

用于 GIS 局部放电诊断的 SF₆ 分解气体研究

骆立实¹, 姚文军¹, 王军¹, 李成榕², 郑书生², 邬晓波¹, 毛婷¹

(1. 华北电网公司 北京超高压公司, 北京市 房山区 100045;

2. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Research on Partial Discharge Diagnosis of GIS by Decomposed Gas of SF₆

LUO Li-shi¹, YAO Wen-jun¹, WANG Jun¹, LI Cheng-rong², ZHENG Shu-sheng², WU Xiao-bo¹, MAO Ting¹

(1. Beijing Super High Voltage Corporation of North China Grid Corporation, Fangshan District, Beijing 100045, China;

2. Beijing Key Laboratory of High Voltage and Electromagnetic Compatibility (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The decomposition mechanism of SF₆, the constituent of the decomposed gases of SF₆ and their stability under various failures occurred in gas insulated switchgear (GIS) are analyzed. On this basis, it is thought that following decomposed gases such as SOF₂, SO₂, SO₂F₂, HF, SOF₄ and S₂F₁₀ can be used as the characteristic gasses characterizing the partial discharge (PD) of GIS; by means of detecting the constitution of SOF₂+SO₂ and HF within GIS, whether there is internal partial discharge inside GIS or not can be judged. According to the content of HF, the state of internal PD inside GIS as well as whether the internal PD is increasingly extending can be determined.

KEY WORDS: SF₆; decomposed gases; gas insulated switchgear (GIS); partial discharge; diagnosis

摘要: 分析了气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)各种故障时 SF₆ 的分解机制、分解气体的成分和稳定性, 认为 SOF₂、SO₂、SO₂F₂、HF、SOF₄ 和 S₂F₁₀ 可作为 GIS 局部放电的特征气体。通过检测 GIS 内部的 SOF₂+SO₂、HF 成分, 可以判断 GIS 内部是否存在局部放电故障, 依据 HF 含量可以判断 GIS 内部局部放电的状态, 即判断局部放电是否正在持续发展。

关键词: SF₆; 分解气体; GIS; 局部放电; 诊断

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)是电力系统关键设备, 一旦发生绝缘故障, 将会造成巨大损失^[1]。局部放电是绝缘故障的前期征兆和发展结果^[2], 因此, 对 GIS 设备内部的局部放电进行准确判断和及时排除是预防绝缘故障、保证 GIS 安全可靠运行的重要措施^[3]。

目前, 国内外采用的 GIS 局部放电检测方法主

要有: 脉冲电流法^[4]、超声波法^[5]和特高频法^[6-7]。

由于户外变电站存在强烈的电磁干扰^[8], GIS 设备接地点多, 脉冲电流法信噪比很低, 难以在现场应用。超声波法虽然不受变电站内强电磁环境的干扰, 但 GIS 局部放电超声波信号频率低, 衰减快, 在超声法检测频带(30~80 kHz)内, 变电站户外存在强烈的噪音干扰, 尤其是自然风和电晕对其影响非常大, 因此, 超声波法灵敏度低, 抗干扰能力差, 只能检测到很强烈的局部放电和机械振动, 难以达到 GIS 局部放电检测的要求。特高频法主要检测 0.3~1 GHz 的电磁波信号, 灵敏度高, 抗干扰能力强^[9], 但其定量标定和模式识别等问题尚未解决, 难以对局部放电状态进行准确判断^[10]。

因此, 有必要探索抗干扰能力强、能准确反映 GIS 局部放电状态的在线检测和诊断技术。SF₆ 是 GIS 设备内部的主要灭弧和绝缘介质, 常温常压下化学性能稳定, 但在电晕和火花放电的情况下会产生多种稳定的分解气体^[11], 如 SO₂、SOF₂、H₂S、HF、SO₂F₂、SOF₄、S₂F₁₀ 等。鉴于油色谱技术在变压器绝缘状态检测和诊断方面的成功应用, 通过检测与分析 SF₆ 分解气体实现对 GIS 局部放电的在线检测与诊断^[12]变为可行。

近年来气体检测技术得到了长足发展, 检测管、气体传感器、气相色谱、质谱、红外吸收光谱、光声光谱等已被成功用于 SF₆ 分解气体检测和分析^[13], 但其在 GIS 局部放电故障诊断方面还存在以下问题: 1) 在过热、电弧、火花放电、电晕放电等情况下, SF₆ 会产生大量的分解气体, 且分解气体种类多, 含量低, 绝大多数分解气体的化学性能活泼,

难以长期稳定存在^[14]，因此选择化学性能稳定、含量高、且依据其相对含量能够区分故障类别的气体组分是实现 GIS 局部放电诊断技术的首要前提；2) 虽然国内外对 SF₆ 分解气体进行了大量研究，但对各种绝缘缺陷产生的局部放电与 SF₆ 分解气体组分间的关联关系还未确定，需进行更深入研究^[15]。

本文将分析 GIS 局部放电时 SF₆ 的分解机制及各种分解气体的稳定性和含量，以确定用于诊断 GIS 局部放电的特征气体组分。

1 SF₆ 分解机制和局部放电特征气体的选取

1.1 SF₆ 分解机制

SF₆ 由卤族元素中最活泼的氟原子与硫原子结合而成，其中 S 原子以 sp³d² 杂化轨道成键，其分子结构是一个完全对称的正八面体(见图 1)，硫原子居于八面体中心，6 个角上是氟原子^[16]。

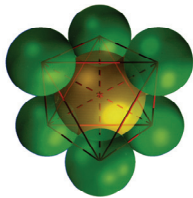


图 1 SF₆ 分子结构
Fig. 1 Molecule structure of SF₆

SF₆ 分子对称性强，S-F 键合距离(0.158 nm)小，键能强，因此 SF₆ 化学性能稳定，被称为人造惰性气体，在常温常压下不会发生任何反应。但在电弧、火花放电、电晕放电或 500℃ 以上高温情况下 SF₆ 会发生离解，形成硫的低氟化物和硫单质，低氟化物和硫单质会与 SF₆ 气体中的微量氧原子和水分子发生反应，生成化学性能相对稳定的气体^[17]。

在 GIS 运行过程中，当存在故障电弧、火花放电、局部放电、过热故障时，由于高温或电子碰撞作用，SF₆ 分子会发生离解，产生 SF₅、SF₂、F 等活性粒子以及 SF₄ 分子和单质硫，同时，SF₆ 气体中的杂质 O₂、H₂O 分子发生离解，生成 H、O 原子和 OH 活性粒子。这些活性粒子将互相结合，最终生成氟、硫、氧、氢的各种化合物。按照 SF₆ 分子离解起因的不同，可将 SF₆ 分解机制分为热分解和电子碰撞分解^[18]。

1) 热分解。SF₆ 在温度不太高时，物理化学性质非常稳定，类似于惰性气体，不会分解，也不会与其他物质发生反应，但在高温下会发生离解。500℃ 时开始离解，700℃ 后会明显离解，温度高达 2000℃ 以上时，SF₆ 大部分会分解为硫和氟的单原 SF₆ 离解产物浓度与温度之间的关系^[17]见图 2。

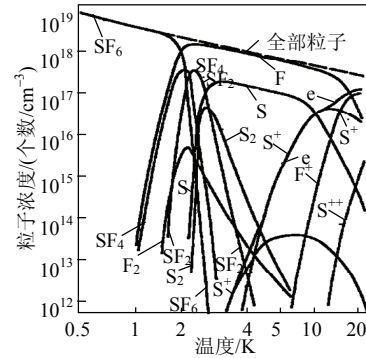
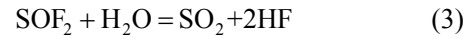
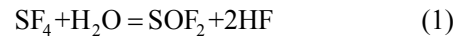


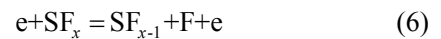
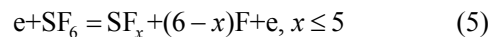
图 2 SF₆ 离解产物浓度与温度的关系
Fig. 2 Relations between concentrations of SF₆'s decomposed gases and temperature

由图 2 可知，温度低于 3 000 K 时，SF₆ 的主要离解产物是 SF₄、SF₂ 和 F，这 3 种活性粒子与 H₂O 和 O₂ 发生以下化学反应^[18]：

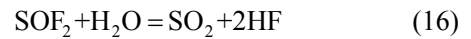
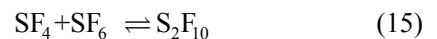
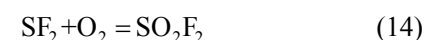
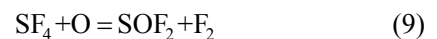


由式(1)~(4)可知，比较稳定的分解气体主要有 SOF₂、SO₂、HF，S₂F₁₀ 在 200℃ 以上不稳定。

2) 电子碰撞分解。当 SF₆ 气体发生低温放电时，在强电场作用下将释放出高能量的电子，如在电晕放电情况下，电子平均动能高达 5~10 eV^[19-20]，SF₆ 分子中 S-F 键的键能约为 3.5~4.0 eV^[21-22]。因此，在电晕等低温放电情况下，在高能电子轰击下，S-F 键断裂，SF₆ 分子逐步离解为硫的低氟化物^[23-25]，即



经过碰撞电离后，SF₆ 的离解产物将会与同时离解产生的 OH、O、O₂ 和 H₂O 等活性粒子产生一系列反应^[26]，生成丰富产物，即



由式(7)~(16)可知，比较稳定的分解气体主要有 SOF₂、SO₂、SOF₄、SO₂F₂、HF、S₂F₁₀。

1.2 GIS 内部故障作用下 SF₆ 分解产物

在 GIS 设备运行过程中, 过热性故障、电弧、火花放电、局部放电等都有可能产生, 为了准确判断局部放电故障, 有必要分析各种故障情况下产生的 SF₆ 分解气体的成分、含量及其变化特征。以下将分别分析 4 种故障下 SF₆ 气体分解情况:

1) 因过热故障产生的 SF₆ 分解气体。

GIS 高压触头间接触不良时接触电阻很大, 在正常工作电流下, 接触点温度过高易导致 SF₆ 热分解, 根据式(1)~(3), 其主要生成物为 SO₂、SOF₂、HF、S₂F₁₀。HF 是强酸性气体, 易与 GIS 内密封胶、金属触头发生反应, 但在吸附剂作用下会很快消失。高温下 S₂F₁₀ 不稳定, 会马上消失。随着温度升高, SF₆ 分解率越高, SOF₂ 和 SO₂ 含量也越高^[25]。

2) 因电弧产生的 SF₆ 分解气体。

GIS 设备内部产生电弧时, 弧柱温度很高, 易导致 SF₆ 气体热分解, 其分解物的产生和消失过程与过热故障相同, 其主要分解气体为 SO₂ 和 SOF₂。分解气体的含量与电弧电流大小和电弧持续时间成正比。电弧电流越大, 弧柱温度越高, SF₆ 分解率也就越高; 电弧持续时间越长, SF₆ 分解率越高, 分解气体的含量越高。

正常操作 SF₆ 断路器时, 开断电流会产生电弧, 在电弧熄灭后, 离解的气体迅速复合, 绝大部分又恢复成 SF₆ 气体, 极少量的离解物在重新结合过程中与水、氧气和游离的金属原子发生化学反应, 生成氧、硫的氟化物及金属氟化物, 主要气体分解物为 SOF₂、SO₂。

GIS 故障电流一般很大, 可达 60 kA, 电弧内部温度可升至 3 000 K。随着温度升高, SF₆ 开始热分解, 且速度逐渐加快, 在温度 2 000 K 左右分解速度达到高峰, 此时分解气体主要有 SOF₂、SO₂^[26]。

3) 因火花放电产生的 SF₆ 分解气体。

GIS 隔离开关动作易发生火花放电。火花放电时的 SF₆ 分解机制与电弧放电时情况很接近。虽然火花放电的持续时间很短, 但火花放电时的能量足以使火花放电通道内的温度升高, 造成小体积范围内的 SF₆ 离解。因此, 在火花放电中, SOF₂ 和 SO₂ 也是主要分解产物。与电弧不同的是, 在火花放电区域存在未被热离解的 O₂ 分子, 如式(14)所示, 它可与 SF₂ 反应生成微量的 SO₂F₂^[14,26]。

4) 因局部放电产生的 SF₆ 分解气体。

GIS 内部由于设计、安装等问题, 会出现高压

金属尖刺、高压金属导体接触不良等现象, 在正常运行电压下, 故障点周围局部电场强度高, 若超过 SF₆ 气体的平均击穿场强就会产生局部放电。在局部放电过程中, 电子在强电场作用下加速, 获得较大动能, 碰撞 SF₆ 分子和由此产生的硫的低氟化物分子就会造成碰撞电离, 如式(5)~(6) 所示。硫的低氟化物与 O、OH、O₂、H₂O 等活性粒子发生一系列反应, 如式(7)~(16), 最终形成多种较稳定的气体, 如 SOF₂、SO₂、SOF₄、SO₂F₂、HF 和 S₂F₁₀^[19-24,27]。各种故障作用下 SF₆ 的主要分解气体见表 1。

表 1 在过热、电弧、火花放电、局部放电情况下的 SF₆ 主要分解气体

Tab. 1 Main decomposition gases of SF₆ in the case of overheat, arc, spark and partial discharge

故障类型	分解气体					
	SOF ₂	SO ₂	HF	SOF ₄	SO ₂ F ₂	S ₂ F ₁₀
过热	✓	✓	✓			
电弧	✓	✓	✓			
火花放电	✓	✓	✓		✓	
局部放电	✓	✓	✓	✓	✓	✓

1.3 GIS 局部放电特征气体选取

由上分析可知, GIS 内部局部放电的分解气体成分丰富: HF、SOF₂ 和 SO₂ 是过热、电弧、火花放电和局部放电现象都会产生的气体; SO₂F₂ 是火花放电和局部放电现象产生的气体; SOF₄、S₂F₁₀ 是局部放电故障特有的分解气体。SOF₂、SO₂ 和 SO₂F₂ 能够稳定存在; HF、SOF₄ 和 S₂F₁₀ 容易与其他物质发生反应或分解而消失。因此, 如何选取特征气体, 对于实验室研究和现场检测至关重要。为此, 有必要对局部放电的主要分解气体的物理化学特性进行对比分析, 具体内容如下:

1) SOF₂ 和 SO₂。在各种故障情况下都会产生 SOF₂ 和 SO₂。不论是局部放电, 还是其他故障, 这 2 种气体的含量都是最高的, 且性能最稳定, 因此, 这 2 种气体是国内外 GIS 局部放电研究和现场检测的重要气体成分之一。

2) HF。HF 是化学性质非常活泼的气体, 容易与密封胶、金属材料等发生反应而迅速消失。考虑到故障电弧、火花放电的间歇性和局部放电的持续性, HF 可作为 GIS 局部放电的特征气体。

3) SOF₄。SOF₄ 是局部放电特有的分解气体, 可以作为局部放电的特征气体。

4) SO₂F₂。因过热和电弧导致的 SF₆ 分解气体中几乎没有 SO₂F₂, 火花放电时有少量 SO₂F₂ 生成, 局部放电时 SO₂F₂ 含量会大大增加。考虑到火花放

电的间歇性和局部放电的持续性, SO₂F₂ 可作为局部放电的特征气体。

5) S₂F₁₀。表 1 中的 4 种故障都会生成 S₂F₁₀, 但由于高温(高于 200°C)下 S₂F₁₀ 易分解, 如式(15)(16), 因此在过热、故障电弧、火花放电情况下难以检测到 S₂F₁₀。局部放电时, 温度低于 200°C, 因此 S₂F₁₀ 可以稳定存在。

综上所述, SOF₂、SO₂、SO₂F₂、HF、SOF₄ 和 S₂F₁₀ 可作为 GIS 局部放电的特征气体。

2 局部放电分解气体实验

2.1 概述

国内外对 SF₆ 气体由于交直流电晕产生的分解气体进行了研究^[28-29], GIS 内部局部放电类型多样, 如高压尖刺放电、高压接触不良放电、金属颗粒放电等。为了给 GIS 局部放电诊断提供依据, 本文在实验室建立了 GIS 局部放电实体模型, 以研究不同类型局部放电产生的 SF₆ 分解气体的成分和含量。

2.2 实验原理

实验原理见图 3, T₁ 为调压变压器, T₂ 为无晕实验变压器, 型号为 YDTW15 kVA/150 kV; Z_{ch} 为保护电阻; C_x 为 GIS 局部放电模型; C_o 为耦合电容; Z_m 为局部放电检测阻抗; PDM 为局部放电检测、采集系统。PDM 中包括 DS14 型局部放电检测仪、示波器、PC 机, 局部放电检测仪检测到的信号通过示波器和 GPIB 卡传输并保存到 PC 机, 此系统可用于统计局部放电状况。

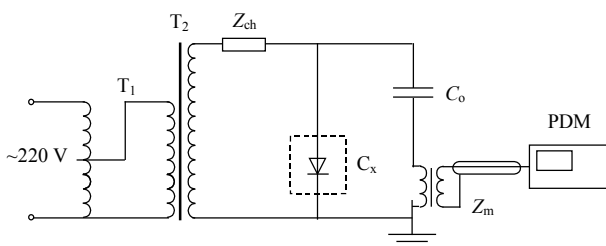


图 3 实验原理

Fig. 3 Experiment principle

2.3 模型设置

本实验在 110 kV GIS 实际腔体内进行, 见图 4。b、c、d 表示气室隔离, a、e 表示气室相通。本文实验所在 3 号气室见图 5, 其容积约为 25 L。

2.4 气体检测方法

分解气体的检测采用气体传感器法, 可检测组分有 SOF₂+SO₂、HF 等。传感器性能指标如下:

1) 灵敏度: SOF₂+SO₂、HF 的浓度 ≤ 0.1 μL/L。

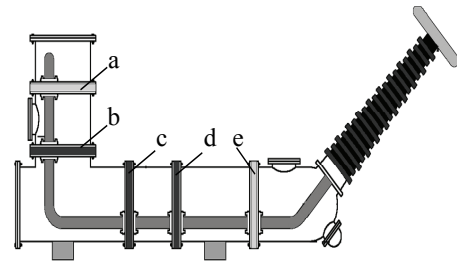


图 4 110 kV GIS 模型

Fig. 4 110 kV GIS model



图 5 3号气室

Fig. 5 The third gas chamber

2) 准确度: SOF₂+SO₂、HF 的浓度 ≤ 2 μL/L 时, 测量误差 ≤ 0.1 μL/L; SOF₂+SO₂、HF 的浓度 > 2 μL/L 时, 测量误差 ≤ ± 0.2 μL/L。

3) 量程: SOF₂+SO₂ 浓度的有效测量量程为 0~100 μL/L; HF 浓度的有效测量量程为 0~30 μL/L。

4) 检测时间: 每加压一定时间检测一次分解气体; 为了排除采气管道内的残气, 每次检测前, 先通 1 min 的检测气, 将管道内残气排掉, 再进行分解气体的检测和分析。

2.5 抽真空及 SF₆ 气体纯度控制

在空气中将模型设置好后, 采用真空泵对实验腔体抽真空, 当腔体气压达到 10 Pa 后, 继续抽 2 h, 最终令腔体气压达到 3.6 Pa。抽真空后, 对实验腔体充气。充气结束后, 气压表读数为 0.32 MPa。采用气相色谱法对 SF₆ 气体纯度进行分析, 结果如表 2 所示, 符合电气设备 SF₆ 气体标准^[30]。

表 2 GIS 实验腔体内气体含量

Tab. 2 Gases' content in GIS experimental cavity

峰号	组分	峰高/mV	保留时间/min	峰面积/mV·s	面积/%	含量/%
1	Air	4.866	0.863	25.920	0.076 12	0.024 37
2	CF ₄	0.073	1.157	0.429	0.001 26	0.000 91
3	SF ₆	820.958	2.686	34 024.925	99.922 62	99.974 72
总计		825.897	—	34 051.273	100.000 00	100.000 00

2.6 高压尖刺放电实验

模型安装方式见图 5。图 6 为高压尖刺放电模型, 高压尖刺材料为铜, 直径为 2 mm, 长度为 26 mm, 尖端与外壳之间的距离为 4 mm。

SF₆ 气压为 0.22 MPa, 实验电压为 20 kV, 局部放电脉冲发生在每个周期的 243°~325°, 放电量为

70~200 pC。持续检测 50 h，每 10 h 检测一次分解气体成分，检测结果见表 3。



图 6 高压尖刺放电模型

Fig. 6 Model of discharge in the high voltage conductor's spine

表 3 高压尖刺放电分解气体检测结果

Tab. 3 Test results of decomposed gases in case of discharge in the high voltage conductor's spine

检测时间/h	SOF ₂ +SO ₂ 浓度/(μL/L)	HF 浓度/(μL/L)
10	0.00	0.00
20	0.01	0.02
30	0.05	0.02
40	0.10	0.00
静置 13	0.25	0.12
50	0.42	0.20
静置 24	0.30	0.00

2.7 高压接触不良放电实验

高压接触不良放电模型见图 7，悬浮金属片与金属夹件之间用绝缘胶带隔离。悬浮金属片材料为铝，尺寸(长×宽×厚)为 20 mm×2 mm×0.8 mm，外露部分长度为 15 mm，尖端与外壳间距离为 15 mm。



图 7 高压接触不良放电模型

Fig. 7 Model of discharge in case of bad contact between the high voltage conductors

SF₆ 气压 0.30 MPa，实验电压(55±5) kV，每周约 1~2 次局部放电，放电量为(1 200±200) pC(背景噪声为 10 pC)，持续检测 10 h，检测结果见表 4。

表 4 高压接触不良放电分解气体检测结果

Tab. 4 Test results of decomposed gases in case of discharge caused by bad contact

检测时间/h	SOF ₂ +SO ₂ 浓度/(μL/L)	HF 浓度/(μL/L)
5	0.0	0.0
6	0.0	0.5
10	0.4	2.0
放电后静置 48	1.3	0.0

2.8 实验结论

1) 高压尖刺放电和高压接触不良放电都会导致 SF₆ 分解，产生 SOF₂、SO₂、HF 气体。

2) 放电过程中的气体检测结果表明，HF 含量高于 SOF₂+SO₂ 的总含量。

3) 放电后气体检测结果表明，HF 化学性质活泼，易消失，SOF₂、SO₂ 化学性质稳定，能够稳定存在。

4) 可根据 HF 含量判断局部放电状态。

3 现场检测实例

本文对 500 kV 罐式断路器分闸前后的气体进行了检测，检测结果表明：

1) 局部放电情况下，SOF₂、SO₂ 和 HF 是 SF₆ 的主要分解产物，在放电量不变的情况下，其含量随着放电时间的延长而增长。

2) 在局部放电发展过程中，HF 的含量高于 SOF₂ 和 SO₂。

3) 由于 HF 化学性质活泼，局部放电停止后，HF 以非常快的速度消失，SOF₂、SO₂ 化学性能稳定，能够长期稳定存在。

4) 500 kV SF₆ 断路器正常分闸电弧产生的分解气体非常少，不会对局部放电故障的检测和诊断造成影响。

5) 被测断路器的开断电流为 300 A，分闸前后的 SOF₂、SO₂ 和 HF 的含量均为 0，SF₆ 断路器正常分、合闸过程中产生的电弧分解气体非常少。

4 结论

本文经分析后认为 SOF₂、SO₂、SO₂F₂、HF、SOF₄ 和 S₂F₁₀ 可作为 GIS 局部放电的特征气体，可据此判断 GIS 内部是否存在局部放电故障。由于条件所限，本文没有对 SO₂F₂、SOF₄、S₂F₁₀ 这 3 种 GIS 局部放电的特征气体进行检测分析，今后应增加对这 3 种气体的检测和分析。在实际运行中，GIS 内的 H₂O、O₂ 等杂质气体，气压和吸附剂会对局部放电时 SF₆ 分解气体的成分和含量产生很大影响，今后还应加强此方面研究。

参考文献

[1] IEC60071-2 Insulation coordination, part 2, application guide[S]. 1996.
 [2] CIGRE WG15.03. Diagnostic methods for gas insulating systems[R]. Paris, 1992.
 [3] Kusumoto S, Itoh S, Tsuchiya Y, et al. Diagnostic technique of gas insulated substations by partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(4): 4196-4206.

- [4] IEC60270 High-voltage test techniques-partial discharge measurement[S]. 2000.
- [5] Bozzo R, Guastavina F, Guerra G. PD detection and localization by means of acoustic measurements on hydrogenerator stator bars [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 660-666.
- [6] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. 基于超高频法的 GIS 局部放电在线监测研究现状及展望[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 40-43.
Qian Yong, Huang Chengjun, Jiang Xiuchen, et al. Present situation and prospect of ultrahigh frequency method based research of on-line monitoring of partial discharge in gas insulated switchgear [J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 40-43(in Chinese).
- [7] 崔在玉, 江昌元, 朴基俊, 等. 预防气体绝缘开关装置故障的超高频局部放电在线实时监控[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 51-54.
Cui Zaiyu, Jiang Changyuan, Piao Jijun, et al. On-line UHF partial discharge monitoring system for prevention of failures in gas-insulated switchgears[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 51-54(in Chinese).
- [8] 王晓蓉, 杨敏中, 严璋. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 41-45.
Wang Xiaorong, Yang Minzhong, Yan Zhang. Review and prospect of rejecting interference in partial discharge measurement of power equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 41-45(in Chinese).
- [9] 张鸣超, 王建生, 邱毓昌. GIS 中局部放电测量用超高频传感器[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 42-44.
Zhang Mingchao, Wang Jiansheng, Qiu Yuchang. UHF sensors for partial discharge measurement in gis[J]. Power System Technology, 1998, 22(8): 42-44(in Chinese).
- [10] 黄兴泉, 康书英, 李泓志. GIS 局部放电超高频检测法有关问题的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 33(7): 36-40.
Huang Xingquan, Kang Shuying, Li Hongzhi. Research on ultra-high-frequency method for detection of partial discharge in GIS[J]. Power System Technology, 2006, 33(7): 36-40(in Chinese).
- [11] Van Brunt R J. Physics and chemistry of partial discharge and corona-recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 761-783.
- [12] 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 SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61 (in Chinese).
- [13] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆ 放分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-669.
Zhang Xiaoxing, Yao Yao, Tang Ju, et al. Actumity and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 664-669(in Chinese).
- [14] 毕玉修, 卞超. 应用 SF₆ 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 diagnose applied on SF₆'s decomposing gases[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(5): 14-17(in Chinese).
- [15] 唐炬, 李涛, 万凌云, 等. SF₆ 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 SF₆ dissociation apparatus under partial discharge and gaseous decomposition components analysis system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1583-1588(in Chinese).
- [16] 李建基. 六氟化硫气体(上)[J]. 大众用电, 2008, 37(4): 37-39.
LI Jianji. SF₆ gas[J]. Popular Utilization of Electricity, 2008, 37(4): 37-39(in Chinese).
- [17] James D R, Sauers I, Griffin G D, et al. Investigation of S₂F₁₀ production and mitigation in compressed SF₆-insulated power systems[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 9(3): 29-40.
- [18] Van Brunt R J, Herron J T. Fundamental processes of SF₆ decomposition and oxidation in glow and corona discharges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 75-94.
- [19] Dincer M S, Raju G R. Monte Carlo simulation of the motion of electrons in SF₆ in uniform electric field[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(11): 6311.
- [20] Yoshizawa T, Sakai Y, Tagashira H, et al. Boltzmann equation analysis of the electron swarm development in SF₆[J]. Journal of Applied Physics, 1979(12): 1839.
- [21] Compton R N, Reinhardt P W, Cooper C D. Collisional ionization between fast alkali atoms and selected hexafluoride molecules [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1978, 68(5): 2023.
- [22] Rapp D, Englander-Golden P. Ionization by electron impact I [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1965(43): 1464.
- [23] Van Brunt R J. Physics and chemistry of partial discharge and corona-recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 761-784.
- [24] Olthoff J K, Van Brunt R J, Herron J T, et al. Catalytic decomposition of S₂F₁₀ and its implications on sampling and detection from SF₆-insulated equipment[C]. IEEE national Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, 1990.
- [25] Tominaga S, Kuwahara H, Hirooka K, et al. SF₆ gas analysis technique and its application for evaluation of internal conditions in SF₆ gas equipment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(9): 4196-4206.
- [26] 胡红红, 周永言, 姚唯建, 等. 浅谈 SF₆ 气体酸度测定在 GIS 设备故障气室判断上的应用[J]. 广东电力, 2006, 19(2): 52-54.
Hu Honghong, Zhou Yongyan, Yao Weijian, et al. Fault chamber judgment for gas insulated switchgears through sulfur hexafluoride acidity test[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(2): 52-54(in Chinese).
- [27] Chu F Y. SF₆ decomposition in gas-insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(5): 693-725.
- [28] Kusumoto S, Itoh S, Tsuchiya Y, et al. Diagnostic technique of gas insulated substation by partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(4): 1456-1465.
- [29] Piemontesi M, Pietsch R, Zaengl W. Analysis of decomposition products of sulfur hexafluoride in negative dc corona with special emphasis on content of H₂O and O₂[C]. Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, USA, 1994.
- [30] GB 8905—1996. 六氟化硫电气设备中气体管理和检修导则[S].



骆立实

收稿日期: 2009-03-23。

作者简介:

骆立实(1977—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电气设备绝缘检测与诊断方面的技术管理及研究工作, E-mail: camells@126.com;

姚文军(1968—), 男, 高级工程师, 主要从事超高压输变电生产管理工作。

(编辑 徐梅)