

基于溶解气体分析的电力变压器 在线监测与诊断技术

肖燕彩¹,朱衡君¹,张霄元²,陈秀海³

(1. 北京交通大学 机电学院,北京 100044;2. 北京许继电气公司,北京 100085;
3. 北京电力公司,北京 100031)

摘要: 油中溶解气体分析是评估变压器绝缘状态和分析变压器绝缘故障的重要依据。在介绍基于油中溶解气体分析的变压器在线监测与诊断技术原理的基础上,进一步总结了当前在线监测与诊断系统的研究现状及存在的问题;系统主要是在线监测油中气体成分及超阈值报警,而对故障性质、种类、定位及发展趋势预测等诊断尚不具备或很不完备,故障诊断需靠离线分析;因缺乏相应的理论指导,在线监测数据在正常情况下应满足的规律还很模糊,装置自身的精确度不能保证。对今后的研究提出了展望,指出如何通过对在线数据的挖掘找到变压器故障诊断的相应理论依据是进一步研究的核心。

关键词: 电力变压器; 溶解气体分析; 在线监测与诊断

中图分类号: TM 855 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)06-0093-04

0 引言

变压器是电力系统的重要设备,其安全性与可靠性将直接影响社会各行业生产和人民生活,因此对其实施监测技术是电力系统安全生产的必然需要。随着电子技术的发展和传感器、计算机、信息处理等技术在各领域的渗透,电力系统监测技术已从离线的定期监测逐渐转变为在线的连续监测,其目的是实时或定时监视变压器的运行状态,判断其运行是否正常,诊断其内部存在故障的性质、类型,并预测故障的发展趋势,指导电力运行部门的管理和维修,实现电力设备从定期的预防性维护到预知性维护的转变。

目前,广泛使用的变压器在线监测技术主要可分为以下几种:

- a. 对变压器油的气相色谱监测;
- b. 对变压器有载分接开关的监测,如监测分接开关的位置、状态及切换开关室油温等;
- c. 对变压器套管的监测;
- d. 对变压器局部放电的监测;
- e. 对变压器铁芯接地电流的监测;
- f. 用光纤、红外对变压器顶层油温的监测;
- g. 其他形式的在线监测,如油流带电、绕组线圈变形等。

公认比较有效的方法为变压器油中气体的在线监测和变压器局部放电在线监测定位技术,但局部放电在线监测的抗干扰技术尚未得到解决,因此,基

于油中溶解气体的变压器在线监测技术在变压器在线监测中占有重要的地位^[1-2]。

1 原理

溶解气体在线监测与诊断的原理和离线监测与诊断的原理相同,即变压器在正常运行及故障初期,其内部的绝缘油及有机绝缘材料会随着运行时间的增加在热和电的作用下逐渐老化和分解,产生少量的低分子烃类、CO₂、CO 等气体和水分,这些气体绝大部分都溶解于油中,若从油样分离出这些气体,通过分析各种气体成分的相对数量和形成速度,就可以判断设备内部是否存在异常,并进一步推断故障类型及故障能量等。不同故障类型所产生的气体如表 1 所示^[2]。

表 1 不同故障类型所产生的气体
Tab.1 Gases produced during different fault

故障类型	气体成分						
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
油过热	+	-	-	++	-	++	+
油和纸过热	+	++	++	++	-	++	+
油纸中局部放电	++	++	+	++	++	-	+
油中火花放电	++	-	-	-	++	-	-
油中电弧放电	++	-	-	+	++	+	+
油纸中电弧放电	++	++	++	+	++	+	+
受潮或油有气泡	++	-	-	-	-	-	-

注: ++、+、- 分别代表故障变压器油的主要、次要、无关气体成分。

变压器油中溶解气体在线监测与诊断系统通常由 2 大部分组成:在变压器现场由监测装置完成系统的实时检测功能;在主控室内由故障诊断软件完成设备状态的精确分析,并给出相应的控制策略。

检测变压器油中溶解气体的方法一般为:变压器油经冷却装置取样后进入气体萃取与分离单元,按不同的方法分离为要求的气体成分后再进入气体检测单元,由不同的检测器变换为与气体含量成比例的电信号,经 AD 转换后将信息存储在终端计算机的存储单元内,以备调用或上传。溶解气体在线监测与诊断系统的原理如图 1 所示。

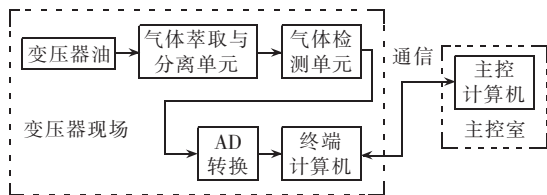


图 1 溶解气体在线监测与诊断系统原理

Fig.1 The principle of on-line monitoring and diagnosis system based on DGA

2 研究现状

早在 20 世纪 60 年代,国外一些国家就开始了在线监测技术的研究。经过 40 多年的发展,在线监测已从理论研究发展到了实用阶段^[3]。许多国家(如德国、美国、日本及加拿大等)都对油中溶解气体监测方面进行了研究探讨,并生产了不少监测设备,如三菱 TCG 自动监测仪、东芝在线三组分色谱仪和加拿大 H201R 型监测仪、美国的 TrueGas 等。在国内也相继开发了一些类似的设备,如东北电力试验研究院于 1994 年研制的 BSZ 大型变压器油色谱在线监测装置、北京电子管厂生产的 BGY-1 型变压器在线监测装置的改进型装置——TRAN 型变压器早期故障在线监测仪、中国电力科学研究院研制的 DDG-1000 变压器油中溶解氢气在线检测仪等。这些装置按不同的标准可以有多种分类方式^[4],其功能也由测单组分氢气、测可燃气总量发展为分别监测多组分的单独含量的设备。

随着众多在线监测装置的开发,诊断方法也逐步发展。判断变压器故障的最基本方法是采用 IEC/IEEE 推荐的三比值法,即选择 5 种特征气体的 3 个相对比例 CH_4/H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 和 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 进行故障诊断。其理论依据是 Halstead 在 1973 年对油中分解的碳氢气态化合物的产生过程进行的热动力学理论分析。针对三比值法存在“缺编码”、“编码边界过于绝对”等不足,日本电气协同研究会提出的电协研法和我国湖北电力试验研究所提出的改良电协研法都对 IEC 编码作了进一步的补充。近年来,许多学者又将各种智能技术如模糊推理、人工神经网络等引入变压器的故障诊断中,取得了比较好的效果^[5-10]。

随着研究的深入,有学者通过分析变压器故障产气机理发现,油中溶解气体本身并不携带足够的故障部位信息,因此,仅仅依靠油中气体提供的信息进行故障诊断有较大的局限性。因此,很多学

者与机构将变压器的油中溶解气体与变压器的其他监测信息相结合,开发了一系列的在线监测诊断系统,目前的研究主要有以下几种。

a. 2003 年南京南自科技发展有限公司将变压器在线监测与微机保护结合,研制了变压器在线监测及微机保护专家系统^[11]。

b. 澳大利亚 Wilson 变压器公司最新推出的 DRMCC 变压器在线监测系统,通过油色谱分析、微水分析、热效应等综合信息分析判断变压器的绝缘状况^[12]。

c. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室研制开发的大型电力变压器油色谱在线监测系统可以在主控室对变电站每台主变压器的油色谱分析进行巡回在线监测,根据需要,还可以实现对反映变压器电气异常的多特征量(色谱、局放、介损等)的在线智能化监测和故障综合评判诊断,并能与变电站其他在线监测与诊断装置联机,实现整个变电站运行工况的在线智能化监测与诊断^[2]。

d. 河海大学介绍了一种电力变压器绝缘在线监测和故障诊断的新思路,一方面通过在线油色谱分析仪检测 6 种故障特征气体含量和产气率,运用模糊理论及专家系统等人工智能技术对电力变压器的绝缘状态进行跟踪监测,另一方面尝试用参数辨识的方法进行变压器三相电气量的在线监测,依据变压器绕组结构及参数在故障前后会改变的原理,进行变压器绕组故障及其故障部位的识别,实现故障局部定位,提高变压器状态监测和故障诊断的准确性^[13]。

e. 东北大学将信息融合的基本思想引入到变压器故障诊断中,充分利用油中溶解气体和各种电气试验、运行状况与检修记录以及专家经验等故障相关信息,结合人工神经网络和证据推理技术提出了一种分层的、可靠的、开放的变压器综合故障诊断模型,该模型能够更有效地表达不确定知识和信息,更直观、逼真地模拟不确定性推理过程^[14]。

3 存在问题及研究展望

由于变压器在线监测与诊断系统在国际上尚属研制阶段,所以目前现有大多数系统的功能还不够理想,主要问题有以下 2 个方面。

a. 很多系统的主要功能是在线监测油中气体成分及超阈值报警,对故障性质、种类、定位及发展趋势的预测等诊断尚不具备或很不完备,以致造成在线监测仅仅是为运行部门提供一定的警示作用,真正的故障诊断还需由离线色谱分析完成。

b. 由于国内外对于变压器油中溶解气体的在线监测与诊断缺乏相应的理论指导,所以在线监测数据在正常情况下究竟应满足什么样的规律还很模糊。这样监测装置本身的精确度不能保证,测量结

果的正确性要由离线色谱分析证实。例如, TrueGas 可以 4 h 作一次分析, 每次分析都可以得到 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 、 O_2 共 8 种气体的含量数据。而现在对于这些数据的准确度判断只能依靠对仪器的工作状态进行确认来单方面进行, 还不能利用这些数据间存在的内在联系对数据的准确度进行确认。当各种气体含量随时间发生变化时, 还不能对这些气体变化与变压器状态之间的关系进行准确说明。

由于变压器在线监测较离线监测的最大优点是可以达到很高的监测频率, 一般离线监测最高频率为数月一次, 而在线监测可以达到数小时一次。大量的在线数据携带了众多的有用信息, 而且存在一定的信息冗余。若利用信息的冗余对原始数据进行纯化、利用数字信号处理技术提取有用信息, 则可对变压器工作状态进行更细致的诊断。现在已有利用高监测频率的在线数据研究变压器产气与变压器负载的相关性, 如图 2 所示是一台异常变压器的 C_2H_2 含量 $\lambda_{C_2H_2}$ 与变压器负载 λ_P (两者都是相对于警告值的百分比) 的对照图 (图中 t_1 为 2002-12-25, t_2 为 2003-02-25, t_3 为 2003-04-25, t_4 为 2003-06-25, t_5 为 2003-08-25, t_6 为 2003-10-25, t_7 为 2003-12-25), 图中每次负载超过 20 % 线都对应一次 C_2H_2 含量的突然增加, 负载降低后 C_2H_2 含量逐渐变为正常 (参见 TrueGas Measurement Range. ServerOn Technical Report, 2003.12)。虽然这种对照还是比较粗浅的处理, 但揭示了高监测频率数据所能达到的对变压器状态进行分析的一种新境界。

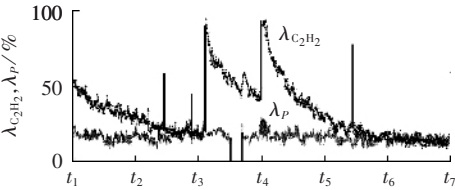


图 2 某变压器油中 C_2H_2 含量与负载的关系

Fig.2 The relation between C_2H_2 content in the transformer oil and the load

目前, 在变压器的在线监测与诊断领域有待进一步研究的问题是:

- a. 如何充分利用在线数据的相关分析研究、挖掘各种气体之间的相关关系;
- b. 如何从理论上研究故障性气体在变压器内产生和扩散的规律;
- c. 如何将理论与试验数据研究相结合, 得出在线数据间内在的联系规律;
- d. 如何从这些内在的规律出发, 得出对试验真实性和数据准确度的判断算法;
- e. 如何找到提高数据精确度的算法;
- f. 如何找到通过在线数据对变压器进行状态诊断的算法。

以上研究的核心在于如何通过对在线数据的挖掘找到变压器故障诊断的相应理论依据, 只有这样才能实现气体的独立监测, 并以在线监测的频率达到离线色谱的分析功能。找到相应的理论之后, 可再进一步考虑是否需要将油中气体监测信息与其他信息相结合, 从而形成真正的在线变压器状态诊断系统。

参考文献:

[1] 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 Lai-sheng, WU Guang-ning, et al. Technical achievements of on-line monitoring of dissolved gas in transformer oil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 90-93.

[2] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[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] 贾瑞君. 关于变压器油中溶解气体在线监测的综述[J]. 电网技术, 1998, 22(5): 49-55.
JIA Rui-jun. Review about gas dissolved in transformer oil on-line detection[J]. Power System Technology, 1998, 22(5): 49-55.

[5] 杨莉, 尚勇, 周跃峰, 等. 基于概率推理和模糊数学的变压器综合故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 19-23.
YANG Li, SHANG Yong, ZHOU Yue-feng, et al. Probability reasoning and fuzzy technique applied for identifying power transformer malfunction[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 19-23.

[6] 韩晓萍, 徐建政. 基于综合特征输入的 DGA 在变压器故障诊断中的应用[J]. 山东工业大学学报, 2001, 31(6): 506-510.
HAN Xiao-ping, XU Jian-zheng. Application of dissolved gas analysis based on comprehensive characteristic input to transformer fault diagnosis[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2001, 31(6): 506-510.

[7] 高文胜, 严璋, 谈克雄. 基于油中溶解气体分析的电力变压器绝缘故障诊断方法[J]. 电工电能新技术, 2000(1): 22-26.
GAO Wen-sheng, YAN Zhang, TAN Ke-xiong. Fault diagnosis of insulation in power transformer based on dissolved gas analysis method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000(1): 22-26.

[8] 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 Jing-hua, 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.

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

[10] 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 Hong-zhong. Extension set method for power transformer fault diagnosis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 14-17.

- [11] 许坤. 变压器在线监测及微机保护专家系统[J]. 电工技术杂志, 2003(8): 19-22.
XU Kun. Transformer online monitoring and computer relay expert system[J]. Electrotechnical Journal, 2003(8): 19-22.
- [12] 邓敏. 变压器在线监测技术的新突破[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 81-83.
DENG Min. An advance in on-line monitoring technique of transformer[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 81-83.
- [13] 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 Xiao-qun. Online monitoring and fault diagnosis of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(12): 60-63.
- [14] 魏守智, 王刚, 王金东, 等. 基于信息融合方法的电力变压器

网络在线监测与故障诊断研究[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(22): 51-54.
WEI Shou-zhi, WANG Gang, WANG Jin-dong, et al. The study of power transformer network on-line detection and fault diagnosis based on information fusion method[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(22): 51-54.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

肖燕彩(1972-), 女, 河北沧州人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为自动化监测和故障诊断;

朱衡君(1950-), 男, 上海人, 教授, 博士研究生导师, 长期从事自动化检测和故障诊断方面的工作。

On-line monitoring and diagnosis of power transformer based on dissolved gas analysis

XIAO Yan-cai¹, ZHU Heng-jun¹, ZHANG Xiao-yuan², CHEN Xiu-hai³

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Xuji Electric Group of Beijing, Beijing 100085, China;

3. Beijing Electric Power Corporation, Beijing 100031, China)

Abstract: The DGA(Dissolved Gas Analysis) is essential for the insulation state assessment and the fault diagnosis of transformers. The principle of the DGA-based on-line monitoring and diagnosis system for transformers is first introduced in which its present research status and problems are summarized. The on-line system mainly monitors gases in oil and alarms when exceeding. It acquires poor or even no information about the fault character, the type, the location and the development trend, the system depends on the off-line analysis for diagnosis. Rules for on-line data in the normal operation is still fuzzy so far due to lacking of associated theories, and the precision of the equipment itself can not be ensured. Prospects are finally presented, in which how to find out a fundamental theory for the transformer diagnosis through the on-line data mining is the core.

Key words: power transformer; dissolved gas analysis; on-line monitoring and diagnosis

西门子全球第 100 个 IEC 61850 项目 ——南桥 500 kV 变电站自动化系统顺利投入运行

本刊讯 2006 年 3 月 30 日, 新南桥变电站正式运行新闻发布会暨技术介绍会在美丽的黄浦江畔召开, 西门子输配电集团、华东电网公司、西门子电力自动化有限公司以及南桥变电站负责人出席会议, 十几家行业内媒体记者参加了会议。会议详细介绍了该项目的实施细节, 专家讲解了基于 IEC 61850 通讯规约的电站自动化系统。

西门子全球的第 100 个 IEC 61850 工程——位于上海西南郊区的南桥 500 kV 变电站自动化系统已于 2005 年顺利投入运行。2004 年 11 月, 西门子输配电集团(PTD)在瑞士承建了世界上第一个运用 IEC 61850 通讯规约的电站自动化系统。短短的时间内, 100 个工程投入运行, 再次凸显 IEC 61850 标准在电力高科技领域的“蓝海市场”。

南桥 500 kV 变电站隶属于华东电网有限公司, 葛南线是中国第一条长距离(全长 1000 km)、大容量、高压直流输电线路, 目前承担了葛洲坝向华东地区输电的任务。在南桥变电站工程中, 西门子使用的产品为 SICAM PAS 变电站自动化系统和 SIPROTEC 4 间隔控制单元。灵活的软硬件模块化设计使得 SICAM PAS 满足了从小型工业系统到高压、超高压级别的应用。设备间的通讯基于 IEC 61850 规约的 100 Mbit/s 冗余光纤以太环网实现, 减少了系统设备的响应时间, 组态更加简便。在中国, 西门子首次在间隔控制单元中使用了内置、可更换的符合 IEC 61850 规约的光以太环网交换机, 并可实现冗余切换功能, 此设置简化了设备连线从而增强了系统的可靠性, 该项目是目前唯一在变电站中使用内置光交换机的工程。

西门子旨在以南桥变电站为典范, 借助行业媒体的力量, 引领国内市场高度重视 IEC 61850 标准的发展与研究。为支持中国重大电力装备国产化, 西门子与中国电力企业共同合作, 通过技术嫁接, 把最先进的技术和全球最佳的业务实践带到中国。凭借不断创新的领先技术和对中国本地市场的深入了解, 西门子有信心和实力成为中国电力行业的可靠合作伙伴。

南桥变电站的顺利运行再次体现了西门子坚持把最先进技术和全球最佳业务实践带到中国的长期承诺。

(濮群方)