

# 交流系统短路故障下MMC对短路电流的影响及抑制策略

茆书睿<sup>1</sup>,徐政<sup>1</sup>,杨健<sup>1</sup>,周友斌<sup>2</sup>,王莹<sup>2</sup>,周鲲鹏<sup>2</sup>,曹侃<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027;2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院,湖北武汉 430077)

**摘要:**基于模块化多电平换流器的高压直流输电系统(MMC-HVDC)接入交流系统可能会对交流断路器清除短路故障造成影响。基于MMC的拓扑结构和控制策略,分析了交流系统短路故障下MMC对交流断路器的影响。然后,研究了交流系统发生对称短路故障时,MMC的运行工况对短路电流的影响,发现MMC对短路电流的贡献主要来源于MMC向交流系统注入的无功功率。接着,研究了交流系统发生非对称短路故障时,MMC在不同运行工况下贡献的三序短路电流的计算方法,得出MMC阀侧零序和负序电流为0,阀侧正序电流是三相对称的且大小由运行工况决定的结论。最后,提出了交流系统对称短路和非对称短路故障下抑制MMC贡献的短路电流的控制方法,并通过PSCAD/EMTDC仿真验证了所得结论的正确性以及控制方法的有效性。

**关键词:**模块化多电平换流器;对称短路故障;非对称短路故障;运行工况;降低短路电流

**中图分类号:**TM 71;TM 72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011008

## 0 引言

随着高压直流输电技术的不断发展,我国华东、华北等地区逐步形成交直流混联电网<sup>[1-2]</sup>。与传统高压直流输电系统LCC-HVDC(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current transmission system)相比,柔性直流输电系统VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current transmission system)具有可同时独立调节有功功率和无功功率、没有换相失败和无功补偿问题等优越性<sup>[3]</sup>。基于模块化多电平换流器的高压直流输电系统MMC-HVDC(Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current transmission system)的不断成熟,提高了柔性直流输电工程的电压等级和输电能力,使得柔性直流输电在电网中扮演着越来越重要的角色<sup>[4-5]</sup>。

由于现已投运的柔性直流输电工程传输功率小,交流系统短路故障下其贡献的短路电流相对于交流系统本身提供的短路电流微不足道,因而目前通常认为柔性直流输电系统不提供短路电流。但是,对于短路容量较大的交流系统,柔性直流换流器贡献的交流短路电流可能使系统整体的短路电流接近或超过断路器的额定开断电流,从而导致短路故障难以清除<sup>[6-7]</sup>。目前,我国电压等级为220 kV及以上的电力系统都选用直接(有效)接地方式。随着高压和超高压输电网的发展,特别是500 kV超高压自耦变压器的广泛应用,中性点直接接地方式导致电

网的零序阻抗急剧下降,单相短路电流有超过三相短路电流甚至断路器额定开断电流的可能<sup>[8-9]</sup>。所以,有必要分别分析在交流系统发生三相短路和单相短路故障时模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)对短路电流的影响,并采取措降低MMC贡献的短路电流。

目前,国内外学者已经对交直流混联系统发生交流短路故障时直流系统贡献的短路电流进行了研究。文献[10]通过对单相五电平MMC的分段分析提出了一种基于MMC离散建模的交流短路电流计算方法,但该方法仅适用于交流侧负载短路故障。文献[11]分析了交流系统三相短路故障下MMC控制系统对短路电流影响的机理,但并没有研究交流系统三相短路故障下MMC的运行工况对短路电流的影响。对于交流系统发生单相短路故障,文献[12]主要关注交流电网电压不平衡和畸变条件下桥臂环流与子模块电容电压的分析,以及控制系统的影响。文献[13]利用序分量法建立了MMC贡献短路电流的数学模型,定性分析了交流系统发生单相短路故障时MMC影响短路电流幅值的因素,但并未给出交流系统单相短路故障下MMC贡献的三序短路电流的计算方法以及降低短路电流的控制策略。

在此背景下,本文首先介绍了MMC的拓扑结构和控制策略,并分析了交流系统短路故障下MMC对交流断路器影响的场景;然后,研究了交流系统发生对称短路故障时,MMC的运行工况对短路电流的影响;接着,研究了交流系统发生非对称短路故障时,MMC在不同运行工况下贡献的三序短路电流的计算方法;最后,提出了交流系统短路故障下抑制MMC贡献的短路电流的控制方法,并通过PSCAD/EMTDC仿真验证了本文所给机理的正确性以及控制方法的有效性。

收稿日期:2020-01-15;修回日期:2020-11-13

基金项目:国家电网公司总部科技项目(521532190003)

Project supported by the Science and Technology Program of the Headquarters of State Grid Corporation of China (521532190003)

## 1 MMC 的工作原理

### 1.1 拓扑结构

三相 MMC 的拓扑结构见附录 A 中的图 A1。图中,每个桥臂包含  $N$  个子模块 SM(Sub-Module) 和 1 个串联电抗器,同相的上、下 2 个桥臂构成一个相单元,子模块一般采用半桥型结构<sup>[14]</sup>;  $u_{sj}(j=a,b,c)$  和  $P_s + jQ_s$  分别为 MMC 交流侧公共连接点 PCC(Point of Common Coupling) 的三相交流电压和功率;  $i_{vj}$  为 MMC 交流出口(即点  $v$ ) 输出的三相交流电流;  $L_{ac}$  为 MMC 交流出口到 PCC 之间的电感;  $R_0$  为整个桥臂的等效电阻;  $L_0$  为桥臂电抗;  $U_{dc}$  为直流电压;  $I_{dc}$  为直流电流; 三相上、下桥臂的桥臂电压分别为  $u_{vj}$ 、 $u_{vj}$ ; 定义上下桥臂的差模电压和共模电压分别为  $u_{diff}$  和  $u_{conj}$ 。

### 1.2 控制策略

MMC 控制器的设计考虑了交流电网电压的不平衡与畸变,控制器框图见附录 A 中的图 A2。MMC 控制器采用直接电流控制策略,主要由外环功率控制器、内环电流控制器和锁相环 PLL(Phase Locked Loop) 等构成。外环功率控制器根据有功功率或直流电压、无功功率或交流母线电压参考值,计算内环电流控制器输出电流的  $dq$  轴参考值,内环电流控制器通过调节上下桥臂的差模电压使  $dq$  轴电流快速跟踪其参考值并通过调节上下桥臂的共模电压将内部环流抑制为 0。特别地,MMC 控制器采用基于双同步旋转坐标变换正负序解耦技术的锁相环 DDSRF-PLL(Decouples Double Synchronous Reference Frame-Phase Locked Loop) 消除负序基波分量<sup>[15]</sup>,使其在电网电压不平衡和存在畸变时仍然具有很好的动态响应速度。

## 2 交流系统短路故障下 MMC 对交流断路器影响的场景分析

由于交流系统发生短路故障时,三相短路电流和单相短路电流都有可能超过断路器的额定开断电流。因而,本节将以交流系统发生三相短路故障和单相短路故障为例,分析 MMC 对交流断路器的影响。

由交流系统短路比的定义可知,在直流输送功率和交流母线电压等级一定的情况下,交流系统的短路比和短路电流成正比关系。在短路容量较大的交流系统中,交流系统贡献的短路电流接近断路器的额定开断电流。结合附录 B 中的 MMC-HVDC 典型参数可知,此时交流系统为强交流系统,交流系统等值电势和 PCC 处的电压相位接近。

在如图 1 所示的场景中,假定交流系统在断路器 1 处的短路电流接近断路器的额定开断电流。

(1) 对于场景 1: 发生三相短路故障时,交流系

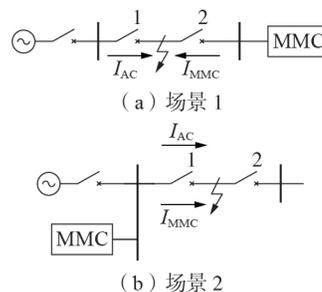


图 1 MMC 对交流断路器影响场景  
Fig.1 Scenarios of impact of MMC on AC circuit breaker

统贡献的短路电流  $I_{AC}$  流过断路器 1 而 MMC 贡献的交流短路电流  $I_{MMC}$  流过断路器 2, 此时 MMC 一般不会造成系统整体的短路电流超过断路器 1 的额定开断电流; 发生单相短路故障时, MMC 会造成非故障相在断路器 1 处的短路电流增大, 从而可能造成非故障相短路电流超过断路器 1 的额定开断电流。

(2) 对于场景 2: 发生三相短路故障时, 交流系统贡献的短路电流  $I_{AC}$  和 MMC 贡献的交流短路电流  $I_{MMC}$  同向且都流过断路器 1, 此时 MMC 会造成系统整体的短路电流超过断路器 1 的额定开断电流; 发生单相短路故障时, 交流系统和 MMC 故障相的短路电流同向且都流过断路器 1, 从而造成故障相的短路电流超过断路器 1 的额定开断电流, 同时 MMC 会造成非故障相在断路器 2 处的短路电流增大。

## 3 MMC 交流母线短路故障下短路电流产生机理

MMC 贡献的短路电流的大小与其控制系统和运行工况密切相关。由于 MMC 具有低惯量特性, 短路故障发生后几毫秒内控制系统能够快速响应<sup>[16]</sup>, 因而本节分别以 PCC 处发生对称短路和非对称短路故障(以单相短路故障为例)为研究对象, 分析控制系统响应后 MMC 在不同运行工况下贡献的稳态短路电流特性。

### 3.1 MMC 交流母线对称短路故障下短路电流分析

#### 3.1.1 MMC 贡献短路电流分析

当 PCC 处发生三相短路故障后, 系统依然处于对称状态, MMC 交流母线电压只存在正序基波电压(忽略谐波分量)。因此, 利用单相基波等效电路来分析 MMC 贡献的 abc 三相稳态短路电流。

当 PCC 处发生三相短路故障后, MMC 输出有功功率  $P_s$ 、无功功率  $Q_s$  和交流母线电压  $U_{sm}$  瞬间下降, 直流电压  $U_{dc}$  瞬间上升或下降, 而指令值不变。因此, 外环功率控制器输出的电流指令值  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  的绝对值会一直增加, 但是由于限幅器的存在, 最终达到  $|i_{vd}^*| = I_{dmax}^*$  和  $|i_{vq}^*| = I_{qmax}^*$ , 其中  $I_{dmax}^*$  和  $I_{qmax}^*$  分别为外环功

率控制器的  $d$  轴和  $q$  轴限幅器的上限值,且假设限幅器上、下限值绝对值相等。

为保证换流阀不过载,在控制系统中设置内环电流限幅器,当电流指令值超过限值时,  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  同比减小。因此,MMC 阀侧的稳态短路电流幅值  $I_{\text{mmc}}$  如式(1)所示。

$$I_{\text{mmc}} = \begin{cases} \sqrt{(I_{d\text{max}}^*)^2 + (I_{q\text{max}}^*)^2} & \sqrt{(I_{d\text{max}}^*)^2 + (I_{q\text{max}}^*)^2} < I_{\text{lim}} \\ I_{\text{lim}} & \sqrt{(I_{d\text{max}}^*)^2 + (I_{q\text{max}}^*)^2} \geq I_{\text{lim}} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $I_{\text{lim}}$  为内环电流限幅器的限幅值。

假设外环功率控制器的  $d$  轴和  $q$  轴限幅器的限幅值  $I_{d\text{max}}^* = I_{q\text{max}}^* = 1.2 \text{ p.u.}$ 、内环电流限幅器的限幅值  $I_{\text{lim}} = 1.2 \text{ p.u.}$ ,因此在 PCC 处发生三相短路故障时,除了特殊情况 ( $P_s^* = 0$  或者  $Q_s^* = 0$ ) 外,MMC 阀侧的稳态短路电流幅值  $I_{\text{mmc}}$  为:

$$I_{\text{mmc}} = I_{\text{lim}} \quad (2)$$

稳态短路电流相对 PCC 处故障前电压的相位  $\varphi_1$  为:

$$\varphi_1 = \arctan(I_{q\text{max}}^* / I_{d\text{max}}^*) \quad (3)$$

将两轴同步旋转坐标系 ( $dq$  坐标系) 下的直流量变换到三相静止坐标系 ( $abc$  坐标系) 下的正弦交流量,当 PCC 处发生三相短路故障时,MMC 阀侧的稳态短路电流  $i_{\text{mmc}}$  (以 a 相为例) 如式(4)所示。

$$i_{\text{mmc}} = I_{\text{lim}} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (4)$$

在标幺值系统下,式(4)同样适用于 MMC 网侧的稳态短路电流  $i'_{\text{mmc}}$ 。

### 3.1.2 MMC 运行工况对短路电流的影响

当交流系统发生短路故障时,在 MMC 容量允许范围内,柔性直流输电系统可以为交流系统提供有功功率和无功功率的紧急支援,从而提高所连接交流系统的功角稳定和电压稳定<sup>[17]</sup>。本文关注受端 MMC 发出有功功率和无功功率 (即  $P_s \geq 0$  和  $Q_s \geq 0$ ), 研究受端 PCC 处发生三相短路故障时,受端 MMC 的运行工况对 MMC 贡献的网侧稳态短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  的影响。

当受端 MMC 仅发出有功功率时,PCC 处发生三相短路故障后, $d$  轴电流  $i_{vd}$  达到外环功率控制器的  $d$  轴限幅器的上限值  $I_{d\text{max}}^*$ , $q$  轴电流  $i_{vq} = 0$ 。由于仅有  $i_{vd}$ ,故 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  与 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$  同相;受端交流系统等值电势  $U_s$  与  $U_{\text{pcc}}$  基本同相 (尤其是 PCC 附近的发电机),交流系统等值电势到 PCC 之间的等值电抗  $L$  远大于电阻  $R$  即阻抗角  $\varphi_k \approx 90^\circ$ 。因此,三相短路故障下交流系统对 PCC 的注入电流  $I_s$  滞后 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$   $90^\circ$ 。可见,三相短路故障下 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  超前交流系统注入短路点的电流  $I_s$   $90^\circ$ 。由 MMC-HVDC 典型参数可知,MMC 贡献的短路电流幅值约为交流系统贡献的短路电流幅值

的 1/10,通过矢量计算最终可以忽略幅值变化,相量关系图如图 2(a) 所示。

当受端 MMC 仅发出无功功率时,PCC 处发生三相短路故障后,  $i_{vq}$  达到外环功率控制器的  $q$  轴限幅器的下限值  $-I_{q\text{max}}^*$ ,  $i_{vd} = 0$ 。由于仅有  $i_{vq}$ ,故 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  滞后 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$   $90^\circ$ ;三相短路故障下交流系统对 PCC 的注入电流  $I_s$  也滞后 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$   $90^\circ$ 。可见,三相短路故障下 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  与交流系统注入短路点的电流  $I_s$  同相。此时,MMC 会使故障点短路电流的幅值增大,且故障点短路电流为交流系统的注入电流与 MMC 贡献的短路电流的代数和,相量关系图如图 2(b) 所示。

当受端 MMC 发出的有功功率和无功功率都不为 0 时,PCC 处发生三相短路故障后,  $i_{vd}$  和  $i_{vq}$  分别达到外环功率控制器的  $d$  轴限幅器的上限值  $I_{d\text{max}}^*$ 、 $q$  轴限幅器的下限值  $-I_{q\text{max}}^*$ ,且假定外环功率控制器的  $d$  轴、 $q$  轴限幅器的限幅值的绝对值相等。所以 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  滞后 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$   $45^\circ$ ;三相短路故障下交流系统对 PCC 的注入电流  $I_s$  滞后 PCC 电压  $U_{\text{pcc}}$   $90^\circ$ 。可见,三相短路故障下 MMC 贡献的短路电流  $I'_{\text{mmc}}$  超前交流系统注入短路点的电流  $I_s$   $45^\circ$ 。根据前文分析可知,  $i_{vq}$  对短路电流幅值的增大起主导作用,由于 MMC 存在无功功率注入交流系统,导致故障点短路电流的幅值增大,相量关系图如图 2(c) 所示。

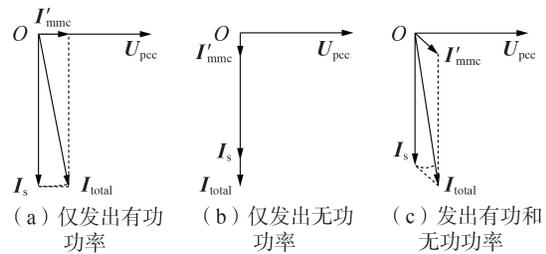


图2 受端 MMC 不同工况下各电流相量

Fig.2 Current phasors at different working conditions of receiving-end MMC

由上述分析可知,受端 MMC 对短路电流的贡献主要来源于受端 MMC 向交流系统注入的无功功率,与 MMC 控制方式无直接关联。若在控制系统中,设定故障期间受端 MMC 注入交流系统的无功功率为 0,则可以大幅减小短路故障下 MMC 向交流系统提供的短路电流。

### 3.2 MMC 交流母线非对称短路故障下短路电流分析

当 PCC 处发生单相 (a 相) 短路故障后,系统处于非对称状态,MMC 交流母线电压不再平衡,存在负序分量和零序分量。因此,采用对称分量法来分

析 MMC 贡献的稳态短路电流。MMC 和换流变压器的三序等效网络图见附录 C 中的图 C1。

在零序等效网络中,换流变压器采用  $Y_0-\Delta$  接法(其中换流变压器阀侧采用  $\Delta$  接法)时  $\Delta$  绕组中的环流不会流到  $\Delta$  绕组以外的线路上,或者采用  $Y_0-Y$  接法(其中换流变压器阀侧采用  $Y$  接法)时  $Y$  绕组没有零序通路,使得 PCC 处发生单相短路故障时 MMC 阀侧零序短路电流  $I_{\text{mmc}(0)}$  无通路,所以  $I_{\text{mmc}(0)}=0$ ,而网侧零序电流  $I'_{\text{mmc}(0)}$  由短路点的零序电势  $U_{f(0)}$  和换流变压器的零序阻抗  $Z_{T(0)}$  决定,即:

$$I'_{\text{mmc}(0)} = \frac{U_{f(0)}}{Z_{T(0)}} = \begin{cases} \frac{U_{f(0)}}{z_1 + \frac{z_{\parallel} z_{m0}}{z_{\parallel} + z_{m0}} + 3z_n} & Y_0 - \Delta \text{接法换流变压器} \\ \frac{U_{f(0)}}{z_1 + z_{m0} + 3z_n} & Y_0 - Y \text{接法换流变压器} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $z_1$  和  $z_{\parallel}$  分别为换流变压器一次侧和二次侧的漏阻抗;  $z_{m0}$  为零序励磁阻抗;  $z_n$  为中性点阻抗(中性点直接接地时  $z_n=0$ )。

在负序等效网络中,当 PCC 处发生单相短路故障时,MMC 交流母线存在负序电压分量,此时如图 A2 所示的 MMC 控制器发挥作用,MMC 会提供与之相对的反电势。在 MMC 控制器中,内环电流控制器的负序电流  $d$  轴和  $q$  轴指令值  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  一般直接取 0,以消除阀侧负序电流。因而,MMC 的阀侧负序电流  $I_{\text{mmc}(2)}$  和网侧负序电流  $I'_{\text{mmc}(2)}$  等于 0。

在正序等效网络中,考虑到交流电网电压不平衡和畸变条件下的 MMC 控制器的瞬时功率计算是基于正序基波分量进行的,即有:

$$p_s^+ = \frac{3}{2} \bar{u}_{sd}^+ \bar{i}_{vd}^+ \quad (6)$$

$$q_s^+ = -\frac{3}{2} \bar{u}_{sd}^+ \bar{i}_{vq}^+ \quad (7)$$

其中,  $p_s^+$  和  $q_s^+$  分别为由正序电压和正序电流构成的 MMC 交流母线注入系统的瞬时有功和无功功率;  $\bar{u}_{sd}^+$  为  $abc$  坐标系中 MMC 交流母线正序基波电压通过正向旋转坐标变换至  $dq$  坐标系中的  $d$  轴直流分量;  $\bar{i}_{vd}^+$  和  $\bar{i}_{vq}^+$  分别为  $abc$  坐标系中 MMC 阀侧正序基波电流通过正向旋转坐标变换至  $dq$  坐标系中的  $d$  轴和  $q$  轴直流分量。且 MMC 阀侧负序和零序电流为 0,因而正序电流  $d$  轴和  $q$  轴指令值  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  的确定方法与交流电网电压平衡且无畸变条件下的 MMC 控制器中外环功率控制器并无差别。

假设  $I_{d\text{max}}^* = I_{q\text{max}}^* = 1.2 \text{ p.u.}$ 、 $I_{\text{lim}} = 1.2 \text{ p.u.}$ ,根据 MMC 不同运行工况,MMC 的正序等效网络中正序受控内电势表现形式不同。当 MMC 阀侧正序电流  $d$  轴和  $q$

轴指令值  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  达到内、外环限幅器的限幅值时,正序受控内电势表现为电流源特性,此时 MMC 阀侧正序电流幅值  $I_{\text{mmc}(1)}$  如式(8)所示。

$$I_{\text{mmc}(1)} = I_{\text{lim}} \quad (8)$$

正序电流相对于 PCC 故障前电压的相位  $\varphi_{(1)}$  如式(9)所示。

$$\varphi_{(1)} = \arctan\left(\frac{i_{vq}^+}{i_{vd}^+}\right) \quad (9)$$

当  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  未达到内、外环限幅器的限幅值时,正序受控内电势表现为电压源特性。由式(6)和式(7)可知,在故障达到稳态时有  $\bar{i}_{vd}^+ = i_{vd}^+$ 、 $\bar{i}_{vq}^+ = i_{vq}^+$ ,即:

$$i_{vd}^+ = \frac{2p_s^+}{3\bar{u}_{sd}^+} \quad (10)$$

$$i_{vq}^+ = -\frac{2q_s^+}{3\bar{u}_{sd}^+} \quad (11)$$

此时 MMC 阀侧正序电流幅值如式(12)所示。

$$I_{\text{mmc}(1)} = \sqrt{(i_{vd}^+)^2 + (i_{vq}^+)^2} \quad (12)$$

正序电流相对于 PCC 故障前电压的相位与式(9)相同。在标幺值系统下,MMC 阀侧的正序电流  $I_{\text{mmc}(1)}$  和网侧的正序电流  $I'_{\text{mmc}(1)}$  相等。

综合 MMC 三序等效网络分析可知,当 PCC 处发生单相( $a$ 相)短路故障时,MMC 阀侧和网侧的  $abc$  三相稳态短路电流分别如式(13)和式(14)所示。

$$\begin{bmatrix} I_{\text{mmca}} \\ I_{\text{mmcb}} \\ I_{\text{mmcc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{mmc}(1)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{\text{mmca}} \\ I'_{\text{mmcb}} \\ I'_{\text{mmcc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{mmc}(1)} \\ 0 \\ I'_{\text{mmc}(0)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,  $a = e^{j120^\circ}$ 、 $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。

#### 4 抑制 MMC 贡献短路电流的措施

为了限制受端 PCC 处发生短路故障时 MMC 贡献的短路电流,常见的方法有 2 类<sup>[18]</sup>:①闭锁受端换流站,换流站闭锁对交流侧而言相当于开路,不会提供短路电流,该方法的缺点在于换流站闭锁后的重新启动过程比较繁琐,且无法在故障期间继续输送有功功率;②当监测到交流系统短路故障后,对外环功率控制器输出电流指令值进行限幅,或对内环电流控制器输出电压指令值进行限幅,降低交流系统发生短路故障时换流站输出的电压,从而减小换流站贡献的短路电流。

考虑到本文研究的交流系统是强系统,一般不会由于 PLL 失锁而闭锁换流站<sup>[19]</sup>。在 PLL 不失锁的条件下,可通过在受端 MMC 的控制系统中增加附加控制器,来限制对称短路和非对称短路故障电流。附加控制器实时监测受端 PCC 电压  $U_{\text{sm}}$  和受端 MMC

注入交流系统的无功功率  $Q_s$ , 采用滞回控制对外环功率控制器  $q$  轴限幅器的限幅值  $I_{qmax}^*$  进行设定, 从而对外环功率控制器输出的正序电流  $q$  轴指令值  $i_{vq}^{+*}$  进行限幅。

对于受端 MMC 注入交流系统的无功功率  $Q_s$  ( $Q_s \geq 0$ ): 当  $Q_s > 0$  时, 故障点的短路电流大于交流系统注入的短路电流; 当  $Q_s = 0$  时, 两者基本相等。因而, 当 MMC 注入交流系统的无功功率  $Q_s > 0$  时, 附加控制器需要限制短路电流。同时, 当 MMC 交流母线电压  $U_{sm}$  降低至设定值  $U_{shrt}$  以下时, 设定  $I_{qmax}^* = I_{qshrt}^*$ , 其中  $U_{shrt}$  和  $I_{qshrt}^*$  根据实际情况进行设置; 当 MMC 交流母线电压  $U_{sm}$  升高至设定值  $U_{rset}$  以上时, 设定  $I_{qmax}^* = I_{qmax0}^*$ , 其中  $U_{rset}$  和  $I_{qmax0}^*$  根据实际情况进行设置, 附加控制器的逻辑框图如图 3 所示。图中, 当换流站近区发生三相短路故障时, 可以设定  $U_{shrt} = 0.3 \text{ p.u.}$ 、 $I_{qshrt}^* = 0$ 、 $U_{rset} = 0.35 \text{ p.u.}$  和  $I_{qmax0}^* = 1.2 \text{ p.u.}$ ; 当换流站近区发生单相短路故障时, 可以设定  $U_{shrt} = 0.9 \text{ p.u.}$ 、 $I_{qshrt}^* = 0$ 、 $U_{rset} = 0.95 \text{ p.u.}$  和  $I_{qmax0}^* = 1.2 \text{ p.u.}$ 。考虑到 MMC 在短路期间注入适量的无功电流有利于提高交流系统的功角稳定和电压稳定水平, 本文令故障期间 MMC 向系统注入的无功功率为非负数。在实际应用中, 可以根据系统不同运行工况下短路电流和系统稳定性要求, 对  $I_{qshrt}^*$  和  $I_{qmax0}^*$  设定值进行适当调整。

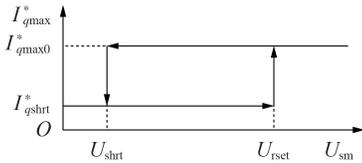


图3 附加控制器的逻辑框图

Fig.3 Logic block diagram of additional controller

最终, 附加控制器输出到内环电流控制器的正序电流  $q$  轴指令值  $i_{vq0}^{+*}$  可以实现为:

$$i_{vq0}^{+*} = \begin{cases} I_{qmax}^* & i_{vq}^{+*} \geq I_{qmax}^* \\ i_{vq}^{+*} & I_{qmax}^* > i_{vq}^{+*} > -I_{qmax}^* \\ -I_{qmax}^* & i_{vq}^{+*} \leq -I_{qmax}^* \end{cases} \quad (15)$$

另一方面, 为了限制交流系统发生单相短路故障时 MMC 网侧零序电流, 可以通过增大换流变压器的零序阻抗  $Z_{r(0)}$ , 即: 一是在换流变压器网侧  $Y_0$  接法的中性点经过小电抗接地, 大小可以采用  $1/3$  [20] 的变压器零序阻抗; 二是采用  $Y_0-Y$  接法 (其中换流变压器阀侧采用 Y 接法) 的换流变压器, 因为由式 (5) 可知, 它的零序阻抗大于采用  $Y_0-\Delta$  接法 (其中换流变压器阀侧采用  $\Delta$  接法) 的换流变压器的零序阻抗, 从而可降低 MMC 在故障点贡献的短路电流大小。

## 5 仿真验证

为了验证第 3 节和第 4 节所述结论的正确性和

所提控制方法的有效性, 在 PSCAD / EMTDC 中搭建如图 4 所示的两端单极柔性直流输电测试系统。本节仿真验证以受端 MMC 为研究对象, 分析其在受端交流母线 PCC 处发生对称短路和非对称短路故障下贡献的短路电流特性。其中, 仿真以故障电阻为  $0.01 \Omega$  的对称和非对称短路故障来模拟金属性接地短路故障, 受端交流母线电压在故障期间不等于 0, PLL 不失锁。送端和受端 MMC 均采用半桥子模块 MMC, 详细参数如附录 D 中表 D1 所示。

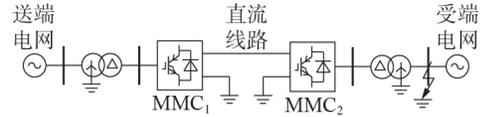


图4 测试系统结构图

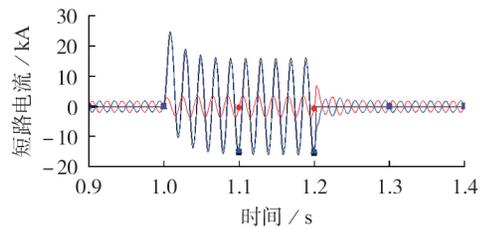
Fig.4 Structure of test system

### 5.1 对称短路故障下 MMC 对短路电流影响的仿真验证

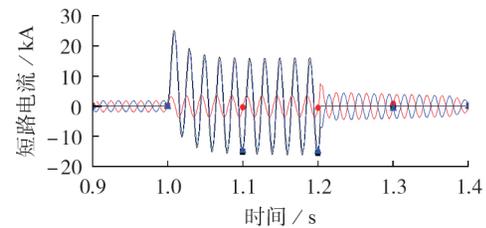
#### 5.1.1 MMC 运行工况对短路电流影响的仿真验证

本节对受端 PCC 处发生三相金属性接地短路故障时, 受端 MMC 的运行工况对短路电流的影响进行仿真验证。

(1) 受端 MMC 仅发出有功功率, 即受端 MMC 分别采用: ①定有功功率 (指令值为  $0.625 \text{ p.u.}$ ) 和定无功功率 (指令值为 0) 控制; ②定直流电压 (指令值为  $1 \text{ p.u.}$ ) 和定无功功率 (指令值为 0) 控制。  $t=1 \text{ s}$  时, 在受端 PCC 处施加持续  $0.2 \text{ s}$  的三相短路故障, 短路电流波形 (以 a 相为例) 如图 5 所示, MMC 输出功率、交流母线电压、PLL 输出相角和频率波形见附录 E 中的图 E1 和图 E2。



(a) MMC 采用定有功功率控制



(b) MMC 采用定直流电压控制

■ PCC 处短路电流, ● MMC 贡献的短路电流  
▲ 交流系统贡献的短路电流

图5 受端 MMC 仅发出有功功率时的短路电流

Fig.5 Short circuit currents when receiving-end MMC only emits active power

仿真结果显示,当受端 MMC 仅发出有功功率时,无论受端 MMC 采用定有功功率控制还是定直流电压控制,MMC 贡献的短路电流均超前交流系统贡献的短路电流  $90^\circ$ ,交流系统贡献的短路电流和 PCC 处短路电流相位相同,MMC 贡献的短路电流、交流系统贡献的短路电流和 PCC 处短路电流幅值分别约为 3.5、15、15.4 kA。因此,PCC 处短路电流和交流系统贡献的短路电流基本相等。

(2)受端 MMC 仅发出无功功率,即受端 MMC 分别采用:①定有功功率(指令值为 0)和定无功功率(指令值为 0.3 p.u.)控制;②定有功功率(指令值为 0)和定交流电压(指令值为 0.95 p.u.)控制。 $t=1$  s 时,在受端 PCC 处施加持续 0.2 s 的三相短路故障,仿真波形见附录 E 中的图 E3 和图 E4。仿真结果显示,当受端 MMC 仅发出无功功率时,无论受端 MMC 采用定无功功率控制还是定交流电压控制,MMC 贡献的短路电流、交流系统贡献的短路电流和 PCC 处短路电流三者相位相同,三者幅值大小分别为 3.5、15、18.5 kA。因此,PCC 处短路电流大于交流系统贡献的短路电流。

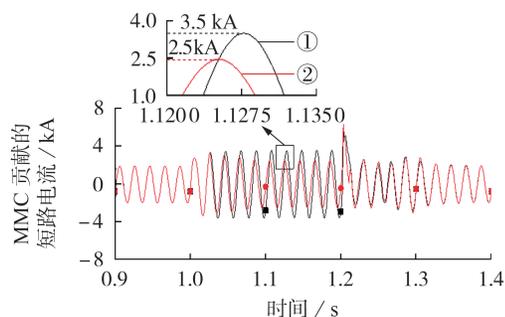
(3)受端 MMC 发出有功和无功功率,即受端 MMC 采用定有功功率(指令值为 0.625 p.u.)和定无功功率(指令值为 0.3 p.u.)。 $t=1.0$  s 时,在受端 PCC 处施加持续 0.2 s 的三相短路故障,仿真波形见附录 E 中的图 E5。仿真结果显示,当受端 MMC 发出有功和无功功率时,MMC 贡献的短路电流超前交流系统贡献的短路电流  $45^\circ$ ,MMC 贡献的短路电流、交流系统贡献的短路电流和 PCC 处短路电流的幅值分别为 3.5、15、17.7 kA。因此,由于受端 MMC 存在无功功率注入交流系统,PCC 处短路电流大于交流系统贡献的短路电流。

综合上述分析可知,受端 MMC 对短路电流的贡献主要来源于 MMC 向交流系统注入的无功功率,与理论分析一致。

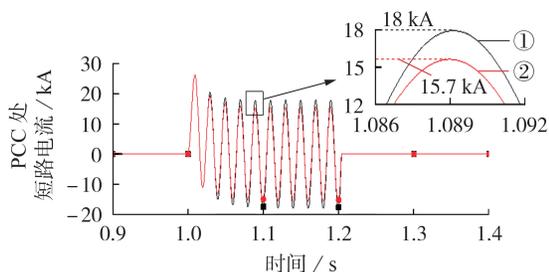
### 5.1.2 限制 MMC 贡献短路电流措施的仿真实验

本节在受端 MMC 的控制系统中设置如第 4 节所述限制对称短路故障电流的附加控制器,对受端 PCC 处发生三相金属性接地短路故障时,受端 MMC 的附加控制器减少短路电流的幅值进行仿真实验。送端 MMC 采用定直流电压(指令值为 1 p.u.)和定无功功率(指令值为 0.3 p.u.),受端 MMC 采用定有功功率(指令值为 0.625 p.u.)和定无功功率(指令值为 0.3 p.u.)控制。 $t=1$  s 时,在受端 PCC 处施加持续 0.2 s 的三相短路故障,短路电流波形(以 a 相为例)如图 6 所示,MMC 输出功率、交流母线电压、PLL 输出相角和频率波形见附录 E 中的图 E6。

仿真结果显示,采用附加控制前,在三相短路故障期间,受端 MMC 贡献的短路电流大幅增加,稳态



(a) 受端 MMC 贡献的短路电流



(b) 受端 PCC 处短路电流

① 采用附加控制前,② 采用附加控制后

图 6 附加控制前、后短路电流

Fig.6 Short circuit currents before and after additional control

短路电流幅值约为 3.5 kA;采用附加控制后,在三相短路故障期间,受端 MMC 贡献的短路电流降低,稳态短路电流幅值基本维持在 2.5 kA 左右。采用附加控制后,故障期间受端 PCC 处的三相短路电流均有所下降,降低的幅值最大可达 2.3 kA。可见,该附加控制器可以有效降低故障期间受端 MMC 贡献的短路电流。

## 5.2 非对称短路故障下 MMC 对短路电流影响的仿真实验

### 5.2.1 MMC 贡献短路电流的仿真实验

本节对受端 PCC 处发生单相(a相)金属性接地短路故障时,受端 MMC 贡献的短路电流进行仿真实验。

(1)受端 MMC 正序受控内电势表现为电流源特性,即送端 MMC 采用定直流电压(指令值为 1 p.u.)和定无功功率(指令值为 0)、受端 MMC 采用定有功功率(指令值为 1 p.u.)和定无功功率(指令值为 0)控制。 $t=1$  s 时,在受端 PCC 处施加持续 0.2 s 的单相(a相)短路故障,短路电流波形如图 7 所示,MMC 输出功率、交流母线电压、PLL 输出相角和频率波形见附录 E 中的图 E7。仿真结果表明,当 PCC 处发生单相(a相)短路故障时,由于换流变压器的  $Y_0-\Delta$  接法,MMC 阀侧的零序电流为 0,网侧的零序电流由零序网络决定为 4.5 kA。由于负序电流控制器的作用,MMC 阀侧和网侧的负序电流基本为 0。当正序受控内电势表现为电流源特性时,MMC 阀侧和网侧的

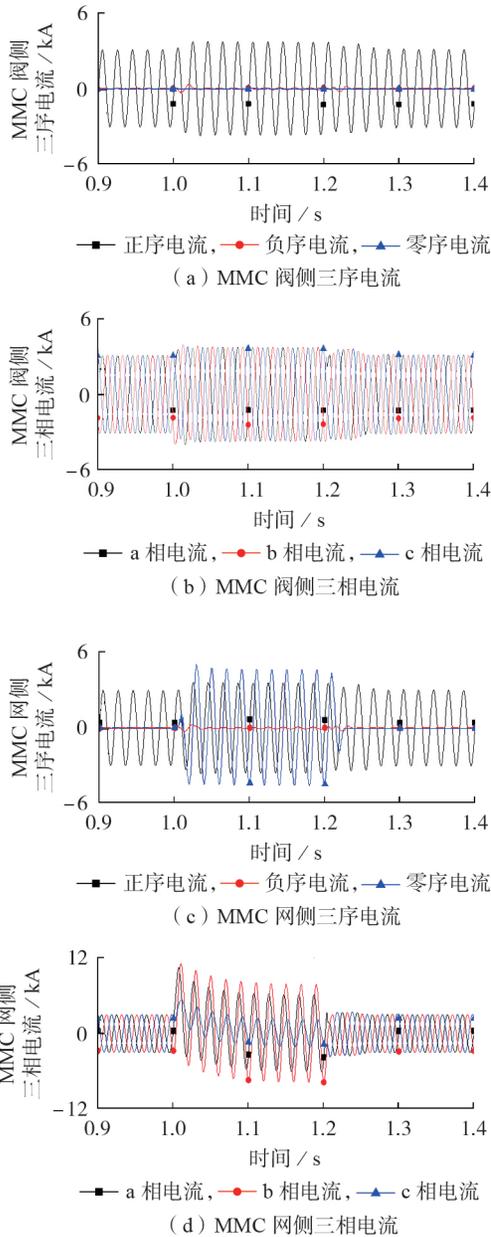


图7 受端MMC的短路电流(电流源)

Fig.7 Short circuit currents of receiving-end MMC (current source)

正序电流幅值为1.2倍的电流基准值,分别为3.73、3.56 kA。由于仅含有正序基波电流,MMC阀侧abc三相电流在故障期间依然处于三相对称状态,三相幅值都为3.73 kA,三相的相位差与故障前相比未发生变化。而由于换流变压器引入的网侧零序电流,MMC网侧abc三相电流在故障期间发生较大变化,幅值最大可达到11.1 kA,与理论分析一致。

(2)受端MMC正序受控内电势表现为电压源特性,即送端MMC采用定直流电压(指令值为1.0 p.u.)和定无功功率(指令值为0)、受端MMC采用定有功功率(指令值为0.5 p.u.)和定无功功率(指令值为0)控制。 $t=1$  s时,在受端PCC处施加持续0.2 s的单相(a相)短路故障,仿真波形见附录E中的图E8。仿

真结果表明,当PCC处发生单相(a相)短路故障时,由于换流变压器采用 $Y_0-\Delta$ 接法,MMC阀侧的零序电流为0,网侧的零序电流由零序网络决定为4.5 kA。由于负序电流控制器的作用,MMC阀侧和网侧的负序电流基本为0。当正序受控内电势表现为电压源特性时,在故障期间,基于正序分量的瞬时有功和无功功率分别为0.63 p.u.和0,MMC交流母线正序基波电压为0.53 p.u.,所以指令值 $i_{vd}^{**}$ 和 $i_{vq}^{**}$ 分别等于0.8 p.u.和0,因此MMC阀侧和网侧的正序电流幅值分别为2.49、2.37 kA。由于仅含有正序基波电流,MMC阀侧abc三相电流在故障期间依然处于三相对称状态,三相幅值均为2.49 kA,三相相位差与故障前相比未发生变化。而由于换流变压器引入的网侧零序电流,MMC网侧abc三相电流在故障期间发生较大变化,幅值最大可达9.6 kA,与理论分析一致。

### 5.2.2 限制MMC贡献短路电流措施的仿真验证

本节在受端MMC的控制系统中设置如第4节所述限制非对称短路故障电流的附加控制器,同时将换流变压器 $Y_0$ 中性点经过一个小电抗(大小为1/3变压器零序阻抗)接地,受端PCC处发生单相(a相)金属性接地短路故障时,受端MMC贡献的短路电流幅值降低进行仿真验证。送端MMC采用定直流电压(指令值为1 p.u.)和定无功功率(指令值为0.3 p.u.)、受端MMC采用定有功功率(指令值为0.625 p.u.)和定无功功率(指令值为0.3 p.u.)控制。 $t=1$  s时,在受端PCC处施加持续0.2 s的单相(a相)短路故障,短路电流波形如图8所示,MMC输出功率、交流母线电压、PLL输出相角和频率波形见附录E中的图E9。

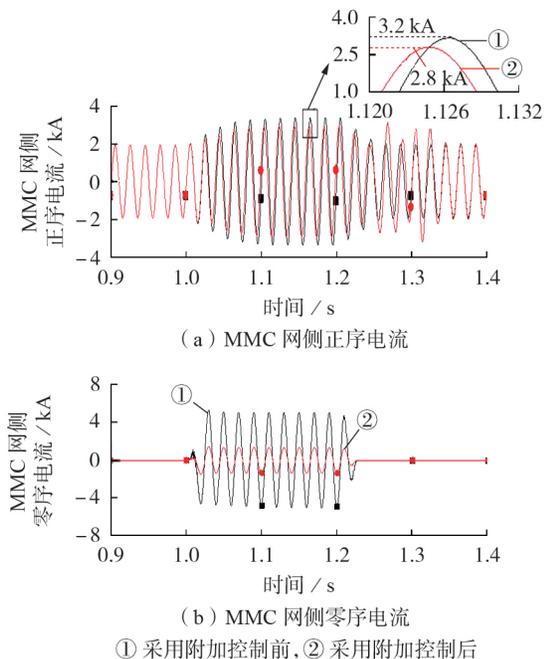


图8 采用附加控制前、后短路电流

Fig.8 Short circuit currents before and after additional control

仿真结果显示,采用附加控制措施前,在单相短路故障期间,受端 MMC 的网侧正序和零序电流幅值分别达到 3.2、4.5 kA;采用附加控制措施后,在单相短路故障期间,受端 MMC 的网侧正序和零序电流幅值分别降低为 2.8、1.33 kA。采用附加控制措施后,故障期间受端 PCC 处的 MMC 贡献的正序和零序电流都有所下降,降低的幅值分别为 0.4、3.17 kA。可见,附加控制措施可以有效降低故障期间受端 MMC 贡献的短路电流。

## 6 结论

本文分别研究了交流系统发生对称短路和非对称短路故障时,MMC 贡献短路电流的计算方法以及 MMC 的运行工况对电流大小的影响,提出了抑制 MMC 贡献的短路电流的控制策略,并通过 PSCAD / EMTDC 仿真验证了本文所给机理的正确性以及控制策略的有效性。本文所得结论如下。

(1)交流系统发生对称短路故障时,MMC 贡献的短路电流不存在负序和零序分量。受端 MMC 对短路电流的贡献主要来源于 MMC 向交流系统注入的无功功率。

(2)交流系统发生非对称短路故障时,由于 MMC 控制系统的作用,MMC 阀侧和网侧负序电流为 0;由于换流变压器一般采用  $Y_0-\Delta$  或  $Y_0-Y$  接法,MMC 阀侧零序电流为 0,网侧零序电流由零序等效网络决定;MMC 阀侧正序电流的大小由运行工况决定。受端 MMC 对短路电流的影响主要与 MMC 向交流系统注入的无功功率以及换流变压器零序阻抗的大小有关。

(3)在 MMC 的控制系统中增加外环无功类附加控制器,对外环功率控制器输出的正序电流  $q$  轴指令值进行限制,可有效降低 MMC 在交流系统对称和非对称短路故障下贡献的短路电流。

(4)增大换流变压器的零序阻抗,可以减小非对称短路故障下的短路电流。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [ 1 ] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3 种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):228-235.  
LI Xiaodong,XU Zheng,HU Siqian,et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):228-235.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):28-35.  
ZENG Xueyang,LIU Tianqi,WANG Shunliang,et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):28-35.
- [ 4 ] 朱益华,郭琦,李成翔,等. 柔性直流和常规直流并联系统功率调制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):130-135.  
ZHU Yihua,GUO Qi,LI Chengxiang,et al. Power modulation strategy for parallel system of MMC-HVDC and LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):130-135.
- [ 5 ] 屠卿瑞,陈桥平,李一泉,等. 柔性直流输电系统桥臂过流保护定值配合方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):172-177.  
TU Qingrui,CHEN Qiaoping,LI Yiquan,et al. Coordination method of arm overcurrent protection settings in flexible HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):172-177.
- [ 6 ] 高凯,阳岳希,张艳军,等. 适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J]. 电网技术,2016,40(1):78-85.  
GAO Kai,YANG Yuexi,ZHANG Yanjun,et al. A topology research of flexible looped network controller suitable to urban power grid[J]. Power System Technology,2016,40(1):78-85.
- [ 7 ] 刘昇,徐政. 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):133-144.  
LIU Sheng,XU Zheng. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):133-144.
- [ 8 ] 潘慧梅. 采用小电抗接地的高压变压器中性点过电压的研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.  
PAN Huimei. Study on the neutral point overvoltage of high-voltage transformers with small reactance grounding[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2008.
- [ 9 ] 李海锋,陈嘉权,曾德辉,等. 小电阻接地系统高灵敏度零序电流保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):198-204.  
LI Haifeng,CHEN Jiaquan,ZENG Dehui,et al. High sensitive zero-sequence current protection for low-resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):198-204.
- [ 10 ] 武汉大学,国网湖北省电力有限公司. 基于 MMC 离散建模的交流短路电流计算方法:CN201810972164.9[P]. 2019-01-04.
- [ 11 ] 卜广全,李英彪,王姗姗,等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(21):6303-6312.  
BU Guangquan,LI Yingbiao,WANG Shanshan,et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(21):6303-6312.
- [ 12 ] 张建波,李耐心,田新成. 电网电压不平衡条件下模块化多电平换流器高压直流输电控制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(22):205-212.  
ZHANG Jianpo,LI Naixin,TIAN Xincheng. The control strategies of modular multilevel converter-high voltage direct current transmission under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(22):205-212.
- [ 13 ] 易杨,沈豫,林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法[J]. 高电压技术,2018,44(7):2150-2158.  
YI Yang,SHEN Yu,LIN Zhangsui. Characteristics and analysis methods of AC short-circuit current contributed by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering,2018,44(7):2150-2158.
- [ 14 ] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2016:3-5.

- [15] GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12):4858-4867.
- [16] 孙吉波, 王宇, 刘崇茹, 等. 基于MMC的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11):72-78.  
SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):72-78.
- [17] 曾冠铭, 范春菊, 乔林岳, 等. 柔性直流配电网换流站交流母线故障响应特性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1):132-141.  
ZENG Guanming, FAN Chunju, QIAO Linyue, et al. Response characteristics of AC bus fault in converter station of VSC-based DC distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1):132-141.
- [18] 李英彪. 柔性直流电网故障特性及其控制策略研究[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2017.  
LI Yingbiao. Research on fault characteristics and control strategy of flexible DC grid[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute, 2017.
- [19] GÖKSU Ö, TEODORESCU R, BAK C L, et al. Instability of

- wind turbine converters during current injection to low voltage grid faults and PLL frequency based stability solution[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4):1683-1691.
- [20] 舒廉甫. 500 kV 变压器中性点接地方式成果应用推广[J]. 高电压技术, 1993(4):45-48.  
SHU Lianfu. Application and popularization of the method of neutral grounding for 500 kV transformer[J]. High Voltage Engineering, 1993(4):45-48.

#### 作者简介:



茆书睿

茆书睿(1996—),女,江苏灌南人,硕士研究生,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail:21810086@zju.edu.cn);

徐政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量等(E-mail:xuzheng007@zju.edu.cn);

杨健(1992—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail:yangjian\_zju@zju.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Influence analysis and control strategy of MMC on AC short circuit current under short circuit fault of AC system

MAO Shurui<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, ZHOU Youbin<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, ZHOU Kunpeng<sup>2</sup>, CAO Kan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current transmission system) affects the AC circuit breaker to clear the short circuit fault. Firstly, based on the topology and control strategy of MMC, the impact of MMC on the AC circuit breaker under short circuit fault of the AC system are analyzed. Secondly, the influence of the operating conditions of MMC on the short circuit current under a symmetric short circuit fault of the AC system is studied, which shows that the short circuit current contributed by MMC is mainly due to the reactive power injected into the AC system by MMC. Then the calculation method of the three-sequence short circuit current contributed by MMC under different operating conditions when an asymmetric short circuit fault occurs in the AC system is proposed. It is concluded that the zero- and negative-sequence currents on the valve side of MMC are zero, and the three-phase symmetrical positive-sequence currents are determined by the operating conditions of MMC. Finally, a control strategy for reducing the short circuit current contributed by MMC under symmetric and asymmetric short circuit faults of the AC systems is proposed. And the correctness of the conclusion and the effectiveness of the control strategy are verified by PSCAD/EMTDC simulation.

**Key words:** modular multilevel converter; symmetric short circuit fault; asymmetric short circuit fault; operating conditions; short circuit current reduction

附录 A

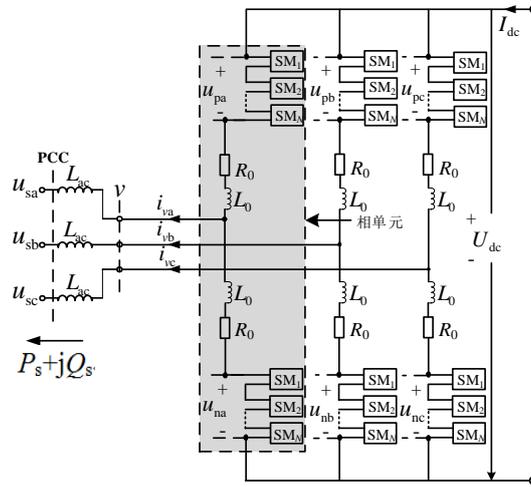


图 A1 MMC 的拓扑结构  
Fig.A1 Topology of MMC

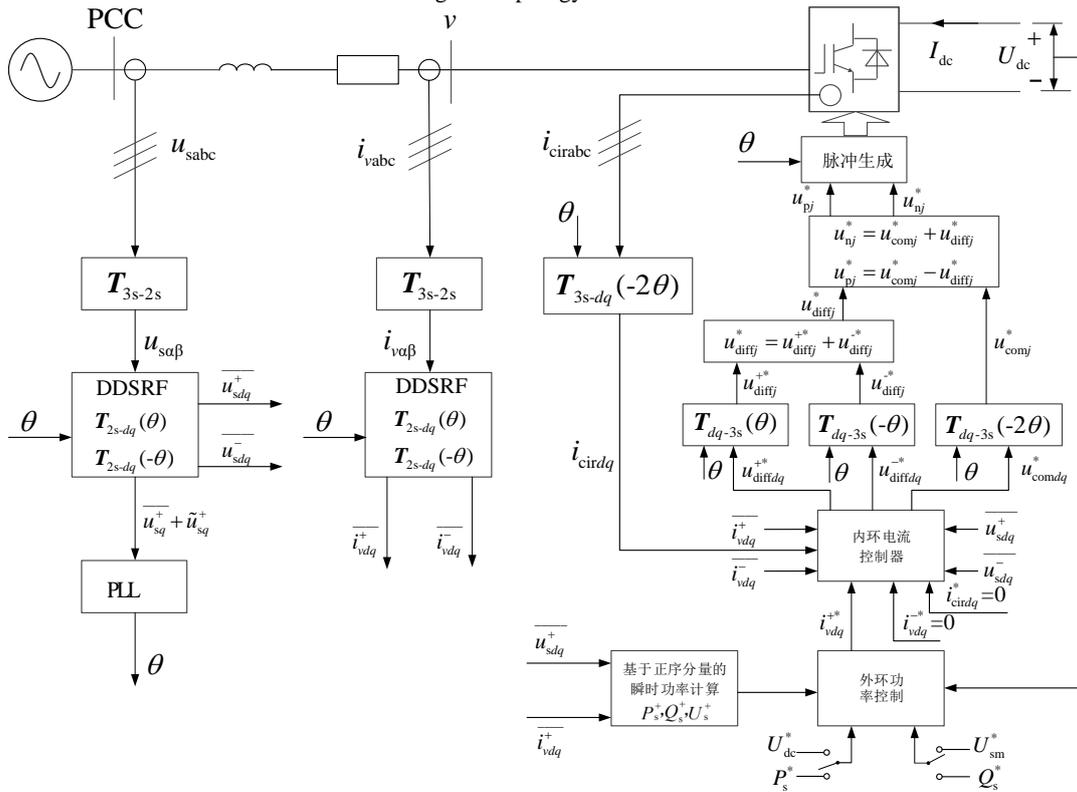


图 A2 交流电网电压不平衡且有畸变时的 MMC 控制器  
Fig.A2 Controller of MMC when AC grid voltage is unbalanced and distorted

### 附录 B : MMC-HVDC 典型参数

MMC-HVDC 所连接交流系统的电压等级一般为 220 kV 或者 500 kV。由实际工程经验<sup>[A1]</sup>可知, 220 kV 交流断路器的额定开断电流等于 50 kA, 500 kV 交流断路器的额定开断电流等于 63 kA。不同容量和电压等级的 MMC-HVDC, 其贡献的短路电流大小由额定容量、电压等级和控制系统中的限幅器等因素决定。对于典型的 MMC-HVDC, 额定容量为 1500 MV · A, 系统电压等级为 500 kV, 考虑限幅器的限幅值取为 1.2 p.u., 则其贡献的最大短路电流约为 2 kA。

[A1] 张炯, 李桂芹. 高压交流断路器大容量短路开断与合闸试验技术[J]. 通信电源技术, 2019, 36(8): 133-134. ZHANG Tong, LI Guiqin. High voltage AC circuit breaker large capacity short circuit breaking and closing test technology[J]. Telecom Power Technologies, 2019, 36(8): 133-134.

### 附录 C: MMC 三序等效网络

考虑到 MMC 的控制器和不同运行工况, MMC 可以等效为电流源或者电压源。由此可得如图 C1 所示的 MMC 和换流变压器的三序等效网络。其中, 换流变压器接线方式一般采用  $Y_0/\Delta$  接法 (其中换流变压器阀侧采用  $\Delta$  接法) 或者  $Y_0/Y$  接法 (其中换流变压器阀侧采用  $Y$  接法),  $E_{mmc(1)}$ 、 $E_{mmc(2)}$  和  $E_{mmc(0)}$  分别为 MMC 正序、负序和零序受控内电势,  $I_{mmc(1)}$ 、 $I_{mmc(2)}$  和  $I_{mmc(0)}$  分别是 MMC 阀侧的正序、负序和零序短路电流,  $I'_{mmc(1)}$ 、 $I'_{mmc(2)}$  和  $I'_{mmc(0)}$  分别是 MMC 网侧的正序、负序和零序短路电流。

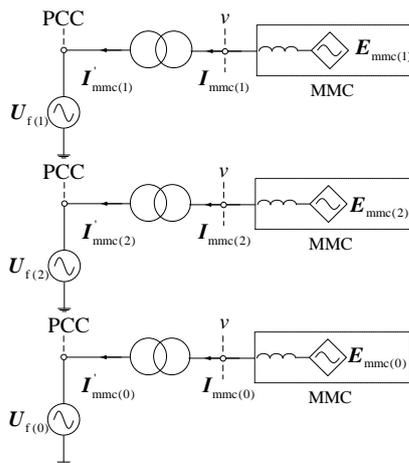


图 C1 MMC 和换流变压器三序等效网络

Fig.C1 Positive-, negative- and zero-sequence equivalent networks of MMC and converter transformer

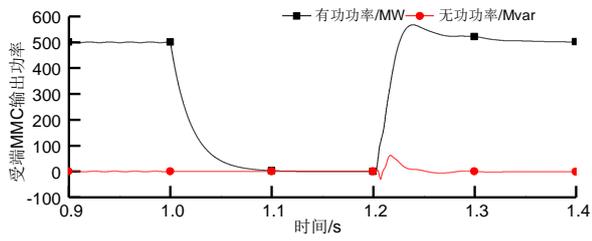
### 附录 D: 仿真测试系统参数

表 D1 MMC-HVDC 系统参数

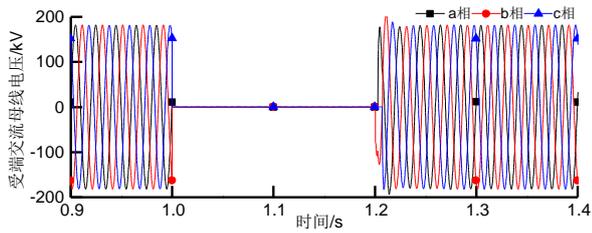
Table D1 Parameters of MMC-HVDC

类别	参数	参数值
基本参数	额定容量/MV · A	800
	额定直流电压/kV	400
	额定直流电流/kA	2
	交流系统额定线电压有效值/kV	220
	平波电抗器/H	0.05
MMC 参数	额定容量/MV · A	800
	子模块个数	200
	子模块电容/ $\mu$ F	13333
	子模块电容电压/kV	2
	桥臂电感/mH	50
MMC 联结变压	绕组类型	$Y_0/\Delta$
	变比	220kV/210
器参数	容量/MV · A	960
	漏抗/%	10
直流畅路参数	线路长度/km	100
	直流电阻/ $\Omega$	0.932

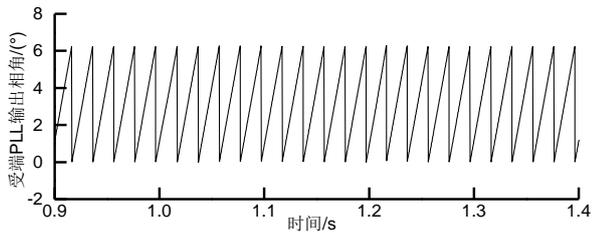
附录 E: 仿真结果



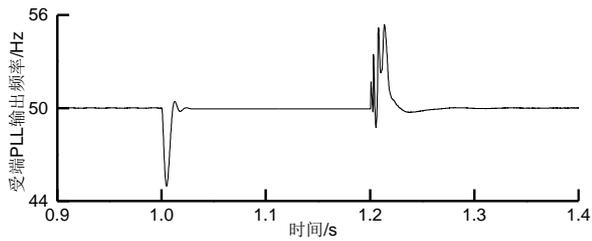
(a) 受端 MMC 输出功率



(b) 受端交流母线电压



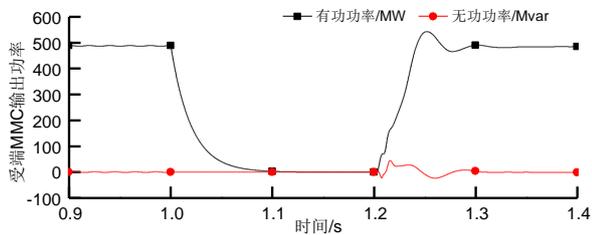
(c) 受端 PLL 输出相角



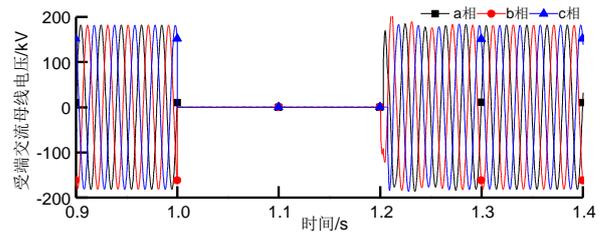
(d) 受端 PLL 输出频率

图 E1 受端 MMC 仅发出有功功率 (定有功功率控制) 时的故障特性

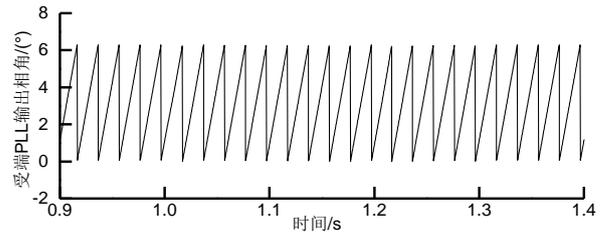
Fig.E1 Fault characteristics when receiving-end MMC only emits active power (fixed active power control)



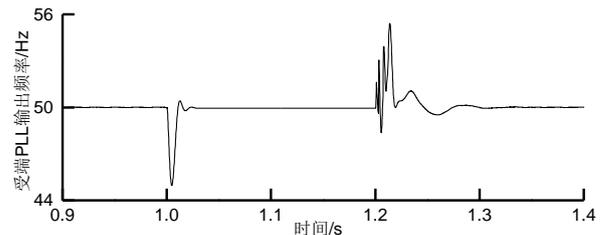
(a) 受端 MMC 输出功率



(b) 受端交流母线电压



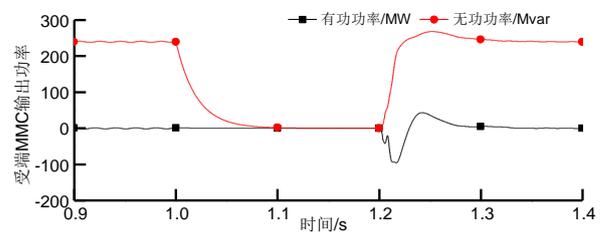
(c) 受端 PLL 输出相角



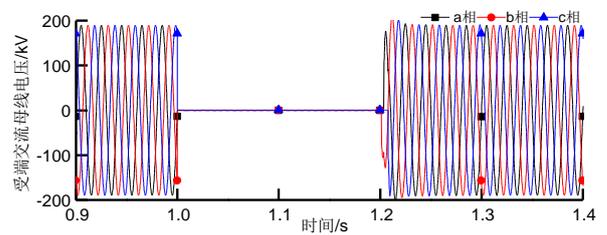
(d) 受端 PLL 输出频率

图 E2 受端 MMC 仅发出有功功率 (定直流电压控制) 时的故障特性

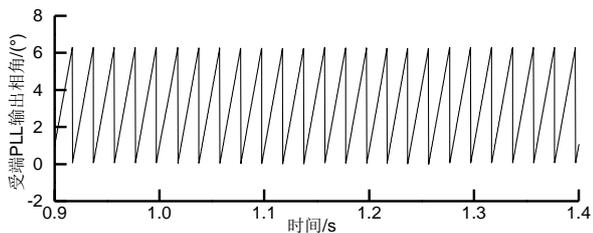
Fig.E2 Fault characteristics when receiving-end MMC only emits active power (fixed DC voltage control)



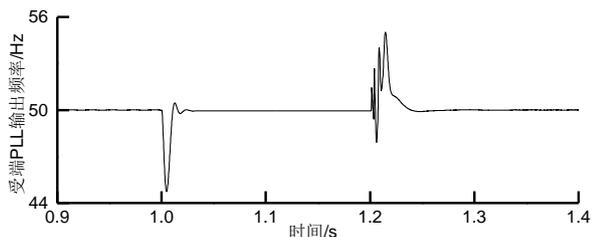
(a) 受端 MMC 输出功率



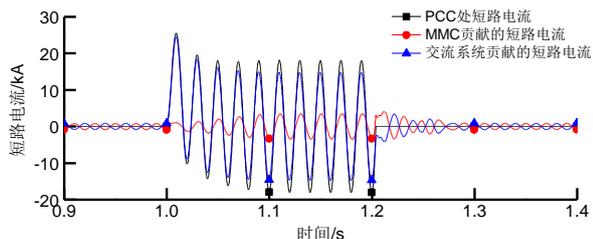
(b) 受端交流母线电压



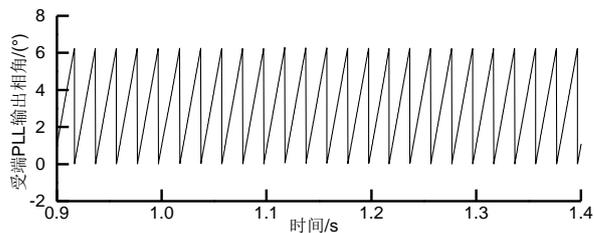
(c) 受端 PLL 输出相角



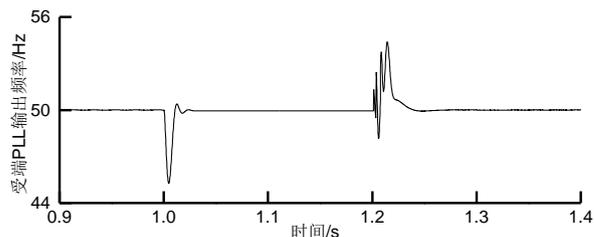
(d) 受端 PLL 输出频率



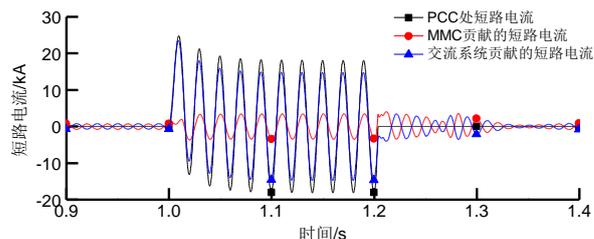
(e) 短路电流 (a 相)



(c) 受端 PLL 输出相角



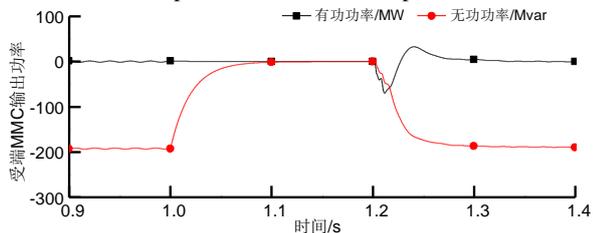
(d) 受端 PLL 输出频率



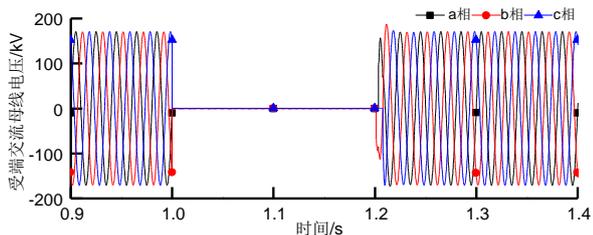
(e) 短路电流 (a 相)

图 E3 受端 MMC 仅发出无功功率 (定无功功率控制) 时的故障特性

Fig.E3 Fault characteristics when receiving-end MMC only emits reactive power (fixed reactive power control)



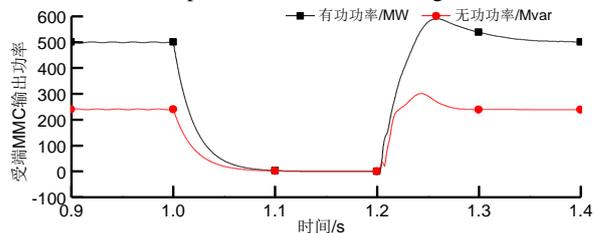
(a) 受端 MMC 输出功率



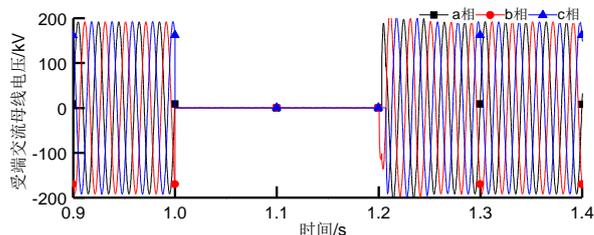
(b) 受端交流母线电压

图 E4 受端 MMC 仅发出无功功率 (定交流电压控制) 时的故障特性

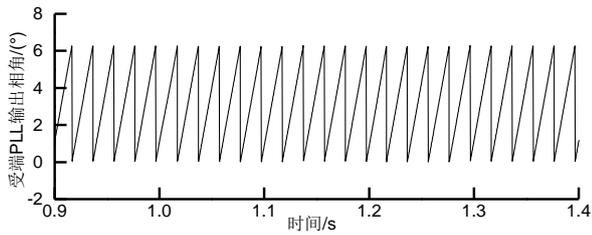
Fig.E4 Fault characteristics when receiving-end MMC only emits reactive power (fixed AC voltage control)



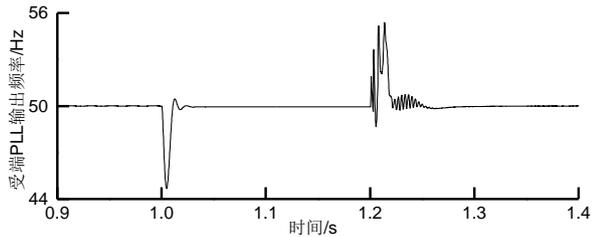
(a) 受端 MMC 输出功率



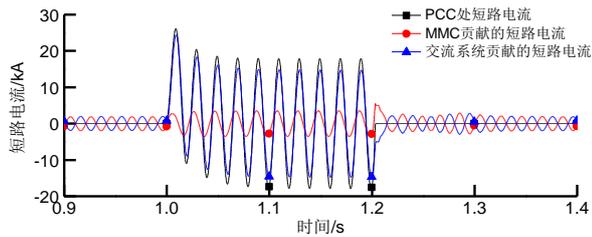
(b) 受端交流母线电压



(c) 受端 PLL 输出相角

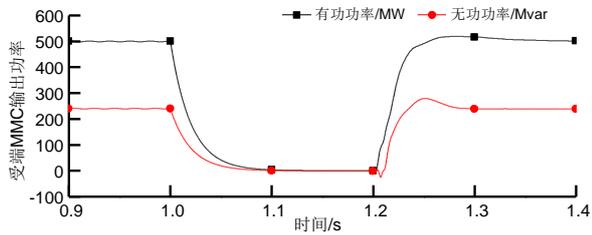


(d) 受端 PLL 输出频率

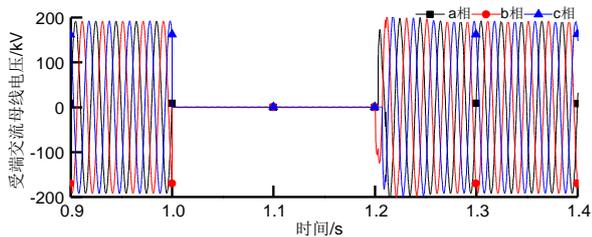


(e) 短路电流 (a相)

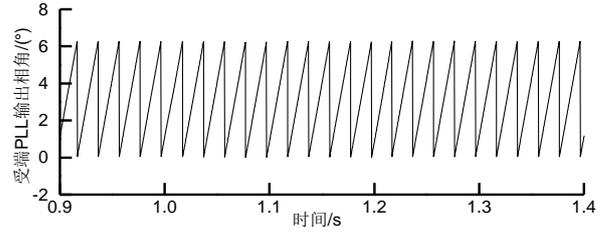
图 E5 受端 MMC 发出有功和无功功率时的故障特性  
Fig.E5 Fault characteristics when receiving-end MMC emits active and reactive power



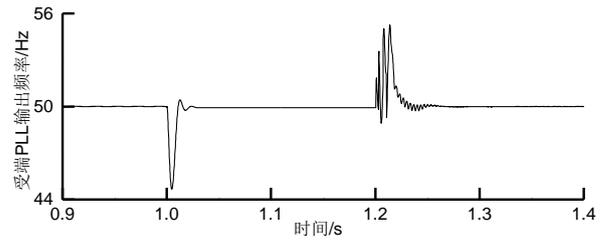
(a) 受端 MMC 输出功率



(b) 受端交流母线电压

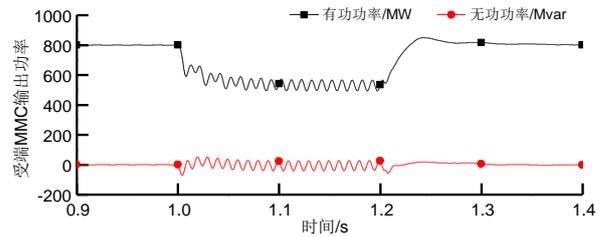


(c) 受端 PLL 输出相角

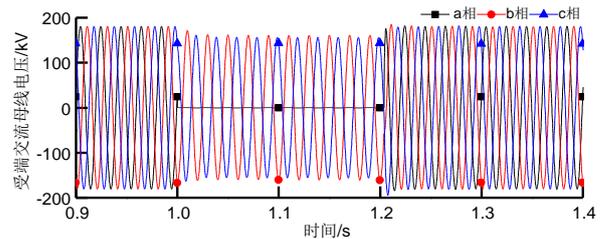


(d) 受端 PLL 输出频率

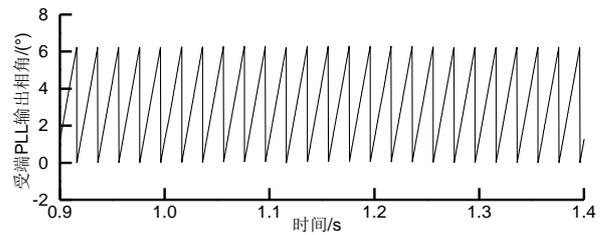
图 E6 附加控制后受端 MMC 的故障特性  
Fig.E6 Fault characteristics of receiving-end MMC after additional control



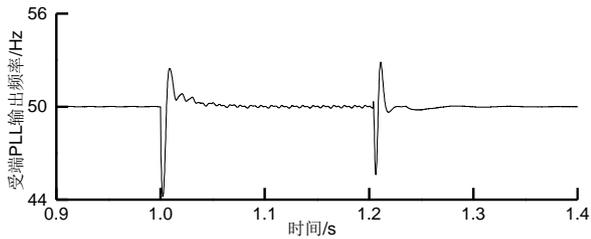
(a) 受端 MMC 输出功率



(b) 受端交流母线电压

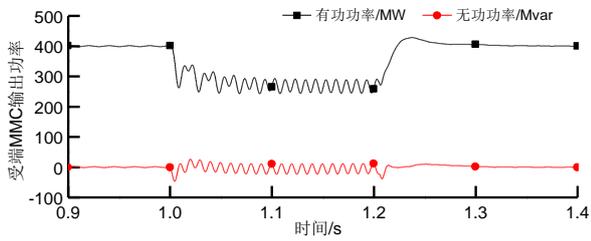


(c) 受端 PLL 输出相角

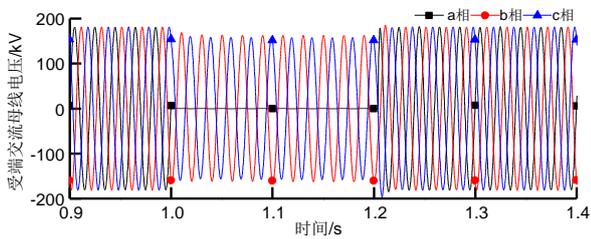


(d) 受端 PLL 输出频率

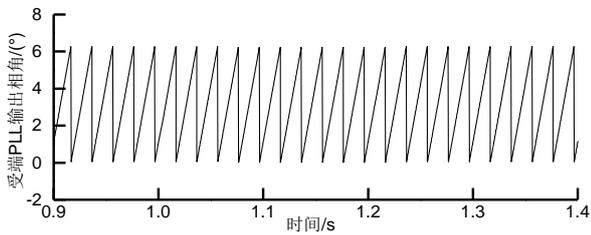
图 E7 受端 MMC 的故障特性 (电流源)  
Fig.E7 Fault characteristics of receiving-end MMC (current source)



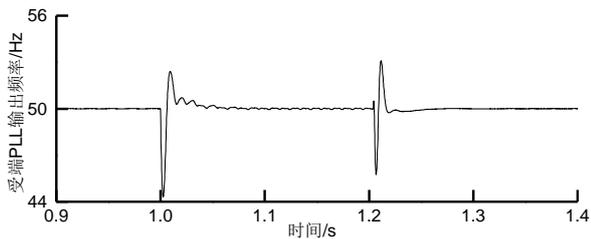
(a) 受端 MMC 输出功率



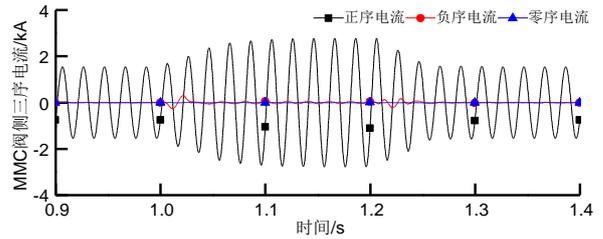
(b) 受端交流母线电压



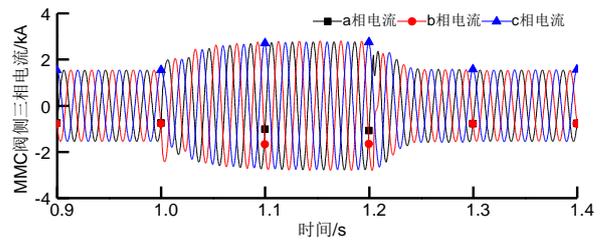
(c) 受端 PLL 输出相角



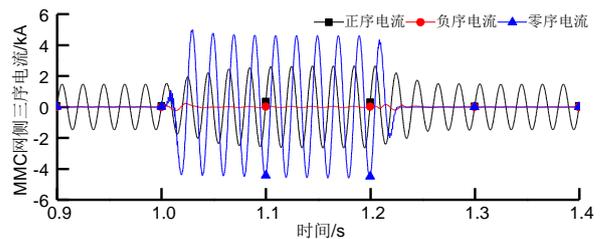
(d) 受端 PLL 输出频率



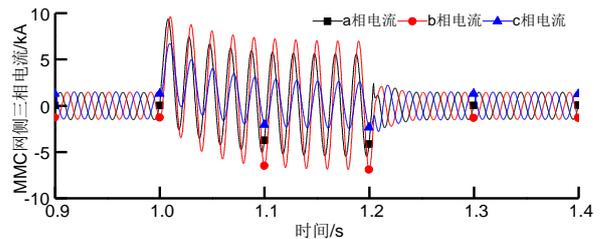
(e) MMC 阀侧三序电流



(f) MMC 阀侧三相电流

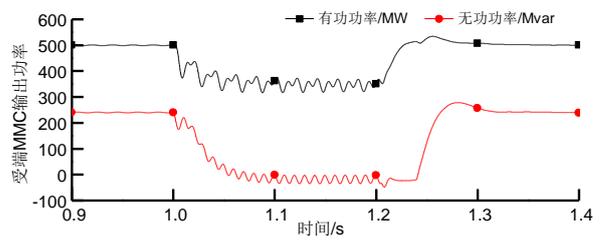


(g) MMC 网侧三序电流

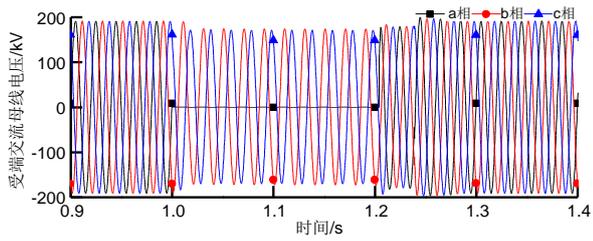


(h) MMC 网侧三相电流

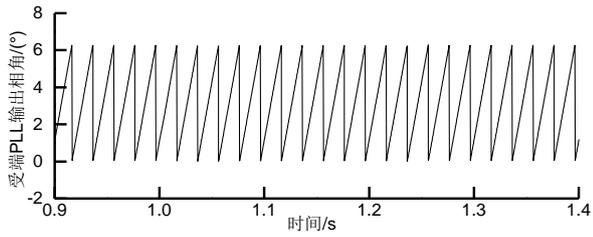
图 E8 受端 MMC 的故障特性 (电压源)  
Fig.E8 Fault characteristics of receiving-end MMC (voltage source)



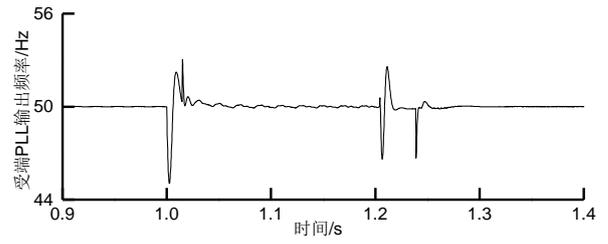
(a) 受端 MMC 输出功率



(b) 受端交流母线电压



(c) 受端 PLL 输出相角



(d) 受端 PLL 输出频率

图 E9 附加控制后受端 MMC 的故障特性  
Fig.E9 Fault characteristics of receiving-end MMC after additional control