

利用气相色谱分析诊断变压器的故障原理

任彦斌, 徐立福

(金安桥水电站有限公司, 云南 丽江 674100)

摘要: 变压器在电力系统中起到了电压转换、电流变换、阻抗变化、稳压及隔离的作用。但随着变压器运行时的高温, 会导致绝缘油老化和绝缘材料损坏的直接原因。绝缘油和固态绝缘在逐渐老化的过程中, 会裂解生成气体, 而这些气体在一定的条件下都稀释在绝缘油中, 因此通过对绝缘油检测分析, 根据气体含量可直接判断变压器内部运行情况。所以利用气相色谱分析法是一种简洁、快速判断变压器内部的重要方法。

关键词: 变压器; 故障; 色谱分析; 判断方法

中图分类号: TV734.3; TV737

文献标识码: B

文章编号: 1006-3951(2024)Z1-0086-03

DOI: 10.3969/j.issn.1006-3951.2024.Z1.023

Principle of Diagnosing Transformer Faults using Gas Chromatography Analysis

REN Yanbin, XU Lifu

(Jin'anqiao Hydropower Station Co., Ltd, Lijiang 674100, China)

Abstract: Transformers play a role in voltage conversion, current conversion, impedance variation, voltage stabilization, and isolation in the power system. However, the high temperature during transformer operation is the direct cause of insulation oil aging and insulation material damage. During the gradual aging process of insulating oil and solid insulation, gases will be generated by cracking, and these gases will be diluted in the insulating oil under certain conditions. Therefore, by detecting and analyzing the insulation oil, the internal operation of the transformer can be directly judged based on the gas content. Gas chromatography analysis is an important method for concise and rapid determination of the interior of transformers.

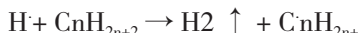
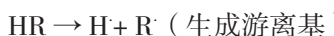
Keywords: transformer; fault; chromatography analysis; judgment method

0 引言

绝缘油色谱检测分析法, 是通过对绝缘油取样-检测-分析(对绝缘油中气体含量、种类及相关气体的比值和产气率), 综合来判断变压器内部是否存在故障, 以及故障类型。通过对检测数据的分析和对比, 及时掌握变压器运行时的内部状况。

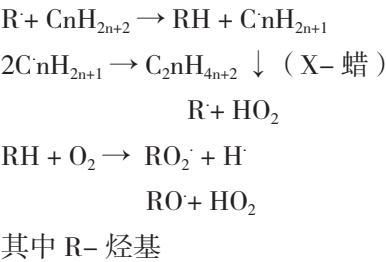
绝缘油主要是碳(C)和氢(H)组成的化合物^[1]。固态绝缘^[2]的成分主要为绝缘纸, 而绝缘纸的主要成分为 α -纤维素, 纤维素是由碳(C)、氢(H)、氧(O)组成的链状高聚合碳氢化合物, 分子式为

$(C_6H_{10}O_5)_n$ 。变压器运行时, 随着内部故障逐渐扩大, 出现放电和局部高温现象。在放电和高温的影响下, 导致油分子和高聚合碳氢化合物中C-H键和C-C键断裂而发生裂解, 在活化的促进下产生氢气(H_2)、饱和和不饱和的气态烃化物^[3](CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_2H_4), 部分单键如C-C、H-H在氧化的作用下生成 CO_2 、CO和 H_2O 。另一方面通过不饱和烃的聚合反应生成X-蜡高化合物。变压器因内部故障不同, 辐射的能量不同, 导致产生的气体也有差异。化学反应过程为:



* 收稿日期: 2024-02-28

作者简介: 任彦斌(1989-), 男, 甘肃庄浪人, 助理工程师, 主要从事水电站机电设备运维及检修工作。



1 变压器内部故障时产生的气体条件

- 1) 局部过热故障。局部过热又分为低温过热和高温过热，低温过热（< 700℃），产生的主要气体为 CO₂ 和 CO，次要气体为少量的 H₂。高温过热（> 700℃），产生的主要气体为 CH₄、C₂H₂ 和 C₂H₄，次要气体为 C₂H₆。
- 2) 电弧放电故障。电弧放电故障点温度为 1 300 ~ 1 600℃，产生的主要气体为 C₂H₂、CO 和 H₂，次要气体为 CH₄、C₂H₄、CO₂。
- 3) 局部放电故障。局部放电产生的热能较小，产生的主要气体为 CH₄ 和 H₂。
- 4) 绝缘油与绝缘纸在不同故障下产生的主要气体成分^[4]见表 1。

| 表 1 绝缘油与绝缘纸在不同故障下产生的气体成分表 | | |
|---------------------------|--|---|
| 故障类型 | 主要气体 | 次要气体 |
| 绝缘油过热 | CH ₄ 、C ₂ H ₄ | H ₂ 、C ₂ H ₆ |
| 绝缘油、纸过热 | CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO ₂ 、CO | H ₂ 、C ₂ H ₆ |
| 绝缘纸中放电 | H ₂ 、CH ₄ 、CO | C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆ 、C ₂ H ₂ |
| 绝缘油中放电 | H ₂ 、C ₂ H ₂ | |
| 绝缘油中电弧 | H ₂ 、C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₄ | CH ₄ 、C ₂ H ₆ |
| 绝缘油、纸过电弧 | H ₂ 、C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₄ 、CO | CH ₄ 、C ₂ H ₆ 、CO ₂ |

2 气体含量的注意值及产气率

变压器运行时，随着内部故障不同，产生的气体也不同，产生的这些气体大部分都会稀释在绝缘油中。随着故障逐级扩大，产气率也逐渐加快，产气率大于溶解率时，便有一部分气体以气态的形式释放出来。为了及时了解变压运行时的内部状况，根据 DL/T 596-2021《电力设备预防性试验规程》中的规定，要求了绝缘油检测周期，其中也明确规定了 H₂、C₂H₂ 和总烃气体含量的注意值（见表 2）和产气率的注意值^[5]。如 H₂、C₂H₂ 和总烃气体的含量超过注意值时，根据以往的气体检测数据或复测数据，结合该气体的产气率，综合判断设备内部故障类型和设备未来发展的趋势。

| 表 2 绝缘油含气量注意值表 | | | | | | μ L/L |
|----------------|-------------------------------|----------|-------|----------|-------|-------|
| 设备 | 气体成分 | ≥ 330 kV | | ≤ 220 kV | | |
| | | 运行前 | 运行中 | 运行前 | 运行中 | |
| 变压器 | H ₂ | < 10 | < 150 | < 30 | < 150 | |
| | C ₂ H ₂ | < 0.1 | < 1 | < 0.1 | < 5 | |
| | 总烃 | < 10 | < 150 | < 20 | < 150 | |
| 套管 | H ₂ | < 50 | < 500 | < 150 | < 500 | |
| | C ₂ H ₂ | < 0.1 | < 1 | < 0.1 | < 2 | |
| | 总烃 | < 10 | < 150 | < 10 | < 150 | |

2.1 产气率的计算方法和注意值

变压器的内部故障会直接影响气体产气率的变化。为更准确的判断变压器内部运行情况，可结合气体产气率来辅助判断。气体产气率又分为绝对产气率和相对产气率，气体产气率计算公式和注意值如下。

1) 绝对产气率：

$$\lambda a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t} \times \frac{m}{p}$$

式中：λa—绝对产气率，mL/d；C_{i2}—第 2 次取样检测中含气量浓度，μ L/L；C_{i1}—第 1 次取样检测中含气量浓度，μ L/L；Δ t—2 次取样相隔实际运行时间，d；m—变压器油量，t；P—变压器油密度，t/m³。

变压器运行中绝缘油含气量绝对产气速率注意值见表 3。

| 表 3 变压器运行中绝缘油含气量绝对产气速率注意值表 | | | μ L/L |
|-------------------------------|-----|-----|-------|
| 气体成分 | 密闭式 | 开放式 | |
| H ₂ | 10 | 50 | |
| C ₂ H ₂ | 0.2 | 0.1 | |
| 总烃 | 12 | 6 | |
| CO | 100 | 50 | |
| CO ₂ | 200 | 100 | |

2) 相对产气率：

$$\lambda r = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{C_{i1}} \times \frac{1}{\Delta t} \times 100\%$$

式中：λr—相对产气率，%/月；C_{i2}—第 2 次取样检测中含气量浓度，μ L/L；C_{i1}—第 1 次取样检测中含气量浓度，μ L/L；Δ t—2 次取样相隔实际运行时间，月。

对于运行中的变压器，总烃相对产气率注意值为 10%。

2.2 气体注意值应用原则

1) 造成气体含量增多的因素种类较多，所以气体含量超过注意值并不是判断设备故障的唯一标准。当气体含量超过注意值时，应缩短气体检测周期，结合气体产气率及电气预防性试验来综合进行判断。如果气体含量超过注意值且长期处

于平稳状态，产气率也正常，设备可正常运行。如果气体产气率超过注意值，气体含量未超过注意值，且气体含量在逐渐升高，设备应缩短检测周期，结合电气预防试验来综合判断设备内部情况，提前采取措施，排除故障。

2) 如果绝缘油中初次检测到 H₂，且含量稳定无明显增长趋势，设备可正常投入运行。因绝缘油受潮在电解的情况下也会产生 H₂，其次要结合绝缘油中含水量来综合判断。所以初次检测到 H₂ 不能单独作为变压器内部故障判断依据。

3 通过气体含量判断变压器内部故障的方法

3.1 气体含量故障比值法

变压器运行时内部发生故障，气体含量越来越高，因产生气体故障的灵活性较大，又无法判断故障的具体位置和类型。采用三比值法，会大

大提高变压器内部故障类型的诊断和准确性。三比值法编码见表 4。

表 4 三比值法编码表

| 气体比值范围 | 比值范围编码 | | |
|---------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ |
| < 0.1 | 0 | 1 | 0 |
| [0.1-1) | 1 | 0 | 0 |
| [1-3) | 1 | 2 | 1 |
| ≥ 3 | 2 | 2 | 2 |

注：如 $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}=1 \leq$ 比值 < 3 时，编码为 1， $\frac{CH_4}{H_2}=0.1 \leq$ 比值 < 1 时，编码为 0， $\frac{C_2H_4}{C_2H_6} \geq 3$ 时，编码为 2。

3.2 三比值法编码诊断变压器内部故障类型
故障类型见表 5。

3.3 CO₂/CO 比值

变压器绝缘油和绝缘纸在正常老化和故障老化过程中，会产生 CO₂ 和 CO。虽然对它们的含量

表 5 三比值法编码诊断故障表

| 编码组合 | | | 故障类型判断 | 典型故障案例 |
|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------|---|
| $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ | | |
| 0 | 0 | 0 | 低温过热 ≤ 150℃ | 绝缘纸过热，CO 和 CO ₂ 含量会增高 |
| | 2 | 0 | 低温过热 (150 ~ 300℃) | |
| | 2 | 1 | 中温过热 (300 ~ 700℃) | 分接开关接触不良，引线连接不良，导线接头不良，绕组短路引起的发热，铁芯多点接地，硅钢片局部短路 |
| | 0/1/2 | 2 | 高温过热 ≤ 700℃ | |
| 2 | 1 | 0 | 局部放电 | 高湿、气隙、毛刺、漆瘤、杂质等引起低能量密度放电 |
| | 0/1 | 0/1/2 | 低能放电 | 不同电位之间的火花放电，引线与穿缆套管 |
| | 2 | 0/1/2 | 低能放电兼过热 | (或引线屏蔽管) 之间的环流 |
| 1 | 0/1 | 0/1/2 | 电弧放电 | 线圈匝间、层间放电、相间闪络、分接引线间油隙闪络、 |
| | 2 | 0/1/2 | 电弧放电兼过热 | 开关拉弧、引线对箱壳或其他接地体放电 |

没有明确的规定要求，但是随着变压器运行年限的增长，CO₂ 和 CO 的含量逐渐增高，因此通过 CO₂ 和 CO 的比值，是判断变压器内部绝缘件老化的重要依据。如果 CO₂/CO < 3，属于绝缘油和绝缘纸正常老化现象，如果 CO₂/CO > 7 时，则判断变压器内部绝缘油和绝缘纸老化严重。结合其他气体含量查找原因即时处理。通过油样检测分析和电气预防性试验综合判断，绝缘油中 CO₂ 和 CO 含量是由设备内部正常高温所引起的，可通过改造设备冷却方式来缓解设备老化状况。

4 结束语

综合上述，变压器在运行期间出现故障，导致内部温度异常，可通过色谱检测分析的方法简

洁、快速、准确的掌握变压器内部状况，及时对变压器的运行状况进行评估和预判。合理安排变压器检修周期，及时消除变压器内部潜在故障，延长变压器使用寿命和提高电力系统的安全稳定运行。

参考文献：

[1] 赵秀梅, 杨波, 刘沛宏, 等. 过热型变压器内部潜伏性故障的典型症状与诊断方法 [J]. 水电站机电技术, 2022 (10): 81-84.
[2] 蒋福佑, 顾杰, 张玉文. 变压器油中溶解气体色谱分析与故障识别 [J]. 四川电力科技, 2006 (6): 75-78.
[3] 李春梅, 毕法森. 变压器油中溶解气体色谱分析与诊断 [J]. 东北电力技术, 2009 (2): 32-34.
[4] 张境. 变压器油中色谱溶解气体色谱分析及故障识别 [J]. 商品与质量, 2017 (9): 143+145.
[5] 王景林. 变压器常见故障及分析 [J]. 云南电力技术, 2010, 38 (2): 73-78+ 后插 1.