

基于膜分离的变压器在线监测系统中 气体体积分数的预测算法

李洋流¹, 赵学增¹, 郭春志², 何 鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 传感与测控实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 沈阳超高压局, 辽宁 沈阳 110001)

摘要: 采用高分子膜对溶解于变压器油中的气体进行分离的变压器在线监测系统需要在气体渗透达到平衡后才能给出油中气体的准确体积分数。在对气体渗透过程的影响因素进行分析后, 提出了一种在非平衡状态下利用气室中气体体积分数数据预测平衡后气室中气体体积分数的算法, 并采用特氟隆膜与电化学气体传感器构建在线监测系统进行了现场实验。在弱化温度对渗透过程的影响的条件下, 利用预测算法对非平衡状态下的测量数据计算后, 与离线气相色谱对 H_2 的测量值 $26 \mu L/L$ 的最大相对误差为 26.8%, 小于国际电工委员会对实验室离线色谱测量结果误差调查的平均值。实验结果证实了该预测算法的可行性, 并在充分利用大量实时的在线监测数据的同时, 提高了变压器在线监测系统测量结果的准确性与可靠性。

关键词: 变压器; 在线监测; 油气分离; 特氟隆膜; 非平衡状态; 预测算法

中图分类号: TM 406

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0036-06

0 引言

油中溶解气体分析 DGA (Dissolved Gas Analysis) 技术是将变压器绝缘油中溶解的气体与变压器运行状态和潜在故障对应起来的分析方法, 是目前对油浸变压器进行故障诊断最方便、有效的手段之一, 位列变电站 32 项常规预试验的第一位, 其有效效率达到了 85% 以上, 并得到了广泛应用^[1-2]。

传统的离线式气相色谱对油中溶解气体体积分数测量的环节较多, 从取油样到实验室分析的作业程序复杂, 花费的时间和费用在技术经济上不能适应电力系统发展的需要。更重要的是离线色谱只能检测到变压器某一时间点的油中溶解气体的体积分数, 对于一段时间内变压器油中溶解气体的变化, 特别是对变压器油中每天产气率的信息无法获知^[3-5], 这使得在线 DGA 技术得到了广泛的关注与研究。对变压器油中溶解气体在线监测的最终目的是对变压器进行实时的状态分析与故障诊断, 而各种诊断方法(神经网络、决策树、援例分析、模糊数学等)是利用故障气体的体积分数作为故障信息分析的依据。其中气体体积分数测量结果的准确性与测量样本的数量对于诊断结果的正判率有较大影响, 当获得数据中缺少关键信息时进行故障诊断结果的正判率不高, 而离线色谱测量所能提供的数据样本数量少^[6-9]。因此, 变压器在线监测系统的应用是提升电站运行安全性的必然趋势, 也是针对变压器运行状况开展状态检修的必然要求。

目前, 各国商品化的变压器油中溶解气体在线监测装置不断推向市场, 同时国家电网内也有很多变压器安装了各种在线监测设备, 但是目前国家电网内安装的变压器油中溶解气体在线监测装置多数仅被当作是比气体继电器更灵敏的保护装置, 而不是真正意义上的油中溶解气体在线监测装置^[10]。即使是能够对全组分气体进行监测的在线监测装置在实际应用的过程中, 大部分的变电站或相应机构也仅将其作为实验室离线色谱的辅助手段, 将在线设备与离线设备所获得的数据加以对比后就不再关心设备数据的变化, 这对于在线设备的投入是极大的浪费^[11]。因此, 在充分利用在线设备数据的大量性和实时性的同时, 提高在线监测系统的准确性及可靠性的方法研究显得尤为重要。

对于在线监测系统对气体体积分数测量结果的评定可以参考离线色谱的测量结果。M. Duval^[12]提出: DGA 结果好坏基于气体体积分数数据的准确性、重复性、测量的可再现性。通过对 IEC 采用气相色谱的实验室分别测量的结果调查显示: 最好的实验室结果在低体积分数时的重复性为 7%, 较高体积分数时为 1%, 对较高体积分数的实验室测量的平均重复性为 7%, 低体积分数时为 27%, 最差的实验室结果对中等气体体积分数的测量重复性为 15%, 低气体体积分数测量的重复性只有 65%; 而准确性的测试结果差别也很大, 25 个实验室低气体体积分数时测量结果的准确度的平均值只有 30%, 在较高体积分数范围内为 15%^[13]。该调查同时指出不论采用何种油气分离方式, 都可能会得到准确度较高及准确度较低的结果, 而 CIGRE 实验室的结果的准

确性远高于非 CIGRE 实验室的测量结果,而对同一实验室同一操作人员的测量结果都有较好的重复性,这说明对于离线色谱测量方式操作人员与操作过程对测量结果有较大影响。如果在线监测系统测量结果的准确性与重复性好于 IEC 对离线色谱实验室的调查结果,可以充分利用在线监测系统测量数据的实时性与大量性得到准确反映油中溶解气体的体积分数值。

事实上,DGA 数据的准确性与可靠性受多种因素的影响,其中脱气这一环节是 DGA 结果差异的主要来源,对于在线监测系统而言,亦是如此^[14]。目前已有的主要的脱气方法主要有真空脱气法、吹气脱气法、动态顶空脱气法、渗透膜脱气法。前 3 种方法必须在仪器架构的基础上进行且操作复杂,所以在线监测系统多采用油气分离膜进行分离。近些年国内外对各种高分子膜对变压器的故障气体的渗透性能多有研究。适合于油气分离的膜是致密高聚物膜,要求耐油、耐压、耐高温(80℃)、透气性好。早期的在线监测仪中较多应用聚四氟乙烯膜,如加拿大 Syprotec 公司的 Hydran 在线 H₂ 监测仪,在国内已安装了近千套。还有一种聚全氟乙丙烯:是一种改性的聚四氟乙烯,又称 F46,其渗透性优于聚四氟乙烯,国内有的变压器在线监测仪采用了 F46 膜,已在数十个变电站现场运行^[15]。2004 年,Roland Gilbert 对 Morgan Schaffer 公司的集气装置 GP100 对各种故障气体的渗透性能进行了测试,其中 H₂ 在 6 h 后就达到了平衡,而需要平衡时间最长的 C₃H₈ 在 239.3 h 之后达到了平衡,其余气体在 96 h 之内达到了平衡^[16]。国内在这方面也有相关的研究,清华大学的李红雷等人研制出了一种新型的油气分离膜,该油气分离膜在 12 h 内实现了 C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆、CH₄、CO、CO₂、H₂ 共 7 种故障气体的平衡,但是该种薄膜是需要特殊的加工工艺才能得到的,目前未见大规模的商用^[17]。目前对于高分子渗透膜的研究一直集中在如何缩短平衡所需的渗透时间上,即提高高分子膜的渗透因子,但油气分离膜的分离性与透过性不可兼得,在高渗透性的条件下同时保持膜的高分离性及高强度难度较大,因此利用在线数据相关性的分析及气体产生扩散规律,研究提高数据精确度的算法有重要意义^[18]。

本文通过分析普遍采用的油中溶解气体计算公式后,提出了一种在非平衡条件下利用已测得气室中的气体体积分数估算渗透平衡后气室中气体体积分数的算法。考察了温度对于渗透过程中渗透率的影响后,从而弱化了温度对气体体积分数测量结果的影响。这使得在油气分离膜的参数标定后,可在渗透未达到平衡时对最终达到平衡状态时的气室中的气体体积分数进行预测,进而获得更接近油中溶解气体的真实体积分数值。

1 渗透过程分析

1.1 自由扩散

设初始条件下,油中溶解气体的质量为 m_G ,在气体经过自然扩散后,扩散到油表面的气体质量为 m_g ,此时油中溶解的气体质量为 m_o ,设分离系数为 k^{ex} , $k^{\text{ex}} = m_g / m_G$,设变压器油总体积为 V_o ,油面上方气室体积为 V_g ,在温度不变的条件下,气体在油面上方的扩散规律符合亨利定律,设亨利系数为 K ,初始时油中溶解气体体积分数 C_G ,平衡后油气两相气体体积分数分别为 C_o 、 C_g ,符合以下关系式:

$$m_G = m_o + m_g \quad (1)$$

$$V_o C_G = V_g C_g + V_o C_o \quad (2)$$

$$C_g = C_G / (K + V_g / V_o) \quad (3)$$

文献[13]中提到在采用离线色谱的测量方式时的一个矛盾之处,当增大气室的体积 V_g 可以提高 k^{ex} ,即增大气室中气体的渗出量,但同时针对某一气体组分而言,增大气室的体积意味着这种气体组分在气室中体积分数的降低。通过离线色谱测量气体体积分数时, K 值与 V_g / V_o 接近,同时 V_g / V_o 的大小对 k^{ex} 有较大影响,因此在测量前需仔细标定 V_g / V_o 的大小。但对于采用膜进行油气分离的变压器在线监测系统来说,通常情况下 $K \gg V_g / V_o$,因此公式(3)可简化为

$$K = C_G / C_g \quad (4)$$

式(4)中 C_g 与 C_G 呈简单的比例关系,其中 K 即奥斯特瓦尔德系数,通过实验可以测得。文献[19]中,通过对 H₂、O₂、N₂、CH₄、CO、CO₂、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆、C₃H₆ 及 C₃H₈ 几种物质在绝缘油中溶解特性的测定,证实了使用奥斯特瓦尔德系数建立气相中气体组分体积分数与油相中气体体积分数组分的对应关系是可行的。对于变压器油中溶解气体在线监测系统而言,适当增大 V_g 虽然不会对气室内气体体积分数产生太大影响,但可以使变压器油中溶解气体渗出的绝对量增加,如果气体检测环节的传感器响应的是气体物质的量的绝对量,即可以提高气体测量环节的灵敏度。

1.2 膜的渗透过程

式(4)表述了通过扩散原理达到的最终结果,通过对膜渗透机理的分析,可以得到膜对油气分离的动态过程表达式,即体积分数随时间变化的关系式,膜分离过程中气室中气体体积分数 C_i 的变化规律符合下式:

$$C_i = C_i^{\text{max}} [1 - \exp(-bt)] \quad (5)$$

其中, b 为扩散系数, t 指渗透开始后的时间, C_i^{max} 表示气室中可达到的气体体积分数的最大值,通常在实验过程中设定测量得到的气室中气体体积分数可达到最大值的 99% 或 90% 对应的时间点 t_0 后即达到平衡。

式(5)可以计算单一渗透过程中某一时间点的体积分数值,但通常认为只有当渗透达到平衡后,即在平衡时间点 t_0 后的测量值才有价值,这意味着在达到平衡时间点之前的测量数据都不能准确反映油中溶解气体的体积分数,因此对于油气分离膜的研究与开发重点集中在缩短平衡时间上,即使目前对几种气体渗透效果最好的 GP100,其对于 CO 的渗透平衡时间也达到了 39 h,普遍认为在这之前的测量数据点不能准确给出油中溶解气体的体积分数值。因此通常在线监测系统在安装后,工作人员会在认为气室中气体体积分数达到平衡后开始记录数据。但是渗透从开始之后,即使在达到平衡时一直为一个动态过程。对于在线监测系统,油温、气室温度及变压器油中溶解气体本身发生的变化都会影响这一过程。这使得即时在达到平衡的时间点 t_0 后,气室中依然可能发生渗透或反渗透过程,因此利用多时间点测量的数据的相关性推测最终平衡时气室中气体的体积分数比单一时间点测量结果更接近油中溶解气体的真实值。

对于某一种气体组分,设 t_1 点测得的气体体积分数为 C_{i1} ,对应此渗透过程达到平衡时的体积分数为 $C_{i1}^{\max}$, t_2 点测得的气体体积分数为 C_{i2} ,此时对应此渗透过程达到平衡时的体积分数为 $C_{i2}^{\max}$,则有以下关系式:

$$\ln \frac{C_{i1}^{\max}}{C_{i1}^{\max} - C_{i1}} = b_1 t_1 \quad (6)$$

$$\ln \frac{C_{i2}^{\max}}{C_{i2}^{\max} - C_{i2}} = b_2 t_2 \quad (7)$$

当时间点 t_1 与 t_2 在一个独立渗透过程之中,则有 $b_1 = b_2$, $C_{i1}^{\max} = C_{i2}^{\max}$,设测量时间间隔 $t_2 - t_1 = \Delta t$,当温度不变时有

$$\ln \frac{C_{i1}^{\max} - C_{i2}}{C_{i1}^{\max} - C_{i1}} = b \Delta t \quad (8)$$

同理:

$$\ln \frac{C_{i1}^{\max} - C_{i1}}{C_{i1}^{\max} - C_{i1-1}} = \ln \frac{C_{i1}^{\max} - C_{i1+1}}{C_{i1}^{\max} - C_{i1}} = b \Delta t \quad (9)$$

因此可以利用在同一渗透过程中相同时间间隔的气体体积分数的测量值计算 $C_{i1}^{\max}$,可以在并不获知 b 值的情况下,预测出这一平衡过程气室中该气体组分体积分数的最终值,不必待渗透进入平衡状态之后再测量气室中气体的体积分数。

2 实验

实验中的特氟隆膜采用美国杜邦公司(Dupont)的 Teflon FEP 含氟聚合物,其耐化学腐蚀特性优良,热适应范围宽,可以热粘合,具有极强的抗冲击和抗撕裂特性。膜的厚度为 $12.5 \mu\text{m}$,气室直径为 38 mm ,体积约为 30 mL 。首先在实验室用气相色谱仪对膜的气-气相渗透性能进行检测,得到了 H_2 及 CO 的渗透曲线与 GP100 的渗透能力进行对比,结果如图 1 所示。

对于 Teflon 膜 H_2 体积分数达到 $C_i^{\max}$ 的时间为

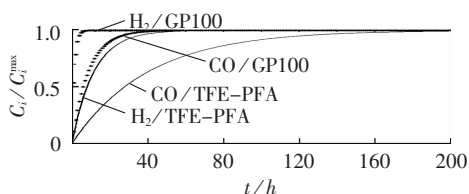


图 1 TeflonFEP 与 GP100 的渗透特性对比

Fig.1 Comparison of membrane permeation characteristics between TeflonFEP and GP100

52.8 h, CO 达到 $C_i^{\max}$ 的时间为 183 h,同时得到在室温 23°C 的条件下, b^{H_2} 值为 $0.08691/\text{h}$, b^{CO} 值为 $0.02503/\text{h}$ 。

为验证上文中提到的预测算法,采用电化学气体传感器作为气体体积分数检测单元进行了现场实验,系统安装于一台 ABB 500 kV 的变压器油箱下端的法兰盘上。系统的气室直径为 38 mm ,体积约为 30 mL 。

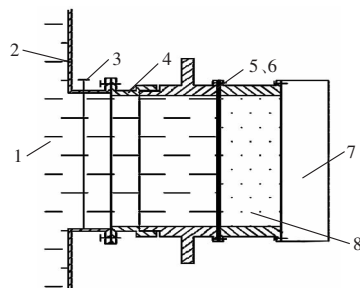


图 2 气室结构与外观图

Fig.2 Structure and aspect of gas cell

气体测量模块选用瑞士产电化学气体传感器,该传感器模块对于 H_2 的最小检测限为 $2 \mu\text{L/L}$,CO 为 $1 \mu\text{L/L}$;对于 H_2 和 CO 的检测最大值均 $2 \mu\text{L/L}$ 。测量温度为 55°C 时,传感器模块对 H_2 体积分数测量的相对精度为 $\pm 3\%$,对 CO 体积分数测量的相对精度为 $\pm 50\%$ 。设输出达到测得数据的稳定值的 90% 所需的时间为响应时间时,对于 H_2 而言响应时间小于 10 min ,对于 CO 响应时间小于 10 min 。该传感器模块对所测量气体的温度范围要求为 $-20 \sim 120^\circ\text{C}$,工作时的测量间隔为 20 min ,其温度系数为 $1\% \text{ K}^{-1}$,输出电流范围 $0 \sim 20 \text{ mA}$ 。电化学传感器对气体的体积分数每隔 20 min 测量,通过 40 d 的监测,得到的 H_2 与 CO 的气体体积分数数据分别如图 3~4 所示。

3 数据分析与讨论

由实验室实验可知,在气室中气体初始体积分

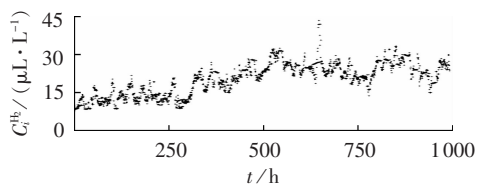


图 3 H_2 体积分数数据

Fig.3 Concentration of H_2

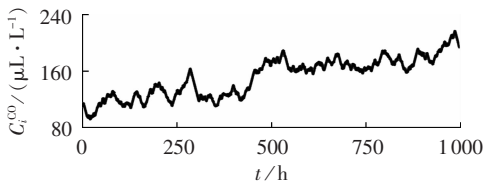


图 4 CO 体积分数数据
Fig.4 Concentration of CO

数为 0 的条件下,TeflonFEP 膜对 H_2 的渗透平衡时间不少于 53 h,在系统安装后的第 4 天计算得到油中溶解 H_2 体积分数变化如图 5 所示。在同一天进行了离线气相色谱分析,得到油中溶解 H_2 的体积分数为 $26 \mu\text{L}/\text{L}$ 。从图中可以看出渗透过程达到平衡后,气体传感器测得的气体体积分数数据变化较小,对应离线色谱的采样时间点传感器测得 H_2 体积分数为 $25 \mu\text{L}/\text{L}$,与离线色谱测量结果非常接近。虽然在线监测系统获得的大量数据与离线色谱的某个时间点的测量值并不具有可比性,但是该测量结果可以间接地验证在油气分离过程达到平衡后,即该电化学传感模块对气体体积分数的测量值,可记为 $C_i^{\max}$ 用以计算油中溶解气体的体积分数。

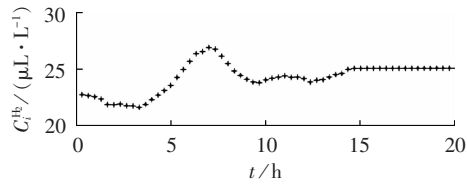


图 5 平衡状态 H_2 体积分数数据
Fig.5 Concentration of H_2 in equilibrium state

用公式(9)中提到的算法进行气体体积分数预测前,首先需确定该算法应用的条件,从式(9)中可以看出,平衡过程还受到 b 与 Δt 的影响,其中 b 值可由式(10)计算得到。

$$b = \frac{P_i A}{1 \times dV} \tag{10}$$

其中, P_i 为温度相关渗透系数; A 为渗透膜面积; V 为气体普适常数; d 为渗透膜厚度,1 指 1 个标准大气压。

当渗透过程中膜内没有热量传递时,即在某一确定温度下,膜的渗透系数与温度的关系符合阿列纽斯关系式:

$$P_i = P_0 \exp\left(-\frac{E_p}{R\theta}\right) \tag{11}$$

其中, P_0 为与温度无关的渗透参数; E_p 为渗透动能; R 为气体普适常数; θ 为温度。

即 P_i 与温度相关,在文献[19]中,通过对气体 C_3H_8 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO_2 、 CH_4 、 O_2 、 CO 、 N_2 及 H_2 的渗透过程的实验验证了 $\ln P_i$ 和 $-1/\theta$ 之间的线性关系,以 Teflon 膜对 H_2 及 CO 这 2 种气体的渗透动能计算,当气相温度从 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,渗透系数的变化如表 1 所示。

从表 1 中看出,油气分离膜温度的变化,即油

表 1 渗透系数与温度关系

Tab.1 Relationship between temperature and permeability coefficient

气体	$\theta/^\circ\text{C}$				
	-20	0	10	23	60
CO	$0.471P_0$	P_0	$1.295P_0$	$1.884P_0$	$4.662P_0$
H_2	$0.464P_0$	P_0	$1.302P_0$	$1.909P_0$	$4.814P_0$

温及气室温度的变化,对渗透系数都有较大影响,进而会影响渗透过程。采用膜进行油气分离的变压器在线监测系统的气室体积通常小于 100 mL,易于将温度精度控制为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$,但变压器油的温度通常变化较大,这是因为变压器油的温度受变压器负载影响,变压器负载在一天有规律的变化,引起变压器的“呼吸”作用,会使油中气体逸散而减少。开放式变压器油箱中的油温上升时,含有气油上升,到达储油柜,并于油面上的空气相接触。为使油中气体含量和气相达到平衡,逸散于油面上的气体会“呼出”储油柜外。反之,当油温降低时,储油柜中的含气量已降低的油又流回油箱,同时有相当量的新鲜空气吸入储油柜中,降低了油面上气体的气相含量,从而又加速了储油柜油中溶解气体向气相侧释放。当变压器油的温度发生变化时, H_2 的逸出率最高^[11],因此在非平衡时间内给出 H_2 体积分数的估算值需要考虑到变压器油温度的变化,否则渗透体积分数的变化会被温度的变化所消解,同时还要考虑到气室温度的变化,在气室中采用温控电路对气室中气体温度进行恒温控制,控制精度为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。在系统运行的初始的 53 h 内 H_2 体积分数的变化如图 6 所示。

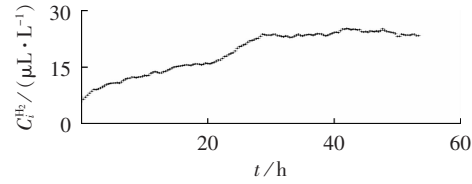


图 6 非平衡状态下 H_2 体积分数数据
Fig.6 Concentration of H_2 in nonequilibrium state

由上文所述,温度的变化对于渗透过程有较大影响,尽管温度并不是突变量,但对于电化学传感器的测量间隔来说,影响是不可忽略的,这种影响体现在温度发生较大变化后平衡过程被打破,即出现气室中气体体积分数下降的反渗透的过程。对图 6 中渗透过程中油温的变化进行监测,得到油温的变化如图 7 所示。算法中涉及 3 个测量数据点的时间点为 1 h。设定在 2 h 内温度在 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内

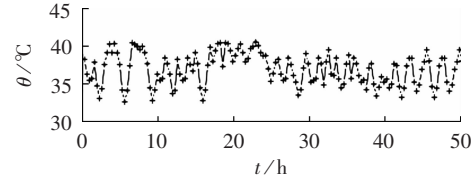


图 7 油温变化
Fig.7 Temperature of oil

变化才可以应用该算法计算预测值,计算后得到的 H_2 体积分数的预测数据如图8所示。

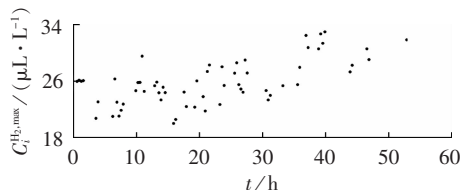


图8 H_2 体积分数预测数据
Fig.8 Predicted concentration of H_2

从图8中可以得出,以预测算法计算得到的 H_2 体积分数值在未达到平衡的条件下,即53 h以内的预测值共60点,其中与离线气相色谱的相对误差在 $\pm 20\%$ 的有52个预测值,最大相对误差为26.8%,最小相对误差为0.931%。IEC的调查显示对低体积分数的离线气相色谱的测量结果的平均误差为 $\pm 30\%$,而该预测算法计算得到的结果的准确性已经接近实验室离线色谱测量值,这表明对于实验所采用的在线监测系统,在对油温进行跟踪监控的同时,利用测得的 H_2 体积分数值在气室中渗透过程未达到平衡时对油中溶解气体体积分数进行预测是可行的。

4 结论

本文通过分析高分子膜对气体的渗透过程,提出一种在渗透未平衡状态下的气体体积分数预测算法。在实验室条件下测定了特氟隆膜的渗透性能后,采用电化学气体传感器构建了在线监测系统进行现场实验,得到了 H_2 和 CO 体积分数的实时数据。在气室中的渗透过程达到平衡后,气体传感器得到 H_2 体积分数为 $25 \mu\text{L/L}$,与同一天的离线色谱测得 H_2 体积分数结果 $26 \mu\text{L/L}$ 接近,验证了该电化学气体传感器的准确性和可靠性。通过分析温度对渗透扩散参数的影响,在降低温度对预测算法的影响干扰后,对系统初始运行期的 H_2 的体积分数据通过预测算法进行计算,得到计算结果的相对误差小于与IEC对实验室离线色谱测量结果的相对误差。

该预测算法的优势体现在渗透未达平衡时,利用相同时间间隔点的测量数据计算出该渗透过程达到平衡后气室中气体的体积分数值,降低了高分子油气分离膜的开发难度。采用该预测算法后,大量的在线监测数据不再是孤立的信息点,而是表现渗透过程的互相关联的变量,充分利用了在线监测系统测量数据的大量性与实时性,这使得测量数据的可靠性得到了提高,进而可以真实、实时地关联变压器的运行状态,为变压器进行状态诊断并开展变压器状态检修提供了良好基础。

参考文献:

[1] DUVAL M, LANGDEAU F, GERVAIS P. Acceptable gas-in-oil

levels in generation and transmission power transformers[C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference on 1990. Pocono Manor, USA: IEEE, 1990: 325-330.

[2] IEC. IEC60599 Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis[S]. 2nd ed. Geneva, Switzerland: IEC, 1999.

[3] DUVAL M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 8-17.

[4] 程鹏, 佟来生, 吴广宁, 等. 大型变压器油中溶解气体在线监测技术进展[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 90-93.

CHENG Peng, TONG Laisheng, WU Guangning, et al. Technical achievements of on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 90-93.

[5] 李娟, 蔡晖, 丁晓群. 电力变压器状态在线监测和故障诊断的新方法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(12): 60-63.

LI Juan, CAI Hui, DING Xiaoqun. Online monitoring and fault diagnosis of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(12): 60-63.

[6] 莫娟, 王雪, 董明, 等. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 162-165.

MO Juan, WANG Xue, DONG Ming, et al. Diagnostic model of insulation faults in power equipment based on rough set theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 162-165.

[7] 黎静华, 栗然. 基于知识粗糙度的多变量决策树在变压器故障诊断系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 40-43.

LI Jinghua, LI Ran. Application of knowledge roughness-based multivariate decision tree in transformer fault diagnosis system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 40-43.

[8] 谢可夫, 罗安. 遗传算法在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 55-58.

XIE Kefu, LUO An. Fuzzy diagnosis system optimized with genetic algorithm for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 55-58.

[9] 李峥, 马宏忠. 电力变压器故障诊断的可拓集法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 14-17.

LI Zheng, MA Hongzhong. Extension set method for power transformer fault diagnosis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 14-17.

[10] 操敦奎, 许维宗, 阮国方. 变压器运行维护与故障分析处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 167-170.

[11] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 4-7.

[12] DUVAL M, DUKARM J. Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 21(4): 21-23.

[13] ARAKELIAN V G. The long way to the automatic chromatographic analysis of gases dissolved in insulating oil[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(6): 8-25.

[14] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB/T 7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

[15] 杨荆林, 肖登明, 徐欣, 等. 变压器在线监测中油气分离高分子膜的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 38-40.

YANG Jinglin, XIAO Dengming, XU Xin, et al. Study on permeability of high polymer membranes for gas-oil separate of the chromatography of the transformer incipient fault[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(6): 38-40.

[16] GILBERT R, NGUYEN H P, JALBERT J, et al. Transport properties of a mixture of permanent gases and light hydro-

- carbons through the polytetrafluoroethylene capillary tubes of a GP-100 gas extractor[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 236(1): 156-160.
- [17] 李红雷, 张光福, 刘先勇. 变压器在线监测用的新型油气分离膜[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(10): 1301-1304.
LI Honglei, ZHANG Guangfu, LIU Xianyong. Oil-gas separation film used for transformer on-line monitoring[J]. Tsinghua University: Sci & Tech, 2005, 45(10): 1301-1304.
- [18] 肖燕彩, 朱衡君, 张霄元, 等. 基于溶解气体分析的电力变压器在线监测与诊断技术[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 93-95.
XIAO Yancai, ZHU Hengjun, ZHANG Xiaoyuan, et al. On-line monitoring and diagnosis of power transformer based on dissolved gas analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 93-95.
- [19] JALBERT J, GILBERT R, PÉTÉTREAU P. Matrix effects affecting the indirect calibration of the static headspace-gas chromatographic method used for dissolved gas analysis in dielectric liquids[J]. Analytical Chemistry, 2003, 75(19): 5230-5239.
- (编辑: 康鲁豫)

作者简介:

李洋流(1983-), 女, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 研究方向为电力系统自动化(E-mail: lylmaria@163.com);

赵学增(1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化。

Gas concentration prediction algorithm based on membrane extraction for transformer online monitoring system

LI Yangliu¹, ZHAO Xuezeng¹, GUO Chunzhi², HE Peng¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shenyang Ultra-High-Voltage Bureau, Shenyang 110001, China)

Abstract: The transformer online monitoring system based on macromolecule membrane extraction acquires the concentration of gas dissolved in transformer oil only when the permeation equilibrium state is realized. Based on the analysis of gas permeation process, an algorithm is proposed to predict the gas concentration in permeation equilibrium state with the data of gas concentration in permeation nonequilibrium state. With Teflon membrane and electrochemical gas detection module, an online gas monitoring system is constructed and field tests are carried out. When the effect of fluctuant temperature is depressed, the biggest relative error between the predicted and the measured concentrations is 26.8 % (H_2 , 26 $\mu L/L$), better than the mean error of lab offline measurements surveyed by IEC, which demonstrates the feasibility of the proposed prediction algorithm.

Key words: power transformer; online monitoring; gas extraction; Teflon membrane; nonequilibrium state; prediction algorithm