

基于直流系统故障保护的三端口直流断路器拓扑研究

陈超, 刘文君, 俞天毅, 刘飞, 查晓明
(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 由隔离开关和电力电子器件组合而成的混合直流断路器在正常运行下的损耗较低, 故障保护时能快速有效地断路, 因此已得到普及。然而, 在多端直流系统中, 每一端都与多条输电线路相连, 同一端则需要多个混合直流断路器, 混合直流断路器庞大的体积和高昂的成本限制了它在多端直流系统中的应用。为了解决这一问题, 提出了一种三端口直流断路器拓扑。这一拓扑将同一端子的三个断路器集成于一个, 可减少一半电力电子器件, 大大降低断路器的尺寸和成本。同时提出了针对一个端口发生短路故障的故障中断策略, 该策略可快速中断短路电流, 隔离故障端口, 减少故障对直流系统的影响。仿真与实验结果表明, 该拓扑与故障中断策略可行。

关键词: 直流系统; 故障保护; 三端口; 直流断路器; 短路

DOI: 10.12067/ATEEE1710029 **文章编号:** 1003-3076(2018)06-0058-07 **中图分类号:** TM561

1 引言

多端和网状形式正逐渐地被考虑应用于直流系统^[1,2]。对于多端直流系统, 在故障发生时, 应该快速有效地隔离故障部分, 使系统的正常部分能够保持稳定的直流电压继续运行^[3-5]。

机械断路器(Circuit Breaker, CB)广泛应用于交流系统, 其在闭合状态下具有低电阻的特点, 并且在关断时可以实现电流隔离的作用^[6,7]。然而, 它用于直流系统时存在着灭弧困难的问题, 因为直流电流没有过零点^[8]。为了使其应用于直流系统, 必须增加额外的电路来产生电流过零点^[6]或者采用其他熄灭直流电弧的方法^[9]。固态断路器使用的是电力电子器件, 它可以避免直流电弧这一问题^[10,11]。然而, 电力电子器件在运行时产生的大量损耗使其不适合直接用于多端直流系统^[10]。混合断路器由隔离开关和电力电子设备组合而成, 它能够快速中断故障电流并隔离故障部分以进行故障保护, 同时在正常运行期间保持较低的导通损耗。

混合断路器最经典的结构是ABB公司的混合断路器^[12], 由两条支路并联而成, 一条包含隔离开关T和负载换向开关(Load Commutating Switch,

LCS), 另一条由多个电力电子器件和缓冲电路组成。电涌放电器与两个支路并联连接以限制故障中断产生的过电压, 而限流电感与两个支路串联以抑制故障过电流。在多端直流系统中, 一个端子通常与多条传输线相连, 每条传输线又必须与一个断路器相连, 以确保发生故障时可以快速切断故障, 这就使得在同一个端子处需要多个混合断路器, 但是单一的混合断路器已经需要很大的空间和成本, 在同一端子处所需的空间和成本则大大提高, 这就阻碍了混合断路器的实际应用^[13-15]。

为了解决这些问题, 提出了多端口断路器。文献[16]提出了一种多端口断路器拓扑, 将多个断路器集成于一个, 该拓扑可减少IGBT的使用数量, 但是对端口的使用有一定限制且无法实现能量的双向流动, 并且未给出实验验证。

基于以上考虑, 本文提出了一种三端口直流断路器拓扑。通过集成化设计, 该拓扑可将电力电子器件的数量减少一半, 同时仍然保留终端在一个端口被切断时继续运行的能力。

2 直流断路器

混合直流断路器的一种经典拓扑如图1所示。

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 湖北省科技支撑计划项目(2015BAA109)

作者简介: 陈超(1993-), 男, 浙江籍, 硕士研究生, 研究方向为微电网暂态分析;

刘飞(1977-), 男, 湖北籍, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动(通讯作者)。

其中正方形是一个电力电子(Power Electronic, PE)单元,由两个反向串联的 IGBT 组成,它能够实现双向开断。断路器由上支路、下支路和一个限流电感组成。作为保护装置的 RCD 缓冲电路和浪涌放电器与两个支路并联,并未在图 1 中标出。上支路是主传导(Main Conduction, MC)支路,包含一个隔离开关 T 和负载换向开关 LCS。在正常运行时,电流经由 MC 支路流通。下支路是主分断(Main Breaker, MB)支路,由 n 个 PE 单元串联而成。短路电流就在下支路中断,两个支路中串联的电感 L_{CL} 用于限制过电流。

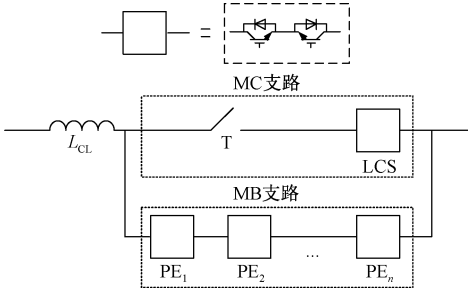


图 1 混合直流断路器拓扑

Fig. 1 Hybrid circuit breaker topology

当在一个终端检测到故障时,MB 支路的 PE 单元将导通,再将 LCS 关闭以强制故障电流完全换向到 MB 支路,然后断开来隔离开关 T 以确保 LCS 故障部分完全分离,并且在之后的故障中断中不会遭受过电压。在 LCS 被安全隔离后,MB 支路的 PE 单元同时关闭以中断故障电流。当故障电流衰减到零时,直流母线电压 u_{dc} 将在 MB 支路的 PE 单元中平均分配,使 PE 单元的 IGBT 不会处于过压危险。

在如图 2 所示的多端直流系统中,同一端子通常会有三个或更多个混合断路器。图 2 虚线框中的电路在图 3 中详细示出,它可以被视为一个三端口断路器。由图 3 可知,单独的 MB 支路具有较多的电力电子组件,在实际应用过程中会出现体积庞大和价格昂贵等问题。为了解决这些问题,本文提出了一种能够将 MB 支路中的组件数量减少一半的拓扑,第 3 节将详细介绍其电路结构和工作原理。

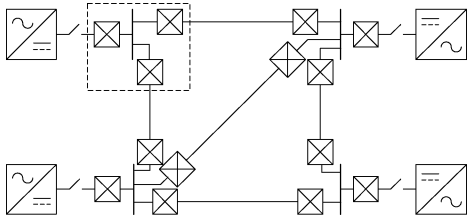


图 2 Grid structure of multi-terminal DC system

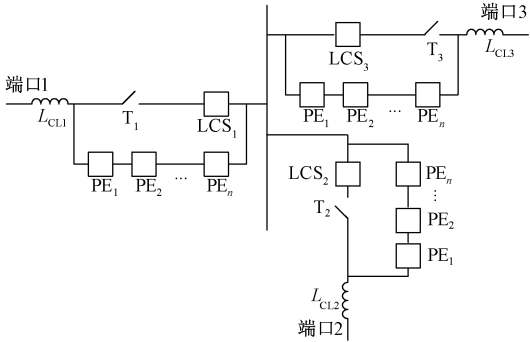


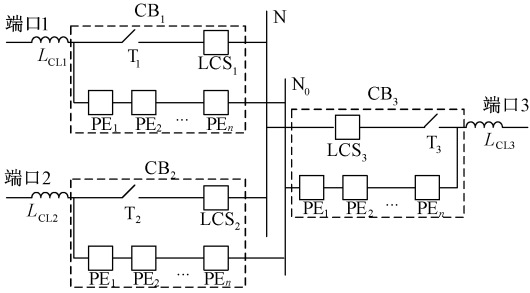
图 3 同一端的混合断路器

Fig. 3 Hybrid circuit breakers at one terminal

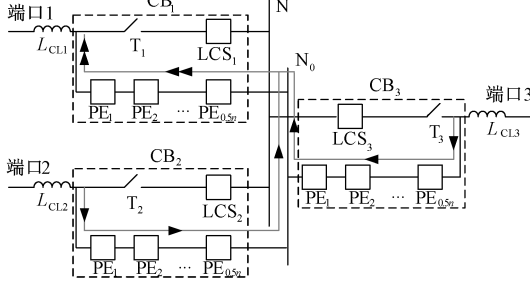
3 三端口直流断路器拓扑

3.1 拓扑结构

为了将同一端子的三个断路器集成到单个三端口断路器中,首先需将三个 MB 支路的端子侧与它们各自的 MC 支路断开,并将它们连接在一起形成单独的端子 N_0 ,如图 4(a)所示。当端口 1 发生故障时, CB_1 能够在 CB_1 和 CB_2 的两个 MB 支路配合下关断,每个 MB 支路的 PE 数量可以减少 $0.5n$,如图 4(b)所示。又由于 MB 支路并有缓冲电容,因此会有电流流过 CB_3 的 MB 支路,这将导致故障过电压在 CB_1 和 CB_2 的 MB 支路不均匀地分布。因此,可以在每个 MB 支路都串联一个隔离开关 T_s ,以确保可以均等分配过电压,如图 4(c)所示。通过上述调整,可得到一种三端口断路器,最终的等效电路如图 4(d)所示。拓扑改进前后所需元件数量比较见表 1。



(a) 拓扑演变 1



(b) 拓扑演变 2

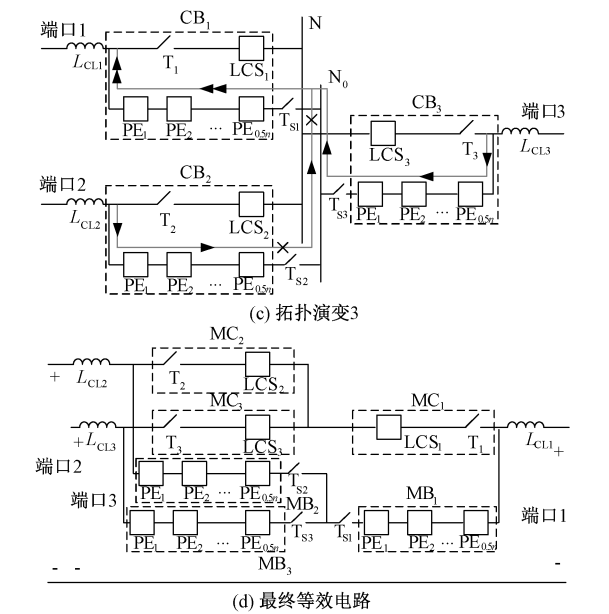


图4 三端口直流断路器拓扑演变过程
Fig.4 Derivation of topology for three-port DC circuit breaker

表1 拓扑改进前后所需元件数量比较

Tab.1 Comparison of number of components required before and after topology improvement

| | PE | T | LCS | L _{CL} | T _s |
|-------|------|---|-----|-----------------|----------------|
| 改进前数量 | 3n | 3 | 3 | 3 | 0 |
| 改进后数量 | 1.5n | 3 | 3 | 3 | 3 |

从表1可知,改进后的拓扑比改进前的拓扑减少了一半的PE单元,这有助于断路器体积的减小和成本的降低。

3.2 断路器故障中断策略

当端口1发生故障时,等效电路如图5所示。故障电流将从端口2和端口3流向端口1。为了防止故障危及整个系统,必须关断端口1的MC支路,使故障中断。故障中断过程可以分为三个阶段,每个阶段涉及的电压和电流的示意波形如图6所示。

(1)阶段一($t_1 < t < t_2$)拓扑如图7所示。该阶段需将用于故障电流换向的支路导通。MB₁和MB₂都要用于协助关断MC₁支路。首先要将MB₁和MB₂支路的T_{s1}和T_{s2}闭合,MB₃支路的T_{s3}仍然保持断开以防止MB₃支路的缓冲电路干扰故障中断过程。然后将MB₁和MB₂的电力电子组件导通,部分故障电流将换流至由MB₁和MB₂组成的通路。

(2)阶段二($t_2 < t < t_3$)拓扑如图8所示。该阶段需要将MC₁支路断开,首先应关断LCS₁,这将迫使故障电流完全从MC₁支路换流到MB₁和MB₂组成的支路。在这一期间有:

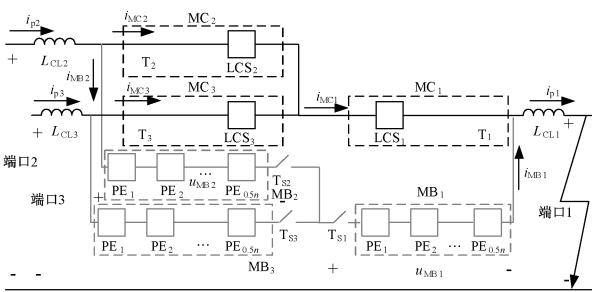


图5 三端直流断路器端口1发生故障时拓扑
Fig.5 Topology of fault inception at port 1 of proposed three-port DC circuit breaker

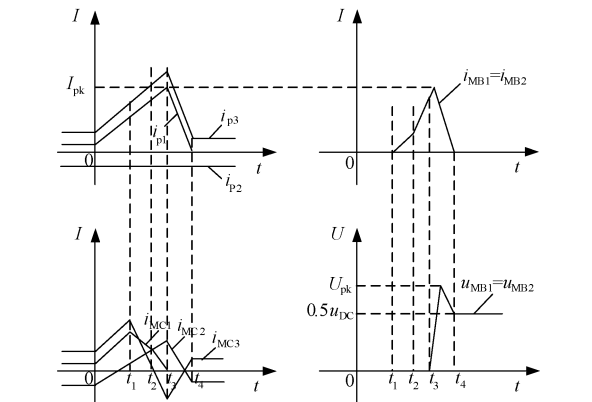


图6 故障中断期间波形图
Fig.6 Schematic waveforms during fault interruption

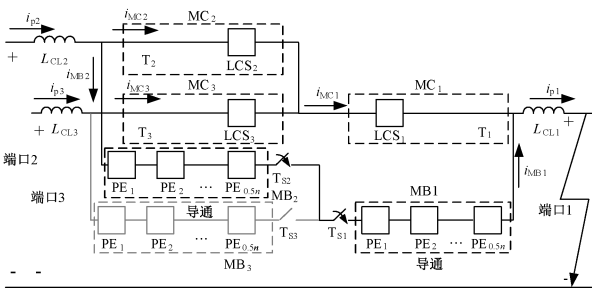


图7 故障中断阶段一拓扑
Fig.7 Topology of fault interruption step one

$$i_{MB1} \uparrow + i_{MC1} \downarrow = i_{p1} = i_{p2} + i_{p3} \quad (1)$$

式中, i_{MB1} 、 i_{MC1} 分别为MB₁、MC₁支路的电流(A); i_{p1} 、 i_{p2} 、 i_{p3} 分别为端口1、端口2、端口3的电流(A)。
 i_{MC1} 的值减小,而 i_{MB1} 增加,当 i_{MC1} 达到零时,隔离开关T₁断开,将LCS₁与电路隔离,避免在电流中断时LCS₁两端产生过电压。
(3)阶段三($t_3 < t < t_4$)拓扑如图9所示。该阶段需要将MB₁和MB₂支路同时关断以中断故障电流。阶段三的电流通断等效电路如图10所示。假设在故障中断期间直流母线电压仍为 u_{DC} ,根据

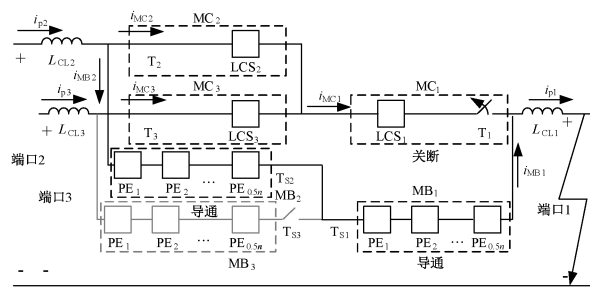


图 8 故障中断阶段二拓扑

Fig. 8 Topology of fault interruption step two

KVL 定理可得:

$$\begin{cases} u_{MB} = nu_{PE} \\ u_{DC} = u_{MB12} + (2\lambda L + L_{CL1}) \frac{di_{p1}}{dt} + 2\lambda Ri_{p1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{MB12} 为 MB_1 和 MB_2 串联支路两端的电压(V); n 为 PE 单元的个数; u_{PE} 为单个 PE 单元的电压(V); u_{DC} 为直流母线电压(V); λ 为端口到短路故障点的长度(m); L 为单位长度的电感值(H/m); L_{CL1} 为端口 1 的限流电感值(H); i_{p1} 为端口 1 的电流(A); t 为时间(s); R 为单位长度的电阻值(Ω /m)。

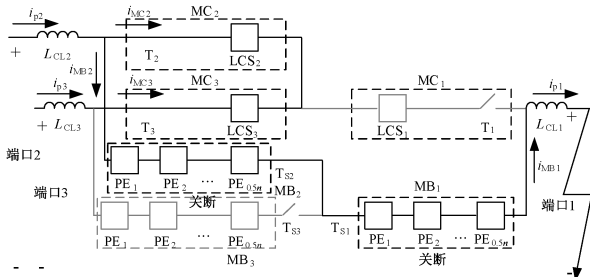


图 9 故障中断阶段三拓扑

Fig. 9 Topology of fault interruption step three

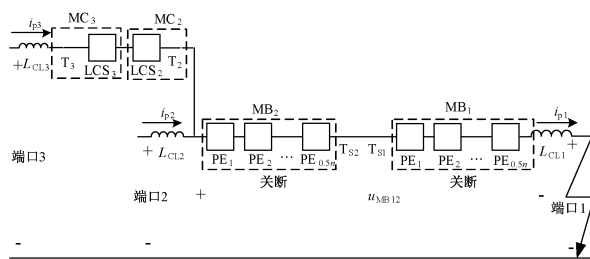


图 10 故障中断阶段三等效电路

Fig. 10 Equivalent circuit for step three: current interruption

每个 MB 支路都并联了 RCD 缓冲器和避雷器, 可以吸收部分短路电流和限制过电压。当阶段三完成($i_{MC1} = i_{p1} = 0$)时, 故障电流将衰减到零, 故障端口则从系统隔离出去。直流母线电压将在两个 MB 支路平均分配。

4 仿真验证

本文所提出的三端口直流断路器可用于中低压直流系统。端口 1 和端口 2 分别接 50 Ω 电阻, 作为负载端, 端口 3 接 100kV 直流电源, 作为电源端。端口 1 在 $t = 0.3995s$ 时刻发生短路故障, 在 $t = 0.4s$ 时, MB_1 和 MB_2 支路导通, LCS_1 在 0.01ms 后关断。故障电流从 MC_1 支路换流至 MB_1 和 MB_2 支路, 同时又有电流从 MC_2 和 MC_3 支路流过。在电流换向之后, 故障电流会在 MB_1 和 MB_2 支路被中断。仿真参数见表 2。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

| 参数 | 数值 |
|---------------------------|------|
| 直流电压 U_{dc}/kV | 100 |
| 每条 MB 支路缓冲电容 $C_s/\mu F$ | 4700 |
| 每条 MB 支路缓冲电阻 R_s/Ω | 10 |
| 每个端口限流电感 L_{CL}/mH | 50 |
| 负载端电阻 R_{Load}/Ω | 50 |
| 短路电阻 R_d/Ω | 2 |

各支路的电流波形如图 11 和图 12 所示。 MC_1 支路在短路故障发生后被迅速切断, 因此, 电流的峰值较小。故障电流从 MC_1 支路换流至 MB_1 和 MB_2 支路, 因此, MB_1 和 MB_2 支路的故障电流先增大后被关断为零。

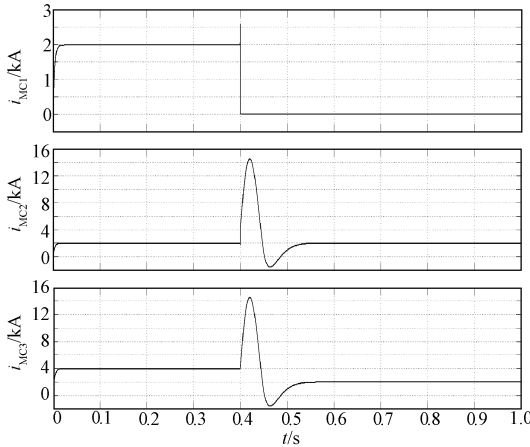


图 11 i_{MC1} 、 i_{MC2} 和 i_{MC3} 波形

Fig. 11 Waveforms of i_{MC1} , i_{MC2} and i_{MC3}

MB_1 和 MB_2 支路的电压波形如图 13 所示。在故障中断的过程中, MB_1 和 MB_2 支路分别出现了 80kV 的过电压, 之后便震荡下降, 直至稳定在 50kV, 即两条 MB 支路对电源电压进行分压。

i_{p1} 、 i_{p2} 和 i_{p3} 波形如图 14 所示。从图 14 可以看

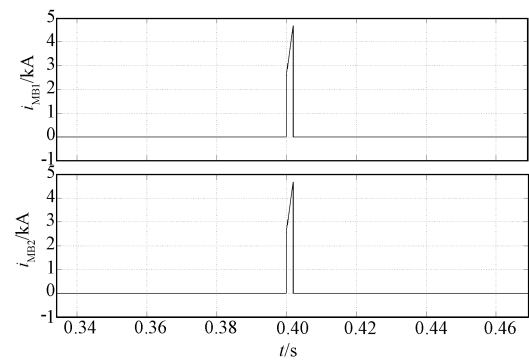


图 12 i_{MB1} 和 i_{MB2} 波形
Fig. 12 Waveforms of i_{MB1} and i_{MB2}

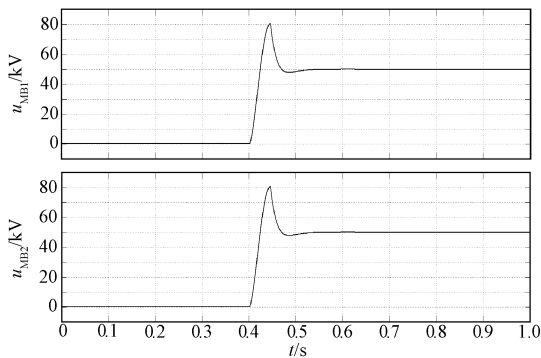


图 13 u_{MB1} 和 u_{MB2} 波形
Fig. 13 Waveforms of u_{MB1} and u_{MB2}

出,在故障中断之后,端口 1 处的电流衰减到零;端口 2 的电流有一定的波动,但未受较大的影响,在短路故障发生和结束时都可正常工作;端口 3 作为电源端,输出的电流是端口 1 与端口 2 电源的总和,当端口 1 被切除后,其输出的电流与端口 2 的电流相同。

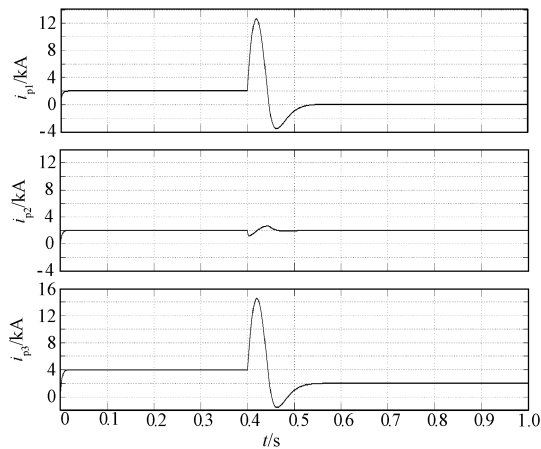


图 14 i_{p1} 、 i_{p2} 和 i_{p3} 波形
Fig. 14 Waveforms of i_{p1} , i_{p2} and i_{p3}

5 实验结果

本实验中每一条 MB 支路分别有 2 个用于关断短路电流的 IGBT。当故障发生,两条 MB 支路导通后,会有 4 个 IGBT 同时用于中断短路电流。端口 3 作为供电端,与 200V 直流源相连,端口 1 和端口 2 作为负载端,分别与 30Ω 的电阻相连,端口 1 是发生短路故障的端口。实验参数见表 3。

表 3 实验参数

| Tab. 3 Experimental parameters | |
|--------------------------------|------|
| 参数 | 数值 |
| 直流电压 U_{dc}/V | 200 |
| 每条 MB 支路缓冲电容 $C_s/\mu F$ | 4.7 |
| 每条 MB 支路缓冲电阻 R_s/Ω | 10 |
| 每个端口线路等效电感 L/mH | 0.89 |
| 负载端电阻 R_{Load}/Ω | 30 |
| 短路电阻 R_d/Ω | 2 |
| 每条 MB 支路 IGBT 个数 | 2 |

图 15 为 MC_1 支路的电流和电压波形。当端口 1 发生短路故障后,短路电流迅速上升,在 0.2ms 后,短路电流被换流至 MB_1 和 MB_2 支路, MC_1 支路被关断。因此,短路电流在 MC_1 支路中产生较小。

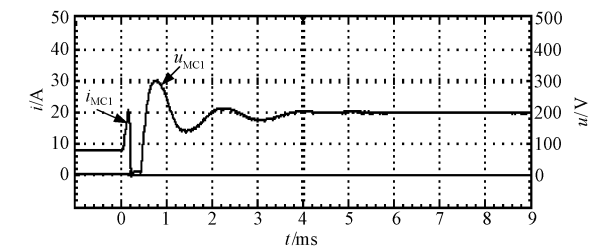


图 15 u_{MC1} 和 i_{MC1} 波形
Fig. 15 Waveforms of u_{MC1} and i_{MC1}

图 16 和图 17 为 MB 支路的电流波形和 PE 单元电压波形。可以看出,短路电流被换流至 MB 支路后继续增大,0.2ms 后被中断为零;短路故障中断后,单个 PE 单元的分压为 50V,两个 PE 单元的分压为 100V,这与理论相符。

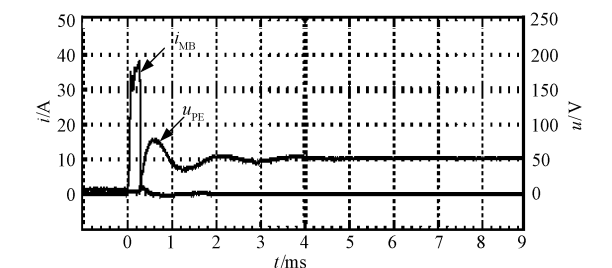


图 16 i_{MB} 和 u_{PE} 波形
Fig. 16 Waveforms of i_{MB} and u_{PE}

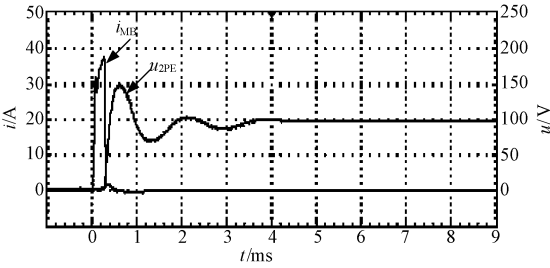


图 17 i_{MB} 和 u_{2PE} 波形

Fig. 17 Waveforms of i_{MB} and u_{2PE}

图 18 ~ 图 20 为三个端口的电流波形和整个 MB 支路的电压波形。端口 1 发生短路故障后,短路电流被中断,端口电流震荡后变为零;端口 2 未发生故障,端口电流在故障中断过程的 1ms 内有些许波动,之后保持稳定;端口 3 在故障中断时电流震荡,之后稳定输出电流,其电流值与端口 2 的电流值相等。

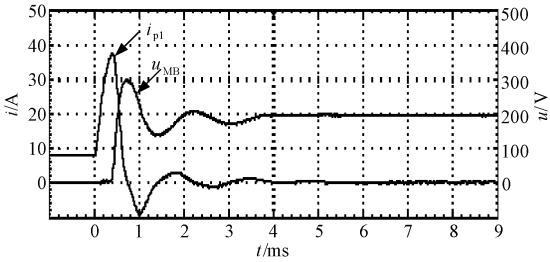


图 18 i_{p1} 和 u_{MB} 波形

Fig. 18 Waveforms of i_{p1} and u_{MB}

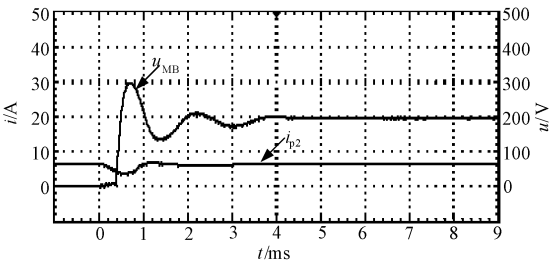


图 19 i_{p2} 和 u_{MB} 波形

Fig. 19 Waveforms of i_{p2} and u_{MB}

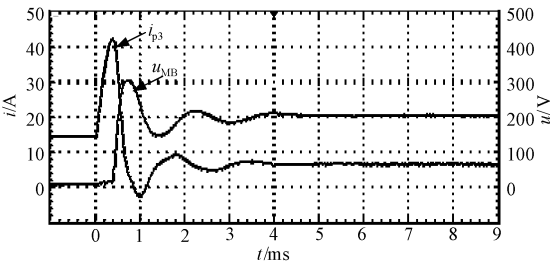


图 20 i_{p3} 和 u_{MB} 波形

Fig. 20 Waveforms of i_{p3} and u_{MB}

6 结论

本文提出了一种可应用于多端直流系统的三端口直流断路器的拓扑结构。该拓扑通过在一个端子处集成混合电路断路器,能够将电力电子器件的使用数量减少一半,大大减小了断路器的尺寸和成本。通过仿真和实验验证了该拓扑与故障中断策略的有效性。在后面的工作中,将重点研究 n 端断路器的拓扑演变规律,提出多端故障情况下的故障中断控制策略。

参考文献 (References):

[1] Beerten J, D' Arco S, Suul J A. Identification and small-signal analysis of interaction modes in VSC MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31 (2): 888-897.

[2] 吴俊勇,裴丛仙子,边国潮 (Wu Junyong, Pei Congxianzi, Bian Guochao). 光伏并网配电网中柔性环网开关的优化运行控制策略研究 (Study on control strategy for optimum operation of soft normally-open points (SNOPs) in distribution network with PV generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 20-28.

[3] Li R, Xu L, Yao L. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32 (3): 1516-1526.

[4] 牛耕,孔力,周龙,等 (Niu Geng, Kong Li, Zhou Long, et al.). 含分布式电源的配电网的供电恢复技术研究综述 (Review of power service restoration of distribution network with distributed generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 51-62.

[5] 杨丽君,魏玲玲,卢志刚,等 (Yang Lijun, Wei Lingling, Lu Zhigang, et al.). 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复 (Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 73-80.

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

[7] 罗永捷,李耀华,李子欣,等 (Luo Yongjie, Li Yao-hua, Li Zixin, et al.). 多端柔性直流输电系统直流故障保护策略 (DC short-circuit fault protection strategy of

- multi-terminal HVDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 1-6.
- [8] Liu W, Yang H, Liu F, et al. An improved RCD snubber for solid-state circuit breaker protection against bus fault in low-voltage DC microgrid [A]. 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC) [C]. 2015. 1-5.
- [9] Bachmann B, Mauthe G, Ruoss E, et al. Development of a 500kV airblast HVDC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104 (9): 2460-2466.
- [10] Li R, Wang Z X, Holliday D, et al. DC circuit breaker requirements in multi-terminal HVDC systems [A]. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives [C]. 2016. 1-6.
- [11] Tahata K, Uda R, Kuroda K, et al. Mitigation on requirement of DCCB by DC reactor for multi-terminal HVDC operation [A]. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. 2016. 1-6.
- [12] Hassanpoor A, Häfner J, Jacobson B. Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (10): 5393-5400.
- [13] Zheng S, Wang Y, Wu X, et al. The voltage sharing of commercial IGBTs in series with passive components [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2011. 3008-3012.
- [14] Monadi M, Koch-Ciobotaru C, Luna A, et al. A protection strategy for fault detection and location for multi-terminal MVDC distribution systems with renewable energy systems [A]. International Conference on Renewable Energy Research and Application [C]. 2014. 496-501.
- [15] 杜少飞, 谢文超, 朱永强, 等 (Du Shaofei, Xie Wen-chao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.
- [16] Mokherdoran A, Van Hertem D, Silva N, et al. Multi-port hybrid HVDC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (1): 309-320.

Topology research of three-port solid state circuit breaker based on DC system fault protection

CHEN Chao, LIU Wen-jun, YU Tian-yi, LIU Fei, ZHA Xiao-ming
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Hybrid DC circuit breaker, a combination of disconnecter and multiple power electronic devices, has gained popularity for its low-loss at normal operation and its quick and effective circuit breaking during fault protection. However, its bulkiness threatens to limit its application in multi-terminal DC system, where the terminal is usually connected to more than one transmission lines and hence the circuit breaker tends to appear in clusters. In this context, a three-port DC circuit breaker topology is proposed. The circuit breakers at one terminal is integrated into one. Through this, it is able to cut down by half the number of power electronic devices needed, greatly reducing the size and cost for circuit breaking. At the same time, a fault interruption strategy for short-circuit faults on a port is proposed. This strategy can quickly interrupt the short-circuit current and isolate the faulty ports to reduce the impact of faults on the DC system. Through simulation and experimental verification, the topology and fault interrupt strategy are feasible.

Key words: DC system; fault protection; three-port; DC circuit breaker; short circuit