

# 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析

戴志辉, 黄敏, 苏怀波

(分布式储能与微网河北省重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 基于 MMC 的环状直流配电网电能质量和供电可靠性高、易于分布式电源接入, 但其故障类型多、故障特性复杂且与接地方式密切相关, 因此完善的故障特性分析对于主电路参数设计、保护配置等具有重要意义。首先, 建立了基于 MMC 的环状直流配网模型, 对其关键设备的主回路和控制方法做了介绍。其次, 在三种接地方式下, 针对中压直流系统单极接地故障和换流器交流侧单相接地故障, 研究了故障回路及故障特性, 并对三种接地方式的优缺点进行了分析。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中进行了建模仿真分析, 验证了理论分析的正确性。仿真结果表明接地方式对故障特性具有较大影响, 相关分析也为直流配网故障检测提供了参考。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 直流配网; 接地方式; 故障分析; 继电保护

## Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes

DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province  
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** The MMC-based ring DC distribution network has high power quality and power supply reliability, as well as good compatibility with distributed generation. However, there are various types of faults in DC distribution networks, and the fault characteristics are complex and closely related to the grounding mode. The sound fault characteristic analysis of DC distribution networks is, therefore, of great significance to the circuit parameter design and protection configuration. Firstly, a ring DC distribution network model based on MMC is constructed, and the main circuit and control strategies of its key equipment are introduced. Secondly, under three grounding modes, the fault paths and characteristics of the pole-to-ground fault on DC lines and phase-to-ground fault on the AC side of the converter are analyzed. The advantage and disadvantage of different grounding modes are discussed. Finally, the DC distribution network model is established in PSCAD/EMTDC to verify the correctness of the theoretical analysis. The simulation results show that the system grounding mode has certain influence on fault characteristics, while relevant analysis supplies reference for fault detection of DC distribution networks.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900203), National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063).

**Key words:** modular multilevel converter; DC distribution network; grounding method; fault analysis; protective relays

## 0 引言

直流配电网与交流配网相比, 因有利于分布式

电源接入、传输容量大、能减少交直流变换次数等优点而成为国内外研究应用的热点和发展方向<sup>[1-2]</sup>。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)和两电平电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)具有良好的应用前景<sup>[3]</sup>。

直流配电网的相关研究中, 故障特性分析对于主电路参数设计、保护配置等具有重要意义<sup>[4]</sup>。文

基金项目: 国家重点研发计划专项课题资助(2016YFB0900203); 国家自然科学基金(51877084); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063)

献[5]针对 MMC-HVDC 交流侧星型电抗经电阻接地的接地方式, 定量分析了直流侧发生单极接地故障后, 正负极母线电压和故障电流的变化规律。文献[6]分析了发生单极、极间和断线故障后的系统等值电路模型, 并定量分析了故障瞬间电气量的暂态特性。文献[7]针对 VSC 换流器交流侧单相接地故障, 推导出直流侧正负极电容电压会出现高频共模波动。但是, 基于电压源换流器的直流配网接地故障特征与接地方式密切相关, 上述文献仅针对特定接地方式下的情况进行了分析。文献[8]对舟山多端柔性直流输电系统接地方式进行了研究, 在确定各站接地方式的基础上, 计算了换流站设备的过电压和绝缘水平, 但对故障时的特征没有做过多研究。文献[9-10]针对不同接地方式下系统交流母线故障特性和直流单极接地故障特性进行研究, 但仅进行了仿真定性分析。直流配网的接地故障特征不仅与接地方式相关, 还随换流器类型不同而不同<sup>[11]</sup>, 现有的文献多是针对基于 VSC 换流器的直流配网进行故障特性分析。

本文计及多种接地方式, 同时考虑部分故障时换流器可能不闭锁的情况<sup>[12]</sup>, 针对基于 MMC 的直流配网接地故障特征进行分析。首先根据现有资料确定了三种适用于直流配网的接地方式; 其次针对直流侧单极接地故障给出了直流侧暂态故障电流的数学表达式, 并分析了直流侧故障对交流侧电气量的影响; 接着针对 MMC 换流器交流侧单相接地故障, 分析了上述三种接地方式下的故障回路和交流侧电气量变化, 推导出交流零序电流会引起 MMC

桥臂电容电压共模波动, 对比分析了三种接地方式下故障特征差异及对系统运行及保护的影响。

## 1 基于 MMC 的环状直流配网

### 1.1 系统结构与电压等级

图 1 为一种环状直流配网的拓扑结构, 主要包括交流系统、MMC 换流器、VSC 换流器、直流变压器、光伏电源、风机、交直流负荷及交直流线路。其中, MMC1 和 MMC2 两个换流站经 110 kV/10 kV 变压器与交流有源电网相连。MMC2 换流器稳定直流电压, 其余 4 个换流站连接中压直流母线和低压直流母线或交流母线。交直流负荷和分布式电源连接在低压配电网中。如图 1 所示, T3 和 T6 端口为直流变压器, 采用双有源桥式直流变压器, 控制方式为单移相控制, 通过控制移相比来控制低压侧电压分别稳定在±750 V 和±400 V。其中: T3 端口所连低压母线含直流负荷及光伏电源, 故 T3 端口潮流能双向流动; T6 端口所连低压直流母线仅有直、交流负荷, 潮流从中压直流母线向低压直流母线单向流动; T4 和 T5 为两电平电压源换流器站, 采用基于 PI 调节器的定交流侧电压控制将±10 kV 直流电转换为 10 kV 的交流电, 其中交流负荷接入 T4 端口所连交流母线, 交流负荷和风机接入 T5 所连交流母线。T4 端口潮流单向流动, 而 T5 端口功率双向流动。直流配网采用环状拓扑, 当中压直流线路故障时, 由故障线路两端断路器隔离故障后, 系统转换为两端和链式供电, 供电可靠性高<sup>[13]</sup>。

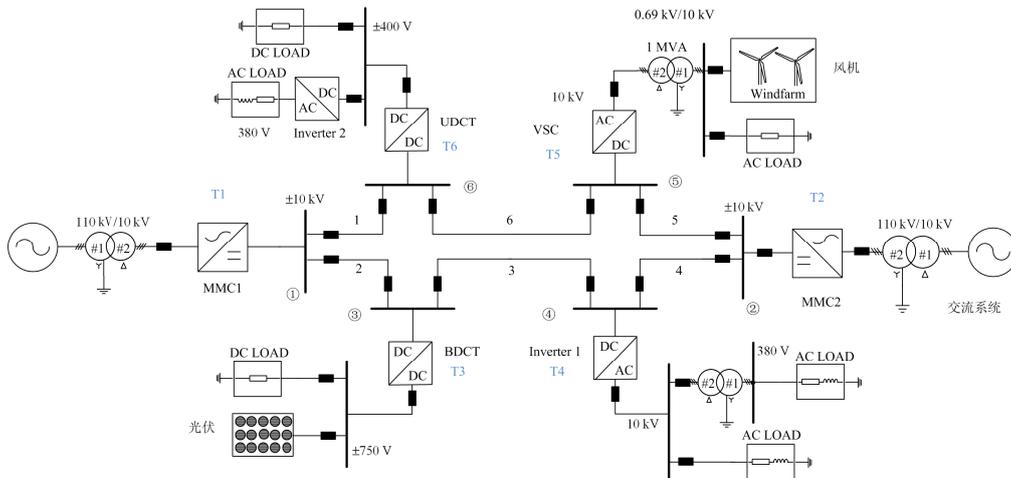


图 1 环状直流配网拓扑图

Fig. 1 Topology of ring DC distribution grid

### 1.2 MMC 换流器控制方式及工作原理

图 2 为 MMC 拓扑结构, 6 个桥臂对称, 每个

桥臂均由  $n$  个子模块和桥臂电感构成。子模块采用半桥结构,  $R_s, L_s$  为交流系统等效电阻和电感。MMC

的结构和控制方法与传统两电平电压源换流器有相似的地方<sup>[14]</sup>, 本文采用双闭环矢量控制方式。T2 端口为系统的平衡节点, 外环采用定直流电压和定无功功率控制, 稳定中压直流系统电压, T1 端口为功率节点, 采用定有功功率和无功功率控制。

由图 2, 根据基尔霍夫电压定律, 得

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{xp} + U_{xn} + Ld(i_{xp} + i_{xn})/dt = U_{xp} + U_{xn} \\ U_{xc} = (U_{xn} - U_{xp})/2 + 0.5Ldi_x/dt + (U_p + U_n)/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{dc}$  为换流器直流出口处极间电压;  $L$  为桥臂电感;  $U_p$ 、 $U_n$  分别为直流正负极对地电压;  $i_{xp}$ 、 $i_{xn}$  分别为三相上下桥臂电流;  $U_{xc}$ 、 $i_x(x=a,b,c)$  分别为换流器交流出口处电压和电流;  $U_{xp}$ 、 $U_{xn}$  为三相上下桥臂子模块电容电压, 可表示为

$$\begin{cases} U_{xp} = S_{xp} \times U_{cap} \\ U_{xn} = S_{xn} \times U_{cap} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{cap}$  为子模块电容额定电压;  $S_{xp}$ 、 $S_{xn}$  为 MMC 上下桥臂平均开关状态<sup>[15]</sup>, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} S_{ap/n} = (1 \mp M \sin \omega_1 t)/2 \\ S_{bp/n} = (1 \mp M \sin(\omega_1 t + 120^\circ))/2 \\ S_{cp/n} = (1 \mp M \sin(\omega_1 t - 120^\circ))/2 \end{cases} \quad (3)$$

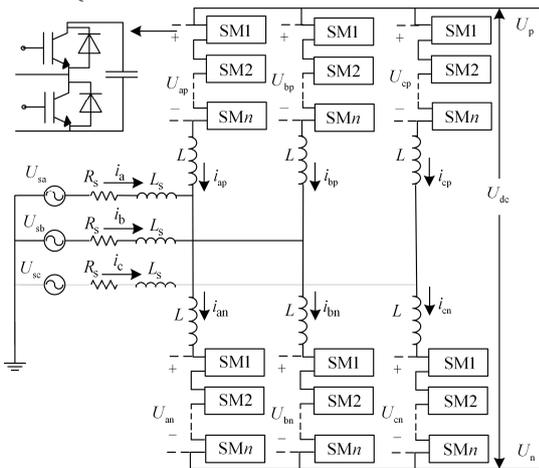


图 2 MMC 拓扑图

Fig. 2 Topology of MMC

## 2 故障特性分析

### 2.1 接地方式与故障类型

基于电压源换流器的直流配电系统中, 接地故障的故障特性与系统的接地方式密切相关。目前, 尚无相关标准对多端直流系统的接地方式做出规定。在典型的对称两极运行的 MMC-HVDC 系统中, 接地方式可分为直流侧接地和交流侧接地两种方式。前者一般为 MMC 直流侧经钳位电阻接地; 后者一般包括 MMC 交流侧换流变压器阀侧星型接

地, 交流侧经电抗接地以及交流侧经接地变压器接地<sup>[5,10]</sup>。其中交流侧经电抗接地和经接地变压器接地增加了系统组件, 占地面积大、系统的可靠性较低。故本文考虑 MMC 在直流侧经钳位电阻接地、交流侧换流变压器阀侧星型直接接地和换流变压器阀侧经电阻接地三种接地方式、其他端口(T3、T4、T5、T6)中压直流侧均不接地时, 直流系统发生故障时的故障特性。为叙述方便, 下文中直流侧接地指的是 MMC 直流侧经钳位电阻接地, 交流侧直接接地和交流侧经电阻接地分别指换流变压器阀侧星型直接接地和换流变压器阀侧经电阻接地。

直流配网故障类型多, 变压器网侧、阀侧以及换流器交流出口侧都可能发生三相故障、两相相间故障、单相接地故障。直流侧在中压直流配电线路各点均可能发生单极和极间短路故障及断线故障<sup>[16-17]</sup>。其中单相和单极接地故障发生概率最大, 且其故障特性和接地方式密切相关; 其他类型故障虽然也会产生很严重的后果, 但与接地方式的关系较弱。故本文重点分析单极和单相故障。

### 2.2 单极接地故障特性分析

#### 2.2.1 直流侧接地

##### 1) 交直流侧电压电流的变化

当采用直流接地方式时, 不考虑线路对地电容, 由于没有故障回路, MMC 桥臂电容、直流变压器高压侧电容、VSC 直流侧电容均不放电, 直流侧电流和交流侧电流不变, 由式(1)得

$$\begin{cases} U_{dc} = U_{px} + U_{nx} = U_p - U_n = -U_n \\ U_{xc} = (U_{nx} - U_{px})/2 + U_n/2 \\ U_{ub} = |U_p + U_n|/2 = U_{dc}/2 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $U_{ub}$  为直流侧正负极不平衡电压。可知, 由于桥臂电容电压不变, 极间电压不变, 但由于零电位点由 MMC 直流侧钳位电阻接地点变为正极接地点, 负极电压绝对值增大到极间额定电压, 直流侧正负极电压不平衡。同时, 交流侧电压幅值不变, 但会有直流偏置, 偏移量为负极额定电压。

##### 2) 负荷侧电压电流变化

由于中压直流系统极间电压保持不变, 对于 T3 和 T4 端口的直流变压器, 其中的高频变压器只工作在极间电压下, 高压侧不平衡电压不会对低压侧造成影响, 因此 T3 和 T4 端口低压侧正负极电压能够保持对称运行; 对于 T5 和 T6 端口的 VSC, 由于 VSC 交流侧换流变压器采用阀侧  $\Delta$  接、负荷侧星接, 此时, 逆变器交流侧同样会有一个向下的直流偏置, 但是变压器负荷侧直接接地具有钳位作用, 因此变压器负荷侧三相电压电流均对称。

由上述分析可见,系统不会出现过流,中压直流系统极间电压不变,但正负极电压出现不平衡现象,从而导致交流侧电压出现直流偏置,威胁交直流侧线路绝缘安全。但对于负荷侧电压没有影响,功率正常传输。因此,直流侧接地方式下,当发生单极接地故障时,在绝缘满足要求的情况下,允许系统工作一段时间。但这种接地方式增大了故障检测与定位的难度,同时由于直流侧经大电阻接地,会存在功耗大、散热难等问题。

### 2.2.2 换流变压器阀侧星型直接接地

当发生单极接地故障时,由于 T1 和 T2 端口的交流侧变压器采用  $\Delta/Y_n$  接,两端交流系统向故障点放电;同时,两端口的 MMC 上桥臂电容通过故障点与交流侧变压器接地点构成放电回路。例如,当线路 6 中点发生单极故障时, T1 端口 MMC 上桥臂电容和 T2 端口 MMC 上桥臂电容分别通过线路 1、线路 6 和线路 5、线路 6 向故障点放电;当 MMC1 直流出口单极接地故障时, MMC1 上桥臂向故障点放电,同时 MMC2 经过线路 5、线路 6、线路 1 和线路 3、线路 2、线路 1 两条故障路径向故障点放电。

以线路 6 中点发生单极故障为例,因中压直流线路上的故障电流均由两端 MMC 提供,以 T1 端口 MMC1 为例,分析故障后 MMC1 交直流侧各电气量的变化。据式(1)一式(3)可得 MMC 等效电路如图 3 所示。每个桥臂均由交流电压源和直流电压源等效,故障时通路如图 3 所示,  $R_L$ 、 $L_L$  分别为 MMC1 直流侧出口到故障点之间线路的电阻和电感。

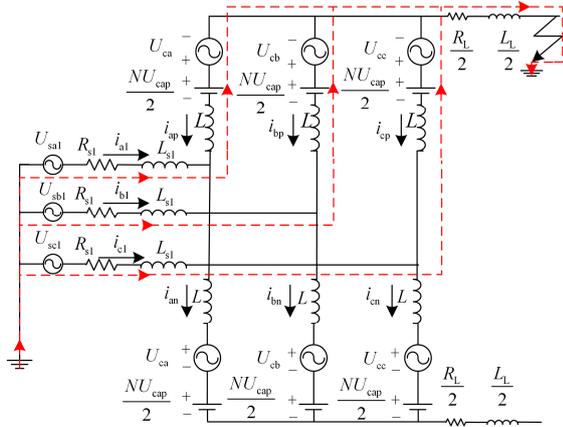


图 3 MMC 等效电路图及故障回路

Fig. 3 Equivalent diagram and fault circuit of MMC

#### 1) 直流侧电压电流的变化

故障瞬间, MMC1 上桥臂电容通过交流侧接地点与故障点构成放电通路,同时交流系统向故障点放电,暂态电流主要为电容放电电流<sup>[18-19]</sup>。结合图

3 和 KVL,对单相故障回路列写方程得

$$\begin{aligned} -U_{sx} + i_x R_s + L_s di_x / dt - L di_{px} / dt - Nu_{cp} / 2 + \\ U_{cx} + R_L I_{0-1} / 2 + 0.5 L_L dI_{0-1} / dt = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $I_{0-1}$  为 MMC1 上桥臂电容放电流经故障点的电流。进行三相求和得

$$\begin{cases} (R_s + 3R_L / 2) I_{0-1} + (L_s - L + 3L_L / 2) dI_{0-1} / dt = 3Nu_{cp} / 2 \\ I_{0-1} = C_{eq} du_{eq} / dt = 6C du_{cp} / dt \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $C$  为子模块中单个电容的电容值。因故障时控制系统仍按正常调制方式投切电容,每相上桥臂可看作分成两组依次投入<sup>[19]</sup>,故三相上桥臂等效电容为  $12C/N$ ;三相上桥臂相当于并联,等效电压为  $Nu_{cp}/2$ 。对式(6)求解即得暂态时 MMC1 上桥臂电容向故障点流入的故障电流和上桥臂电容电压的变化。电容迅速放电,上桥臂电容电压下降,交直流侧将出现很大的故障电流。

随着电容放电减小,交流系统向上桥臂电容充电功率等于上桥臂电容向故障点的放电功率时,故障进入稳定阶段。各端直流侧出口正极电压为出口处到故障点的线路压降, MMC2 采用定直流电压控制,但与两电平电压源换流器不同的是,交流系统向上、下桥臂电容充电以维持极间电压稳定,但由于上下桥臂电容电压不平衡,下桥臂能量传递到上桥臂,上桥臂电容向故障点放电,上下桥臂电容电压将会出现较大的波动,若故障电流较大,使交流侧电流超过换流器的限值时,极间电压不能维持在额定值。由式(7)可知,此时 MMC1 直流出口极间电压为故障点到 MMC1 直流出口处正极线路压降、MMC1 上桥臂电容电压和下桥臂电容电压之和,  $\Delta U_1$  为故障点到 MMC1 直流出口处正极线路压降。

$$\begin{cases} U_{dc} = 2\Delta U_1 + U_{px} + U_{nx} = 2\Delta U_1 + Nu_{cp} / 2 + Nu_{cn} / 2 \\ U_{ub} = |U_p + U_n| = Nu_{cn} / 2 - Nu_{cp} / 2 \end{cases} \quad (7)$$

#### 2) 交流侧电压电流的变化

由于换流变压器阀侧直接接地,对地电压有钳位作用,因此交流侧电压没有直流偏置;但由上述分析可知,故障时交流侧电流会有较大的直流分量使变压器磁饱和,变压器振动加剧,交流侧电流中还含有二倍频负序分量,交流侧电压会有尖顶波和平顶波现象,电压质量差<sup>[10]</sup>,并对直流侧电压电流产生影响。设交流侧二倍频负序分量如式(8)所示。

$$\begin{cases} \bar{i}_a^- = I_- \sin(2\omega_1 t + \alpha_-) \\ \bar{i}_b^- = I_- \sin(2\omega_1 t + \alpha_- - 120^\circ) \\ \bar{i}_c^- = I_- \sin(2\omega_1 t + \alpha_- + 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

考虑上桥臂电容平均开关函数, 以正极为例, 结合式(2)可得负序分量在直流侧产生的影响为

$$\vec{i}_{dc} = [\vec{i}_a^- \quad \vec{i}_b^- \quad \vec{i}_c^-] [S_{ap} \quad S_{bp} \quad S_{cp}]^T = \frac{3MI}{4} \cos(3\omega_1 t + \alpha_-) \quad (9)$$

由式(9)可知, 交流侧二倍频负序分量在直流侧产生三倍频的谐波分量, 进而产生三倍频直流谐波电压, 同时交流侧二倍频分量的存在还会导致交流侧有功功率出现三倍频波动, 进一步引起直流电压的波动, 直流侧谐波电流的产生加重了故障稳态时直流侧过流水平。

可知, MMC 上桥臂和正极线路过流, 直流侧极间电压不能维持, 交流侧电流出现直流偏置使变压器可能出现直流偏磁, 同时直流侧电流中出现三倍频谐波。在此接地方式下, 故障电流大, 会对换流器等设备造成极大威胁。为避免换流器闭锁时直流系统不能持续供电, 可考虑加装限流装置与保护配合<sup>[11]</sup>。同时, 交流侧变压器电流差动保护可能误动使两端交流系统停止对中压直流系统供电。整体上, 故障特征明显, 有利于故障检测和定位。

### 2.2.3 换流变压器阀侧经大电阻接地

发生单相接地故障时, 由 2.2.2 节分析可知, 上桥臂电容放电回路中的大电阻限制放电电流, 故障特征与直流侧经钳位电阻接地类似, 交直流侧电流不变、电容电压不变, 因此极间电压不变; 但由于电位参考点的变化, 正极电压变为 0, 负极电压绝对值增大为极间电压, 同时交流侧电压会有负的直流偏置。

## 2.3 交流侧单相接地故障特性分析

### 2.3.1 直流侧接地方式

#### 1) 交直流侧电压电流的变化

以 MMC1 侧变压器阀侧 A 相故障为例, 故障瞬间, A 相电压降为 0, B、C 相电压升高为线电压,

三个线电压保持不变; 不考虑线路对地电容, 不存在放电回路。因此, 桥臂电容电压保持不变, 交直流侧电流也不变, 由式(1)知, 极间电压稳定在额定电压。对于直流侧正负极电压可表示为

$$\begin{cases} u_p = u_{ca} + L di_{ap} / dt + u_{pa} \\ u_n = u_{ca} + L di_{an} / dt + u_{na} \end{cases} \quad (10)$$

故障时, A 相电压被钳位为零, 而桥臂电流、桥臂电容电压均保持不变, 因此直流侧正、负极对地电压将会出现基频共模波动现象, 波动幅值为 A 相电压, 极间电压保持不变。由式(1)知直流侧正负极电压波动, 导致 MMC2 交流侧电压与 MMC1 交流侧电压变化特征相同。

#### 2) 负荷侧电压电流的变化

由 2.3.1 节分析知, 中压直流系统极间电压不变, 负荷侧电压、电流均能够保持对称运行。因此, 系统能够正常传输功率, 可运行一段时间, 但同样对交直流线路绝缘要求高。

### 2.3.2 交流侧接地方式

同样以 MMC1 换流变压器阀侧 A 相单相故障为例, 由于 T2、T3、T5、T6 中压直流侧均不接地, 因此交流侧接地方式下, 故障回路如图 4 所示。共有 3 条放电通路: (1) MMC1 网侧 A 相电源对故障点放电; (2) MMC1 的 B、C 两相上下桥臂分别通过正负极向 A 相故障点放电; (3) MMC2 上、下桥臂通过中压直流线路、MMC1 的 A 相上下桥臂向故障点放电。

#### 1) 交流侧电压电流变化

故障瞬间, A 相电压变为 0, B、C 两相对地电压不变, MMC2 换流变压器阀侧直接接地, 因此交流侧三相电压保持平衡。由于故障回路 2 和故障回路 3 的存在, MMC1 和 MMC2 交流侧电流含有零序分量。

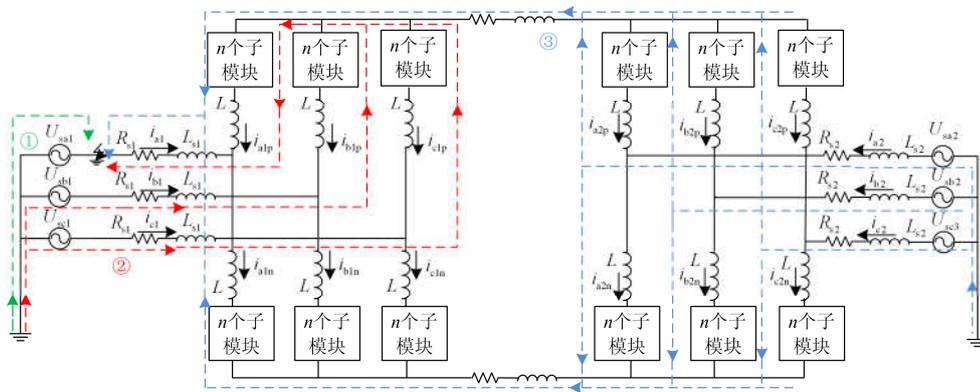


图 4 交流侧单相接地故障的故障回路

Fig. 4 Fault circuit under AC-side phase-to-ground fault

由图 4 知, MMC1 交流侧零序分量如图中故障回路 2, 不会流入交流系统; 而 MMC2 交流侧零序分量经 MMC2 上下桥臂流入直流系统, 对直流系统电压、电流产生影响。

## 2) 直流侧电压电流变化

设 MMC2 交流侧零序分量为

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} = I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) \quad (11)$$

则流入上、下桥臂的零序电流为

$$\begin{cases} i_{ap0}(t) = i_{bp0}(t) = i_{cp0}(t) = 0.5I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) \\ i_{an0}(t) = i_{bn0}(t) = i_{cn0}(t) = 0.5I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) \end{cases} \quad (12)$$

以 A 相为例, 结合式(3)和式(12)可得流入上、下桥臂子模块的平均电容电流  $i_{ca\_p}(t)$ 、 $i_{ca\_n}(t)$  分别如式(13)所示。

$$\begin{cases} i_{ca\_p}(t) = (0.5 - 0.5M \sin \omega_1 t) \times i_{ap0}(t) = \\ \quad (0.5 - 0.5M \sin \omega_1 t) \times [0.5I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0)] = \\ \quad -MI_0 \cos \alpha_0 / 8 + I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) / 4 + \\ \quad MI_0 \cos(2\omega_1 t + \alpha_0) / 8 \\ i_{ca\_n}(t) = (0.5 + 0.5M \sin \omega_1 t) \times i_{an0}(t) = \\ \quad (0.5 + 0.5M \sin \omega_1 t) \times [0.5I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0)] = \\ \quad MI_0 \cos \alpha_0 / 8 + I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) / 4 - \\ \quad MI_0 \cos(2\omega_1 t + \alpha_0) / 8 \end{cases} \quad (13)$$

直流电容电流中含有直流分量、基频分量和二倍频分量。稳态运行时, 从交流侧传输到换流器的交流功率和换流器传输到直流系统的直流功率相等, 所以直流分量为零<sup>[20]</sup>。另外两项代表了交流侧零序电流分量对直流电容波动的影响, 产生了工频分量的波动和二倍频分量的波动。

将上两式的结果拓展到三相得

$$\begin{cases} i_{dcp0} = i_{ap0}(t) + i_{bp0}(t) + i_{cp0}(t) = \frac{3}{4}I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) \\ i_{dcn0} = i_{an0}(t) + i_{bn0}(t) + i_{cn0}(t) = \frac{3}{4}I_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_0) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)知, 直流电容电流中的基频分量流入到直流线路中, 直流正负极线路电流中有基频分量, 两者大小相等, 方向相同。流入直流电容的基频分量和二倍频分量将在直流电容上分别产生基频波动电压和二倍频波动电压, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta u_{ca\_p}(t) = -\frac{I_0}{4\omega_1 C_d} \cos(\omega_1 t + \alpha_0) + \frac{MI_0}{16\omega_1 C_d} \sin(2\omega_1 t + \alpha_0) \\ \Delta u_{ca\_n}(t) = -\frac{I_0}{4\omega_1 C_d} \cos(\omega_1 t + \alpha_0) - \frac{MI_0}{16\omega_1 C_d} \sin(2\omega_1 t + \alpha_0) \end{cases} \quad (15)$$

同理可得其他两相上、下桥臂电容电压波动分量。正负极及极间电压波动分量分别为

$$\begin{cases} \Delta u_{dc\_p}(t) = N\Delta u_{ca\_p}(t) + N\Delta u_{cb\_p}(t) + N\Delta u_{cc\_p}(t) / 3 = \\ \quad -\frac{NI_0}{4\omega_1 C_d} \cos(\omega_1 t + \alpha_0) \\ \Delta u_{dc\_n}(t) = N\Delta u_{ca\_n}(t) + N\Delta u_{cb\_n}(t) + N\Delta u_{cc\_n}(t) / 3 = \\ \quad -\frac{NI_0}{4\omega_1 C_d} \cos(\omega_1 t + \alpha_0) \\ \Delta u_{dc}(t) = \Delta u_{dc\_p}(t) + \Delta u_{dc\_n}(t) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由以上分析可知, 交流侧零序分量经 MMC 在中压直流各线路上产生基频分量, 同时直流侧正、负极电压产生基频共模波动。由于故障回路 3 经过 MMC2 上、下桥臂电感和线路阻抗, MMC2 桥臂电容放电电流小, 交流侧电流幅值在控制器的控制范围内, 因此极间电压保持不变, 同时负荷侧电压电流均保持对称。MMC 交流侧和直流侧以及换流器均要承受过流过压, 但由于桥臂电抗和线路阻抗的存在, 过流、过压并不严重。若为瞬时性故障, 可考虑换流器不闭锁; 若为持续性故障, 在一端交流系统故障时应闭锁该端换流器, 同时配合控制策略的切换, 使直流配网能够持续供电。例如当 MMC2 交流侧故障时, MMC1 应由定功率控制切换为定直流电压控制, 从而稳定中压直流系统电压。

此外, 任一端交流系统故障时, 直流侧会出现工频共模波动, 从而其他端口交流侧电压不对称。因此非故障端交流侧保护可能会误动, 可考虑依靠故障端和非故障端口直流侧共模电压、电流或共模阻抗值的差异构造判据, 判断故障端, 提高系统稳定运行能力。交流侧经大电阻接地时, 故障特性与直流侧接地方式类似, 不再赘述。

## 3 仿真分析

### 3.1 直流侧单极接地故障

以线路 6 中点在 0.6 s 时发生单极接地故障为例, 图 5、图 6 和图 7 分别为三种接地方式下的仿真结果, 其中测量位置为 MMC2 交直流侧出口处, 负荷侧电压以端口 T3 和 T5 为例。

采用直流侧接地方式, 单极接地故障时, 由于没有故障回路, 交直流侧电流均不变, 如图 5(b)和图 5(c)所示。故障瞬间, 直流侧正极电压变为 0, 由于电位参考点的变化, 负极电压绝对值增大到极间电压, 直流侧极间电压不变, 但出现不平衡电压, 如图 5(a)所示, 同时交流侧电压幅值不变但出现一个向下的直流偏移量, 如图 5(c)所示。故障时, 由于极间电压保持不变, T3 端口直流变压器低压侧电压能够保持对称且幅值不变, 如图 5(e)所示, 虽然

中压直流侧正负极电压不平衡, VSC 交流侧电压同样有一个向下的直流偏缩量, 但由于 VSC 交流侧换流变压器负荷侧直接接地, 因此负荷侧三相电压仍保持对称, 如图 5(f) 为 T5 端口 VSC 交流侧换流变压器负荷侧电压。

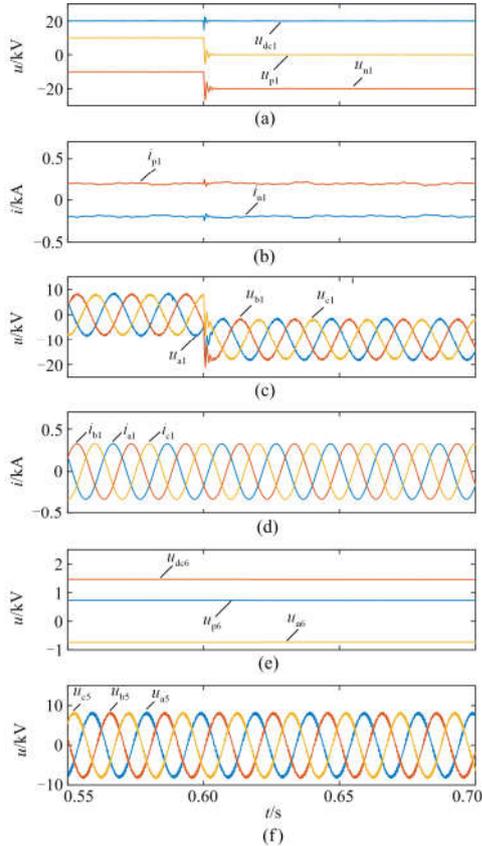


图 5 直流侧接地

Fig. 5 Grounded at the DC side

采用交流侧直接接地方式, 由于两侧 MMC 上桥臂电容均通过交流侧变压器接地点和故障点形成放电回路。由于电容迅速放电, 故障瞬间电流迅速上升, 如图 6(b) 为 MMC2 直流出口时的电流; 故障点处正极电压降为 0, 由于线路压降的存在, 测量点 MMC2 处正极电压不为零, 上桥臂电容电压下降, 下桥臂电容电压平均值基本不变, MMC2 处极间电压为测量点到故障点线路上的压降、MMC2 上桥臂电容残压以及下桥臂电容电压之和, 因此极间电压不能维持在额定电压, 如图 6(a) 所示。

上桥臂电容放电导致交流侧电流存在直流分量, 较大的直流分量使得换流变压器磁饱和, 交流侧电流中将含大量的负序二倍频分量, 三相电流不再对称, 如图 6(d) 所示。交流侧二倍频负序分量经过 MMC 会在直流侧产生三倍频谐波, 如图 6(b) 所示。虽然直流侧正负极存在不平衡电压, 但交流侧

接地点对电位有钳位作用, 交流侧电压不存在偏置。但由于变压器磁饱和, 交流侧电压有平顶波和尖顶波现象, 如图 6(c) 所示。由于直流极间电压减小, 交流负荷侧电压幅值减小但三相仍对称, 如图 6(f) 所示。直流变压器能通过改变移相比补偿极间电压减小对低压侧电压的影响, 因此故障对直流侧负荷的影响小于交流负荷; 但超过直流变压器调节范围时低压侧电压仍会减小, 如图 6(e) 所示。

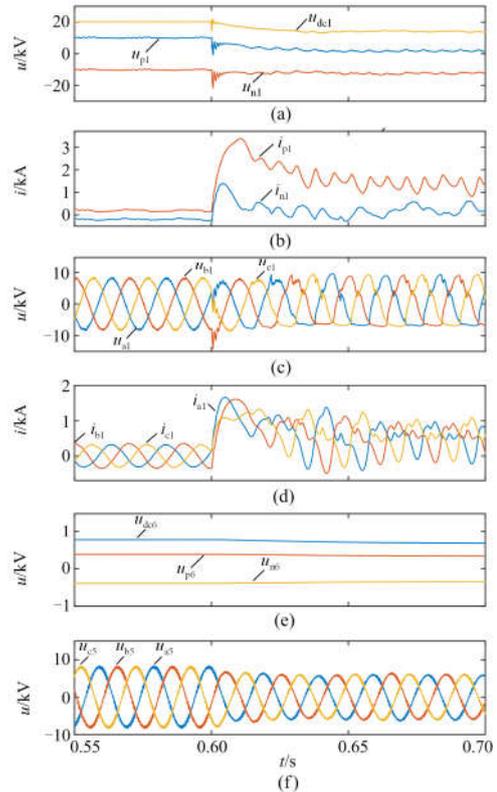
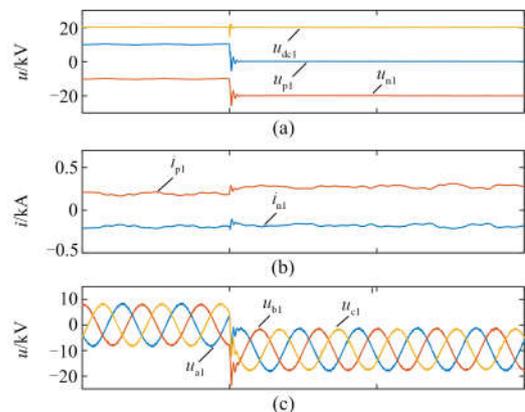


图 6 交流侧直接接地

Fig. 6 Solid grounded at the AC side

交流侧经大电阻接地与直流侧接地时故障特性类似, 如图 7 所示, 不再赘述。



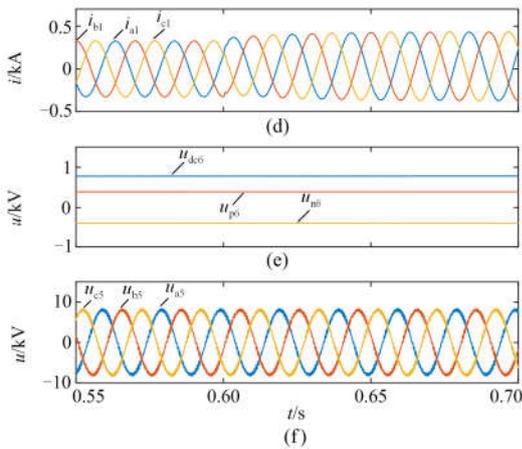


图 7 交流侧经大电阻接地

Fig. 7 Grounded through resistance at the AC side

### 3.2 交流侧单相短路故障

以 MMC1 交流侧变压器阀侧 A 相接地故障为例，图 8、图 9 分别为大电阻接地之外的两种接地方式下的仿真结果，测量点为 MMC1 交直流侧电气量，负荷侧电压以 T3 端口直流变压器低压侧电压和 T5 端口换流变压器负荷侧电压为例。

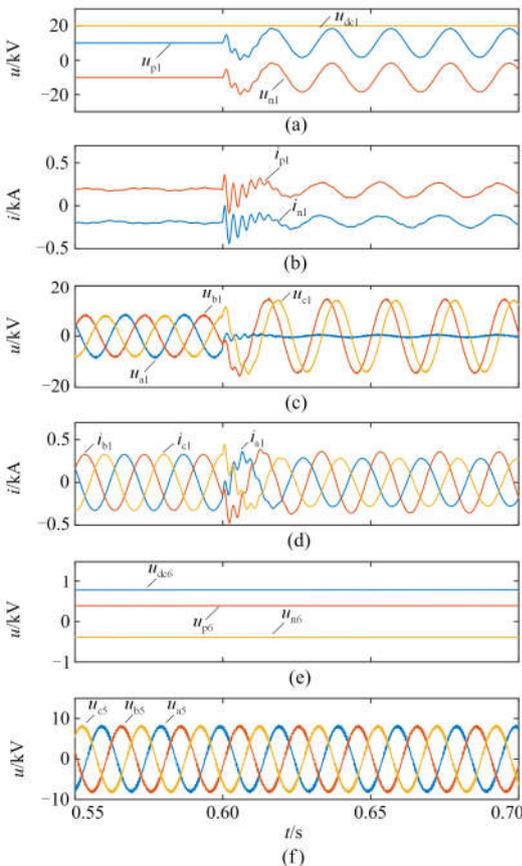


图 8 直流侧接地方式

Fig. 8 Grounded at the DC side

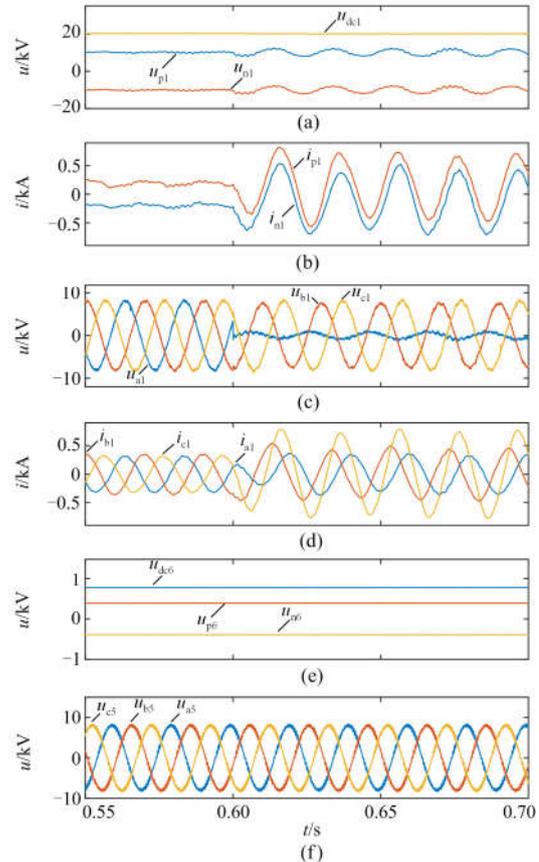


图 9 交流侧直接接地方式

Fig. 9 Solid grounded at the AC side

直流侧接地方式时，故障瞬间 A 相电压变为 0，B、C 相电压升高为线电压，如图 8(c)所示，相间电压保持不变；桥臂电容没有放电通路存在，桥臂电容电压保持不变，但由于直流线路对地电容的存在，故障点与对地电容构成放电通路，交流侧电流三相不对称，同时 MMC1 直流侧电流有小幅度的基频波动如图 8(b)、图 8(d)所示。由于 A 相电压被钳位为 0，因此系统对地电位出现基频共模波动，波动幅值与 A 相相电压幅值相等，即直流侧电压正负极电压出现基频共模波动现象，如图 8(a)所示，同时导致 MMC2 交流侧 A 相电压变为零，B、C 两相电压升高为线电压。由于极间电压不变，因此故障对于负荷侧电气量没有影响。

交流侧直接接地时，故障瞬间 A 相电压变为零，B、C 两相对地电压不变，如图 9(c)所示。由于 MMC1 非故障相上、下桥臂电容通过正负极向故障点放电，同时 MMC2 上下桥臂通过直流线路和 MMC1 故障相向故障点放电，两侧 MMC 交流出口均出现零序分量，三相电流不再对称，如图 9(d)所示。交流侧零序分量经 MMC 作用，直流侧电流中含有基频分量，如图 9(b)所示，同时交流侧零序分量流入桥臂

导致桥臂电容电压基频波动, 从而导致直流正负极电压基频共模波动, 极间电压保持不变, 如图 9(a) 所示。负荷侧电压能够保持平衡且幅值不变, 如图 9(e)、图 9(f) 所示。

#### 4 结论

1) 基于 MMC 的环状直流配网采用交流侧直接接地方式, 直流侧发生接地故障时, MMC 桥臂电容放电, 故障瞬间交直流侧及 MMC 桥臂严重过流, 交流侧变压器磁饱和并加剧了故障稳态时过流程度, 可能会引起变压器保护误动。交流侧发生单相接地故障时, 交流侧的零序电流造成直流侧正负极电流含有基频共模分量, 系统过流。

2) 采用直流侧接地方式和交流侧经大电阻接地时, 由于交直流侧接地故障时故障回路经过大电阻, 系统不会出现过流现象。但直流侧单极故障时, 由于零电位点的变化, 负极电压绝对值升高为极间电压, MMC 交流出口处电压有一个直流偏置; 交流侧发生单相接地故障时, 非故障相电压升高为线电压, 直流侧正负极电压会有基频共模波动。因此这种接地方式下, 故障时增大了系统绝缘要求, 同时故障检测、定位的难度增大。

3) 交流侧经电阻接地方式, 通过改变接地电阻的大小可以改变故障特性, 当接地电阻很大时其故障特性与直流侧接地方式类似, 可以抑制过流现象, 但系统会有过压的危险; 当接地电阻很小时, 其故障特性与交流侧直接接地类似, 系统绝缘要求降低, 过流严重, 但同时有利于故障检测与定位。因此根据系统参数确定合适的接地电阻阻值, 可以限制故障电流避免换流器闭锁, 同时配合保护系统检测定位故障点。

#### 参考文献

- [1] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.  
ZHANG Hongjun, WU Yuwen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [3] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.  
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [4] 严道, 焦彦军, 杜哲. 基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 110-116.  
YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhe. Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 110-116.
- [5] 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): 3518-3526.  
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): 3518-3526.
- [6] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[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.
- [7] 高一波, 徐习东, 金阳忻, 等. 交流侧接地故障对直流配电网电压平衡影响[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2665-2670.  
GAO Yibo, XU Xidong, JIN Yangxin, et al. Impact on the voltage balancing of DC distribution network under AC side grounding fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2665-2670.
- [8] 邓旭, 沈扬, 王东举, 等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流系统接地方式[J]. 电力建设, 2014, 35(3): 24-30.  
DENG Xu, SHEN Yang, WANG Dongju, et al. Grounding mode of multi-terminal flexible DC system based on MMC[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(3): 24-30.
- [9] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相高压直流输电系统接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 14-19.  
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Grounding design analysis of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 14-19.
- [10] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1628-1636.  
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. The grounding

- design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1628-1636.
- [11] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.  
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [12] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2353-2364.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2353-2364.
- [13] 戴志辉, 葛红波, 陈曦, 等. “手拉手”多端柔性直流配电系统启动与协调控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 1-9.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Xi, et al. Start-up and coordination control strategy in “hand-in-hand” multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(5): 1-9.
- [14] 邢长达, 郭家虎, 朱成杰, 等. MMC 控制系统中子模块控制器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 114-121.  
XING Changda, GUO Jiahu, ZHU Chengjie, et al. Design of the sub-module controller of the MMC control system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 114-121.
- [15] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.  
SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-84.
- [16] 陈福锋, 杨阳, 宋国兵, 等. 单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 50-55.  
CHEN Fufeng, YANG Yang, SONG Guobing, et al. Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 50-55.
- [17] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等. YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 99-105.  
ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 99-105.
- [18] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.  
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [19] 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.
- [20] SONG Q, LIU W, LI X, et al. A steady-state analysis method for a modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3702-3713.

收稿日期: 2017-12-09; 修回日期: 2018-02-13

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事电力系统保护与控制、新能源电力系统方面的研究和教学工作; Email: zh dai@ncepu.edu.cn

黄敏(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统保护与控制方面的研究;

苏怀波(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统保护与控制方面的研究。

(编辑 许威)