DOI：10.7500/AEPS20130624006

一种限流式混合直流断路器方案

江道灼[1]，张 弛[1]，郑 欢[1]，叶李心[1]，严玉婷[2]
（1. 浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027；2. 深圳供电局有限公司，广东省深圳市 518001）

摘要：直流输电与交流输电相比，具有线损低、不存在系统同步运行稳定性问题等一系列优点。近年来，随着电压源型高压变流器等技术的迅速发展，柔性多端高压直流输电系统、直流输配电网以及直流断路器等关键技术与装备的研究受到了国内外的高度重视。文中简要阐述了机械式、全固态与混合式 3 类直流断路器的拓扑结构、工作原理、优缺点及国内外研究现状，指出高压直流断路器应以混合式为主要发展方向；提出一种限流式混合直流断路器方案并仿真验证了其可行性，该方案采用全/半控器件串联构成固态开关再与机械开关并联的混合开关结构及故障限流技术，可有效抑制直流短路电流上升率，降低故障判断灵敏性与机械开关速动性的要求，减少高压应用场合下固态开关器件的串联数量（特别是绝缘栅双极型晶体管等价格昂贵的全控型器件），从而降低装置工程化实现的技术难度及其体积与成本。

关键词：高压直流断路器；主电路拓扑；器件串（并）联；能量转移与吸收

0 引言

近年来，随着电压源型高压变流器等技术的迅速发展，国内外对柔性多端高压直流输电系统、直流输配电网及相关技术的研究正日益深入[1-9]。与传统交流输电系统相比，直流输电系统不但具有线路损耗低、传输容量大、传输距离远，以及不存在系统同步运行稳定性问题等优点，而且便于可再生能源电源联网，充分提高可再生能源的利用率。实现柔性多端直流输电系统及直流输配电网的工程化应用还需解决一系列关键技术难题，其中之一就是高压直流断路器的研发。

研发高压直流断路器存在两大技术难题：①直流电流没有自然过零点，直流电弧不易熄灭；②直流系统阻抗较之交流系统要小得多，其短路电流增长极快。近年来，高压直流断路器受到国内外研究者的广泛关注，进行了诸多理论研究，并研制出了相应的样机与产品[10-22]。机械式高压直流断路器的试验样机主要出现在 20 世纪 70 至 80 年代：1984 年 2 月，BBC 公司研制出的 500 kV/2.2 kA 机械式高压直流断路器在美国太平洋直流联络工程的 CELILO 换流站进行了现场测试；1985 年，日立公司研制出 250 kV/8 kA 直流断路器并进行了实验室测试，东芝公司也研制出了 24 kV/100 kA 的真空直流开断装置；2000 年，ABB 公司和波兰 Lodz 大学合作开发了用于牵引系统的 3 kV/60 kA 真空直流开断装置的试验样机。由于机械式高压直流断路器在实现上存在较大的技术难度，20 世纪 80 年代开始，人们开始研究全固态型和混合型直流断路器实现技术并研制出实用化工业样机：1987 年美国德克萨斯州大学研制出一台 200 V/15 A 全固态直流断路器，2005 年美国电力电子系统研究中心研制出 2.5 kV/1.5 kA 和 4.5 kV/4 kA 全固态直流断路器样机，2012 年底 ALSTOM 公司研制出 120 kV/1.5 kA、最大开断电流达 7.5 kA 的全固态直流断路器样机；2006 年瑞典的 Jean Meyer 与 Alfred Rufer 研制出基于集成门极换向晶闸管（IGCT）与快速开关机构的 4 kA/1.5 kV 混合式直流断路器样机并进行了实验，2011 年意大利运用 IGCT 串并联技术结合机械开关研制出 1.5 kV/10 kA 的混合式直流断路器样机并进行了实验测试，2012 年 Elena Gaio 和 Alberto Maistrello 等人合作研制出 25.7 kA/2.8 kV 的混合式直流断路器样机并运用于日本 JT-60SA 超导电磁系统，2012 年 11 月 ABB 公司研制出基于绝缘栅双极型晶体管（IGBT）阀组串联技术与快速机械开关的开断能力 9 kA、开断时间 5 ms 的 320 kV/2.6 kA 混合式直流断路器。国内针对高压直流断路器也开展了一些研究，但迄今仍处于原理性小样机试制和验证阶段。

本文首先简要阐述机械式、全固态与混合式这 3 种类型直流断路器的拓扑结构、工作原理及优缺

收稿日期：2013-06-24；修回日期：2013-08-01。
国家高技术研究发展计划（863 计划）资助项目（2013AA050103）。

点，在此基础上提出一种限流式混合直流断路器方案，给出了原理性拓扑结构，分析了工作原理，并通过建模仿真验证了其可行性。

1　高压直流断路器概述

高压直流断路器大体可分为 3 种类型：基于机械开关（机械式常规断路器）的机械式直流断路器、基于电力电子器件的全固态直流断路器，以及整合前两者优点的混合式直流断路器。

1.1　机械式直流断路器

直流电不存在电流自然过零点，灭弧困难。在低压小电流应用场合，可以通过增大电弧电压、分段串接限流电阻或控制磁场气体放电断流等方法实现强迫直流开断熄弧[10]。但在高压大电流应用场合，上述方法不可行，一般是通过适当改造常规机械式交流断路器结构，并增加能够在开断直流电流过程中自动形成高频振荡电流过零点的振荡换流回路，以解决机械开关切断高压大直流电流时的灭弧问题。早在 19 世纪 70 年代初，美国 GE 公司的专家就提出了采用振荡换流熄弧的机械式直流断路器[11]，其拓扑结构如图 1 所示，主要由机械开关、振荡换流回路，以及吸收、放电回路等部分构成。

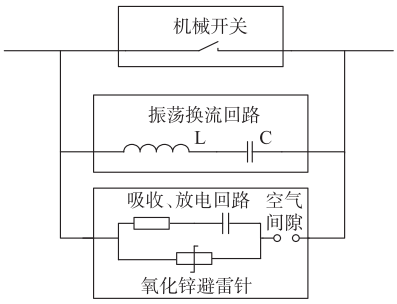

图 1　机械式直流断路器拓扑结构
Fig.1　Topology structure of mechanical type DC-breaker

20 世纪 70 年代后期，BBC 公司开始研制 500 kV/2.2 kA 机械式高压直流断路器，并于 1985 年 2 月被安装在美国太平洋直流联络工程的 CELILO 换流站中进行了现场测试[12-13]。该断路器由 4 个结构完全相同的机械开断模块串联而成，其拓扑结构如图 2 所示。

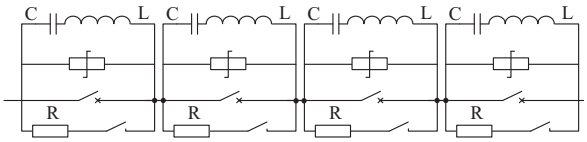

图 2　机械式高压直流断路器拓扑结构
Fig.2　Topology structure of mechanical type high voltage DC-breaker

图中振荡换流回路一般由 LC 谐振电路组成；为防止开断过程中可能产生的高频振荡过电压和大电流损坏设备，通常需在振荡换流回路两端并联相应的能量吸收与过压放电电路[14]。

机械式直流断路器的灭弧方式一般分为自然振荡灭弧与强制振荡灭弧[23]。自然振荡灭弧直接利用电弧电压随电流增大而下降的非线性负电阻效应，通过振荡回路与线路电感产生振荡电流以构造电流过零点；其控制方式简单可靠，但对电路参数依赖性大，元件选择要求高，且开断电流能力较弱，不适用于高压大容量系统。强制振荡灭弧则是动作前预先对振荡回路中的电容进行充电，开断时通过控制接入振荡回路，使其产生高频振荡电流迫使电弧电流强制过零，从而实现断路器的开断灭弧。强制振荡灭弧相对自然振荡灭弧，可产生幅值较大的振荡电流，开断容量较大且成功率高；但需增加振荡回路电容预充电与开断时控制产生强制振荡电流等环节，装置控制实现复杂，成本高。

机械式直流断路器具有运行稳定、带载能力强、通态损耗小等优点，但其触头易被开断电弧损坏，开断能力有限，且故障电流切除时间较长，易造成事故扩大化，破坏系统稳定性[15]。机械式直流断路器因其自身结构的制约，难以实现灵活控制与短路电流的快速切断，不能满足高压直流输配电网应用场合下对断路器的苛刻要求。

1.2　固态直流断路器

20 世纪 70 年代末，出现了以晶闸管（SCR）作为开关元件的直流断路器，因其采用电力电子器件实现对电流的通、断控制，故被称为固态直流断路器。20 世纪 80 年代到 90 年代，随着门极可关断晶闸管（GTO）、IGBT、发射极关断晶闸管（ETO）、IGCT 等全控器件的诞生，固态直流断路器得到了迅速的发展。

固态直流断路器根据其所采用电力电子器件类型的不同，可划分为如下 2 类[24]。

1）半控型固态直流断路器，其拓扑结构如图 3 所示。半控型器件主要以 SCR 为代表，具有容量大、通态压降小、损耗低、价格低等优点，是最早用于研发全固态断路器的器件之一。这种固态直流断路器理论研究已较成熟，其工作原理、拓扑结构简单，且控制策略容易实现，具有较高的可靠性，工业应用广泛。但 SCR 为半控型器件，实现直流关断需增加振荡换流回路产生电流过零点，电路结构复杂，体积较大；同时 SCR 工作频率相对较低，基于其构成的固态直流断路器开断速度也受到了一定的限制。

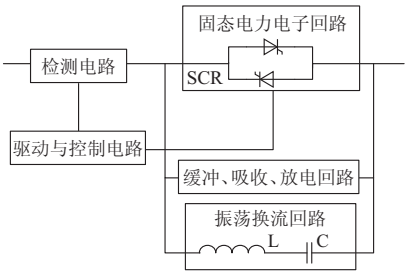

图 3 半控型全固态直流断路器拓扑结构
Fig.3 Topology structure of half-controlled all-solid type DC-breaker

2)全控型固态直流断路器,由于 GTO,IGBT,IGCT,ETO 等全控型电力电子器件通、断均可控,因此,基于其的固态直流断路器无需附加振荡换流回路,从而可实现快速关断,减少关断时间,降低切断故障电流值。1987 年,美国德克萨斯州大学研制出基于 GTO 的 200 V/15 A 固态直流断路器,其拓扑结构如图 4 所示[25]。

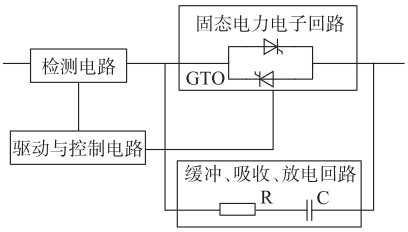

图 4 全控型全固态直流断路器拓扑结构
Fig.4 Topology structure of fully-controlled all-solid type DC-breaker

GTO 属于电流驱动型器件,静态特性好,基于其构成的直流断路器具有通态容量大的特点;但 GTO 通态压降与损耗大、开关时间相对较长(与 IGBT 等相比)、动作速度较慢,尤其是门极驱动功率大(特别是关断时)、驱动电路复杂等缺点限制了其在直流断路器领域的应用。IGBT 为电压驱动型器件,动作速度快,通态压降和损耗方面与 GTO 大致相同,但其单管容量则比 GTO 小,适用于容量较小的场合。基于 IGCT 的直流断路器则因 IGCT 的大容量、低导通损耗和强大的硬关断能力等优点,近年来受到广大研究人员的青睐,但 IGCT 价格昂贵且目前工业化生产技术并不成熟,离工程化应用还有一定的距离。

相对机械式直流断路器,固态直流断路器具有无触头、投切快速无弧无声响、开关时刻准确可控、工作可靠性高、寿命长等优点,特别适用于直流输配电网等速动性要求高的场合。但固态直流断路器存在容易过压过流、器件通态损耗高、冷却系统笨重,以及现阶段成本较高等不足之处,这在一定程度上制约了其工业化应用[25]。

1.3 混合式直流断路器

20 世纪 90 年代,T. Genji 等人提出一种基于真空断路器和固态开关构成的混合式直流断路器,综合了机械开关良好的静态特性与电力电子器件良好的动态性能,文献[26]对其进行一定分析。

混合式直流断路器根据换流关断原理的不同,可分为自然换流关断型与强制换流关断型 2 种。

1)自然换流关断型混合式直流断路器的固态开关部分一般由 GTO,IGBT,IGCT 等全控型电力电子器件构成(拓扑结构见图 5),其分断基本原理如下:利用机械开关分断时产生的电弧电压,为固态开关(已施加触发脉冲)建立阳极正向电压,使其顺利导通;固态开关导通后,由于开关触点间电弧电阻大于固态开关导通电阻,使得电流能够自然地从机械开关换流至固态开关,从而保证机械开关在低压小电流下顺利分断;机械开关分断后立即关断固态开关,从而切断电流通路。

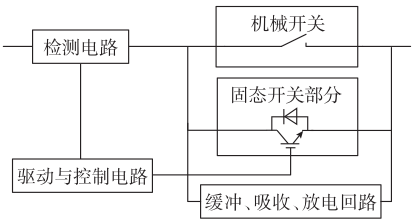

图 5 自然换流关断型混合式直流断路器拓扑结构
Fig.5 Topology structure of mechanical-solid hybrid DC-breaker (natural commutation)

采用自然换流关断的混合式直流断路器,其开断电流能力及工作电压等级取决于电力电子器件。由于目前 IGBT 等全控型电力电子器件单管额定电压、电流均有限,在高压、大电流应用场合下,解决多管串、并联等一系列技术问题难度较大,因此,这种类型的直流断路器多用于容量较小的场合。

2)强制换流关断型混合式直流断路器的换流关断原理类似于机械式直流断路器,即也采用电感、电容串联谐振回路产生谐振电流,从而制造电流过零点实现快速开断与灭弧。文献[27]提出一种基于高速斥力开关的强制换流关断型混合式直流断路器方案,其拓扑结构如图 6 所示。该方案中固态开关部分由 SCR、功率二极管及 LC 谐振电路等构成,是一种可强制关断的半控型双向桥式开关电路。这种强制换流关断型混合式直流断路器可适用于容量较大的场合,但因固态开关采用半控型器件,且须借助谐振回路才能实现换流关断,故其结构复杂、体积较大,可控性与关断速度也要差些(与图 5 相比)。

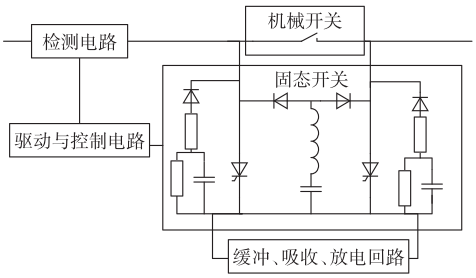

图 6　强制换流型混合式直流断路器拓扑结构
Fig.6　Topology structure of mechanical-solid hybrid DC-breaker (forced commutation)

混合式直流断路器综合了机械式断路器与固态断路器的优点，具有通态损耗小、开断快速可控、无弧(微弧)无响声、开关寿命长、可靠性高、无需专用冷却设备等优点，是目前高压直流断路器研发的主要方向[28-29]。

2　限流式混合直流断路器

2.1　限流式混合直流断路器的提出

2012 年 ABB 公司研制出的混合式高压直流断路器的拓扑结构如图 7 所示[22]。

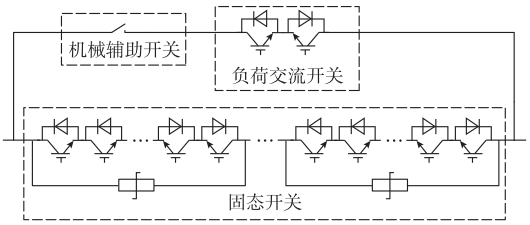

图 7　混合式高压直流断路器拓扑结构
Fig.7　Topology structure of high-voltage hybrid DC-breaker

该直流断路器中的固态开关采用全 IGBT 组件串联构成，且没有采用限流开断技术，高压应用场合下需解决大量 IGBT 串联均压等问题，同时必须具备迅速切断直流短路电流的能力，以尽量降低固态开关器件所承受的短路电流及应力，这对故障判断的灵敏性及机械开关的速动性等提出了极高要求，工程实现上难度较大，且成本较高。

针对以上 2 个问题，本文提出一种基于故障限流技术、机械开关及混合型固态开关(由全/半控电力电子器件混合构成)的限流式混合直流断路器方案，其拓扑结构如图 8 所示。图中，机械开关用于导通正常工作电流，降低装置通态损耗(从而省去辅助冷却设备)，要求具有快速动作特性；混合型固态开关由 IGBT 阀组 T1 及 SCR 阀组 T2 串联构成，充分利用 IGBT 器件的快速可控性和 SCR 器件额定电压高、电流大、价格低等优点，从而有效降低该部分体积与成本；缓冲、吸收电路由电阻-电容缓冲电路与氧化锌避雷器并联构成，用于缓冲吸收开断时线路电感能量、降低固态开关电压上升率和保护固态开关器件不受过压威胁；限流电路由限流电感及其能量释放回路构成，其功能是降低直流短路电流上升率，从而降低对机械开关速动性的要求。另外，拓扑结构中还包含一个续流二极管 D，其作用是开断过程中及结束后为储存在直流负载侧的能量提供释放回路。

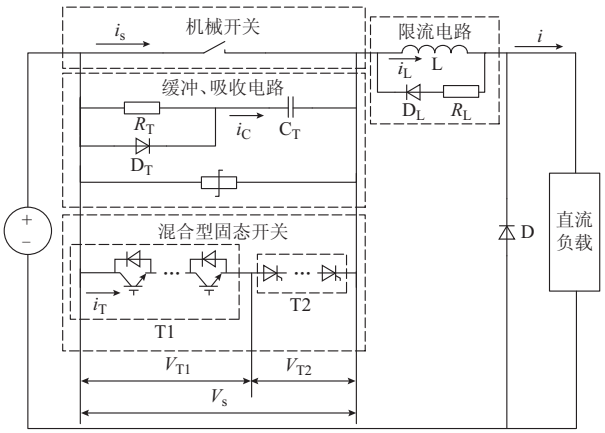

图 8　限流式混合直流断路器拓扑结构
Fig.8　Topology structure of current-limiting hybrid DC-breaker

2.2　限流式混合直流断路器工作原理

结合图 8 阐述限流式混合直流断路器工作原理如下。

1)合闸过程：触发固态开关使其导通，紧接着闭合机械开关使其在零电压下导通，确认导通后关断固态开关使其退出运行；开关闭合后在限流电感的作用下，直流电流逐渐从零上升到稳态值，亦即限流电感在合闸初期阶段(充磁过程)具有抑制直流电流上升率的作用，相当于对合闸过程起到了缓冲作用。合闸过程结束后，直流电源经机械开关向负载供电，限流电感只对直流纹波具有平抑作用，因此装置通态压降与损耗均很小。

2)分闸过程：包括正常分闸与短路分闸过程，其工作原理相对复杂。正常分闸与短路分闸过程基本相同，区别只是前者分断正常工作电流，而后者分断短路电流(限流电抗参与抑制初期短路电流上升率)。当直流负载侧发生短路故障时，限流式混合直流断路器的详细分闸过程及其各部分电压、电流等的分析波形如图 9 所示。图中，λ 为固体开关驱动信号。

t_1 时刻直流负载侧发生短路故障，装置的限流环节无延时动作，限流电感串入主回路抑制初期直

流短路电流上升率；t_2 时刻装置检测到短路电流超过动作设定值，立即发出分断机械开关与触通固态开关信号，此后机械开关经一段时间延时后开始分闸起弧（t_3 时刻），触头间的电弧电压逐渐升高，而固态开关则处于“预导通”状态；t_4 时刻固态开关在电弧电压达到其临界导通值时立即从“预导通”进入导通状态，并将电弧电压钳位在其通态压降上，短路电流则开始快速从机械开关“转移”到固态开关中；t_5 时刻机械开关在低电压（约为固态开关通态压降）微小电流下顺利分断；t_6 时刻确认机械开关分断，向固态开关发出关断信号，完成关断操作。

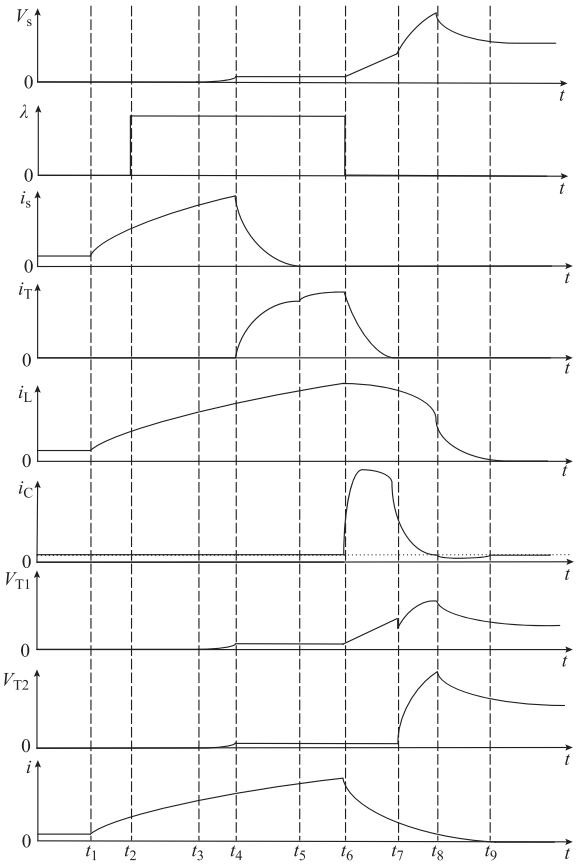

图 9 限流式混合直流断路器分闸过程分析波形
Fig.9 Analysis waveform of current-limiting hybrid DC-breaker during breaking process

向固态开关发出关断信号后，其 IGBT 阀组 T1 首先迅速关断，限流电感（及负载）开始续流释能；而 SCR 阀组 T2 还需经过一段时间（微秒级）才能彻底恢复阻断能力。该段时间内阀组 T1 将承担全部开断电压，但此期间电阻-电容缓冲电路自动投入工作，有效减缓开断电压上升速度，以确保阀组 T1 所承担的开断电压在其安全工作区范围内。阀组 T2 彻底恢复阻断能力后，将承担绝大部分的开断电压（即线路电压），从而确保阀组 T1 的绝缘安全。

2.3 限流式混合直流断路器开断过程仿真验证

利用 PSCAD 仿真软件对所提出的限流式直流断路器进行建模仿真。仿真电路如图 8 所示，参数如下：直流电源 110 kV；机械开关具有足够快的动作速度，采用 Cassie 电弧仿真模型；固态开关开通时间为 10 μs，关断时间为 400 μs（即 SCR 阀组 T2 的导通时间和零电流下正向阻断能力恢复时间）；缓冲电路电容为 1 mF、电阻为 50 Ω；限流电路电感为 100 mH、电阻为 2 Ω；线路电阻为 1 Ω、电感为 5 mH；负载电阻为 55 Ω。

开断过程仿真波形见附录 A 图 A1，与原理分析相符。图中假设 0.5 s 时负载侧线路发生接地短路故障，2 ms 后故障确认并同时发出关断机械开关、开通固态开关信号，机械开关开始分断。则 0.502 5 s 左右固态开关正式导通，短路电流快速从机械开关转移到固态开关；0.505 s 时刻确认机械开关在低电压微小电流下彻底分断并向固态开关发出关断信号，再经 400 μs（该段时间内开断电压由 IGBT 阀组 T1 承担）延时后 SCR 阀组 T2 恢复正向阻断能力，固态开关彻底关断，短路故障被切除。

按所给参数，限流式混合直流断路器切除短路故障时间约为 6 ms（其中故障判断时间为 2 ms，换流及确认机械开关分断时间约为 3 ms，固态开关关断及能量释放等时间共约为 1 ms），直流开断电流约 8 kA。

3 结论

1）本文简要阐述了直流断路器的国内外研究现状，分析了机械式、全固态与混合式 3 类直流断路器的拓扑结构、工作原理和优缺点，指出基于机械开关并联固态开关结构的混合式直流断路器具有开断快速可控、无（微）弧无响声、开关寿命长、可靠性高、通态损耗小及无需专用冷却设备等一系列优点，应作为高压直流断路器的主要发展方向。

2）提出一种限流式混合直流断路器方案，与已有混合式直流断路器方案相比，该方案的突出特点是：与机械开关并联的混合型固态开关基于全控（IGBT）、半控（SCR）型电力电子器件混合构成，充分利用全控型功率器件的快速可控性及半控型器件容量大（耐压水平高）、价格便宜的优点，从而减小装置的体积与成本；采用故障限流技术抑制直流短路电流上升率，从而降低了对故障判断灵敏性和机械开关速动性的要求，以及装置工程化实现的技术难度。

3）详细分析了限流式混合直流断路器的工作原

理，并在 PSCAD 上进行了建模仿真，验证了该方案的可行性。

附录见本刊网络版（http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx）。

参考文献

[1] 江道灼，郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化，2012，36(8)：98-104.
JIANG Daozhuo，ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(8)：98-104.

[2] STARKE M，FANGXING L，TOLBERT L，et al. AC vs DC distribution：maximum transfer capability[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting：Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century，July 20-24，2008，Pittsburgh，PA，USA：1-6.

[3] 凌晨，葛宝明，毕大强.配电网中的电力电子变压器研究[J].电力系统保护与控制，2012，40(2)：34-39.
LING Chen，GE Baoming，BI Daqiang. A power electronic transformer applied to distribution system[J]. Power System Protection and Control，2012，40(2)：34-39.

[4] 黄文焘，邰能灵，范春菊，等.微电网结构特性分析与设计[J].电力系统保护与控制，2012，40(18)：149-155.
HUANG Wentao，TAI Nengling，FAN Chunju，et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control，2012，40(18)：149-155.

[5] DASTGEER F，KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference，September 27-30，2009，Adelaide，SA，USA：1-5.

[6] MEYER C，HOIING M，PETERSON A，et al. Control and design of DC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Trans on Industry Applications，2007，43(6)：1475-1482.

[7] HERTEM D V，GHANDHARI M. Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid：obstacles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2010，14(9)：3156-3163.

[8] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. 2011.

[9] 温家良，吴锐，彭畅，等.直流电网在中国的应用前景分析[J].中国电机工程学报，2012，32(2)：7-12.
WEN Jialiang，WU Rui，PENG Chang，et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE，2012，32(2)：7-12.

[10] 王容华，刘云.直流开断方法分析比较[J].电工材料，2011(4)：40-45.
WANG Ronghua，LIU Yun. Analysis and comparison of DC interruption techniques of switches[J]. Electrical Engineering Materials，2011(4)：40-45.

[11] GREENWOOD A N，BARKAN P，KRACHT W C. HVDC vacuum circuit breaker[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems，1972，PAS-91(4)：1575-1588.

[12] BACHMANN B，MAUTHE G，RUOSS E，et al. Development of a 500 kV airblast HVDC circuit breaker[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems，1985，104(9)：2460-2466.

[13] VITHAYATHIL J，COURTS L，PETERSON G，et al. HVDC circuit breaker development and field tests[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems，1985，104(10)：2693-2705.

[14] WANG Jun，NING Tao，LI Zhihua，et al. A new method of automatic monitoring DC breaker by using GPRS technique [C]// IEEE International Conference on Computer Vision，August 20-21，2011，Xi'an，China：113-120.

[15] 苏麟.混合式电力电子断路器驱动保护及串并联等关键技术研究[D].南京：东南大学，2005.

[16] GELDER P，FERREIRA J. Zero volt switching hybrid DC circuit breakers[C]// IEEE Industry Applications Conference，October 8-12，2000，Rome，Italy：2923-2927.

[17] NOVELLO L，GAIO E，PIOVAN R. Feasibility study of a hybrid mechanical-static DC circuit breaker for superconducting magnet protection[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity，2009，19(2)：76-83.

[18] 梅军，郑建勇，胡敏强，等.基于 IGBT 软关断的混合式限流断路器结构与分析[J].电力系统自动化，2004，28(18)：59-62.
MEI Jun，ZHENG Jianyong，HU Minqiang，et al. Structure and analysis of a hybrid current limiting circuit breaker based on IGBT soft switching[J]. Automation of Electric Power Systems，2004，28(18)：59-62.

[19] NOVELLO L，BALDO F，FERRO A，et al. Development and testing of a 10 kA hybrid mechanical-static DC circuit breaker [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity，2011，21(6)：3621-3627.

[20] MEYER J，RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs)[J]. IEEE Trans on Power Delivery，2006，21(2)：646-651.

[21] GAIO E，MAISTRELLO A. Final design of the quench protection circuits for the JT-60SA superconducting magnets [J]. IEEE Trans on Plasma Science，2012，40(3)：557-563.

[22] CALLAVIK M，BLOMBERG A，HÄFNER J，et al. The hybrid HVDC breaker an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids[R]. 2012.

[23] 王帮田.高压直流断路器技术[J].高压电器，2011，42(6)：61-68.
WANG Bangtian. Technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus，2011，42(6)：61-68.

[24] 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.

[25] 赵阳.基于自然换流的混合式断路器研究[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2008.

[26] WANG Xiuhuan，WEN Jialiang，PENG Chang，et al. Simulation and test research for DC breakers of UHVDC transmission system [C]// International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application，January 6-7，2012，Sanya，China：1480-1485.

[27] 王晨,庄劲武,张晓锋,等.新型混合型限流断路器分析及试验[J].电力系统自动化,2010,34(15):60-65.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, et al. Analysis and test of novel hybrid current-limiting circuit breakers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 60-65.
[28] 胡杰,王莉,穆建国.直流固态断路器现状及应用前景[J].电力系统保护与控制,2009,37(19):145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 145-150.
[29] PIOVAN R. NOVELLO G. Performance analysis of a hybrid IGCTs-mechanical DC circuit breaker for quench protection of superconducting magnets[C]// IEEE 22nd Symposium on Fusion Engineering, June 17-21, 2007, Albuquerque, NM, USA: 1-4.

江道灼(1960—),男,通信作者,教授,主要研究方向:交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术。E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

张 弛(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向:直流断路器、直流配电网及电力电子在电力系统中的应用。E-mail: sashinseno@zju.edu.cn

郑 欢(1988—),女,博士研究生,主要研究方向:直流配电网及电力电子在电力系统中的应用。E-mail: 312682096@qq.com

(编辑 万志超)

A Scheme for Current-limiting Hybrid DC Circuit Breaker

JIANG Daozhuo[1], *ZHANG Chi*[1], *ZHENG Huan*[1], *YE Lixin*[1], *YAN Yuting*[2]
(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Shenzhen Power Supply Bureau Co. Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: In contrast to alternating current (AC) power transmission, direct current (DC) power transmission has a series of advantages, such as low line loss and nonexistence of the problem of system synchronous operation stability. In recent years, with the rapid development of voltage source converter technology with higher voltage, the study on flexible multi-terminal high voltage direct current transmission (HVDC) system, DC transmission and distribution power net, as well as the related key technologies and equipments such as the high-voltage DC circuit breaker (DC-breaker) has captured great attention from the community at home and abroad. The research status of three types of DC-breakers (spoken of as the mechanical type, all-solid-state and hybrid type DC-breakers) and their topologies, working principles, advantages as well as disadvantages are briefly treated. It is concluded that the hybrid type should be the main trend of development for high-voltage DC-breakers. Furthermore, a scheme of hybrid DC-breakers with fault current limiting is proposed, its feasibility verified through simulation. In this scheme the DC-breaker adopts the hybrid solid-state switch (composed of half and full gate-controlled devices in series connection) which is paralleled with a mechanical breaker involving the fault-current-limiting technology. Therefore the rising rate of short-circuit current can be effectively restrained, relieving the requirement on fault diagnosis sensitivity and mechanical breaker speed. Moreover, the series quantities of solid-state switching devices (especially the expensive full gate-controlled devices such as the insulated gate bipolar transistor) in high voltage application, and the technical difficulty and production costs etc will be reduced.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2013AA050103).

Key words: high-voltage direct current circuit breaker; main circuit topology; series and parallel devices; energy transfer and absorption

南方电网建成世界首个多端柔性直流输电工程

近日,南方电网广东汕头南澳多端柔性直流输电工程顺利投产,成为世界上首个多端柔性直流输电工程。南方电网也因此成为世界首个完全掌握多端柔性直流输电成套设备设计、试验、调试和运行全系列核心技术的企业。据悉,南澳多端柔性直流输电工程设计容量为 200 MW,直流电压等级为±160 kV,分别在南澳岛上的青澳、金牛各建设一座换流站,在大陆澄海区建设一座换流站,三站容量分别为 50 MW,100 MW 和 200 MW,建设直流电缆混合输电线路 40.7 km。整个工程所有核心设备均为国内首次研发,实现百分之百自主国产化。

【来源中国电力新闻网】