

高性能真空触发开关技术的研究综述

廖敏夫^{1,2}, 邹积岩², 段雄鹰², 赵纯², 柏兴林²

(1. 哈尔滨工业大学电气学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

Overview on Techniques of High-performance Triggered Vacuum Switch

LIAO Min-fu^{1,2}, ZOU Ji-yan², DUAN Xiong-ying², ZHAO Chun², BAI Xing-lin²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China ; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要:总结了目前国内外高性能真空触发开关技术的进展及发展趋势;分析了真空触发开关在击穿机理方面的研究情况;比较了目前真空触发开关在大功率快速关合技术中的应用情况;介绍了真空触发开关的触发源技术的研究情况。

关键词:真空触发开关; 击穿机理; 快速关合; 触发源
中图分类号: TM561.2; TM89 **文献标识码:** A

Abstract: In this paper the development of high-performance triggered vacuum switch is summarized. The research situation in breakdown mechanisms of TVS is analyzed. The applications of TVS in high-power and quick crowbar are compared. The research situation of triggered source is introduced briefly.

Key words: triggered vacuum switch(TVS); breakdown mechanism; quick crowbar; trigger source

1 引言

真空触发开关(TVS)又称为真空触发间隙,是将真空开关技术和三极火花隙技术相结合而发展起来的一种新型开关器件,其特点是利用真空作为主触头间的绝缘介质和灭弧介质,并采用特殊设计的触发极来控制开关进行快速关合。

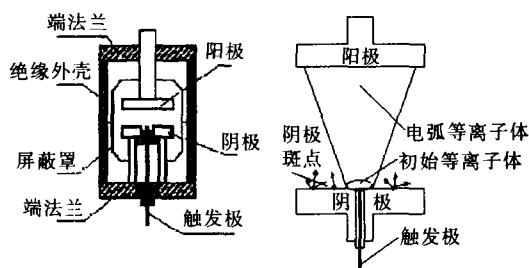
TVS的优点主要有:工作电压范围宽,高库仑电量导通特性/次(每次电荷承载量可达上千库仑),低电弧电压,动作迅速,介质恢复快,高重复频率,高触发准确度,高寿命,重量轻、体积小、经济性好,触发系统灵活、简单可靠。TVS的这些优点决定了它可以充当高压电器的过电流、过电压保护装置,大功率调速管的保护装置;可代替可控硅、闸流管、放电管和火花间隙,用于大功率高电压的整流、变流;亦可在电容器放电回路、脉冲激光系统中用作高压、高重复频率的开关装置;还可用作高功率微波电源、核聚变

装置中充当大能量精密控制开关等。这些应用领域中的高性能真空触发开关实质上是一种对高压大电流进行快速关合的脉冲功率控制开关。

笔者总结了目前国内外高性能真空触发开关的研究进展及发展趋势,以供国内同行参考。

2 真空触发开关的击穿机理研究

TVS的典型结构见图1,它主要包括绝缘外壳(陶瓷或玻璃材料)、金属屏蔽罩、一对相距为 d 的主电极和一个触发电极,管内真空度通常维持在 1×10^{-4} Pa以上。绝缘外壳一方面保证内部真空度,同时起绝缘和支撑作用;金属屏蔽罩一方面可以调整TVS内部的电场分布,还可防止燃弧时产生的金属蒸气沉积在绝缘壳体的内表面,使壳体内表面的闪络强度降低;主电极传导大电流,其结构设计对TVS的性能有重要的影响;触发电极提供初始等离子体。TVS工作过程可分为触发阶段和主间隙导通阶段。在触发阶段要为主间隙提供足够的初始等离子体,初始等离子体扩散进入主间隙后建立起金属蒸汽电弧,使主间隙导通,当主间隙放电电流过零时,电弧熄灭,开关断开^[1-2]。初始等离子体一般通过沿介质表面的闪络产生,所用的介质材料有氢化物^[1]、绝缘材料^[3]、半导体材料^[4-5]和金属膜^[6]等,也可以借助电子束流、激光束



(a)真空触发开关基本结构 (b)初始等离子体的发展过程
图1 真空触发开关的基本结构及初始等离子体发展过程

收稿日期:2005-09-19; 修回日期:2005-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50507001)

作者简介:廖敏夫(1975-),男,讲师,博士,在站博士后,现主要从事智能化高压电器、高电压新技术的研究。着重研究多断口真空开关技术、永磁操动机构及真空触发开关技术。

照射和 X 射线束辐照方式产生。

TVS 的基础理论与实验研究始于 20 世纪 60 年代,主要集中在对 TVS 的击穿机理进行理论和实验研究。文[1]对采用涂敷氯化物作触发材料的触发真空开关做了大量的研究工作,初步证实了 TVS 是一种较好的过电流、过电压保护装置,可应用于大功率能量转换领域。文[3]在文[1]工作基础上研究发现认为,要获得稳定的触发必须提供足够的触发电流,场致发射是引发间隙击穿的原因。

20 世纪 70 年代,文[4-5]对采用绝缘介质和半导体材料涂层作为触发材料的 TVS 进行了试验研究,认为触发时涂敷材料内部气体逸出并进一步引发电子崩是造成间隙最后击穿的原因。文[6]认为,造成主间隙发生击穿的主要原因在初始等离子体扩散阶段,阴极斑点发射及鞘层电场击穿。文[6]认为场致发射是导致触发间隙在触发阶段发生击穿的原因,与文[1]的研究结果相似。

在国内方面,20 世纪 80 年代初期,文[8]首先开始对 TVS 的一些工作特性和影响因素进行了初步的研究。进入 20 世纪 90 年代,文[9]对 TVS 的极性效应和初始等离子体的不稳定现象进行了实验研究,认为真空触发过程和主间隙的电压极性有关,提出在主间隙电压正极性下(这时触发极置于阴极)主要为电子扩散到主间隙引发击穿,在主间隙电压负极性下(这时触发极置于阳极)主要为离子扩散到主间隙引发击穿。文[10]对 TVS 的开断高频大电流等一系列工作特性进行了理论和实验研究。

3 真空触发开关在大功率快速关合中的应用

近年来,国外已经开始将 TVS 作为一种具有卓越性能的大功率快速关合开关进行大量的应用研究,昭示着高性能参数 TVS 的巨大应用前景。国内外开发的 TVS 主要用作脉冲功率装置中大功率关合开关以及过电压与过电流保护的关合开关,其应用见图 2。

由图 2 可见,TVS 主要作为一个关合开关,将已充好电的主电容能量经脉冲成形电感和同轴电缆瞬间释放到负载上。显然,TVS 是一个关键开关器件,要求导通时延小,时延准确度高,并且能关合的能量

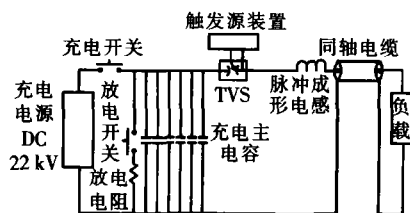


图 2 TVS 在脉冲大功率关合中的应用示例

越大越好。因此,国内外对这种高性能的 TVS 进行了大量的研究。

文[11]提出了一种真空中的旋转电弧间隙关合开关,可应用于电磁发射武器所需的脉冲电源技术中。参数达到每次发射的电压为 22 kV,电流 100 kA,100 C 的电量。触发回路采用了多个触发电极的设计,但触发系统只有 1 套,多个触发极并联共用,触发时只有 1 个触发极能触发,在触发能量为 1 J,触发峰值电压为 5 kV,触发峰值电流为 100 A 时,测得的触发时延(定义为触发脉冲电压开始上升的零点到主间隙电流开始增长的零点之间时间)为 10.8 μs,触发准确度约为 2~3 μs。文[12],文[13]介绍了一种小型的脉冲电源系统,采用 TVS 为保护回路关合开关,主要为了保护高压充电电容器在放电过程中两端的电压不会出现太大的反压,可以提高高压电容器的寿命,适用于单极性脉冲电流放电的应用场合。并采用罗式线圈测量电流最大值点,发信号给 TVS 关合电源系统。然后,文[11]采用容量达 300 kJ 的脉冲电源模块进行并联,产生 2.4 MJ 的用于电磁发射的脉冲电源。每个 300 kJ 的模块采用 6 个 50 kJ/22 kV 的高压电容器进行并联,并采用 TVS 作为关合开关进行能量转换。

文[14]开发了一容量为 540 kJ 的脉冲电源,用于电磁发射技术。系统由 6 个 90 kJ 的模块并联组成,每个模块采用 TVS 作为关合开关,完成能量的转换。各个模块的关合可以同步也可以依次进行关合,可产生不同的脉冲波形,同时也可通过每个模块中的电容值改变电感元件的值来灵活改变波形参数。试验证明了所设计回路的可靠性和实用性。

文[15]提出了一种新型带磁延滞功能的 TVS,见图 3,适合于低功率损失,高重复频率,对脉冲放电上升陡度有特殊要求的应用场合。它借助一个串接在 TVS 主放电回路中的饱和电抗器,利用电抗器电流不能突变的原理,将主放电电流的导通人为地延滞一定的时间,该延时一般为几十至上百 ns。由于经过一定的延时后,初始等离子体充满了整个主间隙,从而使主电流的起始导通变得稳定,避免了主放

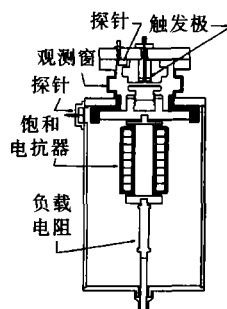


图 3 磁延滞 TVS

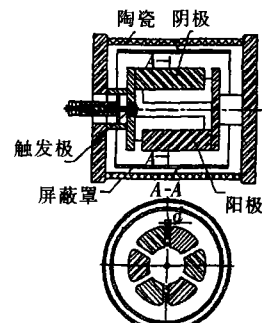


图 4 高承载能力 TVS

电电流在导通初始阶段的振荡现象以及由此引起的高的电流截断。它既保持了传统 TVS 所具有的高静态击穿电压,宽触发范围,潜在的快速介质恢复能力,以及高重复频率的优点,又克服了传统 TVS 的一些缺点,如关合参数不理想,大抖动,较大的功率损失(直接消耗在 TVS 关合过程中),以及不够稳定的介质恢复过程。所制作的带磁延滞功能的 TVS 在亚微秒时间内成功关合了 40 kV, 2.5 kA 的脉冲电流。与没有加磁延滞电抗器的 TVS 相比较,其电流上升时间得到大幅度的提高,而功率损失降低约 90%,脉冲重复能力更强,触头电极烧损明显降低。

文[16]测量了 TVS 运行时开关的伏安特性,开发出关合电流达 200 kA,工作电压 25 kV,单次承载电荷量达 120 C 的高性能 TVS,见图 4,预计将开发出单次承载电荷量超过 100 C,关合电流可达 500 kA 的 TVS。同时提出了串联 TVS 实现大能量(高压大电流)的脉冲能量转换开关。所开发的 RVU-43 型 TVS 可关合 120 kA, 25 kV, 能量 120 C 的电容器脉冲,适用于单极性脉冲电流放电的应用场合。

文[17]针对密封 TVS 在大电流(脉冲 120 kA)及一定重复频率下(5 Hz)的开断特性的实验研究。其触发回路采用空气隙来进行触发,触发能量和触发频率可调,可以做到约 1 000 Hz。试验发现,触发极在阳极比触发极在阴极需要更高的触发能量才能可靠触发,对试验装置来说,当触发能量达 11 J 时,两种情况下都能可靠触发。为获得重复触发成功概率和试验触发次数之间的曲线关系,实施了试验统计。试验表明,TVS 是一种潜在的具有重复操作能力的关合开关,可应用于等离子体 X 射线源。

20 世纪 90 年代,文[18-19]对 TVS 的通断特性、开断能力进行了持续的试验研究,开发出了关合电流达 60 kA,单次关合电荷量达 115 C 的 TVS。

4 真空触发开关的触发源技术

TVS 的触发时延、触发准确度(也称为抖动时间)以及工作寿命是真空触发开关的关键参数。触发时延和触发准确度主要受触发极结构参数、触发极介质材料、触发电压、触发电流及触发能量、主间隙电压、触发极和主电极极性等因素的影响。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告终,而是因触发系统中的触发极不能正常触发而停止工作。因此,触发源的设计性能实际决定了 TVS 的触发极工作寿命,目前认为触发源的对 TVS 的工作寿命有重要的影响^[16]。

TVS 的触发时延是与触发源密切相关的一个关键参数,它包括两个部分,分别对应于 TVS 触发过程的两个阶段,即动作时延 t_{d1} 和导通时延 t_{d2} 。 t_{d1} 为从施加触发脉冲到主间隙电压开始下降所经历的时间,

t_{d2} 为从触发极触发电流起始点到主放电电流的增长达到最大值间的时间。动作时延与初始等离子体的产生有关。TVS 的初始等离子体一般借助沿面放电方式产生。在这种情况下,由于真空-介质-金属导体 3 面交界处的电场增强作用,引起初始电子的发射,初始电子轰击介质表面,引起表面吸附气体层的去吸附,以及部分电极材料的蒸发和电离,导致二次电子发射倍增过程(SEEA)和随之而来的沿面闪络。Litvinov 和 Shnbin 对这个过程进行了详细地分析,从理论上阐明了触发参数与开关动作特性之间的关系,从而推导出动作时延^[8]:

$$t_{d1} = \frac{\pi \lambda \gamma_d C_d}{4 J^2 U^2} (T_{cd} - T_0)^2 \quad (1)$$

式中: t_{d1} 为时延; $\lambda, \gamma_d, C_d, T_{cd}$ 分别为触发介质的导热系数、密度、比热和临界温度; T_0 为环境温度; J, U 分别为触发电流密度和触发电压。

导通时延与初始等离子体的扩散有关。在触发电极尖端产生的初始等离子体可以认为是完全电离的等离子体。当触发极安装在阴极时,可推出主放电时延为^[20]:

$$t_{d2} = kd \left(1 + \frac{R}{d}\right) I_f^\alpha \quad (2)$$

式中: k 为一个依赖于触发系统设计的结构参数; d 为极间开距; R 为触发极尖端到阴极表面的距离; $\alpha = (0.5 \sim 1)$; I_f 为触发电流。

真空触发开关的触发源直接提供真空触发开关导通所需的初始等离子体。因此,触发源的设计直接关系到其工作特性。研究表明^[1, 21],场击穿型 TVS 的触发准确度在 1~2 μ s,沿面触发型 TVS 的触发准确度可以做到几十纳秒。但是,触发时延和触发准确度也直接受到触发源的影响。触发时延和触发准确度均与触发源的脉冲波形参数有关,波形前沿更陡的脉冲源将使触发准确度更高。国外有使用氢闸流管作为触发源开关的情况,但需要对阴极进行预加热,使用起来比较复杂。也有采用纳秒级的冲击电压发生器作为触发源,其能量存储采用脉冲成形线^[6]。目前,国内采用 TVS 的触发源技术,仅见采用脉冲变压器或者汽车点火线圈为触发能量转换器件的报道^[18],它利用高电压小电流电源使触发极起弧,起弧后再投入一低电压大电流电源来续流,目的是为提供触发极击穿后产生出足够的初始等离子体所需的能量,进而导致主电极的击穿。该触发源的特点是触发可靠,装置简单。缺点是触发电压梯度不高,触发准确度只能达到微秒级。国内其它的触发源技术尚未见详细报道。

5 结语

在 TVS 的击穿机理研究方面,国内外已经对 TVS 的一些基本击穿与运行特性进行了研究,提出

了场致发射、触发时涂敷材料内部气体逸出并进一步引发电子崩理论以及鞘层电场击穿理论等 3 大理论为 TVS 的击穿原因。同时,击穿存在极性效应,在 TVS 初始等离子体的产生与扩散过程中,哪一种击穿机理起主导作用目前还没有定论,需要进一步的研究结果来验证并丰富其内容。

在 TVS 的应用方面,目前 TVS 主要是在大功率快速关合领域得到了广泛应用,比较各国的高性能 TVS 研究情况,在通载能力、触发准确度等关键指标上,目前国内水平和国外相比还有一定的差距。应设计出具有更高性能参数的 TVS 以满足应用的需要。

触发源技术是真空触发开关的关键技术。提高 TVS 工作寿命、触发时延、触发准确度、重复频率等高性能参数的触发源,是 TVS 走向实用化的研究课题。

参考文献:

- [1] Lafferty J M. Triggered Vacuum Gaps[J]. Proceeding of IEEE, 1966, 54(1): 23-32.
- [2] 何俊佳, 邹积岩. 触发真空开关中初始等离子体的产生和扩展[J]. 高压电器, 1996, 22(6): 3-5.
- [3] Farrall G A. Low Voltage Firing Characteristics of a Triggered Vacuum Gap[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1966, ED-13(4): 432-438.
- [4] Kamakshiah S, Rau R S N. Delay Characteristics of a Simplified Triggered Vacuum Gap[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1975(8): 1426-1429.
- [5] Govinda Raju C R. Breakdown Mechanisms and Electrical Properties of Triggered Vacuum Gaps[J]. Journal of Appl. Phys., 1976, 47(4): 1310-1317.
- [6] Boxman R L. Triggered Mechanisms in Triggered Vacuum Gaps[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1977, ED-24(2): 122-128.
- [7] Green A J, Christopoulos C. Plasma Buildup and Breakdown Delay in a Triggered Vacuum Gap[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1979, PS-7(2): 111-115.
- [8] 魏荣华, 吴汉基. 触发真空开关[J]. 高压电器, 1983, 25(6): 50-56.
- [9] 尚文凯. 真空触发间隙与马蹄型触头真空灭弧室特性的研究[D]. 西安交通大学博士论文, 1997.
- [10] 邹积岩, 段雄英. 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(S1): 20-23.
- [11] Seo Kil-soo, Lee Tae-Ho. A High Power Vacuum Rotary arc Gap Closing Switch for Pulsed Power Application [A]. Proceeding of Xth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C], July 1-5, Tours, France, 2002: 366-369.
- [12] JIN Yun-sik. Noble Crowbar Circuit for Compact 50 kJ Capacitor Bank[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2004, 32(2): 525-530.
- [13] JIN Yun-sik. Design and Performance of a 300 kJ Pulsed Power Module for ETC Application[J]. IEEE trans. on Magnetics, 2001, 31(1): 165-168.
- [14] Wisken H G. A 540 kJ Modular Capacitive Pulsed Power Supply System for Basic Investigations on ETC-performance[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1999, 35(1): 394-397.
- [15] Roger A Dougal, Gibson Morris. Low-loss High-repetition-rate Vacuum Switching[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1991, 19(5): 976-988.
- [16] Alfero F F. High-current Vacuum Switching Devices for Power Energy Storages[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1999, 35(1): 323-327.
- [17] Hiroshi Arita, Kouji Suzuki, Yukio Kurosawa. Switching Characteristics of the Triggered Vacuum Gap for a High-repetition-rate Pulse-power Source[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1992, 20(2): 76-79.
- [18] 何俊佳, 邹积岩. 高性能大功率触发真空开关的研究[J]. 电工电能新技术, 1997, (2): 28-32.
- [19] HE Jun-jia, ZOU Ji-yan. A High-capacity Triggered Vacuum Switch with Single Axial Magnetic Field Electrode[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1999, 35(1): 352-355.
- [20] Vozdvijensky V A. Initial Stage of Discharge Current Growth in a Triggered Vacuum Gap[A]. Proc. 14th ISDEIV [C], Santa Fe, USA, 1990: 532-535.
- [21] 胡素华. 4 种真空触发间隙抖动时间的研究[J]. 高压电器, 1994, 30(3): 24-27.

新书介绍

树脂浇注干式变压器和电抗器

《树脂浇注干式变压器和电抗器》一书近日已由中国电力出版社正式出版。该书由顺特电气有限公司编著,是一本关于环氧浇注干式变压器和电抗器的专业技术书籍。全书共 6 章,分别为:概述、浇注用环氧树脂的基础知识、树脂浇注干式变压器的结构及其制造、树脂浇注干式变压器的应用和运行、干式电抗器、其它输变电产品以及附录等。全书 33 万字,并附彩图 8 页,售价 21.50 元。

该书为中级专业科技读物,适合于从事环氧浇注干式变压器和电抗器的设计、制造、运行的广大科技工作者阅读;并可供从事用环氧树脂作为绝缘材料的其他高低压电器制造(如开关厂、互感器厂等)和使用的科技人员参考;也可供部分大专院校相关专业的广大师生参阅。