

DOI: 10.7667/PSPC171834

基于电容换流的限流式直流断路器

王江天¹, 王兴国², 马静¹, 周泽昕²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 电网安全与节能国家重点实验室, 中国电力科学研究院, 北京 100192; 3. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 随着柔性直流输电技术逐渐扩展到架空线输电场合, 故障线路的快速识别和隔离显得尤为重要。相比于电缆线路, 架空线输电易发生短路、闪络等瞬时故障, 必须采取相应措施隔离故障线路, 避免系统停运。直流断路器作为隔离故障线路的核心设备受到了国内外的高度重视。简要阐述了现有混合型直流短路器的研究现状, 在已有直流断路器技术方案的基础上提出了一种新型混合型直流断路器拓扑。该断路器通过限流电感可有效抑制短路电流幅值, 依靠电容缓冲作用, 避免了大数量级 IGBT 串联的同步驱动及均压问题。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了四端对称双极柔性直流电网模型, 仿真验证该直流断路器可满足高压直流电网快速切除故障线路的需求。

关键词: 多端直流电网; 直流输电; 架空线; 故障限流; 高压直流断路器

Current limiting and capacitor commutated hybrid DC circuit breaker

WANG Jiangtian¹, WANG Xingguo², MA Jing³, ZHOU Zexin²

(1. NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With MMC-HVDC technology gradually expanding to overhead line transmission occasions, the rapid identification and isolation of fault lines is particularly important. Compared with the cable line, the overhead line transmission is prone to happening short circuit, flashover and other transient faults, and corresponding measures must be taken to isolate the fault line to avoid system outage immediately. DC circuit breaker has captured great attention from the community at home and abroad as the core equipment of isolating fault circuit. A new type of hybrid DC circuit breaker topology is proposed based on the existing DC circuit breaker technical scheme. The circuit breaker can effectively restrain the amplitude of short circuit current through the current limiting inductance, and avoid the synchronous driving and voltage sharing of large orders of IGBT series by means of capacitive buffer action. A model of four-terminal double bipolar HVDC grid is built on the PSCAD/EMTDC, and the simulation results show that the DC circuit breaker can meet the demand of fast resection of the fault line.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. JBB17201600241) "Study on AC Power Grid Protection Influenced by ± 500 kV Flexible DC Power Grid".

Key words: multi-terminal DC system; HVDC transmission; overhead line; fault limitation; HVDC circuit breaker

0 引言

目前, 围绕大规模可再生能源的多点汇集、清洁能源的高效利用和灵活消纳、可再生能源发电的源网友好互动, 模块化多电平换流器直流输电技术

快速发展^[1-3]。与交流电网相比, 直流电网惯性常数小, 是一个“低惯量”的系统^[4]。其短路电流上升速度在几个毫秒内就会超过电力电子器件额定值。目前我国已投入运行的柔性直流输电工程为保证供电的可靠性, 都采用电缆输送电能, 以减小线路故障率^[5-6]。但其建设成本过高, 无法满足远距离大容量的电能输送以及多端直流输电应用场合。同时, 由于直流架空线发生故障时缺乏自然过零点, 传统

基金项目: 国家电网公司科技项目(JBB17201600241) “ ± 500 kV 柔性直流电网对交流电网保护影响研究”

的交流断路器无法适用于当前的柔性直流电网结构。国家电网公司目前计划在北京、河北建设张北柔性直流电网^[7]。该工程为四端环网结构, 选取半桥子模块和直流断路器相结合的配置方案。为实现故障的快速切除, 要求在发生故障时, 直流断路器可有效切除故障线路, 保证非故障线路的正常运行, 维持功率传输, 保证电力系统的稳定性。

近年来, 新型高压直流断路器方案研发快速发展, 诸多理论与样机研究已成功开展。直流断路器的主要技术方案分为三类: 纯机械式、固态开关式和混合式直流断路器^[8-16]。混合式直流断路器综合了机械式断路器和固态断路器的优点, 具有通态损耗小、开断快速可控、无弧(微弧)无响声、开关寿命长、可靠性高、无需专用冷却设备等优点, 是目前高压直流断路器的主要研究方向。当前, 混合式直流断路器根据换流关断原理的不同, 可将其分为自然换流关断型和强制换流关断型两种。自然换流关断型混合式直流断路器依靠全控型器件的分断能力, 改变故障电流流通路径, 断开正常流通支路上的隔离开关, 但该方法需要在电流转移支路上串联很多的 IGBT 模块, 造成直流断路器体积庞大, 造价高昂。强制换流关断型混合式直流断路器利用叠加振荡电流产生电流过零点, 实现快速开断和灭弧, 但其可控性和关断速度较差。

本文提出了一种新型混合式高压断路器拓扑结构。该直流断路器借鉴了现有混合式直流断路器的设计理念, 依靠电容储能和电感限流的方式提高线路短路情况下的关断能力, 降低了电力电子器件所承受的瞬时冲击电压电流幅值。在稳态运行情况下, 限流电抗器不接入电流回路中, 保证直流电网较好的动态特性; 在故障时将其串入故障回路, 具有较好的故障电流抑制效果, 为故障识别争取更多的时间, 准确切除故障线路, 防止误判。最后, 本文通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该直流断路器在柔性直流电网中的适用性和有效性。

1 基于电容换流的限流式直流断路器方案

1.1 基本拓扑结构

相比采用电缆输电的工程、采用架空线的柔性直流输电系统, 由于线路暴露在外, 故障发生概率大大提高, 易对电力系统的稳定性和可靠性造成冲击。为实现架空线路故障前后各换流器不闭锁, 各换流站的功率不中断传输, 克服当前高压直流断路器开断容量和关断能力的缺陷, 降低成本, 提出了

一种基于电容换流和电感限流的新型高压直流断路器, 其具体拓扑结构如图 1 所示。

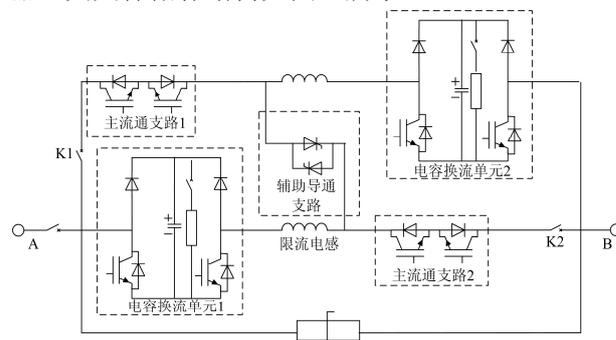


图 1 新型高压直流断路器拓扑方案

Fig. 1 A novel topology of hybrid DC breaker

该断路器由主流通支路、电容换流单元、限流电感、辅助导通支路和超快速机械开关 K1、K2 组成。其中, 各部分结构及功能说明如下所示:

1) 超快速机械开关 K1、K2 在正常运行情况下流经额定电流, 在故障情况下要求其能在零电流状态下快速动作, 其开断时间为 2 ms 左右。

2) 主流通支路由 IGBT 阀组组成。采用反串联连接实现双向导通。其主要功能为依靠 IGBT 的快速可控性, 在故障情况下触发主流通支路上的 IGBT, 关断主支路 IGBT, 改变线路故障情况下的电流流通路径, 实现故障线路的隔离, 同时为机械开关的快速动作创造条件。

3) 电容换流单元结构类似于全桥子模块, 与全桥子模块相比该单元取消了 2 个 IGBT 模块, 通过子模块内的电容的缓冲作用, 有效避免大数量 IGBT 串联的同步驱动问题与均压问题, 实现更为容易。当子模块电容电压达到避雷器动作电压, 电流转移至避雷器之路, 避雷器吸收残余能量, 故障电流逐渐降为 0。子模块电容并联一卸能电阻, 在避雷器动作后, 电容放电, 以便下一次正常投运。

4) 断路器在正常运行时, 对外呈现低电抗、低损耗通路。在故障被检测瞬间投入限流电感, 此时对外呈现较大的电抗值, 以限流方式运行, 可有效抑制故障电流上升速率, 提升断路器的开断容量, 为通流能力弱的电力电子器件起到保护作用, 同时为故障识别和诊断争取了时间, 提高了保护的可靠性。在其开断过程中, 短时间内电感电压上升有限, 快速机械开关、主流通支路和辅助导通支路上的电力电子器件共同承担限流电感电压。

5) 辅助导通支路采用晶闸管阀组串并联构成, 充分利用晶闸管器件额定电压高、电流大、价格低等优点, 从而有效降低该部分体积和成本。

2 混合式直流断路器工作原理

本文所提出的直流断路器故障处理操作方案如图 2 所示。具体工作模式如下：

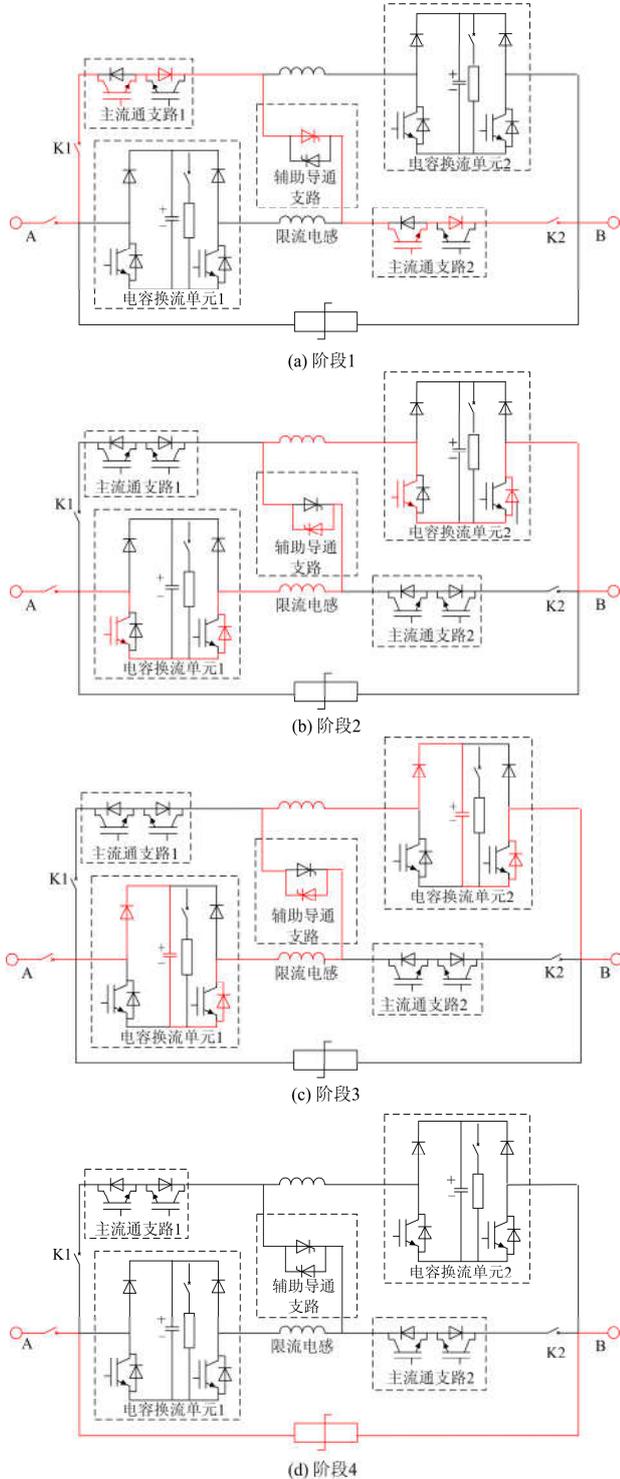


图 2 高压直流断路器工作原理

Fig. 2 Working principle of the DC breaker

在正常运行情况下，假设此时线路电流从 A 侧流向 B 侧，电流通路如图 2(a)所示，直流断路器机械开关 K1、K2 闭合，电容换流单元内的 IGBT 全部闭锁，电流流经主流通支路和辅助导通支路，此时限流电感未接入，断路器对外呈现低阻抗特性，保证了直流电网具有较好的动态特性^[17]。

故障情况下操作步骤如下所示。

1) 第一阶段。直流线路在 t_0 时刻发生接地或极间短路故障后，线路超高速保护装置在 t_1 时刻检测到系统故障后，对直流断路器发出跳闸命令。首先对主流通支路的 IGBT 施加闭锁信号，经过一定的延时后，故障电流转移至电容换流单元回路内，如图 2(b)所示，此时限流电感串入故障回路，抑制故障电流幅值及上升速率。

2) 第二阶段。主流通路径上的 IGBT 闭锁完成后，对超快速机械开关施加开断信号，开断时间约为 2 ms。在 t_2 时刻超快速机械开关完成开断。电流通路路径与上一阶段相同。此时的等效电路如图 3 所示，对图 3 列写微分方程如式(1)所示，对其进行拉普拉斯变换后进行求解。

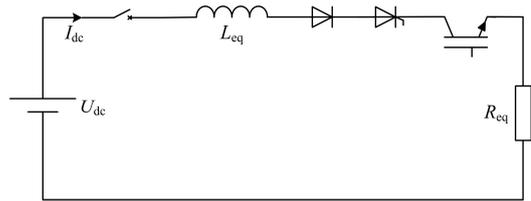


图 3 第二阶段等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of the second step

$$U_{dc} = L_{eq} \frac{di_{dc}}{dt} + R_{eq} i_{dc} \quad (1)$$

$$I_{dc}(s) = \frac{U_{dc}/s + L_{eq} i_{dc}(0)}{sL_{eq} + R_{eq}} \quad (2)$$

式中： L_{eq} 表示限流电感及线路电感等效值； R_{eq} 表示线路、电力电子器件通态电阻及故障点过渡电阻值。由于在 t_1 时刻跳闸后，主流通支路后电流支路立刻转移，则该阶段故障电流初始 $i_{dc}(0)=i_{dc}(t_1)$ 。

$$i_{dc}(t) = \frac{U_{dc}}{R_{eq}} (1 - e^{-R_{eq}t/L_{eq}}) + i_{dc}(t_1) e^{-R_{eq}t/L_{eq}} \quad (3)$$

此时，该直流断路器可充当限流器的功能。当电抗器投入后，此时电流上升速率被抑制，提供给系统充足时间，检测是否发生线路故障。当线路故障发生后，进入第三阶段，断开直流断路器。若发生雷击等短暂性过流，则转入正常运行模式。该断路器可有效避免故障误判，提高系统可靠性。

综合考虑故障点位置，信息传输延迟以及检测算法耗时，故障检测时间通常大于 2 ms^[18]。本文所

提出的限流式直流断路器可在疑是故障发生后, 迅速抑制故障电流, 保证桥臂电流值小于 IGBT 二倍额定电流值, 换流阀无需闭锁, 提供给系统充足的故障检测时间。现有柔性直流电网架空线路主保护多采用行波保护以及欠压微分保护, 后备保护采用欠压过流保护和差动保护, 主保护可在 3 ms 内有效识别故障^[19]。

3) 第三阶段。在 t_3 闭锁电容换流单元内的全部 IGBT, 故障电流开始对电容换流单元模块中的电容充电。如图 2(c)所示。其等效电路图如图 4 所示, 此时电容串入回路, 对其列写微分方程如式(5)所示。

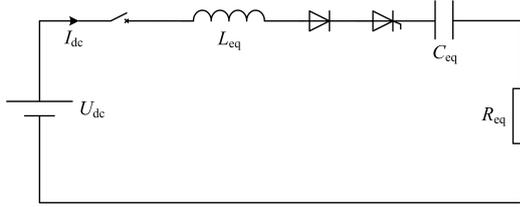


图 4 第三阶段等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of the third step

$$U_{dc} = L_{eq} \frac{di_{dc}}{dt} + \frac{1}{C_{eq}} \int i_{dc} dt + R_{eq} i_{dc} \quad (5)$$

$$I_{dc}(s) = \frac{C_{eq} \cdot [U_{dc} + sL_{eq}i_{dc}(0_-) - U_c(0_-)]}{s^2 L_{eq} C_{eq} + sC_{eq} R_{eq} + 1} \quad (6)$$

式中, C_{eq} 为换流单元内所有电容的等效电容值。该阶段电容电压及故障电流的初值为

$$U_c(0_-) = 0 \quad (7)$$

$$i_{dc}(0_-) = i_{dc}(t_3) \quad (8)$$

式中, $I_{dc}(t_3)$ 为 t_3 时刻闭锁电容换流单元 IGBT 后通过的线路电流。

$$i_{dc}(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left(\frac{B - A\xi\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \sqrt{1-\xi^2} t + A \cos \omega_n \sqrt{1-\xi^2} t \right) \quad (9)$$

式中 4 个变量均由电路参数决定:

$$A = i_{dc}(t_3)$$

$$B = U_{dc} / L_{eq}$$

$$\xi = R_{eq} \cdot \sqrt{C_{eq}} / (2\sqrt{L_{eq}}) \quad (10)$$

$$\omega_n = 1 / \sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq}}$$

此阶段电容电压值为

$$V_{C_{eq}}(t_{3+}) = V_{C_{eq}}(t_{3-}) + \frac{1}{C} \int_{t_{3-}}^{t_{3+}} i_{dc}(t) dt \quad (11)$$

式中: $V_{C_{eq}}(t_{3-})$ 电容电压初始值为 IGBT 导通电压。

由式(9)和式(11)可知电容值越大, 断路器换流电容电压值达到避雷器触发水平越慢。同时电感数

值的增大会抑制电流的上升速率, 也会影响到断路器的开断时间。综合考虑两者, 故本文电容值选取为 $50 \mu\text{F}$ ^[13]。

4) 第四阶段。断流单元两侧的电压快速上升, 在 t_4 时刻其达到避雷器动作阈值时, 短路电流全部转移至避雷器中直至直流网络电感能量全部消耗完成。如图 2(d)所示。

5) 第五阶段。直流线路故障电流为 0 后, 断路器进入恢复重合闸状态。通常, 在柔性直流电网架空线路发生瞬时性故障后, 系统一般要求数百毫秒后启动重合闸操作, 若此时电容换流单元内部电容电压较高, 则电容 C 将直接对与其相连的 IGBT 放电, 存在损坏直流断路器的风险。为保证在重合闸的安全可靠, 通常将电容与一卸能电阻串联, 消耗其能量, 降低电压幅值。对于串联的 RC 电路时间常数为 $\tau = RC$, 工程上一般认为 5τ 即充放电完毕。则卸能电阻值计算可得 $R = T_{RS} / 5C$ 。其中 T_{RS} 为故障发生后到启动重合闸操作的时间。

3 仿真算例分析

3.1 仿真参数

为验证本文提出的基于电容换流的限流式混合直流断路器在高压柔性直流电网中的可行性和有效性, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了如图 5 所示的四端柔性直流电网测试模型, 其参数如表 1 所示。

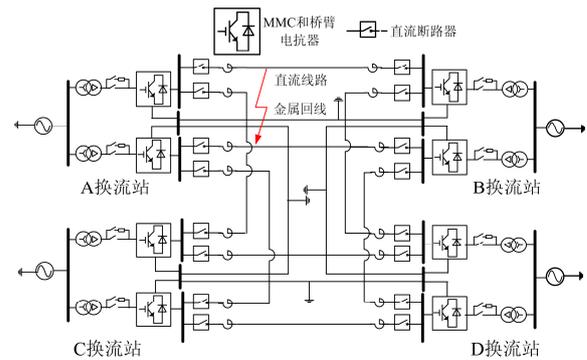


图 5 四端 MMC-HVDC 系统示意图

Fig. 5 Four-terminal monopolar HVDC grid

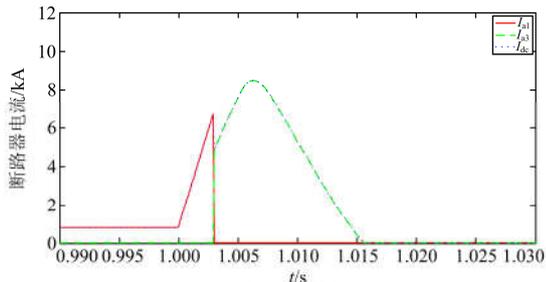
该直流电网采用半桥子模块加直流断路器的构建形式, 采用文献[20]提到的 Thevenin 等效模型实现 MMC-HVDC 电磁暂态快速仿真。换流站 A、B 和 D 3 站采用定有功功率和定无功功率控制, 换流站 C 站采用定直流电压和无功功率控制。系统级控制采用文献[21]提出的改进下垂控制策略。4 站之间通过架空线路相连, 架空线路模型采用 PSCAD/EMTDC 中自带的频率相关(相位)模型。

表 1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

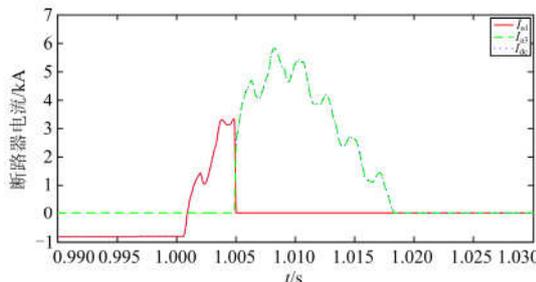
直流侧						
直流母线电压/kV	阀侧交流电压/kV	平波电抗器/H	子模块电容值/mF	桥臂子模块数	直流线路 AB 长度/km	直流线路 AC 长度/km
±500	260.2	0.2	10	228	206	50
直流侧				断路器		
直流线路 BD 长度/km	直流线路 CD 长度/km	A/B 站系统容量/MVA	C/D 站系统容量/MVA	断路器限流电感/H	避雷器保护水平/kV	断流单元子模块电容/μF
207	188	1 500	3 000	0.05	750	50

3.2 断路器特性分析

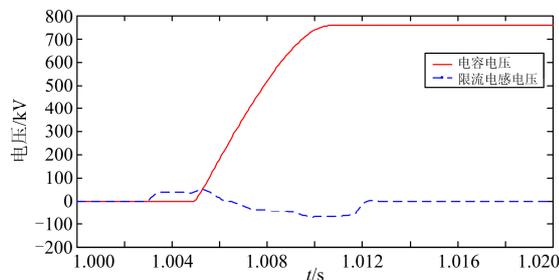
为研究直流断路器在线路最严重故障情况下的动作特性，在 $t = 1\text{ s}$ 时，对架空线路 AB 首端施加双极短路故障，故障点位置如图 5 所示。采用所提直流断路器先限流再切除故障的处理方案。图 6(a)、图 6(b)分别为架空线路近端与远端直流断路器中主流通支路 I_{a1} 、电流换流单元支路电流 I_{a3} 和线路电流 I_{dc} 。图 6(c)为断路器电容电压及限流电感电压。



(a) 近端断路器各支路电流



(b) 远端直流断路器各支路电流



(c) 开断过程中电容电压及限流电感电压

图 6 断路器各器件电压电流

通过线路的波过程，近故障点处约在 1.003 s 时检测到故障，对直流断路器施加关断信号。远故障点处约在 1.005 s 时检测到故障。此时对主流通支路上的 IGBT 施加关断信号，其流通的晶闸管随电流的减小而关断。

故障电流转移向电容换流单元支路，该支路电流 I_{a1} 迅速上升，在限流电感的作用下，故障电流上升斜率与幅值明显降低，实现限流功能。之后电流重新上升，但上升速率远小于限流前。远故障点处尽管施加信号稍晚，但由于其远离故障点，回路阻抗大，电流上升较慢，直流断路器动作后可有效隔离故障。

$t = 1.007\text{ s}$ 时，故障电流 I_{dc} 开始下降。此时类全桥子模块中的电容 C 快速充电，电压迅速上升，当电容电压增大至避雷器保护水平以上时，故障电流通过避雷器支路转移。同时，当 I_{a1} 减小至机械开关 K1、K2 的开断电流时，断开 K1、K2，完成故障线路的正确隔离。

在隔离过程中限流电感电压最大值为 75 kV 左右，且在电容投入后，逐渐减小最后维持在 -100 kV 左右。电容电压稳步上升最后维持在 750 kV 左右，此时触发避雷器支路。

图 7 为故障情况下的直流系统动态响应。图 7(a) 为各换流站直流母线电压，图 7(b) 为换流站交流侧有功功率，图 7(c) 为换流站 A 侧换流站三相上桥臂电流值。从图 7(a) 中可见，在断路器动作过程中，系统直流母线电压变化明显，其中 AB 站离故障点较近，电压大幅波动，但在线路平波电抗器及断路器限流电感的作用下，电压幅值为 557 kV 左右；故障隔离后，系统电压快速恢复到正常水平。

由于该直流电网采用真双极结构，故障线路切除后，换流站继续运行，通过非故障线路持续输出功率。C 站作为定直流电压站，为维持电压的稳定，功率变化明显，其余三站变化量不大，在故障清除后迅速维持在额定值附近。

图 7(c) 为靠近故障点处上桥臂电流变化曲线。

Fig. 6 Dynamic performance of the assembly HVDC breaker

故障期间桥臂电流变化明显。通常对各 MMC 设置过流保护, 当 MMC 换流器的桥臂电流大于 2 倍额定电流时, MMC 将闭锁。此处 A 站闭锁电流为 4 kA, 小于 2 倍额定电流, 因此换流站无需闭锁, 保证了非故障线路的正常运行。

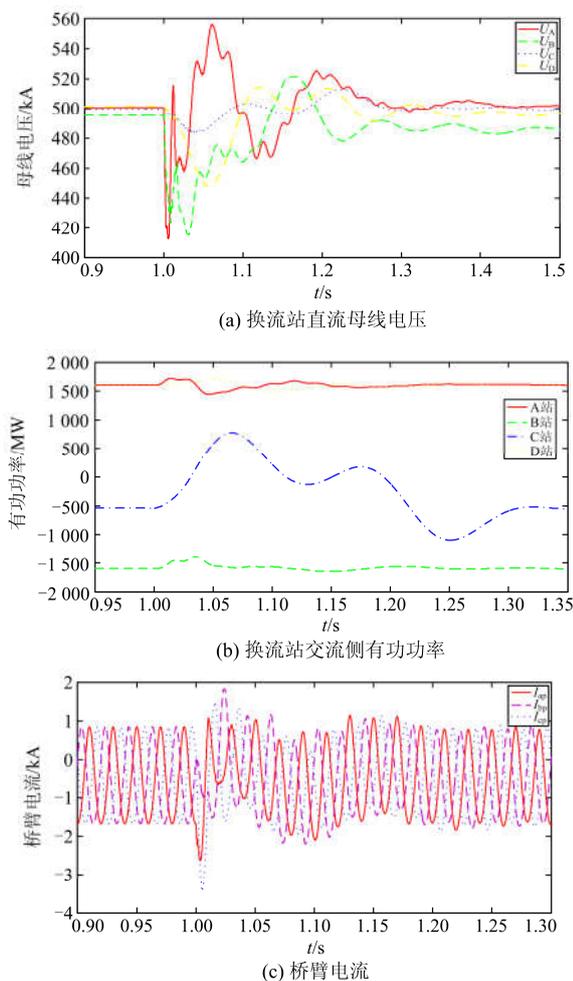


图 7 直流系统动态响应

Fig. 7 Dynamic response of the the DC system

4 结论

本文在现有混合型直流断路器的基础上提出了一种基于电感限流及电容换流的新型高压直流断路器拓扑结构, 该直流断路器在正常情况下通过电力电子器件流通, 电感不对其正常运行产生影响, 通态损耗较小。在故障情况下, 通过电感抑制故障电流上升速率, 降低幅值, 可大大提升直流断路器的关断电流。通过电容换流单元替代原有的混合直流断路器中的固态直流断路器, 大大降低了成本, 并解决了电力电子器件串联所需的动态均压难题, 具有较好的经济性。

通过理论推导分析该直流断路器在故障隔离

过程中的开断时序及开断特性, 研究了相应的电流电压应力, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建了四端真双极直流电网模型。验证了该直流断路器的故障电流开断能力。

研究表明, 该直流断路器方案实现难度小, 开断容量大, 具有极好的动态性能, 适用于高压、特高压直流输电领域。

参考文献

- [1] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 1-7.
RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Enhancement of the stable operation ability of large-scale wind power system based on the VSC-HVDC embedded in energy storage apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 1-7.
- [2] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 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.
- [4] YAO Z, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [5] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.
- [6] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [7] 李文锋, 张健, 卜广全, 等. 抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 130-135.

- LI Wenfeng, ZHANG Jian, BU Guangquan, et al. A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new renewable integrated through VSC-MTDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 130-135.
- [8] TAHATA K, OUKAILI S E, KAMEI K, et al. HVDC circuit breakers for HVDC grid applications[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, February 10-12, 2015, Birmingham, UK: 1-7.
- [9] 穆建国, 王莉, 胡杰. 直流固态断路器拓扑结构的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 109-114.
- MU Jianguo, WANG Li, HU Jie. Analysis and design of topological structure for DC solid-state circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 109-114.
- [10] CALLAVIK M, BLOMBERG A, HAFNER J, et al. Breakthrough! ABB's hybrid HVDC breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids[J]. ABB Review, 2013(2): 7-13.
- [11] LIN W, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Modelling of high-power hybrid DC circuit breaker for grid-level studies[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 237-246.
- [12] 江道灼, 张弛, 郑欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 65-71.
- JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71.
- [13] 周猛, 左文平, 林卫星, 等. 电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1045-1052.
- ZHOU Meng, ZUO Wenping, LIN Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and Its application in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1045-1052.
- [14] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.
- WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [15] WANG X, PENG C, YAO G, et al. Simulation and test research for DC breakers of UHVDC transmission system[C] // 2012 Second International Conference on IEEE Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), January 6-7, 2012, Sanya, China: 1480-1485.
- [16] ZHOU W, WEI X, ZHANG S, et al. Development and test of a 200 kV full-bridge based hybrid HVDC breaker[C] // 2015 17th European Conference on IEEE Power Electronics and Applications (EPE' 15 ECCE-Europe), September 8-10, 2015, Geneva, Switzerland: 1-7.
- [17] 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.
- [18] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3734.
- WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3734.
- [19] 姚为正, 行登江, 吴金龙, 等. 柔性直流电网超高速保护方案研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1710-1718.
- YAO Weizheng, XING Dengjiang, WU Jinlong, et al. Study on ultra-high-speed protection method of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1710-1718.
- [20] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3392.
- XU Jianzhong, LI Chengyu, XIONG Yan, et al. A review of efficient modeling methods for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3381-3392.
- [21] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
- YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.

收稿日期: 2017-12-18; 修回日期: 2018-01-12

作者简介:

王江天(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: hdwangjiangtian@163.com

王兴国(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护原理及算法。E-mail: wangxingguo@epri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)