

# 局部放电下 SF<sub>6</sub> 分解组分检测与绝缘缺陷编码识别

唐炬, 陈长杰, 刘帆, 张晓星, 孟庆红

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044)

## Detection of Constituents From SF<sub>6</sub> Decomposition Under Partial Discharge and Recognition of Insulation Defect Coding

TANG Ju, CHEN Changjie, LIU Fan, ZHANG Xiaoxing, MENG Qinghong

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** To recognize the insulation defects inside the totally enclosed gas insulated switchgear (GIS) by the contents of the constituents from decomposed SF<sub>6</sub> gas, it is necessary to establish an association rule between the decomposed gas composition and insulation defects beforehand. Utilizing the established platform for the partial discharge-caused decomposition experiments of SF<sub>6</sub> gas, a lot of partial discharge experiments for four kinds of typical insulation defects were performed, and it was found that under the partial discharge caused by different insulation defects there were obvious differences among the decomposition characteristics of SF<sub>6</sub> gas corresponding to these defects, and the component contents as well as their variation rates follow special law, for this reason a thinking and corresponding approach to recognize insulation defects by coding tree of gas composition contents were proposed. The ratio ranges of three groups of gas composition contents, i.e., SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> and (SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>), are coded, then corresponding ratio coding tree was established and the coding combination to recognize four kinds of insulation defects was attained. For the condition that the composition content coding fell into a cross area, an auxiliary method to finally confirm the basis of coding was given.

**KEY WORDS:** SF<sub>6</sub>; insulation defects; partial discharge; characteristic component; ratio coding

**摘要:** 用 SF<sub>6</sub> 分解气体组分含量大小来识别全封闭式组合电器内的绝缘缺陷, 须先建立分解气体组分与绝缘缺陷之间的关联法则。利用建立的 SF<sub>6</sub> 绝缘气体局部放电分解试验平

不同绝缘缺陷产生的局部放电下, SF<sub>6</sub> 的分解特性存在差异, 对 4 种典型绝缘缺陷进行了大量局部放电试验, 发现在明显差异, 其组分含量及变化率有特定的规律, 为此提出用气体组分含量编码树识别绝缘缺陷的思路和方法, 并对 SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 和(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)3 组气体组分含量比值范围进行了编码, 建立了相应的比值编码树, 得到了识别 4 种绝缘缺陷类型的编码组合, 并针对组分含量编码处于交叉无法确定的情况, 给出了最终确定编码依据的辅助方法。

**关键词:** SF<sub>6</sub>; 绝缘缺陷; 局部放电; 特征组分; 比值编码

## 0 引言

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)气体具有优良的绝缘性能, 作为绝缘介质可大幅减小设备尺寸, 提高绝缘强度, 已在全封闭式组合电器(gas insulated switchgear, GIS)中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。纯净的 SF<sub>6</sub> 气体化学性能稳定, 不易分解, 但在局部放电(partial discharge, PD)、火花放电、电弧放电和过热等因素作用下会分解<sup>[4-8]</sup>, 并生成一些稳定的气态衍生物。通过分析其组分特性来诊断 SF<sub>6</sub> 气体绝缘电气设备的绝缘状态, 已成为本领域研究的热点<sup>[9-11]</sup>。文献[12-14]研究了 SF<sub>6</sub> 在电弧、火花、电晕放电下的分解产物; 文献[15]讨论了电极材料、水分及吸附剂等因素对 SF<sub>6</sub> 气体分解组分的影响; 文献[16-17]报道可通过测试 SF<sub>6</sub> 气体分解产物来判断设备故障。大量研究表明, SF<sub>6</sub> 分解产物与设备不同类型绝缘缺陷引起的 PD 存在某种关联, 然而这种关联关系至今仍在研究中, 用 SF<sub>6</sub> 分解气体组分的含量及变化情况来识别 GIS 内的绝缘缺陷是目前研究的难点。因此, 本文利用建立的试验装置进行 4 种典型绝缘缺陷下的 PD 试验, 通过气相色谱仪对 SF<sub>6</sub> 分解组分含量的定量分析,

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB-724506); 教育部全国优秀博士学位论文作者基金项目(200749)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724506); Project Supported by Foundation for the Authors of National Excellent Doctoral Dissertation of Ministry of Education in China(200749).

提取能表征不同性质 PD 的组分参量, 建立用于绝缘缺陷类型识别的方法, 为最终实现用 SF<sub>6</sub> 分解组分含量诊断 GIS 设备绝缘故障做出了积极的探索。

## 1 SF<sub>6</sub> 局部放电分解试验

### 1.1 绝缘缺陷类型

利用文献[18]构建的 4 种典型绝缘缺陷物理模型: 1) 高压导体突出物缺陷(N 类绝缘缺陷); 2) 自由金属微粒缺陷(P 类绝缘缺陷); 3) 绝缘子金属污染物缺陷(M 类绝缘缺陷); 4) 绝缘子外气隙缺陷(G 类绝缘缺陷), 在一定试验条件下进行 PD 试验, 以获取反映不同绝缘缺陷的 SF<sub>6</sub> 分解组分混和样气。

### 1.2 试验方法与数据获取

试验在 SF<sub>6</sub> 气体电分解装置<sup>[19]</sup>上进行, 接线如图 1 所示, 将 4 种缺陷物理模型分别置入放电室内, 气室充入 0.3 MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体, 逐步升高试验电压至绝缘缺陷模型产生稳定的 PD, 由 50 Ω 无感电阻将 PD 产生的脉冲电流信号转换成相应的脉冲电压, 通过电缆输入到 WavePro 7100XL 数字存储示波器(模拟频带 1 GHz, 采样率 20 GHz, 存储深度 48 MB)进行监测。对每一种绝缘缺陷在持续不变的试验电压下连续进行 96 h 试验, 除纪录 PD 时域信号以外, 每 12 h 采集 1 次 SF<sub>6</sub> 分解气体进行组分定量检测。试验时, 为排除水分含量对试验结果的影响, 试验室温度通过空控制在 20 °C 左右, 湿度通过除湿机控制在相对湿度 50% 左右, 所有试验均在该条件下进行, 以使试验结果具有可比性。

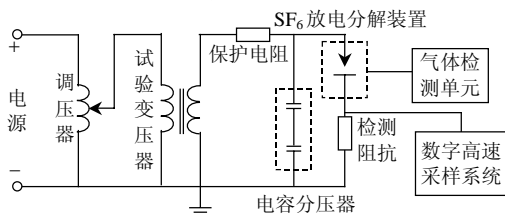


图 1 SF<sub>6</sub> 局部放电分解试验接线

Fig. 1 Circuit-connection of partial discharge in SF<sub>6</sub> test

### 1.3 PD 时域分析

经测试, 试验装置在没有缺陷模型时的固有起始放电电压  $U_g$  为 45 kV, 为保证试验获得的 PD 信号由绝缘缺陷模型所产生, 外施试验电压不得超过该值。按照该要求将所设计的 4 种绝缘缺陷物理模型分别放入 SF<sub>6</sub> 放电分解装置后, 在各自的外施试验电压下均能有效产生稳定的 PD, 采集到的 4 种绝缘缺陷产生的 PD 脉冲波形及对应功率谱如图 2 所示,  $U_{PD}$  为局放脉冲电压,  $P_{PD}$  为功率谱。

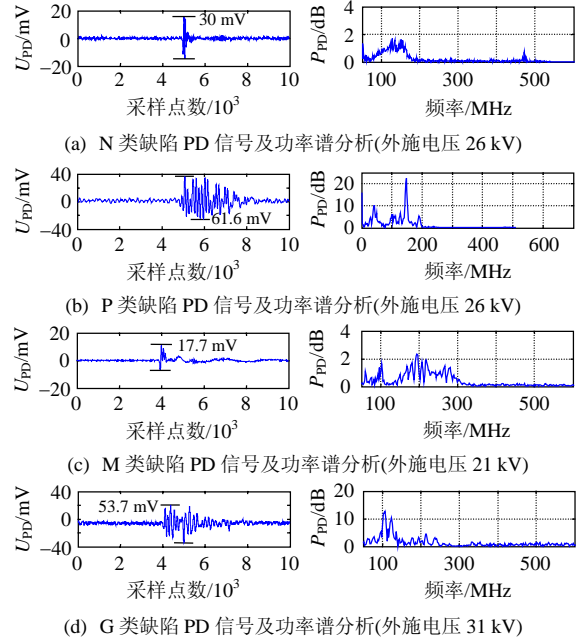


图 2 4 种绝缘缺陷 PD 波形及功率谱

Fig. 2 PD signals and power spectrum under four kinds of defects

由图 2 可见, 不同绝缘缺陷产生的 PD 脉冲信号在时域上具有明显差异。N 类绝缘缺陷产生的 PD 信号幅值最为稳定, 约为 30 mV, 脉冲放电频率高, 功率谱密集, 总体放电能量大且相对集中; 对于 P 类绝缘缺陷, 由于微粒在放电期间会发生颤动、移位及跳跃, PD 幅值高达到 60 mV 左右, 有较大分散性, 脉冲放电频率较低, 总体放电能量不大, 但单次 PD 脉冲能量高; 对于 M 类绝缘缺陷, PD 幅值在 18 mV 左右, 脉冲放电频次较 N 类缺陷略低, 功率谱范围广且相对稀疏, 总体放电能量较大; 对于 G 类绝缘缺陷, 产生稳定 PD 所需外施试验电压较高, 放电幅值在 50 mV 左右, 有较大分散性, 脉冲频次低, 功率谱稀疏, 总体放电能量小。总之, 不同绝缘缺陷产生的 PD 在时域特性上, 诸如波形、功率分布、放电频率、强度、总体放电能量等方面存在各自的特点, 这将是不同 PD 引起 SF<sub>6</sub> 分解出现特性差异的根本原因, 为研究并建立 SF<sub>6</sub> 分解组分特性与绝缘缺陷类型的对应关系提供了可能性。

## 2 SF<sub>6</sub> 放电分解组分混和样气检测

### 2.1 气相色谱仪

对 PD 使 SF<sub>6</sub> 发生分解生成的组分混和样气定量测定, 选用 Varian CP-3800 痕量气体分析仪, 采用填充柱和特制毛细柱并联的方式对混和样气进行组分分离, 用双 PDHID 检测器(检测精度可达 0.01 μL/L)对各分离组分作定量检测。色谱柱所用载

气为 99.999% 的高纯度 He 气，在流速 2 mL/min、柱温恒温 40 °C、进样量 1 mL 和分流比 10:1 的条件下，可有效对 SF<sub>6</sub> 混和样气进行分离。其中，填充柱可以分离空气、CF<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>；特制毛细柱可分离空气、SF<sub>6</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 和 SO<sub>2</sub>。

2.2 标准色谱图获取

本文配制了表 1 所示的标准气体，在相同的色谱条件下，多次注入 1~6 号标气，并对比 7 号混和标气出峰图，得到了各组分的标准色谱图，如图 3 所示。利用不同组分保留时间(t<sub>RT</sub>)的不同<sup>[20]</sup>，并参考标准谱图，对 6 种组分进行定性分析，表 2 为各组分的保留时间。同时采用色谱峰面积外标法进行定量标定<sup>[20]</sup>，定量公式为

$$c_i = c_{s,i} A_i / A_{s,i} = K_i A_i \quad (1)$$

式中：A<sub>i</sub>、A<sub>s,i</sub> 分别为样品、标样中第 i 组组分气体峰面积；c<sub>i</sub>、c<sub>s,i</sub> 分别为样品、标样中第 i 组组分气体含量；K<sub>i</sub> 为校正曲线的斜率，即绝对校正因子。测得各组分的绝对校正因子如表 3 所示。

表 1 标准气体配置  
Tab. 1 List of reference gas

编号	组分	含量/(μL/L)	体积/L
1	CF <sub>4</sub>	20	4
2	CO <sub>2</sub>	500	4
3	H <sub>2</sub> S	500	4
4	SO <sub>2</sub>	500	4
5	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	20	4
6	SOF <sub>2</sub>	20	4
7	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 、SOF <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CF <sub>4</sub> 、H <sub>2</sub> S	各 10	4

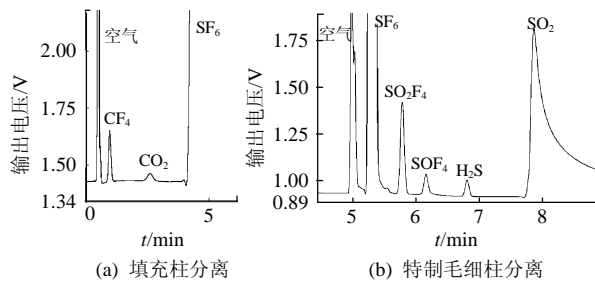


图 3 标准色谱图

Fig. 3 Standard chromatogram

表 2 各组分的保留时间

Tab. 2 Peak time of each component min

组分	CF <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	SOF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>
填充柱	1.27	2.76	—	—	—	—	—
特制毛细柱	—	—	5.25	5.90	6.32	6.73	7.73

表 3 绝对校正因子

Tab. 3 Correction factors

组分	CF <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
K <sub>i</sub>	0.169×10 <sup>-4</sup>	0.999×10 <sup>-5</sup>	0.385×10 <sup>-4</sup>	0.238×10 <sup>-4</sup>	0.241×10 <sup>-4</sup>

注：由于 SO<sub>2</sub> 受烃类影响出峰异常，暂未定量。

2.3 SF<sub>6</sub> 分解试验过程

试验按以下步骤进行：

1) 首先在放电气室中置入所需的绝缘缺陷物理模型，将其抽真空，注入 SF<sub>6</sub> 新气，再将其抽真空，重复该过程以对放电气室进行清洗，在最后一次抽真空之后放置 24h，使放电室内的微水充分气化，以便将放电室内固有水分和杂质气体含量减少到最低。

2) 清洗后再向放电气室注入 SF<sub>6</sub> 新气，直至放电气室的气压接近实际 GIS 设备运行值，即 0.3MPa。

3) 对缺陷模型施加试验电压，利用回路无感电阻监测 PD 放电量和幅值，调节试验电压，使缺陷模型产生稳定持续的 PD。

4) 每隔 12h，从采气口抽取 SF<sub>6</sub> 放电分解样气，用气相色谱仪对其进行组分含量的定量分析。

2.4 SF<sub>6</sub> 气体固有杂质测定

尽管试验所使用的 SF<sub>6</sub> 气体为 99.999% 的高纯度气体，但在充入放电室后，必须在未进行 PD 试验前测定杂质含量，目的是：1) 检测 SF<sub>6</sub> 气体的纯度是否符合标准，防止 SF<sub>6</sub> 气体因受潮、久置、漏气等原因造成杂质气体含量过多，影响试验结果；2) 考虑到在向放电室充气过程中可能混入杂质组分以及放电室内可能有吸附的残存分解物，对 PD 试验前后气体组分准确对比产生影响。本文对试验前充入的 SF<sub>6</sub> 气体所含杂质的定量检测如表 4 所示。结果表明，SF<sub>6</sub> 气体中的杂质组分主要为空气(O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>)、CO<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub>，其他杂质含量很低均可忽略，说明上述试验步骤中的清洗过程是有效的。

表 4 SF<sub>6</sub> 气体中的杂质  
Tab. 4 Impurities in SF<sub>6</sub> gas μL/L

杂质	CO <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	SOF <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>
含量	3.62	4.65	0.00	0.00	0.00	0.00

2.5 SF<sub>6</sub> 分解组分含量测定

利用色谱组分保留时间和峰面积外标法，并结合获取的色谱标准图谱，对 PD 下的 SF<sub>6</sub> 气体分解组分进行了定性和定量分析，在扣除放电前的杂质含量后，得到了 CF<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 组分的含量，以及在不同类型绝缘缺陷产生的 PD 下，稳定组分含量与放电时间的关系，如图 4 所示(SO<sub>2</sub> 受烃类影响出峰异常和 H<sub>2</sub>S 的不稳定性，暂未进行定量分析)。图中 R<sub>1</sub><sup>2</sup>、R<sub>2</sub><sup>2</sup>、R<sub>3</sub><sup>2</sup>、R<sub>4</sub><sup>2</sup> 为曲线的拟合度。

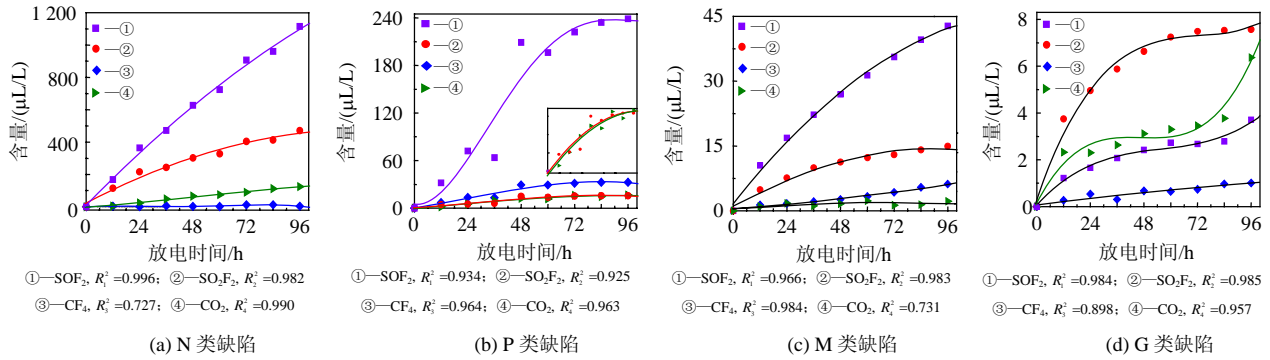


图 4 4 种绝缘缺陷下组分含量的变化

Fig. 4 Composition concentration under four kinds of defects

### 3 SF<sub>6</sub> 分解组分含量及变化规律分析

在对由 4 种绝缘缺陷产生的 PD 使 SF<sub>6</sub> 分解的组分定量测定中，均能检测到 CF<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 这 4 种主要稳定组分，由图 4 所示曲线可以看出，不同绝缘缺陷下的 SF<sub>6</sub> 分解特征存在明显差异。对于 N 类绝缘缺陷，SF<sub>6</sub> 分解量最大，其中，SOF<sub>2</sub> 生成量最多、增长速率最高，SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 组分生成速率相对较低，且随放电时间的延长较快趋于饱和。此外，该缺陷下还生成了较多的 CO<sub>2</sub> 组分气体，且随放电时间的延长含量持续增长，而 CF<sub>4</sub> 的含量变化没有明显的规律性。对于 P 类绝缘缺陷，各组分的含量随时间变化较不均匀，这与该绝缘缺陷产生的 PD 具有不稳定性有关，此时生成的 SOF<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 这 2 种组分气体含量差距显著，同时 CF<sub>4</sub> 的含量略高于 CO<sub>2</sub>。对于 M 类绝缘缺陷，SOF<sub>2</sub> 的含量和增长速率也明显高于 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>；而 CF<sub>4</sub> 的含量随放电时间的延长呈稳定的增长趋势，CO<sub>2</sub> 的含量很少。对于 G 类绝缘缺陷，虽然单次放电强度较高，但 SF<sub>6</sub> 总的分解量却很少；值得注意的是，SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的含量高于 SOF<sub>2</sub>，明显有别于前 3 种绝缘缺陷下的分解规律，此外，CO<sub>2</sub> 的含量明显高于 CF<sub>4</sub>，且在放电后期有增高趋势。为此，采用文献[21]提出的绝对产气速率  $r_a$  来描述不同绝缘缺陷在各时间段上分解组分的产气特性，其计算公式为

$$r_a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中： $C_{i2}$  为第 2 次测得  $i$  组分的含量； $C_{i1}$  为第 1 次测得  $i$  组分的含量； $\Delta t$  为 2 次检测的时间间隔。计算得到不同绝缘缺陷 PD 下各组分的绝对产气速率如表 5 所示。

在 4 种绝缘缺陷产生的 PD 下，SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 SOF<sub>2</sub> 均在放电初期出现了产气高峰期，原因是放电初期气室内残留的微氧和微水参与反应生成了较多的

表 5 4 种绝缘缺陷下的产气速率

Tab. 5 Production rate under four kinds of defects

绝缘缺陷类型	时间/d	$r_a/(\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{d}))$			
		CF <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	SOF <sub>2</sub>
N 缺陷	1	0.90	23.07	216.31	364.44
	2	1.90	42.51	86.29	263.15
	3	8.88	23.50	101.55	278.97
	4	-8.26	35.67	67.05	207.90
P 缺陷	1	13.49	5.18	5.28	72.11
	2	15.96	7.20	9.70	137.07
	3	1.81	3.87	0.34	13.01
	4	1.42	0.38	0.50	16.72
M 缺陷	1	1.70	1.22	7.62	16.89
	2	0.91	0.40	3.66	10.06
	3	1.66	-0.34	1.70	8.67
	4	1.90	0.90	1.97	7.16
G 缺陷	1	0.54	2.30	4.96	1.66
	2	0.13	0.82	1.67	0.76
	3	0.07	0.47	0.86	0.26
	4	0.27	2.91	0.07	0.49

SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 SOF<sub>2</sub>，随着放电时间的延长，参与反应的微氧和微水逐渐减少，使得产气速率相应下降。表中数据显示，N 类绝缘缺陷下的产气速率最高，结合 PD 脉冲检测结果，原因可能是该绝缘缺陷产生的 PD 稳定且放电幅值较大，总体放电能量高，可以为 SF<sub>6</sub> 的分解提供持续的能量；P 类绝缘缺陷下 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 SOF<sub>2</sub> 的产气高峰主要在放电初期，且随着放电时间的延长，2 种组分的产气速率明显降低，原因是该缺陷试验时有少许微粒跳出了碗电极，PD 的频次随之降低，导致各组分的产气速率下降；M 类绝缘缺陷下 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 SOF<sub>2</sub> 产气速率相对较低，原因可能是该绝缘缺陷产生的 PD 幅值较低，总体放电能量较小；G 类缺陷下各组分的产气速率很低，不同的是 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 在放电初期产气速率略高于 SOF<sub>2</sub>，但随着放电时间的延长产气速率下降较快，在 84 h 以后 SOF<sub>2</sub> 产气速率超过 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>，可见 SOF<sub>2</sub> 是 PD 中的主要分解组分。4 种绝缘缺陷 PD 下都检测到有 CF<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 生成组分，而 M 类

缺陷下，由于放电发生在固体绝缘材料表面，CF<sub>4</sub>的产气速率高于CO<sub>2</sub>，且随着放电时间的延长含量逐渐增加。

#### 4 特征组分气体含量比值分析

在绝缘缺陷产生的PD作用下，SOF<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>是稳定的分解产物，CF<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的生成情况随缺陷类型不同而不同。总体看来，SF<sub>6</sub>气体在不同绝缘缺陷类型产生的PD作用下，其分解特性存在明显差异，且具有规律性。通过对检测数据的统计分析，作者提出用SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>和(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)这3组组分含量比值作为表征不同绝缘缺陷类型的特征组分比值，通过计算得到的3组组分含量比值如表6所示。

对于N类绝缘缺陷，由于位置固定不变，一旦引发PD，会长期稳定存在，致使SF<sub>6</sub>的分解速率最高，SOF<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>增长规律性强，SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>的比值大小在1~2，同时CO<sub>2</sub>含量高于CF<sub>4</sub>，(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)含量比值较高，大于11，在绝缘缺陷类型识别时最易判定；对于P类绝缘缺陷，由于微粒位置相对自由，PD存在不稳定性，较高的

单次脉冲强度使得SOF<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>生成含量差距较大，致使SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>含量比值统计数据有分散性，但总体比值较高，大于6，同时CO<sub>2</sub>含量低于CF<sub>4</sub>，(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)含量比值在3~5；对M类绝缘缺陷，与N类绝缘缺陷有一定相似性，产生的PD较为稳定，但放电强度较低，SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>含量比值在2~3。此外，由于PD紧贴绝缘材料表面，放电引起绝缘材料释放的C原子与SF<sub>6</sub>分解出的F原子易结合生成CF<sub>4</sub>，使得(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)含量比值在6~10，因此可作为判断绝缘材料表面缺陷的依据；对于G类绝缘缺陷，虽然产生的PD幅值较高，单次放电强度较大，但总放电次数较少，致使SF<sub>6</sub>分解的总量极少，使放电初期检测到SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>的含量比值小于1，同时(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)含量比值较低，在1~3，因此可以结合脉冲电流检测和气体组分分析判定G类缺陷。

此外，在N类和M类绝缘缺陷产生稳定的PD下，SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>的含量比值随放电时间的延长有稳定的增长趋势。在P类缺陷试验中还发现，当放电剧烈时，SOF<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>的含量差距会明显增大。因此，可以利用SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>的比值变化来判断PD的强度及发展趋势，比值高说明PD强度较大，比值逐渐增大说明绝缘缺陷有不断扩大的趋势。

表6 4种绝缘缺陷特征组分比

Tab. 6 Characteristic content ratio under four kinds of defects

含量比	放电时间/h	N类缺陷	P类缺陷	M类缺陷	G类缺陷
SOF <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	12	1.47	6.96	2.16	0.33
	24	1.69	13.66	2.22	0.34
	36	1.94	10.64	2.23	0.35
	48	2.07	13.96	2.39	0.37
	60	2.21	14.22	2.55	0.38
	72	2.24	14.50	2.74	0.36
	84	2.33	14.82	2.81	0.37
	96	2.37	15.10	2.86	0.49
CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>	12	0.80	4.59	1.33	0.12
	24	0.04	2.60	1.39	0.25
	36	0.12	1.38	1.89	0.12
	48	0.04	2.38	1.62	0.22
	60	0.02	2.49	1.43	0.20
	72	0.13	1.92	3.34	0.21
	84	0.11	2.26	3.80	0.26
	96	0.03	1.97	2.84	0.16
(SOF <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )/(CO <sub>2</sub> +CF <sub>4</sub> )	12	38.07	4.19	6.53	1.92
	24	24.23	4.15	8.39	2.33
	36	13.36	3.05	9.95	2.70
	48	13.60	5.36	9.02	2.39
	60	13.86	5.13	7.74	2.53
	72	13.01	5.00	8.74	2.42
84	11.05	5.32	7.83	2.18	
96	12.37	5.17	6.91	1.53	

#### 5 基于比值编码树的绝缘缺陷类型识别

由上述分析可知，用分解组分含量的比值范围来定义相应编码，再根据不同的编码组合可对4种绝缘缺陷类型进行识别。作者对表6所示的3组组分含量比按其大小范围进行编码，如表7所示。

表7 组分含量比值编码

Tab. 7 Code for component concentration ratio

组分	CF <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub>		SOF <sub>2</sub> /SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>			(SOF <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )/(CO <sub>2</sub> +CF <sub>4</sub> )			
	<1	>1	<1	1~4	>4	1~3	3~6	6~10	>10
编码	0	1	0	1	2	0	1	2	3

研究发现，4种绝缘缺陷类型与编码组合存在一定的对应关系，为此，作者建立了识别绝缘缺陷类型的编码树，如图5所示。编码树的第1层编码由CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>比值编码确定，第2层编码由SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>比值编码确定，第3层编码由(SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>)比值编码确定，最后可得到识别绝缘缺陷类型的编码组合。即N、P、M、G类绝缘缺陷识别的编码组合分别为013、111、122、000。

用该编码树识别绝缘缺陷的准确性，取决于组

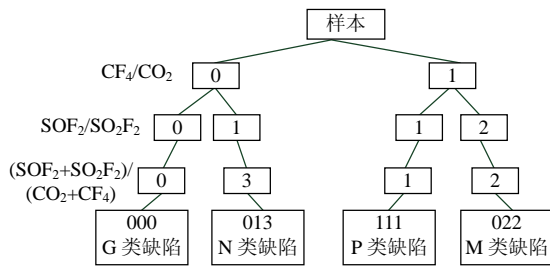


图 5 绝缘缺陷识别编码树

Fig. 5 Coding tree for insulation defects

分含量检测和编码的准确性。组分含量的准确检测可以由试验保证，但对于组分含量处于编码的交叉处，如何进行有效编码往往因人而异，如果编码不当，会出现错误的判断，因此当组分含量编码处于交叉时，可借助某些核心组分含量大小及变化规律来确定最终的编码，以减小误判率。此外，利用上述建立编码树的方法，可以采用更多的特征组分参与编码，以进一步提高对 4 种或更多绝缘缺陷类型的准确识别。

## 6 结论

1) 对 4 种绝缘缺陷产生的 PD 进行了时域和频域分析，发现在放电频率、脉冲陡度、放电分散性以及能量分布等方面有各自的特点，这是导致 SF<sub>6</sub> 绝缘气体发生分解生成不同含量、不同变化规律组分的根本原因，因此可利用 SF<sub>6</sub> 分解气体组分的定量检测来识别不同类型绝缘缺陷。

2) 4 种绝缘缺陷产生的 PD 均能使 SF<sub>6</sub> 发生分解生成多种衍生物，其中 CF<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 这 4 种组分比较稳定，利用制定的组分色谱标准图谱，得到了 4 种组分含量随时间的变化关系，发现不同类型绝缘缺陷产生的 PD 使 SF<sub>6</sub> 分解生成的组分，在含量、产气率以及变化规律上有明显差异，分析了差异的原因。

3) 发现 4 种绝缘缺陷下的不同组分含量比有一定范围，提出一种用气体组分含量编码树识别绝缘缺陷的思路和方法，并对 SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 和 (SOF<sub>2</sub>+SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>)/(CO<sub>2</sub>+CF<sub>4</sub>) 这 3 组气体组分含量比值范围进行了编码，建立了相应的比值编码树，得到了识别 4 种绝缘缺陷类型的编码组合。

4) 在 PD 导致 SF<sub>6</sub> 发生分解生成的特征组分中，SOF<sub>2</sub> 是核心分解产物，变化规律也最为明显，除 G 类绝缘缺陷以外，其他 3 种绝缘缺陷产生的 SOF<sub>2</sub> 含量均很高，在组分含量编码处于交叉无法确定时，可作为确定最终编码的依据。

## 参考文献

- [1] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [2] 汪润, 邱毓昌. 气体绝缘开关装置(GIS)的近期发展动向[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 54-57.  
Wang Feng, Qiu Yuchang. Recent development trend of gas insulated switchgear[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 54-57(in Chinese).
- [3] 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(S2): 286-290.  
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(S2): 286-290(in Chinese).
- [4] 贾志杰, 范建斌, 李金忠, 等. 不同 SF<sub>6</sub> 气压下不同填料环氧树脂绝缘子的直流闪络特性[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 31-40.  
Jia Zhijie, Fan Jianbin, Li Jinzhong, et al. DC flashover characteristics of epoxy resin insulator with and without fillers under different SF<sub>6</sub> gas pressures[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 31-40 (in Chinese).
- [5] 骆立实, 姚文军, 王军, 等. 用于 GIS 局部放电诊断的 SF<sub>6</sub> 分解气体研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 225-230.  
Luo Lishi, Yao Wenjun, Wang Jun, et al. Research on partial discharge diagnosis of GIS by decomposed gas of SF<sub>6</sub>[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 225-230(in Chinese).
- [6] 张晓星, 任江波, 肖鹏, 等. 检测 SF<sub>6</sub> 气体局部放电的多壁碳纳米管薄膜传感器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 116-120.  
Zhang Xiaoxing, Ren Jiangbo, Xiao Peng, et al. Multi-wall carbon nanotube films sensor applied to SF<sub>6</sub> PD detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 116-120(in Chinese).
- [7] Heise H M, Kurte R, Fischer P, et al. Gas analysis by infrared spectroscopy as a tool for electrical fault diagnostics in SF<sub>6</sub> insulated equipment[J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1997, 358(7-8): 793-799.
- [8] Piemontesi M, Niemeyer 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: IEEE, 1996: 828-838.
- [9] Beyer C, Jenett H, Kfocow D. Influence of reactive SF<sub>x</sub> gases on electrode surfaces after electrical discharge under SF<sub>6</sub> atmosphere[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 234-240.
- [10] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF<sub>6</sub> 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 37-42.  
Zhang Xiaoxing, Yao Yao, Tang Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF<sub>6</sub> decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 37-42(in Chinese).
- [11] 刘有为, 吴立远, 肖燕, 等. 输变电设备特征参数的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [12] Boudene C, Cluet J L, Keib G, et al. Identification and study of some properties of compounds resulting from the decomposition of SF<sub>6</sub> under the effect of electrical arcing in circuit-breakers[J]. Revue Generale Electricite, 1974(Special Issue): 45-78.
- [13] Grasselt H, Ecknig W, Polster H J, Applications of gas chromatography for the development of SF<sub>6</sub> insulated switchgear and equipment[J]. Elektrische, 1978(32): 369-371.
- [14] Bartakova B, Krump J, Vosahlik V. Effect of electric partial discharge

- in SF<sub>6</sub>[J]. *Electrotechnichy Obzor*, Prague, 1978, 67(4): 230-233.
- [15] 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, et al. Investigation on SF<sub>6</sub> decomposition products in GIS and affecting factors[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(5): 58-61(in Chinese).
- [16] 连鸿松. 根据 SF<sub>6</sub> 气体分解产物诊断电气设备故障[J]. *福建电力与电工*, 2005, 23(3): 21-24.  
Lian Hongsong. Electrical equipment fault diagnosis according to SF<sub>6</sub> department products[J]. *Fujian Power and Electrical Engineering*, 2005, 23(3): 21-24(in Chinese).
- [17] 卢立秋. 放电故障的 SF<sub>6</sub> 设备分解产物总量分析[J]. *华北电力技术*, 2007(1): 150-152.  
Lu Liqiu. Analyzing amount of SF<sub>6</sub> facilities decomposition product by electric discharge fault[J]. *North China Electric Power*, 2007(1): 150-152(in Chinese).
- [18] Tang Ju, Zhou Qian, Tang Ming, et al. Study on mathematical model for VHF partial discharge of typical insulated defects in GIS[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(1): 30-37.
- [19] 唐炬, 李涛, 万凌云, 等. SF<sub>6</sub> 气体分解组分的多功能试验装置研制[J]. *高电压技术*, 2008, 34(8): 1583-1588.  
Tang Ju, Li Tao, Wan Lingyun, et al. Device of SF<sub>6</sub> dissociation apparatus under partial discharge and gaseous decomposition components analysis system[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(8): 1583-1588(in Chinese).
- [20] 汪正范. 色谱定性与定量[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 49-68.
- [21] 唐炬, 李涛, 张晓星, 等. 两种常见局部放电缺陷模型的 SF<sub>6</sub> 气体分解组分对比分析[J]. *高电压技术*, 2009, 35(3): 487-492.  
Tang Ju, Li Tao, Zhang Xiaoxing, et al. Analysis of SF<sub>6</sub> gaseous decomposition components under two kinds of PD defects[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(3): 487-492(in Chinese).



唐炬

收稿日期: 2010-09-19。

**作者简介:**

唐炬(1960), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 973 计划首席科学家, 主要从事高压电气设备绝缘在线监测及故障诊断研究, E-mail: cqtangju@vip.sina.com;

陈长杰(1984), 男, 硕士研究生, 从事电力电缆绝缘在线监测及故障诊断研究;

刘帆(1984), 男, 博士研究生, 主要从事 GIS 绝缘故障诊断研究。

(责任编辑 马晓华)