

浅谈三比值法在变压器故障诊断中的应用

变压器在电力系统中具有很重要的作用，同时因为变压器结构繁杂、运行时间长，变压器故障频发，所以电力变压器的故障诊断显得非常重要。分析了变压器不同故障类型产生的不同类型气体，运用基于溶于油中气体的三比值法来初步判断变压器的故障，便于电力运检人员有针对性地进行故障排查和检修，缩短变压器故障处理时间，提高维护检修的效率和系统供电可靠性。

张育华/国网福建省电力有限公司物资分公司

0 引言

电力变压器内部发生热或电的故障时，变压器故障的类型及其变化趋势、伴随故障产生的特征故障气体的含量及组分之间有着紧密关系，故障时产生的相应特征故障气体绝大部分会溶解到变压器绝缘油中，所以采集故障变压器中的油样品进行色谱分析，就可以了解变压器的工况，反映出变压器故障的异常特征量，对变压器所发生的故障类型、故障程度等特性作出定性的判断。三比值法是通过计算变压器故障后油中五种常见气体的比值，对照三比值诊断表，初步找出可能的故障及类型。其计算简单、判断明确、对局部过热和局部放电故障比较灵敏，因此成为目前使用最广泛的变压器故障诊断方法。

1 变压器故障气体

1.1 变压器故障气体产生

变压器是一种非常重要的电气设备，经过长时间运行后，变压器内部油和纸等绝缘材料会老化，导致变压器可能会出现故障。目前我国35 kV及以上

等级的电力变压器主要是油浸式电力变压器，绝缘材料主要是绝缘油和绝缘纸。绝缘油是多种碳氢化合物组成的混合物，含脂肪族饱和环烷、环烷烃和芳香烃等组分，长期运行过程中，由于水份、氧气、电压和高温的影响，绝缘油发生裂解以及碳化和氧化，会产生少量的氢、低分子烃类和碳氧化合物等气体。绝缘纸主要用于变压器线圈匝间、层间及线段间的绝缘，由多种纤维组成，温度要105℃以上才能裂解，300℃以上才能彻底裂解和碳化，在其裂解的过程中，会生成一定量的水，同时产生大量的一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)气体和少量的烃类气体。

根据调查，变压器故障主要集中在变压器的本体、套管、绝缘、铁心、绕组、引线以及分接调压开关等。从国内变压器故障类型的统计结果可看出，运行中的变压器故障主要为过热性故障和放电性故障，占全部故障类型的70%以上。过热性故障按温度可分为低温过热故障、中温过热故障和高温过热故障。放电故障一般有局部、火花及电弧等放电故障。

1.1.1 过热性故障

当过热故障在变压器油中产生，而与固体绝缘无关时，主要产生甲烷(CH₄)和乙烯(C₂H₄)等烃类低分子气体。当过热故障发生时，故障点四周的绝缘油温度抬高，裂解而产生多种特征气体，绝缘油裂解产生气体时，其某种气体产生的速度因温度的变化而变化，



张育华/工程师

关键词/Keywords

变压器·
故障诊断·
油中溶解气体·
三比值法·

在某一温度下产气最多，溶于绝缘油中的气体也最多。随着温度的上升，依次产生甲烷（CH₄）、乙烷（C₂H₆）、乙烯（C₂H₄）及乙炔（C₂H₂）等特征故障气体。当温度较低时，CH₄为故障气体的主要成份；当故障点温度高于500℃时，产生大量的C₂H₄和氢气（H₂），当故障点严重过热，温度高于800℃时，则会产生C₂H₂，并伴随着CO₂和CO的产生；但随着温度的进一步提高，CO₂和CO在特征故障气体中的含量反而下降。如果是与固体绝缘材料有关的过热性故障，故障气体中会有较多的CO和CO₂。

1.1.2 放电性故障

放电性故障分为三种类型：电弧放电（高能放电）、火花放电（低能量放电）和局部放电。

1) 电弧放电故障主要是由过电压导致变压器内部闪络等原因引起的，故障气体主要有C₂H₂、H₂、CH₄及C₂H₄等。

2) 火花放电是一种因为悬浮电位而引起的间歇性放电故障。火花放电属低能量放电，产生的气体中总烃含量不高。故障气体主要有C₂H₂、H₂。

3) 局部放电是在绝缘材料内部形成桥路而引起的一种放电故障，一般有气隙放电和油中气泡放电，故障气体主要有H₂以及少量的CH₄。当高能放电时，也有少量C₂H₂产生，不同的故障类型产生的特征气体如表1所示。

表1 不同的故障类型生成不同的气体

故障类型	主要气体组分	次要气体组分
油过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄	H ₂ 、C ₂ H ₆
油和纸过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO和CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
油纸绝缘中局部放电	H ₂ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₂ 和CO	C ₂ H ₆ 、CO ₂
油中火花放电	C ₂ H ₂ 、H ₂	
油和纸中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO和CO ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
进水受潮或油中气泡	H ₂	

在变压器实际运行过程中，变压器的过热性故障和放电性故障都会将绝缘材料裂解而形成某种特定的气体，故障的类型不同，生成的故障气体不同，变压器故障时气体的成分和多少能反映出故障的种类和严重程度。所以，当变压器发生故障时，通过分析溶于变压器油中的气体成分，

能够初步诊断出变压器内部的故障。

1.2 油中溶解气体及分析方法

变压器故障的类型及其变化趋势和故障气体的成分之间有一定的联系，因而通过分析溶于绝缘油中的气体成分能够判断变压器内部故障的类型和性质。

溶于变压器新绝缘油中的气体主要是空气，即氧气（O₂）和氮气（N₂），在正常运行过程中充当绝缘的油和固体材料会逐渐老化，分解出CO、CO₂或烃类气体等特征气体，这些气体绝大部分都溶解于油中。而当故障发生时，在热和电的作用下，这些材料就会加速分解过程，产生的故障气体为H₂、C₂H₂、CH₄、C₂H₆和C₂H₄等一些低分子气体，即特征气体。当故障不严重时，产生的气体少，溶于绝缘油中的故障气体也少，当变压器内部有严重的放电或者过热性故障时，故障气体产生的速率就会提高，当故障时气体生成的速率比溶于绝缘油中的速率大时，则部分气体不能溶于绝缘油中，进入继电器内引起继电器故障。随着过热的温度和放电的性质不一样，产生故障气体的多少和类型也不同，溶于绝缘油中的故障气体的多少及故障气体的比例也不一样，因此溶于绝缘油中气体的类型和多少，能反映出变压器内部故障的性质和程度。通过分析溶于绝缘油中故障气体的类型和比值，可初步诊断出变压器内部出现的发热性故障和放电性故障。

气相色谱法就是通过测量溶于绝缘油中故障气体的类型和比值来诊断变压器内部故障的一种分析方法。诊断故障过程：将溶于绝缘油中的故障气体与绝缘油脱离，故障气体流经过色谱分析仪过程中，色谱柱通过物理化学的方法将各种故障气体一一分开，并由鉴定器测量被分开的故障气体的类型和比例，根据溶于绝缘油中的故障气体的类型和比例来分析判断变压器内部故障点和故障程度。采用特征故障气体气相色谱法，只可对故障的性质进行初步分析判断，不能作出准确的定性分析。在采用特征故障气体的气相色谱法对变压器故障分析诊断的过程中，找出了故障气

体的类型及其相对比值和内部故障处的温度值、电场强度的相对应的关系，从而提出了三比值法以及改良的三比值法。

2 三比值法

2.1 三比值法定义

变压器绝缘油和绝缘材料在故障时裂解所生成的各种类型特征故障气体的浓度比值与故障点处的温度或故障性质有一定的关系，故障点处温度的增加，变压器绝缘油裂解而生成的特征气体依次为CH₄、C₂H₆、C₂H₄和C₂H₂，而H₂一般是在放电性故障中生成。因此选用了几种特征故障气体，通过分析特征气体浓度的比值（即C₂H₂/C₂H₄、CH₄/H₂和C₂H₄/C₂H₆）来判断故障的类型，即为三比值法，作为诊断变压器故障类型的重要方法。

2.2 三比值法的原理

三比值法的原理是分别将溶于变压器绝缘油中的特征故障气体中溶解度与扩散系数接近的两种气体的浓度构成比值，形成三对比值，列出不同的比值范围，并以不同的编码表示，将这些编码进行组合，并按照一定的编码规则规定，某种的编码组合与某种故障类型相对应，以此来分析和诊断变压器故障类型和性质。表2为三比值法的编码规则，表3为故障类型的判断方法。这种方法弥补了绝缘油的体积效应对变压器故障分析的影响，是分析诊断变压器故障类型的一种重要方法。

表2 编码规则

气体范围	比值范围的编码		
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
气体<0.1	0	1	0
0.1≤气体<1	1	0	0
1≤气体<3	1	2	1
气体≥3	2	2	2

表3 故障类型判断方法

编码组合			故障类型判断	故障实例
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
0	0	1	低温过热（低于150℃）	绝缘导线过热，注意CO和CO ₂ 的含量及CO ₂ /CO的值
	2	0	低温过热（150~300℃）	分接开关接触不良，引线夹件螺钉松动或街头焊接不良，涡流引起铜过热，铁心漏磁，局部短路，层间绝缘不良，铁心多点接地等
	2	1	中温过热（300~700℃）	
	0, 1, 2	2	高温过热（高于700℃）	
2	1	0	局部放电	高温度、含气量引起油中低能量密集的局部放电
	0, 1	0, 1, 2	低能放电	引线对电位未固定的部件之间连续火花放电，分接抽头引线和油隙闪络，不同
	2	0, 1, 2	低能放电兼过热	电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的电火花放电
1	0, 1	0, 1, 2	电弧放电	线圈匝间、层间短路、相间闪络、分接头引线间油隙闪络、引起对箱壳放电、
	2	0, 1, 2	电弧放电兼过热	线圈熔断、分接开关飞弧以及因环路电流引起电弧及引线对其他接地体放电等

2.3 三比值法的判断故障类型流程

利用三比值法判断变压器故障类型的流程如图1所示。

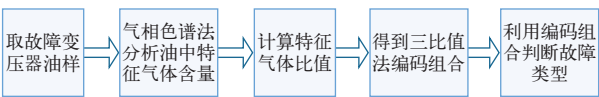


图1 三比值法判断故障类型流程图

3 故障分析

某500 kV变电站35 kV 2[#]所用变压器跳闸，故障后对35 kV 2[#]所用变压器油中溶解气体进行取样和气相色谱法分析，分析得到数据：H₂为1 989（注意值为150），CH₄为209，C₂H₆为17，C₂H₄为105，C₂H₂为307（注意值为5）、总烃为638（注意值为150），如图2所示。

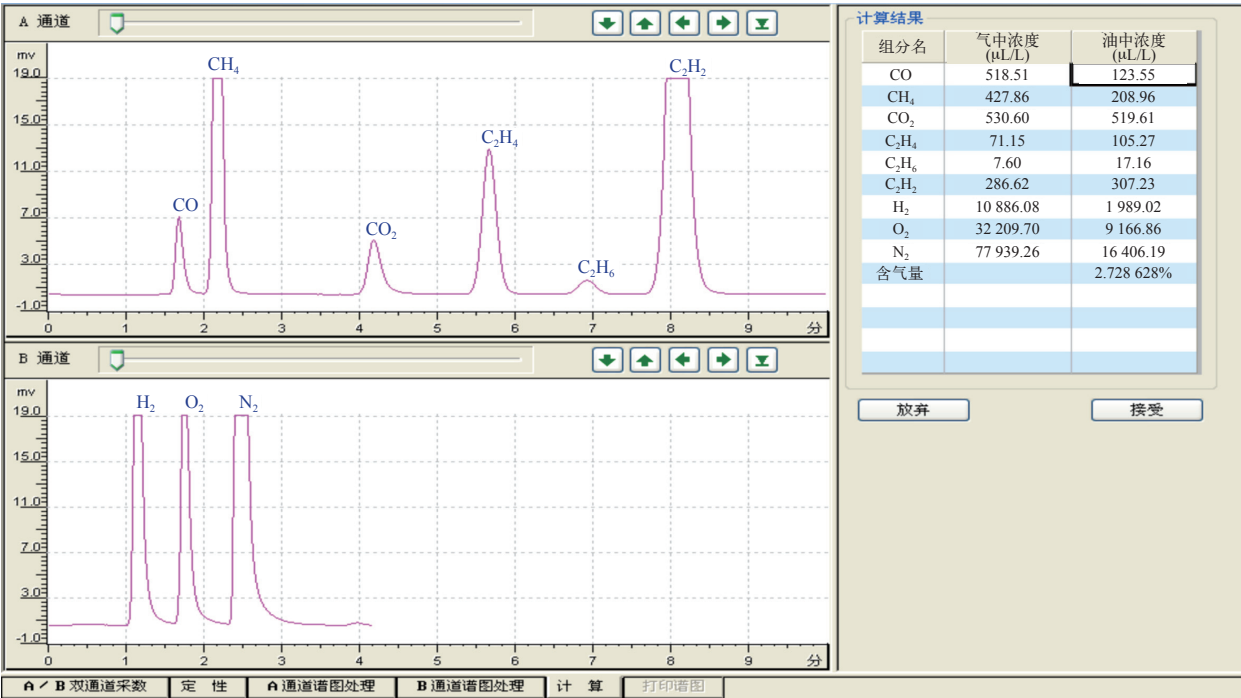


图2 某500 kV变电站35 kV 2#所用变压器油中气体气相色谱分析

根据三比值法进行计算得： $C_2H_2/C_2H_4 = 307/105 = 2.923$ ，编码为1； $CH_4/H_2 = 209/1\,989 = 0.105$ ，编码为0； $C_2H_4/C_2H_6 = 105/17 = 6.176$ ，编码为2，获得变压器油色谱异常比值编号组合为102。对照表3的三比值法故障类型判断方法进行故障分析判断，故障类型为所用变压器内部存在电弧放电。

4 吊罩检查确定故障

为了进一步确定故障部位，决定进行吊罩内部检查，并返厂对该变压器进行了吊芯解体检查，发现B相绕组内圈低压绕组出线连接部有明显放电烧黑与开裂的痕迹。对B相高压绕组进行逐层松解，打开第3层绝缘纸后，发现绕组中上部开始有明显发黑、灼烧痕迹，第4层绕组中上部大面积发黑灼烧，且线圈散股、断股十分明显，如图3所示。

5 结束语

1) 变压器油色谱分析中的三比值法是从国内外大量的实际案例中归纳总结出来的，计算简单、判断明确且故障诊断准确率较高，尤其对过



图3 B相低压侧绕组出线发黑开裂

热性故障和放电性故障比较灵敏，对过热性故障和放电性故障的诊断准确率能达到80%以上，是变压器故障诊断的重要方法之一。

2) 三比值法是基于大量模型分析和故障后数据的统计得到的经验公式或判据，所以三比值法并不能解决所有的故障诊断的问题，当有下列的情况时，就缺乏了适用价值，或者不能准确地进行故障类型判断。①变压器内部发生绝缘材料受潮、外力作用损伤及绕组变形等故障，并不产生气体或气体含量没有高于注意值，三比值法无法对故障进行诊断。②当变压器内部出现多种电故障和热故障联合作用时，很可能找不到故障对应的比值组合。

(下转第60页)

- [6] Moreno V C, Duarte A H, Garcia U J. Propagation of flicker in electric power networks due to wind energy conversions systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17 (2): 267-272.
- [7] GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] GB/T 20320—2013 风力发电机组电能质量测量和评估方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [9] 李渝, 范高峰, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31 (6): 88-92.
- [10] 葛高飞. 风电并网对电力系统电能质量的影响研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [11] 白鸿斌, 王瑞红. 风电场并网对电网电能质量的影响分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24 (1): 120-124.
- [12] 王振宇. 风电接入对电网电能质量的影响分析 [J]. 机电信息, 2012 (21): 21-23.
- [13] 刘薇. 风电并网对电能质量影响的评估与治理 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [14] 何世恩, 郑伟, 智勇, 等. 大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (2): 39-44.
- [15] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (四)——电压波动与闪变的测量分析 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (1): 1-4.
- [16] 雷亚洲. 国外风力发电导则及动态模型简介 [J]. 电网技术, 2005, 29 (12): 27-32.
- [17] 沈小军, 周冲成, 吕洪. 大型风电场风电机组分组方法研究综述 [J]. 电气学报, 2016, 11 (5): 1-10.

(收稿日期: 2016-03-25) **EA**

(上接第43页)

③当编码不在已知的编码表中, 找不到相应故障的类型。

3) 三比值法只是变压器众多故障诊断方法中的一种, 仅仅根据三比值法来诊断变压器的故障不够全面。在诊断变压器故障实际的应用中, 应该进行综合诊断, 才能得出正确的结论。应结合电气试验结果、检修情况、设备的结构特点、设备运行状况和家族性故障等因素以及考虑非故障原因形成的气体影响而进行综合诊断分析, 才能对故障的位置及原因作出一个准确、有价值的诊断结果。

参考文献

- [1] 国家电网公司人力资源部编组. 国家电网公司生产技能人员职业能力培训专用教材 (油务化验)

[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

- [2] 康喜明, 张惠芝, 柴绍鹏. 油色谱分析在变压器故障诊断中的应用 [J]. 青海电力, 2012, 31 (3): 45-48.
- [3] 程实, 常青. 浅谈电力变压器主要故障分析与诊断 [J]. 贵州电力技术, 2010, 13 (9): 37-39.
- [4] 陈志勇, 李忠杰. 油中溶解气体分析在变压器故障诊断中的应用 [J]. 变压器, 2011, 48 (2): 64-66.
- [5] 赵旭彤, 沈倩, 许家响, 等. 基于IEC三比值法与融合权重法的变压器可拓关联故障诊断 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (8): 18-22.
- [6] 李洪珠, 孙佳月, 马文涛, 等. 基于半桥变压器与次序耦合变压器的超级电容均压 [J]. 电气学报, 2015, 10 (6): 41-46.

(收稿日期: 2016-08-15) **EA**