

基于晶闸管的主动关断型双向直流固态断路器

贺嵩铭^{1,2}, 朱晋^{1,2}, 曾庆鹏^{1,2}, 王道祺³, 吴理心¹, 韦统振^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 济南大学自动化与电气工程学院, 济南 250022)

摘要: 随着直流供电系统的不断发展, 直流故障保护问题日益凸显, 用于故障隔离的直流断路器被广泛应用。基于晶闸管的固态断路器具有低损耗和低成本的优势, 但是晶闸管无法被控制关断的特性制约了这类断路器的发展, 目前的部分方案存在无法可靠重合闸、损耗大的缺点。为此, 提出了一种基于晶闸管的新型双向直流固态断路器拓扑结构, 实现了主动可靠关断与软重合闸功能, 消除了 MOV 的断态漏电流, 具有高可靠性和低损耗的优势。文中详细阐述了断路器在 3 种模式下的工作原理, 给出了参数设计依据; 仿真和实验表明, 所提拓扑可以主动可靠分断短路故障, 并通过软重合闸判断故障类型。

关键词: 直流电网; 固态断路器; 直流断路器; 晶闸管; 故障保护; 主动关断

Thyristor-based Active Turn-off Bidirectional DC Solid State Circuit Breaker

HE Songming^{1,2}, ZHU Jin^{1,2}, ZENG Qingpeng^{1,2}, WANG Daoqi³, WU Lixin¹, WEI Tongzhen^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: With the continuous development of DC power system, DC fault protection problems are becoming more prominent, circuit breakers are widely used to isolate faults. Thyristor-based solid state circuit breakers demonstrate low losses and low costs, but the characteristic that thyristors can not be controlled to turn-off has limited the development of these circuit breakers, some current solutions have disadvantages of unreliable reclosing and high losses. This article proposes a novel bidirectional DC solid state circuit breaker; reliable active turn-off, soft reclosing and MOV off-state leakage current elimination create advantages in high reliability and low losses. The working principles in three modes and parameters design are described in detail. Simulations and experiments show that the proposed topology can actively interrupt short-circuit faults, and distinguish the type of fault by soft reclosing.

Key words: DC grid; solid state circuit breaker; DC circuit breaker; thyristors; fault protection; active turn-off

0 引言

直流供电系统具有效率高、容量大、灵活性强等优势^[1-2], 是未来电力系统的主要发展方向之一。但是直流系统的阻抗低且缺乏自然过零点; 当系统发生故障时, 故障电流上升率高的同时又很难被快速无弧开断。因此具有故障隔离功能的直流断路器是直流系统中的重要保护装置^[3]。

直流断路器根据工作原理可分为机械式、混合式、纯固态式^[4-7]。机械式断路器开断速度较慢, 机械触点在关断过程易产生电弧, 需要通过外部器件创造过零点; 混合式断路器使用机械开关流通正常

负荷电流, 固态开关进行故障电流开断^[8-11], 在一些高压直流工程中已经得到了应用^[12-14]。但是在电压等级较低的直流分布式系统和直流微网场景中, 混合式断路器的响应时间和成本导致其并不适用。

固态式直流断路器因不使用机械开关而具有很快的响应速度, 可以快速无弧开断故障; 除此之外, 还具有体积小、寿命长的优势^[15-18], 而成为中低压直流断路器中受欢迎的技术路线。

具有快速关断能力的绝缘栅双极型晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT) 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal oxide semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 被应用在许多固态断路器方案中^[19-22], 但是 IGBT 和 MOSFET 长时间流通负荷电流会产生较高的导通损耗, 降低直流断路器的效率; 二者高昂的成本也制约了它们在固态

基金资助项目: 国家重点研发计划 (2023YFB2405905); 山东能源研究院企业联合基金 (SEI U202310)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2405905), Shandong Energy Institute Joint Fund (SEI U202310).

断路器中大规模应用。

在各类电力电子器件中,晶闸管在同电压等级下具有较低的导通损耗,成本也相对低廉。然而晶闸管是一种半控型器件,无法被控制关断,需要反向恢复过程才可被可靠关断。根据晶闸管关断过程中的电流转移原理,晶闸管型断路器可被分为被动型和主动型两种。

被动型晶闸管断路器的基本原理是当故障发生时,通过参数配合,耦合电感或 Z、T、 Γ 源电路自动为需要关断的晶闸管提供反向电压,使其关断^[23-27]。

被动型方案通过参数整定可以自动、快速地开断故障电流,无需电流检测装置;但是这类方案存在受外部电路参数影响、不能开断负荷电流和双向拓扑结构复杂的问题^[28]。为此一些学者开展了主动型晶闸管断路器的研究^[28-34]。

文献[28]提出了基于电容反压原理的断路器拓扑,其结构简单,但电容需在主通流晶闸管导通时充电,无法可靠重合闸。文献[29]使用电容对反压的思想,消除了金属氧化物避雷器(metal oxide varistor, MOV)的断态漏电流,并将重合闸时的无法开断的时间间隔由文献[28]的数百毫秒减少到数毫秒。文献[30]在电容反压的基础上嵌套桥式电路,电容在主通流晶闸管关断时充电,解决不可靠重合闸问题的同时具有软重合闸功能,但大幅增加了导通损耗。

文献[33]在文献[28]的基础上增加电感,利用电容电感谐振原理降低双向拓扑结构的复杂度,但是其不对称性导致一个通流方向无法可靠重合闸。文献[34]在主支路和转移支路使用耦合电感,解决不可靠重合闸问题,但是主通流支路上额外的电感会增加导通损耗。与此同时,相较于基于电容反压原理的断路器拓扑,以上方案电感的使用会增加断路器的重量和体积。

针对上述问题,本文提出了一种新型主动关断双向直流固态断路器拓扑结构:解决不可靠重合闸问题,并且集成了软重合闸的功能;消除断路器关断状态下的 MOV 漏电流,提高了器件的电压利用率;使用反并联晶闸管构成双向主通流支路,降低了断路器的导通损耗。

本文首先展示了断路器的拓扑结构,并详细分析其在 3 种模式下的工作原理;结合工作原理给出参数选取的依据,而后通过 10 kV 仿真、375 V 仿真与实验验证了方案的可行性和有效性;最后与各

种主动型双向晶闸管断路器进行对比分析。

1 断路器拓扑结构与工作原理

1.1 断路器拓扑结构

本文提出的主动关断型双向直流固态断路器拓扑结构如图 1 所示。其由两部分组成,分别是:1) 主通流支路和 2) 辅助关断支路。

1) 主通流支路:由晶闸管 T_1 和 T_2 反并联构成,在直流系统正常运行时流经负荷电流;无论正向通流还是反向通流,负荷电流仅流过一个晶闸管,有效降低断路器的导通损耗。

2) 辅助关断支路:是本文主要的创新之处,其集成了 3 个功能:主动反压关断主通流支路上的晶闸管(T_1 或 T_2),作为吸能支路箝位开断电压和吸收系统能量,故障处理完毕后进行软重合闸判断故障类型。

1.2 工作原理

以下分析假定负载位于直流断路器右侧,电流从左侧流向右侧为负载供电的场景定义为正向通流。

1.2.1 无故障预充电原理

直流系统正常工作时,晶闸管 T_1 导通流经负荷电流,此时控制器给晶闸管 T_3 和晶闸管 T_6 持续的导通信号,使直流母线电压通过图 2 所示 $T_3-T_6-C_1-R_1$ 的路径为电容预充电(反向通流则是通过路径 $T_4-T_6-C_1-R_1$ 为电容预充电),做好开断故障的准备。待电容电压达到直流母线电压后,撤去导通信号,晶闸管 T_3 和晶闸管 T_6 自然关断。

1.2.2 故障开断原理

负载侧发生短路故障后,故障电流快速上升,直流断路器进行故障开断的步骤如下:

1) 第 1 阶段:当断路器控制器检测到故障电流达到开断电流的阈值后,向晶闸管 T_3 、晶闸管

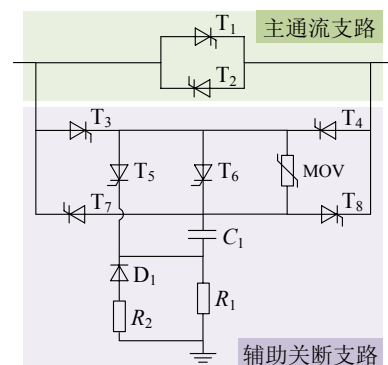


图 1 新型双向直流固态断路器拓扑结构

Fig.1 Proposed bidirectional DC solid state circuit breaker

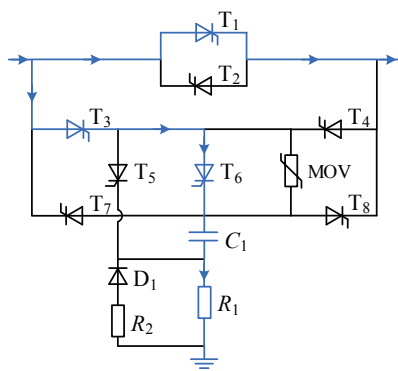


图2 无故障正常工作时电容预充电原理

Fig.2 Working principle of capacitor charging during normal operation

T₅ 和晶闸管 T₈ 发送导通指令, 使已经预充电的电容并联到主通流支路晶闸管两端, 如图 3(a)所示。随后故障电流向路径 T₃—T₅—C₁—T₈ 换流, 迫使晶闸管 T₁ 在电容反压阶段内关断。

2) 第 2 阶段: 主通流支路晶闸管 T₁ 可靠关断后, 故障电流使电容继续放电, 使其电压降到 0 V 后再向反方向充电, 如图 3(b)所示; 随后, 电容电压达到 MOV 的箝位电压触发 MOV, 晶闸管 T₅ 也由于反压而关断。

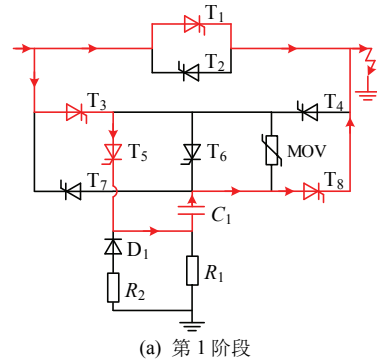
3) 第 3 阶段: 如图 3(c)所示, 电流被完全转移到路径 T₃—MOV—T₈ 上面, MOV 吸收系统电感中的剩余能量, 一段时间后故障电流降为 0 A, 断路器两端电压回落到直流母线电压; 晶闸管 T₃ 和晶闸管 T₈ 因为电流小于维持电流而关断, 故障开断过程结束。

1.2.3 软重合闸原理

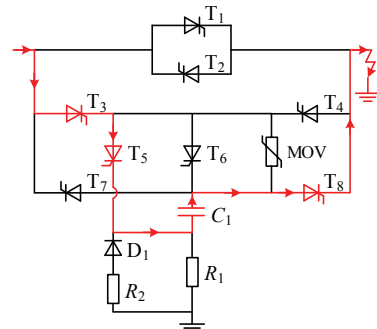
在故障开断过程结束后, 及时判断故障类型并清除故障、恢复供电是系统的下一步工作。但是永久性故障下进行传统重合闸, 相当于直流断路器再分断一次故障, 大电流在晶闸管和 MOV 上产生很高的电应力, 这会对断路器的寿命和安全性造成影响^[30]。为此, 本文所提出的拓扑结构具有软重合闸功能。

1) 第 1 阶段: 短路故障处理完毕后, 断路器控制器给晶闸管 T₃ 和晶闸管 T₆ 发送持续的导通信号, 将电容重新充电至直流母线电压, 如图 4(a)所示。随后撤去导通信号, 两个晶闸管自然关断。

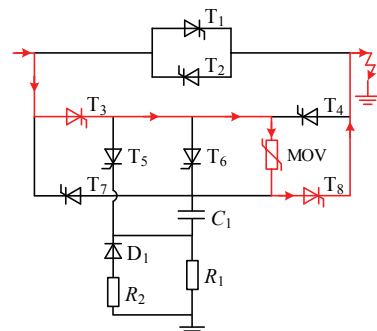
2) 第 2 阶段: 控制器发出软重合闸指令, 触发晶闸管 T₈, 电容通过 R₂—D₁—C₁—T₈ 的路径(由于选型时 R₂ 远小于 R₁, 故忽略流经 R₁ 的电流)对负



(a) 第1阶段



(b) 第2阶段



(c) 第3阶段

图3 故障开断原理

Fig.3 Working principle of fault interrupting process

载侧进行放电, 来检测当前状态下的故障类型。

永久性故障和暂时性故障在负载侧的区别为: 暂时性故障后负载侧在一段时间内会恢复正常的阻抗, 而永久性故障后负载侧则维持短路阻抗。由于两种故障类型在负载侧阻抗的显著区别, 电容放电后, 通过负载侧电流峰值和总放电时间可以判断故障类型。随后重复第一阶段的过程为电容充电, 控制器根据已经判断的故障类型结果来进行重合闸或软重合闸。

所提出的断路器拓扑结构可以进行双向阻断, 故上述原理均会存在正向通流和反向通流两种情况。双向工作原理如表 1 所示。

1.3 重合闸可靠性分析

文献[28]与文献[29]中的拓扑结构均可以开断

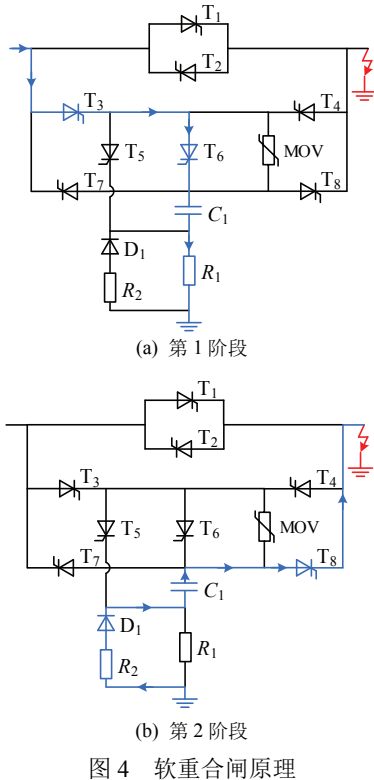


图4 软重合闸原理

表1 双向工作原理总结
Table 1 Summary of bidirectional working principle

状态	正向通流	反向通流
无故障正常工作	T ₁	T ₂
电容充电 (正常工作或软重合闸)	T ₃ , T ₆	T ₄ , T ₆
故障处理	T ₃ , T ₅ , T ₈	T ₄ , T ₅ , T ₇
软重合闸	T ₈	T ₇

故障电流，但是它们采用的电容充电原理使其无法可靠重合闸。

两个拓扑结构重合闸时的电容充电原理如图5所示，均以单向拓扑为例。两个方案电容充电的前提是主通流支路晶闸管导通。若此时负载侧仍处于故障状态，则断路器无法对故障电流进行开断。

文献[28]的电容充电限流电阻需要满足辅助晶闸管的电流关断条件，这导致其取值通常在数千欧姆的范围内；而文献[29]使用电容对的思想将限流电阻减少到数十欧姆，通过降低电容充电的时间常数来减少无法进行开断的时间间隔。

对于本文提出的直流断路器，电容充电过程如图4(a)所示，无需主通流支路晶闸管导通即可对电容进行充电，能够实现可靠重合闸；并且软重合闸功能可在重合闸之前判断故障类型。

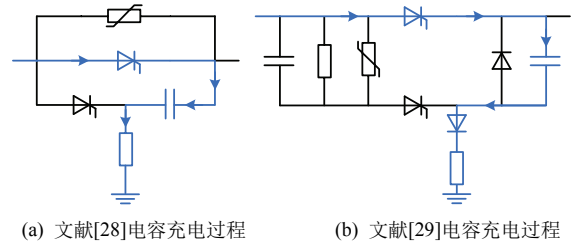


图5 重合闸电容充电原理

Fig.5 Capacitor charging principles of reclosing

2 断路器参数设计

2.1 电容参数设计

如 1.2.2 故障开断原理所述，为了确保主通流支路晶闸管在故障时可靠关断，晶闸管必须在电容的反压时间段内完成反向恢复过程。

假设在电容反压阶段内，故障电流维持不变，则电容可提供的反向电压时间为：

$$t_r = C_1 U_{DC} / I_{fault_max} \quad (1)$$

式中： t_r 为电容反压时间； U_{DC} 为直流母线电压； I_{fault_max} 为最大故障电流。

晶闸管的最大反向恢复时间可由产品手册中获得，电容反压时间必须大于最大反向恢复时间；与此同时，为了确保晶闸管可靠关断并补偿前文故障电流维持不变的假设，设置冗余系数 β 。 β 越大，电容的成本越高，故 β 的取值范围应在 1.3~2 之间[28]。因此电容的取值应满足：

$$C_1 = \beta t_{q_max} I_{fault_max} / U_{DC} \quad (2)$$

式中： t_{q_max} 为晶闸管的最大反向恢复时间。

2.2 MOV 参数设计

1) 需满足吸能条件：MOV 被用于吸收系统中的剩余能量，其本质是非线性电阻。在故障电流峰值(MOV 达到箝位电压)到故障电流降为 0 A 的时间段内，假设 MOV 两端的电压维持箝位电压不变；根据基尔霍夫电压定律，可得：

$$U_{clamp} = U_{DC} + L_{system} (I_{fault_max} / \Delta t) \quad (3)$$

式中： U_{clamp} 为 MOV 的箝位电压； L_{system} 为系统电感； Δt 为故障电流从峰值降为 0 A 的时间间隔。

因此故障电流处理时间为：

$$\Delta t = \frac{L_{system} I_{fault_max}}{U_{clamp} - U_{DC}} \quad (4)$$

式(4)为理想计算值，实际过程中 MOV 两端电压会缓慢下降，所以故障电流处理时间要略大于计算结果。

MOV 需要吸收的能量为:

$$E_{\text{MOV}} = \int U_{\text{clamp}} I_{\text{fault}} dt \approx 0.5 U_{\text{clamp}} I_{\text{fault_max}} \Delta t \quad (5)$$

2) 影响晶闸管(T_3 和 T_8 , T_4 和 T_7)可靠关断:

晶闸管 T_3 和 T_8 在故障开断过程的最后由于电流小于维持电流而关断, 如图 3(c)所示, 这需要 MOV 在直流母线电压下的漏电流小于维持电流, 即:

$$I_{\text{MOV}} | U_{\text{DC}} < I_{\text{H}} \quad (6)$$

式中: $I_{\text{MOV}} | U_{\text{DC}}$ 表示 MOV 在直流母线电压下的漏电流; I_{H} 为晶闸管的维持电流, 可由产品手册获得。根据式(5)和(6), 可对 MOV 进行选型; 除此之外 MOV 的箝位电压应小于直流断路器各器件的击穿电压。

2.3 电阻参数设计

电阻 R_1 是电容充电的限流电阻, 大限流电阻可以防止直流系统震荡, 但是会延长直流断路器重合闸的间隔时间(电容充电至直流母线电压后才允许进行软重合闸或重合闸); 与此同时电阻 R_1 也影响晶闸管 T_5 的可靠关断。综上, 电阻 R_1 的取值需要满足^[29]:

$$U_{\text{DC}} / I_{\text{H}} < R_1 < t_{\text{reclose}} / (5C_1) \quad (7)$$

式中: t_{reclose} 为断路器重合闸的间隔时间。

电阻 R_2 首先是故障类型判断电阻, 在软重合闸中需要及时判断故障类型, 这要求 R_2 不能过大而使永久性故障和暂时性故障的区别难以判断; 电阻 R_2 的上限推荐为 $1.5R_L$ 。电阻 R_2 也是电容放电的限流电阻, 要限制放电电流峰值在安全区间。综上, 电阻 R_2 的取值需要满足:

$$0.8R_L < R_2 < 1.5R_L \quad (8)$$

式中: R_L 为直流系统正常运行时的负载电阻。

2.4 耐压分析

1) 电容: 电容在直流系统正常运行时维持在直流母线电压, 而在故障处理过程中需要被反向充电到 MOV 的箝位电压, 这要求电容具有双向耐压能力, 电容的耐压值应满足:

$$U_{\text{stress_C1}} > U_{\text{clamp}} \quad (9)$$

式中: $U_{\text{stress_C1}}$ 为电容耐压值。

2) 电力电子器件: 根据 1.2 中的分析, 各电力电子器件的耐压值应分别满足:

$$U_{\text{stress_T5}} > U_{\text{DC}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_{\text{stress_T1}} = U_{\text{stress_T2}} = U_{\text{stress_T3}} = U_{\text{stress_T4}} = \\ U_{\text{stress_T6}} = U_{\text{stress_T7}} = U_{\text{stress_T8}} > U_{\text{clamp}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$U_{\text{stress_D1}} > U_{\text{clamp}} + U_{\text{DC}} \quad (12)$$

式中: $U_{\text{stress_T5}}$, $U_{\text{stress_T1}}$, $U_{\text{stress_T2}}$, $U_{\text{stress_T3}}$, $U_{\text{stress_T4}}$, $U_{\text{stress_T6}}$, $U_{\text{stress_T7}}$, $U_{\text{stress_T8}}$, $U_{\text{stress_D1}}$ 分别为 T_5 , T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_6 , T_7 , T_8 , D_1 耐压值。

3) 电阻: 电阻 R_1 耐压值与 D_1 耐压值一致, 电阻 R_2 的耐压值应满足:

$$U_{\text{stress_R2}} > U_{\text{DC}} \quad (13)$$

式中: $U_{\text{stress_R2}}$ 为 R_2 耐压值。

3 仿真与实验验证

3.1 10 kV 仿真分析

为了验证所提断路器拓扑的可行性, 首先搭建了 10 kV 仿真模型, 模拟断路器工作中压直流系统。10 kV 仿真模型参数如表 2 所示。电容值可由式(2)确定, 将系统直流电压、最大故障电流和晶闸管参数代入式(2), 计算可得电容值为 80 μF 。图 6 为断路器关键器件的 10 kV 仿真波形图。

仿真中假设 $t_0=2$ s 时发生短路故障, 故障电流快速上升, 如图 6 中 I_{T1} 所示。当故障电流在 $t_1=2.002$ s 达到 3 kA 时, 控制系统触发晶闸管 T_3 、晶闸管 T_5 和晶闸管 T_8 , 使已预充电到 10 kV 的电容反向并联在晶闸管 T_1 两端, 晶闸管 T_1 进入反向恢复过程, 如图 6 中 U_{T1} 所示; 故障电流被迅速换流到电容上, 如图 6 中 I_{T1} 和 I_{C1} 所示。

随后故障电流继续给电容放电至 0 V, 并反方向充电; 由于此阶段 MOV 并联在电容两端, 当电容电压在 $t_2=2.002$ s 时被反向充电到 MOV 箝位电压, 如图 6 中 U_{C1} 和 U_{MOV} 所示; MOV 电流开始增大, 电容电流开始减小, 电流被换流到 MOV 上, 如图 6 中 I_{C1} 和 I_{MOV} 所示。晶闸管 T_5 关断, 关断后其承受电容和 MOV 的电压差值, 如图 6 中 U_{T5} 所示。

最后 MOV 吸收系统中的剩余能量, 故障电流逐渐减少; 直到 $t_3=2.005$ s 减少到 0 A, 如图 6 中 I_{MOV} 所示。故障开断过程结束, 晶闸管 T_1 两端回到直流母线电压, 如图 6 中 U_{T1} 所示。

表 2 10 kV 仿真参数表

Table 2 Parameters used for 10 kV simulation

参数	数值
系统直流电压(U_{DC})/kV	10
系统负荷电流/kA	1
最大故障电流($I_{\text{fault_max}}$)/kA	3
$C_1/\mu\text{F}$	80

3.2 375 V 仿真分析

随后搭建了 375 V 仿真模型，模拟断路器工作在低压直流系统，并优化选取实验参数，验证实验原理。

375 V 仿真模型的所有参数如表 3 所示。MOV 由式(5)和式(6)所确定的参数进行选型，选择的型号为 V25S275P；电阻 R_1 的取值可由式(7)计算，选取 $R_1=3\text{ k}\Omega$ 。

电容是主通流晶闸管可靠关断的关键。假设电容值以 $5\text{ }\mu\text{F}$ 为间隔，从 $15\text{ }\mu\text{F}$ 增加到 $35\text{ }\mu\text{F}$ ，不同电容值下在换流过程中的电容电压波形如图 7 所示。可以看出随着电容值的增大，电容的反压时间逐渐增加，但是电容的成本也越高。最终电容被选

为 $25\text{ }\mu\text{F}$ 。

电阻 R_2 是故障类型判断电阻，也是电容放电的限流电阻。假设电阻 R_2 的取值以 $10\text{ }\Omega$ 为间隔，从 $20\text{ }\Omega$ 增加到 $40\text{ }\Omega$ ，不同电阻值下在软重合闸过程中的仿真波形如图 8 所示，其中 I_L 表示负载侧电流。

表 3 375 V 仿真与实验参数表

Table 3 Parameters used for 375 V simulations and experiments

参数	数值
系统直流电压(U_{DC})/V	375
最大故障电流($I_{\text{fault,max}}$)/A	35
$C_1/\mu\text{F}$	25
$R_1/\text{k}\Omega$	3
R_2/Ω	30
MOV	V25S275P
晶闸管维持电流/mA	150
晶闸管最大反向恢复时间/ μs	150

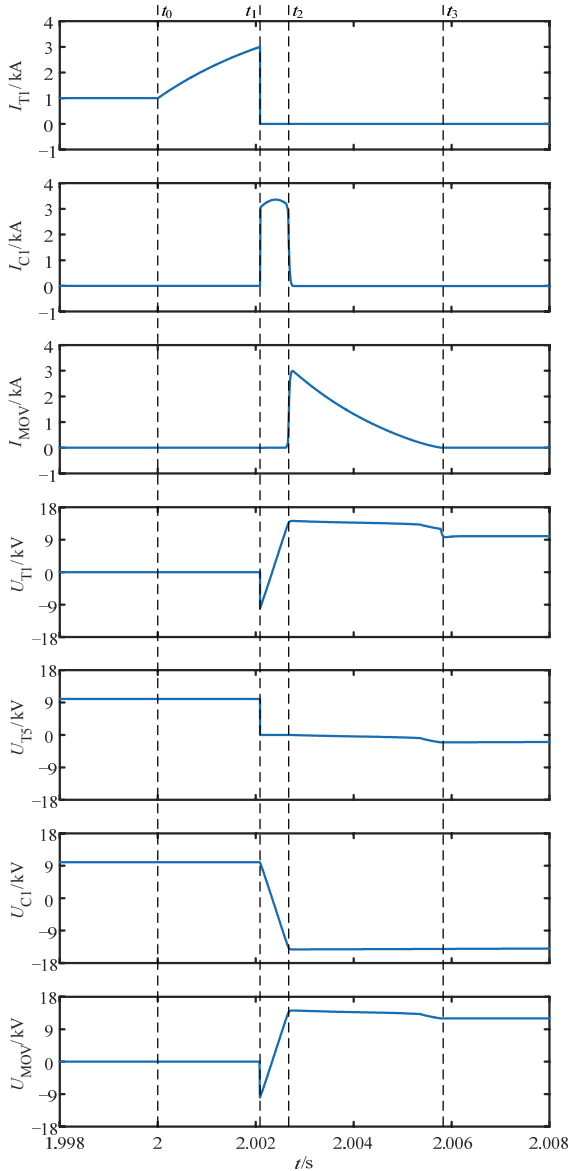


图 6 断路器关键器件 10 kV 仿真波形

Fig.6 10 kV simulation waveforms of key components of circuit breaker

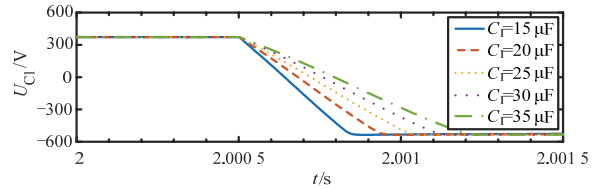
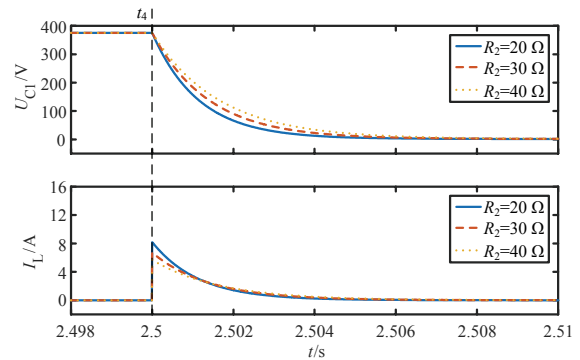
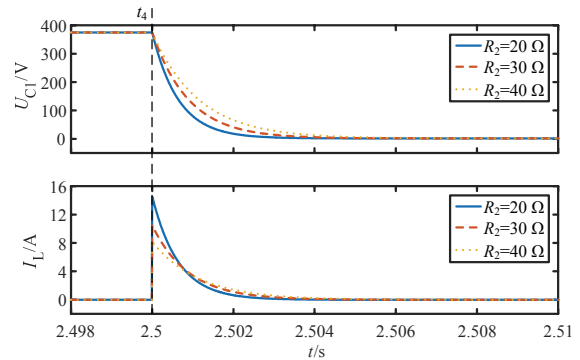


图 7 不同电容值仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms with different capacitance values



(a) 暂时性故障



(b) 永久性故障

图 8 不同电阻 R_2 仿真波形

Fig.8 Simulation waveforms with different R_2

可以看出 R_2 值越大时, 暂时性故障和永久性故障的区别越小, 故障类型越难以判断; R_2 值越小时, 虽然故障类型更容易判断, 但是对系统的电流冲击也越大。最终 R_2 的值被选为 30Ω 。

确定所有参数后, 375 V 短路故障开断仿真波形如图 9 所示, 其中 I_{CB} 表示断路器总电流, U_{CB} 表示断路器两端电压。仿真中仍假设 $t_0=2 \text{ s}$ 时发生短路故障, 故障电流快速上升。当故障电流在 $t_1=2.0005 \text{ s}$ 达到 35 A 时, 控制系统触发晶闸管 T_3 、 T_5 和 T_8 , 断路器两端电压变为电容上的负电压, 晶闸管 T_1 进入反向恢复过程。随后故障电流继续给电容放电并反方向充电, 约 $t_2=2.001 \text{ s}$ 时达到 MOV 的箝位电压, MOV 触发, 吸收系统中的剩余能量, 故障电流逐渐减少; 直到 $t_3=2.0021 \text{ s}$ 时, 故障电流减少到 0 A , 故障开断过程结束。

3.3 375 V 实验分析

在 375 V 仿真结果的基础上, 为了验证所提出直流断路器拓扑结构的性能, 搭建实验样机在 375 V 实验平台下测试, 如图 10 所示。图 10(a)所示实验平台电路图中, 单相交流电经过整流桥和滤波环节后转变为直流电, 调压器将电压调整至直流母线电压; 电感 L 用于限制故障电流上升率; R_L 为负载电阻, R_f 为短路电阻; 图 10(b)为搭建的实验测试样机。实验参数如表 3 所示。

3.3.1 故障开断实验

短路故障开断波形如图 11 所示, 短路故障发生于 t_0 , 随后故障电流迅速上升。在 t_1 时刻, 断路器检测到故障后触发晶闸管 T_3 、 T_5 和 T_8 , 此时断路器两端电压变为电容上的负电压, 晶闸管 T_1 进入反向恢复过程, 并在最大反向恢复时间内关断。随后故障电流继续给电容放电并反方向充电, 直到 t_2 时刻达到 MOV 的箝位电压, MOV 触发, 电流开始下降; 当故障电流于 t_3 时刻降至 0 A 后, 断路器两端电压回到直流母线电压, 故障开断过程结束。

图 11 显示电容提供的反向电压时间约为 $210 \mu\text{s}$, 大于所选晶闸管的最大反向恢复时间, 可保证其可靠关断。

3.3.2 软重合闸实验

软重合闸波形如图 12 所示, 故障开断过程结束, 电容被立即充电至直流母线电压, 为软重合闸或重合闸做好准备。

断路器进行软重合闸时, 在 t_4 时刻触发晶闸管 T_8 , 电容向负载侧放电。若负载侧是已经恢复正常

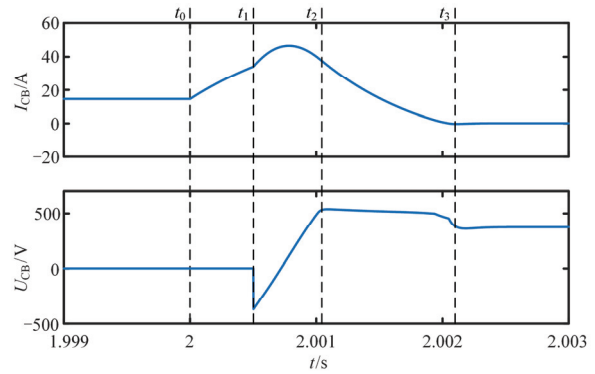
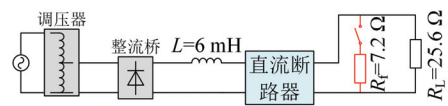
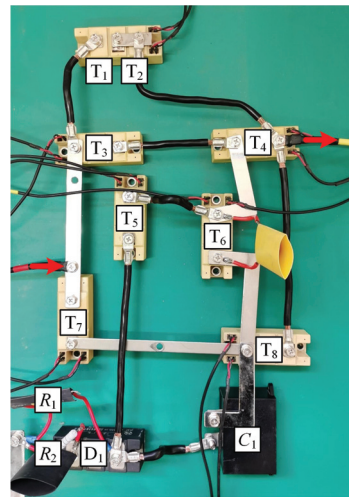


图 9 375 V 短路故障开断仿真波形

Fig.9 375 V simulation waveforms of dealing with short-circuit fault



(a) 实验平台电路图



(b) 实验测试样机

图 10 实验平台和实验样机

Fig.10 Experimental platform and prototype

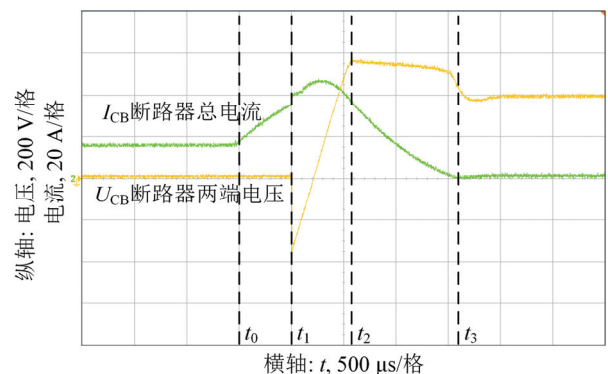


图 11 375 V 短路故障开断实验波形

Fig.11 375 V experiment waveforms of dealing with short-circuit fault

阻抗的暂时性故障,检测到如图 12(a)所示的波形,放电时间为 5.6 ms,负载侧电流峰值为 6 A;若负载侧是仍处于故障状态的永久性故障,则检测到如图 12(b)所示的波形,放电时间为 3.8 ms,负载侧电流峰值为 9.5 A。

对比图 12(a)和图 12(b),永久性故障的负载侧电流峰值更大且放电时间更短。在实际应用时,可仅由负载侧电流峰值和总放电时间作为判断故障类型的标志。

4 对比分析

为了凸显本文所提出拓扑结构的优点,将其与 5 个新型主动关断型双向断路器进行对比,见表 4。

在器件数量方面,所提方案使用了较多的电力电子器件,与此同时使用了最少的电容、电感和 MOV。而在断路器的性能方面,所提方案展现出了极大的优势。本文所提出的拓扑结构解决了文献 [28]、[29]、[33] 中的不可靠重合闸问题,并具有软重合闸的功能;消除了断路器关断状态下的 MOV 漏电流,提高电压利用率的同时解决 MOV 安全问题;并且在正常运行流经负荷电流时,具有低导通损耗的特性。因此,所提方案具有高可靠性和低损耗的优势。

5 结论

本文通过分析现有主动关断型晶闸管断路器的性能特点,针对现有结构存在的问题,提出了一种新型主动关断双向直流固态断路器拓扑结构;给出所提方案的工作原理和参数选择依据,并通过 10 kV 仿真、375 V 仿真与实验验证了有效性和可行性,对比分析则体现了其优势,主要优点如下:

1) 具有可靠重合闸能力的同时集成了软重合闸的功能;软重合闸可以有效降低在重合闸过程中晶闸管和 MOV 上的电应力。

2) 断路器关断状态下的 MOV 漏电流被消除,提高了器件的电压利用率。

3) 使用反并联晶闸管构成双向主通流支路,负荷电流仅流过一个晶闸管,降低断路器的导通损耗。

本文提出的拓扑结构适用于双向功率流动和保护场合,满足直流微网双向保护的需求,具有较高的可靠性。后续将进一步研究如何减少方案的电力电子器件数量和系统级保护验证。

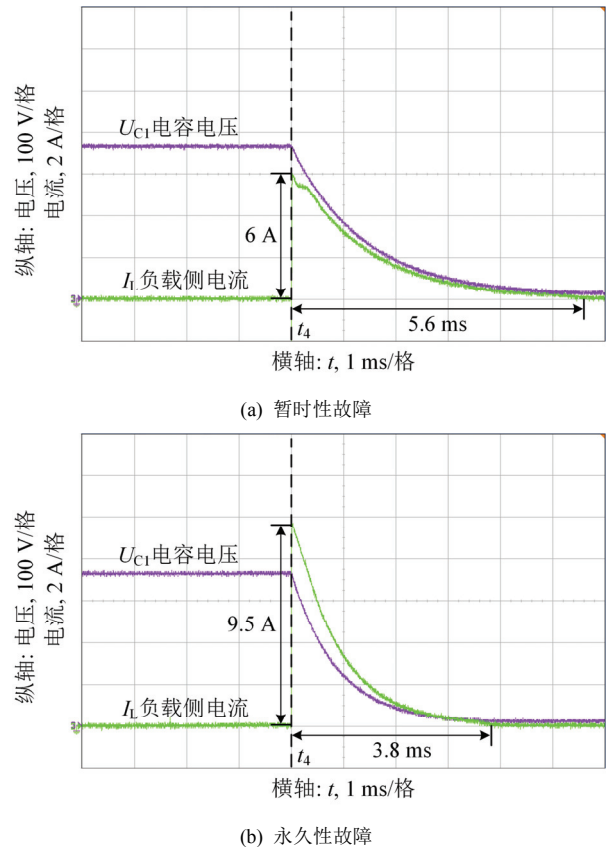


图 12 软重合闸实验波形

Fig.12 Experiment waveforms of soft reclosing

表 4 主动关断型双向晶闸管断路器对比表

Table 4 Comparison of thyristor-based active turn-off bidirectional DC solid state circuit breakers

参数	文献[28]	文献[29]	文献[30]	文献[33]	文献[34]	所提方案
电力电子器件数量	4	9	6*	4*	6	9
电容数量	2	2	1	1	2	1
电感数量	0	0	0	1	2	0
MOV 数量	1	2	1	1	1	1
消除 MOV 漏电流	无	有	无	有	无	有
可靠重合闸	无	无	有	无	有	有
软重合闸	无	无	有	无	无	有
导通损耗	低	低	高	低	中	低

注: *表示需要额外配置一个双向机械开关。

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] 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(13): 7-12.

- WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [3] 陶育菲, 周中正, 江雪, 等. 低损耗双向Z源固态直流断路器设计[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 153-161.
- TAO Yufei, ZHOU Zhongzheng, JIANG Xue, et al. Design of bidirectional Z-source solid-state DC circuit breaker with low loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 153-161.
- [4] 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.
- [5] 薛士敏, 齐金龙, 刘冲. 直流微网保护综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3404-3412.
- XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong. A research review of protection for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3404-3412.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 黄云峰, 肖晃庆, 黄莹, 等. 具备故障限流和快速故障清除能力的多端口直流断路器拓扑与控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2128-2145.
- HUANG Yunfeng, XIAO Huangqing, HUANG Ying, et al. Topology and control strategies of a multiport DC circuit breaker integrating current-limiting and fast fault clearing capabilities[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2128-2145.
- [10] 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.
- [11] 陈晓龙, 冯永涛, 周宁, 等. 具备自适应重合闸能力的多端口混合式直流断路器[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2601-2613.
- CHEN Xiaolong, FENG Yongtao, ZHOU Ning, et al. Multi-port hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing capability[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2601-2613.
- [12] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5438-5446.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei Project[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5438-5446.
- [13] 郭铭群, 梅念, 李探, 等. $\pm 500\text{kV}$ 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204.
- GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of $\pm 500\text{kV}$ Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204.
- [14] 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.
- [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]. 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.
- [16] SANO K, TAKASAKI M. A surgeless solid-state DC circuit breaker for voltage-source-converter-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2690-2699.
- [17] SCHMERDA R, CUZNER R, CLARK R, et al. Shipboard solid-state protection: overview and applications[J]. IEEE Electrification Magazine, 2013, 1(1): 32-39.
- [18] 张杰, 纪江辉, 张玉婵, 等. 具备重合闸功能的经济型直流断路器研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1083-1091.
- ZHANG Jie, JI Jianghui, ZHANG Yuchan, et al. Research on economical DC circuit breaker with reclosing function[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1083-1091.
- [19] 张明锐, 金鑫, 刘金辉, 等. 基于IGBT的固态断路器开断策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 123-126, 131.
- ZHANG Mingrui, JIN Xin, LIU Jinhui, et al. Study on breaking strategy of solid-state circuit breaker based on IGBT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 123-126, 131.
- [20] 张帆, 杨旭, 任宇, 等. 一种适用于固态直流断路器的IGBT串联均压电路[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 656-663.
- ZHANG Fan, YANG Xu, REN Yu, et al. Voltage balancing circuit for series-connected IGBTs in solid-state breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 656-663.
- [21] RAVI L, ZHANG D, QIN D H, et al. Electronic MOV-based voltage clamping circuit for DC solid-state circuit breaker applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 7561-7565.
- [22] KHEIROLLAHI R, ZHANG H, ZHAO S Y, et al. A DC solid-state circuit breaker based on transient current commutation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4614-4625.
- [23] 李长乐, 聂子玲, 朱俊杰, 等. 新型T源直流固态断路器技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 879-889.
- LI Changle, NIE Ziling, ZHU Junjie, et al. Research on a novel T-source solid state breaker for direct current system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 879-889.
- [24] 周中正, 费玉清, 王雨峰, 等. 面向直流微网的磁耦合双向Z源固态断路器建模与设计[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 143-153.
- ZHOU Zhongzheng, FEI Yuqing, WANG Yufeng, et al. Modeling and design of magnetically coupled bidirectional Z-source solid-state circuit breaker for DC Microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 143-153.
- [25] ZHOU Z Z, FEI Y Q, LI Y, et al. Circuit modeling and experimental validation of a bidirectional Z-source circuit breaker based on coupled inductors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(6): 6242-6252.
- [26] CHEN J, PANG Z A, SONG W S. An accurate calculation method for minimum detectable fault ramp rate of coupled-inductor Z-Source DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(11): 15021-15032.

- [27] SONG W Z, WANG C, HAN Z H, et al. Research on breaking function for two bidirectional Γ -Source DC solid-state circuit breakers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 3516-3528.
- [28] SHU J, MA J P, WANG S L, et al. A new active thyristor-based DCCB with reliable opening process[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3617-3621.
- [29] KHEIROLLAHI R, ZHAO S Y, ZAN X, et al. Fast Y-type Thyristor-based DC SSCB using complementary commutation in a capacitor-capacitor pair structure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 1144-1154.
- [30] MARWAHA M, SATPATHI K, SATHIK M H M, et al. SCR-based bidirectional circuit breaker for DC system protection with soft reclosing capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4739-4750.
- [31] ZHU J, HE S M, ZENG Q P, et al. Multiport thyristor-based DC solid-state circuit breaker with soft reclosing capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 15845-15857.
- [32] AYUBU Z, KIM J Y, YU J Y, et al. Novel bidirectional DC solid-state circuit breaker with operating duty capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9104-9113.
- [33] QIN K J, WANG S L, MA J P, et al. A thyristor-based reliable bidirectional SSCB with fast-reclosing protection function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(8): 8841-8852.
- [34] WANG Y F, WANG S, UGALDE-LOO C E, et al. Low-loss bidirec-

tional solid-state circuit breakers with reliable breaking capability for protecting DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 16118-16129.



HE Songming
Ph.D. candidate

贺嵩铭

1999—, 男, 博士生

主要从事固态断路器及电力电子器件研究

E-mail: hesongming@mail.iee.ac.cn



ZHU Jin
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

朱 晋(通信作者)

1987—, 男, 博士, 副研究员, 硕导

主要从事直流系统保护和变换器设计等研究工作

E-mail: zhujin@mail.iee.ac.cn

收稿日期 2024-10-17 修回日期 2024-12-03 编辑 陈 蔓