

# SF<sub>6</sub>压力对GIS典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响

孔凡璐<sup>1</sup>, 马径坦<sup>2</sup>, 谌珉灏<sup>1</sup>, 张潮海<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)内部气压是影响局部放电检测灵敏度的重要因素。在局部放电实验平台中构建尖端、悬浮、气隙与沿面缺陷模型, 基于特高频法、高频电流法与超声法开展气压0.2~0.5 MPa下局部放电信号特征的检测实验, 并对比了高频电流法和超声法局部放电检测的灵敏度。实验结果表明: 气压是影响尖端、悬浮与沿面缺陷放电的关键参数, 3种缺陷放电起始电压与气压成正比, 同一电压下的放电幅值和脉冲次数与气压成反比; 气隙缺陷放电源于绝缘层内部气泡, 因此设备气压对气隙缺陷放电影响不大。高频电流法可实现不同气压下的悬浮缺陷有效检测, 但未测得气隙和尖端缺陷局部放电信号; SF<sub>6</sub>压力降低, 高频电流对沿面缺陷的检测灵敏度有所提升, 但仍低于特高频法。超声法可实现不同气压下的悬浮和尖端缺陷有效检测, 但未测得气隙和沿面缺陷局部放电信号; SF<sub>6</sub>压力降低, 超声法对尖端缺陷的检测灵敏度提高(当气压为0.2 MPa时, 超声法对尖端缺陷的检测灵敏度与特高频法相当)。

**关键词:** 气体绝缘开关设备(GIS); 局部放电; 绝缘缺陷; SF<sub>6</sub>压力; 灵敏度; 放电检测

**中图分类号:** TM854

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0233-09

## 0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)具有占地面积小、可靠性高和安装方便等优点<sup>[1-3]</sup>, 已被广泛应用于电力系统。在出厂、运输、装配和运行过程中, GIS中不可避免地会形成一些绝缘缺陷, 如导体尖刺、壳体尖端、悬浮电极和绝缘子气隙、绝缘子表面金属颗粒等。这些缺陷会导致设备局部电场畸变, 当局部场强达到击穿场强时, 就会发生局部放电(partial discharge, PD)。PD作为绝缘故障的前兆, 一直是判断电气设备绝缘状态的重要依据<sup>[4-6]</sup>。

目前在现场应用较多的PD检测方法主要有特高频法和超声法<sup>[7-12]</sup>。高频电流法在实际GIS中应用较少, 但其成本低、操作简单, 且作为唯一具有国际标准的PD检测方法<sup>[13]</sup>, 可以获得视在放电量, 因此具有一定研究价值。不同检测方法的检测原理和检测频带不同, 因此对不同缺陷PD检测的灵敏度存在差异, 这已经引起了国内外众多学者的关注。文献[14]利用脉冲电流法和超声法对GIS多种缺陷进行检测, 总结了GIS典型故障图谱特征; 文献[15]比较了特高频法和高频电流法检测的灵敏度, 获得了2种方法测得的缺陷放电信号时频特性; 文献[16]研究了超声法和特高频法对不同缺陷检

测的适用性, 并对比了2种方法的优缺点; 文献[17]依托110 kV GIS真型试验平台, 设计了5种典型绝缘缺陷, 在仿真的基础上对缺陷进行实验, 采用雷达图比较了特高频法、超声波法和高频电流法带电检测的灵敏度; 文献[18]采用脉冲电流法和超声法对PD信号进行检测, 结果表明缺陷尺度对不同检测方法的响应速度影响很大; 文献[19]针对110 kV GIS真型试验平台定量对比了特高频法、超声法和高频电流法对不同绝缘缺陷的检测尺度。以上研究表明, 特高频法能有效检测各类缺陷。然而为了降低气体泄漏概率, 一些设备在设计时未预留内置式特高频传感器<sup>[20]</sup>, 且采用铠装绝缘子, 无法使用外置式特高频传感器接收绝缘子浇筑口处泄露的电磁波, 从而限制了特高频法的使用。因此, 亟须对比其他常用检测方法的PD检测灵敏度。

实际GIS中的SF<sub>6</sub>气体压力受气体绝缘强度、设备电压等级等因素的影响, 额定压力在0.3~0.5 MPa之间均有分布<sup>[21]</sup>。气压是影响PD的重要因素之一, 不同气压下不同缺陷的放电特征会有所区别<sup>[22]</sup>, 从而导致PD检测灵敏度的变化。现有对比PD检测方法灵敏度的研究主要集中在单一气压下, 因此研究气压对气体绝缘设备PD检测灵敏度的影响具有重要应用价值。

文中搭建了PD检测实验平台, 基于特高频法、高频电流法和超声法, 研究气压对尖端、悬浮、气隙和沿面这4种缺陷的放电幅值、放电次数的影响, 对

比分析不同气压(0.2~0.5 MPa)下高频电流法和超声波对4种缺陷放电检测的灵敏度,为气体绝缘设备PD检测和故障诊断提供技术支撑。

## 1 实验平台

### 1.1 实验装置

搭建的PD平台等效电路如图1所示。其中,耦合电容 $C_k$ 为50 pF,检测阻抗 $R$ 为50  $\Omega$ , $C_x$ 为被测设备电容。GIS局部放电模拟实验装置如图2所示,该装置可以模拟110~500 kV设备不同缺陷的PD。无局放升压变压器和耦合电容均内置于腔体中,无局放升压变压器为实验装置提供工频交流电压,额定最高输出电压为160 kV,额定电压下PD量不超过1 pC。实验中采用上海某PD700E局放仪及其配套传感器,特高频传感器为内置式特高频传感器,检测频带为300~1 500 MHz;超声传感器涂抹硅胶后用捆扎带固定在装置底部,检测频带为20~500 kHz;高频电流传感器套在装置接地点引线处,检测频带为0.5~30 MHz,灵敏度不小于9 mV/mA。

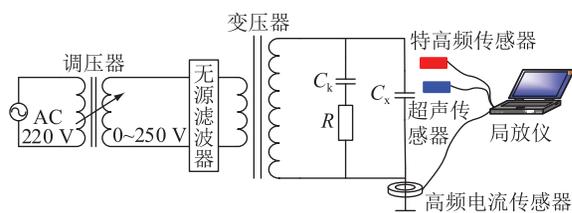
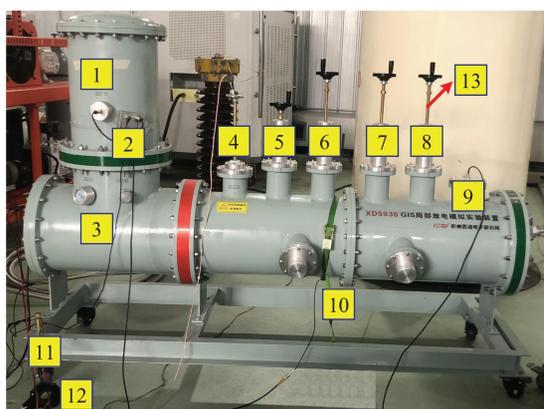


图1 实验等效电路

Fig.1 Experimental equivalent circuit



- 1—耦合电容; 2—检测阻抗; 3—无局放升压变压器;
- 4—脉冲校验杆; 5—尖端模型; 6—悬浮模型; 7—气隙模型;
- 8—沿面模型; 9—内置式特高频传感器; 10—超声传感器;
- 11—接地点; 12—高频电流传感器; 13—模型升降杆。

图2 实验装置

Fig.2 Experimental device

### 1.2 缺陷模型

文中缺陷模型分别放置于图2中的5、6、7、8位置,旋转降下缺陷对应的升降杆即可对模型加压。缺陷模型实物与示意如图3所示,具体包括

尖端、悬浮、气隙和沿面缺陷模型。其中尖端缺陷模型升降杆降到底时,尖端距离母线上的板电极10 mm;其余3种缺陷模型升降杆降到底时,模型均与母线接触。

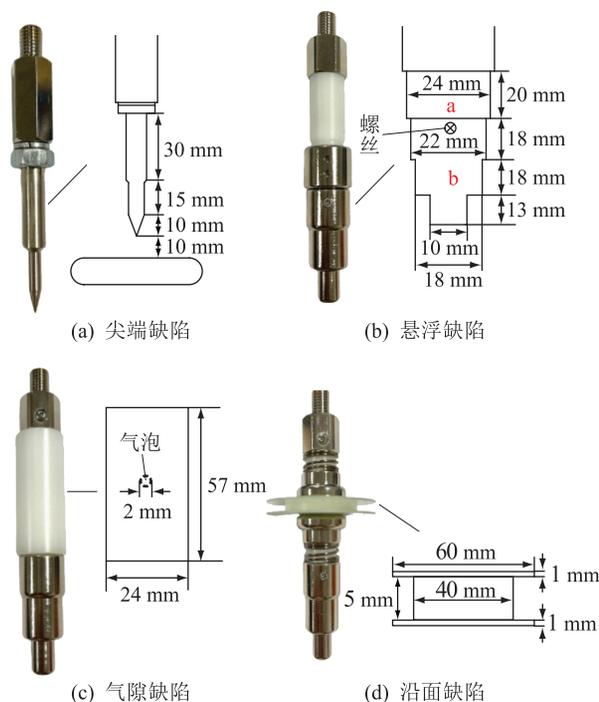


图3 缺陷模型实物与示意

Fig.3 Physical drawings and schematic diagrams of defect models

(1) 尖端缺陷模型。如图3(a)所示,模型由六角金属柱和尖端2个部分构成,中间用螺母和垫圈连接。用针-板放电模拟壳体尖端放电,其中针尖长10 mm。

(2) 悬浮缺陷模型。如图3(b)所示,模型由上、下金属柱和中间环氧支撑柱3个部分构成,其中下金属柱又分为用螺丝连接的a和b两部分。由于a、b由螺丝连接,可能会由于接触不良而形成悬浮电位。

(3) 气隙缺陷模型。如图3(c)所示,模型由上、下金属柱和中间环氧柱3个部分构成,通过在中间环氧柱内制造一个气泡模拟气隙放电,环氧柱高57 mm、直径24 mm,气泡直径2 mm。

(4) 沿面缺陷模型。如图3(d)所示,模型由上、下金属柱和中间主体3个部分构成,中间主体部分由上、下2层薄伞状材料和中间环氧柱构成。由于上、下2层薄伞状材料之间绝缘薄弱,因此会形成爬电,以此模拟沿面放电。伞状板高1 mm、直径60 mm,环氧柱高5 mm、直径40 mm。

### 1.3 实验方法

实验开始前先用酒精擦拭腔体,然后将缺陷

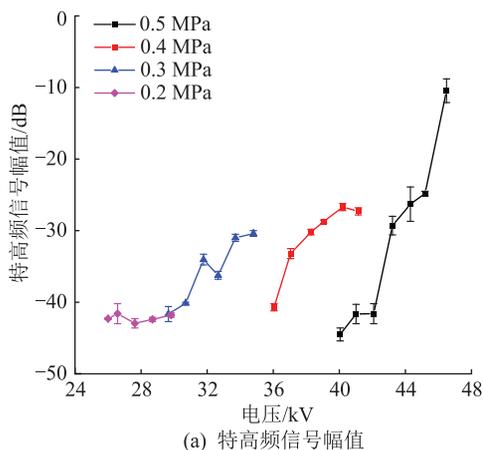
模型安装至腔体,并抽真空。充SF<sub>6</sub>气体至表压为0.5 MPa。旋转缺陷模型升降杆将模型降到底后,对其加压,完成该缺陷实验后将模型旋转升高到初始位置,再进行下一个缺陷实验。由于放电会对缺陷模型造成烧蚀,影响数据准确性,因此在0.5 MPa气压下4个缺陷模型的实验均完成后,应更换缺陷模型,再抽真空,分别充SF<sub>6</sub>气压至表压为0.4 MPa、0.3 MPa和0.2 MPa,并完成相应气压下的实验。

采用阶梯升压法检测4种缺陷PD特征,电压每隔3 min升高1 kV。将局放仪首次检测到重复的PD信号的电压作为放电模型的局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)。实验中采用局放仪记录PD产生的特高频、高频电流、超声信号幅值和放电次数。在相同条件下重复测量5次,取5次测量的平均值作为信号的幅值和放电次数。

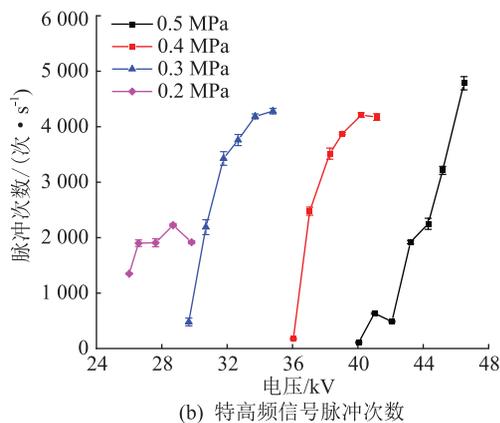
## 2 实验结果

### 2.1 尖端缺陷

尖端放电本质是极不均匀电场气体放电,气体压力是影响尖端放电的关键参数。不同气压下,尖端缺陷放电特高频信号幅值和脉冲次数随电压变化情况如图4所示。根据Paschen定律,气压升高,气体密度增大,电子平均自由程度减小,其在电场中加速获得的动能减小,不易电离,导致气体放电电压升高。由图4可知,气压升高导致尖端放电形成所需PDIV不断上升,起始放电特高频信号幅值和放电次数不断降低。然而,当施加电压超过PDIV时,气压越高,PD发展越快。当气压为0.5 MPa时,电压由起始电压40 kV升高至46 kV,放电幅值由-44.5 dB升高至-10.45 dB,脉冲次数约增加4 674次/s;但当气压为0.2 MPa时,电压由起始电压26 kV升至30 kV,放电幅值仅由-42.3 dB变化至-41.8 dB,脉冲次数约增加567次/s。



(a) 特高频信号幅值



(b) 特高频信号脉冲次数

图4 不同气压下尖端放电特高频信号

Fig.4 Tip discharge UHF signal at different SF<sub>6</sub> pressures

整个实验过程中,超声法在4个气压下均能测到尖端放电信号,高频电流法未测到放电信号。

图5为不同气压下,尖端缺陷放电超声信号幅值随电压变化情况。由图5可知,超声法在4个气压下均能够有效检测尖端放电信号。同一气压下,尖端放电产生的超声信号幅值随电压升高而上下波动;气压降低,超声信号幅值并无明显变化规律。

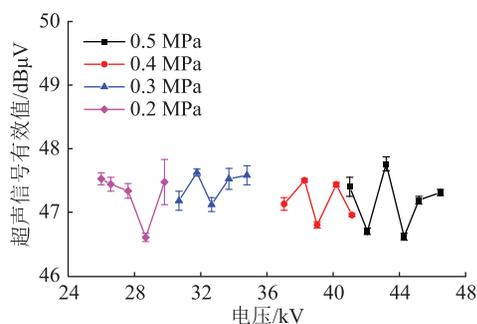


图5 不同气压下尖端放电超声信号

Fig.5 Tip discharge AE signal at different SF<sub>6</sub> pressures

### 2.2 悬浮缺陷

悬浮放电的本质是悬浮体与母线之间的电容放电。气压变化,悬浮放电的放电特性也会发生变化。不同气压下,悬浮缺陷放电特高频信号幅值和脉冲次数随电压变化情况见图6。由图6可知,与尖端放电一致,气压升高导致悬浮缺陷放电形成所需的PDIV不断上升。气压越高,放电特高频信号幅值和次数越低。当外施电压超过PDIV时,悬浮放电特高频信号幅值和脉冲次数随电压升高呈上升趋势。4个气压下放电信号幅值变化曲线均较为平缓,而脉冲次数曲线在低气压下随电压升高变化非常迅速。当气压为0.5 MPa时,电压由起始电压41 kV升高至60 kV,脉冲次数约增加23次/s;当气

压降至 0.2 MPa 时,电压由起始电压 21 kV 升高至 41 kV,脉冲次数约增加 190 次/s。

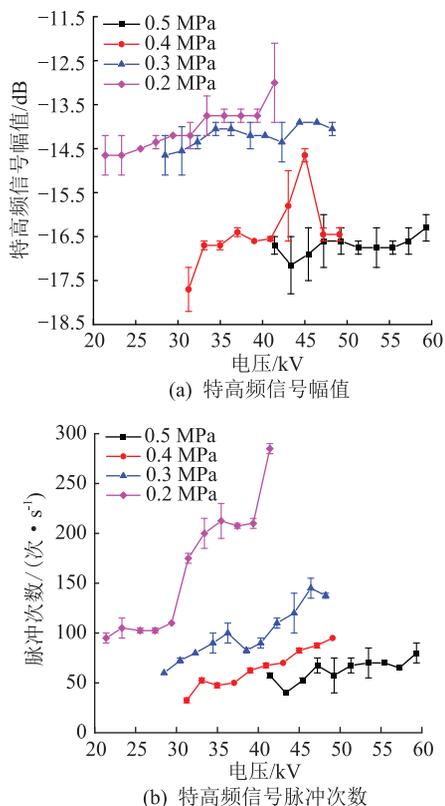


图6 不同气压下悬浮放电特高频信号  
Fig.6 Suspension discharge UHF signal at different SF<sub>6</sub> pressures

图7为不同气压下,悬浮缺陷放电高频电流信号幅值和脉冲次数随电压变化情况。由图7可知,高频电流法在4个气压下均能测到悬浮放电信号,悬浮放电高频电流信号幅值随电压升高而产生波动,高压下高频电流信号幅值比低气压下的幅值高,但脉冲次数明显低于低气压下的脉冲次数。

不同气压下,悬浮缺陷放电超声信号幅值随电压的变化情况如图8所示,超声法在4个气压下均能有效检测悬浮放电信号。与特高频信号变化趋势一致,悬浮放电超声信号幅值也随电压升高而升高。气压越高,放电的超声信号强度越低(0.5 MPa下的放电超声信号有效值明显低于0.2~0.4 MPa下的有效值)。

### 2.3 气隙缺陷

气隙放电的本质是绝缘层内部气隙中的气体放电,因此气隙放电受气压影响不大。图9为不同气压下气隙缺陷放电特高频信号幅值和脉冲次数随电压变化情况。由图9可知,不同气压下气隙放电的PDIV无明显差别。随电压升高,气隙放电的放电幅值和次数呈先升后降再升趋势,因为一开始

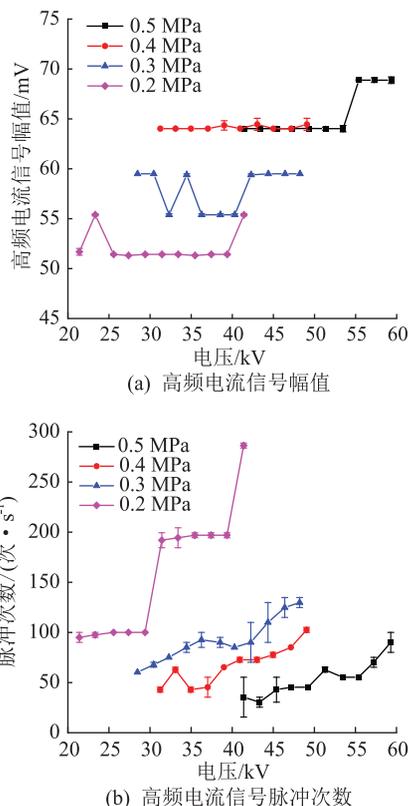


图7 不同气压下悬浮放电高频电流信号  
Fig.7 Suspension discharge HFCT signal at different SF<sub>6</sub> pressures

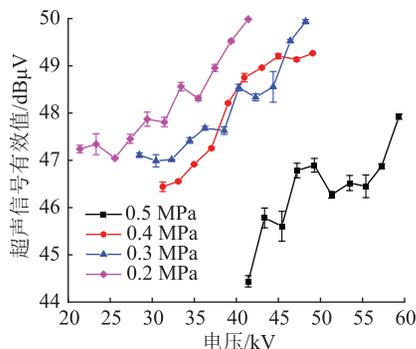


图8 不同气压下悬浮放电超声信号  
Fig.8 Suspended discharge AE signal at different SF<sub>6</sub> pressures

外施电压升高,气隙内场强增大,加剧电子运动,放电有效面积增加,放电幅值和重复率升高。当外施电压继续升高,气隙内的场强升到一定程度时,气隙内气体状态可能会变化,形成半导体放电通道,抑制放电,使放电幅值和重复率降低。此外,高频电流法和超声法在4个气压下均未测得放电信号。

### 2.4 沿面缺陷

实验中该沿面缺陷模型放电的本质为伞状结构之间的气体放电,因此沿面缺陷放电受气压影响也很大。图10为不同气压下沿面缺陷放电特高频信号幅值和脉冲次数随电压变化情况。

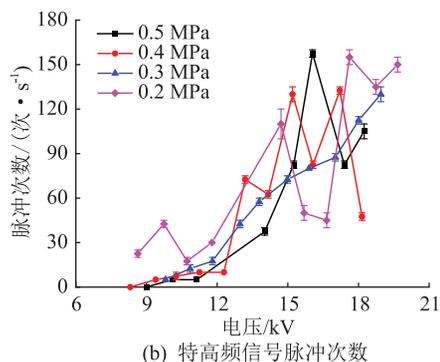
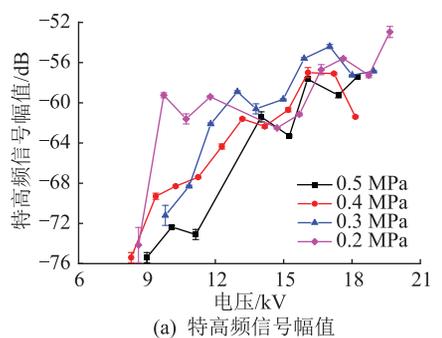


图9 不同气压下气隙放电特高频信号  
Fig.9 Void discharge UHF signal at different SF<sub>6</sub> pressures

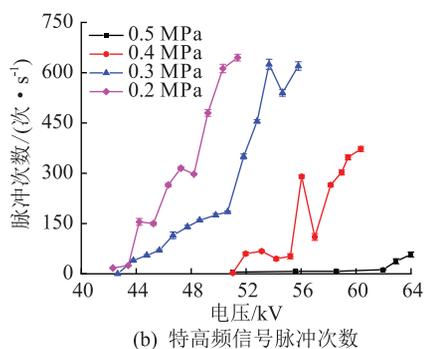
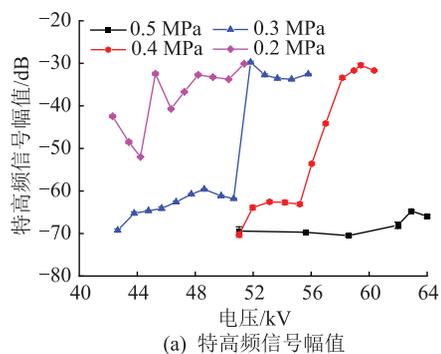


图10 不同气压下沿面放电特高频信号  
Fig.10 Surface discharge UHF signal at different SF<sub>6</sub> pressures

由图10可知,气压越高,沿面缺陷的PDIV越高。电压升高,低气压(0.2~0.4 MPa)的放电幅值远大于高气压(0.5 MPa)的放电幅值。此外,低气压下沿面缺陷放电发展速度比高气压下迅速,当

气压为0.2 MPa时,电压由起始电压42.3 kV升高至51 kV,放电幅值由-42.45 dB升高至-30.1 dB,脉冲次数约增加630次/s;但当气压为0.5 MPa时,电压由起始电压50.3 kV升高至64 kV,放电幅值仅由-69.4 dB升高至-65.95 dB,脉冲次数约增加50次/s。

图11为不同气压下沿面放电高频电流信号幅值和脉冲次数随电压变化图。由图11可知,高频电流法在0.5 MPa时未测得沿面放电信号,在0.2~0.4 MPa可测得放电信号。高频电流信号幅值随着电压升高而升高,且低气压下高频电流随电压升高变化幅度较大。高频电流脉冲次数随着电压的升高,总体呈现上升趋势,但在电压升高过程中,脉冲次数也会有所降低,这是由伞状结构之间形成的爬电不稳定造成的。实验中,高频电流法在3个气压下均未测得放电信号。

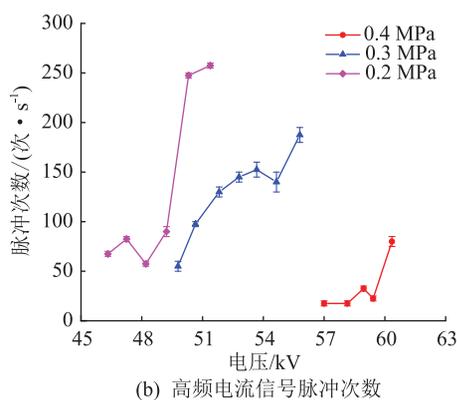
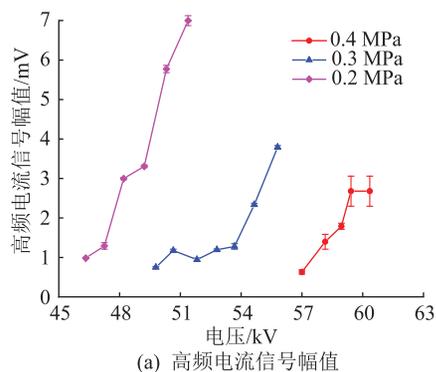


图11 不同气压下沿面放电高频电流信号  
Fig.11 Surface discharge HFCT signal at different SF<sub>6</sub> pressures

## 2.5 小结

低气压下,除了气隙缺陷以外,其他3种缺陷的起始放电电压会明显降低,且同一电压下,低气压下的放电更为剧烈,幅值和次数大于高气压下的幅值和次数。而气隙放电的本质是绝缘材料内部空洞的气体放电,当气泡内的电场强度达到击穿电场强度时,气泡内的气体开始放电,与设备内SF<sub>6</sub>气体

的压强无关。因此设备内部气压的改变对气隙缺陷的放电影响不大。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 高频电流法检测灵敏度分析

表 1 为不同气压下应用高频电流法对 4 种缺陷进行检测的灵敏度的对比。由表 1 可知,高频电流法对实验中采用的尖端和气隙缺陷模型放电不敏感,在 4 个气压下均未测得这 2 种缺陷的放电信号。对于实验中采用的悬浮缺陷模型,高频电流法在不同气压下均能检测到放电信号,且与特高频法灵敏度相当。而对于实验中采用的沿面缺陷模型,高频电流法在 0.5 MPa 时未检测到放电信号,在 0.2~0.4 MPa 能检测到放电信号,但灵敏度不及特高频法。

表 1 不同气压下高频电流法检测灵敏度比较

Table 1 Comparison of the sensitivity of HFCT method at different SF<sub>6</sub> pressures

气压/MPa	缺陷类型			
	尖端	悬浮	气隙	沿面
0.5	/	●●	/	/
0.4	/	●●	/	●
0.3	/	●●	/	●
0.2	/	●●	/	●

注:“/”表示未检测到放电信号;“●”表示检测到放电信号,但灵敏度不及特高频法;“●●”表示检测到放电信号且灵敏度与特高频法相当,下文含义相同。

当外施电压达到缺陷放电电压  $U_c$  时,缺陷开始放电<sup>[23]</sup>,放电电流流入接地线,假设缺陷放电流过接地线的电流为  $i(t)$ <sup>[24]</sup>。

高频电流传感器输出电压  $u(t)$  为<sup>[25]</sup>:

$$u(t) = R_0 i_2(t) = \frac{R_0}{N} i(t) \quad (1)$$

式中: $N$  为次级线圈匝数; $R_0$  为采样电阻; $i_2(t)$  为次级电流。

由式(1)可知,当线圈型号及测试系统连线不变时,高频电流传感器的输出电压与流过接地线的电流  $i(t)$  有关,而  $i(t)$  主要取决于不同气压下的缺陷放电强度。

由实验结果可知,在特高频信号幅值达到 -30 dB 左右,即放电能量到达一定强度时,高频电流法能测得缺陷的放电信号。悬浮缺陷放电属于容性放电,不同气压下一旦开始放电,特高频信号幅值就已超过 -20 dB,放电强度很大,因此高频电流法对悬浮放电检测具有较高的灵敏度。同理,在低气压下电压升高,沿面放电达到一定强度时,

高频电流法也能检测到沿面缺陷的放电信号。SF<sub>6</sub> 压力降低,沿面放电量增加,高频电流法对沿面缺陷的检测灵敏度有所提升。而设备气压变化对气隙放电强度几乎没有影响,气隙的放电强度在 4 个气压下均较小。因此高频电流法未检测到气隙缺陷的放电信号。

然而,实验中尖端缺陷放电特高频信号幅值达到了 -30 dB,高频电流法仍然未能测得电流信号,这可能是尖端缺陷放电的放电机制导致的。尖端缺陷放电属于电晕放电,随着电压升高,放电强度变大,放电次数增加<sup>[26]</sup>,但击穿前针-板放电电流不高<sup>[27-28]</sup>,因此当高频电流传感器精度不够时,很难测得电流信号。且这种电流信号非常容易淹没在噪声中,可以通过提高高频电流传感器精度和优化局放仪降噪算法来提高高频电流法对尖端缺陷的检测灵敏度。

#### 3.2 超声法检测灵敏度分析

表 2 为不同气压下超声法对 4 种缺陷进行检测的灵敏度的对比。由表 2 可知,超声法对气隙和沿面缺陷模型放电不敏感,4 个气压下均未能测到 2 种缺陷的放电信号。针对实验采用的尖端和悬浮缺陷模型,超声法在 4 个气压下均能测得放电信号,且对悬浮缺陷放电的检测灵敏度与特高频法相当。在 0.2 MPa 下,超声法对尖端缺陷放电的检测灵敏度高于其他气压,在放电起始时能检测到缺陷的放电信号。

表 2 不同气压下超声法检测灵敏度比较

Table 2 Comparison of the sensitivity of AE method at different SF<sub>6</sub> pressures

气压/MPa	缺陷类型			
	尖端	悬浮	气隙	沿面
0.5	●	●●	/	/
0.4	●	●●	/	/
0.3	●	●●	/	/
0.2	●●	●●	/	/

超声法的检测灵敏度与超声传播过程中的衰减及缺陷放电强度有关。GIS 局部放电产生的超声波在传播过程中的衰减主要包括扩散衰减和吸收衰减<sup>[29]</sup>。扩散衰减即由于声波波阵面变大而导致声强变弱的现象,仅受波的几何形状影响,与介质无关,因此在分析与介质相关的超声波衰减时,通常可以忽略扩散衰减的影响;吸收衰减即声波在介质中的损耗,环氧树脂和 SF<sub>6</sub> 的声波吸收率高达 100 dB/m 和 26 dB/m,而在小距离和短时间内可以忽略不计声能在金属材料中传播的耗散<sup>[30]</sup>。实验中尖

端缺陷放电产生的超声信号沿着金属传播至外壳,声能损耗较小,因此超声法能有效检测壳体尖端这类缺陷。当气压降低时,尖端缺陷起始放电强度增大,导致超声法检测灵敏度提高,在起始放电时就能有效检测到放电信号。悬浮缺陷放电强度很大,缺陷放电产生的超声信号在穿过SF<sub>6</sub>后仍能透过外壳被超声传感器接收到<sup>[31]</sup>,因此4个气压下,超声法在悬浮放电起始放电时就能检测到信号。而气隙缺陷放电产生的超声信号很难在经过环氧树脂和SF<sub>6</sub>的吸收衰减后,还能透过外壳被接收。同理,虽然低气压下,沿面放电增强,但产生的超声信号在穿过SF<sub>6</sub>后,也很难被检测到。因此,4个气压下超声法均未检测到气隙和沿面缺陷放电信号。由于频率越高,吸收衰减系数越大<sup>[32]</sup>,因此适当降低超声传感器的谐振频率有利于提高气隙和沿面缺陷放电的灵敏度。

此外,实验中尖端缺陷放电的超声信号幅值随电压变化不明显,这可能是由于超声信号的传播过程很复杂,幅值并不能完全反映放电的严重程度,因此虽然电压升高,放电变强,但是尖端缺陷放电的超声信号幅值变化不明显。在采用超声法进行局放检测时,应结合其他可以判断放电严重程度的检测手段。

#### 4 结论

(1) 气压是影响尖端、悬浮和沿面缺陷放电的重要因素。气压越低,这3种缺陷放电起始电压越低,放电的幅值和脉冲次数就越高。尖端缺陷放电在高气压下发展迅速,而悬浮和沿面缺陷放电在低气压下较容易发展,因此对于不同气压工况的设备,应重点关注不同类型的缺陷。气隙缺陷放电源于绝缘层内部空洞气体,因此设备气压对气隙缺陷放电影响不大。

(2) 高频电流法在不同气压下均能有效检测悬浮缺陷,且检测灵敏度与特高频法相当。SF<sub>6</sub>压力降低,高频电流法对沿面缺陷检测的灵敏度有所提升,但仍低于特高频法。高频电流法对缺陷的检测灵敏度主要受不同气压下缺陷的放电量影响。

(3) 超声法在不同气压下能有效检测悬浮和尖端缺陷,且对悬浮缺陷的检测灵敏度与特高频法相当。SF<sub>6</sub>压力降低,超声法对尖端缺陷的检测灵敏度有所提升。超声信号幅值并不能完全反映尖端缺陷放电的严重程度,应结合其他检测手段判断其放电严重程度。

#### 致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021049)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] KOCH H, GOLL F, MAGIER T, et al. Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1448-1453.
- [2] KOCH H. Gas insulated transmission lines-GIL[C] // 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, IL, USA. IEEE, 2008: 1-3.
- [3] 齐波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.  
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [4] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.  
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [5] 王晓康, 牛勃, 马飞越, 等. 电气设备局部放电融合诊断与智能预警系统研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 93-100, 107.  
WANG Xiaokang, NIU Bo, MA Feiyue, et al. Research on fusion diagnosis and intelligent early warning system of partial discharge for electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 93-100, 107.
- [6] 倪鹤立, 姚维强, 傅晨钊, 等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 1-15.  
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, et al. Review on status of technical standards of partial discharge in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 1-15.
- [7] 赵科, 王静君, 刘通, 等. 直流GIL绝缘设计及局部放电检测研究进展[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 98-102, 108.  
ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, et al. A review of insulation design and partial discharge detection of DC gas insulated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 98-102, 108.
- [8] JIANG J, CHEN J D, LI J S, et al. Propagation and localisation of partial discharge in transformer bushing based on ultra-high frequency technique[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 684-692.
- [9] 陈钜栋, 江军, 杨小平, 等. 油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 147-154.  
CHEN Judong, JIANG Jun, YANG Xiaoping, et al. Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated-paper bushing based on UHF technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 147-154.
- [10] ILKHECHI H D, SAMIMI M H. Applications of the acoustic method in partial discharge measurement: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28

- (1):42-51.
- [11] 周秀,吴旭涛,汲胜昌,等. 基于空间电容耦合原理的局部放电电检测方法及其传感器研究[J]. 高压电器,2022,58(4):63-69.  
ZHOU Xiu,WU Xutao,JI Shengchang,et al. Study on partial discharge detection method and sensor based on principle of space capacitive coupling[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(4):63-69.
- [12] 霍天,吴振升,桂俊峰. 高压开关柜局部放电声-电联合定位方法研究[J]. 电力工程技术,2017,36(3):62-66.  
HUO Tian,WU Zhensheng,GUI Junfeng. Acoustic-electric joint localization method of PD in high voltage switch cabinet[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(3):62-66.
- [13] IEC. High voltage test techniques; partial discharge measurements;IEC 60270-2000[S]. Geneva, Switzerland; International Electrotechnical Commission, 2000.
- [14] 李德军,沈威,郭志强. GIS局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J]. 高压电器,2009,45(3):99-103.  
LI Dejun,SHEN Wei,GUO Zhiqiang. Application comparison between conventional and ultrasonic detection methods for GIS partial discharge[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(3):99-103.
- [15] XU Y,LIU W D,GAO W S,et al. Comparison of pd detection methods for power transformers-their sensitivity and characteristics in time and frequency domain[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(5):2925-2932.
- [16] 陈敏,陈隽,刘常颖,等. GIS超声波、超高频局部放电检测方法适用性研究与现场应用[J]. 高压电器,2015,51(8):186-191.  
CHEN Min,CHEN Jun,LIU Changying,et al. Applicability research with field applications on ultrasonic and UHF partial discharge detection methods for GIS[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(8):186-191.
- [17] 杨宁,毕建刚,弓艳朋,等. 110 kV GIS设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究及比较分析[J]. 高压电器,2019,55(8):37-47,57.  
YANG Ning,BI Jiangan,GONG Yanpeng,et al. Experimental research and comparative analysis on live test methods of partial discharge of internal defects in 110 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(8):37-47,57.
- [18] WITOS F,GACEK Z. Application of the joint electro-acoustic method for partial discharge investigations within a power transformer[J]. The European Physical Journal Special Topics,2008,154(1):239-247.
- [19] 刘弘景,李伟,任志刚,等. GIS不同绝缘缺陷的局放检测有效性对比研究[J]. 绝缘材料,2018,51(9):53-60,69.  
LIU Hongjing,LI Wei,REN Zhigang,et al. Comparative study on partial discharge test effectiveness of different insulation defects in GIS[J]. Insulating Materials,2018,51(9):53-60,69.
- [20] 刘泽洪,王承玉,路书军,等. 苏通综合管廊工程特高压GIS关键技术要求[J]. 电网技术,2020,44(6):2377-2385.  
LIU Zehong,WANG Chengyu,LU Shujun,et al. Key technical parameters of UHV GIS in Sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology,2020,44(6):2377-2385.
- [21] 唐炬,胡瑶,姚强,等. 不同气压下SF<sub>6</sub>的局部放电分解特性[J]. 高电压技术,2014,40(8):2257-2263.  
TANG Ju,HU Yao,YAO Qiang,et al. Decomposition characteristics of SF<sub>6</sub> under partial discharge at different gas pressures[J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2257-2263.
- [22] 汪正江,夏红攀. 组合电器局部放电特高频检测的气压影响分析[J]. 电力工程技术,2018,37(3):107-111.  
WANG Zhengjiang,XIA Hongpan. Influence of relationship between UHF signals and discharge quantity of partial discharge under various pressure in gas insulated switchgear[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(3):107-111.
- [23] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002:47-48.  
YAN Zhang,ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing:China Electric Power Press,2002:47-48.
- [24] 唐志国,蒋佟佟,张连根,等. 高频电流法检测电容器局部放电的灵敏度研究[J]. 高压电器,2018,54(6):9-15.  
TANG Zhiguo,JIANG Tongtong,ZHANG Liangen,et al. Study on the detection sensitivity of high-frequency current method to capacitor partial discharge[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(6):9-15.
- [25] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006:18-24.  
WANG Changchang,LI Fuqi,GAO Shengyou. On-line monitoring and diagnosis for power equipment[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006:18-24.
- [26] 庞培川,孙泽明,张芊,等. 负极性直流电压作用下SF<sub>6</sub>气体中极不均匀电场局部放电特性研究[J]. 高电压技术,2019,45(4):1093-1100.  
PANG Peichuan,SUN Zeming,ZHANG Qian,et al. Study on partial discharge characteristics of severe non-uniform electric field in SF<sub>6</sub> under negative DC voltage[J]. High Voltage Engineering,2019,45(4):1093-1100.
- [27] 牛海清,徐乐平,李小潇,等. SF<sub>6</sub>气体正极性电晕放电特性仿真研究[J]. 高电压技术,2021,47(11):4063-4071.  
NIU Haiqing,XU Leping,LI Xiaoxiao,et al. Simulation and study of positive corona characteristics in SF<sub>6</sub> gas[J]. High Voltage Engineering,2021,47(11):4063-4071.
- [28] GAO Q Q,NIU C P,ADAMIAK K,et al. Numerical simulation of negative point-plane corona discharge mechanism in SF<sub>6</sub> gas[J]. Plasma Sources Science and Technology,2018,27(11):115001.
- [29] 杜功焕,朱哲民. 声学基础[M]. 2版. 南京:南京大学出版社,2001.  
DU Gonghuan,ZHU Zhemin. Acoustics foundation[M]. 2nd ed. Nanjing:Nanjing University Press,2001.
- [30] LUNDGAARD L E,RUNDE M,SKYBERG B. Acoustic diagnosis of gas insulated substations; a theoretical and experi-

mental basis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4):1751-1759.

- [31] 黎大健,梁基重,步科伟,等. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J]. 高压电器, 2009, 45(1):72-75.  
LI Dajian, LIANG Jizhong, BU Kewei, et al. Ultrasonic detection of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1):72-75.
- [32] LUNDGAARD L E. Partial discharge XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4):25-31.

作者简介:



孔凡珺

孔凡珺(1998),女,硕士在读,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断(E-mail:kongfj@nuaa.edu.cn);

马径坦(1993),男,博士,工程师,从事电气设备运维检修和状态监测相关工作;

湛珉灏(1998),男,硕士在读,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

## Effect of SF<sub>6</sub> pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS

KONG Fanjun<sup>1</sup>, MA Jingtan<sup>2</sup>, CHEN Minhao<sup>1</sup>, ZHANG Chaohai<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The gas pressure of gas insulated switchgear (GIS) is the key factor affecting the sensitivity of partial discharge (PD) detection. In this paper, four defect models, tip, suspension, void, surface, are constructed on the PD experimental platform. PD experiments are carried out at different pressures, 0.2 MPa-0.5 MPa. Ultra-high frequency (UHF), high-frequency current transform (HFCT) and acoustic emission (AE) methods are used, and the sensitivity of HFCT and AE methods for PD signal detection is compared. The results show that SF<sub>6</sub> pressure is a key parameter affecting tip discharge, suspension discharge and surface defect discharge. Under these defects, the partial discharge initial voltage (PDIV) is proportional to SF<sub>6</sub> pressure, and the discharge amplitude and pulse number are inversely proportional to SF<sub>6</sub> pressure. For the void defect, the change of external SF<sub>6</sub> pressure does not affect the void gas pressure, and thus does not significantly affect the cavity discharge intensity. The HFCT method can effectively detect suspension defects, however, it cannot detect the PD signals of void and tip defects. As the SF<sub>6</sub> pressure decreases, the sensitivity of HFCT method to detect surface defects increases, although the sensitivity is not comparable to that of the UHF method. The AE method can detect suspension and tip defects effectively, but cannot detect PD signals of void and surface defects. The detection sensitivity of the AE method for tip defects gradually increases with the decrease of SF<sub>6</sub> pressure. When the pressure is 0.2 MPa, the detection sensitivity is equivalent to that of the UHF method.

**Keywords:** gas insulated switchgear (GIS); partial discharge; insulation defect; SF<sub>6</sub> pressure; sensitivity; discharge detection

(编辑 方晶 江林)