

# 诱导触发型气体间隙开关快速绝缘恢复特性

董冰冰, 陶磊, 李康, 陈子建

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 气体间隙开关动作迅速、结构简单, 在电力系统中应用前景良好, 但对其绝缘恢复特性研究尚少。为此, 文中采用双脉冲法研究开关间隙距离、触发介质气压及其种类对气体开关绝缘恢复特性的影响规律。结果表明: 诱导触发型气体间隙开关绝缘恢复经历过渡期、快速恢复期和饱和期3个阶段, 饱和期的持续时间远大于前两阶段之和, 且在快速恢复期无“平台现象”出现。减小开关间隙距离, 气体开关绝缘恢复速率渐进增大, 其绝缘基本恢复时间(绝缘恢复系数  $R_1 > 90\%$ ) 可降低50%。触发介质气压对气体开关绝缘恢复特性影响显著, 对绝缘恢复过程的影响特性存在差异。增大触发介质气压会减缓气体开关的绝缘恢复过程, 0.1~0.3 MPa 压缩干燥空气中, 气体间隙开关绝缘基本恢复时间对应为11~40 ms。强电负性  $SF_6$  对气体开关绝缘恢复具有明显增强作用, 其绝缘恢复速率接近于空气中的4倍。研究结果可为气体间隙开关快速绝缘恢复技术提供理论指导。

**关键词:** 气体间隙开关; 诱导击穿; 双脉冲法; 绝缘恢复特性; 击穿电压; 强电负性  $SF_6$ 。

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0163-07

## 0 引言

气体间隙开关结构简单、工作电压可调范围宽、重复频率高、实现成本低, 在电力系统应用旁路开关场景中具有明显优势<sup>[1-3]</sup>。

气体间隙开关放电火花通道熄灭后, 由于其间隙中仍充斥着大量的高温气体和残留的带电粒子, 导致开关绝缘耐压水平未能立即恢复<sup>[4-7]</sup>。电力系统泄放冗余功率或消除残余电压后, 若气体开关绝缘恢复延迟, 则会明显提高其重击穿的概率, 易引起开关误操作, 影响电网供电可靠和安全。因此有必要开展气体间隙开关快速绝缘恢复特性研究。

长期以来, 国内外学者主要关注自击穿型气体间隙开关的绝缘恢复特性, 研究其绝缘恢复速率的提升方法, 以此来提高气体开关的重复运行频率。西北核技术研究所许日等人对  $N_2$  和  $H_2$  绝缘恢复特性进行试验研究, 认为在静态不吹气情况下,  $H_2$  的绝缘恢复速率较快<sup>[8]</sup>。文献[9]引入吹气开关, 以一定速率更换开关间隙内的气体, 以去除残留带电粒子并加速气体冷却, 从而增大气体开关的绝缘恢复速率, 提高开关重复工作频率, 但吹气系统会导致气体开关结构复杂, 影响紧凑化结构设计。近年来, 研究人员开始探究借助其他外界因素影响来提高气体开关自身绝缘恢复速率的方法。印度学者 Reddy C S 认为气压对氩气火花间隙的恢复有显著影响, 且间隙距离愈短, 绝缘恢复愈快<sup>[10]</sup>。英国

Macgregor 小组通过实验得到不同气压下  $SF_6$  的绝缘恢复曲线, 认为增大气压对改善气体开关绝缘恢复效果较为明显<sup>[11]</sup>。西安交通大学李陇杰等人对电晕稳定等离子体闭合开关的恢复性能进行研究, 认为小分子质量、高气速的气体介质在均匀场气体开关中表现出优异的绝缘恢复能力, 但在棒-板电极电晕稳定开关中具有较差的重复性能<sup>[12]</sup>。清华大学王新新等人对氮气短间隙的耐受电压和气体恢复特性进行研究, 结合气体击穿电压和密度的恢复特性, 分析气隙过电压能力恢复显著滞后效应的原因<sup>[13]</sup>。

诱导触发型气体间隙开关通过沿面电弧放电烧蚀触发腔内壁产生高压喷射等离子体, 并将其注入主间隙实现快速触发导通, 结构简单、成本低<sup>[14]</sup>。文献[15-16]对火花放电等离子体喷射型气体开关的喷射特性进行研究, 分析开关在10%~90%工作系数下的触发导通时延和高、低工作系数下的工作模式。文献[17-19]采用两间隙毛细管射流装置, 实现在较低工作电压下的空气间隙重复放电, 并研究环境介质(气体种类、气压)、工作电压和绝缘材料对触发导通特性的影响规律。诱导触发型气体间隙开关在电力系统中具有重要的应用前景, 但目前现有研究主要关注其诱导击穿放电特性, 其绝缘恢复特性与自击穿型气体开关是否存在差异值得深入研究。鉴于此, 文中采用双脉冲法研究开关间隙距离、触发介质气压及其种类对诱导触发型气体间隙开关绝缘恢复特性的影响规律, 为气体开关快速绝缘恢复提供理论参考。

收稿日期: 2023-09-15; 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107142)

### 1 试验平台与试验方案

诱导触发型气体间隙开关的拓扑结构和工作方式参考文献[20]。文中采用双脉冲法研究气体开关诱导击穿后的绝缘恢复特性,其试验回路拓扑如图1所示,由充电回路控制模块、放电回路、数据采集模块等组成。充电回路控制模块由触发控制单元、充电控制单元和计算机等组成,实现试验回路的通断、电容充放电、触发次数记录等功能。双脉冲触发模块主要由试验腔、放电回路1和2中的脉冲电容 $C_1$ 和 $C_2$ 、晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR)SCR<sub>1</sub>和SCR<sub>2</sub>、二极管 $D_1$ 和 $D_2$ 、脉冲变压器 $T_1$ 和 $T_2$ 、保护电阻 $R_1$ 和 $R_2$ 等组成,分别实现气体开关的触发导通和绝缘恢复校核。数据采集模块主要包括高压探头(Tektronix P6015A)、罗氏线圈(Pearson 4997)、示波器(Tektronix DPO2024B)、高速摄像机(Photron SAZ)等,在试验过程中监测高压电极电压、回路电流、气体开关导通时延和等离子体射流形态等。试验过程中,通过触发器控制SCR<sub>1</sub>和SCR<sub>2</sub>的触通信号的时间间隔 $t$ ,从而实现2路高压脉冲气体在开关触通和重击穿作用的时间间隔在0~1 s范围内微秒级连续可调;以施加在气体开关高压电极上的直流电压信号是否发生跌落判定其是否成功触通,即气体开关是否发生动作。

双脉冲法中 $\Delta t$ 为气体开关绝缘恢复时间,通过改变 $\Delta t$ 获得气体开关导通结束后不同时刻主间隙的重击穿电压 $U_2$ 。为评估该时刻的绝缘恢复性能,定义绝缘恢复系数 $R_U = U_2/U_1$ ,其中 $U_1$ 为气体开关间隙的稳态击穿电压。气体间隙开关1次典型触发

导通-重击穿过程的放电波形及对应时刻等离子体射流形态见图2、图3。其试验条件为干燥空气气压为0.1 MPa、开关主间隙为6 mm、 $U_1$ 为19.3 kV、工作电压为1.2 kV、双脉冲时间间隔 $t$ 为1 ms。

由图2、图3可得, $t_0$ 时刻,触通晶闸管SCR<sub>2</sub>,脉冲电容 $C_2$ 经脉冲变压器 $T_2$ 放电作用于气体间隙开关触发腔,主间隙内产生明亮的等离子体团簇,并向开关高压电极运动。经过约50  $\mu$ s的快速发展,主间隙内大量的喷射等离子体在 $t_1$ 时刻向上扩散至高压电极附近,从而诱导主间隙放电击穿,此时工作电压迅速跌落至0,开关导通并维持约30  $\mu$ s。 $t_2$ 时刻起喷射等离子体逐渐消散,喷射高度降低,开关工作电压逐步抬升,导通结束,随后气体开关主间隙的绝缘强度渐进恢复。主间隙内喷射等离子体持续约180  $\mu$ s后,在 $t_3$ 时刻完全消散,主间隙亮度变暗。 $t_4$ 时刻(约1 ms),触通晶闸管SCR<sub>1</sub>, $C_1$ 经脉冲变压器 $T_1$ 放电产生高压脉冲作用于气体开关,使得高压电极和低压电极之间产生明亮的击穿电弧,此时开关主间隙再次放电击穿。气体开关的绝缘恢复时间 $\Delta t$ 为920  $\mu$ s,其重击穿电压 $U_2$ 为11.5 kV,即气体开关的绝缘强度恢复约59.6%。

进一步改变 $\Delta t$ 得到气体开关绝缘恢复特性曲线如图4所示。分析图4可得,气体开关绝缘恢复过程主要分为3个阶段。①过渡期(0~0.20 ms), $R_U$ 随 $\Delta t$ 的增大而缓慢变化,整体呈增长趋势;气体开关绝缘恢复系数在8%以下,且恢复曲线呈现“单峰”状。②快速恢复期(0.20~1.95 ms), $R_U$ 随 $\Delta t$ 的增大而快速提高。1.95 ms时,气体开关绝缘恢复系数已恢复至81.1%,且在其快速绝缘恢复过程中未

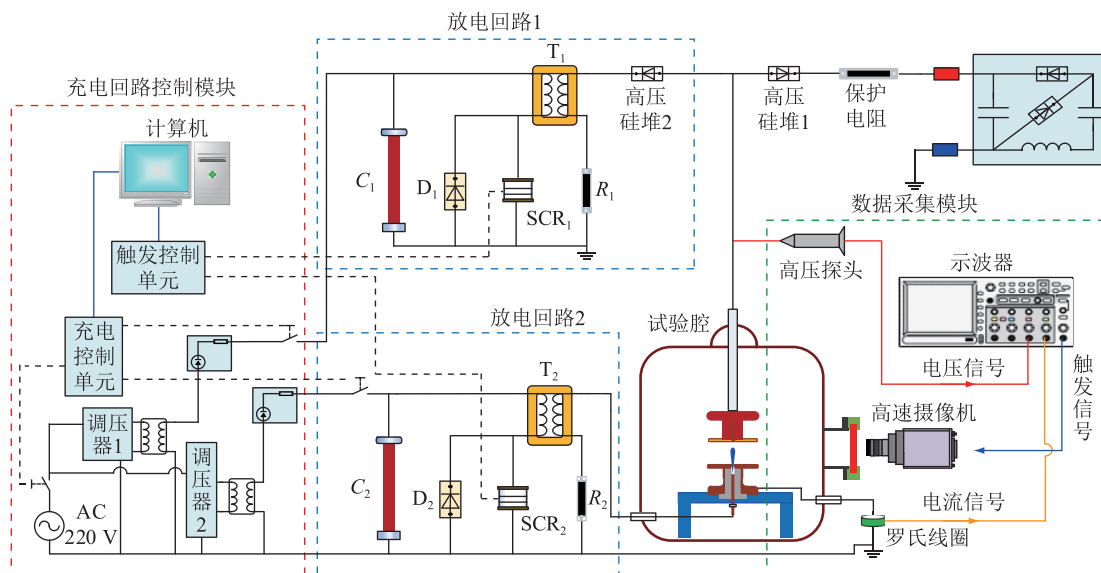


图1 试验回路拓扑

Fig.1 Test circuit topology

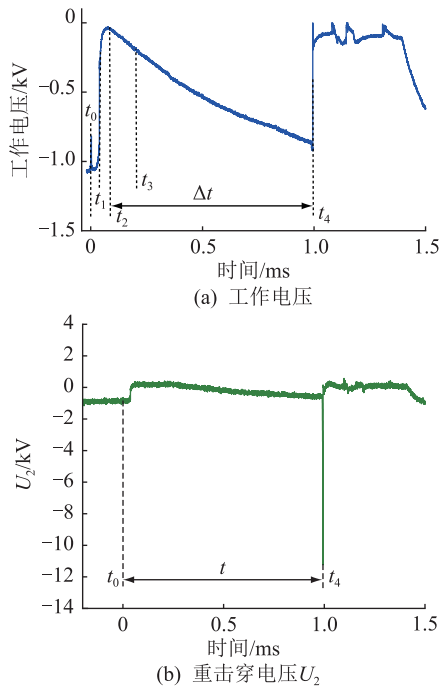


图2 气体间隙开关触发导通-重击穿过程的放电波形  
Fig.2 The trigger conduction-rebreakdown discharge waveform of the gas gap switch

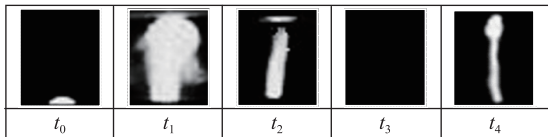


图3 气体间隙开关触发导通-重击穿过程的等离子体射流形态

Fig.3 The plasma jet morphology during the conduction-rebreakdown process of the gas gap switch

出现文献[21-24]提及的“平台现象”。③饱和期(1.95~60 ms),  $R_U$ 上升趋势明显变缓并趋于饱和,近似于平台,其间隙绝缘耐受电压已接近于稳态击穿电压  $U_1$ 。具体分析如下。

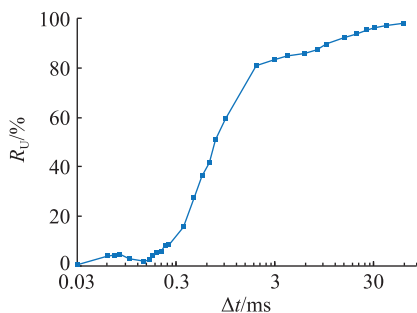


图4 气体开关绝缘恢复特性

Fig.4 Insulation recovery characteristic of gas switch

(1) 过渡期,鉴于等离子体喷射型气体开关的等离子体喷射发展过程,开关导通结束后间隙内仍存在渐进衰弱的等离子体喷射过程是影响开关绝缘恢复的主要因素。此时,间隙中等离子体与环境

气体分子相互掺杂混合,对开关主间隙绝缘强度恢复的起到明显抑制作用,引起  $R_U$  增长缓慢。此外,气体开关存在两次等离子体喷射过程<sup>[20]</sup>,开关在第一次等离子体喷射过程中触通,导通过程维持约 30  $\mu\text{s}$  结束,随后初次喷射等离子体逐渐消散,间隙绝缘强度开始渐进恢复;由于开关的第二次等离子体喷射过程,喷射等离子体再次快速发展,使得开关间隙内的等离子体浓度呈现逐渐增大趋势,抑制开关绝缘恢复进程,导致该阶段的  $R_U$  随着恢复时间的增加而减小。因此,在开关绝缘恢复的过渡期,绝缘恢复曲线出现“单峰”状。

(2) 快速恢复期,气体开关触通后的带电粒子的消逝速度远高于高温气体的冷却速度<sup>[25-26]</sup>,故该时期带电粒子的消逝为影响开关绝缘恢复速度的主导因素,  $R_U$  恢复速率高达 74%/ms(自 0.25 ms 时的 8.4% 增至 0.35 ms 时的 15.8%);随后带电粒子浓度降低,高温气体的冷却逐步占据主导作用,  $R_U$  恢复速率减小至 21.5%/ms(自 0.95 ms 时的 59.6% 增至 1.95 ms 时的 81.1%)。由于开关主间隙两端施加直流电压形成背景电场,加快带电粒子的消逝过程,故气体开关绝缘快速恢复阶段并未出现“平台现象”,显著缩短绝缘恢复时间。

(3) 饱和期,气体开关间隙内的带电粒子浓度显著降低,随着高温气体的传导、对流作用,高温气体逐渐冷却<sup>[27]</sup>,成为影响开关绝缘恢复速度的主导因素,此时  $R_U$  恢复速率最高仅为 3%/ms(自 1.95 ms 时的 81.1% 增至 2.75 ms 时的 83.5%),在 11 ms 时增至 91.1%。文献[28-29]认为  $R_U > 90\%$  时,可视为绝缘强度已基本恢复。因此,该试验条件下气体间隙开关触通 11 ms 后的绝缘恢复可满足电力系统的动作要求。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 开关间隙距离的影响特性

固定干燥空气气压为 0.1 MPa,通过改变开关主间隙距离 6~10 mm(对应的稳态击穿电压  $U_1$  为 19.4~30.9 kV),获得间隙距离对气体开关绝缘恢复特性的影响规律。不同间隙距离下的气体开关绝缘恢复特性如图 5 所示。

分析图 5 可得,改变开关的主间隙距离,其绝缘恢复过程与图 3 结果类似,均分为过渡期、快速恢复期和饱和期 3 个阶段。随着开关主间隙距离增大,间隙绝缘强度基本恢复时间显著增大,开关主间隙为 6 mm 时,间隙绝缘强度基本恢复时间仅 11 ms;而主间隙距离增大至 10 mm,绝缘强度基本恢复时

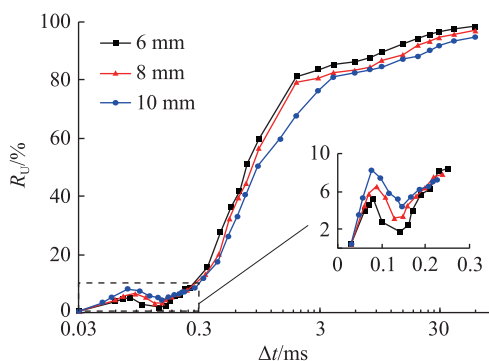


图5 0.1 MPa 大气压下气体开关在不同间隙距离的绝缘恢复特性

Fig.5 Insulation recovery characteristics of gas switch at different gap distances under 0.1 MPa atmospheric pressure

间增大至 25 ms,其恢复时间相比于主间隙 6 mm 时增大 1.3 倍。其中,不同于快速恢复期和饱和期,相比短间隙,长间隙在过渡期下的绝缘恢复较快。减小开关主间隙距离,快速恢复期  $R_U$  的平均恢复速率渐进增大,主间隙距离为 10 mm 时,  $R_U$  平均恢复速率为 20%/ms(自 0.2 ms 时的 6.5%增至 3.93 ms 时的 80.9%),而主间隙距离降至 6 mm 时,其平均恢复速率增加至 42.8%/ms(自 0.2 ms 时的 6.2%增至 1.95 ms 时的 81.1%),约提升了 1 倍。

分析原因主要是:

(1) 在过渡期,间隙内的喷射等离子体对气体介质绝缘性能的抑制是影响开关绝缘恢复速度的主要因素。相同触发条件下,气体间隙开关触发腔内的喷射等离子体量较为一致,而间隙距离的增大使得间隙空间增大,等离子体在与干燥气体分子掺杂混合后浓度降低。此外,开关间隙增大使得间隙内的电场强度减小,等离子体射流中带电粒子与气体分子之间的相互作用力较弱,与气体分子碰撞的频率相对较低,使得气体分子发生电离的概率较小,等离子体的密度降低,导致对开关主间隙绝缘强度恢复的抑制作用减弱。故相比于短间隙,长间隙开关在过渡期下的绝缘恢复较快。

(2) 在较短间隙(0~10 mm)条件下,沉积热量从间隙中移除主要是通过金属电极的轴向传热<sup>[30-31]</sup>。因此,较短的间隙易于通过电极传热,从而使间隙内高温气体冷却速度更快,利于气体温度下降,气体密度回升,加快绝缘恢复速率。此外,间隙距离减小,使得开关导通电压降低,开关内能耗减少,也有利于气体的绝缘恢复。综合上述几方面的因素,减小开关间隙距离更有利于气体开关绝缘恢复。

## 2.2 气压的影响特性

在干燥空气介质环境中,固定间隙距离为 6 mm,改变气压 0.1~0.3 MPa(对应的稳态击穿电压  $U_1$  为 19.4~40.1 kV),获取气压对气体开关绝缘恢复特性的影响规律。不同气压下的气体开关绝缘恢复特性如图 6 所示,其触发导通-重击穿过过程的特征量如表 1 所示。

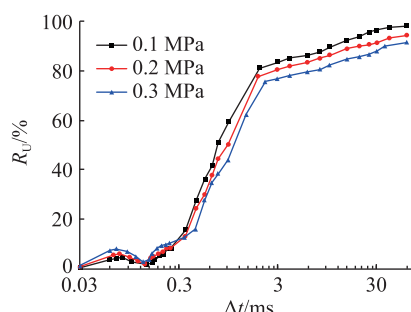


图6 气体开关在不同气压下的绝缘恢复特性

Fig.6 Insulation recovery characteristics of gas switch under different gas pressures

表 1 不同气压下气体开关导通特征量

Table 1 Characteristic quantities of gas switch contactation under different gas pressures

气压/ MPa	电气特征量			
	$\Delta t_1$ /ms	$\Delta t_2$ /μs	$\Delta t_3$ /μs	$U_1$ /kV
0.1	11	48.4	2.6	19.4
0.2	24	56.2	3.8	27.7
0.3	40	66.5	5.2	40.1

注: $\Delta t_1$ 为气体开关绝缘强度基本恢复时间; $\Delta t_2$ 为气体开关平均触通时延; $\Delta t_3$ 为气体开关时延抖动。

分析图 6 和表 1 可知,触发介质气压对气体间隙开关绝缘恢复特性影响显著。增大气压会减缓气体开关的绝缘恢复过程,其绝缘强度基本恢复时间将明显延长,但在过渡期和快速恢复初期,高压环境下的绝缘恢复速率较高。分析原因主要为:一方面随着气压的增大,气体分子密度增大,电子的平均自由行程减小,使得气体开关等离子体喷射高度和速度明显降低<sup>[32]</sup>,间隙空间大小一定的情况下,高压下的开关间隙中积聚的等离子体浓度较小,而与周围气体分子的高频率碰撞会使得电子能量更易损失,带电粒子消失速度更快,使得等离子体的电子密度相对降低,有利于开关绝缘恢复,导致开关在高气压下的过渡期和快速恢复初期的绝缘恢复速率偏快。另一方面,气压的增大会使得气体热扩散系数减小,抑制开关初次诱导击穿导通时所产生的高温等离子体、气体的冷却,减缓气体温度下降,气体密度回升,抑制开关的绝缘恢复,最终导致高压下间隙绝缘强度基本恢复时间明显增

大,故当气压增大至 0.3 MPa 时,其基本恢复时间增大至 40 ms,较气压 0.1 MPa 时增大接近 4 倍。

此外,触发介质气压增大对气体间隙开关的触通性能起到抑制作用。随着气压的增大,气体开关导通时延由 48.4  $\mu\text{s}$  延长至 66.5  $\mu\text{s}$ ,增大 37.4%,且开关时延抖动与干燥空气气压呈正比,气压增大使得气体开关触通可靠性降低。综上所述,减小气压可促进气体间隙开关的绝缘恢复和导通性能提升。

### 2.3 气体种类的影响特性

固定开关间隙距离为 6 mm,气压为 0.1 MPa,改变气体开关所处环境介质,分别为干燥空气和  $\text{SF}_6$  (稳态击穿电压  $U_1$  分别为 19.4 kV 和 34.9 kV),获取气体种类对气体开关绝缘恢复特性的影响规律。气体开关在不同气体种类下的绝缘恢复特性如图 7 所示。

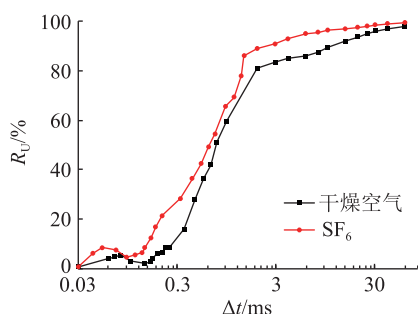


图 7 气体开关在不同气体种类下的绝缘恢复特性

Fig.7 Insulation recovery characteristics of gas switch under different gas types

分析图 7 可得,在相同的间隙距离和气压下, $\text{SF}_6$  气体介质环境可以使开关绝缘 3 个阶段的恢复速率明显加快。其中在快速恢复阶段, $\text{SF}_6$  气体环境中  $R_U$  的平均增大速率较干燥空气提高了约 25.5%,高达 53.7%/ms。因此,相较于干燥空气, $\text{SF}_6$  可以显著缩短开关间隙绝缘强度基本恢复时间, $\text{SF}_6$  气体间隙开关基本恢复时间仅为 3 ms,约为干燥空气环境下间隙绝缘基本恢复时间的 1/4,故  $\text{SF}_6$  气体可以大大提高开关绝缘恢复性能。

分析原因主要是:

(1) 电负性极强的  $\text{SF}_6$  分子易捕获喷射等离子体中的自由电子而形成质量较大的负离子,而负离子的运动速度远小于电子,从而对等离子体粒子产生较强的“粘滞效应”,降低等离子体喷射速度,显著抑制过渡期的等离子体射流发展。而  $\text{SF}_6$  作为间隙内介质环境可以加快带电粒子的复合过程,使得间隙空间内等离子体密度降低,对开关主间隙绝缘强度恢复的抑制作用减弱,从而加快开关绝缘恢复的速率。

(2) 虽然  $\text{SF}_6$  导热系数只有空气的 2/3,但其分子的定压比热约为空气的 3.4 倍,对流散热能力比空气大得多,所以实际上  $\text{SF}_6$  气体的传热能力优于空气,故更有利于气体温度下降。相同气压下, $\text{SF}_6$  气体分子直径远大于空气,其分子平均自由程比空气小,使得气体开关间隙中粒子的碰撞更加频繁,导致沉积的热量能迅速传导出去,利于气体密度的恢复,两方面作用下加快气体开关的绝缘恢复速率。

## 3 结论

文中针对诱导触发型气体间隙开关,采用双脉冲法研究开关间隙距离、触发介质气压及其种类对其绝缘恢复特性的影响规律,研究结果表明:

(1) 气体间隙开关绝缘恢复过程分为过渡期、快速恢复期和饱和期 3 个阶段,饱和期的持续时间远大于前两阶段之和,且在快速恢复期无“平台现象”出现。减小间隙距离有利于气体开关绝缘特性恢复,气体开关绝缘恢复速率渐进增大,气体开关绝缘基本恢复时间由 10 mm 间隙距离的 25 ms 缩短至 6 mm 间隙距离的 11 ms。

(2) 气压是影响气体开关间隙绝缘恢复特性的重要因素。增大气压有利于过渡期和快速恢复初期的绝缘恢复,但会抑制快速恢复中后期和饱和期的绝缘恢复进程,导致绝缘基本恢复时间显著增加。0.1~0.3 MPa 压缩干燥空气中,气体间隙开关绝缘基本恢复时间对应为 11~40 ms。

(3) 强电负性  $\text{SF}_6$  对气体开关的绝缘恢复具有明显增强作用, $\text{SF}_6$  气体间隙开关绝缘恢复速率接近于空气中的 4 倍,其绝缘恢复系数  $R_U$  到达 90% 最短时间仅为 3 ms。

### 参考文献:

- [1] KANCHI S, SHUKLA R, SHARMA A. Plasma triggered spark gap switch for multiple switch synchronization [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(10): 104704.
- [2] LIU S H, LIU X D, SHEN X, et al. Discharge characteristics of a dual-electrode gas switch triggered by ejected plasma in  $\text{N}_2$  and  $\text{SF}_6$  [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 969-974.
- [3] 张知先,高拓宇,雷嘉丽. 换流变用有载分接开关振动信号预处理方法研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 120-126. ZHANG Zhixian, GAO Tuoyu, LEI Jiali. Vibration signal preprocessing method of OLTC for converter transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 120-126.
- [4] REDDY C S, TAK A K, SHARMA A, et al. Computational modeling of spark gap density recovery after breakdown [C]//2014 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Mumbai, India. IEEE, 2014: 273-276.

- [5] 卓然,柯锬,张跃,等. 准均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘特性[J]. 电力工程技术,2021,40(3):159-165.  
ZHUO Ran,KE Kun,ZHANG Yue,et al. Insulation characteristics of  $C_5F_{10}O$ /Air and  $C_5F_{10}O/N_2$  under quasi-uniform electric field[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(3):159-165.
- [6] 文振明,陈立,任淑一,等. 基于改进双脉冲法的气体开关间隙绝缘恢复特性[J]. 现代应用物理,2022,13(3):82-89.  
WEN Zhenming,CHEN Li,REN Shuyi,et al. Insulation recovery characteristics of gas switch gap based on improved double-pulse method[J]. Modern Applied Physics,2022,13(3):82-89.
- [7] YAN W L,CHEN B Y,WANG Z X,et al. Study on breakdown stability of gas spark switches[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu,Japan. IEEE,2019:429-432.
- [8] 许日,宁辉,邱爱慈,等. 重复率气体火花开关绝缘恢复特性[J]. 强激光与粒子束,1996,8(4):518-522.  
XU Ri,NING Hui, QIU Aici,et al. Experiment researches of rep-rate gas spark gap insulation recovery [J]. High Power Laser & Particle Beams,1996,8(4):518-522.
- [9] 李雨泰,刘志刚,黎哈东,等. 基于吹气开关的重复频率纳秒脉冲源的研究[J]. 高电压技术,2021,47(9):3380-3386.  
LI Yutai,LIU Zhigang,LI Handong,et al. Research on the repetitive frequency nanosecond pulse power supply based on blowing switch[J]. High Voltage Engineering,2021,47(9):3380-3386.
- [10] REDDY C S,PATEL A S,NARESH P,et al. Experimental investigations of argon spark gap recovery times by developing a high voltage double pulse generator[J]. Review of Scientific Instruments,2014,85(6):064703.
- [11] MACGREGOR S J,TURNBULL S M,TUEMA F A,et al. Factors affecting and methods of improving the pulse repetition frequency of pulse-charged and DC-charged high-pressure gas switches[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1997,25(2):110-117.
- [12] LI L,HUANG Z,LI J. Effect of gas type on insulation recovery performance and repetitive breakdown stability of a corona-stabilized plasma closing switch[J]. Journal of Applied Physics,2020,128(7):073302.
- [13] 蔡新景,邹晓兵,王新新. 氮气短间隙的耐受电压和气体密度恢复特性[J]. 高电压技术,2011,37(6):1471-1478.  
CAI Xinjing,ZOU Xiaobing,WANG Xinxin. Recovery of hold off voltage and gas density in short nitrogen gaps[J]. High Voltage Engineering,2011,37(6):1471-1478.
- [14] 董冰冰,郭志远,文韬,等. 两级沿面触发型气体开关等离子体喷射过程与触发导通规律[J]. 高电压技术,2022,48(11):4656-4666.  
DONG Bingbing,GUO Zhiyuan,WEN Tao,et al. Development process of jet plasma of two-stage surface-triggered gas switch and its trigger conduction law[J]. High Voltage Engineering,2022,48(11):4656-4666.
- [15] DONG B B,GUO Z Y, XIANG N W. Effect of working coefficient on induced breakdown characteristics of plasma-triggered-based gas gap switch in fast bypass conditions[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2023,51(1):148-155.
- [16] 刘善红,刘轩东,李志兵,等. 火花放电喷射等离子体触发气体开关导通特性及工作模式分析[J]. 高电压技术,2015,41(6):1830-1836.  
LIU Shanhong,LIU Xuandong,LI Zhibing,et al. Discharge characteristics and working modes of a gas switch ignited by spark-discharge ejected plasma[J]. High Voltage Engineering,2015,41(6):1830-1836.
- [17] 黄东,杨兰均,霍鹏,等. 基于毛细管放电的大气压等离子体射流喷射装置放电特性[J]. 高电压技术,2016,42(12):3769-3774.  
HUANG Dong,YANG Lanjun,HUO Peng,et al. Discharge characteristics of atmospheric plasma flow ejector based on capillary discharge [J]. High Voltage Engineering,2016,42(12):3769-3774.
- [18] 董冰冰,张泽霖,李志兵,等. 极低工作系数下 $SF_6$ 间隙开关喷射等离子体诱导击穿作用规律[J]. 高电压技术,2022,48(1):348-357.  
DONG Bingbing,ZHANG Zelin,LI Zhibing,et al. Induced breakdown law of plasma jet-triggered  $SF_6$  gap switch at very low operating coefficient[J]. High Voltage Engineering,2022,48(1):348-357.
- [19] DONG B B,GUO Z Y,ZHANG Z L. Action law and deterioration characteristics of trigger cavity of plasma-jet-triggered air-gap switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2022,50(11):4693-4699.
- [20] 董冰冰,陈子建,陈维江,等. 配电网用灵活控制特快速开关方案及其触发导通特性[J]. 高电压技术,2022,48(5):1808-1816.  
DONG Bingbing,CHEN Zijian,CHEN Weijiang,et al. Scheme of flexible control very fast switch and its discharge characteristics for distribution network [J]. High Voltage Engineering,2022,48(5):1808-1816.
- [21] MORAN S L,HARDESTY L W. High-repetition-rate hydrogen spark gap[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,1991,38(4):726-730.
- [22] 卢彦雷,樊亚军,石磊,等. 高电压纳秒气体开关绝缘恢复特性的实验研究[J]. 高电压技术,2015,41(6):1852-1856.  
LU Yanlei,FAN Yajun,SHI Lei,et al. Experiment research of high voltage nanosecond gas switches insulation recovery [J]. High Voltage Engineering,2015,41(6):1852-1856.
- [23] CAI X J,ZOU X B,WANG X X,et al. Over-volted breakdown and recovery of short nitrogen spark gaps [J]. Laser and Particle Beams,2010,28(3):443-450.
- [24] MACGREGOR S J,TURNBULL S M,TUEMA F A,et al. Methods of improving the pulse repetition frequency of high pressure gas switches[C]//Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque,

- NM, USA. IEEE, 2002:249-254.
- [25] MACGREGOR S J, TUEMA F A, TURNBULL S M, et al. The operation of repetitive high-pressure spark gap switches [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(6):954-958.
- [26] TSURUTA K, TAKAHASHI I, KANZAKI Y, et al. Experimental study of the voltage recovery characteristics of small air gaps [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(3):560-564.
- [27] PARKER A B, POOLE D E. Cooling of high current spark channels in hydrogen and argon [J]. British Journal of Applied Physics, 1964, 15(9):1011-1019.
- [28] 殷毅, 刘金亮, 钟辉煌, 等. 不同气压和电极间距对开关绝缘恢复的影响 [J]. 高电压技术, 2009, 35(2):304-308.  
YIN Yi, LIU Jinliang, ZHONG Huihuang, et al. Influence of gas pressure and gap distance on the recovery time of gas spark gap switch [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2):304-308.
- [29] 彭建昌, 孙旭, 余希园, 等. 气体火花开关重复频率特性的实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6):272-276.  
PENG Jianchang, SUN Xu, SHE Xiyuan, et al. Experimental investigation of gas spark switch features on pulse repetition rate [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(6):272-276.
- [30] 殷毅, 刘金亮, 高景明, 等. 气体火花开关高温气体冷却的三维模拟 [J]. 高电压技术, 2008, 34(2):382-384, 396.  
YIN Yi, LIU Jinliang, GAO Jingming, et al. 3-D simulation of high temperature gas decay of gas spark gap [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2):382-384, 396.
- [31] WANG X X, LUO H Y, HU Y A. Numerical simulation of the gas discharge in a gas peaking switch [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(3):702-708.
- [32] 董冰冰, 陶磊, 李志兵, 等. 机械式直流断路器换流支路用气体间隙开关方案及其诱导击穿特性 [J]. 高电压技术, 2022, 48(12):4863-4872.  
DONG Bingbing, TAO Lei, LI Zhibing, et al. A gas gap switch scheme for commutation branch of DC circuit breakers and its induced breakdown characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12):4863-4872.

作者简介:



董冰冰

董冰冰(1987),男,博士,副研究员,研究方向为能源电力装置放电理论与试验(E-mail: bndong@126.com);

陶磊(1999),男,硕士在读,研究方向为气体间隙开关研制;

李康(2000),男,硕士在读,研究方向为气体间隙开关研制。

## Fast insulation recovery characteristics of induced trigger gas gap switch

DONG Bingbing, TAO Lei, LI Kang, CHEN Zijian

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Gas gap switch has good application prospects in power systems, due to its quick response and simple structure. However, there is still little research on insulation recovery characteristic. Therefore, the double pulse method is used to study the influence of switch gap distance, trigger medium pressure and trigger medium type on the insulation recovery characteristics of gas switch. The experimental results show that the insulation recovery characteristics of induced trigger gas gap switch experience three stages: transition period, fast recovery period and saturation period. The duration of the saturation period is much longer than the sum of the previous two stages, and there was no 'platform phenomenon' in the rapid recovery period. With the decrease of gap distance, the insulation recovery rate of gas switch increases gradually, and the basic recovery time of gap insulation (insulation recovery coefficient  $R_U > 90\%$ ) can be reduced by 50%. The influence of trigger medium pressure on the insulation recovery of gas switch is significant, and the influence characteristics on the insulation recovery process are different. Increasing the trigger medium pressure will slow down the insulation recovery process of gas switch. In 0.1 ~ 0.3 MPa compressed dry air, the basic recovery time of gas gap switch insulation corresponds to 11 ~ 40 ms. The strong electronegative gas SF<sub>6</sub> has a significant effect on the insulation recovery rate of gas switches, and its insulation recovery rate is close to 4 times that in air. The research results provide theoretical guidance for the rapid insulation recovery of gas gap switch.

**Keywords:** gas gap switch; induced breakdown; double pulse method; insulation recovery characteristics; gas breakdown voltage; strong electronegative gas SF<sub>6</sub>

(编辑 吴昊)