

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241087

具备快速重合闸能力的低损耗低成本双向固态式直流断路器

王顺亮^{1,2}, 李明², 辛清明¹, 秦科军², 王鹏², 马俊鹏², 刘天琪²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 相较于全控器件, 晶闸管在损耗、成本及耐浪涌电流等方面具有优势, 利用其设计直流断路器已经成为一种趋势。针对现存晶闸管型固态式直流断路器普遍存在可控性差、可靠性低、导通损耗高以及无法满足重合闸需求等问题, 提出一种具备快速重合闸能力的固态式直流断路器。首先, 介绍了拓扑的电路结构和工作原理, 建立了断路器数学模型并给出各元器件的参数设计原则。然后, 与现有方案进行性能和经济对比, 通过仿真分析了各方案中关键元器件的电气应力。最后, 搭建了断路器样机实验测试平台。实验结果表明, 所提拓扑能够可靠开断故障电流, 并有效保证了直流系统重合闸安全。

关键词: 直流配电网; 故障保护; 晶闸管; 固态式直流断路器; 重合闸

A low-cost bidirectional solid-state DC circuit breaker with low power loss and fast-reclosing capability

WANG Shunliang^{1,2}, LI Ming², XIN Qingming¹, QIN Kejun², WANG Peng², MA Junpeng², LIU Tianqi²

(1. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Compared to fully controlled semiconductor devices, thyristors offer advantages in terms of power loss, cost, and surge current tolerance, making them an increasingly popular choice for designing DC circuit breakers. To address the common issues found in existing thyristor solid-state DC circuit breakers, such as poor controllability, low reliability, high conduction losses, and the inability to meet reclosing requirements, a new solid-state DC circuit breakers with fast reclosing capability is proposed. First, the circuit structure and working principle are introduced, and then the mathematical models are established and the parameter design principles of each component are provided. Next, the performance and cost of the topology are compared with the existing schemes, and the electrical stress of the key components in each scheme is analyzed through simulation. Finally, a prototype testing platform is built. Experimental results show that the proposed topology can reliably interrupt fault current, and effectively ensure the safe reclosing in DC systems.

This work is supported by the "Digital Power Grid" Open Fund Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. DPGCSG-2024-KF-41).

Key words: DC distribution grid; fault protection; thyristor; solid-state DC circuit breaker; reclosing

0 引言

随着光伏、风电等新能源的广泛接入及电动汽车、变频设备等直流负载不断增加, 具备高效率、大容量、高可靠性等优点的直流配电网得到了广泛研究^[1-3]。然而, 直流短路故障电流上升速度快且无电流自然过零点, 严重影响直流配电网安全运行, 需要直流断路器快速隔离故障^[4-6]。

不同于机械式直流断路器^[7], 基于半导体器件设计的固态式直流断路器(solid-state DC circuit breaker, SSCB)具有动作速度快和无弧开断的优势, 是直流配电网的有效保护装置之一^[8]。传统的基于全控器件的SSCB结构简单, 但导通损耗大、建设成本高^[9-10]。相较于全控器件, 晶闸管导通压降低、成本低且容量高, 因此, 利用晶闸管设计直流断路器已经成为一种趋势。但晶闸管是半控型器件, 如何关断晶闸管是设计此类断路器的关键。现存晶闸管型SSCB(thyristor-based SSCB, TCB)方案可分为两类: 1) 以故障发生为触发条件的被动式方案; 2) 配

基金项目: 中国南方电网有限责任公司“数字电网”开放基金项目资助(DPGCSG-2024-KF-41)

备辅助晶闸管实现主动动作的主动式方案。

被动式方案主要包括 Z 源、T 源及其衍生断路器, 其原理是利用故障本身引起的电感电压突变触发断路器响应实现晶闸管自动关断^[11]。文献[11-12]为 3 种典型 Z 源断路器, 但它们仅可开断单向电流, 适用场景有限。图 1 所示文献[13-16]提出的 4 种被动式断路器具备双向传输能力, 实用性更高。然而被动式方案普遍存在以下 4 个问题。1) 主动控制能力低。被动式方案的触发条件是发生短路故障, 故无法主动开断运行电流。2) 可靠性低。通流支路晶闸管的关断回路包含了外部线路, 由于故障位置和类型未知, 无法保证通流晶闸管可靠开断。此外, 负载切换或线路功率波动时, 易导致断路器误动作, 源荷协调将面临巨大挑战^[17]。3) 双向结构导通损耗大。对于 TCB 而言, 只有一对反向并联晶闸管是损耗最低的双向结构。然而被动式方案的通流支路普遍包含了晶闸管、二极管等器件, 导通损耗高。4) 不具备快速重合闸能力。TCB 常配备预充电电容, 但首次开断后, 电容无法恢复至初状态, 因此难以实现快速重合闸。

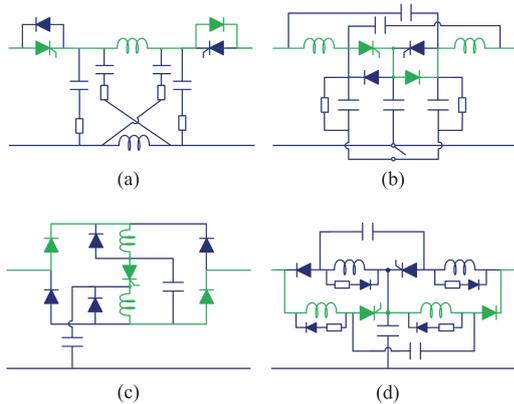


图 1 文献[13-16]中的双向被动式断路器

Fig. 1 Bi-directional passive TCBs in Ref [13-16]

为解决被动式方案无法主动关断运行电流的问题, 图 2 所示的 4 种主动式方案提出配备辅助晶闸管主动开断电流^[18-21]。图 2(a)所示拓扑在导通辅助晶闸管后, 流过其通流支路晶闸管的电流降低至 0, 随后通流晶闸管关断; 图 2(b)—图 2(d)所示拓扑则主动投入耦合电感为通流晶闸管创造关断条件。上述方案相比被动式方案增加了主动控制能力, 但通流晶闸管的关断回路仍包含外部电路, 导致关断过程不可靠。为进一步解决可靠性问题, 图 3 所示文献[22-25]提出 4 种通流晶闸管的关断不受外部电路影响的主动式断路器。然而, 图 3(a)和图 3(b)所示拓扑导通损耗大; 图 3(c)和图 3(d)所示拓扑导通损耗低, 但很难满足直流配电网的重合闸需求^[26]。图

3(c)所示拓扑重合闸后, 电容不能快速充电至源端电压, 不适用于快速重合闸场景。图 3(d)中小阻值的电阻 R_1 和 R_2 会导致辅助晶闸管无法可靠关断, 影响后续重合闸。

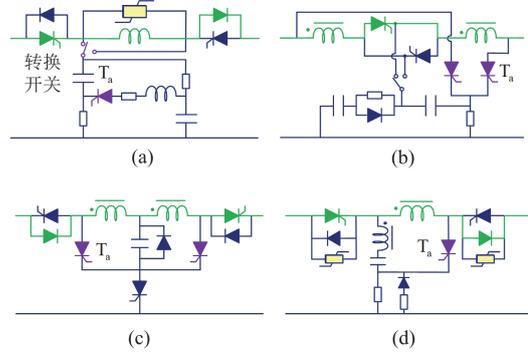


图 2 文献[18-21]中的双向主动式断路器

Fig. 2 Bi-directional active TCBs in Ref [18-21]

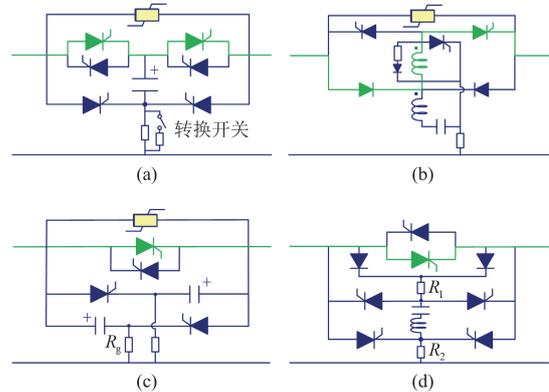


图 3 文献[22-25]中可靠开断的断路器

Fig. 3 Reliable-breaking TCBs in Ref [22-25]

综上, 现存方案普遍存在主动控制能力差、开断可靠性低、导通损耗大、不具备快速重合闸保护能力的问题。针对上述问题, 本文提出一种双向 TCB, 该拓扑可主动、可靠地开断运行和故障电流。其通流支路只有一对反向并联晶闸管, 导通损耗极低。此外, 利用 LC 谐振电路可在重合闸后翻转电容极性, 实现快速重合闸保护。首先给出断路器结构及工作原理, 而后建立数学模型并给出参数设计原则, 与现存 TCBs 进行性能对比研究, 最后通过实验和仿真验证拓扑可行性。

1 拓扑结构与工作过程

1.1 拓扑结构

本文所提拓扑如图 4 所示, 断路器包含了通流支路和两条辅助支路。通流支路的晶闸管 T_m 、 T_m^* 负责能量传输, 运行导通损耗极低。辅助支路 1 由电

感 L_p 、电容 C 及晶闸管 T_2 、 T_3 构成，通过导通晶闸管 T_2 主动开断正向电流，晶闸管 T_3 则用于实现快速重合闸保护。 R_g 为电容 C 的充电电阻，在电流开断过程中，大电阻 R_g 视为开路。辅助支路 2 由 C 、 T_2^* 、 T_3^* 、 R_g 及电感 L_p 组成，用于开断反向电流。避雷器 MOV 用于钳位电压和吸收故障能量。与所提拓扑串联的物理隔离开关 (residual circuit breaker, RCB) 可以在断路器成功动作后物理隔离故障， L_m 为限流电抗器。

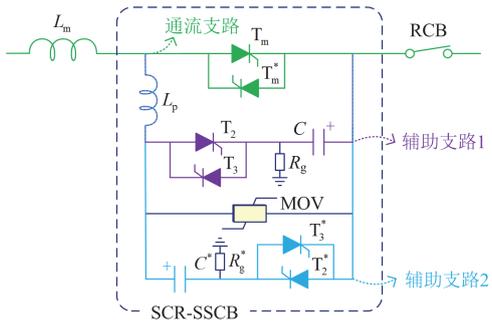


图 4 所提直流断路器拓扑

Fig. 4 The proposed DC circuit breaker topology

1.2 工作原理

所提拓扑高度对称，正向和反向电流开断原理相同，为了方便起见，这里只介绍正向电流开断过程。图 5 为正向故障电流开断及重合闸的各阶段示意图。

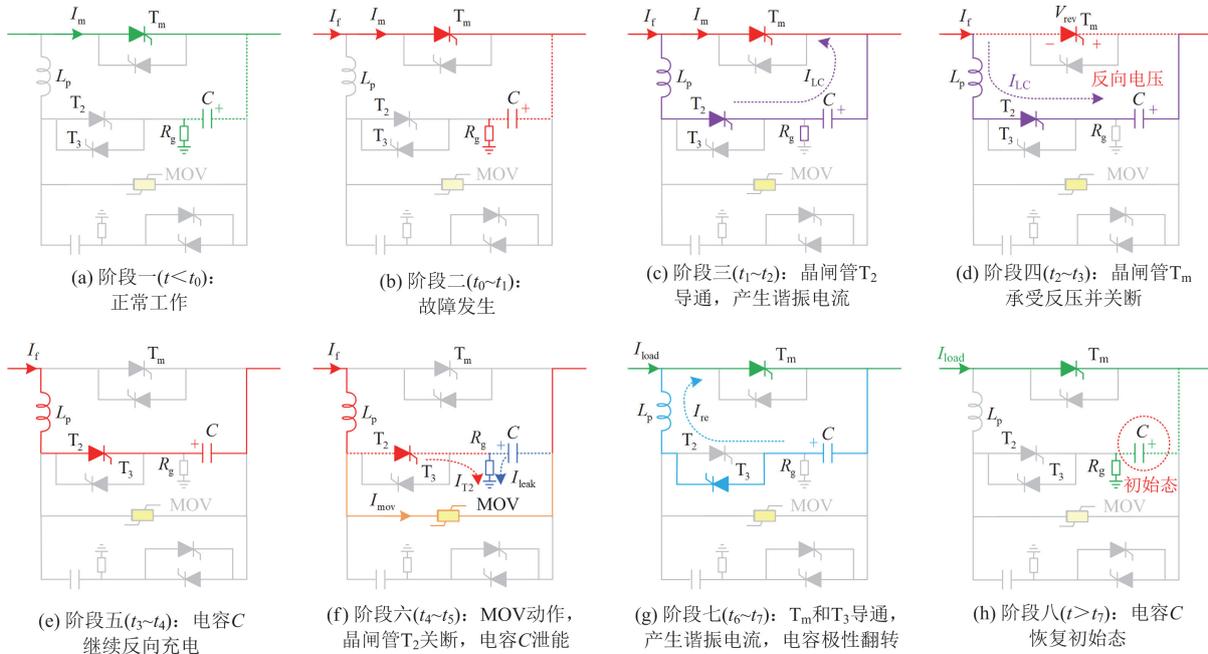


图 5 所提断路器故障切除及重合闸过程

Fig. 5 Process of circuit breaker fault clearing and reclosing

阶段一($t < t_0$): 当断路器处于正常工作状态，负载电流仅需流经晶闸管 T_m ，导通损耗极低。此外，电容 C 通过接地电阻 R_g 充电至系统电压 V_s ，因此无需外部电压源为电容预充电。

阶段二($t_0 \sim t_1$): 当短路故障发生，故障电流 I_f 迅速上升。由于阶段二持续时间很短，且接地电阻 R_g 阻值很大，电容电压损失忽略不计。

阶段三($t_1 \sim t_2$): 检测到故障，导通晶闸管 T_2 ，电感 L_p 和电容 C 产生谐振电流 I_{LC} 。谐振电流 I_{LC} 持续增大，当 I_{LC} 和故障电流 I_f 相等时，流经晶闸管 T_m 的电流 I_m 降低至 0。

阶段四($t_2 \sim t_3$): 晶闸管 T_m 持续承受电容残余电压并关断。

阶段五($t_3 \sim t_4$): 晶闸管 T_m 成功关断后，电容 C 反向充电。

阶段六($t_4 \sim t_5$): 当电容充电至避雷器动作电压时，避雷器动作并耗散系统能量。由于避雷器动作电压一般为源端电压的 1.2~2 倍^[27]，因此电容电压被钳位至避雷器动作电压，其绝对值 $|V_C|$ 大于系统电压。首次电流开断结束后，晶闸管 T_2 自动关断，电容 C 通过电阻 R_g 泄放能量，时间段为 $t_5 \sim t_6$ ，但该电路的时间常数 $R_g C$ 较大，电容电压变化可忽略不计。

阶段七($t_6 \sim t_7$): 系统重合闸, 导通晶闸管 T_m 和 T_3 , 电容 C 和电感 L_p 产生谐振电流 I_{re} , 该电流仅在断路器内部流动, 并不影响电能传输。

阶段八($t > t_7$): 半个谐振周期后电容极性翻转, 恢复至图 5(h)所示的初始状态, 晶闸管 T_3 承受反向电压关断, 此时断路器已具备再次动作能力。

1.3 时序分析

图 6 为所提拓扑开断永久性短路故障的电流、电压及控制信号波形, 其中包括两次故障电流开断及一次重合闸过程。 t_5 时刻首次故障电流开断结束, 电容电压 V_C 高于系统电压。 t_6 时刻断路器重合闸, 电容极性恢复时间只需半个谐振周期, 因此电容极性翻转后仍满足 $V_C > V_s$, 断路器可再次开断故障电流。

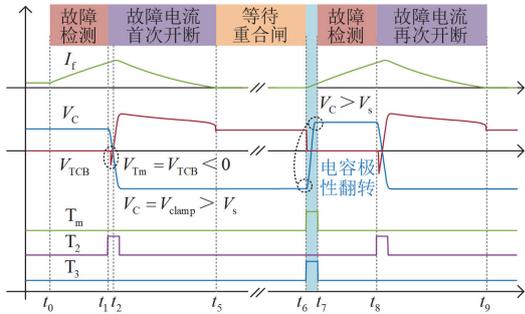


图 6 永久性故障电流开断及重合闸理论波形

Fig. 6 Theoretical waveforms of current breaking and reclosing process with permanent fault

所提拓扑通过导通辅助晶闸管 T_2 触发动作, 可主动开断运行和故障电流。由于运行电流小于故障电流, 通流晶闸管 T_m 上的电流将更快下降至 0, T_m 承受反向电压的时间更长, 因此确保开断故障电流即可保证开断运行电流。此外, 所提断路器巧妙利用谐振电路实现电容极性翻转, 可在重合闸后快速恢复开断能力。

2 断路器数学模型及参数设计

如 1.3 节所述, 相较于运行电流开断过程, 开断故障电流时通流支路晶闸管承受反压时间更短, 关断条件更严苛。为保证直流断路器开断过程可靠, 需要保证发生最严重短路故障时晶闸管 T_m 承受反向电压时间仍长于其反向恢复时间 t_q 。本节分析首次故障电流开断过程和重合闸后电流开断过程。

2.1 首次故障电流开断过程

2.1.1 故障发生($t_0 \sim t_1$)

故障前系统处于正常工作状态, 流过断路器通流支路的工作电流为 I_0 。考虑到故障位置的不确定

性, 线路电感随故障点与断路器的距离增大而增大。故障发生时刻为 t_0 , 故障电流 I_f 随时间的变化规律如式(1)所示, 式(1)中 L_m 和 L_{line} 分别为电抗器的电感值和线路电感值。

$$I_f = I_0 + \frac{V_s}{L_m + L_{line}}(t - t_0) \quad (1)$$

2.1.2 断路器动作, 晶闸管 T_2 导通($t_1 \sim t_2$)

t_1 时刻断路器动作, 晶闸管 T_2 导通。如图 7(a)所示, 谐振电路中的电流 I_{LC} 为

$$I_{LC} = \sqrt{\frac{C}{L_p}} V_s \sin\left(\frac{t - t_1}{\sqrt{L_p C}}\right) \quad (2)$$

根据 KCL 定律, 流过晶闸管 T_m 的电流 I_m 如式(3)所示。

$$I_m = I_f - I_{LC} \quad (3)$$

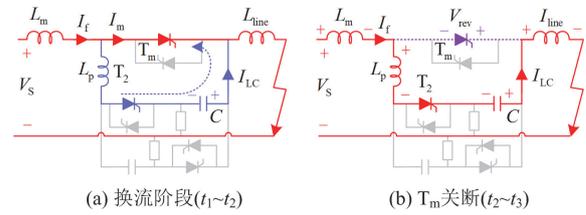


图 7 通流晶闸管关断过程等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuits of thyristor turn-off process

考虑到谐振开始至电流 I_m 过零的时间较短, 为便于分析, 对式(3)进行泰勒展开并化简得到式(4)。

$$I_m = V_s \left(\frac{1}{L_m + L_{line}} - \frac{1}{L_p} \right) t + A \quad (4)$$

其中

$$A = I_0 - V_s \left(\frac{t_1}{L_m + L_{line}} - \frac{t_0}{L_p} \right) \quad (5)$$

当电感 L_p 满足式(6)时, 式(4)斜率为负, 且电感值 L_p 越小, 电流 I_m 下降越快。设 t_2 时刻电流 I_m 为 0, 此时电容电压 V_C 和谐振电流 I_{LC} 分别如式(7)和式(8)所示。

$$L_p < L_m + L_{line} \quad (6)$$

$$V_C(t_2) = V_s \cos\left(\frac{t_2 - t_1}{\sqrt{L_p C}}\right) \quad (7)$$

$$I_{LC}(t_2) = \sqrt{\frac{C}{L_p}} V_s \sin\left(\frac{t_2 - t_1}{\sqrt{L_p C}}\right) \quad (8)$$

2.1.3 晶闸管 T_m 承受反压并关断($t_2 \sim t_3$)

t_2 时刻后, 流过晶闸管 T_m 的电流为 0, T_m 承受

反向电压 V_{rev} ，如式(9)所示。

$$V_{rev} = V_{Lp} + V_C \quad (9)$$

式中： V_{Lp} 为电感 L_p 上的电压，如式(10)所示。

$$V_{Lp} = \frac{L_p}{L_p + L_m + L_{line}}(V_s + V_C) \quad (10)$$

通常限流电抗器 L_m 为 mH 量级，而电感 L_p 为 μH 量级， L_p 满足式(11)，故式(10)中 V_{Lp} 近似为 0，从而晶闸管 T_m 承受的反向电压近似于电容电压 V_C 。由于晶闸管 T_m 反向恢复时间极短，默认故障电流维持在 t_2 时刻的值 $I_{LC}(t_2)$ ， T_m 承受反向电压的时间 Δt 如式(12)所示。

$$L_p \ll L_m + L_{line} \quad (11)$$

$$\Delta t = t_3 - t_2 > \frac{CV_C(t_2)}{I_{LC}(t_2)} \quad (12)$$

$$\Delta t > t_q \quad (13)$$

式中： t_q 为晶闸管 T_m 反向恢复时间。

Δt 满足式(13)时晶闸管 T_m 可靠关断。当外部电感 L_{line} 增大时，式(4)斜率绝对值增大，流经晶闸管 T_m 的电流 I_m 将更快降为 0，此外 t_2 时刻电容电压 $V_C(t_2)$ 增大，即电容残余电压提高，电流 $I_{LC}(t_2)$ 减小，即电容反向充电电流更小，因此 Δt 增长。故 $L_{line} = 0$ mH 时晶闸管 T_m 承受反压的时间最短，为最严重短路故障，确保此情况下 $\Delta t > t_q$ 即可确保任意故障位置下晶闸管 T_m 可靠关断。

2.1.4 避雷器动作，晶闸管 T_2 关断($t_4 \sim t_5$)

避雷器动作后故障电流向避雷器转移，由于通流晶闸管关断的时间较短，断路器动作后故障电流上升幅值较小，避雷器的耗能容量 E_{MOV} 可大致根据式(14)估算。

$$E_{MOV} = \int I_f V_{clamp} dt \approx \frac{(L_m + L_{line})I_{f_max}^2 V_{clamp}}{2(V_{clamp} - V_s)} \quad (14)$$

式中： I_{f_max} 为故障电流峰值； V_{clamp} 为避雷器的钳位电压。

避雷器动作后，为使辅助晶闸管 T_2 可靠关断，经电阻 R_g 流过 T_2 的电流 I_{T2} 应小于其维持电流 I_{hold} ，电阻 R_g 应满足式(15)。 R_g 阻值越大，断路器与外电路的隔离效果越好。

$$I_{T2} = \frac{V_s}{R_g} < I_{hold} \quad (15)$$

2.2 重合闸及电流再次开断过程

2.2.1 等待重合闸阶段($t_5 \sim t_6$)

首次电流开断后，电容 C 电压绝对值为避雷器的钳位电压，此后电容经电阻 R_g 放电，时间常数 τ 如式(16)所示，放电时间为电流开断与重合闸动作相隔时间^[28]。当时间常数 τ 足够长(秒级或更高)时，电容电压损失忽略不计。

$$\tau = R_g C \quad (16)$$

2.2.2 断路器重合闸($t_6 \sim t_7$)

如图 8(a)所示，重合闸时流过晶闸管 T_m 的电流 I_{sum} 为谐振电流 I_{re} 与故障电流 I_f 之和，需要根据晶闸管的浪涌能力进行参数设计。当线路电感为 0 且故障仍然存在时，电流 I_{sum} 上升速度最快，此时 I_{sum} 表达式为

$$I_{sum} = I_{re} + I_f = \sqrt{\frac{C}{L_p}} V_{clamp} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{L_p C}}\right) + \frac{V_s}{L_m} t \quad (17)$$

对式(17)求导可得式(18)，式中 I'_{sum} 为电流 I_{sum} 关于时间的一阶导数。电流 I_{sum} 取最大值时对应的的时间 t_{max} 出现在电流 I_{re} 的半个谐振周期内，由式(18)计算可得 t_{max} ，如式(19)所示。

$$I'_{sum} = \frac{V_{clamp}}{L_p} \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_p C}}\right) + \frac{V_s}{L_m} \quad (18)$$

$$t_{max} = t \Big|_{I'_{sum}=0} \quad (19)$$

为保护晶闸管 T_m ，电流 I_{sum_max} 必须小于晶闸管 T_m 的浪涌电流值 I_{surge} ，如式(20)所示。虽然谐振电流幅值较大，但谐振时间非常短，且晶闸管具有很强的通流能力，根据式(20)进行合理选型，可以保证晶闸管可靠运行。

$$I_{sum_max} = I_{sum} \Big|_{t=t_{max}} < I_{surge} \quad (20)$$

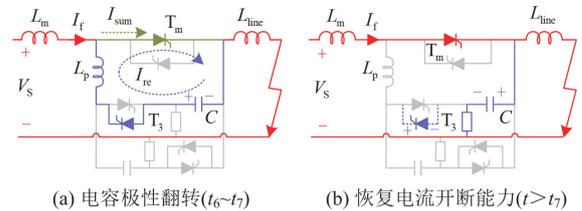


图 8 重合闸过程等效电路

Fig. 8 Equivalent circuits of reclosing process

2.2.3 断路器恢复开断能力($t > t_7$)

为确保断路器重合闸后能再次开断故障电流，则电容 C 极性翻转、辅助晶闸管 T_3 关断的过程需在

检测到故障电流前完成, 如式(21)所示, I_0 为动作时刻的故障电流值。

$$\pi\sqrt{L_p C} + t_q < I_0 \left(\frac{L_m}{V_s} \right) \quad (21)$$

2.3 参数设计原则

根据上述理论推导, 元件的设计原则如下:

- 1) 根据直流系统电压等级、额定功率等参数及式(20)选择晶闸管;
- 2) 根据式(6)、式(11)、式(20)选择电感 L_p ;
- 3) 根据式(12)、式(16)、式(20)选择电容 C ;
- 4) 根据式(15)和式(16)选择电阻 R_g ;

5) 根据式(14)选择避雷器 MOV。

综上, 各元件均可依据直流系统中确定的参数进行设计, 变化的线路参数无需纳入元件选型考量, 因此电流开断的可靠性得到保障。

3 对比与讨论

3.1 性能对比研究

表 1 选取了图 1—图 3 中文献[15-16]、文献[20-25]对应双向 TCBs 拓扑与本文所提拓扑进行关键性能指标对比。所提拓扑具有以下几方面的性能优势。

表 1 双向 TCBs 参数对比

Table 1 Parameters comparison of different bi-directional TCBs

	图 1(c)	图 1(d)	图 2(c)	图 2(d)	图 3(a)	图 3(b)	图 3(c)	图 3(d)	图 4
器件数目									
晶闸管	1	2	5	3	6	3	4	6	6
二极管	6	6	3	3	0	2	0	2	0
电容	2	3	1	1	1	1	2	1	2
电感	2	4	2	2	0	2	0	1	1
电阻	0	4	0	2	2	2	2	2	2
MOV	0	0	0	2	1	1	1	0	1
转换开关	0	0	0	0	1	0	0	0	0
指标									
导通器件	1T+2D+2L	1T+1D+2L	1T+1D+2L	1T+1D+1L	2T	1T+1D	1T	1T	1T
主动开断	×	×	√	√	√	√	√	√	√
可靠性高	×	×	×	×	√	√	√	√	√
快速重合闸保护	×	×	×	×	×	×	×	×	√

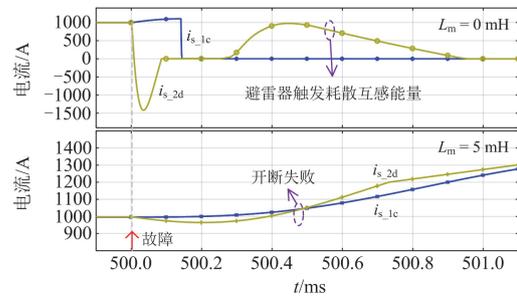
注: T、D、L 分别表示晶闸管、二极管和电感, 字母前的数字为器件数。

1) 导通损耗低。大量 TCBs 为实现双向传输和双向电流开断的功能, 牺牲了导通损耗。而所提拓扑通流支路仅有一对反并联晶闸管, 实现双向电流开断的同时保证极低的导通损耗。

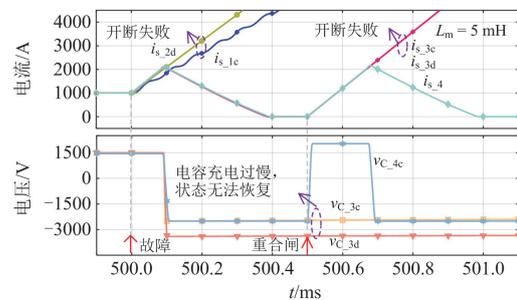
2) 高可控性。相比于被动式方案, 本拓扑通过导通辅助晶闸管投入谐振电路关断通流晶闸管, 可主动开断运行电流和故障电流。

3) 电流开断可靠性高。由于故障位置和类型未知, 图 1(d)和图 2(a)对应方案的晶闸管关断回路含有未知的线路参数, 因此存在图 9(a)中远距离故障开断失败的问题。图 9 中 i_{s_1c} 、 i_{s_2d} 、 i_{s_4} 分别为表 1 中图 1(c)、图 2(d)和图 4 对应方案的电源端电流, v_{C_3c} 、 v_{C_3d} 和 v_{C_4} 分别为表 1 中图 3(c)、图 3(d)和图 4 对应方案的电容电压。所提拓扑中通流晶闸管的关断回路不包括外电路, 电流开断过程不受线路参数影响, 且线路波动和负载变化等不会触发误动作, 具有更高的电流开断可靠性。

4) 具备快速重合闸能力。如图 9(b)中所示, 以图 3(c)和图 3(d)对应拓扑由于电容充电时间常数较大, 在有故障情况下重合闸时电容充电过慢, 电容



(a) 电流开断失败



(b) 重合闸后电流开断

图 9 各方案仿真结果对比

Fig. 9 Simulation results comparison of various schemes

状态无法恢复到初始态, 无法实现重合闸保护。而本拓扑利用 LC 谐振电路翻转电容极性至初始状态, 从而具备可靠的快速重合闸保护能力。

3.2 经济性对比研究

本节针对所提方案与现存 TCB 方案进行经济性对比研究, 对比内容包括各方案内器件数量和关键器件耐压两项内容。

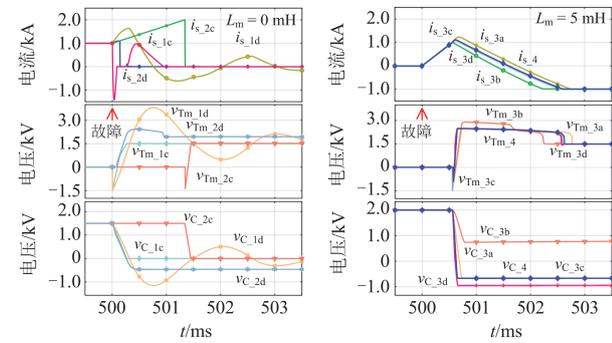
1) 器件数量。1.5 kV 直流系统场景下, 各方案投入的器件类型及数量如表 1 所示。图 1(c)和图 1(d)对应的被动式方案原理简单, 投入的晶闸管数量少, 但电感及续流二极管等器件数量大。主动式方案通过导通辅助晶闸管主动开断电流, 所需晶闸管数量更多。所提方案利用辅助晶闸管触发电容极性翻转, 实现了快速重合闸功能。

2) 关键器件耐压。各方案电路结构相差较大, 但是 TCB 方案普遍包含两大器件: 通流支路的晶闸管 T_m 和换流支路的电容 C 。图 10 包含了各方案中通流晶闸管 T_m 和充电电容 C 的电压变化规律, 其中 $V_{Tm,lc}$ 为表 1 中图 1(c)对应方案中晶闸管 T_m 电压。由于图 1 和图 2 对应拓扑面对远距离故障存在开断失败的情况, 故设置线路电感 L_m 为 0 进行耐压分析。而图 3(a)—图 3(d)及所提方案需要外部电感限制电流上升速度, 故将 L_m 设置为 5 mH。各方案器件耐压范围如表 2 所示, 可见所提方案的晶闸管 T_m 和电容 C 承受的电压应力略低于图 3(c)和图 3(d)对应方案。除图 1(d)方案外, 各方案晶闸管 T_m 承受的最大正向电压均低于 3 kV, 考虑一定裕度, 各方案可选用相同耐压值的晶闸管。

4 实验与仿真验证

4.1 低压实验参数

为验证所提断路器的功能, 本节研制了 200 V 断路器样机并进行实验验证, 实验系统及断路器样机参数见表 3。图 11(a)为直流系统等效电路图, 图



(a) 图1—图2方案 (b) 图3及所提方案

图 10 耐压分析

Fig. 10 Voltage tolerance analysis

表 2 关键器件耐压范围

Table 2 Voltage tolerance ranges of key devices

	晶闸管 T_m 耐压	电容 C 耐压
图 1(c)	-1.5~1.5	0~1.5
图 1(d)	-1.5~3.8	-1.2~1.5
图 2(c)	-1.4~1.5	0~1.5
图 2(d)	-1.5~2.8	-0.5~1.5
图 3(a)	-1.5~2.5	-2.5~1.5
图 3(b)	-0.7~2.9	-0.4~1.5
图 3(c)	-1.5~2.5	-2.5~1.5
图 3(d)	-1.5~2.5	-3.0~1.5
图 4	-1.0~2.5	-2.5~1.5

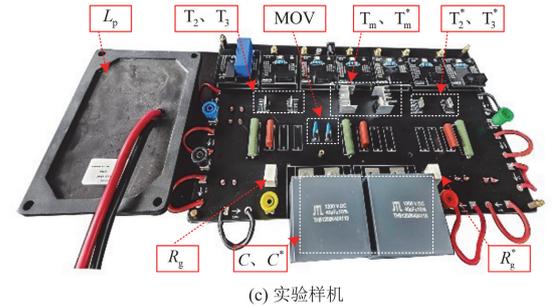
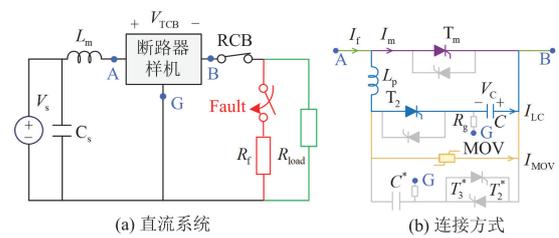


图 11 样机实验

Fig. 11 Prototype experiment

表 3 实验系统及断路器样机参数

Table 3 Parameters of experimental system and circuit breaker prototype

参数	数值	参数	数值
系统电压 V_s/V	200	反向关断时间 $t_q/\mu s$	90
源端电容 C_s/mF	33	钳位电压 V_{clamp}/V	300
限流电抗器 L_m/mH	20	谐振电感 $L_p/\mu H$	500
负载电阻 R_{load}/Ω	20	电容 $C/\mu F$	40
短路电阻 R_f/Ω	3.5	接地电阻 $R_g/k\Omega$	70

11(b)标明了断路器与外部电路的连接方式, 图 11(c)为实验样机。测试内容包括 4 种工况: 运行电流开断、故障电流开断、瞬时故障后重合闸、永久性故障后重合闸。

4.2 实验结果

图 12 为断路器主动开断运行电流的结果, 工作电流 I_m 为 10 A, 电容电压 V_C 为 200 V, 和系统电压

一致, V_{TCB} 为断路器两端电压。导通辅助晶闸管 T_2 后, 随着谐振电流 I_{LC} 增大, 流过晶闸管 T_m 上的电流 I_m 迅速下降至 0, 而后晶闸管 T_m 承受反向电压的时长为 $670 \mu\text{s}$, 远大于其反向恢复时间 t_q ($90 \mu\text{s}$), 最终晶闸管 T_m 成功关断。

图 13 为故障电流开断波形图, 故障发生 2 ms 后, 流过晶闸管 T_m 上的电流 I_m 上升至 27 A, 系统检测到故障, 断路器开始动作。导通晶闸管 T_2 , 随着谐振电流 I_{LC} 上升, 流过晶闸管 T_m 的电流 I_m 过零, 晶闸管 T_m 承受时长为 $248 \mu\text{s}$ 的反向电压并成功关断。断路器动作 0.63 ms 后触发避雷器动作, 故障电流开始下降, 最终耗时 5.9 ms 切除故障。

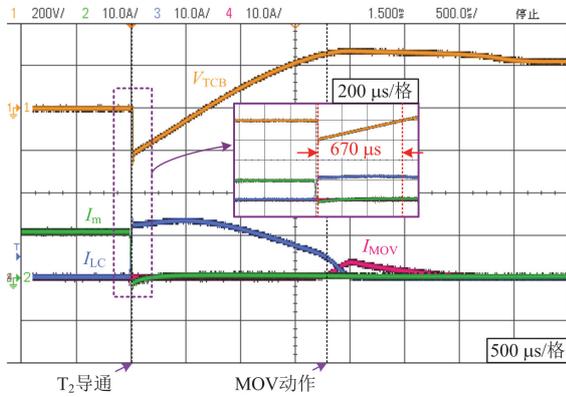


图 12 运行电流开断波形图

Fig. 12 Waveforms of normal current breaking process

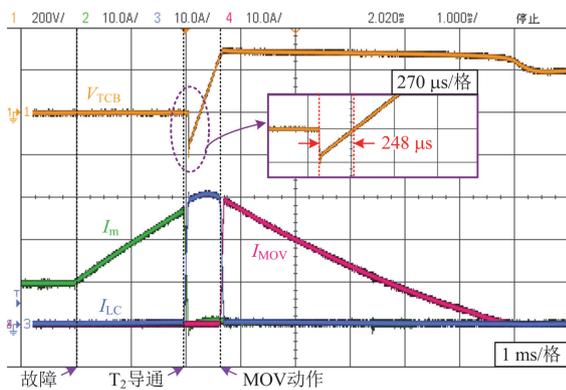


图 13 短路故障电流开断波形图

Fig. 13 Waveforms of short-circuit fault current breaking process

如图 14 所示, 面对瞬时性故障时, 断路器主动并可靠地开断了故障电流。瞬时故障消除后, 同时导通晶闸管 T_m 、 T_3 实现重合闸。谐振电流 I_{re} 在断路器内部流动, 半个谐振周期后电容极性完全翻转, 断路器恢复开断能力。而运行电流 I_{load} 恢复至额定值, 谐振过程并不影响电能传输。

图 15 为断路器重合闸于永久性故障并再次开断电流的波形图。故障发生前电容电压 V_C 为 200 V, 断路器动作后电压 V_C 被钳位至 300 V。电容放电常数 τ 远大于重合闸等待时间, 重合闸前 V_C 维持在 300 V。谐振电流 I_{re} 经晶闸管 T_m 在断路器内部产生, 半个谐振周期 ($435 \mu\text{s}$) 后电容极性翻转, 断路器恢复开断能力。重合闸等待期间电容电压损失忽略不计, 重合闸时谐振时间极短, 故电容极性翻转后仍高于源端电压, 这意味着二次开断过程中电容为晶闸管 T_m 提供反向电压的时间更长, T_m 更易关断。

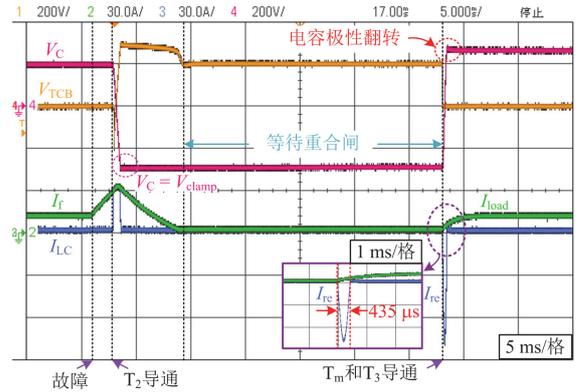


图 14 瞬时故障后重合闸波形图

Fig. 14 Reclosing process waveforms after instantaneous fault

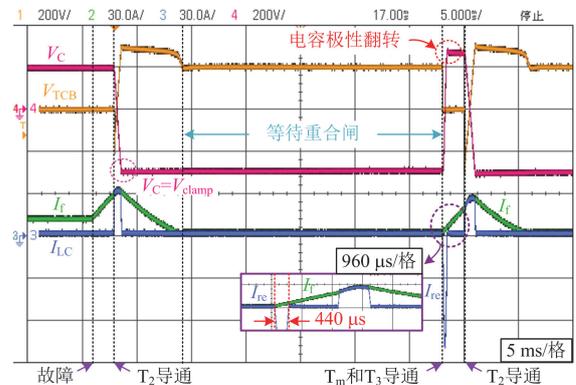


图 15 重合闸于永久性故障波形图

Fig. 15 Waveforms of reclosing process with permanent fault

4.3 中压仿真验证

为验证所提断路器在直流配电网中的应用, 本文选取了 1.5 kV 的城市地铁系统进行仿真验证。如图 16 所示, 根据故障位置与运行电流的相对流向, 线路故障电流可能有以下两种情况: 1) 故障发生后, 电流持续上升至系统预设值 I_{set} ; 2) 故障发生后, 电流先下降至 0, 再反向上升至 I_{set} 。系统及断路器参数如表 4 所示。

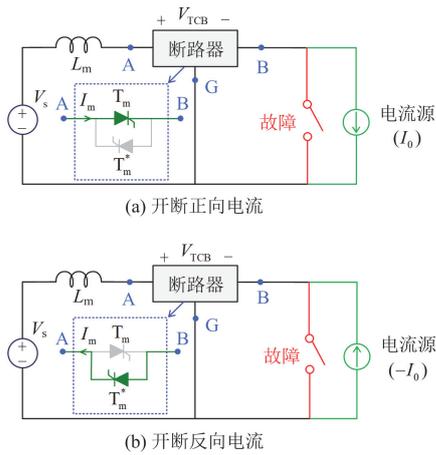


图 16 仿真结构图

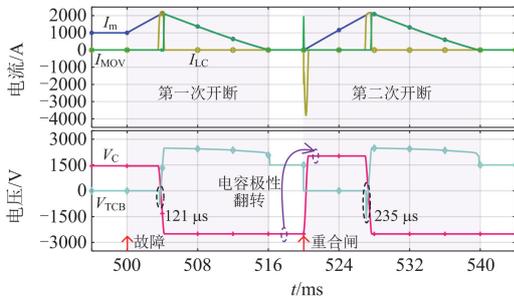
Fig. 16 Simulation structure diagram

表 4 仿真参数

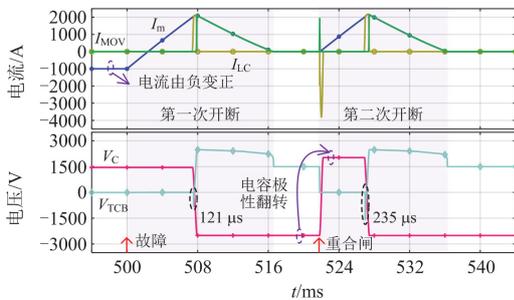
Table 4 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
系统电压 V_s /kV	1.5	反向关断时间 $t_q/\mu\text{s}$	90
限流电抗器 L_m /mH	5	谐振电感 $L_p/\mu\text{H}$	100
运行电流 I_0 /kA	1	电容 $C/\mu\text{F}$	300
动作电流 I_{set} /kA	2	接地电阻 $R_g/\text{k}\Omega$	70

如图 17(a)所示, 断路器开断正向电流时, 为晶闸管 T_m 提供 $121 \mu\text{s}$ 的反向恢复时间, 长于晶闸管 T_m 的反向恢复时间 t_q , T_m 关断并成功开断电流。



(a) 正向电流开断



(b) 反向电流开断

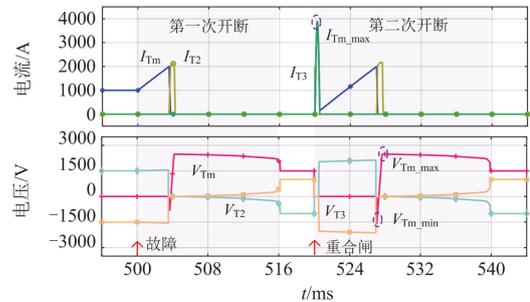
图 17 短路故障开断仿真结果

Fig. 17 Simulation results of interrupting short-circuit fault

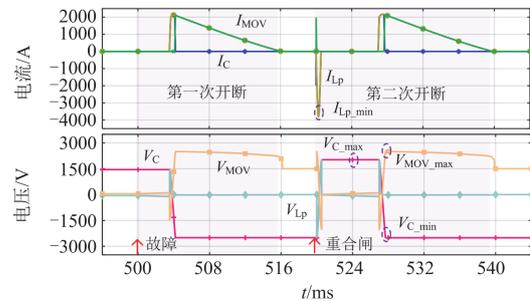
重合闸启动导通晶闸管 T_m 时, 触发晶闸管 T_3 导通, 可以使电容极性翻转。与第一次开断过程相比, 由于电容电压更高, 可为晶闸管 T_m 提供更长的反向恢复时间($235 \mu\text{s}$), 从而保证 T_m 可靠关断。

如图 17(b)所示, 面临故障导致运行电流反向下降至 0 再持续上升的情况, 电流在 0 附近时应同时向 T_m 和 T_m^* 提供触发信号以保证功率的正常双向流通。当电流从 0 上升到系统预设值 I_{set} 时断路器启动, 后续过程与图 17(a)保持一致。

为进一步分析关键器件的应力情况, 图 16(a)对应工况下各器件的电压和电流应力情况的仿真结果如图 18 所示。重合闸时流过晶闸管的电流达到峰值, 为 3.9 kA ; 重合闸后第二次电流开断过程中 T_m 承受的反向峰值电压为 1.6 kV 。各器件承受的电压范围和峰值电流情况见表 5。



(a) 晶闸管



(b) 无源元件

图 18 关键器件电流/电压应力

Fig. 18 Current and voltage stress on key devices

表 5 器件耐压范围和峰值电流

Table 5 Voltage ranges and peak current of devices

器件	电压范围/峰值电流
晶闸管 T_m	电压: $-1.6 \sim 2.5 \text{ kV}$; 电流: 3.9 kA
晶闸管 T_2	电压: $-1.0 \sim 2.2 \text{ kV}$; 电流: 2.1 kA
晶闸管 T_3	电压: $-2.2 \sim 1.0 \text{ kV}$; 电流: 3.9 kA
电感 L_p	电压: $-2.0 \sim 2.0 \text{ kV}$; 电流: 3.9 kA
电容 C	电压: $-2.5 \sim 2.0 \text{ kV}$; 电流: 3.9 kA
避雷器 MOV	电压: $-2.0 \sim 2.5 \text{ kV}$; 电流: 2.1 kA

以上实验和仿真结果表明所提拓扑通过相同步骤可以主动、可靠地开断运行电流和故障电流;首次故障电流开断后可利用谐振电路翻转电容极性至初始状态,从而具备再次开断电流的能力,有效保证直流电网的系统重合闸安全。

5 总结

针对现有大量双向 TCBs 无法主动开断电流、开断可靠性低、损耗大、无法快速重合闸保护的问题,本文提出一种应用于直流配电网的双向主动式 TCB 方案。阐述了断路器的工作原理和参数设计原则,与现存 TCBs 进行对比研究,最后通过仿真和实验验证了所提方案的可行性,得到了如下结论。

1) 所提断路器通过导通辅助晶闸管可主动开断运行和故障电流,且通流晶闸管的关断过程不受外部参数影响,可靠性高。短路电流开断实验中,预充电电容为通流晶闸管提供的反向电压时长为 248 μs ,可确保晶闸管成功关断。

2) 仿真和实验结果表明,LC 谐振电路可实现电流转移和通流晶闸管关断,在系统重合闸后快速翻转电容极性,令断路器具备再次开断电流能力,有效保证重合闸安全。且上述 LC 谐振过程仅在断路器内部进行,可有效避免对电网和线路产生负面影响。

3) 所提断路器在有效控制器件数量的基础上,相比现存 TCB 方案在导通损耗、电流开断可靠性及重合闸保护能力等方面显著提高,在直流配电网等领域中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 程杉,傅桐,李泮洋,等.含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J].电力系统保护与控制,2023,51(22):1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [2] 李响,武海潮,王文雪,等.考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):178-187.
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 178-187.
- [3] 刘科研,盛万兴,詹惠瑜,等.考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网双层协同优化调度方法[J].电力建设,2024,45(1):33-44.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAN Huiyu, et al. Bi-level optimization scheduling of mid-low-voltage AC/DC hybrid distribution network considering interconnection between networks[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 33-44.
- [4] 邢超,奚鑫泽,何鑫,等.多端直流输电系统中限流电抗器配置研究[J].电测与仪表,2023,60(5):72-78.
XING Chao, XI Xinze, HE Xin, et al. Research on configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 72-78.
- [5] 刘进,樊艳芳,孙瑶,等.一种改进型限流式直流断路器拓扑[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):30-39.
LIU Jin, FAN Yanfang, SUN Yao, et al. An improved current-limiting DC circuit breaker topology[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 30-39.
- [6] 刘书瀚,庄园,梁战,等.含直流断路器的柔直配电网过电压与绝缘配合[J].电力工程技术,2023,42(3):61-71,80.
LIU Shuhan, ZHUANG Yuan, LIANG Zhan, et al. Overvoltage and insulation coordination of flexible DC distribution network with DC circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 61-71, 80.
- [7] 郑峰,王威东,刘宝谨,等.计及柔性限流装置与直流断路器协同动作的电弧抑制暂态特性研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):59-69.
ZHENG Feng, WANG Weidong, LIU Baojin, et al. Research on transient characteristic of arc suppression considering the joint operation of a flexible current limiting device and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 59-69.
- [8] BEHESHTAEIN S, CUZNER R M, FOROUZESH M, et al. DC microgrid protection: a comprehensive review[J/OL]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics: 1-10[2024-08-12]. DOI: 10.1109/JESPTE.2019.2904588.
- [9] CAIROLI P, RODRIGUES R, RAHEJA U, et al. High current solid-state circuit breaker for safe, high efficiency DC systems in marine applications[C]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), June 23-26, 2020, Chicago, USA: 936-941.
- [10] HE D, ZHOU H, LAN Z, et al. Solid-state circuit breaker based on cascaded normally-on SiC JFETs for medium-voltage DC distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 32-46.
- [11] CORZINE K A, ASHTON R W. A new Z-source DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

- 2012, 27(6): 2796-2804.
- [12] CHANG A H, SENNETT B R, AVESTRUZ A T, et al. Analysis and design of DC system protection using Z-source circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1036-1049.
- [13] MAQSOOD A, CORZINE K A. The Z-source breaker for ship power system protection[C]// 2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), June 21-24, 2015, Old Town Alexandria, VA, USA: 293-298.
- [14] KESHAVARZI D, GHANBARI T, FARJAH E. A Z-source-based bidirectional DC circuit breaker with fault current limitation and interruption capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6813-6822.
- [15] RYAN D J, TORRESAN H D, BAHRANI B. A bidirectional series Z-source circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7609-7621.
- [16] SAVALIYA S G, FERNANDES B G. Analysis and experimental validation of bidirectional Z-source DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4613-4622.
- [17] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
- XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [18] ZHOU Z, CHEN M, JIANG J, et al. Analysis and design of a novel thyristor-based circuit breaker for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2959-2968.
- [19] DIAO X, LIU F, ZHUANG Y, et al. A bidirectional efficient circuit breaker with automatic and controllable shutoff functions for DC distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 7988-7999.
- [20] RAGHAVENDRA I V, BANAVATH S N, AHMAL C N M, et al. Modular bidirectional solid-state DC circuit breaker for next-generation electric aircrafts[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5486-5497.
- [21] ZHOU Z, JIANG J, YE S, et al. A Γ -source circuit breaker for DC microgrid protection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2310-2320.
- [22] 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.
- [23] XU X, YE J, WANG Y, et al. Design of a reliable bidirectional solid-state circuit breaker for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7200-7208.
- [24] SHU J, MA J, WANG S, et al. A new active thyristor-based DCCB with reliable opening process[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3617-3621.
- [25] 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.
- [26] 时伯年, 李岩, 孙刚, 等. 基于快速重合闸的多端直流配电网极间故障隔离恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 88-95.
- SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. Fault isolation recovery strategy for multi-terminal DC distribution network based on DC breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 88-95.
- [27] QIN K, WANG S, MA J, et al. A thyristor-based reliable bidirectional SSCB with fast-reclosing protection function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(8): 8841-8852.
- [28] XU X, CHEN W, LIU C, et al. A novel thyristor-based bidirectional SSCB with controllable current breaking capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 4526-4534.

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2025-01-10

作者简介:

王顺亮(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高压直流输电、变流器拓扑控制; E-mail: slw_scu@163.com

辛清明(1986—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为高压直流输电系统研究与成套设计、交直流大电网谐波治理等; E-mail: xinqm@csg.cn

秦科军(1997—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为直流断路器拓扑设计。E-mail: kejun.qin@outlook.com

(编辑 张颖)