

# 开关设备中 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测的应用

颜湘莲, 王承玉, 季严松, 郭媛媛

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Application of Decomposition Products Detection of SF<sub>6</sub> in Switchgears

YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, GUO Yuanyuan

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Field experiences show that the fault diagnosis and state estimation of internal insulation of power equipment by detecting the decomposition products of SF<sub>6</sub> in switchgears possess the advantages such as high anti-interference ability and high sensitivity and so on, so they are widely utilized in field detection and analysis of internal insulation of equipment. By means of analyzing the gas detection theory for SF<sub>6</sub> in switchgears and under the guidance of detection technology for decomposition products of SF<sub>6</sub>, the detection and result analysis on decomposition products of SF<sub>6</sub> in equipment being operated, faulty equipment, the post-type-test equipment are performed, then the gas compositions of SF<sub>6</sub> and their contents in equipment in different states are determined. Based on field detection results of decomposition products of SF<sub>6</sub> in lots of equipment, the characteristic gas to characterize the feature of the fault occurred in SF<sub>6</sub> gas-insulated equipment as well as its application prospect are pointed out.

**KEY WORDS:** switchgears; SF<sub>6</sub> gas detection; decomposition products; fault diagnosis; characteristic gas

**摘要:** 运行经验表明, 通过检测开关设备中 SF<sub>6</sub> 气体分解产物对设备内部绝缘进行故障诊断和状态评估, 具有抗干扰能力强、灵敏度高、优势, 被广泛用于设备现场检测分析。通过分析开关设备的 SF<sub>6</sub> 气体检测理论, 在 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测技术的指导下, 对运行中设备、故障设备和型式试验后设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物进行检测和结果分析, 确定了设备在不同状态下的 SF<sub>6</sub> 气体组分及其含量。基于大量设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物现场检测结果, 指出了 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备故障的特征气体及其在设备故障诊断中的应用前景。

**关键词:** 开关设备; SF<sub>6</sub> 气体检测; 分解产物; 故障诊断; 特征气体

## 0 引言

随着电力工业的发展, SF<sub>6</sub> 开关设备逐渐取代传统的充油设备, 对电力系统的安全稳定和经济运行起到了关键作用<sup>[1]</sup>。由于设备在设计、制造、安

装和运行维护等方面可能存在缺陷, 设备内部发生局部放电甚至电弧放电, 严重威胁电网安全, 因此及时检测出 SF<sub>6</sub> 开关设备内部缺陷, 对保障设备和电网的安全运行具有重要意义。在 SF<sub>6</sub> 开关设备故障诊断的早期阶段, 传统的电气试验方法难以检测到设备的内部绝缘缺陷<sup>[2-4]</sup>。现场运行经验已表明, 通过检测 SF<sub>6</sub> 气体分解产物, 可及时、有效地发现设备内的潜伏性故障, 进行设备故障定位<sup>[5-10]</sup>。

近年来, 我国电力运行单位已大量开展开关设备 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测工作, 福建、广东、陕西和安徽等省电力公司及其科研机构对所属电网的全封闭式组合电器(gas insulated switchgear, GIS)、断路器等 SF<sub>6</sub> 开关设备进行了普测<sup>[11-20]</sup>, 取得了一定的成果, 为设备维护积累了大量的运行数据, 进而对设备的状态检修提供技术指导。但目前 SF<sub>6</sub> 气体检测分析方法在开关设备方面的应用仍处于起步阶段, 有关设备故障的 SF<sub>6</sub> 分解产物特征气体等问题尚未明确, 难以全面实现设备状态评估和检修, 因而需进行更深入的研究, 以实现通过检测 SF<sub>6</sub> 气体分解产物而确定开关设备状态的目的。

本文通过分析 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测理论, 给出了现有规程关于设备运行的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的规定值, 对运行中设备、故障设备和型式试验后设备的气体分解产物进行检测和结果分析, 以确定开关设备在不同状态下的 SF<sub>6</sub> 分解产物组分及其含量, 进而得到可表征设备故障的 SF<sub>6</sub> 分解产物特征气体, 并对 SF<sub>6</sub> 气体检测方法在开关设备故障诊断等方面的应用前景进行展望。

## 1 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测理论

SF<sub>6</sub> 气体在正常条件下化学性质较稳定, 被广泛用作开关设备的绝缘和灭弧介质。SF<sub>6</sub> 开关设备

由于内部绝缘缺陷导致金属对地放电及气体中的导电颗粒杂质引起对地放电时,释放能量较大,表现为电晕、火花或电弧放电。故障区域的 SF<sub>6</sub> 气体、金属触头和固体绝缘材料分解,产生大量的金属氟化物、SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HF 等。在电弧作用下, SF<sub>6</sub> 的稳定生成物主要是 SOF<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>,在火花放电中,还可检测到 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> 和 S<sub>2</sub>OF<sub>10</sub> 等,稳定分解物含量的顺序为 SOF<sub>2</sub>>SOF<sub>4</sub>>SiF<sub>4</sub>>SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>>SO<sub>2</sub>,电晕放电的主要产物为 SO<sub>2</sub> 和 HF, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/SOF<sub>2</sub> 比值比火花放电的比值高。

开关设备发生气隙局部放电故障的能量较小,放电量约为 11 500 pC,通常会使得 SF<sub>6</sub> 气体分解产生微量的 SO<sub>2</sub>、HF 和 H<sub>2</sub>S 等组分。因导电杆的连接接触不良,导体接触电阻增大,导致故障点温度过高,当温度超过 500℃,设备内的 SF<sub>6</sub> 气体发生分解,温度达到 600℃时,金属导电杆开始熔化,并引起支撑绝缘子材料分解。试验表明,固体绝缘材料在高电压、温度高于 190℃时会与 SF<sub>6</sub> 气体发生反应,温度更高时绝缘材料甚至直接分解。此类故障主要生成 SO<sub>2</sub>、HF、H<sub>2</sub>S 和氟化硫酰等分解产物,设备发生内部故障时, SF<sub>6</sub> 气体分解产物还有 CF<sub>4</sub>、SF<sub>4</sub> 和 SOF<sub>2</sub> 等物质,由于气室中存在水分和氧气,这些物质会再次反应生成稳定的 SO<sub>2</sub> 和 HF 等。

因此,在放电和热分解过程中<sup>[21]</sup>,在水分的作用下, SF<sub>6</sub> 气体分解产物主要为 SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、HF 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>,当故障涉及固体绝缘材料时,还会产生 CF<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、CO 和 CO<sub>2</sub>。此外,实验室研究结果表明,在裸金属局部放电或电晕放电情形下,产生少量 H<sub>2</sub>S,当故障电流大于 8 kA(电极为 Cu 材料)时,能检测到较大含量的 H<sub>2</sub>S 组分,可见, H<sub>2</sub>S 含量与裸金属放电能量有关。

GB 8905—1996《六氟化硫电气设备中气体管理和检测守则》<sup>[22]</sup>推荐便携式气相色谱仪、气体检测管和电化学传感器检测仪器为 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的现场分析有效设备。IEC 60480—2004<sup>[23]</sup>规定,重复使用的 SF<sub>6</sub> 气体中杂质最大允许含量为 50 μL/L,其中 SO<sub>2</sub>+SOF<sub>2</sub> 为 12 μL/L, HF 为 25 μL/L。本文在现有标准和规程指导下,对开关设备在不同状态下的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物进行检测和分析。

## 2 开关设备的 SF<sub>6</sub> 气体检测

### 2.1 检测方法

基于 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测理论,对运行中设备、故障设备和型式试验后设备进行了 SF<sub>6</sub> 分解产

物 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 HF 等组分的检测,分析设备内部绝缘状况<sup>[24]</sup>,统计设备运行状态与气体分解产物的关系。

### 2.2 运行中设备的分解产物检测

为掌握 SF<sub>6</sub> 开关设备运行状态,中国电力科学研究院和各网、省电力公司及其研究机构等应用 SF<sub>6</sub> 气体检测方法,对 110 kV 及以上电压等级的运行设备已逐步开展 SF<sub>6</sub> 气体分解产物普测工作,取得了一定的应用效果,为及时消除设备运行隐患和潜伏性故障提供了依据和指导。

以某换流站的运行中交流开关设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测为例,用气体检测管先粗测气体分解产物 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 HF 组分的含量,均未检测到 H<sub>2</sub>S 和 HF 组分, SO<sub>2</sub> 组分含量较小,进而采用具备电化学传感器的便携式检测仪器确定 SO<sub>2</sub>+SOF<sub>2</sub> 气体组分的总含量,检测结果如表 1 所示。

表 1 运行中设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测结果  
Tab. 1 Measurement results of SF<sub>6</sub> decomposition products in working equipment

设备名称	气室编号	(SO <sub>2</sub> +SOF <sub>2</sub> )含量/(μL/L)
SF <sub>6</sub> 断路器	5031 A 相*	0
	5031 B 相	1
	5031 C 相	1
SF <sub>6</sub> 隔离开关	51521 A 相	1
	51522 A 相	1
	51521 B 相	1
	51522 B 相	1
	51521 C 相	1
	51522 C 相	1

注: \*5031A 相断路器气室因出现泄露,2006 年已置换气体。

分析表 1 的检测结果表明,正常运行设备气室含有的 SO<sub>2</sub> 气体组分较小(≤1 μL/L),且未检测到 H<sub>2</sub>S 和 HF 气体组分。断路器或隔离开关等气体绝缘设备进行正常的分合操作时,灭弧室会产生一定的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物,如 SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 等,由于设备内装有吸附剂(主要用于吸附 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S),经过一段时间后,大部分气体分解产物被吸附,使 SF<sub>6</sub> 气体绝缘强度及时恢复,确保设备的安全运行。

### 2.3 故障设备的分解产物检测

若 SF<sub>6</sub> 开关设备发生故障,产生的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物组分复杂,其中 SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 等组分含量较高,往往超出了电化学传感器检测仪器的量程范围,可先用气体检测管对故障气体进行定性检测,初步界定故障气体的成分及其含量,进一步用便携式气相色谱仪精确分析气体中的空气、CF<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等组分含量。

1) 某换流站完成江复线年度检修后,500 kV

交流场 GIS 设备 5152 断路器各项试验合格, 操作 5152 断路器进行合环运行时, 51521 隔离开关合闸正常, 对 51522 隔离开关进行合闸操作时, 三江 II 线和江复线的线路保护动作, 造成三江 II 线和江复线停运。

根据事故现象, 初步判断 5152 断路器发生了故障, 采用检测管和便携式气相色谱仪对相关气室进行了分解产物检测, 结果列于表 2, 其中 A 相气室的 CF<sub>4</sub> 和 SO<sub>2</sub> 含量严重超标, 推断该设备内部发生电弧放电故障。

表 2 某换流站 5152 A 相断路器检测结果

Tab. 2 Detection results of SF<sub>6</sub> decomposition products in 5152 phase A breaker in converter station

气体组分	含量/( $\mu\text{L/L}$ )	现有规程的参考值
CF <sub>4</sub>	4 264	GB8905—1996: $\leq 1\ 000\ \mu\text{L/L}$
SO <sub>2</sub>	10 000	IEC 60480—2004: $\leq 2\ \mu\text{L/L}$
H <sub>2</sub> S	>1 600	—

对故障 GIS 断路器进行了开盖检查, 发现 GIS 内部散落着合闸电阻碎块及大量的白色粉末分解物, 5 152 A 相断路器确实发生了严重的电弧放电现象, 其合闸电阻已被损坏, 验证了 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的检测结果。

2) 某变电站在正常操作时, 先后 2 次发生 500 kV I 母的母亲差保护动作, 初步诊断 5032 B 相和 5051 B 相断路器出现绝缘性放电故障。用气体检测管对 5051 断路器气室进行了 SO<sub>2</sub>、HF 和 H<sub>2</sub>S 组分检测, 如表 3 所示, 5051 B 相断路器 SF<sub>6</sub> 气体分解产物也严重超出 IEC 60480—2004 规定的设备正常运行的规定值<sup>[23]</sup>。

表 3 某变电站 5051 断路器检测结果

Tab. 3 Detection results of SF<sub>6</sub> decomposition products in 5051 breaker in station

气室编号	SO <sub>2</sub> 含量/( $\mu\text{L/L}$ )	HF 含量/( $\mu\text{L/L}$ )	H <sub>2</sub> S 含量/( $\mu\text{L/L}$ )
5051 A 相	0	0	0
5051 B 相	>1 500	>900	>200
5051 C 相	0	0	0

对该设备进行现场解体检修, 发现 5032 B 相罐体内端部均压罩与外壳间发生击穿, 放电痕迹位于罐体的下部, 5051 B 相第 4 串合闸电阻炸碎, 残块散落在罐体底部, 合闸电阻端部均压罩存在明显的电弧放电痕迹, 5051 A、C 相断路器未见异常, 解体所呈现的故障现象与分解产物检测结果相符。

#### 2.4 型式试验后设备的分解产物检测

对开关设备进行型式试验, 主要目的是检验设备操动机构及其辅助设备的动作性能, 考核开关设备的极限状态。国家高压电器质量监督检验中心(西

安高压电器研究所)和机械工业高压电器产品质量检测中心(沈阳)是进行开关型式试验的两个大功率试验站, 型式试验项目有 10%额定短路开断电流(T10)、30%额定短路开断电流(T30)、60%额定短路开断电流(T60)、对称条件下 100%额定短路开断电流(T100s)、非对称条件下 100%额定短路开断电流(T100a)试验和关合试验、电寿命试验、近区故障和切空载架空长线试验等方式。

开关设备进行型式试验后, 气室中会产生大量 SF<sub>6</sub> 气体分解产物, 一般用气体检测管和气相色谱仪对型式试验前后设备的气体成分进行检测分析。以在 2 大试验站进行的断路器试验为例, 对型式试验后开关设备的 SF<sub>6</sub> 分解产物进行了现场检测和实验室分析。

##### 1) 现场检测。

在西安高压电器研究所对 LW 25—252 kV 型断路器进行 100%额定短路开断电流 20 次电寿命试验后, 采用便携式色谱仪和气体检测管对试品的气体成分进行了检测, 结果如表 4 所示。

表 4 252 kV 断路器检测结果

Tab. 4 Detection results of 252 kV breaker

检测项目	SF <sub>6</sub>	微水	空气	CF <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	HF	未知物
	纯度/ %	含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	含量/ ( $\mu\text{L/L}$ )	含量/ %
测试数据	99.282 6	651	3 478	5 066	11 550	10 000	0.342 8

注: 环境条件(温度 15.3℃, 湿度 61.6%)。

分析表 4 中的结果可知, 型式试验后设备 SF<sub>6</sub> 气体的空气、CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub> 和 HF 含量都较高, 其中空气中的氧来源主要有: 固体绝缘部件(环氧树脂), SF<sub>6</sub> 气体中的水分(影响较小), 弧触头烧损也会产生约几百  $\mu\text{L/L}$  的含氧量。

在机械工业高压电器产品质量检测中心(沈阳)对 40.5 kV/40 kA 型断路器进行型式试验, 其中 A 相未经试验, B 相进行 4 次异相接地条件下的 T60 短路开断试验, 开断电流为 34.8 kA, C 相的试验为 T100s 下的电寿命 20 次, 现场检测结果见表 5。

表 5 40.5 kV 断路器检测结果

Tab. 5 Detection results of 40.5 kV breaker

设备名称	SO <sub>2</sub> 含量/( $\mu\text{L/L}$ )	HF 含量/( $\mu\text{L/L}$ )	H <sub>2</sub> S 含量/( $\mu\text{L/L}$ )
A 相	5	12	0
SF <sub>6</sub> 断路器 B 相	1 800	90	0
C 相	1 800	120	0

由表 5 可见, 与未试验设备相比, 型式试验后的设备气室产生了大量的 SO<sub>2</sub> 和 HF 组分, 严重超出 IEC 60480—2004 的规定值, 未检测到 H<sub>2</sub>S 组分, 未经试验的 A 相断路器的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物含量满

足现有标准的要求。

## 2) 实验室分析。

对 SF<sub>6</sub> 气体进行实验室分析的仪器为色谱-质谱联用仪,可精确定量地分析型式试验后设备的现场取样气体,检测了 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub> 和 S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub> 等分解产物组分,分析结果列于表 6,同时也给出了某换流站故障设备 5152 A 相断路器气体的实验室测试数据,稍小于表 2 中的结果。表 6 中的结果已表明,型式试验后设备的 SO<sub>2</sub> 含量和杂质总量都严重超标,已造成开关设备绝缘不可恢复。

表 6 型式试验后设备气体成分的实验室分析结果  
Tab. 6 Measurement results of SF<sub>6</sub> decomposition products from equipment after tests in laboratory

断路器试品	CF <sub>4</sub> 含量/ (μL/L)	SO <sub>2</sub> 含量/ (μL/L)	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 含量/ (μL/L)	SOF <sub>4</sub> 含量/ (μL/L)	S <sub>2</sub> O <sub>2</sub> F <sub>10</sub> 含量/ (μL/L)	杂质 总量/ (μL/L)
126 kV/40 kA 断路器 (切长线 72 次)	53.70	975.00	2.65	40.40	14.70	1 086.45
252 kV/50 kA 断路器 (T100s 下 20 次电寿命 试验) <sup>#</sup>	877.00	20 100.00	2.31	2.29	134.00	21 115.60
252 kV/50 kA 断路器 (T60 试验)	70.70	29 238.00	11.00	8.55	533.00	29 861.25
363 kV/40 kA 断路器 (切长线 32 次)	63.10	1 993.00	3.68	38.80	0.00	2 098.58
420 kV/63 kA 断路器 (T100a 试验)	188.00	5 493.00	1.67	28.20	0.00	5 522.87
252 kV/50 kA 断路器 (T100s、T100a 试验)	2 980.00	41 500.00	0.00	5.30	5.22	44 490.52
252 kV/50 kA 断路器 (T100s 下 20 次电寿命 试验) <sup>*</sup>	50.00	56 057.00	316.00	117.00	424.00	56 964.00
420 kV/50 kA 断路器 (切长线 96 次和 T100s 试验)	2 020.00	25 784.00	10.40	40.90	1.50	27 856.80
126 kV/40 kA 断路器 (T10、T30、T60 试验)	83.30	4 448.00	0.50	71.30	3.36	4 606.46
某换流站故障设备 5152 A 相断路器	3 158.00	8 654.00	0.50	0.00	0.00	11 812.50

注: 试品#与试品\*的生产厂家不同。

## 3 检测结果分析

### 3.1 分析目标

通过对大量的运行中设备、故障设备和型式试验后设备进行 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测,并统计分析检测结果,确定 SF<sub>6</sub> 开关设备的故障特征气体,展望 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测方法在设备故障诊断方面的应用前景。

### 3.2 设备故障特征气体

基于大量的实验室和现场实测结果,分析设备在不同状态下的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物,确定 SF<sub>6</sub> 气体

成分与开关状态相关的特征参数,指出表征设备故障的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物特征组分。

#### 1) 不同状态下的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物。

在放电作用下, SF<sub>6</sub> 气体的分解生成物主要是 SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、HF 和 H<sub>2</sub>S 等, SF<sub>6</sub> 气体发生热分解的产物有 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 等组分。因此,在放电和热分解过程中,在水分作用下,气体分解产物为 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、HF 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>,当设备故障涉及固体绝缘材料时,还会产生 CF<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S 和 CO 等。

#### 2) SF<sub>6</sub> 气体分解产物的稳定性。

由 SF<sub>6</sub> 气体分解机制可知, SF<sub>6</sub> 开关设备出现内部故障,分解产物主要是 SOF<sub>2</sub> 组分,水解生成 SO<sub>2</sub>。SOF<sub>2</sub> 的化学性质虽比较稳定,但现有分析手段难以准确检测该物质浓度。HF 是强酸性物质,性质活泼,易与其他物质(设备本体材料、绝缘材料、密封材料、吸附材料等)反应生成更稳定的氟化物,因此其含量会随着时间延长而减少。SiF<sub>4</sub> 虽然性质稳定,但其含量与设备的内部材料有较大关系,分析方法较复杂,也不适合现场检测。H<sub>2</sub>S 气体较稳定,可有效揭示设备内部绝缘材料的潜伏性故障。

#### 3) 分解产物的特征组分。

在水分等杂质影响下,由于 HF 具有强酸腐蚀性,会与内部金属再发生反应,使得设备故障后的 HF 含量小甚至检测不到。同时, HF 虽是设备内部故障的特征组分,但因其腐蚀性较强,可能造成检测传感器被深度污染,缩短传感器的使用寿命。根据 SF<sub>6</sub> 设备在不同状态下产生的气体分解产物及不同组分的稳定性、适应性等,推荐现场检测以 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 组分为主。

目前,现场主要用气体检测管和电化学传感器方法检测 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HF 组分的含量。检测管对气体的选择性较好,量程范围宽,可初步确定气体组分含量的范围。电化学传感器具有较好的敏感性和选择性,操作简单,适合现场检测应用。因此在现场检测过程中,将 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HF 气体组分作为判断被测设备是否存在运行隐患或故障的特征分解产物,且根据 H<sub>2</sub>S 含量还可分析故障是否涉及固体绝缘。这 3 种组分不仅检测方便,可快速准确地诊断设备内部缺陷,且应以 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 为主测对象, HF 为辅测对象。

### 3.3 设备故障诊断应用

SF<sub>6</sub> 气体检测分析方法将化学分析法与物理诊断有机结合,应用于 SF<sub>6</sub> 开关设备的故障诊断和状

态评估, 具有灵敏度高、准确性好等优势, 将成为设备运行监测和故障诊断的有效手段。

按照 SF<sub>6</sub> 气体检测理论, 考虑电力系统中设备运行的实际情况, 确定了开关设备在不同状态下的检测方案, 对设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物进行了系统全面的检测, 并取得了良好的应用效果。

#### 1) 运行中设备检测。

采用气体检测管、传感器等现场检测仪器对运行设备中 SF<sub>6</sub> 气体的 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HF 等主要成分含量进行检测和纪录, 可直接、真实地反映开关设备的现场运行状态。

在 2006 年期间, 中国电力科学研究院联合福建和湖北电力试验研究院, 对电压等级为 126~550 kV 的运行中开关设备进行了 SF<sub>6</sub> 气体普测研究, 结果发现: 大量已正常运行二三十年的开关设备中 SF<sub>6</sub> 气体杂质含量较少, SO<sub>2</sub> 为痕量, 其含量一般 ≤ 1 μL/L, 设备解体后发现内部几乎无损伤, 灭弧室、触头等关键部位都完好无损。若开关内部出现异常, 如轻度的放电或发热, 都会体现为 SF<sub>6</sub> 气体分解产物组分及其含量的变化。

#### 2) 故障设备检测。

若设备发生故障引起事故, 应在最短的时间到达事故现场, 利用现场检测仪器对设备的 SF<sub>6</sub> 气体进行测量和分析, 与设备正常运行时相比, SO<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>S 的含量显著增加, 可有效确定故障设备, 或进行设备故障定位。

通过对几次典型事故进行的 SF<sub>6</sub> 气体检测和分析, 结果表明故障设备内部的 SF<sub>6</sub> 气体成分发生了剧烈变化, SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 或 CF<sub>4</sub> 的含量会显著上升, 甚至超出了现有规程给出的规定值。但由于故障类型及其程度不同, 各气体组分的含量存在较大差异, 还难以确定不同故障所对应的气体组分及其含量, 有待进一步的深入研究, 包括模拟试验和实测数据的支持。

#### 3) 型式试验后设备检测。

开关设备在型式试验中不安装吸附剂, 从而能更直观地检测到试验后设备中 SF<sub>6</sub> 气体组分变化, 排除了吸附剂的影响, 获得无吸附剂下气体分解产物的发展趋势, 掌握并判断 SF<sub>6</sub> 开关设备最严酷的运行状态。

采用气体检测管在现场初测试验后设备的 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 HF 含量, 同时结合实验室的色谱-质谱联用仪对 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub> 和 S<sub>2</sub>O<sub>10</sub> 进

行精确测定。分析大量的试验结果得出, 随着试验条件严酷程度的增加, SO<sub>2</sub>、HF 或 CF<sub>4</sub> 等组分的含量呈现显著上升趋势, 可见通过跟踪气体组分含量的变化来评估设备寿命的思路具有可行性, 但仍需进行更系统深入的研究, 以得到设备状态评估的分解产物变化规律。

## 4 结论

1) 在放电作用下, SF<sub>6</sub> 气体的主要分解产物为 SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、HF 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, 若故障涉及固体绝缘, 还会产生 H<sub>2</sub>S、CF<sub>4</sub> 和 CO 等气体组分。

2) 正常运行设备的 SF<sub>6</sub> 气体杂质含量较少, SO<sub>2</sub>+SOF<sub>2</sub> 含量一般不大于 1 μL/L, 对设备绝缘不产生影响。故障设备和型式试验后设备的 SF<sub>6</sub> 气体分解产物含量较大, 远远超过标准规定的正常值。若 SF<sub>6</sub> 气体组分含量不变或上升, 表明设备可能存在运行安全隐患或潜伏性故障。

3) SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 HF 气体组分可作为现场判断被测设备是否存在故障的特征分解产物, 通过 H<sub>2</sub>S 含量分析故障是否涉及固体绝缘, 推荐现场检测以 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 为主测对象, HF 组分为辅测对象。

4) SF<sub>6</sub> 气体检测分析方法在开关设备故障诊断方面具有广泛的应用前景, 跟踪监测 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 或 CF<sub>4</sub> 的含量, 为设备可靠性评估提供技术指导。但需进行更细致深入的研究, 包括模拟试验和实测数据的支持, 应用数理可靠性统计方法, 分析 SF<sub>6</sub> 开关设备与分解产物的关系, 掌握 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的变化趋势和规律, 逐步完善建立设备状态检修系统。

## 致 谢

本文的工作得到了国家电网公司科技项目“气体绝缘设备中 SF<sub>6</sub> 分解气体检测技术与检测规程研究”的资助, 谨此致谢!

## 参考文献

- [1] 罗学琛. SF<sub>6</sub> 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 13-26.
- [2] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] 罗志, 王杰. 高压开关机械故障诊断平台开发[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 1): 134-136.  
Luo Zhi, Wang Jie. Development of mechanical fault analysis and diagnosis platform for HV circuit breaker[J]. Power System Technology, 2007, 31(Supplement 1): 134-136(in Chinese).
- [4] 丁繁荣, 赵学军, 张敏强. 高压电气设备 SF<sub>6</sub> 气体危害及防范措施[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 2): 26-29.

- Ding Fanrong, Zhao Xuejun, Zhang Minqiang. Hazards of SF<sub>6</sub> gas in power equipment on human and environment and preventive measures[J]. Power System Technology, 2007, 31(Supplement 2): 26-29 (in Chinese).
- [5] Piemontesi M, Niemyer L. Sorption of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub> decomposition products by activated alumina and molecular sieve 13X[C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, 1996.
- [6] Suehiro J Y, Zhou G B, Hara M. Detection of partial discharge in SF<sub>6</sub> gas using a carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators, 2005, 105(2): 164-169.
- [7] Beyer C, Jenett H, Klockow D. Influence of reactive SF<sub>x</sub> gases on electrode surfaces after electrical discharges under SF<sub>6</sub> atmosphere [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 234-240.
- [8] 裘吟君, 刘岩, 陈晓琳, 等. SF<sub>6</sub> 气体杂质与潜伏性故障诊断技术研究[J]. 南方电网技术, 2009(3): 67-71.  
Qiu Yinjun, Liu Yan, Chen Xiaolin, et al. Study on SF<sub>6</sub> gas impurities and potential faults diagnosis[J]. Southern Power System Technology, 2009(3): 67-71(in Chinese).
- [9] 王小波, 谢开贵. 计及开关故障的复杂配电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 16-21.  
Wang Xiaobo, Xie Kaigui. Reliability evaluation of complex distribution system taking switch faults into account[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 16-21(in Chinese).
- [10] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 58-61.  
Liu Youwei, Wu Liyuan, Gong Yanpeng. Investigation on SF<sub>6</sub> decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61(in Chinese).
- [11] 游荣文, 黄逸松. 基于 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 含量测试的 SF<sub>6</sub> 电气设备内部故障的诊断[J]. 福建电力与电工, 2004(2): 15-16, 57.  
You Rongwen, Huang Yisong. Diagnosis of internal faults in SF<sub>6</sub> electrical equipments based on measuring SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S[J]. Fujian Electric and Electrician, 2004(2): 15-16, 57(in Chinese).
- [12] 姚唯建, 钟志铿. 气体分析法用于六氟化硫电气设备故障的检测[J]. 广东电力, 1994(2): 21-24.  
Yao Weijian, Zhong Zhijian. Gas analysis method used to detect fault of SF<sub>6</sub> electrical equipment[J]. Guangdong Electric Power, 1994(2): 21-24 (in Chinese).
- [13] 庄贤盛, 李智, 姚唯建, 等. SF<sub>6</sub> 电气设备放电故障检测和判断方法[J]. 广东电力, 2008, 21(12): 35-38, 67.  
Zhuang Xiansheng, Li Zhi, Yao Weijian, et al. Detection and judgment of discharge failures of sulphur hexanuide electrical equipment[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(12): 35-38, 67(in Chinese).
- [14] 黄云光, 朱立平, 王琪. 气体分析在 GIS 网络定位中的应用[J]. 广西电力技术, 2000, 23(4): 33-35, 53.  
Huang Yunguang, Zhu Liping, Wang Qi. Application in locating GIS discharge by gas analysis[J]. Guangxi Electrical Power Technology, 2000, 23(4): 33-35, 53(in Chinese).
- [15] 汪金星, 杨韧, 郑小川. SF<sub>6</sub> 开关设备带电测试新技术在陕西电网的应用[J]. 陕西电力, 2008, 36(11): 15-17.  
Wang Jinxing, Yang Ren, Zheng Xiaochuan. Application of novel live test methods for SF<sub>6</sub> switch equipment to Shaanxi Power Grid [J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(11): 15-17(in Chinese).
- [16] 张仲旗, 连鸿松. 通过检测 SO<sub>2</sub> 发现 SF<sub>6</sub> 电气设备故障[J]. 中国电力, 2001, 34(1): 78-81.  
Zhang Zhongqi, Lian Hongsong. Using SO<sub>2</sub> detection for failure checking of SF<sub>6</sub> electrical equipment[J]. Electric Power, 2001, 34(1): 78-81(in Chinese).
- [17] 刘佳, 朱华, 仝松利, 等. 气体分析技术在 SF<sub>6</sub> 设备内部故障判断中的应用[J]. 河南电力, 2009(1): 32-34, 44.  
Liu Jia, Zhu Hua, Tong Songli, et al. The application of gas analysis technique on line fault judgment of SF<sub>6</sub> equipments[J]. Henan Electric Power, 2009(1): 32-34, 44(in Chinese).
- [18] 蔡巍, 黄韬颖, 李帆. 动态离子分析在 SF<sub>6</sub> 电气绝缘设备诊断中的应用[J]. 华北电力技术, 2006(1): 31-33, 41.  
Cai Wei, Huang Taoying, Li Fan. Application of ion mobility spectrometry technique in diagnosis of gas condition in SF<sub>6</sub> electric insulating equipment[J]. North China Electric Power, 2006(1): 31-33, 41(in Chinese).
- [19] 毕玉修, 卞超. 应用 SF<sub>6</sub> 气体分解物进行电气设备故障诊断的探讨[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(5): 14-17.  
Bi Yuxiu, Bian Chao. Research on electric equipment fault diagnosis applied on SF<sub>6</sub> decomposing gases[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(5): 14-17(in Chinese).
- [20] 袁亮. 高压电器中 SF<sub>6</sub> 气体分解物的检测与研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [21] 秦澍麟. 六氟化硫绝缘的高压电器译文[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008: 1-11.
- [22] 中国电力科学研究院. GB/T 8905—1996 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [23] IEC. IEC 60480—2004 Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment and specification for its re-use[S]. Geneva: IEC, 2004.
- [24] 郭媛媛, 刘汉梅, 王承玉. SF<sub>6</sub> 高压开关设备运行状态与气体成分关系的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.



颜湘莲

收稿日期: 2010-06-30.

作者简介:

颜湘莲(1977), 女, 博士, 工程师, 研究方向为高压开关设备故障诊断和状态检修技术等工作, E-mail: yanxl@epri.sgcc.com.cn;

王承玉(1963), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压开关设备的研制开发、标准制定和设备故障诊断、状态检修技术等工作, E-mail: cywang@epri.sgcc.com.cn;

季严松(1978), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压开关设备的研发、故障诊断和状态检修技术等工作, E-mail: jiys@epri.sgcc.com.cn;

郭媛媛(1980), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为高压开关设备的监造、故障诊断和状态检修技术等工作, E-mail: guoyy@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)