

基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究

孙刚¹, 时伯年¹, 赵宇明², 李树鹏³

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 深圳电力技术研究中心, 深圳 518048;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 结合深圳多端柔性直流配电示范工程, 研究了柔性直流配电网的保护配置和直流线路故障定位方法。首先根据实际工程的电路拓扑结构, 明确了柔性直流配电网保护区域的划分方法。其次结合 MMC 换流器及直流配电网的故障特性, 提出了各保护区域的保护配置方案。最后针对直流线路“T”接负荷与微电网的特点, 重点介绍了直流线路单极故障、双极故障及断线故障的保护配置和故障定位方法。在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 下搭建了基于 MMC 的直流配电网仿真模型, 通过仿真验证了保护配置策略的正确性和直流线路故障定位的可行性。

关键词: 柔性直流配电网; 保护配置; 直流线路故障; 故障定位

Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid

SUN Gang¹, SHI Bonian¹, ZHAO Yuming², LI Shupeng³

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. Shenzhen Power Supply LLC, Shenzhen 518048, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A protection configuration strategy and fault location method of the demonstration project of flexible DC distribution system in Shenzhen is studied. Firstly, focusing on the topology structure of the project, the protection area of DC distribution network is divided. Secondly, an overall protection configuration strategy is presented considering MMC and the system's faulty characteristics. Thirdly, as the new feature of the load and micro grid being connected with the DC line with “T” type, the protection configuration and fault location method of DC line single-pole fault, double-pole fault and broken line fault is proposed. Lastly, the simulation model of MMC based DC distribution grid is built on PSCAD/EMTDC, and the simulation results verify the effectiveness of the protection configuration strategy and the correctness of the fault location method.

This work is supported by National High-tech R & D program of China (No. 2013AA050104).

Key words: MMC based distribution grid; protection configuration strategy; DC line protection coordination; fault location method

中图分类号: TM77; TM72

文章编号: 1674-3415(2015)22-0127-07

0 引言

柔性直流配电系统是基于电压源型换流(Voltage Sourced Converters, VSC)技术, 采用 IGBT 等具有可关断电流能力的晶闸管构成的换流器, 通过脉冲调制技术实现无源整流逆变, 以直流电流向负荷送电的配电系统。其具有许多传统交流配电系统无法比拟的优点, 使其成为最近发展起来的最有潜质的电力传输方式, 特别适用于新能源并网、构筑城市

直流配电网、向孤立的远方小负荷区供电等领域, 具有广阔的应用前景^[1-5]。

模块化多电平换流器 (Modular Multi-level Converter, MMC) 相对于传统两电平或三电平 VSC, 具有易于扩展、谐波畸变小、开关损耗低、没有换相失败、故障处理能力强等优点^[6-9], 成为柔性直流输电工程的优选拓扑之一。但其所用器件数量较多, 存在电容电压不均衡、桥臂环流等问题, 使得控制系统变得更为复杂^[10-11]。综合考虑经济成本、技术难度及系统特性等因素, 柔性直流配电工程可采用 MMC 与 VSC 共存的混合式多端换流器的拓扑结构。

由于 MMC 与 VSC 拓扑结构的差异,两者直流系统故障机制也有所区别,有必要对其故障特性进行研究并进行保护设计。本文依托深圳六端柔性直流配电示范工程,利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了直流配电系统仿真模型,根据柔性直流配电系统的运行特性,提出了在不同故障区域下的保护配置方法及直流线路的故障保护和定位策略。

1 系统结构及参数介绍

深圳柔性直流配电示范工程中两个 MMC 换流器分别与交流主电网相连,其余四端换流器采用“T”型连接的方式与直流配网相连,主接线拓扑结构如图 1 所示。

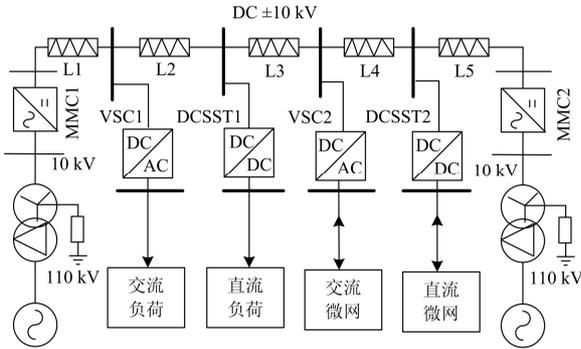


图 1 深圳柔性直流配电工程主接线图

Fig. 1 Main wiring topology structure of Shenzhen VSC-DC distribution network

其中换流变压器采用 Y/Δ 联接方式、变比 110 kV/10 kV, 低压侧中性点经大电阻接地。直流电缆 L1~L5 的长度及电阻参数见表 1 所示。各接口换流器的电压和容量参数如表 2 所示。

表 1 直流配电系统线路长度及电阻

Table 1 DC cable line parameters

线路序号	线路长度/km	线路电阻/Ω
L1	2.3	0.065 09
L2	1.8	0.050 94
L3	1.9	0.053 77
L4	0.9	0.025 47
L5	0.9	0.025 47

表 2 各换流器的电压和容量

Table 2 Voltage and capacity of VSCs

设备名称	电压	容量	负荷类型
MMC1	10 kV ac/±10 kV dc	25 MVA	交流电网
MMC2	10 kV ac/±10 kV dc	25 MVA	交流电网
VSC1	±10 kV dc/380 V ac	8 MW	交流负荷
VSC2	±10 kV dc/400 V dc	2.5 MW	直流负荷
DCSST1	±10 kV dc/400 V dc	-3.5~5 MW	交流微网
DCSST2	±10 kV dc/400 V dc	-4~4 MW	直流微网

其中,容量中正号是指从配电网中吸收功率,负号指从配电网中反送功率。

2 配电网的保护配置策略

2.1 保护区域划分

根据被保护设备所处位置的不同,大致将本工程划分为 16 个区域,如图 2 所示。根据保护功能的不同将该 16 个区域汇总成五个大类,介绍如下。

1 和 8 为交流系统保护区,实现所连接交流系统及联接变压器的保护,该部分需重点考虑联接变压器与 MMC 换流器及整个直流系统的保护配合问题。2 和 7 为 MMC 换流器保护区,是保证交直流系统可靠联接的关键区域、设备也较昂贵,需重点保护。3、4、5 和 6 为直流线路与直流母线保护区,与控制系统配合可完成故障线路隔离及系统控制方式切换或重新启动工作。9、10、11、12 为负载换流器及直流变压器保护,完成 VSC 换流器和直流变压器的保护,该类保护还将作为换流器低压母线上所连设备的后备保护。13、14、15、16 为交直流负载、交流微电网和直流微电网的保护,该区域的保护功能由自身保护系统实现,本文不予考虑。

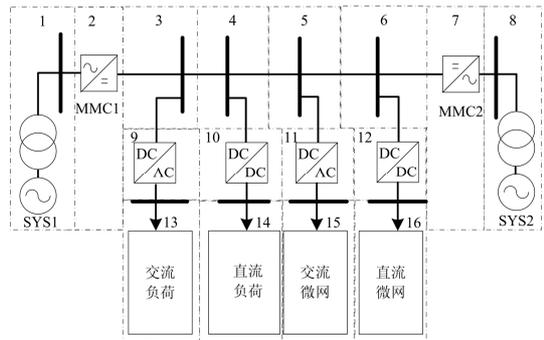


图 2 保护区域划分图

Fig. 2 Protection area partition of DC distribution network

2.2 保护配置

2.2.1 交流系统区保护配置

交流系统保护区包括连接变压器、变压器阀侧套管至换流器交流母线区域,其保护配置及信号测量点如图 3 所示。

在图 3 中:①表示连接变压器过流保护;②表示交流连接母线过流保护;③表示交流过电压保护;④表示交流低电压保护;⑤表示交流连接母线接地保护;⑥表示直流场区接地过流保护。

2.2.2 MMC 换流器区保护配置

MMC 换流器保护区主要保护其内部换流设备的安全,不因其自身或外边故障而产生设备的损坏。其保护配置及信号测量点如图 4 所示。

少分布式电源的出力, 调整用户的接入电源。

(3) 用户侧和发电侧完成调整后(目前可等效为固定的延时), 控制系统调整中性点接地电阻的投切开关并入 $400\ \Omega$ 的小电阻。此后故障电流幅值会升至 $50\ \text{A}$ 左右, 满足差动保护故障定位的要求, 在定位完成后告知控制系统。

(4) 控制系统获得故障位置信息后, 首先将中性点电阻调整回 $2.5\ \text{k}\Omega$, 然后进入故障隔离和系统运行状态转换程序直至系统正常运行。

直流线路 L1~L5 的单极接地故障定位功能由直流线路差动保护的低定值段实现, 其动作判据为

$$\begin{cases} |I_{dp} - I_{dp0}| > \max(I_{c_set_L}, k_{set_L} \times I_{res_L}) \\ \text{或} \\ |I_{dn} - I_{dn0}| > \max(I_{c_set_L}, k_{set_L} \times I_{res_L}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: 差动电流门槛值 $I_{c_set_L} = 0.03 \times I_{DCBase}$; 制动电流 $I_{res_L} = \max(I_{dp}, I_{dp0})$; 制动系数 $k_{set_L} = 0.03$; 直流线路额定电流 $I_{DCBase} = 1.25\ \text{kA}$; I_{dp} 、 I_{dp0} 表示直流正极线路两端电流测量值; I_{dn} 、 I_{dn0} 表示直流负极线路两端电流测量值。

保护延时 $300\ \text{ms}$ 后将定位信息送给控制系统, 由控制系统协调完成故障线路的隔离及系统运行方式的切换。

3.2 双极故障

3.2.1 双极故障保护配置

双极故障是直流配电系统中最为严重的故障。直流线路正负极短接时, MMC 子模块电容将通过短路点快速放电, 直流电压立即降到零电位。两端 MMC 换流器将立即停止功率传输, 此时交流系统类似于发生三相短路, 严重危害整个系统的安全运行^[14-15]。

极间短路的故障保护可依据极间短路的故障特性, 由直流低电压过电流保护实现, 动作判据为

$$\begin{cases} |U_{dp} - U_{dn}| < U_{set_S} \text{ 且 } |I_{dp}| > I_{set_S} \\ \text{或} \\ |U_{dp} - U_{dn}| < U_{set_S} \text{ 且 } |I_{dn}| > I_{set_S} \end{cases} \quad (3)$$

式中: 电压动作门槛值 $U_{set_S} = 1.5 \times U_{DCBase}$; 电流动作门槛值 $I_{set_S} = 2 \times I_{DCBase}$ 。

考虑保护的可靠性等因素, 设定直流极间电压降低至单极额定电压的 1.5 倍时电压判据动作; 设定线路电流增大到额定值的两倍以上时电流判据动作。电压电流判据同时动作后, 保护启动并动作于跳开交流、直流断路器。

3.2.2 双极故障定位

为保护直流设备, 检测到双极故障后应尽快闭锁换流阀。但阀闭锁后故障定位所需的电流、电压等电气量会迅速下降, 可能导致来不及完成故障定位。可见应综合配置阀的闭锁时间, 既要满足保护的判定时间要求, 同时又不损坏直流设备。

在保证安全的前提下延长阀的闭锁时间, 可采取以下三方面措施: 1) 选取过流能力强的开关器件; 2) 配置直流电抗器限制故障电流的幅值和上升速率; 3) 采用具备直流清除能力的 MMC 换流器^[16-17]。

受开关器件型号、经济性及工程实用等方面的限制, 本工程主要考虑通过配置直流电抗器及桥臂电抗器的方法, 限制故障电流的幅值和上升速率^[18], 以达到延迟闭锁时间的目的。同时配置快速线路差动保护, 加快数据处理及运算时间, 通过上述方法可实现差动保护在有用的故障信息消失前需完成故障线路定位。

极间短路的故障定位可由直流线路差动保护的高定值段实现, 具体保护判据如下:

$$\begin{cases} |I_{dp} - I_{dp0}| > \max(I_{c_set_H}, k_{set_H} \times I_{res_H}) \\ \text{或} \\ |I_{dn} - I_{dn0}| > \max(I_{c_set_H}, k_{set_H} \times I_{res_H}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: 差动电流门槛值 $I_{c_set_H} = 0.5 \times I_{DCBase}$; 制动电流 $I_{res_H} = \max(I_{dp}, I_{dp0})$; 制动系数 $k_{set_H} = 0.03$ 。

保护延时 $300\ \text{ms}$ 后将保护定位信息传送给控制系统, 并由控制系统协调实现故障隔离、控制系统切换及配电系统的重启等工作。

3.3 断线故障

本工程为多电源供电系统, 在发生断线故障后, 可由控制系统调节并实现负荷不停电运行。故障特性与系统控制方式和运行方式有关。在定电压控制方式下, 若断线前换流器工作在整流状态, 则故障后该侧直流电压短暂升高后恢复至正常水平; 若断线前换流器工作在逆变状态, 则故障后直流电压短暂下降后恢复到原有电压。

当发生断线故障后, 故障线路电流降为零, 电压瞬时升高或降低, 根据故障特性配置直流线路断线保护实现故障定位, 动作判据为

$$\begin{cases} |I_{dp}| < I_{set_D} \text{ 且 } (|U_{dp}| > U_{set_H} \text{ 或 } |U_{dp}| < U_{set_L}) \\ \text{或} \\ |I_{dn}| < I_{set_D} \text{ 且 } (|U_{dn}| > U_{set_H} \text{ 或 } |U_{dn}| < U_{set_L}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: 过电压门槛值 $U_{set_H} = 1.1 \times U_{DCBase}$; 低电压门槛值 $U_{set_L} = 0.9 \times U_{DCBase}$; 电流门槛值 $I_{set_D} = 0.02 \times I_{DCBase}$ 。

保护动作后延时 300 ms 将动作信息送给控制系统, 控制系统通过切换运行方式、隔离故障等措施可维持系统的正常运行。

4 仿真验证

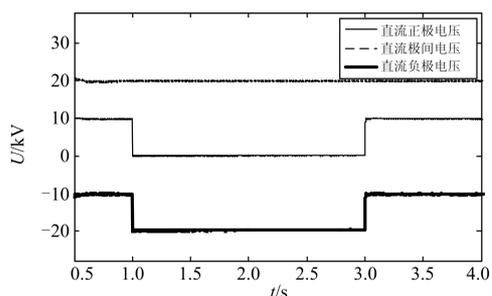
按图 1 所示的拓扑结构在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建深圳柔性直流配电网工程仿真模型。以下重点对直流线路的典型故障的保护配置和故障定位策略做仿真验证。

4.1 直流线路单极故障

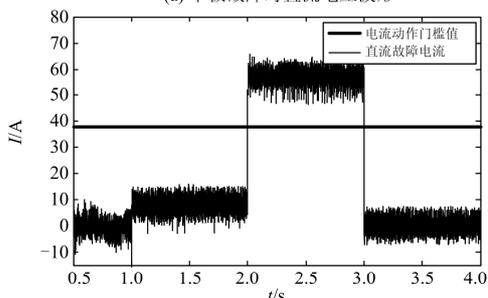
在距离 MMC1 换流器 3 km 处的 L2 正极线路上发生对地金属性短路故障, 故障起始时刻 1 s, 故障持续时间 2 s。

故障极直流电压在故障后迅速降为零, 非故障极直流电压则升高一倍, 直流极间电压保持不变, 如图 6(a)所示。

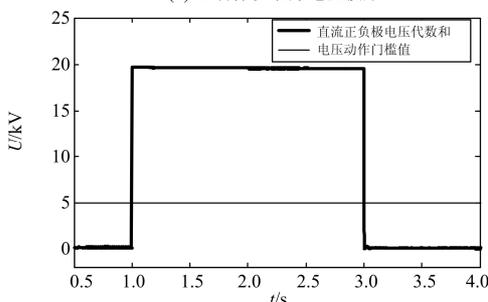
直流电压不平衡保护检测到故障后, 延时 500 ms 动作并将动作信息送给控制系统。控制系统切换运行方式后, 在 2 s 时投入并联小电阻。直流



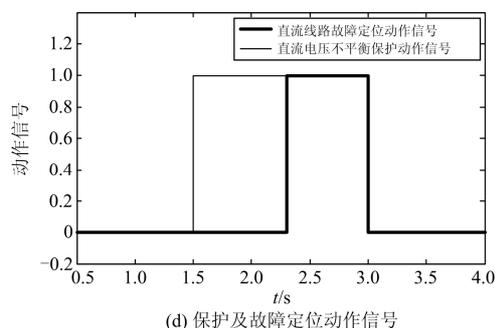
(a) 单极故障时直流电压波形



(b) 差动保护故障电流波形



(c) 差动保护动作电压波形



(d) 保护及故障定位动作信号

图 6 单极故障时的波形图

Fig. 6 Conditions at DC line pole to ground fault

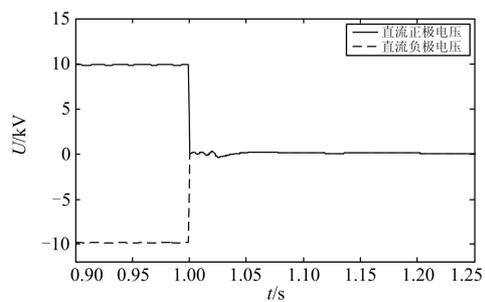
故障电流增大, 则 L2 处直流线路差动保护判别出故障位置, 并延时 300 ms 后动作。故障动作电流波形如图 6(b)所示; 故障动作电压波形如图 6(c)所示; 保护及故障定位触发情况如图 6(d)所示。

4.2 直流线路双极故障

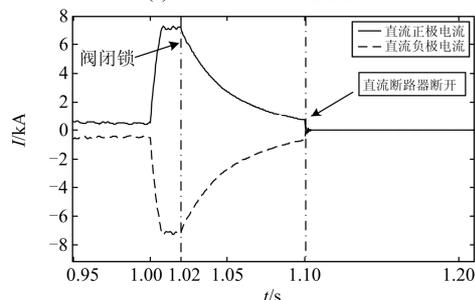
取距离 MMC1 换流器 3 km 处 L2 线路上发生极间短路故障, 故障起始时刻 1 s, 故障持续时间 0.2 s。

当电压电流达到直流低电压过电流保护的整定值时, 保护装置投入, 在 1.02 s 时闭锁触发脉冲, 1.1 s 时刻直流断路器动作跳闸。

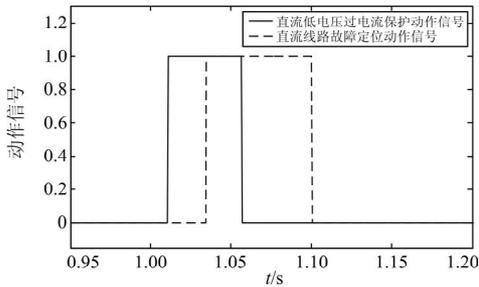
双极故障时直流电压均迅速降低, 直流电流快速增大, 分别如图 7(a)和图 7(b)所示。直流低电压过电流保护动作情况、L2 处直流线路差动保护故障定位动作情况如图 7(c)所示。



(a) 双极故障时直流电压波形图



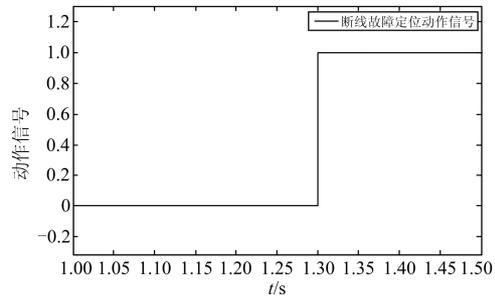
(b) 双极故障时直流电流波形图



(c) 保护及故障定位动作信号

图 7 双极故障时的波形图

Fig. 7 Conditions at DC line pole to pole fault



(d) 断线故障定位动作情况

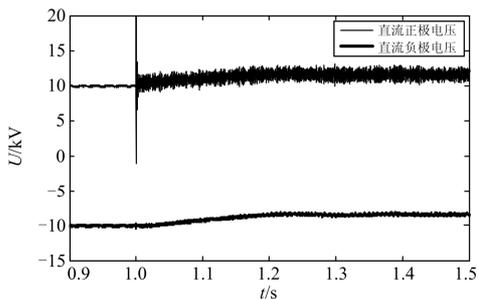
图 8 断线故障时的波形图

Fig. 8 Conditions at DC line disconnection fault

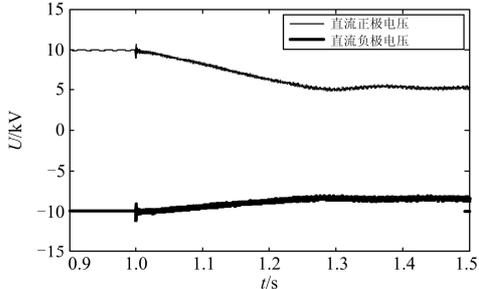
4.3 直流线路断线故障

取距离 MMC1 换流器 3 km 处 L2 线路上发生正极永久性断线故障，故障发生在 1 s 时刻。

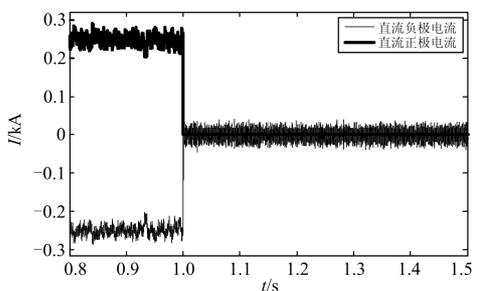
假设 MMC1 端采用定电压控制且工作在整流状态、MMC2 端采用定功率控制且工作在逆变状态。直流线路断线后，MMC1 侧电压短暂升高后基本恢复到正常水平，如图 8(a)所示；MMC2 侧电压则持续降低，如图 8(b)所示；断线后线路电流降为零，如图 8(c)所示；断线故障定位动作情况如图 8(d)所示。



(a) MMC1 侧直流电压波形图



(b) MMC2 侧直流电压波形图



(c) 断线故障直流电流波形图

通过直流断线保护判断故障区域，将故障线路隔离后负荷可由其他电源端供电，实现不停电运行。

5 结论

本文结合深圳柔性直流配电示范工程，介绍了柔性直流配电网的保护分区方法及保护的配置策略。重点分析了直流线路上的保护配置和定位方法，并通过 PSCAD/EMTDC 平台进行了仿真验证，结论如下：

- (1) 柔性直流配电网的保护分区及配置策略与柔性直流输电网有较大不同，应着重考虑直流配电网的故障特性、负荷及微电网分支对保护配置的影响。
- (2) 单极故障时并联小电阻的方法，能有效克服小电流接地系统直流故障电流较小的缺点，保证直流线路差动保护准确定位故障线路。
- (3) 通过合理配置直流电抗器和桥臂电抗器的方法，能够有效限制双极故障时短路电流的上升速率，延长阀闭锁时间。确保直流线路差动保护能准确判定故障线路的位置。
- (4) 直流线路断线故障特性与系统控制方式及运行方式有直接关系，本工程采用的直流断线故障定位方法能够有效判定各种运行方式下的故障位置。

参考文献

[1] LONG W, NILSSON S. HVDC transmission: yesterday and today[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 22-31.

[2] 卓谷颖, 江道灼, 连霄壤. 模块化多电平换流器不平衡环流抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 118-124.

ZHUO Guying, JIANG Daozhuo, LIAN Xiaorang. Study of unbalanced circular current suppressing for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 118-124.

[3] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013,

- 41(10): 33-38.
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.
- [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 Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [5] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42-57.
LI Xiang, HAN Minxiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42-57.
- [6] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电的发展和展望[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.
- [7] 屠卿瑞, 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, 44.
TU Qingrui, XU Zheng, YAO Weizheng. Selecting number of voltage levels for modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 33-38, 44.
- [8] 翟晓萌, 赵成勇, 李路遥, 等. 模块化多电平动态电压恢复器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 86-91.
ZHAI Xiaomeng, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Study of modular multilevel dynamic voltage restorer[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 86-91.
- [9] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [10] 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.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [12] 赵成勇, 李探, 俞露杰, 等. MMC-HVDC 直流单极接地故障分析与换流站故障恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3158-3167.
ZHAO Chengyong, LI Tan, YU Lujie, et al. DC Pole-to-ground fault characteristic analysis and converter fault recovery strategy of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3158-3167.
- [13] 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.
- [14] 许烽, 徐政, 傅闯. 多端直流输电系统直流侧故障的控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 73-77.
XU Feng, XU Zheng, FU Chuang. A control and protection scheme of multi-terminal DC power system for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 73-77.
- [15] 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): 139-146.
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): 139-146.
- [16] 丁云芝, 苏建徽, 周建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 97-105.
DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-105.
- [17] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6390-6397.
LI Xiaolian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6390-6397.
- [18] 黎小林, 许树楷. 中海油文昌柔性直流输电系统暂态故障仿真分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 10-15.
LI Xiaolin, XU Shukai. Simulation analysis on the transient fault of CNOOC Wenchang VSC-HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 10-15.

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2015-06-29

作者简介:

孙刚(1986-), 男, 硕士, 研究方向为微电网控制技术; E-mail: sungang@sf-auto.com

时伯年(1976-), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定及广域保护; E-mail: shibonian@sf-auto.com

赵宇明(1978-), 男, 博士, 研究方向为电力系统通信技术。E-mail: zhaoym97@sina.com

(编辑 魏小丽)