

基于 PCA 的变压器故障红外监测应用研究

康建爽 蒋书波 程明霄 储 琴

(南京工业大学自动化与电气工程学院 南京市新模范马路 5 号 210009)

摘 要 变压器作为电力系统中非常重要的输变电设备, 其运行状况直接影响到整个系统运行的安全水平。根据红外光谱仪所测得信息, 通过傅里叶变换可得到各故障特征气体红外吸收信息; 依据 Lambert-Beer 定律并结合所测信息, 采用主成分分析法就可以对各故障特征气体进行定性定量分析, 判别当前变压器的运行状况。对于故障运行的电力变压器, 及时发现并解除存在的故障或故障隐患对整个系统的安全运行具有重要意义。

关键词 变压器; 故障特征气体; 傅里叶红外光谱仪; 主成分分析

中图分类号: O 657. 33; TP212. 14

文献标识码: A

文章编号: 1004-8138(2010)02-0594-04

1 引言

在电力系统中, 变压器作为电力传输中重要设备之一, 其运行状态的安全与否直接关系到整个电力系统的安全性与经济性。对近年来全国 110kV 以上电力变压器常见故障类型作统计归类, 分析结果如图 1 所示。

因此实时监控变压器的运行状态, 及早发现并解决变压器可能存在的故障, 对确保变压器正常工作具有重要意义。研究表明, 变压器长时间运行中由于受温度、局部放电、杂质等因素的影响, 其内部绝缘介质老化分解, 产生少量的低分子的烃类、CO、H₂ 等气体。当故障较轻时, 这些气体溶解在绝缘油中。当这些设备存在潜伏性过热或放电故障时, 就会加剧这些气体的产生, 当产气速率大于气体的溶解速率时, 就会有一部分气体进入气体继电器, 干扰变压器的正常运行甚至引发安全事故。产生的这些故障气体与变压器内部故障类型、故障程度及故障部位都有密切关系, 如表 1 所示。因此通过对变压器油中溶解气体组分进行定性定量分析, 就可以间接判断当前变压器的运行状况^[1, 2]。

红外分析技术作为近年发展起来的一门高新技术, 它集光谱测量技术、计算机技术、化学计量学技术与基础测量技术于一体。该分析技术的特点是无需对待测样品进行预处理, 并且在分析过程中不消耗其他材料, 对样品无损、分析重现性好、成本低。

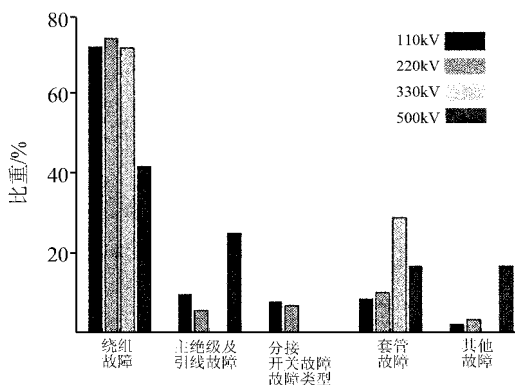


图 1 变压器常见故障类型分布直方图

联系人, 手机: (0)13951675610; E-mail: kangkang9336@126.com

作者简介: 康建爽(1984—), 男, 河南省许昌市人, 硕士研究生, 主要研究方向为过程检测。

收稿日期: 2009-07-24; 接受日期: 2009-08-19

表 1 变压器常见故障类型及其对应特征气体^[3]

故障类型	主要气体成分	次要气体成分
油过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄	H ₂ 、C ₂ H ₆
油纸绝缘局部放电	H ₂ 、CH ₄ 、CO	C ₂ H ₂ 、C ₂ H ₄ 、CO ₂
油和纸过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO、CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
油中火花放电	H ₂ 、C ₂ H ₂	
油中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
油和纸中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆

将红外分析技术应用于变压器故障气体在线检测, 与传统的变压器故障检测方法相比, 不仅降低了整个装置结构的复杂性, 而且能够做到对混合气体中的多个组分同时无损分析, 大大缩短了分析时间, 使工作人员能够及时掌握当前变压器的运行状况, 根据检测结果能够对故障运行的变压器做出及时处理, 确保整个电力系统的正常工作。

2 红外分析原理与方法

2.1 红外检测原理

不同物质由于其分子结构的差异, 它们所对应的红外吸收光谱也各不相同。因此测得试样的红外吸收光谱, 然后根据所得谱图中各个红外吸收峰位置、数目、相对强度和形状(峰宽)等参数, 就可以推断试样中存在哪些基团, 进而推断其分子结构, 确定混合物中所含各个组分。

由朗伯-比耳定律^[4]可知, 同一物质不同浓度时, 在同一峰位置其对应的吸收峰强度亦不相同。其具体关系如式(1)所示:

$$E_{\lambda}=K_{\lambda}CL \tag{1}$$

式中: E_{λ} ——波长 λ 处的吸光度; K_{λ} ——波长 λ 处的消光系数; C ——样品浓度; L ——样品吸收池的厚度。

其中 K_{λ} 是反映物质吸光特征的参量, 不同物质所对应的 K_{λ} 值亦不相同, 但对不同浓度的同一物质, 在同一波长处具有相同的 K_{λ} 值; 样品吸收池厚度 L 可以由光的干涉原理计算得出, K_{λ} 值亦可以提前通过试验计算得出。因此样品浓度 C 与该样品在特征吸收波长处的吸光度成正比。只要计算出 E_{λ} 就可以间接的对样品中的各个组分进行定量计算。

2.2 基于红外技术的变压器在线监测系统设计

依据上述分析原理, 参照传统的色谱在线分析^[5]流程, 可把整个监测装置分为如下三大模块, 如图 2 所示。

油气分离装置: 对变压器油中溶解故障特征气体进行分析, 首先必须将故障气体从油中分离出来, 然后才能对各个组分进行定性与定量分析。该环节是油中溶解气体分析结果差异的主要来源。本装置采用气体渗透膜的方法来实现油气分离。整个分离装置主要由气体渗透膜、电磁阀和真空泵构成。

红外分析系统: 红外光谱仪是整个分析系统的核心。本系统采用基于光的干涉原理傅里叶变换红外光谱仪, 检测器获得的只是样品的干涉图, 实际的红外吸收光谱图需要通过计算机对获得的干涉图进行傅里叶变换得到。相对于传统的色散型红外光谱仪, FTIR 红外光谱仪具有扫描速度快、分辨率高和可做多次累加扫描的优势^[6, 7]。

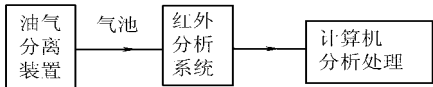


图 2 基于红外分析技术变压器故障在线监测原理图

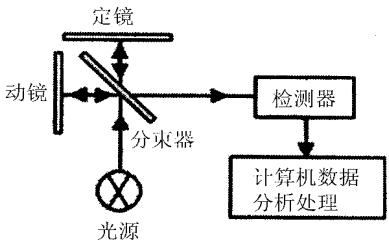


图 3 基于傅里叶变换红外监测系统结构图

计算机分析处理: 该部分完成的主要工作是根据光谱仪所测得信息, 结合化学计量方法, 对混合气体中各个组分进行定量计算, 根据计算结果判断当前变压器的运行状况。

具体的红外检测系统如图 3 所示。

2.3 建模定量计算分析

红外光谱主要是由于分子振动非谐振性使分子振动从基态向高能级跃迁时产生的, 反映的是含氢基团振动的倍频和合频吸收。但由于其吸收强度弱, 吸收带宽且重叠严重, 因此依靠传统的校准曲线方法进行定量分析往往不能得到满意的结果^[8]。

因此本装置在对故障特征气体进行定量分析的过程中, 采用间接分析方法。在具体建模过程当中, 首先采用标准方法测得各个待测组分的含量, 然后根据红外光谱仪所测的这些待测组分的光谱数据, 在二者之间建立关联分析模型, 使用该模型预测变压器油中溶解的各故障特征气体含量。因此在建立关联分析模型前, 必须收集足够的训练样本以确保能够覆盖对未知样本的预测范围, 使该分析模型能够准确对各故障特征气体的含量进行预测。而又由于采用红外光谱仪所测得的原始光谱数据中会含有噪声, 为提高预测的精度, 正式建立模型前必须先对这些原始数据进行预处理。整个分析流程如图 4 所示。

在具体的算法实现过程当中, 本模型采用主成分分析的方法对混合气体中各个待测组分进行定量计算, 其对应的数学方法是主成分回归。主成分回归是在多元回归的基础上发展起来的, 通过将原测量数据矩阵的降维, 以排除众多化学信息共存中相互重叠的信息, 来克服多元回归分析存在的组分间相互干扰和测量通道之间的相关性而导致的模型建立的不准^[9]。具体的操作过程是通过将原变量进行线性组合而形成新变量, 使这些新变量尽可能多的表征原变量的数据结构特征, 同时各变量间相互正交, 互不相关。

3 结果与讨论

在对未知组分进行定量分析的过程当中, 共选用了 16 组故障特征气体, 其中 14 组用于建立校正模型, 另外两组用于对模型预测能力的验证。具体编译调试过程在 Visual C 6.0 上实现。为提高模型的预测精度以及避免混合组分间的相互干扰, 采用单独预测的方法, 即每个模型只对应其中的一种故障气体进行定量计算。下面是对 CH₄ 的建模预测结果。

根据上图主成分分解结果, 如图 6 所示, 取其中的前 5 个作为主成分用于对未知样品的预测, 预测结果如图 7 所示。

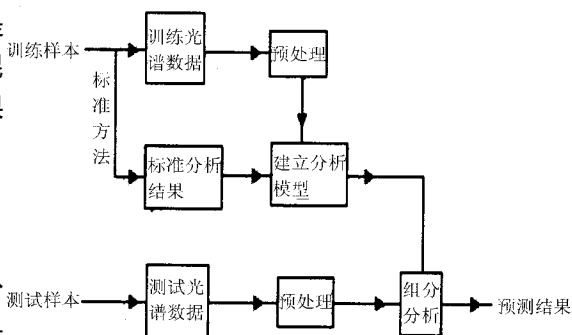


图 4 红外定量分析模型图

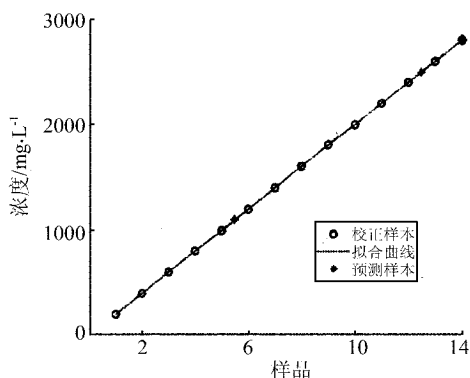


图 5 校正集样本分布及测试点分布图

表 2 预测结果分析

实际值	预测值	偏差	偏差比(%)
1100	1160.289	60.289	5.4
2500	2575.390	75.390	3.0

```

特征值:
第0个特征值为: 44.300529
第1个特征值为: 23.088124
第2个特征值为: 5.411354
第3个特征值为: 6.104651
第4个特征值为: 11.186169
第5个特征值为: 0.768305
第6个特征值为: 0.140869
主成分分解时计算的主成分数为: 6
前0个主成分所占的比率为: 48.681900%
前1个主成分所占的比率为: 74.053464%
前2个主成分所占的比率为: 80.000007%
前3个主成分所占的比率为: 86.708415%
前4个主成分所占的比率为: 99.000007%
前5个主成分所占的比率为: 99.845199%
前6个主成分所占的比率为: 100.000000%

```

图6 经主成分分解后各个特征值

```

所求的系数矩阵
b[0]=-32.087995
coefficient[0][0]=-1758.425692
coefficient[1][0]=3613.391646
coefficient[2][0]=1685.819692
coefficient[3][0]=-69.357064
coefficient[4][0]=-304.525615
coefficient[5][0]=79.355939
coefficient[6][0]=-1345.577377
预测浓度值为:
predict_value[0][0]=1160.288694
predict_value[1][0]=2575.390363
Press any key to continue.

```

图7 预测结果

由表2可知,最大预测误差在5%左右。这与所选择的用于建立校正集的样本数目以及所选择本浓度的分布范围有关,由图5可知,预测样本浓度在样本校正集浓度范围之内,但用于建立校正集的各相邻样本间浓度差偏大,这是造成预测误差相对偏高的主要原因。因此在保证不过拟合的情况下,增加用于建立校正集样本数目,可以提高预测精度。另外,预测精度与建立模型所选择的主成分数也有很大的关系,因此主成分确定过程当中应做到既不丢失有用信息,又能最大限度的剔除干扰成分。

4 结论

利用红外分析技术,可直接对混合气体中 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 进行检测分析,但是不能检测 H_2 (H_2 在中红外区域无对应吸收光谱)。该方法优点是测试速度快,可连续采集对故障分析有利的全部故障特征气体,不需载气,长期免维护。随着科技的不断进步,对产品品质功能要求的不断提高,变压器在线监测产品将具有更高的可靠性、灵敏度,其分析的气体种类将更丰富,诊断技术亦越趋于智能化。

参考文献

- [1] 操敦奎 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005 25—26
- [2] Lan X Z, Guang Y F, Zhu D Q. Decomposition of Transformer Oil Under Ultrasonic Irradiation During Degassing Process[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2002, 13: 1131—1134
- [3] 中华人民共和国经济贸易委员会 DL/T22-2000 变压器油中溶解气体分析和判断导则[M]. 北京:中国电力科学研究院,2000
- [4] 陈允魁 红外吸收光谱法及其应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1993 2—3,20—23
- [5] Thomas W, Sr C, Dan M. On-Line DGA During Controlled Energization of a 1000 MVA Autotransformer Exhibiting Partial Discharge[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1995, 1: 12—15
- [6] Smith K, Ya Y. Measurement of Vehicle Emissions with Fourier Transform Infrared (FTIR) Method[J]. *International Symposium COMODIA*, 1990, 1: 365—369
- [7] Fan S C. The Principle and Characteristic of the FTIR Spectrometer[J]. *Polymeric Materials Research*, 2007, (11): 40—41
- [8] 褚小力,袁洪福,陆婉珍 用于石化工业的光谱和波谱类过程分析技术[J]. *现代科学仪器*, 2006, 31(8): 8—13
- [9] 许禄,邵学广. 化学计量学方法[M]. 北京:科学技术出版社,2004 130—138

Study on On-Line Detection of Transformer Fault Using FTIR Based on Principal Component Analysis

KANG Jian-Shuang JIANG Shu-Bo CHENG Ming-Xiao CHU Q in

(Institute of Automation and Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P. R. China)

Abstract Transformer play an important role in power transmission, and its working condition directly affects the safety level. An infrared absorption spectra can be used to monitor the stage of the transfer by infrared spectrometer with Fourier transform based on the qualitative and quantitative analysis using principal component analysis based on Lambert-Beer's law combined with the measured information. For the operation transformer in trouble, accurate judgment of the potential failure or hidden danger in time and solving it is of great significance.

Key words Transformer; Fault Gases; FTIR; Principal Component Analysis