

MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究

裘鹏¹, 章姝俊², 黄晓明¹, 陆翌¹, 芦明明³

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310000;
3. 许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 模块化多电平换流器直流输电系统 (Modular Multilevel Converter HVDC, MMC-HVDC) 的阀侧交流母线与换流器直接相连, 其故障对换流器造成的危害相对于网侧交流母线故障要严重的多。对其控制保护策略进行深入的研究分析有助于提高 MMC-HVDC 系统电力传输的安全性和可靠性。首先对 MMC 基本结构及原理进行了介绍。然后对阀侧交流母线故障进行了分类, 就单相接地故障对系统的影响进行了深入的研究分析, 并提出了针对性的控制保护策略。最后通过对阀侧交流母线单相接地故障进行仿真, 验证了故障特性分析的正确性和对应保护策略的可行性。

关键词: MMC-HVDC; 单相接地故障; 控制保护策略; RTDS

Research on the protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC

QIU Peng¹, ZHANG Shu-jun², HUANG Xiao-ming¹, LU Yi¹, LU Ming-ming³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China;
3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The internal AC bus of MMC-HVDC system is directly connected to the converter. Faults on the internal AC bus will lead to more serious harms to the system than those on the AC grid side. To enhance the security and reliability of the DC transmission, it is necessary to analyze the internal AC bus faults in more detail to find out reasonable protection strategies. Firstly the structure and principle of MMC are discussed. Then, the internal bus faults are reviewed, and a protection strategy focusing on single-phase ground fault are proposed. Finally simulation by RTDS is carried out. Results of the simulation show that the proposed protection strategy is valid and effective.

Key words: MMC-HVDC; single-phase ground fault; control and protection strategy; RTDS

中图分类号: TM77; TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0150-05

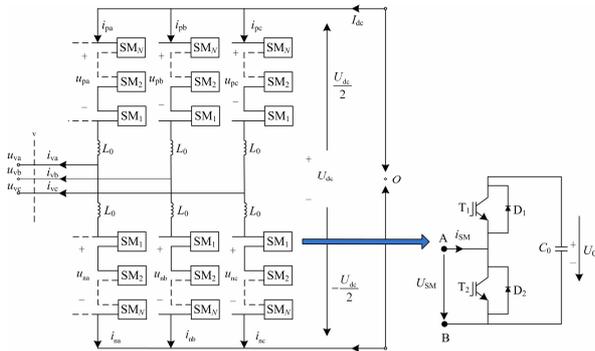
0 引言

传统的交流输电与基于电流源换流器的直流输电技术在城市电网扩容与可再生能源并网等领域显得既不经济又污染环境^[1]。随着高压大功率全控型电力电子器件 (IGBT, IGCT) 的发展, 基于电压源换流器的高压直流输电系统 (VSC-HVDC) 越来越得到工业界的重视^[2-3]。作为电压源换流器的一种新型拓扑结构, 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 近年来在风电并网、直流输电等领域的应用越来越受到关注^[4-6]。目前, 世界上已经投运的基于 MMC 的工程有美国旧金山 Trans Bay Cable 工程和中国上海南汇风电场柔性直流输电示范工程^[7-8]。

控制保护系统性能是 MMC-HVDC 的关键, 它直接影响着系统运行的可靠性和稳定性。当前, 国内外对 MMC 的研究多集中在控制策略和系统建模仿真方面^[9], 对于保护方面的研究也多关注在直流侧的故障分析。相对于直流侧的故障, 交流侧的故障对于系统的稳定性及可靠性同样有着不可忽略的影响。阀侧交流母线与换流器直接相连, 在发生故障时对换流器的危害要比网侧故障更严重。本文对 MMC-HVDC 阀侧交流母线单相接地故障特性进行了重点分析, 提出了针对性的保护策略, 并通过 RTDS 实时仿真对故障特性和保护策略进行了验证, 为基于 MMC-HVDC 工程的控制配合与保护设计提供参考。

1 MMC 基本结构与原理

三相模块化多电平换流器的拓扑结构如图 1 所示, O 点表示零电位参考点。一个换流器有 6 个桥臂, 每个桥臂有一个电抗器 L_0 和 N 个子模块 (SM) 串联而成, 每一相的上下两个桥臂合在一起称为一个相单元。交流电抗器的作用除了抑制因各相桥臂直流电压瞬时值不完全相等而造成的相间环流, 同时还可有效地抑制故障时流过桥臂的冲击电流, 提高系统的稳定性和可靠性。模块化的设计结构可以提高 MMC 的故障穿越能力, 通过对子模块的冗余配置来进行换流阀的故障保护^[10-11]。



MMC-HVDC 一次系统阀侧单相接地故障，其故障特性分析如下：

1) 由于接地电抗的阻抗值非常大，在 MMC-HVDC 阀侧单相接地故障发生时，改变了直流系统的电位参考点。设正极线电压为 U_P ，负极线电压为 U_N ，在故障发生后，电位参考点由图 3 中的 ①点变为②点，此时正负极线电压 U_P 、 U_N 出现正弦波动，但直流正负极间电压 U_{dc} 保持不变。

2) 阀侧交流母线故障相电压下降到 0。由于故障发生后故障相变为参考点，所以非故障相的相电压变为对故障相的线电压，非故障相电压上升为 1.732 pu。

3) 故障电流通过接地电抗器构成故障回路 a，并向非故障站传递，同非故障站接地电抗器构成故障回路 b，使直流电流在故障后呈现正弦波动。

4) 在故障发生后，会有零序电流流过接地电阻，并产生零序电压。

总之，阀侧单相接地故障并不影响 MMC-HVDC 的功率传输，在故障发生后，若为暂时性故障，在线路绝缘允许的情况下可保持正常功率传输；若为永久性故障，应当立即闭锁换流阀，跳开交流侧断路器。

3 单相接地故障仿真分析

3.1 仿真模型

本文依托舟山柔性直流输电工程，在 RTDS 实时仿真平台中搭建双端 MMC-HVDC 仿真系统模型^[13]。联结变压器、接地电抗器、桥臂电抗、IGBT、子模块电容等的参数如表 2 所示。联结变压器网侧绕组采用星型接法，阀侧绕组采用三角型接法，模型的一次系统主接线图如图 3 所示。本文采用 MMC 基于载波移相的正弦脉宽调制策略^[14-15]，根据文献^[16-21]对子模块电容电压、桥臂环流以及阀侧负序电压进行控制。

表 2 MMC-HVDC 模型参数设置

Table 2 Model parameter of the MMC-HVDC

模型区域	模型名称	模型参数
交流系统	电源	等值电源模型
	网侧相电压	175 kV
	阀侧相电压	165 kV
	联结变变比	130 kV/205 kV
	联结变容量	350 MVA
MMC	子模块个数	250 个
	子模块电容值	12 000 mF
	桥臂电抗值	0.09 H
直流线路	直流线路采用集中参数等值，等值电阻为 0.915 Ω ，等值电抗为 0.02 H	

3.2 单相接地故障仿真

仿真模型运行工况为：S1 采用定有功功率、定无功功率控制方式；S2 采用定直流电压、定无功功率控制方式。直流电压参考值为 ± 200 kV，无功功率为 0 Mvar，有功功率为 300 MW。故障设置为 S1 阀侧交流母线 A 相接地故障，如图 3 所示。在系统稳定运行后，0.4 s 时刻触发故障。MMC-HVDC 系统的电压、电流波形如图 4 所示。

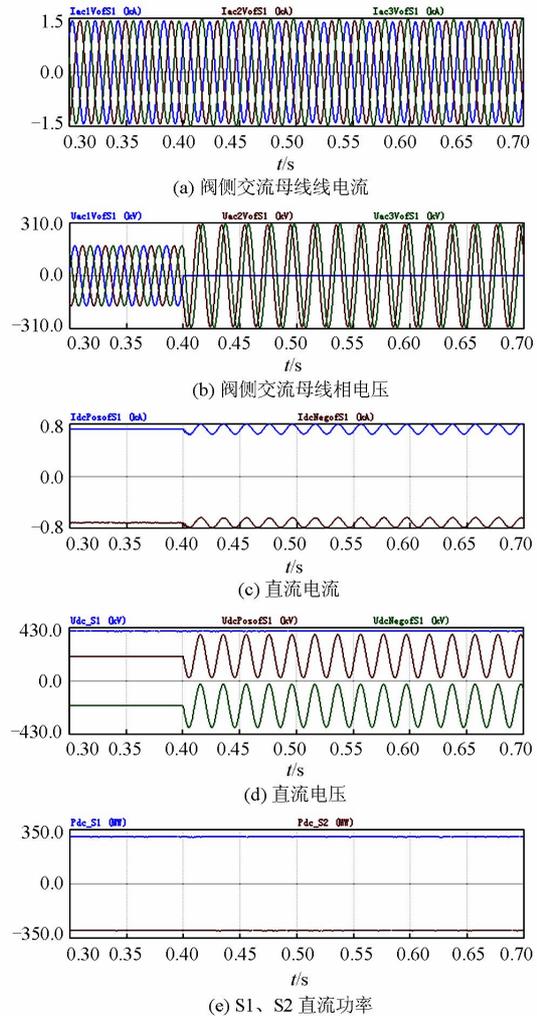


图 4 单相接地故障电压、电流波形图

Fig. 4 Waveforms for single-phase to ground fault

阀侧 A 相接地故障发生后，引起阀侧和直流侧对地参考电位变化。如图 4 (a) 所示，阀侧交流母线三相电流 $I_{ac1VofS1}$ 、 $I_{ac2VofS1}$ 、 $I_{ac3VofS1}$ 基本保持稳定；如图 4 (b) 所示，阀侧交流母线 A 相电压 $U_{ac1VofS1}$ 降低为 0，B、C 两相电压 $U_{ac2VofS1}$ 、 $U_{ac3VofS1}$ 升高为故障前的 1.732 倍；如图 4 (c)、图 4 (d) 所示，直流电流 $I_{dcPosofS1}$ 、 $I_{dcNegofS1}$

出现小幅波动, 浮动值在正负 75 A; 如图 3 所示, 直流侧参考点 O 与阀侧接地电抗器①点是等电位点, 在故障发生后, 由于零序电压的存在, 直流电压 $U_{dcPosofS1}$ 、 $U_{dcNegofS1}$ 出现类似正弦波动, 但正负极间直流电压 U_{dc_S1} 始终保持 400 kV; 如图 4 (e) 所示, S1、S2 功率 P_{dc_S1} 、 P_{dc_S2} 保持稳定在 300 MW。

3.3 保护策略

结合以上仿真分析可知, MMC-HVDC 系统在阀侧单相接地故障期间, 阀侧交流母线及直流线路过流程度低, 系统依然能够正常进行功率传输。但在故障后非故障相的电压升高, 直流电压波动较大, 并存在零序电流 I_{VC_0} 流过接地电抗器。因此, 本文采用接地电抗器零序过流与阀侧交流母线电压不平衡作为主要判据来实现阀侧单相接地故障的保护配置, 以接地过流保护作为主保护, 阀侧交流母线电压不平衡作为后备保护。由于故障会通过接地电抗器同非故障站构成故障回路, 两站保护均会动作, 无法区分故障发生站, 本文通过检测阀侧零序电流和接地电抗器上测点电流的差值来区分故障发生在哪个站。若差值为 0, 则故障发生在本站; 若差值为 1, 则故障发生在对站。

当 MMC-HVDC 系统发生暂时性阀侧单相接地故障时, 首先考虑交直流系统绝缘配合的相应标准, 通过合理设计换流器交流母线和直流线路的绝缘水平, 以及避雷器的强度, 避免故障的扩大。其次通过调整相应的交直流保护定值, 最大限度地确保系统的稳定性与可靠性。若阀侧单相接地故障为永久性故障, 从保护换流阀的角度出发, 应当立即闭锁换流阀, 跳开交流母线断路器, 从而避免换流阀承受长时间的电压过应力的危害。单相接地故障保护出口逻辑框图如图 5 所示。

4 结论

本文从理论上对双端 MMC-HVDC 系统的阀侧交流母线单相接地故障的故障特性进行了深入研究分析, 利用 RTDS 实时仿真装置对阀侧交流母线单相接地故障进行了仿真, 得出以下结论:

(1) 阀侧交流母线单相接地故障发生后, 由于 MMC-HVDC 系统的对地参考点的变化, 使得阀侧交流母线非故障相电压上升为 1.732 倍, 直流电压出现类似正弦波动; 但阀侧交流母线电流与直流电流基本保持稳定, 交直流线路不承受任何过电流的影响。

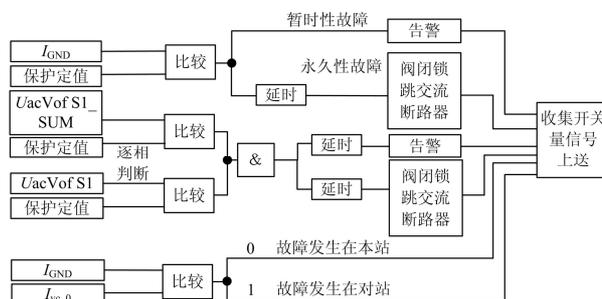


图 5 单相接地故障保护策略逻辑框图

Fig. 5 Logic diagram of protection strategy

(2) 根据故障特性的分析结果, 提出了针对单相接地故障的保护配置, 并通过检测阀侧零序电流和接地电抗电流的差值来区分故障发生站。最后通过区分暂时性故障和永久性故障, 设计了不同的保护出口。

参考文献

- [1] 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 Cheng-yong, CHEN Xiao-fang, CAO Chun-gang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Power System Protection and Control, 2011, 35(23): 82-87.
- [2] 涂瑞卿, 徐政, 姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38.
TU Rui-qing, XU Zheng, YAO Wei-zheng. Selecting number of voltage levels for modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 33-38.
- [3] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
ZHANG Zhe-ren, XU Zheng, XUE Ying-lin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.
- [4] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hai-rong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [5] 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.
- [6] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] WESTERWELLER T, FRIEDRICH K, ARMONIES U, et al. Trans bay cable world's first HVDC system using

- multilevel voltage sourced converter[C] // Proceedings of CIGRE, Paris, France: CIGRE, 2010.
- [8] 乔卫东, 毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 37-40.
QIAO Wei-dong, MAO Ying-ke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 37-40.
- [9] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的STATCOM分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.
ZHU Jing-song, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [10] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7.
ZHANG Wen-liang, TANG Guang-fu, ZHA Kun-peng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7.
- [11] 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 Min-yuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [12] 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(5): 1-7.
WANG Shan-shan, ZHOU Xiao-xin, TANG Guang-fu, 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(5): 1-7.
- [13] 刘崇茹, 林雪华, 李海峰, 等. 基于RTDS的模块化多电平换流器子模块等效模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 37(12): 92-99.
LIU Chong-ru, LIN Xue-hua, LI Hai-feng, et al. An equivalent sub-module model of modular multilevel converter in RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 37(12): 92-99.
- [14] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. NEW transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C] // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, June15-19, 2008: 174-179.
- [15] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压对称控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
ZHAO Xin, ZHAO Cheng-yong, LI Guang-kai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [16] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平VSC子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
DING Guan-jun, TANG Guang-fu, DING Ming, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [17] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高电压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 38-45.
GUAN Min-yuan, XU Zheng, PAN Wu-lue, et al. Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 38-45.
- [18] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 交流系统不对称时模块化多电平换流器的控制[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 22-28.
ZHOU Yue-bin, JIANG Dao-zhuo, GUO Jie, et al. Control of modular multilevel converter under imbalance of AC power system[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 22-28.
- [19] TEEUWSEN S P. Voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C] // Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, Siemens AG, Germany, May 11-14, 2011: 279-286.
- [20] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇. 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 Min-yuan, XU Zheng, PAN Wei-yong. Nearest level modulation for modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [21] LI Xiao-qian, SONG Qiang, LIU Wen-hua. Protection of non-permanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[C] // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, Jan 28-1, 2013: 483-491.

收稿日期: 2013-12-10; 修回日期: 2014-06-13

作者简介:

袁鹏(1985-), 男, 硕士, 工程师, 从事直流输电及柔性交流输电研究工作; E-mail: qiupeng5000@163.com

章姝俊(1977-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统工作;

黄晓明(1969-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护研究工作。