

# 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制

周猛<sup>1</sup>, 向往<sup>1</sup>, 林卫星<sup>1,2</sup>, 文劲宇<sup>1</sup>, 左文平<sup>1</sup>

- (1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室 (华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北省 武汉市 430074;
2. 特变电工新疆新能源股份有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830011)

## Active Current-Limiting Control to Handle Overhead Line Fault in DC Grid

ZHOU Meng<sup>1</sup>, XIANG Wang<sup>1</sup>, LIN Weixing<sup>1,2</sup>, WEN Jinyu<sup>1</sup>, ZUO Wenping<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China;
2. TBEA China Xinjiang Sunoasis Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang Uyghur Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** To handle line faults in a DC grid, this paper proposed a new method of active current-limiting control (ACLIC) based on hybrid MMC. With this active control, breaking capacity requirement of DC circuit breaker (DCCB) will significantly decrease and DC grid investment will be reduced. Firstly, independent controllability of AC/DC voltage of converter is studied. The ACLIC control architecture is proposed. To avoid overvoltage of capacitor on each arm during DC fault, a method of dynamically adjusting DC current thresholds is proposed. The ACLIC optimization method, i.e., target predetermined control, is put forward. Impact of different controller delay time on the ACLIC is analyzed. Transient evolution mechanisms of DC fault current are studied in a single converter system and in DC grid respectively. Finally, validity of the ACLIC is verified.

**KEY WORDS:** DC grid; Line fault; active converter; DCCB; active current-limiting control

**摘要:** 针对架空线柔性直流电网线路故障, 提出了基于混合型 MMC 的主动限流控制方法, 从而降低对直流断路器开断速度、开断容量以及吸收能量的要求, 减少直流电网建设成本、提高直流电网可利用率。该文首先研究了换流器的交/直流电压解耦可控性, 给出了主动限流控制器的控制架构。为了解决直流故障穿越期间, 桥臂电容电压可能会短时越限的问题, 提出了在内环直流电流控制器附加直流电流指令动态限幅控制器的方案。提出了主动限流控制策略的一种优化手段—电流目标预设控制, 分析了不同控制器延时对主动限流控制的影响。计及主动限流控制, 研究了单换流器系统和直流电网故障前后直流故障电流演变机理。最后, 分别在单换流器系统和直流电网系统中仿真验证了前文理论分析的正确性的有效性。

**关键词:** 直流电网; 线路故障; 混合型换流器; 直流断路器; 主动限流控制

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0117

## 0 引言

柔性直流电网在大规模风电、光电的汇集、输送和并网中有很好的应用前景<sup>[1-3]</sup>, 是美、欧和我国都竞相研究的前沿热点方向。对于我国而言, 由于陆上风电和光电大规模开发利用的需要, 采用架空线的柔性直流电网技术需求更为迫切<sup>[4-5]</sup>, 如正在建设的张北柔性直流电网示范工程<sup>[6]</sup>和规划中的西部可再生能源汇集柔性直流电网<sup>[8]</sup>, 均采用了架空线方式。与电缆线路相比, 架空线发生短路故障的概率大增。

目前应对架空柔直电网线路故障的方法是采用高速大开断容量直流断路器被动隔离故障。以张北工程为例, 一旦直流线路发生短路故障, 必须依靠直流断路器(DCCB)在 5-6 ms 内开断数倍于线路额定电流的故障电流以隔离故障。然而, 满足上述要求的高速大开断容量 DCCB 的研制非常困难, 无论是混合式 DCCB<sup>[9-10]</sup>还是机械式 DCCB<sup>[11]</sup>, 其有效性和可靠性仍需通过实际工程考验。针对 500kV/3kA 等级柔性直流电网的 DCCB 应用, 几乎已达到了全控型器件(IGBT)的承受极限。如果全控型器件参数没有较大的提升, 更高开断容量的 DCCB 将不得不采用其他设备或其他开断原理<sup>[12]</sup>。更为关键的是, 即使这些 DCCB 的功能和性能均能满足要求, 其成本都非常昂贵。以张北直流电网工程为例, 其中 DCCB 总成本几乎接近换流阀总成本的三分之二<sup>[13]</sup>。由于直流电网中 DCCB 的用量很多, 使得直流电网的经济性差, 难以推广应用。

应对直流电网线路故障的另外一个方法是利

用具备故障阻断能力的换流器<sup>[14]</sup>, 比如由半桥子模块(HBSM)和全桥子模块(FBSM)或者箝位双子模块(CDSM)组合构成的混合型 MMC。一旦发生故障则闭锁所有换流器<sup>[15-20]</sup>, 阻断故障电流通路。由于换流器闭锁期间, 直流电网与外部电网处于隔离状态, 而且直流电网的重启动过程较为复杂, 导致其功率恢复时间相对较长, 可能会导致交流系统失去稳定性。

因此, 应对架空柔直电网线路故障迫切需要新思路。文献[21-22]提出了一种可以使混合型 MMC 在单/双极直接地/短路故障下维持不间断运行的故障穿越控制策略。文献[23]通过引入直流故障状态信号  $S_{dc}$ : 正常运行时,  $S_{dc}$  为 1; 一旦检测到直流故障,  $S_{dc}$  置 0, 实现混合型 MMC 的故障穿越。该方案在应对高阻故障时, 存在着一定的局限性。文献[24]提出一种全桥 MMC 故障穿越控制保护策略。在故障穿越期间, 换流器处于可控状态, 无需切断交直流系统连接。文献[25]基于 LCC-MMC 混合直流输电系统提出了混合式 MMC 直流故障穿越的优化控制策略, 即在系统检测到直流线路故障时, 直流电流指令值设置为 0。这种故障处理方式能够较好地应对两端柔性直流输电系统的直流故障。对于直流电网应用场合, 特别是 MMC 站作为新能源电力汇集站(比如张北工程中的张北换流站)时, 故障期间将直流电流指令设置为零会造成换流器功率传输中断, 可能会导致新能源脱网, 降低直流电网的利用率。并且当 MMC 站作为功率站长期运行时, 由于线路压降的影响, 仅依靠直流电流控制器可能会造成该站直流功率实际值与上层系统发送的功率指令值之间存在一定的偏差。

实际上, 对于桥臂由 HBSM 和 FBSM 构成的混合型 MMC, 可通过设计先进控制策略, 达到主动限制住直流短路电流的目的, 辅以慢速小开断容量的 DCCB 隔离故障, 实现对直流故障的主动控制。

## 1 混合型 MMC 基本运行原理及其控制

### 1.1 混合型 MMC 拓扑及其交/直流电压解耦可控性分析

混合型 MMC 单相拓扑结构如图 1 所示, 其桥臂分别包含  $N_F$  个全桥子模块和  $N_H$  个半桥子模块。

为简化分析, 在本文中取  $N_F=N_H$ 。  $R_0$ 、  $L_0$  分别为桥臂等效电感和桥臂等效电阻。记混合型 MMC 交流输出电压为:

$$U = M_{ac} \frac{U_{dcn}}{2} \cos(\omega t + \theta_v) \quad (1)$$

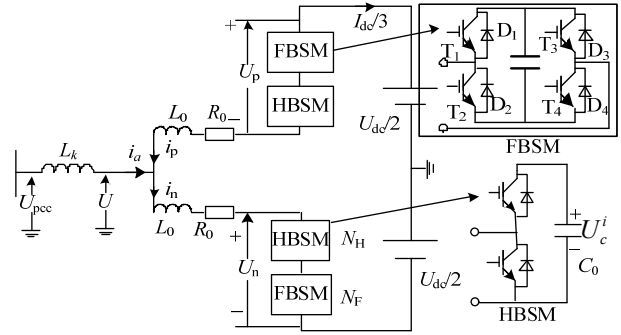


图 1 混合型 MMC 单相拓扑结构

Fig. 1 Topology of single-phase active MMC

式中:  $M_{ac}$  为交流调制比,  $U_{dcn}$  为额定直流电压,  $\theta_v$  为 MMC 交流输出电压  $U$  相对于 PCC 点电压的相位差。稳态运行时, 忽略  $R_0$ 、  $L_0$  两端的压降, 则上、下桥臂电压可以表示为:

$$\begin{aligned} U_p &= U_{dc} / 2 - U \\ U_n &= U_{dc} / 2 + U \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 桥臂输出电压  $U_p$ 、  $U_n$  大小取决于桥臂子模块的投切状态。  $U_{dc}$  为直流电压瞬时值。

假设某时刻上、下桥臂投入的子模块个数分别为  $N_p$  和  $N_n$ , 并且认为子模块电容均压算法良好, 所有桥臂子模块电容电压平均值记为  $U_{c\_avg}$ 。忽略子模块电容电压波动(电容电压波动一般小于 5%), 则由(2)可以得到  $U_{dc}$  为:

$$U_{dc} = (N_p + N_n)U_{c\_avg} \quad (3)$$

由(3)可知, 在  $U_{c\_avg}$  保持一定时, 可通过控制  $(N_p+N_n)$  来调节  $U_{dc}$ 。定义变量  $M_{dc}$  为直流调制比<sup>[25,26]</sup>。定义变量  $U_{armdc}$  为“桥臂内部子模块电容电压之和的直流分量”, 以下简称“桥臂电容电压”。  $U_{dc}$  进一步表示为:

$$\begin{cases} U_{dc} = M_{dc}U_{armdc} = M_{dc}(N_{sm}U_{c\_avg}) \\ U_{armdc} = \frac{1}{6} \sum_{A,B,C} \sum_{p,n} \sum_1^{N_{sm}} U_{ci\_dc} \approx \frac{1}{6} \sum_{A,B,C} \sum_{p,n} \sum_1^{N_{sm}} U_{c\_avg} \end{cases} \quad (4)$$

上式中,  $N_{sm}$  为不考虑冗余子模块时桥臂内子模块数量,  $U_{ci\_dc}$  为子模块电容电压直流分量。由式(4)可知, 当  $U_{armdc}$  被控制在  $U_{dcn}$  附近时, 通过调节  $M_{dc}$  便可使桥臂输出可变的直流电压  $U_{dc}$ 。当混合型 MMC 桥臂中半桥和全桥子模块数量相等时,  $M_{dc}$  的动态调节范围为  $[-0.1, 1]$ <sup>[21,26]</sup>, 因此桥臂电压  $U_p$  或  $U_n$  的直流分量输出范围为  $[-0.1 U_{dcn}, U_{dcn}]$ 。

式(1)可进一步表示为

$$U = M_{ac} \frac{U_{armdc}}{2} \cos(\omega t + \theta_v) \quad (5)$$

由式(5)可知, 当  $U_{armdc}$  被控制在额定直流电压  $U_{dcn}$  附近时, 混合型 MMC 直流侧输出电压  $U_{dc}$  由  $M_{dc}$  决定, 而  $M_{dc}$  的动态调节范围取决于桥臂中半

桥子模块和全桥子模块之间的数量配比。交流侧输出电压  $v$  由  $M_{ac}$  决定。因此，式(4)(5)表征了混合型 MMC 的交、直流输出电压的解耦可控性。

### 1.2 混合型 MMC 主动限流控制

根据前文分析结论，混合型 MMC 交、直流输

出电压可以实现解耦控制。本文提出的主动限流控制器如图 2 所示，其由极控制器和阀控制器两部分构成。极控制器包括交流电流控制回路和直流电流控制回路。

交流电流控制回路中，外环控制的“桥臂电容

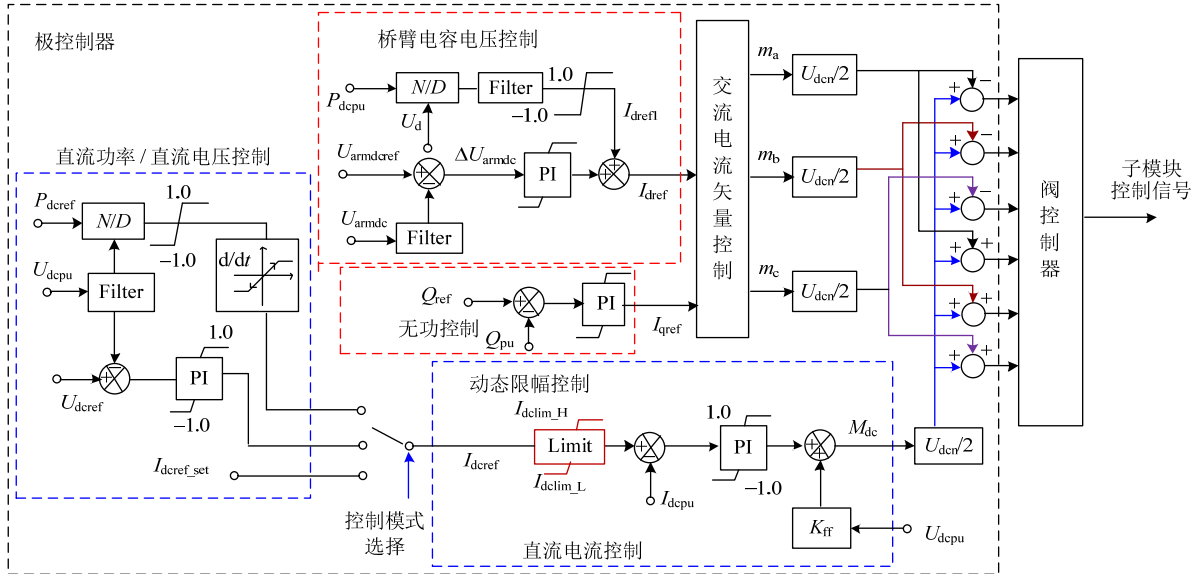


图 2 主动限流控制

Fig. 2 Active current-limiting control

电压控制”用于维持总桥臂电容电压平均值为给定值  $U_{armdcref}$ ，反馈信号  $U_{armdc}$  为所有桥臂电容电压采样值求取平均值后的直流分量，输出信号即为交流电流内环控制器的有功电流指令  $I_{dref}$ 。直流功率前馈控制器输出分量  $I_{drefl}$  叠加到  $I_{dref}$  可以加快有功电流控制器的响应速度，减小子模块电容暂态过电压。内环交流电流矢量控制与半桥 MMC 基本一致。

直流电流控制回路中，外环控制用于控制混合型 MMC 直流功率/直流电压为给定值，其输出信号为内环直流电流指令值，经过“桥臂电容电压动态限幅”环节动态限幅后进入内环直流电流控制器，进一步得到直流调制比  $M_{dc}$ 。直流电流参考信号亦可直接设定，如图 2 中  $I_{dcref\_set}$  所示。在直流电网中，功率站在稳态运行时采用直流功率控制模式。当检测到线路故障时，该功率站经过一定的控制延时后切换到直流电流直接控制。通过在内环直流电流控制器中附加直流电压的前馈控制信号，直流电流控制器可快速跟踪外部直流电压的变化从而迅速调整桥臂输出的直流电压，降低直流故障时的直流过电流。

阀控制器主要包含环流抑制和电容均压控制，文献[26]已进行了相关研究，此处不再详述。

### 1.3 直流故障期间直流电流目标预设控制

#### 1.3.1 直流电流目标控制曲线的选择

与半桥型 MMC 不同，混合型 MMC 具有更高

的可控性，通过主动限流控制策略，可以限制住短路电流的大小(如果需要，甚至可以将短路电流限制到接近于零)。针对基于混合型 MMC 构建的架空线柔直电网，在线路故障发生后至故障被直流断路器清除前这一时间段内，可以利用换流器的控制能力实现对直流故障电流的主动限流控制，降低对 DCCB 开断速度和开断容量的要求。

如图 3 所示，本文提出了一组可行的直流电流目标预设控制曲线。基于不同的直流电流目标预设控制曲线，故障期间换流器直流侧对外电路呈现出不同的电流特性。在直流功率控制模式下，直流电流参考值  $I_{dcref}$  由直流功率指令  $P_{dcref}$  和直流电压标幺值  $U_{dcnu}$  计算得到。正常运行时， $I_{dcref}$  近似为额定值 1.0 pu(pu 为标幺值)。

当检测到直流故障时(图 3 中  $t_1$  时刻)，图 2 中的外环直流功率控制器经过检测延时后切换至直

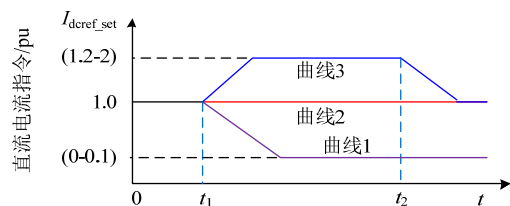


图 3 故障隔离期间直流电流目标预设控制曲线

Fig. 3 Curve of target predetermined control of DC current during the fault isolation

接直流控制。通过直流电流控制器直接选择不同的直流电流目标控制曲线。

对于两端柔性直流输电系统, 在发生线路短路故障后, 整个输电系统将失去直流功率输送能力, 因此故障后的电流目标控制曲线可以选择曲线 1。通过直流电流控制器将直流故障电流主动限制在 0.1 pu 甚至为零, 以便于使用隔离开关隔离故障。同时, 故障期间换流器可以运行于 STATCOM 模式, 具备持续向交流系统提供无功支撑的能力。

对于直流电网, 在线路短路故障期间, 为了使整个直流电网与外部交流系统仍然保持连通状态, 增加直流电网的可利用率, 电流目标控制曲线宜选择曲线 2 或者 3。此时, 所有换流器在故障期间都保持运行状态, 非故障线路持续输送部分或者全部有功功率, 减小交流系统失去稳定性的风险。特别是在大规模风电场经直流外送的应用场景下, 直流线路故障期间, 直流电网保持部分功率传输避免了大规模切机的发生。当换流器工作在预设曲线 2 或 3 时, 一旦故障线路被隔离, 直流电网还能快速恢复到新的稳态。选择曲线 3 有利于缩短暂态过程, 促使系统更快的达到新稳态。对于新能源电力汇集应用场景, 当发生高阻接地故障时, 受限于换流器交流侧新能源电源的功率输出能力, 故障后电流指令宜选择预设曲线 2。图 3 中曲线 1 和曲线 3 的斜率并无特殊要求, 甚至可以为阶跃变化。为了加快故障清除过程, 曲线 1 和 3 应在尽可能短的时间内从故障前的初始值(1.0 pu)达到故障后的目标稳态值, 以减小电流暂态调节过程。

当 DCCB 成功开断后(图 3 中  $t_2$  时刻), 曲线 3 的指令值恢复至额定值 1.0 pu。故障线路两端换流器恢复额定运行。

### 1.3.2 直流电流指令动态限幅控制

当混合型 MMC 外部直流线路发生短路故障时, 可能会因为控制环路的延时, 使得  $U_{armdc}$  在短时间内越限。为解决此问题, 本文提出了如图 4 所示的直流电流指令动态限幅控制器。

直流电流指令动态限幅器对“桥臂电容电压”控制器的跟踪误差  $\Delta U_{armpu}$  ( $U_{armdcref} - U_{armdc}$ ) 进行动态监测, 如果  $\Delta U_{armpu}$  超出设定的上、下限范围时, 则动态改变直流电流参考值的限幅范围, 通过维持交、直流侧功率的平衡, 保证  $\Delta U_{armpu}$  在动态过程中不超出限幅值。正常情况下,  $\Delta U_{armpu}$  不越限, 此时上限幅器向上饱和, 输出  $I_{dclim}$  ( $I_{dclim}$  一般取 1.2 pu); 下限幅器向下饱和, 输出  $-I_{dclim}$ 。直流电流直接受直流外环控制器输出的直流电流指令  $I_{dcref}$  控制。当

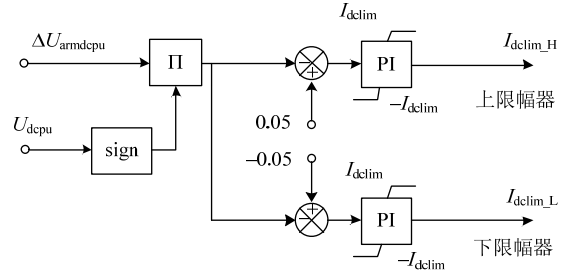


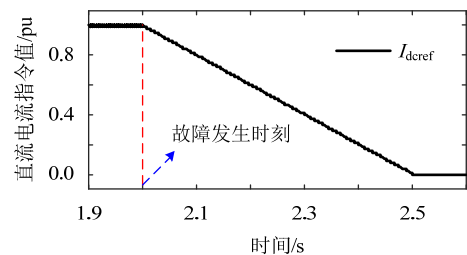
图 4 桥臂电容电压限幅控制

**Fig. 4 Limiting control of voltage for arm bridge capacitor**  
 $\Delta U_{armpu}$  越下限时, 则相应的下限幅器动作, 输出  $I_{dclim}$ , 通过增大直流侧输出功率维持桥臂有功功率平衡, 抑制  $U_{armdc}$  的上升。 $\Delta U_{armpu}$  越上限时, 则相应的上限幅器动作, 输出  $-I_{dclim}$ , 抑制  $U_{armdc}$  的下降。当外部直流电压反向时, 通过符号运算 sign 将误差值反向, 以保证电流限制方向的正确。

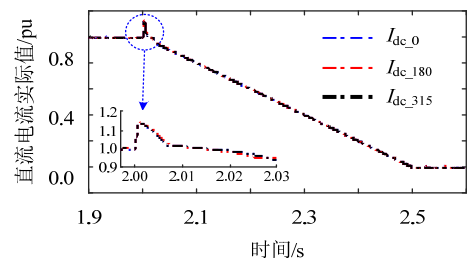
### 1.4 控制器延时对主动限流控制的影响

根据柔性直流一次设备的当前研制进展, 电压/电流传感器的延时一般为 60~90  $\mu s$ , 测量装置的采样频率一般为 40~50 kHz, MMC 换流阀控系统控制周期一般为 10~20 kHz。因此, 从故障发生到阀控系统发出相应的控制脉冲整个过程延时为 180~315  $\mu s$ <sup>[24]</sup>。在系统延时期间, 控制器无法对外部故障信号做出新的反馈动作。图 5 给出了直流故障期间控制器延时分别为 0、180、315  $\mu s$  时直流电流指令值和实际值。仿真系统拓扑结构以及参数详见图 9 和表 1。故障后的直流电流控制器目标预设曲线选择图 3 中的曲线 1。

图 5(a)为故障前后直流电流指令值  $I_{dcref}$ 。故障



(a) 故障前后直流电流指令值



(b) 故障期间直流电流实际值

**图 5 不同延时条件下直流电流指令值与实际值**  
**Fig. 5 Instruction value and actual value of DC current with different delay time**

前  $I_{dcref}$  等于 1.0 pu。在 2 s 时刻发生短路故障后,  $I_{dcref}$  以 2 pu/s 的斜率下降, 2.5 s 时刻减小为 0。

图 5(b) 为直流电流实际值。可以看出不同延时工况下的直流电流响应曲线  $i_{dc\_0}$ 、 $i_{dc\_180}$ 、 $i_{dc\_315}$  基本重合, 控制器延时对故障期间直流电流响应特性的影响基本可以忽略。故障期间, 直流系统故障回路内等值物理参数(主要包含桥臂电抗器, 平波电抗器, 直流线路等值阻抗, 接地点故障电阻等)、直流电流控制器 PI 参数和控制回路延时等因素都将影响直流电流的过电流幅值。

## 2 计及主动限流控制器时故障电流演变机理

### 2.1 单换流器系统故障电流演变机理分析

故障期间单换流器系统直流侧等效电路如图 6 所示。图 6 中  $U_{dc}$  为 MMC 直流侧母线电压。  $U_{dc2}$  为外部直流系统电压,  $L_{dc}$  为线路等效限流电感。与半桥 MMC 不同的是, 混合型 MMC 直流电压  $U_{dc}$  具有较宽范围的主动调节能力, 能够自适应外部电压变化或者将直流电压  $U_{dc}$  控制为任意需要的值。比如, 当桥臂内半桥和全桥子模块配置比例为 1:1 时,  $U_{dc}$  可以在 (-0.1 pu, 1.0 pu) 之间调节。

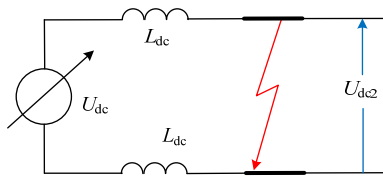


图 6 单换流器系统等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of single converter system

线路短路故障发生后, 直流故障电流快速上升, 故障点直流电压迅速跌落。直流电压前馈控制器感知到外部直流电压跌落, 迅速减小前馈输出, 从而在极短的时间内降低直流调制比  $M_{dc}$ , 减小桥臂投入的子模块数量。同时, 结合直流电流控制器的调节作用, 混合型 MMC 桥臂输出电压的直流分量迅速降低以自适应外部直流电压  $U_{dc2}$ , 从而限制直流短路电流的持续增长, 将直流电流控制在目标值附近。

图 7 为计及主动限流控制时单换流器系统直流电流特征曲线。故障前, 直流电流为额定值 1.0 pu。  $t_1$  时刻线路发生短路故障, 在  $\Delta t_1$  时间段内, 直流输出电压  $U_{dc}$  因自适应外部直流电压  $U_{dc2}$  而逐渐下降。但由于直流故障回路等效阻抗较小, 直流故障电流迅速增大。在  $\Delta t_1$  期间, 故障电流的演变规律主要由此期间的直流系统物理参数以及等值电路决定。

在  $t_2$  时刻,  $U_{dc}$  等于  $U_{dc2}$ , 直流故障电流停止上升。在  $\Delta t_2$  期间, 由于主动限流控制器的作用, 故

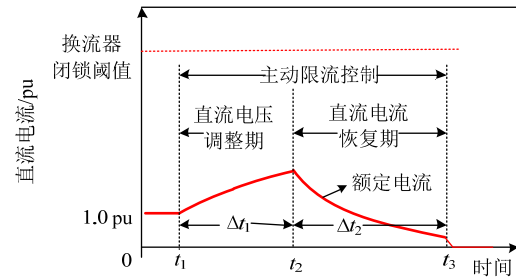


图 7 单换流器系统故障线路直流电流特征曲线

Fig. 7 Curve of DC current of faulty line in single converter

障电流将跟实时跟踪预先设定的目标控制曲线, 因此在  $\Delta t_2$  时间段内直流电流响应特性将与直流电流目标控制曲线的选择强相关。对于两端柔性直流输电系统, 由于故障后整个系统失去了有功功率输送能力, 可以直接将直流电流控制为较小值(即图 3 中的曲线 1), 以便于采用隔离开关来隔离线路故障。

在  $t_3$  时刻, 隔离开关分闸, 故障电流被开断, 线路故障被隔离。

### 2.2 直流电网故障电流演变机理分析

与两端柔性直流输电系统不同的是, 直流电网的功率输送容量一般较大。为降低直流电网故障对交流系统稳定性以及直流电网内部直流断路器过载能力的影响, 故障期间故障线路两端的功率站直流电流指令推荐维持故障前的水平, 即图 3 中的曲线 2。图 8 所示为直流电网故障线路电流特征曲线。与图 7 类似, 依据故障电流演变过程, 故障期间直流电流的动态过程同样包含两个典型的时间段, 即直流电压调整期, 直流电流恢复期。

在直流电压调整期  $\Delta t_1$  时间段内, 其故障电流演变过程与单换流器系统类似, 此处不再赘述。需要指出的是, 由于直流电网内部包含大量的换流器, 故障期间数量庞大的子模块电容将对故障点放电, 导致  $\Delta t_1$  时间段内直流电网峰值故障电流也将会大于单换流器系统。另一方面, 直流电网中的大量感性和阻性元件使得其阻尼远大于单换流器直流系统, 因此直流电网中  $\Delta t_1$  的持续时间远大于后者。

在  $\Delta t_2$  时间段内, 故障电流在主动限流控制器的

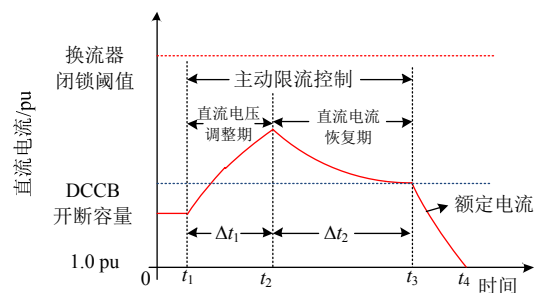


图 8 直流电网故障线路直流电流曲线

Fig. 8 Curve of DC current of faulty line in DC Grid

作用下逐渐降低。 $t_3$  时刻, DCCB 成功开断, 故障电流开始快速衰减为零。

### 3 主动限流控制性能验证仿真验证

为验证主动限流控制器性能, 搭建了如图 9 所示的单极性换流器测试系统。换流器采用前文所述的混合型 MMC 拓扑结构, 单个桥臂中包含 95 个 HBSM 和 95 个 FBSM。架空线长度 103 km, 使用 PSCAD 自带的频域相量模型(frequency dependent model)。仿真系统参数详见表 1。稳态运行时, 混合型 MMC 向直流侧电源  $U_{dc2}$  输送 1.5 GW 直流功率。在 2 s 时刻, 距离 MMC 直流母线 103 km 处发生永久性双极金属性短路故障, 故障电阻  $0.1 \Omega$ 。

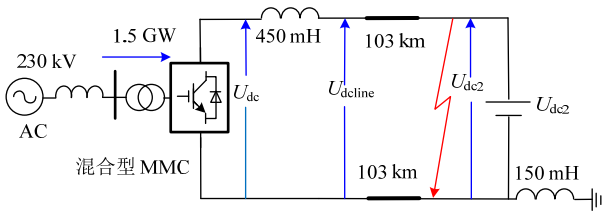


图 9 单换流器测试系统

Fig. 9 Test system based on single converter

表 1 单换流器测试系统仿真参数

Tab. 1 Parameters for simulation of single converter

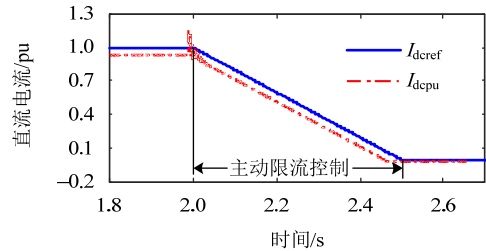
参数	额定值
混合型 MMC 额定容量	1.5 GW
额定直流电压( $U_{dcn}$ )	500 kV
交流系统额定电压	230 kV
短路比(SCR)	4.0
联结变压器变比	230 kV/290 kV
桥臂电感 $L$	50 mH
子模块电容值	15 mF
控制器延时	315 $\mu$ s

图 10(a)所示为故障前后直流电流指令值  $I_{dcref}$  与实际值  $I_{dcpu}$ 。2 s 时刻发生极对极短路故障, 极控制器检测到直流电压异常跌落到 0.7 pu 以下时, 经过 315  $\mu$ s 控制延时, 直流外环由直流功率控制模式切换到直接电流控制模式。经过 0.5 s,  $I_{dcref}$  由 1.0 pu 减小到 0。可以看出,  $I_{dcpu}$  能够较好的跟踪目标控制曲线  $I_{dcref}$ , 限流控制期间直流过电流小于 25%。

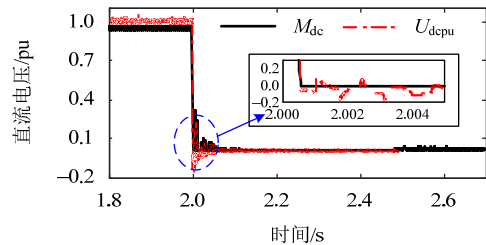
图 10(b)所示为换流器直流母线端口输出电压  $U_{dcpu}$  和直流调制比  $M_{dc}$ 。MMC 感知到线路故障发生后, 直流电流内环 PI 控制器快速调整输出值, 同时直流电压前馈控制器减小前馈输出, 进一步减小直流调制比  $M_{dc}$ 。通过调整桥臂投入的子模块数量, 使得  $U_{dcpu}$  能够自适应外部故障线路电压, 避免直流故障电流的进一步增大。

图 10(c)为 A 相上、下桥臂电流。直流侧短路后, 直流侧输出功率降为零。为了维持桥臂功率的

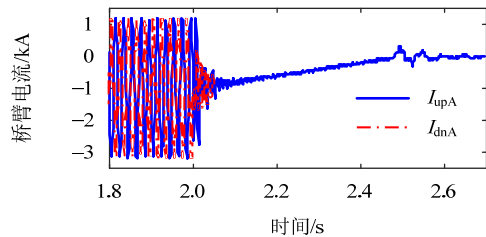
平衡, 防止子模块电容过电压, 交流电流控制器将减小有功电流指令, 从而降低 MMC 从交流系统吸收的有功功率, 因此桥臂电流基频分量迅速衰减为零。同时, 桥臂电流直流分量也随着直流电流的降低而逐渐减小。图 10(c)表明故障前后桥臂电流几乎无明显过电流。



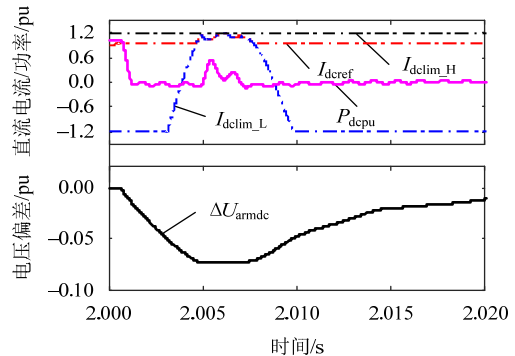
(a) 直流电流指令值与实际值



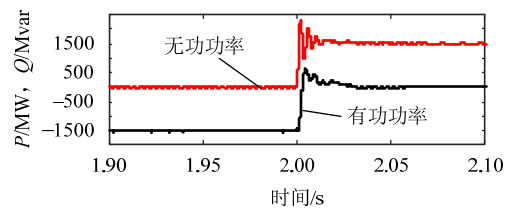
(b) MMC 直流端口输出电压和直流调制比



(c) MMC 的 A 相上、下桥臂电流



(d) 直流电流指令动态限幅器响应特性



(e) MMC 注入交流系统的有功和无功功率

图 10 单换流器测试响应特性

Fig. 10 Dynamic response characteristics of single converter

图 10(d)为直流电流指令动态限幅器响应特性。故障前 $\Delta U_{armpu}$ 不越限，上、下限幅控制器  $I_{dclim\_H}$  和  $I_{dclim\_L}$  分别输出限幅值 1.2 pu 和 -1.2 pu，直流电流指令值由直流外环功率控制器输出决定。短路故障发生后，直流侧平波电抗器暂态能量向换流器转移。同时，由于 MMC 直流侧功率输送路径中断，交流系统注入 MMC 的有功功率全部被桥臂吸收，过量的有功功率对子模块电容充电，造成  $U_{armdc}$  快速上升，使得控制器的跟踪误差 $\Delta U_{armpu}$ 短时间内越下限值-0.05。可以看到，下限幅控制器动作， $I_{dclim\_L}$  输出 1.2 pu，促使直流电流指令值  $I_{dref}$  增大到 1.2 pu。同时直流功率  $P_{dcpu}$  增大，释放桥臂内部电容的过量储能，降低桥臂电容电压。一旦 $\Delta U_{armpu}$ 恢复至允许的变化区间 $\pm 0.05$  以内，上、下限幅控制器  $I_{dclim\_H}$  和  $I_{dclim\_L}$  重新分别处于向上和向下饱和状态。

图 10(e)为 MMC 换流器注入交流系统的有功功率和无功功率。故障前，MMC 注入交流系统的有功功率和无功功率分别为-1500 MW 和 0 Mvar(MMC 运行于整流模式，实际上从交流系统吸收 1500 MW

有功功率)。在 2 s 时刻故障发生后，由于直流侧功率输送路径中断，MMC 从交流系统吸收的有功功率快速下降以防止 MMC 内部子模块电容产生较大过电压。同时，直流故障期间 MMC 向交流系统注入 1500 Mvar 无功功率，以维持交流系统交流电压质量。

### 4 主动限流控制在直流电网中的应用

#### 4.1 主动限流控制在直流电网中的可行性验证

为验证主动限流控制在直流电网中的可行性，搭建了如图 11 所示的单极性直流电网测试系统。换流器全部采用混合型 MMC 拓扑结构，单个桥臂中包含 95 个 HBSM 和 95 个 FBSM。换流器主回路参数详见表 2。架空线长度分别为 50 km, 206 km, 187 km, 205 km。线路等效直流电阻为 0.0011  $\Omega$ /km。安装在极线上的限流电抗器以及接地电抗器  $L_{dc1}$  大小为 150 mH，安装在金属回线上限流电抗器  $L_{dc2}$  大小为 300 mH。线路故障检测算法采用文献[30-31]所提出的电压微分检测算法。

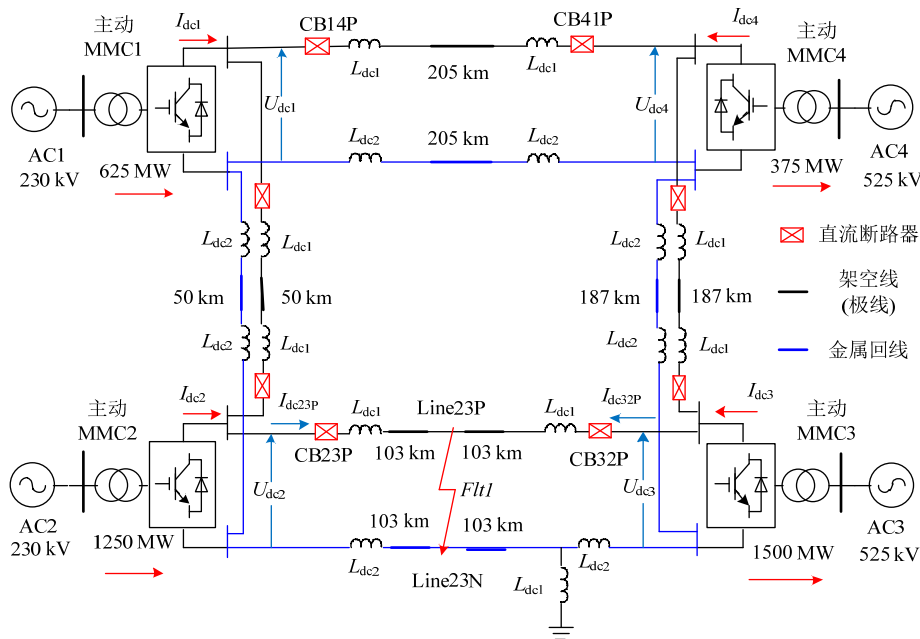


图 11 直流电网测试系统  
Fig. 11 Test system of DC grid

换流器	额定容量/ MW	额定直 流电压/ kV	交流系统 额定电压/ kV	联结 变变 比/kV	联结 变漏 抗/pu	桥臂 电感/ mH	子模块 电容值/ mF
MMC1	750	500	230	230/290	0.15	75	10
MMC2	1500	500	230	230/290	0.15	40	15
MMC3	1500	500	525	525/290	0.15	40	15
MMC4	750	500	525	525/290	0.15	75	10

直流电网初始运行时，换流站 MMC1 和 MMC2

共汇集 1875 MW 的有功功率，MMC3 和 MMC4 下网功率分别为 1500 MW 和 375 MW。MMC3 作为直流电压站维持直流电网电压，其余 3 个站均为功率站，控制直流电网与交流电网之间的功率交换。在 2 s 时刻，距离 MMC2 直流母线 103 km 处发生永久性双极金属性短路故障。故障检测时间设置为 2 ms，DCCB 开断时间设置为 8 ms。

图 12 所示为预设曲线选择曲线 3 时短路故障

前后直流电网动态响应特性。系统检测到故障后，向直流断路器 CB23P 和 CB32P 发送开断指令。换流站 MMC2 经过 315  $\mu\text{s}$  的控制延时从直流功率控制模式切换到直接直流电流控制模式。为了减小对交流系统的扰动，故障后 MMC2 的直流电流目标控制曲线采用图 3 中的曲线 2，即维持故障前直流电流大小。MMC3 继续保持直流电压控制模式。非故障线路两端的换流站 MMC1 和 MMC4 继续保持直流功率控制模式。

图 12(a)为换流器直流侧母线处极对极电压。故障期间，由于故障点的存在使得直流电压不可避免的逐渐跌落。直流电流内环中直流电压前馈控制器的存在使得 MMC 直流输出电压可以快速跟踪外部直流电压的变化，减小故障期间的直流过电流。由于本文中故障清除时间(包含故障检测时间和 DCCB 开断时间)长达 10 ms，导致故障期间直流电网电压会大幅度跌落至接近于零。在直流故障被隔离后，直流电压在直流电压站 MMC3 的控制下逐渐恢复。

图 12(b)表明，由于主动限流控制的作用，运行于整流模式的功率站 MMC2 直流侧故障电流  $I_{dc2pu}$  幅值仅仅为 1.1 pu 左右，而故障期间运行于逆变模式的电压站 MMC3 直流侧电流  $I_{dc3pu}$  反向增大，故障清除后经过 40 ms 逐渐恢复至额定值 1.0 pu。由流电压调整期保持时间稍大于 MMC2，导致故障期于 MMC1 距离故障点的电气距离较远，因此其直间  $I_{dc1pu}$  幅值达到 1.9 pu。从图 12(b)还可以看出，故障期间整流站要承受比逆变站更加严苛的故障电流。

图 12(c)所示为故障前后换流器直流功率动态特性。由于直流电压的跌落，导致故障期间直流功率几乎下降为零，但是在故障被清除后，整个直流电网的直流功率在 100 ms 左右快速恢复至故障前水平。对于小型直流电网，持续 100 ms 左右的直流功率中断不会影响其外部交流电网稳定性<sup>[4,27]</sup>。

图 12(d)、(e)分别为 MMC3、MMC1 上桥臂电流。故障期间桥臂无明显过电流，MMC 不会因过电流而闭锁。

图 12(f)为故障线路直流电流特性。故障发生后 10 ms, DCCB 成功开断，故障线路电流  $I_{dc23P}$  和  $I_{dc32P}$  开始快速衰减至零。由于主动限流控制器的限流作用，故障期间  $I_{dc23P}$  的峰值为 4.5 kA(2 倍额定电流)。注意到，在 DCCB 开断时刻  $I_{dc23P}$  电流已处于下降过程，相应的 DCCB 开断电流值为 4 kA。另一方面，故障期间直流系统内部感性元件储能也得到有

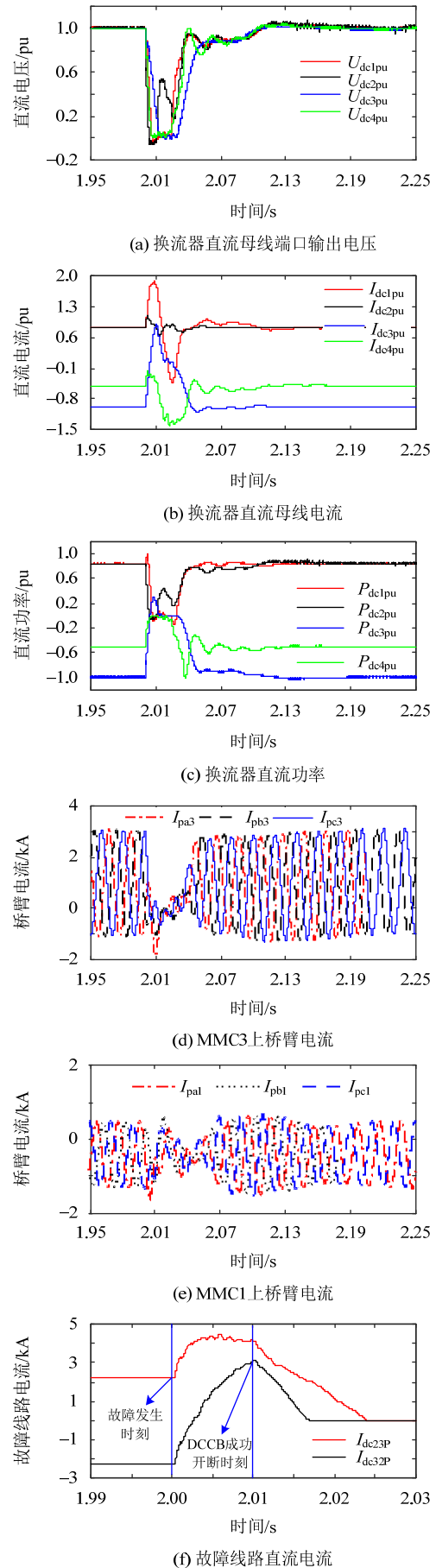


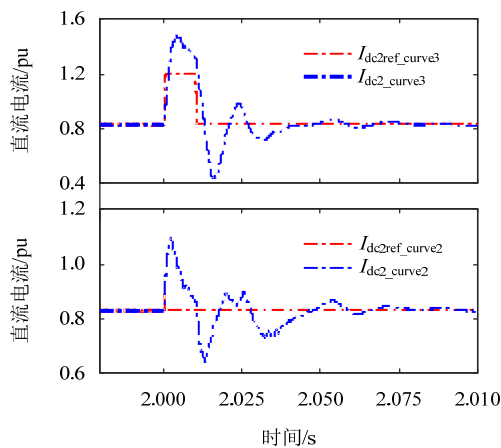
图 12 选择曲线 2 时直流电网动态响应特性  
Fig. 12 Dynamic response characteristics of DC grid



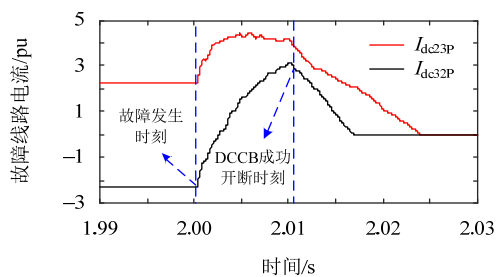
效抑制。可以看出, 主动限流控制可以有效的减小 DCCB 的开断容量以及对避雷器的能量耗散需求, 极大的降低 DCCB 制造成本与难度。

#### 4.2 不同目标预设曲线的可行性验证

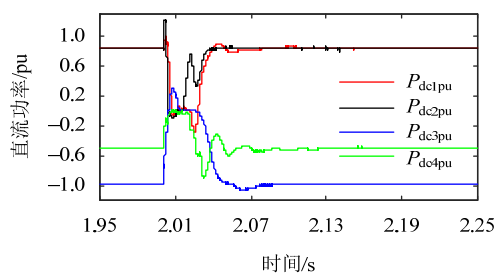
图 13 所示为预设曲线选择曲线 3 时直流电网响应特性。故障期间曲线 3 直流电流指令值  $I_{dc2ref\_curve3}$  为 1.2 pu, 一旦 DCCB 成功开断,  $I_{dc2ref\_curve3}$  恢复故障前水平 0.83 pu。故障期间曲线 2 直流电流指令值  $I_{dc2ref\_curve2}$  保持故障前水平 0.83 pu。仿真系统参数设置与 4.1 节一致。



(a) MMC2 直流母线电流指令值与实际值



(b) 故障线路直流电流



(c) 换流器直流功率

图 13 选择曲线 3 时直流电网动态响应特性

Fig. 13 Response of DC grid when curve 3 is selected

图 13(a)为 MMC2 直流电流预设曲线分别选择曲线 2 和 3 时 MMC2 直流母线电流指令值与实际值。可以看出, 预设曲线选择曲线 3 时对应的故障电流  $I_{dc2\_curve3}$  峰值达到 1.5 pu, 大于选择曲线 2 时对应的直流电流  $I_{dc2\_curve2}$  峰值(1.1 pu)。

对比图 12(e)和图 13(b)可知, 由于在 DCCB 开

断时刻, 故障线路直流电流  $I_{dc23P}$  和  $I_{dc32P}$  在主动限流控制器的作用下已经处于电流恢复期, 因此两种预设曲线对 DCCB 开断容量影响不大。

从图 13(c)可看出, 直流电网功率经过 70 ms 恢复至故障前水平。对比图 12(c)和图 13(c)可知, 预设曲线选择曲线 3 对加速直流电网功率恢复有一定的优势。

## 5 结论

1) 换流器之于直流电网, 就如同发电机之于交流电网, 充分利用换流器的可控性, 是提高直流电网运行特性的关键。本文充分利用主动换流器强大的控制能力, 提出了一套全新的应对架空柔直电网线路故障的主动限流控制方法, 并给出了一种主动限流控制的优化手段—电流目标预设控制曲线。

2) 直流故障发生后, 主动限流控制器首先主动调节换流器直流侧端口输出电压以自适应外部直流电压的变化, 从而限制故障电流的上升。然后按照预先设定的目标控制曲线将直流电流控制为所需要的值。最后通过慢速小容量的 DCCB 彻底开断故障电流, 以隔离直流故障。故障期间, 混合型换流器可以持续向交流系统提供无功支撑。在故障被隔离后, 整个直流电网的直流功率可以在 70~100 ms 左右快速恢复至故障前水平。

3) 分析表明控制器延时对主动限流控制的影响基本可以忽略。

4) 针对单换流器系统和直流电网不同应用场景, 论文定性分析了故障前后直流电流的演变机理, 最后通过仿真验证了前文理论分析的正确性以及所提出的主动限流控制器的有效性。

5) 分析和仿真结果同时表明, 主动限流控制极大地降低了对 DCCB 开断速度和开断容量的要求, 从而大幅降低 DCCB 的技术难度和制造成本。

6) 本文研究可以为架空柔直电网线路故障应对提供参考, 下一步工作将详细研究主动限流控制对 DCCB 的开断时间和开断容量的要求以及换流器主动限流控制与 DCCB 的协调控制。

## 参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [2] 周勤勇. 亚洲电网互联模式探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1491-1497.

- Zhou Qinyong. Discussion on interconnection mode of Asian power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1491-1497(in Chinese).
- [3] 孙玉娇,周勤勇,申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1929-1935.  
Sun Yujiao, Zhou Qinyong, Shen Hong. Analysis and prospect on development patterns of China is power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935(in Chinese).
- [4] 徐政,薛英林,张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.  
Xu Zheng, Xue Yinglin, Zhang Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062(in Chinese).
- [5] 吴亚楠,吕铮,贺之渊,等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3734.  
Wu Yanan, Lü Zheng, He Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733(in Chinese).
- [6] 孙栩,曹士冬,卜广全,等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 678-682.  
Sun Xu, Cao Shidong, Bu Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682(in Chinese).
- [7] 李英彪,卜广全,王姗姗,等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3391-3399.  
Li Yingbiao, Bu Guangquan, Wang Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3391-3399(in Chinese).
- [8] 潘垣,尹项根,胡家兵,等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.  
Pan Yuan, Yin Xianggen, Hu Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in West China based on flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629(in Chinese).
- [9] 周猛,左文平,林卫星,等. 电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1045-1052.  
Zhou Meng, Zuo Wenping, Lin Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and its application in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1045-1052(in Chinese).
- [10] W Zhou. Development and test of a 200 kV full-bridge based hybrid HVDC breaker[C]//2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications(EPE'15). Geneva: IEEE, 2015: 1-7.
- [11] 陈名,徐惠,张祖安,等. 耦合型机械式高压直流断路器设计及仿真[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 380-387.  
Chen Ming, Xu Hui, Zhang Zu'an, et al. Design and simulation of coupling mechanical high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 380-387(in Chinese).
- [12] 魏晓光,杨兵建,汤广福. 高压直流断路器技术发展与实践[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3180-3188.  
Wei Xiaoguang, Yang Bingjian, Tang Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3180-3188(in Chinese).
- [13] 张北柔直项目启动产品招标,柔直技术将成为直流输电重要路线[EB/OL]. 国金证券股份有限公司, 2018[2018-04-29]. [http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP201804021115374845\\_1.pdf](http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP201804021115374845_1.pdf)
- [14] 宋国兵,陶然,李斌,等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.  
Song Guobing, Tao Ran, Li Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12(in Chinese).
- [15] Li Xiaoqian, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability[C]//2013 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 6182-6188.
- [16] 薛英林,徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63-70.  
Xue Yinglin, Xu Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70(in Chinese).
- [17] 向往,林卫星,文劲宇,等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5179.  
Xiang Wang, Lin Weixing, Wen Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179(in Chinese).
- [18] 李斌,李晔,何佳伟. 具有直流故障清除能力的 MMC 子模块关键性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2114-2122.  
Li Bin, Li Ye, He Jiawei. Research on the key properties of MMC sub-modules with DC fault Eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2114-2122(in Chinese).
- [19] Li R, Fletcher J E, Xu L, Holliday D and Williams B W. A hybrid modular multilevel converter with novel three-level cells for DC fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 30(4): 2017-2026.
- [20] 赵成勇,许建中,李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学技术科学, 2013, 43(1): 106-114.  
Zhao Chengyong, Xu Jianzhong, Li Tan. DC faults ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC system[J]. Science China: Technology Science, 2013, 43(1): 106-114(in Chinese).
- [21] Xiang W, Lin W, Xu L and Wen J. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, PP(99): 1-1. doi: 10.1109/TPWRD.2017.2715040
- [22] J. Hu, K. Xu, L. Lin and R. Zeng, "Analysis and enhanced control of Hybrid-MMC-Based HVDC systems during asymmetrical DC voltage faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 32(3): 1394-1403.
- [23] 孔明,汤广福,贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.  
Kong Ming, Tang Guangfu, He Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351(in Chinese).
- [24] 罗永捷,李耀华,李子欣,等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.  
Luo Yongjie, Li Yaohua, Li Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943(in Chinese).
- [25] 李少华,王秀丽,李泰,等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策

略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.

Li Shaohua, Wang Xiuli, Li Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858(in Chinese).

- [26] Lin W, Jovcic D, Nguefeu S and Saad H. Full-Bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(3): 1342-1350.
- [27] CIGRE WG B4.52. HVDC grid feasibility study[Z]. CIGRE technical brochure 533, 2013: 20-40.
- [28] 徐政, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 211-229.
- [29] Bucher M K, Franck C M. Contribution of fault current sources in multiterminal HVDC cable networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1796-1803.
- [30] Sneath J, Rajapakse A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 31(3): 973-981.
- [31] Lin Weixing, Jovcic D, Nguefeu S and Saad H. Coordination of MMC converter protection and DC line protection in DC grids [C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA: IEEE, 2016: 1-5.



周猛

收稿日期: 2018-01-15。

作者简介:

周猛(1988), 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流输电等, E-mail: zhoumeng4077@foxmail.com;

向往(1990), 男, 博士, 通信作者, 主要研究方向为柔性直流输电、直流电网等, E-mail: xiangwang1003@foxmail.com;

林卫星(1986), 男, 博士, 主要研究方向为直流输电、直流电网、MMC, E-mail: weixinglin@foxmail.com;

文劲宇(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、直流输电等, E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn;

左文平(1988), 男, 博士, 主要研究方向为直流输电等, E-mail: radio.zuo@foxmail.com。

(实习编辑 宋钰龙)