

3 MV 自耦式紫外预电离开关的设计*

李俊娜, 薛斌杰, 贾伟, 陈维青, 汤俊萍, 邱爱慈

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 基于紫外预电离技术和阻容耦合电路研制了应用于高功率装置的三串联 3 MV 自耦式紫外电离开关。该开关由紫外预电离间隙和开关主间隙组成。根据同类开关在脉冲电压下的击穿数据推算出 3 MV 开关的间隙距离, 开关主间隙的电场不均匀系数为 1.58。采用台阶屏蔽技术使开关有机玻璃筒外沿面最大电场小于 50 kV/cm, 满足设计要求。设计紫外预电离间隙击穿电压为主脉冲电压的 1%, 理论模拟计算表明, 在 0.1~0.7 MPa 范围内, 预电离间隙电压大于在此范围内间隙击穿电压, 保证可靠预电离。

关键词: 脉冲气体开关; 紫外预电离; 绝缘; 电场分布; 脉冲功率技术

中图分类号: TM836 **文献标志码:** A

开关技术在脉冲功率技术领域有特殊重要的地位^[1], 根据其耐受电压类型的不同可以分为直流开关和脉冲开关^[2]; 本文主要研究一种应用于高功率装置中的脉冲开关。20 世纪 90 年代, 美国 MPI 公司研制成功 2.6 MV 三串联紫外预电离开关^[3], 实现了紫外预电离开关在 MV 级电压下的应用, 并成功应用于 FEMP2000 设备中。紫外预电离开关由开关主间隙和紫外预电离间隙组成。开关工作时, 利用开关主间隙脉冲电压通过耦合方式在预电离间隙得到预电离电压, 预电离间隙先击穿使空气电离在主间隙产生有效初始电子, 减小开关击穿过程中的统计时延^[4-5], 进而达到加速开关导通, 减小开关抖动的目的^[6]。

高功率设备中为了满足输出电压高的需求, 采用多级开关串联的方式。为了实现三级开关的串联同步击穿, 使用电阻分压形式使每级开关均匀分压。在前期工作中我们利用 300 kV 模型开关得到了调节紫外预电离产生时刻的方法以及紫外预电离产生时刻对开关击穿电压的影响^[7]。实验和理论计算表明: 分压电路对开关性能有重要影响, 因此在 3 MV 开关中预电离电路参数的设计是开关设计的关键问题之一。另外, 如何在高功率设备狭小的区域内实现开关电场分布均匀化, 以及开关绝缘子沿面电场符合绝缘要求也是 3 MV 开关设计的难点所在。本文在前期实验的基础上通过电场计算确定了开关主电极距离; 同时设计台阶结构解决了三结合点处绝缘子沿面电场过大的问题; 并且通过模拟计算确定了紫外预电离电路的参数。

1 3 MV 紫外预电离开关结构设计

1.1 设计依据

相对直流开关, 脉冲开关的平均击穿场强更复杂, 此时开关的击穿场强不但与电压幅值有关, 还与脉冲电压的作用时间关联。文献[8]中也提到对于特定场型、气压、间隙距离以及脉冲上升时间的开关要通过实验才能确定其平均击穿场强。在之前实验的基础上, 我们得到适合脉冲上升时间 240 ns, 气压大于 0.5 MPa, 场不均匀系数 $1.5 < f < 1.8$ 时, 开关平均击穿场强的估算公式为

$$E = 34.7p/f \quad (1)$$

在 SF₆ 气体中闪络概率约为 0.3% 时, 允许的最大绝缘体沿面电场为

$$E_i/p < 25 \quad (2)$$

式中: E 为开关自击穿间隙平均电场(kV/cm); E_i 为绝缘体沿面最大电场(kV/cm); p 为开关内的干燥空气和开关外的 SF₆ 气压(0.1 MPa)。

预电离间隙采用尖-尖电极, 间隙距离 1 mm。经过实验得到: 在 240 ns 上升时间的脉冲电压作用下, 气压范围在 0.1~0.7 MPa 时, 尖-尖电极的击穿电压在 4.5~23.0 kV 范围内与气压成近似线性关系。这一结果为预电离间隙击穿电压与主电极电压的配合以及分压电阻的选取提供了数据支持。

* 收稿日期: 2008-12-06; 修订日期: 2009-04-07

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 李俊娜(1981—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事高功率脉冲技术方面研究; uvlna@126.com。

1.2 开关结构设计

基于前期实验和理论计算结果,开关主间隙采用均匀场结构,紫外预电离间隙采用极不均匀场结构。开关内部采用干燥空气为绝缘介质,工作气压设计为 0.1~0.7 MPa。开关外部采用纯 SF₆ 气体为绝缘介质,工作气压设计为 0.2 MPa。3 MV 紫外预电离开关设计为三级自击穿开关串联组成,每级开关包括一个紫外预电离间隙和一个主电极间隙(图 1)。主电极采用不锈钢电极,间隙设计为场不均匀系数很小但距离较大的均匀电场,每级开关的电极距离取 6 cm,电极作表面处理。紫外预电离间隙由钨针和不锈钢尖端组成,钨针与触发盘之间用陶瓷绝缘子隔开,不锈钢尖端点焊于触发盘上,焊点作表面处理。支撑绝缘子采用有机玻璃筒,金属件上与绝缘子相接处设计台阶结构用来屏蔽三结合点处的电场进而减小绝缘子沿面电场。开关通过尼龙拉杆穿过电极盘紧固电极盘和绝缘子。

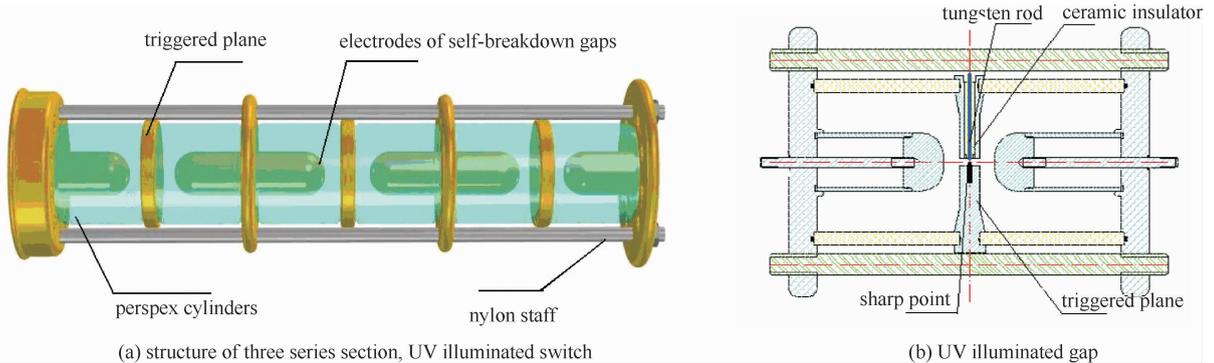


Fig. 1 Sketch of three series section and UV illuminated switch

图 1 三串联紫外预电离开关示意图

2 静电场计算及击穿电压校核

图 2 给出了有机玻璃筒一端台阶屏蔽结构示意图。以一级开关为例进行静电场计算,假设开关工作电压为 3 MV,忽略分压电阻差异则每级开关上工作电压为 1 MV,触发盘上电压为 500 kV,此时静电场计算结果如图 3~4 所示。

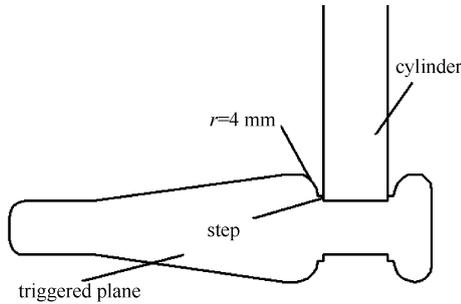


Fig. 2 Structure of cylinder shield

图 2 有机玻璃筒屏蔽结构示意图

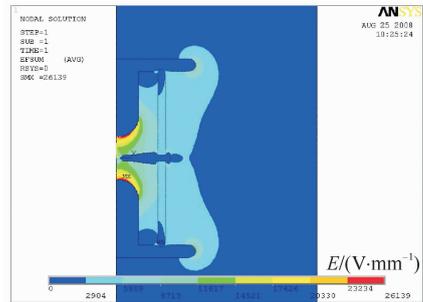
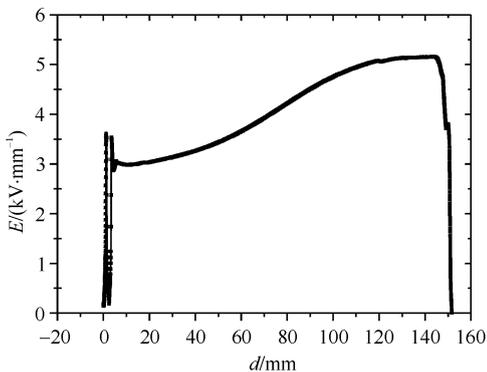
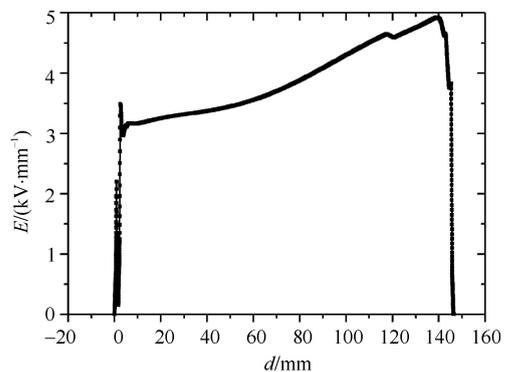


Fig. 3 Distribution of electronic field intensity at switch

图 3 开关位置的电场强度分布



(a) internal surface of cylinder



(b) outer surface of cylinder

Fig. 4 Electronic field of internal and outer cylinder surfaces

图 4 开关内外筒体沿面场强

图 3 给出了开关位置的电场分布, 开关电场最大值出现在电极尖端 261 kV/cm , 开关电场的场不均匀系数 $f = E_{\max}/E_{\text{ave}} = 1.58$ 。图 4 给出了绝缘子内外筒体的沿面电场, 开关筒体内沿面最大场强为 51.6 kV/cm , 开关筒体外沿面最大场强为 49.2 kV/cm 。根据式(1) 对开关最高击穿电压进行校核, 首先得到开关的平均击穿电场

$$E = 34.7p/f \approx 154 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (3)$$

式中: p 取开关最高设计气压 0.7 MPa ; $f = 1.58$ 。此时, 三级开关的最高击穿电压 $U_b = E \times 3d = 2.77 \text{ MV}$ 。

另外, 根据 SF_6 气体中允许的最大绝缘体沿面电场要求, 在 0.2 MPa 的 SF_6 气体中开关沿面的最大电场须小于 50 kV/cm , 图 4(b) 的计算结果为 49.2 kV/cm , 满足设计要求。

3 紫外预电离电路设计

实验中选用串联分压的紫外预电离回路。图 5 给出了高功率装置中 3 MV 开关的等效电路。其中, Marx 电容 C_{Marx} 为 0.625 nF , 等效电感 L_{Marx} 为 $58 \mu\text{H}$; 中间储能电容 C_{tr} 为 0.5 nF ; 3 MV 开关末端测量电阻高压臂电阻 R_p 为 $11 \text{ k}\Omega$; 陡化电容 C_p 为 0.14 nF 。紫外预电离开关可以等效为 6 个间隙电容和 6 个分压电阻耦合分压的形式, 经估算 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 5 \text{ pF}$, 预电离间隙钨针与触发盘之间电容 $C_{\text{UV1}} = C_{\text{UV2}} = C_{\text{UV3}} = 85 \text{ pF}$; 设计中取分压电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 32 \text{ k}\Omega$, 钨针与触发盘之间预电离电阻 $R_{\text{UV1}} = R_{\text{UV2}} = R_{\text{UV3}} = 2 \text{ k}\Omega$ 。

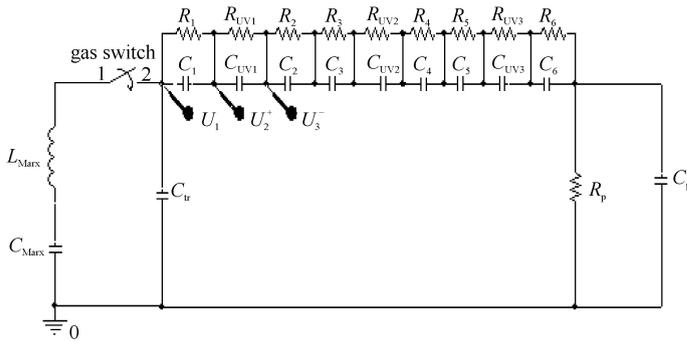


Fig. 5 Equivalent circuit of test bed

图 5 测试平台等效电路图

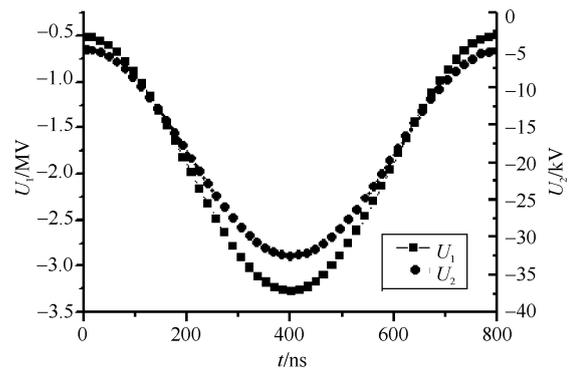


Fig. 6 Voltages of UV preionization gap and main electrodes

图 6 紫外预电离间隙电压与主电极电压

通过 PSpice 软件模拟计算, Marx 电容充电电压为 3 MV 时紫外预电离间隙上的电压波形如图 6 所示。此时预电离间隙电压峰值约 32 kV , 大于尖-尖电极在 0.7 MPa 气压下的击穿电压, 满足紫外预电离间隙在主电极脉冲电压前沿击穿的设计要求。随着 Marx 充电电压的降低, 紫外预电离间隙电压也降低, 且可以按照 $U_2 \approx (R_{\text{UV1}}/6R_1)U_1 \approx 0.01 U_1$ 来估算。假设开关在 0.1 MPa 气压下的击穿电压为 1 MV , 则此时预电离间隙电压 $U_2 = 10 \text{ kV}$, 大于尖-尖电极在 0.1 MPa 气压下的击穿电压, 满足紫外预电离间隙在主电极脉冲电压前沿击穿的设计要求。

4 结论

高功率装置 3 MV 紫外预电离开关由三级均匀电场开关串联组成, 每级开关包括紫外预电离间隙和主电极间隙。开关主间隙采用均匀场设计, 场不均匀系数为 1.58 , 根据实验得到估算公式, 开关最高工作电压为 2.77 MV (气压为 0.7 MPa)。通过三结合点处台阶结构的设计, 实现了有机玻璃筒沿面最大场强小于 50 kV/cm 的理论要求。紫外预电离间隙电压设计为主间隙电压的 1% , 在开关工作范围内 ($0.1 \sim 0.7 \text{ MPa}$) 紫外预电离间隙电压范围为 $10 \sim 30 \text{ kV}$, 满足实验测得的尖-尖电极在此气压范围内的击穿电压, 可以实现有效预电离。实验证明: 不加预电离回路时, 开关的抖动达到数十 ns (均方根值); 加预电离回路时, 开关在 $1.5 \sim 2.5 \text{ MV}$ 工作范围内抖动小于 5 ns (均方根值)。

参考文献:

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High pulsed power technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)

- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003. (Zeng Zhengzhong. The introduction to practical pulsed power technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003)
- [3] Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//Proc of 12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999: 1438-1440.
- [4] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. (Liang Xidong, Chen Changyu, Zhou Yuanxiang. High voltage engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2003)
- [5] Cooper J R, Hutchesson G, Kristiansen M, et al. A multi-spark preionization source for diffuse discharges containing attachers[C]//Proc of 4th IEEE International Pulsed Power Conference. 1983: 726-728.
- [6] 邵涛, 孙广生, 严萍, 等. 高压纳秒脉冲气体放电试验研究进展[J]. 高压电器, 2004, **40**(4): 279-282. (Shao Tao, Sun Guangsheng, Yan Ping, et al. Progress in the experiment and research of gas breakdown under HV nanosecond pulse. *High Voltage Engineering*, 2004, **40**(4): 279-282)
- [7] 李俊娜, 邱爱慈, 蒯斌, 等. 自耦式紫外预电开关特性[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)
- [8] Martin T H. Pulsed charged gas breakdown[C]//Proc of 5th IEEE International Pulsed Power Conference. 1985: 74-83.

Design of 3 MV UV illumination switch

Li Junna, Xue Binjie, Jia Wei, Chen Weiqing, Tang Junping, Qiu Aici
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract: A UV illuminated switch of three sections in series was designed based on UV illumination technology and capacitance-resistance coupling circuit. The switch consists of UV illumination gap and self-breakdown gaps. The distance of self-breakdown gap was calculated based on the experimental data of same switch under pulse with 240 ns risetime. The nonuniform factor of self-breakdown gap is 1.58. The step shield of outer cylinder was used to get the surface field no more than 50 kV/cm. The voltage of UV illumination gap was designed as about 1% of the voltage of self-breakdown gap. It was indicated that the voltage of UV illumination gap is higher than breakdown voltage of rod-rod electrode within 0.1~0.7 MPa.

Key words: pulsed gas switch; UV illumination; insulation; field distribution; pulsed power technology