

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.040

# 应用于配网的MMC直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略

高泽盟, 李卫国, 杨洪达, 周银平, 陈 艳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 由于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具有较好的控制特性且应用逐步成熟, 其不仅应用于高压直流输电领域, 在智能配电领域也具有广泛的应用。保障换流器在直流双极短路故障下不闭锁运行且实现故障快速自愈, 成为了当前智能配电网柔性一次设备领域的研究热点。首先分析了采用全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)的MMC直流双极短路故障机理, 随后提出了包含零电压故障穿越控制和直流电流控制的直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略。故障发生后启动零电压故障穿越控制可抑制子模块电容放电, 且使直流侧电流出现过零点便于直流断路器切断故障电流, 在重新建立直流侧电压之后采用直流电流控制可线性抬升功率至故障恢复, 实现换流设备无闭锁故障穿越及快速自愈。最后基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建了双端FBSM-MMC模型, 验证了所提故障穿越策略的有效性。

**关键词:** 智能配电网; 全桥子模块; 双极短路故障; 故障穿越; 无闭锁控制

## Non-locking Fault Ride-through Control Strategy Under DC Bipolar Short Circuit of MMC for Distribution Network

GAO Zemeng, LI Weiguo, YANG Hongda, ZHOU Yinping, CHEN Yan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Because the modular multilevel converter (MMC) has good control characteristics and mature application, it is not only used in the field of HVDC transmission, but also widely used in the field of intelligent distribution. It has become a research focus in the field of flexible primary equipment of intelligent distribution network to ensure the unlocked operation of converter under DC bipolar short circuit fault and to realize rapid self-recovery of fault. Firstly, the DC bipolar short circuit fault mechanism of MMC with full bridge sub-module (FBSM) was analyzed, and then a DC bipolar short circuit non-locking fault ride-through control strategy including zero voltage fault ride-through control and DC current control was proposed. Starting the zero voltage fault ride-through control after the fault occurs can restrain the capacitance discharge of the sub-module, and make the DC side current cross zero to facilitate the DC circuit breaker to cut off the fault current. After the DC side voltage was re-established, the DC current control can be used to linearly lift the power to the fault recovery, so as to realize the non-locking fault ride-through and fast self-recovery of the converter equipment. Finally, a double-ended FBSM-MMC model was built based on PSCAD/EMTDC simulation software to verify the effectiveness of the proposed fault ride-through strategy.

**Key words:** intelligent distribution network; full bridge sub-module; bipolar short circuit fault; fault ride-through; non-locking control

## 0 引言

随着分布式电源与新型电力电子设备渗透率

的不断提高, 传统配电网的潮流调控方式正面临着负荷多样性和复杂性的双重挑战。MMC在柔性直流输电领域的应用已经较为成熟, 由于其相较于两

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0903100); 国家电网公司科技项目(521104170043)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFB0903100), State Grid Science & Technology Project(521104170043).

电平或三电平换流器具有拓展性好、模块化设计等一系列优点<sup>[1-3]</sup>, 因此在中低压智能配电网领域也得到了业界学者的广泛关注, 相继提出了环网控制器(loop power controller, LPC)<sup>[4]</sup>、柔性多状态开关(flexible multi-state switch, FMSS)<sup>[5]</sup>等概念, 以新型柔性一次设备替代联络开关等传统一次设备。

与单纯的交流配网相比, 交直流混合配网由于可能联接多端交流馈线, 若直流侧发生故障将对各端换流设备及负荷造成严重影响。其中双极短路故障是系统中最严重的故障类型之一, 故障发生后将中断各端交流馈线间的功率传输, 严重时还将危害换流设备, 导致系统停运<sup>[6]</sup>。双极短路故障将使直流侧出现严重的直流过电流<sup>[7]</sup>, 若采用直流断路器切断故障电流的方案则对直流断路器的性能提出较高要求; 若断开交流断路器以隔离故障, 不仅会使换流器中各桥臂承载严重过电流, 而且大大延长了系统恢复时间。因此基于 MMC 的直流故障穿越技术成为了当前的研究热点。

文[8]研究了采用全桥子模块的 MMC 直流侧双极短路故障发生后通过闭锁换流器阻断故障电流的原理和故障清除控制策略; 文[9]提出了钳位双子模块拓扑(clamp double sub-module, CDSM); 文[10]提出了不对称型全桥子模块拓扑 AS-FBSM, 均具有闭锁换流器阻断直流侧故障电流能力, 且相较于 FBSM 所用半导体器件更少; 文[11]基于 CDSM 提出了一种改进拓扑方案, 在子模块内部箝位二极管处串联阻尼电阻, 可加快闭锁期间的能量耗散和降低电容电压增高幅值; 文[12]提出了一种新型故障限流模块, 可闭锁后短路电流幅值进行有效抑制, 并基于该模块设计了换流站快速重启策略; 文[13]提出一种基于虚拟电阻的故障穿越控制策略, 可减少暂态期间直流故障电流对子模块电容电压平衡的影响, 且故障穿越期间无需闭锁换流器。

当前研究多集中于阻断故障电流、提出新型子模块等方法, 均需对换流器进行闭锁。闭锁后的系统重启需要各端换流器的配合, 过程复杂, 时间较长; 若重启时直流故障未清除则需换流器再次闭锁, 反复闭锁会对开关器件和功率模块产生损害, 可能导致换流器失去重启能力<sup>[14-15]</sup>。

文中首先对采用 FBSM 的 MMC 直流双极短路故障机理进行分析, 然后提出应用于配网的 FBSM-MMC 直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略, 可实现换流设备无闭锁故障穿越及快速自愈。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建双端 FBSM-MMC 仿真模型, 对所提直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略的

有效性进行验证。

## 1 FBSM-MMC 拓扑结构及工作原理

### 1.1 MMC 拓扑结构及调制方式

一般 MMC 拓扑结构图见图 1。每相均由上桥臂和下桥臂组成, 每个桥臂串联有一个桥臂电感  $L_0$ 、 $n$  个子模块(sub-model, SM)和桥臂电阻  $R_0$ , 三相上桥臂共同连接直流侧正极, 三相下桥臂共同连接直流侧负极, 假设正负极线路电感均为  $L_{dc}$ , 电阻均为  $R_{dc}$ 。图 1 中:  $u_a, u_b, u_c$  为换流器交流侧出口处三相电压;  $i_a, i_b, i_c$  为流入换流器的三相电流;  $i_{au}, i_{bu}, i_{cu}$  为上桥臂三相电流;  $i_{al}, i_{bl}, i_{cl}$  为下桥臂三相电流;  $O$  点为直流侧等效零电位点;  $U_{dc}$  为直流侧电压;  $i_{dc}$  为直流侧电流。

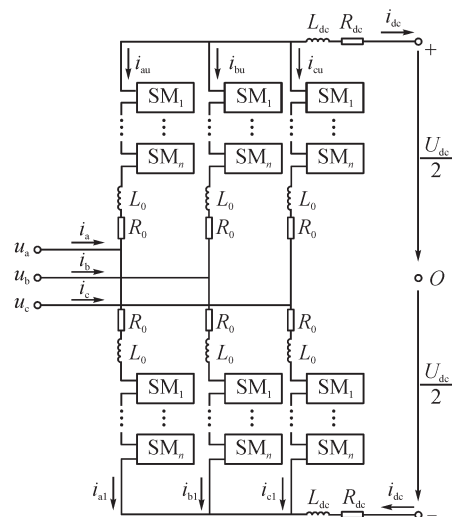


图1 MMC 拓扑结构

Fig. 1 MMC topology

目前 MMC 主要有最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)和载波移相脉冲宽度调制(carrier phase shifting pulse width modulation, CPS-PWM)等方法。研究及实践经验表明, NLM 具有开关损耗小、子模块均压方式简单等优点, 但只有当桥臂子模块数量大于 30 时, 才能保证电压总谐波畸变率小于 5%, 而当桥臂子模块数小于 10 时, 电压总谐波畸变率最大可接近 20%<sup>[16-18]</sup>, 因此 NLM 方法适用于子模块数量较多的高压柔性输电技术领域。对于 CPS-SPWM 来说当载波频率足够高时, 其低次谐波非常小, 且高次谐波对感性负载的电流畸变率影响相对较小<sup>[19-20]</sup>, 所以对于柔性多状态开关等模块数较少的中低压换流设备, 多采用 CPS-SPWM 方式。

### 1.2 FBSM 工作方式

当前应用较为普遍的子模块为半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM), 具有投入、切除和闭锁 3 种工作状态, 所需器件较少、运行损耗较低,

但不具备清除直流侧故障电流的能力,需配合交流断路器进行故障隔离。CDSM等具备直流侧故障电流清除能力的新型子模块拓扑结构<sup>[9]</sup>,虽然较HBSM所需器件增加不多,但遇到直流侧故障只能闭锁各端换流器并重启,过程涉及多端换流站的协调配合,重启过程复杂,恢复时间长。FBSM相较于CDSM,不但能够实现闭锁后阻断故障电流,还具备主动输出负极性电压的能力<sup>[8]</sup>,依靠其输出负极性电压的能力可以实现直流故障无闭锁穿越控制。3种子模块结构见图2。

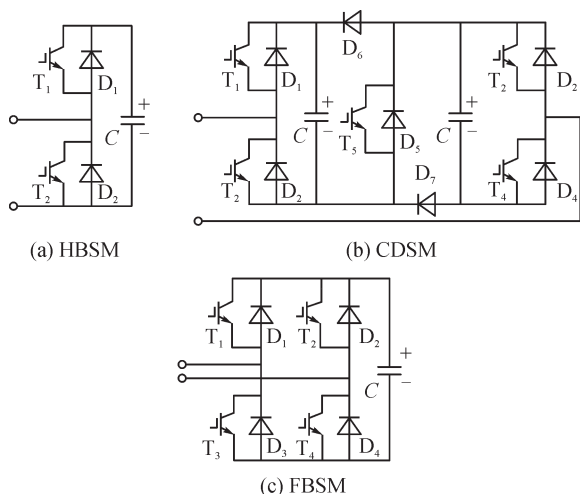


图2 子模块拓扑结构对比

Fig. 2 Comparison of sub-module topologies

与HBSM相比,FBSM同样具有投入、切除和闭锁3种工作状态,但FBSM处于投入状态时,具有输出 $+U_c$ 和 $-U_c$ 两种极性电压的能力,即 $T_1$ 、 $T_4$ 导通, $T_2$ 、 $T_3$ 关断,电流经 $D_1$ 、 $D_4$ 给电容充电或经 $T_1$ 、 $T_4$ 使电容放电,子模块输出 $+U_c$ ;  $T_2$ 、 $T_3$ 导通, $T_1$ 、 $T_4$ 关断,电流经 $D_2$ 、 $D_3$ 给电容充电或经 $T_2$ 、 $T_3$ 使电容放电,子模块输出 $-U_c$ 。FBSM的工作状态文[8]等已有研究,在此不再赘述。

## 2 故障机理分析

故障发生后,由于故障检测和保护装置的延时效性,在保护装置动作前MMC将形成的故障电流通路见图3。图3中以A相上桥臂、B相下桥臂和故障点所形成的回路为例。由图3可见,故障电流包含交流系统通过子模块中反并联二极管向直流侧的馈送电流和处于投入状态的子模块电容通过导通的IGBT形成的放电电流。其中,子模块电容迅速放电是直流侧故障过电流的主要原因,此外子模块电容完全放电后,回路中的电感将进行续流,对直流断路器切断故障电流造成困难,因此阻断子模块电容放电回路将极大程度抑制故障过电流。

每相上下桥臂均包含 $n$ 个子模块,对于传统的 $n+$

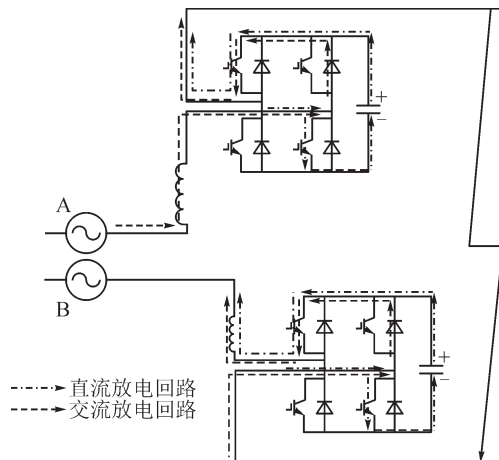


图3 FBSM-MMC 直流双极短路故障电流通路

Fig. 3 FBSM-MMC DC bipolar short circuit fault current path

1电平CPS-SPWM调制和NLM调制,任意时刻每相上下桥臂处于投入状态的总模块数均为 $n$ 。因此直流放电回路中每相桥臂相当于 $n$ 个子模块电容、2个桥臂电感和两个桥臂电阻串联,三相桥臂并联后与直流侧电感和电阻串联,直流放电回路简化模型见图4。

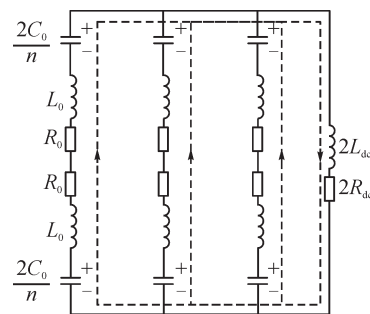


图4 直流放电回路简化模型

Fig. 4 Simplified model of DC discharge circuit

由图4可见,直流放电回路为RLC二阶零输入振荡电路,等效电阻 $R$ 、等效电感 $L$ 、等效电容 $C$ 分别为:

$$R = \frac{2}{3}R_0 + 2R_{dc} \quad (1)$$

$$L = \frac{2}{3}L_0 + 2L_{dc} \quad (2)$$

$$C = \frac{3}{n}C_0 \quad (3)$$

设故障发生时刻为 $t_0=0$ ,直流放电回路等效电容电压 $u_{fc}$ 满足方程

$$\frac{L}{C} \frac{d^2 u_{fc}}{dt^2} + R \frac{du_{fc}}{dt} + u_{fc} = 0 \quad (4)$$

设 $I_0$ 为故障发生时刻回路电流值,则回路初始状态为 $u_{fc}(t_0^-) = nU_c = U_{dc}$ ,  $i_f(t_0^-) = I_0$ 。由此可求得直流放电回路等效电容电压 $u_{fc}$ 和故障电流 $i_0$ 解析式为:

$$u_{fc} = e^{-t/\tau_0} [U_{dc} \cos \beta t + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t] \quad (5)$$

$$i_f = e^{-t/\tau_0} [I_0 \cos \beta t - (\frac{\alpha}{\tau_0 \beta C} + \frac{\beta U_{dc}}{C}) \sin \beta t] \quad (6)$$

式(5)、(6)中:

$$\tau_0 = \frac{2L}{CR} \quad (7)$$

$$\alpha = CI_{f0} + \frac{CR}{2L} U_{dc} \quad (8)$$

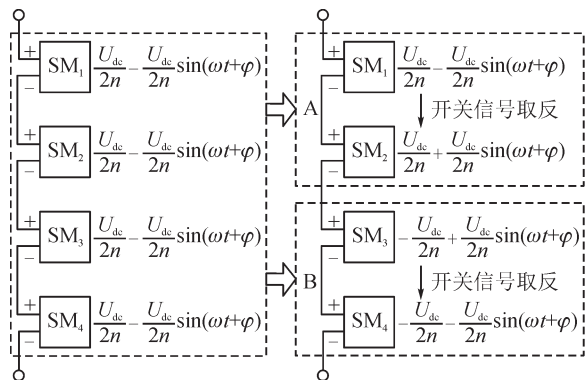
$$\beta = \frac{\sqrt{C(4L - CR^2)}}{2L} \quad (9)$$

由公式可知,放电过程中子模块电容电压迅速下降,故障电流迅速上升,因此对故障检测精度和保护装置反应速度的要求大大提高,当检测到故障信号后应立即启动无闭锁故障穿越控制策略,以保护换流设备并及时恢复正常运行状态。

### 3 无闭锁故障穿越控制策略

#### 3.1 零电压故障穿越控制

以上桥臂4个全桥子模块为例,每2个全桥子模块为一组,共A和B两组,在CPS-SPWM调制方式下,正常运行时调制信号均为  $\frac{U_{dc}}{2n} - \frac{U_{dc}}{2n} \sin(\omega t + \phi)$ ,见图5(a)。故障发生后检测到故障信号,启动零电压控制策略:对于子模块SM<sub>1</sub>,保持T<sub>1</sub>导通T<sub>3</sub>关断,调制信号维持不变,开关信号控制T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>;子模块SM<sub>2</sub>同样保持T<sub>1</sub>导通T<sub>3</sub>关断,开关信号为对SM<sub>1</sub>开关信号进行取反,控制T<sub>2</sub>和T<sub>4</sub>;子模块SM<sub>3</sub>保持T<sub>2</sub>导通T<sub>4</sub>关断,调制信号不变,开关信号控制T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>;子模块SM<sub>4</sub>维持T<sub>2</sub>导通T<sub>4</sub>关断,开关信号为对SM<sub>3</sub>开关信号进行取反,控制T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>。启动零电压穿越控制后各子模块等效输出电压见图5(b)。



(a) 正常运行时的调制信号 (b) 零电压穿越控制等效输出电压

图5 零电压穿越控制原理图

Fig. 5 Zero voltage ride-through control schematic

零电压穿越控制简化原理图见图6。A组和B组子模块在故障期间均启动零电压穿越控制后,A组“SM<sub>1</sub>输出零电平,SM<sub>2</sub>输出+U<sub>c</sub>”和“SM<sub>1</sub>输出+U<sub>c</sub>,SM<sub>2</sub>输出零电平”两种状态交替出现,B组“SM<sub>3</sub>输出零电平,SM<sub>4</sub>输出-U<sub>c</sub>”和“SM<sub>3</sub>输出-U<sub>c</sub>,SM<sub>4</sub>输出零电平”两种状态交替出现。使得A组子模块恒定输出电

压+U<sub>c</sub>,B组子模块恒定输出电压-U<sub>c</sub>,实现两组子模块恒定输出电压为零。

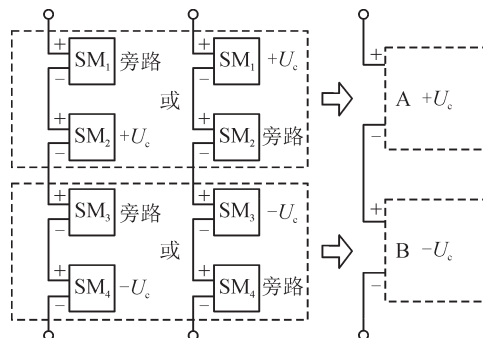


图6 零电压穿越控制简化原理图

Fig. 6 Simplified schematic diagram of zero voltage ride-through control

下桥臂的控制原理与上桥臂相同,不再赘述。在故障期间双端互联MMC中所有桥臂均启动零电压穿越控制,可实现将双极电压控制为零,等效电路图见图7。

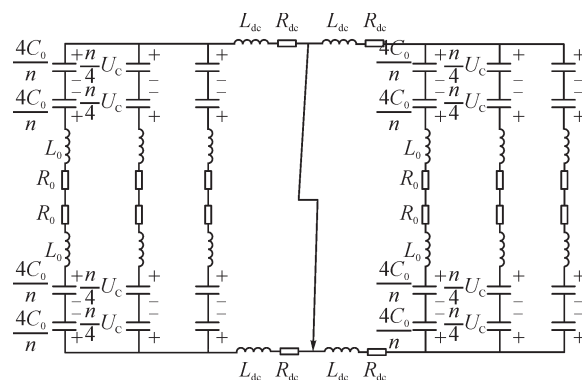


图7 零电压穿越控制等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of zero voltage ride-through control

双极短路故障期间,通过主动控制直流电压为0,阻断了子模块电容的放电回路,但回路中电感与电容之间会产生谐振,因此在直流侧电流将会产生过零点,谐振周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\left(\frac{1}{3}L_0 + L_{dc}\right) \frac{6C_0}{n}} \quad (10)$$

#### 3.2 直流电流控制

添加了直流电流控制的故障恢复控制框见图8。与正常运行时的dq解耦控制策略相比,有功功率外环控制被替换为子模块电容均压控制以维持子模块电容电压的恒定;而直流控制外环用于控制有功功率并输出直流电流参考值作为直流内环的输入,进而输出直流电流控制指令,对直流侧电流进行精确控制;同时在直流控制外环添加上行斜坡模块对功率抬升速率进行控制。

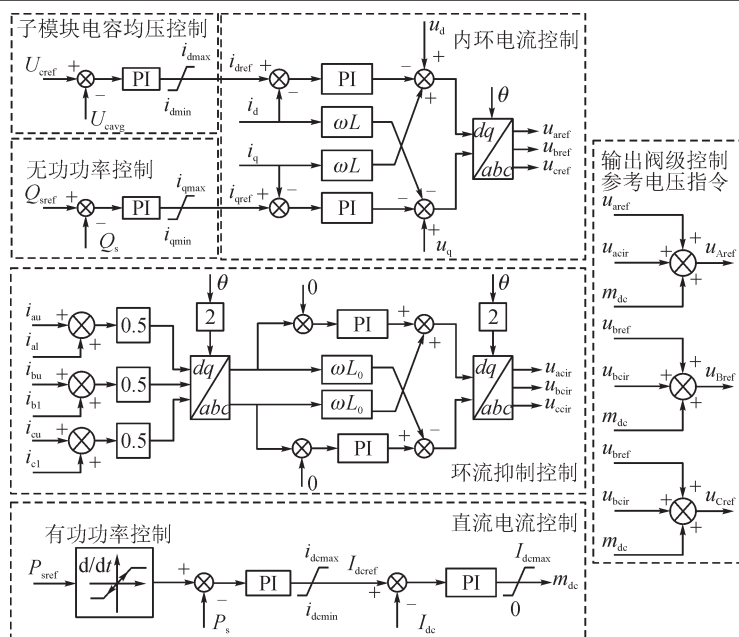


图8 故障恢复控制框图

Fig. 8 Fault recovery control block diagram

### 3.3 直流故障穿越控制策略

直流双极短路故障穿越控制策略框图见图9。图9中 $N_f$ 为直流断路器断开次数; $\lambda$ 为直流断路器断开次数限值。当直流侧发生双极短路故障,由于子模块电容放电,直流侧电流将迅速增大;故障检测装置检测到故障信号后立即启动零电压故障穿越控制,此时无需对IGBT闭锁即可阻断子模块电容放电,限制了各桥臂及直流侧出现过流以保护换流设备;同时在各桥臂与短路点形成的谐振回路中将出现电流过零点,此时利用直流断路器切断故障电流,并使直流侧充分去游离,确保短路弧道消失;若 $N_f$ 达到 $\lambda$ ,则对换流器中所有IGBT进行闭锁,并断开交流断路器及隔离开关,对设备进行故障检修后重启,若 $N_f < \lambda$ ,则重新闭合直流断路器,建立直流电压;成功建立直流电压后,启动直流电流控制,线性抬升传输功率至设定值 $P_{sref}$ ,系统恢复至正常运行状态。

由此可见,换流设备直流故障后迅速启动直流故障穿越控制策略,可实现无需闭锁换流器及断开交流断路器的情况下快速清除故障,保证系统的快速恢复。

## 4 仿真验证

为验证所提直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略的有效性,文中基于PSCAD/EMTDC搭建了双端FBSM-MMC仿真模型,每相上下桥臂子模块数为4个,子模块电容 $100\mu\text{F}$ ,桥臂电感 $10\text{mH}$ ,桥臂

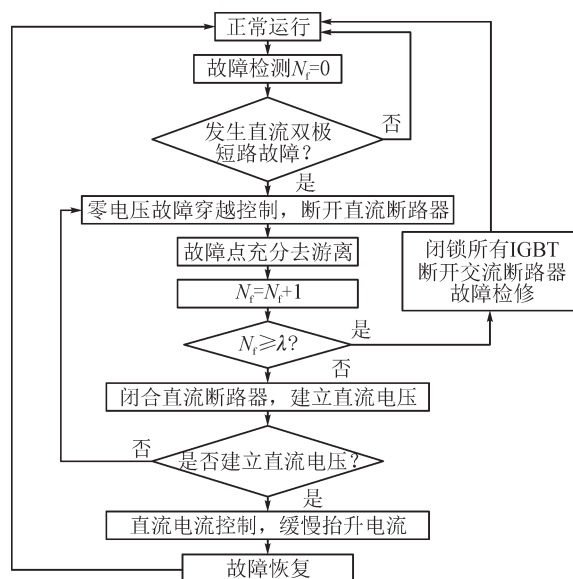


图9 直流双极短路故障穿越控制策略框图

Fig. 9 Block diagram of DC bipolar short circuit fault ride-through control strategy

电阻 $0.1\Omega$ ,直流电感 $10\text{mH}$ ,交流侧额定电压 $10\text{kV}$ ,直流侧额定电压 $\pm 10\text{kV}$ ,正常运行时传输功率 $3\text{MW}$ 。

### 4.1 零电压故障穿越控制仿真

故障态仿真时序设定为 $0.8\text{s}$ 时发生双极短路故障, $0.9\text{s}$ 时去除短路故障。零电压故障穿越控制仿真时序设定为 $0.8\text{s}$ 时发生双极短路故障,考虑到检测装置的时延, $0.8005\text{s}$ 时启动零电压穿越控制, $0.9\text{s}$ 时去除短路故障。

故障态和施加零电压穿越控制下的A相上桥臂4个子模块电容电压对比图见图10,直流电流对比

图见图 11, A 相桥臂电流对比见图 12。通过对比可以看出,故障态下子模块电容迅速放电,直流侧出现严重的直流过电流,桥臂电流中将包含较大的直流分量,对设备造成严重危害;而零电压穿越控制阻断了直流放电回路,各子模块电压出现由谐振和旁路交替进行的波动,桥臂电流不包含直流分量,降低了直流电流最大值,降低故障期间对设备的破坏性,且直流侧电流仅包含谐振导致的交流分量,电流出现过零点,有助于直流断路器切断故障电流。

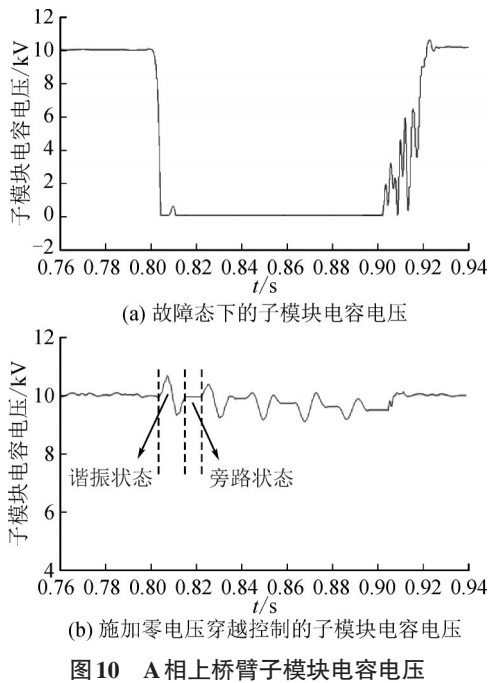


Fig. 10 Capacitance voltage of A phase upper bridge arm

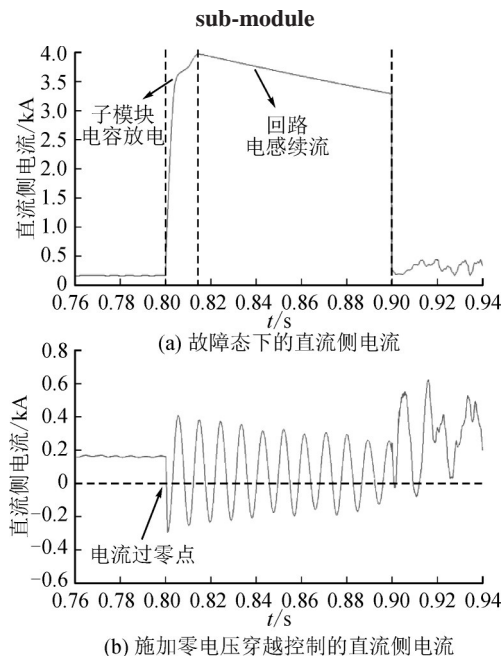


Fig. 11 DC side current

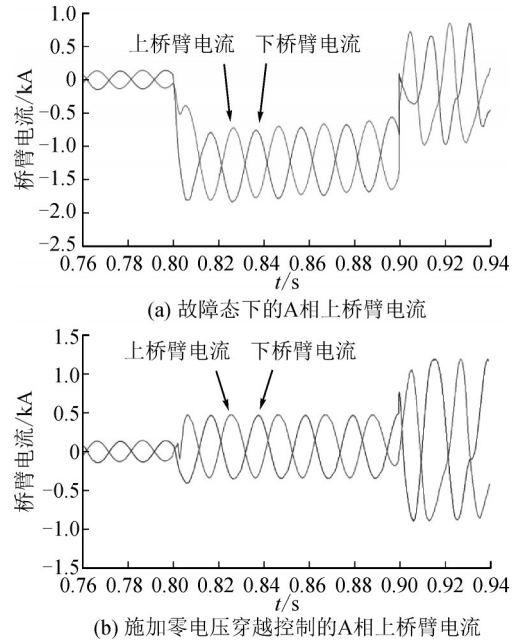


Fig. 12 A phase bridge arm current

#### 4.2 直流故障穿越控制策略仿真

设定 0.8 s 时发生双极短路故障, 0.800 5 s 时启动零电压穿越控制, 在直流侧电流过零点时断开直流断路器, 持续 80 ms 使直流侧充分去游离后重新闭合断路器, 取消零电压穿越控制并建立直流电压, 直流侧去游离期间仿真中短路点已断开, 待子模块电容电压及直流电压平稳后启动直流电流控制, 线性抬升传输功率至 3 MW, 使系统恢复至正常运行状态。故障穿越控制策略仿真波形见图 13。

仿真波形中可以看出, 0.8 s 发生直流双极短路后直流双极电压迅速跌落, 检测到故障信号后由于启动了零电压穿越控制, 阻断了子模块电容放电回路, 直流侧电流由于谐振出现过零点; 断开直流断路器切断故障电流后, 子模块旁路和谐振 2 种状态交替进行, 由于直流短路点被隔离因此回路参数改变谐振周期缩短, 回路中电阻的存在使得震荡过程中出现能量损失, 子模块电容电压仅出现缓慢降低; 由于子模块电容电压未出现大幅下降, 在重新闭合断路器后实现了直流电压迅速建立; 启动直流电流控制实现了将功率线性抬升至额定值, 总体故障恢复时间大大缩短。仿真结果表明, 所提控制策略可在直流侧双极短路故障下不闭锁换流器依然可阻断子模块电容放电, 抑制故障过电流保护换流设备, 并使系统快速恢复至正常运行水平。

#### 5 结语

模块化多电平换流器在中低压配网中得到了愈发广泛的应用, 其直流双极短路故障将导致子模

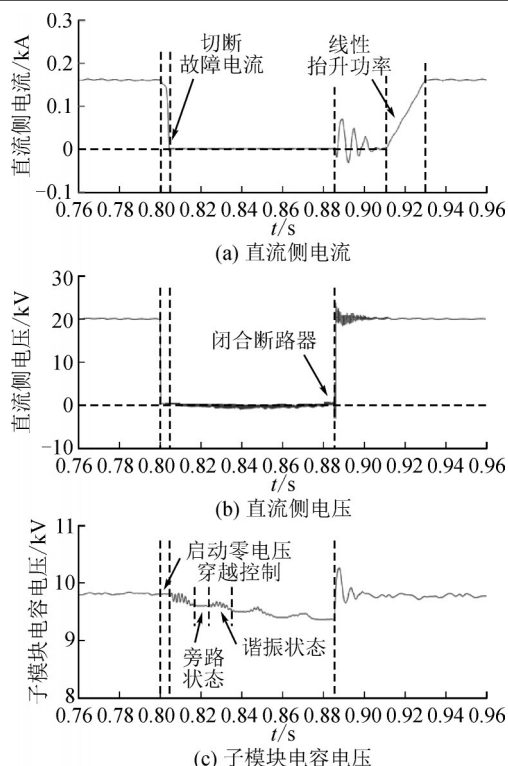


图13 无闭锁故障穿越控制策略仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform of non-locking fault ride-through control strategy

块电容放电、直流侧出现较大的直流电流、桥臂电流出现直流分量等问题。通过闭锁换流器的方式虽然可阻断故障回路,但过程复杂,时间较长,且反复闭锁会对开关器件造成损害。

文中针对以上问题提出了零电压穿越控制策略,可以阻断直流放电回路、抑制子模块电容放电;然后进一步提出了直流双极短路无闭锁故障穿越控制策略,实现直流故障快速清除和故障恢复,整个过程中无需闭锁换流器;最后,基于PSCAD/EMTDC搭建了双端FBSM-MMC仿真模型,仿真结果表明所提控制策略有效可行。

## 参考文献:

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//IEEE Bologna Power Tech. Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 272-277.
- [2] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 64-68.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [3] 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.
- [4] CHEN Chaoshun, TSAI C T, LIN C H, et al. Loading balance of distribution feeders with loop power controllers considering photovoltaic generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1762-1768.
- [5] 杨欢, 蔡云旖, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.  
YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [6] 马焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的MMC-HVDC直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2099-2106.  
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [7] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC系统直流故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.  
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [8] 和敬涵, 黄威博, 李海英, 等. FBMCMC直流故障穿越机理及故障清除策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 1-7.  
HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. FBMCMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 1-7.
- [9] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C]//International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 502-507.
- [10] 李国庆, 宋祯子, 王国友. 具有直流故障阻断能力的MMC不对称型全桥子模块拓扑[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 12-20.  
LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of MMC with DC fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 12-20.
- [11] 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]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [12] 王江天, 王兴国, 马静, 等. 双极MMC-HVDC系统故障限流及换流器快速重启策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(s1): 21-29.  
WANG Jiangtian, WANG Xingguo, MA Jing, et al. Research on fault current limiting and fast restart strategy for the bipo-

- lar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(s1): 21-29.
- [13] 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.
- [14] XIANG W, LIN W, WEN J, et al. Equivalent electromagnetic transient simulation model and fast recovery control of overhead VSC-HVDC based on SB-MMC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 778-788.
- [15] 李梦柏, 向往, 左文平, 等. 具备无闭锁穿越直流故障能力的直流自耦变压器[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 82-88.
- LI Mengbai, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. DC-DC autotransformer with uninterrupted operating capability during DC fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 82-88.
- [16] 胡灿, 付超, 王毅. 直流配电网中 MMC 的谐波分析与调制方法设计[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 81-88.
- HU Can, FU Chao, WANG Yi. Harmonic analysis and modulation method design of MMC in DC distribution network[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 81-88.
- [17] 管敏渊, 徐政, 潘伟勇, 等. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1327-1332.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong, et al. Analytical calculation of fundamental wave and harmonic characteristics for nearest level modulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1327-1332.
- [18] LI J, LI H, LIU C. The effects of voltage level number on operation characteristics of modular multilevel converter [C]//Applied Mechanics and Materials. Shanghai, China: [s.n.], 2014: 1902-1908.
- [19] MIGUEL M, Francisco H, INÉS S, et al. A comparison of modulation techniques for modular multilevel converters[J]. Energies, 2016, 9(12): 1091.
- [20] 张建坡, 赵成勇, 孙一莹, 等. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1732-1738.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Yiyong, et al. Research on topological structure and control strategy for voltage source converter-based direct current power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1732-1738.

高泽盟(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性输电技术与智能电网。

李卫国(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压与绝缘技术。

(上接第 273 页)

- Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 8-13.
- [4] 杨兴超, 张占营, 秦海晶, 等. 高压输电换流阀晶闸管控制单元电磁兼容测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 15-20.
- YANG Xingchao, ZHANG Zhanying, QIN Haijing, et al. EMC testing method research for thyristor control unit of HVC valve[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 15-20.
- [5] 查鲲鹏, 周万迪, 高冲, 等. 高压直流换流阀例行试验方法研究及工程实践[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 465-470.
- ZHA Kunpeng, ZHOU Wandu, GAO Chong, et al. Research on routine test of HVDC converter valve and its engineering practice[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 465-470.
- [6] 刘隆晨, 岳珂, 庞磊, 等. 高压直流输电换流阀晶闸管级单元综合测试系统设计与实现[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 756-761.
- LIU Longchen, YUE Ke, PANG Lei, et al. Design and implementation of synthetic test system for thyristor level of HVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 756-761.
- [7] 祁招, 杨会磊, 胡子健, 等. 一种基于直流输电换流阀阀控设备的触发测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 125-129.
- QI Zhao, YANG Huilei, HU Zijian, et al. Design of automatic test system for triggering function of HVDC valve control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 125-129.
- [8] 贺之渊, 汤广福, 朱家骝, 等. 电力电子装置高压阀的介质试验[J]. 高电压技术, 2005, 32(6): 75-78.
- HE Zhiyuan, TANG Guangfu, ZHU Jialiu, et al. Dielectric test of power electronics high voltage valve[J]. High Voltage Engineering, 2005, 32(6): 75-78.
- [9] Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission Part1: Electric testing: IEC 60700-1—2008[S]. 2008.
- [10] 高压直流输电用普通晶闸管的一般要求: GB/T 20992—2007[S]. 2007.
- [11] General requirements for thyristors for HVDC transmission: GB/T 20992—2007[S]. 2007.
- [12] LI Y, ZHANG Z, REHTANZ C, et al. Study on steady and transient state characteristics of a new HVDC transmission system based on an inductive filtering method[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2011, 26(7): 1976-1986.
- 杨帆(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流换流阀相关技术研究。
- 余振球(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 从事高压直流输电相关技术研究。
- 张翔(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流换流阀相关技术研究。