

真空触发开关导通瞬间高频脉冲电压的测量

胡国威, 夏长征, 陈仕修

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

Measurement of the High frequency Pulse when the Triggered Vacuum Switch Turns on

HU Guo-wei, XIA Chang-zheng, CHEN Shi-xiu

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: 介绍了一种高压真空触发开关导通瞬间高频脉冲电压的测量方法,并构建了相应的测量系统。对测量过程中各种抗干扰措施进行了分析,试验测得了开关导通瞬间的脉冲电压波形,并获得了约 400 ns 的开关导通延时时间。

关键词: 真空触发开关; 高频脉冲; 高压测量

中图分类号: TM835

文献标识码: A

Abstract: A method for high frequency pulse measurement of high voltage triggered vacuum switch is introduced in this paper. Interference immunity measures during the process of measurement are taken. Therefore, a high frequency pulse is obtained when the triggered vacuum switch turns on. A delay time about 400 ns between trigger voltage breakdown and the commutation of main gap current is achieved.

Key words: triggered vacuum switch; high frequency pulse; high voltage measurement

1 前言

研究真空触发开关导通的机理对真空触发开关的设计极其重要,直接用理论的方法建立模型分析非常困难,虽然用试验的方法测量其导通瞬间的电流和电压可为设计提供依据,但由于开关导通瞬间电压波动的范围大,电压频率高,再加上测量过程中各种干扰的影响,使电压的测量较为困难,因此现有的测量结果很少。为了便于深入研究真空触发开关导通的机理,需对开关导通瞬间电压的变化特征有足够的了解,因此笔者构建了一个纳秒级脉冲信号的测量系统。利用该系统,对几种不同型号的真空触发开关进行了导通试验,分析和排除了测量过程中各种干扰对测量的影响,测得了开关导通瞬间的脉冲电压波形。所测波形可为深入研究真空触发开关导通的机理以及开关的设计提供参考。

2 测量系统的组成及工作原理

图 1 为测量系统组成框图,各部分组成及工作

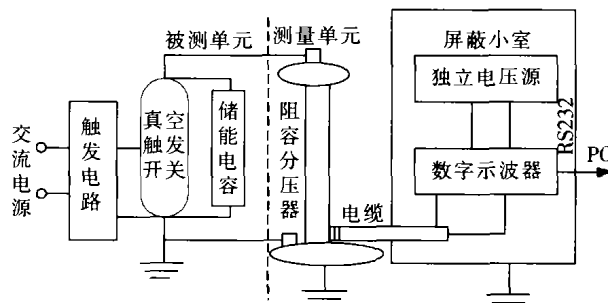


图 1 测量系统组成框图

原理如下。

(1)被测单元:由触发电路、真空触发开关、储能电容(主要为可充电高频电容组)组成。

(2)测量单元:由耐压 50 kV 的串联阻容分压器(变比 1 000:1)、50 Ω 射频同轴电缆、TDS220 示波器、长时效 UPS 独立电源、计算机及 RS232 接口组成。

阻容分压器是其关键部分。理想的电容分压器由两个纯电容串联而成,其中任何一个电容上的电压都小于输入电压,通常输出信号从低压臂电容上引出。电容分压器有分立式和耦合式两种类型。这里选用串联阻容分压器,其电路原理见图 2。实际电容器都具有一定杂散电感和泄漏电阻,有时还必需考虑引线电感。由于容抗随脉冲频率的增大而减小,感抗随脉冲频率的增大而增大,克服杂散电感的一种有效途径是在分压器中适当引入阻尼电阻,所需满足的条件是^[1]:

$$C_1 R_1 = C_2 R_2; R_2 \geq 2\sqrt{L_2/C_2}$$

(3)测量原理:被测单元储能电容给真空触发开

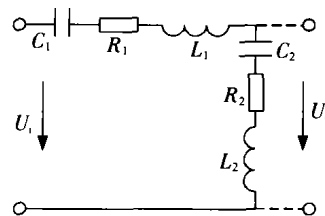


图 2 串联阻容分压器

关加上几十千伏交流高电压,触发单元触发后真空触发开关导通放电,放电完成后储能电容重新储能等待下一次触发;测量单元阻容分压器将真空触发开关两端的高压信号转变为低压信号,并通过射频电缆传输到示波器,计算机通过RS232接口读取示波器波形。

3 测量过程的干扰及抗干扰措施

(1)测量系统的接地对抑制干扰、保证测量信号的准确有着非常重要的作用。该系统有多点接地,试验所在高压大厅约800 m²,工频接地电阻0.2 Ω,接地线用铜带,一般不超过2 m,以保证接地良好。

(2)试验中测量用数字示波器由长时效UPS独立供电,UPS可提供标准的正弦波,避免了电网谐波对示波器的影响。同时,使用UPS供电的方式对于隔离高低压、保护示波器,减小设备体积、增强设备可移动性都非常有益。高频储能电容充电完毕后即断开充电电源,则充电电源不影响放电回路;触发电路触发后立即断开,也不会影响放电回路,这样就避免了外部电源通过传导耦合干扰放电回路。

(3)由于高压放电过程中会产生较大能量的电磁波,通过辐射耦合对信号的测量产生干扰,图3是干扰下的测量波形。图中放电波形的变化差不多被干扰信号淹没了。为此,设计了全屏蔽小室,小室外壁用2 mm厚钢板无缝焊接,采用双层金属网窗用于观察示波器。传输线为50 Ω双层屏蔽同轴电缆,电缆接头分别伸入屏蔽小室和阻容分压器外壳,全屏蔽小室外壁和阻容分压器外壳都用铜线接入地下。这种屏蔽接地结构可有效减少电磁干扰。示波器与UPS均置于全屏蔽小室绝缘地板上,使得测量单元与高压部分不会形成共地回路。

(4)真空触发开关两端电压信号所包含的频率很高,波长较短。当波长与测量单元回路尺寸相比较时,测量信号可能会产生严重的畸变、衰减和终端反射。另一方面,信号的传输也要求传输线能满足高频信号的传输要求,以及适当的阻抗匹配消除终端反射。一般地,回路尺寸应满足^[2]: $L < \lambda/8.6$ (λ 对应于测量信号截止频率 f_c)。笔者选用的测量回路最大尺寸为35 cm(选截止频率 $f_c=100$ MHz,即 $\lambda=3$ m),此外传输线采用50 Ω射频同轴电缆,阻抗匹配。

(5)当示波器采用直流耦合,单次上升沿触发的情况下,被测单元触发电路工作时,有可能引起示波器误触发,使得示波器记录的是真空触发开关放电前的一段波形,见图4,从而观测不到开关的放电过程。适当提高示波器触发电平,有助于消除干扰信号,使示波器只记录放电开始时的信号,从而得到所需的测量波形。

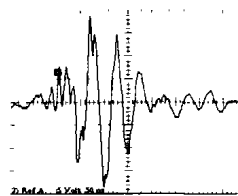


图3 无屏蔽小室时的测量波形

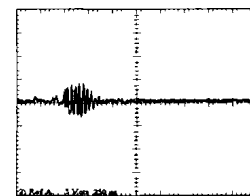


图4 低触发电平下的错误

4 测量系统的校验

为检验测量单元的性能,可以对脉冲发生器产生的输出方波信号进行测量试验。测量结果用TDS680B数字存储示波器记录,其带宽可达1 GHz,采样率为5 GS/s,可以满足测量要求。试验时测得脉冲发生器输出方波的脉宽为70 ns,输出电压为120 V,方波上升时间为2 ns,测得阻容分压器输出波形见图5。其输出电压为116 mV,上升时间为9 ns,即分压器变比为1 034:1。从对阻容分压器的各种参数分析表明,分压器的频响特性可以满足纳秒级脉冲电压的测量需要。

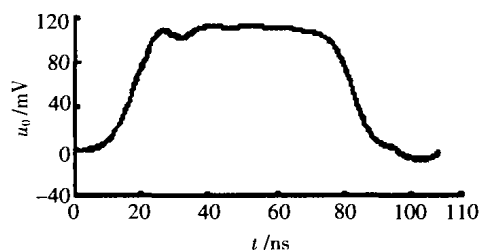


图5 校验方波信号

5 测量结果及分析

为获得足够高的扫描频率,并尽可能观测完整的导通电压变化过程,选择扫描频率为50 ns/div。测量所得典型放电电压波形见图6。从图中可以看出,触发电路触发后,在A点放电回路开始放电,真空触发开关两端电压振幅在突然升高后不断振荡衰减,到B点时放电电压的变化基本完成。其波形与正弦波类似。最大振幅为20 kV,振荡周期约为50 ns。放电波形的干扰较小,因而没有对波形做任何处理。为准确把握电路的振荡周期,对储能电路中储能电容充以不同的电压(5, 10, 15, 25, 30 kV)进行放电试验,得到的放电振荡周期基本没有什么变化,即都约为50 ns,因而没有给出其他电压下的放电波形。由此可见,该种真空触发开关放电周期为几十纳秒。

真空触发开关的导通机理与开关内等离子体的

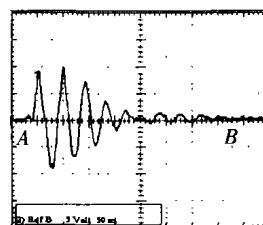


图6 典型开关放电电压波形 (下转第369页)

数 δ 是二次电子崩假说的一个标志性概念,该物理量的变化与绝缘体表面正负电荷间存在某种必然的联系。但时至今日,尚缺乏足够的试验依据证明二者间的上述对应关系。

(2)难以就真空绝缘何以在直流电压施加数秒之后才发生闪络这一现象给出合理的解释。该假说的前提假设是绝缘体表面电荷及二次电子崩的形成几乎与施加电压的作用时间同步,并且贯穿闪络延迟时间的始终。很显然,上述假设与实际观察到的直流电压作用下的试验现象,即闪络发生在直流电压施加数秒之后存在矛盾。

(3)忽略了一个引发闪络的重要能量来源,即介质极化能的存在。法国科学家 G. Blaise 和 C. Le Gressus 在试验中发现,虽然电子轰击能够导致绝缘闪络发生,但是在一定条件下,当介质材料在电子扫描显微镜发射的电子束的扫描轰击下被充电后,即使绝缘体上没有施加电压,也同样会有闪络现象发生^[15,16]。二次电子崩理论无力对上述现象给予合理的解释,原因很显然,该假说忽略了介质极化能在闪络发展过程中的作用。

参考文献:

- [1] H Craig Miller. Flashover of Insulation in Vacuum; Review of the Phenomena and Techniques to Improve Holdoff Voltage [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 512-527.
- [2] P A Arnold. 45 Degree Insulator Surface Flashover: A Review and New Results [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1988, 23(1): 17-25.
- [3] R A Anderson, J P Brainard. Mechanism of Pulsed Surface Flashover Involving Electron-stimulated Desorption [J]. J. Appl. Phys., 1980, 51(3): 1414-1421.
- [4] A Watson. Pulsed Flashover in Vacuum [J]. J. Appl. Phys., 1967, 38(5): 2019-2023.
- [5] O Yamamoto. Temporal Behavior of Surface Charge Accumulation in Bridged Vacuum Gaps [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1995, 24(2): 292-298.
- [6] O Yamamoto. Monte Carlo Simulation of Surface Charge on Angled Insulators in Vacuum [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 706-712.
- [7] A S Pillai, R H Hackam. Surface Flashover of Solid Dielectric in Vacuum [J]. J. Appl. Phys., 1982, 53(4): 2983-2987.
- [8] 高本辉, 崔素言. 真空物理[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [9] A A Avdienko, MD Malev. Surface Breakdown of Solid Dielectrics in Vacuum. II Mechanism for Surface Breakdown [J]. Sov. Phys. Tech. Phys., 1977, 22: 986-990.
- [10] E Gray, D Harrington. Surface Topography of Printed Wiring Boards and Its Effect on Flashover [J]. IEEE Trans. Comp. Hybrids and Manuf. Tech., 1982, 5(1): 142 - 146.
- [11] E Gray, T Uhrig. Voltage Breakdown Testing of Relays in the 1 000 V Range [J]. IEEE Trans. Comp. Hybrids and Manuf. Tech., 1980, CHMT-3(3): 442-448.
- [12] E W Gray. Vacuum Surface Flashover: A High-pressure Phenomenon [J]. J. Appl. Phys., 1985, 58(1): 132-141.
- [13] Andreas A Neuber, Lynn L Hatfield. The Role of Outgassing in Surface Flashover under Vacuum [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2000, 28(5): 1593-1598.
- [14] J P Vigouroux. Surface Processes Occurring during Breakdown of HV Devices [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1983, 18(3): 287-291.
- [15] C L Gressus. Flashover in Wide-band-gap High-purity Insulators Methodology and Mechanisms [J]. J. Appl. Phys., 1991, 69(9): 6325-6333.
- [16] G Blaise, C Le Gressus. Charging and Flashover Induced by Surface Polarization Relaxation Process [J]. J. Appl. Phys., 1991, 69(9): 6334-6339.

作者简介:高巍(1970-),女,博士生,从事脉冲功率技术等方面的研究。电话:010-62551456。

(上接第365页)

形成有关^[3],从测量波形可看出:从A点到B点约400 ns的时间可以看作是等离子体的形成过程,也就是开关的闭合延时时间。在这个过程中电压逐渐降低,电流变化不明显;开关导通后则电流急剧增加,回路频率也随之发生改变。这一点在测量的电流波形中得到了较好的验证。

6 结语

构建了一个能测量纳秒级脉冲信号的测量系统,阐述了测量系统的基本原理,讨论了测量过程中的干扰和抗干扰措施,并利用脉冲发生器校验了系统的幅频特性。在以上工作的基础上,测得了真空触发开关导通瞬间的电压闪动波形,获得了所测开关

的闭合延时时间,得出了所测真空触发开关会产生周期为几十纳秒的电压闪动的结论。

参考文献:

- [1] 曾正中. 实验脉冲功率技术引论[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003.
- [2] 郝艳捧. 单个局部脉冲测量系统 [J]. 电工电能新技术, 2001(4): 31-35.
- [3] 王季梅, 苑舜. 大容量真空开关理论及其产品开发[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

作者简介:胡国威(1974-),男,湖北人,硕士,从事电压波动与闪变监控的研究。