

DOI: 10.7667/PSPC160865

直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究

刘思源¹, 徐东旭², 梅念¹, 付颖¹, 刘崇茹²

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 对于直流侧双极性短路故障, 首先分析了故障通路对电容闭锁充电以及故障对交流侧功率的影响, 然后对如何减少故障对交流侧无功的影响提出了建议。对于直流侧单极接地故障, 通过仿真换流站不同接地电阻下, 故障对系统稳定性的影响, 对接地电阻的选择提供了建议。对于直流侧断线故障, 分析了故障发生后控制器的作用, 并给出了不同控制方式下, 故障对系统稳定性的影响。此外, 就双极短路和断线故障后闭锁时刻对系统的影响进行了分析。最后, 在PSCAD/EMTDC中建立HBSM-MMC模型验证了分析的正确性。

关键词: HBSM; 双极性短路故障; 单极短路故障; 断线故障; 短路电流

Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter

LIU Siyuan¹, XU Dongxu², MEI Nian¹, FU Ying¹, LIU Chongru²

(1. State Grid Beijing Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 2. State Key Lab of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For the DC side bipolar short-circuit fault, firstly, the impact to DC side power and capacitor charging after locking is analyzed, and then the suggestion for reducing the impact of fault on the AC side reactive power is proposed. For the DC side monopole ground fault, simulation results show the impact that the stability of the system is connected with the values of the grounding resistors, and suggestion is proposed in grounding resistor choice. For the DC side disconnection fault, it draws a conclusion for the stability of the system in different control modes. In addition, the impact of the locking time on the system is analyzed. Finally, the correctness of the above analysis is verified by the simulation of a single ended and double ends half bridge sub-module DC converter system in PSCAD/EMTDC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277068), and Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-12-0846), "111" Project of China (No. B08013), and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: HBSM; bipolar short-circuit fault; single pole ground fault; broken line fault; short circuit current

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 由于其模块化程度高, 易拓展, 输出谐波少等优点而得到了广泛应用^[1-4]。半桥子模块 (Half Bridge Sub-Module, HBSM) 作为一种拓扑结构的 MMC 子模块, 因其构造简单, 易控制而被应用于实际工程中^[4-5], 如国内的上海南汇柔性直流输电

工程、南澳三端柔直输电工程以及舟山五端柔性直流输电工程等^[6-9], 所用的子模块均是 HBSM。

但由于 HBSM 结构的特点, 使得其并不具有隔离直流侧故障的能力。目前直流侧主要有三种故障类型: 双极短路故障、单极接地故障、断线故障。为了分析这三种故障对于换流站稳定运行的影响, 现有文献已对其进行了详细研究。

对于 HBSM-MMC 直流侧故障^[10-11], 现有文献研究较多的是直流侧双极性短路故障^[12-14]。文献[12]分析了直流侧双极性短路故障的等效电路, 采用的等效模型认为上下桥臂电容是并联关系。文献[13-14]也对直流侧双极性短路故障进行了分析。但其都没有涉及故障对于交流侧的影响, 也未涉及故

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277068); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-0846); 高等学校学科创新引智计划 ("111" 计划) (B08013); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目资助 (2015AA050101)

障通路对于电容电压充电的影响。文献[15-17]详细分析了直流侧单极短路故障特性。文献[15]分析了直流侧接地下的故障特性, 文献[16-17]分析了交流侧接地下的故障特性。文献[18-19]在分析不同控制方式的基础上, 得出了对于功率控制侧其电容电压会不断上升, 对于直流电压控制侧其电容电压会在短暂下降后维持稳定的结论, 但并没有分析闭锁时间对于送端及受端的影响。

本文针对现有研究的不足, 分析了双极性故障对电容闭锁充电及交流侧功率的影响, 提出了在换流站交流侧配置无功补偿装置的建议, 以减少故障对交流侧无功的影响。同时阐述了不同接地方式下单极性接地故障对于换流站稳定性的影响。对于断线故障, 分析了闭锁时刻对于系统的影响, 并通过仿真建模验证了本文研究的正确性。

1 直流侧双极性短路故障

MMC 的结构如图 1 所示, u_s 为交流电源电压, R_S 和 L_S 为交流侧阻抗, L_0 为桥臂电感, R_0 为桥臂等效电阻, 直流侧通过中接地大电阻 R_∞ 使其正负极电压分别为 $U_{dc}/2$ 和 $-U_{dc}/2$ 。

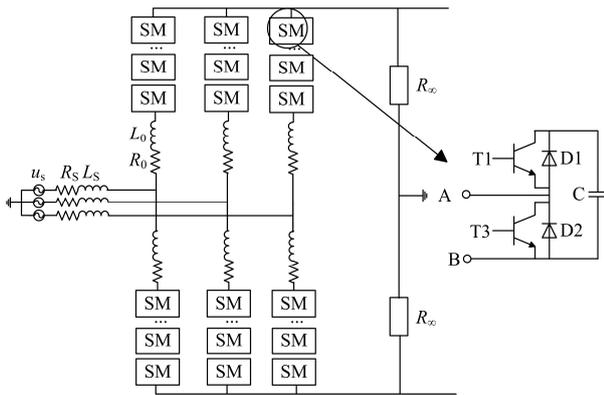


图 1 MMC 结构

Fig. 1 Structure of MMC

1.1 故障切除与否对电容充电的影响

当直流侧发生双极性短路故障时, 闭锁后电容电压的充电回路图 2 所示。

由图 2 可看出, 此时由于直流侧通路的存在, 使得交流侧电流有两条通路, 分别如图 2 中的通路 1、2。当电流流经通路 1 时, 电流对子模块电容有充电作用; 当电流流过通路 2 时, 电流对子模块电容无作用。显然, 当电流流过通路 1 时, 会引起电容电压的升高, 其对于电流通路 1 的形成起到阻碍作用。因此, 当电路处于这种状态下, 在闭锁初始

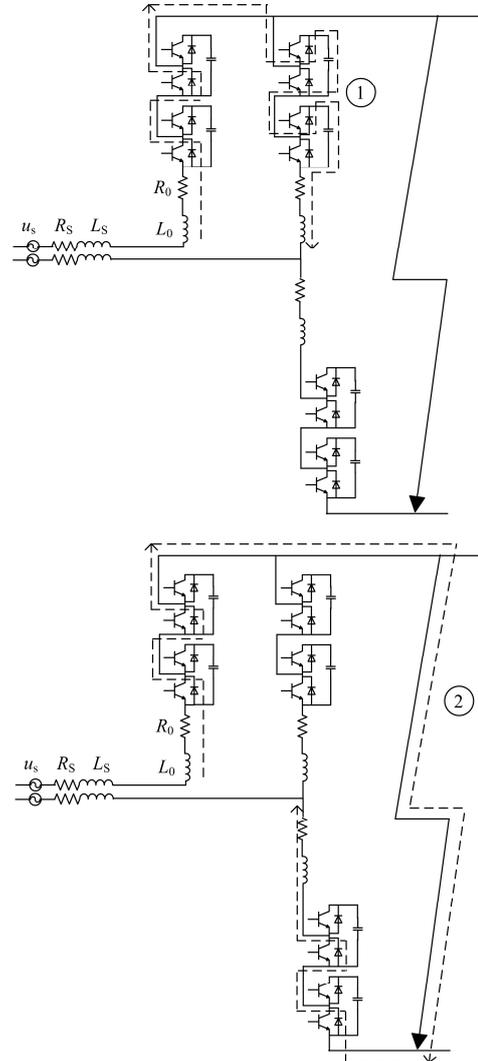


图 2 直流侧双极性短路故障电流通路

Fig. 2 Fault current circuit after bipolar short-circuit of DC side

时段内, 桥臂电流会有少量的正值, 当桥臂电流为正值时, 会对子模块电容充电。当对子模块电容充电进行到一定阶段时, 桥臂电流始终为负值, 此时电流始终流过通路 2。

当直流侧双极性短路被切除之后, 图 2 中电流通路 2 不存在, 电流只能流过通路 1, 此时电流对于电容的充电作用会更充分。其电容电压的最大值应满足如下关系式。

$$u_{cm} = \frac{u_1}{N} \quad (1)$$

式中: u_{cm} 为电容电压最大值; u_1 为交流侧线电压幅值; N 为每个桥臂子模块数。

1.2 对交流侧输送功率的影响

直流侧发生双极性短路故障后, 其稳定后的等效电路如图 3 所示。

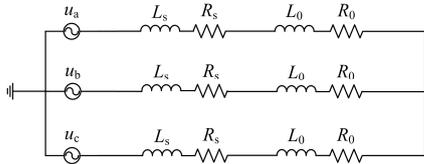


图 3 直流侧双极性故障后等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit after bipolar short-circuit of DC side

由图 3 可看出，故障后对于交流侧而言等效为三相短路。换流站的等效阻抗迅速减小，只剩下桥臂电感与桥臂等效电阻。对于无限大交流系统而言，其对于换流站的注入功率要增加，由于桥臂等效电阻极小，其注入功率主要表现为桥臂电感消耗的无功功率。

因此当发生直流侧双极性短路故障时，对于交流侧输送功率而言，其输入的无功功率会大幅增加。

1.3 闭锁时刻对故障电流的影响

由图 4 可看出，闭锁后，对于 HBSM 而言，其电容放电通路被阻断，只存在充电而不存在放电。由故障电流的暂态过程^[12]可知，其最大值主要由电容放电产生。因此，闭锁时刻会对短路电流的最大值起到明显作用。但是，闭锁换流站将造成系统停运，带来停电损失，如果是瞬时故障，过快的闭锁换流站将造成供电可靠性下降。

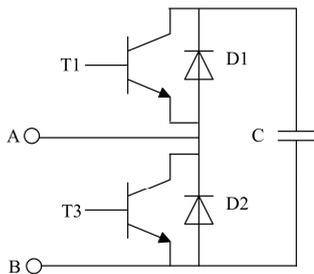


图 4 HBSM 结构

Fig. 4 Structure of HBSM

2 直流侧单极性短路故障

对于直流侧单极性短路故障，其故障特性与接地方式的选取有关。接地方式主要有两种：直流侧接地与交流侧接地。文献[15]详细分析了直流侧接地的情况。当选择直流侧接地时，由于子模块电容与故障点并不构成放电通路。因此其仅改变了故障极的参考电压，而对于系统的稳定运行无影响。文献[16-17]详细分析了交流侧接地情况下的故障特性。当选择交流侧接地时，由于故障点与交流侧接地点会通过子模块电容形成通路，子模块电容会放电，从而影响系统稳定性。相关分析，现有文献已有涉及，本文不再详细阐述。

3 直流侧断线故障

3.1 闭锁前

当直流侧发生断线故障时，直流侧不能形成回路，直流线路电流降为 0，两端系统之间无功功率流通。但是换流站内部三相电路之间存在电流通路，如图 5 所示。假设送端采用 $P\sim Q$ 控制，受端采用 $U_{dc}\sim Q$ 控制。

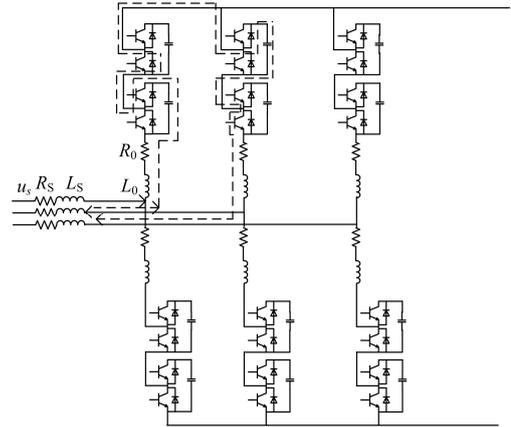


图 5 断线故障后子模块闭锁前电容充电回路

Fig. 5 Capacitor charging circuit before locking sub module after disconnection fault

以 AB 相上桥臂为例。假设 u_{ab} 为 AB 相线电压， n_1 为 A 相上桥臂投入的子模块个数， n_2 为 B 相上桥臂投入的子模块个数， v_c 为子模块电压，那么当满足 $u_{ab} > n_2 v_c - n_1 v_c$ 时，A 相上桥臂投入电容处于放电状态，B 相上桥臂投入电容处于充电状态。

送端换流站在故障发生后，输出功率下降，但由于采用 $P\sim Q$ 控制，交流侧功率会逐渐回升，此时大部分能量通过充电回路储存在电容中，电容电压持续升高。

受端换流站在故障发生后，由于直流线路输送功率的通路被切断，所以受端接收到的功率逐渐减少，由于其功率来自于本端电容放电，因此本端电容电压会逐渐降低。之后，由于受端采用的是 $U_{dc}\sim Q$ 控制，在控制器的作用下，电容电压会逐渐升高到额定值来支撑直流侧电压，受端从向交流系统输出有功功率逐渐变为从交流系统吸收有功功率。

3.2 闭锁后

闭锁后，HBSM 放电回路被阻断。假设电容充电回路仍然存在，如图 6 所示，则必须满足 $u_{ab} > N v_c$ 。但是，由于正常工作情况下，调制比小于 1，即 $u_a < N v_c$ ，且换流变采用的是 Y/Δ 接线，所以对于换流站

的交流侧来说, 线电压与相电压相等。因此充电回路存在的假设不成立, 即闭锁后, 电容的充电回路并不存在。此时, 交流侧输出的有功功率和无功功率迅速降为 0, 电容电压维持在闭锁之前的数值。

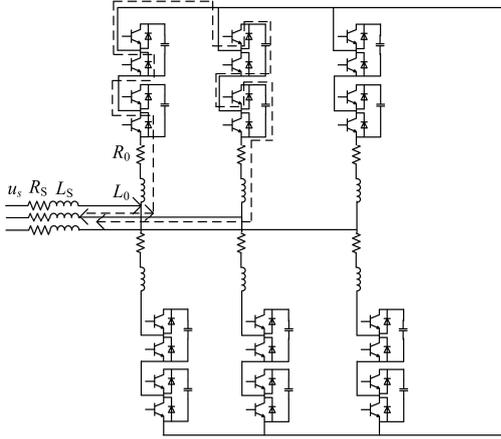


图 6 假设存在的断线故障后子模块闭锁后电容充电回路
Fig. 6 Assumed capacitor charging circuit after the locking of the sub module after the disconnection fault

3.3 闭锁时刻对短路过程的影响

由于断线故障下, 短路电流为零。因此, 换流站闭锁时刻不影响短路电流的大小。但是, 由于换流站不闭锁, 将造成 $P\sim Q$ 控制端电容电压持续上升, 而 $U_{dc}\sim Q$ 控制端会从交流系统吸收有功功率给电容充电, 当电容电压达到控制目标后, 有功功率降为 0, 无功功率在故障发生后无明显变化。因此闭锁时刻对于送端电容电压的大小、受端电容电压以及受端有功功率均有影响。

4 仿真验证

本文在 PSCAD/EMTDC 中建立单端 HBSM-MMC 模型, 其参数如表 1 所示。

表 1 HBSM-MMC 模型参数

Table 1 Parameter of HBSM-MMC model

U_s/kV	Z_s/Ω	U_{dc}/kV	L_0/mH	$C/\mu F$
10	$0.3732+j0.314$	17	0.04	3000

4.1 双极性短路故障

由图 7 可看出, 在闭锁状态下, 双极性短路故障切除后的电容电压明显高于故障切除前的电容电压。说明若此故障是瞬时性故障, 则故障后重启无需再经过电容充电的过程, 电容电压维持在较高值; 若此故障是永久性故障, 则故障排除后, 故障后重启依然要有电容预充电过程, 以保证换流器顺利运行。

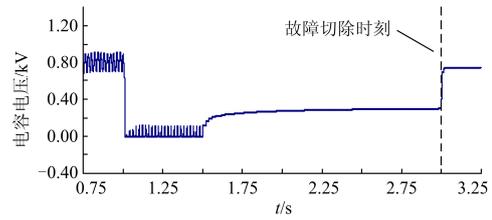


图 7 闭锁前后电容电压的变化

Fig. 7 Capacitor voltage before and after locking the sub module

由图 8 可看出, 当直流侧双极性故障发生后, 交流侧输入的有功功率会略有增加, 无功功率则增加幅度极大, 验证了 1.2 章节分析的正确性。因此, 为了使换流站故障后对交流系统所造成的冲击较小, 应在换流站交流侧配置好无功补偿装置, 在阀侧断路不能顺利断开的情况下, 立刻投入运行, 以减少故障对于交流系统的影响。

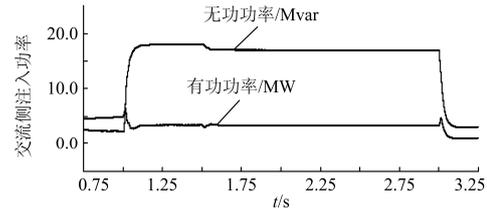


图 8 故障后交流侧注入功率

Fig. 8 AC side injected power after fault

由图 9 可看出, 闭锁时刻越短, 故障电流的峰值越小。故障电流峰值与闭锁时刻的关系如图 10 所示。因子模块闭锁后, 电容放电通路被阻断, 这也说明了, 故障电流的峰值主要由电容放电造成。

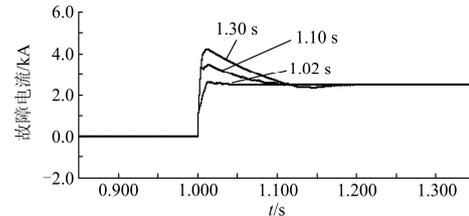


图 9 闭锁时刻对故障电流的影响

Fig. 9 Influence of locking time on fault current

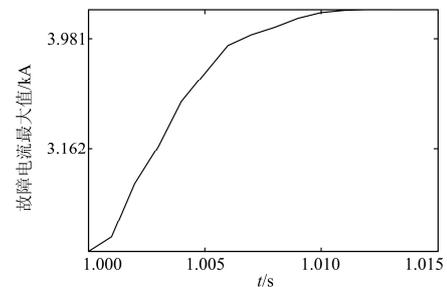


图 10 最大故障电流与闭锁时刻关系

Fig. 10 Relationship between the maximum fault current and the locked time

4.2 单极接地故障

换流器交流侧接地时的故障特性如图 11 所示。

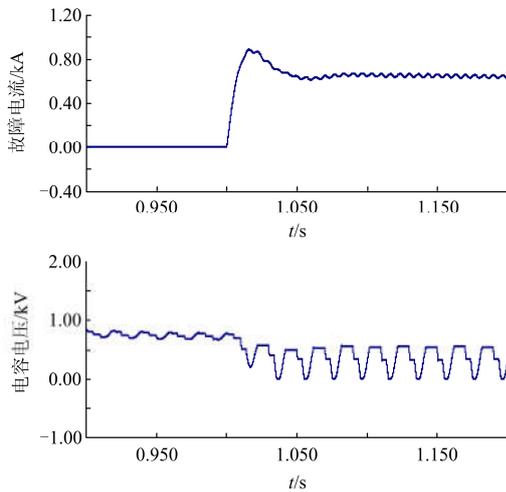


图 11 换流器交流侧接地故障特性

Fig. 11 Characteristic of AC side grounding fault

由图 11 可看出，由于交流侧接地点的存在，其与接地故障点形成回路，从而造成桥臂电容的放电，导致短路点有较大的短路电流。由电容电压的变化曲线可以看出，虽然故障导致电容放电，但在控制系统的作用下，电容在充放电之间不断切换。

当接地电阻足够大时，本文所搭建模型以 500 Ω 为例，其仿真结果如图 12 所示。

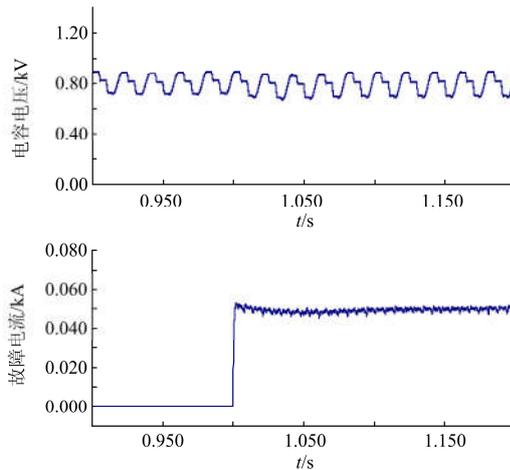


图 12 接地电阻为 500 Ω 时的故障特性

Fig. 12 Fault characteristic of 500 Ω grounding resistance

由图 12 可看出，当接地电阻大到一定程度时，虽然电流通路仍然存在，但由于接地电阻过大，导致电容放电缓慢，其能够在控制系统的作用下仍然维持稳定，与系统通过直流侧接地的情况类似。但是一味的增加接地电阻，会减弱接地效果。所以在实际工程中，选择合适的接地电阻尤为重要。

4.3 断线故障

采用两端 21 电平 HBSM-MMC 模型，送端采用 $P\sim Q$ 控制，受端采用 $U_{dc}\sim Q$ 控制。设置 1.0 s 时发生直流侧负极断线故障，为了便于观察故障后电路状态的变化，设置不同时刻 HBSM 闭锁。

由图 13 可看出，闭锁时刻越短，送端电容电压越小。因闭锁使得电容充电通路被阻断，与前述分析结果一致。且送端电容电压与闭锁时刻近似呈线性关系，如图 14 所示。

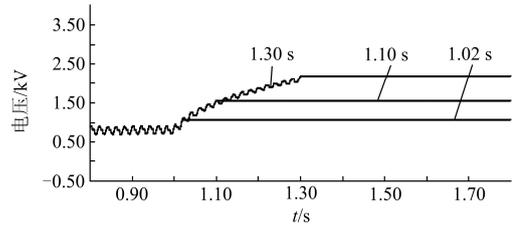


图 13 不同闭锁时刻送端电容电压

Fig. 13 Capacitor voltage of receiving end at different locking time

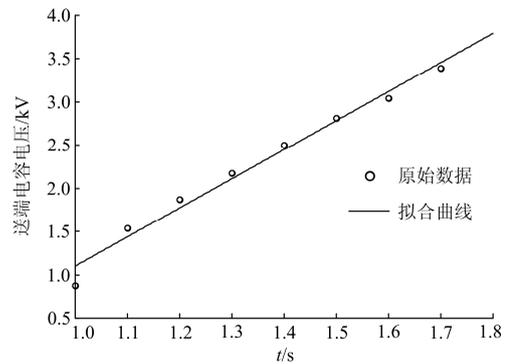


图 14 送端电容电压与闭锁时刻关系

Fig. 14 Relationship between capacitor voltage of receiving end and the locking time

由图 15(a)可看出，当闭锁时刻为 1.30 s 或 1.10 s 时，此时电容电压已恢复到稳定值，闭锁电流通路不存在，所以电容电压稳定在闭锁时刻值。由图 15(b)可看出，当闭锁时刻为 1.02 s 时，此时电容电压处于最低值，该电容电压并不足以阻断图 6 所示电流回路，所以闭锁后电容电压会有少量充电。综上可得，当闭锁时电容电压小于 u_{ab}/N 时，闭锁后电容充电回路存在，电容电压会上升至 u_{ab}/N ；当闭锁时电容电压大于 u_{ab}/N 时，闭锁后电容充电回路不存在，电容电压会维持在闭锁时刻的值。

由图 16(a)可得，对于电容电压已恢复到稳定值的闭锁时刻，其受端有功功率变化不变。而对于电容电压未恢复稳定值的闭锁时刻，由于闭锁使得其无法恢复到稳定值，即有功功率直接由负值增大到 0，而没有对电容大量充电的正值部分。但由 1.02 s

闭锁时刻的局部放大图 16(b)可知,受端有功功率会有极小的正值,这与上文分析中该闭锁时刻电容会有少量充电相符合。

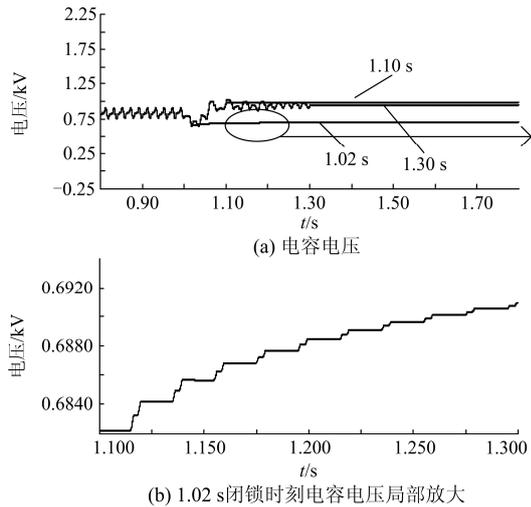


图 15 不同闭锁时刻对受端电容电压的影响

Fig. 15 Influence of different locking time on capacitor voltage of sending end

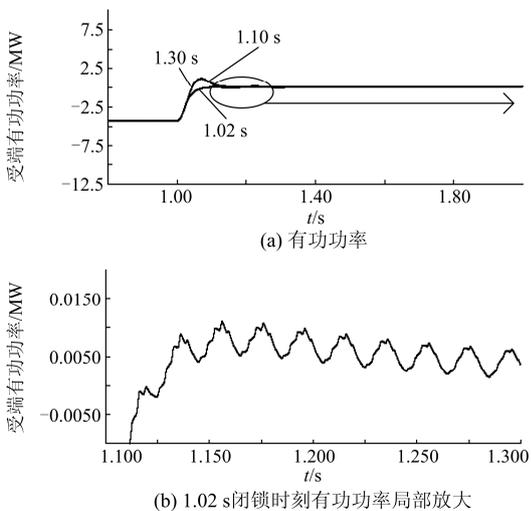


图 16 不同闭锁时刻对受端有功功率的影响

Fig. 16 Influence of different locking time on active power of receiving end

5 结论

当 HBSM 采用直流侧接地, 直流侧发生故障后, 通过上文的分析, 可以得到如下结论:

1) 当直流侧发生双极性短路故障时, 故障通路对于电容充电起阻碍性作用, 当故障通路存在的情况下, 电容电压低于闭锁充电的最大值。故障后对于交流系统的无功功率消耗巨大, 在不能够顺利断

开交流断路器的情况下, 在交流侧配置合适的无功补偿装置能够减轻换流器直流侧故障对于交流侧的影响。

2) 当直流侧发生单极性接地短路故障时, 系统稳定性与换流站接地点的选取有关, 当换流站选取交流侧接地方式。选择合适的大小电阻能够在保证接地效果的基础上, 避免换流站单极接地故障对系统稳定性的影响。

3) 当直流侧发生断线故障时, HBSM 闭锁前, $P\sim Q$ 控制端的电容电压会持续上升, $U_{dc}\sim Q$ 控制端的电压会有稍微的波动最终达到稳定, 波动期间换流站从交流系统吸收有功功率为电容充电, 达到稳定后不再与交流系统交换有功功率; HBSM 闭锁后, 两侧电压都维持恒定, 两端之间的功率传输降为 0。快速的 HBSM 闭锁会减少 $P\sim Q$ 控制侧的最大电容电压, 并减少 $U_{dc}\sim Q$ 控制侧从交流系统吸收的有功功率。因此, 断线故障情况下应尽快闭锁换流站。

参考文献

- [1] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [2] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.
LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.
- [3] 李欢, 田新成, 张建坡. 模块化多电平换流器改进型子模块拓扑仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 95-101.
LI Huan, TIAN Xincheng, ZHANG Jianpo. Simulating research of improved topologies of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 95-101.
- [4] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [5] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. Novel voltage-sourced converters for HVDC and FACTS applications[C] //

- Proceedings of CIGRE, September 25-28, 2007, Osaka, Japan: 8p.
- [6] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [7] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.
- [8] RAMTHARAN G, ARULAMPALAM A, EKANAYAKE J B, et al. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission[J]. Renewable Power Generation IET, 2009, 3(4): 426-438.
- [9] 王熙骏, 包海龙, 叶军. 柔性直流输电技术及其示范工程[J]. 供用电, 2011, 28(2): 23-26.
WANG Xijun, BAO Hailong, YE Jun. High-voltage DC flexible technology and its demonstration engineering[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(2): 23-26.
- [10] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [11] 赵堃宇. 多端柔性直流输电系统控制策略及故障保护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHAO Kunyu. Research on control strategy and fault protection of voltage source converter based multi-terminal high voltage direct current system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [12] 王姗姗, 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.
- [13] 陈晓芳. MMC-HVDC 直流线路故障的控制保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
CHEN Xiaofang. Control and protection strategy for the MMC-HVDC under DC faults[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [14] HU Jingjing, GAO Yibo, YAN Yuting, et al. DC side short-circuit fault analysis of VSC[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4): 512-516.
- [15] KONTOS E, PINTO R T, BAUER P. Providing DC fault ride-through capability to H-bridge MMC-based HVDC networks[C] // ICPE 2015-ECCE Asia, 2015.
- [16] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 40-46.
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 40-46.
- [17] 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 fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [18] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.
ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [19] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1825-1832.
XING Dengjiang, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1825-1832.

收稿日期: 2016-06-13

作者简介:

刘思源(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电和柔性直流输电; E-mail: 18600012626@126.com

徐东旭(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: 427763967@qq.com

梅念(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压及特高压工程换流站设计工作。E-mail: meinian@chinasperi.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)