

直流断路器电弧研究的新进展

荣命哲¹ 杨 飞^{1,2} 吴 翊¹ 孙 昊¹ 李 阳¹ 纽春萍¹

(1. 西安交通大学电气工程学院电力设备电气绝缘国家重点实验室 西安 710049

2. 国家电网平高集团有限公司 平顶山 467000)

摘要 近年来从低压、中高压直到特高压直流输配电系统迎来了一个快速发展的黄金时期,相应的各类直流断路器也成为了一个新的研究热点。在直流断路器的开断过程中,电弧的产生将极大地影响直流开断过程,因此对于电弧演化和熄灭过程的研究是直流断路器研制的关键问题。根据电压等级和开断原理的区别,目前的直流断路器主要分为三类,即空气断路器、自激振荡式断路器和混合式断路器。本文对三类直流断路器中电弧相关的仿真和实验工作进行了综述,并对直流断路器下一步的研究工作进行了展望。

关键词: 直流 断路器 开关电弧现象 综述

中图分类号: TM561

New Developments in Switching Arc Research in DC Circuit Breaker

Rong Mingzhe¹ Yang Fei^{1,2} Wu Yi¹ Sun Hao¹ Li Yang¹ Niu Chunping¹

(1. State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment

Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China

2. State Grid Pinggao Group Co. Ltd. Pingdingshan 467000 China)

Abstract Recently, low-voltage, medium voltage and high voltage DC transmission and distribution system has been in a period of rapid development. DC circuit breaker has also become a new hot research area in electrical engineering. Switching arc plays a significant role in the DC current interruption which is formed in the interrupting process of DC circuit breaker (DCCB). The control of arc evolution and extinction is one of the most important problems to be solved in the development of DCCB. According to the differences of breaking principle and work voltage, there mainly have been three types of DCCB related to arc phenomenon, such as air circuit breaker, self-excited oscillation circuit breaker and hybrid circuit breaker. In this paper, previous simulation and experimental works on the switching arc phenomenon in these DCCB are reviewed. And some points for the future development needs are presented.

Keywords : Direct current, circuit breaker, switching arc phenomenon, review

1 引言

直流电力系统主要应用于电力推进、可再生能源分布式电网和超远距离高压输电等场合^[1-8]。伴随着轨道交通,高压直流输电等系统的大规模建设与

规划,直流输配电系统迎来了一个快速发展的黄金时期,从系统到设备的相关研究工作都成为电力行业一个新兴的研究热点。

虽然在不同的应用场合中系统的基本运行特征差异很大,但无一例外都需要直流断路器这一关键的电力设备。其主要功能包括关合、承载和开断正常回路条件下的电流,转换系统运行方式以及切断故障电流对系统实行保护等。因此,近年来直流断路器的研究也得到了越来越多的关注^[6-16]。

国家自然科学基金(51221005, 51007072、51177124),教育部博士点基金(20110201130006、20110201120069),博士后基金(2012M512002)和教育部新世纪人才资助项目。

收稿日期 2012-09-10 改稿日期 2012-12-10

在直流断路器的开断过程中,触头打开后将在触头之间形成电弧,因此,断路器的任务就是迅速使电流过零,熄灭电弧,加速介质恢复,防止再次击穿和电弧的重燃。然而,与交流系统相比,直流系统的开断更加困难,这是因为直流系统不存在自然过零点,必须采用一定的技术手段迫使电流过零。另外,在开断过程中直流断路器还需要吸收存储在系统电感中的大量能量^[1]。因此,直流断路器中的电弧调控技术难度大、要求高,也是目前开关电器领域最前沿的技术问题。而这一断路器核心技术的形成与完善,必须建立在直流断路器中电弧现象的多种科学问题更加深入的理解基础之上。

2 直流断路器的主要类型

不同的直流输配电系统差异非常大,额定电压从几百伏至几百千伏,开断电流从几千安到上百千安。所以,针对直流断路器的设计,已有的文献中提出了各种不同的开断方法,这些方法所关注的核心问题也大不相同^[6-16]。

一般而言,直流断路器按照不同的熄弧原理和开断方法主要分为三类。本文针对不同类型直流断路器的原理结构,和其中的电弧现象相关研究工作进行了综述,最后对各类直流开断技术未来的发展需求提出了展望。

3 空气直流断路器

中低压直流电力系统主要应用于地铁和船舶的电力推进、太阳能发电微网,以及冶金和矿山等工业场合,通常,系统电压在几百至几千伏的范围之内。空气直流断路器采用提高电弧电压强迫电流过零的开断原理,具有开断原理简单、可靠性高的特点,在这类系统中已经得到了非常广泛的应用^[7,9]。目前,在国内市场 1 500V 及其以上的大容量空气直流断路器主要被瑞士 Secheron 公司、美国 GE 公司和英国 FKI 等几个跨国公司的产品所垄断。在公开发表的文献当中主要有国内的西安交通大学、中船重工 712 研究所、ABB 公司等单位进行了相关的研究工作^[17-19],大部分的研究成果仍然处于未公开的状态。

3.1 原理与结构

空气直流断路器的示意图如图 1 所示,由包含金属栅片的灭弧室、动静触头、操作机构和其他控制元器件组成。对于空气直流断路器,在开断过程中断口的电弧电压必须上升到足够高的水平,抵抗直流系统的电源电压迫使电流下降到零点,最后再

迅速实现介质恢复过程完成开断。其电弧电压的建立可以采用拉长电弧、降低弧柱温度和接近极压降等方法,而实际的断路器中经常将这些灭弧方法综合使用。图 2 为适用于不同工作电压等级的不同结构的空气直流断路器。其中,图 2a 适用于相对较高电压等级(1 000V)的应用场合,而图 2b 则通常是在交流塑壳式断路器的基础上进行改造,适用于低电压等级(<1 000V)的应用场合。

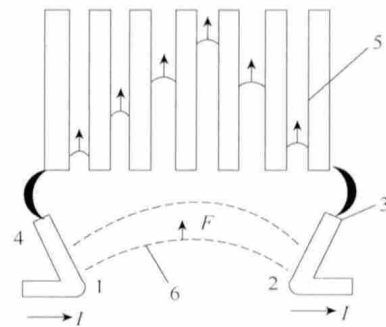


图 1 空气直流断路器示意图

1—动触头 2—静触头 3,4—跑弧道 5—栅片

Fig.1 Schematic of the air DCCB

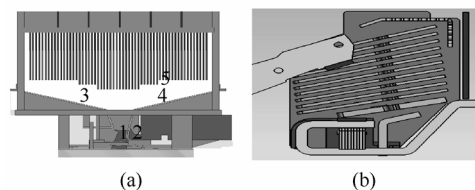


图 2 不同结构的空气直流断路器

Fig.2 Different configuration of air DCCB

在空气断路器的开断过程中,首先由操动机构驱动动静触头分离,动静触头之间产生的电弧将被机械运动拉长,同时在电流路径和电弧本身共同作用产生的磁吹力作用下,电弧被进一步拉长并将沿跑弧道向上运动。当电弧进入灭弧室后,弧柱在金属栅片的作用下被切割成若干个串联的短弧,一方面电弧被拉长,另一方面在金属表面会形成一连串的近极压降,再加上电弧还会受到栅片的冷却作用和器壁侵蚀蒸汽的影响,此时的电弧电压将会急剧上升,进而迫使回路电流迅速下降过零。值得注意的是,电弧运动和电弧电压上升是决定开断性能的根本原因,所以这种开断技术的关键在于控制电弧平稳、快速地进入灭弧室,迅速被切割成一段段短弧。因此,对电弧现象的研究工作与调控技术的发展是空气直流断路器的核心与关键所在。

3.2 研究工作

空气直流断路器的电弧等离子体特性研究工作主要分为仿真和实验两个方面,主要关注于电弧运

动过程^[7,9]。电弧运动过程又可以分为电弧转移和栅片切割两个阶段,因此,研究工作主要针对这两个阶段,分析灭弧室结构(包括触头系统和栅片排布)对电弧运动过程的影响,从而发现控制电弧运动的有效方法。

Yang 等人^[7]基于磁流体动力学(Magneto-Hydrodynamics, MHD)理论,通过数值计算的方法研究了中压直流断路器触头系统转移过程中的电弧等离子体的行为特性。弧柱的运动特性由电磁场和气流场的共同作用所决定,分别用麦克斯韦方程组和 Navier-Stokes 方程组耦合求解来描述^[20-22]。等离子鞘层的电压降和新弧根的形成过程用一层非线性的电阻薄层单元描述^[23-25]。仿真结果表明由于触头系统的气压分布会显著影响弧根区域气体电导率的变化,因此压力的分布会对电弧的转移过程产生重要影响。具体的,在直流断路器触头系统中,若弧根区域的气压集中且压力值很高,则会对电弧转移过程有不利影响。相反若气压分布均匀且较低,则电弧转移过程将更加平稳、快速。其中的部分计算结果如图 3 所示。

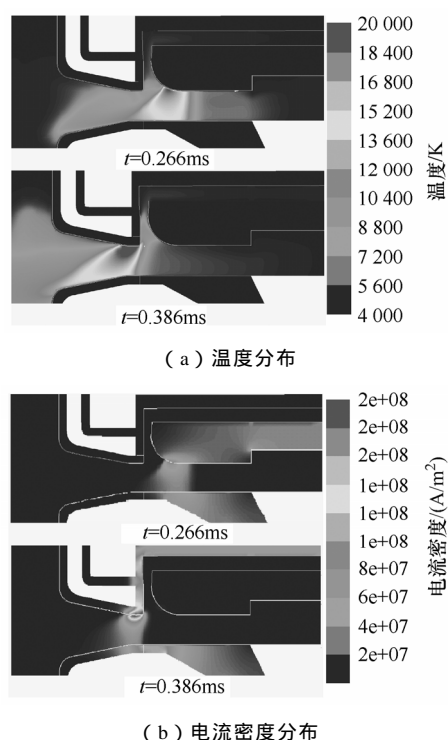


图 3 空气直流断路器触头系统的温度和电流密度分布^[7]

Fig.3 Temperature and current density distribution of the air DCCB contact system

Rong 等人^[9]用数值仿真的方法研究了直流断路器灭弧室内的电弧行为特性。在三维仿真模型中建立了铁磁栅片,考虑了由铁栅片引起的非线性磁

场对电弧切割过程的影响。同时,为了缩短仿真时间,研究人员将电弧从触头转移到跑弧道的仿真结果作为该模型计算的初始条件。图 4 所示为电弧运动过程的温度分布变化情况,图 5 为电弧电压的仿真计算结果。计算结果表明,电弧电压曲线在 $t=1.2\text{ms}$ 和 $t=2.1\text{ms}$ 之间相对平坦,这段时间也对应了电弧的停滞过程,这个电弧停滞过程与灭弧室结构设计密切相关。其中,在图 4 中 $t=2.0\text{ms}$ 时刻的温度分布为典型的灭弧室内电弧的停滞状态。电弧停滞是直流断路器整个电弧过程中非常重要的现象,电弧停滞时间过长将导致开断失败。图 6 为高速摄影仪拍摄的直流断路器在开断过程中灭弧室内的电弧演化过程,在文中将这一实验结果与仿真结果进行了对比。两者在整体的电弧运动趋势上是一致的,然而在时间上存在一些不一致,主要原因是仿真计算没有考虑断路器触发和触头打开的过程(约 3ms)。实验结果和仿真研究同时表明,如果灭弧室入口的结构尺寸不合适,电弧则难以进入灭弧室完成开断过程。

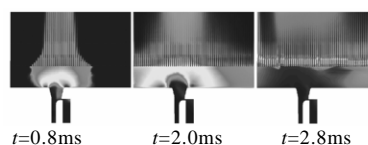


图 4 空气直流断路器灭弧室的温度分布^[9]

Fig.4 Temperature distribution in the arc chamber of air DCCB

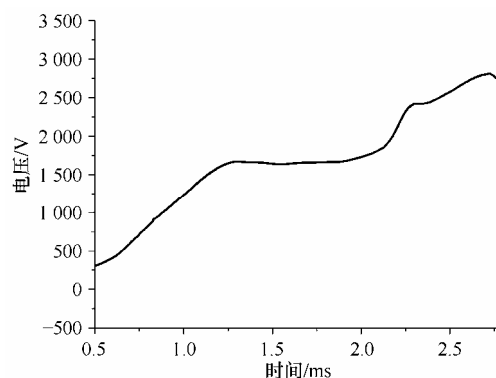


图 5 电弧电压的数值仿真^[9]

Fig.5 Arc voltage of numerical simulation

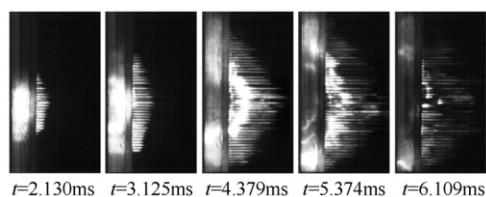


图 6 大电流开断过程中的电弧演化^[9]

Fig.6 Arc evolution during fault current interruption

ABB 公司的 Dominguez 等人^[19]通过实验测试的方法研究了在空气直流断路器中,使用 PTFE, PEEK, 不饱和聚酯(UP)和环氧复合材料(Epoxy)四种不同类型的聚合物材料时,器壁产气对开断时间和重击穿过程的影响。研究表明环氧复合材料(Epoxy)的效果最好,开断过程中的重击穿次数可以明显降低,然而对各种聚合物使用位置和方法并没有进行相关描述。

另外,除了大容量故障电流的开断是直流断路器的一个难点问题之外,临界小电流的开断也是其中的另一个难点问题。在临界小电流情况下,由于磁吹力过小,不足以拉长电弧,在直流断路器中的电弧将会长时间停滞并持续燃烧,也会造成开断失败。图 7 为高速摄影机拍摄的小电流情况下的电弧演化过程。普通的磁场吹弧系统又将明显增加断路器的复杂程度,因此这一问题将来也需要再进行更加深入的研究。

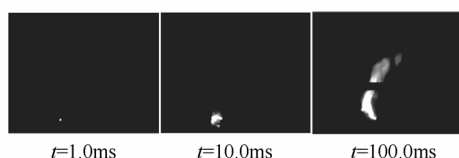


图 7 临界电流开断过程中的电弧演化

Fig.7 Arc evolution during critical current interruption

理论上通过增加栅片数量有利于提高电弧电压,从而可以进一步提高空气断路器的电压等级。然而,一方面增加栅片将显著增加灭弧室体积,不能满足应用场合对灭弧室尺寸和重量的要求;另一方面灭弧室小型化带来的能量密度提高和电压等级提高造成的恢复电压迅速上升,会使空气与烧蚀蒸汽的混合气体介质恢复过程极其困难,易发生重燃现象。因此,在电压等级超过 10kV 的应用场合这种类型的直流断路器实现难度将会非常大。

4 自激振荡式直流断路器

由于我国的自然能源资源与用电负荷的分布极不平衡,因此近年来在我国电网公司的大力推动下,全国范围的超远距离高压输电系统获得了飞速的发展。同时由于高压直流输电系统具有线路损耗小、输电走廊经济、可以减少占地面积等突出的优点,引起了人们的广泛关注^[26-30]。在特高压电力系统中,类似于空气直流断路器采用提升电弧电压迫使直流电流降低到零点的方法实现难度极大,因此一般都采用电流转移的方法实现高压直流开断。Nakao 等人^[15,16]指出自激振荡是其中的一个重要方法。金属

回路转换开关(Metallic Return Transfer Breaker, MRTB)是典型的自激振荡方法的应用,目前国内的平高、西电和中国电科院等单位已有产品研制成功。图 8 所示为高压直流换流站开关场的示意图^[31],在换流站的开关场内,金属回路转换开关主要用于将直流电流从较低阻抗的大地回路向较高阻抗的金属回路转移,可以完成单极运行和双极运行之间的转换,从而改变系统的运行方式。

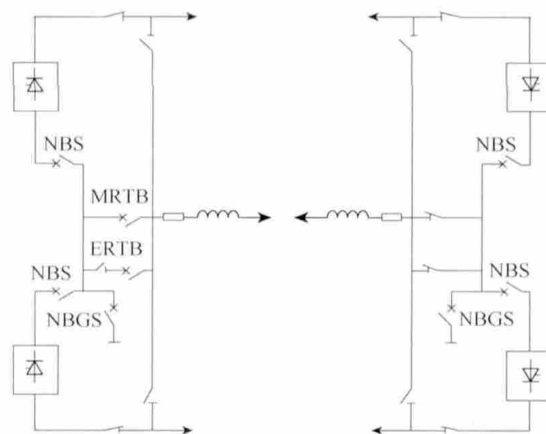


图 8 高压直流换流站开关场的示意图^[31]

Fig.8 Schematic diagram of switchyard in HVDC converter station

4.1 原理和结构

金属回路转换开关(MRTB)一般由三条并联支路组成,分别为正常电流支路、转移支路和能量吸收支路,具体结构如图 9 所示。通常情况,正常电流支路是一个或多个串联的传统交流高压 SF₆ 断路器 S_n,转移支路则由电容器组 C_c和电感 L_c的串联电路组成,能量吸收支路是高压避雷器 R_e。

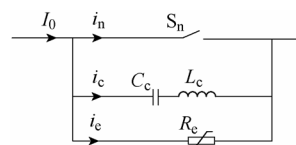


图 9 自激振荡式直流断路器的结构图^[32]

Fig.9 Structure of self-excited oscillation DC breaker

金属回路转换开关的原理是利用电弧的不稳定性和负阻特性在正常电流支路和转移支路间产生自激振荡的电流。当 S_n分闸时,动静触头之间产生电弧,电弧将与并联的转移支路产生相互作用,如果二者参数匹配良好,则会出现电流的增幅振荡现象,其振荡频率主要由转移支路的电容和电感决定。当振荡电流 i_n的幅值大于直流系统的电流 I₀时, S_n的断口之间会出现电流过零点, S_n将会关断电流 i_n。之后电容器组 C_c被持续充电,直到电压达到避雷器

R_e 的阈值, 避雷器导通, 最后系统电流 I_0 下降到零, 完成转换开关的开断过程。

该类型直流断路器的优点在于正常电流支路上的 SF_6 断路器不需要抵消电力系统的全部电压, 也不需要吸收系统电感中的全部能量。 SF_6 断路器只用于电流转移过程, 因此, 自激振荡式直流断路器可用于特高压输电系统。此外, 该类型直流断路器结构相对简单, 不包含可控制的有源元器件, 因此可靠性更高。然而, 从断路器分闸到电流开始振荡一般需要 10ms 以上的时间, 总开断时间则更长。这是因为电流振荡在短时间内难以达到很大的幅值。这一缺点使得自激振荡式直流断路器无法应用于需要快速开断能力的应用场合。

4.2 研究工作

基于对金属回路转换开关工作原理的分析, SF_6 电弧现象是研究提高断路器开断能力的关键问题。在以往的研究工作中, 金属回路转换开关中电弧现象的研究主要依靠实验测试, 经济成本和时间成本巨大。而理论研究一般采用半经验公式的 Mayer 模型, 模型中的参数, 如电弧时间常数、电弧电导, 必须依靠实验获得, 而且难以反映断路器具体结构对电弧过程的影响。磁流体动力学电弧模型在 SF_6 断路器的研究当中已经获得了很多的应用和成功案例, 可以使实际产品结构中电弧现象的物理机制通过仿真展示出来, 然而这一模型在 MRTB 方面的仿真工作则很少有相关报道。

国内西安交通大学的荣命哲等人^[32]基于 MHD 理论, 开展了 MRTB 开断过程的仿真工作, 建立了综合考虑电路和 MRTB 中机械运动的电弧模型, 并通过该模型计算了其中的电流自激振荡过程。MRTB 的电路拓扑图如图 9 所示, 采用了一个交流 SF_6 断路器作为 MRTB 的核心组成部分, 其简化的几何模型如图 10 所示。

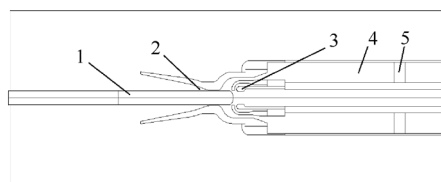


图 10 SF_6 断路器的简化几何模型^[32]

1—静弧触头 2—喷嘴 3—动弧触头 4—压气缸 5—活塞

Fig.10 Simplified geometric model of SF_6 breaker

图 11 和图 12 分别是开断过程中温度和压力的分布图。模型采用了动网格技术来描述触头和活塞的运动。仿真结果可以清晰详尽地展示出开断的整

个过程, 从中可以看到随着触头的运动电弧逐渐被拉长, 在活塞的不断压缩作用下压气缸内的 SF_6 气体压力逐渐升高, 在喷嘴的上游区域形成了一个高压区。当动弧触头杆被拉出喷嘴喉部之后, 喷嘴喉部处产生了强烈气吹的过程。如图 13 所示, 为振荡

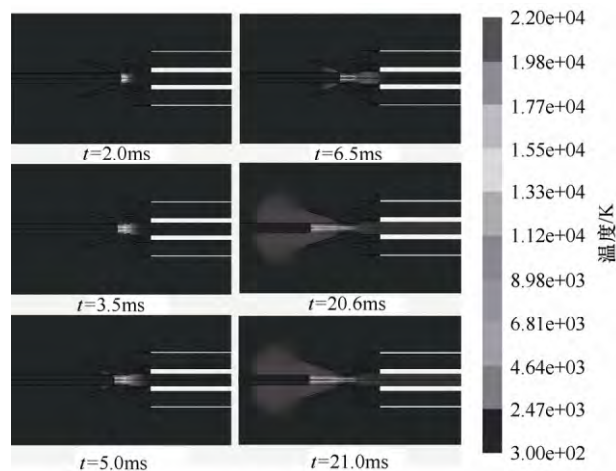


图 11 开断过程的温度分布^[32]

Fig.11 Temperature distribution during interruption

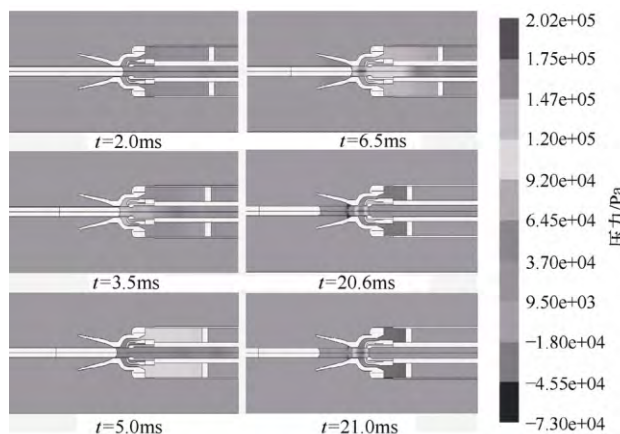


图 12 开断过程的压力分布^[32]

Fig.12 Pressure distribution during interruption

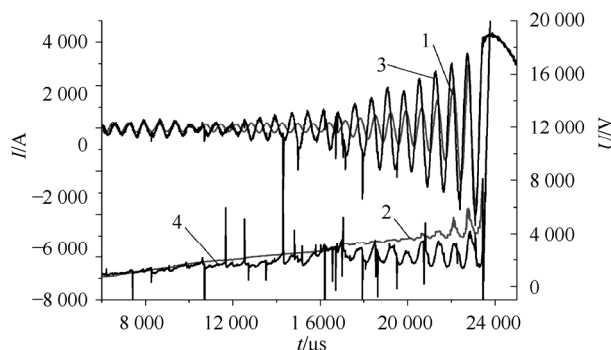


图 13 电流振荡和开断^[32]

1, 2—电弧电压和电流的计算结果

3, 4—电弧电压和电流的实验结果

Fig.13 Current oscillation and interruption

电流和电弧电压的计算结果与实验结果的比较。可以看出计算结果和实验结果在变化趋势上是一致的,研究发现当电弧被持续拉长且 SF_6 气吹效应增强时,电弧等离子体表现得更加不稳定,电弧电压与电流的振荡幅值则开始逐渐升高。因此,电流振荡特性与气吹过程和电弧长度有密切的关系。

文献[32]建立的模型可以用于研究 MRTB 中的自激振荡过程,如电路参数对电弧现象的影响,转移支路的参数匹配关系,断路器灭弧室的改进等方面,可以为 MRTB 或其他自激振荡式直流断路器的改进提供重要的设计指导。

5 混合式直流断路器

随着可再生能源分布式电网持续发展,如海上风电、沙漠太阳能发电并网等,近年来多端轻型高压直流输电系统引起了人们的广泛关注^[1-5]。多端轻型高压直流输电系统的运行离不开直流断路器,而且系统对直流断路器也有着苛刻的要求,需要断路器具有高电压等级,大容量和快速分断的能力,难以找到一种传统的开断方案可以满足这样的要求。而混合式直流断路器(Hybrid DCCB),具有机械开关的大容量与低损耗的特点,同时又结合了半导体元器件的快速特性,成为解决这一问题的一个很可能的途径。另外,混合式直流断路器同样也可以应用于电力推进、托卡马克受控核聚变、电力储存等方面^[6,8,10]。

5.1 原理和结构

混合式直流断路器一般包括三条并联支路:机械开关的正常电流支路、包含电力电子器件的转移支路和避雷器的吸能支路。以往的研究工作大多专注于 HDCCB 的拓扑结构,提出了一些不同结构的电路原理和方案。下面对两种典型的混合式直流断路器进行比较。

图 14 是一个传统的 HDCCB 示意图^[10]。正常工作电流支路是一个机械开关,转移支路则由电感和半导体管组成。正常工作时,电流通过机械断路器 S ,一旦检测到故障电流, S 立刻打开,触头之间产生电弧,在电弧电压的作用下电流向支路的半导体管 V 转移,直至 S 熄弧并且能够承受系统恢复电压。此时关断半导体管,在系统电压和线路电感中储存的大量能量的作用下,金属氧化物压敏电阻 MOV 两端的电压会急剧上升,被击穿并钳位电压,最后完成开断过程。这种 HDCCB 的电流转移时间主要依赖于开关速度和电弧电压,故必须采用快速机构^[10]。

此外,其开断能力会受到半导体元件的约束,限制了它在多端轻型高压直流系统中的应用。

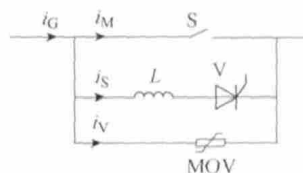


图 14 传统混合式直流断路器^[10]

Fig.14 Traditional hybrid DC circuit breaker

为了缩短电流转移时间,获得更好的限流能力,人们提出了一种强制转移的混合式直流断路器,用以改进传统的结构,如图 15 所示^[10]。正常情况下,机械断路器 S_1 和 S_2 均关合,半导体管 V_S 处于关断状态,电容 C_S 预充电。当检测到故障电流时, V_S 立刻导通,转移电流 i_S 因电容 C_S 放电而迅速上升。当 i_S 大小接近 i_G 时, i_M 下降到零,为 S_1 快速打开并关断电流创造了良好的时机。随后电容 C_S 将被系统电源持续充电,直至电容电压达到 MOV 阈值,MOV 被击穿电压钳位,电流 i_G 迅速下降到零。最终,机械开关 S_2 打开,HDCCB 开断过程结束。

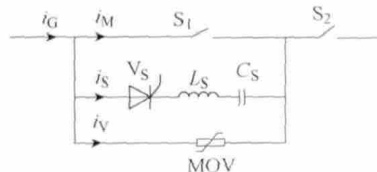


图 15 强制转移混合式直流断路器^[10]

Fig.15 Forced commutation HDCCB

5.2 研究工作

文献中的各种不同电路拓扑的 HDCCB 具有一些共同特征,如果正常电流支路上机械断路器的触点分离速度很快,则故障大电流也会以很高的频率转移到并联的转移支路上,之后机械断路器断口间会出现一个很高的瞬态恢复电压。因此,机械断路器必须综合大电流、高频率开断能力和高恢复电压耐受的能力。所以高频情况下电弧等离子体熄灭和绝缘介质恢复是深入研究 HDCCB 开断机理的关键。在研制高压混合式直流断路器的过程中,人们需要更加关注电弧的调控机理。

在已有的研究工作中,真空断路器常常被应用于 HDCCB,Niwa 等学者^[8]开展了真空断路器大电流和高频率开断能力方面的一些研究工作。其电路拓扑与图 15 的电路结构相似,在故障电流峰值前真空断路器开始分闸。几毫秒后触头分离并注入反向的高频电流。如图 16 所示,开断前后的电流波形可以通过控制注入高频电流来获得。文献中对电流零

点附近不同电流变化率 $di/(dt)$ 和有无低电流阶段的情况都进行了实验研究。从图 17 的实验结果中可知, 开断期间电流变化率 $di/(dt)$ 和低电流阶段是否存在对开断能力有着极大的影响, $di/(dt)$ 过高或没有低电流阶段都会造成开断困难。这些结论说明调整反向电流的注入方式可以获得更理想的开断能力^[8]。

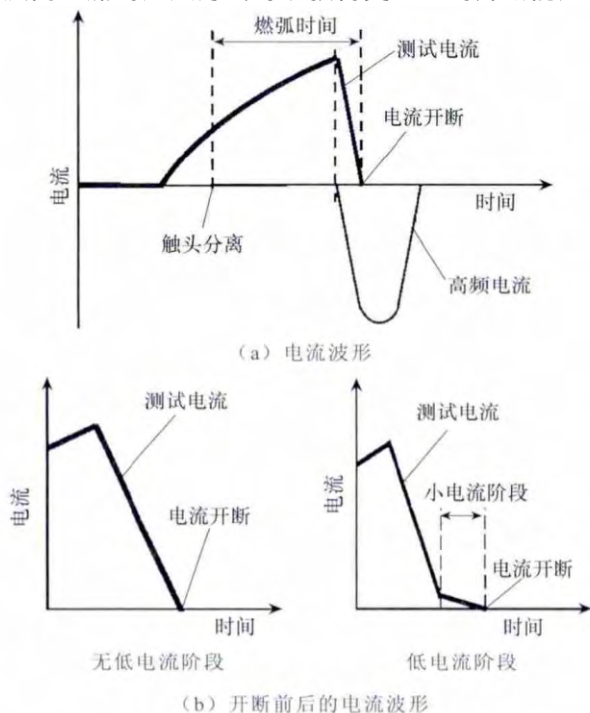


图 16 实验真空断路器的电流波形^[8]

Fig.16 Current waveforms of test vacuum circuit breaker

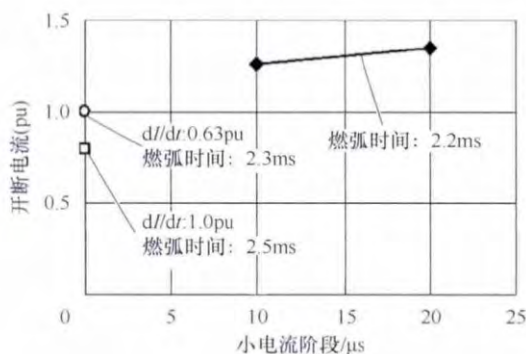


图 17 开断电流和低电流阶段的关系^[8]

Fig.17 Relationship between interruption current and low current period

然而, 文献[8]并没有指出高频电弧熄灭和介质恢复的物理机制, 这些内容在将来需要展开进一步的研究。

6 工作展望

本文对目前三类主要的直流开断技术进行了综

述, 对于其中电弧现象研究工作的展望总结如下:

6.1 空气直流断路器

(1) 基于电弧调控机理和控制技术的进一步深入研究, 特别是金属材料 and 绝缘材料的侵蚀机理, 烧蚀蒸汽对电弧过程的影响, 和复杂介质情况下弧后介质恢复中非平衡态等离子体的特性及调控手段, 从而改进灭弧室, 提高开断能力, 实现断路器尺寸的小型化。

(2) 研制新型的快速机构及其对电弧过程的影响, 以实现减少触头侵蚀, 加速大容量直流开断的电弧转移过程的目的。

(3) 研究触头材料及结构设计等因素对临界电流开断的影响机理, 避免增加复杂的磁场吹弧装置。

6.2 自激振荡式直流断路器

(1) 进一步深入研究电弧的不稳定性和负阻性的内在机理和影响因素。

(2) 建立更加完善的多物理场耦合的高频电弧熄弧和介质恢复过程的非平衡态等离子体数学模型。

(3) 发展电弧控制技术, 加快电弧振荡过程, 改善增幅振荡的稳定性, 研究电弧和外加电路, 如电容、电感、避雷器等的作用。

6.3 混合式直流断路器

(1) 需要进一步研究混合式直流断路器中的高频熄弧和介质恢复机理。

(2) 研究新型混合式直流断路器中, 机械断口间的电弧过程和快速机构以及其他电路部分的匹配原理, 从而获得更好的开断性能。

参考文献

- [1] Franck C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [2] Kirby N, Xu L, Luckett M, et al. HVDC transmission for large offshore wind farms[J]. Power Engineering Journal, 2002, 16(3): 135-141.
- [3] Lu W, Ooi B. Optimal acquisition and aggregation of offshore wind power by multiterminal voltage-source HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 201-206.
- [4] Meyer C, Hoeing M, Peterson A, et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1355-1363.

- 1475-1482.
- [5] DLR, German Aerospace Center Institute of Technical Thermo-Dynamics. Section systems analysis and technology assessment. Trans-mediterranean inter-connection for concentrating solar power[R]. 2006.
- [6] Bonicelli T, Lorenzi A, Hrabal D, et al. The European development of a full scale switching unit for the ITER switching and discharging networks[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75-79: 193-200.
- [7] Yang F, Ma R G, Wu Y, et al. Numerical study on arc plasma behavior during arc commutation process in direct current circuit breaker[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(2): 167-171.
- [8] Niwa Y, Yokokura K, Matsuzaki J. Fundamental investigation and application of high-speed VCB for DC power system of railway[C]. XXIVth International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, 2010.
- [9] Rong M Z, Wu Y, Yang F, et al. Numerical research on switching arc of circuit breaker[C]. Proceeding of the 1st International Conference on Electric Power Equipment- Switching Technology, 2011: 488-491.
- [10] Meyer C, Kowal M, De Doncker R W. Circuit breaker concepts for future high-power DC-applications[C]. Record of the IEEE Industry Applications Conference, 2005: 860-866.
- [11] Greenwood, Kanngiessner K, Lesclae V, et al. Circuit breakers for meshed multiterminal HVDC systems part I: introduction DC side substation switching under normal and fault conditions[J]. Electra, 1995, 163: 98-122.
- [12] Greenwood, Kanngiessner K, Lesclae V, et al. Circuit breakers for meshed multiterminal HVDC systems part II: switching of transmission lines in meshed MTDC systems[J]. Electra, 1996, 164: 62-82.
- [13] Bergstrom L, Juhlin L E, Liss G, et al. Simulator study of multiterminal HVDC system performance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(6): 2057-2066.
- [14] Kanngiessner K, Ring H, Wess T. Simulator study on line fault clearing by DC circuit breakers in a meshed MTDC system[C]. Proceeding of the International Conference AC and DC Power Transmission, London, UK, 1991: 102-107.
- [15] Nakao H, Nakagoshi Y, Hatano M, et al. DC current interruption in HVDC SF₆ gas MRTB by means of self-excited oscillation superimposition[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 687-693.
- [16] Andersson D, Henriksson A. Passive and active DC breakers in the three Gorges-Changzhou HVDC project[C]. Proceeding of International Conference on Power Systems, 2001: 391-395.
- [17] 杨飞. 空气介质中压直流大电流快速开断技术的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010.
- [18] 宁佐清, 罗锦华. 直流空气断路器缩小弧区的研究[J]. 船电技术, 2004(2): 28-29.
- Ning Z Q, Luo J H. The study on reducing the direct current air-breaker's arc-area[J]. Marine Electric and Electric Technology, 2004(2): 28-29.
- [19] Dominguez G, Friberg A. Effect of polymeric gas on re-strike phenomenon[C]. Proceeding of the XIX International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 2012: 218-221.
- [20] Wu Y, Rong M Z, Sun Z Q, et al. Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low-voltage switching device[J]. Journal of Physics D(Applied Physics), 2007, 40(3): 795-802.
- [21] Wu Y, Rong M Z, Li X W, et al. Numerical analysis of the effect of the chamber width and outlet area of the motion of an air arc plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2831-2837.
- [22] Wu Y, Rong M Z, Yang F, et al. Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in low-voltage air circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1074-1075.
- [23] Yang F, Rong M Z, Wu Y, et al. Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker[J]. Journal of Physics D(Applied Physics), 2010, 43(43): 434011(12 pages).
- [24] Yang F, Rong M Z, Wu Y, et al. Numerical analysis of arc characteristics of splitting process considering ferromagnetic plate in low-voltage arc chamber[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(11): 3219-3225.
- [25] Rong M Z, Yang F, Wu Y, et al. Simulation of arc characteristics in miniature circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(9):

- 2306-2311.
- [26] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. $\pm 800\text{kV}$ 6 400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
- Shu Y B, Liu Z H, Gao L Y, et al. A preliminary exploration for design of $\pm 800\text{kV}$ UHVDC project with transmission capacity of 6 400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [27] 范建斌, 于永清, 刘泽洪, 等. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 1-6.
- Fan J B, Yu Y Q, Liu Z H, et al. Introduction of $\pm 800\text{kV}$ HVDC transmission standards system[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 1-6.
- [28] 刘海峰, 徐政, 金丽成, 等. 世界远距离大容量高压直流输电工程可靠性调查综述[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 1-4.
- Liu H F, Xu Z, Jin L C, et al. A review of the reliability survey of long distance high power HVDC transmission project throughout the world[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 1-4.
- [29] 黄道春, 魏远航, 钟连宏, 等. 我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 6-12.
- Huang D C, Wei Y H, Zhong L H, et al. Discussion on several problems of developing UHVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 6-12.
- [30] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
- Yuan Q Y. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [31] 王帮田. 高压直流断路器技术[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 61-64, 68.
- Wang B T. Technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 61-64, 68.
- [32] 荣命哲, 杨飞, 吴翊, 等. 特高压直流转换开关 MRTB 电弧特性仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 1-5.
- Rong M Z, Yang F, Wu Y, et al. Numerical analysis of arc characteristics in ultra-high voltage switch MRTB[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 1-5.

作者简介

荣命哲 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电器电弧物理与电接触理论, 电器智能化理论与技术, 低温冷等离子体理论与应用。

杨 飞 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 通讯作者, 研究方向为电弧电接触理论及其应用, 新型开关电器设计与优化, 电器智能化理论与技术。