第 52 卷 第 2 期：743-753　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 743-753
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250259

基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器

李纪豪，裴翔羽，肖　铭，陈　杨
（电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学)，长沙 410114）

摘　要：混合式直流断路器是柔性直流输电系统实现故障线路选择性快速隔离的主流技术方案，现有的混合式直流断路器存在开断能力受限、成本高昂等问题。该文提出了一种基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器，通过系统正常运行时的电流对电容进行预充电，然后通过控制开关模块内电力电子器件的开断，使电容和电感产生谐振并振荡反向，辅助电流迅速转移，实现故障电流的快速分断。首先，该文阐述了开关模块单元的拓扑结构及其基本原理；其次，提出了基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器拓扑，并对其工作原理进行了详细阐述；然后，研究了所提断路器元件的选型策略；最后，基于张北柔性直流电网的仿真验证和技术性能对比分析表明：所提基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器开断能力强，有效减少了设备成本和占地面积，技术经济性能优越。

关键词：柔性直流电网；混合式直流断路器；电容自取能；辅助关断；开关模块单元；*LC* 谐振

A Hybrid DC Circuit Breaker Turned-off-assisted with Capacitance Self-charging

LI Jihao, PEI Xiangyu, XIAO Ming, CHEN Yang
(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid(Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China)

Abstract: The hybrid DC circuit breaker(HDCB) is the mainstream technical solution for achieving selective rapid isolation of fault lines in VSC-based DC transmission systems, existing hybrid high-voltage DC circuit breaker technologies face limitations such as constrained interruption capability and high costs. Therefore, an HDCB turned-off-assisted with capacitance self-charging (TWCS-HDCB) is proposed in this paper. By pre-charging capacitors with normal operating currents in the DC system and controlling the switching of power electronic devices in the module, resonance and oscillatory reversal between capacitors and inductors are generated to facilitate rapid current transfer, thereby achieving fast fault current interruption. Firstly, this paper elaborates on the topology and operational principles of the basic switching module unit. Next, the topology of TWCS-HDCB is proposed, and the working principle of TWCS-HDCB when breaking the fault current is studied. Then, the influence mechanism of the capacitance and inductance for the overall breaking performance is revealed, and the component selection method of the switch module unit is determined. Finally, simulation verification and technical performance comparison analysis based on Zhangbei VSC-based DC grid reveal that the proposed TWCS-HDCB has strong breaking capacity, effectively reduces equipment cost and floor area, and has superior technical and economic performance.

Key words: VSC-based DC grid; hybrid DC circuit breaker; capacitance self-charging; assisted turn-off; switch module unit; *LC* resonance

0　引言

柔性直流输电作为支撑高比例新能源并网的关键技术[1-3]，是助力我国构建具有更强新能源消纳能力的新型电力系统、实现双碳战略目标的重要路径之一[4-7]。高压直流断路器作为保障系统运行的核心保护装置，能够快速切断故障电流，实现电网各部分的灵活投切，最大限度地保障柔直系统的安全稳定运行，已成为目前高压直流领域的研究焦点[8-10]。

在机械开关与电力电子器件技术持续发展的背景下，高压直流断路器现阶段主要分为机械式、固态式及混合式直流断路器(hybrid DC circuit breaker, HDCB) 3 类[11-14]。混合式直流断路器综合利用了机械式直流断路器导通损耗低与固态式直流断路器分断速度快的优点，是柔性直流输电工程应

基金资助项目：国家自然科学基金(52277075)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277075).

用上最具发展前景的直流开断方案之一[15-18]。

然而，混合式直流断路器转移支路采用多模块绝缘栅双极型晶闸管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)串联拓扑设计以耐受暂态分断电压，使得单台造价昂贵[19-20]。此外，由于系统电压等级不断提升以及系统容量的扩大，使得混合式直流断路器的开断容量受到限制，这严重限制了其在柔性直流电网中的大规模应用[21-22]。2012 年 ABB 公司研制出最大分断电流为 8.5 kA 的 IGBT 串联混合式直流断路器，但其成本高昂并且动态均压技术困难，不适合大规模推广应用[23]。在此基础上，文献[24]应用子模块级联拓扑，并且采用二极管全桥实现双向开断以减少 IGBT 使用数量，使得在降低技术要求的前提下更加具有经济性。同时，将平波电抗器分别配置在断路器两侧，以降低能耗需求。但是所提拓扑的开断能力有限，在大容量高电压的场景下开断能力受到限制。文献[25]中转移支路直接采用固态开关和增加接地引流二极管，在降低成本的同时也减少了避雷器能量消耗，但必须建立在 IGBT 串并联成熟的基础上，这使得该断路器的技术难度和占地面积较大。文献[26]采用电容作为换流支路，代替了原有的 IGBT 级联模块，并且具备判断故障类型的能力，极大地降低了成本，但通流支路因串联电力电子器件过多，导致通态损耗显著增加。综上所述，现有混合式直流断路器仍存在造价高昂、占地面积大及开断能力受限等问题。

因此，本文提出了一种基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器(hybrid DC circuit breaker turned-off-assisted with capacitance self-charging, TWCS-HDCB)。该断路器通过直流系统正常运行电流对开关模块单元内的电容进行预充电，然后通过控制开关模块内电力电子器件的开断，实现电容和电感产生谐振并振荡反向，辅助电流迅速转移，实现了故障电流的快速分断。首先，本文阐述了开关模块基本单元的拓扑结构及其基本原理；其次，基于前述研究，提出了一种基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器拓扑，并系统阐明其工作机理；然后，研究了所提断路器开关模块元件的选型策略；最后，通过基于张北柔性直流电网的仿真验证和技术性能对比分析表明：所提基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器开断能力强，有效减少了设备成本和占地面积，技术经济性能优越。

1 电容自取能辅助关断电路

1.1 开关模块基本单元

本文提出的电容自取能开关模块基本单元拓扑如图 1 所示，其中 T_1 和 T_2 为晶闸管；T_G 为集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)；C 为谐振电容；L 为谐振电感；U_0 为外部辅助电源；Z 为外部电路阻抗。

1.2 工作原理

1）预充电阶段

如图 2 所示，电容自取能开关模块基本单元中 T_2 和 T_G 处于闭锁状态，触发导通 T_1，外电源 U_0 经 T_1-C-L 对电容 C 进行预充电。待电容 C 电压升高至 U_0 后，晶闸管 T_1 自然关断。

2）振荡反向阶段

触发导通 T_2 和 T_G，电流 i_G 经 T_G 和阻抗 Z 构成回路。此时，电容 C 和电感 L 构成谐振电路，如图 3 所示，电容器电压和振荡电流分别为：

$$\begin{cases} u_C(t) = U_0 \cos \omega t \\ i_L(t) = -U_0 \sqrt{\dfrac{C}{L}} \sin \omega t \end{cases} \tag{1}$$

式中：ω 为谐振角频率，其表达式如下：

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2}$$

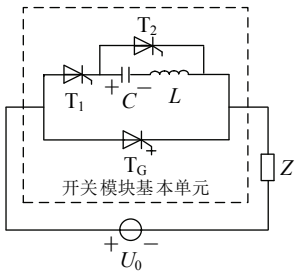


图 1 开关模块基本单元拓扑

Fig.1 The topology of the basic unit of the switch module

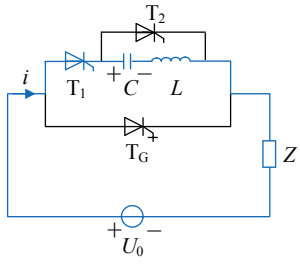


图 2 预充电阶段

Fig.2 Pre-charge stage

周期为：

$$T=2\pi\sqrt{LC} \tag{3}$$

鉴于晶闸管的单向导通机制，谐振过程被限制为单个振荡周期的 1/2。随着 1/2 周期振荡的完成，电容极性发生反向，即从左正右负转变为左负右正。同时，电容振荡反向阶段后，振荡电流衰减至 0，T_2 晶闸管自然关断。

3）电流转移阶段

如图 4 所示，触发导通 T_1，外电源 U_0 经 T_1-C-L 形成回路，LC 谐振电路在经过振荡反向阶段后形成反压。在此反压的作用下，流过 T_G 的电流不断下降，而流过 LC 振荡电路的电流不断增加。当流过 T_G 的电流下降到关断阈值电流时，闭锁 T_G，使得总电流 i 完全转移至 LC 振荡电路。根据电路基本原理有：

$$\begin{cases} i=i_C+i_G \\ u_L=L\dfrac{\mathrm{d}i_C}{\mathrm{d}t} \\ i_C=-C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \\ U_0=u_L-u_C+iZ \end{cases} \tag{4}$$

式中：i 表示总电流；i_G 表示流过 T_G 的电流。

2　基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器

2.1　拓扑结构

基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器拓扑结构如图 5 所示。其中，系统参数定义如下：系统电压记为 U_{dc}；线路等效电感为 L_{dc}；线路等效电阻为 R_{dc}；负载阻抗为 Z。主断路器由通流支路，开断支路以及接地支路 3 个部分组成：

1）通流支路主要由超高速机械开关(ultra-fast mechanical switch，UMS)和少量电力电子模块(power electronic modules，PEMs)构成，实现系统额定电流的正常通流。

2）开断支路主要由二极管串联阀构成的全桥电路和 n 个开关模块基本单元组成，其中每个开关模块基本单元由 IGCT 支路、电容自取能支路以及耗能支路构成，其作用为在发生故障时开断故障电流并且耗散系统中的感性能量。

3）接地支路主要由接地电阻构成，其作用为限制预充电电流。

2.2　工作原理

不失一般性，以左侧电源、右侧故障为例进行分析。各阶段工作原理、工作状态、等效电路图及电流、电压等关键量表达式分析如下：

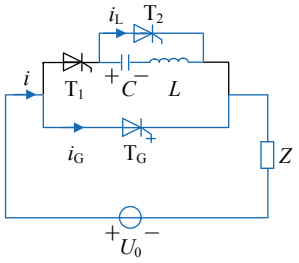


图 3　振荡反向阶段

Fig.3　Oscillation reversal stage

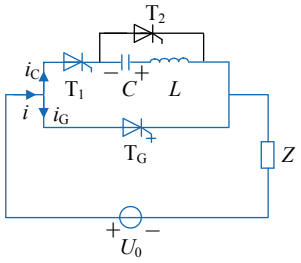


图 4　电流转移阶段

Fig.4　Current transfer stage

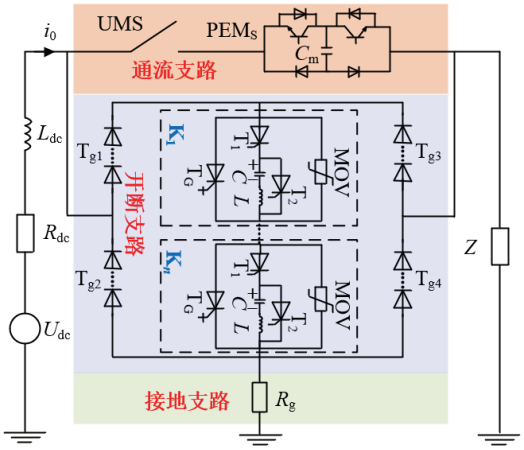


图 5　基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器拓扑

Fig.5　The topology of TWCS-HDCB

1）系统稳定运行阶段(t_0 时刻之前)

如图 6 所示，系统稳定运行时通流支路的快速机械开关处于合闸状态，PEMs 中的电力电子开关处于导通状态，开断支路中晶闸管 T_2 和 T_G 均处于关断状态。系统负载电流从通流支路中流过。触发导通 T_1，系统电流经二极管阀桥臂 T_{g1}、电容自取能支路 T_1-C-L 及接地电阻 R_g 给开断支路中的电容进行充电。在开断支路中的所有电容电压之和升高至系统电压 U_{dc} 后，充电电流降为零，电容自取能

支路中的晶闸管 T_1 随之自然关断，电容 C 两端形成正向偏置电压。系统正常工作时的电流 i_0 可以表示为：

$$i_0 = \frac{U_{dc}}{R_{dc} + Z} \tag{5}$$

2）t_0~t_1

如图 7 所示，t_0 时刻，直流线路发生短路故障，故障电流迅速上升。系统保护检测到故障后迅速向断路器发送动作指令。断路器在 t_1 时刻收到系统保护的动作指令。忽略主支路的杂散电感和电阻，根据电路基本原理有：

$$\begin{cases} U_{dc} = L_{dc}\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t} + R_{dc}i_{dc} + R_{eq}i_{dc} \\ i_{dc}(t_0) = i_0 \end{cases} \tag{6}$$

式中：i_{dc} 为故障电流；R_{eq} 为故障等效电阻。

3）t_1~t_2

如图 8 所示，t=t_1 时刻，TWCS-HDCB 接收到动作指令，立即向通流支路 PEMs 发送闭锁信号，同时向开断支路发送触发信号驱动 T_G 进入导通状态。故障电流由通流支路迅速向开断支路中的 IGCT 支路转移。t_2 时刻故障电流完全转移到 IGCT 支路。忽略通流支路和开断支路的杂散电感，该时间段内系统电流和电压满足：

$$\begin{cases} U_{dc} = R_{dc}i_{dc} + L_{dc}\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t} + U_{cm} + R_{eq}i_{dc} \\ i_0 = i_1 + i_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中：U_{cm} 表示 PEMs 中所有的电容电压之和；i_1 为通流支路电流；i_2 为 IGCT 支路中的电流。

4）t_2~t_3

如图 9 所示，当故障电流完全转移至 IGCT 支路后，快速机械开关在零电流的条件下进行无弧分闸，分闸过程持续 2 ms 左右。在分闸过程中，触发导通开关模块基本单元 K_1 至 K_n 中的晶闸管 T_2，预充电电容 C 与电感 L 发生谐振。谐振过程持续半个周期，在此期间，电容电压完成极性翻转并建立反向电场。当振荡电流达到过零点时，T_2 晶闸管随之自然关断。根据电路基尔霍夫定律有：

$$\begin{cases} u_L - u_C = 0 \\ i_C = -C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \\ u_L = L\dfrac{\mathrm{d}i_C}{\mathrm{d}t} \\ U_{dc} = L_{dc}\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t} + i_{dc}(R_{dc} + R_{eq}) + U_{Tg} + U_{TG} \end{cases} \tag{8}$$

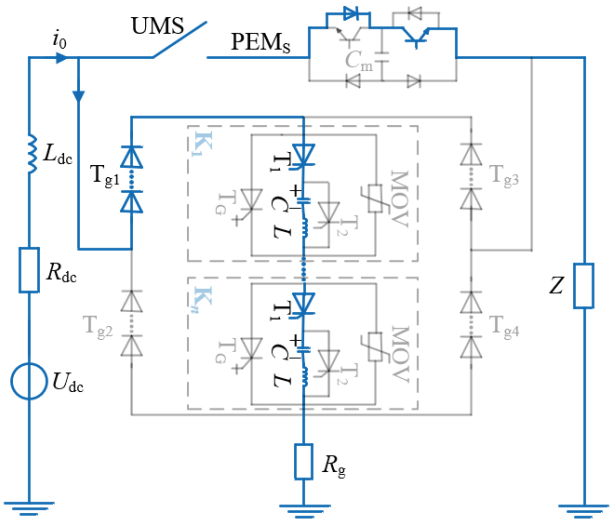


图 6 正常运行阶段

Fig.6 Normal operation stage

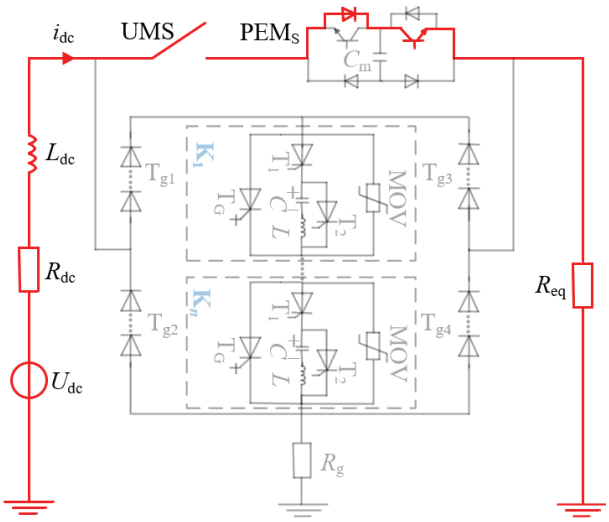


图 7 t_0~t_1 阶段等效电路

Fig.7 Equivalent circuit during the stage t_0~t_1

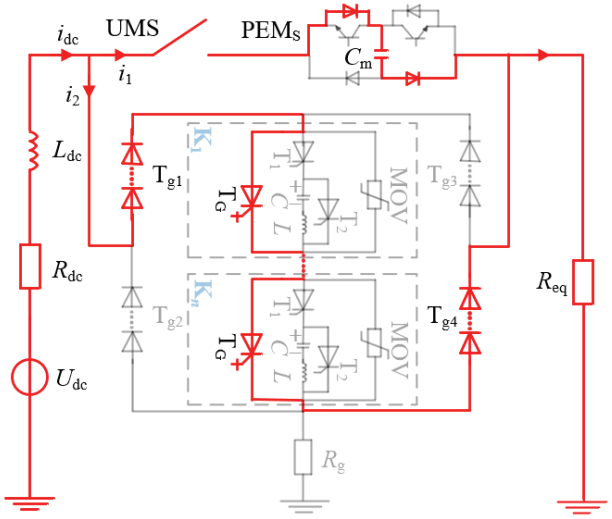


图 8 t_1~t_2 阶段等效电路

Fig.8 Equivalent circuit during the stage t_1~t_2

式中：i_C 为电容电流；u_L 为电感电压；U_{Tg} 为二极管串联阀 T_{g1} 和 T_{g4} 的导通压降；U_{TG} 为 IGCT 的导通压降；R_{eq} 为故障等效电阻。

5）t_3~t_4

如图 10 所示，在快速机械开关分闸之后，触发导通各个开关模块中的晶闸管 T_1，电容迅速放电。此时由于 T_G 承受反压，使得流过电容的故障电流不断增大，而流过 IGCT 支路的电流不断减少，故障电流逐渐转移到电容自取能支路。当 IGCT 支路中的故障电流下降至关断阈值电流时，闭锁 IGCT 支路，故障电流完全转移至电容自取能支路。根据电路基本原理有：

$$\begin{cases} U_{dc}=L_{dc}\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t}+i_{dc}(R_{dc}+R_{eq})+U_{Tg}+U_{TG} \\ U_{TG}=U_{T1}-u_C+u_L \\ i_C=-C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \\ u_L=L\dfrac{\mathrm{d}i_C}{\mathrm{d}t} \\ i_{dc}=i_G+i_C \end{cases} \tag{9}$$

式中：i_G 为 IGCT 支路的电流；U_{T1} 为晶闸管 T_1 的导通压降。

6）t_4~t_5

如图 11 所示，在关断 IGCT 支路后，故障电流给电容充电，直到电容电压极性反向并且达到 MOV 的启动阈值电压。在此过程中有：

$$U_{dc}=L_{dc}\frac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t}+i_{dc}(R_{eq}+R_{dc})+U_{Tg}+n(U_{T1}+u_C+u_L) \tag{10}$$

式中：n 表示开关模块单元数。

7）t_5~t_6

如图 12 所示，t_5 时刻电容自取能支路电容电压达到耗能支路 MOV 动作阈值，耗能支路导通实现故障电流换流转移。故障电流在 MOV 两端暂态分断电压的作用下，于 t=t_6 时刻降为 0。在此期间有：

$$U_{dc}=i_{dc}(R_{eq}+R_{dc})+L_{dc}\frac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t}+U_{MOV} \tag{11}$$

式中：U_{MOV} 为所有 MOV 的暂态分断电压之和。

3　参数设计

开关单元模块作为所提断路器的核心部件，其参数设计直接影响着断路器的整体性能。根据第 2 章工作原理分析，TWCS-HDCB 的 L、C 参数配置将影响故障电流可靠转移、换流速率及 IGCT 支路关断可靠性等。因此，本章将重点对电容 C 和电感

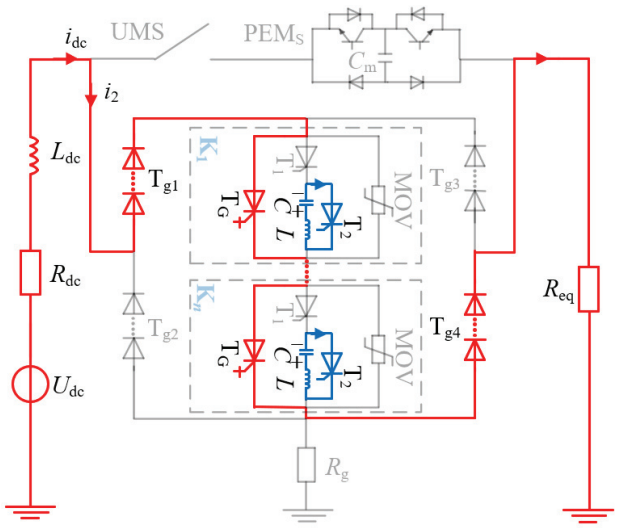


图 9　t_2~t_3 阶段等效电路

Fig.9　Equivalent circuit during the stage t_2~t_3

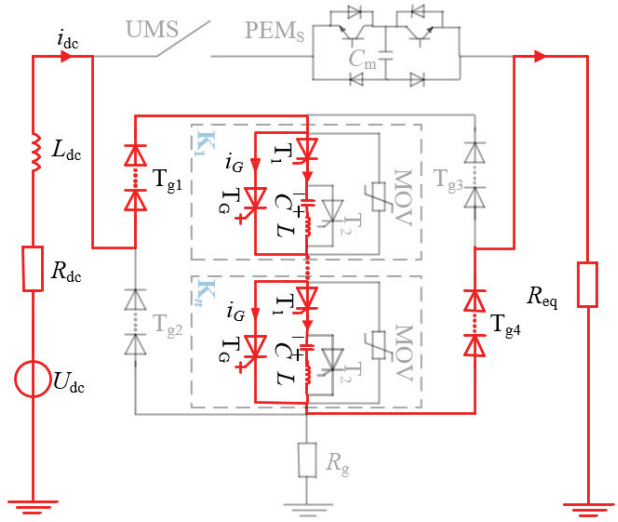


图 10　t_3~t_4 阶段等效电路

Fig.10　Equivalent circuit during the stage t_3~t_4

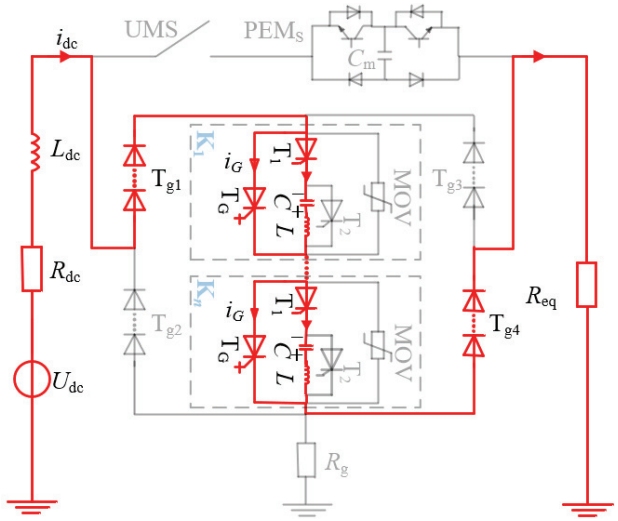


图 11　t_4~t_5 阶段等效电路

Fig.11　Equivalent circuit during the stage t_4~t_5

L 的参数选取进行分析。以±500 kV 张北柔性直流电网工程为例，直流电压 U_{dc} 为 500 kV，n=10，IGCT 支路故障电流峰值 25 kA[27]。

1）谐振电容 C

由式(3)及分析可知，LC 谐振电流的峰值点对应于 1/4 谐振周期。为确保断路器换流过程的可靠进行，IGCT 支路电流向电容自取能支路的换流过程须在振荡电流达到峰值前完成。因此，系统所需的换流时间小于四分之一个振荡周期，该时间参数通常被设计在 100~200 μs 的范围内。

首先对电容 C 的参数选取进行初步设定。由工作原理可知，电容 C 的增大将延长振荡周期和换流时间，进而增加故障隔离时间，不利于断路器快速隔离故障。因此，电容 C 的取值应避免过大，可取为 25~150 μF。

由工作过程和理论分析可知，在 t_3~t_4 阶段，为了确保故障电流能够可靠地从 IGCT 支路转移至电容自取能支路，须保证电容的振荡电流峰值大于流经 IGCT 支路的故障电流峰值。由式(1)可知，振荡电流峰值表达式为：

$$i_C(t)=\frac{U_{dc}}{n}\sqrt{\frac{C}{L}} \tag{12}$$

根据式(13)理论分析，在电容 C 初始电压恒定条件下，提升容值或降低电感量均会显著增大振荡电流峰值。但是当峰值电流过高时会导致晶闸管 T_2 承受过大的电流应力，因此建议将振荡电流峰值控制在略高于故障电流峰值的合理区间。进一步研究表明，断路器开断时间的优化需通过协调电容 C 与电感 L 参数来实现：式(4)揭示了振荡周期与 LC 乘积的平方根呈正比关系，随参数值的增加而延长。图 13 表征了不同 C-L 参数组合下换流时间与振荡电流幅值的变化关系，为参数匹配提供了设计依据。综上所述，电容 C 的取值范围建议为 32~64 μF。

2）谐振电感 L

电感参数在电容 C 取值范围内对谐振特性具有双重约束作用：过大的电感将导致周期延长，进而影响断路器快速隔离故障电流，故需设定其上限；式(13)则表明在电容确定条件下，电感 L 与振荡电流峰值呈反比关系，为确保晶闸管 T_2 耐受电流应力较小并满足故障电流转移要求，须设定其下限。因此，电感 L 参数选取过程中需在电流应力约束与转移时间要求之间实现动态平衡。综上所示，综合考量振荡电流峰值、T_2 晶闸管电流应力耐受能力及 T_G 关断可靠性等关键参数，L 的取值范围建议为 64~255 μH。

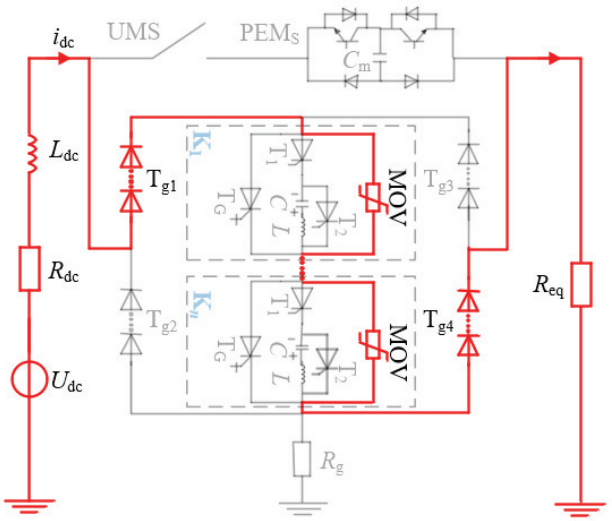
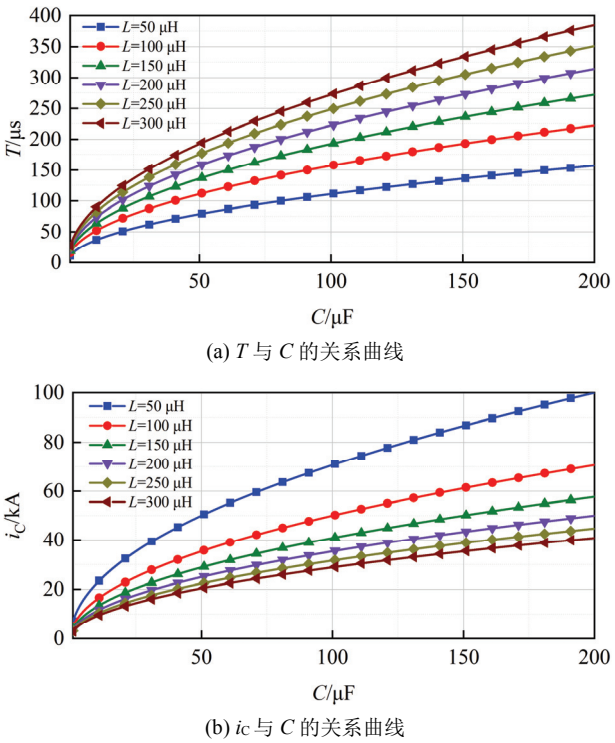


图 12 t_5~t_6 阶段等效电路

Fig.12 Equivalent circuit during the stage t_5~t_6



(a) T 与 C 的关系曲线

(b) i_C 与 C 的关系曲线

图 13 参数影响分析

Fig.13 Parameters influencing analysis

4 仿真验证

4.1 系统介绍

为验证本文所提 TWCS-HDCB 的有效性，基于 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 14 所示的±500 kV 四端柔性直流电网电磁暂态仿真模型。系统参数详见

表 1。在该系统中，换流站 S_1、S_2、S_3、S_4 均配置为基于半桥子模块结构的模块化多电平换流器，并分别与对应的交流系统相连。其中，控制策略配置如下：S_1、S_3 和 S_4 换流站采用定有功-无功功率(P/Q)控制模式，S_2 换流站实施定直流电压-无功功率(V_{dc}/Q)控制模式。稳态运行工况下，S_1 和 S_3 作为功率送端分别向柔性直流电网送出 1 250 MW 和 2 500 MW 有功功率，S_4 作为受端从柔性直流电网中吸收 3 000 MW 有功功率。每根输电线两端都连接 150 mH 的平波电抗器用来抑制故障电流，并且每条线路两端都配置直流断路器用于系统有选择性地隔离故障。所提断路器设计采用 10 级模块化串联架构，各模块均集成 IGCT 支路、电容自取能支路及耗能支路(详细参数见表 2)。核心参数配置为：额定电压 500 kV，电容自取能支路电容 C 为 50 μF，电感 L 为 200 μH，接地电阻 250 Ω。

4.2　结果分析

如图 15 所示，3 s 时刻之前，各个换流站功率达到稳态，换流站 S_1 和 S_3 分别向柔性直流电网送出 1 250 MW 和 2 500 MW 有功功率，S_4 从柔性直流电网中吸收 3 000 MW 有功功率。t=3 s 时刻，在直流线路 $Line_{34}$ 线路中点处发生了金属性正极接地故障，在断路器作用下，故障线路被快速隔离，各换流站功率发生短暂波动后，柔性直流电网恢复稳态。

如图 16 所示，t=3 s 时刻之前，系统处于稳定运行状态。约 t=3.003 3 s 时刻，TWCS-$HDCB_{34}$ 接收到保护动作指令，通流支路中 PEMs 立即闭锁，PEMs 的控制指令由 1 变为 0，通流支路电流迅速下降至 0。

如图 17 所示，在闭锁通流支路 PEMs 的同时，IGCT 收到开通动作指令，此时 IGCT 控制指令由 0 变为 1，IGCT 支路导通，故障电流迅速由通流支路转移至 IGCT 支路。经过 70 μs 左右，故障电流由通流支路完全转移至开断支路中的 IGCT 支路，此时流经通流支路的故障电流降为 0，在零电流的条件下快速机械开关进行无弧分闸。快速机械开关分闸过程中，触发导通晶闸管 T_2，电容自取能支路中的电容 C 与电感 L 发生谐振，电容 C 的电压由上正下负变为上负下正。约 3.005 48 s 时刻，快速机械开关分闸完成，此时触发导通晶闸管 T_1，故障电流迅速从 IGCT 支路向电容自取能支路转移，IGCT 支路电流迅速下降。故障电流下降到 IGCT 关断阈值时，其控制指令由 1 变为 0，迅速关断 IGCT，流经

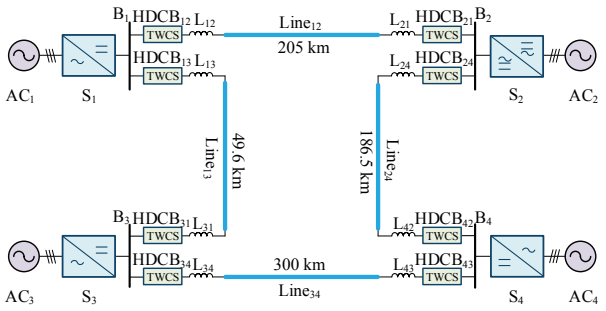


图 14　四端柔性直流输电系统拓扑架构图

Fig.14　Topology diagram of four-terminal VSC-based DC grid transmission system

表 1　柔性直流输电系统仿真参数

Table 1　Simulation parameters of the VSC-based DC grid transmission system

参数	S_1	S_2	S_3	S_4
交流系统电压/kV	220	500	220	500
直流额定电压/kV	±500	±500	±500	±500
控制模式	P/Q	V_{dc}/Q	P/Q	P/Q
变压器变比	220/275	500/275	220/275	500/275
额定容量/MVA	1 600	1 600	3 200	3 200
桥臂电感/mH	100	100	50	50
桥臂子模块数量	244	244	244	244
子模块电容/mF	8	8	15	15

表 2　所提 TWCS-HDCB 核心参数

Table 2　Core parameters of the proposed TWCS-HDCB

参数	取值
系统额定电压/kV	500
MOV 暂态分断电压/kV	800
电容自取能支路电容 C/μF	50
电容自取能支路电感 L/μH	200
接地电阻 R_g/Ω	250

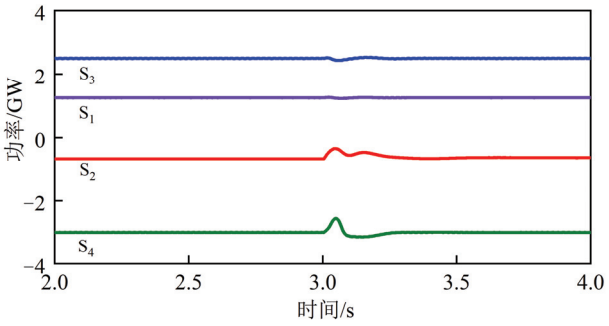


图 15　各个换流站功率

Fig.15　Power of each converter station

IGCT 支路电流降为 0。

如图 18 所示，电容自取能支路中电容电流共

发生两次谐振。第 1 次谐振时，电容 C 与电感 L 通过晶闸管 T_2 形成振荡电路。基于晶闸管 T_2 的单向导通特性，当电容 C 经半周期(约 314 μs)充放电过程完成电压极性反转后，晶闸管 T_2 因承受反压且通流为 0 而自然关断。此谐振过程中，谐振电流峰值约 24.3 kA。快速机械开关完成分闸后，触发导通晶闸管 T_1，电容 C 与电感 L 通过故障回路发生第 2 次谐振。此谐振过程中，谐振电流峰值约为 22.5 kA。当第 2 次谐振电流上升至约为直流线路故障电流时，IGCT 支路电流下降至可关断阈值。

如图 19 所示，3 s 时刻之前，系统处于正常工作状态，直流系统对电容自取能支路中每级模块电容 C 充电至 50 kV。约 3.003 28 s 时刻，电容 C 与电感 L 通过晶闸管 T_2 发生第 1 次谐振。谐振完成后，电容 C 电压大小不变，极性反向。约 3.005 48 s 时刻，电容 C 与电感 L 通过故障回路发生第 2 次谐振。在正向谐振电流作用下，电容自取能支路中每级模块电容 C 的电压由−50 kV 被迅速充电至 80 kV。

如图 20 所示，当电容自取能支路中的电容电压达到耗能支路 MOV 的动作阈值时，耗能支路触发导通实现故障电流换流转移。MOV 依托其非线性伏安特性，迅速建立起约 1.6 倍系统电压的暂态分断电压。故障电流在此电压作用下经约 12 ms 由 4.15 kA 逐渐衰减至 0。

如图 21 所示，3 s 时刻前，系统处于正常运行状态，直流线路电流约为 2.18 kA。3 s 时刻，$Line_{34}$ 线路中间位置发生金属性正极接地故障，故障电流迅速增大。约 3.003 3 s 时刻，TWCS-$HDCB_{34}$ 接收到线路动作指令后，快速机械开关迅速启动分闸操作。约 3.005 72 s 时刻，直流线路故障电流上升至峰值 5.38 kA；约 3.02 s 时刻，直流线路故障电流被阻断为 0。

4.3 技术性能对比

为验证 TWCS-HDCB 的技术经济性优势，本研究从综合技术性能和经济性两个维度开展对比分析。选取文献[20]、文献[28]所提直流断路器方案进行系统比较。

本文选取故障暂态电流分断速度作为直流断路器性能评估的核心指标。在同一电磁暂态仿真系统中，搭建此 3 种直流断路器模型，故障线路电流波形如图 22 所示。文献[20]与文献[28]所提断路器方案故障电流分断时间几乎相同，但分断时间明显长于本文所提的 TWCS-HDCB 方案。究其原因，本

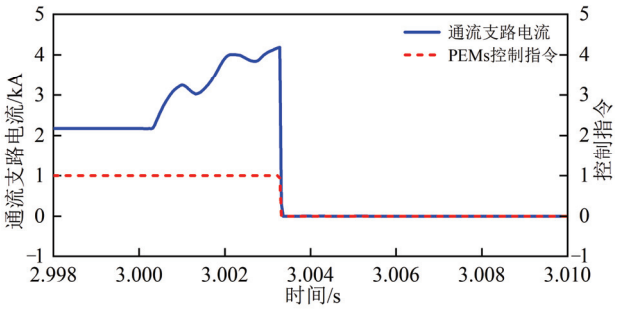


图 16 通流支路电流和控制指令

Fig.16 Current of through-flow branch and control command

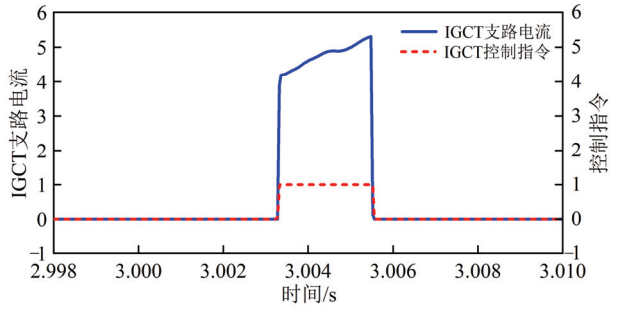


图 17 IGCT 支路电流和控制指令

Fig.17 Branch current of IGCT and control command

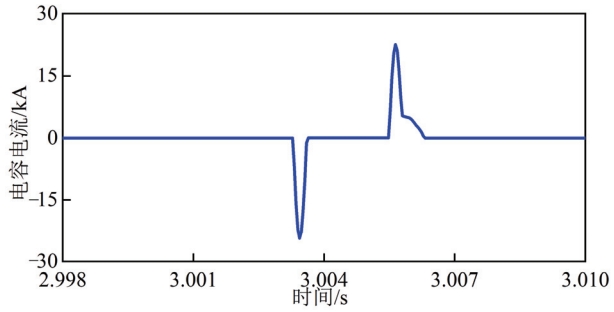


图 18 电容自取能支路电容电流

Fig.18 Current of capacitance in capacitance self-charging branch

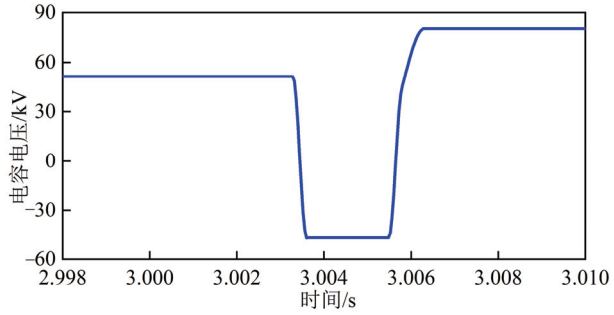


图 19 电容自取能支路电压

Fig.19 Voltage of capacitance in capacitance self-charging branch

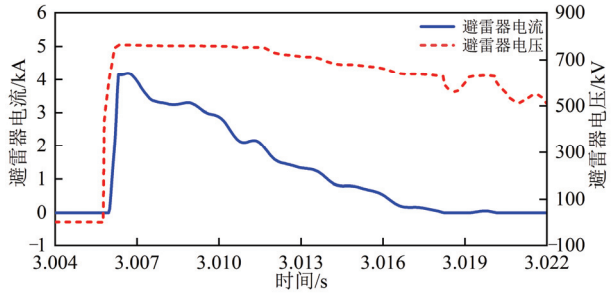


图 20　避雷器电压和电流

Fig.20　Voltage and current of arrester

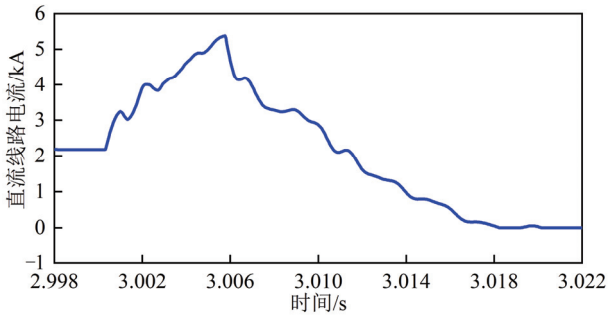


图 21　直流线路电流

Fig.21　Current of DC line

文所提 TWCS-HDCB 方案采用 *LC* 振荡方式对电容自取能支路的电容进行快速充电、加速触发导通耗能支路 MOV 的方式进行换流。而文献[20]采用增强快速机械开关弧压的外部横向磁场装置进行第 1 次换流，文献[28]采用对转移支路级联模块内的电容进行充电、触发导通耗能支路 MOV 的方式进行第 2 次换流。

3 种断路器方案分断能力、分断时间等具体性能对比结果如表 3 所示。

电力电子器件选型与配置规模是评估直流断路器经济性的关键指标。本文所提 TWCS-HDCB 与文献[20]断路器均基于 IGCT 作为主开关器件构建，耐受电压高，通流能力强。文献[28]断路器选用成本较高的 IGBT 作为主要开关元件，应用灵活，开关速度快但因转移支路中需串联大量 IGBT 以耐受暂态分断电压，导致成本较高。

下面对 3 种断路器的经济性进行详细分析计算，鉴于通流支路电力电子器件配置规模显著低于转移支路，其参数影响在计算中予以忽略。各个电力电子器件的串联数量 n 可根据下式计算得出：

$$n=\frac{\left(1+k_{\mathrm{rc}}\right)\lambda U_{\mathrm{dc}}}{k_{\mathrm{mc}}u_{\mathrm{e}}} \tag{13}$$

式中：k_{rc} 为冗余系数，工程上一般取 8%；λ 为 MOV 阀片组的限电压系数，工程上一般取 1.6；k_{mc} 为电力电子器件电压裕度系数，一般取 0.8；u_{e} 为单个电力电子器件的额定电压[29]。

针对±500 kV/25 kA/3 ms 分断需求的直流断路器设计方案，二极管、晶闸管、IGBT 和 IGCT 器件选型依次为 5SDF28L4520(4.5 kV, 2.75 kA, 510.25 美元)、TDK4453002DH(4.5 kV, 5.388 kA, 1 194.27 美元)、5SNA3000K452300(4.5 kV, 3 kA, 6 195.31 美元)和 CAC4000-45(4.5 kV, 4 kA, 2 149.15 美元)[20,29]。通常情况下，电力电子器件具有短时过载

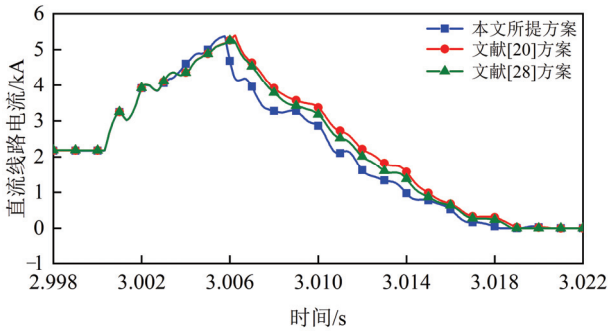


图 22　不同断路器电流波形特性对比分析

Fig.22　Comparative analysis of current waveform characteristics of different DCCBs

表 3　整体性能对比

Table 3　Overall performance comparison

断路器	文献[20]	文献[28]	TWCS-HDCCB
分断能力	双向	双向	双向
分断时间	短	短	短
预充电电容	较高	无	较低
辅助电源	需要	不需要	不需要
电弧烧蚀	短时燃弧	无弧分断	无弧分断
成本	较低	较高	低

耐受特性，可在暂态工况下承受数倍额定值的过电流。在 TWCS-HDCB 方案设计中，晶闸管 T_1 及二极管 T_{g1}—T_{g4} 采用并联数量为 1 的配置即可满足运行需求，而晶闸管 T_2 需要短时承受振荡电流峰值故采用并联数量为 2 的配置。由式(13)计算可得本文所提 TWCS-HDCB 开断支路中二极管 Tg_1—Tg_4 和 IGCT 的数量均为 240 个，晶闸管 T_1 数量为 240 个，T_2 的数量为 480 个。同样地，可以依照此方法推导出文献[20]和文献[28]所需电力电子器件数量。

文献[20]所提断路器方案中，外部横向磁场装置的价格约为 9.2×10^5 美元。如表 4 所示，本文所提 TWCS-HDCB 方案与文献[20]和文献[28]断路器

表 4 断路器电力电子器件配置分析

Table 4 Configuration analysis of circuit breaker power electronic devices

断路器	文献[20]	文献[28]	本文所提 TWCS-HDCB
二极管/个	1 200	1 680	960
晶闸管/个	240	0	720
IGCT/个	240	0	240
IGBT/个	0	480	0
外部磁场装置/个	1	0	0
成本/(10^6美元)	2.33	3.83	1.87

方案在核心元件数量及成本方面进行了对比。所提 TWCS-HDCB 方案相对成本较文献[20]和[28]所提拓扑分别降低 19.7%和 51.2%。

综上所述，本文所提 TWCS-HDCB 在开断性能与成本效益方面展现出显著综合优势。

5 结论

本文阐述了开关模块基本单元的拓扑结构及其基本原理，提出了基于电容自取能辅助关断的混合式直流断路器拓扑方案，并基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提拓扑在典型直流故障场景下的开断性能与拓扑适应性。有如下结论：

1）提出了电容自取能开关模块基本单元拓扑，无需配备辅助电源，实现了对电容自取能支路电容的预充电，通过控制开关模块内电力电子器件的开断，实现了电容和电感产生谐振并振荡反向，辅助电流迅速转移。

2）所提断路器开断支路采用 IGCT 支路、电容自取能支路及耗能支路串并联结构，相较于传统的混合式直流断路器，在快速可靠分断故障电流的同时显著降低了直流断路器制造成本。

3）所提断路器具备双向无弧快速分断、控制策略简洁及经济性优越等技术特征，可为我国构建具有更强新能源消纳能力的新型电力系统提供有力支撑。

参考文献 References

[1] 汤广福，罗 湘，魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报，2013，33(10)：8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[2] 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]. 高电压技术，2024，50(2)：551-560.
YAN Xin, YU Zhanqing, QU Lu, et al. Design and development of solid-state DC circuit breaker based on reverse blocking IGCT[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 551-560.

[3] TANG G F, HE Z Y, PANG H, et al. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 22-35.

[4] 裴翔羽，汤广福，张盛梅，等. 双极柔性直流电网短路电流暂态特性分析[J]. 全球能源互联网，2018，1(4)：403-412.
PEI Xiangyu, TANG Guangfu, ZHANG Shengmei, et al. Analysis on transient characteristics of short-circuit current for bipolar VSC-based DC grid[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 403-412.

[5] 裴翔羽，汤广福，庞 辉，等. 柔性直流电网线路保护与直流断路器优化协调配合策略研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(增刊1)：11-18.
PEI Xiangyu, TANG Guangfu, PANG Hui, et al. Study on optimized coordination strategies between line protection and DC breakers for VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement1): 11-18.

[6] JUNAID M, YU W Q, CAO S Z, et al. Simulation study of integrated-gate-commutated-thyristor based superconducting hybrid direct current circuit breaker[J]. High Voltage, 2023, 8(6): 1275-1284.

[7] WU S H, SHEN H, QI L, et al. Analysis for magnetic field disturbance of hybrid DC circuit breaker during breaking[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 523-535.

[8] 贺之渊，王威儒，谷怀广，等. 兼备故障限流及开断功能的直流电网集成化关键设备发展现状及展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3402-3417.
HE Zhiyuan, WANG Weiru, GU Huaiguang, et al. Development status and prospect of integrated key equipment of DC power grid with fault current limiting and breaking functions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3402-3417.

[9] 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.

[10] 范兴明，李 涛，张 鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2537-2553.
FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Research and application of medium voltage and high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2537-2553.

[11] 魏晓光，周万迪，张 升，等. 模块化混合式高压直流断路器研究与应用[J]. 中国电机工程学报，2020，40(6)：2038-2046.
WEI Xiaoguang, ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, et al. Research and application of modular hybrid high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2038-2046.

[12] 徐 政，肖晃庆，徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术，2018，44(2)：347-357.
XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.

[13] 李骊智，周万迪，王新颖，等. 直流电网用混合式直流断路器开断参数影响因素研究[J]. 电网技术，2021，45(4)：1377-1387.
LI Pengzhi, ZHOU Wandi, WANG Xinying, et al. Breaking parameter influencing factors of hybrid DC circuit breaker applied to DC power

grids[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1377-1387.

[14] 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.

[15] 周万迪，张　升，李　伟，等. 基于多物理场耦合的高速机械开关可靠性研究[J]. 高电压技术，2024，50(3)：974-985.
ZHOU Wandi, ZHANG Sheng, LI Wei, et al. Reliability research of high-speed mechanical switch based on multiple physical field coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 974-985.

[16] RODRIGUES R, DU Y, ANTONIAZZI A, et al. A review of solid-state circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 364-377.

[17] LI B, HE J W, LI Y, et al. A novel solid-state circuit breaker with self-adapt fault current limiting capability for LVDC distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3516-3529.

[18] 余占清，曾　嵘，屈　鲁，等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.

[19] 周万迪，贺之渊，李珊智，等. 模块级联多端口混合式直流断路器研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(11)：4355-4366.
ZHOU Wandi, HE Zhiyuan, LI Pengzhi, et al. Modular cascaded multi-port DC circuit breaker for DC grid application[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4355-4366.

[20] ZHUANG W B, RONG M Z, WU Y F, et al. A novel DC circuit breaker with counter-current injection and IGCT combined[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3451-3461.

[21] 涂银钢，裴翔羽，周万迪，等. 基于可控有源振荡换流的混合式高压直流断路器[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2047-2058.
TU Yingang, PEI Xiangyu, ZHOU Wandi, et al. Hybrid HVDC circuit breaker based on controllable active oscillation commutation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2047-2058.

[22] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids[C]//Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids. [S.l.]: CIGRE Symposium, 2011: 1-9.

[23] 王　辉，马　超，郝全睿，等. 一种强制换流型混合式高压直流断路器方案[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2425-2433.
WANG Hui, MA Chao, HAO Quanrui, et al. Scheme of hybrid high voltage DC circuit breaker with forced current commutation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2425-2433.

[24] 于　海，迟　颂，李尔平. 基于全控型电力电子器件的强制换流型混合直流断路器[J]. 电力系统自动化，2017，41(12)：168-172，187.
YU Hai, CHI Song, LI Erping. et al. Hybrid DC circuit breaker with forced current commutation based on full-controllable power electronic devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 168-172, 187.

[25] 蒋纯冰，赵成勇. 具备重合闸判断能力的电容换流型直流断路器[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3254-3263.
JIANG Chunbing, ZHAO Chengyong. Capacitor-commutated DC circuit breaker with reclosing judgment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3254-3263.

[26] 叶　晗，陈　武. 基于预充电电容的新型混合直流断路器[J]. 中国电机工程学报，2018，38(20)：5992-6000.
YE Han, CHEN Wu. A novel hybrid DC circuit breaker based on pre-charged capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 5992-6000.

[27] 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.

[28] PEI X Y, TANG G F, ZHANG S M. Sequential auto-reclosing strategy for hybrid HVDC breakers in VSC-based DC grids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 633-643.

[29] 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.



李纪豪
2000—，男，硕士生
主要研究方向为中高压直流开断技术
E-mail: 940969486@qq.com

LI Jihao



裴翔羽(通信作者)
1986—，男，博士，副教授，博导
主要研究方向为新型电网构建技术，中高压直流开断技术，新型电力系统动力学建模、解算与控制基础理论等
E-mail: 646888200@qq.com

PEI Xiangyu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-02-26　在线出版日期　2025-04-30　　编辑　陈　蔓