了提高分析的准确性，首先，优化气体采集与预处理流程是关键，通过改进采样装置，确保在采样过程中尽可能减少外界气体的干扰，采用先进的预处理技术，如脱气、净化等，以消除油中杂质对气体分析的影响。引入高精度、高灵敏度的气体检测仪器，如气相色谱仪、质谱仪等，能够更精确地测定溶解气体的种类和浓度，进一步提升分析的准确性。其次，建立更为完善的标准气体库和数据库也是提高准确性的重要途径。标准气体库用于校准仪器，确保测量结果的准确性；而数据库则存储了大量实际故障案例中的气体数据，通过对比分析，可以更有效地识别故障类型。最后，引入人工智能和机器学习算法，对气体数据进行智能分析，能够自动识别异常数据，减少人为判断的主观性，从而提高分析的准确性和可靠性。

##### 4.2 绝缘油溶解气体分析的在线监测技术

随着传感器技术和物联网技术的快速发展，绝缘油溶解气体分析的在线监测技术得以实现。在线监测技术通过在电力设备中安装传感器，实时监测绝缘油中溶解气体的含量变化，无需人工取样和实验室分析，大大提高了监测的实时性和效率。在线监测技术具有多个优势。它能够实时监测气体的变化趋势，及时发现异常变化，为故障预警和快速响应提供有力支持。在线监测技术能够减少人工干预，降低操作成本，提高监测的自动化水平。通过与其他监测技术的融合，如振动监测、温度监测等，可以实现电力设备状态的综合评估，提高故

障诊断的准确性和全面性<sup>[4]</sup>。为了实现更高效的在线监测，研究者们还在不断探索新的传感器材料和传感技术，以提高传感器的灵敏度和稳定性，优化数据传输和处理算法，确保监测数据的实时性和准确性。

##### 4.3 绝缘油溶解气体分析的综合诊断方法

绝缘油溶解气体分析技术虽然能够提供关于电力设备内部状态的重要信息，但仅凭溶解气体数据往往难以全面诊断故障。研究者们提出了综合诊断方法，将溶解气体分析与其他诊断技术相结合，以提供更全面、准确的故障诊断结果。综合诊断方法包括将溶解气体分析与电气试验、油化试验、红外测温、超声波检测等多种技术相结合。通过多源数据的融合分析，可以更全面地了解设备内部的运行状态，准确判断故障类型和位置。综合诊断方法还注重数据的挖掘和智能分析，利用大数据和人工智能技术，对大量历史数据和实时数据进行深度挖掘和分析，可以发现设备故障的潜在规律和趋势，为故障预警和预防性维护提供科学依据。

#### 结束语

综上所述，绝缘油溶解气体分析技术在电力设备故障诊断中具有广泛的应用前景和重要的实践价值。随着技术的不断进步和应用的深入，该技术将为电力设备的安全稳定运行提供更加全面、准确和高效的故障诊断手段。未来，期待看到更多创新性的技术和方法应用于这一领域，共同推动电力设备故障诊断技术的发展。

#### 参考文献

- [1]侍海欢,许旦旦,王龙龙,胡勇.高压电力设备绝缘诊断的声学检测技术[J].科技风,2019,(20):201.
- [2]吴文英,易美玲,温君,郑师武.变压器油中溶解气体的分析与判断[J].能源研究与管理,2019(04):57-60.
- [3]任双赞,吴昊,刘晓立,朱红梅,单玉涛,刘晶,韩红蕊.变压器油中溶解气体在线监测技术研究现状[J].电工技术,2020(19):86-90.
- [4]曹兵,刘为,薛晓敏,等.绝缘油中溶解气体分析在电气设备故障诊断中的应用[J].山东电力技术,2018,45(12):46-49. DOI:10.3969/j.issn.1007-9904.2018.12.011.