

DOI: 10.7500/AEPS201210274

基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略

仇雪娜¹, 赵成勇¹, 庞辉², 林畅²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京市 102206; 2. 国网智能电网研究院, 北京市 102200)

摘要: 基于模块化多电平换流器(MMC)的多端直流(MTDC)输电技术,兼具 MMC 技术和多端柔性直流输电技术的优势,具有广阔的应用前景。文中分析了 MMC 的拓扑结构和运行机理,设计了基于电压裕度的多点直流电压控制策略,并对控制器进行了设计。在此基础上,分析了直流侧单极接地故障、极间短路故障、断线故障对基于 MMC 的 MTDC 系统的影响,并进一步提出了相应的控制保护策略与保护时序。利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对以上几种直流侧故障及控制保护策略进行了仿真,结果表明所提出的控制保护策略能够实现系统故障后的快速恢复,有效提高多端系统的可靠性和可用率。

关键词: 多端直流输电; 模块化多电平换流器; 多点直流电压控制; 直流线路故障; 控制保护策略

0 引言

柔性直流输电在潮流反转时,直流电流方向反转而直流电压极性不变,因而有利于构成并联多端柔性直流输电系统^[1]。目前,已投入运行的多端直流(MTDC)输电工程全部基于传统电流源型换流器,尚未有多端柔性直流输电工程投运。但随着电压源型换流器(VSC)在高压直流输电领域应用的不断增多,多端柔性直流输电技术必将在分布式发电系统、可再生能源发电、高压直流配电网等领域具有广阔的应用前景^[2-3]。在各类 VSC 拓扑中,模块化多电平换流器(MMC),因其结构模块化、开关频率低、谐波含量小、易于实现高压多电平输出等优点,成为未来柔性直流输电工程的优选拓扑之一^[4]。基于 MMC 的 MTDC 输电技术,兼具 MMC 技术和多端柔性直流输电技术的优势,具有广泛的应用前景。

国内对于多端柔性直流输电系统的探索目前还处于起步阶段,研究主要集中在系统建模仿真与稳态控制策略方面,对直流线路故障的控制保护研究相对较少,且大多数研究都是针对基于两电平 VSC 的多端柔性直流输电系统,没有将多端系统的协调控制考虑在内^[5-11]。由于换流器拓扑结构的不同,与基于两电平 VSC 的 MTDC 输电系统相比,基于 MMC 的 MTDC 输电系统直流侧故障时的故障特性及其控制保护策略均有所不同。与基于 MMC 的两端直流输电系统相比,由于增加了站间协调控制策略,基于 MMC 的 MTDC 输电系统控制保护策略

与保护时序也变得更加复杂。本文为基于 MMC 的 MTDC 输电系统的控制保护设计提供了参考。

1 多端柔性直流接线方式及换流器模型

1.1 多端柔性直流接线方式

多端柔性直流输电系统需要多条直流传输线,因此,根据运行条件和设计要求的不同,可以组成多种接线方式。本文仿真平台采用的是应用范围较广的并联放射形接线,如图 1 所示。

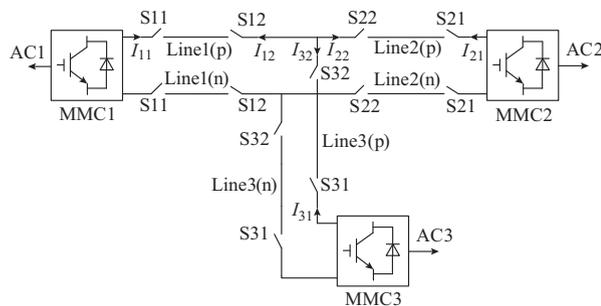


图 1 多端柔性直流输电拓扑结构
Fig.1 Topology of multi-terminal DC transmission system based on MMC

系统由 3 个基于 MMC 拓扑结构的 VSC 构成,换流站直流侧通过直流网络并联连接,采用经大电阻接地的接地方式。换流站 1 和 2 的交流侧接有源网络,等效交流电压额定值为 10 kV;换流站 3 交流侧接无源网络,采用恒功率与恒阻抗复合模型。每个换流站的交流侧均装设交流断路器,考虑到直流断路器价格昂贵且技术不成熟,直流侧采用快速直流开关,这种开关价格低廉且动作迅速,但不能切断故障电流,在设计系统控制保护策略时需一并考虑。

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2013-06-06。
国家自然科学基金资助项目(51177042)。

1.2 换流器模型

MMC 是应用于柔性直流输电的新型多电平换流器拓扑,其拓扑结构如图 2 所示。它由 6 个桥臂组成,其中每个桥臂由偶数个相互连接且结构相同的子模块(SM)与 1 个电抗器 L 串联组成。每个子模块是由绝缘栅双极型晶体管(IGBT)与反并联二极管构成的一个半桥和一个直流储能电容组成。通过调整子模块中 T1 与 T2 的开通与关断,可以灵活控制子模块的投入与切除。正是由于这种子模块单元结构的存在,增强了 MMC 的故障穿越能力,提高了系统的可靠性及可用率。

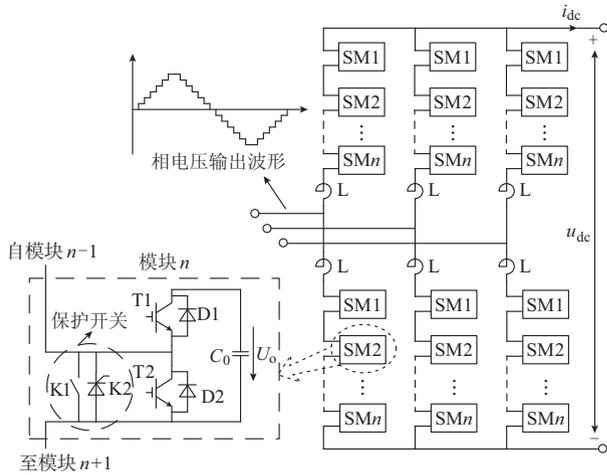


图 2 MMC 拓扑结构及其子模块的构成

Fig.2 Topology of MMC and structure of sub-modules

根据基尔霍夫电压定律,可得 MMC 的电压方程为:

$$\begin{cases} u_j = u_p - u_{j1} \\ u_j = u_n + u_{j2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_j 为换流器交流侧的出口电压; u_{j1} 和 u_{j2} 分别为 j 相上、下桥臂电压; u_p 和 u_n 分别表示直流侧正负极线相对于电位参考点的电压,正常运行时的值分别为 $u_{dc}/2$ 和 $-u_{dc}/2$ 。通过调整上、下桥臂投入的子模块个数可以灵活控制三相交流电压的输出。

2 控制策略

与两端系统相比,多端柔性直流输电系统的各个换流站之间的功率可以相互协调,因此,在可靠性、经济性和灵活性方面更具技术优势,但是其控制也更加复杂。本文针对 MMC 的控制特性,在文献[12]所介绍的基于直流电压偏差的 MTDC 控制策略基础上加以改进,设计了基于电压裕度的多点直流电压控制策略,并对控制器进行了设计。

2.1 基于电压裕度的多点直流电压控制原理

以三端柔性直流输电系统为例,说明采用基于电压裕度控制的多点直流电压控制的运行特性。选取交流侧注入直流侧的功率为正,则其运行特性如图 3 所示。主换流器和从换流器控制特性均由 5 段直线组成,其中 U_{dmax} 和 U_{dmin} 分别为直流电压的上下限; P_{Href} 和 P_{Lref} 分别为有功功率的运行上下限值; U_{dref} 为换流器期望的运行电压。各换流器的期望电压值间必须保持一个电压裕度。正常运行时,MMC1 作为主换流器控制直流电压恒定,MMC2 作为从换流器控制功率恒定,MMC3 接无源网络,采用定交流电压控制,系统稳定运行于工作点 A。若 MMC3 所接有功负荷增加较多,超出 MMC1 的有功调节范围,则系统的运行点将由 A 移向 B;若主换流站 MMC1 退出运行,则系统的运行点由 A 移到 C,多端系统仍能继续运行。

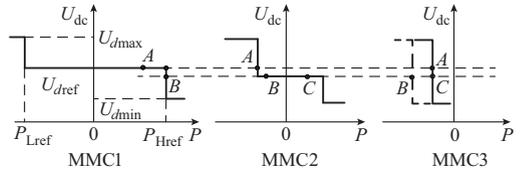


图 3 采用裕度控制的三端柔性直流输电系统控制特性

Fig.3 Voltage control characteristics of VSC based three-terminal DC transmission system using margin control method

2.2 控制器设计

三端柔性直流输电系统的站级控制器,采用直接电流控制,它具有快速的电流响应特性和很好的内在限流能力^[13]。外环控制根据给定的直流电压、有功功率和无功功率,生成内环电流指定值,内环电流控制环通过调节换流器的输出电压,使实际电流值 I_d 和 I_q 快速跟踪其指定值 I_{dref} 和 I_{qref} 。为实现如图 3 所示的控制特性,需对外环各类控制加以组合^[14],具体的控制器结构如图 4 所示。

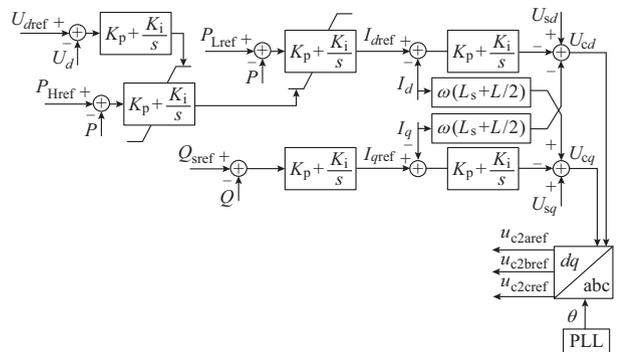


图 4 主换流站、从换流站控制器

Fig.4 Controller structure of the main and auxiliary converters

3 直流侧故障的控制保护策略

通常情况下,基于 MMC 的 MTDC 输电系统采用双极对称传输方式,直流线路故障类型可分为单极接地故障、正负极间短路故障与断线故障。极间短路故障与断线故障一般都是因人为挖断或船锚强行拉断造成的永久性故障,因此若检测到故障,故障侧换流器将闭锁退出运行。而单极接地故障往往是由于树枝或雷击等闪络造成,表现为暂时性故障,此时必须考虑故障清除后的恢复能力。本文将以上节介绍的 MTDC 输电系统仿真平台为例,分别对这 3 种故障类型的故障机制进行分析,提出相应的控制保护策略与保护时序,并进行仿真验证。

3.1 单极接地故障

基于两电平 VSC 的柔性直流输电系统单极接地故障时,直流侧并联电容器的能量通过接地极构成通路进行放电,容易产生较大的故障浪涌电流。而基于 MMC 的柔性直流输电系统由于直流侧不接地或经大电阻接地,故障后各电气特征参数的变化区别于基于两电平 VSC 的柔性直流输电系统。考虑工程实际,本文中的 MMC 直流侧采用经两个大电阻接地的方式,既可以钳位两级的直流电压,又为直流系统提供了电位参考点^[15]。

换流站发生单极接地故障期间,由于直流侧所并联的电阻阻值很大,近似于开路,因此直流侧电流基本保持不变,而子模块电容由于不存在与故障接地点之间的放电通路,电容电压基本维持稳定。直流侧电位参考点发生变化,正极电压 u_p 降低至 0,负极电压 u_n 的幅值由于大电阻的钳位作用上升了一倍,因此,正负极间电压 u_{ac} 基本保持不变,多端系统仍能正常传输功率。因此,通过合理设计直流线路和换流器交流母线的绝缘水平,当系统直流侧发生暂时性单极接地故障时,只需相应调整交直流保护定值以最大限度地配合系统的可靠性与可用率。当发生永久性单极接地故障时,由于系统功率传输正常,阀设备所承受的电气应力不大,换流站无需采取紧急闭锁,应注意在超过交直流线路耐压极限之前尽快排除故障。

3.2 正负极间短路故障

极间短路是基于 MMC 的高压直流输电系统中最为严重的故障类型,直流线路正负极短接时,各端换流站都通过子模块下部二极管 D2 向短路点注入短路电流。同时,换流器中正处在导通状态的子模块电容也通过 T1 向短路点快速放电,子模块电容电压迅速减小至零,换流器直流侧电压快速降低至零,换流器之间将即刻终止功率传输,交流系统电压、电流近似于发生三相短路^[16]。

极间短路故障线路的识别可依据极间短路的故障特性进行,具体方法为:选择如图 1 所示的线路电流方向为正方向,假设流过第 n 条直流线路两端的电流分别为 I_{n1} 和 I_{n2} 。若本条线路发生极间短路故障,则有 $I_{n1} + I_{n2} = I_s$,其中 I_s 为流入故障点的电流;在正常运行与外部故障时 $I_{n1} + I_{n2} = 0$,但由于分布电容等因素的影响实际上并不为零。因此,本段线路发生极间短路的故障判据实际上应为 $I_{n1} + I_{n2} \geq I_{set}$,其中 I_{set} 为电流门槛值。

下文以直流线路 1 发生极间短路故障为例来说明故障后所采取的控制保护策略。系统检测到极间短路故障并根据故障线路识别判据标记故障线路。然后需要尽快闭锁换流站以防止开关器件过流,从故障发生到换流器可靠闭锁,约需 5~10 ms 的检测装置延时及保护装置动作时间,本文中设置延时为 10 ms。此时子模块电容器只能通过二极管 D1 充电,而不存在放电通路,但交流短路电流仍能通过 D2 注入直流短路点,因此,在故障 80 ms 后各端交流侧跳闸切断交流电流的馈入。此时,桥臂电流仅由电抗器的续流提供,随着桥臂电抗器能量的释放,直流电流缓慢减小至零。直流电弧熄灭后,故障线路两端快速直流开关跳开,迅速隔离故障线路,与故障线路相连的换流站 MMC1 退出运行。然后立即闭合换流站 2 和 3 交流侧断路器并解锁换流站,采用他励式启动方式对换流站进行充电,从而完成剩余多端系统的重新启动。由于采用了基于电压裕度的多点直流电压控制策略,MMC2 的控制方式由定有功功率控制自动切换为定直流电压控制,以维持剩余系统的功率平衡。

3.3 断线故障

断线故障一般为永久性故障,其故障识别可依据断线的故障特性进行,根据线路有无电流进行故障定位,当发生断线故障时,有 $I_{n1} = I_{n2} = 0$,但由于分布电容等因素的影响实际上不为零。因此,本段线路发生断线的故障判据实际上为 $|I_{n1}| \leq I_{set}$ 。

假设线路 2 发生单极断线故障,由于故障时 MMC2 工作在定有功功率控制方式下,直流电压将持续降低,交流电流不断增大以维持定有功功率,当电压下降到一定程度时,功率将无法继续维持。MMC1 和 MMC3 出现功率富余,但由于 MMC1 工作在定直流电压控制方式,其将根据 MMC3 所需功率调节功率输出,以维持剩余系统的有功平衡,因此,故障后 MMC1 和 MMC3 侧的直流电压在经历短暂的小幅上升后会迅速回落到正常水平。

假设直流线路 1 发生单极断线故障,则故障后与其相连的换流站 MMC1 功率传输中断。若故障前 MMC1 处在整流状态,则故障发生后 MMC1 侧

的直流电压经历短暂小幅升高后会迅速回落到正常水平;若 MMC1 处在逆变状态,则故障后 MMC1 侧直流电压经历短暂下降后会迅速恢复到原有电压值。而由于多端系统采用了基于电压裕度的多点直流电压控制策略,剩余两端换流站仍能继续运行,MMC2 由定有功功率控制自动切换为定直流电压控制,从而达到对直流电压的控制以及有功功率的平衡。当检测到断线故障时,MMC1 换流站将在 10 ms 内闭锁,同时由于断线后线路 1 上的电流迅速降为零,直流电弧熄灭后,故障线路两端快速直流开关跳开,在故障 80 ms 后 MMC1 交流侧跳闸。

4 基于 MMC 的 MTDC 系统仿真平台

在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建并联三端柔性直流输电系统仿真模型,其接线方式如图 1 所示。3 个换流站均采用电平数为 11 的 MMC 拓扑结构,并采用最近电平逼近调制策略与基于电容电压排序的通用电容均压策略^[17]。系统采用如图 3 所示的基于电压裕度的多点直流电压协调控制策略。作为主换流站,换流站 1 正常运行时的参考电压 U_{dref} 为 10 kV,有功功率的上下限 P_{Href} 和 P_{Lref} 分别设为 0.3 MW 和 -0.3 MW。换流站 2 作为从换流站,其 U_{dref} 为 9.5 kV, P_{Href} 和 P_{Lref} 分别为 0.2 MW 和 -0.2 MW。换流站 3 接无源网络,采用定交流电压控制策略。

正常运行时,换流站 3 从直流侧吸收 0.05 MW 有功功率,换流站 2 从直流侧吸收 0.2 MW 有功功率,换流站 1 向直流侧注入 0.25 MW 有功功率,系统的直流电压稳定在 10 kV。

5 仿真验证

5.1 单极接地故障的响应特性

假设换流站 1 直流正极线在 2.0 s 时发生接地故障,故障持续时间 0.1 s,则系统仿真波形如图 5 所示。各换流站的两极直流电压波形如图 5(b) 所示,各换流站电压之间仅相差线路压降。交流系统方面,根据式(1)可知,3 个换流站阀侧交流电压均发生偏移,幅值下降,如图 5(e) 所示。而网侧交流电压仅有微小变动。由于直流侧通过钳位电阻接地,且故障期间其电容电压基本保持不变,当故障恢复时,其正负极对地电压可较快地恢复正常。

5.2 正负极间短路故障的响应特性

图 6 所示为 2 s 时线路 1 发生极间短路故障并采取相应控制保护策略后的仿真波形图。2.01 s 时三端换流站故障闭锁,2.08 s 时三端交流断路器跳闸,2.15 s 时故障线路 1 上快速直流开关跳开,

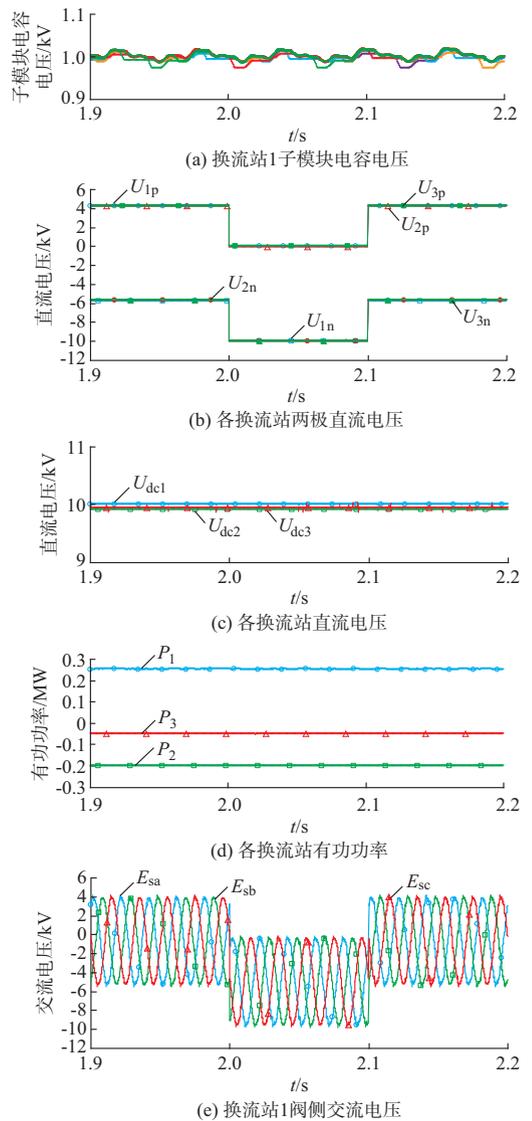


图 5 直流正极线接地故障仿真波形
Fig.5 Waveforms for single-line to ground DC fault

2.16 s 时闭合 MMC2 和 MMC3 交流侧断路器,并解锁 MMC2 和 MMC3,换流站 2 和 3 重新启动。整个过程中,换流站 3 子模块电容电压波形与换流站 2 的基本类似,限于篇幅不再给出。图 6(e) 所示为换流站 2 直流电流波形,可见,只在故障发生瞬间对系统有一个较大的电流冲击,在换流站充电重启过程中未出现过流问题,这是由于 MMC 在故障闭锁之后电容电压仍能部分保持,因此,故障后其能迅速恢复直流电压,并且不会造成充电过流问题。

5.3 断线故障的响应特性

图 7 所示为 2 s 时线路 1 发生断线故障并采取相应控制保护策略后的仿真波形图。其中,换流站 3 子模块电容电压波形与换流站 2 的基本类似。

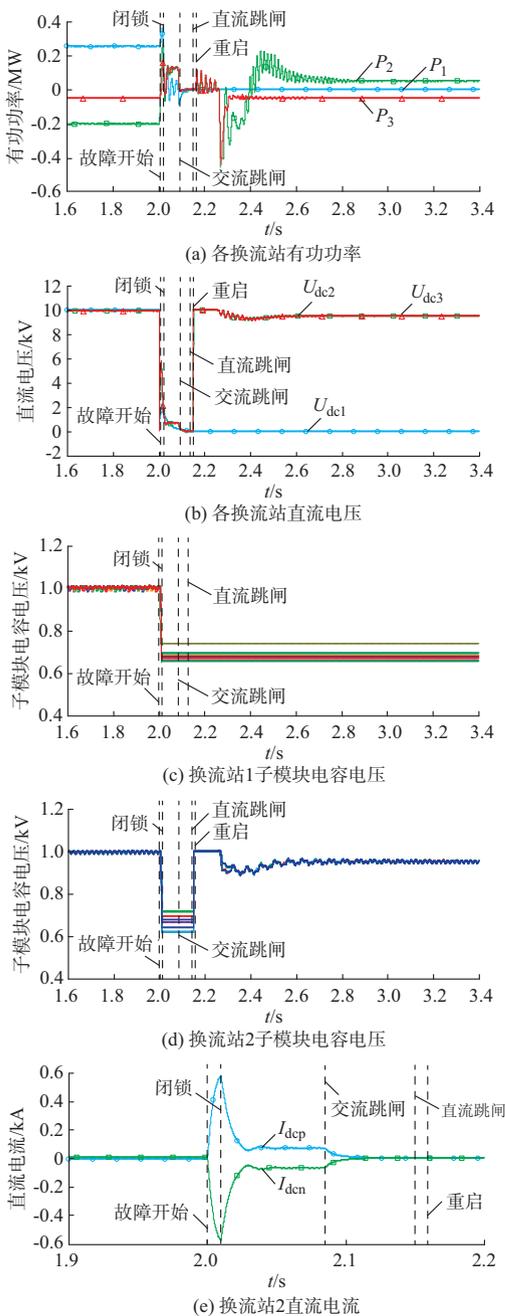


图6 直流线路极间短路故障仿真波形
Fig.6 Waveforms of line-to-line DC fault

6 结语

基于 MMC 的多端柔性直流输电技术,兼具 MMC 技术和多端柔性直流输电技术的优势,具有广阔的应用前景,为未来柔性直流输电技术的发展开辟了新的方向。理论分析与仿真结果表明,本文针对基于 MMC 的并联多端柔性直流输电系统设计的基于电压裕度的多点直流电压控制策略是可行的。采用该控制策略的多端系统在一定的扰动范围

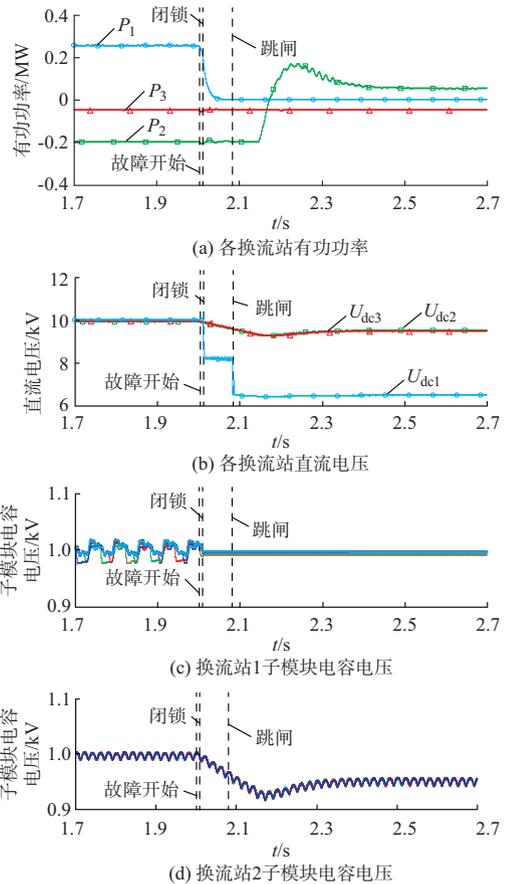


图7 直流正极断线故障仿真波形
Fig.7 Waveforms for DC line break fault

内能够完成控制模式的自动切换,提高了多端系统的故障穿越能力。当多端系统发生暂时性直流侧单极接地故障时,由于 MMC 的自身特点,多端系统仍能正常输送功率。当多端系统发生极间短路故障时,由于采用了基于电压裕度的多点直流电压控制,采取相应的保护策略后,系统只需经历短时停运,非故障系统便可恢复供电。当多端系统发生断线故障时,无需停运,非故障系统仍能继续运行。

参考文献

[1] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展和展望[J].电力系统自动化,2003,27(4):1-5.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 1-5.
[2] JIANG Hongbo, EKSTROM A. Multiterminal HVDC in urban area of large cities[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1278-1284.
[3] 陈海荣,徐政,张静.一种基于电压源多端直流输电的供电系统[J].高电压技术,2006,32(9):1-5.
CHEN Hairong, XU Zheng, ZHANG Jing. Supply system based on VSC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 1-5.
[4] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of

- multilevel VSC technologies for power transmission [C]// Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 1-16.
- [5] 陈谦,唐国庆,潘诗峰.采用多点直流电压控制方式的 VSC 多端直流输电系统[J].电力自动化设备,2004,24(5):10-15.
CHEN Qian, TANG Guoqing, PAN Shifeng. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 10-15.
- [6] SEKI Noboru. Filed testing of 53 MVA three-terminal DC link between power system using GTO converters[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27, 2000, Singapore: 2504-2508.
- [7] NG C H, PARKER M A, LI Ran, et al. A multilevel modular converter for a large, light weight wind turbine generator[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1062-1074.
- [8] ADAM G P, ANAYA-LARA O, BURT G. Multi-terminal dc transmission system based on modular multilevel converter [C]// Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 1-4, 2009, Glasgow, UK: 1-5.
- [9] YANG Xiaodong, ZHAO Chengyong, HU Jing. Key technologies of three-terminal DC transmission system based on modular multilevel converter [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 6-9, 2011, Weihai, China.
- [10] TANG Liangxiang, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC system [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [11] TANG Liangxiang, OOI B T. Protection of VSC-multi-terminal HVDC against DC faults [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 24-27, 2002, Cairns, Australia.
- [12] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [13] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J].电力系统自动化,2010,34(19):64-68.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [14] 陈海荣,徐政.适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略[J].电力系统自动化,2006,30(19):28-34.
CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 28-34.
- [15] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [16] 王珊珊,周孝信,汤广福,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J].中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by dc pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [17] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等.模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J].电力系统自动化,2010,34(2):48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.

仇雪娜(1987—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:高压直流输电与柔性输配电技术。E-mail: zhangxuena19871011@163.com

赵成勇(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:直流输电、柔性交流输配电与电能质量。

庞辉(1980—),男,博士,工程师,主要研究方向:柔性直流输电及大功率电力电子技术。

(编辑 章黎)

A Control and Protection Scheme of Multi-terminal DC Transmission System Based on MMC for DC Line Fault

ZHANG Xuena¹, ZHAO Chengyong¹, PANG Hui², LIN Chang²

1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102200, China)

Abstract: Since the modular multilevel converter (MMC) based multi-terminal DC (MTDC) transmission system has the advantage of MMC technology combined with that of the voltage source converter (VSC) based MTDC transmission system (VSC-MTDC), it will have broad application prospects. The topological structure and working principle of MMC are presented. A multi-point DC voltage control strategy based on the DC voltage margin method is then proposed and the controller is designed. Furthermore, the impact of different DC faults of the system is analyzed and the corresponding control and protection strategies are given. This approach can realize automatic switching between active power and DC voltage control modes, thus improving system stability. The DC faults include single-line to ground fault, line to line fault and line break fault. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed control strategies and the designed controller are verified by simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177042).

Key words: multi-terminal DC transmission system; modular multilevel converter (MMC); multi-point DC voltage control; DC line faults; control and protection strategy