

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.018

直流电网中直流断路器失灵保护方案研究^{*}

彭发喜¹, 邓银秋¹, 汪震^{1*}, 郑超², 宋云亭²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:针对基于模块化多电平换流器的柔性直流电网直流侧故障难以快速清除的问题,对基于 MMC 的柔性直流输电技术的基本原理和 3 种主流的直流侧故障隔离技术进行了研究。分析比较了 3 种高压直流断路器技术路线,选择混合式高压直流断路器作为清除柔性直流电网直流侧短路故障的方案,介绍了一种混合式高压直流断路器的基本结构和直流故障处理过程。参考交流电网断路器失灵保护策略,提出基于柔性直流电网的输电线路和母线上直流断路器失灵保护方案,并在 PSCAD/EMTDC 上搭建模型进行仿真验证。研究表明:所提出的断路器失灵保护方案在线路和母线上断路器未成功动作时使相邻断路器跳闸,实现故障的彻底隔离,并清除短路故障电流。

关键词:柔性直流电网;模块化多电平换流器;混合式直流断路器;直流侧故障;失灵保护

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0906-05

Scheme of failure protection for HVDC circuit breakers in MMC-HVDC grid

PENG Fa-xi¹, DENG Yin-qiu¹, WANG Zhen¹, ZHENG Chao², SONG Yun-ting²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of fast DC-fault clearing in HVDC grid based on MMC (MMC-HVDC), the principle of MMC-HVDC and three main isolation techniques of DC faults were studied. By comparing three technical routes of HVDC circuit breaker (DC-CB), the hybrid DCCB was used to interrupt DC faults. The topology and DC fault isolation process of a hybrid DCCB were studied. Referring to the failure protection strategy in AC grid, a scheme of failure protection for HVDC circuit breaker in MMC-HVDC grid was proposed. A four-terminal MMC-HVDC grid was used to verify the feasibility of the proposed strategy in PSCAD/EMTDC platform. The results indicate that the proposed scheme can order adjacent DCCBs to interrupt DC faults completely and clear fault current if a DCCB fails to act.

Key words: MMC-HVDC grid; modular multilevel converter (MMC); hybrid DCCB; DC fault; failure protection

0 引言

近年来,随着储能技术的不断进步,分布式电源的快速发展,直流负荷的日益增加,以及由于具有传输容量大、线损低、可靠性高等优势,直流电网受到了人们的关注^[1-2]。建立直流电网,可以充分实现多种能源形式、多时间尺度、大空间跨度、多用户类型之间的互补,

是未来电网的重要发展方向^[3]。国际大电网会议(CI-GRE)工作组 B4-52 的技术报告对直流电网所作的定义是:直流电网是由多个网状和辐射状联接的换流器组成的直流网络^[4]。

然而建立直流电网仍然面临着几大难点,其中的一大关键技术是实现直流侧故障的隔离。由于直流侧的低阻抗特性,短路故障电流上升率比较大,将严重危

收稿日期:2016-11-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900903);国家电网公司 2014 年基础性前瞻性科技资助项目(XT7114005)

作者简介:彭发喜(1990-),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事柔性直流输电和直流电网方面的研究。E-mail: faxipeng@zju.edu.cn

通信联系人:汪震,男,教授,博士生导师。E-mail: z. wang@zju.edu.cn

及系统中的相关电气设备^[5]。为了严格防止直流故障给直流系统和换流器造成损害,理论上要求直流保护能在毫秒级的时间内完成全套动作(包括故障检测和清除故障电流)^[6-7]。由于半桥型 MMC 桥臂中与 IGBT 反并联的续流二极管可为故障电流提供通路,在直流侧短路时无法通过闭锁换流器来切断短路电流^[8]。因此为快速限制并切断故障电流,以维持直流电网安全稳定运行并保护关键设备,高压直流断路器成为有效甚至唯一技术手段^[9]。

但是在运用直流断路器实现直流电网的故障处理时,会存在故障元件的保护动作导致直流断路器操作失拒拒绝跳闸的问题,此时直流故障未能彻底清除。所以有必要研究类似于交流电网的断路器失灵保护方案。

本研究将引入一种混合式高压直流断路器方案,提出柔性直流电网中直流断路器失灵保护策略。

1 MMC 原理及故障隔离技术

基于半桥子模块的模块化多电平换流器的拓扑结构如图 1 所示。

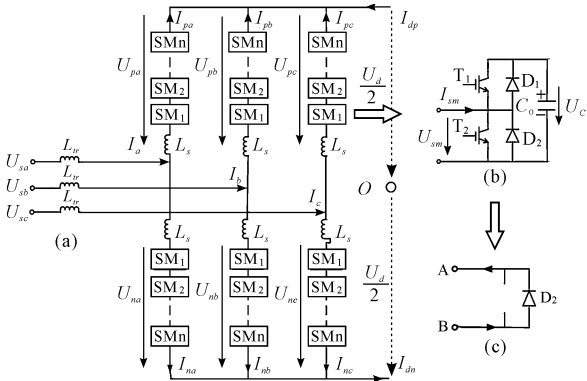


图 1 MMC 拓扑结构

其结构由 6 个桥臂 (arm) 构成,每个桥臂由一个电抗器(电感为 L_s) 和 N 个半桥子模块 (SM) 串联而成,每相上、下两个桥臂结合在一起称为一个相单元^[10]。由于采用模块化设计,MMC 能够通过改变接入换流器子模块的数量和参数来满足不同功率、电压等级和谐波参数的要求,便于实现集成化设计,缩短工程周期,节约成本。

当直流侧发生短路故障时,即使 IGBT 全部关断,交流系统通过与 IGBT 反并联的二极管,仍然会向故障点馈入短路电流,图 1(c) 表示的是直流侧发生短路故障时的子模块等效电路。因此,半桥子模块的换流器无法通过自身的控制来清除直流侧故障,需要其他的外部控制来达到这一目的。

隔离直流故障的方法主要有 3 种:(1) 基于交流侧断路器的故障隔离技术,通过交流侧断路器和直流侧隔离开关的配合实现故障隔离;(2) 设计具备“故障穿越”能力的换流站拓扑技术;(3) 研制高压直流断路器,实现类似交流电网中断路器的部分故障保护功能。

在上述 3 种方案中,直流断路器方案可以保护非故障线路供电不受简单故障影响,是国际大电网会议 (CIGRE) 推荐的未来直流组网保护方案。

2 高压直流断路器

近年来的高压直流断路器主要有 3 种技术路线:(1) 基于常规开关的传统机械式断路器。(2) 基于电力电子器件的全固态式断路器。(3) 基于二者结合的混合式断路器。3 种高压直流断路器的性能比较如表 1 所示。

表 1 3 种高压直流断路器性能比较

性能指标	机械式	固态	混合式
分断速度	慢	快	快
通态损耗	低	高	高
分断能力	强	中等	中等
制造成本	低	高	高

混合式断路器用快速机械开关导通正常运行电流,电力电子开关分断故障电流,在保证分断容量和动作速度的前提下降低通态损耗,具有良好的研究与应用前景。本研究采用 ABB 提出的混合式直流断路器模型^[11],其基本结构如图 2 所示。

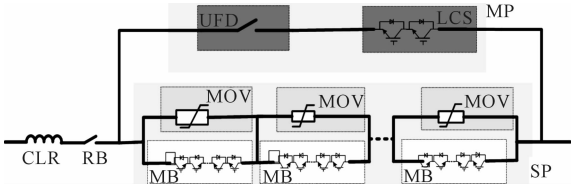


图 2 混合式直流断路器基本结构

该断路器主要包括以下几部分:

(1) 机械式开关支路 MP。包括快速隔离开关 UFD 和半导体负载换流开关 LCS,其中 UFD 具有零电流状态下快速断开电路的能力,在当前研发能力下,其开断时间为 2 ms 左右;

(2) 开关支路 SP。包括半导体主断路器 MB 和避雷器组 MOV;

(3) 限流电抗器 CLR 及残余电流断路器 RB。

这种混合式直流断路器故障处理过程如图 3 所示。

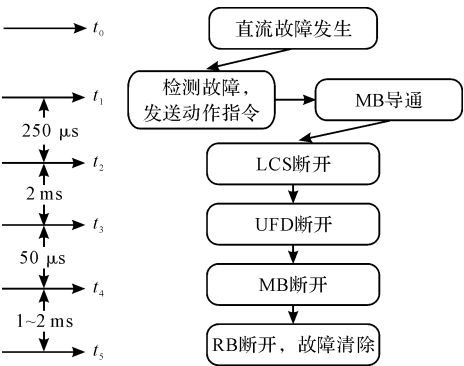


图 3 混合式直流断路器故障处理过程

整个直流断路器的动作完成时间在 5 ms 之内。在本研究建立的柔直电网模型中,各输电线路两端的正负两极线路上和换流站出口线路上都会接入混合式直流断路器用于隔离直流侧故障,并且每个断路器附近都加装电流互感器和继电器。

3 直流断路器失灵保护方案

在柔性直流电网中存在多条输电线路和直流母线,在故障发生时,笔者希望电网的保护系统能确定故障所在的位置,在不影响非故障部分的正常运行下仅断开故障部分,并且被停运的范围最小。

因此本研究基于混合式高压直流断路器需要对直流线路故障区域进行快速检测。对于直流电网的架空线路,所选的保护方案需具有全线速动性,并能区分交流侧故障、直流开关场故障、换流器故障等区外故障,以避免误动。类似于传统直流输电的保护方案,直流断路器所连直流线路采用行波保护和微分欠电压保护作为主保护,它动作性能快,并且不依赖远端通信就可启动;同时采用低电压保护和电流差动保护等作为后备保护^[12]。保护原理示意图如图 4 所示。

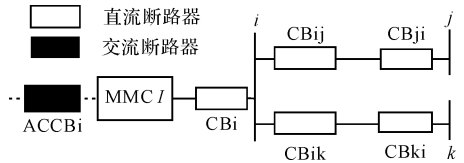


图 4 保护原理示意图

在正常情况下,当输电线路出现故障时,该线路两侧断路器将跳闸切断该故障线路;当母线出现故障时,该母线所连的全部断路器将动作切断该母线;如果输电线路和母线保护正确动作,故障电流将会在断路器断开后下降至 0。

类似于交流电网中的保护,直流电网应该具备断路器失灵保护的功能,在某断路器未成功动作时,向附近的断路器发出动作指令,隔离短路故障。本研究借

鉴交流电网的交流断路器失灵保护策略,具体设定如下:

- (1)如果线路故障时一端的断路器未跳闸,控制保护系统将向与此断路器所连母线上的其他所有断路器发出动作指令;
- (2)如果母线出现故障时一个线路断路器未动作,系统将断开该线路对侧的断路器;
- (3)如果换流站出口处断路器未动作,使用传统的保护方法,断开该换流站的交流侧断路器,将该断路器所连的换流站从系统中隔离。

4 实验及结果分析

4.1 仿真模型

本研究在 PSCAD/EMTDC 平台中搭建 4 端柔直电网系统以初步验证本研究提出的直流断路器失灵保护方案,其电气结构如图 5 所示。

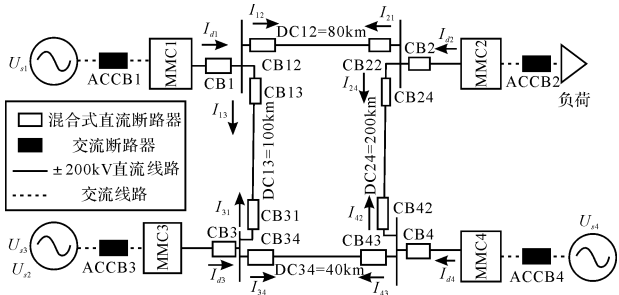


图 5 四端柔性直流电网系统结构

I_{di} —直流母线 i 与换流站之间的电流; I_{ij} —输电线路 ij 两侧的电流

仿真系统中换流站均由 MMC 子模块构成,换流站的控制方式如下:MMC1 和 MMC3 采用直流电压-有功功率下垂和定无功功率控制模式,稳态输送功率为 400 MW 和 -800 MW(以换流站流向直流侧为正方向)。MMC2 连接 100 MW 负荷,采用孤岛控制模式,稳态时交流侧的电压为 145 kV。MMC4 采用定有功功率和定无功功率控制模式,稳态输送 -500 MW 功率。换流站间通过架空线相连。

混合式直流断路器的相关参数如表 2 所示。

表 2 混合式直流断路器参数

参数	数值
限流电抗/mH	100
残余电流断路器动作阈值/A	25
快速机械隔离开关重合电阻/ Ω	0.005
避雷器组额定电压/kV	240
快速机械隔离开关动作时间/ms	2

规定输入换流站的交流功率为正。

各换流站及交流系统的参数如表 3 所示。

表 3 柔性直流电网仿真系统基本数据

参数	MMC1	MMC 2	MMC3	MMC 4
额定容量/MVA	800	200	1 200	800
网侧母线电压/kV	380	145	380	145
直流电压/kV	± 200	± 200	± 200	± 200
换流变额定容量/MVA	800	200	1200	800
换流变变比	380/220	145/220	380/220	145/220
换流变漏抗/(%)	10	10	10	10
桥臂电抗/mH	29	116	19	29
桥臂子模块数	200	200	200	200
子模块电容/ μ F	10 000	2 500	15 000	10 000

在正常状态下,断路器可用 5 ms 左右切断故障电流。为实现故障的快速隔离并避免断路器失灵保护的误动作,本研究的失灵保护均在线路和母线保护动作后 6 ms 时启动。同时假定因保护动作导致的直流线

路潮流转移不会触发线路过载。

4.2 故障设置

为了测试第 3 节直流电网保护策略的效果,本研究在 $t=2\text{ s}$ 时,设定了典型直流故障。F1 ~ F3 均设为永久性双极短路故障(最严重单一故障),用于测试存在断路器拒动条件下的断路器失灵保护,预想直流电网故障集如表 4 所示。

表 4 预想直流电网故障集

标识	测试对象	位置	失灵断路器	断路器开断先后
F1	线路后备	DC12 中点	CB12	CB21,CB1,CB13
F2	母线后备	直流母线 1	CB12	CB1,CB13,CB21
F3	母线后备	直流母线 1	CB1	CB21,CB13,ACCB1

4.3 仿真及分析

F1 的仿真波形如图 6 所示。

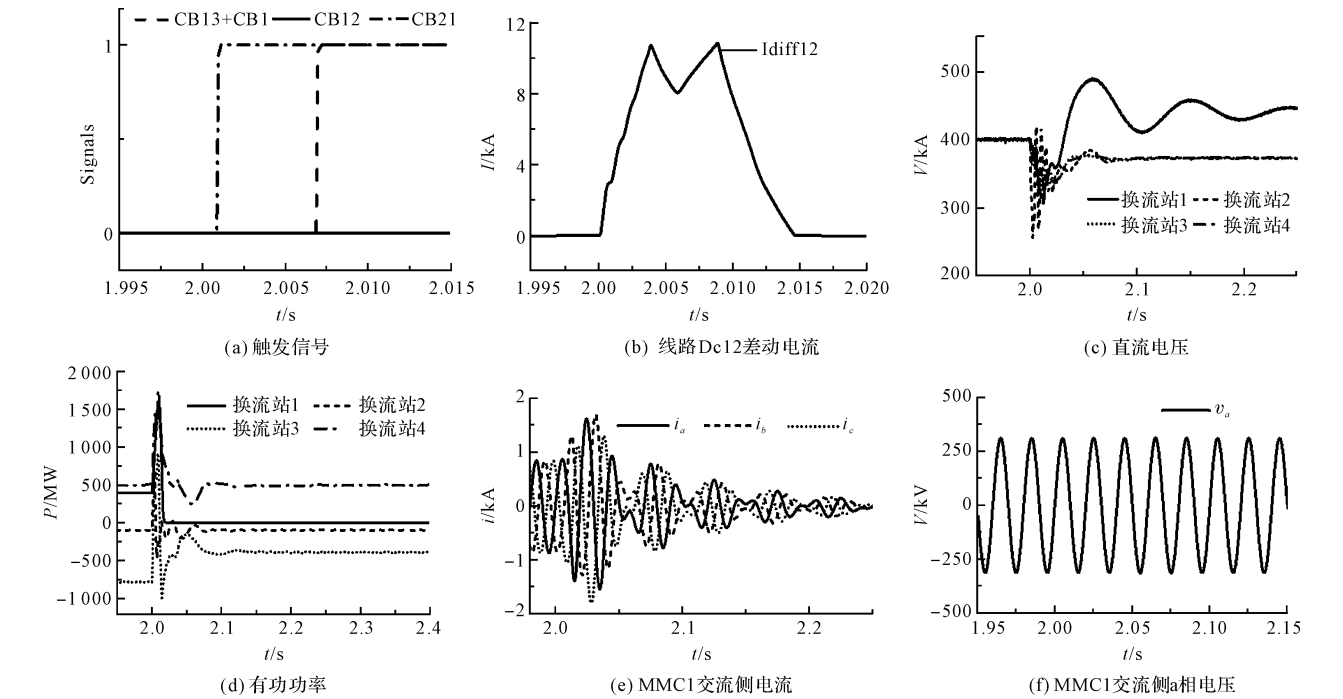


图 6 直流故障 F1 的仿真波形

故障 F1 发生时,保护系统检测到故障没有成功隔离,在故障后 8 ms 左右发出动作指令,连接在母线 1 上的断路器 CB13 和 CB1 断开(图 6(a)),在故障发生后 16 ms 时完全清除故障电流(图 6(b))。由于 MMC1 和 MMC3 采用直流电压下降控制模式,故障隔离后 MMC1 有功功率降为零、出口处电压上升到 440 kV(图 6(c))。直流网内直流电压由 MMC3 控制,降低至 380 kV,MMC2 和 MMC4 的有功功率恢复到故障前水平,而 MMC3 的有功功率变为 -400 MW(图 6(d))。MMC1 交流侧电压基本保持稳定(图 6(e)、6(f)),所以故障处

理过程对交流系统的稳定性影响较小。可见,柔直电网可稳健穿越线路双极短路故障,系统各项指标均在可承受范围之内。

故障 F2 发生时,保护系统检测到线路 DC12 中的电流没有成功清除,向 DC12 对侧的断路器 CB21 发出动作指令,断开 DC12 中的故障电流。在 CB21 动作 5 ms,即 2.011 s 时线路 DC12 中的电流降为零。而故障 F2 发生后各换流站出口处直流电压、有功功率和 MMC1 交流侧电流最终的稳态值与故障 F1 基本一致。

F2 的仿真波形如图 7 所示。

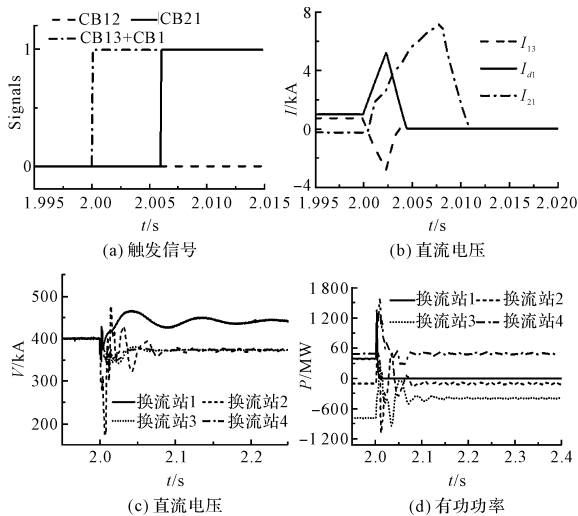


图 7 直流故障 F2 的仿真波形

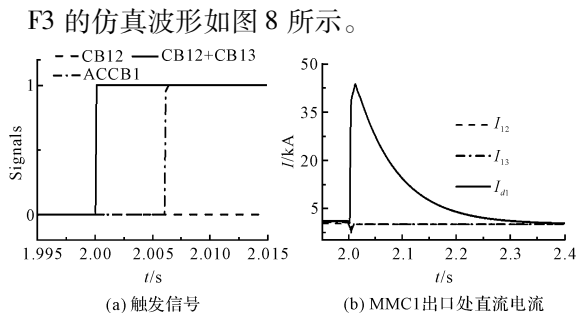


图 8 直流故障 F3 的仿真波形

在 2.006 s 时检测到 CB1 未成功动作导致换流站出口处电流没有断开,保护系统向 MMC1 交流侧断路器 ACCB1 发出动作指令,使 MMC1 彻底停运,断开母线 1 中的故障电流。直流电网其余部分工作状态与故障 F1 一致。由于交流断路器断开总时间为 40 ms,导致 MMC1 出口处电流持续增大至 45 kA,直到 2.4 s 后才下降至零。另外 MMC1 交流侧电流也有较大的跃升,由 1 kA 最高上升到 10 kA。可见,运用交流侧断路器隔离直流侧故障速度较慢,会产生较大的短路电流,并且需要换流站的停运。

5 结束语

(1) 混合式直流断路器结合了机械式断路器良好的静态特性以及全固态式断路器无弧快速分断的动态特性,在保证分断容量、动作速度的前提下降低了通态损耗,更加适合柔性直流电网;

(2) 在有直流断路器未成功动作时,本研究提出的断路器失灵保护方案可向附近的断路器发出动作指令,彻底清除短路故障;

(3) 在直流母线发生故障而换流站出口处断路器未动作时,运用交流断路器隔离故障时,存在开断时间过长的问题,会产生较大的短路电流;

(4) 仿真实验初步验证了所提出的直流断路器失灵保护方案的可行性。在下一阶段的研究中,笔者将在 RT-LAB 实时仿真平台上进一步验证相关保护方案。

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.
- [2] 陈 聪. ± 500 kV 高压直流输电线路电磁环境影响评估[J]. 机电工程技术,2016,45(4):120-125.
- [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.
- [4] Cigre B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study [R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems,2011.
- [5] 何俊佳,袁 召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术,2015,9(2):9-15.
- [6] AHMED N, ANGQUIST L, MAHMOOD S, et al. Efficient modeling of an MMC-based multi-terminal DC system employing hybrid HVDC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(4):1792-1801.
- [7] 李 斌,何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):87-95.
- [8] 薛英林,徐 政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
- [9] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review Identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):998-1007.
- [10] 徐 政,屠卿卿,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [11] HAFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers-a key innovation for reliable HVDC grids[C]. Proceedings of Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium, Bologna: CIGRE, 2011.
- [12] 刘高任,许 烽,徐 政,等. 适用于直流电网的组合式高压直流断路器[J]. 电网技术,2016,40(1):70-77.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

彭发喜,邓银秋,汪 震,等. 直流电网中直流断路器失灵保护方案研究[J]. 机电工程,2017,34(8):906-910.

PENG Fa-xi, DENG Yin-qiu, WANG Zhen, et al. Scheme of failure protection for HVDC circuit breakers in MMC-HVDC grid[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(8):906-910.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>