

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.005

柔性直流输电系统电容器稳态及暂态运行特性研究

蔡玲珑^{1,2}, 王婷婷³, 易承乾³, 马志钦^{1,2}, 刘刚³, 廖梓豪^{1,2}, 姚成³, 李谦^{1,2}, 胡泰山³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要:柔直电容器的可靠性直接影响换流阀运行可靠性,需要对其稳态与暂态运行特性开展研究,为柔直电容器的全工况等效试验提供依据。本文以乌东德工程系统实际参数为输入,搭建包含真实子模块的柔直系统电磁暂态仿真模型,分析了柔直电容器稳态及暂态运行特性。仿真结果表明,稳态工况下柔直电容器上承受由直流偏置的阶梯状交流电压,与是否有负投状态无关;稳态工况下柔直电容器上电流为工频交流电流与冲击电流的叠加,当无负投状态时,电容上仅存在正向冲击电流,当有负投状态时,电容上同时存在正向及负向冲击电流;暂态工况下高阀组换流变阀侧单相接地故障下柔直电容器的电流峰值最大,低阀组换流变阀侧单相接地故障下电容器的瞬时电压峰值最大。

关键词:柔性直流输电; 电容器; 稳态工况; 暂态工况; 电压电流特性

Study on Steady and Transient Operating Characteristics of Capacitors in VSC-HVDC Transmission System

CAI Linglong^{1,2}, WANG Tingting³, YI Chengqian³, MA Zhiqin^{1,2}, LIU Gang³, LIAO Zihao^{1,2}, YAO Cheng³, LI Qian^{1,2}, HU Taishan³

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Guangdong; Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability Enterprises, Guangzhou 510080, China; 3. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The reliability of VSC-HVDC DC capacitors directly affects operation reliability of the converter valve. It is necessary to study their steady and transient operating characteristics so to provide a basis for the full-condition equivalent test of the VSC-HVDC DC capacitors. In this paper the actual parameters of the Wudongde project system is taken as an input, an electromagnetic transient simulation model of VSC-HVDC DC system containing real sub-modules is set up, and the steady and transient operating characteristics of the VSC-HVDC DC capacitors is analyzed. The simulation results show that under steady conditions, the VSC-HVDC DC capacitors are subjected to a step-shaped AC voltage biased by DC, regardless of whether there is a negative switching condition. Under steady conditions, the current on the VSC-HVDC DC capacitors is a superposition of the power frequency AC current and the impulse current. In case of no negative switching, only a positive impulse current is existed on the capacitors. While, in case negative switching, both positive and negative impulse currents are existed on the capacitors. Under transient condition, the peak of current of the VSC-HVDC DC capacitors is the highest under a single-phase grounding fault on the valve side of high valve group converter transformer, and the peak of transient voltage of the capacitors is the highest under a single-phase grounding fault on the valve side of low valve group converter transformer.

Keywords: VSC-HVDC transmission; capacitor; steady-state; transient; voltage and current characteristics

收稿日期:2025-07-30

基金项目: 南方电网公司科技项目(GDKJXM20222649(030000KC22120033))。

0 引言

作为新一代直流输电技术,在大规模可再生能源消纳、高负荷密度城市区域供电以及远离大陆的海岛电力联网等复杂场景下^[1],柔性直流输电技术具备显著的技术优势,随着需求负荷飞速增长,柔性直流输电在向高电压、大容量的趋势发展^[2-3]。现有柔直工程均采用基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的直流输电系统^[4-5]。

模块化多电平换流器(MMC)采用三相桥式拓扑结构^[6],其中每个桥臂包含一个桥臂电抗器以及多个串联连接的子模块^[4]。各子模块由 IGBT 开关器件和柔直电容器构成,其中柔直电容器作为储能单元,其功能在于为子模块提供直流电压支撑,并抑制系统故障工况下引发的子模块电压波动^[7]。

作为柔直输电工程核心器件的柔直电容器的可靠性直接影响换流阀运行可靠性^[8]。现有柔直电容器检测方法来源于低压电力电子电容器标准,在试验参数选取和电压波形等方面不适用于柔直电容器高电压峰值、高谐波电流的工况^[9]。因此有必要对上、下两个电容器稳态与暂态运行特性开展研究,为柔直电容器的全工况等效试验提供依据。

本文以乌东德工程系统实际参数为输入,搭建包含真实子模块的乌东德柔直系统电磁暂态仿真模型。以乌东德工程广东站换流阀为研究对象,对换流阀及其功率模块的运行特性进行研究,分析柔性直流输电用电容器稳态及暂态运行特性,为柔直电容器试验评估方法研究提供支撑。

1 柔直电容器稳态运行特性

模块化多电平换流器型直流输电拓扑的各桥臂由多个独立的子模块串联构成,子模块中由柔直电容器与开关器件串并联构成^[10]。子模块分为半桥子模块及全桥子模块两种^[11]。

半桥子模块共有 3 种工作状态^[12-21],如图 1 所示。

1) 闭锁状态下,两组 IGBT(T_1 、 T_2)均关断,子模块电容只能充电,不能放电,其状态由反并联二极管(D_1 、 D_2)的正向导通特性主导。

2) 投入状态下,一组 IGBT T_1 导通,另一组 T_1 关断,子模块电容通过 T_1 及其反并联二极管 D_1 与桥臂联通,子模块输出电压恒定为电容电压。

3) 切除状态下,与投入状态相反, T_1 关断而 T_2 导通,桥臂电流仅会通过 T_2 或其反并联二极管 D_2 ,

子模块电容被旁路,子模块输出电压恒定为零。

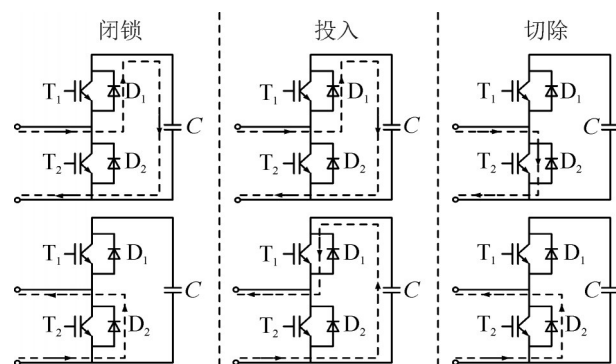


图1 半桥子模块的3种工作状态
Fig. 1 Three operating states of the half-bridge sub-module

全桥子模块共有 4 种工作状态^[13],如图 2 所示。

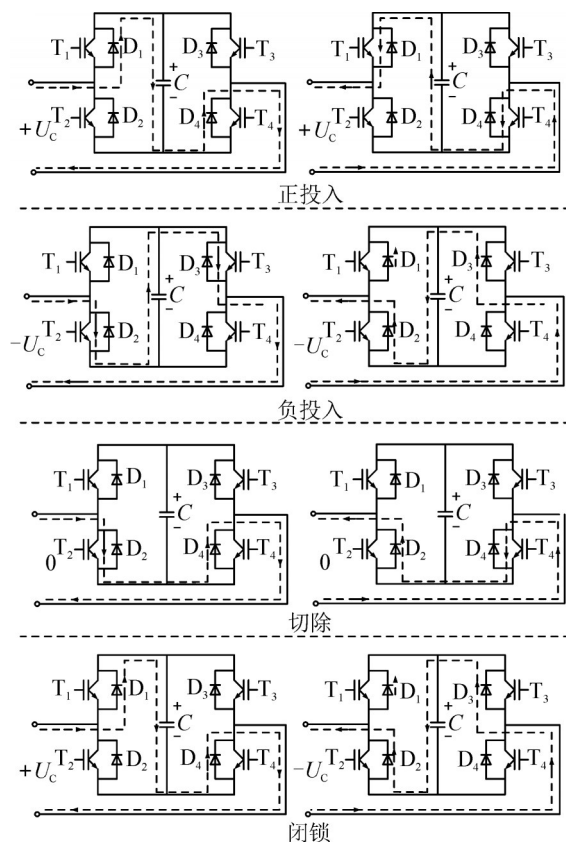


图2 全桥子模块的4种工作状态
Fig. 2 Four operating states of the full-bridge sub-module

1) 正投入状态下,两组对侧 IGBT T_1 和 T_4 导通,另外两组 T_2 和 T_3 关断,子模块电容与桥臂联通,子模块输出电压恒定为电容电压。

2) 负投入状态下,与正投入时相反,此时 T_1 和 T_4 关断,而 T_2 和 T_3 导通,子模块电容同样与桥臂联通,但接入极性与正投入状态相反,子模块的输出电压恒定为负的电容电压。

3) 切除状态下,同侧两组 IGBT T_2 和 T_4 同时导

通,或 T_1 和 T_3 同时导通,此时子模块电容被旁路子模块输出电压恒定为零。

4)闭锁:4组 IGBT 同时关断,子模块电容仅通过反并联二极管与桥臂联通,电容只能充电,不能放电。

全桥与半桥电容电流的计算如表 1-2 所示。

表1 半桥子模块电容电流			
Table 1 Capacitive current of the half-bridge submodule			
PWM	状态	桥臂电流	电容电流
0	切除	I_{arm}	$I_c = 0$
1	投入	I_{arm}	$I_c = I_{arm}$
3	闭锁	I_{arm}	$I_{arm} > 0: I_c = I_{arm}$ $I_{arm} \leq 0: I_c = 0$

表2 全桥子模块电容电流			
Table 2 Capacitive current of the full-bridge submodule			
PWM	状态	桥臂电流	电容电流
0	切除	I_{arm}	$I_c = 0$
1	正投入	I_{arm}	$I_c = I_{arm}$
2	负投入	I_{arm}	$I_c = -I_{arm}$
3	闭锁	I_{arm}	$I_{arm} > 0: I_c = I_{arm}$ $I_{arm} < 0: I_c = -I_{arm}$

2 柔直系统故障暂态运行特性

基于乌东德工程实际系统,以广东站为研究对象,重点分析阀侧接地故障情况下换流阀运行特性。乌东德工程采用 LCC-FHMMC 混合三端结构,其拓扑如图 3 所示^[22-26]。

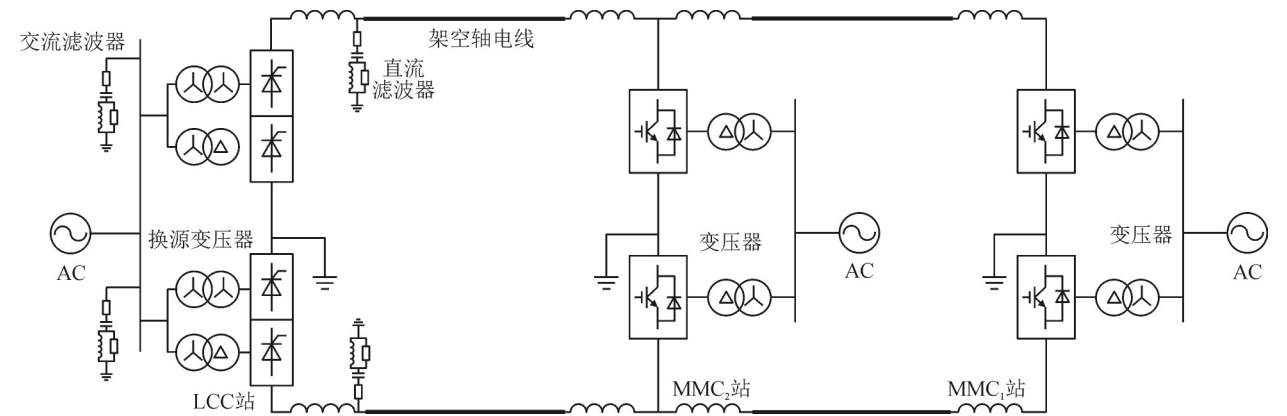


图3 LCC-FHMMC 混合三端直流输电系统的拓扑结构
Fig. 3 Topological structure of LCC-FHMMC hybrid three-terminal DC transmission system

相较于网侧故障,阀侧交流母线与换流器直接连接,故障时会在阀组上产生更严重的暂态应力,且阀侧接地故障通常为永久性故障^[14,22]。因此,当换流变阀侧发生接地故障时,保护系统需实现毫秒级故障辨识并立即闭锁换流阀组,以强制隔离故障源。

在 LCC-FHMMC 混合直流输电系统中^[15],当 MMC 发生阀侧接地故障时,桥臂上投入的子模块电容对地放电,导致直流端口输出电压迅速跌落,LCC 换流站与 MMC 换流站之间的直流电压降增大,进而提高了直流电流幅值,促使更多的有功功率向故障换流站倒灌^[23]。基于 LCC 的运行机理,其在检测到故障信号或本地保护动作触发后,需在百毫秒级时间内执行移相控制^[25]:一方面阻断对故障站的有效功率馈送,另一方面辅助耗散直流线路存储的电磁能量。

在故障发生 200 ms 之后,广东站、广西站以及云南站非故障阀组解锁,恢复正常运行模式。

高阀组故障时,同样,在故障发生 200 ms 之后,

广东站、广西站以及云南站非故障阀组解锁,恢复正常运行模式。

对于故障站,检测到故障后,采用该故障站的单阀组紧急退出方案,如下所示:

1)故障阀组将紧急退出信号站间通讯至其余站,定义故障阀组及其余站对应位置阀组为待退出阀组。

2)收到本站或其余站阀组紧急退出信号时,MMC 站待退出阀组以及同极的另一阀组紧急闭锁脉冲,LCC 待退出阀组以及另一阀组则快速移相至 120° ,同时,待退出阀组下发交流断路器跳开命令。

3)此后 MMC 待退出阀组闭合 BPS,并进行 BPS 至 BPI 的电流转移,LCC 待退出阀组同样闭合 BPS,断开交流断路器。

4)一段时间后,另一定有有功功率控制的 MMC 阀组重新恢复功率指令至故障前水平,同时另一 LCC 阀组取消强制移相,解锁后恢复故障前的电流控制,电流指令根据非故障站的功率容量来定。

稳态工况下,高、低端换流阀组交流电压均存在直流偏置分量^[16]。当阀侧接地故障触发阀组闭锁后,桥臂电流形成的隔离效应将消除该直流偏置^[17]。由于换流变压器阀侧绕组采用不接地设计,此时故障相阀侧电压跌落至零电位,非故障相阀侧电压抬升至线电压幅值;而健全阀组侧三相电压维持对称特性,其电压波形仅含基频交流分量,幅值恒定为相电压额定峰值^[18]。

当发生故障的换流站闭锁后,由于信号传输或保护系统响应延时,远端未发生故障的换流站不会立即保护动作^[19, 24],此时非故障站持续向故障点馈入有功,加之直流线路在故障前储存的有功,相当于直流电源对子模块电容充电。以高端阀组 A 相故障为例,当阀组闭锁后,最恶劣情况下,最终单桥臂子模块电容电压之和等于直流电压和阀侧交流线电压之和,引起较严重的子模块过电压。

3 仿真结果与分析

以乌东德工程系统实际参数为输入,搭建包含真实子模块的乌东德柔直系统电磁暂态仿真模型,如图 4 所示,其中广东站的模型如图 5 所示,以广东站为研究对象仿真研究了子模块柔直电容器稳态及暂态工况下电压及电流波形。广东站参数如表 3 所示。

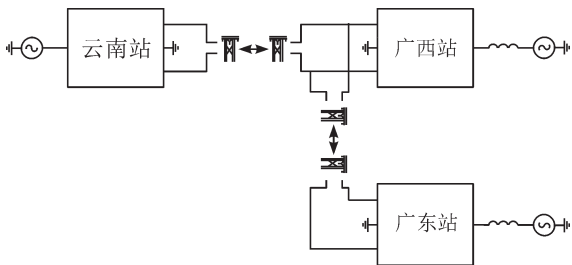


图 4 三端系统模型
Fig. 4 Three-terminal system model

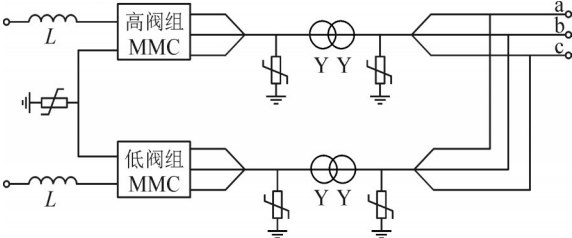


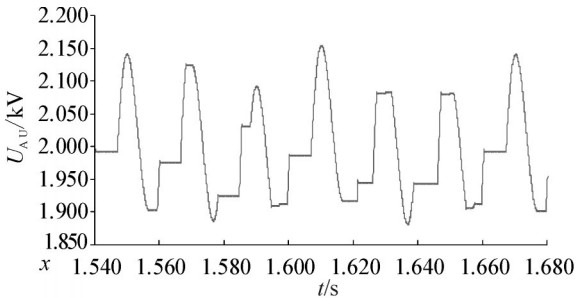
图 5 广东站模型
Fig. 5 Model of Guangdong station

3.1 柔直电容器稳态运行工况

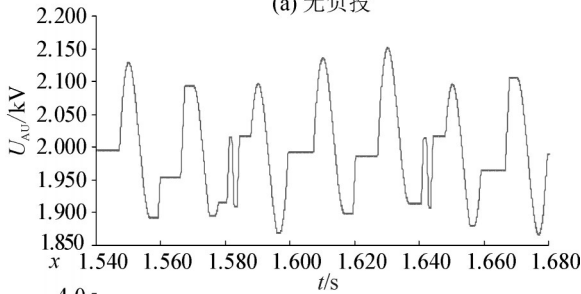
针对正常工作状态的广东站子模块电容器运行工况,仿真得到的柔直电容器电压电流波形如图 6 所示。考虑到半桥及全桥两种形式子模块,仿真考虑无负投及有负投两种情况。

表 3 广东站回路参数
Table 3 Circuit parameters of Guangdong station

参数	数值
接线方式	高低阀组串联,按照 400 kV+400 kV 分配电压
连接形式	YNy
变压器接线形式	单相双绕组
额定容量/MVA	480
柔直变压器	变比 $\frac{525/\sqrt{3}}{244/\sqrt{3}}$
漏抗/%	18
分接开关级数	-4~+4
分接开关的间隔/%	1.25
桥臂电抗器电感值/mH	40
启动电阻阻值/ Ω	5 000
中性母线位置直流电抗器电感值/mH	75
直流极线位置直流电抗器电感值/mH	75



(a) 无负投



(b) 有负投

图 6 柔直电容稳态电压电流波形
Fig. 6 Steady voltage and current waveforms of VSC-HVDC DC capacitors

由图6可以看出稳态工况下柔直电容器上承受由直流偏置的阶梯状交流电压,电压峰值约为2.15 kV,与是否有负投状态无关。电流为工频交流电流与冲击电流的叠加,当无负投状态时,电容上仅存在正向冲击电流,最大电流峰值为2.81 kA;当有负投状态时,电容上同时存在正向及负向冲击电流,正向最大电流峰值为3.05 kA,负向最大电流峰值为3.04 kA。

3.2 柔直电容器暂态运行工况

本文重点关注故障应力较严重的换流变阀侧接地故障,按照发生故障的位置,可以分为高阀组接地故障及低阀组接地故障,如图7-8所示。

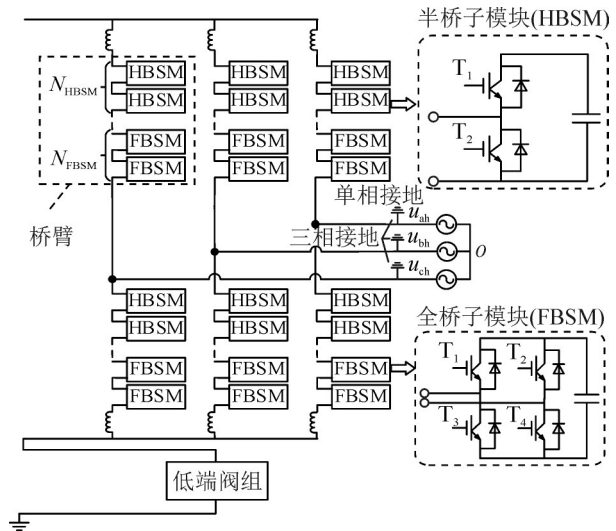


图7 高阀组阀侧接地故障示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the grounding fault on the valve side of the high valve group

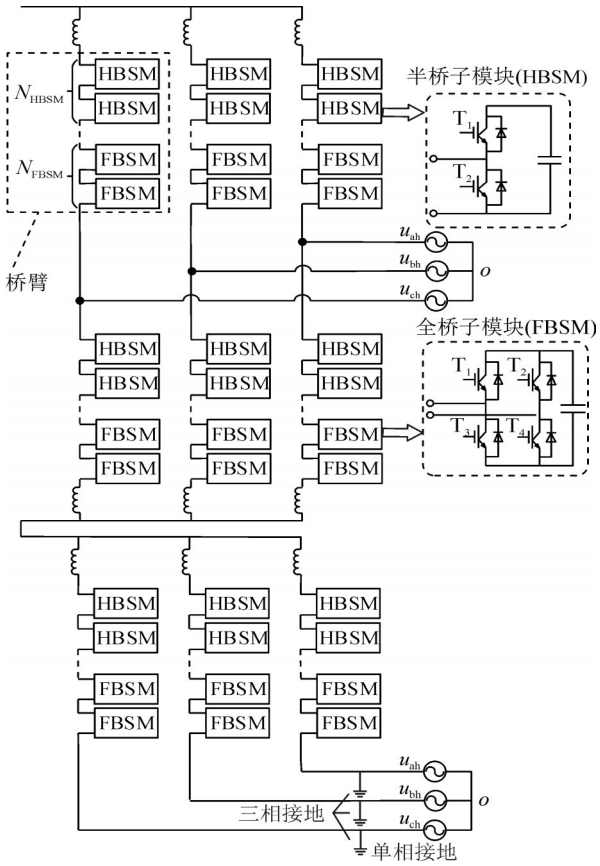


图8 低阀组阀侧接地故障示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the grounding fault on the valve side of the low valve group

针对4种不同的换流阀阀侧接地故障,仿真得到的柔直电容器电压电流波形如图9-12所示。

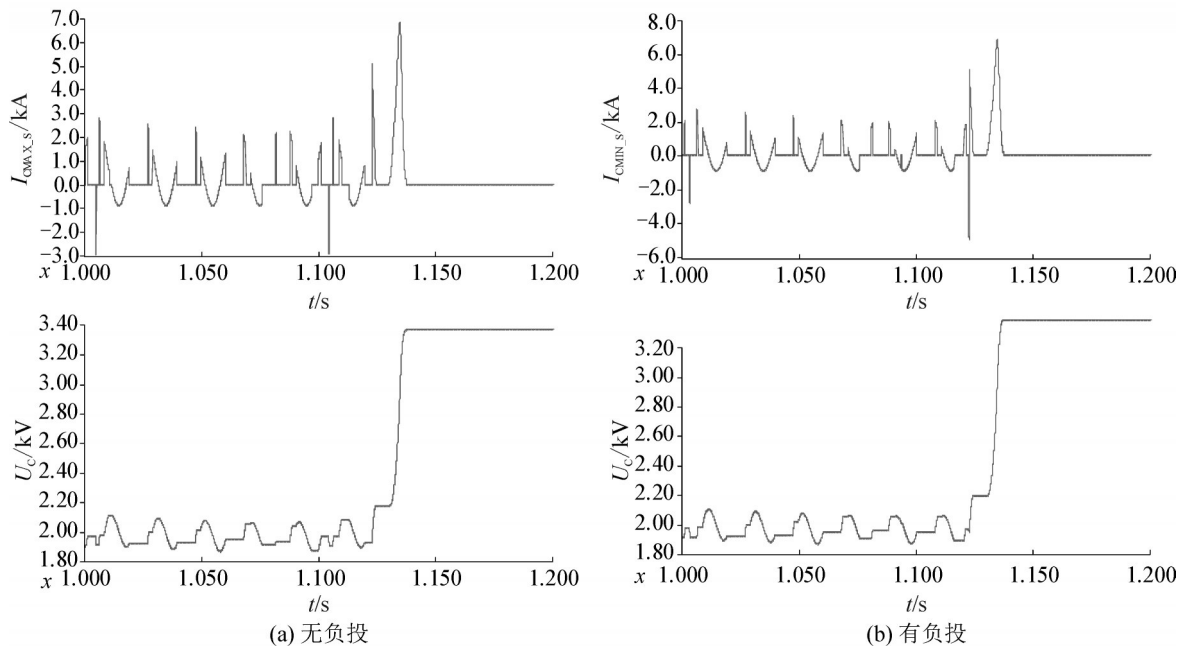


图9 工况1柔直电容电压电流波形
Fig. 9 Voltage and current waveforms of VSC HVDC capacitors under operating condition 1

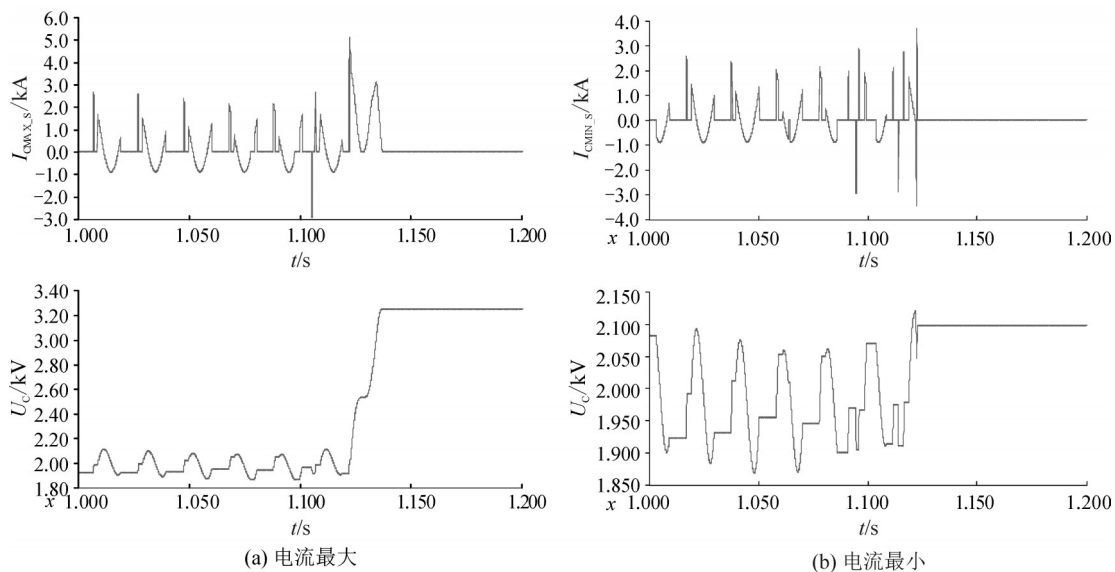


图 10 工况 2 柔直电容电压电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveforms of VSC HVDC capacitors under operating condition 2

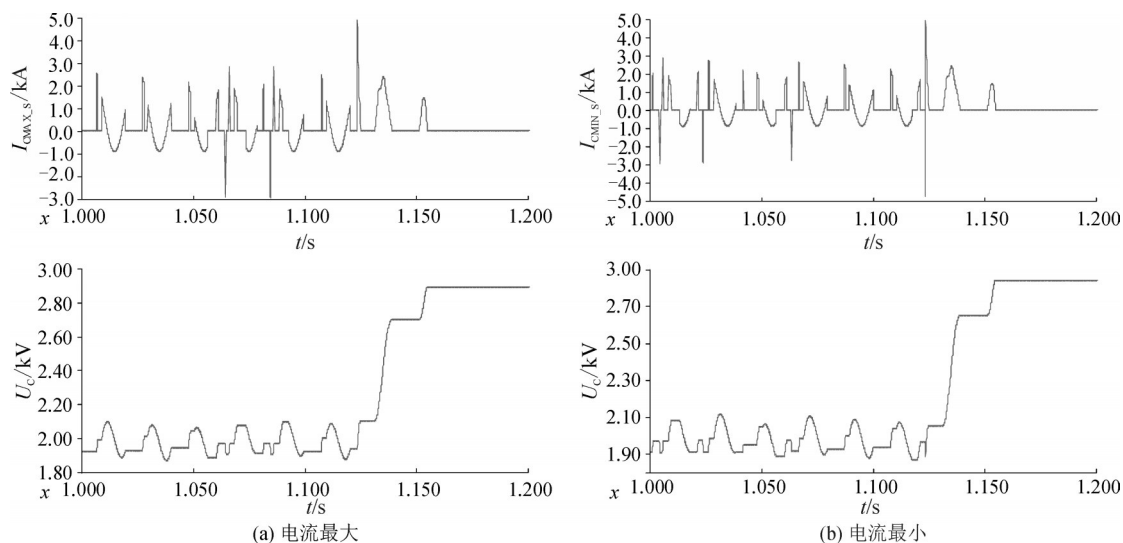


图 11 工况 3 柔直电容电压电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms of VSC HVDC capacitors under operating condition 3

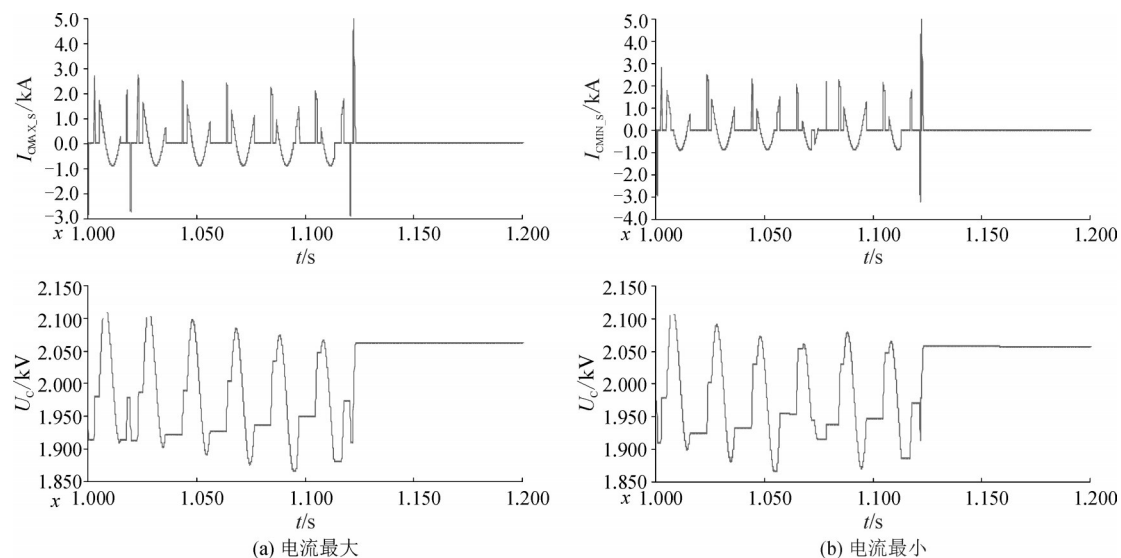


图 12 工况 4 柔直电容电压电流波形

Fig. 12 Voltage and current waveforms of VSC HVDC capacitors under operating condition 4

换流变阀侧接地故障的电容器电流峰值及瞬时电压峰值的仿真数据如表4所示。

表4 换流变阀侧接地故障仿真数据
Table 4 Simulation data of ground fault on the converter valve side

工况 编号	电容电流 最大值/kA	电容电流 最小值/kA	电容瞬时电压 峰值/kV
1	6.830	-4.93	3.420
2	5.096	-3.45	3.250
3	4.900	-4.83	3.615
4	4.970	-3.22	2.610

由表4可以看出,高阀组换流变阀侧单相接地故障下柔直电容器的电流峰值最大,正向最大峰值电流达到6 kA以上,反相最大电流峰值达到近5 kA。低阀组换流变阀侧单相接地故障下电容器的瞬时电压峰值最大,达到3.6 kV以上。

4 结语

本文以乌东德工程系统实际参数为输入,搭建包含真实子模块的乌东德柔直系统电磁暂态仿真模型,分析柔性直流输电用电容器稳态及暂态运行特性,结论如下:

1)稳态工况下柔直电容器上承受由直流偏置的阶梯状交流电压,与是否有负投状态无关。

2)稳态工况下柔直电容器上电流为工频交流电流与冲击电流的叠加,当无负投状态时,电容器上仅存在正向冲击电流,当有负投状态时,电容器上同时存在正向及负向冲击电流。

3)暂态工况下高阀组换流变阀侧单相接地故障下柔直电容器的电流峰值最大,低阀组换流变阀侧单相接地故障下电容器的瞬时电压峰值最大。

参考文献

[1] 赵振兴. 全域绿电赋能新型电力系统的源网荷储一体化管理[J]. 电气技术与经济,2024(6):225-227.

[2] 张绮轩,李海峰,梁远升,等. 基于行波解析分析的柔性直流输电线路故障智能检测方法[J]. 广东电力,2024,37(5):84-96.

ZHANG Qixuan, LI Haifeng, LIANG Yuansheng, et al. Intelligent fault detection method for flexible DC transmission lines based on prior experience and of travelling wave expression[J]. Guangdong Electric Power,2024,37(5):84-96.

[3] 苏寅生,赵利刚,姚海成,等. 100% 新能源电源经柔性直流送出系统的机电暂态建模仿真研究[J]. 广东电力,2023,36(10):57-65.

SU Yinsheng, ZHAO Ligang, YAO Haicheng, et al. Research on electromechanical transient modeling and simulation of 100% new energy power source connected by MMC-HVDC

[J]. Guangdong Electric Power,2023,36(10):57-65.

[4] KIM S, HUR K, NA J, et al. Generic analysis framework for modular multilevel converter HVDC with multi-infeed line-commutated converter HVDC system[J]. Energies, 2021, 15(1):184.

[5] 刘易,陈芳芳,秦滨慧,等. MMC-HVDC 直流输电线路的保护研究[J]. 电子设计工程,2022,30(16):169-175.

LIU Yi, CHEN Fangfang, QIN Binhui, et al. Protection study of MMC-HVDC DC transmission lines[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(16):169-175.

[6] 方田,李化,李征,等. 柔性直流输电中子模块电容参数设计及其寿命终结判据[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020,41(4):57-62.

FANG Tian, LI Hua, LI Zheng, et al. Parameter design and end of life criterion on sub-module capacitor in flexible HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):57-62

[7] MA Yajun, XIAO Anjie, LIN Hua, et al. A novel battery integration method of modular multilevel converter with battery energy storage system for capacitor voltage ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12):12250-12261.

[8] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A novel restart control strategy for the MMC-based HVDC transmission system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99(3):465-473.

[9] GANESHPURE D A, SOEIRO T B, NIASAR M G, et al. Design trade-offs of modular multilevel converter-based arbitrary wave shape generator for conventional and unconventional high voltage testing[J]. IEEE Open Journal of The Industrial Electronics Society, 2021, 2(3):584-605.

[10] HU Pengfei, LIANG Yiqiao, WANG Xi. Topology and control of a new line commutated converter-modular multilevel converter hybrid bipolar high-voltage direct current transmission system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(11):39-46. .

[11] GUO Meng, HAO Quanrui, DING Lei. Improved AAVM and small-signal model of hybrid MMC considering dynamic differences between full-bridge and half-bridge submodules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7):8215-8228.

[12] FANG Jingyang, YANG Shunfeng, WANG Haiyu, et al. Reduction of MMC capacitances through parallelization of symmetrical half-bridge submodules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8):8907-8918.

[13] GAN Chun, SUN Qingguo, WU Jianhua, et al. MMC-based SRM drives with decentralized battery energy storage system for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3):2608-2621.

- [14] ZHANG Yanxia, WEI Le. Study on valve-side winding fault characteristics of converter transformer in LCC-HVDC system[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 232: 110426.
- [15] SUN Pingyang, WICKRAMASINGHE H R, KONSTANTINO G. Hybrid LCC-AAC HVDC transmission system[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192: 106910.
- [16] COLLINS M, MARTINS C A. Evaluation of a novel capacitor charging structure for flicker mitigation in high-power long-pulse modulators[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 985-993.
- [17] LI Huailong, DENG Fujin, TIAN Jie, et al. Grounded thyristor loop-based hybrid MMCs for valve-side single-phase-to-ground faults in bipolar HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 6298-6311.
- [18] SOLÍS-CHAVES J S, BARRETO M S, SALLES M B C, et al. A direct power control for DFIG under a three phase symmetrical voltage sag condition[J]. Control Engineering Practice, 2017, 65(2): 48-58.
- [19] LI Botong, LI Andi, WEN Weijie, et al. A protection scheme for MMC-HVDC grid based on blocking time of converter station[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152: 109241.
- [20] BAE C H, KIM H S, NHO E C. Modular multilevel converter-based voltage source converter high-voltage direct current valve operating test circuit[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(14): 2445-2448.
- [21] 陆翌, 吴俊健, 裘鹏, 等. 基于桥臂等效电容的全桥子模块型MMC快速仿真方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 47-54.
- LU Yi, WU Junjian, QIU Peng, et al. A rapid simulation method for full-bridge sub-module MMC based on bridge arm equivalent capacitance[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 47-54.
- [22] 陆书豪, 贾秀芳. LCC-FHMMC混合直流输电系统阀侧故障特性及保护策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 211-216.
- LU Shuhao, JIA Xiufang. Grounding fault characteristics of converter valve-side and protection strategy in LCC-FHMMC hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 211-216.
- [23] 桂重, 韩永霞, 刘刚. 计及多脉冲回击电流及电晕电流效应的输电线路耦合雷电过电压特性[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 145-151.
- GUI Chong, HAN Yongxia, LIU Gang. Coupled lightning overvoltage characteristics of transmission lines considering multi-pulse return stroke current and corona current effect[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 145-151.
- [24] 张伟, 方永丽, 孙硕, 等. 基于多重综合判据的单端MMC直流配电网单极接地保护方法[J]. 广东电力, 2022, 35(5): 53-59.
- ZHANG Wei, FANG Yongli, SUN Shuo, et al. Single pole grounding protection method for single-ended MMC DC distribution network based on multiple comprehensive criteria[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 53-59.
- [25] 余江盛, 黄匀飞, 袁灿培, 等. 基于自适应功率调节的多端柔性直流配电网主从控制策略[J]. 广东电力, 2022, 35(3): 37-46.
- YU Jiangsheng, HUANG Yunfei, YUAN Canpei, et al. Master-slave control strategy of multi-terminal flexible DC distribution network based on adaptive power regulation[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(3): 37-46.
- [26] 张楠, 徐政, 张哲任. LCC-FHMMC混合直流输电系统受端交流系统故障穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 39-45.
- ZHANG Nan, XU Zheng, ZHANG Zheren. Receiving-end AC system fault ride-through control strategy of LCC-FHMMC hybrid HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 39-45.

作者简介:

蔡玲珑(1990—),男,高级工程师,主要从事高电压技术研究与变电一次设备管理工作。E-mail: cailinglong1107@163.com。

王婷婷(1990—),女,高级工程师,主要从事电工材料与高压电容器技术研究工作。E-mail: wangtingting@csg.cn。

易承乾(1996—),男,工学博士,主要从事高电压与绝缘技术、多物理场仿真等技术研究工作。E-mail: yicq@csg.cn。

马志钦(1986—),男,正高级工程师,主要从事高电压试验技术与变电一次设备管理工作。E-mail: mzhqcqu@163.com。

刘刚(1985—),男,正高级工程师,长期从事高压电力装备与电工材料、电容器技术研究工作。E-mail: liugang@csg.cn。

廖梓豪(1997—),男,助理工程师,主要从事高电压试验技术与变电一次设备管理工作。E-mail: 984150068@qq.com。

姚成(1981—),男,高级工程师,长期从事高压电容器与电工材料研究工作。E-mail: yaocheng@csg.cn。

李谦(1965—),男,正高级工程师,主要从事过电压与绝缘配合、防雷接地技术研究工作。E-mail: gdlqian@126.com。

胡泰山(1990—),男,高级工程师,长期从事高压电力装备与电工材料、绝缘配合技术研究工作。E-mail: huts@csg.cn。