

DOI: 10.7667/PSPC160522

子模块混联 MMC-HVDC 系统直流侧短路 故障电流抑制方法

李红梅¹, 行登江², 高扬³, 吴金龙², 艾芊³

(1. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 2. 西安许继电力电子有限公司, 陕西 西安 710075;
3. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 考虑到目前直流输电系统故障难以快速清除且故障后系统重启的复杂度较高, 基于全桥及半桥混联的模块化多电平换流器系统, 提出一种直流双极短路故障电流抑制方法。首先根据系统调制裕量计算得到用于抑制故障电流的抑制电压。然后进行判断, 当故障电流大于电流上限值时, 控制每相级联电压为负的抑制电压; 当故障电流小于电流下限值时, 控制每相级联电压为正的抑制电压; 当故障电流位于电流上、下限值之间时, 控制每相级联电压为零, 此时系统等效为两个并联的无功补偿器, 可以为电网持续提供无功支撑。该方法能够在系统不闭锁的情况下快速将故障电流抑制在给定的范围内, 算法简单、容易实现。最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建了 MMC-HVDC 双端系统仿真模型, 验证了所提出的故障电流抑制方法的正确性和有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 直流双极短路故障; 故障电流抑制; 抑制电压; 相级联电压

A DC pole-to-pole fault current suppression strategy of the half-and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter

LI Hongmei¹, XING Dengjiang², GAO Yang³, WU Jinlong², AI Qian³

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 2. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Given the current difficulties to remove faults in DC transmission system and high complexity for the system to restart after faults, a method to suppress the DC pole-to-pole fault current is proposed for half- and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter (MMC). Firstly, the suppression voltage used to suppress the fault current is computed according to modulation margin of system. Then considering the fault current, if it is larger than the upper limit value, the phase cascaded voltage is controlled as a negative suppression voltage. If the fault current is smaller than the lower limit value, the phase cascaded voltage is controlled as a positive suppression voltage. If the fault current is between them, the phase cascaded voltage is controlled as zero, and the valve is equal to two STATCOMs in parallel which can provide reactive power for the grid. This method is simple to carry out and can limit the fault current in a given period quickly by not blocking the valve. Finally, a two-terminal MMC-HVDC transmission system is constructed in PSCAD/EMTDC, and simulation results show that the method mentioned above is correct.

Key words: modular multilevel converter; DC pole-to-pole fault; fault current suppression; suppression voltage; phase cascaded voltage

0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统 (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC) 由于其无需交流滤波器、可靠性高和易于扩展等优点, 是高压大容量柔

性直流输电系统的发展趋势^[1-9]。将架空线引入柔性直流输电系统中, 可以克服直流电缆造价高、输送功率受限的缺点^[10-12], 但较高的直流故障发生率给直流输电系统的安全可靠运行带来极大挑战^[13-14]。目前直流断路器的制造工艺尚不成熟, 难以在工程中直接推广应用, 导致直流侧发生的故障难以快速

清除^[15]。直流双极短路故障是直流故障的一种，目前已投运的基于半桥级联的 MMC-HVDC 系统由于没有直流故障电流抑制能力，当系统发生直流双极短路故障时，只能闭锁换流器并跳闸交流断路器^[15]，不仅造成直流停运，同时增加了故障清除后系统恢复重启的复杂度。

现有文献已经对 MMC-HVDC 系统直流故障电流抑制方法进行了研究。文献[16-18]将 MMC 的技术特点和两电平换流器相结合，提出了混合级联多电平换流器和桥臂交替导通多电平换流器，具有直流电流闭锁能力，无需交流断路器动作即可快速抑制直流故障电流，但是换流器控制策略复杂，且会在直流侧引入大量的谐波。文献[19]提出了利用全桥子模块和箝位双子模块反向电压来抑制直流双极短路故障电流，但是全桥子模块开关器件利用率不高，运行损耗较大，且在直流故障期间需要闭锁换流器，故障后恢复重启时过程较繁琐、耗时较长。文献[20]基于全桥与半桥混联的 MMC 拓扑，提出了一种基于虚拟电阻的故障电流抑制方法，能够在系统不闭锁的情况下实现故障电流的抑制，同时向交流电网提供持续的无功支撑，但是该方法对虚拟电阻的选取过程较复杂，电流波动较大，暂态过程较长，且电流大小不可控，不利于故障线路的快速隔离。

为在系统发生直流双极短路故障时，能够向交流电网持续提供无功支撑，同时能够在故障清除所需的时间内快速将故障电流抑制在给定的较小范围内，以便实现故障线路的快速隔离，故障电流抑制策略可以减小对故障清除装置的冲击，同时有利于电容电压的平衡，便于故障后的系统的重启，尽可能的减小故障电流对系统的影响，本文基于全桥及半桥级联 MMC 拓扑，提出一种基于电流限值的故障电流抑制方法，分析了故障电流的抑制原理及实现过程，并在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建了双端仿真模型，验证了故障电流抑制策略的正确性和有效性。

1 MMC-HVDC 系统简介

1.1 MMC 拓扑介绍

MMC 换流器拓扑结构^[21]如图 1 所示，由三相六个桥臂组成，每个桥臂由 $N/2$ 个半桥子模块、 $N/2$ 个全桥子模块和一个桥臂电抗器串联构成，上下 2 个桥臂构成一个相单元。其中 HBSM 为半桥子模块，FBSM 为全桥子模块， N 为桥臂子模块数， C 为子模块电容， L 为桥臂电抗器。

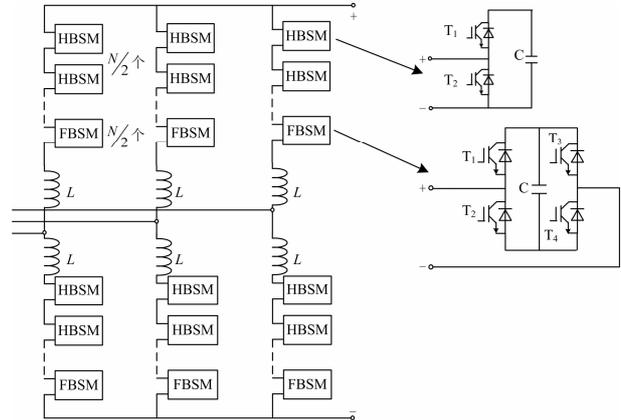


图 1 换流器拓扑

Fig. 1 Converter topology

1.2 MMC 工作原理

MMC 通过控制 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的导通和关断，可以实现子模块不同的输出状态，如表 1、表 2 所示。正常运行时每相每时刻投入的子模块个数之和为 N ，通过控制每相上下桥臂投入的子模块个数来拟合出期望的交流输出电压，从而实现功率的控制和传输^[22-26]。

表 1 半桥 IGBT 状态与子模块状态

Table 1 State of half bridge IGBT and sub module

IGBT 状态		子模块状态
T_1	T_2	
1	0	投入状态
0	1	切除状态
0	0	闭锁状态

表 2 全桥 IGBT 状态与子模块状态

Table 2 Full bridge IGBT state and sub module state

IGBT 状态				子模块状态
T_1	T_2	T_3	T_4	
1	0	0	1	投入状态
0	1	0	1	切除状态
1	0	1	0	切除状态
0	1	1	0	负电平
0	0	0	0	闭锁状态

2 故障电流抑制策略

2.1 抑制电压计算

故障电流的抑制主要靠施加反向电压来实现。故障电流抑制过程中，半桥子模块为切除状态，全桥子模块正常运行，为保证桥臂输出电压能够跟随上层指令，每相的级联输出电压即用于抑制故障电流的抑制电压不能太高。本文提出一种根据调制裕量来计算抑制电压的方法，系统检测到直流双极短路故障发生后，即进入故障电流抑制模式，此时

换流器等效于两个并联的无功补偿器, 有功基本为零, 但继续向系统输出无功功率, 无功补偿器的调制度 k 可以计算为

$$k = \frac{\frac{\sqrt{2}U_{\text{rms}}}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{2}\pi f Q}{\sqrt{3}U_{\text{rms}}} \cdot (2L_{\sigma} + L_{\text{arm}})}{\frac{1}{2}U_{\text{dc}}} \quad (1)$$

式中: U_{rms} 为阀侧线电压有效值; f 为工频频率; Q 为额定运行时无功功率; L_{σ} 为变压器短路阻抗; L_{arm} 为桥臂电抗器; U_{dc} 为直流母线电压。

系统剩余可利用的调制度 k_0 为

$$k_0 = 1 - k \quad (2)$$

由此可计算系统剩余可利用的电压 U_0 为

$$U_0 = U_{\text{dc}}(1 - k) \quad (3)$$

同时考虑子模块电容的额定工作电压, 用于抑制故障电流的抑制电压应为子模块电容电压的整数倍, 因此可以计算抑制电压 U_{sup} 为

$$U_{\text{sup}} = \left\lfloor \frac{U_{\text{dc}}(1 - k)}{U_{\text{sm}}} \right\rfloor \cdot U_{\text{sm}} \quad (4)$$

式中, U_{sm} 为子模块电容额定工作电压。

2.2 故障电流抑制方案

本文所示故障电流抑制方法主要通过通过对故障回路施加反向电压来实现, 即需要根据故障电流的大小和方向来确定抑制电压的方向。根据故障电流的大小和方向可以将电流抑制过程分成三种情况。

1) 故障电流 I_{fault} 大于上限值 I_{up}

当故障电流大于给定的故障电流上限值时, 将故障回路电压即每相级联输出电压控制为 $-U_{\text{sup}}$, 以控制故障电流在上限值 I_{up} 以下范围内。

2) 故障电流 I_{fault} 小于下限值 I_{down}

当故障电流小于给定的故障电流下限值时, 将故障回路电压即每相级联输出电压控制为 U_{sup} , 以控制故障电流在下限值 I_{down} 以上的范围内。

3) 故障电流 I_{fault} 位于上下限值之间

当故障电流被抑制在上下限值之间时, 故障电流很小, 认为故障电流已经接近零, 将换流器半桥子模块全部切除, 剩余全桥子模块控制为两个并联的无功补偿器, 为交流电网提供持续的无功支撑。

由此可得故障电流抑制方案流程图如图 2 所示。

2.3 故障电流抑制方案实现

当系统检测到直流双极短路故障发生后, 系统将由正常运行模式切换至故障电流抑制模式, 后者与前者相比, 在直流电压控制、调制策略方面有所不同, 本节就这两个方面对故障电流抑制方案的实现方法进行说明。

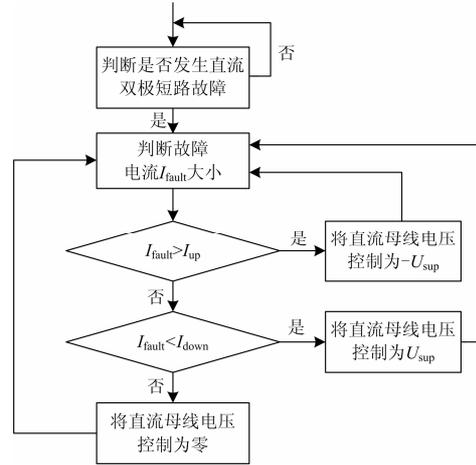


图 2 故障电流抑制方案图示

Fig. 2 Fault current suppression scheme

1) 直流电压控制

直流双极短路故障发生后, 直流母线电压降为零, 使用原本的直流母线电压控制环无法实现直流电压的控制, 考虑到仍需将电容电压控制在额定值附近, 则增加电容电压的平均控制器作为直流电压环, 并为有功电流环提供参考值。电容电压平均控制器框图如图 3 所示。

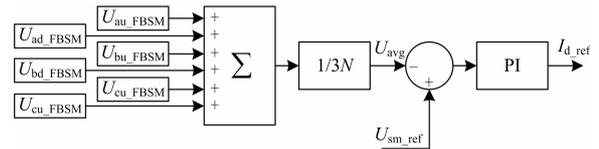


图 3 电容电压平均控制器框图

Fig. 3 Block diagram of capacitor voltage average controller

图中, $U_{j\text{u_FBSM}}(j=a, b, c)$ 为 j 相上桥臂全桥子模块电容电压之和, $U_{j\text{d_FBSM}}(j=a, b, c)$ 为 j 相下桥臂全桥子模块电容电压之和, U_{avg} 为所有全桥子模块电容电压平均值, $U_{\text{sm_ref}}$ 为电容电压额定值, $I_{\text{d_ref}}$ 为有功电流指令值。

由此可得直流双极短路故障发生前后, 直流电压环的切换方式如图 4 所示。

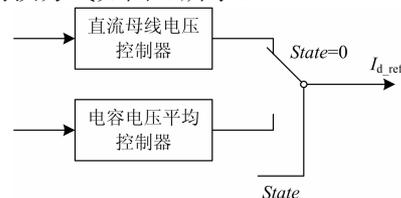


图 4 直流电压环切换图示

Fig. 4 Diagram of DC voltage loop switching

图中, $State$ 为系统状态, $State$ 为 0 时表示系统正常运行, $State$ 为 1 时表示系统检测到直流双极短路故障发生。

2) 调制策略

系统发生直流双极短路故障后, 需要将每相级联电压控制为 U_{sup} 、 $-U_{sup}$ 或者零, 而原调制策略旨在将每相级联电压控制为 U_{dc} , 有所不同, 因此需要重新配置调制策略。由式(4)可知, 抑制电压等效于 n 个子模块电容电压之和, n 可以计算为

$$n = \left\lfloor \frac{U_{dc}(1-k)}{U_{sm}} \right\rfloor \quad (5)$$

(1) 故障电流大于上限值

故障电流大于上限值时, 需要将每相级联电压控制为 $-U_{sup}$, 在每相投入的子模块个数上则表现为上下桥臂中处于正投入的全桥子模块个数比处于负投入的全桥子模块个数少 n 个, 由于上下桥臂调制波反相, 为实现这一工况, 需要将上下桥臂的调制波同时减去 $n/2$, 此时调制波的生成框图如图 5 所示。

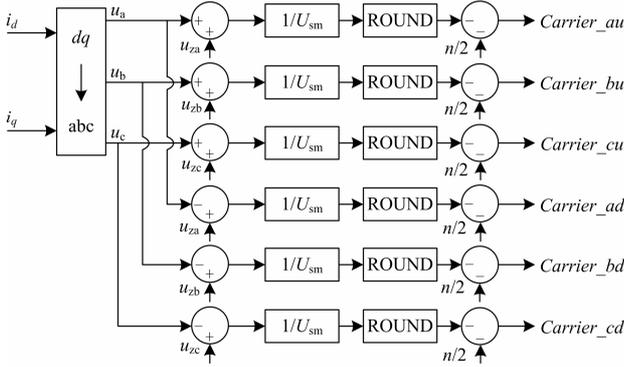


图 5 调制波生成框图

Fig. 5 Block diagram of modulated wave

图中, i_d 、 i_q 为有功、无功电流分量, $u_j(j=a,b,c)$ 为有功、无功电流分量经 dq 反变换生成的 j 相电压, $u_{zj}(j=a,b,c)$ 为 j 相环流控制器输出, $Carrier_{ju}(j=a,b,c)$ 为 j 相上桥臂调制波, $Carrier_{jd}(j=a,b,c)$ 为 j 相下桥臂调制波。

调制波产生之后, 就需要根据调制波来确定每个桥臂中每个子模块的工作状态, 本文仍选用排序法作为桥臂内子模块之间的均压算法, 以桥臂为单位对电容电压进行排序后, 根据调制波的值及桥臂电流方向作如下处理:

- ① 当调制波大于零, 且桥臂电流为正时, 子模块表现为对电容充电, 选择桥臂内电压较小, 个数为调制波的全桥子模块正投入, 其他子模块切除;
- ② 当调制波大于零, 且桥臂电流为负时, 子模块表现为对电容放电, 选择桥臂内电压较大, 个数为调制波的全桥子模块正投入, 其他子模块切除;
- ③ 当调制波小于零, 且桥臂电流为正时, 子模块表现为对电容放电, 选择桥臂内电压较大, 个数为调制波的全桥子模块负投入, 其他子模块切除;

为调制波的全桥子模块负投入, 其他子模块切除;

- ④ 当调制波小于零, 且桥臂电流为负时, 子模块表现为对电容充电, 选择桥臂内电压较大, 个数为调制波的全桥子模块负投入, 其他子模块切除;

通过以上对调制算法的修改, 可以实现 $-U_{sup}$ 的单相级联电压输出。

(2) 故障电流小于下限值

故障电流小于下限值时, 需要将单相级联电压控制为 U_{sup} , 在每相投入的子模块个数上则表现为上下桥臂中处于负投入的全桥子模块个数比处于正投入的全桥子模块个数少 n 个, 由于上下桥臂调制波反相, 为实现这一工况, 需要将上下桥臂的调制波同时加上 $n/2$, 此时调制波的生成框图如图 6 所示。

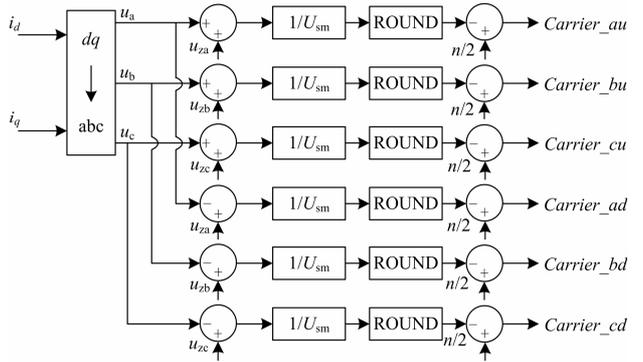


图 6 调制波生成框图

Fig. 6 Block diagram of modulated wave

子模块工作状态确定方法与故障电流大于上限值时一致, 这里不再赘述。

(3) 故障电流位于上下限之间

故障电流位于上下限值之间时, 需要将单相级联电压控制为零, 在每相投入的子模块个数上则表现为上下桥臂中处于负投入的全桥子模块个数与处于正投入的全桥子模块个数相等, 上下桥臂调制波反相, 此时调制波的生成框图如图 7 所示。

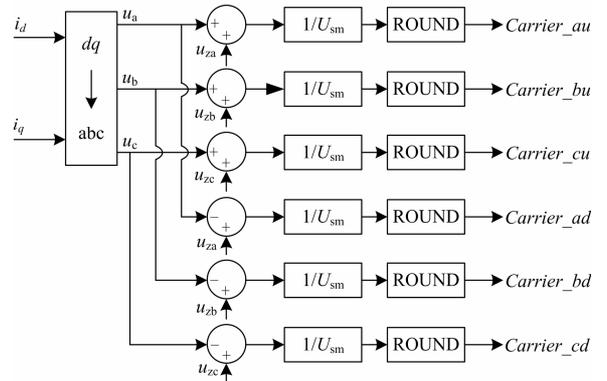


图 7 调制波生成框图

Fig. 7 Block diagram of modulated wave

子模块工作状态确定方法与故障电流大于上限值时一致, 这里不再赘述。

3 仿真实验

本文给出了一种直流双极短路故障电流抑制方法, 通过将每相级联电压控制为正的抑制电压或者负的抑制电压来抑制故障电流, 并最终实现故障期间换流器的 STATCOM 模式运行, 能够为交流电网提供持续的无功支撑。本节从并网功率、电容电压、直流电流三个方面对所示直流双极短路故障电流抑制方法的正确性和有效性进行仿真实验。

3.1 仿真模型介绍

在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建基于全桥与半桥混联的 MMC-HVDC 的双端仿真模型, 直流母线电压为 ± 1200 V, 系统容量 20 kW, 两端的参数完全相同。双端仿真模型相关参数具体如表 1 所示。

表 1 双端 MMC-HVDC 系统参数

Table 1 Parameters of MMC-HVDC

参数	取值及单位	
直流母线电压	± 1200 V	
变压器容量	25 kVA	
变压器变比	380 V/1250 V	
联接变短路阻抗	6%	
系统容量	有功	20 kW
	无功	6 kvar
交流阀侧线电压(有效值)	1250 kV	
桥臂	HBSM	10 个
子模块数	FBSM	10 个
子模块额定电压		120 V
HBSM 电容值		1 mF
FBSM 电容值		2 mF
桥臂电抗器		0.05 H
接地电阻		1200 Ω

3.2 抑制策略参数配置

1) 抑制电压计算

由表 1 可知, 变压器容量为 25 kVA, 阀侧线电压有效值为 1250 V, 短路阻抗为 6%, 因此可以计算变压器短路阻抗等效电感值为

$$L_{\sigma} = \frac{U_{rms}^2 \cdot 0.06}{S} \cdot \frac{1}{2\pi f} = 0.012 \text{H} \quad (6)$$

式中, S 为变压器容量。

将式(6)以及相关参数代入式(1)中即可计算得到换流器工作于 STATCOM 模式时调制度为

$$k = 0.8885 \quad (7)$$

将式(7)及相关参数代入式(4)即可得到用于抑制故障电流的故障电压为

$$U_{sup} = 240 \text{V} \quad (8)$$

由式(8)可知, 抑制电压计算结果等效于两个子模块电容电压的和, 即 $n=2$ 。

2) 电流限值配置

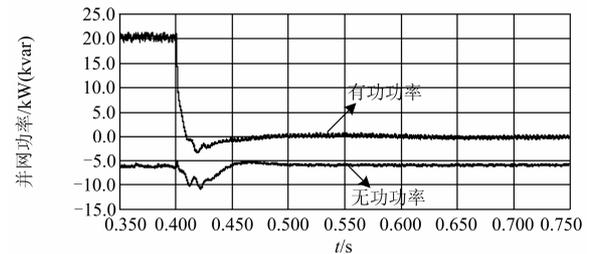
本文所示故障电流抑制方法, 依据故障电流大小调整抑制电压的方向, 且能够将故障电流抑制在限值限定的范围内。为验证电流限值的有效性, 设定限值分别为 0.5 p.u.、0.2 p.u.、0.1 p.u.时, 分别对故障过程进行仿真。

3.3 仿真实验

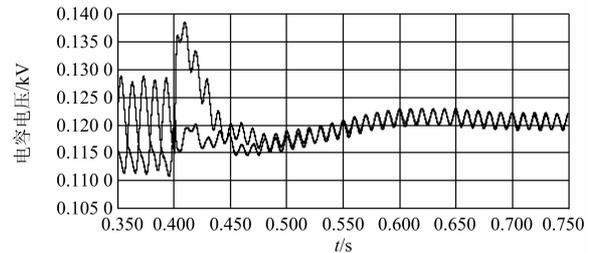
仿真过程设定系统在 0.4 s 时刻发生直流双极短路故障, 且为永久性故障。

1) 电流限值为 0.5 p.u.

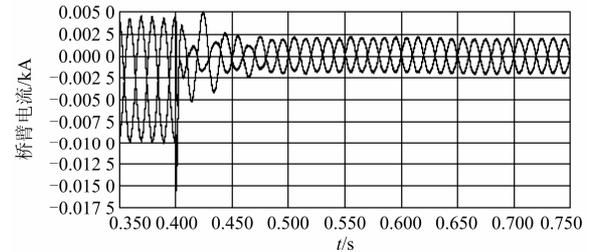
故障电流限值设定为 0.5 p.u.即 4.17 A 时, 仿真得到并网功率波形、电容电压及桥臂电流波形、直流母线电压及电流波形如图 8 所示, 由于故障时刻 b 相桥臂电流最大, 因此仅给出 b 相电容电压及桥臂电流波形。



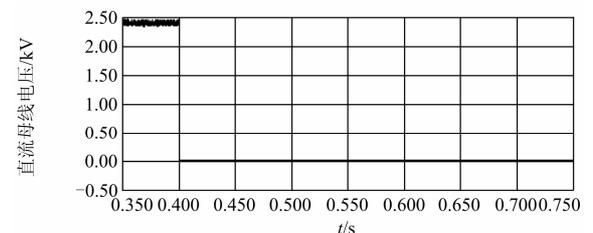
(a) 并网功率波形



(b) 电容电压波形(b相)



(c) 桥臂电流波形(b相)



(d) 直流电压波形

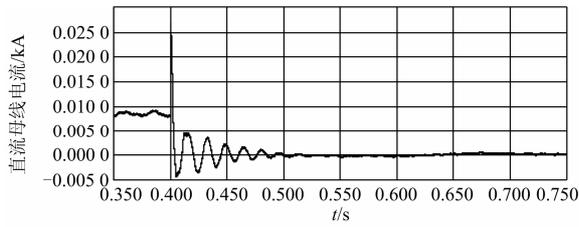


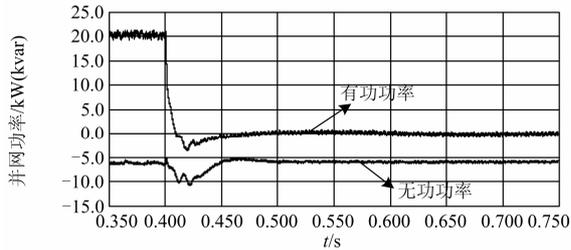
图 8 电流限值为 0.5 p.u. 时仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform when the current limit is 0.5 p.u.

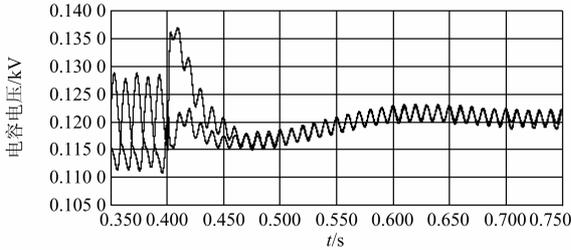
由图 8 可知，故障期间，换流器仍然能够为交流电网提供-6 kvar 的无功功率，电容电压最大值约为 138 V，桥臂电流暂态过程较长，直流故障电流被抑制在 4.17 A 以内。

2) 电流限值为 0.2 p.u.

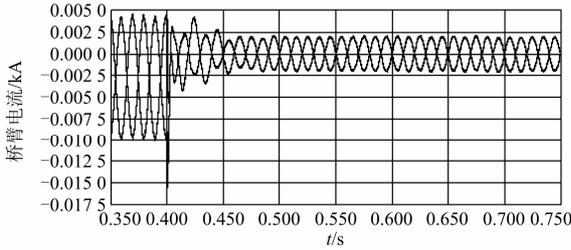
故障电流限值设定为 0.2 p.u.即 1.67 A 时，仿真得到并网功率波形、电容电压及桥臂电流波形、直流母线电压及电流波形如图 9 所示。



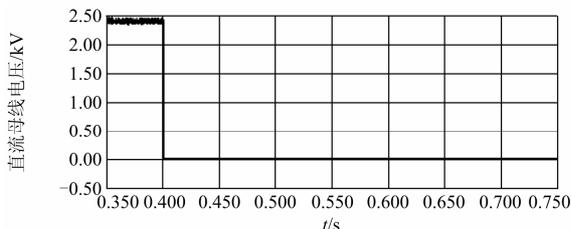
(a) 并网功率波形



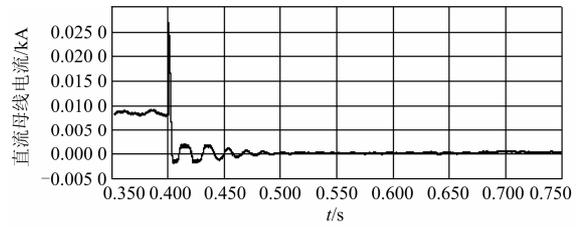
(b) 电容电压波形



(c) 桥臂电流波形



(d) 直流电压波形



(e) 直流电流波形

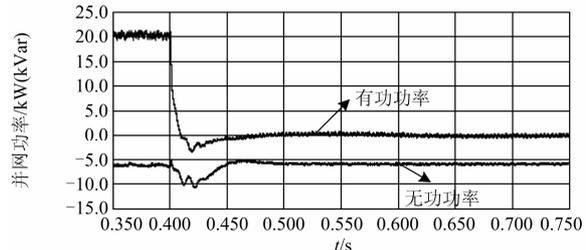
图 9 电流限值为 0.2 p.u. 时仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform when the current limit is 0.2 p.u.

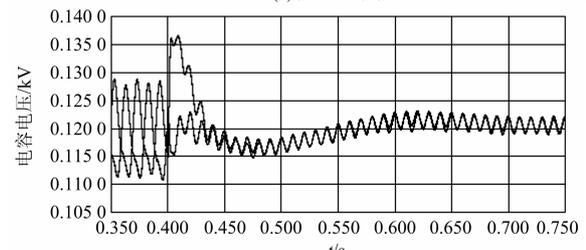
由图 9 可知，故障期间，换流器仍然能够为交流电网提供-6 kvar 的无功功率，电容电压最大值约为 136.5 V，桥臂电流暂态过程缩短，直流故障电流被抑制在 1.67A 以内。

3) 电流限值为 0.1 p.u.

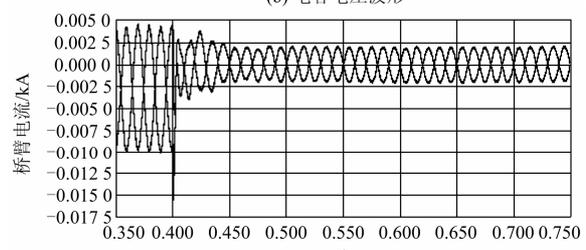
故障电流限值设定为 0.1 p.u.即 0.83 A 时，仿真得到并网功率波形、电容电压及桥臂电流波形、直流母线电压及电流波形如图 10 所示。



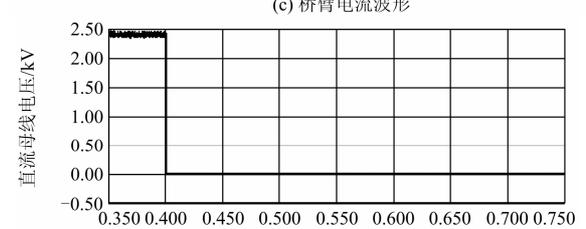
(a) 并网功率波形



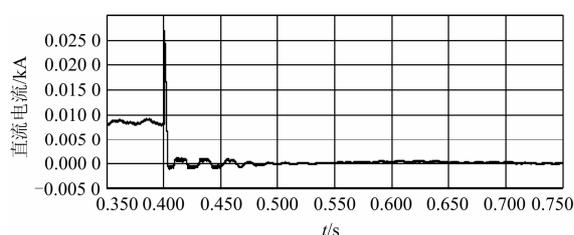
(b) 电容电压波形



(c) 桥臂电流波形



(d) 直流电压波形



(e) 直流电流波形

图 10 电流限值为 0.1 p.u. 时仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform when the current limit is 0.1 p.u.

由图 10 可知, 故障期间, 换流器仍然能够为交流电网提供-6 kvar 的无功功率, 电容电压最大值约为 136 V, 桥臂电流暂态过程较短, 直流故障电流被抑制在 0.83 A 以内。

对比图 8 至图 10 仿真波形可知, 本文所示故障电流抑制策略, 能够将故障电流快速抑制在给定范围内, 对于不同的电流限值, 故障电流均可以在 0.1 s 内趋于稳定, 直流输电系统中的直流双极端路故障清除时间在 0.2 s 左右, 因此本文提出的策略有利于减小故障电流的影响。随着故障电流限值的降低, 故障期间电容电压的最大值降低, 桥臂电流暂态过程缩短, 有利于实现对故障线路的快速隔离, 且故障清除后上下桥臂电容电压平衡的所需时间大大缩短, 上下桥臂投入的子模块数对称性也更高, 有利于故障后的系统的修复和重启。

4 结论

本文基于全桥及半桥混联 MMC-HVDC 系统, 提出了一种直流双极短路故障电流的抑制方法, 分析了不同电流限值下的电压控制和调制策略, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端仿真模型进行了仿真验证, 得到了以下结论:

1) 本文所示故障电流抑制方法能够快速、有效地将故障电流抑制在给定的较小范围内, 减小了故障电流的影响, 有利于故障线路的快速隔离, 减小了对故障清除装置的冲击;

2) 选择较小的故障电流限值, 能够降低暂态过程中电容电压、桥臂电流的峰值, 缩短暂态持续时间, 利于电容电压的平衡控制, 以及故障消除后系统的恢复运行;

3) 在故障期间, 换流阀可以等效为两个并联的链式 H 桥 STATCOM, 能够为交流电网提供持续的无功支撑, 减少了直流侧故障对交流电网的负面影响。

参考文献

[1] LESNICAR A, MARGUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power

range[C] // IEEE Power Tech Conference. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 23-26.

[2] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-15.

YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG T Q, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.

[3] 余露杰, 赵成勇. 基于 MMC 的高压直流三极输电技术[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 838-843.

YU Lujie, ZHAO Chengyong. Modular multilevel converter based tri-pole HVDC power transmission technology[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 838-843.

[4] 江丽丽, 马文忠, 李林欢, 等. 模块化多电平换流器的容错控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2497-2503.

JIANG Lili, MA Wenzhong, LI Linhuan, et al. A fault-tolerant control strategy of modular multi-level converters[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2497-2503.

[5] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 27-42.

[6] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C] // IEEE International Power Electronics Conference(IPEC). Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 502-507.

[7] 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.

[8] PENG F Z, LAI J S, MC-KEEVER J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static Var generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.

[9] WANG K, LI Y D, ZHENG Z D. A new transformerless cascaded multilevel converter topology[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. California, USA: IEEE, 2009: 3124-3129.

[10] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.

TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

- [11] 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: 1-10.
- [12] 丁钊, 韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-55.
DING Zhao, HAN Weiqiang. Summary of bipolar operation situation of Tianguang DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-55.
- [13] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-175.
REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-175.
- [14] 周建. MMC-HVDC 故障分析和保护策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
ZHOU Jian. Faults analysis and protection strategy for MMC-HVDC system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [15] 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): 74-78.
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): 74-78.
- [16] 王珊珊, 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.
- [17] TRAINER D R, DAVIDSON C C, OATES C D M, et al. A new hybrid voltage-sourced converter for HVDC power transmission[C] // CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2010: 1-12.
- [18] ADAM G P, FINNEY S J, WILLIAMS B W, et al. Network fault tolerant voltage-source-converters for high-voltage applications[C] // 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 2010: 1-5.
- [19] MERLIN M M C, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C] // 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 2010: 1-5.
- [20] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with dc-short circuit current limitation[C] // 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE&ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [21] 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.
- [22] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C] // IEEE International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 502-507.
- [23] LESNICAR A, MARQUARDT R. A new modular voltage source inverter topology[C] // European Conference on Power Electronics and Applications. Toulous, France: European Conference on Power Electronics and Applications, 2003: 1-10.
- [24] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.
- [25] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 1-8.
ZHOU Yang, CHANG Fei. Quick model of MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 1-8.
- [26] 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.

收稿日期: 2016-04-13

作者简介:

李红梅(1962-), 女, 通信作者, 本科, 主要从事电力系统自动化、柔性直流输电等方向的研究和管理工作。
E-mail: 13688639496@163.com

(编辑 姜新丽)