

DOI: 10.7667/PSPC151706

# 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究

付艳, 黄金海, 吴庆范, 范子强, 许朋见, 芦明明, 范雪峰

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 基于MMC的多端柔性直流输电是直流输电的重要发展方向。对MMC多端柔性直流输电控制保护系统进行了研究, 介绍了一种基于子模块电容电压优化平衡控制算法的控制策略, 详细给出了柔性直流输电系统保护配置, 对阀侧交流母线差动保护策略和换流器区保护策略等保护关键技术问题进行深入研究, 给出了具体的解决策略。并搭建了多端MMC-HVDC仿真试验系统验证控制保护研究策略, 详细分析了阀侧交流母线两相短路接地故障和换流器上桥臂短路故障仿真结果。所研究内容对多端MMC-HVDC工程的研究和发展有重要的借鉴意义。

**关键词:** 电压优化平衡; 阀侧交流母线差动保护策略; 换流器区保护策略; 多端 MMC-HVDC; 仿真试验系统; 故障仿真结果

## Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection

FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, FAN Ziqiang, XU Pengjian, LU Mingming, FAN Xuefeng  
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The flexible multi-terminal HVDC based on MMC is an important development direction of HVDC. This paper researches the control and protection system of flexible HVDC based on MMC. It introduces one control strategy based on sub-module capacitor voltage optimization of balance control algorithm and provides the protection configuration of flexible HVDC system in detail. The key technical problems of protection including the strategy of valve side AC busbar differential protection and inverter area protection are researched further. And a specific solution strategy is provided. A multiterminal MMC-HVDC simulation test system is set up to examine control and protection strategy. Then it analyzes the fault simulation results of two-phase connected to ground in valve side AC busbar, and the short circuit in inverter up bridge arm. The research in this paper has important significance for the research and development of multiterminal MMC-HVDC project.

**Key words:** voltage optimization balance; strategy of valve side AC busbar differential protection; strategy of inverter area protection; multiterminal MMC-HVDC; simulation test system; fault simulation results

## 0 引言

柔性直流输电采用的是可关断的电压源型换流器(VSC), 具有向无源电网(孤岛)供电、快速独立控制有功与无功、潮流反转快、运行方式灵活等优点。柔性直流输电技术作为智能电网的关键技术, 已成为当今世界电力电子技术应用领域的制高点<sup>[1-2]</sup>。模块化多电平换流器(MMC)是一种新型 VSC 拓扑, 因其具有结构模块化、开关频率低、谐波含量小、

易于实现高压多电平输出等优点, 成为柔性直流输电工程的优选拓扑之一<sup>[3-4]</sup>。多端直流(MTDC)比两端直流系统具有更好的经济性和灵活性, 实现多电源供电、多落点受电, 是直流输电系统的重要发展方向<sup>[5-6]</sup>。基于 MMC 的多端柔性直流输电系统结合了 MMC 技术和 MTDC 技术, 具有广泛的应用前景。

## 1 柔性直流输电控制保护系统研究

### 1.1 MMC 基本原理

图 1 所示为三相模块化多电平换流器(MMC)的拓扑结构, O 点为零电位参考点, 一个换流器包含 6 个桥臂, 每个桥臂由一个电抗器和  $N$  个子模块串联而成<sup>[7-10]</sup>。

**基金项目:** 河南省重大专项项目“高压大容量柔性直流输电装备关键技术研究及产品研制”; 国家电网公司科技项目“ $\pm 500$  kV 柔性直流电网超高速保护关键技术研究”。

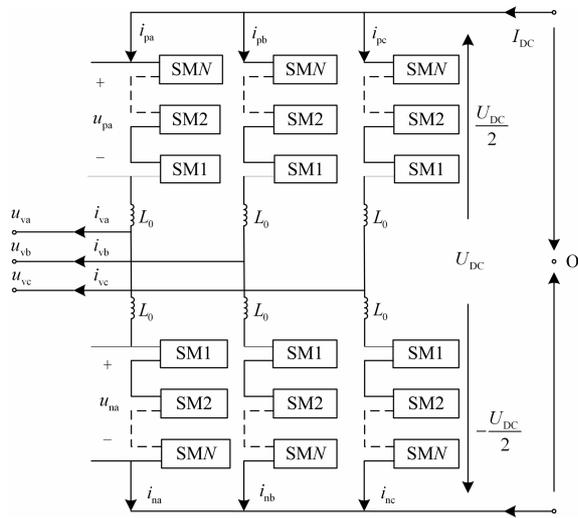


图 1 MMC 拓扑结构图

Fig. 1 Structure of MMC topology

子模块的拓扑结构如图 2 所示。MMC 子模块是由两个 IGBT、两个反并联二极管和一个电容组成，两条有端点的引线连接主电路。图中给出了子模块运行时的工作状态，流过子模块的电流为  $i$ ，设流入子模块为正，流出子模块为负，而电流的正负决定电容的充放电。

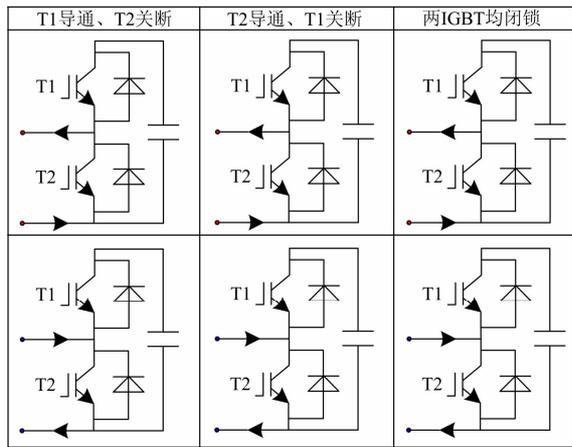


图 2 子模块运行时的工作状态

Fig. 2 Structure of sub-module running condition

当 T1 导通、T2 关断时，电容被投入到主电路中，子模块输出端引出子模块电容电压。电流的方向决定了子模块是处于充电还是放电状态，利用这一特点可实现各子模块电压维持在同一水平值。当 T2 导通、T1 关断时，电容从主电路中切出，子模块输出端约为零电压，即仅是开关器件的通态压降，利用这一特点可实现子模块冗余保护的设计。当两个 IGBT 均闭锁时，子模块只能被充电而不能放电。

即要实现子模块的投入或切除，只需控制该子模块的上下两个 IGBT 的开关状态。

### 1.2 MMC 控制策略研究

已知 MMC 的运行条件：一、恒定的直流电压。每个桥臂由  $N$  个子模块组成，每个相单元含上下两个桥臂，任一瞬时每个相单元投入  $N$  个子模块，即

$$U_{DC} = N \times U_C \quad (1)$$

二、交流侧输出三相交流电压<sup>[11]</sup>。当一个桥臂投入的子模块数从  $0 \sim N$  变化时，交流侧可以得到  $N+1$  级电压<sup>[12]</sup>。可以得出任一时刻 MMC 上下桥臂需要投入子模块的个数为

$$n_{down} = \frac{n}{2} + \text{round}[\frac{u_s(t)}{U_C}] \quad (2)$$

$$n_{up} = n - n_{down} = \frac{n}{2} - \text{round}[\frac{u_s(t)}{U_C}] \quad (3)$$

式中： $\text{round}(x)$  表示取与  $x$  最接近的整数； $u_s(t)$  表示调制波的瞬时值； $U_C$  表示子模块的直流电压平均值； $0 \leq n_{up}, n_{down} \leq n$ 。 $n_{up}$  和  $n_{down}$  分别为任一时刻上下桥臂需要投入子模块的个数。

如何实现在任一时刻子模块的投入和切除控制的同时，又要保证子模块的电容电压均衡，是 MMC 控制的关键。首先，监测各子模块的电容电压值，并输入控制器进行排序。其次，测量桥臂电流方向，确定子模块电容是放电还是充电。最后，在下次电平变动时刻，如果桥臂电流对子模块电容充电，则投入该桥臂中电容电压偏低的子模块；如果桥臂电流方向导致子模块电容放电，则投入该桥臂中电容电压偏高的那些子模块。子模块电容电压优化平衡控制算法如图 3 所示。

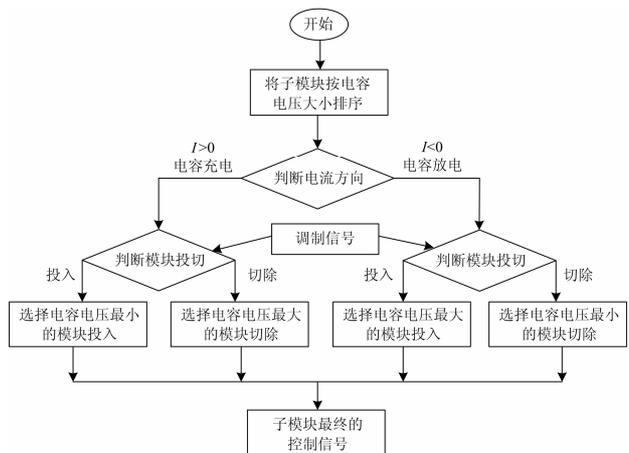


图 3 子模块电容电压优化平衡控制算法

Fig. 3 Sub-module capacitor voltage optimization of balance control algorithm

### 1.3 柔性直流输电系统保护配置研究

首先根据一次设备和运行维护以及确认故障范围的需要<sup>[13]</sup>, 将柔性直流输电系统的保护区域划分为换流变压器保护区、阀侧交流母线保护区、换流器保护区和直流极保护区。各个区域的保护功能

配置如图 4 所示。其中, 换流器保护区主要对换流器、换流器与交流母线的部分连接线路以及桥臂电抗器进行保护, 包含子模块保护、阀保护、直流保护, 以上保护区域的划分确保了对所有相关的直流设备进行保护, 相邻保护区域之间重叠, 不存在死区。

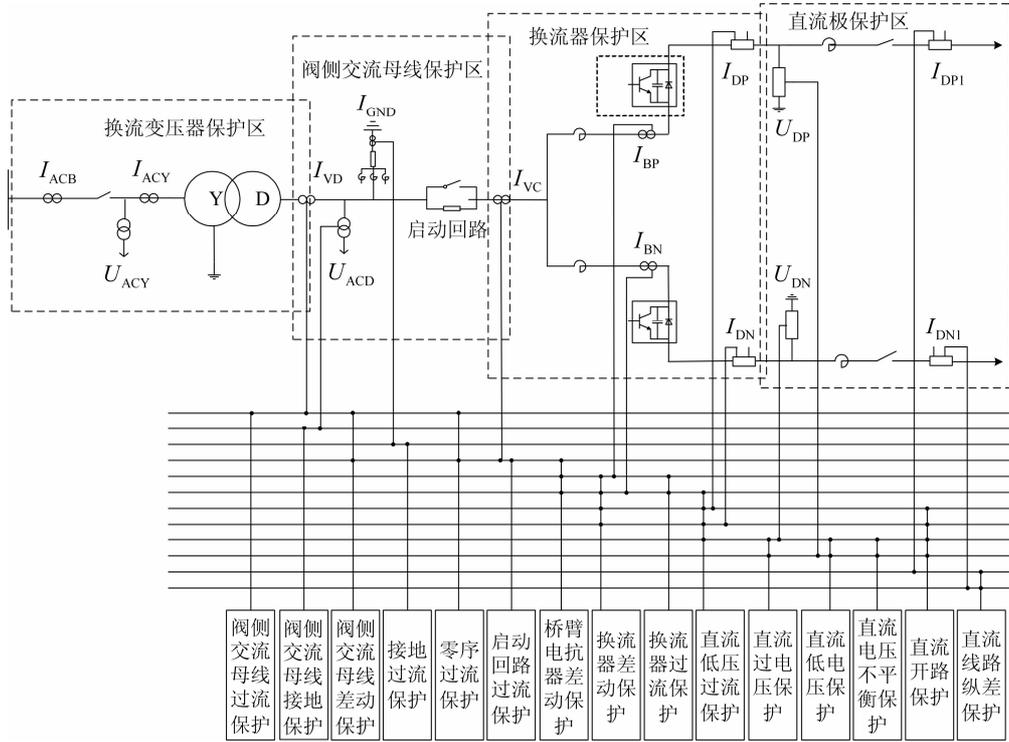


图 4 保护分区、测点、保护功能配置示意图

Fig. 4 Structure of protect partition, measuring point, and function configuration

## 2 保护关键技术问题研究及解决策略

目前柔性直流输电工程大多采用伪双极接线方式, 即在换流变压器阀侧并联三相星形电抗器构造人为中性点, 并经接地电阻接地, 使直流线路呈现正、负极性对称的线路, 此种拓扑结构和测点配置大大增加了阀侧交流母线差动保护的设计难度, 而阀侧交流母线差动又是阀侧交流母线区域的主保护, 因此本文针对此种拓扑结构和测点配置, 提出一种阀侧交流母线差动保护的实现方法, 经试验验证, 该方法可快速、准确地判断故障, 有效地保护整个系统。

换流器保护区内包含了柔性直流输电系统中最关键的元器件即 MMC, 由于 IGBT 的器件特性, 造价昂贵, 电流和电压的过载能力差, 大倍率的过流和过压的能力都在几  $\mu\text{s}$  到几十  $\mu\text{s}$ , 所以换流器区的保护是柔性直流输电保护系统的重点和难点。因此, 本文主要针对阀侧交流母线差动保护和换流器区保护问题研究提出解决策略。

### 2.1 阀侧交流母线差动保护研究

阀侧交流母线保护区一次设备与测点如图 4 阀侧交流母线保护区所示, 阀侧交流母线差动保护判据为

$$|dif_{-A/B/C}| = |i_{VD,A/B/C} - i_{VC,A/B/C} - i_{L,A/B/C}| \quad (4)$$

式中:  $i_{VD,A/B/C}$  为联结变阀侧交流母线各相电流;  $i_{VC,A/B/C}$  为启动回路阀侧各相电流;  $i_{L,A/B/C}$  为接地电抗器各相电流;  $i_{VD,A/B/C}$ 、 $i_{VC,A/B/C}$  可通过电流互感器测得并传给保护屏的测量板卡, 而  $i_{L,A/B/C}$  通常无测点。但可以利用采集到的阀侧各相电压值  $u_{ACD,A/B/C}$ 、接地电阻总电流值  $I_{GND}$ , 计算出接地电抗器各相电流。

$$i_{L,A/B/C} = \frac{u_{ACD,A/B/C} - R \times I_{GND}}{\omega \times L_{-A/B/C}} \quad (5)$$

则阀侧交流母线区各相差流的绝对值为

$$|dif_{-A/B/C}| = |i_{VD,A/B/C} - i_{VC,A/B/C} - \frac{u_{ACD,A/B/C} - R \times I_{GND}}{\omega \times L_{-A/B/C}}| \quad (6)$$

交流母线差动保护的判据为：当 $|dif_{-A/B/C}| > \Delta$ 时，延时 $T$ ，发出闭锁信号。其中 $\Delta$ 为保护定值， $T$ 为保护动作延时时间。

## 2.2 换流器区保护策略研究

柔性直流的换流器保护区采用分级、分层的分布式结构来实现，如图4换流器保护区所示，包含子模块保护、阀保护、直流保护。其中，子模块保护包括子模块过压、欠压保护，子模块驱动故障保护，子模块通信故障保护，旁通开关拒动保护，在子模块中集成，文献[14]对子模块故障进行了详细的分析，并提供了保护解决方案。由于常规的直流保护装置计算能力有限，无法满足保护对于时间上的要求，故将阀级桥臂过流保护集成在阀控制保护装置里。保护判据为： $|i_{BP\_A/B/C}| > \Delta$ ，or  $|i_{BN\_A/B/C}| > \Delta$ 时，阀保护发出闭锁、触发旁通晶闸管请求。直流保护包括桥臂电抗器差动保护、换流器差动保护、换流器过流保护，均用到各相桥臂电流值，故桥臂电流是换流器区故障检测的重要指标。

由于三个相单元的对称性，总直流电流 $I_{DC}$ 在三个相单元之间平均分配，每个相单元中的直流电流为 $I_{DC}/3$ 。又由于上、下桥臂电抗器 $L_0$ 相等，所以交流电流 $i_{VC}$ 在上下桥臂间均分，这样三相上下桥臂电流为

$$i_{BP\_A/B/C} = \frac{i_{VC\_A/B/C}}{2} + \frac{I_{DP}}{3} \quad (7)$$

$$i_{BN\_A/B/C} = -\frac{i_{VC\_A/B/C}}{2} + \frac{I_{DN}}{3} \quad (8)$$

由于换流器过流保护的判据采用的是各相桥臂电流的有效值，故要求交流电流： $i_{BP\_A/B/C}$ 、 $i_{BN\_A/B/C}$ 的有效值。根据有效值的定义，交流电流

$i_B = \frac{i_{VC}}{2} + \frac{I_{DP}}{3}$  在一个周期内通过电阻 $R$ 产生的热量为

$$Q = \int_0^T i_B^2 R dt = \int_0^T \left( \sqrt{2} I_{VC} \sin \omega t + \frac{1}{3} I_{DP} \right)^2 R dt \quad (9)$$

$$Q = \int_0^T \left( 2I_{VC}^2 \sin^2 \omega t + \frac{2\sqrt{2}}{3} I_{VC} I_{DP} \sin \omega t + \frac{1}{9} I_{DP}^2 \right) R dt \quad (10)$$

$$Q = \int_0^T \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) 2I_{VC}^2 R dt + \frac{2\sqrt{2}}{3} I_{VC} I_{DP} R \int_0^T \sin \omega t dt + \frac{1}{9} I_{DP}^2 R \int_0^T dt \quad (11)$$

将 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 代入式(11)，得

$$Q = \left[ I_{VC}^2 + \left( \frac{1}{3} I_{DP} \right)^2 \right] RT \quad (12)$$

根据交变电流有效值的定义，有

$$Q = I_B^2 RT \quad (13)$$

所以：

$$I_B^2 = I_{VC}^2 + \left( \frac{1}{3} I_{DP} \right)^2 \quad (14)$$

$$I_B = \sqrt{I_{VC}^2 + \left( \frac{1}{3} I_{DP} \right)^2} \quad (15)$$

式中： $I_B$ 为交变电流 $i_B$ 的有效值； $I_{VC}$ 为交变电流 $i_{VC}$ 的有效值。换流器过流的保护判据为： $I_{BP\_A/B/C} > \Delta$ ，or  $I_{BN\_A/B/C} > \Delta$ ，延时 $T$ ，发出保护闭锁信号。其中 $\Delta$ 为保护定值， $T$ 为动作延时时间。

## 3 柔性直流输电仿真试验研究

### 3.1 仿真试验平台构建

基于MMC的柔性直流输电系统需要大量的子模块串联，给实时仿真计算带来了巨大的挑战<sup>[15]</sup>。针对多端MMC-HVDC控制保护系统同时构建多端MMC-HVDC的RTDS和RT-LAB仿真模型，均实现了控制保护系统的实时半实物仿真<sup>[16-17]</sup>。构建不同的仿真平台，可以通过不同仿真软件的仿真试验更好地了解多端MMC-HVDC的特性，更好地验证多端MMC-HVDC控制保护系统的正确性和稳定性。

柔性直流保护试验故障点示意图见图5所示。

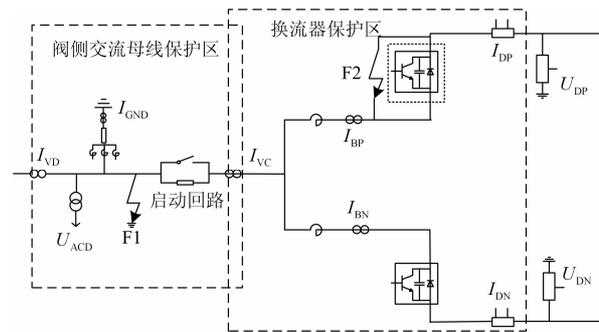


图5 柔性直流保护试验故障点示意图

Fig. 5 Structure of flexible DC protection test failure point

### 3.2 阀侧交流母线两相短路接地故障仿真

系统运行工况为：站1采用定直流电压400 kV，定无功功率0 Mvar，站2采用定有功功率300 MW，定无功功率0 Mvar，故障点设置站2阀侧交流母线AB两相短路接地故障F1，故障持续时间为200 ms。

站 2 仿真波形如图 6 所示: 其中图 6(a)为阀侧交流母线电流波形图; 图 6(b)为启动回路阀侧电流波形图; 图 6(c)为阀侧电压波形图; 图 6(d)为接地电阻电流波形图。

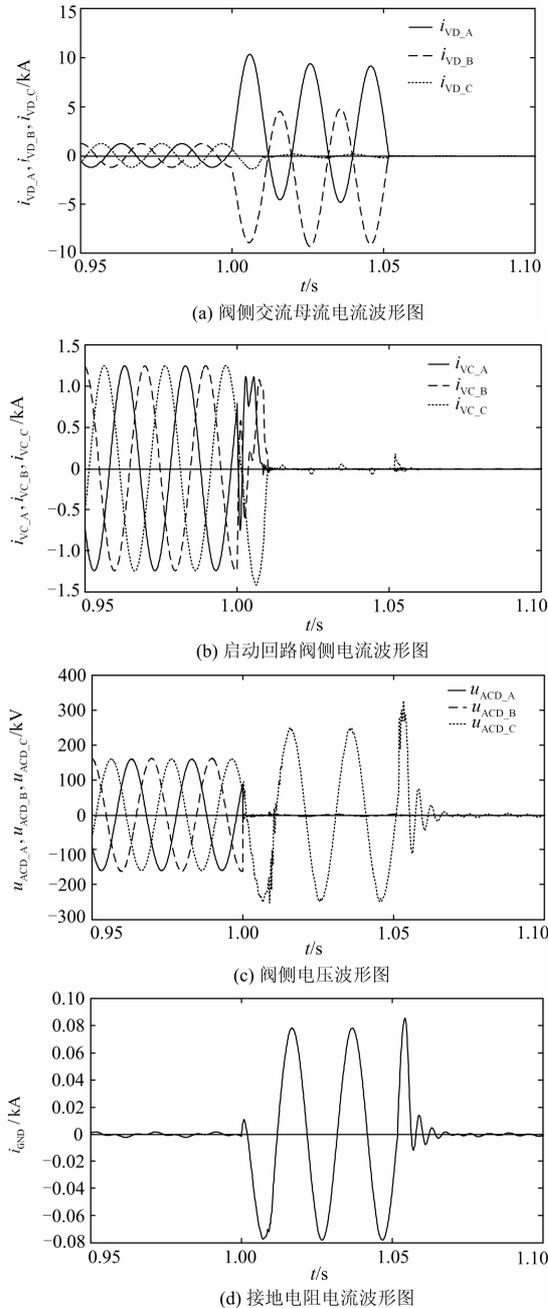


图 6 站 2 仿真波形图

Fig. 6 Simulation waveform structure of station 2

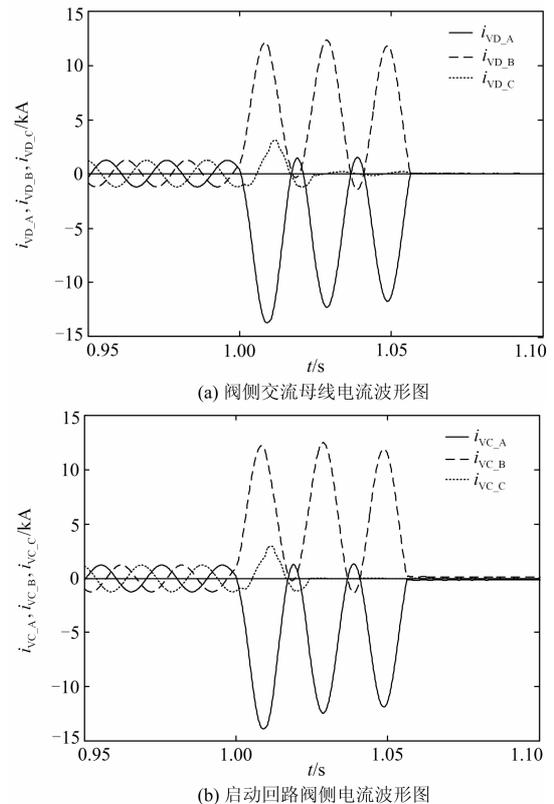
通过波形图可以看出, 系统稳定运行 1 s 后发生阀侧交流母线 AB 两相短路接地故障, 站 2 系统: 故障后 6.00 ms 阀侧交流母线差动保护闭锁, 阀侧交流母线过流保护闭锁, 故障后 46.00 ms 跳开交流断路器。站 1 系统: 故障后 10.00 ms 收到对站启动

闭锁信号, 闭锁本站。从波形图看, 故障发生后, 换流器阀侧 AB 两相电压为 0 kV, C 相电压由相电压变为线电压, 换流器阀侧 AB 两相电流迅速增大, 达到阀侧交流母线过流保护限值, 保护启动闭锁、跳交流断路器出口命令, 同时, 有较大的故障电流流入 F1 处接地点, 使阀侧交流母线差动保护也达到保护限值, 保护启动闭锁、跳交流断路器出口命令。

### 3.3 换流器上桥臂短路故障仿真

系统运行工况为: 站 1 采用定直流电压 400 kV, 定无功功率 0 Mvar, 站 2 采用定有功功率 -300 MW, 定无功功率 0 Mvar, 故障点设置站 2 上桥臂短路故障, 故障持续时间为 200 ms。站 2 仿真波形如图 7 所示: 其中图 7(a)为阀侧交流母线电流波形图; 图 7(b)为启动回路阀侧电流波形图; 图 7(c)为换流器上桥臂电流波形图; 图 7(d)为换流器下桥臂电流波形图。

通过波形图可以看出, 系统稳定运行 1 s 后发生换流器平抗网侧 AB 两相短路故障, 站 2 系统: 故障后 7.20 ms 桥臂电抗器差动保护闭锁, 桥臂过流保护闭锁, 阀侧交流母线过流保护闭锁, 启动回路过流保护闭锁, 故障后 42.00 ms 跳开交流断路器。站 1 系统: 故障后 10.00 ms 收到对站启动闭锁信号, 闭锁本站。从波形图可以看出, 故障发生后, 阀侧交流母线电流、启动回路阀侧电流、换流器上桥臂



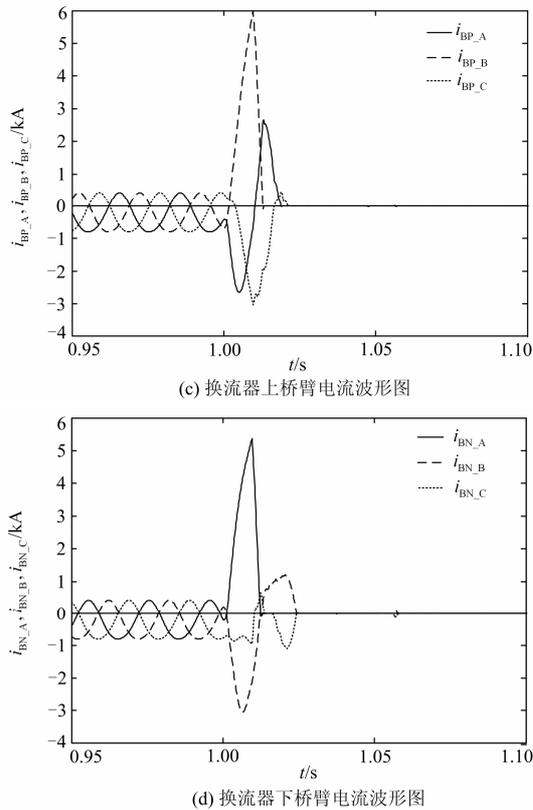


图 7 站 B 仿真波形图

Fig. 7 Simulation waveform structure of station B

电流和换流器下桥臂电流的 AB 两相电流均迅速增大超过保护定值，保护启动闭锁、跳交流断路器出口命令，同时，桥臂电抗器差动保护也达到保护限值，保护启动闭锁、跳交流断路器出口命令。

#### 4 总结

本文介绍了 MMC-HVDC 基本原理，并阐述了一种基于子模块电容电压优化平衡控制算法的控制策略。详细分析了柔性直流输电保护系统，主要包括柔性直流输电系统保护配置研究、保护关键技术问题及解决策略，包含阀侧交流母线差动保护、换流器区保护策略。搭建了多端 MMC-HVDC 仿真试验系统，详细分析了阀侧交流母线两相短路接地故障和换流器上桥臂短路故障仿真，验证了控制保护系统的可靠性、稳定性，为多端 MMC-HVDC 工程的研究和发展奠定了坚实的基础。

#### 参考文献

[1] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.  
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 贾林壮, 冯琳, 李国杰, 等. 基于 MMC 技术的光伏并网逆变器原理及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 78-85.  
JIA Linzhuang, FENG Lin, LI Guojie, et al. Research on the principle and simulation of grid-connected PV inverter based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 78-85.

[5] 顾益磊, 唐庚, 黄晓明, 等. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 27-34.  
GU Yilei, TANG Geng, HUANG Xiaoming, et al. Dynamic characteristic analysis hybrid AC/DC power grid with multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 27-34.

[6] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端直流输电工程换流站内暂态过电压[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.

[7] 陈鹤林, 徐政, 唐庚, 等. 海上风电场 MMC-HVDC 并网系统暂态行为分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 112-118.  
CHEN Helin, XU Zheng, TANG Geng, et al. Transient behavior analysis of offshore wind farm integration system with MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 112-118.

[8] 张明, 吴浩伟, 蔡凯, 等. 模块化多电平变换器的环流谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 57-66.  
ZHANG Ming, WU Haowei, CAI Kai, et al. Circulating harmonics suppression method for modular multilevel

- converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 57-66.
- [9] 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.
- [10] 刘普, 王跃, 雷万钧, 等. 模块化多电平变流器稳态运行特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 91-99.  
LIU Pu, WANG Yue, LEI Wanjun, et al. Analysis of steady-state operating characteristics for modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 91-99.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [12] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [13] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.  
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [14] 敬华兵, 年晓红, 龚芬, 等. MMC 子模块元件短路故障机理及其新型保护策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 21-27.  
JING Huabing, NIAN Xiaohong, GONG Fen, et al. Fault mechanism and novel protection strategy of MMC sub-module component short-circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 21-27.
- [15] 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, 2013, 37(12): 92-98.  
LIU Chongru, LIN Xuehua, LI Haifeng, et al. An equivalent sub-module model for modular multilevel converter in RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 92-98.
- [16] 张群, 赵倩, 陈朋. 基于 RT-LAB 的柔性直流输电系统仿真平台设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 123-128.  
ZHANG Qun, ZHAO Qian, CHEN Peng. Design of real time simulation platform based on RT-LAB for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 123-128.
- [17] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.  
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.

收稿日期: 2015-09-23; 修回日期: 2015-12-31

作者简介:

付艳(1987-), 女, 硕士研究生, 工程师, 从事柔性直流输电保护软件设计及研究; E-mail: fuyan@xjgc.com

黄金海(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究;

吴庆范(1982-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究。

(编辑 魏小丽)