DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211321

# 极低工作系数下 SF6 间隙开关喷射等离子体 诱导击穿作用规律

董冰冰<sup>1</sup>,张泽霖<sup>1</sup>,李志兵<sup>2</sup>,张 竹<sup>1</sup>,向念文<sup>1</sup> (1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院,合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

**摘 要:**喷射等离子体触发型 SF6间隙开关用于混合直流输电系统消能装置控制开关的优势十分明显,但极低工 作系数下的喷射等离子体诱导 SF6间隙开关击穿作用规律尚不明晰。为此搭建了喷射等离子体诱导击穿试验平台, 研究了 SF6间隙中喷射等离子体特征参数的时空分布特性,以及触发条件参数和主间隙施加电压的作用规律。结 果表明,喷射等离子体呈高亮度的类圆锥形状,其初始发展速度可达 2.0 km/s 以上。提高 SF6间隙开关触发腔中 第 2 级腔(连接中间电极)的电容值和充电电压,其第 2 级间隙的沿面放电电流随之增大,触发腔的导通时延及其 分散性也会随之降低;同时喷射等离子体的几何特征量(面积、径向和轴向长度以及发展速度等)和电气参量均随 之渐进增大。增大间隙开关高压电极的施加电压,即提高其工作系数,SF6间隙开关诱导击穿末期的等离子体喷 射速度出现抬升现象;且随着工作系数的增大,喷射等离子体的头部局部电场畸变增强,引起其头部带电粒子的 运动速度进一步提高,喷射速度的抬升效应愈加显著。研究成果为高压大容量强绝缘气体间隙开关的等离子体喷 射触发性能的提升方法提供理论指导。

关键词: SF6间隙开关; 等离子体触发; 诱导击穿; 低工作系数; 过电压与接地

# Induced Breakdown Law of Plasma Jet-triggered SF<sub>6</sub> Gap Switch at Very Low Operating Coefficient

DONG Bingbing<sup>1</sup>, ZHANG Zelin<sup>1</sup>, LI Zhibing<sup>2</sup>, ZHANG Zhu<sup>1</sup>, XIANG Nianwen<sup>1</sup>

School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
 China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Plasma jet-triggered SF<sub>6</sub> gap switch has obvious advantages in the control switch of the self-recovery energy dissipation device used to solve the fault of hybrid HVDC transmission system. However, for the SF<sub>6</sub> gap switch with extremely low operating coefficient, the action mechanism of its jetting plasma in the process of the SF<sub>6</sub> gap induced breakdown is still unclear. Consequently, a jet plasma triggering test platform was established to study the spatiotemporal distribution and development characteristics of SF<sub>6</sub> gap jet plasma, the parameters of triggering conditions, and the operating voltage of the main gap. The results show that the jet plasma has a high-brightness cone-like shape, and the initial growth rate can exceed 2 km/s at most. When the capacitance value and charging voltage of the secondary cavity (connected to the middle electrode) in the SF<sub>6</sub> gap switch trigger cavity, the discharge current of the secondary cavity is increased, and the conduction delay and dispersion of the trigger cavity will be also reduced. At the same time, the geometric characteristics (including area, radial and axial length, and development velocity) and electrical parameters of the jet plasma increase gradually. As the operating voltage of the high-voltage electrode of SF<sub>6</sub> gap switch increases, that is, as its working coefficient increases, the plasma jet velocity at the end of SF<sub>6</sub> gap switch breakdown rises. With the increase of the operating coefficient, the local electric field distortion at the plasma jetting head is enhanced, which will further increase the movement speed of the charged particles at the plasma head, and the rise effect of the jetting velocity is more significant. The research results provide theoretical guidance for improving the triggering performance of high voltage, large capacity and strong insulating gas-gap switch plasma injection.

Key words: SF6 gap switch; plasma trigger; induced breakdown; low operating coefficient; overvoltage with grounding

基金资助项目: 国家自然科学基金(52107142); 国家电网公司总部科技项目——基础性、前瞻性院士专项(5400-202055451A-0-0-00)。 Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107142), Prospective and Basic Research Project Academician Foundation of SGCC (5400-202055451A-0-0-00).

## 0 引言

混合直流输电作为一种新型的直流输电方式, 综合利用了常规直流输电和柔性直流输电技术的优 势,是我国远距离大容量特高压直流输电技术的重 要发展方向<sup>[1-4]</sup>。白鹤滩-江苏±800 kV 工程受端采 用常规直流串联柔性直流以实现大容量输电和灵活 功率消纳。当交流侧出现故障时,柔直母线上会快 速出现过电压和能量积聚,需要并联可控自恢复消 能装置,快速将避雷器可控部分阀柱退出,以有效 保护柔性直流换流阀组安全[5]。在这种情况下,迫 切需要消能装置控制开关的动作时间在 1 ms 以内 且耐受电压高<sup>[2]</sup>。传统电力系统开关动辄数十 ms 的动作时间,显然无法满足快速动作的需求。高电 压大容量的电力电子开关动作时间快, 但需要多个 元件串并联,结构复杂、成本高60。等离子体喷射 触发型 SF6 间隙开关是一种通过产生高气压喷射等 离子体,在百 µs 内快速触通的新型快速开关,具有 结构简单、耐受电压高、实现成本低等优势,对于 保障特高压混合直流输电系统的关键设备安全具有 重要的作用。

长期以来,国内外学者主要关注脉冲功率领域 中气体开关的快放电、低抖动、低自放特性,并取 得了大量的研究成果。但上述气体开关的触发导通 时延需要控制到百纳秒量级,导致其施加高压脉冲 的幅值高达上百 kV,脉冲前沿几十 ns,工作系数(气 体开关主间隙的施加电压与其稳态击穿电压的比 值)>50%,否则难以可靠触发。文献[7-9]认为,随 着气体间隙距离的增加,其诱导击穿所需等离子体 的射流长度需要增加,击穿延迟时间和抖动也会随 之增加; 击穿时延随工作系数的降低而增大, 喷射 等离子体的形态分布对气体开关的空间电场分布的 影响较大。文献[10-11]认为,喷射等离子体初始电 子的增值发展速度随着工作系数的提高而增强,并 且存在一个对初始电子产生有效电离作用的工作系 数阈值;随着工作系数的继续提高,初始电子将通 过多代电子崩继续发展。

然而,上述研究中气体开关的工作系数大于 50%,使得背景电场力的作用较为明显。在此基础 上,文献[12-15]研究认为,喷射等离子体近似呈轴 对称分布,提高脉冲电容的储能会加速喷射等离子 体在轴向和径向的发展速度,降低放电延时及抖动。 文献[16-18]认为,气体开关的击穿延迟随着工作系 数的减小而增大。文献[19-21]则认为,击穿延时随 着触发脉冲峰值和上升速率的增大而减小,当触发 脉冲为陡上升率和高峰值时,气体间隙开关导通常 发生在触发电流的上升沿阶段;反之,触发脉冲为 低峰值和缓上升率时,其导通发生在触发电流峰值 甚至下降沿的时刻。文献[22-24]认为,增大触发脉 冲源的输出电压,可以提升气体开关触发性能的预 电离效果,触发抖动也会降低。

研究学者进一步研究了绝缘介质种类对气体 间隙开关触发特性的影响。文献[15,18,25]认为等离 子体喷射触发型 N<sub>2</sub> 间隙开关的触发导通时延随着 工作系数的减小呈指数增大,甚至出现触发失败的 情况。文献[26-28]认为 SF6气体对喷射等离子体有 很强的抑制作用,喷射高度随着 SF6气压的增大而 降低,触发能量越大导致这种抑制效应的影响越明 显。与 N<sub>2</sub>相比,SF6介质密度高、介电强度大,SF6 氛围中的喷射等离子体通道膨胀会受到明显的抑 制,影响其喷射触发的有效性,使得气体间隙开关 诱导击穿过程中的等离子体喷射触发面临着新的问题。

本文采用两级沿面放电触发结构,实现消能装置的气体间隙开关在低工作系数、强绝缘 SF6 气体 介质中的快速触发导通。但其触发腔的注入能量大, 且能量注入速率低(电容值大、充电电压低),SF6 间隙开关喷射等离子体诱导击穿过程的作用规律尚 不明晰,导致喷射等离子体的触发失效性问题突出。 因此,本文搭建 SF6 间隙开关等离子体喷射触发试 验平台,通过改变其工作系数、触发条件参数,研 究 SF6 间隙开关喷射等离子体诱导击穿特性及其作 用规律,为高压大容量强绝缘气体间隙开关等离子 体喷射触发性能的提升方法提供理论指导。

## 1 试验平台

SF6 间隙开关的触发腔利用两级沿面放电触发 结构,工作原理如图1所示。首先在针电极施加高 压脉冲引起其第1级腔(触发针与中间电极之间)发 生触发放电,形成预电离通道;随后中间电极通过 电容器注入大能量引起其第2级腔(中间电极通过 电容器注入大能量引起其第2级腔(中间电极与低 压电极之间)发生沿面闪络,形成主放电触发通道; 最后,触发腔内壁的绝缘材料在电弧烧蚀作用下产 生等离子体,大量积聚后在触发腔喷口处产生高气 压喷射,从而诱导 SF6间隙开关主间隙快速击穿。 在前期研究基础上,本文试验中气体开关触发腔的 针电极施加负极性的高压脉冲,中间电极施加正极 性的电容电压,触发腔的绝缘部件采用电气绝缘性 能和消融产气能力俱佳的聚四氟乙烯,其喷口直径 为2mm,绝缘产气材料为易消融聚四氟乙烯,SF6 间隙开关的地电极和高压电极均为黄铜平板电极, 其电极间距(SF6间隙长度)为20mm。

SF<sub>6</sub>间隙开关喷射等离子体诱导击穿试验平台 如图 2 所示,其中试验回路主要包括 SF<sub>6</sub>间隙开关、 高压直流电源(0~30 kV 可调)、储能电容 C<sub>1</sub>与脉冲 电容 C<sub>2</sub>、晶闸管 SCR<sub>1</sub>和 SCR<sub>2</sub>、脉冲变压器等。为 避免脉冲变压器断电或故障情况时,触发回路产生 自感电势引起的高压脉冲对晶闸管造成损害,晶闸 管 SCR<sub>2</sub> 需反并联二极管 D。在试验过程中,高压 探头(Tektronix P6015A)用于测量触发回路中的脉 冲电压和储能电容器电压,测量范围为 0~40 kV, 分压比为 1 000:1。罗氏线圈(Pearson 4997)测量放电 主通道的电弧电流。电压电流信号传输至示波器(安 捷伦 DSOX60004A)。采用高速摄相机(photron SAZ) 观测气体开关喷射等离子体诱导击穿过程,最高拍 摄速度为1 000 000 帧/s,最大分辨率为2 048×2 048 像素,通过 PFV Ver.3691 软件进行控制和图像读取。

为保证触发试验过程中单一变量影响因素的 一致性,SF6间隙长度 20 mm 和触发腔内的气压 0.27 MPa 均保持恒定,SF6间隙开关的工作系数仅 通过改变其高压电极的施加电压进行调整,即主间 隙的工作电压。SF6间隙开关喷射等离子体诱导击 穿的典型放电波形如图 3 所示,其中 C1 为 120 μF、 C2 为 10 μF,C1 和 C2 充电电压均为 1.5 kV,主间隙 的施加电压为30kV。

分析图3可知:

1) to 时刻, 触通电路中的晶闸管 SCR2, 脉变 副边将输出幅值为8kV的负极性高压脉冲, SF6间 隙开关触发腔的第1级腔触发放电,即针电极和中 间电极的第1级间隙导通,形成预电离触发通道, 此时作为等离子体喷射触发的起始时刻。

2) 经过 10 µs 后, 触通回路中的晶闸管 SCR<sub>1</sub>, 储能电容  $C_1$ 通过预电离触发通道、脉变副边和电阻 R 放电,由于此时脉变铁芯尚未达到饱和状态,相 当于开路,故脉变的输出电压被钳位至  $C_1$ 充电电压 1.5 kV 附近。 $C_1$ 向触发腔的第 1 级腔注入能量以烧 蚀管壁聚四氟乙烯产生等离子体进入第 2 级腔,由 于第 1 级腔触发放电后  $\Delta t_0$ 阶段  $C_1$ 的能量释放速率 低,故  $C_1$ 储能电压未见明显下降。 $\Delta t_0$ 阶段的



图 1 SF6 间隙开关触发工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of SF<sub>6</sub> gap switch



图 2 试验平台拓扑结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the testing platform topology



Fig.3 Jet plasma triggered discharge waveform of SF<sub>6</sub> gap

持续时间约为190 μs。

3) t<sub>1</sub>时刻触发腔的第2级腔导通, C<sub>1</sub>迅速向第 2级腔注入约135J的能量,形成主放电触发通道, 放电电流峰值约为2.3kA,继续烧蚀绝缘产气材料, 在低于5μs的时间内迅速产生大量等离子,大量积 聚后在触发腔喷口处产生高气压喷射(喷射速度可 达1.5km/s),从而诱导SF6间隙开关主间隙约50μs 后击穿。此时放电电流迅速增大至1.2kA,在t2时 刻等离子体喷射触发过程结束。

4)脉冲电容的电容值和充电电压的大小对于喷射等离子体几何特征量和主通道电弧电流的影响可以忽略,仅对导通时延产生影响(见表 1 和表 2)。分析原因主要在于,脉冲电容的充电电压经脉变在其副边会产生高压脉冲,用于触发腔的第 1 级腔形成火花放电通道,增大脉冲电容的电容值与充电电压,能够减小触发导通时延,且分散性<15%。而SF6主间隙诱导击穿过程主要由储能电容 C1 注入能量,形成主放电触发通道,烧蚀绝缘产气材料,产生大量的喷射等离子体,使得脉冲电容的改变对等离子体喷射特性与主通道电流幅值的影响并不明显。</p>

## 2 结果与分析

## 2.1 SF6间隙喷射等离子体发展特性

本部分研究 SF<sub>6</sub>间隙喷射等离子体时空分布特 性,其中触发电路中储能电容 C<sub>1</sub>和脉冲电容 C<sub>2</sub>的 充电电压均为 1.5 kV,SF<sub>6</sub> 主间隙的施加电压为 0 kV,喷射等离子体形态演化微观过程如图 4 所示。 在此基础上,对采集的等离子体图像采用双阈值分 割算法进行数值量化处理,提取喷射等离子体图像 特征值,分析喷射等离子体几何特征量动态变化规 律,其对应关系如图 5 所示。分析图 4 和图 5 可以 得到: 表1 不同脉冲电容器容值下等离子体特征量参数对比

Table 1 Comparison of characteristic parameters of jet plasma

under different pulse capacitor capacitance values

脉冲 电容/µF	电气特征量		喷射等离子体特征量		
	主通道	导通延迟	持续	面积	速度
	电流/kA	时间/μs	时间/μs	$/mm^2$	$/(km \cdot s^{-1})$
5	3.3	228	92	138	1.8
10	3.24	209	93	142	1.7
20	3.34	158	91	140	1.9

#### 表 2 不同脉冲电容充电电压下等离子体特征量参数对比

Table 2 Comparison of characteristic parameters of jet plasma

under different pulse capacitor charging voltages

脉冲 电压/kV	电气特征量		喷射等离子体特征量		
	主通道	导通	持续	面积	速度
	电流/kA	时延/μs	时间/μs	$/mm^2$	$/(km \cdot s^{-1})$
1.5	3.34	209	92	142	1.7
1.6	3.4	200	92	140	1.7
1.7	3.3	191	92	145	1.8
1.8	3.24	179	90	143	1.7
1.9	3.4	165	91	145	1.8



 $Fig.4 \quad Images \ of \ the \ plasma \ jet \ of \ SF_6 \ gap$ 

1)等离子体从间隙开关触发腔的喷口处喷射 至 SF6气体开关主间隙中,形成高亮度的类圆锥形



Fig.5 Variation rule of characteristic parameters of SF<sub>6</sub> gap jet plasma

等离子体团簇,喷射初始时的等离子体头部发展速 度可达 1.5~2.0 km/s,喷射高度达到 5.0 mm。随着 喷射高度的继续增长,等离子体头部发展速度迅速 衰减,根据喷射等离子体发展过程图像得到,13.3 μs 时到达 SF<sub>6</sub>间隙长度约 1/2 处,即 10 mm 时的喷射 速度仅为 0.4 km/s。

2)SF<sub>6</sub>气体间隙中,喷射等离子体径向和轴向 的发展速度明显滞后于喷射速度的变化趋势。轴向 上的喷射等离子体长度(喷射高度)经过 13.3 µs 达到 10 mm,在 48.9 µs 时发展至高压电极,从而诱导 SF6 气体开关主间隙击穿导通;而径向上的喷射长 度(喷射直径)随时间呈单峰分布,在 35.6 µs 时达到 14.3 mm 峰值后迅速降低直至消散。此外,采用喷 射等离子中心轴向的最大横截面面积为其喷射面积。 等离子体喷射面积在 35.6 µs 也达到峰值 130 mm<sup>2</sup>。 喷射等离子沿中心轴向呈类圆锥发展,而其头部端 的带电粒子与 SF6 分子不断发生碰撞,其形状渐变 至蘑菇云状,喷射速度趋于饱和至 0.34 km/s。

3)喷射等离子体发展至 53.3 μs 时,其边缘开 始出现扩散和湍流现象,等离子体形态发展过程明 显减弱,喷射等离子体的亮度、径向和轴向长度、 喷射面积均快速降低。这主要是因为喷射等离子体 头部粒子与 SF<sub>6</sub> 气体分子发生强烈的湍流掺混作 用,卷吸入射流的气体分子与等离子体之间相互掺 杂,导致湍流耗散效应明显。随后喷射等离子体到 达 SF<sub>6</sub>间隙开关的高压电极侧,诱导 SF<sub>6</sub>间隙开关 的主间隙发生击穿导通,继续发展会出现衰退迹象 直至弥散。

#### 2.2 临界触发条件参数的作用规律

1) 储能电容器充电电压

SF<sub>6</sub>气体开关主间隙的施加电压为 30 kV(即工 作系数为 0.15),储能电容 C<sub>1</sub>为 120 μF,充电电压 为 1.2~1.6 kV 时,SF<sub>6</sub>间隙开关主间隙临界击穿过 程中的喷射等离子体几何特征参数变化如图 6 所 示。分析图 6 可以得到:

(1) SF<sub>6</sub> 间隙开关主间隙临界击穿过程中的等 离子体喷射面积的变化趋势相同,随时间变化呈单 峰变化,在 32~40 μs 时等离子体喷射面积达到峰 值,约 90~140 mm<sup>2</sup>。当储能电容 C<sub>1</sub> 的充电电压越 大,用于烧蚀产气材料产生等离子体的能量增大, 喷射面积的峰值越大。当充电电压为 1.2 kV 时,此 时注入能量为 86.4J,喷射面积约为 90 mm<sup>2</sup>;充电 电压 1.6 kV 时,注入能量为 153.6 J,喷射面积为 140 mm<sup>2</sup>。

根据喷射面积与触发能量比可知,等离子体喷 射面积与 C<sub>1</sub>存储能量近似呈线性关系。

(2) SF<sub>6</sub> 间隙开关主间隙临界击穿过程中的等 离子体喷射高度随时间先快速增大,后渐进趋缓。 充电电压越大,用于烧蚀触发腔管壁材料聚四氟乙 烯的触发能量呈平方增大,大量积聚的等离子体在 触发腔内高气压作用下迅速从喷口处喷出,导致等 离子体喷射高度的初始变化率越快,即初始喷射速 度越大。比如充电电压为 1.6 kV 时,等离子喷射速 度可达 2.2 km/s。但喷射时间>12 μs 时,喷射速度 渐进衰减,且与储能电容充电电压呈反比关系,原 因在于等离子体高速喷射过程中,其头部与 SF<sub>6</sub>气 体分子不断碰撞引起能量耗散,且注入能量越高, 等离子体的初始速度越大,引起的湍流耗散现象越



程中的喷射等离子体特征参数变化关系

Fig.6 Variation rule of jet plasma characteristic parameters in SF<sub>6</sub> gap switch critical breakdown process at different voltages

明显,导致后期的喷射速度衰减越快。

2) 储能电容器电容

SF<sub>6</sub>气体开关主间隙的施加电压为 30 kV(即工 作系数为 0.15),储能电容 C<sub>1</sub>的充电电压为 1.5 kV、 电容值为 60~240 μF 时,其主间隙临界击穿过程中 的喷射等离子体特征参数变化规律如图 7 所示。

分析图7得到:

(1) 等离子喷射面积随着储能电容 *C*<sub>1</sub> 的增大而 显著增加,且喷射初始速度也愈快。*C*<sub>1</sub> 为 240 μF 时,喷射面积达到 460 mm<sup>2</sup>,其头部约 20 μs 时即 可到达 SF<sub>6</sub>间隙开关的高压电极,诱导其击穿导通; 而 *C*<sub>1</sub> 为 60 μF 时,喷射面积峰值仅为 50 mm<sup>2</sup>,在 45 μs 时喷射等离子体才到达高压电极,诱导 SF<sub>6</sub> 主间隙导通。这主要是因为,*C*<sub>1</sub>存储能量与其电容 值呈线性增加,引起触发腔管壁材料聚四氟乙烯消 融产生的等离子体增多;同时热膨胀作用增强,冲 击波作用效应明显,使得等离子体的喷射速度加快。



图 7 储能电容对临界击穿过程中等离子体特征参数变化

Fig.7 Characteristic parameters of SF<sub>6</sub> gap switch during breakdown process at different capacitors

(2) 较低电容下, 等离子体发展末期的喷射速 度明显加快。这说明在 SF6 间隙开关主间隙诱导击 穿过程中, 等离子体尖端带电粒子在间隙开关高压 电极施加电压产生的背景电场力作用下, 其头部场 强迅速畸变, 引起头部与高压电极间的 SF6 主间隙 诱导击穿; 随着 C<sub>1</sub> 的增大, 等离子体喷射初始速度 加快, 较短时间内即可诱导 SF6 主间隙击穿, 未发 现等离子体发展末期的喷射速度抬升现象。

## 2.3 临界工作电压的作用特性

本部分储能电容 C<sub>1</sub> 为 120 µF、充电电压 1.5 kV, SF6气体开关主间隙的施加电压为 0~30 kV(即 工作系数为 0~0.15), SF6间隙开关主间隙击穿过程 中的喷射等离子体特征参数变化如图 8 所示,其几 何特征参量的极值见表 3。分析图 8 和表 3 可知:

1)提高主间隙的施加电压,喷射等离子体持续时间和喷射面积的影响可以忽略,主要原因在于, SF6主间隙诱导击穿过程主要由储能电容 C1注入能量,形成主放电触发通道,烧蚀绝缘产气材料,产 生大量的喷射等离子体。因此 C1能量不变时,产生的等离子体量基本无明显变化。

2)提高主间隙的施加电压,SF6主间隙诱导击 穿过程中喷射等离子体的发展速度显著增加,到达 间隙开关的高压电极所需要的时间明显缩短。当主 间隙的施加电压为 30 kV(工作系数为 0.15)时,等离 子体喷射速度可达 2.45 km/s。这是由于主间隙的施 加电压越大,其背景电场力的作用将显著增强,引 起 SF6主间隙诱导击穿过程中的喷射等离子体发展 速度增大,迅速发展至高压电极侧并诱导 SF6主间 隙快速击穿。

## 2.4 低触发能量下主间隙施加电压的影响规律

1) 临界触发电压的影响特性

本部分储能电容 C<sub>1</sub>为 60 µF、主间隙施加电压 30 kV, C<sub>1</sub>充电电压为 1.2~1.6 kV 时, SF<sub>6</sub> 主间隙诱 导击穿过程中的等离子体喷射高度与喷射速度如图 9 所示。由图 9 可知:

等离子体喷射速度和喷射高度的变化趋势较为一致,SF6 主间隙诱导击穿末期观测到喷射速度 抬升的现象。C1 的充电电压越小,引起触发腔管壁 产气材料烧蚀的触发能量越低,喷射等离子体在 SF6 间隙诱导击穿发展末期,受到主间隙施加电压 产生的背景电场力的作用愈加显著,使得喷射等离 子体头部场强畸变效应越大,引起等离子体喷射速 度加快,导致喷射速度的抬升效应愈加明显,其喷





射速度可达到1 km/s,从上述2.2 节中的分析结果 也可以得到。但由于湍流耗散的掺混作用,等离子 体轴向位移和速度曲线呈现波动特点。

2) 主间隙施加电压的作用规律

上述分析得到,较低触发能量下 SF<sub>6</sub>间隙开关 主间隙诱导击穿过程中,观测到等离子体喷射速度 表3 主间隙不同施加电压下喷射等离子体特征量参数对比 Table 3 Comparison of characteristic parameters of jet plasma 1.00

at different operating voltages				
主间隙的	喷射等离子体几何特征量			
施加电压/kV	持续时间/μs	面积/mm <sup>2</sup>	速度/(km·s <sup>-1</sup> )	
0	92	136.1	1.80	
5	92	136.5	2.08	
10	92	134.5	2.25	
15	91	136.1	2.25	
20	89	135.6	2.40	
25	91	137.2	2.41	
30	90	137.2	2.45	





Fig.9 Injection velocity and height in SF6 gas critical breakdown process under different capacitance voltages

抬升的现象,本部分进一步研究低触发能量下主间 隙施加电压对等离子体喷射触发特性的影响规律。 SF6主间隙等离子体喷射触发过程如图 10 所示,喷 射等离子体几何特征参量的极值如表4所示。

0 µs	4.4 μs	8.8 µs	13.2 µs
ş	۲	Ţ	Ţ
17.6 µs	22 µs	26.4 µs	30.8 µs
۳	T	Υ	Ŷ
35.2 µs	38.5 µs	40.7 µs	41.8 µs
T	Ŧ	Ŧ	Î
42.9 µs	44 µs	48.4 μs	52.8 μs
25	(a) 等离子	-体喷射图像	2.0
25			2.0
20- E 15-			
新 10- 第			1.0 到前
≌ 5-	X		-0.5 暫
	0 19	27 26	0
U	, (b)喷射速度和	2/ 50 间/μs 高度随时间变化	ч.
图 10	低触发能量下 SF	6间隙等离子体	喷射过程

Fig.10 Plasma jet process of SF<sub>6</sub> gap at low trigger energy

Table 4 Variation of plasma jet velocity and height under

different operating voltages				
工作	速度抬升时的	抬升速度		
电压/kV	喷射高度/mm	极值/(km·s <sup>-1</sup> )		
10	15	1.1		
15	15	1.2		
20	13	1.4		
25	12	1.4		
30	10	1.5		

分析图 10 和表 4 可知:

1)喷射时间在 30.8~38.5 μs 时,等离子体喷射 高度增长较为缓慢,其头部径向直径有所增大;但 在 38.5 μs 后,等离子体头部带电粒子在主间隙施加 电压产生的背景电场力的作用下,其局部场强发生 严重畸变,使得喷射速度明显增大,向高压电极侧 快速发展,从而快速诱导 SF6 主间隙击穿;随后开 始呈现衰退迹象,直至在 SF6 氛围中弥散消殆。

2)随着主间隙施加电压的增大,等离子体喷 射速度抬升时的高度随之减小,速度抬升的极值渐 进增大。比如,主间隙施加电压 10 kV 时,等离子 体喷射至 15 mm 时,喷射速度抬升达到 1.1 km/s, 迅速短接 SF6剩余间隙;主间隙施加电压提高至 30 kV 时,等离子体喷射高度 10 mm 时即可诱导 SF6 间隙击穿,喷射速度抬升达到 1.5 km/s。喷射等离 子体诱导击穿时延随着主间隙施加电压的增大线性 缩短,其持续时间也会随之降低。

3)随着主间隙施加电压的增大,即工作系数 的提高,等离子体喷射速度的抬升效应也会越为明 显。喷射等离子体在几十 μs 内,其头部带电粒子与 SF6 气体分子不断碰撞,易引起一部分能量耗散, 并导致等离子体喷射速度降低,但仍具有高电导率。 因此喷射等离子体缩短了 SF6 间隙诱导击穿长度, 在较高主间隙施加电压下极易引起等离子体头部局 部场强畸变,诱导 SF6 间隙快速击穿导通。

## 3 结论

1) SF<sub>6</sub>间隙开关诱导击穿过程中的喷射等离子体呈高亮度类圆锥形态,初始发展速度可达 2.0 km/s 以上,其径向和轴向喷射长度的增长速度滞后于喷射速度的变化。等离子体发展末期因湍流掺混作用,湍流耗散效应明显,SF<sub>6</sub>间隙开关主间隙诱导击穿后出现衰退迹象直至弥散。

2)提高储能电容值及其充电电压,SF6间隙开 关诱导击穿过程中的喷射等离子体几何特征量(包 括喷射面积、高度、发展速度)均随之增大,其导通 时延相应降低。充电电压是 SF6间隙开关喷射等离 子体诱导击穿的前提条件。

3)随着 SF<sub>6</sub>间隙开关主间隙施加电压的增大, 等离子体几何特征参量和电气参量影响并不明显, 但低触发能量下等离子体喷射速度抬升时的高度随 之减小,喷射速度抬升极值渐进增大;同时 SF<sub>6</sub>间 隙开关诱导击穿过程中等离子体发展末期的喷射速

## 度具有明显的抬升效应。

## 参考文献 References

- 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
   ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):4999-5008.
- [2] 刘泽洪,王绍武,种芝艺,等.适用于混合级联特高压直流输电系统的可控自恢复消能装置[J].中国电机工程学报,2021,41(2):514-523.
   LIU Zehong, WANG Shaowu, CHONG Zhiyi, et al. Controllable and adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC

adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 514-523.

[3] 刘 杉,余 军,贺之渊,等. 基于 VSC 与 LCC 混合的多点传输 直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2980-2988.
LIU Shan, YU Jun, HE Zhiyuan, et al. Research on the topology and characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC[J].

characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC[J].
Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2980-2988.
[4] 毛炽祖,娄伟涛,李 清,等. 混合多馈入直流输电系统交流故障

- 下 VSC 暂态调压控制策略[J]. 高电压技术,2021,47(8):2905-2913. MAO Chizu, LOU Weitao, LI Qing, et al. VSC transient voltage regulation control strategy under AC faults in hybrid multi-infeed DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2905-2913.
- [5] 余占清,曾 嵘,屈 鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.
  YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.
- [6] CHEN W J, ZENG R, HE J J, et al. Development and prospect of direct-current circuit breaker in China[J]. High Voltage, 2021, 6(1): 1-15.
- [7] 满林坤,梁 毅,张 娜,等. 气体火花间隙开关的自击穿性能研究[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 146-151.
  MAN Linkun, LIANG Yi, ZHANG Na, et al. Research on self-breakdown performance of gas spark gap switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 146-151.
- [8] CHEN L, YANG L J, QIU A C, et al. Effects of the injected plasma on the breakdown process of the trigatron gas switch under low working coefficient[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(1): 013523.
- [9] CHEN L, YANG W H, FAN H, et al. The injected plasma triggered breakdown of the trigatron spark gap[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(2): 023501.
- [10] 翟戎骁,罗维熙,邱孟通,等.工作系数对直流耐压气体开关间隙 中初始电子发展特性的影响[J].高电压技术,2019,45(3):826-831. ZHAI Rongxiao, LUO Weixi, QIU Mengtong, et al. Influence of working coefficient on the development characteristics of initial electrons in gas switch gap under DC-withstanding process[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 826-831.
- [11] WOODWORTH J R, STYGAR W A, BENNETT L F, et al. New low inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2010, 13(8): 080401.
- [12] LIU S H, LIU X D, SHEN X, et al. Space-time evolution of ejected plasma for the triggering of gas switch[J]. Physics of Plasmas, 2016,

23(6): 063515.

- [13] TIE W H, MENG C, ZHANG Y T, et al. Analysis on discharge process of a plasma-jet triggered gas spark switch[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(1): 014009.
- [14] TIE W H, LIU X D, LIU S H, et al. Experimental study on the multichannel discharge characteristics of a multi-plasma-jet triggered gas switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(4): 937-943.
- [15] 张明康,刘轩东,沈 曦,等.喷射等离子体触发气体开关导通特 性[J].强激光与粒子束,2019,31(12):125003. ZHANG Mingkang, Liu Xuandong, SHEN Xi, et al. Discharge characteristics of a gas switch triggered by ejected plasma[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(12): 125003.
- [16] 翟戎骁,黄 涛,丛培天,等. 气体开关触发间隙与过压间隙击穿 特性研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 53(10): 1904-1910.
  ZHAI Rongxiao, HUANG Tao, CONG Peitian, et al. Study on breakdown characteristic of trigger gap and overvoltage gap in gas switch[J].
  Atomic Energy Science and Technology, 2018, 53(10): 1904-1910.
- [17] ZHAI R X, HUANG T, CONG P T, et al. Comparative study on breakdown characteristics of trigger gap and overvoltage gap in a gas pressurized closing switch[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(1): 015505.
- [18] CHAN Y A, MONTAG C, HERDRICH G, et al. Review of thermal pulsed plasma thruster-design, characterization, and application[C]// Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe, Japan: [s.n.], 2015.
- [19] LIU X D. Comparison of gas spark switch trigger methods through resistor and inductor for FLTD[J]. Journal of Fusion Energy, 2019, 38(2): 213-218.
- [20] KANCHI S, SHUKLA R, SHARMA A. Plasma triggered spark gap switch for multiple switch synchronization[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(10): 104704.
- [21] 程 显,李泰煜,葛国伟,等. 同轴型火花开关研制及其触发特性 试验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3480-3486.
  CHENG Xian, LI Taiyu, GE Guowei, et al. Development of coaxial spark switch and experimental study on its trigger characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3480-3486.
- [22] 李 黎, 鲍超斌, 冯希波, 等. 纳秒快脉冲下气体开关的过电压击 穿[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 185-191.

LI Li, BAO Chaobin, FENG Xibo, et al. Overvoltage breakdown of air-insulated gap under fast nanosecond-pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 185-191.

- [23] 申赛康,闫家启,孙国祥,等.封闭式双间隙伪火花开关的触发及导通特性[J].高电压技术,2021,47(3):855-864.
  SHEN Saikang, YAN Jiaqi, SUN Guoxiang, et al. The characteristics of triggering and conduction of a sealed-off double-gap pseudospark switch[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):855-864.
- [24] 闫家启,孙国祥,申赛康,等. 伪火花放电初始发展过程的仿真研 究[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2572-2582.
  YAN Jiaqi, SUN Guoxiang, SHEN Saikang, et al. Simulation investigation on initial processes of pseudospark discharge[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2572-2582.
- [25] HAN R Y, ZHU W Y, WU J W, et al. Spatial-temporal evolution of plasma radiation in electrical wire explosion: a morphological observation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(34): 345201.
- [26] KIM S H, YANG K S, LEE Y H, et al. Electrothermal-chemical ignition research on 120-mm gun in Korea[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 341-346.
- [27] LIU S H, LIU X D, SHEN X, et al. Discharge characteristics of a dual-electrode gas switch triggered by ejected plasma in N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 969-974.
- [28] WU J W, HAN R Y, DING W D, et al. Electrode erosion characteristics of repetitive long-life gas spark switch under airtight conditions[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(10): 3425-3433.



**董冰冰(**通信作者) 1987—,男,博士(后),副研究员 主要从事开关类设备及成套装置研制、放电理论 与试验研究 E-mail: bndong@126.com

DONG Bingbing Post-doctorate Associate professor Corresponding author

收稿日期 2021-08-14 修回日期 2021-10-27 编辑 曹昭君