

高性能触发真空开关的研究综述

谢昌明, 尚绍环, 谈效华, 杜 涛

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 综述了目前国内外高性能触发真空开关的研究进展, 归纳了触发真空开关的结构研究情况, 按触发形式的不同将其分为沿面击穿型和场击穿型, 按结构形式不同可将其分为多棒极型、磁延滞型、带辅助阴极型、长间隙型、触发真空灭弧室、棒状电极和圆筒状电极型; 分析了触发真空开关的击穿机理研究情况; 总结了触发真空开关的触发特性和导通特性等性能研究情况。

关键词: 触发真空开关; 结构; 击穿机理; 触发特性; 导通特性

中图分类号: TM561.2; TM89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)04-0131-08

Review of the Researches on High-performance Triggered Vacuum Switch

XIE Changming, SHANG Shaohuan, TAN Xiaohua, DU Tao

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

Abstract: The current researches of high-performance triggered vacuum switches (TVS) in the world are reviewed. The researches on the structures of TVS are summed up, concerning the field-breakdown and surface breakdown types according to triggering modes; and concerning multi-electrode type, magnetically delayed type, type with auxiliary cathode, long-gap type, triggered vacuum interrupter type, club-shaped electrode type, and cylindraceous electrode type, according to the structures. The researches on breakdown mechanisms of TVS are analyzed, and the researches on triggering and conducting characteristics of TVS are summarized.

Key words: triggered vacuum switch(TVS); structure; breakdown mechanism; triggering characteristics; conducting characteristics

0 引言

近年来, 脉冲功率技术飞速发展, 而开关技术是限制脉冲功率技术发展的关键技术之一。触发真空开关(triggered vacuum switch, TVS)又称为真空触发间隙, 是在真空开关技术和触发火花间隙技术相结合的基础上发展起来的一种可控快速关合的新型开关^[1]。作为能量的快速关合控制开关, TVS是近年具有雄厚发展潜力的脉冲功率开关器件。

TVS的特点是利用真空作为主触头间的绝缘和灭弧介质, 并使用特殊设计的触发极来控制开关进行快速关合。它具有承载电荷量高、工作电压范围宽、介质恢复迅速、结构紧凑、使用方便和维护简单等优点, 可用作过电流、过电压保护装置, 以及大功

率高电压的整流和变流等^[2-3], 具体工作特点及应用见表1。近年来, TVS被认为是在高压大电流快速关合领域拥有广泛应用前景的控制开关。TVS的一系列优点促使它被广泛应用于电力系统的故障限流器、电工新技术中的电磁轨道炮发射、脉冲等离子体发动机、电热化学炮和高重复频率脉冲电源等诸多领域中^[4]。

TVS的研究始于20世纪60年代, 主要集中在TVS的击穿机理方面。文[4]中提出了TVS的基本理论, 初步证实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[5]中通过进一步研究发现, 须提供足够的触发电流才能获得稳定的触发, 引发间隙击穿的主要原因是场致发射; 文[6-7]中对以绝缘介质和半导体涂层作为触发材料的TVS, 进行了大量试验研究; 文[8]中研究了采

表1 TVS 的特点及应用表

Tab. 1 Characteristics and applications of TVS

开关	工作特点	应用
TVS	工作电压范围宽,通载电荷量高,主间隙介电强度恢复快,重复频率高,触发准确度高,动作时延及其分散性小,开关体积小,成本低廉,环境适应性强,可靠性高。	用作高压电器的过电流、过电压保护装置,大功率调速管的保护装置;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;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;在高功率微波电源、核聚变装置中充当大能量精密控制开关。

用铜和铍作为涂敷材料的 TVS。80 年代,文[9]中针对 TVS,尤其是触发技术,以及 TVS 的工作特性和影响因素做了初步的研究,进一步研究了间隙击穿机理,促进了 TVS 的实用化发展;文[10]中开展了 TVS 工作特性的相关研究。进入 90 年代以来,文[11-12]中对 TVS 的极性效应、初始等离子体的不稳定现象和开断高频大电流等一系列工作特性开展了理论和试验研究。近年,国内外开始将 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,促使具有巨大应用前景的高性能 TVS 在多个领域得以广泛应用。笔者总结了目前国内外高性能 TVS 的研究进展及发展趋势,包括结构研究、击穿机理研究、触发特性和导通特性研究等,以供同行参考。

1 TVS 的结构研究

TVS 的基本结构及样品实物^[3]见图 1,它主要由绝缘外壳、金属屏蔽罩、一对主电极和一个触发电极组成,其中绝缘外壳材料为陶瓷(坚固、体积小)或玻璃(工艺简单、造价低),管内气压维持在 1×10^{-4} Pa 或更小。绝缘外壳在保证管内真空度的同时起支撑和绝缘的作用;金属屏蔽罩可防止由燃弧产生金属蒸气沉积于壳体内表面而引起壳体内表面闪络强度的下降,在另一方面还可调整开关管内的电场分布;触发电极担负着重要的触发任务,为开关管提供初始等离子体,因此触发电极的结构设计直接影响开关的性能;主电极在开关管工作时传导大电流,使主间隙导通,因而它的结构设计以及抗烧蚀电极材料的选择对开关管的导通特性有着重要影响。

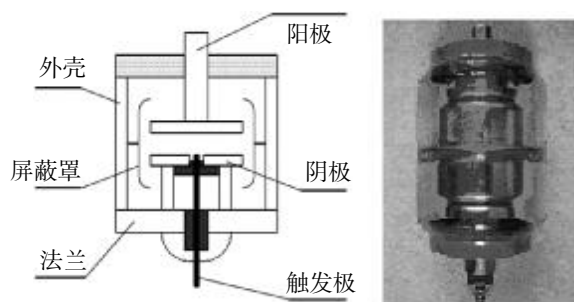


图1 TVS 的基本结构及样品实物

Fig. 1 Basic structure and sample of TVS

经过近 50 年国内外研究人员对 TVS 的研究,TVS 呈现出结构多样化、用途广泛化的发展趋势。根据触发形式的不同,可将 TVS 分为沿面击穿型和场击穿型 TVS^[13-14],其基本结构见图 2。场击穿型 TVS 的主电极与触发电极绝缘表面远离放电区间,可有效避免金属蒸气的污染;主电极与触发电极间形成场畸变区,由较高电压形成场击穿产生初始等离子体;该结构可延长开关的寿命,但是同时加重了外触发回路的负担,触发时延及其分散性较大。

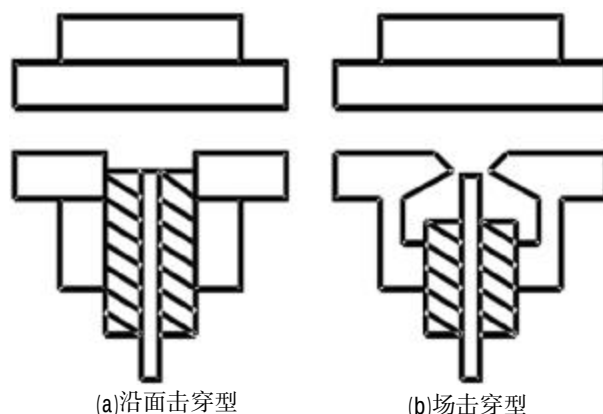


图2 沿面击穿型和场击穿型 TVS 的基本结构

Fig. 2 Structure of surface breakdown and field-breakdown TVS

沿面击穿型 TVS 的触发电极与主电极间的陶瓷沿面距离较小,通过在陶瓷表面涂敷一层触发材料,以降低触发电压和触发能量。如文[4]采用 TiH_2 涂层使触发电压降低至 50 V。此结构的优点是外电路简单,触发电压低,但由于大电流电弧放电产生的金属蒸气沉积在触发电极的绝缘表面,绝缘电阻降低直至触发失效,导致触发寿命较短。沿面击穿型 TVS 又分为电脉冲触发和激光脉冲触发形式^[15],激光触发沿面击穿型 TVS 的时延和抖动较电脉冲触发沿面击穿型 TVS 的小,可应用于并联的脉冲功率装置中解决并联同步问题。

在电极结构形式上,TVS 包括多棒极型、磁延滞型、带辅助阴极型、长间隙型、触发真空灭弧室、棒状电极和圆筒状电极 TVS 等多种类型。多棒极型 TVS 是一种采用多对棒状电极导通脉冲大电流的特殊结构的触发真空开关,结构示意图见图 3,开关的主电

极由多对棒状电极组成,棒状电极正负交叉,呈环形排列,构成并联的真空间隙。在此类触头中,电弧电流由轴向电流产生的磁场导向,保持扩散态,避免了真空电弧的收缩和电极烧蚀,因此可大幅提高通流能力和寿命。它最早由美国通用电气公司提出,最终由俄罗斯研制成功并开发出一系列规格产品,在各国脉冲电源装置上获得应用^[16]。

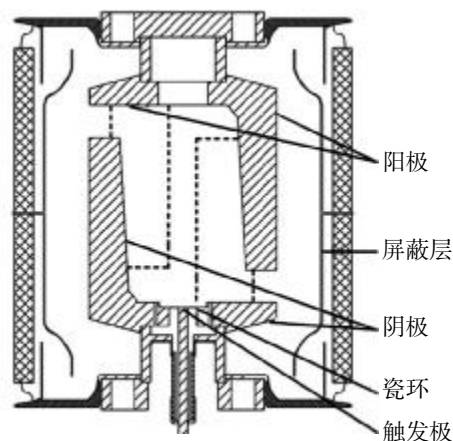


图3 多棒极型 TVS 的结构

Fig. 3 Structure of multi-electrode TVS

磁延滞型 TVS 是一种带磁延滞功能的新 TVS^[17],结构见图 4。它借助串联在 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,令放电电流的导通人为地延滞一定的时间(延时几十至上百 ns)。经过一定的延滞后,初始等离子体充满整个主间隙,因而使主电流的起始导通变得稳定,避免了在间隙导通初始阶段主放电电流的振荡现象以及由此引起的高的电流截断。

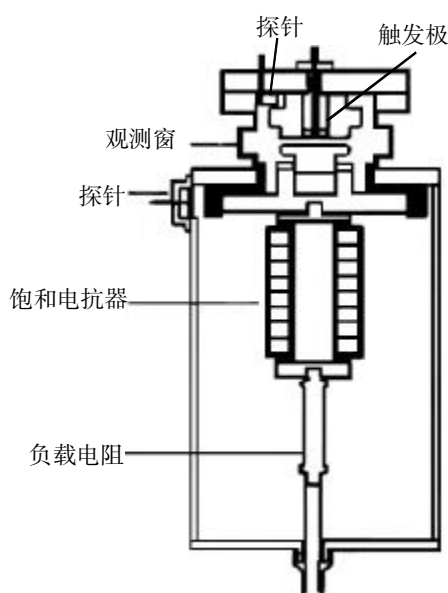


图4 磁延滞型 TVS 的结构

Fig. 4 Structure of magnetically delayed TVS

带辅助阴极的 TVS 是由全俄电工研究院的 Alferov 等人提出^[18],基本结构见图 5,它可将整个初始等离子体源从阴极中分离出来。触发极与辅助阴极之间的放电产生初始等离子体,辅助阴极是通过 RL 电路与主阴极相连。通过调节 R 和 L 的参数值,就可调节初始等离子体相对于主阴极的电位,从而灵活控制主阴极上阴极斑点的动力学特性,使导通性能达到最优。例如,可减小触发装置的电流负载和降低 TVS 的启动损耗,从而提高开关管的工作寿命。

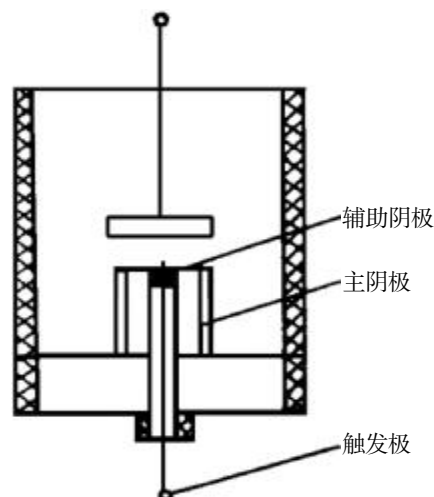


图5 带辅助阴极的 TVS 的基本结构

Fig. 5 Basic structure of TVS with auxiliary cathode

TVS 的真空间隙一般为 1~20 mm,长间隙型 TVS 是在其基础上加大真空间隙长度(达 50~60 mm)的新型 TVS^[19],结构见图 6,可达到进一步提高工作电压的目的。触发真空灭弧室综合了 TVS 和真空灭弧室的特点,主要用于工频条件下的大电流关合情况^[2]。其导通控制比真空灭弧室更精确,可在时间控制非常严格的场合作为快速闭路开关使用。在大电流应用场合,触发真空灭弧室借助轴向磁场的作用使电弧保持扩散型,以减轻电极烧蚀,提高恢复速度。但是在持续时间非常短的脉冲大电流情况下(如雷电流,峰值电流为 100 kA,持续时间为 μs 量级),电流上升速度极高,引起触头涡流使轴向磁场严重滞后于电流相位,同时巨大电磁力作用于线圈上,对触头系统造成重大冲击。在此情况下,棒状电极和圆筒状电极 TVS 应运而生,由 Damstra 等人提出^[10],可用于上升速度较高的脉冲大电流场合。

综上所述,TVS 呈多样化发展,具有广泛的应用前景。表 2 归纳了多种类型 TVS 的工作特点及应用范围。电极的结构形式与布置是由通载的电荷量、电流密度和动态绝缘水平等因素决定的^[20-21]。多棒极型 TVS 可增加燃弧面积,可在以载荷量为主要考虑因素的场合应用;带磁延滞功能的 TVS 借助饱和电

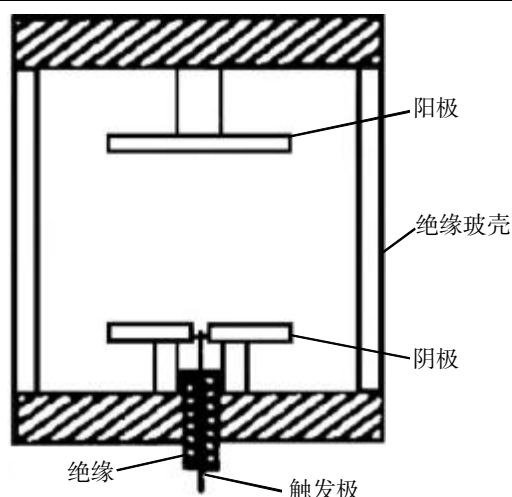


图 6 长间隙型 TVS 的基本结构

Fig. 6 Basic structure of long-gap TVS

抗器使主电流起始导通变稳定,可应用于以 TVS 导通稳定性为主要考虑因素的场合;长间隙型 TVS 可提高静态绝缘水平,同时提高工作电压并可用于高电压大容量的相关场合,但在动态下并非间距越大越好,这是因为增加电弧长度则提高了电弧电压,增大了电极表面的热载,从而加剧电极烧蚀,影响弧后介质强度恢复;在关合电流大且持续时间长的场合,触发真空灭弧室表现出独特的优势,同时为了扩大其应用范围,触发真空灭弧室朝着提高重复频率的方向发展;棒状电极和圆筒状电极型 TVS 因关合和分断能量强而广泛应用于上升速度非常快的脉冲大电流场合;与沿面击穿型 TVS 相比,场击穿型 TVS 存在工艺制作难控制和触发时延及分散性较大的问题,因此目前常用触发电极结构为沿面击穿型,可解

表 2 多种类型 TVS 的特点及应用

Tab. 2 Characteristics and applications of various TVS

分类方式	TVS	特点	应用
触发形式	场击穿型	在触发小孔填充陶瓷或半导体材料,在陶瓷表面再涂敷触发材料,可避免金属蒸气的污染,触发寿命较长;触发时延及分散性较大,触发极与阴极相距近,工艺制作难控制。	用于要求触发真空开关触发寿命长的场合。
	沿面击穿型	只在触发极和主电极表面涂敷触发材料,外触发电路简单,触发电压低,重复触发方便;有金属蒸气沉积于触发极绝缘表面,触发寿命较短。(包括电脉冲触发、X 射线束辐照触发和激光触发等)。	用于并联的脉冲功率装置,解决并联同步问题。
电极结构形式	多棒极型	主电极由多对棒状电极组成,棒状电极正负交叉,呈环形排列,通流能力强,寿命长。	用于脉冲电源装置。
	磁延滞型	击穿电压高,触发范围宽,重复频率高,克服了抖动大、功率损失大等缺点,导通稳定。	用于低功率损失,高重复频率,电流上升快且电流较大的场合。
	带辅助阴极型	由主电极和辅助阴极组成,触发极与辅助阴极间放电产生初始等离子体。	用于要求触发真空开关工作寿命长的场合。
	长间隙型	真空间隙大(达 50 mm),工作电压高,工作稳定性良好。	用于工作电压高的场合;用作大容量高性能闭路开关。
	触发真空灭弧室	在触发脉冲快结束时发出合闸信号使触头闭合,触头烧蚀小,导通控制精确;重复频率不高。	用于工频条件大电流关合及持续时间长的场合;用在时间控制严格场合。
	棒状和圆筒状电极型	电极为棒状、圆筒状,工作电压高(达 40 kV),关合和分断能力强(达 200 kA)。	用于上升速度高的脉冲大电流场合(雷电流)。

决并联同步问题,近年来沿面击穿型 TVS 朝着提高触发寿命的方向发展;场击穿型 TVS 仍受到众多学者的重视并开展了大量的研究,促使其朝着降低时延及分散性的方向发展。

2 TVS 的击穿机理研究

TVS 的工作过程包括触发和主间隙导通两个主要阶段。初始等离子体通过沿介质表面的闪络而产生(沿面击穿型 TVS),或通过触发极的尖端放电产生(场击穿型 TVS),继而扩散进入主间隙;在电场作用

下,带电粒子引发辉光放电,随着电流密度的迅速增加,辉光放电转变为弧光放电,形成金属蒸气电弧,使主间隙导通;当主间隙放电电流过零时,开关断开。触发阶段为主间隙提供初始等离子体,产生初始等离子体所用的介质材料有半导体材料、绝缘材料、金属膜和氢化物等,也有借助电子束流、激光束照射以及 X 射线束辐照方式产生^[4,13-15]。

TVS 的击穿机理研究自 20 世纪 60 年代起便拉开帷幕。文[4]系统地研究 TVS 并分析其击穿机理,初步证实了 TVS 作为过电流、过电压保护装置的优

越性以及应用于大功率能量装换领域的光明前景。继而,国内外学者对 TVS 的击穿机理开展了理论和实验研究,相关结论见表 3,针对 TVS 的击穿机理提出了多种理论。哪一种击穿机理占主导作用,目前仍没有定论,需继续进一步开展系统性的研究。

表 3 TVS 的击穿机理理论

Tab. 3 Breakdown mechanisms of TVS

引起间隙击穿的原因(击穿机理)	研究人员
场致发射	FARRALL G A(1966) ^[6]
涂敷材料内部气体逸出,并进一步引发电子崩,从而引发间隙击穿。	KAMAKSHIAIAH S(1975) ^[6] , GOVINDA R G R(1976) ^[7]
阴极斑点发射及鞘层电场击穿(初始等离子体扩散阶段),引发击穿。	BOXMAN R L(1977) ^[8]
场致发射	GREEN A J(1979) ^[22]
当主间隙电压为正极性时,电子扩散到主间隙引发间隙击穿;当主间隙电压为负极性,触发电极置于阳极时,离子扩散到主间隙引发击穿。	尚文凯(1997) ^[14]

3 TVS 的触发特性研究

TVS 的工作性能主要体现在触发特性和导通特性两个方面。触发特性主要包括工作时延及其分散性、触发可靠性和时间抖动特性等关键参数,它们主要由触发系统的结构和触发参数(如触发电流、触发电压)决定。

TVS 的工作时延包括触发时延 t_1 和导通时延 t_2 。从施加触发脉冲到主间隙电压开始下降所经历时间为触发时延,它与初始等离子体的产生有关。Litvinov 和 Shnbin 假设初始等离子体是通过沿介质表面的闪络产生,从理论角度分析了触发参数与开关动作特性的关系,推导出触发时延的计算式^[9]。

$$t_1 = \frac{\pi \rho \lambda C}{4U^2 J^2} (T_c - T_0)^2 \quad (1)$$

式(1)中: t_1 为触发时延; ρ 、 λ 、 C 、 T_c 分别为触发介质的密度、导热系数、比热容和临界温度; T_0 为环境温度; U 、 J 分别为触发电压和触发电流密度。

导通时延是从触发电极触发电流起始点到主放电电流增大直至峰值时的时间,它与初始等离子体的扩散有关。可认为在触发电极尖端产生的初始等离子体已完全电离,当触发电极置于阴极时,推导出导通时延的计算式^[23]。

$$t_2 = kd(1 + \frac{r}{d}) I^{-\alpha} \quad (2)$$

式(2)中: t_2 为导通时延; k 为触发系统的结构参数; d 为主电极间隙距离; r 为触发电极尖端到阴极表面的距离(即触发间隙距离); α 为 0.5~1; I 为触发电流。

文[17]提出的新型带延滞功能的 TVS,一般延时几十至上百 ns;文[4]研究发现,场击穿型 TVS 的工作时延在 1~2 μ s,沿面击穿型 TVS 的工作时延可降低至几十 ns;文[24]研究了真空中旋转电弧间隙关合开关,在触发能量为 1 J,触发峰值电压和电流分别为 5 kV 和 100 A 时,时延为 10.8 μ s,分散性为 2~3 μ s。针对场击穿型 TVS,文[25]设计的主触发电火回路采用三电极间隙产生陡化的高压触发脉冲,使 TVS 导通时延的分散性小于 2 μ s,导通时延可降低至 15.57 μ s;文中实验还证实了 TVS 的导通时延和时延分散性随控制器提供触发能量的增加而迅速减小。文[26]也开展了场击穿型 TVS 时延特性研究,实验表明 TVS 的触发时延和导通时延均随触发能量增大而减小,时延分散性呈现同样的规律;当主间隙电压为正时,正脉冲的触发时延及其分散性均比负脉冲的小。针对场击穿型 TVS,文[27]设计了输出峰值为 22 kV/350 A 的正脉冲触发系统来研究开关的开通性能,结果显示,正极性接线能使 TVS 经触发后有效开通,触发成功率高,系统时延分散性小(<2 μ s),工作电压范围宽(0.3~35 kV);同时证实 TiH₂ 能有效提高 TVS 触发起弧的可靠性。文[28]开展了长间隙(60 mm)场击穿型 TVS 的研究,发现采用高电压小电流击穿加低电压大电流续流的触发电路,可保证触发可靠性;长间隙 TVS 表现出良好的工作稳定性。长间隙 TVS 的工作电压可满足众多场合的要求^[19]。

采用高介电常数电介质材料制成沿面击穿型 TVS,文[29]研究了开关的触发脉冲和主间隙电压对放电时延及其分散性的影响。研究发现,在自击穿电压为 120 kV 的条件下,TVS 的最小工作电压为 1.3 kV,工作电压范围为 1%~99%;通过的最大电流峰值可达 240 kA,最小放电时延和抖动分别达 100 ns 和 10 ns;该 TVS 不仅满足作为高电压、大电流放电开关的要求,还可用于对放电开关有特殊要求(高耐压、宽触发工作电压范围、短放电时延和抖动等)的 Crowbar 回路。

对于多棒极型 TVS,文[23]开展了开关触发特性的研究。结果表明,当触发能量越大,触发电流幅值越高、陡度越高时,TVS 的导通时延及其分散性越小;降低脉冲变压器电压比或提高触发电压的幅值可降低触发时延;在脉冲变压器匹配续流回路后,充电电容续流可使触发电流达 kA 级,导通时延减小

至 2~4 μs ;通过对触发回路的改进(在触发极和阴极两端并联电容),可使导通时延保持小于 1 μs 。文[30]研究了多棒极型 TVS 的极性效应,基于有限元分析方法对触发极附近静电场分布进行仿真,计算结果表明当触发极工作在正极性配置下,可增强触发极附近阴极表面的电场强度,利于阴极斑点的形成,减小导通时延及其分散性,同时提高其可靠性;该文还通过实验验证了在正极性配置下 TVS 的时延小、工作可靠性高。

4 TVS 的导通特性研究

TVS 的导通特性主要反映在电流通断能力(单次转移电荷量、最大可分断的峰值电流)、导通期间的电弧稳定性和连续工作频率方面(进行下轮操作的最小时间间隔或最大工作频率),后两者主要由真空电弧的输入能量及其变化率决定。

TVS 的电流通断能力主要受电极结构、耐烧蚀电极材料的选择以及管内真空度等因素影响,还与熄弧后主间隙承受的暂态电压恢复特性、介质绝缘强度恢复速度及开断电流频率有关。TVS 的早期研究主要基于平板电极结构,在通载大电流时,平板电极会发生真空电弧的聚集,从而影响其通载能力。为了解决平板电极中电弧收缩问题,通用电气公司于 20 世纪 70 年代提出多棒极型电极结构^[31]。近年,俄罗斯开发了一系列商品化的多棒极型 TVS^[16,32],最具代表性的是 RVU-43,额定电压为 25 kV,峰值电流为 200 kA,单次最大电荷转移量为 120 C,寿命为 10^4 次。文[33]研究了多棒极型 TVS 中多通道燃弧的过程,利用 3 对棒形电极的特殊结构来增大主触头间的燃弧面积,从而有效地提高开关的通流能力。电弧电压的变化表现了多棒极型 TVS 中多通道并联燃弧及其在各通道之间的电弧转移过程,从而使得真空电弧维持在扩散态。该文中设计的 TVS 实现了 225 kA 的峰值电流,单次转移电荷量为 45 C。将电力用真空开关的纵磁场控制电弧技术引入到 TVS 中,可大幅度提高开关的开断能力,而在电磁发射中对开关最苛刻的要求正是大容量开断^[34]。文[12,35]对纵磁 TVS 开展了开断能力研究,结果表明开关的开断能力随着频率的增大而下降,这归因于频率提高引起的过零时电流变化率的提高。

TVS 的导通过程实质上是电弧燃烧的过程,而起弧稳定性直接影响 TVS 的导通。文[36]针对 TVS 的起弧稳定性,设计了一套触发和实验系统,从电气特性和图像特性研究场击穿型 TVS 的起弧过程。理论分析结合实验结果表明,触发系统的稳定延时为

40 μs ,起弧过程持续 297 μs ;初始等离子体的不同发展决定着 TVS 的开通,只有充足的初始等离子体,才能产生一定的鞘层电压,从而不断产生新的阴极斑点,保障起弧的稳定性。

文[37]根据高速摄像方法讨论了长间隙 TVS 的导通过程,分析研究了影响导通特性的因素,给出了放电通道发展过程,见图 7;触发间隙形成初始等离子体—阳极处形成等离子体—形成电弧通道。该文推测放电通道的发展包括以下过程:触发间隙在高压脉冲作用下形成初始等离子体;电子加速向阳极运动并轰击阳极,被轰击出的金属蒸汽与后续电子碰撞电离形成阳极附近的等离子体;被轰击出的正离子加速轰击阴极,轰击出的电子与阴极附近金属蒸汽碰撞形成阴极等离子体;阳极等离子体和阴极等离子体在电场作用下进行双极性扩散,直至间隙闭合形成电弧通道。还通过实验证实了在 TVS 导通过程中,可通过提高阴极处的初始等离子体密度来增大阴极和阳极的等离子体密度,达到提高电导率的目的,从而促使开关导通^[38-40]。

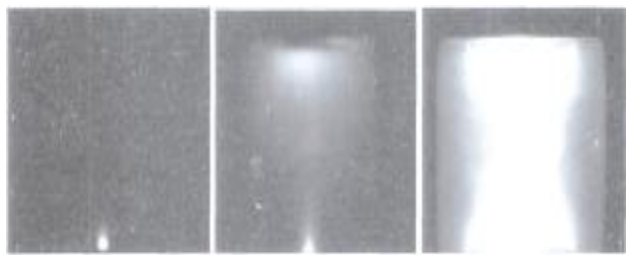


图 7 放电通道的发展过程

Fig. 7 Development of discharge channels

5 结语

经过近 50 年的研究与发展,TVS 的结构呈现多样化发展,分别应用于不同的场合。根据触发形式不同,可将其分为沿面击穿型和场击穿型 TVS,其中沿面击穿型 TVS 又分为电脉冲触发和激光脉冲触发;根据电极结构形式不同,可分为多棒极型、磁延滞型、带辅助阴极型、长间隙型、触发真空灭弧室、棒状和圆筒状电极型 TVS 等类型。

国内外学者对 TVS 的击穿机理开展了大量研究,并提出了场致发射理论、鞘层电场击穿理论、涂敷材料内部气体逸出并引发电子崩理论以及主间隙极性效应等理论。目前对于哪一种击穿原理占主导作用仍没有定论,需进一步开展研究。

TVS 的工作性能主要反映在触发和导通特性上,包括时延及其分散性、触发可靠性、电流通断能力、电弧稳定性和工作频率等参数。不断提高 TVS 的性能以满足更广泛应用的需要,已成为当前 TVS

实用化的重要课题。

参考文献:

- [1] 修士新, 王季梅. 关于高电压等级真空灭弧室研究与开发[J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 7-9.
XIU Shixin, WANG Jimei. Research and development of the high voltage vacuum interrupter[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 7-9.
- [2] 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 Junjia, ZOU Jiyan, WANG Hai, et al. Review of development in high quality, high power triggered vacuum switches, advanced technology of electrical engineering and energy[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1997, 16 (2): 28-32.
- [3] 董曼玲. 触发真空开关工作特性及其机理的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
DONG Manling. Study on working characteristic and mechanism of triggered vacuum switch [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [4] LAFFERTY J M. Triggered vacuum gaps[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(1): 23-32.
- [5] FARRALL G A. Low voltage firing characteristics of a triggered vacuum gap[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1966, 13(4): 432-438.
- [6] KAMAKSHIAH S, RAU R S. Delay characteristics of a simplified triggered vacuum gap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975(8): 1426-1429.
- [7] RAJU G R G, HACKAM R, BENSON F A. Breakdown mechanisms and electrical properties of triggered vacuum gaps[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(4): 1310-1317.
- [8] BOXMAN R L. Triggered mechanisms in triggered vacuum gaps[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(2): 122-128.
- [9] 魏荣华, 吴汉基. 触发真空开关[J]. 高压电器, 1983, 25(6): 50-56.
WEI Ronghua, WU Hanji. Triggered vacuum switches[J]. High Voltage Apparatus, 1983, 25(6): 50-56.
- [10] DAMSTRA G C, PETTINGA J A. Low vacuum triggered gap for crowbar application[C]//15th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Darmstadt, Germany: IEEE, 1992: 443-435.
- [11] 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: 西安交通大学, 1997.
SHANG Wenkai. Research on triggered vacuum gaps and characteristics of vacuum interrupter with horseshoe contact[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1997.
- [12] 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 (S1): 20-23.
ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, HU Zhihong. Experimental investigations on operation capacity of triggered vacuum switches[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(S1): 20-23.
- [13] KELLOGG J C, BOLLER J R, COMMISSO R J, et al. Triggered vacuum flashover switch for high-power applications[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(11): 2689-2694.
- [14] ZHOU Z, LIAO M, ZOU J, et al. Time delay of a field-breakdown triggered vacuum switch with flat electrodes [J]. Electronics and Radio Engineering, 2011, 54(6): 803-807.
- [15] NUNNALLY W C, NEURATH R, HOLMES C, et al. Investigation of UV laser triggered, nanosecond, surface flashover switches[C]//Proceedings of IEEE 14th Pulsed Power Conference. Dallas, Texas, USA: IEEE, 2003: 1355-1358.
- [16] ALFEROV D F, IVANOV V P, SIDOROV V A. High-current vacuum triggered vacuum triggered switching devices [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 406-409.
- [17] DOUGAL R A, MORRIS G. Low-loss high-repetition-rate vacuum switching[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 19(5): 976-988.
- [18] ALFEROV D F, VOZDVIJENSKY V A, KOROBOVA N I, et al. Triggered vacuum switch with subsidiary cathode [C]//15th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Darmstadt, Germany: IEEE, 1992: 411-415.
- [19] ALFEROV D F, NEVROVSKY V A, SIDOROV V A. On statistics of dielectric strength of triggered vacuum switches[C]//20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Tours, France: IEEE, 2002: 194-197.
- [20] 李化, 龙兆芝, 林福昌, 等. 多棒极型触发真空开关触发特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 61-67.
LI Hua, LONG Zhaozhi, LIN Fuchang, et al. Triggering characteristics of multi-electrode type triggered vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 61-67.
- [21] 程正. 电磁发射用脉冲电源系统及触发真空开关特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
CHENG Zheng. Research on the pulsed-power system and characteristic of triggered vacuum switch for electromagnetic launcher[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [22] GREEN A J. Plasma build up and breakdown delay in a triggered vacuum gap[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1979, 7(2): 111-115.
- [23] VOZDVIJENSKY V A. Initial stage of discharge current growth in a triggered vacuum gap[C]// 14th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Santa, USA: IEEE, 1990: 532-535.

- [24] KIL S S, TAC H L, LEE H H, et al. A high power vacuum rotary arc gap closing switch for pulsed power application[C]//25th International Power Modulator Symposium. Hollywood, California, USA:IEEE, 2002: 366-369.
- [25] 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时延特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 45-47.
LIAO Minfu, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Delay characteristics and design of controller of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 45-47.
- [26] 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 Shengguo, DONG Manling, HE Junjia, et al. Measurement and analysis of time delay characteristics of a field-breakdown triggered vacuum switches[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 167-170.
- [27] 周正阳, 廖敏夫, 邹积岩, 等. 场击穿型真空触发开关的开通实验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3059-3064.
ZHOU Zhengyang, LIAO Minfu, ZOU Jiyan, et al. Switching-on Experiment of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3059-3064.
- [28] 吴远利, 陈仕修, 夏长征, 等. 长间隙触发真空开关的实验研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 17-19.
WU Yuanli, CHEN Shixiu, XIA Changzheng, et al. Experimental research on long-gap triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 17-19.
- [29] 姚学玲, 陈景亮, 孙 伟. 沿面闪络真空开关触发特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 340-344.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, SUN Wei. Experimental research on triggering characteristics of surface flashover triggered vacuum switch[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 340-344.
- [30] 王延召, 戴 玲, 周正阳, 等. 多棒极型触发真空开关极性效应[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 587-591.
WANG Yanzhao, DAI Ling, ZHOU Zhengyang, et al. Polarity effect on triggered vacuum switch with multi-rod system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 587-591.
- [31] RICH J A, WESTENDORP W F. Vacuum arc discharge device with tapered rod electrodes:USA,US4063126 A [P]. 1977-12-13.
- [32] ALFEROV D F, SIDOROV V A. Modernized triggered vacuum discharge switch with a six-gap electrode system [J]. Instruments and Experimental Techniques, 1996, 39(3): 390-395.
- [33] 周正阳, 戴 玲, 南 敬, 等. 大电流下多棒极型真空触发开关电弧特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 823-826.
ZHOU Zhengyang, DAI Ling, NAN Jing, et al. Arc characteristics of triggered vacuum switch with multi-rod electrode under high current[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 823-826.
- [34] HE J, ZOU J. A high-capacity triggered vacuum switch with single axial magnetic field electrode[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1): 352.
- [35] 卫 鹏, 张俊芳. 基于模糊控制的新型永磁开关磁阻电机控制系统研究与设计[J]. 电网与清洁能源, 2013(7):6-11.
WEI Peng, ZHANG Junfang. Research and design of the permanent switched reluctance motor control system based on fuzzy control[J]. Power System and Clean Energy, 2013, (7):6-11.
- [36] 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, 2008, 29(3): 298-303.
ZHOU Zhengyang, LIAO Minfu, DONG HuaJun, et al. Arc starting stability of triggered vacuum switch[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2008, 29(3): 298-303.
- [37] 盖 斐, 陈仕修, 陈 堃, 等. 长间隙真空触发开关导通特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(4): 847-850.
GAI Fei, CHEN Shixiu, CHEN Kun, et al. Conduction characteristics of long-gap triggered vacuum switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 847-850.
- [38] 张华赢, 杨兰均, 李良书, 等. 投切电容器组专用真空断路器性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 38-44.
ZHANG Huaying, YANG LanJun, LI Liangshu, et al. Study on the performance of special vacuum breaker for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3):38-44.
- [39] 许沛丰, 高军委, 张予洛, 等. 对断路器电容器电容及介损测量预试方法的探讨[J]. 电力电容器, 2007, 28(4):53-56.
XUE Peifeng, GAO Junwei, ZHANG Yuluo, et al. Discussion about the way to measure capacitance and dielectric loss of circuit breaker[J]. Power Capacitor, 2007, 28(4):53-56.
- [40] 李志兵, 许沛丰, 刘华伟, 等. 断路器电容器介损随电压变化关系研究[J]. 电力电容器, 2007, 28(6):26-30.
LI Zhibing, XU Peifeng, LIU Huawei, et al. Research on dielectric loss variation of circuit-breaker capacitors with voltage[J]. Power Capacitor, 2007, 28(6):26-30.
- 谢昌明(1986—), 男, 硕士, 主要从事脉冲功率技术、高电压及电真空技术等方面的研究。
- 尚绍环(1974—), 女, 高级工程师, 主要从事脉冲功率技术及高电压新技术的研究与设计工作。
- 谈效华(1970—), 男, 研究员, 主要从事脉冲功率技术、高电压及电真空技术等方面的研究。
- 杜 涛(1971—), 男, 研究员, 主要从事脉冲功率技术、高电压及电真空技术等方面的研究。