

气体介质对多间隙气体开关电晕均压与 自击穿特性的影响*

刘现飞, 唐 钊, 刘轩东

(西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 快脉冲直线变压器型驱动源(FLTD)是近年来快速发展的新型脉冲功率源技术,多采用多间隙气体开关作为开关器件。电晕均压措施有利于提升开关击穿性能,但不同气体中电晕放电有显著区别。本文首先研究了空气中针电极对单间隙电晕放电特性的影响,确定了电晕针电极的尺寸,之后研究了 N_2 、 CO_2 、 SF_6/N_2 混合气体、 C_4F_7N/N_2 混合气体中的电晕放电特性,研究了电晕均压6间隙气体开关击穿电压及其稳定性随气体种类和气压的变化规律。实验结果表明, N_2 中电晕电流较大且不稳定,空气中电晕电流比 N_2 中低,且电晕放电较为稳定,微量强电负性气体加入会极大降低电晕放电电流。当采用空气和 N_2 作绝缘介质时,气体开关击穿电压随气压升高线性增加,但存在低值击穿,微量强电负性气体混合 N_2 可显著提升击穿电压的稳定性。1% $SF_6/99\%N_2$ 混合气体在0.18 MPa时,击穿电压约为197.33 kV,标准偏差占击穿电压比例为1.50%,1% $C_4F_7N/99\%N_2$ 混合气体在0.15 MPa时,击穿电压约为190.42 kV,标准偏差为0.55%。这表明,微量环保替代气体 C_4F_7N 与 N_2 的混合气体对于提升多间隙气体开关击穿电压稳定性有显著作用。

关键词: 电晕均压; 多间隙开关; 电晕特性; 自击穿特性

中图分类号: TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.0358

Effect of gas medium on corona discharge for voltage balance and self-breakdown characteristics in multi-gaps gas switch

Liu Xianfei, Tang Zhao, Liu Xuandong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fast linear transformer drive (FLTD) is a new type of pulse power source developing rapidly in recent years. It usually adopts multi-gap gas switch (MGS) as its primary switch. The corona discharge for voltage balance was proposed to improve the switch breakdown performance. However, great difference of corona discharge in different gases may exist and affect the performance of MGSs. In this paper, the effects of needle electrode in air on single-gap corona discharge characteristics are studied. The size of corona needle electrode is determined. Then, the corona discharge characteristics in N_2 , CO_2 , SF_6/N_2 and C_4F_7N/N_2 are studied. The breakdown voltage of the 6-gap gas switch and its stability with the gas type and pressure are studied. The experimental results show that the corona current is high in N_2 . The corona current in air is lower and the corona discharge is stable in air. The addition of electric negative gas will greatly reduce the corona current. When air and N_2 are used as the switch gas, the breakdown voltage of the switch increases linearly with the increase of gas pressure, but there is a low breakdown voltage sometimes. When electric negative gas is mixed with N_2 , the breakdown voltage is significantly higher. When the pressure of 1% $SF_6/99\%N_2$ mixed gas is 0.18 MPa, the breakdown voltage is about 197.33 kV and the ratio of the standard deviation to the breakdown voltage is 1.50%. When 1% $C_4F_7N/99\%N_2$ mixed gas is 0.15 MPa. The breakdown voltage is about 190.42 kV, and the standard deviation is 0.55%. This indicates that the mixed gas of C_4F_7N and N_2 has a significant effect on improving the breakdown voltage stability of multi-gap gas switch.

Key words: corona discharge for voltage balance; multi-gap gas switch; corona characteristics; self-breakdown characteristics

* 收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51207127)

作者简介: 刘现飞(1997—), 男, 硕士研究生, 从事脉冲功率技术的研究; liuxianfei2015@stu.xjtu.edu.cn.

脉冲功率技术经过几十年的发展,如今在医学、环保、工业、材料等众多领域都有着十分广泛的应用^[1]。快直线变压器型驱动源技术(FLTD)是近年来得到快速发展的一种新型脉冲功率结构,多种 FLTD 模块结构或者概念模型也被陆续提出^[2-4],相关技术发展也越来越成熟^[5-6]。而制约 FLTD 发展的一个很重要的因素就是其内部所需的数量庞大的开关。开关的性能直接决定了 FLTD 的性能。而 FLTD 为了要实现电压的叠加输出,需要其内部的所有开关相互独立工作,严格按照固定时序导通,因此要求各个开关必须非常可靠,在其工作电压下要有很低的自击穿概率。多间隙开关凭借其结构简单、传导脉冲电流大、工作电压高、击穿电压相对比较稳定等特点,在 FLTD 中有着非常广泛的应用^[7-8],但是传统的多间隙串联开关各个间隙之间主要是靠绝缘子的表面电阻进行电压的分配,容易造成电压不均。俄罗斯托木斯克强流电子学研究所(HCEI)提出了在多间隙开关中利用针电极电晕放电产生的电晕电流来进行强制均压的方式^[9],使串联间隙的电压均匀分布,降低击穿电压的分散性^[10],改善开关性能。

国内外的一些学者对电晕均压气体开关技术进行了研究,A. Kim 等学者^[10]研究发现电晕针的加入并未使单间隙击穿电压发生明显降低,西北核技术研究所姜晓峰等学者^[11]实验发现在干燥空气工作介质 0.1 MPa 到 0.25 MPa 间的各个工作点下,开关击穿电压分散性较之无均压措施的开关明显降低,开关在 0.4 MPa, ± 100 kV 的工作条件下,自击穿的概率在 1×10^{-4} 以下。这表明电晕均压是一种有效的均压方式,但是仍需通过进一步研究确定电晕针尺寸最优配置,同时能否通过气体介质的合理选择,进一步提升电晕均压特性和自击穿特性,还有待进一步研究。因此本文针对上述问题,通过空气中针电极对电晕放电特性和单间隙击穿电压的影响,确定电晕针电极的尺寸,进而研究不同气体介质对电晕放电特性,以及 6 间隙气体开关击穿电压及其稳定性的影响规律。

1 电晕均压多间隙开关结构及实验电路

多间隙开关结构如图 1 所示,由 2 个高压电极、5 个中间电极、电晕针、绝缘外壳及气嘴组成,高压电极端盖用于连接外部电路,中间电极通过平头螺钉固定在绝缘筒壁的 V 型槽内,电极厚度为 2 cm。开关共有 6 个间隙,长度均为 5 mm。除正高压电极外,其余每个电极均安装有电晕针,针尖指向正高压电极,针安装处到电极下表面的距离为 9 mm。开关中间电极为触发电极。开关的气嘴安装在绝缘外壳的侧面。开关绝缘子由有机玻璃制成,电极端盖和中间电极由不锈钢制成。

单间隙电晕特性实验电路如图 2 所示,100 kV 直流电源通过 1.5 M Ω 的充电电阻连接到 40 nF 电容器 C,再通过 100 M Ω 的保护电阻连接到开关间隙。开关两端电压由电阻分压器测量,分压比为 30 312 : 1,线性度良好。电晕电流由微安表测量,在其两端并联气体放电管(GDT)以保护微安表。

多间隙开关自击穿特性实验电路如图 3 所示,多间隙开关的正负高压电极分别连接到正负充电的 40 nF 电容 C,由 ± 120 kV 直流高压电源经 20 M Ω 电阻充电,负载电阻 R_L 为水溶液电阻。开关两端电压由电阻分压器测量,分压器分压比为 8 330:1。

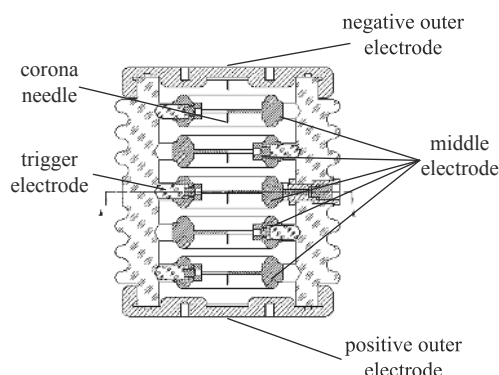


Fig. 1 Structure of multi-gap gas switch with corona needles for voltage balance

图 1 电晕均压多间隙开关结构图

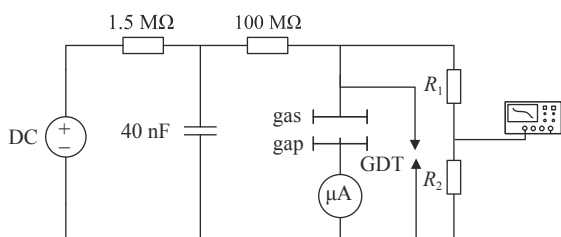


Fig. 2 Test circuit of single gap corona discharge characteristics

图 2 单间隙电晕特性实验电路

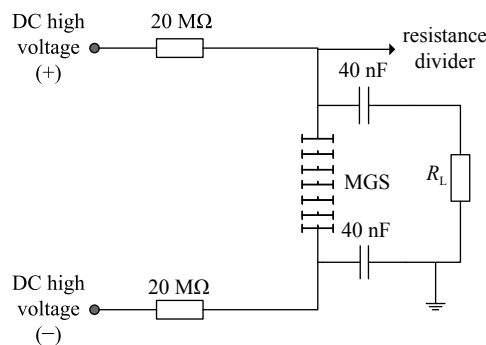


Fig. 3 Test circuit of multi-gap gas switch self-breakdown characteristics

图 3 多间隙开关自击穿特性实验电路

2 电晕均压单间隙电晕特性

2.1 针尺寸对电晕特性的影响

选取电晕针长度为 4, 6, 8, 10, 12 mm, 电晕针长度为 4~8 mm 时, 电晕针未突出上电极表面, 长度增加至 10, 12 mm 时, 电晕针将突出上电极表面。选取电晕针的直径为 0.7, 0.9, 1.3 mm, 三种直径针对应针尖曲率半径为 29, 74, 217 μm 。

一个大气压自然空气中不同针尺寸单间隙电晕特性如图 4 所示, 在同一直径下, 随针长度增加, 电场不均匀程度增加, 电晕起始电压降低, 电晕电流增大, 曲线陡度变大, 说明随针长度增加, 电晕电流对电压变化更加敏感, 在高电压下将会使得电晕均压电流过大。针长度过小时, 电晕起始电压高, 电晕电流小, 也会影响均压效果, 所以电晕针长度为 6~8 mm 较合适。

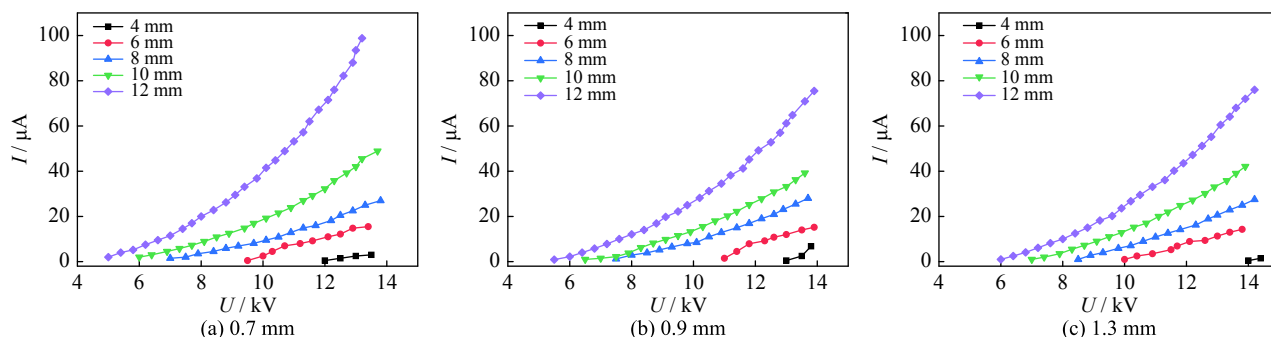


Fig. 4 Corona discharge characteristics of single gap under different needle size

图 4 不同针尺寸下单间隙电晕特性

在同一针长度下, 随着针直径即针尖曲率半径的增大, 其电晕起始电压有略微升高, 但差别较小。在针直径为 0.7 mm 时, 间隙电压确定不变情况下, 电晕电流存在小幅波动, 存在不稳定的情况。同时考虑到随着放电进行, 针尖会出现因烧蚀而产生的钝化^[11], 所以最终针直径选取 0.9 mm, 即使针尖发生钝化, 曲率半径变大, 由于 0.9 mm 直径与 1.3 mm 直径电晕针单间隙电晕特性差别较小, 此时开关仍可具有均压效果。综上, 针电极长度 6~8 mm, 直径 0.9 mm 时, 具有较为稳定的电晕放电特性, 可应用于电晕开关。本文采用长度为 6 mm, 直径为 0.9 mm 的电晕针。

2.2 气体介质对电晕特性的影响

N_2 作为一种常见的绝缘工作介质气体, 也常应用于气体开关中^[12]。 SF_6 电气强度高, 常被作为绝缘气体应用于各种电力设备中^[13], 但 SF_6 全球变暖潜能值(GWP)很高, 有显著的重温室效应^[14], 因此常与 N_2 混合使用, 同样具有很好的绝缘效果。 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 作为一种可能的环保替代气体, 其 GWP 值约为 SF_6 的十分之一, 而绝缘强度大约为 SF_6 的两倍, 最近几年获得了广泛的关注和研究^[15]。

干燥空气和 CO_2 两种介质下不同气压单间隙电晕特性如图 5 所示, 电晕电流较低, 随气压升高, 电晕起始电压升高, 电晕电流上升趋势减缓, 曲线整体右移。随间隙间电压升高, 针尖作为负极首先发生电子崩, 产生正负带电粒子, 负带电粒子即电子以很快速度移向正电极, 正离子则缓慢移向针尖, 聚集在针尖附近的正离子增强了尖端附近电场, 使得电晕开始发展, 而气体介质中二氧化碳及氧气等分子电子亲和能较大, 易吸附电子, 形成负空间离

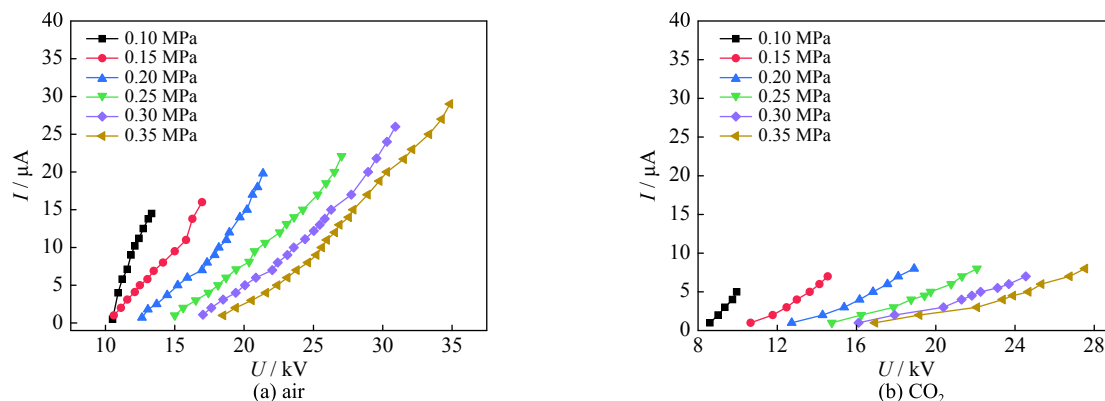


Fig. 5 Corona discharge characteristics of single gap under different pressure in air and CO_2

图 5 空气和 CO_2 中不同气压下单间隙电晕特性

子, 同样聚集在针尖附近, 削弱电晕层电场, 使得空气和 CO_2 介质中电晕发展稳定, 电晕电流较小。随气压升高, 间隙中电负性分子浓度增大, 更易吸附电子形成负空间离子, 电晕更加稳定。 CO_2 作为纯电负性气体, 用于工作介质时电晕电流低于空气介质。

N_2 介质下单间隙电晕特性如图 6 所示, 电晕起始电压低于空气介质下, 电晕电流较大。高压下氮气中电晕同样存在不稳定现象, 即固定间隙电压下, 电晕电流存在波动, 这不利于电晕均压。 N_2 分子中含有氮氮三键, 化学性质十分稳定, 电子亲和能几乎为 0, 很难吸引电子, 电晕发展较快。

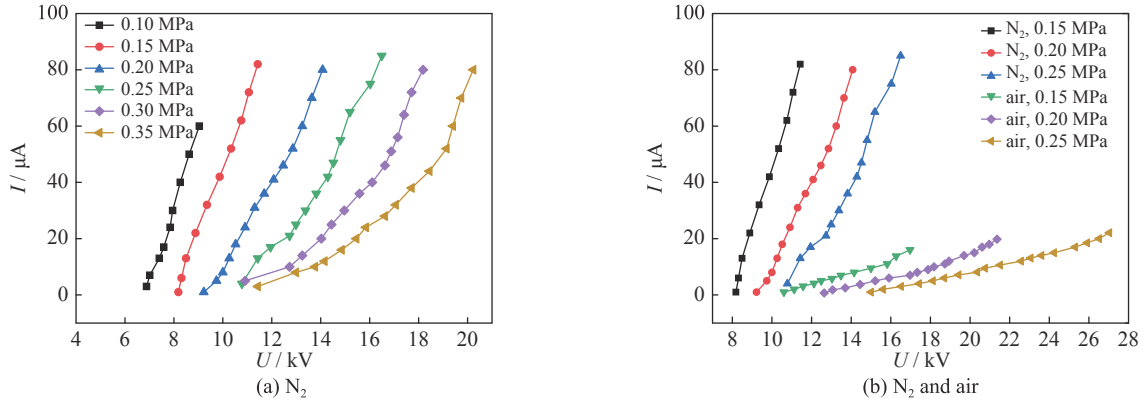


Fig. 6 Corona discharge characteristics of single gap under different pressure in N_2

图 6 N_2 中不同气压下单间隙电晕特性

SF_6/N_2 , $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ 混合气体介质下实验结果如图 7 所示, 混合气体中 SF_6 及 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 的体积分数为 5%。 SF_6/N_2 和 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ 介质下电晕电流低于 N_2 介质下, 电晕电流随电压上升趋势减缓。说明 N_2 中混入少量强电负性气体 SF_6 或 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 同样可以使电晕特性变稳定。

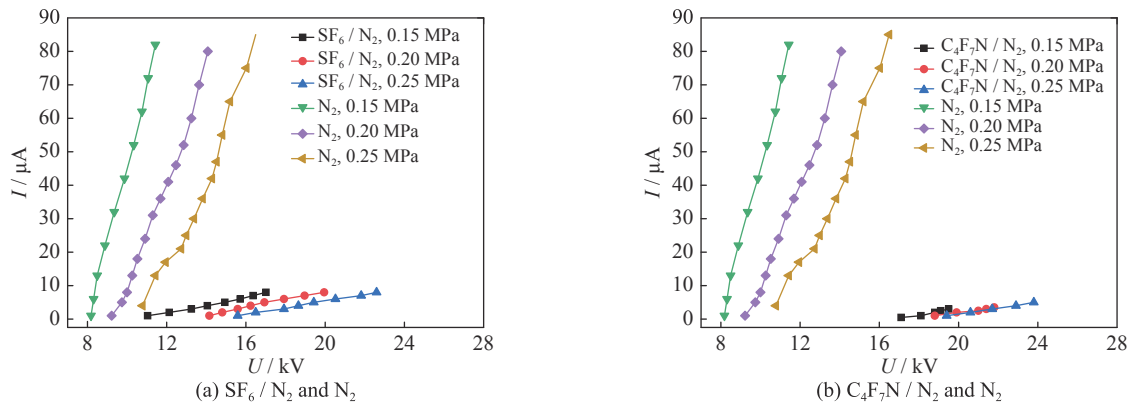


Fig. 7 Corona discharge characteristics of single gap under different pressure in SF_6/N_2 and $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$

图 7 SF_6/N_2 与 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ 中不同气压下单间隙电晕特性

3 电晕均压多间隙开关自击穿特性

对比研究了空气、 N_2 、 CO_2 、 SF_6/N_2 、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ 下多间隙开关的自击穿电压, 混合气体中 SF_6 或 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 的体积分数分别为 1%、3%、5%。开关最高工作电压约为 200 kV。对于每一种气体介质, 首先调整气压使开关击穿电压达到 200 kV 左右, 重复放电 100 次, 以研究同一工作条件下自击穿电压的分散性, 然后再逐渐降低气压选取工作点, 研究不同气压下的自击穿电压。除最高气压外, 其余每一个工作条件下重复放电 30 次。

不同气体介质下自击穿电压随气压的变化规律如图 8 所示。可见, 多间隙气体开关的自击穿电压随气压升高, 基本呈线性升高趋势。空气下击穿电压略高于 CO_2 , N_2 下击穿电压高于空气, 而 SF_6 、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 的绝缘强度较高, 分别为空气的 3 倍和 7 倍左右^[16], N_2 中混入少量 SF_6 或 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 之后击穿电压有明显的提升。

图 9 为两种混合气体在混合浓度分别为 1%、3%、5% 下的击穿电压情况, 击穿电压随 SF_6 或 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 的体积分数的增大而增大, 所以在 N_2 中加入少量 SF_6 或 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 可以明显的提高多间隙开关的击穿电压, 使其应用于耐压更高的场合。

对于 100 次放电的工作点情况,空气介质下,0.27 MPa 工作点处击穿电压均值为 197.62 kV,击穿电压标准差占均值为 1.61%,分散性很小, N_2 和 CO_2 介质下,0.2, 0.3 MPa 工作点处击穿电压均值为 200.10, 191.36 kV,标准差占均值为 3.30%, 2.59%,分散性相对较大。三种气体介质下均存在低电压击穿点,但是出现概率较低,空气介质与 CO_2 介质中为 3%, N_2 介质中为 4%。

含 SF_6 体积分数为 1%, 3%, 5% 的 SF_6/N_2 介质下 0.18, 0.16, 0.14 MPa 工作点处击穿电压均值为 197.33, 188.09, 186.60 kV,标准差占均值为 1.50%, 1.25%, 1.11%,分散性小于空气中的情况。含 C_4F_7N 体积分数为 1%, 3%, 5% 的 C_4F_7N/N_2 介质下 0.15, 0.14, 0.12 MPa 工作点处击穿电压均值为 190.42, 193.74, 198.40 kV,标准差占均值为 0.55%, 0.85%, 0.67%,分散性最小。两种混合气体介质无低电压击穿点。以 SF_6 为例进行分析, SF_6 作为强电负性气体,电子亲和能很高,针尖附近电晕放电产生初始电子后,初始电子在电场加速过程中易与 SF_6 分子发生吸附反应;并且 SF_6 气体分子体积较大,即碰撞横截面较大,碰撞反应发生几率也较高。所以开关采用 SF_6/N_2 气体介质时,初始电子在向阳极移动过程中会易发生吸附和碰撞,平均自由程较短,很难发展成为高能电子;再加上吸附反应产生的负离子 SF_6^- 和 SF_5^- 等会进一步削弱针尖附近电晕层电场,使得放电不易在低电压下转入电子崩阶段,电子电流不存在激增,开关稳定工作。

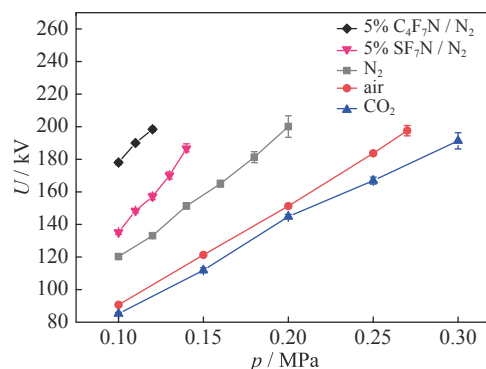


Fig. 8 Distribution of breakdown voltage of different pressures in different gas media

图 8 不同气体介质下不同气压击穿电压的分布

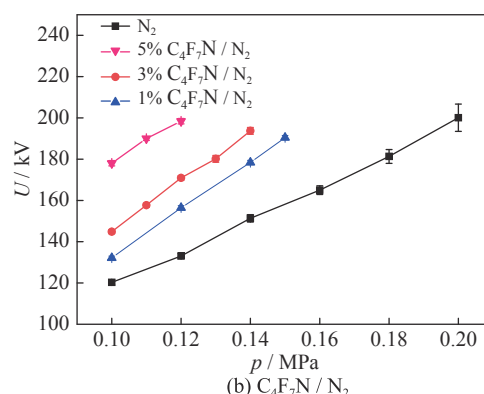
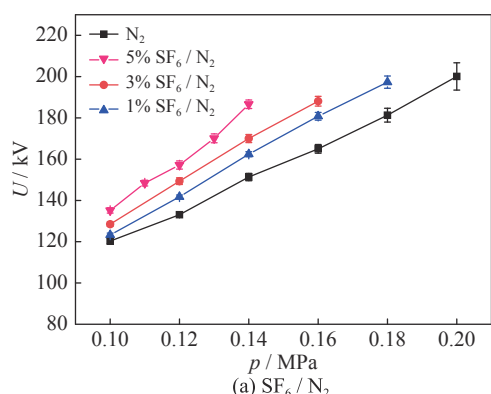


Fig. 9 Distribution of breakdown voltage of different pressures in mixtures of different mixed concentration

图 9 混合气体不同混合浓度下不同气压的击穿电压分布

4 结论

本文针对不同气体介下单间隙电晕特性和多间隙开关击穿特性进行了研究,实验结果表明:

(1) 随着电晕针长度的增加,单间隙电晕起始电压降低,电晕电流增大。针电极长度 6~8 mm,直径 0.9 mm 时,具有较为稳定的电晕放电特性,可应用于电晕开关。

(2) 空气介质下电晕发展较稳定; N_2 介质下,电晕电流变大; CO_2 介质下,电晕电流低于空气介质下; SF_6/N_2 , C_4F_7N/N_2 介质下,相比 N_2 ,电晕电流大幅降低,说明在 N_2 中混入少量的 SF_6 或 C_4F_7N 可以使电晕特性变稳定。

(3) 空气、 N_2 、 SF_6/N_2 、 C_4F_7N/N_2 介质下开关击穿电压随气压升高而线性升高, CO_2 介质下在较高气压略有饱和趋势。空气介质下,分散性很小,但存在低电压击穿点; N_2 和 CO_2 介质下,分散性相对大一些,同样存在低电压击穿点;而在 SF_6/N_2 、 C_4F_7N/N_2 介质下分散性最小,并且无低电压击穿点,这表明, SF_6/N_2 、 C_4F_7N/N_2 为开关的良好气体介质,特别是环保替代气体 C_4F_7N 与 N_2 的混合气体对于提升电晕均压多间隙气体开关击穿电压稳定性有显著的作用。

参考文献:

- [1] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (6)代表性的应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 030201. (Jiang Weihua. High repetition rate pulse power technology and its application: (6) Representative application[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 030201)

- [2] 周林, 李正宏, 王真, 等. 5 MA 100 ns重频LTD驱动器设计[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 050102. (Zhou Lin, Li Zhenghong, Wang Zhen, et al. 5 MA 100 ns repeated frequency LTD driver design[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 050102)
- [3] 孙凤举, 姜晓峰, 魏浩, 等. 一种多级串联共用外腔体新结构LTD[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 025001. (Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, Wei Hao, et al. A multi-stage series shared external cavity new structure LTD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29: 025001)
- [4] 孙凤举, 姜晓峰, 王志国, 等. 四级串联共用腔体MA级FLTD的设计与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 035001. (Sun Fengju, Jiang Xiaofeng, Wang Zhiguo, et al. Design and simulation of four-stage series shared cavity MA grade FLTD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 035001)
- [5] Zhao Yue, Chen Lin, Zhou Liangji. 216 cables synchronization trigger for linear transformer driver[C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference. 2014: 63-66.
- [6] Jiang Jinbo, He Mengbing. Design of low inductance, long life capacitor for linear transformer drivers[J]. IEEE Trans Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3555-3559.
- [7] Kim A A, Kovalchuk B M, Bostrikov A N, et al. 100 ns current rise time LTD stage[C]//28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. 2001: 1491-1494.
- [8] Mazarakis M G, Fowler W E, Kim A A, et al. High current, 0.5-MA, fast, 100-ns, linear transformer driver experiments[J]. Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, 2009, 12(5): 313-316.
- [9] Laurent F. Multichannel spark-gap with multiple intervals and pulsed high power generator: GB2438530[P]. 2007-11-28.
- [10] Kim A, Frolov S, Alexeenko V, et al. Prefire probability of the switch type fast LTD[C]// IEEE Pulsed Power Conference. 2009.
- [11] 姜晓峰, 丛培天, 孙凤举, 等. 电晕均压多间隙串联气体开关特性实验[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 075009. (Jiang Xiaofeng, Cong Peitian, Sun Fengju, et al. Breakdown characteristics of a multi-gap switch with corona discharge for voltage balance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 075009)
- [12] Sun Hao, Tanaka Y, Wu Yi, et al. Chemically non-equilibrium model of decaying N_2 arcs in a model circuit breaker[C]//IEEE International Conference on Electric Power Equipment—Switching Technology. 2016.
- [13] 陈会利, 徐建源, 李璐维, 等. 不均匀电场 SF_6/N_2 混合气体击穿特性的实验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 110-115. (Chen Huili, Xu Jianyuan, Li Luwei, et al. Experimental study on breakdown characteristics of SF_6/N_2 mixtures in non-uniform electric field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 110-115)
- [14] Guo Can, Zhang Qiaogen, You Haoyang, et al. Influence of electric field non-uniformity on breakdown characteristics in SF_6/N_2 gas mixtures under lightning impulse[J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2248-2258.
- [15] 罗运柏, 高占阳, 高克利, 等. 环保绝缘气体七氟异丁腈(C_4F_7N)的制备技术现状与发展[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1009-1017. (Luo Yunbai, Gao Zhanyang, Gao Keli, et al. Current status and development of preparation technology of environmentally friendly insulating gas(C_4F_7N)[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1009-1017)
- [16] 周文俊, 郑宇, 高克利, 等. 环保型绝缘气体电气特性研究进展[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3114-3124. (Zhou Wenjun, Zheng Yu, Gao Keli, et al. Research progress on electrical properties of environmentally friendly insulating gas[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3114-3124)