

场击穿型真空触发开关的触发源性能研究

周正阳^{1,2}, 廖敏夫², 翟云飞²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 2. 大连理工大学电气工程学院, 大连 116023)

摘要: 真空触发开关(triggered vacuum switch, TVS)是大功率脉冲技术领域的重要开关器件之一, 它的导通依赖于其触发极的触发过程。场击穿型TVS的触发根源在于场致发射, 所以对触发源提出了特殊要求。为此, 笔者研究了正负两种应用于场击穿型TVS的触发源, 并且对触发源极性的影响作了讨论。结果表明, 设计的触发源应用于场击穿型TVS触发成功率高, 且具有较小的触发系统时延和较高触发精度。主电极相同极性下, 触发源的极性对触发过程的影响并不大。

关键词: 真空触发开关; 场击穿型; 触发源

中图分类号: TM89; TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2011)02-0017-05

Study on Trigger Source Performance of Field-breakdown Triggered Vacuum Switch

ZHOU Zheng-yang^{1,2}, LIAO Min-fu², ZHAI Yun-fei²

(1. College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Electrical & Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Triggered vacuum switch (TVS) is one of the important switch apparatuses in the pulsed power technology. Its switching-on is due to the trigger process of trigger pin, and the trigger of field-breakdown TVS is due to the field emission. So the special design for trigger source is needed. In this paper, two kinds of trigger sources were proposed for the field-breakdown TVS, and the influence of trigger pulse polarities was discussed. Results show that, the field-breakdown TVS can be switched-on successfully with a high trigger rate. It also has a short trigger system delay and high trigger accuracy. Under the same polarity of main electrodes, the influence of trigger pulse polarity to the TVS trigger process is little.

Key words: triggered vacuum switch (TVS); field-breakdown; trigger source

0 引言

真空极为优异的绝缘和熄弧能力给真空开关带来了许多优势^[1]。真空触发开关(triggered vacuum switch, TVS)是大功率脉冲技术领域的重要开关器件之一, 其特点是利用真空作为主触头间的绝缘和灭弧介质^[2-3]。它具有结构紧凑、介质恢复迅速、操作无噪声、工作可靠性高、无污染、环境适应性强等优点, 因而在大功率脉冲技术领域得到了广泛的应用^[4-7]。

TVS的研究始于20世纪60年代, 美国通用电气公司的Lafferty等人, 对TVS, 特别是涂敷氢化物作触发材料的TVS做了大量的研究^[8]。70年代, 印度

学者对绝缘介质和半导体涂层作为触发材料的TVS, 做了大量的试验^[9]。在国内, 中国科学院、华中科技大学、武汉大学、大连理工大学等都有广泛的研究基础^[10-13]。近年来, TVS在电磁发射和高电压大电流快速关合等领域的应用, 进一步促进了它的发展^[14-15]。

根据触发机理不同, TVS可分为2大类, 即沿面击穿型TVS和场击穿型TVS。两者的区别主要是沿面击穿型TVS在触发小孔填充陶瓷或半导体材料, 在陶瓷表面再涂敷一层触发材料, 譬如TiH₂; 而场击穿型TVS的触发小孔是没有任何填充剂的, 所以只在触发极和主电极表面涂敷触发材料。填充材料为沿面击穿提供了方便, 但往往因其表面绝缘电阻的降低而丧失其触发性能, 限制了触发寿命; 场

收稿日期: 2010-09-23; 修回日期: 2010-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50507001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China NSFC(50507001).

击穿型的真空小孔就避免了绝缘电阻的降低,在其机械结构没有招致破坏的前提下具有良好的绝缘性能,但其优良的绝缘性能带来触发脉冲的要求更高。笔者研究的对象是场击穿型 TVS,根据其触发要求高的特点,设计了正负 2 种触发源。研究目标是为场击穿型 TVS 的具体应用提供辅助和配套系统,这直接影响 TVS 的工作可靠性以及时延等工作特性,并讨论触发源的极性特点。

1 场击穿型 TVS 的结构和原理

场击穿型 TVS 的基本结构及其样品见图 1、2。它主要包括一个绝缘外壳(陶瓷或玻璃材料)、一个金属屏蔽罩、一对相距为 d 的主电极和一个触发极,管内真空度一般维持在 1.33×10^{-4} Pa 左右。绝缘外壳保证内部真空度,同时起绝缘和支撑作用;金属屏蔽罩可调整 TVS 内部的电场分布,并且防止燃弧时金属蒸气和触发材料沉积在绝缘壳体的内表面,导致壳体内表面的绝缘强度降低;主电极传导大电流,其结构设计对 TVS 的性能有重要的影响;触发极连接外来触发源,产生初始等离子体。TVS 样品实际结构主要参数见表 1。

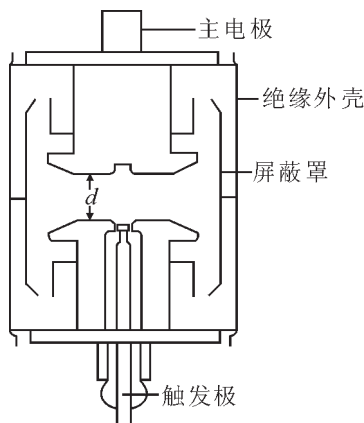


图 1 TVS 的基本结构

Fig.1 Basic structure of TVS



图 2 TVS 样品

Fig.2 Sample of TVS

表 1 TVS 样品的结构参数
Tab.1 Structure parameters of the TVS sample

项目	参数
主电极直径/mm	50.0
主电极开距/mm	15.0
触发孔径/mm	6.0
触发针顶端直径/mm	5.0
触发孔间隙/mm	0.5

文中的场击穿型 TVS 在其触发极上采用“T”形结构设计,使得触发极顶端与主阴极之间的场强畸变更大,有利于产生场致电子发射。另外喇叭口的触发孔有利于又快又多的初始等离子体扩散进入主间隙。这些都有助于 TVS 的开通,一定程度上提高触发性能,而且可避免强脉冲在触发极尾部的提前放电而造成的 TVS 失效。

TVS 的工作过程通常包括 2 个主要阶段,即触发阶段和主间隙导通阶段。触发阶段为主间隙提供初始等离子体。作为场击穿型 TVS,初始等离子体由触发极的尖端放电、燃烧触发材料来产生大量的初始等离子体,并扩散进入主间隙。在主间隙电场的作用下,带电粒子首先引发辉光放电,然后随电流密度的迅速增加,辉光放电转变为弧光放电,建立起金属蒸汽电弧,主间隙导通。当主间隙放电电流过零时,开关断开。

场击穿型 TVS 的结构特点和工作原理决定了它的使用过程中需要一高电压脉冲来触发其导通。高电压脉冲触发源的设计在成功使用 TVS 过程中同样起着非常重要的作用。譬如脉冲电压峰值决定了能否及时产生初始等离子体,而初始等离子体的数量受到脉冲电流的极大影响。所以触发源的研究是场击穿型 TVS 能否成功应用的关键之一。此外,目前几乎所有 TVS 的寿命,都不是由于真空度下降或电极烧损,而是因触发系统中触发极不能正常触发而停止工作^[16]。触发源的参数对 TVS 的工作寿命有重要的影响,其设计性能实际决定了 TVS 的触发极工作寿命。由于场击穿型 TVS 对触发源的高要求,就需要设计强有力的触发源配合它的工作,以提高场击穿型 TVS 的实际工作性能。

触发极击穿的过程产生大量初始等离子体,这是能否成功导通 TVS 的关键。而影响触发极真空击穿过程的因素很多,譬如触发极几何形状和大小、间隙的大小、材料、老炼作用、操作条件和真空度等。实际上,电极材料一般是合金材料,具有较强的硬度和机械强度,硬度和机械强度高的材料往往有高的绝缘强度^[17]。针对

此要求,笔者利用彩电高压包和汽车点火线圈分别产生正负2种高压触发脉冲源。

2 触发电源设计

触发电源的设计主要分控制回路和触发电源回路。控制回路除了需要保证动作可靠、触发性能较高之外,由于产生信号所需的供电电源通过触发信号与触发电源回路高压相连,触发电源回路高压又与 TVS 所处的高电压大电流系统相连,因此防止高压串入低压控制系统显得非常必要,以保证设备和人身安全。为此,采用了光纤隔离的方法,利用光电控制技术进行有效的隔离,控制回路的原理图见图 3。最后的 D₁ 口输出 3 V 左右的控制信号,控制触发电源回路中的可控硅导通。

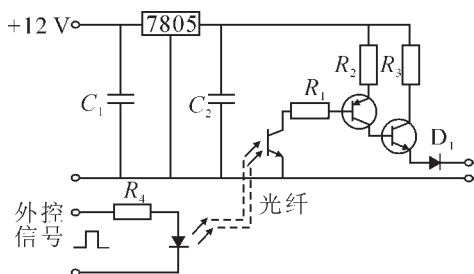


图3 触发控制回路

Fig.3 Control circuit of trigger

由于脉冲变压器的特性不同,触发电源回路的具体设计分正脉冲和负脉冲2种触发电源。

2.1 正脉冲触发电源

TVS 触发电源回路见图 4, 该回路采用了高电压小电流触发结合低电压大电流续流的复合方式^[18]。作为核心部件的脉冲变压器 T₂ 采用的是彩电高压包,其特点是上升前沿陡峭、振荡小,并且维持高压时间比较长。SCR 是可控硅,C₁ 是主触发电容用于脉冲成形,C₂ 是续流电容用于加大脉冲电流,硅堆用来阻隔输出的高压脉冲。试验时,T₁ 前面接自耦调压器,可连续调节输出脉冲峰值和续流能量。当 C₁=C₂=1 000 μF 且充电至 150 V 时,回路输出脉冲峰值在 22 kV,续流能量达 6.5 J 左右,能有效地开通 TVS 样品。

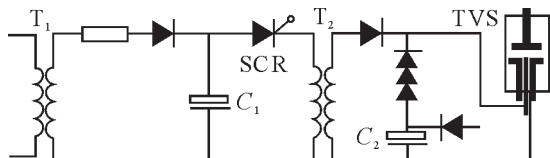


图4 触发电源回路

Fig.4 Trigger source circuit

输出的正触发脉冲源电压波形见图 5。图 5 中 CH₁ 是 5 V 的控制信号,CH₂ 是输出的 20 kV 高压

正脉冲击穿波形,脉冲的单峰值说明此刻触发极已经稳定击穿。比较 CH₁ 和 CH₂,可得整个系统的时延控制在 40 μs。TVS 主回路的多次实验结果见表 2,此时的触发系统整体时延集中在 38~42 μs 之间,时延精度在 2 μs 左右。

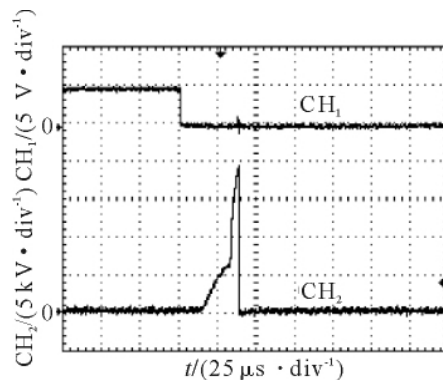


图5 正触发电源电压波形

Fig.5 Pulse voltage of positive trigger source

表2 正脉冲触发系统时延及其分散性

Tab.2 Trigger system delay and its jitter time of positive pulse

时延/μs	38	40	41	42
导通次数	6	8	6	2

需要特别指出的是,触发电压并不是越高越好,即使脉冲源有这个条件实现。过高的触发电压反而造成 TVS 尾部放电,不利于初始等离子体的扩散进入主间隙。初始等离子体在触发孔深处大量集聚,造成 TVS 开通失败。所以,既要保证触发电压足够高,又不能一味追求高电压脉冲。

实验结果显示,如果是涂覆了触发材料的场击穿型 TVS,由于触发材料的影响其要求的触发电压较低,一般在 17 kV 左右就可产生丰富的初始等离子体而稳定导通;如果没有涂覆触发材料,与表 1 相同的结构和参数的场击穿型 TVS 样品成功导通的触发脉冲电压峰值在 30 kV 左右。所以根据不同需求,即不同的场击穿型 TVS 样品,设计强触发脉冲峰值范围在 17~30 kV 之间可调,用实验方法获得其稳定导通的最低触发电压,以此作为最后选定的触发电压。

2.2 负脉冲触发电源

为产生高的负触发脉冲,与图 4 同理,只是 T₂ 选择汽车点火线圈,高压线圈副边输出一负高压。C₁=C₂=1 000 μF,当充电至 200 V,回路输出脉冲峰值近 30 kV,续流能量达 8.5 J,此时能够有效地开通 TVS 样品。但是它的触发时延比较长,有时达上百微秒。其触发极击穿电压波形见图 6,一个近 30 kV 的负脉冲,具有比较陡的前沿和较小的振荡。

这种触发方式可靠性也高,可保证场击穿型

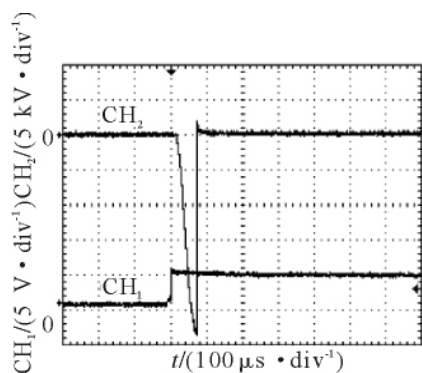


图 6 负触发源电压波形

Fig.6 Pulse voltage of negative trigger source

TVS 稳定触发。相比正触发脉冲而言,其陡度比较缓,所以用它触发场击穿型 TVS 的时延较长。结合场击穿型 TVS 的主回路,用这样的脉冲触发相同的 TVS 样品,从发出触发控制信号到触发间隙击穿的系统时延在 60~110 μs 之间,实验统计结果见表 3。因其分散性较大,在要求 TVS 导通时延小、时延精度高的应用场合比正触发源稍逊。这主要还是由于点火线圈和彩电高压包作为脉冲变压器的特性有差异,点火线圈作为脉冲变压器的上升前沿缓慢,但依然可保证其触发的可靠性。如果采用涂覆触发材料、减小触发小孔尺寸等方法降低触发电压,比如降到 17 kV 可有效改善其触发分散性,减小到 5 μs 之内。

表 3 负脉冲触发系统时延及其分散性

Tab.3 Trigger system delay and its jitter time of negative pulse

时延/ μs	60~70	70~80	80~90	90~100	100~110
导通次数	10	19	20	18	5

3 极性讨论

根据 TVS 的工作特点可分为正极性工作方式和负极性工作方式。带触发极的主电极接地,另一主电极接正高压为正极性工作方式,反之为负极性工作方式。不同极性下的触发原理见图 7^[19]。

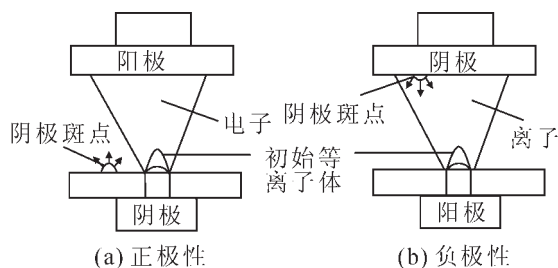


图 7 正负极性下触发原理分析

Fig.7 Trigger principle of positive and negative polarities

在主电极正极性触发状态下,主电极的击穿首先依靠扩散到主间隙的电子,随后主间隙的放电由在阴极上新产生的阴极斑点维持。而真空电弧就是

由阴极斑点维持的,若产生阴极斑点的过程可持续,则主间隙的放电电流会持续下去。

此时的触发间隙处于阴极上,这样初始等离子体就距离阴极很近。强触发脉冲下触发极喷射出密度非常高的电子电流,主间隙的击穿可由这一高的电子电流触发。同时,在阴极附近的高密度初始等离子体,可在阴极上触发新的阴极斑点。这些都有利于 TVS 在阴极迅速建立阴极斑点,进而促成 TVS 的导通。所以,在提供充足的初始等离子体前提下,主电极正极性时触发比较容易。

主电极负极性时,初始等离子体主要在阳极上产生,所以初始等离子体距阴极相对于正极性时较远。正离子主要扩散到主间隙之间,正离子必须越过主间隙到达阴极来产生阳离子鞘层并由此在阴极上产生新阴极斑点,这样主电极的击穿就随着阴极斑点的产生而触发。在阳离子通过主间隙期间,主间隙并不会因阳离子的通过而击穿,这是因为阳离子电流相对较小。由于离子的密度有限,以及离子质量较电子的质量高,这样就需要较长时间在阴极表面产生阴极斑点。随后主间隙的放电也会由阴极上产生的新阴极斑点而维持。所以,同样在初始等离子体充分的前提下,主电极负极性时的触发是相对困难的。

而触发源的作用主要是在产生初始等离子体,其密度主要由触发电流或者说触发能量的大小决定。触发小孔的小范围局部放大类似于板板小间隙,所以无论内壁的触发极还是外壁的主电极是何极性,其击穿过程都是相似的。触发源极性不会影响初始等离子体的密度,因而触发源极性对 TVS 的运行不会有很大的影响。

虽然正脉冲情况下,触发极和主阳极都是高的正电压,更利于正离子离开主阳极,相应的负脉冲情况下,触发极是高的负脉冲电压,会阻碍一部分正离子的离开,稍许影响主阴极表面快速形成正离子鞘层。但是实际上,实验证明这种影响是非常有限的,所以 TVS 的极性差异主要在于主电极,而触发源的极性对其工作特性的影响并不大。这也是笔者提出正负 2 种脉冲源来触发场击穿型 TVS 的原因。而且实验证明,除了因脉冲变压器特性差异造成触发系统时延的不同之外,2 种触发源在 TVS 触发过程中具有同样的高可靠性,可根据实际情况灵活选择。

4 结语

研究设计了 2 种适用于场击穿型 TVS 的触发源,输出峰值在 17~30 kV 之间可调,保障了 TVS 在实际应用中的可靠运行,触发成功率高。正脉冲触

发系统总体时延在 $38\sim 42\ \mu\text{s}$ 之间, 负脉冲触发系统总体时延在 $60\sim 110\ \mu\text{s}$ 之间。此时延差异主要源于脉冲变压器的副边上升沿不同, 但具有同样的高触发可靠性。因为触发源的正负极性对场击穿型 TVS 触发过程影响不大, 可综合考虑各因素和要求来选取不同的触发源。

参考文献:

- [1] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩. 双断口真空开关的动态介质恢复特性分析[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(3): 190-194.
LIAO Min-fu, DUAN Xiong-ying, ZOU Ji-yan. Dynamic dielectric recovery characteristics of vacuum circuit-breakers with double-break[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, 27(3): 190-194.
- [2] 周正阳, 廖敏夫, 董华军, 等. 真空触发开关的起弧稳定性分析[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(3): 298-303.
ZHOU Zheng-yang, LIAO Min-fu, DONG Hua-jun, et al. Arc starting stability of triggered vacuum switch[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(3): 298-303.
- [3] 周正阳, 廖敏夫, 董华军. 一种场击穿型真空触发开关的工作特点[J]. 电气应用, 2009, 28(11): 80-83.
ZHOU Zheng-yang, LIAO Min-fu, DONG Hua-jun. Working characteristics of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. Electrotechnical Application, 2009, 28(11): 80-83.
- [4] 何俊佳, 邹积岩, 王海, 等. 高性能大功率触发真空开关的研究[J]. 电工电能新技术, 1997, 16(2): 28-32.
HE Jun-jia, ZOU Ji-yan, WANG Hai, et al. Review of development in high quality, high power triggered vacuum switches[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1997, 16(2): 28-32.
- [5] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 高性能真空触发开关技术的研究综述[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 51-54.
LIAO Min-fu, ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, et al. Overview of techniques of high-performance triggered vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 51-54.
- [6] GREEN A J, CHRISTOPOULOS C. Plasma buildup and breakdown delay in a triggered vacuum gap[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1979, PS-7(2): 111-115.
- [7] SHANG W, DAMSTRA G C. The main gap discharge type and mechanism of a triggered vacuum gap[C]//1996 IEEE XVIIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, 1996: 51-55.
- [8] LAFFERTY J M. Triggered vacuum gaps[J]. Proceeding of the IEEE, 1996(54): 23-32.
- [9] GOVINDA RAJU G R, HACKAM R, BENSON F A. Breakdown mechanisms and electrical properties of triggered vacuum gaps[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(4): 1310-1317.
- [10] 吴汉基, 安世明, 冯学章, 等. 触发真空开关的触发寿命[J]. 高压电器, 1987, 25(6): 37-43.
WU Han-ji, AN Shi-ming, FENG Xue-zhang, et al. The triggered lifetime of triggered vacuum switches[J]. High Voltage Apparatus, 1987, 25(6): 37-43.
- [11] 夏胜国, 董曼玲, 何俊佳, 等. 场击穿式 TVS 时延特性的测量与分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 167-170.
XIA Sheng-guo, DONG Man-ling, HE Jun-jia, et al. Measurement and analysis of time delay characteristics of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 167-170.
- [12] 胡国威, 夏长征, 陈仕修. 真空触发开关导通瞬间电场强度的计算[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 364-365.
HU Guo-wei, XIA Chang-zheng, CHEN Shi-xiu. Measurement of the high frequency pulse when the triggered vacuum switch turns on[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 364-365.
- [13] 邹积岩, 段雄英, 扈志宏. 真空触发开关通断特性实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(增刊 1): 20-23.
ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, HU Zhi-hong. Experimental investigations on operation capacity of triggered vacuum switches[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(S1): 20-23.
- [14] ZHAO Chun, ZOU Ji-yan, LIAO Xiao-peng, et al. Study of a three-stage reconnection electromagnetic launcher using triggered vacuum switches[J]. IEEE Transactions on magnetics, 2007, 43(1): 219-222.
- [15] 范兴明, 邹积岩, 董恩源, 等. 全电压关合试验的控制策略及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 8-13.
FAN Xing-ming, ZOU Ji-yan, DONG En-yuan, et al. Control strategy of synthetic making test for high voltage circuit breakers at full voltage and its realization[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 8-13.
- [16] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 场击穿型真空触发开关控制器设计及实验特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 45-47.
LIAO Min-fu, ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, et al. Delay characteristics and design of controller of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 45-47.
- [17] 王季梅, 马志瀛, 郭文元. 真空开关理论及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [18] 武建文. 真空电弧动态图像及其电子扩散过程的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1995.
- [19] 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.

周正阳(1981—), 男, 博士后, 讲师, 工程师, 现从事脉冲功率技术的研究。