

# 低压混合式直流断路器开断特性研究

熊德智<sup>1</sup>, 陈石东<sup>2</sup>, 郎霄剑<sup>3</sup>, 肖宇<sup>1</sup>, 尹健宁<sup>3</sup>

(1. 智能电气量测与应用技术湖南省重点实验室(国家电网湖南省电力有限公司供电服务中心(计量中心)), 长沙 410004; 2. 国家电网湖南电力有限公司, 长沙 410004; 3. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710054)

**摘要:** 电力系统中大量可再生清洁能源的引入在带来电能高效利用的同时也对系统控制与保护用直流断路器提出了新要求, 尤其在光伏发电领域中光伏发电系统电压等级的攀升导致光伏发电用直流断路器需要承受更高的电压 (>1 500 V), 混合式直流断路器的出现解决了高电压下难分断的问题。在混合式直流断路器中 IGBT 的快速响应为直流开断快速性提供了基础, 而直流微型断路器作为机械开关时能够在分断过程中使得电弧电压较短时间内上升至 IGBT 导通电压实现换流。通过在 DC 1 000 V 系统中验证混合式直流断路器的开断迅速的优势后, 仿真预测了这种混合式直流断路器在 DC 1 500 V 系统中的开断特性, 在对比电弧能量后进一步体现了混合式直流断路器的开断优势。混合式直流断路器的研究对低压系统的控制与保护提供了思路。

**关键词:** 机械开关; 直流微型断路器; 电弧能量; 混合式直流断路器; 开断特性

## Research on Interruption Characteristics of Low Voltage Hybrid DC Circuit Breaker

XIONG Dezhi<sup>1</sup>, CHEN Shidong<sup>2</sup>, LANG Xiaojian<sup>3</sup>, XIAO Yu<sup>1</sup>, YIN Jianing<sup>3</sup>

(1. Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Electrical Measurement and Application Technology (State Grid Hunan Electric Power Limited Company Power Supply Service Center (Metrology Center)), Changsha 410004, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Limited Company, Changsha 410004, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The introduction of a large number of renewable clean energy in the power system not only facilitates efficient utilization of electric energy, but also imposes new requirements on DC circuit breakers for system control and protection. This is particularly evident in the field of photovoltaic power generation, where the increasing voltage levels of photovoltaic systems necessitate DC circuit breakers capable of handling higher voltages (>1 500 V). The emergence of hybrid DC circuit breakers has addressed the challenge of breaking circuits operating at high voltages. The fast response of IGBT in the hybrid DC circuit breaker forms the foundation for rapid DC breaking. Meanwhile, the DC miniature circuit breaker, functioning as a mechanical switch, quickly raises the arc voltage to the conduction voltage of the IGBT during the breaking process to achieve commutation. After verifying the rapid breaking advantage of the hybrid DC circuit breaker in the DC 1 000 V system, simulations and predictions were conducted to assess their breaking characteristics in DC 1 500 V systems. By comparing arc energy, the superior breaking performance of hybrid DC circuit breakers was further demonstrated. The research on hybrid DC circuit breakers presents a promising approach for control and protection in low-voltage systems.

**Key words:** mechanical switch; miniature DC circuit breaker; arc energy; hybrid DC circuit breaker; interruption characteristics

## 0 引言

随着全球气候变化以及能源短缺问题的出现, 特别在二氧化碳排放量剧增下造成的温室效应和海平面升高, 能源转型成为全球的发展趋势, 越来越多的国家开始加速能源转型, 制定可再生能源发展目标规划, 中国也提出了“碳中和、碳达峰”的

长期愿景, 这一目标的提出使得可再生清洁能源的开发利用成为必然要求<sup>[1]</sup>。其中太阳能作为一种可再生清洁能源得到全国乃至全球广泛关注, 而大量的分布式清洁能源接入电力系统将促进电力系统架构和设备的转型, 以充分消纳清洁能源为目标, 构建以清洁能源为主体的新型电力系统成为电力体制的改革趋势。在此基础上太阳能光伏发电装

**基金项目:** 国家自然科学基金(52107167); 国家电网有限公司科技创新项目(5216AG21N00C); 国家重点研发计划(2022YFF0607700)资助。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (52107167), State Grid Corporation of Science and Technology Innovation Project, China (5216AG21N00C), National Key R&D Program of China (2022YFF0607700).

机容量得到提升,随着光伏发电系统的应用,光伏发电系统控制与保护用直流断路器的需求也在随之变化,装机容量带来的光伏发电系统电压等级的攀升使得直流断路器耐高压的需求被提出<sup>[2]</sup>。原光伏发电系统用机械式直流断路器在 DC 1 000 V 及以下系统中能实现故障开断,但是在高电压下机械式直流断路器难以满足开断需求。

直流断路器作为直流电网中安全可靠运行发展的重要一环随着当前系统需要经历了多种结构的优化改进<sup>[3]</sup>,目前系统中常用的直流断路器主要包括机械式直流断路器、全固态式直流断路器和混合式直流断路器<sup>[4-6]</sup>,其中机械式直流断路器常用于高电压和大电流的直流系统中,通过栅片切割灭弧或者速拉灭弧等方式实现电弧的熄灭<sup>[7]</sup>,由于机械式结构中阻抗较低,因此机械式直流断路器的通态损耗低,体积较小,成本较低;全固态式直流断路器主要用于对电流变化要求高的场合,由于全固态式结构中直接采用电力电子器件代替机械开关进行开合动作<sup>[8-11]</sup>,因此在分断过程中没有电弧产生,避免了电弧的影响,其开关速度快,响应时间短,但是与机械式直流断路器相比,电力电子器件的导通阻抗较高造成较大的通态损耗,且需要添加冷却装置<sup>[12-13]</sup>。混合式直流断路器兼具了机械式直流断路器和全固态式直流断路器的优势<sup>[14-18]</sup>,采用机械式直流断路器作为通流支路,电流流经通流支路时通态损耗较低,将全固态式直流断路器作为转移支路,发生故障时实现电流的转移保证机械直流断路器无弧分断,因此混合式直流断路器的响应速度与全固态式直流断路器相近,能够在短时间内实现故障切除。现如今混合式直流断路器多应用于高压输电领域中<sup>[19]</sup>,在分断过程中为了保障换流可靠性通常在通流支路中串联辅助换流开关,确保通流支路电流降为零。现有的混合式直流断路器类型根据其换流方式不同,采用的电力电子器件类型不同主要分为自然换流型混合式直流断路器和强制换流型混合式直流断路器<sup>[20-22]</sup>。自然换流型混合式直流断路器通常采用反向电流与故障电流相抵消来实现机械开关的无弧分断<sup>[23]</sup>,2000年意大利学家 PetervanGelder 等人基于电流注入原理设计了由晶闸管组成的半控型混合直流断路器,但只能完成单向分断<sup>[24]</sup>。为实现双向分断电流的功能改进了电力电子器件支路,电流转移支路结构上采用了全桥结构<sup>[25]</sup>,同时也提高了开断能力。强制换流型混合式直流断路器主要依靠串联在通流支路上的辅助换流开关的闭锁,将故障电流强制换流至转移支路中。2012年 ABB 公司基于强制换流型断路器结构设计 320 kV/2.6 kA/5 ms 混合式直流断路器,通过了开断试验测试,成为全球第一台用于高压直流环境的混合式直流断路器<sup>[26]</sup>,这种直流断路器利用

IGBT 对通流支路的故障电流强行分断,令故障电流转移到转移支路中,不需要反向电流抵消创造电流过零点,且全控型器件易于控制,可靠性高。但是 IGBT 的耐流和耐压能力弱,在电压等级高的场所需要对大量 IGBT 进行串并联使用,导致断路器的成本提高,同时串并联下使得出现均流和均压问题<sup>[27]</sup>,强制换流型结构下可靠性高,开断迅速。近年来混合式直流断路器得到业界的广泛关注,2020 年为保障北京冬奥会电力供应的稳定性,投入了电压等级最高容量最大的直流电网工程±500 kV 张北四端柔性直流输电工程,其中采用了 14 台混合式直流断路器,在 3 ms 内开断 25 kA 的故障大电流<sup>[28-29]</sup>。但是在光伏发电系统中混合式直流断路器鲜有涉及,因此考虑采用混合式直流断路器作为光伏发电系统控制与保护用直流断路器。

文中主要针对混合式直流断路器的开断特性进行分析,在通流支路中选用直流微型断路器作为机械开关,分析对比了在 DC 1 000 V 系统中传统直流微型断路器和混合式直流断路器分断 10 kA 故障电流的开断特性,验证了混合式直流断路器不仅适用于高压输电领域,在低压领域中仍然适用。之后预测了混合式直流断路器在 DC 1 500 V 系统中的开断效果,最后根据电弧能量进一步验证了混合式直流断路器的优势。

## 1 混合式直流断路器的开断特性

混合式直流断路器 HCB(hybrid circuit breaker)主要包括三条支路:通流支路,转移支路和耗散支路。自触型混合式直流断路器主要依靠通流支路中机械开关分断产生的电弧电压上升至 IGBT 导通电压后实现换流,确保机械开关无弧分断,而由于直流微型断路器存在响应速度快、可靠性高、体积小的优势,作为混合式直流断路器中的机械开关有一定的积极影响,自触型混合式直流断路器的拓扑结构见图 1,其中机械开关选用直流微型断路器 MCB (miniaturecircuit breakers)<sup>[30]</sup>。

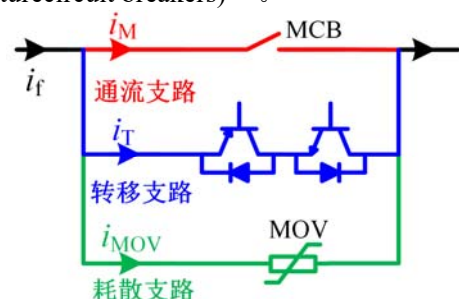


图 1 自触型混合式直流断路器拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of self-triggering hybrid DC circuit breaker

针对直流 1 000 V 系统中开断 10 kA 故障电流,混合式直流断路器中的通流支路采用微型断路器 MCB 作为机械开关进行电流通流以及故障的开断,

通过对微型断路器进行开断试验得到其分断 10 kA 故障电流的电流电压波形。

微型直流断路器的开断试验原理图见图 2，采用直流电源和  $RL$  模拟短路故障，在试验过程中罗氏线圈用于测量回路中电流的变化，高压探头测量断路器分段过程中的电压变化情况，最后将电流和电压波形由示波器输出。

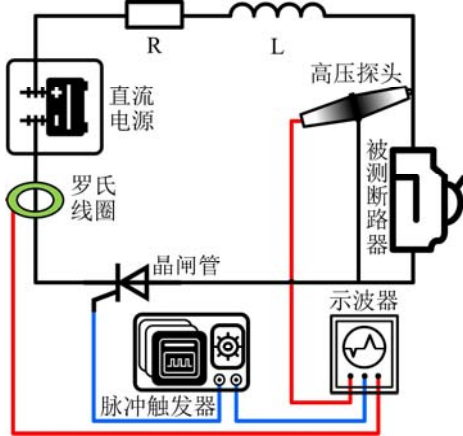


图 2 微型断路器的开断试验原理图

Fig. 2 Breaking test schematic diagram of MCB

通过试验测量得到的微型直流断路器电流和电压波形见图 3，得到的开断电流波形作为混合式直流断路器仿真过程中的故障电流用于分断，而得到的电压波形用于触发 IGBT 导通。此外也有利于后续对比混合式直流断路器与微型直流断路器的开断特性。

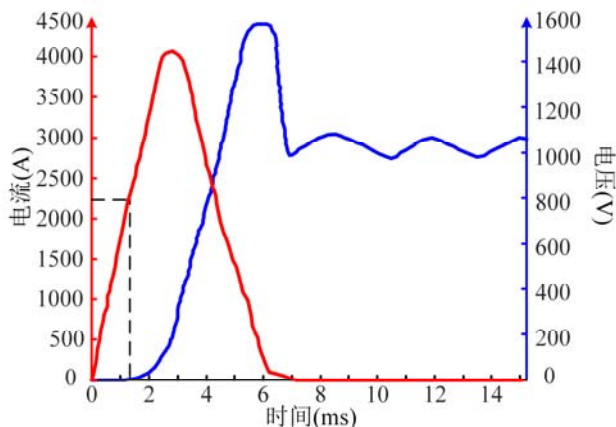


图 3 微型断路器的开断试验波形

Fig. 3 Breaking test waveform of MCB

通过试验波形得到在直流 1 000 V 系统中开断 10 kA 故障电流时，微型断路器的开断故障电流峰值为 4 kA 左右，电弧电压最高达到 1 600 V 附近，远超系统 1 000 V 电压，且燃弧时间约为 7 ms。为了进一步提高断路器的使用寿命，降低故障电流峰值，缩短故障开断时长，将微型断路器作为混合式直流断路器中通流支路的机械开关器件，在混合式结构中主要通过导通转移支路实现换流，在换流过程完成后确保通流支路电流降为零，此时通流支路中的机械开关即可实现无弧分断，而转移支路的导

通本质是导通电力电子器件 IGBT，采用机械开关分断过程中产生的电弧电压作为 IGBT 的前向导通电压，降低控制结构的复杂程度。采用混合式直流断路器开断仿真结果见图 4。

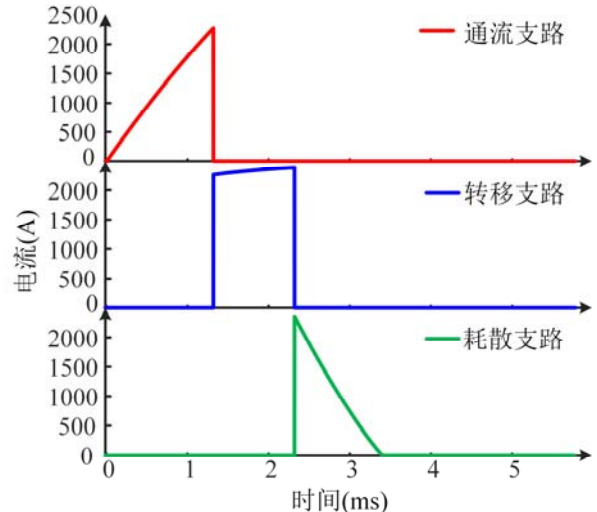


图 4 采用混合式直流断路器开断仿真结果

Fig. 4 The simulation results of hybrid DC circuit breaker breaking are adopted

当 IGBT 的导通电压为 5 V 时，从图 2 得到在电弧电压上升为 5 V 时，此时的故障电流仍处于上升阶段，且故障电流未达到较高水平。因此为了验证其可行性，将微型断路器的开断电流作为故障电流，开断电压作为 IGBT 两端的电压进行仿真。

在仿真过程中预设 IGBT 导通电压为 5 V 时从仿真结果得到在 1.2 ms 附近通流支路电流降为零，此时转移支路导通，电流开始换流。当机械开关支路电流降为零时，电流完全流经转移支路中的 IGBT，随后 IGBT 闭锁产生关断过电压，见图 5。

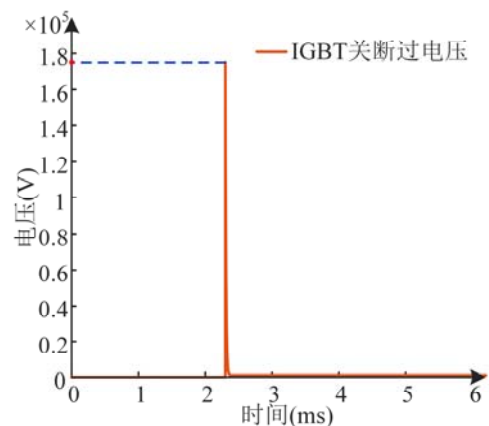


图 5 IGBT 关断产生的关断过电压

Fig. 5 Overvoltage generated by IGBT blocking

IGBT 产生的关断过电压用于触发并联在其两端的避雷器，在设定避雷器的动作电压阈值为 2 500 V 时，由于 IGBT 关断过电压峰值较高，上升率较大，在极短时间内上升至较高值。一旦出现 IGBT 闭锁避雷器立即动作，即第二个换流过程较快发

生。而 IGBT 动作产生的关断过电压虽然能够有效实现换流的发生，然而较高的电压峰值不利于设备的正常运行。避雷器两端的电压变化波形见图 6，结合图 5、6 在 IGBT 闭锁的瞬间避雷器动作，将断路器两端电压钳位到 2 685 V 附近，同时故障电流换流至避雷器所在耗散支路，之后避雷器进行感性能量的耗散，同时将系统电压钳位至原 1 000 V，有效保护断路器动作，也保障系统的安全稳定。

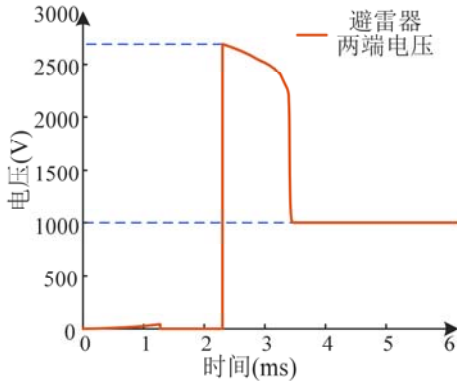


图 6 避雷器两端的电压变化

Fig. 6 The voltage variation across the terminals of a surge arrester

微型断路器与混合式断路器开断对比见图 7。通过对比直流微型断路器和混合式直流断路器的开断电流，采用混合式直流断路器进行故障开断时，故障电流下降了 41.78%，降低了故障大电流对器件的影响，提高了使用寿命；开断时长缩短了 54.29%，更快切除短路故障。其中转移支路中的 IGBT 仅需考虑承受 2 200 A 左右的电流，所需 IGBT 数量较少，同时也验证了混合式直流断路器能够适应于不同电压等级实现短路故障开断。在原 DC 1 000 V 系统中，直流微型断路器采用四极串联结构，通过串联分压完成故障的开断，在整个开断过程中微型断路器需要承受 4 000 A 左右的电流，且会对分断触头造成严重烧蚀；而在原有四极串联结构基础上并联 IGBT 和耗散支路构成混合式直流断路器，有效降低了流经通流支路的电流，缓解了电弧对触头的烧蚀，同时由于直流微型断路器分断过程中电弧电压上升速率较快，可以更快达到 IGBT 导通电压，实现更快的换流，因此主要影响整体分断效果的因素为 IGBT 的导通时长。

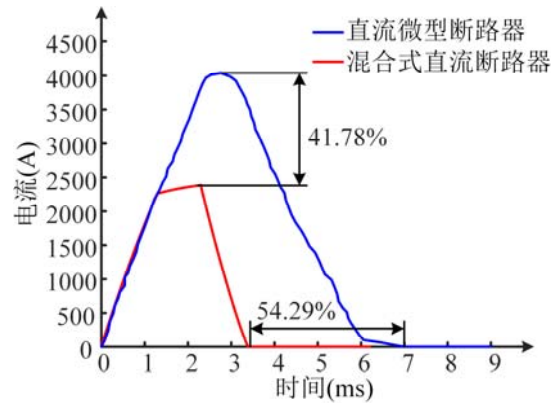


图 7 微型断路器与混合式断路器开断对比

Fig. 7 Comparison of MCB and HCB breaking

由于在同一系统电压下，断路器分断产生的电弧弧压上升速率相近，而发生换流将电流转移至 IGBT 所在支路后为了确保电流转移的完全，保证换流可靠性对 IGBT 的导通时长进行了对比分析。此外 IGBT 的导通时长也决定着混合式直流断路器的开断时间，因此对比分析了不同 IGBT 导通时长下的开断特性，主要分析了流经 IGBT 的电流峰值，关断过电压值以及避雷器的电压变化，见图 8-10。

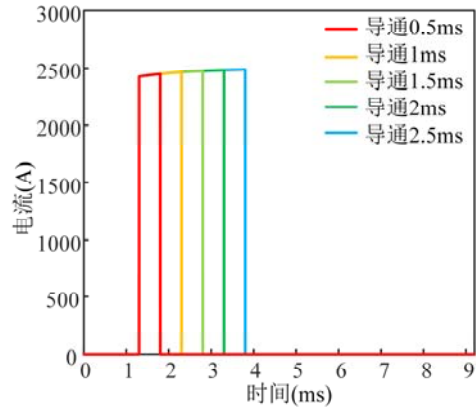


图 8 不同导通时长下流经 IGBT 的电流对比

Fig. 8 Comparison of current flowing through IGBT under different conduction time

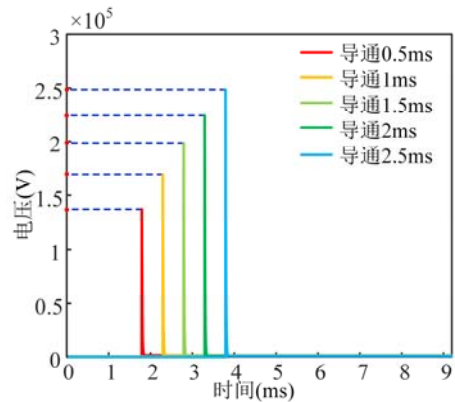


图 9 不同导通时长下 IGBT 的关断过电压对比

Fig. 9 Comparison of overvoltage generated by IGBT blocking under different conduction time

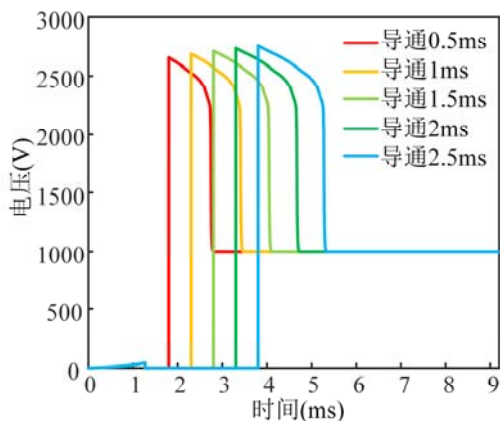


图 10 不同导通时长下避雷器两端的电压变化对比

Fig. 10 Comparison of the voltage variation across the terminals of a surge arrester under different conduction time

通过对比分析得到，随着导通时长的增加，流经 IGBT 的电流峰值上升，这主要是由于在 IGBT 导通期间，延长导通时间可以提供更多的时间向 PN 结注入电荷，因此较长的导通时间会导致更多的电荷注入，进而使得电流增加。同时流经 IGBT 电流的上升导致在其闭锁时出现的关断过电压提高，避雷器需要能高的规格实现电压钳位，更高的关断过电压更易导致出现击穿现象，不利于断路器的使用寿命。最后对比避雷器两端电压变化后，避雷器电压峰值随着 IGBT 导通时长增加而上升，此外避雷器需要更长的时间进行电压钳位和能量耗散。总体上 IGBT 导通时间长可以确保换流可靠性，但是 IGBT 需要承受更高的电流峰值，产生更大的关断过电压，伴随的热量累计增多，因此通过对比分析选择 IGBT 导通时长在 1 ms 左右开断性能最佳。

## 2 在高电压等级下的开断特性预测

随着光伏发电装机容量的增加，其系统的电压等级不断抬升，在高电压下原有的机械式直流断路器难以完成故障开断任务，因此考虑采用混合式直流断路器。在上节内容中验证了利用直流微型断路器作为机械开关的混合式直流断路器在直流 1 000 V 系统中的开断能力，为了进一步验证混合式直流断路器在不同电压等级下的适用性，下面将提出的基于直流微型开断特性的混合式直流断路器置于直流 1 500 V 系统中进行仿真预测在高电压下的开断能力，并为混合式直流断路器应用于高电压光伏发电系统控制与保护提供研究思路。

由于混合式直流断路器仍采用自触型方式进行故障开断，因此电弧电压的对比成为主要因素，电弧电压上升越快，IGBT 导通越早，换流越快发生，故障电流越迅速被切除。通过仿真对比了在 DC 1 000 V 和 DC 1 500 V 系统下的电弧电压。不同电压系统下的电弧电压对比见图 11。

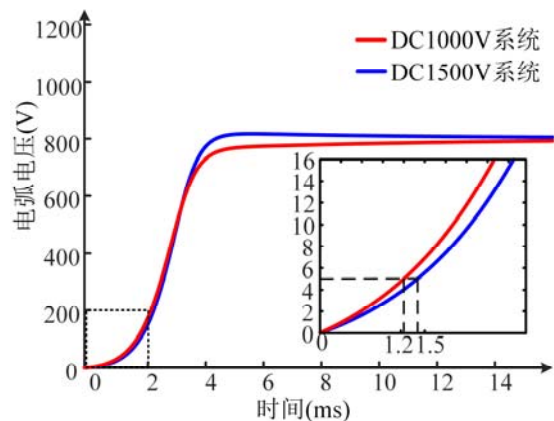


图 11 不同电压系统下的电弧电压对比

Fig. 11 Comparison of arc voltage under different voltage systems

从波形图中得到相比于 DC 1 000 V 系统，在 DC 1 500 V 系统中电弧电压上升较慢，电弧电压上升至 5 V 的时间从 1.2 ms 左右延迟到近 1.5 ms。提高系统电压能够降低电弧电阻，这主要是由于在产生电弧的过程中，气体分子被电离和激发产生带电粒子，带电粒子与通电的电极相撞转移其能量和动量。随着系统电压的上升，电子在电场力的作用下更易获得足够的能量，与带电粒子发生碰撞，使得离子化程度提高，形成正负离子对，降低电弧的电阻。而由于电弧需要有足够的电动势才能维持电弧的存在，因此电弧电压上升过程中电弧电阻在离子化程度提高时下降，此时系统电源仅需要更低的电动势即可产生相同的电流流经电弧。因此电弧电动势下降，电弧电压上升缓慢。

因此在 DC 1 500 V 系统中 IGBT 导通时刻被延迟，换流时刻延后，通过分析开断波形对比在不同电压等级下的开断特性。直流 1500V 系统中的开断波形见图 12。

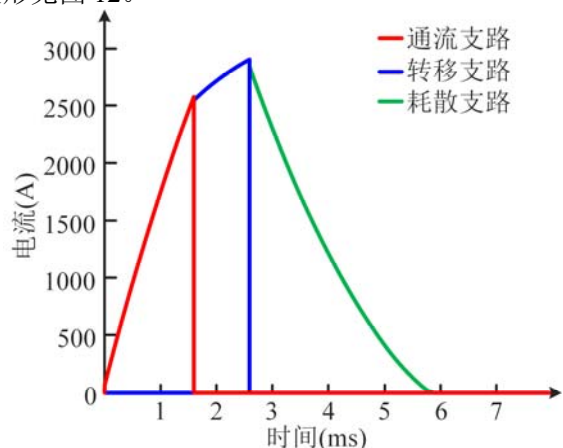


图 12 直流 1 500 V 系统中的开断波形

Fig. 12 The breaking waveform in DC 1 500 V system

在改变系统电压而器件规格保持不变情况下，由于电弧电压较慢达到 IGBT 导通电压值，IGBT 导通时刻被延后，流经 IGBT 的电流上升，电流峰值达到 2 901 A，与 DC 1 000 V 系统相比提高了

21.23%。同时在图 13 中对比 DC 1 000 V 和 1 500 V 系统中避雷器两端电压变化，由于在 DC1500V 系统中 IGBT 导通时刻较晚，且在更高电压下需要耗散的感性能量，在选用原 DC 1 000 V 用避雷器规格时，耗散时间更长。此外，在 DC 1 000 V 系统中机械开关所在的通流支路采用四极串联的微型断路器，而随着电压的上升，单极微型断路器需要分得更高的电压，因此为了避免由于高电压下断路器难开断的难题，在通流支路中多串联一个隔离开关，即通流支路中采用四极微型断路器串联隔离开关的方式进行见图 14。

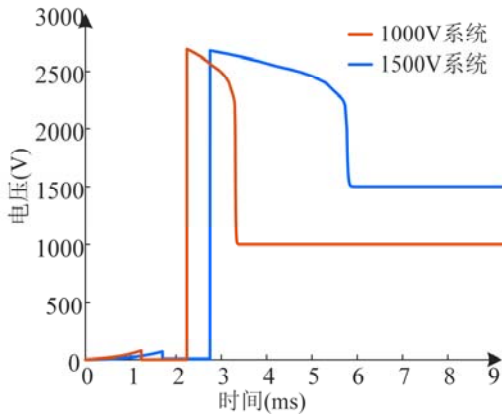


图 13 不同系统电压下避雷器两端的电压变化对比  
Fig. 13 Comparison of the voltage variation across the terminals of a surge arrester under different system voltages

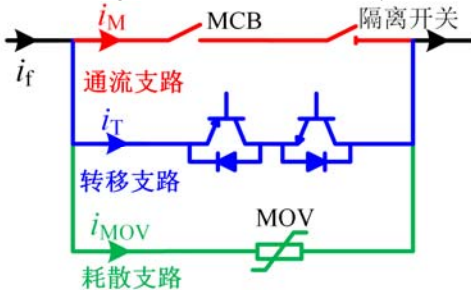


图 14 应用于 DC1500V 系统的混合式直流断路器拓扑结构  
Fig. 14 Topology of HDCCB applied in DC1500V system

### 3 断路器的使用寿命对比

直流断路器在完成故障开断任务过程中在不同的开断条件产生的电弧能量与断路器的使用寿命有密切的联系，电弧能量主要指的是断路器在开合过程中产生的电弧释放的能量，与断路器的性能和使用寿命有一定关系。在开合断路器过程中，电弧能量作为评估断路器寿命的主要因素之一，当断路器内的电弧能量较高时，一方面电弧在触头附近燃烧，产生高温高压等强破坏力，导致触头表面烧蚀氧化，造成触头表面的附着物增多，加剧触头的磨损。缩短断路器的使用寿命。电弧燃烧时间越长，电弧能量越大，触头的烧蚀和磨损程度越严重；另一方面电弧产生的高温高压也影响断路器周围的绝缘材料，造成绝缘材料的老化和劣化，降低绝缘

性能，导致绝缘故障风险提高。此外弹簧作为断路器中的关键部件，直接影响触头的分离速度，在电弧影响下会产生疲劳失效或者热滞后效应，影响开断性能和运行稳定性。

因此对比微型断路器和混合式直流断路器的电弧能量即可得到开断性能好，可靠性高的直流断路器。

根据式(1)

$$W = \int_{t_0}^{t_1} I^2 dt \quad (1)$$

式(1)中： $t_0$ 为起弧时间； $t_1$ 为熄弧时间。

分别代入得到直流微型断路器的电弧能量为 14.191 7 J，而采用直流微型断路器作为机械开关的混合式直流断路器的电弧能量仅为 5.091 5 J。

此外混合式直流断路器中还需要耗散系统中由感性负载产生的感性能量，根据式(2)

$$W_1 = \frac{1}{2} L \int_{t_0}^{t_2} I^2 dt \quad (2)$$

式(2)中： $t_2$ 为故障切除完成时间； $L$ 为系统等效电感。得到在混合式直流断路器中避雷器还需要耗散的感性能量为 2.546 8 J，因此混合式直流断路器中共计需要耗散能量为 7.638 3 J。

综合分析对比在 DC 1 000 V 系统中开断预设 10 kA 故障电流，直流微型断路器和混合式直流断路器的开断性能对比见表 1。

表 1 微型断路器和混合式直流断路器开断性能对比

Table 1 Comparison of breaking performance between MCB and HCB

对比项目	直流微型断路器	混合式直流断路器
故障电流峰值/A	4 038.9	2 324.5
机械开关电流峰值/A	4 038.9	2 121.3
开断时长/ms	6.9	3.2
所需耗散能量/J	14.191 7	7.638 3

因此在直流 1 000 V 系统中开断 10 kA 故障电流采用混合式直流断路器开断性能高于传统微型断路器，且混合式直流断路器中采用微型断路器作为机械开关用于通流正常电流，产生电弧电压触发 IGBT 导通性能更佳，经济性高。

同时在实际应用过程中，为了保证断路器的性能，延长其使用寿命，通常需要避免产生较高的电弧能量，综合考虑负荷电流大小，通过增加阻抗负载等方式控制电弧能量大小，减少电弧产生且保证快速灭弧，降低断路器灭弧室内的温度和压力，确保断路器能够安全稳定运行并具有较长的使用寿命。

### 4 结论

文中主要采用自触型混合式直流断路器，利用

直流微型断路器的快速响应特性作为混合式结构中的机械开关,得到迅速上升的电弧电压来触发 IGBT 导通,通过仿真验证其开断性能,结论如下:

1)直流微型断路器作为机械开关,其电弧电压上升率大,IGBT 在故障电流还未上升至较高值就被触发导通,有效降低了故障电流;

2)由于采用混合式直流断路器,换流时刻较早发生,故障的开断时长被极大缩短,由原 6.9 ms 缩短至 3.2 ms;

3)机械开关部分仍采用四极串联微型断路器,与原直流微型断路器相比,流经微型断路器的电流降低近一半;

4)通过在高电压情况下仿真预测,电弧电压上升速率有所减缓,但仍能实现 10 kA 故障开断;

5)对比直流微型断路器和混合式直流断路器在分断过程中产生的电弧能量,进一步验证了混合式直流断路器的优势。

## 参考文献:

- [1] 李昕蕾. 全球清洁能源转型与中国角色[J]. 当代世界, 2023(2): 16-22.  
LI Xinlei. Global clean-energy transformation and China's role[J]. Contemporary World, 2023(2): 16-22.
- [2] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.  
LI Bin, YUAN Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17.
- [3] 沙彦超, 蔡巍, 胡应宏, 等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 64-70.  
SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 64-70.
- [4] 成达, 张蓬鹤, 熊素琴, 等. 新型低压直流断路器研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2022(11): 1-8.  
CHENG Da, ZHANG Penghe, XIONG Suqin, et al. Overview of novel LVDC circuit breaker research[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(11): 1-8.
- [5] 张烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 等. 多端口直流断路器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4502-4515.  
ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. A review of research on multi-port DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4502-4515.
- [6] 贾申利, 史宗谦, 王立军. 真空断路器用于直流开断研究综述[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 12-16.  
JIA Shenli, SHI Zongqian, WANG Lijun. Review on the research of vacuum circuit breaker for DC breaking[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 12-16.
- [7] YIN Jianning, WANG Qian, LI Xingwen, et al. Numerical study of influence of frequency and eddy currents on arc motion in low-voltage circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8(8): 1373-1380.
- [8] REN Yu, YANG Xu, ZHANG Fan, et al. A single gate driver based solid-state circuit breaker using series connected SiC MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2002-2006.
- [9] SATO Y, TANAKA Y, FUKUI A, et al. SiC-SIT circuit breakers with controllable interruption voltage for 400 V DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2597-2605.
- [10] ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, ZHAO Biao, et al. A novel mixture Solid-State Switch based on IGCT with high capacity and IGBT with high turn off ability for hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4485-4495.
- [11] MIAO Zhenyu, SABUI G, ROSHANDEH A M, et al. Design and analysis of DC solid-state circuit breakers using SiC JFETs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 863-873.
- [12] 穆建国, 王莉, 胡杰. 直流固态断路器拓扑结构的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 109-114.  
MU Jianguo, WANG Li, HU Jie. Analysis and design of topological structure for DC solid-state circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 109-114.
- [13] SONG Xiaoqing, PENG Chang, HUANG A Q. A medium-voltage hybrid DC circuit breaker, Part I: Solid-state main breaker based on 15 kV SiC emitter turn-off thyristor[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 278-288.
- [14] 章宝歌, 荣耀, 张振. 一种新型限流型高压直流断路器拓扑[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 34-43.  
ZHANG Baoge, RONG Yao, ZHANG Zhen. New topology of current limiting high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 34-43.
- [15] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.  
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.

- [16]CHEN Xiaolong, ZHOU Ning, LI Yongli, et al. A multiport hybrid DC circuit breaker with high economic efficiency and adaptive reclosing capability[J]. Electric Power Systems Research, 2023(221): 109485.
- [17]LIU Yiqi, LI Bingkun, YIN Laicheng, et al. Hybrid DC circuit breaker with current-limiting capability[J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(4): 700-711.
- [18]SHEN Z J, ZHOU Yuanfeng, NA Risha, et al. A series-type hybrid circuit breaker concept for ultrafast DC fault protection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6275-6279.
- [19]李 莉, 张彼德, 方春恩, 等. 一种混合式高压直流断路器的换流特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 101-107.  
LI Li, ZHANG Bide, FANG Chun'en, et al. Analysis on current commutation characteristics of a hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 101-107.
- [20]周万迪, 郭 亮, 魏晓光, 等. 混合式直流断路器合成开断试验方法及等效研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5233-5241.  
ZHOU Wandi, GUO Liang, WEI Xiaoguang, et al. Synthetic breaking test method and equivalence analysis of hybrid DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5233-5241.
- [21]杨兵建, 张 迪, 林志光, 等. 500 kV 混合式高压直流断路器控制保护及其动模试验[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3440-3450.  
YANG Bingjian, ZHANG Di, LIN Zhiguang, et al. Control protection and dynamic model tests for 500 kV hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3440-3450.
- [22]熊 迪, 谭亲跃, 丁月明, 等. 一种高压限流混合式直流断路器拓扑及参数优化研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 37-44.  
XIONG Di, TAN Qinyue, DING Yueming, et al. Study on topology and parameter optimization of high voltage current limiting hybrid DC breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 37-44.
- [23]HASAN S. A hybrid circuit breaker based on current commutation approach for multi-feeder DC railway substations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 234-239.
- [24]DIJK E V, Ferreira J A and gelder P van. current sharing between diode clamps of polar capacitor bank[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1600-1605.
- [25]ZYBORSKI J, LIPSKI T, CZUCHA J, et al. Hybrid arcless low-voltage AC/DC current limiting interrupting device[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1182-1187.
- [26]MAGMUS C, ANDERS B, JURGEN H, et al. The hybrid HVDC breaker an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids[C]. ABB Grid Systems, Technical Paper, 2012.
- [27]HASSANPOOR A, HÄFNER J, JACOBSON B. Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5393-5400.
- [28]汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500kV 直流电网关键技术及设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.  
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [29]张翔宇, 余占清, 黄瑜琰, 等. 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 413-422.  
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500 kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 413-422.
- [30]YIN Jianning, LANG Xiaojian, XU Haotian, et al. High-performance breaking and intelligent of miniature circuit breakers[J]. Sensors, 2022, 22(16): 5990.

熊德智(1979—), 男, 教授级高级工程师, 博士后, 主要从事智能电气量测、智能配电网等工作(E-mail: dzhxiong@hotmail.com)。