

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2023.08.004

·输变电·

电晕放电下的SF₆气体特征发射光谱与放电程度识别

赵科,李玉杰,杨景刚,李洪涛,肖焱艳

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211100)

摘要:电晕放电是局部放电的典型形式,长时间电晕放电会引起电气设备的绝缘老化,甚至导致设备在正常运行电压下发生击穿。SF₆气体的强电负性致使低电压或高压放电条件下的光谱信号极其微弱,为此,提出一种特征谱带光信号增强的方式,选取可表征局部放电SF₆气体特征光谱,采用窄带滤光片+光电倍增管的方式,增强特征谱段的光信号,以提高信噪比。首先,模拟黄铜、不锈钢、铝等不同电极材料下的针-板电晕放电,结合SF₆气体的电离分解机理,分析表征电晕放电的激发辐射的粒子特征谱带及其成因。其次,根据特征谱带选取窄带滤光片、光电倍增管、透镜等光学器件并搭建光脉冲信号检测平台,增强特征谱段的光信号响应。最后,在对比分析不同放电阶段光信号特点的基础上,提出识别放电严重程度的指标及阈值,并通过高压电晕放电实验进行有效性验证。本文可为SF₆气体绝缘电气设备的局部放电检测及识别提供参考。

关键词: SF₆; 电晕放电; 发射光谱; 特征谱线; 放电识别

中图分类号: TM855

文献标识码: A

文章编号: 1007-9904(2023)08-0027-08

Characteristic Emission Spectrum and Discharge Degree Identification of SF₆ Under Corona Discharge

ZHAO Ke, LI Yujie, YANG Jinggang, LI Hongtao, XIAO Hanyan

(State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China)

Abstract: Corona discharge is one of typical partial discharge defects. Long-term corona discharge will cause insulation aging of electrical equipment, and even lead to breakdown of equipment under normal operating voltage. The strong electronegativity of SF₆ gas results in extremely weak spectral signals under low-voltage or high-pressure discharge conditions. Therefore, a method for enhancing the characteristic optical signal is proposed. In this method, according to the characteristic emission spectra of SF₆ under corona discharge, the narrow-band filter and a photomultiplier tube are used to enhance optical signal, so as to increase the signal-to-noise ratio (S/N). First, a series of needle-plate corona discharge experiments with different electrode materials such as brass, stainless steel, and aluminum are carried out, and the characteristic spectral band and genesis of the excited radiation particles during the discharge process is analyzed, combined with the mechanism of SF₆ gas ionizing. Then, optical devices such as narrow-band filter, photomultiplier tube, and lenses are selected according to the characteristic spectral band, and an optical pulse signal detection platform is built, so as to enhance the characteristic optical signal. Finally, according to the characteristics of the optical signal during corona discharge, indicators and thresholds for identifying the discharge degree are proposed. Corona discharge experiments under high pressures verify the proposed indicators. A reference is provided in this paper for the detection and identification of partial discharge in SF₆ gas-insulated electrical equipment.

Keywords: SF₆; corona discharge; optical emission spectroscopy; characteristic spectrum; discharge degree identification

0 引言

SF₆气体具有优异的绝缘和灭弧性能,广泛应用于气体绝缘的输变电设备中,如气体绝缘组合电器、

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021024)。

Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company(J2021024)。

气体绝缘输电管道、断路器、气体绝缘变压器等。目前,我国高压电气设备的SF₆气体使用量约占SF₆总产量的80%。在生产制造、安装和运行过程中,SF₆气体输变电设备残留杂质、外力所致的细小划痕等易使设备产生局部高场强并引发局部放电,严重时

可进一步发展为绝缘故障,给电气设备的安全稳定

运行埋下隐患^[1]。根据电气设备发生局部放电时伴随产生的超声波、光辐射、电磁波辐射和气体分解等物理化学现象,当前局部放电检测的方法主要有脉冲电流法、特高频法、超声波法和分解气体法等,这些方法易受设备运行环境中的电磁、背景噪声干扰,在一定程度上限制了其推广与应用。发射光谱法通过检测局部放电产生的光辐射信息进行放电识别与诊断,具有响应速度快、灵敏度高、抗电磁和声信号干扰能力强^[1]等优点,在输变电设备的局部放电检测领域得到广泛关注^[2]。

在 SF₆ 气体放电与发射光谱信息关系研究方面,东京电力有限公司 Fujii K 等^[3]利用光谱仪检测电晕放电下的 SF₆ 气体发射光谱,主要集中在 300~800 nm 谱段,且正极性电晕和负极性电晕放电的发射光谱存在差异。日本名古屋大学 Yoshida S 等^[4]发现局部放电发展过程的三个瞬间中,560 nm 以上波长的 SF₆ 气体发射光谱条纹图像及其光谱分布差异较明显。波兰军事工业大学 Bartnik^[5]利用极端紫外线辐射脉冲辐照 SF₆ 气体,得到 SF₆ 气体从紫外到可见光范围内的光谱分布,其谱线主要由氟离子、氟原子和硫离子的辐射跃迁形成。西安交通大学任明等^[6]研究不同放电类型下 SF₆ 气体的光谱分布和光脉冲的统计特性,提出一种识别局部放电的三角聚类方法。中国科学院电工所李彦飞等^[7-8]研究几种典型的 SF₆ 气体放电缺陷下的发射光谱,并根据光谱分布差异,对不同类型的放电缺陷进行模式识别。

在 SF₆ 气体放电与光脉冲信号关系研究方面,英国索尔福德大学 D.F.Binns 等^[9]利用光电倍增管检测了电晕放电下 SF₆ 气体与 SF₆ 气体/N₂ 的光脉冲信号,并分析施加电压和电极针尖的曲率半径的影响。日本名古屋大学 Naoki Hayakawa 等^[10]通过高时间分辨率电流、光脉冲、局部放电的发光图像等信息,分析交流电压下 SF₆/N₂ 和 C₂F₆/N₂ 混合气体局部放电的产生和发展机制。西安交通大学韩旭涛等^[11]利用荧光光纤和特高频传感器,检测气体绝缘组合电器内部导杆尖刺缺陷和悬浮缺陷,指出荧光光纤法的灵敏度不低于甚至高于特高频法。重庆大学唐炬等^[12]采用荧光光纤传感系统对常见的 SF₆ 气体局部放电缺陷进行检测,对不同放电类型下的光脉冲三维图谱进行识别。

SF₆ 气体是电负性气体,具有很强的捕捉自由电

子的能力,这使得局部放电初期的光信号极其微弱。对于微弱光信号的检测,目前多采用宽谱光信号增强的方式,即同时增大“紫外—可见光—红外”全谱段范围内的光信号,但该方式在增强光信号的同时也增强了本底噪声,导致检测信噪比低。为此,提出一种特征谱带光信号增强的方式,选取可表征局部放电 SF₆ 气体特征光谱,采用窄带滤光片+光电倍增管的方式,增强特征谱段的光信号,提高信噪比。

首先模拟黄铜、不锈钢、铝等不同针电极材料下的工频交流电晕放电,并检测放电过程中的 200~1 037 nm“紫外—可见光—近红外”波段范围内的发射光谱,识别 SF₆ 气体电晕放电的特征谱带。根据特征谱带选取窄带滤光片、光电倍增管、透镜等光学器件并搭建光脉冲信号检测平台,以增强并检测特征谱段的光信号响应。结合特征谱带内光信号均方根的特点,将电晕放电分为三个区域:初始放电阶段,光电倍增管基本检测不到明显的光脉冲信号;放电发展阶段,光信号呈上升趋势,放电程度逐渐加深;临界击穿阶段,光信号上升趋势放缓,针-板间隙有随时被击穿的可能。采用 logistic 模型对电晕放电发展过程中的光信号均方值进行拟合和分析,提出识别放电严重程度的指标及阈值,并通过高压下的电晕放电实验验证所提识别放电严重程度的指标及阈值。

1 实验条件

图 1 为实验装置结构示意图,主要包括高压击穿装置、实验气罐、光谱仪、光电倍增管等模块,可模拟电晕放电至火花放电击穿的全放电过程。

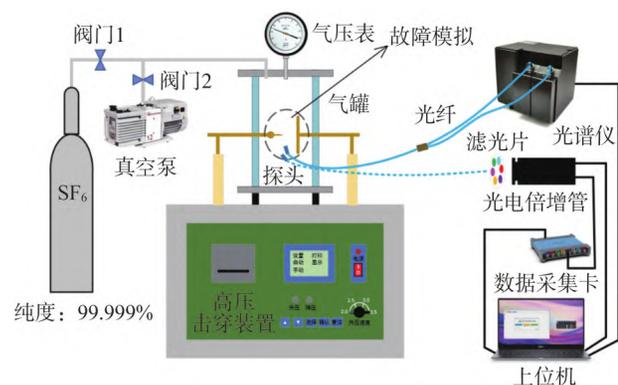


图 1 实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental devices

局部放电故障模拟采用针-板电极模拟。针电极材料分别为黄铜、SUS304 不锈钢和纯铝(直径为 3 mm, 针尖部分长度为 8 mm), 板电极材料为 SUS304 不锈钢(直径为 80 mm, 厚度为 4 mm), 针-板电极间距为 10 mm。实验气罐体积约为 1.7 L。此外, 为避免外界光干扰, 实验系统已与外部光源隔离。

高压击穿装置有两种工作方式: 1) 设定最大值, 使其以恒定的工频交流电压输出; 2) 设定速率升压, 直至间隙被击穿, 自动降压, 然后继续升压, 重复 6 次后停止加压。对于工作方式 1) 来说, 电压保持时间最长为 5 min, 可设定电压最大值为 100 kV, 选取该工作方式进行电晕放电实验。

光谱仪采用 MX2500+ 光谱仪, 用于检测放电产生的光谱信息。光谱波长检测范围为 200~1 037 nm, 其中通道 1 为 200~650 nm, 通道 2 为 650~1 037 nm; 分辨率为 1 nm; 光子积分时间为 10~60 000 ms。光脉冲信号检测采用光电倍增管 PMT2101, 可检测直流到 80 MHz 的信号, 通过 50 Ω 射频线输出, 含内置低通滤波器, 光阴极材料为 GaAsP, 增益的数量级为 10⁶。光谱仪和光电倍增管的石英光纤头装有连接器, 与针-电极尖端等高且水平距离约为 20 cm。

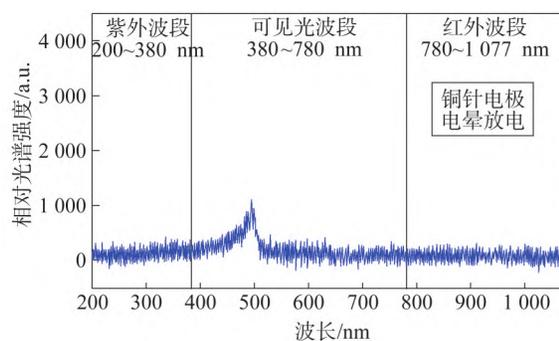
上位机对光谱仪测量的光谱信息进行扣除背景噪声和滤波处理, 即设置光谱仪的模块化程序扣除背景以排除光谱基线的飘移等干扰, 然后再对测量数据进行 Savitzky-Golay(S-G) 平滑滤波。同时, 为增强光脉冲信号的响应幅值, 对光电倍增管测量的信号进行累加和滤波处理, 即对 10 个周期内相位相同的信号进行累加, 取 3 次检测的均值作为最终统计结果, 然后采用 S-G 平滑方法对累加后的信号进行滤波。

实验前对实验气罐进行清洗, 以减小气体杂质、水分等对实验结果的干扰。首先, 用无水乙醇清洗气室内壁及针-板电极。然后, 在实验气罐密封的条件下持续抽真空约 30 min, 再充入 SF₆ 气体(纯度: 99.999%) 静置约 20 min, 如此循环洗气 3~4 次, 进行充分清洁。清洗结束后, 充入绝对气压 0.1 MPa(绝对气压) 的 SF₆ 气体静置 10 h 后进行电晕放电实验。实验的环境温度约为 20 ℃, 空气相对湿度为 10%~30%。

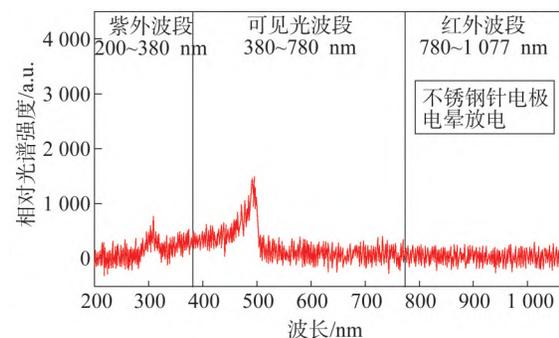
2 SF₆ 气体特征发射光谱

电晕放电和火花放电条件下的 SF₆ 气体发射光

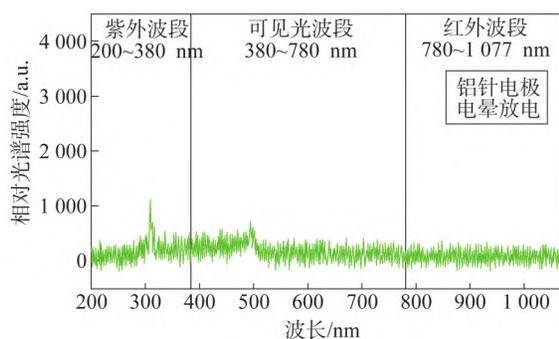
谱分布如图 2 所示, 其中施加电压为 36 kV。从光谱分布上看, 不锈钢针电极和铝针电极下电晕放电的光谱主要集中在通道 1 中的紫外 275~350 nm 波段和可见光 420~510 nm 波段, 铜针电极电晕放电的光谱则主要为 420~510 nm 波段。通道 2 的 650~1 037 nm 波段内基本未检测到光谱信号。



(a) 铜针电极



(b) 不锈钢针电极



(c) 铝针电极

图2 不同针电极材料的电晕放电光谱分布

Fig.2 Emission spectrum of corona discharge with different needle-electrode materials

在 275~350 nm 波段, 308.87 nm 处的发射光谱主要为 OH 自由基的谱峰^[13-15], 由实验罐体中残余的微量水分电离产生, 因此, 308.87 nm 波长附近的相

对光强与微水含量直接相关。虽然在每次实验前均进行充分的抽真空及洗气操作,但微水含量与空气的相对湿度关系较大,因此每次实验的微水含量不稳定。在以黄铜材料为针电极的电晕放电实验中,实验当日的空气相对湿度较低,实验气罐中的微水含量较低,电离产生的OH自由基较少,导致该波长的光强相对较弱。

图2(b)中,不锈钢材料主要成分Fe, C, Cr, Mn, Ni等元素的谱线在紫外波段均有不同程度的分布^[16]。这些元素的原子或离子光谱叠加,使得275~350 nm波段表现为连续的带状分布。图2(c)中,308.22 nm和309.28 nm处均有Al原子的特征光谱,所以铝针电极材料电晕放电光谱中309 nm附近的光谱可能是OH自由基和Al原子的光谱叠加而成,从而使得该处的相对光强增大。

420~510 nm波段主要为SF₆分子及其低氟硫化物分子形成的连续带状光谱^[17-18]:一是在电场作用下,由于SF₆分子内部价电子的能级跃迁,形成由量子化振动能级和旋转能级在SF₆分子基态电子能级上的叠加光谱;二是根据SF₆电晕放电的三区域模型^[19],针尖处的SF₆分子因电子碰撞发生电离,从而生成低氟硫化物SF₅, SF₄, SF₂等。

以不锈钢针电极为例,图3为施加电压为14.5~26.5 kV时,200~650 nm波段内电晕放电的光谱分布。随着施加电压增大,电晕放电程度加深,275~350 nm和420~510 nm波段范围内的光谱相对强度也逐渐增大,且420~510 nm波段的光谱强度明显增大。同时,施加电压为14.5 kV时,即初始电晕放电阶段,光谱信号最早出现在420~510 nm的可见光波段,随着放电程度的加深,275~350 nm波段开始检测到信号。

总体来说,电极材料和微水含量对电晕放电光谱的影响主要集中在紫外波段;SF₆及其低氟硫化物分子所形成的420~510 nm波段光谱相对光强主要受放电强度的影响。因此,将420~510 nm波段作为SF₆电晕放电的特征谱带,采用窄带滤光片+光电倍增管的方式,即基于窄带滤光片的提取光谱在增强该谱带内光信号的同时滤除非特征谱带的光信号,以分析特征谱带光信号强度与放电程度之间的关系。

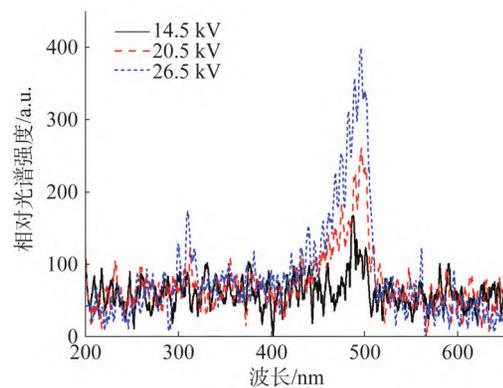


图3 不锈钢针电极材料发射光谱与电晕放电施加电压的关系
Fig.3 Relationship of emission spectra and applied voltages with stainless steel needle-electrode materials

3 特征光谱响应增强及放电程度识别

3.1 特征光谱响应增强

图1中聚焦透镜、光纤、滤光片和光电倍增管等构成特征光谱响应增强模块。通过调整聚焦透镜的位置对电晕放电产生的弱光进行聚焦,增强初始放电的光信号强度;光纤接收端放置在透镜的焦点,另一端连接窄带滤光片+光电倍增管组件,光信号通过光电倍增管的入射窗传入光电阴极。聚焦透镜的透过率如图4所示,对特征光谱具有良好的透过率。滤光片的波长为370~560 nm,对420~510 nm特征谱带的透过率约为90%。光电倍增管的光谱响应范围为300~720 nm,实验中光电倍增管的增益选为70,偏移为0.012。

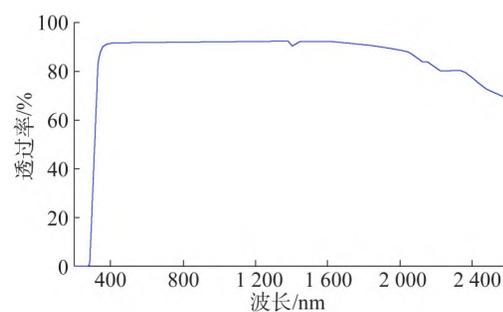
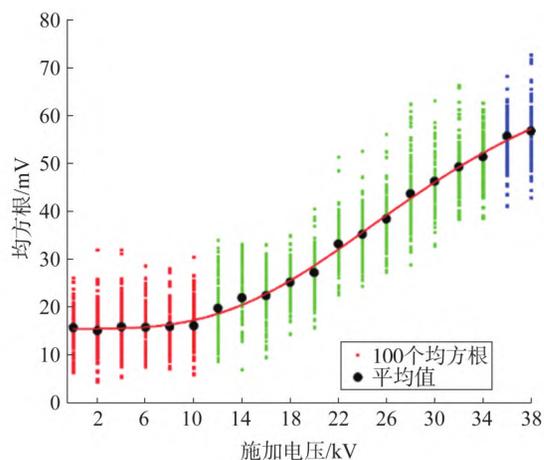


图4 聚焦透镜的透过率曲线
Fig.4 Transmission curve of focusing lens

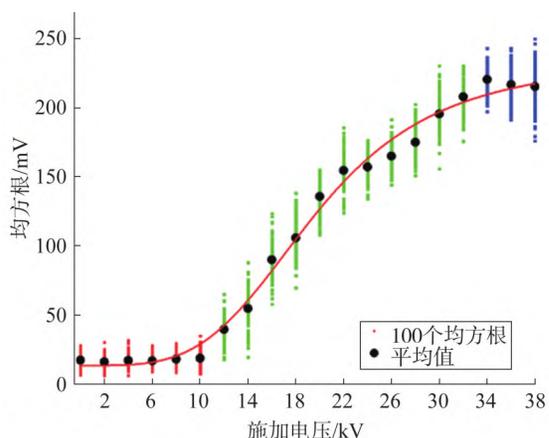
电晕放电实验中,施加电压的范围为0~38 kV,电压间隔为2 kV。每个施加电压下测量的光脉冲信号均按10个周期进行累加,然后再利用式(1)分别计算光信号和施加电压的均方根值,每个施加电压下共计算100组均方根值。光信号强度与施加电压的关系如图5所示。

$$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

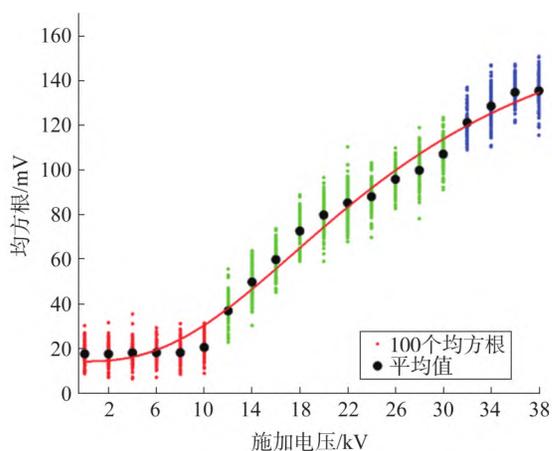
式中: x_{rms} 为均方根值; x_i 为采样值。



(a) 铜针电极



(b) 不锈钢针电极



(c) 铝针电极

图5 不同电极材料下光信号强度与施加电压的关系
Fig.5 Relationship of optical signals and applied voltages with different electrode materials

由图5可知,根据光信号的均方根值判断,放电可大致分为3个区域:1)初始放电阶段,施加电压为0~10 kV,放电产生的光信号强度低,未达到光电倍增管的检测限,光电倍增管基本检测不到明显的光脉冲信号;2)放电发展阶段,施加电压为12~32 kV,光信号呈上升趋势,此时放电程度逐渐加深;3)临界击穿阶段,施加电压为32~38 kV,光信号上升趋势放缓,有饱和趋势,但这一阶段的放电已较为严重,针-板间隙随时有可能被击穿。

3.2 放电程度识别

电晕放电发展的过程中,光信号均方根值随施加电压的变化趋势与sigmoid函数趋势相近,因此采用logistic模型对光信号的均方根值进行回归分析和拟合^[20]。logistics模型的曲线成S型,如式(2)所示。

$$y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \quad (2)$$

式中: A_1 为 x 趋近于零时 y 的最小值; A_2 为 x 趋近于无穷时 y 的最大值; x_0 为曲线拐点; p 与拐点处斜率有关。

3种针电极材料下光信号均方根的拟合曲线如图5所示。设 y_A 、 y_B 、 y_C 分别为铜、不锈钢和铝针电极的光信号均方根的拟合值,其logistic拟合如式(3)~式(5)所示。

$$y_A = 77.9 + \frac{15.42 - 77.9}{1 + \left(\frac{x}{30.35}\right)^{3.15}} \quad (3)$$

$$y_B = 234.35 + \frac{13.27 - 234.35}{1 + \left(\frac{x}{19.74}\right)^{3.8}} \quad (4)$$

$$y_C = 180.56 + \frac{14.25 - 180.56}{1 + \left(\frac{x}{25.35}\right)^{2.39}} \quad (5)$$

3种电极材料下光信号的拟合参数如表1所示,其中, R^2 为相关系数,计算如式(6)所示, R^2 取值在0~1之间, R^2 越大说明拟合效果越好。由表1可见,3种针电极材料下的光信号拟合效果较好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

式中: n 为施加电压次数,间隔为2 kV, $n=20$; y_i 为实际值; \hat{y}_i 为拟合值; \bar{y}_i 为均值。

表1 不同电极材料下光信号的拟合参数
Table 1 Fitting parameters of optical signals with different electrode materials

电极材料	A_1/mV	A_2/mV	x_0/kV	p	R^2
铝	14.25±3.1	180.56±26.03	25.38±3.55	2.39±0.34	0.987 7
铜	15.42±0.42	77.9±6.03	30.35±1.94	3.15±0.26	0.997 1
不锈钢	13.27±3.63	234.35±9.76	19.74±0.64	3.8±0.40	0.992 7

结合电晕放电的实测数据及其放电特征,将初始值 A_1 定义为光信号的基础噪声, A_2 定义为危险放电时光信号均方根的最大值。从图 5 中可以看出,当光信号的均方根值大于 A_1 时,表明已发生局部放电并处于发展阶段;当接近 A_2 时,表明局部放电较严重,并呈现向击穿放电发展的趋势。以铜针电极为例,放电击穿时的平均电压为 40 kV,如图 5(a) 所示,当施加电压为 12 kV 时,光信号的均方根大于 A_1 ,说明发生了局部放电;当施加电压为 34 kV 及以上时,均方根值已接近 A_2 的取值范围,说明局部放电处于严重程度。

由于初始值 A_1 为光信号的基础噪声,实际中,如果仅采用光信号的均方根值来判断放电严重程度,可能会因为随机噪声大而造成误判。因此,采用均方根+信噪比的联合判定方式评价放电的严重程度。信噪比 S/N 的计算如式(7)所示,其中, V_s 为光信号电压的均方根值, V_N 为噪声电压的均方根值。

$$S/N = 20 \lg (V_s/V_N) \quad (7)$$

施加电压 0~38 kV 时 3 种电极材料下光信号的信噪比如图 6 所示,可以看出, S/N 超过 6 时,局部放电的光学信号能被检测到。因此,可将 $S/N=6$ 设为第二阈值。

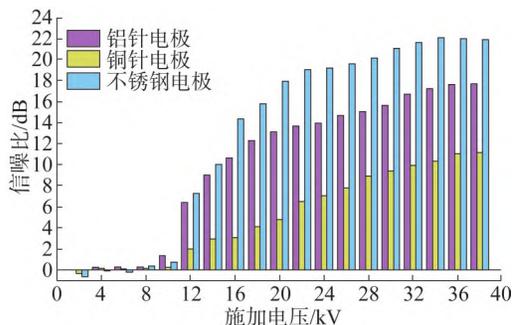


图6 不同电极材料的信噪比

Fig.6 Signal to noise ratios of different electrode materials

根据光信号的均方根及其信噪比,局部放电程度的联合判定流程为:首先计算光信号的均方根值,将 logistic 回归拟合的 A_1 作为衡量放电严重程度的第一阈值;若光信号的均方根大于阈值,则再计算信噪比是否大于第二阈值 S/N ,若同时满足,则判断局部放电开始处于发展阶段,应引起注意; A_2 作为第三阈值,若光信号的均方根接近或大于 A_2 ,随时可能发生间隙击穿放电,为严重放电状态,应预警。

4 实验验证

为验证所提阈值的有效性,采用如图 7 所示的真型 L 套管模型(容积约为 120 L)进行电晕放电实验。其中,针电极材料为铝,板电极材料为不锈钢,电极间距为 10 mm;气体的绝对压力为 0.3 MPa 和 0.4 MPa,接近高压 SF₆ 气体绝缘设备的实际压力;施加电压范围分别为 0~50 kV 和 0~60 kV,电压间隔为 6 kV。考虑到局部放电的不稳定性,每个施加电压下各测 100 组数据,取 100 组数据的均值作为输入,然后以 A_1 、信噪比 $S/N=6$ dB 和 A_2 作为判断放电程度的阈值。

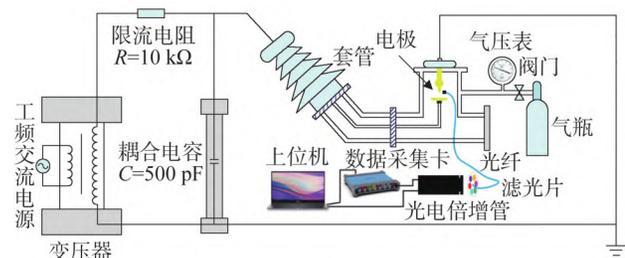
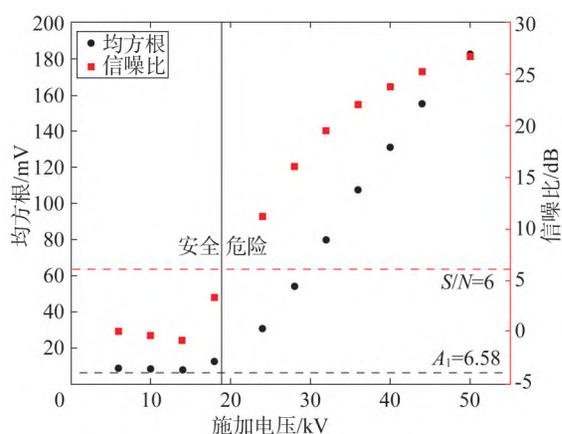


图7 实验验证平台

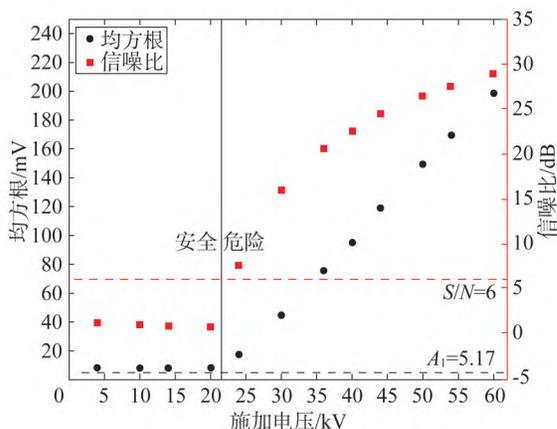
Fig.7 Experimental verification platform

气压 0.3 MPa 下的击穿电压约为 74 kV。如图 8 (a)所示,施加电压为 16 kV 时,光信号的均方根及信噪比均有明显增大,因此可选取 16 kV 为注意值,

施加电压超过 16 kV 时应密切注意;当施加电压为 50 kV 时光信号均方根值已开始与 A_2 ($A_2=(231.84\pm 8.66)\text{mV}$) 接近,判为严重放电。同样地,如图 8(b) 所示,气压 0.4 MPa 下,施加电压阈值为 20 kV,当施加电压超过该阈值时,应引起注意。



(a) 气体绝对压力为 0.3 MPa



(b) 气体绝对压力为 0.4 MPa

图 8 高气压下局部放电程度判断的验证

Fig.8 Verification of partial discharge degree under high gas pressures

5 结论

结合 SF₆ 电离分解机理,探究电晕放电发展过程中的发射光谱特征及其成因,采用窄带光增强的方式依此增强电晕放电特征谱带的光信号。在此基础上,提出用于识别局部放电严重程度的指标和阈值,并进行有效性验证。主要结论如下:

1) 电晕放电的发射光谱集中在紫外 275~350 nm 波段和可见光 420~510 nm 波段。其中,275~350 nm 波段主要为 OH 自由基和金属材料各元素光谱的叠

加,420~510 nm 波段主要是 SF₆ 气体及其低氟硫化物分子形成的连续带状光谱,可选取 420~510 nm 波段作为 SF₆ 气体电晕放电的特征谱带。

2) 根据特征谱带内光信号均方根的特点,可将电晕放电分为 3 个区域:初始放电阶段,光电倍增管基本检测不到明显的光脉冲信号;放电发展阶段,光信号呈上升趋势,放电程度逐渐加深;临界击穿阶段,光信号上升趋势放缓,针-板间隙有随时被击穿的可能。

3) 将 logistic 回归拟合中表征基础噪声的 A_1 和光信号均方根的最大值 A_2 以及信噪比作为判断放电严重程度的指标。若局部放电过程中光信号的均方根大于 A_1 且信噪比大于阈值,说明局部放电已处于发展阶段,应引起注意;若光信号的均方根接近或超过 A_2 ,局部放电处于严重放电状态,应及时预警。

参考文献

- [1] 潘长明,刘刚,熊炬,等.高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J].高压电器,2011,47(7):90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis and countermeasures [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [2] REN M, DONG M, LIU J. Statistical analysis of partial discharges in SF₆ gas via optical detection in various spectral ranges [J]. Energies, 2016, 9: 152.
- [3] FUJII K, YAMADA M, TANAKA A, et al. Emission-spectrum of partial discharge light in SF₆ gas [C]//Conf. Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1992: 332-335.
- [4] YOSHIDA S, KOJIMA H, HAYAKAWA N, et al. Light emission spectrum depending on propagation of partial discharge in SF₆ [M]. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008: 365-368.
- [5] BARTNIK A, WACHULAK P, FIEDOROWICZ H, et al. EUV induced low temperature SF₆-based plasma [J]. Journal of Instrumentation, 2016, 11: 11.
- [6] REN M, SONG B, ZHUANG T, et al. Optical partial discharge diagnostic in SF₆ gas insulated system via multi-spectral detection [J]. ISA Transactions, 2018, 75: 247-257.
- [7] 李彦飞,汤贝贝,韩冬,等.SF₆ 放电的发射光谱特性分析与放电识别.电工技术学报,2022,37(7):1 866-1 874.
LI Yanfei, TANG Beibei, HAN Dong, et al. Spectroscopy analysis of emission spectrum characteristics and discharge recognition of SF₆ gas discharge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1 866-1 874.
- [8] 汤贝贝,韩冬,李彦飞,等.基于特征发射光谱的SF₆电晕放电检

- 测[J].电工电能新技术,2022,41(8):71-78.
- TANG Beibei, HAN Dong, LI Yanfei, et al. SF₆ needle-plate corona discharge detection based on characteristic emission spectrum [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2022,41(8):71-78.
- [9] BINNS D F, MUFTI A H, MALIK N H. Optical discharge detection in SF₆-insulated systems [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990,25(2):405-414.
- [10] HAYAKAWA N, HATTA K, OKABE S, et al. Streamer and leader discharge propagation characteristics leading to breakdown in electronegative gases [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006,13(4):842-849.
- [11] 韩旭涛,刘泽辉,李军浩,等.基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6760-6769.
- HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(22):6760-6769.
- [12] 唐炬,曾福平,范庆涛,等.基于荧光光纤检测GIS局部放电的多重形谱识别[J].高电压技术,2014,40(2):465-473.
- TANG Ju, ZENG Fuping, FAN Qingtao, et al. Multifractal spectrum identification of partial discharge in GIS based on fluorescence optical fiber detection [J]. High Voltage Engineering, 2014,40(2):465-473.
- [13] SARANI A, NIKIFOROV A Y, LEYS C. Atmospheric pressure plasma jet in Ar and Ar / H₂O mixtures: Optical emission spectroscopy and temperature measurements [J]. Physics of Plasmas, 2010,17(6):063504.
- [14] BENSTAALI B, BOUBERT P, CHERON B G, et al. Density and rotational temperature measurements of the OH^o and NO^o radicals produced by a gliding arc in humid air [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002,22(4):553-571.
- [15] 严建华,戴尚莉,李晓东,等.气液两相滑动弧放电中自由基的光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2008(8):1851-1855.
- YAN Jianhua, DAI Shangli, LI Xiaodong, et al. Emission spectroscopy diagnosis of the radicals generated in gas-liquid phases gliding arc discharge [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008(8):1851-1855.
- [16] 郑经国,计子华,余兴.原子发射光谱分析技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [17] LI H, WU X, LI C, et al. Study of spatial and temporal evolution of Ar and F atoms in SF₆/Ar microsecond pulsed discharge by optical emission spectroscopy [J]. Plasma Science and Technology, 2019,21(7):65-72.
- [18] CASANOVAS A M, CASANOVAS J, DUBROCA V, et al. Optical-detection of corona discharges in SF₆, CF₄, and SO₂ under DC and 50Hz AC voltages [J]. Journal of Applied Physics, 1991,70:1220-1226.
- [19] VAN BRUNT R J, HERRON J T. Fundamental processes of SF₆ decomposition and oxidation in glow and corona discharge [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1990,25(1):75-94.
- [20] 林济铿,任怡睿,闪鑫,等.基于Logistic回归深度神经网络的电力系统故障概率诊断[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2021,54(2):186-195.
- LIN Jikeng, REN Yirui, SHAN Xin, et al. Power system fault probability diagnosis based on the Logistic regression deep neural network [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021,54(2):186-195.

收稿日期:2022-12-06

修回日期:2023-06-08

作者简介:

赵科(1985),男,硕士,高级工程师,从事电气设备故障检测与诊断工作;

李玉杰(1991),男,硕士,高级工程师,从事电气设备故障检测与诊断工作;

杨景刚(1984),男,硕士,高级工程师,从事电气设备状态评价工作;

李洪涛(1987),男,博士,高级工程师,从事高压开关电器相关工作;

肖焱艳(1992),女,博士,工程师,从事电气设备故障检测与诊断工作。

(责任编辑 姜婷婷)