

波前时间对 GIS 典型绝缘缺陷放电特性的影响

刘轩东¹, 张伶俐¹, 谭向宇², 陈 铭¹, 吴治诚¹, 杜乾栋¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

摘 要: 为了解 GIS 各类绝缘缺陷在遭受过电压侵袭时的状况, 研究了冲击电压波前时间对 GIS 典型绝缘缺陷 50% 放电电压 (U_{50}) 以及伏秒特性的影响。实验发现, 表面附着金属微粒的绝缘子和棒-板间隙 U_{50} 随波前时间增加呈 U 形变化趋势; 而同轴母线附着针凸起间隙的 U_{50} 随波前时间增加近似呈线性增长, 并逐渐趋于稳定值。研究了波前时间对伏秒特性的影响, 实验发现, 棒-板间隙伏秒特性曲线形状随外施电压波前时间变化而变化, 且间隙距离 d 增加, 最低击穿电压升高, U 型伏秒特性曲线拐点有右移趋势。当缺陷类型为同轴母线附着凸起物时, 随着波前时间增加, 击穿电压分散性变大, 伏秒特性曲线也变得平坦, 且凸起物为针时, 随着针长 l 增加, 击穿电压降低, 分散性变小, 击穿发生在曲线拐点之后的概率增大。分析可知, 可用空间电荷的形成、迁移以及复合状况来解释以上实验结果。

关键词: SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备; 波前时间; 典型绝缘缺陷; 50% 放电电压; 伏-秒特性

Influence of Wave Front Time on Discharge Characteristics of GIS Typical Insulation Defects

LIU Xuandong¹, ZHANG Lingli¹, TAN Xiangyu², CHEN Ming¹, WU Zhicheng¹, DU Qiangdong¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Yunnan Power Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: In order to find out the status of various insulation defects when they suffer from different overvoltages, we studied the influences of wave front time (t_f) on the 50% discharge voltage (U_{50}) and voltage-time ($U-t$) characteristic of GIS typical insulation defects. The results show that, with t_f increases, U_{50} of insulator with metallic conducting particle attached to its surface and rod-plate gap presents a "U" shaped curve. However, U_{50} of coaxial bus with a needle attached to it increases approximately linearly with t_f increases, and gradually approaches to a stable value. The $U-t$ characteristic is studied and results show that the form of $U-t$ characteristic curve of the rod-plate electrode changes with t_f , and when gas gap distance (d) increases, the minimum breakdown voltage increases, the inflection point of $v-t$ characteristic curve moves right too. When choosing coaxial bus with protrusion attached to it as the insulation defect, with t_f increasing, the breakdown voltages become more decentralized, the $U-t$ characteristic curve becomes flat. Moreover, when the protrusion is a needle, with the length (l) of needle increasing, the breakdown voltages become lower and less decentralized, and the probability of breakdown occurrence after the inflection point of $v-t$ characteristic curve rises. According to the analysis, we can use the ionization, diffusion and recombination of space charges to explain the above phenomena.

Key words: gas-insulated metal-enclosed switchgear; wave front time; typical insulation defects; 50% discharge voltage; voltage-time characteristic

0 引言

SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备 (gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS) 性能优异, 自 20 世纪 60 年代中期问世以来得到了迅速发展。与传统的敞开式空气绝缘开关设备相比, GIS 具有占地面积小、可靠性高、安全性能强、环境适应能力强等一系列优点, 在国内外电力系统中应用广泛^[1-2]。

GIS 的绝缘系统是复合绝缘系统, 主要包括固

体绝缘和气体绝缘两方面, 绝缘性能优劣是评价 GIS 可靠性的一项重要指标。随着电压等级不断提高, 由 GIS 内部绝缘缺陷造成的绝缘击穿事故越来越多, 严重影响电力系统安全稳定运行。尽管 GIS 宏观上属于稍不均匀电场结构, 但实际中由于粉尘、导电微粒侵入, 或者因为加工工艺不当, 运输、拆装过程中磕碰等原因, 会不可避免地在其内部出现缺陷, 引起局部电场集中。现场试验作为 GIS 设备投运前的最后一道关卡, 是提高入网质量的重要保

障[3-6]。

现场试验包含工频耐压试验、局放试验、冲击电压试验等,其中,冲击电压试验是检测异常电场结构的一种行之有效的方法[7-11]。IEC 62271-203[12]及 GB 7674—2008[13]规定,对 252 kV 及以上 GIS 设备要进行雷电冲击电压试验。但是,随着试品电容量不断提高,现场无法产生标准的雷电冲击电压。DL/T 555—2004 规定,现场可以开展长波前(波前时间可延长至 $8\text{ }\mu\text{s}$)雷电冲击试验[14]。此外国家电网也提出,用 $3\text{ }\mu\text{s}$ 雷电代替标准雷电来进行现场试验。但是此类冲击电压和标准雷电冲击电压波前时间相差较大,用此类冲击电压进行试验,能否有效地检测出 GIS 的绝缘缺陷,值得深入研究[15-18]。

本文研究 GIS 典型绝缘缺陷在冲击电压作用下的放电特性,包括 50%放电电压和伏-秒特性,着重分析了波前时间对放电特性的影响,以期确定为 GIS 现场冲击电压试验波形提供一定的参考。

1 实验装置及方法

本文设计了一套全封闭、油浸式陡前沿冲击试验装置[19-20]绝缘缺陷的放电特性研究,装置结构如图 1 所示。通过调节波前、波尾电阻,可产生不同参数冲击电压波形。图 2 为实验所采用的不同双指数冲击电压波形,波前时间分别为 $0.08\sim 23.5\text{ }\mu\text{s}$,波尾时间在标准雷电冲击范围 $40\sim 60\text{ }\mu\text{s}$ 内。

实验测量系统包括安装在 GIS 实验腔体观察窗内的锥形电容分压器、双层屏蔽电缆、同轴积分器和示波器。经标定,测量系统平均分压比为 36263,测量不确定度在 $-2\%\sim 2\%$ 范围内;示波器型号为 Tektronix DPO4104,带宽为 1 GHz ,采样率为 5 GHz ,能满足实验测量要求。

GIS 典型绝缘缺陷包括固体绝缘结构缺陷和气体绝缘结构缺陷两大类。GIS 中固体绝缘主要为绝缘子,本文采用的试品绝缘子为 110 kV 支柱绝缘子和盆式绝缘子,在绝缘子表面用环氧树脂粘附钢针模拟其表面出现金属微粒的缺陷状态。支柱绝缘子表面钢针直径 0.56 mm ,长 4 mm ,钢针粘附于近高压电极侧,且端面与绝缘子上端面平齐;盆式绝缘子表面钢针直径 0.56 mm ,长 8 mm ,钢针粘附于紧贴高压电极处。钢针的粘附位置如图 3 所示。

当 GIS 中气体绝缘结构出现缺陷时,也会出现极不均匀电场。本文采用如图 4 所示的间隙距离可变的棒-板电极和同轴母线附着凸起物电极结构来

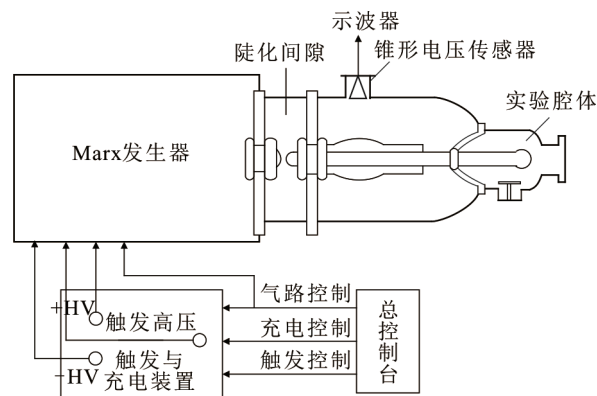
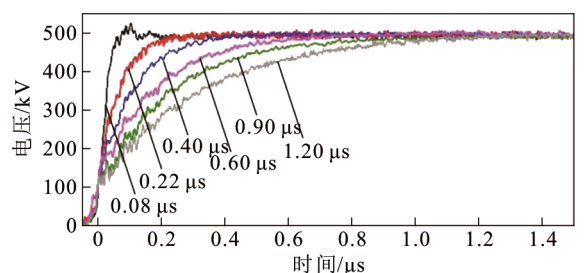
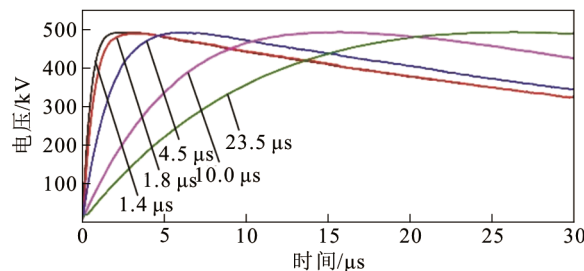


图 1 1 MV 陡前沿冲击试验装置结构图

Fig.1 Configuration of 1 MV steep-fronted impulse generator



(a) $0.08\sim 1.20\text{ }\mu\text{s}$ 双指数冲击电压



(b) $1.40\sim 23.5\text{ }\mu\text{s}$ 双指数冲击电压

图 2 不同波形参数双指数冲击电压波形图

Fig.2 Double exponential impulse voltages with different waveform parameters

模拟 GIS 气体间隙中局部电场集中的情况。棒-板电极结构中,棒电极曲率半径 $r=0.5\text{ mm}$,平板电极选取直径 $D=300\text{ mm}$ 的 Rogowski 电极,间隙距离 d 取 $33, 45, 60\text{ mm}$;同轴母线附着凸起物采用内/外径为 $72\text{ mm}/230\text{ mm}$ 的同轴结构,凸起物为尖端曲率半径 $r=0.5\text{ mm}$ 的金属棒和曲率半径极小约为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的针,凸出长度 l 取 $3, 5, 10\text{ mm}$ 。

50%放电电压由升降法获得,电压步长为预估 50%放电电压的 2% ,连续两次施加电压时间间隔为 4 min ,实验中有效数据点 ≥ 20 个。进行伏-秒特性实验时,保持一定的电压波形而逐级升高电压,若在波头处击穿,电压取击穿时刻电压值,若在波尾处击穿,电压取击穿前实验电压的最大值。将放电

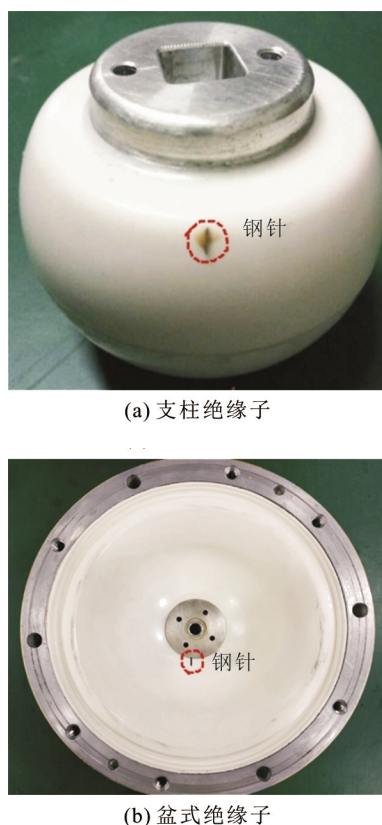


图 3 附着金属微粒的绝缘子实物图

Fig.3 Insulator with conductive particle attached to its surface

电压与其对应时刻描绘在坐标系中即可得到间隙放电的伏-秒特性。

实验时, 绝缘子及棒-板电极间隙的气压为 0.5 MPa, 同轴母线附着凸起物电极间隙的气压为 0.6 MPa。本文不考虑冲击电压极性对 GIS 典型绝缘缺陷放电特性的影响, 故研究气体绝缘结构的放电特性时均采用正极性冲击电压。

2 实验结果及分析

2.1 波前时间对 GIS 典型绝缘缺陷放电电压的影响

研究了双指数冲击电压作用下, 波前时间 t_f 对 GIS 典型绝缘缺陷放电电压的影响。选取试品分别为表面存在缺陷的绝缘子、棒-板电极以及同轴母线附着针凸起电极结构 (间隙距离 $d=33$ mm)。实验结果如图 5 所示。

表面附着金属微粒的绝缘子 U_{50} 随波前时间增加先降低后升高, 呈 U 形变化趋势, 支柱绝缘子 U_{50} 经极小值点后上升速度更快, 而盆式绝缘子 U_{50} 随波前时间变化的曲线相对平坦, 如图 5(a)所示。棒-板间隙 U_{50} 随波前时间增加同样呈现 U 形变化趋势, 且间隙增长, U 形趋势更加明显, 如图 5(b)

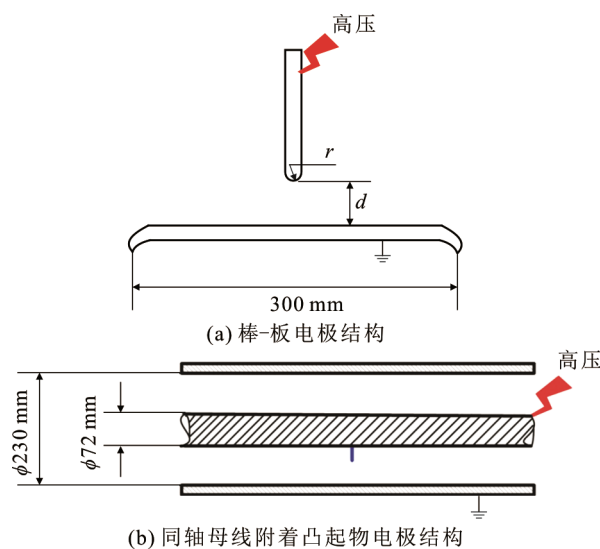


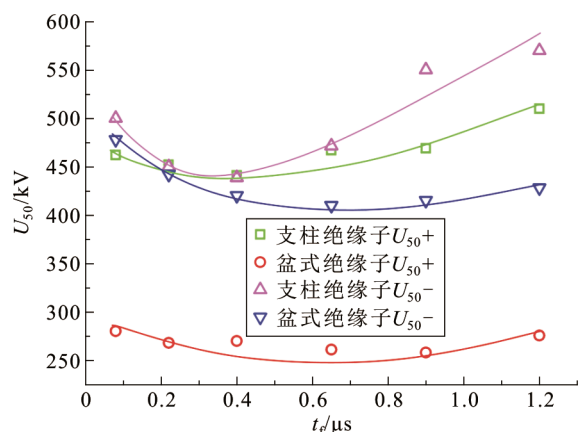
图 4 电极结构

Fig.4 Electrode structure

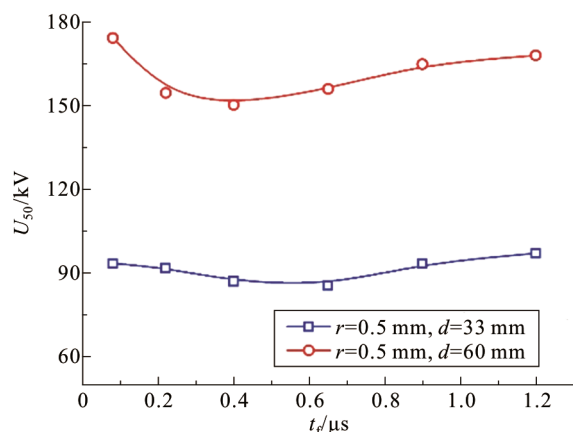
所示。同轴母线附着针凸起间隙的 U_{50} 随波前时间变化规律如图 5(c)所示。可以看出, 随着波前时间增加, 间隙 U_{50} 整体呈增大趋势, 并没有出现类似绝缘子及棒-板间隙的 U 形曲线。且当波前时间足够长时, U_{50} 逐渐趋于稳定。

由于绝缘子表面缺陷附近以及棒端部电场集中, 出现极不均匀电场, 故分析其 $U_{50}-t_f$ 曲线的 U 形变化趋势与放电时延及空间电荷的形成、迁移均有关系。在 U 形曲线极小值左半枝中, 放电时延起主要作用, 当外施电压波前时间缩短, 相当于放电时间缩短, 故击穿电压升高; 而在右半枝中, 击穿主要与空间电荷有关, 外施电压作用时间增长, 空间电荷迁移范围增大, 电晕稳定化作用改善了电晕电极附近电场从而提高了击穿电压。因为支柱绝缘子是垂直结构, 放置在 GIS 中对其稍不均匀电场影响较小, 故金属微粒的存在对绝缘子表面电场影响更大, 同样, 间隙距离增长, 棒端部的电场更不均匀, 因此, 这两种情况下 U_{50} 随波前时间变化曲线的 U 形趋势更加明显。

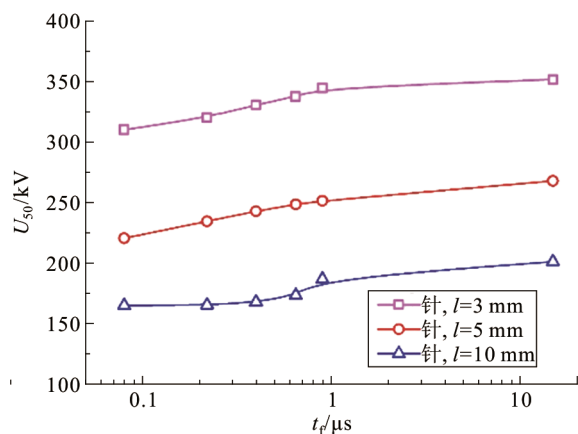
对于同轴母线附着针凸起电极结构, 从整体来看, 母线间是一个受扰动的稍不均匀电场, 但针凸起尖端电场集中情况严重, 属于极不均匀电场。由于该电极结构放电均从针尖端起始, 此时, 电极曲率半径极小, 电晕稳定化作用已经占主导地位, 波前时间对击穿电压的作用几乎可以忽略不计, 故击穿电压随波前时间增加而上升, 并逐渐接近持续作用电压下的稳定击穿电压值。



(a) 绝缘子(图中正负表示电压极性)



(b) 棒-板电极



(c) 同轴母线附着针凸起电极

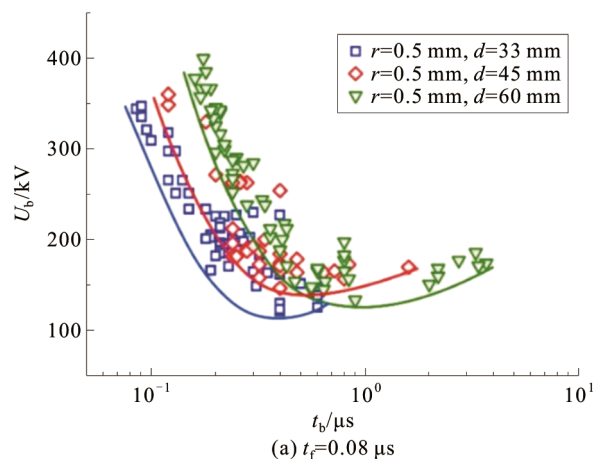
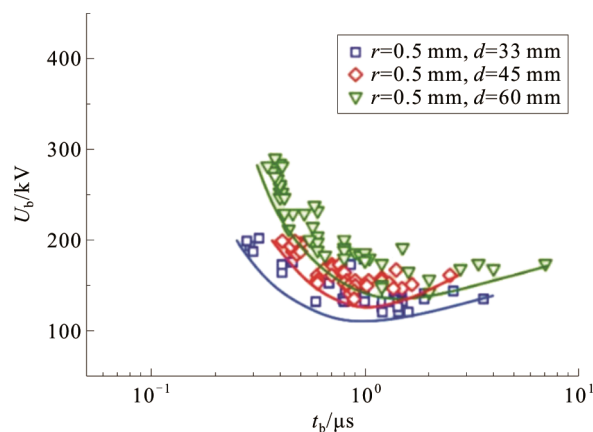
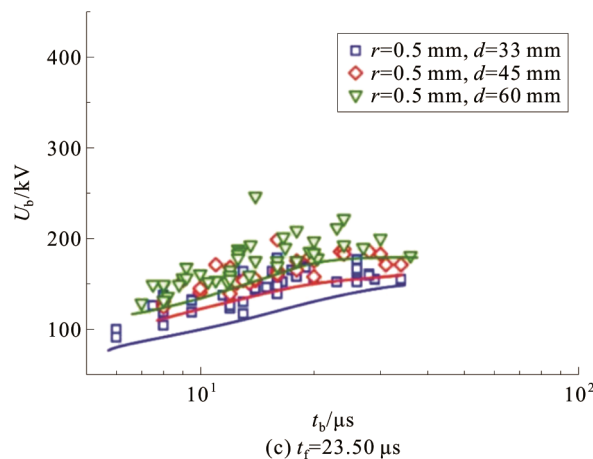
图5 波前时间对GIS典型绝缘缺陷 U_{50} 的影响Fig.5 Influence of wave front time on U_{50} of GIS typical insulation defects(a) $t_f=0.08 \mu s$ (b) $t_f=1.20 \mu s$ (c) $t_f=23.50 \mu s$

图6 棒-板电极伏秒特性随间隙距离变化规律

Fig.6 Law of $U-t$ characteristics changing with d of rod-plate electrode

2.2 波前时间对GIS气体绝缘结构缺陷伏-秒特性的影响

2.2.1 波前时间对棒-板电极间隙伏-秒特性的影响

研究了不同波前时间双指数冲击电压作用下棒-板电极 SF_6 气体间隙的伏秒特性随间隙距离变化的情况,实验结果如图6所示,图中的实线为手绘的0%伏秒特性曲线拟合结果, U_b 为击穿电压,

t_b 为放电时刻。

由图中可以看出,当波前时间较短 ($t_f=0.08 \mu s$, $t_f=1.2 \mu s$) 时,间隙的伏秒特性是一条近似U形的曲线,具体分析同2.1节。当波前时间较长 ($t_f=23.5 \mu s$) 时,随着击穿时间的增长,间隙放电电压整体呈上升趋势。这是因为:一方面,电压作用时间长,对间隙中初始空间电荷的扫除作用强,即间隙中初

始正负离子在电压上升阶段就在电场力的作用下移动到阳极或者阴极, 那么放电起始时有效初始电子的产生就比较困难, 所以击穿电压高; 另一方面, 对于这种存在极不均匀电场结构的 GIS, 放电开始会出现电晕放电, 电压作用时间越长, 电晕放电产生的空间电荷越多, 形成电晕稳定化作用, 这样对尖端的屏蔽作用越强, 等效于尖刺的曲率半径变大, 电场变得均匀, 所以击穿电压变高。

观察图 6(a)和图 6(b)可以发现, 随着间隙距离 d 增加, 击穿电压升高, 伏秒特性曲线拐点有右移趋势。这是由于 d 增加后, 间隙电场越不均匀, 空间电荷需要迁移到更远的地方时才能起到改善间隙电场分布的作用, 故伏秒特性曲线拐点右移了。

整理了同一间隙不同波前时间双指数冲击电压作用下的放电结果, 如图 7 所示, 可以看出不同波前时间下 SF_6 气体间隙伏秒特性曲线随击穿时间呈下凹形式, 在短时延区和长时延区上翘, 中间时延区域呈平坦状。随着间隙距离增加, 曲线在短时延区变得更陡, 也就是说凹形曲线的开口随间隙距离的增加而缩小了; 此外, 间隙距离增加, 间隙的最低击穿电压增加。由这个曲线可以获得不同间隙距离下的最小击穿电压, 对指导 GIS 的绝缘设计有着比较重要的工程意义。

2.2.2 波前时间对同轴母线附着凸起物电极间隙伏-秒特性的影响

研究了同轴母线附着棒形凸起物时 SF_6 气体间隙的特性, 实验结果如图 8 所示, 可以看出随着波前时间增加, 击穿电压分散性变大, 伏秒特性曲线变得平坦, 伏秒曲线带也变宽。分析认为击穿电压的分散性是由于波前时间增加, 间隙出现有效初始电子的统计时延分散性增大引起的。 t_f 短时, 波前越陡, 越有利于初始电子产生。电子产生后电压很快上升, 达到间隙击穿电压, 进而发生击穿。如果 t_f 长, 电压上升速率慢, 电子产生后可能会发生复合、或迁移到间隙外、或电离终止等情况, 不能成为有效初始电子, 故统计时延分散性增大, 从而击穿电压分散性也变大。另外, 因为棒的尖端面积更大, 在棒尖端发射电子的方向可以各异, 故最终引起间隙击穿的放电路径也是多样化的, 所以放电分散性增大了。当同轴母线附着棒凸起时, 棒尖端的电场不足以产生强烈的电晕放电, 没有足够多的空间电荷改善电场分布, 故伏秒特性曲线比较平坦, 没有明显的上翘趋势。由图中还可以看出, 随着棒

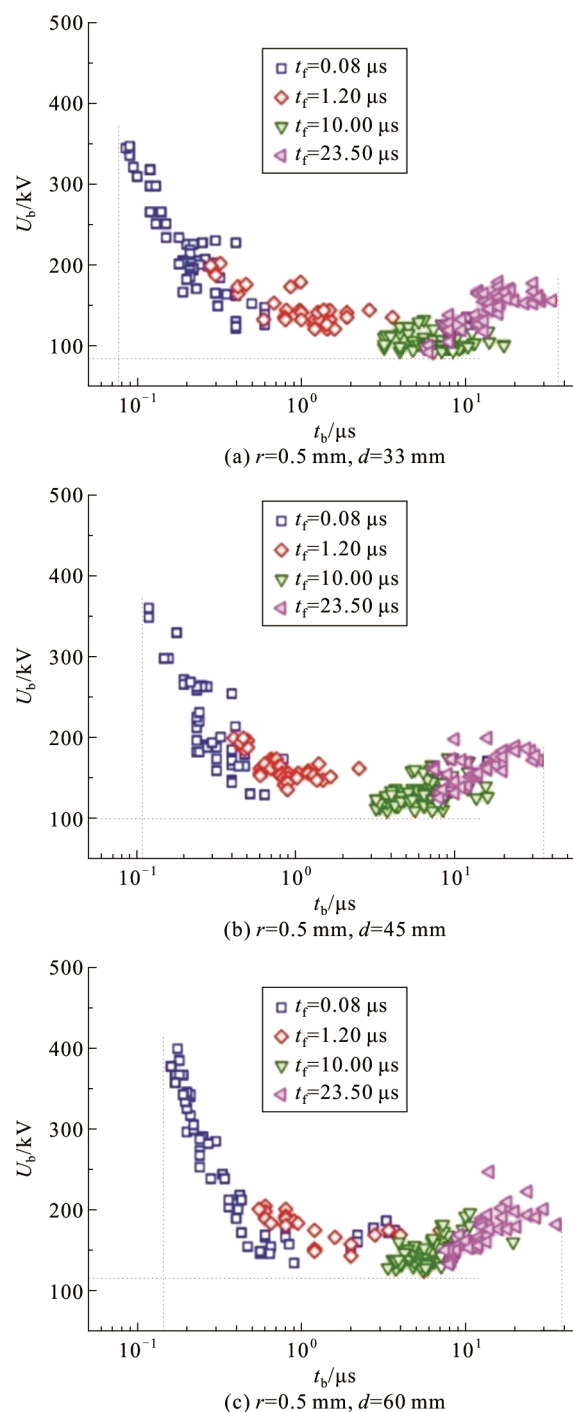


图 7 不同 SF_6 气体间隙的伏秒特性整合

Fig.7 $U-t$ characteristics integration of different SF_6 gaps

长 l 增加, 击穿电压降低, 伏秒特性曲线下移。这是由于 l 增加后, 局部电场集中的情况变得更严重了, 故击穿电压降低。

当同轴母线附着针凸起时, 首先研究了不同针长下 SF_6 气体间隙伏秒特性随波前时间变化的情况, 实验结果如图 9 所示, 可以看出随着波前时间增加, 击穿电压分散性变大, 伏秒特性曲线趋于平坦, 伏秒曲线出现拐点所需的时间缩短了。由于波

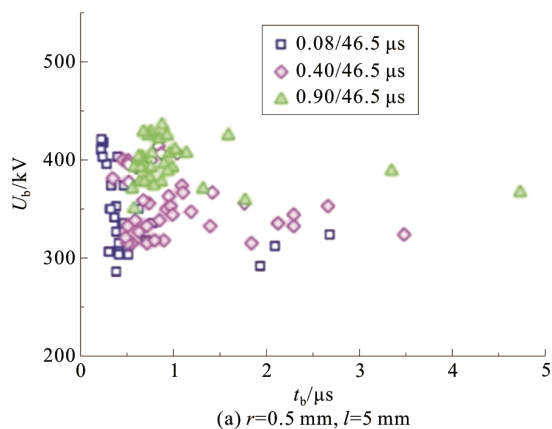
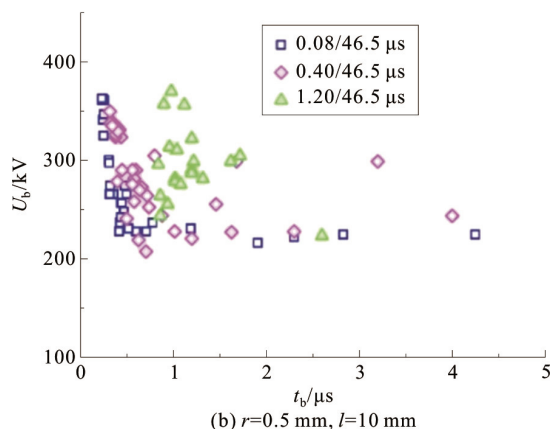
(a) $r=0.5$ mm, $l=5$ mm(b) $r=0.5$ mm, $l=10$ mm

图8 同轴母线附着棒形凸起物间隙的伏秒特性

Fig.8 U - t characteristics of coaxial bus with a rod attached to it

前时间增加, 放电时延的作用减弱, 故由其产生的击穿电压随击穿时延增加而降低的区域减小了, 所以伏秒曲线出现拐点所需的时间缩短了。另外, 从图中还可以看出, 随着针长 l 增加, 不同波前双指数冲击电压作用下的伏秒特性曲线之间差异变小。这是因为 l 增加, 针尖附近局部电场集中的情况变得更严重, 就整个间隙而言, 针尖附近更易出现有效初始电子, 故放电分散性减小, 伏秒特性曲线之间差异变小。

不同波前时间双指数冲击电压作用下 SF_6 气体间隙伏秒特性随针长变化规律见图 10。可见随着针长 l 增加, 击穿电压降低, 击穿电压分散性变小; 另外, 随着针长 l 增加, 击穿发生在伏秒特性曲线拐点之后的概率增大了。这是因为针长增加之后, 针尖处的电场更加集中, 故电晕稳定化作用较短针情况下变得明显, 所以长时延区的放电概率增大了。

3 结论

1) 不同 GIS 绝缘缺陷的 U_{50} 随外施电压波前时

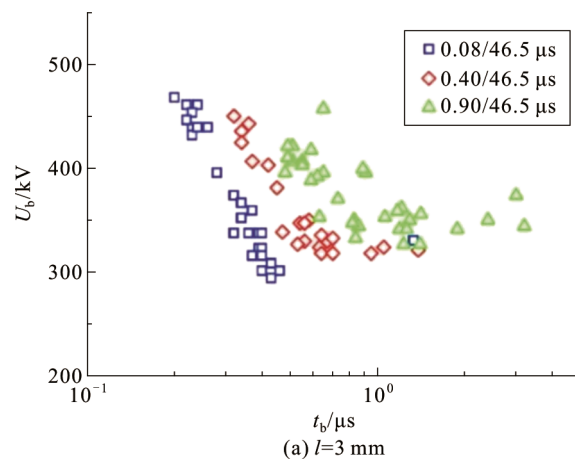
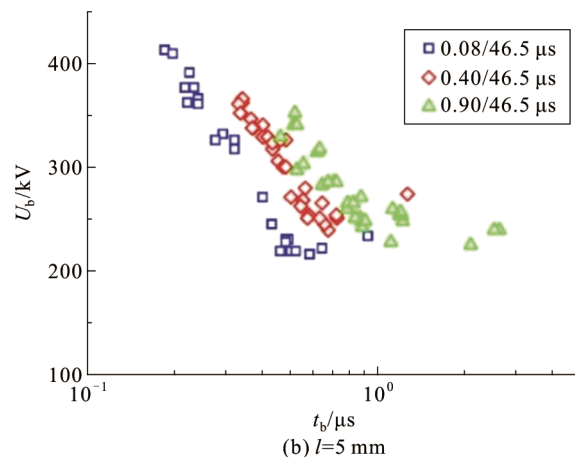
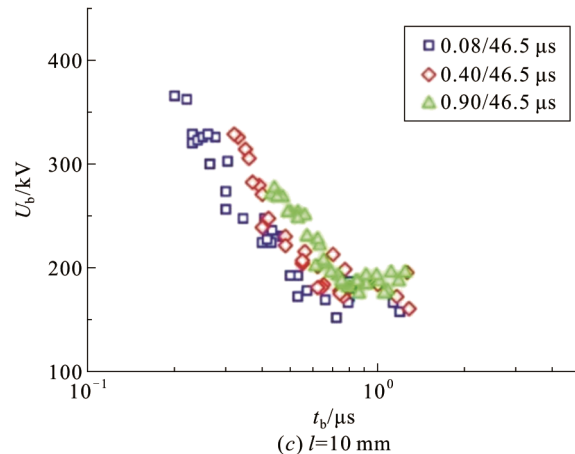
(a) $l=3$ mm(b) $l=5$ mm(c) $l=10$ mm

图9 同轴母线附着针形凸起物间隙的伏秒特性随波前时间变化规律

Fig.9 Law of U - t characteristics changing with t_f of coaxial bus with a needle attached to it

间增加呈现不同的规律。实验发现, 表面附着金属微粒的绝缘子和棒-板间隙 U_{50} 随波前时间增加先降低后升高, 呈 U 形变化趋势。而同轴母线附着针凸起间隙的 U_{50} 随波前时间增加近似呈线性增长, 且当波前时间足够长时, U_{50} 逐渐趋于稳定。

2) 棒-板间隙伏秒特性的曲线形状随外施电压

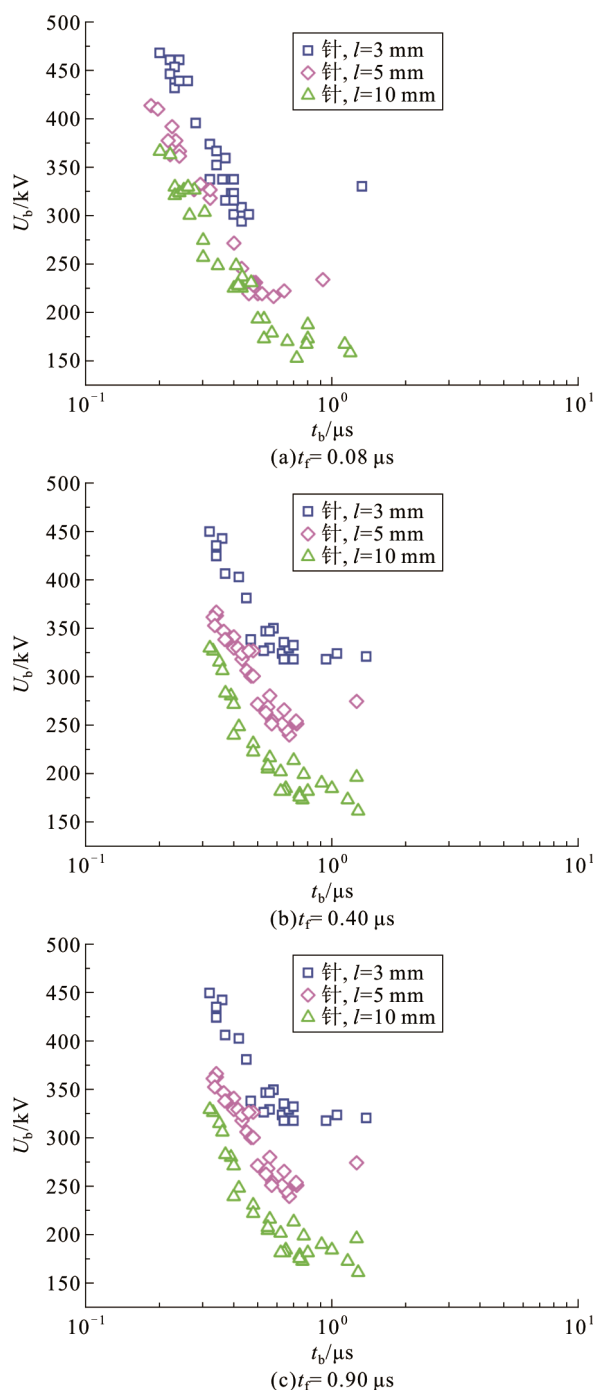


图 10 同轴母线附着针形凸起物间隙的伏秒特性随针长变化规律

Fig.10 Law of $U-t$ characteristics changing with l of coaxial bus with a needle attached to it

波前时间变化而改变, 波前时间短时, 间隙的伏秒特性是一条近似 U 形的曲线, 当波前时间较长时, 间隙的伏秒特性曲线整体呈上升趋势。随着间隙距离 d 增加, 间隙的最低击穿电压升高, U 型伏秒特性曲线拐点有右移趋势。

3) 同轴母线附着棒形凸起物时, 随着波前时

间增加, 击穿电压分散性变大, 伏秒特性曲线变得平坦, 伏秒曲线带也变宽。

4) 同轴母线附着针形凸起物时, 随着波前时间增加, 击穿电压分散性变大, 伏秒特性曲线趋于平坦, 伏秒曲线出现拐点所需的时间缩短了。随着针长 l 增加, 击穿电压降低, 击穿电压分散性变小, 同时击穿发生在伏秒特性曲线拐点以后的概率增大。

参考文献 References

- [1] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation engineering[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2007.
- [2] 张璐. 特快速暂态过电压下 GIS 典型绝缘结构放电特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2014.
ZHANG Lu. Study of discharge characters for typical insulation structure of GIS under very fast transient overvoltage[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2014.
- [3] ZHANG Q G, QIU Y, WANG P, et al. Dielectric characteristics of SF₆ under the steep-fronted impulses[C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 1996: 770-773.
- [4] 张乔根, 顾温国. 陡波作用下 SF₆ 气体的绝缘特性[J]. 高电压技术, 1996, 22(1): 6-8.
ZHANG Qiaogen, GU Wenguo. Insulating characteristics of SF₆ under the steep-fronted impulses[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(1): 6-8.
- [5] 张乔根, 邱毓昌. 快速暂态过电压下 SF₆ 气体的绝缘特性[J]. 高压电器, 1995, 31(3): 38-43.
ZHANG Qiaogen, QIU Yuchang. Insulation characteristics of SF₆ gap under very fast transient overvoltage[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(3): 38-43.
- [6] 陈允, 崔博源, 王宁华, 等. 1 100 kV 气体绝缘开关设备用盆式绝缘子中心嵌件结构设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 564-570.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin-type insulator used for 1 100 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 564-570.
- [7] 文韬, 张乔根, 马径坦, 等. 冲击电压波形参数对 SF₆ 稍不均匀电场棒-板间隙放电电压的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 936-941.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, MA Jingtian, et al. Influence of impulse waveform parameters on breakdown voltage in SF₆ Quasi-uniform electric field of rod-plate gap[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 936-941.
- [8] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [9] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas-insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [10] 王先培, 肖伟, 胡明宇, 等. 基于 SF₆ 分解产物融合判断的 GIS 绝缘劣化趋势划分[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1834-1840.
WANG Xianpei, XIAO Wei, HU Mingyu, et al. GIS insulation deteri-

- oration trend division based on SF₆ decomposition products fusion judgement[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1834-1840.
- [11] OKABE S, TSUBOI T, UETA G. Study on lightning impulse test waveform for UHV-class electric power equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 803-811.
- [12] Corrigendum 1: High-voltage switchgear and controlgear. Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV: IEC 62271-203[S], 2013.
- [13] 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltage of 72.5 kV and above: GB 7674—2008[S]. Beijing, China: China Standards Press, 2008.
- [14] 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则: DL/T 555—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Guide for withstand voltage and insulated test of gas-insulated metal-enclosed switchgear on site: DL/T 555—2004[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2004.
- [15] OKABE S, YUASA S, KANEKO S. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms - breakdown characteristics for non-standard lightning impulse waveforms associated with lightning surges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 407-415.
- [16] CHOWDHURI P, MISHRA A K, MCCONNELL B W. Volt-time characteristics of short air gaps under nonstandard lightning voltage waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 470-476.
- [17] ANCAJIMA A, CARRUS A, CINIERI E, et al. Behavior of MV insulators under lightning-induced overvoltages: experimental results and reproduction of volt-time characteristics by disruptive effect models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 221-230.
- [18] SHIGEMITSU O, TAKAMI J, TSUBOI T. Breakdown voltage-time characteristics and insulation testing of gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 741-748.
- [19] 文 韬, 张乔根, 赵军平, 等. 大容量电力设备标准雷电冲击现场试验技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2968-2973.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. On-site test technology of standard lightning impulse for power equipment with large capacitance[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2968-2973.
- [20] 施 围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 机械工业出版社, 2006.
SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen. Fundamental of high voltage engineering[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2006.



LIU Xuandong

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author



ZHANG Lingli

刘轩东(通信作者)

1981—, 男, 博士, 副教授

主要从事电力设备高电压试验技术、气体绝缘与放电等离子体、高功率脉冲源等方面的研究

E-mail: liuxuand@mail.xjtu.edu.cn

张伶俐

1992—, 女, 硕士生

主要从事 GIS 绝缘特性方面的研究工作

E-mail: zhanglingli@stu.xjtu.edu.cn

收稿日期 2017-12-24 修回日期 2018-07-18 编辑 曾文君