

# 含MMC的交直流输电系统短路电流统一求解方法

刘昕宇<sup>1</sup>, 王国腾<sup>1</sup>, 徐政<sup>1</sup>, 张哲任<sup>1</sup>, 高熠莹<sup>2</sup>, 韩奕<sup>2</sup>, 刘天阳<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:**针对含模块化多电平换流器(MMC)的交直流输电系统短路电流水平校核问题,在考虑MMC的运行方式和控制系统的基础上,建立了MMC交流侧故障模型。在对比分析了同步机电源和MMC输出短路电流的机理后,通过近似求解并网点(PCC)处电压将MMC交流侧故障模型简化为电流源模型以实现PCC处电压和MMC输出电流之间的解耦。对支路进行合理编号并筛选出电源支路和待求短路电流所在无源支路,基于电网络理论将联络节点构成的无源网络用混合参数表征,经推导得到了含MMC的电网短路电流计算的统一求解方法。不同工况下的仿真结果表明,通过建立各控制策略下的MMC交流侧故障模型,所提算法能准确统一求解不同MMC交流侧故障下的短路电流,可用于含MMC的交直流输电系统的设备选型和保护系统设计。

**关键词:** MMC; 短路电流; 交流侧故障模型; 电网络理论; 混合参数

**中图分类号:** TM 721.1; TM 46

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202201004

## 0 引言

在风电和光伏等新能源电源逐步取代同步机电源接入电力系统的过程中,部分地区的新能源消纳问题越来越突出。由于我国新能源与负荷中心呈逆向分布,应努力筹划外送通道,增强资源的配置能力<sup>[1-2]</sup>。基于模块化多电平换流器的高压直流(MMC-HVDC)输电技术在运行性能上有很强的优越性,主要表现在无换相失败和无功功率补偿问题、可以为无源系统供电、同时调节有功功率和无功功率、远距离大容量输电以及异步联网等方面<sup>[3-4]</sup>。

近年来我国已相继建成和投运多项柔性直流输电工程:渝鄂直流背靠背联网工程、集大规模新能源并网和直流电网构建为一体的张北柔直示范工程、作为世界上首个±800 kV特高压多端混合直流输电工程的昆柳龙直流工程等。随着柔性直流输电技术的发展,模块化多电平换流器(MMC)的额定容量及其所接入电网的电压等级均有所提高,柔性直流输电技术对受端电网短路电流水平的影响已不容忽视。为保证电网的安全稳定运行,应在分析柔性直流输电系统输出短路电流机理的基础上在规划设计阶段对其所接入电网的短路电流水平进行校核。

目前,国内外已有大量研究集中在交流系统发生短路故障时柔性直流输电系统输出短路电流的特性分析和解析计算。文献[5-6]分析了双极MMC交流发生阀侧故障时换流器闭锁后的暂态电压、电流特性,推导了短路电流的解析式。然而当交流网侧发生短路故障时,MMC在不需要闭锁的情况下向交流系统注入短路电流的特性和计算方法与阀侧故障

时区别较大,应另作分析。文献[7-11]通过分析MMC输出短路电流的机理,提出了MMC为交流系统贡献短路电流的解析表达式。文献[12-13]分析了影响柔性直流输电系统输出短路电流的因素并提出了相应的抑制措施和算法修正方案。但是当柔性直流输电系统参与短路电流计算时,其作为受控电流源与交流系统间的耦合关系往往会影响短路电流计算的准确度,而如何处理这种关系却未见分析。文献[14]对接入的电压源换流器(VSC)采用了Kron简化,通过将节点阻抗矩阵的规模减小到接入前的大小,将VSC的电气特性包含在节点阻抗矩阵中,最后通过修正节点阻抗矩阵中的VSC相关子矩阵更新节点电压并应用叠加原理计算得出故障电流。但文献[14]的计算方法从机理上只能适用于定有功功率和交流电压的控制策略。文献[15]将VSC视为电流源并通过Kron简化的方法提出了其参与交流系统短路电流计算的方法,但未考虑如何将换流器电源从受控电流源等效为电流源。文献[16-17]采用迭代的方法求解了含VSC的电力系统的短路电流,然而若通过迭代的方法进行求解,则在降低计算效率的同时无法直接应用于国内外成熟的商业软件BPA和PSS/E中,对于节点较多且考虑元件较多的电力系统而言,迭代计算结果的收敛性也值得商榷。

鉴于此,本文首先建立了MMC在不同控制策略下的交流侧故障模型,分析了含MMC的交直流输电系统中同步机电源和MMC输出短路电流的机理,提出了通过近似求解并网点(PCC)处电压将MMC等效为电流源的方法。基于电网络理论中的混合参数将网络表征为不含联络节点的等效网络,通过网络矩阵方程之间的关系,推导得出了含MMC的交直流输电系统中短路电流的统一求解方法。最后,在PSCAD/EMTDC中基于IEEE 9节点系统验证了本

收稿日期:2021-05-10;修回日期:2021-11-09

基金项目:国家电网公司科技项目(202055128A)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(202055128A)

文所提算法的准确性。

### 1 MMC-HVDC 交流侧故障模型

当交流电网发生短路故障时,同步机电源内电势恒定,而故障点电压会瞬间跌落。此时同步发电机输出的短路电流发生突变,然而由于次暂态电抗上的电流无法突变,同步发电机故障后的暂态过程中出现迅速衰减的直流分量和缓慢衰减的交流分量。

由于故障后 MMC 交流侧电压会瞬间跌落,在控制系统的作用下,通过迅速调节 MMC 上下桥臂差模电压使其输出的短路电流改变。因此 MMC 输出的短路电流中不含直流分量。由文献[7]可知,MMC 故障后经过毫秒级的暂态过程即可达到稳态,因此在分析 MMC-HVDC 输电系统交流侧故障特性时只需分析其稳态故障模型。

对于图1所示采用矢量控制的两端 MMC-HVDC 输电系统,每端换流器一般可控制有功、无功类物理量:有功类物理量为有功功率和直流电压;无功类物理量为交流电压和无功功率。由于两端换流器应分别控制有功类物理量的一种,而两端的无功类控制是完全解耦的。因此 MMC 交流侧故障模型应按照无功类物理量分为2类进行分析。在考虑换流器容量限制和外环功率控制器的限幅环节后,本文分别建立了采用定有功功率和无功功率以及定有功功率和交流电压控制策略下的 MMC 交流侧故障模型。

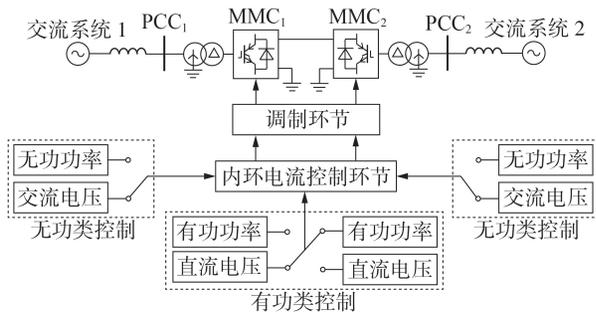


图1 MMC-HVDC 输电系统控制结构  
Fig.1 Control structure of MMC-HVDC transmission system

当交流系统不同位置发生不同类型的短路故障时,PCC 处电压会出现不同程度的跌落。由于 MMC 的控制系统以 PCC 处电压来计算其注入交流系统的功率,以 PCC 处电压跌落程度建立 MMC 交流侧故障模型。为了便于分析,建模过程均在标么值下进行。

#### 1.1 定有功功率和无功功率时 MMC 交流侧故障模型

当故障后 PCC 处电压跌落较小时,MMC 输出的有功功率和无功功率均可达到其指令值,此时 MMC 输出的短路电流  $I_{MMC}$  如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_{MMC} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = P_s^* / U_{PCC}^+, i_{vq}^* = -Q_s^* / U_{PCC}^+ \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{PCC}^+$  为 PCC 处正序电压有效值;  $\varphi_u$  为 PCC 处正序电压相位;  $P_s^*$  和  $Q_s^*$  分别为 MMC 运行范围内的有功功率和无功功率指令值;  $i_{vd}^*$  和  $i_{vq}^*$  分别为有功电流和无功电流指令值。

当故障后 PCC 处电压跌落较大时,应考虑外环控制器限流环节的作用[4]。图2为 MMC 外环控制器限流环节的结构。图中:  $U_{dc}$  和  $U_{dc}^*$  分别为 MMC 运行范围内的直流电压及其指令值;  $U_{PCC}^+$  为 PCC 处正序电压指令值;  $P_s$  和  $Q_s$  分别为 MMC 运行范围内的有功功率和无功功率实际值。通过对  $i_{vd}^*$ 、 $i_{vq}^*$  等比例限幅, MMC 电流指令值  $i_v^*$  应满足式(2)所示关系。

$$\begin{cases} i_v^* = \sqrt{(i_{vd}^*)^2 + (i_{vq}^*)^2} \leq I_{vmax} \\ i_{vd}^* = k i_{vdref}, i_{vq}^* = k i_{vqref} \\ i_{vdref} \leq i_{vdmax}, i_{vqref} \leq i_{vqmax} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i_{vdref}$ 、 $i_{vqref}$  分别为比例积分(PI)环节输出的电流指令值的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $k$  为外环限流器等比例限幅的比例系数;  $i_{vdmax}$ 、 $i_{vqmax}$  分别为 PI 控制器限幅环节限幅值  $I_{vmax}$  的  $d$ 、 $q$  轴分量,  $I_{vmax}$  根据换流器过载能力设定。

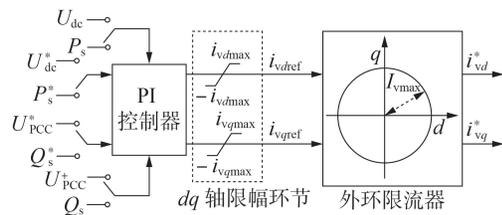


图2 MMC 外环控制器限流环节  
Fig.2 Current-limit loop of outer-loop controller for MMC

此时, MMC 输出的有功功率和无功功率中只有指令值较小的可达到其指令值。由于整流站吸收功率而逆变站输出功率,在考虑换流站输出功率与输出电流之间参考方向的关系后,  $I_{MMC}$  可表示为:

$$\begin{cases} I_{MMC} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = \frac{P_s^*}{|P_s^*|} \sqrt{I_{vmax}^2 - (i_{vq}^*)^2}, i_{vq}^* = -\frac{Q_s^*}{U_{PCC}^+} \quad P_s^* > Q_s^* \\ i_{vd}^* = \frac{P_s^*}{U_{PCC}^+}, i_{vq}^* = -\frac{Q_s^*}{|Q_s^*|} \sqrt{I_{vmax}^2 - (i_{vd}^*)^2} \quad P_s^* \leq Q_s^* \end{cases} \quad (3)$$

当 PCC 处电压跌落至 0 或接近于 0 时, MMC 输出的有功功率和无功功率均无法达到指令值。此时,在外环限流环节的作用下,  $I_{MMC}$  在考虑参考方向后可表示为:

$$\begin{cases} I_{MMC} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = \frac{I_{vmax} P_s^*}{\sqrt{2} |P_s^*|}, i_{vq}^* = -\frac{I_{vmax} Q_s^*}{\sqrt{2} |Q_s^*|} \end{cases} \quad (4)$$

由于在定无功功率控制策略下,故障侧换流站按照无功功率指令值的符号发出或吸收无功功率(即送端吸收功率“+”,受端发出功率“-”),无功电

流指令值的符号与无功功率指令值的符号有关。

## 1.2 定有功功率和交流电压时 MMC 交流侧故障模型

当 MMC 远区发生短路故障时,在控制系统的作用下 PCC 处电压可达到其指令值,因此 MMC 输出的有功功率也可达到指令值。然而,由于无法准确判断 MMC 发出的无功功率,可通过 PCC 处与故障点之间的电气距离近似判断此时 MMC 输出的无功电流大小。综上, $I_{\text{MMC}}$  可表示为:

$$\begin{cases} I_{\text{MMC}} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = P_s^* / U_{\text{PCC}}^+ \\ i_{vq}^* = -\min \left\{ \sqrt{I_{\text{vmax}}^2 - (i_{vd}^*)^2}, \frac{Q_0 + |Z_{MD}/Z_{DD}|}{U_{\text{PCC}}^+} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q_0$  为故障前电压达到指令值时 MMC 输出的有功功率; $\min\{\cdot, \cdot\}$  为最小值函数; $Z_{DD}$  和  $Z_{MD}$  分别为故障节点  $D$  的自阻抗以及故障节点和 MMC 所接入节点  $M$  之间的互阻抗。

当短路故障发生在换流站近区且 PCC 处电压无法被控制在指令值时。在限流环节的作用下,MMC 按照有功功率指令值输出有功功率后剩余的通流容量均输出无功功率以提供电压支撑。当 MMC 采用定交流电压控制策略时,无论整流侧还是逆变侧交流系统发生故障,换流器均输出无功功率, $I_{\text{MMC}}$  为:

$$\begin{cases} I_{\text{MMC}} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = P_s^* / U_{\text{PCC}}^+, i_{vq}^* = -\sqrt{I_{\text{vmax}}^2 - (i_{vd}^*)^2} \end{cases} \quad (6)$$

当 PCC 处及其近区发生较为严重的故障时,MMC 输出的有功功率以及 PCC 处电压均无法达到指令值。此时 MMC 输出的短路电流可表示为:

$$\begin{cases} I_{\text{MMC}} = (i_{vd}^* + j i_{vq}^*) e^{j\varphi_u} \\ i_{vd}^* = \frac{I_{\text{vmax}} P_s^*}{\sqrt{2} |P_s^*|}, i_{vq}^* = -\frac{I_{\text{vmax}}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (7)$$

由于在定交流电压控制策略下,故障侧换流站始终发出无功功率,无功电流指令值应为负。

## 2 含 MMC 的交直流输电系统短路电流计算机理

当含 MMC 的交直流系统发生短路故障时,由于同步机电源为电压源特性,故障后次暂态电势  $E''$  不会突变,在电力系统实用计算中仍可取起始次暂态电流  $I''$  作为同步机输出的短路电流  $I_{\text{short}}$  来校核交流断路器<sup>[18]</sup>,如式(8)所示。

$$I_{\text{short}} = I'' = E'' / x_d'' \quad (8)$$

式中: $x_d''$  为次暂态电抗。

由于 MMC 在一定的控制策略下输出的短路电流与 PCC 处正序电压有关,可将 MMC 视为正序电压控制电流源,即  $I_{\text{MMC}} = f(U_{\text{PCC}}^+)$  (函数  $f$  表示表 1 所示  $I_{\text{MMC}}$  与  $U_{\text{PCC}}^+$  之间的关系)。由 1.1 节和 1.2 节可知,

MMC 的交流侧故障特性可根据 PCC 处正序电压大小分为高、中、低 3 个电压区间讨论,并以  $U_{\text{high}}$  和  $U_{\text{low}}$  分别作为高、中电压区域和中、低电压区域之间的临界值。表 1 中  $U_{\text{high}}$  和  $U_{\text{low}}$  的计算表达式见式(9)。

$$\begin{cases} U_{\text{high}} = \sqrt{(P_s^*)^2 + (Q_s^*)^2} / I_{\text{vmax}} \\ U_{\text{low}} = \sqrt{2} \min\{P_s^*, Q_s^*\} / I_{\text{vmax}} \end{cases} \quad (9)$$

表 1 MMC 的交流侧故障特性

MMC 控制策略	$U_{\text{PCC}}^+$ 取值范围	$f$
	$U_{\text{PCC}}^+ \geq U_{\text{high}}$	式(1)
定有功功率和无功功率	$U_{\text{low}} < U_{\text{PCC}}^+ < U_{\text{high}}$	式(3)
	$U_{\text{PCC}}^+ \leq U_{\text{low}}$	式(4)
	$U_{\text{PCC}}^+ = U_s^*$	式(5)
定有功功率和交流电压	$U_{\text{low}} < U_{\text{PCC}}^+ < U_s^*$	式(6)
	$U_{\text{PCC}}^+ \leq U_{\text{low}}$	式(7)

由于故障后非同步机电源即换流器的 PCC 处电压会发生突变,在计算 MMC 输出的短路电流时应首先确定故障后的 PCC 处电压。但当 MMC 注入 PCC 处短路电流未知的情况下无法直接得到 PCC 处故障后的电压。有必要考虑将 PCC 处电压和 MMC 输出的电流进行解耦,在现有同步机短路电流计算方法的基础上提出含 MMC 电网的短路电流计算方法。

## 3 含 MMC 电网短路电流统一求解方法

### 3.1 MMC 交流侧故障模型解耦简化方法

由于 MMC 的交流侧故障模型是电压控制电流源,其输出的电流与 PCC 处电压之间会相互影响。鉴于此,应在计算短路电流前将 PCC 处电压与 MMC 输出的短路电流进行解耦,通过近似求解 PCC 处电压的方法将 MMC 故障模型解耦简化为电流源。

根据叠加原理,对于只含电压源的电力系统,故障后的各支路电流和各节点电压可由正常运行时的潮流计算结果和故障后故障点等效电压源单独作用下的响应叠加得到。对于含有电压源和受控电流源的电力系统,故障后各电压、电流分量应由正常稳态运行时的潮流计算结果、故障点等效电压源和 MMC 故障前后输出电流的改变量 3 个部分叠加得到。

由于在短路比较大的电力系统中,相比于同步机电源,MMC 故障前后输出电流的改变量  $\Delta I_{\text{MMC}}$  对换流站远区的节点电压的影响可以忽略,假设  $\Delta I_{\text{MMC}}$  仅对 PCC 处电压有较小的变化,且认为此改变对  $I_{\text{MMC}}$  的影响可忽略。由节点电压方程可得:

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{PCC1}} = U_{D0} Z_{MD} / Z_{DD} \\ \Delta U_{\text{PCC2}} = Z_{MM} \Delta I_{\text{MMC}} \\ U_{\text{PCC}} = U_{\text{PCC0}} + \Delta U_{\text{PCC1}} + \Delta U_{\text{PCC2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Z_{MM}$  为 MMC 所接入节点  $M$  的自阻抗; $\Delta U_{\text{PCC1}}$  和  $\Delta U_{\text{PCC2}}$  分别为故障点等效电压源和 MMC 故障前、后输出电流的改变量作用时 PCC 处的电压改变量;

$U_{PCC}$  为基于上述假设的 PCC 处电压近似计算结果;  $U_{D0}$  和  $U_{PCC0}$  分别为故障前稳态时故障节点电压和 PCC 处电压的潮流计算结果;  $\Delta I_{MMC}$  可根据  $\Delta U_{PCC1}$  和表 1 所示 MMC 的交流侧故障特性计算得到, 如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} \Delta I_{MMC} = f(U_{PCC1}^+) - f(U_{PCC0}^+) \\ U_{PCC1} = U_{PCC0} + \Delta U_{PCC1} \end{cases} \quad (11)$$

通过上述方法得到故障后的 PCC 处电压, 再根据  $I_{MMC} = f(U_{PCC}^+)$  可得 MMC 输出的短路电流, 此时可将 MMC 视为电流源参与交流电网短路电流计算。

### 3.2 基于电网络理论的网络等效方法

当计算含有电压源和电流源的电力系统的短路电流时, 需要同时考虑同步机和故障源 2 种电压源以及非同步机电流源的影响。本文基于电网络理论, 通过消除网络中不关注的联络节点以简化电网的拓扑结构, 可将其等效为基于混合参数 ( $H$  参数) 的多端口网络。其中, 将电流源支路定义为一类端口, 电压源支路定义为二类端口, 所关注支路的待求电流、电压可通过替代原理等效为电流源或电压源支路并归为一类或二类端口, 简化后的等效多端口网络如图 3 所示。图中:  $I_{ci}$  ( $i=1, 2, \dots, m, m$  为端口总数) 和  $U_{vi}$  分别为第  $i$  个柔性直流输电系统电流源支路的电流和电压源支路的电压;  $I_{vi}$  为第  $i$  个柔性直流输电系统电压源支路的电流;  $U_{ci}$  为第  $i$  个柔性直流输电系统电流源支路的电压。

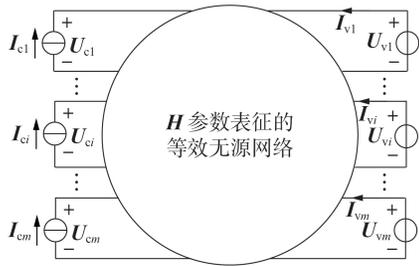


图3 基于  $H$  参数的多端口网络

Fig.3 Multi-port network based on  $H$  parameters

### 3.3 基于等效网络的短路电流统一求解方法

为了从各支路中筛选出  $m$  个端口电压  $U_i$  和端口电流  $I_i$ , 定义筛选矩阵  $E = [I; 0]$ , 其中  $I$  为  $m$  阶单位矩阵, 在对支路进行编号时, 设端口支路编号在前。此时各端口电压电流可表示为:

$$\begin{cases} I_i = EI_b \\ U_i = EU_b \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $I_b$  和  $U_b$  分别为支路电流和支路电压列向量。

对端口支路进行编号时按照先电流源支路再同步机电压源支路最后故障电压源支路的顺序即可得到电流源支路的电压  $U_c$  和电压源支路的电流  $I_v$  为:

$$\begin{bmatrix} U_c \\ I_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ U_v \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $I_c$  和  $U_v$  分别为电流源支路的电流和电压源支路的电压;  $H_{11}$ 、 $H_{12}$ 、 $H_{21}$ 、 $H_{22}$  为  $H$  参数。筛选矩阵定义为:

$$E = \begin{bmatrix} E_c \\ E_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $E_c$  为电流源支路筛选矩阵;  $E_v$  为电压源支路筛选矩阵。支路电压和节点电压之间的关系为:

$$U_b = A^T U_n \quad (15)$$

式中:  $A$  为网络关联矩阵;  $U_n$  为节点电压向量。由节点电压方程和基尔霍夫电压定律可知:

$$\begin{cases} Y_n U_n = J_n = AY_b U_v - AI_c \\ I_b - I_c = Y_b (U_b - U_v) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $J_n$  为注入节点的电流源向量;  $Y_n$  为节点导纳矩阵;  $Y_b$  为支路导纳矩阵。由式 (14) 可得:  $E_v E_c^T = 0$ 。由图 3 中电压和电流的参考方向、 $H$  参数的定义及上述支路的编号顺序, 经过推导整理即可得到  $H$  参数的表达式为:

$$\begin{cases} H_{11} = E_c A^T Y_n^{-1} A E_c^T \\ H_{12} = H_{11} (E_c^T)^{-1} Y_b E_v^T \\ H_{21} = -E_v Y_b E_c^{-1} H_{11} \\ H_{22} = E_v Y_b E_v^T - H_{21} (E_c^T)^{-1} Y_b E_v^T \end{cases} \quad (17)$$

综上所述, 当系统中有  $G$  个同步机电源和  $M'$  个柔性直流输电系统接入时, 故障点短路电流  $I_D$  和第  $i$  个柔性直流输电系统所在的 PCC 处电压  $U_{PCCi}$  可以由式 (13) 推导得到:

$$\begin{cases} I_D = \sum_{k=1}^{M'} H_{21(D,k)} I_{MMCk} + H_{22(D,D)} U_{vD} + \sum_{k=1}^G H_{22(D,k)} U_{vk} \\ U_{PCCi} = \sum_{k=1}^{M'} H_{11(i,k)} I_{MMCk} + H_{12(i,D)} U_{vD} + \sum_{k=1}^G H_{12(i,k)} U_{vk} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $H_{xy(i,j)}$  ( $x, y=1, 2$ ) 为  $H_{xy}$  中第  $i$  行第  $j$  列的元素。

## 4 算例分析

为验证所提算法的有效性, 基于 IEEE 9 节点系统, 在不改变正常运行潮流的情况下将节点 2 的同步机电源替换为输出相同功率的两端 MMC-HVDC 系统, 换流站主回路参数见附录 A 表 A1。在 PSCAD 中搭建含有 MMC 的 IEEE 9 节点系统, 其具体网络结构如图 4 所示, 图中  $G_1$ 、 $G_3$  为同步发电机。

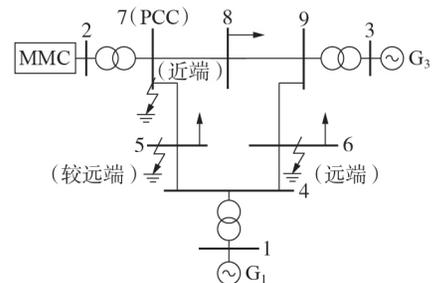


图4 含 MMC 的 IEEE 9 节点测试系统  
Fig.4 IEEE 9-bus test system with MMC

为体现本文建立的 MMC 交流侧故障模型的正确性,分别设置 PCC 处(近端)、节点 5(较远端)和节点 6(远端)处于  $t=1$  s 时发生三相和单相金属性接地短路故障,0.1 s 后清除故障。应用本文所提算法对故障点短路电流和 MMC 输出的短路电流进行计算。

#### 4.1 MMC 采用定有功功率和无功功率控制的验证结果

当 MMC 采用定有功功率和无功功率控制策略时,3 个节点三相短路故障的计算和仿真结果分别如表 2 及附录 A 表 A2、A3 所示。此时 3 个节点处的电压跌落情况依次为跌落至 0 以及故障前稳态值的 32% 和 66%。

表 2 MMC 采用定有功功率和无功功率控制策略时 PCC 处发生三相接地短路故障时的短路电流

Table 2 Short circuit current of three-phase grounding fault at PCC with MMC adopted fixed active power and reactive power control strategy

计算参数	仿真值 / kA	理论计算值 / kA	相对误差 / %
$I_D$	2.483 $\angle$ -57.47°	2.505 $\angle$ -57°	0.886
$I_{MMCa}$	1.203 $\angle$ -10.94°	1.205 $\angle$ -9°	0.166

当以上 3 个节点在  $t=1$  s 时发生持续 0.1 s 的单相金属性短路故障时,由于 PCC 处正序电压均可维持在较高值,3 种情况的短路电流计算方法相同,本文仅以节点 5 为例,计算和仿真结果见表 3。

表 3 MMC 采用定有功功率和无功功率控制策略时节点 5 处发生 a 相接地短路故障时的短路电流

Table 3 Short circuit current of phase-a grounding fault at Node 5 with MMC adopted fixed active power and reactive power control strategy

计算参数	仿真值 / kA	理论计算值 / kA	相对误差 / %
$I_D$	2.855 $\angle$ -78.18°	2.815 $\angle$ -76.94°	1.421
$I_{MMCa}$	0.725 $\angle$ -13.75°	0.724 $\angle$ -17.71°	0.138
$I_{MMCb}$	0.922 $\angle$ -94.78°	0.911 $\angle$ -103.71°	1.207
$I_{MMCc}$	0.426 $\angle$ 154.16°	0.410 $\angle$ 145.67°	3.902

#### 4.2 MMC 采用定有功功率和交流电压控制的验证结果

当 MMC 采用定有功功率和交流电压控制策略时,三相短路故障的计算和仿真结果分别如附录 A 表 A4—A6 所示。此时 3 个节点处的电压跌落情况依次为跌落至 0 以及故障前稳态值的 81% 和无跌落。当上述 3 个节点在  $t=1$  s 时发生持续 0.1 s 的单相金属性短路故障时,3 个节点处正序电压的跌落情况依次为跌落至故障前稳态值的 80%、无跌落和无跌落。因此本文仅以 PCC 处和节点 5 处短路为例,计算和仿真结果分别如附录 A 表 A7、A8 所示。

综上所述,所提出的不同控制策略下的 MMC 交流侧故障模型和短路电流算法对于不同工况下含 MMC 的交直流输电系统短路电流计算均准确有效。

## 5 结论

针对含 MMC 的交直流输电系统短路电流水平校核问题,考虑到迭代计算无法直接适用于现在已成熟的短路电流计算商业软件,且为了防止较大电网中可能出现迭代不收敛问题,本文在将 MMC 交流侧故障模型解耦简化的基础上提出了基于等效网络的含 MMC 电网短路电流统一求解方法。经研究表明:

1) MMC-HVDC 输电系统的短路电流特性为电压控制电流源,然而在假定 MMC 故障前后输出电流的改变量仅对 PCC 处电压有影响时,可以通过计算 PCC 处电压得到 MMC 输出的短路电流从而将其视为电流源参与短路电流计算;

2) 为了方便同时考虑电流源和电压源输出的短路电流,可通过混合参数表征无源网络的方法简化网络拓扑,在合理编号支路的情况下筛选出待求短路电流所在支路并进行计算,计算结果表明本文所提算法可适用于不同控制策略下的含 MMC 电网的对称和非对称故障短路电流的校核。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力发展“十三五”规划[R]. 北京:国家能源局, 2016.
- [2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008. ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):4999-5008.
- [3] 陈启超,李晖,吴文传,等. 基于 VSC-HVDC 异步互联系统联网转孤岛运行稳定控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):32-39. CHEN Qichao, LI Hui, WU Wenchuan, et al. Stability control strategy for conversion from grid-tied to island operation of asynchronous interconnected power grids based on VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4):32-39.
- [4] 徐政,肖晔庆,张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2017:8,111.
- [5] 李振东,安海清,樊小伟,等. 双极 MMC-HVDC 系统站内接地故障特性及保护策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):77-83. LI Zhendong, AN Haiqing, FAN Xiaowei, et al. Converter grounding fault characteristics and protection strategy in bipolar MMC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):77-83.
- [6] 薛士敏,范勃喙,刘冲,等. 双极柔性直流输电系统换流站交流三相接地故障分析及保护[J]. 高电压技术,2019,45(1):21-30. XUE Shimin, FAN Boyang, LIU Chong, et al. Fault analysis and protection scheme for converter AC three-phase grounding of bipolar HVDC systems [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1):21-30.
- [7] 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.
- [8] 刘若平,屠卿瑞,李银红,等. 适用于交流保护整定的 MMC-

- HVDC接入母线故障等效模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(18):145-153.
- LIU Ruoping, TU Qingrui, LI Yinhong, et al. Equivalent model of MMC-HVDC for AC protection setting with access bus fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 145-153.
- [9] 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.
- [10] LIU Y, HUANG M, ZHA X, et al. Short-circuit current estimation of modular multilevel converter using discrete-time modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 40-45.
- [11] 梁莹玉, 李武林, 卢正杰, 等. MMC-HVDC对交流线路电流相位差动保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 95-101.
- LIANG Yingyu, LI Wulin, LU Zhengjie, et al. Influence of MMC-HVDC on current phase differential protection of AC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 95-101.
- [12] 郭明星, 霍启迪, 赵鹏飞, 等. 柔性直流贡献短路电流影响因素及工程算法误差分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(7): 143-150.
- GUO Mingxing, HUO Qidi, ZHAO Pengfei, et al. Influencing factors of VSC-HVDC contribution short-circuit current and error analysis of engineering calculation method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(7): 143-150.
- [13] 茆书睿, 徐政, 杨健, 等. 交流系统短路故障下MMC对短路电流的影响及抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 134-149.
- MAO Shurui, XU Zheng, YANG Jian, et al. Influence analysis and control strategy of MMC on AC short circuit current under short circuit fault of AC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 134-149.
- [14] REIZ C, LEITE J B. Short-circuit calculation in unbalanced three-phase power distribution systems with distributed generation[C]//2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. Gramado, Brazil: IEEE, 2019: 1-6.
- [15] KIM I. Short-circuit analysis models for unbalanced inverter-based distributed generation sources and loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3515-3526.
- [16] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.
- ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [17] MARGOSSIAN H, SACHAU J, DECONINCK G. Short circuit calculation in networks with a high share of inverter based distributed generation[C]//2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Galway, Ireland: IEEE, 2014: 1-5.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 三相交流系统短路电流计算第1部分 电流计算: GB/T 15544.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

#### 作者简介:



刘昕宇

刘昕宇(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电技术(**E-mail**: liuxinyu\_up@163.com);

王国腾(1996—),男,博士研究生,研究方向为交直流电力系统安全稳定分析与控制(**E-mail**: wgt339@163.com);

徐政(1962—),男,教授,博士研究生导师,博士,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、风电发电技术与风电场并网技术(**E-mail**: xuzheng007@zju.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Unified solution method of short circuit current for AC / DC transmission system with MMC

LIU Xinyu<sup>1</sup>, WANG Guoteng<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Zheren<sup>1</sup>, GAO Yiyi<sup>2</sup>, HAN Yi<sup>2</sup>, LIU Tianyang<sup>2</sup>

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

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** In view of the checking for short circuit current level of AC / DC transmission system including MMC (Modular Multilevel Converter), the fault model at MMC AC-side is established based on considering the operation mode and control system of MMC. After comparing the mechanism of short circuit current output by synchronous generators as well as MMC to realize the decoupling between the voltage at PCC (Point of Common Coupling) and the output current by MMC, the fault model at MMC AC-side is simplified to a current source by approximate solving the voltage at PCC. After reasonably numbering the branches, screening out the source branches, and the passive branches where the short circuit current is to be solved, the passive network composed of contact nodes is characterized by hybrid parameters based on the electrical network theory. Through derivation, the analytical expression of short circuit current for the power grid including MMC is obtained. The simulative results under different operating modes show that the proposed algorithm can accurately solve the short circuit current under different AC-side faults of MMC by establishing the fault models at MMC AC-side under different control strategies, and it can be used for equipment selection and protection system design of AC / DC transmission system with MMC.

**Key words:** MMC; short circuit current; fault model at AC-side; theory of electrical network; hybrid parameter

## 附录 A

表 A1 MMC 换流站主回路参数

Table A1 Main circuit parameters of MMC converter station

参数	数值	参数	数值
换流器额定容量/(MV·A)	400	子模块额定电压/kV	2
换流变额定容量/(MV·A)	480	单桥臂子模块个数	200
换流变变比	230 kV/210 kV	子模块电容值/mF	100
换流变漏抗	0.1	桥臂电感/mH	38
直流电压/kV	400	平波电抗器/H	0.1

注：换流变漏抗为标么值。

表 A2 定有功和无功控制策略下节点 5 处三相接地短路时的短路电流

Table A2 Short circuit current of three-phase fault at Node 5 with MMC adopted fixed active power and reactive power control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	$2.196 \angle -71.82^\circ$	$2.194 \angle -71.82^\circ$	0.069
$I_{MMC\alpha}$	$1.222 \angle 70.61^\circ$	$1.205 \angle 67.82^\circ$	1.411

表 A3 定有功和无功控制策略下节点 6 处三相接地短路时的短路电流

Table A3 Short circuit current of three-phase fault at Node 6 with MMC adopted fixed active power and reactive power control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	$2.582 \angle -77.16^\circ$	$2.618 \angle -77.87^\circ$	1.394
$I_{MMC\alpha}$	$0.797 \angle 20.49^\circ$	$0.768 \angle 20.00^\circ$	3.776

表 A4 MMC 采用定有功和交流电压控制策略时 PCC 处三相接地短路时的短路电流

Table A4 Short circuit current of three-phase grounding fault at PCC with MMC adopted fixed active power and AC voltage control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	$2.969 \angle -71.16^\circ$	$2.949 \angle -69.63^\circ$	0.678
$I_{MMC\alpha}$	$1.193 \angle -48.67^\circ$	$1.205 \angle -45.00^\circ$	1.006

表 A5 定有功和交流电压控制策略下节点 5 三相接地短路时的短路电流

Table A5 Short circuit current of three-phase fault at node 5 with MMC adopted fixed active power and AC voltage control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	$3.151 \angle -74.96^\circ$	$3.153 \angle -75.90^\circ$	0.063
$I_{MMC\alpha}$	$1.223 \angle -37.71^\circ$	$1.205 \angle -39.43^\circ$	1.494

表 A6 定有功和交流电压控制策略下节点 6 三相接地短路时的短路电流

Table A6 Short circuit current of three-phase fault at Node 6 with MMC adopted fixed active power and AC voltage control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	$2.750 \angle -79.22^\circ$	$2.734 \angle -79.09^\circ$	0.585
$I_{MMC\alpha}$	$0.679 \angle -25.74^\circ$	$0.635 \angle -21.829^\circ$	6.929

表 A7 MMC 采用定有功和交流电压控制策略时 PCC 处 a 相接地短路时的短路电流

Table A7 Short circuit current of phase-a grounding fault at PCC with MMC adopted  
fixed active power and AC voltage control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	3.880∠-69.46°	3.887∠-68.80°	0.180
$I_{MMCa}$	2.090∠-55.40°	2.134∠-55.26°	2.105
$I_{MMCb}$	1.552∠-123.48°	1.548∠-123.29°	0.258
$I_{MMCc}$	0.596∠26.08°	0.636∠19.58°	6.711

表 A8 MMC 采用定有功和交流电压控制策略时节点 5 处 a 相接地短路时的短路电流

Table A8 Short circuit current of phase-a grounding fault at Node 5 with MMC adopted  
fixed active power and AC voltage control strategy

计算项目	仿真值/kA	理论计算值/kA	相对误差/%
$I_D$	3.058∠-78.36°	3.041∠-78.90°	0.559
$I_{MMCa}$	0.881∠-45.63°	0.885∠-46.00°	0.454
$I_{MMCb}$	0.851∠-128.05°	0.842∠-128.87°	1.069
$I_{MMCc}$	0.340∠87.56°	0.345∠85.55°	1.471