

多断口真空开关技术的发展与研究现状

廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 孙 辉

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

Development and Current Status of Vacuum Switch with Multiple Breaks

LIAO Min-fu, ZOU Ji-yan, DUAN Xiong-ying, SUN Hui

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

摘要: 在分析国内外高电压等级真空开关的总体现状的基础上, 对多断口真空开关技术的发展与研究现状进行了综述, 研究了多真空间隙串联的静态绝缘特性、多断口真空开关的动态绝缘特性及对多断口真空开关的操动机构及控制系统 3 个方面的内容。认为在解决各断口均压分布及同步问题后, 多断口真空开关技术是实现高电压等级真空开关的合理选择。

关键词: 多断口真空开关; 静态绝缘; 动态绝缘; 同步

中图分类号: TM561.2

文献标识码: A

Abstract: On the basis of analyzing the overall situation of high voltage vacuum switch both in china and abroad, this paper overviews the development and current status of vacuum switch with multiple breaks. It consists of three parts: the static dielectric characteristic, the dynamic dielectric characteristic and the actuator with the controller system. It is proposed that the technology of vacuum switch with multiple breaks is a reasonable choice for higher voltage level application, after solving the problems of synchronous as well as voltage distribution in every break.

Key words: vacuum switch with multiple breaks; static dielectrics; dynamic dielectrics; synchronization

0 引言

目前, 在 110 kV 及以上电压等级, SF₆ 开关占主导地位。但是, SF₆ 对地球大气层有很强的负作用。早在 1997 年, 在京都会议上, SF₆ 被正式确定为温室效应气体, 它在空气中存在的寿命超过 3 000 年, 温室效应是 CO₂ 的 25 000 倍^[1]。因此, 必须对它的使用和排放进行限制。目前, 一直在研究可以替代 SF₆ 介质的高电压等级开关, 但直到现在还没有找到更好的替代品。

迄今为止, 发展更高电压等级的真空开关有两种途径: ①继续发展单断口型真空开关; ②发展双断口及多断口真空开关。

所谓多断口真空开关技术, 其实质是采用多个小真空间隙串联, 使真空开关获得更高的电压耐受特性。多断口真空开关技术的优越性就是充分利用真空短间隙的优良特性。

目前, 国内外对多断口真空开关技术的研究主要集中在以下几个方面: ①对多真空间隙串联的静态绝缘特性的研究; ②对多断口真空开关的动态绝缘特性-多间隙金属蒸汽电弧的动态介质恢复特性研究; ③对多断口真空开关的操动机构及控制系统的研究。本文将在以上几个方面分别综合论述与分析多断口真空开关技术的发展与研究现状。

1 国内外多断口真空开关总体发展现状

为了将真空开关推向高电压等级领域, 以日、美为主, 在对真空绝缘性能做了大量研究工作的基础上, 首先开始了高电压等级真空断路器的研制工作。美国 GE 公司于 20 世纪 50 年代即开始生产 45 kV 电压等级的真空灭弧室, 并于 20 世纪 60 年代初采用多个 45 kV 电压等级真空灭弧室串联制成高压和超高压真空断路器和真空负荷开关, 并投入了实际运行, 是世界上最早开始真空开关研究的公司, 这种真空断路器分别由 3, 7, 11 和 14 个真空灭弧室组成电压等级分别为 145, 362, 550 和 800 kV 的真空断路器。1980 年, 该公司又推出了额定电压 84 kV、分断电流 40 kA 的单断口真空断路器, 并于同年正式生产了 30 台额定电压 168 kV、分断电流 40 kA 的双断口真空断路器^[2]。日本的高电压等级真空断路器的研究和开发以东芝、日立、三菱、明电舍等大型电

收稿日期: 2006-03-12; 修回日期: 2006-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507001, 50377003, 50537010)。

作者简介: 廖敏夫(1975-), 男, 博士, 博士后, 主要从事多断口真空开关技术、真空触发开关技术及永磁操动机构技术的研究。

工业企业为主,明电舍公司于1973~1979年间引进美国技术开始生产额定电压84 kV、分断电流25~40 kA的单断口真空灭弧室。1978年,明电舍自行研制开发了额定电压145 kV、分断电流25 kA的双断口真空断路器。1980年,又开始生产额定电压123 kV、分断电流31.5 kA的单断口真空断路器,并迅速研制成功额定电压145 kV的单断口真空断路器^[3]。东芝公司从1979年开始研制额定电压84 kV、分断电流25 kA的单断口真空断路器。目前,84 kV及以下电压等级的真空断路器已形成系列化产品。为了适应国内外市场竞争的需要,于1987年研制成功额定电压145 kV、分断电流31.5 kA的单断口真空断路器及额定电压168 kV、分断电流40 kA的双断口真空断路器^[4]。日本三菱公司已试制成功270 kV单断口真空灭弧室,并拟发展生产500 kV电压等级的真空断路器,一旦成功,其造价将比相应电压等级的六氟化硫断路器便宜很多^[5]。西屋公司在1980年研制成功额定电压72 kV、分断电流40~60 kA的真空灭弧室^[6],并迅速推出了双断口形式的121~145 kV真空断路器以取代同电压等级的少油断路器^[7]。俄罗斯于1990年生产了由4个35 kV的真空灭弧室组成110 kV,分断电流为25 kA的真空断路器,并投入实际运行。英国GEC公司试制成功具有8个断口的132 kV高压真空断路器^[8]。国内北京开关厂72.5 kV和110 kV单断口真空断路器2004年已通过鉴定。国内的多断口真空开关产品尚为空白。现在的双断口真空断路器由于采用机械连动,技术复杂,制造成本高,限制了在高压和超高压领域的实际应用和推广。

除了对多断口真空开关积极进行产品开发与推广外,国内外还进行了相关理论的分析与研究。

2 多真空间隙串联的静态绝缘特性

多断口真空开关的多真空间隙串联静态绝缘特性是指开关在没有开断大电流情况下的绝缘特性,是研究多断口真空开关技术中绝缘结构设计的基础。目前,国内外的研究方向主要集中在多断口真空开关的静态击穿特性、静态击穿统计特性和静态绝缘击穿机理等几个方面。

对多断口真空开关绝缘特性进行研究,是发展此类高电压等级真空开关的基础和前提条件。试验方面,文[9-10]对双断口真空开关和单断口真空开关的静态击穿特性进行了比较研究。通过在真空灭弧室上分别施加交流电压和雷电冲击电压,测量得到在一定的总间隙长度下,双断口真空开关与单断口真空开关相比具有更高的击穿电压值。理论方面,文[11]提出了多断口真空开关击穿电压增益的概念,并理论推导得到多断口真空开关的击穿电压增益倍数公式,从理论

上阐明了多断口真空开关击穿统计概率要比单断口的击穿统计概率要小,而且串联断口越多,其静态击穿统计概率及弧后重击穿概率越低。

引入‘击穿弱点’的概念,是对真空灭弧室的静态击穿统计特性进行研究的一个重要内容。文[12]对双断口真空断路器的击穿统计特性进行了实验研究。研究表明,与单断口真空断路器相比,在相同的总开距下双断口真空断路器的击穿概率要低。文[13]对两个串联布置的真空触发开关进行击穿统计特性研究,得到与文[12]类似的研究结果。这些研究成果证明了多断口真空开关在运行可靠性方面的优势。

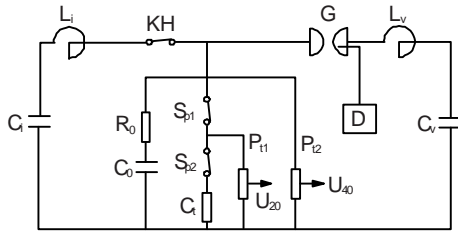
虽然对多真空间隙串联后宏观上的击穿电压增益特性和击穿统计概率特性研究取得了一些研究成果,论证了多断口真空开关技术的应用优势与前景,但对多真空间隙串联内在绝缘击穿机理的研究目前进展缓慢,文[10]仅对双断口真空开关的静态绝缘击穿机理进行了初步研究,认为预击穿放电起了决定性的作用。击穿机理不明制约了多断口真空开关的工程应用,还需要进一步深入开展工作,从多真空间隙击穿微观过程出发,讨论其绝缘变化的机理,揭示绝缘击穿内在本质,为多断口真空开关技术工程应用提供理论支持^[14]。

3 多断口真空开关的动态绝缘特性

多断口真空开关的动态绝缘特性是指多断口真空开关在各种实际运行条件下的绝缘性能及其变化。其主要内容集中在多断口真空开关在开断大电流后的各断口的介质强度恢复特性和弧后重击穿特性。多断口真空开关的动态绝缘直接关系到开关在电力系统中的运行可靠性,因而是多断口真空开关技术研究中的一个重要内容^[15-20]。

多断口真空开关的大电流开断能力是研究者关心的热点问题。文[15-16]首先研究了两个24 kV真空灭弧室串联起来运行时的试验结果,发现双断口真空开关和单断口真空开关的开断能力相比增长可达1.3倍以上。证明了双断口真空开关比单断口真空开关具有更高的开断能力。

多断口真空开关在开断大电流后的各断口的介质强度恢复特性和弧后重击穿特性是多断口真空开关动态绝缘的核心研究内容。文[15-16]利用图1所示的双断口真空开关合成试验回路测量了双断口真空开关重燃过程中的恢复电压波形,发现双断口真空开关的动态介质恢复过程与单断口真空开关在本质上截然不同。在弧后,双断口真空开关的等值电路见图2。在双断口真空开关开断过程中,由于上下布置的两个真空灭弧室分压不均匀(由于对地电容的影响,见图2),通常是所受恢复电压较高的灭弧室先发生重击穿。此时,只要恢复电压的峰值和上升速度

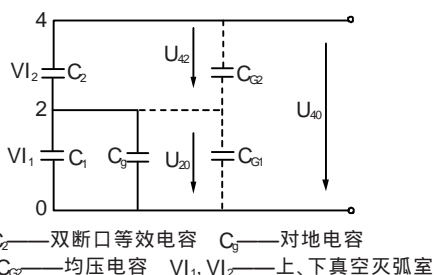


L_i, C_i ——大电流产生回路 L_r, C_r ——高电压产生回路 C_t ——分流器 R_0, C_0 ——调频回路 P_t ——分压器 KH ——合闸断路器 S_0 ——试品(双断口真空开关) G ——点火球隙 D ——同步装置

图 1 双断口真空开关的合成试验回路

低于某一极限值,整个双断口开关并不会因为一个灭弧室发生重击穿而导致开断失败。这是因为另一个真空灭弧室的介质强度仍可能高于此时的恢复电压,它还能承受整个恢复电压一个比较短的时间,当重击穿的灭弧室的介质恢复以后,共同完成分断过程。文[17]重点研究了双断口真空开关的弧后重燃过程中的恢复电压波形,其研究结果与文[15-16]的试验结果相吻合。这些研究成果从电特性试验方面给出了多断口真空开关弧后介质强度恢复过程。

为了提高多断口开关各断口的电压分布均匀性,目前电力系统中的多断口开关主要采取加装均压电容的方法来保证使开关各断口上的恢复电压分配比较均匀。但是,加装均压电容亦将带来一系列的问题,如存在绝缘隐患^[18],影响开关的弧后介质恢复等^[19-20]。文[19-20]研究了双断口真空开关中使用均压电容时对双断口真空开关的开断能力的影响。通过实验发现:有均压电容时,两个断口上恢复电压分布更均匀(见图 2),可以提高整个双断口真空开关的开断能力。但均压电容不是越大越好。因为在均压电容量很大,而图 1 中上下真空灭弧室的燃弧时间不同时(比如开断非周期的短路电流时及上下真空灭弧室操动机构动作是非同期的情况),即使只有 2ms 的非同期时间,均压电容也会大大影响弧后 3~5 μm 内的暂态恢复电压,导致整个双断口真空开关发生击穿,降低了双断口真空开关的开断能力。由此可见,为了减小均压电容对多断口真空开关弧后暂态恢复电压的影响,要求操动机构能达到很高的控制精度才可能实现两个断口的同期开断,这对操动机构提出了非常高的要求,这或许是目前制约多断口真空开关在高压和



C_1, C_2 ——双断口等效电容 C_0 ——对地电容 C_{02}, C_{01} ——均压电容 V_{11}, V_{12} ——上、下真空灭弧室

图 2 双断口真空开关的等值电路

超高压领域实用化的主要瓶颈。

综上所述,目前对双断口真空开关弧后介质恢复过程进行了一些积极的工作,但仅仅从电特性方面来阐释其动态绝缘特性是不够的,还需做工作来完善动态介质恢复的理论。笔者认为,如果能直接对多断口真空开关开断大电流后的各断口真空电弧形态的转变过程进行测量和分析,对弧后金属蒸气中各种粒子的衰减过程进行细致的诊断,并和电特性测量结果相融合,应该能大大丰富多断口真空开关介质强度恢复特性和弧后重击穿特性理论。

4 操动机构及控制系统

以前的多断口串联超高压真空断路器多采用液压机构,如日本明电舍 168 kV, 2 000 A, 25 kA 高压真空断路器^[4]。

传统多断口真空开关采用的传动机构方式主要有双(多)燕形、准确椭圆机构和梯形结构等^[21]。当同一相中串联的真空灭弧室数目越多,其传动机构的结构就愈复杂,各断口的不同期性也增大。不同期性过大,则多断口真空开关在分断电流时将会造成各断口燃弧时间的显著差异,引起分断过程断口电压分布的不均匀。不仅使得各触头的电磨损差别较大,更重要的是容易导致真空电弧的重燃甚至开断失败。因此,为了满足同期性的要求,多断口串联的传动机构还需要设置便于调节触头不同期性的装置。这样势必使得传统多断口真空开关的成本上升。

多断口真空开关的总体结构有 T 型双断口结构和垂直布置的多断口结构。图 3 为日本明电舍 1976 年研制的由两个 84 kV 真空灭弧室串联而成的 145 kV/1 250 A/25 kA 真空断路器,为 T 型落地式结构^[4]。美国 JOSLYN 公司生产从 15~69 kV 的 VBM 系列户外真空负荷开关外形为垂直布置的多断口结构,各断口没有并联均压电容,多断口垂直串联时,各灭弧室之间的联动采用梯形方式。国内西安交通大学和北京北开电气股份有限公司联合开发的 110 kV 双断口真空开关是由两个 63 kV 真空灭弧

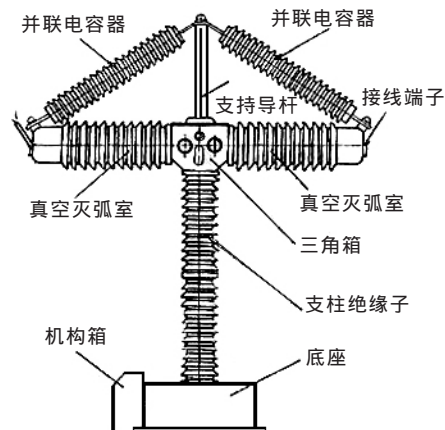


图 3 110 kV 双断口真空断路器结构

室串联组成,采用电动弹簧操动机构,外形亦为T型结构^[22]。

由于传统的多断口真空开关采用的是传统操动机构,整个操动系统的环节多,累计运动公差大而且响应缓慢,可控性差,效率低,各断口的动作同期性较差,为了提高各断口动作的同期性,将以增加成本为代价。正是操动机构存在的这些问题,使追求单断口真空开关完成更高电压等级成为一种目标。人们在开发出多断口真空开关之后的几十年中,转而主攻单个灭弧室的耐压水平。

值得特别注意的是,近年来,用于中压真空断路器的永磁保持、电子控制的电磁操动机构(简称为永磁机构)备受关注,已成为开关电器行业研究的热点^[23]。尤其近来基于永磁操动机构而提出的电子操动技术^[24],可使中压真空开关的操动机构精度达到微秒级,若将此技术应用于模块式多断口真空开关技术中,将极大地提高多断口真空开关的控制精度和同步性,具有很好的应用前景^[25]。

5 结语

在对单断口真空开关的真空绝缘性能做了大量研究工作的基础上,国内外已经开始研究多断口真空开关的静态绝缘特性,并取得了一些成果。但为了实现将多断口真空开关技术在高压和超高压领域的实际应用和推广,还需进行继续研究。国外目前对双断口真空开关的弧后介质恢复研究开展的比较多,取得了一些有指导意义的研究成果。但由于技术条件的限制,对超过两个断口的多断口真空开关的介质恢复研究相对还比较缓慢,不够深入。

与国外相比,国内的高电压等级真空开关水平还有较大的差距,还亟待发展。为了将真空开关推向高电压等级领域,可以应用国内外在多断口真空开关技术领域取得的成果,结合新的结构与控制模式,在解决相应的理论问题和实用化中操动机构的同步问题后,把多断口真空开关技术的应用推向高电压等级。

参考文献:

- [1] Okubo H, Yanabu S. Feasibility Study on Application of High Voltage and High Power Vacuum Circuit Breaker [C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 275-278.
- [2] J.M.Lafferty. Vacuum Arcs: Theory and Application [M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [3] 水见齐代. 145 kV 户外用真空断路器 [J]. 明电时报, 1976, 29(4): 15-20.
- [4] 高山岛保代. 168 kV 级真空断路器[J]. 明电时报, 1979, 145(2): 8-13.
- [5] 王季梅. 真空开关于 SF₆ 开关优越性的对比分析[J]. 电工技术杂志, 1992, 6(4): 25-27.
- [6] Voshall R E. Experiments on Vacuum Interrupter in a High Voltage 72 kV Circuit Breaker [J]. IEEE Trans. Power Appar.

- Syst., 1980, 99(2): 658-666.
- [7] Stade P G. The Development of a Vacuum Interrupter Retrofit for the Upgrading and Life Extension of 121 ~ 145 kV Oil Circuit Breakers [J]. IEEE Trans.on Power Delivery, 1991, 6(3): 1124-1130.
- [8] 李建基. 国外真空断路器的最新发展 [J]. 上海电器技术, 1995(1): 11-16.
- [9] Giere S, Karner H G. Dielectric Strength of Double and Single-break Vacuum Interrupters [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 43-47.
- [10] Sentker P, Karner P H C. Double Breaks in Vacuum: Technical Benefit and Flashover Mechanism [C]// IEEE Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, 1996: 16-19.
- [11] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 多断口真空开关的动态介质恢复及统计特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 82-87.
- [12] Shiciri T. Investigation of Dielectric Breakdown Probability Distribution for Double-break Vacuum Circuit Breaker [C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 323-326.
- [13] Sidorov V A, Alferov D F. High Voltage High-current Commutator Based on Series-connected Triggered Vacuum Switches [C]// Proc. XXth ISDEIV, Paris, France, 2002: 202-205.
- [14] 廖敏夫. 基于光控模块的多断口真空开关研究 [D]. 大连理工大学, 2004.
- [15] Fugel T, Koenig D. Peculiarities of the Switching Performance of Two 24 kV-Vacuum Interrupters in Series [C]// IEEE 19th Int. symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Xi'an, China, 2000: 411-414.
- [16] Fugel T, Koenig T D. Switching Performance of Two 24 kV Vacuum Interrupters in Series [C]// IEEE XXth Int.symp.on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Paris, France, 2002: 164-168.
- [17] Betz T, Koenig D. Simulation of Reignition Processes of Vacuum Circuit Breakers in Series [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 370-373.
- [18] 刘让雄, 禹炬林. 双断口真空断路器加装均压电容的负效应与必要性探讨[J]. 电气开关, 1997(6): 34-37.
- [19] Betz T, Koenig D. Influence of Grading Capacitors on the Breaking Capacity of Two Vacuum Interrupters in Series[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 405-409.
- [20] Fugel T, Koenig D. Influence of Grading Capacitors on the Breaking Performance of a 24 kV Vacuum Breaker Series Design [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 569-575.
- [21] 岩原皓一. 真空开关[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [22] 苑舜, 王季梅. 110 kV 双断口真空断路器传动机构分析[J]. 高压电器, 1993, 29(1): 20-25.
- [23] Dullni E. Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator and Electronic Control [C]// Proc. CIRED, 1999: 150-156.
- [24] 邹积岩, 王瑛, 董恩源. 电子操动的概念与实践 [J]. 高压电器, 2000, 36(5): 29-31.
- [25] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英. 基于永磁操动机构的光控模块式多断口真空断路器技术[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 40-42.