

# 考虑交直流侧协调的模块化多电平换流站直流线路保护方案

戴志辉<sup>1</sup>,朱惠君<sup>1</sup>,苏怀波<sup>1</sup>,刘雪燕<sup>1</sup>,金丽萍<sup>2</sup>,陈曦<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室,河北 保定 071003;  
2. 国网保定供电公司,河北 保定 071000)

**摘要:**在换流站保护中,交直流保护之间往往缺乏配合,且存在直流保护的速动性难以满足要求、故障区域难以确定等难点。为此,根据模块化多电平换流器(MMC)闭锁前后直流二次谐波电流与交流负序电流特征,提出了换流站交直流故障辨识方法,可有效区分交、直流故障,确定故障区域。在此基础上,提出了交、直流侧协调配合的换流站直流保护方案。最后,结合光伏直流汇集接入系统的PSCAD/EMTDC模型,验证了交直流故障辨识方法的可行性以及交、直流侧协调配合的直流保护方案的可靠性。结果表明,所提方法能有效识别交、直流故障,且受过渡电阻的影响较小。

**关键词:**模块化多电平换流器;交直流故障识别;继电保护;保护配合;2次谐波;负序分量

**中图分类号:**TM 773;TM 721.1

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201909011

## 0 引言

交直流混合系统中,为避免电力电子器件因故障而损坏,需限制故障电流并快速隔离故障,可采用具有故障隔离能力的模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter),或加装限流装置<sup>[1]</sup>,并由控制策略维持电网运行<sup>[2]</sup>。为减少故障对非故障线路正常运行的影响、实现系统的快速恢复,需确定故障区域并完成故障隔离<sup>[3-4]</sup>。

交流故障往往导致桥臂环流增大、直流电压波动等问题,且换流站内的交流故障一般为永久性故障,需对其进行快速识别、定位并隔离<sup>[5]</sup>。为提高换流站内交流保护的可靠性,直流保护的覆盖范围可延伸至换流站网侧,并与交流保护范围部分重叠<sup>[6]</sup>。传统交流保护常利用电流特征确定故障区域,而无法直接应用于直流保护<sup>[3,7]</sup>,且存在发生交流故障后直流保护误动的可能<sup>[8]</sup>。

此外,现有的交、直流保护配合策略主要通过延时防止保护误动。如直流输电系统中,通常装有100 Hz保护及低电压保护识别阀故障与交流系统扰动;与交流后备保护配合时,定值整定困难,且一般设有几百毫秒的延时<sup>[9]</sup>。但对于直流保护,延时时间较长时,可能存在故障特征因换流器闭锁等原因

而消失的情况。且现有的交直流保护大多没有综合考虑交直流故障特征以及保护方案和定值的配合,确定故障区域的功能仍待完善<sup>[8-9]</sup>。

因此,本文在分析交直流故障特征的基础上,提出了换流站交直流故障辨识方法,及不受交流故障影响的直流保护方案,主要工作如下:

(1)分析了MMC换流站交、直流侧故障后,MMC闭锁前后交流负序电流与直流侧2次谐波电流的特征,以及交、直流电压特征;

(2)结合MMC闭锁前后的交、直流电流特征,提出换流站交、直流故障辨识方法;

(3)结合MMC闭锁前后的故障特征,及换流站交、直流故障辨识方法,提出了新的MMC换流站直流保护方案。

## 1 基于故障电流特征的MMC交直流故障辨识原理

### 1.1 MMC的等效简化模型

首先以图1所示的MMC换流站为载体说明参数关系。图中,母线 $B_{s1}$ 为换流站直流出口母线; $B_{s2}$ 为换流站交流出口母线; $R_T$ 为变压器 $T_s$ 接地电阻。MMC拓扑结构及其等效简化电路分别见附录A中的图A1(a)和(b)<sup>[10]</sup>。图中, $N$ 为MMC桥臂子模块数; $u_{pdc}$ 和 $u_{ndc}$ 分别为直流系统等效电源的正极和负极电压; $u_p$ 、 $u_n$ 分别为母线 $B_{s1}$ 的正、负极电压; $i_p$ 、 $i_n$ 分

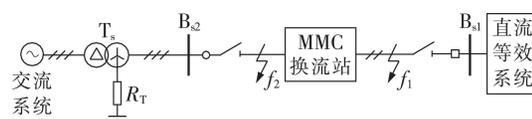


图1 基于MMC的交直流混合系统结构示意图  
Fig.1 Topology of MMC-based AC/DC system

收稿日期:2018-11-09;修回日期:2019-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877084);国家重点研发计划项目(2016YFB0900203);河北省自然科学基金资助项目(E2018502063);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017MS096)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877084),the National Key Research and Development Pro-gram of China(2016YFB0900203),the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2018502063) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017MS096)

别为换流站直流出口的正、负极电流;  $u_{js}$  ( $j=A, B, C$ ; 后同)为交流系统的  $j$  相电压;  $u_j$  为母线  $B_{s2}$  的  $j$  相电压;  $i_j$  为换流站交流出口的  $j$  相电流;  $i_{jcu}$ 、 $i_{jcl}$  分别为  $j$  相的上、下桥臂电流;  $R_{dc}$  和  $L_{dc}$  分别为从  $B_{s1}$  到直流系统等效电源的等效电阻和电感, 含直流系统等效电源内阻;  $R_{ac}$  和  $L_{ac}$  分别为从  $B_{s2}$  到交流系统间的等效电阻和电感, 含交流系统等效电源内阻抗;  $R_{arm}$  和  $L_{arm}$  分别为桥臂等效电阻和桥臂电感;  $C_{jcu}$ 、 $C_{jcl}$  分别为  $j$  相上、下桥臂投入子模块的总电容; 设  $j$  相上、下桥臂投入子模块数分别为  $N_{ju}$  和  $N_{jl}$ , 则  $C_{jcu}$  与子模块电容  $C_{sm}$  满足  $C_{jcu}=C_{sm}/N_{ju}$ ,  $C_{jcl}$  与  $C_{sm}$  满足  $C_{jcl}=C_{sm}/N_{jl}$ 。

## 1.2 MMC 交直流故障特征

### 1.2.1 故障电流特征

根据文献[11], 换流站交流侧  $k_{ac}$  次谐波与直流侧  $k_{dc}$  次谐波具有式(1)所示关系。

$$k_{dc} = \pm(k_{ac} - 1) \quad (1)$$

其中,  $k_{ac} > 0$  时表示正序谐波,  $k_{ac} < 0$  时表示负序谐波;  $\pm$  号用于修正, 使  $k_{dc} \geq 0$ 。

因 MMC 交流电气量谐波含量少, 故本文只分析交流电气量的工频特征[12]。发生交流不对称故障后, 交流侧往往产生负序分量, 将  $k_{ac} = -1$  代入式(1)得  $k_{dc} = 2$ , 即交流负序分量会导致直流侧出现 2 次谐波。反之, 若直流侧包含 2 次谐波, 则交流侧也会出现负序分量。若 MMC 未闭锁或不具有故障隔离功能, 则交直流电气量相互影响, 上述关系成立。

对于 MMC, 当交流电压不平衡或直流电压突变时, 可能导致桥臂电容电压不平衡并出现环流[13-14]。为抑制正常运行时因桥臂环流导致的直流侧 2 次谐波, 一般设有环流抑制控制器 CCSC (Circulating Current Suppressing Controller)。但交、直流故障后, 桥臂环流突增且 CCSC 难以抑制该环流, 则交流侧负序电流和直流侧 2 次谐波电流突增[15]。可见, 桥臂电容不平衡电压是连接交流负序电流与直流 2 次谐波电流的纽带。

为进一步定量反映交流侧负序电流和直流侧 2 次谐波电流的大小关系, 作如下分析。根据文献[15], 结合图 A1(b), 得到 MMC 交、直流侧的环流等效电路如图 2 所示。其中,  $u_{jb}$  为  $j$  相桥臂电容不平衡电压, 对于交流侧而言为负序分量, 对于直流侧而言为 2 次谐波分量;  $i_{j(2)}$  为  $j$  相负序电流;  $i_{p(2)}$  和  $i_{n(2)}$  分别为正、负极的 2 次谐波电流, 且满足  $i_{p(2)} = i_{n(2)}$ , 故以  $i_{p(2)}$  为例分析直流 2 次谐波电流。

由图 2 可得, 在桥臂不平衡电流作用下, 交流负序电流  $i_{j(2)}$  满足式(2), 直流 2 次谐波电流  $i_{p(2)}$  满足式(3)。

$$i_{j(2)} = \frac{u_{jb}}{2L_{ac} + L_{arm}} \exp\left(-\frac{2R_{ac} + R_{arm}}{2L_{ac} + L_{arm}} t\right) \quad (2)$$

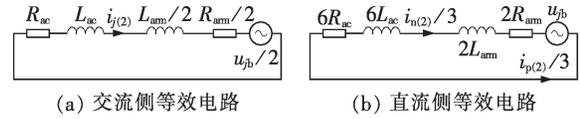


图 2 MMC 桥臂环流等效电路

Fig.2 Equivalent circuits of circulation in bridge arms of MMC

$$i_{p(2)} = -\frac{3u_{jb}}{2(3L_{dc} + L_{arm})} \exp\left(-\frac{3R_{dc} + R_{arm}}{3L_{dc} + L_{arm}} t\right) \quad (3)$$

一般地, 发生交流故障后相当于在故障点产生 1 个附加电源, 若为不对称故障则系统中存在负序分量。类似地, 发生直流故障后亦可视为在故障点产生附加电源[16], 由文献[13-15]可知, 若故障后桥臂电容电压平衡难以维持, 则该直流故障等效电源含 2 次谐波分量。为便于叙述, 交流故障等效电源的负序分量和直流故障等效电源的 2 次谐波分量均用  $u_{f(2)}$  表示。

由前文的分析可知, 不平衡电压  $u_{jb}$  是在  $u_{f(2)}$  的作用下产生的。交、直流故障后,  $u_{jb}$  与  $u_{f(2)}$  的关系分别如式(4)和(5)所示。

$$\frac{di_{j(2)}}{dt} + \frac{2R_{acf} + R_{arm}}{2L_{acf} + L_{arm}} i_{j(2)} = \frac{2u_{f(2)} + u_{jb}}{2L_{ac} + L_{arm}} \quad (4)$$

$$\frac{di_{p(2)}}{dt} + \frac{3R_{def} + R_{arm}}{3L_{def} + L_{arm}} i_{p(2)} = \frac{3(u_{f(2)} - u_{jb})}{2(3L_{dc} + L_{arm})} \quad (5)$$

其中,  $R_{acf}$  和  $L_{acf}$  分别为交流故障点到 MMC 交流出口之间的电阻和电感;  $R_{def}$  和  $L_{def}$  分别为故障点到 MMC 直流出口之间的电阻和电感。

正常运行或子模块发生故障而换流器外部无故障时, 换流站母线  $B_{s1}$  流向换流器的 2 次谐波电流  $i_{p(2)}$  满足式(3), 母线  $B_{s2}$  流向换流器的负序电流  $i_{j(2)}$  满足式(2)。若子模块发生故障后 MMC 闭锁且实现交、直流电气隔离, 相当于 MMC 开路, 则  $i_{j(2)}$  和  $i_{p(2)}$  均降为 0。

换流站直流引线短路, 即图 1 中的点  $f_1$  发生故障时,  $i_{p(2)}$  满足式(6),  $i_{j(2)}$  仍满足式(2)。

$$i_{p(2)} = -(u_{f(2)}/L_{dc}) \exp(-R_{dc} t/L_{dc}) \quad (6)$$

MMC 闭锁且完成交、直流电气隔离后,  $i_{p(2)}$  仍满足式(6), 但  $i_{j(2)}$  降为 0。

换流站交流引线短路时, 即图 1 中的点  $f_2$  发生故障时,  $i_{j(2)}$  满足式(7),  $i_{p(2)}$  仍满足式(3)。

$$i_{j(2)} = -(u_{f(2)}/L_{ac}) \exp(-R_{ac} t/L_{ac}) \quad (7)$$

MMC 闭锁且完成交、直流电气隔离后,  $i_{j(2)}$  仍满足式(7), 但  $i_{p(2)}$  降为 0。

### 1.2.2 故障电压特征

直流极间短路后, 母线  $B_{s2}$  上的  $j$  相电压  $u_j$  降低, 类似三相短路[1]。在换流器桥臂阻抗及过渡电阻的

影响下,  $u_f$  不一定为0。发生单极接地故障后, 母线  $B_{s2}$  的电压包含式(8)所示的直流量  $u_{Bdc}$ <sup>[17]</sup>。

$$u_{Bdc} = \frac{R_{acs}(u_p + u_n)}{R_{arm} + 2R_{acs}} \quad (8)$$

其中,  $R_{acs}$  为包含接地电阻在内的交流等效电阻。

MMC 闭锁且完成交、直流电气隔离后, 母线  $B_{s2}$  的电压即变压器  $T_s$  阀侧开路电压。发生交流故障后, 母线  $B_{s1}$  上的直流正、负极电压产生式(9)所示的共模工频分量  $U_p$  和  $U_n$ <sup>[18]</sup>。

$$\begin{cases} U_p = \frac{Z_{dc}}{Z_{dca}} \left( \sum_{j=A,B,C} V_{jcu} + \sum_{j=A,B,C} U_j \right) \\ U_n = \frac{Z_{dc}}{Z_{dca}} \left( - \sum_{j=A,B,C} V_{jel} + \sum_{j=A,B,C} U_j \right) \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $Z_{dc}$  为直流侧等效阻抗;  $Z_{dca} = 3Z_{dc} + Z_{arm}$ ,  $Z_{arm}$  为桥臂等效阻抗;  $V_{jcu}$  和  $V_{jel}$  分别为上、下桥臂电容等效电压相量;  $U_j$  为  $B_{s2}$  上  $j$  相电压相量。

MMC 闭锁且完成交、直流电气隔离后, 母线  $B_{s1}$  的电压由直流电网决定。

### 1.3 基于直流2次谐波电流与交流负序电流的换流站直流故障辨识方法

由式(9)知, 发生交流故障后直流电压可能包含交流分量, 增加了直流低压保护误动的概率。提高低电压保护整定值可防止其误动, 但也会降低其灵敏度<sup>[8-9]</sup>。此外, 因极间短路后三相电压降低, 过渡电阻较大时直流低电压保护可能拒动, 交流低压保护误动的可能性提高<sup>[1, 19]</sup>。故通过改进电压保护防止保护误动具有一定的局限性。结合1.2.1节的分析可知, 发生交、直流故障后, 交流负序电流与直流2次谐波电流特征差异明显。故提出基于直流2次谐波电流和交流负序电流的换流站直流故障辨识方法, 主要用于区分站内交流和直流故障。

设换流站直流引线上的2次谐波电流有效值为  $I_{dcM2}$ , 交流引线上的负序电流有效值为  $I_{acM2}$ , 二者之比  $K_{IM2} = I_{dcM2} / I_{acM2}$ 。

换流器外部无故障但存在桥臂环流时, 如正常运行但电网电压不平衡, 换流器子模块故障并旁路等情况下, 流经交流母线  $B_{s2}$  的负序电流  $i_{Bj(2)}$  和直流母线  $B_{s1}$  的2次谐波电流  $i_{Bp(2)}$  分别满足式(2)、(3)。考虑到直流2次谐波电流为共模量, 取  $I_{dcM2} = 2i_{Bp(2)}|_{t=0}$ 、 $I_{acM2} = i_{Bj(2)}|_{t=0}$ , 则换流器外部无故障时  $K_{IM2}$  的最大值如式(10)所示。

$$K_{IM2\max} = \frac{3(2L_{ac} + L_{arm})}{3L_{dc} + L_{arm}} \quad (10)$$

换流站直流引线点  $f_1$  发生故障后, MMC 未闭锁时, 因引线长度可忽略, 将  $R_{def} = L_{def} = 0$  及式(3)代入

式(5)得  $u_{jb} = u_{f(2)}$ 。将其代入式(6), 得到  $i_{Bp(2)}$  如式(11)所示。

$$i_{Bp(2)} = -\left(u_{jm(2)}/L_{dc}\right) \exp\left(-R_{dc}t/L_{dc}\right) \quad (11)$$

因  $i_{Bj(2)}$  仍满足式(2), 故直流故障后  $K_{IM2}$  的瞬时值如式(12)所示。对比式(12)与式(10)所示的最大值, 易可知直流故障后的短暂时间内  $K_{IM2}$  大于换流器外部无故障的  $K_{IM2}$ 。

$$K_{IM2} = \frac{4L_{ac} + 2L_{arm}}{L_{dc}} \exp\left[\left(-\frac{R_{dc}}{L_{dc}} + \frac{2R_{ac} + R_{arm}}{2L_{ac} + L_{arm}}\right)t\right] \quad (12)$$

当 MMC 闭锁且实现了直流故障的隔离后, 由1.2.1节分析可知,  $i_{Bp(2)}$  满足式(6), 即  $I_{dcM2} > 0$ , 而  $I_{acM2}$  趋于0, 故  $K_{IM2}$  趋于  $\infty$ 。因此, 发生直流故障时, 换流器闭锁前后的  $K_{IM2}$  值均较大。

类似地, 换流站交流引线即点  $f_2$  发生故障后, 当 MMC 未闭锁时, 有  $u_{jb} = 2u_{f(2)}$ , 则  $i_{Bj(2)}$  如式(13)所示。

$$i_{Bj(2)} = -\left[u_{jb}/(2L_{ac})\right] \exp\left(-R_{ac}t/L_{ac}\right) \quad (13)$$

因  $i_{Bp(2)}$  仍满足式(3), 故发生交流故障后  $K_{IM2}$  的瞬时值如式(14)所示。对比式(14)与式(10)的最大值, 易知发生交流故障后的短暂时间内  $K_{IM2}$  小于换流器外部无故障时的  $K_{IM2}$ 。

$$K_{IM2} = \frac{6L_{ac}}{3L_{dc} + L_{arm}} \exp\left[\left(-\frac{3R_{dc} + R_{arm}}{3L_{dc} + L_{arm}} + \frac{R_{ac}}{L_{ac}}\right)t\right] \quad (14)$$

当 MMC 完全闭锁且完成交流电流的隔离后, 由1.2.1节分析可知,  $i_{Bj(2)}$  满足式(7), 即  $I_{acM2} > 0$ , 而  $I_{dcM2}$  趋于0, 故  $K_{IM2}$  趋于0。因此, 发生交流故障时, 换流器闭锁前后的  $K_{IM2}$  值均较小。

由以上分析可知, 换流站交、直流故障辨识判据分别如式(15)、(16)所示。

$$K_{IM2} < K_{IM2\text{SetL}} = K_{kIRelL} \min\{K_{IM2dcL}, K_{IM2cL}\} \quad (15)$$

$$K_{IM2} > K_{IM2\text{SetH}} = K_{kIRelH} \max\{K_{IM2acH}, K_{IM2cH}\} \quad (16)$$

其中,  $K_{IM2\text{SetL}}$ 、 $K_{IM2\text{SetH}}$  分别为交、直流故障的电流保护判据定值, 理论依据分别如式(14)、(12)所示;  $K_{kIRelH}$  和  $K_{kIRelL}$  为可靠系数, 且  $K_{kIRelH} > 1$ 、 $K_{kIRelL} < 1$ ;  $\max\{X\}$  表示取数集  $X$  的最大值;  $\min\{X\}$  表示取数集  $X$  的最小值;  $K_{IM2acH}$  为交流故障的最大  $K_{IM2}$ ;  $K_{IM2cH}$  为换流器内部故障的最大  $K_{IM2}$ ;  $K_{IM2dcL}$  为直流故障的最小  $K_{IM2}$ ;  $K_{IM2cL}$  为换流器内部故障的最小  $K_{IM2}$ 。

## 2 MMC 换流站直流线路保护方案

换流站交直流故障辨识方法需计算交流负序电流有效值, 故其计算速度会影响直流保护的响应速度<sup>[20]</sup>。此外, 当换流站交流侧接地阻抗较大, 或站内装有限流装置时, 单相接地故障和单极接地故障的故障电流较小甚至可能为0。此时, 换流站交直流故障辨识方法和常规交流过电流保护难以识别故

障。但因系统功率传输基本不受影响,可继续运行一段时间,故可适当降低保护速动性要求<sup>[4]</sup>。由式(9)可知,发生单相接地故障后直流电压产生共模工频分量,故可用式(17)所示的直流工频电压判据辨别单相接地与直流故障,并为单相接地故障提供后备保护。

$$U_{dcM1} > U_{dcM1Set} = K_{u1RelH} U_{dcM1acH} \quad (17)$$

其中,  $U_{dcM1}$  为直流电压中工频分量的有效值;  $U_{dcM1Set}$  为直流电压保护判据定值,用于识别单相接地故障;  $K_{u1RelH}$  为大于 1 的可靠系数;  $U_{dcM1acH}$  为除单相接地故障外,发生其他交流短路故障后直流电压工频分量的最大有效值,结合式(9)可知,若故障前的交流电压有效值为  $U_{j0l}$ ,则  $U_{dcM1acH}$  的理论值为  $1.5Z_{dc}U_{j0l}/Z_{dca}$ 。

综合考虑单极接地故障、极间故障、单相接地故障后的直流电压特征及速动性要求,改进传统直流低电压保护如式(18)所示。

$$\begin{cases} u_p < U_{dcSetL} = K_{uRel} U_{dcacl}, u_n > -U_{dcSetL} \\ u_p < U_{dcSetH} = K_{uRel} U_{dcacl}, u_n > -U_{dcSetH} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $U_{dcSetL}$  和  $U_{dcSetH}$  分别为电压高、低定值;  $K_{uRel}$  为小于 1 的可靠系数;  $U_{dcacl}$  为发生交流故障后的最低直流电压,即发生单相接地短路故障后的最低直流电压,由式(9)知,其理论值比额定电压小  $3Z_{dc}U_{j0l}/Z_{dca}$ ;  $U_{dcacl}$  为正常运行允许的最低电压,一般取额定电压的 95%。

综上所述,考虑交直流保护协调配合的换流站保护流程如附录 B 中的图 B1 所示。其中,交流电压、电流取母线  $B_{s2}$  上的电压  $u_{Bj}$  及  $B_{s2}$  流向 MMC 的电流  $i_{Bj}$ ,直流电压取母线  $B_{s1}$  上的正极电压  $u_{Bp}$  和负极电压  $u_{Bn}$ ,直流电流取从母线  $B_{s1}$  流向 MMC 的电流正极  $i_{Bp}$ 、负极  $i_{Bn}$ 。

(1)若式(18)的低定值判据成立,则直流保护动作并确定故障极。由于低定值判据躲过了交流故障引起的最低直流电压值,可直接用于直流故障极判断,如图 B1(a)所示。

(2)如图 B1(b)所示,若式(18)的高定值判据在正、负极均成立,则为极间故障,直流保护动作。若仅一极低电压高定值判据成立,结合式(9),可能是由于交流故障后直流电压出现交流分量所致<sup>[18]</sup>,则需进一步结合式(15)、(16)判断是否为直流故障(如图 B1(c)所示):若式(15)所示的交流故障判据成立,则为交流故障、直流保护不动作,并结合交流保护判据或式(17)所示的直流工频电压保护判据确定故障类型;若式(16)所示的直流故障判据成立,直流保护动作。

此外,为防止正常运行时因交流负序电流有效值  $I_{acM2}$  趋于 0 导致  $K_{IM2}$  趋于  $\infty$  而使式(16)成立,换流站交直流故障辨识方法可能误动,设式(19)所示的电流突变判据为启动判据,并分别取  $I_{dcM2}$  和  $I_{acM2}$  为测

量值与正常运行均值  $I_{dcM2noM}$  和  $I_{acM2noM}$  中的最大值。

$$\begin{cases} \left| \frac{\Delta I_{dcM2}}{I_{dcM2noM}} \right| > I_{dcM2Set} = K_{i2Rel} \left| \frac{\Delta I_{dcM2noM}}{I_{dcM2noM}} \right| \\ \left| \frac{\Delta I_{acM2}}{I_{acM2noM}} \right| > I_{acM2Set} = K_{i2Rel} \left| \frac{\Delta I_{acM2noM}}{I_{acM2noM}} \right| \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $\Delta$  表示变化量;  $I_{dcM2Set}$  为直流 2 次谐波电流启动判据定值;  $K_{i2Rel}$  为略大于 1 的可靠系数;  $\Delta I_{dcM2noM}$  为正常运行时直流 2 次谐波电流变化量均值;  $I_{dcM2Set}$  为交流负序电流启动判据定值;  $\Delta I_{acM2noM}$  为正常运行时交流负序电流变化量均值,可取 0.01 p.u.。设正常运行时直流 2 次谐波电流与交流负序电流有效值之比为  $K_{IM2no}$ ,如式(10)所示,则  $I_{dcM2noM}$  的值为  $0.01K_{IM2no}$ 。为提高保护可靠性,所有判据均需连续成立 2 次。

### 3 保护方案的验证

#### 3.1 换流站交直流故障辨识方法验证

为验证该方法的有效性,在 PSCAD / EMTDC 中搭建图 3 所示的光伏直流汇集接入系统模型。图中,  $B_1$  为光伏电站母线,  $B_2$  为换流站直流母线,  $B_3$  为换流站交流母线;  $T_Y$  为变压器;  $L_Y$  为直流线路;保护采样频率为 10 kHz,光伏输出额定功率为 5 MW;为限制单相短路电流,变压器  $T_Y$  经 120  $\Omega$  电阻接地;系统参数见附录 C 中的表 C1。

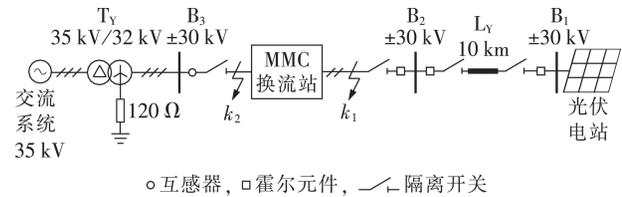


图 3 光伏汇集接入系统拓扑结构示意图

Fig.3 Topology of photovoltaic grid-connection system

在图 3 所示的交直流混合系统仿真模型中,设仿真 1 s 发生故障,故障后若桥臂过流,则延时 2 ms 后 MMC 闭锁<sup>[20]</sup>。以换流站直流引线上点  $k_1$  发生正极接地故障、极间短路故障,及交流引线上点  $k_2$  发生 A 相接地故障和三相短路故障为例,故障前后 MMC 交、直流侧电流波形分别如附录 D 中的图 D1、D2 所示。

根据交、直流电流特征,以点  $k_1$  故障为例的区内直流故障,  $k_2$  点故障为例的区内交流故障,及上桥臂半桥子模块故障为例的子模块故障前后计算得到的电流比  $K_{IM2}$  变化如图 4 所示。图 4(a)中, PF 表示直流正极金属性接地短路; PNF 表示极间金属性短路; PFR 表示含有过渡电阻的直流正极接地故障; PNFR 表示过渡电阻为 50  $\Omega$  的极间故障;图 4(b)中, AF 表示交流 A 相接地短路; BCF 表示 BC 两相相间短路; BCGF 为 BC 两相接地短路; ABCF 表示三相短路;图 4(c)中, AF 表示换流器 A 相桥臂子模块故障; BCF 表示换流器 B、C 相桥臂子模块故障, ABCF 表示换流器三相桥臂均有子模块故障。

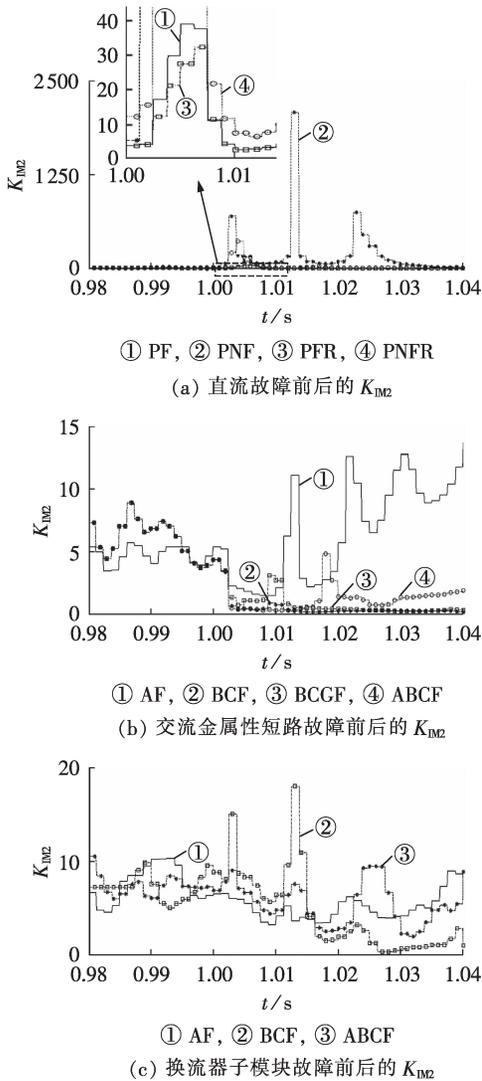


图 4 换流站内故障前后的  $K_{IM2}$  波形

Fig.4 Waveform of  $K_{IM2}$  before and after faults in MMC station

结合 1.2 节的分析可知,发生直流故障后瞬间桥臂电容电压不平衡,  $K_{IM2}$  上升且最大值大于式(10)所示的换流器外部无故障时的最大值,如图 4(a)所示。发生单极故障后极间电压不变,故子模块电容电压恢复至故障前的值并恢复平衡,则  $K_{IM2}$  下降。发生极间短路故障后极间电压下降,子模块电容放电并逐渐恢复电容电压平衡,  $K_{IM2}$  下降。若 MMC 闭锁且完成交、直流电气隔离,则交流负序电流  $I_{acM2}$  突降为 0,  $K_{IM2}$  上升后下降。

交流故障后瞬间,桥臂电容电压不平衡,  $K_{IM2}$  下降且最小值小于正常运行的值,如图 4(b)所示。若 MMC 闭锁,则直流电流  $I_{dcM2}$  降为 0,  $K_{IM2}$  维持在较低值。若 MMC 不闭锁,则交直流之间存在通路,  $K_{IM2}$  跟随交流电流  $I_{acM2}$  和直流电流  $I_{dcM2}$  变化,且最大值小于式(10)。

将表 C1 中的数据代入式(12)和(14)可得:发生正极直接接地故障后  $K_{IM2}=31.47e^{-2.81t}$  (故障初始时刻

$t=0$ );发生正极经  $50\ \Omega$  过渡电阻接地故障后,  $K_{IM2}=31.47e^{-1.55t}$ ;发生交流 A 相直接接地故障后的  $K_{IM2}=0.918e^{-0.50t}$ ,发生 A 相经  $50\ \Omega$  过渡电阻接地故障后的  $K_{IM2}=0.918e^{-0.23t}$ ,2 种故障后的仿真波形与计算结果如图 5(a)、(b)所示。由图可见,发生正极接地故障时  $K_{IM2}$  的计算值接近仿真结果的最大值,发生 A 相接地故障后计算得到的  $K_{IM2}$  接近仿真结果的最小值;无论是计算结果还是仿真结果,发生直流单极接地故障时的  $K_{IM2}$  均明显大于发生交流单相接地故障时的  $K_{IM2}$ ,与 1.3 节结论一致。

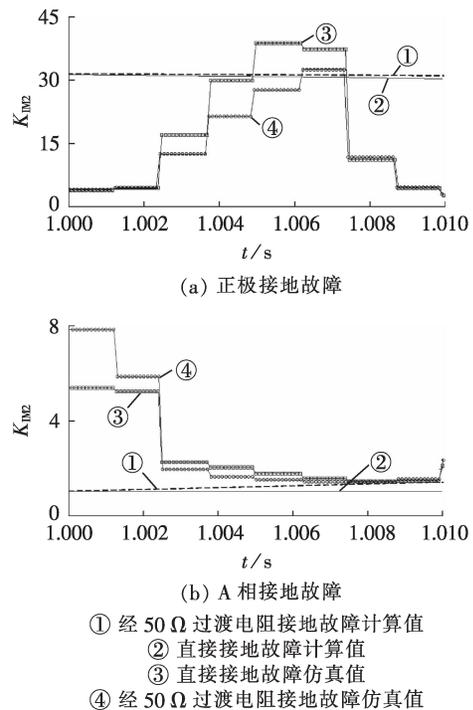


图 5 计算结果与仿真结果对比

Fig.5 Comparison between calculative and simulation results

计算结果与仿真结果存在差异的原因在于:计算过程忽略了 MMC 电流内环控制对故障电流的调节作用及换流器内部储能元件(模块电容、桥臂电感等)对故障暂态的影响,且其波形较为平滑;而仿真过程中由于两者的作用,故障电流存在一定波动。但在故障发生 2 ms 后,仿真波形与计算波形已较接近,可用于交直流故障的识别。

综上,通过式(15)、(16)所示的换流站交直流保护判据区分交、直流短路是可行的。

### 3.2 换流站交直流配合保护方案验证

根据 1.3 节、2.1 节相关分析,结合表 C1 参数,可得换流站保护方案中的整定值如表 1 所示。

按图 B1 所示流程,在 MATLAB 中实现换流站交、直流保护方案,并结合图 3 所示系统的 PSCAD 模型验证该方案。结果表明,换流站内  $k_i$  处发生金属性直流故障及过渡电阻为  $50\ \Omega$  的直流故障时,保护

表1 保护定值

Table 1 Theoretical and actual set values of protection

整定值	可靠系数	保护定值	整定值	可靠系数	保护定值
$I_{dcM2Set}$	1.05	$4.20 \times 10^{-4}$ kA	$K_{IM2SetL}$	0.95	4.03
$I_{acM2Set}$	1.05	$7.59 \times 10^{-5}$ kA	$U_{dcSetL}$	0.95	2.95 kV
$U_{dcM1Set}$	1.05	5.96 kV	$U_{dcSetH}$	0.95	27.2 kV
$K_{IM2SetH}$	1.05	18.96			

可正确识别为直流故障并确定故障极;换流站内 $k_2$ 处发生金属性直流故障及过渡电阻为 $50 \Omega$ 的交流故障时,保护可正确识别为交流故障;换流站子模块故障时,交、直流保护正确不动作。表2给出了 $k_1$ 和 $k_2$ 处发生故障后的保护判据成立时间。

表2 换流站内发生交直流故障后保护判据成立时间

Table 2 Times when protections are established after AC and DC faults in converter station

故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	判据成立时间/ms	故障位置	过渡电阻/ $\Omega$	故障类型	判据成立时间/ms
$k_1$	0	PF	0.2	$k_1$	50	PFR	2.7
		PNF	0.2			PNFR	0.2
$k_2$	0	AF	5.2	$k_2$	50	AF	6.4
		BCF	1.9			BCF	2.7
		BCGF	1.7			BCGF	2.7
		ABCF	2.4			ABCF	2.7

表2中,极间短路后0.2 ms,正、负极电压均满足低压判据,保护识别为极间短路故障。发生单极故障及单相故障后,MMC均不闭锁。若为金属性单极短路故障,故障后0.2 ms故障极低电压低定值判据成立,保护识别为正极故障。若为非金属性单极故障,故障极低电压低定值判据不成立,高定值判据于故障后0.2 ms成立,交直流辨识方法于2.7 ms判断为直流故障,此时保护识别为单极故障。若为单相故障,则直流低电压高定值判据在某一极成立,低定值判据不成立,因交直流辨识方法判断为交流故障,故直流保护正确不动作。

## 4 结论

现有的交直流混合系统保护方案往往缺少交直流保护的配合,影响了保护的可靠性。为此,本文在分析交直流故障电流特征的基础上,提出了交直流侧协调配合的换流站直流线路保护,并得到以下结论。

(1)发生交、直流故障后,交流负序电流与直流2次谐波电流突增且相互影响。

(2)发生直流故障后,直流2次谐波电流与交流负序电流有效值之比突增,高于交流故障及子模块故障后的电流比。

(3)发生交流故障后,电流比突降,低于直流故障及子模块故障后的电流比。

(4)基于直流2次谐波电流与交流负序电流特征的换流站交直流故障辨识方法可较为准确地识别

站内交流单相接地故障和直流单极接地故障,且过渡电阻基本只影响保护速度,对其可靠性影响较小。因为联合了交流量,极间短路故障的识别速度无法满足要求,可采用低电压保护高定值判据进行判别。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李斌,李晔,何佳伟. 基于模块化多电平换流器的直流系统故障处理方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1944-1950.  
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. DC fault handling scheme for the MMC-based DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1944-1950.
- [2] 司志磊,陆翌,韩坤,等. 基于桥臂阻尼阀组的模块化多电平换流器故障快速清除与系统恢复技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):60-67,74.  
SI Zhilei, LU Yi, HAN Kun, et al. Fast fault clearance and system recovery technology of MMC based on bridge-arm damping valve groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):60-67, 74.
- [3] 李斌,何佳伟,冯亚东,等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):2-12.  
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Systems, 2016, 40(21):2-12.
- [4] 郑涛,吴丹,宋洁莹. 基于MMC的统一潮流控制器交流侧故障特性及保护方案[J]. 电网技术,2015,39(12):3570-3577.  
ZHENG Tao, WU Dan, SONG Jieying. The AC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on MMC[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3570-3577.
- [5] 孙晓云,高鑫,同向前. 考虑故障阀臂封锁条件下的VSC-HVDC换流器故障诊断算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):121-126.  
SUN Xiaoyun, GAO Xin, TONG Xiangqian. Fault diagnosis algorithm for converter of VSC-HVDC system with failed valve arm blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):121-126.
- [6] 蒲莹,厉璇,马玉龙,等. 网侧分层接入500 kV/1000 kV交流电网的特高压直流系统控制保护方案[J]. 电网技术,2016,40(10):3081-3087.  
PU Ying, LI Xuan, MA Yulong, et al. Control and protection system scheme on UHVDC with hierarchical connection to 500 kV/1000 kV AC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):3081-3087.
- [7] 戴志辉,葛红波,陈冰研,等. 柔性中压直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):78-86.  
DAI Zhihui, GE Hongbo, CHEN Bingyan, et al. Line protection schemes for flexible medium voltage DC distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17):78-86.
- [8] 张海强,林圣,刘磊,等. 基于直流差动保护动作的送端换流器接地故障定位方案[J]. 电网技术,2018,42(8):2382-2390.  
ZHANG Haiqiang, LIN Sheng, LIU Lei, et al. Grounding fault location scheme of HVDC rectifier based on the action of DC differential protection[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2382-2390.
- [9] 成敬周,徐政,张静. 交流系统横向故障对HVDC 100 Hz保护影响及特性分析[J]. 电网技术,2011,35(9):223-228.  
CHENG Jingzhou, XU Zheng, ZHANG Jing. Influence of transverse faults in HVAC power system on HVDC 100 Hz protection of HVDC transmission system and analysis on its characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9):223-228.

- [10] 和敬涵,黄威博,李海英,等. FBMMC 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. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 1-7.
- [11] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:76-87.
- [12] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C] //2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 1-6.
- [13] LI J, KONSTANTINOU G, WICKRAMASINGHE H R, et al. Impact of circulating current control in capacitor voltage ripples of modular multilevel converters under grid imbalances [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1257-1267.
- [14] LU M, HU J, ZENG R, et al. Imbalance mechanism and balanced control of capacitor voltage for a hybrid modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5686-5696.
- [15] SHI X, WANG Z, LIU B, et al. Steady-state modeling of modular multilevel converter under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 32(9): 7306-7324.
- [16] 索南加乐,张健康,焦在滨,等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术,2010,36(6):1461-1467.  
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [17] 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.
- [18] 戴志辉,朱惠君,严思齐,等. 钳位双子模块型模块化多电平换流器交流侧故障对直流侧的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(12):3568-3577.  
DAI Zhihui, ZHU Huijun, YAN Siqi, et al. Influence of clamp double submodule-modular multilevel converter AC-side faults on DC-side quantities [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3568-3577.
- [19] 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):2353-2362.  
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): 2353-2362.
- [20] 和敬涵,周琳,罗国敏,等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):158-165.  
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.

#### 作者简介:



戴志辉

戴志辉(1980—),男,宁夏固原人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: zhdai@ncepu.edu.cn);

朱惠君(1994—),女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制;

苏怀波(1993—),男,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制。

## DC line protection scheme for modular multilevel converter station considering coordination of AC and DC sides

DAI Zhihui<sup>1</sup>, ZHU Huijun<sup>1</sup>, SU Huaibo<sup>1</sup>, LIU Xueyan<sup>1</sup>, JIN Liping<sup>2</sup>, CHEN Xi<sup>2</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Baoding Power Supply Company, Baoding 071000, China)

**Abstract:** In the protection of converter station, the coordination between AC and DC protections has not been fully addressed, and the tripping speed of DC protection is not quick enough and the fault area is difficult to be identified accurately. Therefore, an approach for discriminating AC and DC faults near MMC (Modular Multilevel Converter) station is proposed based on characteristics of DC-side second harmonic current and AC-side negative-sequence current before and after the blocking of MMC, which can effectively distinguish AC faults from DC ones and determine the fault area. On this basis, a DC protection scheme for MMC station considering the coordination between AC and DC side protections is proposed. Finally, the feasibility of the AC/DC fault discrimination approach and the reliability of the DC protection scheme considering the coordination between AC and DC side protections are verified by the PSCAD/EMTDC model of a photovoltaic grid-connected system. Results demonstrate that the proposed approach can discriminate AC and DC faults while being slightly affected by the transition resistance.

**Key words:** modular multilevel converter; identification of AC and DC fault; relay protection; protection coordination; second harmonic; negative-sequence component

## 附录 A

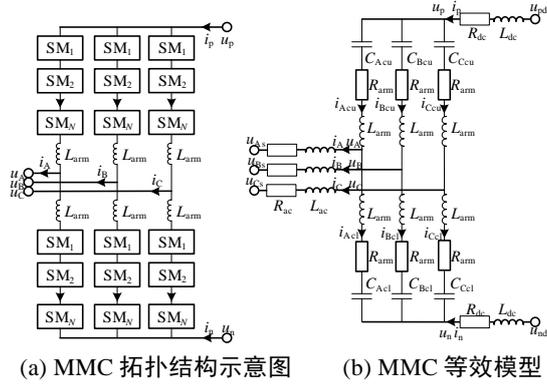


图 A1 MMC 结构示意图

Fig. A1 Topology of a MMC

(1) 式 (2)、(3) 的推导过程如下。

由**错误! 未找到引用源。**得, 在桥臂不平衡电流作用下, 交流负序电流  $i_{j(2)}$  满足式 (A1),  $i_{p(2)}$  满足式 (A2)。

$$\frac{di_{j(2)}}{dt} + \frac{2R_{ac} + R_{arm}}{2L_{ac} + L_{arm}} i_{j(2)} = \frac{u_{jb}}{2L_{ac} + L_{arm}} \quad (A1)$$

$$\frac{di_{p(2)}}{dt} + \frac{3R_{dc} + R_{arm}}{3L_{dc} + L_{arm}} i_{p(2)} = -\frac{3u_{jb}}{2(3L_{dc} + L_{arm})} \quad (A2)$$

分别解式 (A1)、(A2) 得式 (2)、(3)。

(2) 式 (6) 的推导过程如下。

当换流站直流引线短路时, 即图 A1 (a) 中的点  $f_1$  发生故障, 则  $i_{p(2)}$  满足式 (A3)。

$$L_{dc} \frac{di_{p(2)}}{dt} + R_{dc} i_{p(2)} = -u_{f(2)} \quad (A3)$$

解式(III)得式(6)。

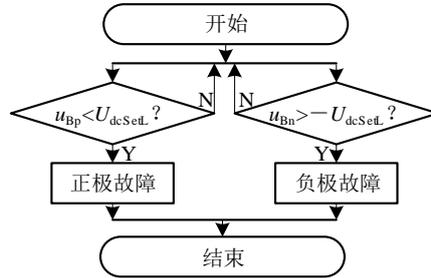
(3) 式 (7) 的推导过程如下。

当换流站交流引线短路时, 即**错误! 未找到引用源。**A (a) 中的点  $f_2$  发生故障, 则  $i_{j(2)}$  满足式 (A4)。

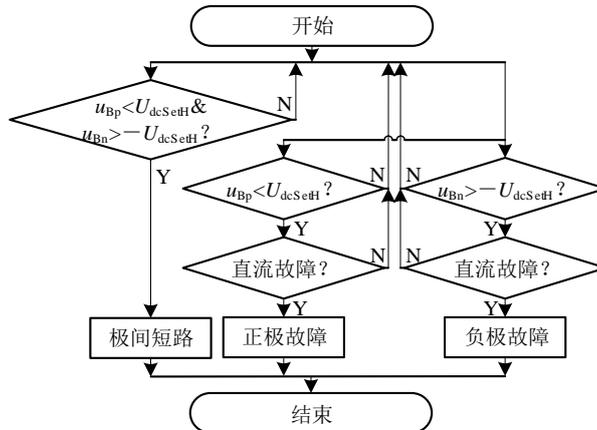
$$L_{ac} \frac{di_{j(2)}}{dt} + R_{ac} i_{j(2)} = -u_{f(2)} \quad (A4)$$

解式 (A4) 得式 (7)。

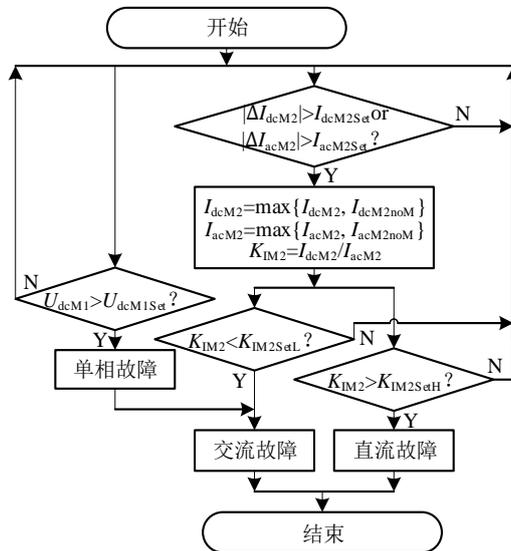
附录 B



(a) 直流低电压低定值保护流程图



(b) 直流低电压高定值保护流程图



(c) 交直流故障识别流程图

图 B1 换流站交直流保护配合流程图

Fig.B1 Flowchart of cooperative AC/DC protection in converter station

## 附录 C

表 C1 光伏直流接入系统参数  
Table C1 Parameters of grid-connection system of PV station

设备	参数	参数值
交流系统	等效电源电压/kV	35
	等效电源电阻/ $\Omega$	2.94
	等效电源电感/mH	150
变压器 $T_Y$	额定容量/ (MV · A)	5
	漏抗	0.05 p.u.
换流器	拓扑结构	混合型 MMC
	各桥臂全桥子模块个数	32
	各桥臂半桥子模块个数	32
	子模块电容/ $\mu$ F	1260
	桥臂电感/mH	160
	限流电感/mH	100
线路 $L_Y$	电阻/ ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.4
	电感/ ( $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$ )	1.41
光伏电站	等效电源电压/kV	$\pm 30$
	等效电源内阻/ $\Omega$	36

## 附录 D

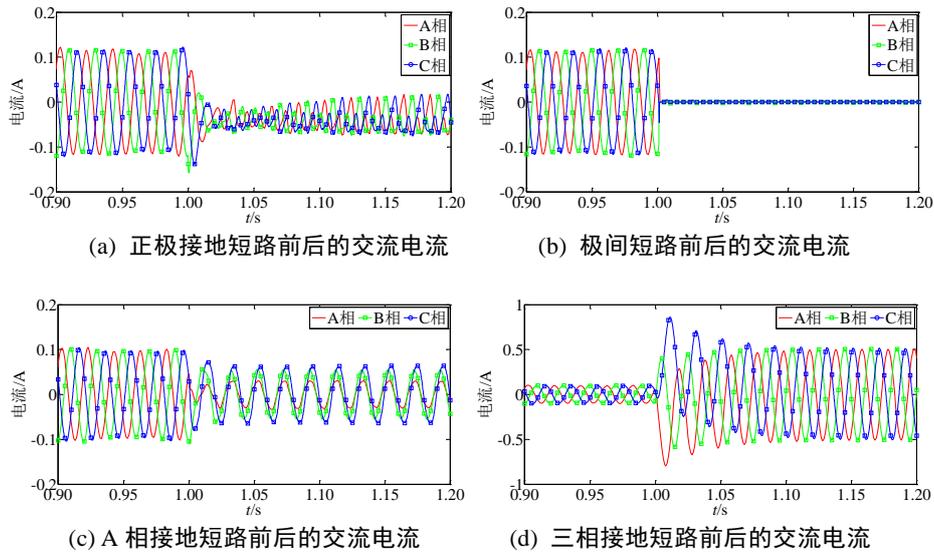


图 D1 交直流短路前后的交流电流波形

Fig.D1 Waveforms of AC-side currents before and after AC and DC faults

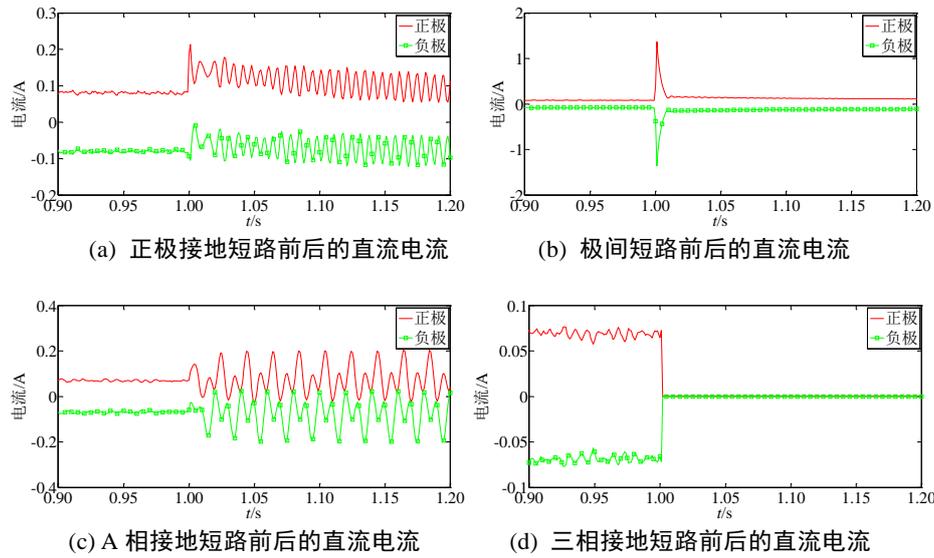


图 D2 交直流短路前后的直流电流波形

Fig.D2 Waveforms of DC-side currents before and after AC and DC faults