

变压器油介质损耗因数升高的原因探讨

徐源中

(上海久隆电力(集团)有限公司 上海 200052)

摘要: 变压器油是石油的一种分馏产物,油品受到污染或逐渐老化后,油的介质损耗因数会升高。介质损耗因数越大,越会使变压器的整体损耗增大。因此在实际生产生活中,变压器油的介质损耗因数必须符合相应的国家标准。本文以此为切入点,认为变压器油的介质损耗因数有时还可能受其他因素的影响。介质损耗因数数值比较高时,通常认为该变压器油中可能含有较多的水或者其他金属离子等杂质,需要处理。而在实际生产过程中,一些变压器油经过真空滤油或白土吸附法处理,介质损耗因数降低后在短时间内又再次升高。这一研究结果对业界的参考和借鉴作用不言而喻。

关键词: 变压器油老化;介质损耗因数;烷烃;环烷烃;芳香烃;游离基反应;离子型反应

0 引言

变压器油的化学组成十分复杂,大约含有 2900 多种化合物。它主要是有三类烃类物质组成:烷烃、环烷烃、芳香烃。其中,烷烃约 25% ~ 60%,环烷烃约 30% ~ 60%。除此之外,变压器油在密封之前与空气接触,可能还吸收了部分空气中的水、二氧化碳、氧气、氮气等。变压器油介质损耗因数在变压器油使用一段时间后会由于油质老化或是受到污染后升高。但在实际生产过程中发现一些变压器油经过真空过滤或白土吸附法处理后,介质损耗因数降低,而在短时间内又再次升高。因此认为变压器油的介质损耗因数有时还可能受其他因素的影响。比如在变压器运行时,热量比较高,电场也比较强。这有利于有机物、水、金属催化剂更快速地发生反应。同时也有利于有机反应中,有机物大分子游离基和离子的形成,从而促使反应更快进行。并且由于有机物大分子游离基和离子并非杂质,因而在老化变压器油的处理过程中难以去除。建议可以考虑添加抑制游离基产生的物质,进行进一步的实验研究。

1 介质损耗因数检测步骤和相关标准

1.1 介质损耗因数的定义

绝缘材料在电场作用下,由于介质电导和介质极化的滞后效应,在其内部引起的能量损耗。也叫介质损失,简称介损。介质损耗因数是指介质损耗角正切值,简称介损角正切。

1.2 介质损耗因数的检测步骤

1.2.1 实验准备

棕色磨口瓶、介质损耗因数检测仪、聚乙烯塑料管

或耐油橡胶软管、废油收集桶、橡胶手套。

1.2.2 实验取样

将聚乙烯塑料管或耐油橡胶软管套到取样油阀出油嘴上,拧开封油螺钉待油品从管口流出片刻后,将导管另一端接到棕色磨口瓶瓶口进行取样。待瓶子装满,油品略有溢出时,结束取样并拧紧封油螺钉,密封棕色磨口瓶,取样完成。为了保证油品检测的准确性,样品需在 3 天之内进行检测。

1.2.3 实验仪器

BRUR 油测试仪 DTL C。

1.2.4 实验操作

本实验室采用的介质损耗因数检测仪器为:奥地利保尔检测技术有限公司出品的 BRUR 油测试仪 DTL C,如图所示。该仪器符合 IEC 61620:1998-11 标准的测量。国际 IEC 61620 标准是一种同时测量电导 G 和电容 C 的方法。这一方法使得计算绝缘液体的介电损耗因数成为可能。

介电损耗可通过绝缘油的电导率 σ 和电容率 ε 定义为:

$$\tan \delta = \sigma / (\varepsilon \omega)$$

式中: σ — 绝缘油的电导率;

ε — 电容率;

$\omega = 2\pi f$;

f — 频率。

打开油样瓶,将油样注入检测单元(油杯),至接近杯口处(约 40mL),按下放油按钮,排出仪器中的样品油,对仪器进行润洗。5min 后再次重复。经过 2 ~ 3 次润洗后,开始检测。设定检测温度为 90℃,

并进行编号，按 STRAT 键开始运行。约 1 h 后，显示结果并打印。

介质损耗因数执行的相关标准（按 GB 5654 进行， $\tan \delta$ （90℃）%）。



图 BAUR DTL 型油测仪

表 1 GB5 654 介质损耗因数标准

序号	要求	
	投入运行前的油	运行油
1	220kV 及以下， $\tan \delta \leq 1$	220kV 及以下， $\tan \delta \leq 4$
2	500kV， $\tan \delta \leq 0.7$	500kV， $\tan \delta \leq 2$

2 变压器运行一段时间后变压器油的组成

在变压器投入运行后，变压器油的主要作用是绝缘、散热、消弧并作为液压安全阀内的液封。尽管变压器油的化学组成比较稳定，但在强电场、热环境以及各种金属非金属固体或液体催化剂的共同作用下，它的组分会产生些许的变化。

2.1 运行油中的液体杂质

除了变压器油原本运行前就已有的烷烃、环烷烃、芳香烃等化合物之外，水以及其他烷烃、环烷烃、芳香烃氧化或其他化学反应后产生的物质。

2.1.1 运行油中的液体杂质的组成

大分子的烯烃、环烯烃、环炔烃、环二烯烃，还有有机酸以及苯的同系物等。另外在油的劣化过程中其主要的分解产物，如过氧化物、水溶性酸、低分子酸、

脂肪酸、水分、醇类、金属皂类（包括环烷酸铜及环烷酸亚铁）、醛类、清漆、沥青稀油泥，也会存在其中。

2.1.2 运行油中的液体组成变化

随着变压器使用年限的增加，变压器油的酸值和 pH 值会逐渐升高，也就是说，油中含有的酸性物质在逐渐增加。比如：水溶性酸、低分子酸、脂肪酸等。同时运行油的水（微水）含量在检测过程中也会受外部环境的影响，特别是空气湿度和温度。一般在冬季微水检测结果比较低，而在夏季检测结果比较高。在上海地区，梅雨季节的检测结果会更高。

2.2 运行油中的气体杂质

由于安全和质量监控的需要，也因为变压器油中气体组成能够为变压器故障诊断和状态监控提供依据，长期以来对于变压器油中的气体组成，一直是变压器使用和生产单位研究和检查的重点。

2.2.1 运行油中的气体杂质的组成

变压器油中气体主要包括：水（气体）、氧气、氮气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氢气、乙烯、乙炔等。

2.2.2 运行油中的气体组成变化

随着变压器使用年限的增加，变压器油中气体所含的一氧化碳、二氧化碳、氢气、乙烯、甲烷也会逐渐增加。其中氢气还可能受气温影响，在夏季占比相对较高，而在冬季占比相对较低。乙炔的增加可能指示着变压器内部有放电反应。

3 变压器运行环境可能对油组分产生的影响

有机化学反应如同其他化学反应一样，在使用化学反应方程式进行描述时，不可或缺的包括反应物、生成物以及反应条件。其中常见的反应条件包括加热、高温、通电以及加催化剂。而在运行的变压器中，这些反应条件、反应物都不缺乏。

因此，在这样的环境中，通常比较稳定的烷烃、环烷烃、芳香烃类物质具备发生化学反应的条件。正是这些化学反应使得变压器油中产生了原本不存在或极少量的小分子物质，如甲烷、氢气、乙烯、乙炔、一氧化碳、二氧化碳。油品的老化或者说氧化，在检测过程中，它的一个表现就是 $\tan \delta$ 的升高。

3.1 热环境可能对油组分产生的影响

变压器在正常运行时，上层油温应在 85℃ 以下，而强迫循环水冷或风冷的变压器为 75℃。根据国家标准变压器油的闪点（闭口）℃ 应符合 GB261，即投运前 10、25 号油应 $\geq 140^\circ\text{C}$ ，45 号油应 $\geq 135^\circ\text{C}$ ；同时运行油与新油原始测定值相比不低于 10℃。即正常情

况下，变压器油的闪点（闭口）℃应不小于 125℃。在变压器运行时，铁芯温度不应高于 105℃。而在变压器中，上层油温通常情况下是变压器油的最高温度，也就是说运行中的变压器油始终处于加热状态并长期存在电场环境。

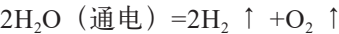
经过查阅相关资料，烷烃、环烷烃、芳香烃类物质都在点燃或高温情况下易发生化学反应（特别是存在催化剂的情况下），比如氧化、裂解、取代等。但是需要说明的是，有机化学反应主要可分为两大类：一类是离子型反应，这类反应进行时，反应物分子中的化学键断裂，共用电子对完全转移（异裂），形成正、负离子，以离子进行反应；另一类是游离基反应，这类反应进行时，反应物分子中的化学键断裂，共用电子平均地分配到成键的两个原子上（均裂），成为具有孤电子的很活泼的原子或基团，即游离基（自由基），通过游离基进行反应。而氧极易与游离基反应，生成过氧游离基或不活泼的过氧化物。通常游离基反应远少于离子反应。

此外，有机物还会发生周环反应。周环反应是不同于离子型反应、自由基反应的另一种协同反应。反应过程中，旧键断裂与新键生成是同步的，周环反应分为：电环化反应、环加成反应、sigma 迁移反应。周环反应中的电环化反应和环加成反应对比见表 2。

从以上化学反应的规律，以及变压器油在投运前和运行中的组成成分的变化情况，可以推测，变压器中由于各种金属、非金属催化剂在加热环境下，有机物发生一定反应，虽然这种反应的量可能极少，但热量能够加速化学反应的进行。例如：油温在 75℃时，大约需要 5 天油就能与氧反应，反之在油温 50℃时，此种反应大约需要几个月时间。

3.2 电场环境可能对油组分产生的影响

由于变压器油具有灭弧、绝缘、冷却等作用，变压器内部不可避免的有较多的电子，也可能有局部的放电或者是有电流通过。当电流和水同时出现时，著名的电解水反应就可能在变压器这一特殊环境中发生。



研究表明，即使在较低的电场条件下，油受氧的氧化作用也会加速进行。从表 3 中可以看出。在 49kV/cm

表 2 周环反应

电环化反应	含 4n 个 π 电子共轭多烯	加热顺旋环化，光照对旋环化
	含 4n+2 个 π 电子的共轭多烯	加热对旋环化，光照顺旋环化
环加成反应	含 4n 个 π 电子共轭多烯	加热同面 - 异面成环，光照同面 - 同面成环
	含 4n+2 个 π 电子的共轭多烯	加热同面 - 同面成环，光照同面 - 异面成环

表 3 变压器油在电场下的氧化性

项目	电场强度 / (kV/cm)			
	0	49	0	49
酸值 / (mgKOH/g)	0.10	0.13	100%	130%
水溶性酸 / (mgKOH/g)	0.032	0.049	100%	153%
水分含量 /%	0.003	0.017	100%	566%
介质损耗因数 (70℃)	5.5	10.7	100%	195%
吸收 O ₂ 含量, mL/100g 油	28.5	48.5	100%	170%

电场下，油吸收氧的能力提高了 70%，介损增加了一倍，水分含量增加了 5.6 倍。

4 介质损耗与油中游离基、离子

绝缘材料在电场作用下，由于介质电导和介质极化的滞后效应，在其内部引起的能量损耗也叫介质损失，简称介损。而损耗主要归因于液体的电导，即归因于液体内部自由载流子的存在。即样品中可电离的溶解杂质和胶体颗粒越多，介损越大。因此，由介损计算得出的 tan δ 越大。

在化合物中，存在于同种元素原子之间成键的共用电子对没有偏向，成为非极性键。而在不同种元素原子之间的共价键有极性，成为极性键。共价键的极性越强说明电子偏离程度越高，也更容易形成离子和游离基。

而在变压器运行时，热量和电场同时存在，这为游离基和离子的形成提供了有利的条件，因此也更易形成可电离的溶解性杂质以及胶体颗粒。而游离基和离子的数量越多，也促使更多游离基和离子形成。

加热的环境促使反应速度的加快，意味着更多的游离基和离子会被产生出来，更多的电子在化合物分子中的分布发生改变。而游离基和离子倾向于结合形成更稳定（断裂时需要更多能量）的化合物。因此，游离基和离子促进了变压器油中烷烃、环烷烃、芳香烃类物质分解成为分子量更小（但更稳定）的水（气体）、氧气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氢气、乙烯、乙炔。同时反应还得到了过氧化物、水溶性酸、低分子酸、脂肪酸、水分、醇类、金属皂类（包括环烷酸铜及环烷酸亚铁）、醛类、清漆、沥青稀油泥等。这些杂质作为反应的生成物的进一步增加，促使变压器油的 tan δ

值升高。这种增大，主要是由于极性分子随频率变化而做定向转动时所产生的分子间摩擦力引起的发热和能量损耗，即介质极化造成的。

同时电场的存在，使得电子和

（下转第 84 页）

参考文献:

- [1] 付义, 王鹏, 赵成才, 等. 聚丙烯生产工艺技术进展[J]. 高分子通报, 2012(4): 139-147.
- [2] 张毅. 离心泵产生振动过大的原因及解决措施[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(09): 108-129.
- [3] 聂静, 张之新. 离心泵振动常见原因分析及预防措施[J]. 化工管理, 2020(4): 169-170.
- [4] 石奇峰. 离心泵振动超标原因分析及措施[J]. 中国设备化工, 2020(21): 175-176.
- [5] 刘超, 王中良, 于涛, 等. 离心泵振动故障分析及排查措施[J]. 化工设备及管道, 2016, 53(04): 64-65.
- [6] 张翼飞, 谢小青. 石化离心泵设备系统工程振动偏大影响因素的探究[J]. 化工设备及管道, 2021, 58(04): 51-54.
- [7] 张玉程. 进出口管路设置对离心泵振动的影响[J].

设备管理与维修, 2019(21): 105-106.

- [8] 孙永航. 浅析离心泵振动故障诊断与解决措施[J]. 中国设备工程, 2022(4): 168-169.
- [9] 卢明君, 刘兴发, 王得胜, 等. 离心泵振动故障分析与处理研究[J]. 中国设备工程, 2021(23): 10-12.
- [10] 李亮, 雷宇, 杜仲军. 基于频谱分析的离心泵振动故障诊断与处理[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(3): 291-294.
- [11] 谈明高, 陆友东, 吴泽瑾, 等. 叶片数对离心泵振动噪声性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 73-78.

作者简介: 徐野(1971.12-), 男, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 物资供应质量管理、重大装备国产化。

(上接第 80 页)

离子更有序地排列, 使电子的偏向性更强, 更有利于共价键的断裂, 产生更多离子, 成为催化剂, 促使反应的发生, 离子的增加使变压器油的 $\tan \delta$ 值进一步增加, 加速变压器油的老化。

5 结语

综上所述, 除了水或者胶体以及其他金属离子之外, 促使变压器油介质损耗因数升高的原因还包括: 由于变压器运行时产生的热能和电场的共同作用而产生的高于普通环境的游离基和离子。而且由于游离基和离子不但有水合形式, 还可能大分子的有机物形式。现有的变压器油处理手段主要是将油体中气体、水分、低馏分物质, 蒸发出来并去除机械杂质。但大分子有机物不在处理之列。大分子的游离基或离子无法去除, 因此在经过滤油处理后, 短时间内 $\tan \delta$ 降低, 但在变压器油处理后再次在变压器中运行一段时间后, $\tan \delta$ 值又会再次升高。

为了验证这一假设的可能性, 建议在以后的实验

中, 尝试添加抑制游离基或离子形成的化学物质, 再次检验其结果。

参考文献:

- [1] S. D. Mgcrs, J. JKelly, R. H. Parrish. 变压器维护指南[M]. 文闯成, 等译. 武汉: 湖北电力试验研究所, 1981: 271-273.
- [2] 本书编写组. 电力设备预防性试验规程(DL T596 1996 修订说明)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 80-81.
- [3] 上海市电力公司. 电力设备交接和预防性试验规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 59-61.
- [4] 汪红梅. 电力用油(气)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] 尹冬冬. 有机化学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 88-89.
- [6] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 137-138.