平行板电极边缘滑闪引起加载电压的"双峰"现象

陈志强^{1,2}, 贾 伟^{1,2}, 何小平², 李俊娜², 郭 帆^{1,2}, 吴 伟², 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学 电气绝缘与电力设备国家重点实验室,西安 710049;2. 西北核技术研究所,强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室,西安 710024)

摘 要: 平板电容器是电磁脉冲(EMP)模拟装置中常用的脉冲压缩器件,在平行板电极的 SF。沿面闪络 实验中发现,原本前沿光滑的纳秒脉冲电压加载在平行板电极上,会在脉冲电压前沿上测得一尖峰,使加载的 脉冲电压出现"双峰"现象。为探索该现象的原因,首先通过理论分析,认为该现象可能是由于平行板电极边缘 发生了滑闪放电,增大了电极等效正对面积,使平行板电极的等效容值发生突变所致,容值变化越大,尖峰越明 显。之后开展了不同气压下平行板电极的沿面闪络实验,并对放电过程的图像进行了拍摄,结果表明:平行板 电极边缘产生的树枝状放电在低气压时主干明亮粗大,分枝较多,气压升高后,主干亮度和直径逐渐变小,分枝 也越来越少;随着气压的增加,由于平行板电极边缘的滑闪放电受到抑制,平行板的等效面积变化率越来越小, 尖峰出现时对应的电压幅值越来越高,且尖峰越来越不明显,与理论分析一致。

关键词: 电磁脉冲; 沿面闪络; 纳秒脉冲; 放电通道; 电容; 平行板电极 中图分类号: TM85 **文献标志码:** A **doi**:10.11884/HPLPB201931.180383

Double peak phenomenon of applied pulse voltage induced by flashover around parallel-plate electrodes

Chen Zhiqiang^{1,2}, Jia Wei^{1,2}, He Xiaoping², Li Junna², Guo Fan^{1,2}, Wu Wei², Ji Shengchang¹
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory of Intense Pulse Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: During the flashover experiments of parallel-plate electrodes in SF_6 , a double-peak phenomenon is discovered that a small peak occurs in the front-edge of the applied nanosecond pulse voltage which is originally smooth. In order to explore the cause of this phenomenon, the phenomenon is analyzed theoretically and ascribed to the discharge on the edge of the electrodes. The discharge enlarges the area of the parallel-plate electrodes, thus the equivalent capacitance of the electrodes is increased. The greater the change of the equivalent capacitance is, the more obvious the peak shows. Flashover experiments under different pressures are developed to validate the analysis. The results show that as the pressure increases, the peak is less and less obvious, and the amplitude of the small peak is higher and higher due to the suppression of the discharge in high pressure SF_6 , which is confirmed by the integrating images of the whole discharge process. Dendritic discharges occur on the edge of the electrodes during the flashover process. In low SF_6 pressure, the stems are thick and bright, and generate many branches, but when the pressure is high, the number of stems and branches is reduced and the discharge channel also darkens.

Key words: flashover; nanosecond pulse; discharge channel; capacitance; parallel-plate electrodes PACS: 51.50. +v; 52.25. Jm; 52.80. Mg

电磁脉冲(EMP)模拟装置是用于产生模拟电磁环境,开展系统电磁效应与防护性能研究的实验平台^[1-8]。 对于高空电磁脉冲(HEMP),能量主要体现在早期过程中,因此大量开展的效应实验主要针对早期 HEMP^[1-2]。IEC60111-2-9 给出了早期 HEMP 的时域参数波形为 2.5/23 ns。为满足这一指标,HEMP 模拟

^{*} 收稿日期:2018-12-28; 修订日期:2019-03-26

基金项目:强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金项目(SKLIPR1602)

作者简介:陈志强(1987一),男,博士研究生,工程师,主要研究方向为电磁脉冲环境模拟生成; chenzhiqiang@nint.ac.cn。

装置通常采用一级或者二级脉冲压缩技术方案,其中峰化电容器是脉冲压缩的关键器件之一。用于 HEMP 模 拟装置中的峰化电容器主要包括平板型和同轴型两类,一般采用基于金属电极和聚合物薄膜介质的层叠结构, 薄膜介质材料由于薄层强化效应具有优越的体绝缘性能,电极和介质依次层叠,薄膜介质伸出平行板电极边缘 一定距离以提高耐受沿面电压的能力,能够承受数 MV 的高压,其结构简单,易于设计和制作,和陡化开关配 合对脉冲源前级波形进行调整和压缩^[3-10]。在平板型峰化电容器的设计过程中,开展了单层平行板电极在 SF₆环境中纳秒脉冲下的沿面闪络实验,实验中发现,当脉冲源样品连接端开路时,输出脉冲前沿光滑,当连接 试验样品时,脉冲源输出电压出现"双峰"现象,前沿叠加一尖峰。本文基于电路仿真和实验分析对该现象的成 因进行了探索。

1 "双峰"现象的产生

平行板电极沿面闪络特性实验电路如图 1 所示,其中 C_1 , L_1 和 S 表示一紧凑型 Marx 发生器,输出脉冲电 压最高能达 400 kV,样品端脉冲前沿约 27 ns,E 为样品连接端。分压器 D_1 和 D_2 分别用来监测脉冲源输出电 压和实验样品上电压。实验电极为图 2 所示的平行板电极,电极材质为黄铜,直径 60 mm,厚度 4 mm,边缘倒 角,聚酯薄膜介质厚度总共约 1.1 mm,伸出电极边缘长度 40 mm。实验绝缘环境为 0.1 MPa 的 SF₆ 气体,温 度约为 25 °C。



Fig. 1 Experimental circuit of the flashover platform
图 1 沿面闪络试验平台的电路(C₁:Marx 建立电容,C₂:输出端电容, L₁:Marx 建立电感,S:Marx 开关,D₁:输出侧分压器,
D₂:样品侧分压器,R:限流电阻,L_e电极回路电感,E:实验电极)



Fig. 2 Schematic of the parallel-plate electrodes 图 2 平行板电极结构示意图

脉冲源输出电压加载在负载上时,由于薄膜介质伸出边缘较长,没有发生贯穿性的沿面闪络现象,即上下 两电极未导通。但是在电极四周的薄膜介质表面发生了如图 3(a)所示的树枝状滑闪放电。放电通道从电极、 聚酯薄膜和 SF₆绝缘介质的三结合点处起始,呈树枝状向外沿扩展,逐渐变暗变细,直至熄灭。

当样品连接端开路时,样品侧分压器 D₂测到的电压如图 3(b)所示,前沿光滑,无叠加毛刺和震荡。但是, 当样品连接端连接图 2 所示平行板电极时,在分压器 D₂上监测到的脉冲电压前沿不再光滑,而是叠加了一尖 峰,在加载脉冲的前沿出现"双峰"现象。图 3(b)中波形后沿的不同是由负载不一样所致。





(a) typical integrating image of the flashvoer

(b) comparison of pulses with and without parallel-plate samples

Fig. 3 Image of discharge channels and the "double-peak" phenomena in the wavefront

图 3 平行板电极典型放电图像和加载脉冲前沿的"双峰"现象(腔体未完全遮蔽,可以观察到电极和聚酯薄膜介质)

2 "双峰"现象原因分析和电路仿真

实验样品平行板电极为一容性负载,对于平行板电容器,电容表示为[12]

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon A}{d} \tag{1}$$

式中:Q为电容上的电荷;U为电容器两极板上电压; 6为电容极板之间介质的介电常数;A为电容器极板正对 面积;d为电容器两极板之间的距离。

当脉冲前沿出现跌落,即U变小时,由式(1)可知,必然对应着Q变小或者C变大。电极边缘发生滑闪放 电,电子倍增过程中气体分子电离后产生自由电子和正离子,总体上仍呈现电中性,不会对极板上储存的电荷 产生影响,因此平行板电极上电荷主要由实验回路注入。Q突然变小即意味着平行板电极引入了低阻的旁路, 使两极板上的正负电荷发生中和,显然与实验设置不符。因此,此处发生变化的物理量应为C,即平行板电极 等效电容发生了变化。平行板电极由两侧压板压紧,其间距d保持不变,因此能够引起"双峰"现象的可能原因 有两个:(1)薄膜介质材料在高电场的作用下介电常数发生了变化;(2)电极边缘的产生的脉冲电晕和未贯穿的 滑闪放电导致了平行电极等效面积的增加。

采用 PSPICE 对上述实验回路进行分析,建立了图 4(a)所示的平行板电容容值突变的仿真模型,考虑了 样品连接部分引线的电感和电阻,电路其他部分同图 1。改变电容器突变的容值占平行板电极容值比例大小, 得到的结果如图 4(b)所示。由图可知,电容容值突变时,前沿上出现了一尖峰,该尖峰为后续电压跌落所致, 突变的容值越大,尖峰的幅值和半高宽越大,即使突变容值小到平行板电极容值的 5%,仍然可以观察到一个 比较明显的"双峰"现象。



 Fig. 4 Simulation circuit and results of the "double-peak" phenomena in the wavefront
 图 4 前沿"双峰"现象的仿真电路和结果(左图中 D₂ 为分压器,L_e和 R_e为引线的电感和电阻,C_t为平行板电极电容, C_f为滑闪放电引起的电容值变化,右图中百分比表示变化容值占主电容的比例)

3 "双峰"现象的实验验证

为了验证上述分析,设计了一验证实验,改变平行板电极沿面闪络实验时绝缘气体的气压,在 SF。气体的 气压 0.1 MPa、0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa 和 0.9 MPa 的条件下分别开展平行板电极的闪络实验,观察尖峰 出现的时刻和形态,以及表面滑闪放电的积分图像。如果尖峰为薄膜介质在高场强下介电常数发生突变所致, 则改变气压不会影响尖峰出现的时间和形态,如果尖峰为电极边缘滑闪放电所致,则由于气压增大后抑制了电 晕的产生和滑闪放电,尖峰出现的时刻和形态应该发生变化。

在每个气压条件下开展了 10 次实验,统计其出现第一个尖峰的平均幅值(定义为第一个尖峰的峰值)和对 应平均时延(定义为脉冲起始时刻与第一个尖峰的峰值时刻之间的时间差),得到图 5(a) 所示结果。从图 5 (a)中可以看出,随着气压的升高,气体有效电离系数降低,放电尖峰出现的时间越来越靠后,且对应的电压也 越来越高。同时图 5(b)列出了不同气压下第一个尖峰的形貌对比,气压升高后,尖峰的幅值和半宽逐渐变 小,与前述电路仿真结果相符合。由此可知,平行板电极电容值的突变应不是介质介电常数在高场强下发生变 化所致,而是由于电极边缘的电晕和滑闪放电引起的。

图 6 给出了不同气压下电极边缘滑闪放电的积分图像,拍摄工具为佳能 60D 数码相机,在手动模式下采 用长时间曝光的方式拍摄了放电通道的积分图像。从该图像能更直观地了解滑闪放电对平行板电极等效容值 的影响。

放电过程中,当加载在平行板上的电压达到产生滑闪放电的阈值电压时,放电通道从三结合点处起始,向 四周发展,电荷从电极注入放电通道,随着离电极边缘的距离越来越远,背景电场减小,放电通道逐渐失去向前







(a) 0.1 MPa

(b) 0.3 MPa

(c) 0.5 MPa



(d) 0.7 MPa(e) 0.9 MPaFig. 6Integrating images of the the flashover around the parallel-plate electrode图 6不同气体压力下平行板电极滑闪放电积分图像

发展的动力,渐致熄灭。气压较低时,平行板电极周围的放电通道茎干粗壮明亮,树枝呈发散状,向外逐渐变细 变暗。平行板电极周围延伸出来的树枝状放电通道形成后,电荷从极板注入通道,一定程度上增大了平行板电 极的等效正对面积,因此平行板电极在电路回路中表现出来的等效电容增大,加载的脉冲电压出现"双峰"现 象。SF。气压增加后,气体的有效电离系数降低,放电通道的形成需要在更高的背景电场作用下,因此,滑闪放 电现象不如低气压明亮剧烈,茎干较细,且树枝向外延伸距离较短。相比较低气压的情况,此时平行板电极的 等效面积要小,滑闪放电带来的电容容值突变不如低气压大,所以尖峰形态的变化也不如低气压条件下明显。

4 "双峰"现象对 EMP 模拟装置波形的影响

图 7 为文献[12]中描述的一有界波模拟器初始段的实物图,包括紧凑型同轴 Marx 发生器、峰化电容、输出开关和天线过渡段,其中峰化电容、输出开关与天线过渡段被放置在一个内部充 SF。气体的有机玻璃腔体中。该模拟器采用一级脉冲压缩技术方案,紧凑型 Marx 发生器输出的脉冲加载在峰化电容器上,通过输出开

关导通时刻与 Marx 建立时刻的配合,实现脉冲的陡化后馈入有界波天线。峰化电容器采用平行板电容器的 结构,设计容值 60 pF,电感小于 20 nH,内部充高气压的 SF。气体以实现紧凑结构下的绝缘^[10]。

当紧凑型 Marx 发生器的输出端仅连接电阻分压器时,测到的波形前沿如图 3(b)中未连接平行板电极样品的波形所示。当紧凑型 Marx 发生器输出端采用如图 7 所示的连接方式时,测到的峰化电容器上(即紧凑型 Marx 发生器输出)波形如图 8 所示。图中不同电压的峰化电容波形均在前沿上存在一尖峰,基于前述分析可以判断,该尖峰的产生原因是峰化电容器平板电极边缘的滑闪放电所致。受到叠加的振荡干扰信号影响,并不能清楚地观察到如图 5(a)所示波形前沿尖峰出现时刻和对应电压幅值随气压的变化关系,但是可以从图 8 中看到随着气压的增加,尖峰的形态逐渐发生向台阶状转变,变化趋势同图 5(b)所示波形。



Fig. 7 Initial segment of a bounded-wave simulator 图 7 一台有界波模拟装置的初始段



Fig. 8 Pulsed voltage stressed on the parallel-plate peaking capacitor 图 8 不同 SF₆ 气压下平板电容器上的加载电压

在一级脉冲压缩回路中,为满足输出波形为双指数波的要求,峰化电容器容值 C_p 必须满足一定的关系, C_p 由初级回路的等效电容 C_m、初级回路的等效 L_m 和负载的等效阻抗 R_L 共同确定^[1,12-13]

$$C_{\rm p} = -\frac{C_{\rm m}}{2} + \sqrt{(\frac{C_{\rm m}}{2})^2 + \frac{L_{\rm m}C_{\rm m}}{R_{\rm L}^2}}$$
(2)

当峰化电容器容值 C_p由于受到电极边缘滑闪放电影响时,C_p的实际值将偏离设计值,引起输出波形发生 畸变。

5 结 论

本文对平行板电极沿面闪络实验中所遇到"双峰"现象的成因进行了探索。通过理论分析,认为"双峰"现 象的成因为平行板电极的等效容值发生了突变;通过开展不同气压下的沿面闪络实验,观察尖峰形态和放电通 道的积分图像,进一步确定了"双峰"的形成源自电极周围产生的滑闪放电,滑闪放电扩大了平行板电极的等效 正对面积,导致等效容值增大。

该结果对于电磁脉冲模拟装置中峰化电容器容值的精确设计具有一定借鉴意义。为减小电感,峰化电容器结构设计得非常紧凑。在 MV 级高电压的工作场合中,由于金属电极、电容器介质和绝缘环境介质所构成 三结合点处的存在,会引入一场强超过绝缘环境介质击穿电压的局部强场区域,导致滑闪放电往往不可避免。 在峰化电容器的设计中,应该尽量抑制滑闪放电的范围,同时增大电极正对面积,降低滑闪放电引起电容变化 值所占主电容的比例,以减小峰化电容器电极边缘滑闪放电对主回路波形的影响。

参考文献:

- [1] 邱爱慈.脉冲功率技术应用[M].西安:陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Application of the pulse power technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016)
- [2] 毛从光,程引会,谢彦召.高空电磁脉冲技术基础[M].北京:科学出版社, 2018. (Mao Congguang, Cheng Yinhui, Xie Yanzhao. Technological base of HEMP. Beijing: Science Press, 2018)
- [3] Baum C E. EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: an interim categorization[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 1978, 20(1):35-53.
- [4] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2010, 38(10):2554-2558.

- [5] Charles G, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//The 12th IEEE International Pulsed Power Conference. 1999:1437-1440.
- [6] Schilling H, Schluter J, Peters M, et al. High voltage generator with fast risetime for EMP simulation[C]//The 10th IEEE International Pulsed Power Conference. 1995:1359-1364.
- [7] Jung M, Weise T, Nitsch D, et al. Upgrade of a 350 kV NEMP HPD pulser to 1.2 MV[C]//26th International Power Modulator Symposium. 2004:23-26.
- [8] 陈维青,何小平,贾伟,等. 2.5 MV 快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会.北京:中国电子学会核电子学与核探测技术分会, 2008;689-693. (Chen Weiqing, He Xiaoping, Jia Wei, et al. Development of a 2.5MV fast pulse generator for EMP simulation//14th National Conference on Nuclear Electronics & Detection Technology. Beijing: Nuclear Electronics and Detection Technology Branch, Chinese Institute of Electronics, 2008;689-693)
- [9] Giri D V, Baum C E. Theoretical considerations for optimal positioning of peaker capacitor arms about a Marx generator parallel to a ground plane[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 1989, 32(2):117-124.
- [10] Jia W, Chen Z Q, Tang J, et al. A 800 kV compact peaking capacitor for nanosecond generator[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85:094706.
- [11] 陈永真,李锦. 电容器手册[M]. 北京:科学出版社, 2011. (Chen Yongzhen, Li Jin. Handbook of capacitors. Beijing: Science Press, 2011)
- [12] 贾伟,陈志强,郭帆,等. 基于 Marx 发生器的中小型电磁脉冲模拟器驱动源[J].强激光与粒子束, 2018, 30:073203. (Jia Wei, Chen
- Zhiqiang, Guo Fan, et al. Drivers of small and medium scale electromagnetic pulse simulator based on Marx generator. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30:073203)
- [13] 刘锡三.高功率脉冲技术[M].北京:国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High power impulse technique. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)