第 50 卷 第 2 期：467-477 高电压技术 Vol.50, No.2: 467-477
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240137

直流快速开断技术研究进展和展望

吴益飞，吴　翊，庄伟斌，吴　鑫，荣命哲
（西安交通大学电气工程学院电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049）

摘　要：由于直流电流无自然过零点且短路电流上升率高，直流电流快速开断与系统故障切除成为制约直流电力系统发展的一大瓶颈。该综述首先介绍了直流快速开断技术要求与难点。其次，详细分析了直流快速开断过程涉及的关键技术，包括电流转移技术、固态式直流开断技术、介质恢复技术和高速机械开关技术等，综述了各种技术的当前发展现状及其应用情况，对比了不同技术方案的特点及适应性。最后，对直流快速开断技术未来发展方向进行了讨论和总结，为小型化、高性能、低成本、高可靠快速直流断路器的研发及推广应用提供了新的技术思路。

关键词：直流电力系统；直流快速开断技术；电流转移；介质恢复；高速机械开关

Research Progress and Prospect of Fast DC Current Interruption Technology

WU Yifei, WU Yi, ZHUANG Weibin, WU Xin, RONG Mingzhe
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Due to the DC current has no natural zero crossing point and high short-circuit current rise rate, DC current rapid interruption and system fault removal has become a major bottleneck restricting the development of DC power system. This paper firstly introduces the technical requirements and difficulties of DC fast interruption. Secondly, we analyze in detail the key technologies involved in DC fast interruption process, including current commutation technology, solid-state DC interruption technology, dielectric recovery technology, and high-speed mechanical switch technology, etc. Moreover,we review the current development status of various technologies and their applications, and compare the characteristics and adaptability of different technical solutions. Finally, the future development direction of DC fast interruption technology is discussed and summarized, which provides new technical ideas for the research and development and popularization and application of miniaturized, high-performance, low-cost, and highly-reliable fast DC circuit breakers.

Key words: DC power system; DC fast interruption technology; current commutation; dielectric recovery; high-speed mechanical switch

0　引言

近年来，柔性直流电力系统以其系统容量大、易于接入分布式能源和系统控制灵活等优势成为研究热点[1-5]。目前已经建成的柔性直流系统包括张北±500 kV 四端高压直流电网[6-7]、南澳 160 kV 三端高压直流电网[8]、苏州±10 kV 城市直流电网以及各类低压直流配电网等[9]，为我国新能源规模化并网和消纳提供了良好模板和借鉴。

直流断路器(DC circuit breaker，DCCB)作为构建质量电网中保障供电灵活性和可靠性所不可或缺的关键装备，对于直流电网建设至关重要[10-14]。与交流系统相比，直流系统电流无自然过零点，导致故障电流上升快、开断极其困难[15-17]，是电气工程领域极具挑战性的难题。

本文首先介绍了直流快速开断技术要求与难点。其次，综述了当前直流快速开断涉及的关键技术，包括电流转移技术、固态式直流开断技术、快速介质恢复技术和高速机械开关技术等，分析了不同技术方案的发展现状及其应用情况，并讨论了不同直流开断解决方案的特点及适用性。最后，展望了未来直流快速开断技术的发展方向。

基金资助项目：国家自然科学基金(52025074；52377158)；电工材料电气绝缘全国重点实验室自主研究课题(EIPE23113)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52025074, 52377158), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment for Independent Research (EIPE23113).

1 直流快速开断技术要求与难点

直流断路器是构建直流电网，保障供电灵活性和可靠性所不可或缺的关键设备。其技术要求主要包括：

1）正常运行时承载系统额定电流，关键部件满足温升和绝缘要求。

2）系统发生故障时快速开断故障电流，开断时间和开断过电压满足系统要求。

3）接收到分合闸指令后，快速可靠地进行分合闸动作。

4）直流断路器的体积、成本和寿命应满足实际工程的应用要求。

为了实现电流过零，直流开断涉及了电流转移、电压建立、电压耐受、能量耗散等多个物理过程。当前的直流断路器采用了多种不同的开断方案，包括机械灭弧式、电流注入式、自激振荡式、混合式、阻尼式等多种直流开断方案。相比于交流系统，无论哪种直流电流的开断，均存在以下难点：

1）直流电流没有自然过零点，必须采取适当的措施来建立开断所需的电压，人为制造电流过零点，如何可靠制造电流过零点，是直流开断面临的一大难题；

2）直流回路存在着电感(线路、负荷)，流过电流的电感存储着磁能，这一能量在电流开断过程需要得到释放，如何快速耗散系统能量是直流开断面临的又一难题；

3）直流电流过零时，系统电感及未释放的能量将会在断口之间产生过电压，极易引起直流断路器断口的击穿引起电弧的重燃，如何耐受这一开断过电压是直流开断面临的另一难题[18]。

2 直流快速开断的关键技术

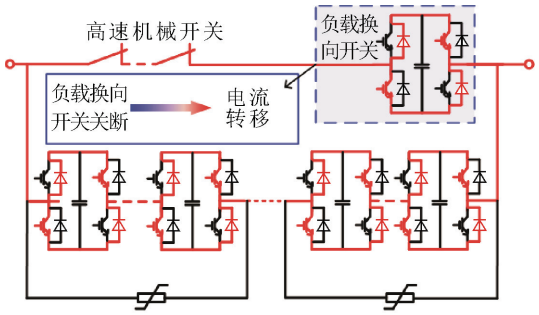
快速直流断路器是多端直流电网故障切除和隔离的关键设备。回顾现有各种快速直流断路器技术方案，其研制过程主要涉及 4 个关键技术：分别是电流转移技术、固态式直流开断技术、快速介质恢复技术和高速机械开关技术。

2.1 电流转移及直流快速开断拓扑结构

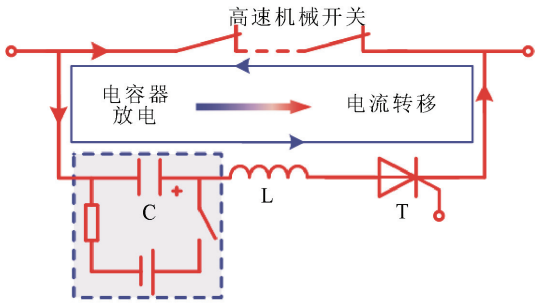
传统的基于电弧切割建立开断电压的机械灭弧式方案开断速度慢，无法满足数毫秒故障快速切除的要求。为了实现多端直流系统故障快速切除和保护，通常采用转移式直流开断技术，包含几条不同功能的并联支路，在进行电流分断时，系统电流会在这些并联支路间相互转移[19]。目前主流的电流转移式开断技术包括混合式开断方案[20-22]和有源电流注入式开断方案[23-27]两种。

混合式直流断路器的典型拓扑结构如图 1(a)所示。其中，主支路由负载换向开关(load commutation switch，LCS)与高速机械开关串联形成，转移支路包括多个串联绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)组件。混合式开断技术的核心是通过闭锁 LCS 产生 1 个电压来强迫故障电流转移。该方案虽然可以实现快速电流分断，但 LCS 的导通损耗高，长期运行运维复杂。混合式断路器样机最早由 ABB 公司开发[28]，具有 9 kA 开断能力。全球能源互联网研究院在该拓扑的基础上，进一步开发了 500 kV 混合式直流断路器样机，如图 2 所示[29]。该断路器开断能力达 26 kA，目前已应用于张北四端柔性直流电网工程。

有源电流注入式开断方案是通过向高速机械开关注入反向电流，从而制造电流零点实现开断，该方案也被称为人工过零方案。该方案采用机械开关承担额定通流，损耗小；同时采用预充电电容实现电流快速转移，开断电流较大，目前获得较多的推广应用[30-32]。有源电流注入式断路器典型拓扑结



(a) 混合式断路器



(b) 有源电流注入式断路器

图 1 典型的直流断路器拓扑结构[30-32]

Fig.1 Typical topology of the DCCB[30-32]

构如图 1(b)所示，主支路由高速机械开关组成，转移支路包括预充电电容器 C、电感器 L 和晶闸管 T。

由于电流注入式方案采用了预充电电容来实现反向电流注入，电容器体积大、长期耐受电压要求高，为此进一步提出了利用磁耦合电流转移模块(magnetic induction current commutation module, MICCM)实现电流转移和开断的新方法[33-34]，如图 3 所示，主支路由高速开关组成，转移支路包含转移电容器 C_1、MICCM 模块和二极管 D，MICCM 模块包含耦合电感器 L_1 和 L_2、预充电电容器 C_2 和晶闸管 T。i_{VS} 和 i_1 分别代表主支路电流和转移支路电流。该方案利用磁耦合模块实现电流转移，转移支路的电容器不再需要长期预充电，有效降低了电容预充电耐压要求，同时实现电容器二次供电电路与主回路的完全电气隔离，提高了断路器的开断可靠性。

该方案中，高速真空开关中的电流转移是通过磁耦合电流转移模块的一次绕组 L2 和二次绕组 L1 之间的磁耦合实现的，磁耦合二次侧低压电容器(绕组 L2 侧)与主回路元件(绕组 L1 侧)完全电气隔离。

基于该原理，华中科技大学研制了 160 kV 直流断路器样机[33]，如图 4 所示，该样机能够在 3.9 ms 内开断 9.2 kA 短路电流，成功应用于南澳直流电网工程。

同时，西安交通大学基于该原理研制了 10 kV/20 kA 直流断路器[34]，并通过了第三方测试，可在 3 ms 内成功分断故障电流。

然而，对于传统有源注入式直流断路器或者改进的磁耦合型电流注入式直流断路器，由于转移支路换流电容器的存在，其开断过程仍然存在两大不足：一是在小故障电流开断时，电容器需要较长的时间来建立开断电压，导致总的开断时间较长，甚至可达百毫秒以上；二是转移支路电容器需要承受开断电压，整体体积较大、价格较高，导致直流断路器的总体成本和体积降低困难。

为此，西安交通大学提出了一种新的转移和耗能一体化直流开断方案[35]，如图 5 所示，其中 i_S 和 i_1 分别代表主支路电流和转移支路电流。该方案仅包含机械开关支路和转移支路这 2 条支路，利用磁耦合模块和金属氧化物变阻器(metal oxide varistor, MOV)串联，一次转移完成开断，实现全电流范围下的快速分断，并且大幅降低了断路器体积和成本。基于该原理，西安交通大学开发了 10 kV 直流断路器及负荷开关，断路器如图 6 所示，通过了第三方测试，可在约 2.3 ms 内分断 22 kA 的故障电流。

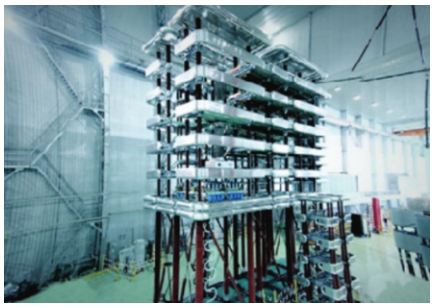


图 2　500 kV 直流断路器样机示意图[29]

Fig.2　Schematic diagram of the prototype of 500 kV DC circuit breaker[29]

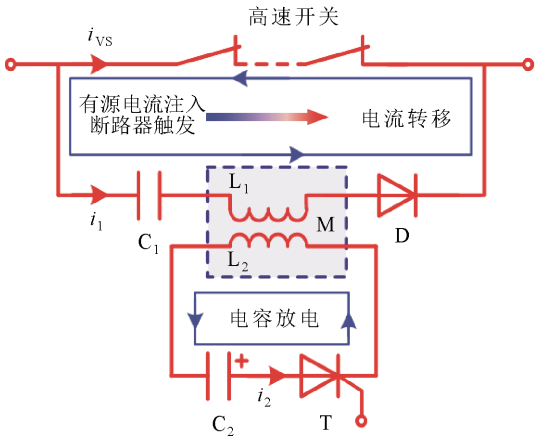


图 3　基于 MICCM 的有源电流注入断路器拓扑图[33-34]

Fig.3　Topology diagram of active current injection circuit breaker based on MICCM[33-34]



图 4　160 kV 机械式直流断路器样机[33]

Fig.4　Prototype of 160 kV mechanical DC circuit breaker[33]

同时，基于磁耦合电流转移及开断原理，为了兼顾电流快速开断及柔直系统快速重合闸需求，清华大学、西安交通大学等单位提出了磁耦合模块和电力电子相结合实现电流转移和开断的混合式直流断路器新拓扑，如图 7 所示。其中，西安交通大学基于该原理开发了 10 kV/10 kA 混合式直流断路器

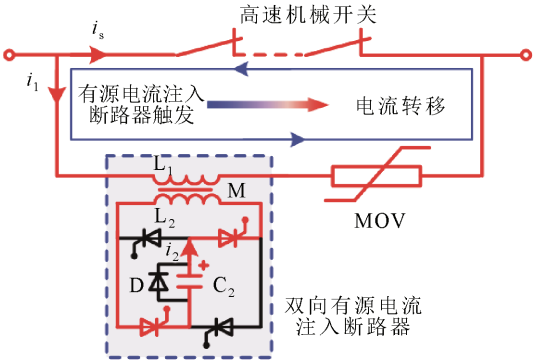


图 5 转移和耗能一体化直流断路器拓扑结构[35]

Fig.5 Topology of DC circuit breaker with the integration of current commutation and energy dissipation[35]

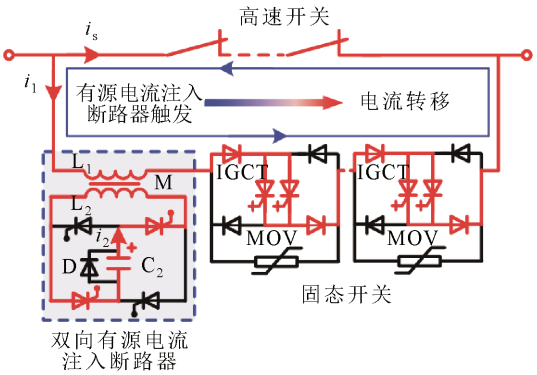


图 7 基于磁耦合换流的直流断路器拓扑结构[36]

Fig.7 DC circuit breaker topology based on magnetic coupling commutation[36]

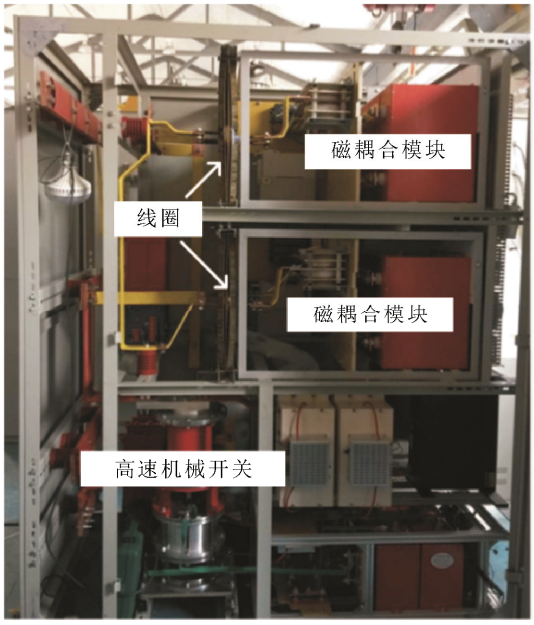


图 6 转移和耗能一体化直流断路器样机[35]

Fig.6 Prototype of DC circuit breaker with the integration of current commutation and energy dissipation[35]

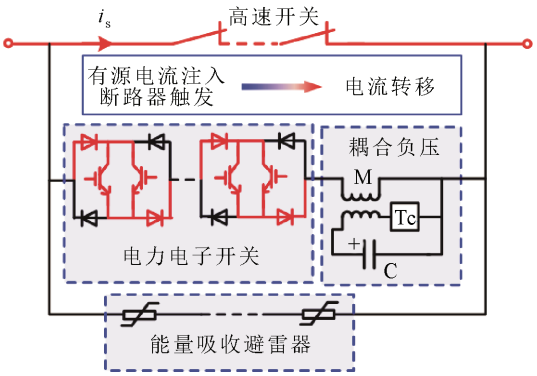


图 8 耦合负压换流型混合式直流断路器拓扑结构[37]

Fig.8 Coupled negative voltage commutation hybrid DC circuit breaker topology[37]

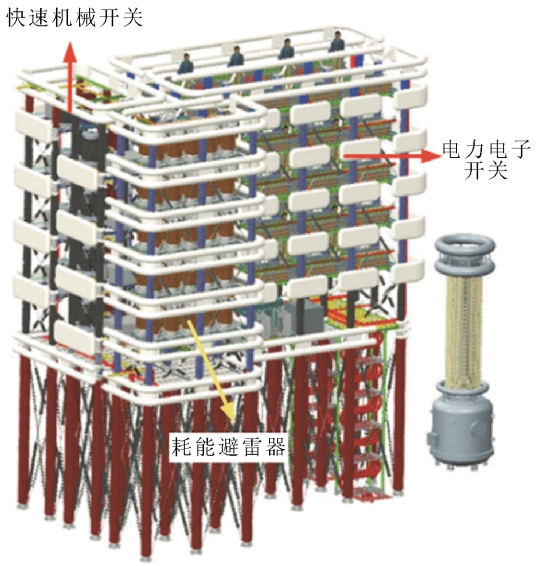


图 9 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器[37]

Fig.9 500 kV coupled negative voltage commutation hybrid DC circuit breaker[37]

并应用于广东电网[36]。清华大学基于该原理开发了一种 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器[37]，其拓扑和样机分别如图 8 和图 9 所示。该样机能够在 3 ms 内开断 25 kA 短路电流，并成功应用于张北 500 kV 直流电网。

此外，瞄准国防领域 60 kA 以上电流的直流短路电流快速分断，西安交通大学提出了集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor，IGCT)和预充电电容器相结合的大容量开断方案[38]，拓扑结构如图 10 所示。该方案由 3 个支路——主支路、固态开关支路和 LC 换流支路组成。其中，主支路

由高速开关组成，采用电磁斥力机构实现快速分闸[39-40]，固态开关支路由串联的 IGCT 组件(包含 IGCT 器件 T_1、T_2，缓冲元件 R、C，耗能元件 MOV)组成，具备通流损耗低、浪涌耐受能力强的特点。LC 换流支路包含预充电电容器 C_r、电感 L_r 和晶闸管。开断过程中，机械开关首先分闸并利用电弧电压将断口电流分流到并联的 IGCT 支路；当断口分闸到指定的开距后，利用 LC 换流支路预充电电容器向机械断口和 IGCT 注入反向电流，实现机械断口电流过零，并通过 IGCT 续流实现断口零电压恢复，防止断口弧后发生击穿。由此，该方案巧妙地将 IGCT 高浪涌能力和 LC 强制换流结合，实现断口燃弧阶段的电流分流以及断口电流过零后的零电压恢复，保证大电流可靠转移并防止断口弧后发生重击穿，大幅提升电流开断能力。基于该方案，开发了 10 kV 大容量直流断路器样机，并通过了苏州电器科学研究院的权威测试，短路开断电流为100 kA，开断时间为 2.7 ms，实际开断电流为 64.2 kA，为目前中压直流开断领域的最高水平。

上述介绍的各类直流开断方案，其开断过程都需要专门的电流转移模块来实现电流转移，不仅导致断路器体积和成本增加，同时也使得转移过程的控制方式复杂。为此，西安交通大学研究揭示了开距、磁场等因素对真空断口电弧电压的影响规律，发明了脉冲磁场调控电弧电压的方法，进而提出了弧压增强的直流开断新方案[41]，其拓扑结构如图 11 所示。该方案利用脉冲磁场调控真空电弧，实现电弧电压快速提升，进而直接利用该弧压转移断口电流，颠覆了传统必须外加模块实现机械断口电流转移的思路，成本和体积大幅降低。基于上述原理，开发了 10 kV 直流断路器及负荷开关样机，可在 1.9 ms 内实现 15 kA 以上电流的快速开断，并通过了第三方型式试验，如图 12 所示。开发的直流断路器及负荷开关在世界最大规模的新能源城市直流电网(苏州)率先实现批量应用，为城市直流电网发展提供了关键装备支撑。

在上述断口电弧电压调控的基础上，为了进一步提升断路器的经济性，避免电力电子器件的使用，提出了磁控振荡式直流断路器方案[42]，利用脉冲磁场调控真空电弧，进而与断口并联的 LC 谐振模块快速振荡，实现电流转移和过零。该方案通过对真空断口施加脉冲横向磁场，激发电弧电压振荡。根据电弧电压频谱分析，或者电弧电压振荡的频谱特

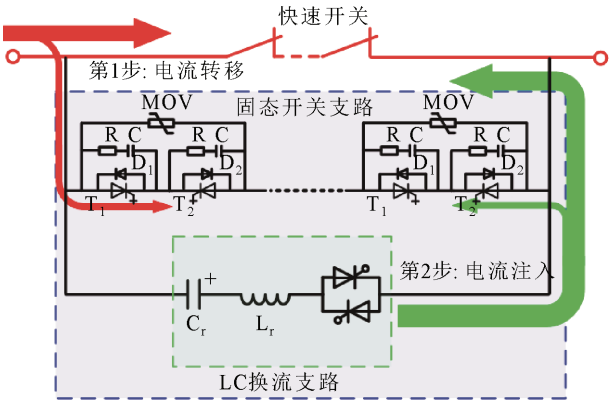


图 10　IGCT 和强迫换流相结合的直流断路器拓扑结构[38]

Fig.10　DC circuit breaker topology combining IGCT and forced commutation[38]

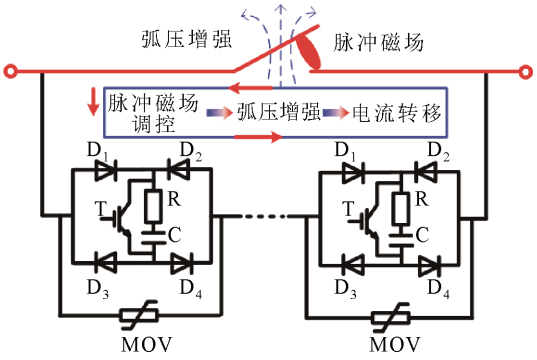


图 11　弧压增强直流断路器拓扑结构[41]

Fig.11　Arc voltage enhanced DC circuit breaker topology[41]

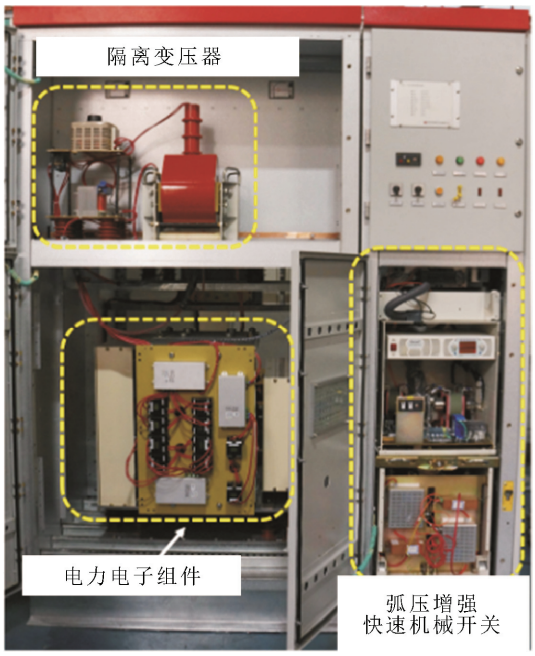


图 12　弧压增强直流断路器样机[41]

Fig.12　Prototype of arc voltage enhanced DC circuit breaker[41]

征，进而匹配设计 LC 谐振模块，与真空断口电弧形成谐振，使得谐振过程的电流幅值快速增大，进而在断口中制造电流零点，如图 13 所示。与前述开断方案相比，该方案利用机械断口自身电弧电压激励 LC 谐振模块实现快速振荡开断，成本和体积与传统交流断路器相当，从根本上解决了传统必须依靠转移电容或者电力电子器件实现开断带来的体积大、成本高、控制复杂等难题。基于上述原理，开发了 10 kV/2 kA 直流负荷开关及 10 kV/10 kA 直流断路器样机，如图 14 所示。样机可在 3 ms 内实现电流快速分断，通过了第三方权威测试，成本、体积与传统交流开关装备相当，为未来直流断路器的规模化推广应用提供了崭新的解决思路。

2.2 固态式直流快速开断技术

近年来，固态断路器因其响应速度快和电寿命高等优势逐渐受到研究人员的关注。随着全控型电力电子器件的发展，固态式直流快速开断技术也在不断进步。ABB 公司采用逆阻型集成门极换流晶闸管(reverse blocking integrated gate-commutated thyristor，RB-IGCT)作为主开关，开发了一系列框架式直流固态断路器[43]，额定电压包含 1 和 1.5 kV 两种，额定电流为 1~5 kA。该固态断路器容量和体积较大，主要应用于船舶领域。ATOM 公司开发了基于 SiC MOSFET 模块的系列化塑壳式固态断路器[44]，额定电压为 100~600 V，额定电流为 15~100 A。该断路器体积较小，且具有保护、计量、监测、远程控制等功能，目前已在美国应用于汽车充电桩等低压配电场景。但是断路器容量较小，且能量密度有待提升。泰永长征公司开发了基于 SiC 器件的直流固态断路器，额定电压包含 40、80 和 400 V，额定电流为 80 A。可实现双向保护，并集成了计量功能，可应用于光伏储能、数据中心、建筑等领域的电能保护。上海京硅公司开发了基于 Si MOSFET 器件的小容量直流固态断路器，额定电压有 60 V 和 80 V 两种，额定电流为 16~63 A。该断路器具有体积小、功耗低、可远程智能控制等特点，目前在 5G 基站、储能设备等场景也逐步开始应用。总体来说，泰永长征和上海京硅开发的固态断路器容量有待进一步提升。

目前直流固态断路器还存在器件并联稳定性、短路故障快速识别、隔离与控制系统设计等技术难点。为此，西安交通大学提出了一种基于 SiC 器件的直流固态断路器[45]。如图 15 所示，主支路包含机械隔离开关 S_1、S_2 和电力电子开关 Q_1、Q_2。该

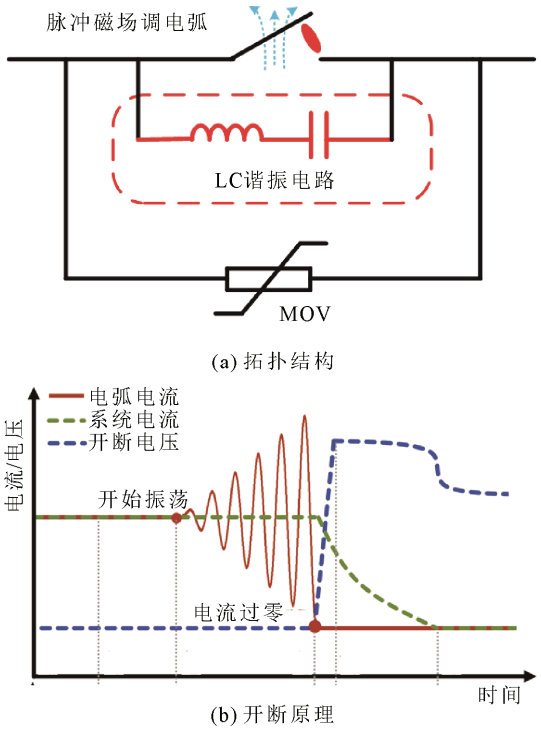


图 13 磁控振荡式直流开断方案[42]

Fig.13 Magnetron oscillation DC interrupting scheme[42]



图 14 磁控振荡式直流断路器及负荷开关样机[42]

Fig.14 Magnetron oscillating DC circuit breaker and load switch prototype[42]

固态断路器包括电力电子开关、机械隔离开关及控制电路等，电力电子开关由 SiC MOSFET 模块、缓冲耗能电路及驱动电路组成。

其中，SiC MOSFET 模块是实现固态断路器电流开断功能的核心部件，内部包含多个并联的功率半导体芯片。为了降低 SiC 模块杂散电感和抑制大电流关断暂态的栅极振荡问题，设计了一种叠层对称的低感封装布局结构，缓解了并联 SiC MOSFET 在大电流关断暂态的栅极电压振荡。所设计的封装布局结构与 SiC MOSFET 功率模块如图 16 所示。

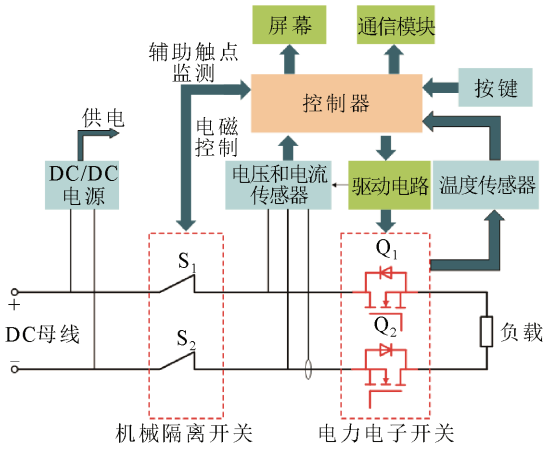
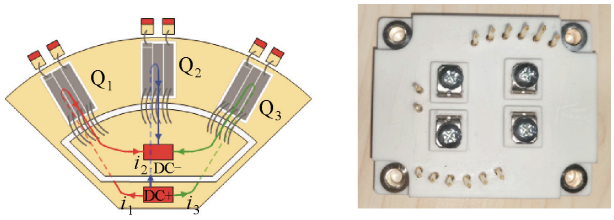


图 15　低压直流固态断路器拓扑结构[45]

Fig.15　Low-voltage DC solid-state circuit breaker topology[45]



(a) 封装布局　　(b) 功率模块

图 16　应用于固态断路器的 SiC MOSFET 模块

Fig.16　SiC MOSFET modules for solid-state circuit breakers

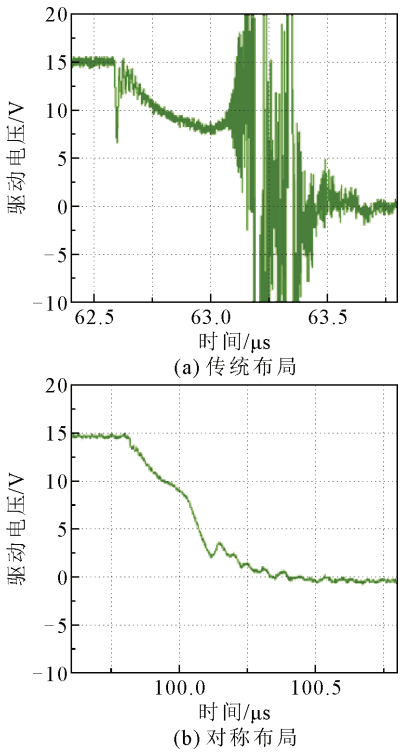


图 17　不同 DBC 布局下并联 SiC MOSFET 关断暂态栅极电压波形[45]

Fig.17　Current breaking transient gate voltage waveforms of SiC MOSFETs in parallel under different DBC layouts[45]

不同布局下的关断暂态栅极电压波形如图 17 所示，可以看出所提出的对称布局方式缓解了 SiC MOSFET 模块栅极电压振荡问题，提升了固态断路器的可靠性。

此外，隔离开关也是固态断路器的主要部件之一，主要功能是实现故障清除后的可靠隔离。除了良好的载流能力和足够的断口间隙，应用于低压固态断路器的隔离开关还应具备小体积和高寿命的特点。图 18 所示的隔离开关改进了传统电磁机构的结构，大幅降低了电磁机构所需提供的力，从而减小了电磁机构的体积。此外，通过弹簧缓冲降低了分合闸过程机械碰撞力，提高了其使用寿命。

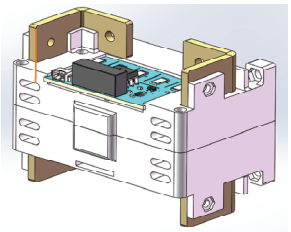


图 18　应用于固态断路器的隔离开关模块[45]

Fig.18　Disconnector module for solid-state circuit breakers[45]

2.3　直流开断工况下断口弧后介质恢复特性研究

直流开断工况下，快速机械开关电流转移完成后，电弧熄灭，断口开始进入介质恢复阶段并耐受绝缘恢复电压。与传统交流开断相比，由于直流开断过程断口间隙小、电流过零速度快，导致断口弧后介质恢复异常困难，因此研究直流开断过程中断口的介质恢复特性对提升开断容量和可靠性至关重要。

基于上述技术，研制了±375 V/150 A 固态式直流断路器样机，如图 19 所示。图 20 给出了固态断



图 19　低压直流固态断路器样机[45]

Fig.19　Low-voltage DC solid-state circuit breaker prototype[45]

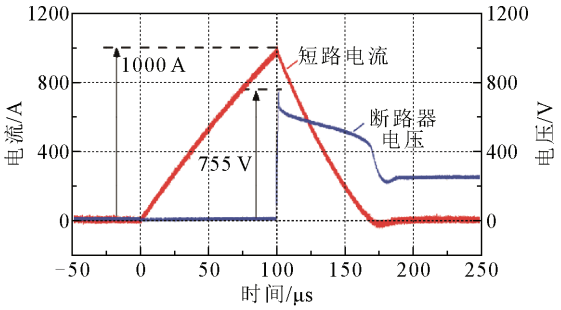


图 20 直流固态断路器短路电流开断波形

Fig.20 Current breaking waveforms of DC solid-state circuit breaker short-circuit

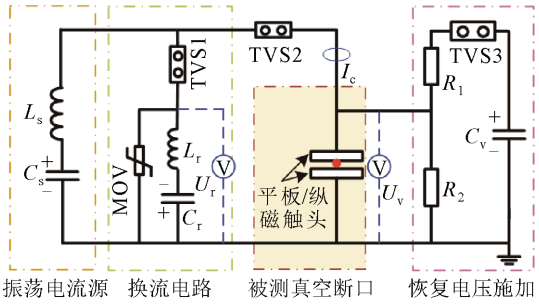


图 21 断口介质恢复试验电路原理图[25]

Fig.21 Schematic diagram of the recovery test circuit[25]

路器的短路电流开断波形，开断峰值电流为 1 kA，开断过电压为 755 V。验证了所研制的固态断路器在低压直流领域应用的电流分断能力以及稳定性。

针对直流开断工况下介质恢复特性的研究需求，西安交通大学设计并搭建了用于测量真空灭弧室介质恢复强度的实验电路[25]，其电路拓扑如图 21 所示，其中 U_r 表示换流电路电压，I_c 代表电弧电流，U_V 代表介质恢复电压。其中振荡电流源可以产生不同频率的正弦电流，峰值电流可达 60 kA；换流电路通过预充电电容和电感模拟不同开断工况的电流转移过程，电流转移能力以及过零的 di/dt；可调高压脉冲电容用于模拟恢复电压的时间。图 22 给出了介质恢复的典型测试波形。图 23 分别给出了断口施加恢复电压后成功耐受和击穿两种情况的波形，包含燃弧(阶段Ⅰ)、电流下降(阶段Ⅱ)和零休(阶段Ⅲ)这 3 个阶段。

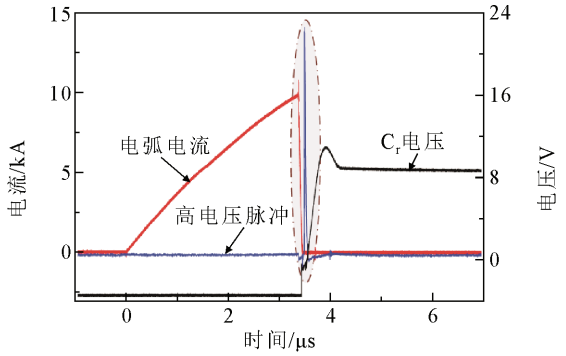


图 22 典型介质恢复试验波形[25]

Fig.22 Typical waveforms of the dielectric recovery test[25]

通过研究，揭示了不同燃弧时间和电流条件下断口弧后介质恢复强度随恢复时间的变化规律[25,40]，获得不同燃弧电流、燃弧时间等条件下弧后数十微秒内的介质恢复强度及其影响因素。特别地，发现对于断口燃弧电流较大的情况，存在一个最佳的燃弧时间，结果如图 24 所示。随着燃弧时间的增加，开距增大，燃弧能量也增大，但是开距对介质恢复的影响更大，更有利于介质恢复，因此燃弧电流<30 kA 时介质恢复强度随着燃弧时间的增加而提升；但是当燃弧电流达到 30 kA 及以上时，从图 24 中可知，当燃弧时间>1000 μs 时，断口介质恢复强度反而降低，说明在燃弧电流>30 kA 时，断口燃弧能量对介质恢复的影响更大，不利于耐受恢复过电压，因此存在一个最佳的燃弧时间，并且燃弧电流越大，最佳燃弧时间越短，断口弧后介质恢复强度越好[46]。

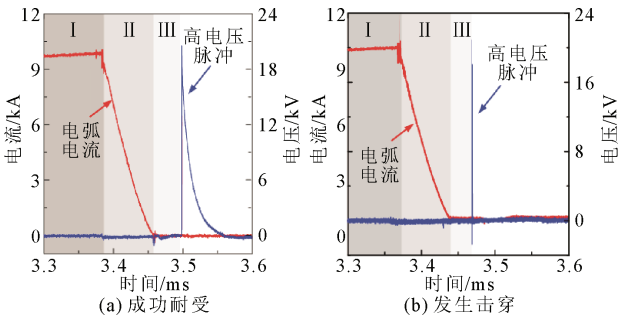


图 23 断口承受恢复电压波形[25]

Fig.23 Detailed waveforms of recovery voltage across the fracture[25]

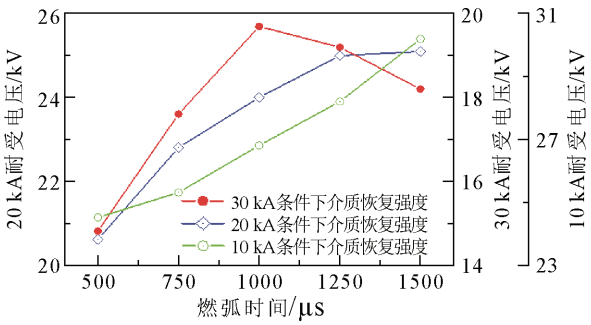


图 24 不同燃弧电流、燃弧时间介质恢复特性对比[40]

Fig.24 Comparison of dielectric recovery characteristics for different arc currents and arc-firing times[40]

2.4　高速机械开关技术

高速机械开关是直流断路器中承载额定电流、快速建立绝缘间隙的关键设备，目前采用汤姆逊线圈作为驱动机构，也称为电磁斥力机构，其原理如图 25 所示。当脉冲电流 i_c 放电到汤姆逊线圈时，瞬态磁场会在金属盘中上产生相反方向的涡流 i_P，进而形成巨大的电磁斥力，驱动金属盘带动机构及触头系统运动。

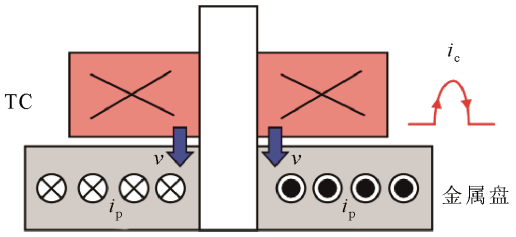
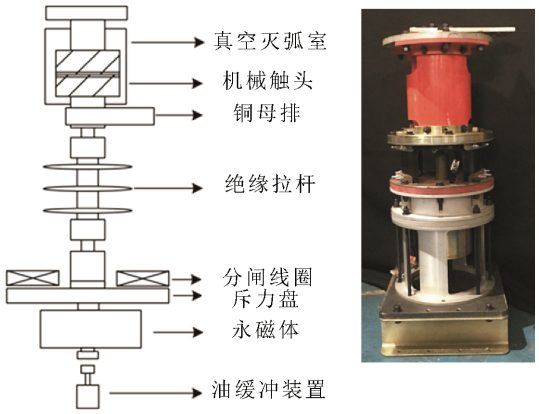


图 25　电磁斥力机构的工作原理

Fig.25　Working principle of the electromagnetic repulsion mechanism

由于高速开关的分闸速度快，运动过程中的冲击力大，难以提高其使用寿命。为了解决这个问题，笔者团队提出了一种将基于电磁斥力机构和永磁机构相结合的高速机械开关方案，典型结构如图 26 所示。一方面利用电磁斥力机构实现高速分闸，可在 2~3 ms 内实现断口分闸至指定的开距，满足直流开断的耐压要求；另一方面利用永磁机构提供大的合闸保护力，实现浪涌耐受和低额定通流损耗。此外，利用永磁机构实现正常机构分合可以显著提升高速机械开关的寿命。

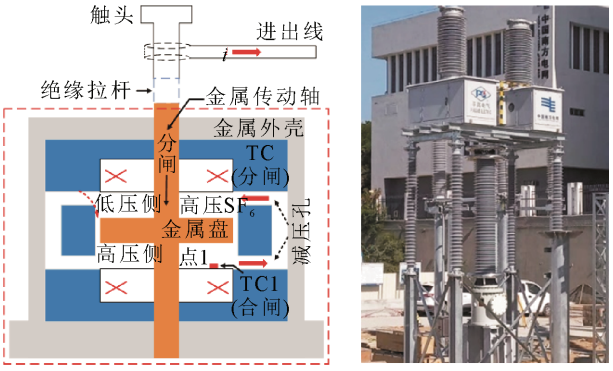


(a) 结构　　(b) 实物图

图 26　高速机械开关

Fig.26　High-speed mechanical switches

由于高速机械开关需要满足高速驱动和高速制动的要求，其动作过程的缓冲制动对于实现快速分合闸、保证机构寿命也至关重要。传统高速机械开关制动主要外加油缓冲器，通过碰撞缓冲器吸收机构可动部件动能，进而实现制动。但是，外加缓冲器一方面会导致机构成本和体积增加，另一方面油缓冲碰撞也会降低机构使用寿命。为此，西安交通大学提出了一种高速电磁驱动和气压缓冲一体化的高速机械开关新结构[47]，其原理如图 27(a)所示。利用斥力机构金属盘高速驱动引起的流场变化和气压差实现自动阻尼缓冲。该方案具有分闸前期气压阻力非常小，不影响高速驱动，分闸后期气压差大、气压阻力大，缓冲效果显著的特点，并且缓冲效果可以随着分闸速度自动调整，分闸速度越高，气压阻力越强，缓冲效果越好，攻克了传统油缓冲器对于不同分闸速度无法自动适应的问题。基于上述原理，开发了系列高速机械开关并工程应用。



(a) 分闸原理　　(b) 样机图

图 27　气压缓冲高速机械开关[47]

Fig.27　Air pressure buffer high-speed mechanical switch[47]

3　结论及展望

在双碳战略以及绿色可持续发展的能源目标的指引下，大规模新能源并网消纳以及局部分布式新能源接入是未来电网发展的重要形态，进而催生电网系统的直流化不断深入发展。直流快速开断技术作为直流电网发展的瓶颈问题之一，是电气工程领域需要重点突破的研究热点。目前直流快速开断技术仍存在诸多不足，例如电流转移方案成本高、固态式开断方案通态损耗大、高速机械开关难以兼顾速度和可靠性等。总体来说，未来直流快速开断技术发展需要从如下几个方面取得突破。

1）探索和发展经济型高压直流快速开断技术，突破传统电力电子器件或者人工过零开断方案存在

的控制复杂、成本高等瓶颈问题，为未来多端柔直电网发展提供关键装备保障。

2）发展新的高速机械开关技术，提升断口稳态通流能力、暂态绝缘耐受能力以及分闸速度特性，进而更好地适应高电压、快速开断的直流断路器应用需求。

3）研发适用于直流开断的专用电力电子器件，例如专用的 IGCT、IGBT 器件，重点突破器件低通流损耗与高关断能力，为直流断路器技术性能的进一步提升奠定基础。

参考文献 References

[1] SLEIMAN M, AL HAGE ALI A, BLANCHETTE H F, et al. A survey on modeling, control, and dc-fault protection of modular multilevel converters for HVDC systems[C]// 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Istanbul, Turkey: IEEE, 2014: 2149-2154.

[2] WANG J, BURGOS R, BOROYEVICH D. A survey on the modular multilevel converters-modeling, modulation and controls[C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, USA: IEEE, 2013: 3984-3991.

[3] ZUÑIGA-GARCIA L, ZARAGOZA-HERNÁNDEZ A, NADAL-MARTÍNEZ J M, et al. MMC technology and its participation in the integration of variable renewable energies and implementation of DC grids[C]//2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). Ixtapa, Mexico: IEEE, 2014: 1-6.

[4] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-Bus-applications[C]// The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 502-507.

[5] NAMI A, LIANG J Q, DIJKHUIZEN F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36.

[6] 刘晨阳，王青龙，柴卫强，等. 应用于张北四端柔直工程±535 kV 混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3638-3646.
LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Evelopment and experimental research of ±535 kV hybrid dc circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3638-3646.

[7] PANG H, WEI X G. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC Grid[C]// 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan: IEEE, 2018: 2343-2351.

[8] 杨 柳，黎小林，许树楷，等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术，2015，9(1)：63-67.
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.

[9] LU Y N, SU L, YUAN D, et al. Design of control and protection system for medium-low voltage flexible DC distribution network[C]// Proceedings of the 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China: IEEE, 2019: 1-8.

[10] 周万迪，张 蓓，魏晓光，等. 一种基于电容可控振荡换流的新型直流断路器[J]. 中国电机工程学报，2023，43(3)：1123-1131.
ZHOU Wandi, ZHANG Bei, WEI Xiaoguang, et al. A novel capacitor controlled oscillation commutation DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1123-1131.

[11] 吴益飞，肖 宇，杨 飞，等. 基于磁耦合电流转移的阻尼式直流开断技术[J]. 电力系统自动化，2022，46(13)：168-176.
WU Yifei, XIAO Yu, YANG Fei, et al. Damping DC breaking technology based on magnetic induction current commutation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 168-176.

[12] 薛士敏，陈 萧，刘白冰，等. 一种新型限流式混合直流断路器拓扑[J]. 中国电机工程学报，2022，42(7)：2508-2520.
XUE Shimin, CHEN Xiao, LIU Baibing, et al. A novel current-limiting hybrid DC circuit breaker topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2508-2520.

[13] 黄亚峰，周 银，严干贵，等. 基于电容换流的限流型高压直流断路器[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3098-3108.
HUANG Yafeng, ZHOU Yin, YAN Gangui, et al. Current-limiting high-voltage DC circuit breaker based on capacitor commutation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3098-3108.

[14] 丁 璨，聂太平，陈天凡，等. 基于 IGBT 的新型固态直流断路器设计与分析[J]. 高压电器，2022，58(4)：17-24.
DING Can, NIE Taiping, CHEN Tianfan, et al. Design and analysis of new type solid-state DC circuit breaker based on IGBT[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 17-24.

[15] 严 鑫，余占清，屈 鲁，等. 基于逆阻型 IGCT 器件的固态式直流断路器设计及研制[J/OL]. 高电压技术，2023：1-10[2024-02-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20230643.
YAN Xin, YU Zhanqing, QU Lu, et al. Design and development of solid-state DC circuit breaker based on reverse blocking IGCT[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-10[2024-02-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230643.

[16] 范兴明，李 涛，张 鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J/OL]. 高电压技术，2023：1-16[2024-02-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230696.
FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Research and application of medium and high voltage DC circuit breaker[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-16[2024-02-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20230696.

[17] 郭彦勋，许 壮，王要强，等. 适用于直流电网的晶闸管型直流断路器[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2029-2037.
GUO Yanxun, XU Zhuang, WANG Yaoqiang, et al. A thyristor-based DC circuit breaker suitable for DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2029-2037.

[18] 荣命哲，吴 翊，杨 飞. 直流开断基础及技术应用[M]. 北京：科学出版社，2021.
RONG Mingzhe, WU Yi, YANG Fei. Fundamentals and technical applications of DC interruption[M]. Beijing, China: Science Press, 2021.

[19] SHUKLA A, DEMETRIADES G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 627-641.

[20] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers-a key innovation for reliable HVDC grids[C]// The Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids, CIGRE Symposium. Bologna, Italy: CIGRE, 2011: 1-8.

[21] 李骊智，魏晓光，周万迪，等. 混合式直流断路器电流转移开关核心性能研究与参数设计[J]. 中国电机工程学报，2021，41(24)：8560-8570.
LI Pengzhi, WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, et al. Research on core performance and parameter design of current commutation switch in hybrid HVDC CB[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24):

8560-8570.

[22] CALLAVIK M, BLOMBERG A, HÄFNER J, et al. The hybrid HVDC breaker[R]. [S.l.]: ABB Grid Systems, 2012: 143-152.

[23] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. Hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2330-2338.

[24] WU Y F, WU Y, RONG M Z, et al. Research on a novel two-stage direct current hybrid circuit breaker[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 084707.

[25] XIAO Y, WU Y, WU Y F, et al. Study on the dielectric recovery strength of vacuum interrupter in MVDC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(9): 7158-7166.

[26] 万重山，裴翔羽，周万迪，等. 基于电流注入的新型混合式直流断路器[J]. 中国电机工程学报，2023，43(12)：4726-4735.
WAN Chongshan, PEI Xiangyu, ZHOU Wandi, et al. Novel hybrid DC circuit breaker based on current injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4726-4735.

[27] 彭振东，杨晨光，李　博，等. 直流真空断路器大电流强迫换流分断特性分析与验证[J]. 高电压技术，2020，46(2)：603-609.
PENG Zhendong, YANG Chenguang, LI Bo, et al. Analysis and test of the high current forced commutation interruption characteristics for a DC vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 603-609.

[28] CALLAVIK M, BLOMBERG A, HAFNER J, et al. Breakthrough![hybrid HVDC breaker][R]. [S.l.]: ABB Rev, 2013, 2: 7-13.

[29] 汤广福，王高勇，贺之渊，等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[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.

[30] GREENWOOD A N, LEE T H. Theory and application of the commutation principle for HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, 91(4): 1570-1574.

[31] 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.

[32] LIU L H, ZHUANG J W, WANG C, et al. A Hybrid DC vacuum circuit breaker for medium voltage: principle and first measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2096-2101.

[33] 张祖安，黎小林，陈　名，等. 160 kV 超快速机械式高压直流断路器的研制[J]. 电网技术，2018，42(7)：2331-2338.
ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research and development of 160 kV ultra-fast mechanical HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2331-2338.

[34] WU Y, HU Y, WU Y F, et al. Investigation of an active current injection DC circuit breaker based on a magnetic induction current commutation module[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1809-1817.

[35] WU Y F, WU Y, YANG F, et al. A novel current injection DC circuit breaker integrating current commutation and energy dissipation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2861-2869.

[36] YI Q, YANG F, ZHUANG W B, et al. Transient current balancing of parallel IGCTs in 10-kV/10-kA hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10055-10065.

[37] 张翔宇，余占清，黄瑜珑，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.

[38] XIAO Y, WU Y F, WU Y, et al. High-capacity MVDC interruption based on IGCT current sharing integrated with freewheeling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10982-10991.

[39] WEN W J, HUANG Y L, AL-DWEIKAT M, et al. Research on operating mechanism for ultra-fast 40.5-kV vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(6): 2553-2560.

[40] XIAO Y, WU Y, WU Y F, et al. Study on dielectric recovery characteristic of vacuum interrupter after high frequency interruption[C]// 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019: 197-200.

[41] WU Y F, XIAO Y, WU Y, et al. Hybrid MVDC circuit breaker based on enhanced arc voltage of vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4776-4785.

[42] XIAO Y, WU Y, WU Y F, et al. A passive oscillation DC breaking scheme based on enhanced vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7344-7353.

[43] RODRIGUES R, ZHANG Y Z, RAHEJA U, et al. Robust 5 kA, 1 kV solid-state DC circuit breaker for next generation marine power systems[C]// 2021 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Arlington, USA: IEEE, 2021: 1-7.

[44] BELCHANDAN R K, XU X W, SHOUBAKI E, et al. Characterization and performance of 600 V 100 A Solid-State circuit breaker[C]// 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Charlotte, USA: IEEE, 2018: 1-4.

[45] 吴　鑫，陶闯闯，王景帅，等. 低压直流固态断路器关键技术研究[J]. 电器与能效管理技术，2024(1)：1-5.
WU Xin, TAO Chuangchuang, WANG Jingshuai, et al. Research on key technologies of low voltage DC solid state circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(1): 1-5.

[46] WU Y F, DONG S L, XIAO Y, et al. Research on dielectric recovery characteristic after large capacity DC interruption[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 3420-3423.

[47] WU Y F, WU Y, RONG M Z, et al. A new Thomson coil actuator: principle and analysis[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(11): 1644-1655.



吴益飞

1985—，男，博士，教授，博导

主要从事新能源并网关键装备及应用、直流电流限制与开断技术、电力电子器件封装及关断技术方面的研究工作

E-mail: yifei208@xjtu.edu.cn

WU Yifei

Ph.D., Professor



吴　翊(通信作者)

1975—，男，博士，教授，博导

主要从事电力电子与直流开断技术、智能电器与传感技术、电弧放电等离子体基础与应用方面的研究工作

E-mail: wuyic51@xjtu.edu.cn

WU Yi

Ph.D., Professor

收稿日期　2024-01-23　修回日期　2024-02-06　　编辑　曾文君