

喷射等离子体触发气体开关导通特性*

张明康¹, 刘轩东¹, 沈 曦², 梁成军¹

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 成都 610000)

摘 要: 利用内嵌微孔火花放电产生喷射等离子体、作用于两电极开关, 研究了间隙距离、气压、气体种类、开关工作系数和电压极性配合等因素对等离子体喷射控制开关导通特性的影响。实验结果表明, 等离子体喷射触发开关可在工作系数为 10% 的条件下可靠快速导通, 当开关采用 0.5 MPa_{N₂} 作为绝缘介质、间隙距离 5 mm 时, 触发导通时延为 11.7 μs, 抖动为 1.42 μs; 当间隙距离增大到 18 mm 时, 触发导通时延增大至 19.7 μs, 触发可靠性降低; 当工作系数由 10% 增大到 60% 时, 触发导通时延由 11.7 μs 降低至 1.1 μs。在确保开关自击穿电压一致的前提下, 短间隙、高气压、负触发脉冲电压、正工作电压更有利于减小开关触发导通时延。

关键词: 喷射等离子体; 气体开关; 间隙距离; 工作系数范围; 导通特性

中图分类号: TM56

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB201931.190243

Discharge characteristics of a gas switch triggered by ejected plasma

Zhang Mingkang¹, Liu Xuandong¹, Shen Xi², Liang Chengjun¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Co, Ltd, Chengdu 610000, China)

Abstract: High speed ejected plasma, generated by the discharge in an actuator, can be applied as a trigger to gas gap switch which is working at low coefficient or with wide gap. This paper studies the influence of working conditions of gas switch on the discharge characteristics of ejected plasma triggered gas switch. The effects of gap distance, gas type, gas pressure, switching coefficient and cooperation mode of trigger pulse polarity and main voltage polarity on the discharge characteristics of ejected plasma triggered gas switch were studied by experiments. The results indicate that the ejected plasma triggered gas switch can be reliably and rapidly triggered with switching coefficient of about 10%. When the gas pressure of N₂ in the switch is 0.5 MPa and the gap distance is 5 mm, the delay time and jitter are 11.7 μs and 1.42 μs, respectively. When the distance increases to 18 mm, the probability is reduced, the delay time increases to 19.7 μs. When the switching coefficient increases from 10% to 60%, the delay time decreases from 11.7 μs to 1.1 μs. With the same self-breakdown voltage, high pressure, short gap distance, negative trigger pulse and positive main voltage are better best choices to reduce the delay time.

Key words: ejected plasma; gas switch; gap distance; switching coefficient; discharge characteristics

PACS: 81.15.Jj; 52.80.Tn

气体火花开关因具有结构简单、性能稳定、调控方便、可重复频率工作等特点, 在脉冲功率领域得到了广泛的应用^[1-7]。按工作方式, 其可分为自击穿开关和触发击穿开关。当对开关稳定性、时序性和可控性要求较高时, 通常采用后者。

目前通常采用电脉冲、激光、紫外预电离等方式触发导通开关^[8-12]。电脉冲触发利用触发脉冲对间隙电场的畸变作用, 首先在触发间隙放电, 进而在第二个间隙上形成过电压使其放电, 因而电脉冲触发开关的最低工作系数仅能降至 50% 左右^[13-14]。激光触发是将激光脉冲聚焦于触发间隙, 使焦点附近的气体电离产生大量等离子体, 在电场作用下发展成为火花通道, 完成触发间隙的击穿, 进而在串联的自击穿间隙上形成过电压使其击穿, 激光触发开关在工作系数大于 70% 时, 才能获得较好的放电特性^[10]。紫外预电离利用火花放电间隙产生热电弧, 发出强烈的紫外光照射在主间隙, 增加一定数量的初始电子, 降低气体击穿场强, 紫外预电离开关工作系数不能低于

* 收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-10-21

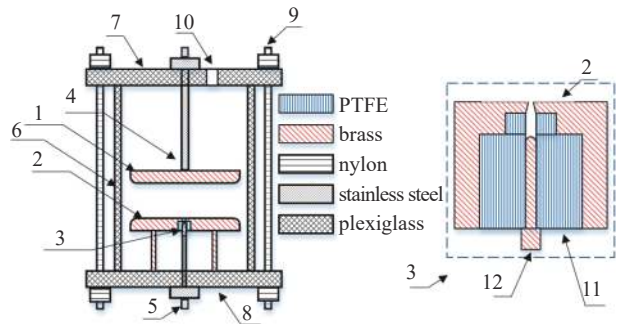
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51207127)

作者简介: 张明康 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事脉冲功率技术的研究; 563457686@qq.com。

55%^[15]。上述三种触发方式在脉冲功率技术中均有广泛应用,但受气体开关本身技术特点的限制,当开关工作系数较低时,开关不能可靠触发,且导通时延和抖动随工作系数的降低迅速增大。而新型的采用喷射等离子体触发的气体开关^[16-20],能实现开关在工作系数低于 55% 时可靠触发,并且在相同工作系数下,相较于传统电脉冲触发气体开关,其触发抖动大大降低。刘善红等人研究了喷射等离子体的时空分布特性,得到了气压、触发脉冲能量对等离子体喷射高度及时空分布特性的影响^[20]。而在喷射等离子体注入主间隙后,间隙距离、间隙气压、绝缘气体种类与工作系数范围等关键技术参数对主间隙导通的影响规律仍需深入研究。鉴于此,本文采用微孔火花放电产生喷射等离子体用于两电极气体开关的触发,研究了间隙距离、气压、气体种类、工作系数与电压极性对开关触发导通特性的影响规律。

1 喷射等离子体触发气体开关结构及其实验回路

喷射等离子体触发气体开关结构如图 1 所示,主要由主电极、等离子体喷射腔、外壳以及相应的连接杆组成。其中主电极 1 通过连接杆 4 与外部的直流高压相连,主电极 2 作为接地电极。等离子体喷射腔 3 嵌入主电极 2 中,喷射腔上层为板电极(主电极 2),中心开有锥形喷孔,下层为聚四氟乙烯绝缘环 11,正对喷孔处为微孔放电腔;针电极 12 安装在放电腔的底部,通过连接杆 5 与外部的触发回路相连;开关外壳主体 6、上端盖 7、下端盖 8 均为有机玻璃材料,用尼龙螺杆 9 连接构成开关的密封腔体,可通过气孔 10 控制腔体内气压。



1-HV electrode; 2-ground electrode; 3-micro cavity; 4-connecting rod; 5-connecting rod; 6-insulative shell; 7-insulative shell; 8-insulative shell; 9-screw; 10-gas hole; 11-insulative ring; 12-needle electrode

Fig. 1 Construction of the gas switch triggered by ejected plasma and structure of plasma ejection cavity

图 1 喷射等离子体触发气体开关结构及等离子体喷射腔结构

实验回路如图 2 所示,主要由主回路、触发回路、气体开关及测量装置等组成。触发回路由储能电容 C 、触发间隙 S 和负载电阻 R 组成。储能电容 C 充直流高压,通过触发间隙对负载电阻放电,输出快前沿触发脉冲,并施加到针电极上。当触发回路储能电容充电电压为 40 kV 时,其空载时的典型输出脉冲波形如图 3 所示,其输出触发脉冲幅值约为 40 kV,上升沿约为 50 ns,脉宽约为 12 μ s。主回路储能电容串接在高压板电极与接地板电极之间,并充直流高压。分别采用电阻分压器和 Pearson 101A 线圈测量触发脉冲波形和主回路放电电流波形,电阻分压器分压比约为 8000:1, Pearson 101A 线圈灵敏度为 0.01 V/A。

当触发脉冲施加到针电极上时,针电极与地电极之间的微孔间隙发生放电,从而产生喷射等离子体。随着喷射等离子体在气体开关主间隙内的发展,等离子体头部与高压电极的距离减小,引起电场严重畸变,从而导致间隙放电。由于等离子体喷射为间隙放电提供了大量初始电子,降低了间隙的绝缘强度,因此可以在极低的工作系数

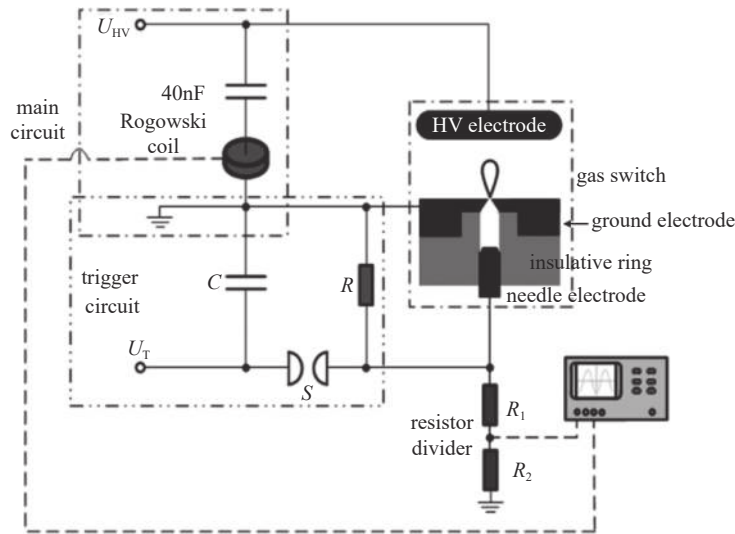


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

图 2 开关实验回路

当触发脉冲施加到针电极上时,针电极与地电极之间的微孔间隙发生放电,从而产生喷射等离子体。随着喷射等离子体在气体开关主间隙内的发展,等离子体头部与高压电极的距离减小,引起电场严重畸变,从而导致间隙放电。由于等离子体喷射为间隙放电提供了大量初始电子,降低了间隙的绝缘强度,因此可以在极低的工作系数

下使开关可靠触发放电,又由于触发脉冲不直接接触气体开关,故不需要高幅值的触发脉冲。当气体间隙导通时,触发脉冲和开关导通电流波形如图4所示,开关触发导通时延 Δt 定义为触发脉冲起始时刻至主回路电流起始时刻的时间差,抖动为导通时延的标准差。

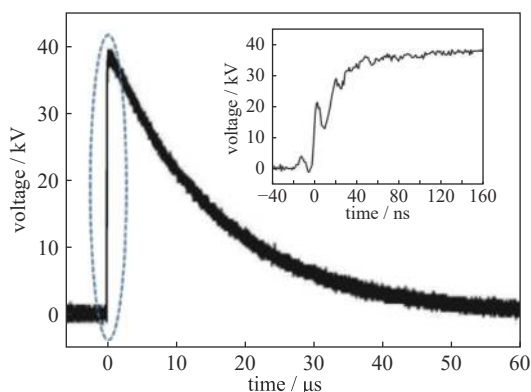


Fig. 3 waveform of unloaded trigger circuit

图3 触发回路空载时输出波形

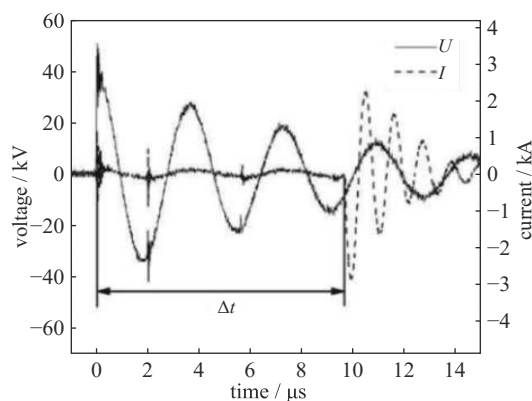


Fig. 4 Waveform of trigger voltage and that of conduction current

图4 触发电压波形和开关导通电流波形

气体开关的工作系数定义如下

$$m = U_0/U_b \quad (1)$$

式中: U_0 为施加在气体开关两端的工作电压,单位为kV; U_b 为相同条件下气体开关的自击穿电压,单位为kV。当气体开关采用 N_2 或 SF_6 气体作为绝缘气体时,其自击穿电压分别可由下式估算

$$U_{b-N_2} = 24.5pd + 6.7\sqrt{pd} \quad (2)$$

$$U_{b-SF_6} = 88.5pd + 0.5 \quad (3)$$

式中: p 为气体压强,单位为MPa; d 为间隙距离,单位为mm。在下文中,气体开关的自击穿电压及在不同充电电压下的工作系数均由上式计算而得。

2 工作条件对开关触发导通特性的影响

2.1 间隙距离对开关触发导通特性的影响

空气中氧气的存在会使微孔中针电极在触发脉冲的作用下迅速烧蚀而导致开关失效,故气体开关使用 N_2 作为绝缘介质,气压0.5 MPa;触发脉冲电压幅值为+48 kV;开关间隙距离 d 分别为5, 13, 15和18 mm。为了保证开关工作系数10%不变,开关充电电压分别设置为-7, -20, -22和-27 kV。每组实验重复40次,得到不同间隙距离下开关触发导通概率如表1所示。可知,间隙距离对主间隙触发导通概率影响较大。随着间隙距离的增大,主间隙触发击穿概率迅速降低,当间隙距离为15 mm时,主间隙击穿概率降低到85%,不能可靠触发导通。这是因为在触发脉冲幅值确定的情况下,等离子体喷射高度相同,随着开关间隙距离增大,喷射等离子体头部与高压电极间的距离增加,在10%左右的极低工作系数下,等离子体喷射触发开关的导通概率迅速降低。

表1 不同间隙距离下,主回路电压及开关触发导通概率

Table 1 main voltage and discharge probability at different gap distance

distance/mm	main voltage/kV	discharge number in 40 triggers	discharge probability/%
5	-7	40	100
13	-20	38	95
15	-22	34	85
18	-27	28	70

开关触发放电平均时延和抖动变化曲线如图5所示。由图5可知,随着间隙距离的增加,主间隙触发放电平均时延和抖动显著变大,间隙长度由5mm变为18 mm,其导通时延由 $(11.7 \pm 1.42) \mu s$ 增至 $(19.7 \pm 4.23) \mu s$;而当间隙距离大于13 mm时,时延和抖动的增加趋势更明显。结合表1可知,这是因为当间隙距离为13 mm时,主间隙已经处于能够可靠触发的临界状态附近,如果间隙距离继续增大,则主间隙触发导通概率迅速降低,其放电时延和抖

动也明显变大。

2.2 工作系数对开关触发导通特性的影响

气体开关间隙距离为 5 mm; 使用 N₂ 作为绝缘介质, 气压 0.5 MPa; 触发脉冲电压幅值固定为 +48 kV; 改变主回路充电电压, 使得开关间隙工作系数 m 变化范围为 10%~60%。每组实验重复 40 次, 得到不同工作系数下开关间隙触发导通平均时延和抖动变化曲线如图 6 所示。

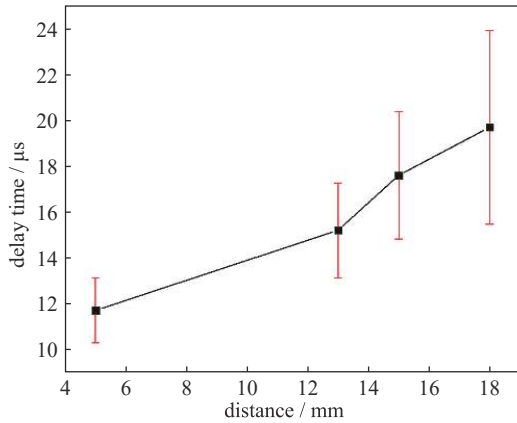


Fig. 5 Delay time and jitter of the switch with different switching coefficients

图 5 开关导通时延与抖动随间隙距离的变化曲线

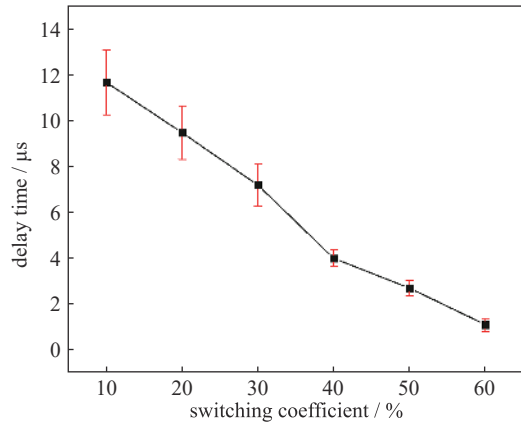


Fig. 6 Delay time and jitter of the switch with different switching coefficient

图 6 开关导通时延与抖动随开关工作系数的变化曲线

由图 6 可知, 工作系数对开关触发导通平均时延和抖动的影响十分明显。随着工作系数的增加, 开关间隙击穿时延和抖动几乎线性减小, 当工作系数由 10% 增大到 60% 时, 其时延由 $(11.7 \pm 1.42) \mu\text{s}$ 变为 $(1.1 \pm 0.28) \mu\text{s}$ 。这是因为当工作系数增加时, 开关上施加的电压使喷射等离子体头部与主电极间更易发生击穿, 即使开关击穿时喷射等离子体头部到达的高度随工作系数增加而降低, 而在触发脉冲幅值相同、开关气压相同的条件下, 每次触发等离子体喷射的速度与极限高度是相同的, 从而导致开关触发导通时延与抖动下降; 而在高工作系数下, 较传统电脉冲触发气体开关, 由于喷射等离子体在主间隙内的发展需要一定时间, 气体开关触发导通时延主要由喷射等离子体发展时间构成, 故而其时延与抖动偏大。

2.3 气体种类和气压对开关触发导通特性的影响

气体开关分别充 SF₆, N₂ 以及 SF₆ 和 N₂ 的混合气体 (混合气体组成为 20% 的 SF₆ 和 80% 的 N₂), 气压分别为 0.2, 0.3 和 0.5 MPa。触发脉冲电压幅值固定为 +48 kV, 主回路储能电容充电电压为 -20 kV, 为保证开关的工作系数为 10% 不变, 即开关的自击穿电压为 200 kV 不变, 不同气体种类和间隙气压下主间隙距离相应改变。表 2 为不同气体种类和气压下对应的开关间隙距离。每组实验重复 40 次, 得到不同气体种类和气压下间隙距离和触发导通平均时延和抖动变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知, 不同气体种类和气压下间隙触发导通平均时延和抖动相差较大, 在开关自击穿电压相同的条件下, 随着气压增大、间隙距离减小, 开关的触发导通时延明显降低。这表明气

表 2 不同气体种类和间隙气压下, 开关的间隙距离

Table 2 Gap distance changes with gas type and pressure

gas	pressure/MPa	distance/mm
SF ₆	0.2	12
	0.3	8
	0.5	5
N ₂	0.2	32
	0.3	22
	0.5	13
20% SF ₆ +80% N ₂	0.2	16
	0.3	11
	0.5	7

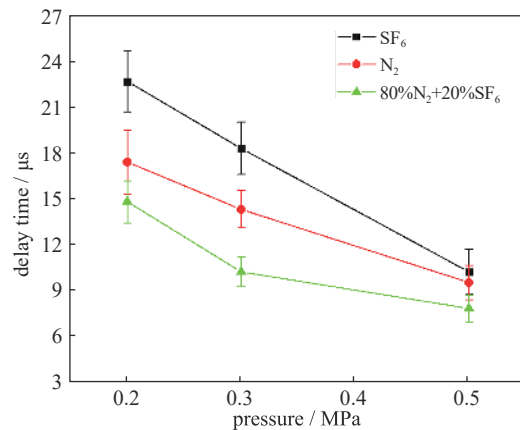


Fig. 7 Delay time and jitter of the switch with different gas type and pressures

图 7 开关导通时延与抖动随气体种类和气压的变化曲线

压升高将抑制喷射等离子体的发展,其喷射高度降低,但在保持开关自击穿电压以及工作系数相同的情况下,开关间隙距离减小,两者共同作用使得开关的触发导通时延降低。

SF₆ 气体中的导通时延显著大于 N₂ 中的时延情况,这是因为 SF₆ 的强电负性,吸附电子阻碍喷射等离子体的发展,从而使开关的触发导通时延增加。

2.4 不同电压极性下间隙触发导通特性

气体开关分别充 SF₆, N₂, 触发脉冲电压幅值固定为 48 kV, 主回路储能电容充电电压为 20 kV, 气体开关间隙距离固定为 5 mm 不变。触发脉冲极性与气体开关工作电压极性组合可有四种工作条件,如表 3 所示。

表 3 不同工作模式下, 工作电压与触发脉冲电压极性

Table 3 Polarities of main voltage and trigger pulse at different working mode

working mode	polarities of main voltage	polarities of trigger voltage
I	negative	positive
II	positive	negative
III	positive	positive
IV	negative	negative

图 8 为触发电压和主电压极性相反时开关触发导通时延和抖动随气压的变化曲线。由图可知,相同触发电压和主电压极性下,由于气体开关间隙距离固定,在气压相同条件下 SF₆ 气体绝缘强度高于 N₂ 气体,故而 SF₆ 中开关导通时延明显大于 N₂ 中击穿时延。另外,II 条件下开关触发击穿时延明显小于条件 I 下的导通时延。其原因可能是,在条件 II 下,触发电压为负极性,对应着“针-板”电极模型中“负尖-正板”的情况,此时等离子体喷射击穿电压较高,等离子体获得的初始能量高,从喷孔喷出的初始速度大。同时,主电压为正极性,开关间隙中电场方向由主电极指向板电极,对喷射等离子体头部的电子具有加速作用,进一步加快了等离子体在开关间隙中的发展,因此开关导通时延明显减小。

图 9 为触发电压和主电压极性相同时开关触发击穿时延和抖动随气压的变化曲线。可知,条件 IV 下开关触发导通时延小于条件 III 下的导通时延。其原因可能是,在条件 IV 下,触发电压和主电压均为正极性,虽然喷射等离子体获得的初始能量低,从喷孔喷出的初始速度小,但在开关间隙中受到电场的加速作用,导致其发展速度更快,因此开关导通时延较小。这也说明主电压极性对开关触发导通时延的影响更明显。

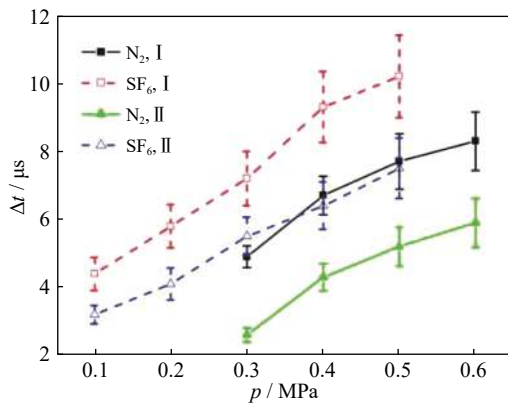


Fig. 8 Delay time and jitter of the switch with different polarities of main voltage and trigger pulses

图 8 触发电压和主电压极性相反时开关触发击穿时延与抖动

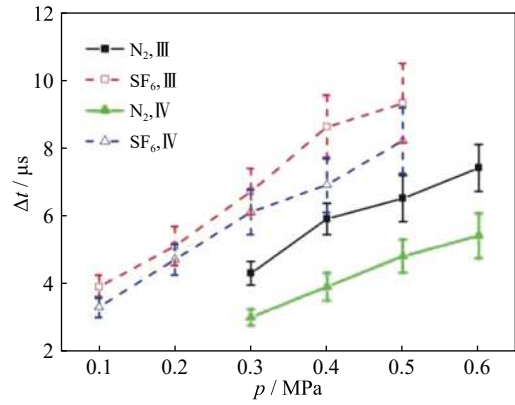


Fig. 9 Delay time and jitter of the switch with same polarities of main voltage and trigger pulses

图 9 触发电压和主电压极性相同时开关触发击穿时延与抖动

另外,对比图 8 和图 9 还可以发现,四种工作条件下开关触发导通时延的大小关系为 $\Delta t_{II} < \Delta t_{IV} < \Delta t_{III} < \Delta t_{I}$ 。这个结果是由前述两种因素共同作用造成的,即触发电压极性主要影响喷射等离子体的初始速度,而主电压极性主要影响喷射等离子体的发展快慢,并且后者作用更明显。因此,为了获得更小的开关触发导通时延,开关工作条件可选为条件 II,即主电压为正极性,触发电压为负极性。

3 结论

本文实验研究了微孔火花放电喷射等离子体触发开关的触发导通特性,获得了不同间隙距离(5~18 mm)、不

同工作系数(10%~60%)、不同气压(0.2~0.5 MPa)、不同气体种类(N₂, SF₆)、不同主电压与触发电压极性下的开关导通时延和抖动,主要结论如下:(1)开关触发导通时延与触发击穿概率随间隙距离增加分别增加与降低,当气体开关采用0.5 MPa_N₂作为绝缘介质时,间隙长度由5 mm变为18 mm,其导通时延由(11.7±1.42)μs增至(19.7±4.23)μs,导通概率由100%降至70%;(2)随着工作系数增加,开关导通时延和抖动迅速降低,当工作系数由10%增大到60%时,其时延由(11.7±1.42)μs变为(1.1±0.28)μs。在确保开关自击穿电压不变的前提下,高气压、短间距更利于获得较小的开关导通时延和抖动,SF₆和N₂混合气体在这方面具有较为明显的优势,是优选的气体绝缘介质;(3)触发电压与工作电压的极性配合对开关的触发导通特性有明显影响,负极性触发脉冲与正极性工作电压的配合可最大程度降低开关的触发导通时延。

参考文献:

- [1] 刘轩东, 孙凤举, 姜晓峰, 等. 气体开关抖动对单模块快脉冲直线型变压器驱动源输出特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 1163-1166. (Liu Xuandong, Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, et al. Influence of gas switch jitter on output characteristics of single modular fast linear transformer driver. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 1163-1166)
- [2] 武庆周, 李劲, 李远, 等. “神龙二号”气体火花开关中绝缘结构的电场分析与优化[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 025001. (Wu Qingzhou, Li Jin, Li Yuan, et al. Electric field analysis and optimization of the insulation system in gas-filled spark gap switch of Dragon-II accelerator. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 025001)
- [3] 伍友成, 耿力东, 何洪, 等. 100 kV重频气体开关初步研究及应用[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 025005. (Wu Youcheng, Geng Lidong, He Yang, et al. Investigation and application of 100 kV repetitive gas switches. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 025005)
- [4] 宋法伦, 秦风, 张勇, 等. 气体开关对多级脉冲形成线输出波形的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 045032. (Song Falun, Qin Feng, Zhang Yong, et al. Analysis of output waveform for multi-stage stacked Blumlein line commutated by individual gas switches. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 045032)
- [5] Larsson A. Gas-discharge closing switches and their time jitter[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2012, 40(10): 2431-2442.
- [6] 邱剑, 刘克富, 雷宇. 直线变压器驱动源多路开关同步触发技术[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 765-770. (Qiu Jian, Liu Kefu, Lei Yu. Multi-output synchronization trigger for linear transformer driver. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 765-770)
- [7] 滕亚青, 刘克富, 邱剑, 等. 阵列微孔阴极放电触发的纳秒脉冲开关[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 621-624. (Teng Yaqing, Liu Kefu, Qiu Jian, et al. Nanosecond pulsed switch triggered by array microhollow cathode discharge. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 621-624)
- [8] 刘鹏, 魏浩, 孙凤举, 等. 快放电直线变压器型驱动源用场畸变型低电感气体火花开关[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2554-2560. (Liu Peng, Wei Hao, Sun Fengju, et al. Low-inductance field-distortion gas spark switches for fast linear transformer drivers. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2554-2560)
- [9] Osmokrovic P, Arsic N, Lazarevic Z. Triggered vacuum and gas spark gaps[J]. *IEEE Trans Power Delivery*, 1996, 11(2): 858-864.
- [10] 殷毅, 杨杰, 钟辉煌, 等. 激光触发开关触发时延及抖动特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 194-200. (Yin Yi, Yang Jie, Zhong Huihuang, et al. Triggering delay and jitter of laser triggered gas switch. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 194-200)
- [11] LeChien K R, Gahl J M. Multichannel and impedance analysis of the laser-triggered rimfire gas switch[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2006, 34(5): 1646-1652.
- [12] 李俊娜, 邱爱慈, 蒯斌, 等. 自耦式紫外预电离开关特性[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(6): 994-998. (Li Junna, Qiu Aici, Kuai Bin, et al. Characteristics of capacitance-resistance coupling UV illumination switch. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(6): 994-998)
- [13] Liu X, Jiang X, Sun F, et al. Experimental study on synchronous discharge of ten multigap multichannel gas switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2009, 37(10): 1943-1947.
- [14] 常家森, 危瑾, 刘轩东, 等. 同轴场畸变气体火花开关的多通道放电特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1234-1238. (Chang Jiasen, Wei Jin, Liu Xuandong, et al. Multichannel discharge characteristics of coaxial field distortion gas spark switch. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1234-1238)
- [15] Woodworth J R, Alexander J A, Gruner F R, et al. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2009, 12: 060401.
- [16] Tie W, Liu X, Zhang Q, et al. Note: Design and investigation of a multichannel plasma-jet triggered gas switch[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 076105.
- [17] Tie W, Liu S, Liu X, et al. A novel low-jitter plasma-jet triggered gas switch operated at a low working coefficient[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 023504.
- [18] 铁维昊, 刘善红, 张乔根, 等. 新型等离子体喷射触发其他开关[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 045013. (Tie Weihao, Liu Shanhong, Zhang Qiaogen, et al. A novel plasma-jet triggered gas switch. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 045013)
- [19] Tie W, Liu X, Liu S, et al. Low-jitter discharge of a plasma-jet triggered gas switch at low working coefficients[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 42(6): 1729-1735.
- [20] Liu S, Liu X, Shen X, et al. Space-time evolution of ejected plasma for the triggering of gas switch[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 063515.