

充油电缆和变压器在气相色谱分析方面的比较

陈志勇, 刘丽兵, 吴鹏, 冯义, 高乃奎

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Comparison between Oil-filled Cable and Transformer in Gas Chromatography of Insulation Oil

CHEN Zhi-yong, LIU Li-bing, WU Peng, FENG Yi, GAO Nai-kui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 从气相色谱分析的角度比较了充油电缆和变压器的异同,阐述了绝缘油气相色谱分析的机理和过程,指出了充油电缆实现油气在线监测所面临的困难。

关键词: 充油电缆; 变压器; 气相色谱分析

中图分类号: TM855 **文献标识码:** A

Abstract: In this paper, oil-filled cable and transformer are compared each other in gas chromatography of insulation oil. The gas generating mechanism and analysis process are presented. Meanwhile, the problems for intending to on-line monitor the dissolved gas of oil-filled cable are shown too.

Key words: oil-filled cable; transformer; gas chromatography

1 引言

对于电力系统的高压充油设备,气相色谱分析法已经被充分肯定和广泛应用。气相色谱分析法可以发现常规电气试验所不能发现的局部缺陷以及早期潜伏性故障,例如,变压器的铁心局部过热,较低能量的电晕放电等。目前电力系统的一些充油设备已经实现了油气分析的在线监测和诊断。

变压器和高压充油电缆作为电力系统最重要的两种充油设备,都采用了气相色谱分析法来检测设备的绝缘状况,但是二者结构、材料等的诸多不同,导致了它们在气相色谱分析和判断上的一些不同,笔者就这个问题做了初步的探讨。

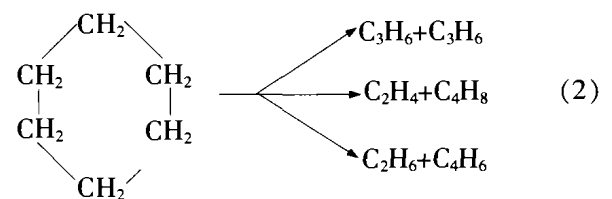
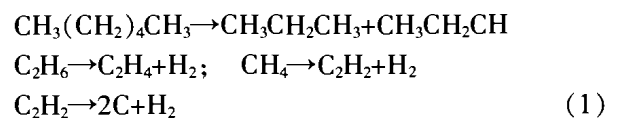
2 油中气体的产生

变压器和充油电缆都是油纸绝缘结构,绝缘材料主要分为两部分:绝缘油和油浸纸。变压器油一般是由原油精制而成,一般新变压器油的分子量在270~310之间,每个分子的碳原子数在19~23之间,其化学成分至少包含60%的烷烃,10%~40%的环烷烃以及5%~15%的芳香族环烃^[1],除此之外,还有有机酸、硫化物、氮化物和胶质沥青等高分子化

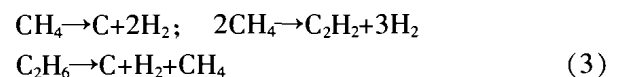
合物以及有机化合物。

高压充油电缆一般采用采用的是十二烷基苯合成油。十二烷基苯是具有侧链的单环芳香烃,侧链上碳原子数平均为12个。纯十二烷基苯分子式为 $C_{18}H_{30}$,结构式为 $C_6H_5C_{12}H_{25}$,分子量为246.62。实际使用的十二烷基苯为混合物,一般十二烷基苯约占65%,其余侧链碳原子数为10~11或13~14^[2]。

在正常情况下,电力设备产生的热量不足以使绝缘油的化学键破坏,因此产生的气体极少;但是当设备内部存在局部缺陷,例如电弧放电、局部过热等,故障点产生的热能会使烃类化合物的键断裂而产生低分子烃类气体或氢气。例如在变压器中存在下列裂解过程:



绝缘油热裂解过程除了上述分解反应外,还有聚合与异构过程,在高温或电弧下,油裂解产生的低分子烃类气体也不稳定,会再裂解而形成更低分子。例如:

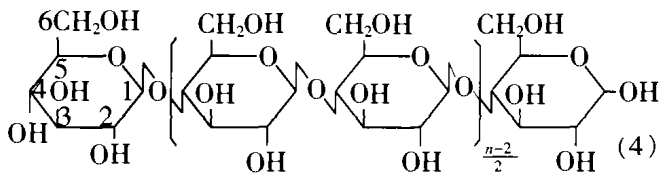


这些低分子气体是绝缘油中以前所没有的,因此可以成为检测设备潜伏性缺陷的对象^[1]。

除了绝缘油之外,油浸纸在故障情况下也可以产生气体。一般绝缘纸都是由纤维素构成,变压器的绝缘纸主要成分是黄酸纤维^[1],电缆纸一般由硫酸盐纤维素制成^[2]。它们都是由木质纤维素制成的。

纤维素的化学结构是由很多D-吡喃葡萄糖酐

(1-5)彼此以 $\beta(1-4)$ 苷键连结而成的线形巨分子,其化学式为 $C_6H_{10}O_5$,Haworth结构式表示为^[3]:



其中: n 为D-葡萄糖酐的数目,即聚合度。

纤维素在高温情况下会断裂产生碳的氧化物,如 CO 、 CO_2 。由于绝缘油中不会裂解产生 CO 和 CO_2 ,因此涉及固体绝缘缺陷的时候可以通过检测油中 CO 和 CO_2 的含量变化来判断。

综上所述,油中可以产生:氢气(H_2),甲烷(CH_4),乙烷(C_2H_6),乙烯(C_2H_4),乙炔(C_2H_2),一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO_2)。通过检测它们的含量变化可用来监测充油设备的绝缘状况。

3 气相色谱分析简介

气相色谱分析泛指以气体作为流动相的色谱分离分析技术。原理是依靠被分析的物质在不同的两相之间具有不同的分配系数,当两相作相对运动时,被分配物质在两相做反复多次的分配,最后使不同的组分得到完全分离。

目前绝缘油气相色谱分析多采用高纯氮气(N_2)作为载气,检测器多为氢火焰检测器(FID)和热导检测器(TCD)。一般方法是利用FID检测低级烃类,即 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_2H_2 ;用TCD检测 H_2 ;而 CO 和 CO_2 则通过Ni转换器转化为可燃气体后通过FID检测。油中气体的分离一般采用不完全分离法,通过震荡分离和顶空取气获得待测气体^[4]。

关于气相色谱分析的原理及流程在许多相关的书籍中都有详细的叙述,并且对于变压器和充油电缆,其气体分离和检测的方法都是一致的。笔者不再详述。

4 充油电缆和变压器在气相色谱分析方面的不同

4.1 绝缘油不同

变压器油为矿物油,而高压电缆油为合成油,二者在组分和分子结构上的不同导致了产气的条件和产气量的不同。

与变压器油相比,电缆油分子略小而均匀度和纯净度优于变压器油。由于变压器油中含有的一些杂质,如有机酸、硫化物、氮化物和胶质沥青等高分子化合物以及有机化合物在一定条件下也会产生气体,因此在同样的作用和检测条件下,二者产生的气体种类、数量都会有所不同。

另外,变压器油在老化时会产生x蜡,会附着在

固体绝缘表面阻碍散热,从而加速绝缘的热分解,而电缆油在这方面则明显优于变压器油。

4.2 油纸比例及气体分配系数不同

变压器和充油电缆内部的油纸比例相差很大,不论是体积比还是重量比,变压器内部的油纸比例都远远大于充油电缆。因此在同样固体绝缘缺陷和产气量的情况下,检测出来的气体含量会有所不同,变压器中固体绝缘缺陷的检测理论上不如充油电缆灵敏。另外,由于目前采用的不完全脱气法测量涉及到绝缘油的气体分配系数,不同的油品具有不同的气体分配系数,因此,变压器和充油电缆的气相色谱检测结果中各气体成分的绝对含量和相对含量都不具有可比性。

4.3 油的流动性不同

变压器的绝缘是将绝缘纸浸泡在油的中间,而充油电缆的纸绝缘在电缆的最外层,电缆油通过中心油道的缝隙渗进纸绝缘^[5]。一般的大型变压器都配有油循环冷却系统,强制加速了油的流动,而电缆油并不具有循环流动性,绝缘油的运动是朝向或者背离电缆的压力罐完全取决于负载的变化,所以它们也可能只是覆盖了几米的距离。因此,变压器和充油电缆的绝缘油流动性相差很大。对于充油电缆,从附件中所取油样中的气体是由电缆内部扩散到取样点的气体和附件老化而产生的气体组成的。电缆油中气体的扩散总的来说是一个比较慢的过程,气体扩散到取样点往往需要几天甚至几个月的时间^[6]。相对而言,变压器则不存在这个问题。这也是充油电缆气相色谱法发展较慢的原因之一。

4.4 测试结果的判断依据不同

理论上来说,在变压器系统中建立起来的检验分析气体结果的方法应该同样适用于充油电缆。基本上,在同样电压和温度条件下,两个系统中应该有同种类型的气体产物生成。然而,两个系统工作环境和几何分布都差别很大。所以在变压器领域之内已经建立起来的很成功的监测标准,例如IEC的“三比值法”等,并不能很好适用于充油电缆。

5 结语

气相色谱分析检测绝缘状况在变压器上已经运用得相当成熟,成为了一项重要的检测手段,相应的理论、工作流程以及诊断标准都十分完备。目前,变压器油色谱分析在线监测系统已成功运行,相应的专家诊断系统也投入使用^[7,8]。与变压器相比,充油电缆虽同为油纸绝缘设备,气相色谱分析的应用却进展缓慢,相应的标准也不齐全,目前还不能实现在线监测。主要难点在于充油电缆一般较长,并且油的流动性差,电缆各段的油中溶解气体情况并不相同,在某一点进行油气检测无法代表 (下转第123页)

$$R_0 = 7 \times 10^{-3} \Omega, C_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ F}, L_0 = 3 \times 10^{-7} \text{ H},$$

$$G_0 = 5 \times 10^{-10} \text{ S}, l = 300 \text{ m}, f = 50 \text{ Hz}, C = 8 \times 10^{-10} \text{ F},$$

$$C_f = 4.4 \mu\text{F}, C_l = 0.1 \mu\text{F}, \delta = 0.003^\circ.$$

计算结果表明: R_0, C_0, G_0, L_0 (分别表示同轴电缆单位长度的电阻、电导、电容、电感) 这4个参数对相角误差的影响相似, 其中 δ' 对 R_0 的灵敏度最高, R_0 的变化对相角误差的影响见表2。

表2 电缆参数 R_0 变化对相角误差的影响

$R_0/(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	$\delta'/(\circ)$	绝对误差/ $(\times 10^{-3})$	相对误差/%
0.001	0.002 906 7	9.332 5	3.111
0.004	0.002 942 4	5.763 5	1.921
0.007	0.002 978 1	2.194 5	0.731
0.010	0.003 013 7	1.374 6	0.458
0.050	0.003 489 6	48.962	16.321

从上述分析中知, 只要选择合适的电缆和终端阻抗, 可以将电缆引起的相移误差减小到满足测量准确度的要求。

5 套管绝缘在线检测的实际应用

套管绝缘在线检测的参量包括母线电压、套管泄漏电流、 $\tan \delta$ 和温湿度等。表3是对山东某一110kV变电站的主变套管的绝缘在线检测结果。同时图5给出了其中一台变压器三相高压套管 $\tan \delta$ 长期在线检测的变化曲线, 通过该曲线可以判定基于末屏传感器的套管绝缘检测系统的工作是稳定可靠的。

表3 套管绝缘在线检测参数

相别	线电压/kV	泄漏电流/mA	套管电容/pF	温度/ $^\circ\text{C}$	湿度/%	$\tan \delta$
A	117	4.068	190.68	27	42	0.003 12
B	118	4.078	190.56	27	42	0.004 88
C	118	4.083	190.77	27	42	0.005 01

6 结论

笔者设计了变压器套管末屏电容分压传感器,

(上接第120页)

整条电缆。另外, 由于电缆油在电缆的中心油道中, 所以多点取样也存在一定的困难。

参考文献:

- [1] 王文华. 气相色谱分析在变压器上的应用 [J]. 变压器, 1994 (5): 12-17.
- [2] 郑肇曠, 王琨明. 高压电缆线路[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [3] 高洁, 汤烈贵. 纤维素科学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [4] GB/T 17623-1998. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法[S].
- [5] 刘子玉, 王惠明. 电力电缆结构设计原理 [M]. 西安: 西安交

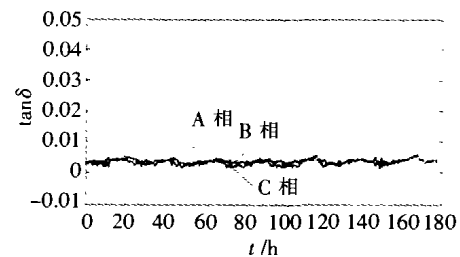


图5 套管介电损耗在线检测曲线

提出在套管绝缘在线检测中采用相对测量与绝对测量相结合的原理, 可以定量判断套管的绝缘性能以及动态分析其绝缘变化的趋势。同时应用均匀传输线理论计算套管绝缘检测的电压信号在传输过程的误差, 通过选择合适参数消除该误差。

参考文献:

- [1] 贺景亮, 赵生和, 陈鹏云, 等. 无源介损传感器的稳定性分析[J]. 高电压技术, 1995, 21(4): 39-41.
- [2] 吕延锋, 钟连宏, 王建华. 电气设备绝缘介电损耗测量方法的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 38-40.
- [3] 黄新红, 张军辉, 严璋. 高压电气设备绝缘特性带电检测仪信号采集系统的研究[J]. 西安交通大学学报(自然科学版), 1997, 31(11): 40-44.
- [4] 史保壮, 杨莉, 王红斌. 网络型变电站绝缘在线监测及诊断系统[J]. 高电压技术, 2001, 27(8): 33-34.
- [5] 黄建华, 金园, 何青. 电容型设备绝缘在线监测系统及其选用原则[J]. 高电压技术, 2001, 27(10): 13-16.
- [6] Lu Fangcheng, Wang Nan. Measurement of $\tan \delta$ Based on Absolute and Comparative Method [A]. Proc. of 2001 ISEIM [C], Himeji, Japan, 2001.
- [7] 刘云鹏, 律方成. 介损在线监测信号保护单元研究 [J]. 华北电力技术, 2002(7): 4-7.

作者简介: 刘云鹏(1976-), 男, 博士研究生, 从事电气设备在线检测和故障诊断方面的研究。

通大学出版社, 1995.

- [6] D Couderc, P Bourassa. Gas-in-oil Criteria for the Monitoring of Self-contained Oil-filled Power Cables [A]. IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[C]. San Francisco, 1996.
- [7] Tsuchie M. Recent Diagnostic Technology on Oil-immersed Power Transformers in Japan[J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific., IEEE/PES, 2002, 2(10): 1 496 -1 499.
- [8] M Duval. A Review of Faults Detectable by Gas-in-oil Analysis in Transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 8 -17.

作者简介: 陈志勇(1975-), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 研究方向为高压充油电缆的老化研究与在线监测。