

红沿河核电厂主变在线色谱分析装置选用与评价

陈良甲¹ 郭新刚¹ 徐光亮¹ 田海松²

(1. 辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116319;
2. 中科华核电技术研究院有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要 电力变压器在核动力发电厂可以被视为机组连接外电源(500kV电网)的“咽喉”, 它承担着同电网之间传输电能的重要任务。在核电机组运行期间, 如出现主变不可用的情况, 机组将被迫停堆, 由此可见主变其重要性。而目前变压器油样分析在业内被视作反映变压器内部健康状况的“晴雨表”, 通过对油中气体含量进行取样分析, 可以预判变压器内部是否出现局部放电、电流冲击、甚至短路等故障。而油色谱在线监测装置具有实时、快速、准确对油样气体含量进行分析的作用, 采样周期比人工采样明显缩短, 因此也为业界广为应用。

关键词: 主变; 油色谱; 在线监测

Selection and Evaluation for Hongyanhe Nuclear Power Plant Main Transformer Oil Chromatogram Multi-gas Online Monitoring Device

Chen Liangjia¹ Guo Xin'gang¹ Xu Guangliang¹ Tian Haisong²

(1. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd, Dalian, Liaoning 116319;
2. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518124)

Abstract In nuclear power plant, the main transformer works as the throat which can connect power grid with the plant and transmit power. In the event of main transformer is not available during the nuclear power plant unit operation, the reactor of the unit has to shut down. Thus we can see the importance of the main transformer. Besides, the gas analysis for the transformer at present is seen as the barometer that can reflect the health condition for transformer. Via the analysis of gas dissolved in the oil, we can predict whether the transformer internal fault occurs, such as partial discharge, current shock, even a short circuit. The oil chromatogram multi-gas on-line monitoring device can real-time, rapidly and accurately analyze gas content of the oil sample, and the sampling period is shorter than manual sampling, therefore widely used in the electrical power industry.

Keywords: main transformer; oil chromatogram; on-line monitoring

目前广泛用于检测故油中溶解气体分析(DGA)是检测、分析变压器潜伏性故障广泛应用的常规方法。传统的人工取样操作程序及试验环节多、操作手续繁琐、检测周期长。近年来, 油中气体在线监测装置的应用规模不断扩大, 从对氢气或可燃混合气体浓度监测到多达7~8单独特征气体的浓度监测。常见的产品可分为3类, 即燃料电池型、气相色谱型及光声光谱型。本文主要针对光声光谱型在线监测设备的实际测试数据和人工取样数据进行详

细比对, 给出此类技术的综合评价。

1 背景简介

1.1 红沿河核电厂主变压器在线监测装置配置情况

红沿河4台机组主变压器在安装阶段时均未配套安装油色谱在线监测设备, 考虑当时在线监测技术不成熟, 产品可靠性差, 故暂未安装此类设备, 但在主变本体预留了接口。

1.2 关于核能协会评估的建议

2011年世界核电营运者协会(WANO)在对1#机组评估时提出：红沿河主变未安装气体在线监测装置，无法实时对变压器油溶解气体含量进行监测，建议针对带载变压器选择加装色谱在线监测装置，建立变压器的故障预警机制。

2 新增在线监测装置的必要性论述

根据GB/T 7595—2000^[1]对色谱分析周期要求：“运行中的330kV及以上变压器和电抗器为3个月”；对于特征气体浓度规定为“运行设备的油中H₂与烃类气体含量超过下列任何一项值时应引起注意：总烃含量大于150μL/L；H₂含量大于150μL/L；

C₂H₂含量大于5μL/L；(500kV变压器为1μL/L)”。人工取样周期间隔及分析时间较长，而变压器内部局部放电演变为击穿短路事故往往时间较快，在线监测装置的作用可以弥补中间这段空档期，从这点考虑增设在线监测装置非常有必要。

红沿河电厂周边电站如东北高岭换流站(东北电网和华北电网的连接枢纽)，相继装设了十多台变压器油色谱在线监测装置。国家电网公司颁布的企业标准Q/GDW 534—2010《变电设备在线监测系统技术导则》^[2]中，对500kV油浸式变压器也提出配置油中溶解气体在线监测装置要求。

中广核其他基地变压器加装的在线监测装置产品多样、可靠性也大相径庭，见表1。

表1 各核电厂油色谱在线监测装置使用反馈

电站	设备	设备类型	经验反馈
宁德核电站	1#、2#机组主变/厂变	深圳奥特迅(燃料电池型)	2013年9月10月1#机组主变C相误报警，更换监测装置探头和主板；2014年1月1#机组厂变B误报警；6月厂变A误报警；6/8月2#主变B相均有误报警，更换主板
阳江核电站	1#、2#机组主变/厂变	上海思源(燃料电池型)	1#厂变有1次误发C ₂ H ₂ 微量，随后取油样正常；通道频繁出现故障，后台机多次经常出现蓝屏
防城港核电站	1#机组的主变/厂变	SEVERON(气相色谱法)	在主变倒送电合闸冲击试验时出现报警，人工取样分析发现数据正常，属于误报
岭澳核电站	1#机组主变B、C两相	宁波理工MGA2000-6型(气相色谱法)	C相出现过功率驱动器损坏、载气减压器损坏、气路微漏、油泵电源模块烧坏；B相的在线监测装置出现过温控模块损坏等问题。目前已拆除此套装置
	3#、4#机组主变	深圳奥特迅(燃料电池法)	多次出现主变厂变气体含量高，监视器故障的误报警，监测数据与人工取样分析数据的吻合度较差，目前还在线使用
大亚湾核电站	2#机组主变C相	GE凯尔曼(光声光谱法)	2013年4月投用，2014年9月份出现电源模块烧毁情况

3 设备选型方案

3.1 方案一光声光谱型在线监测装置

工作原理：光声光谱技术是基于光声效应，即气体分子吸收特定波长的电磁辐射(红外光)所产生的效应。在此过程中，气体分子吸收经过调制的特定波长红外辐射而被激发到高能态，鉴于高能态极不稳定，分子随即以无辐射跃迁形式将吸收的光能变为热能而回到基态，宏观上表现为压力的变化，即产生声波。由于声波的频率与光源调制频率相同，而其强度则与吸收气体的浓度有关，因此，建立气体浓度与声波强度的定量关系，就可以准确检测出混合气体中各类气体的浓度。其具体实现原理如图1所示。

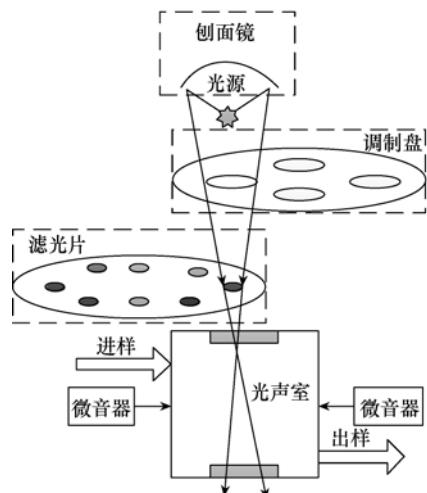


图1 光声光谱原理图

主要设备由设备主体（就地检测箱）、油路、通信线路、后台监测系统三部分组成。

主要性能及指标：设备可提供油中 8 种溶解故障气体 (H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 O_2 、 CO 、 CO_2) 和微水的含量及趋势变化，测量频率可调，最短取样周期是每小时 1 次。

3.2 方案二气相色谱型在线监测装置

工作原理：利用油泵、气泵将油气分离，利用载气带动气体样品定时传送至色谱柱进行分离，经分离后的气体通过检测器检测作用，转换成电信号，通过 A/D 转换获得气体组分的色谱出峰图，根据组分峰高或面积进行浓度定量分析。这种原理是目前人工分析（实验室）做法应用到在线设备上，但两者最大区别在于实验室条件远优于在线设备。

主要设备：整套系统如图 2 所示，核心元器件包括就地检测箱、油管、载气瓶、后台机。

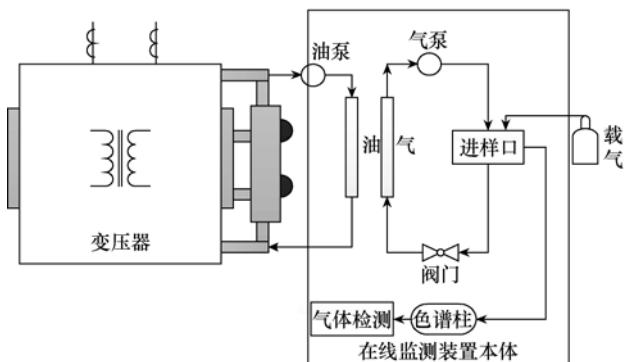


图 2 气相色谱型设备安装简图

3.3 方案三燃料电池型在线监测装置

工作原理：变压器油中气体透过复合式油气分离膜进入传感器内，在气体检测电极上氧化产生电信号，电信号通过信号输出端（即电接头）进入数据采集系统，经过数据处理，形成最终监测结果。

主要设备：包括就地通信控制箱、信号变送器、后台机。其中，气体传感器是信号变送器的核心部分，其一端为探头部分，通过标准锥螺纹接头，可通过过渡法兰盘与变压器阀门连接。

主要性能及指标：可检测绝缘油中 H_2 、 CO 、 C_2H_2 和 C_2H_4 的复合浓度，测量精度为氢气±10% 读数或±20μL/L 取最大值。

3.4 方案综合比较

由于方案一采用技术最为先进，且使用过程不需要耗材，测量精度三者最高；且根据调研的各核电厂、周边电站使用情况反馈，光声光谱型设备可靠性在三类设备中最高；因此，本技术优化方案最

终选取光声光谱型在线监测装置。

4 设备功能评价

红沿河 1#机组主变油色谱在线监测于 2014 年 4 月 11 日投入使用，2#、4#机组分别于 2015 年 1 月及 12 月份完成加装，至今设备投运正常。下面选取 1#机组为例，对设备使用效果进行如下评价。

4.1 设备功能

1) 气体浓度趋势跟踪功能。利用装置中存储器和分析软件，将以往监测数据加以处理，并描绘出较长时间段内某气体的浓度趋势，通过趋势跟踪不仅可以进行事故前预警，还为事故后提供宝贵的数据分析。光声光谱型在线监测装置可以在后台机调取产气速率值，且支持产气速率阈值（注意值）设置功能，产气速率超出阈值时装置会发出报警；阈值详见 GB/T 7252—2001^[3]标准表格 9 所列，超出阈值后应及时进行人工检测，并缩短人工采样周期，可按每周取一次样进行比对。

2) 特定气体浓度异常预警功能。可用于特定气体（如 C_2H_2 、总烃含量）数值的监测及预警，但数据仅供参考最终以人工取样为准。GB/T 7252—2001 对在线监测装置做了如下规定：“所有的在线监测仪在出现声光报警时，都必须由实验室的气相色谱仪分析其组分和含量，再进行进一步判断。”

4.2 设备使用考核

1) 测量误差考核

为了评估在线监测设备的数据准确性，对在线设备采样和人工采样结果进行了比对，即在两者的取样时段相同，且油样分析时间前后不超出 2h 条件下；先后 13 次对在线监测数据及人工取样数据进行比对，并根据如下过程进行了详细计算。

(1) 电力行业标准 DL/T 722^[4]规定的：“在线与手工分析结果差值不大于其平均值的 30%”。

(2) 国家电网企业标准 Q/GDW 540.2—2010^[5]规定的：“测量误差 = $\frac{\text{在线数值} - \text{实验室数值}}{\text{实验室数值}} \times 100\%$ ”，

最低检测限值或±30%，测量误差取两者最大值”。

例，以 2014 年 12 月取样为例，选取 H_2 作简要计算说明如下。

按照规定 (1) 计算公式为：误差 = 按照此公式计算出来的误差结果为 $-38.341/-22.897/-8.334$ ，不大于±0.3 的结果视为合格，因此 A 相不合格，B、C 相均合格。

按照规定(2)先将在线监测数值和实验室数值做差值,A、B、C三相两者差值分别为:-18.802、-9.582、-3.467。

Q/GDW 540.2—2010给定的氢气最低检测限值为 2.0×10^{-6} ,小于实验室分析的30%,测量误差不能

选最低检测限值,而是选取 $\leq \pm 30\%$ 作为合格标准。

根据给定公式,可直接算出A、B、C三相误差分别为-32.173%、-20.545%、-8.005%,计算结果得出A相数值超出标准,B、C相符合误差要求,计算结果汇总详见表2。

表2 H₂测量误差计算表

取样日期	项目	H ₂		
		A相	B相	C相
2014/12/1	在线分析数据	39.638	37.058	39.843
	实验室分析数据	58.440	46.640	43.310
	在线-手动分析结果相差值	-18.802	-9.582	-3.467
	各分析气体的检测限值		2.000	
	实验室分析结果的30%	17.532	13.992	12.993
	DL 722偏差(要求 $\leq 30\%$)	-38.341%	-22.897%	-8.339%
	Q/GDW误差(要求 $\leq 30\%$)	-32.173%	-20.545%	-8.005%

说明:当1)、2)两个标准出现不一致时,优先以电力行业标准为最高标准。

2) 特定气体浓度预警功能考核

使用过程中发现A、C两相在2014年6、7月份C₂H₂出现数据虚高(多次超出 1×10^{-6})的情况,人工分析均未检出C₂H₂气体;而后厂家到厂进行标定,修改参数后数值恢复正常,C₂H₂气体趋势平稳,表格3是从4月至7月之间出现C₂H₂气体浓度超出注意值的次数及比例。

表3 C₂H₂浓度超 1×10^{-6} 次数统计表

设备名称	C ₂ H ₂ 浓度 $>1 \times 10^{-6}$ /次	历史监测记录/次	C ₂ H ₂ $>1 \times 10^{-6}$ 比例
主变A相	29	214	13.6%
主变B相	7	203	3.4%
主变C相	16	207	7.7%

A、C两相C₂H₂超出注意值的原因有如下几方面。

1)根据使用经验发现气体浓度检测关键元器件(探头)受运行环境条件影响较大,尤其是环境温度;而设备在出厂前厂家根据实验室数据标定设备,运抵红沿河后环境温度差异很大,因此测量数值出现偏差,厂家2014年7月根据红沿河现场条件对设备标定后超标现象消除。

2)在线监测设备对C₂H₂的最小测量限制为0.5pmm,且监测设备的精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ (允许偏差值),当设备检测值时 0.5×10^{-6} 以下时无参考意义,当设备检测值超出 1×10^{-6} 时,真实值可能只有 0.5×10^{-6} 。因此,按照国标要求设定为 1×10^{-6} 作为关注值时容易出现所谓的“误报”。2015年4月份

2#机组A相在线检查检出C₂H₂值为 0.6×10^{-6} ,人工取样未检出,在误差范围内出现的偏差,但未出现超出注意值。

3)在线设备针对特定气体的预警功能不能作为系统常规的报警功能,尤其是针对C₂H₂的报警功能;根据IEC 60599(A.1.4 Typical concentration values)^[6]对国外25个电网近20000台变压器的运行经验涉及到的油中溶解气体浓度提出的参考值;其中,未配置有载调压的变压器C₂H₂参考值为2~20,远高于国内的 1×10^{-6} 。

另外,据厂家反馈,在线监测装置在国外仅用于趋势跟踪,不作为特定气体数值监测及报警;而在国内,更多厂家则趋向于利用其作为特定气体浓度预警功能。

5 结论

根据13次的测量数据计算结果以及特定气体浓度出现虚高情况分析,可以得出如下结论:

1)H₂、CH₄、CO、CO₂、总烃的吻合度较好,C₂H₄、C₂H₆数值趋势无规律,吻合度较差。

2)所有气体中基数较大的气体误差较小,基数较小的气体误差较大,如H₂、CH₄、CO、CO₂基数较大,通过表4可以看出,超出30%误差的为少数;C₂H₄、C₂H₆基数较小其误差超出范围的居多。

3)而对于C₂H₂,人工未检出,在线监测虽然检出有数值(GB/T 7252—2001规定实验室色谱仪

表4 各气体误差一览表

日期/设备		H ₂ 偏差/%	CO 偏差/%	CH ₄ 偏差/%	CO ₂ 偏差/%	C ₂ H ₄ 偏差/%	C ₂ H ₆ 偏差/%	C ₂ H ₂ 偏差/%
2014/12/1	A 相	38.34	15.06	40.59	2.47	147.03	65.43	
	B 相	22.90	12.55	16.36	10.97	25.66	59.14	
	C 相	8.34	4.85	10.85	2.22	111.17	107.81	
2014/11/10	A 相	41.22	22.46	24.84	1.65	88.63	85.99	
	B 相	2.73	18.68	24.23	6.92	49.71	63.22	
	C 相	7.78	10.44	16.67	8.96	11.76	136.37	
2014/8/11	A 相	51.04	33.51	49.40	10.57	200.00	86.74	
	B 相	34.72	24.01	36.95	11.77	200.00	86.02	
	C 相	24.00	13.60	80.58	2.15	144.95	138.46	
2014/6/20	A 相	51.45	31.20	54.5	112.60	126.50	58.80	
	B 相	36.70	30.60	43.10	12.50	103.00	39.10	
	C 相	26.40	5.26	112.6	15.90	120.00	128.20	
2014/5/15	A 相	39.77	28.00	25.40	84.80	52.30	44.20	
	B 相	13.40	15.30	26.60	9.00	77.50	22.76	
	C 相	3.39	11.10	84.80	5.40	57.30	125.30	
2014/4/14	A 相	22.31	26.70	40.90	11.30	64.90	41.40	
	B 相	11.20	13.90	18.20	4.50	34.30	26.70	
	C 相	33.66	61.34	19.40	8.57	—	37.20	

人工未分析到无法比对

最小检测限值为 0.1×10^{-6} ，在线监测设备则为 0.5×10^{-6} ，但都小于 1×10^{-6} ，如果在线设备以 1×10^{-6} 作为预警值，可靠性就很低。

4) 在线监测设备需要根据人工采样数据定期进行标定及校准，建议是1年一次。

5) 在线监测设备的趋势跟踪功能满足使用要求，而特定气体预警功能则仅供参考，不建议引入系统作为报警信号。

参考文献

- [1] GB/T 7595—2000. 运行中变压器油质量标准[S].
- [2] Q/GDW 534—2010. 变电设备在线监测系统技术导则[S].

(上接第123页)

参考文献

- [1] 石秋洁. 变频器应用基础[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
- [2] 袁勇. 变频器技术应用与实践(三菱西门子)[M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2012.
- [3] 索楠，马春燕，李永刚. 基于PLC的矿井提升机控制系统的设计[J]. 机械工程与自动化，2012, 4(2): 139-140.
- [4] 呼成林. 矿井提升机控制系统的设计[J]. 实用技术，2012, 21(10): 46-47.

- [3] GB/T 7252—2001. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [4] DL/T 722—2000. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [5] Q/GDW 540.2—2010. 变电设备在线监测装置检验规范 第2部分：变压器油中溶解气体在线监测装置[S].
- [6] IEC 60599. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis[S].

作者简介

陈良甲（1985-），男，海南海口人，大学本科，工程师，主要从事核电领域电气系统技术改进工作。

- [5] 宋运富. 提升机自动控制变频节能改造实践[J]. 机电与自动控制, 2012, 33(11): 46-47.
- [6] 温占军，李新，景会成，等. 基于PLC的铁矿提升机控制系统的设计[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 78-81.
- [7] 陈良. 浅谈PLC控制技术在矿井提升中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(8): 17-17.

作者简介

杨怀林（1967-），男，江苏财经职业技术学院副教授，研究方向为电气自动化技术。