

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.025

# 基于相模变换的柔性直流电网短路故障电流计算

王泰基<sup>1</sup>, 张坤<sup>2</sup>, 许壮<sup>3</sup>, 郭彦勋<sup>3</sup>

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯, 017209; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌, 461000; 3. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州, 450001)

**摘要:**精确的短路故障电流计算对柔性直流电网的器件选型、参数设计以及继电保护研究十分重要。针对现有短路故障电流计算方法未充分考虑直流线路极间耦合的问题,文中提出一种基于相模变换的柔性直流电网短路故障电流计算方法。首先,建立换流站与直流线路的故障等值模型;然后,利用相模变换实现柔性直流电网正极与负极的电气解耦,并获取柔性直流电网在模域内的节点阻抗矩阵;接着,结合柔性直流电网的故障边界条件,计算出柔性直流电网短路故障电流的复频域值,并利用矢量拟合得到故障电流的时域值;最后,利用PSCAD/EMTDC仿真验证所提故障电流计算方法的有效性。仿真分析结果表明,在直流电网发生故障且换流站尚未过流闭锁期间,所提故障电流计算方法能够精准描述直流故障电流的变化规律。

**关键词:**柔性直流电网;故障电流计算;换流站;相模变换;故障边界条件;故障等值模型

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)05-0247-09

## 0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流电网技术具有控制灵活、谐波含量低、潮流翻转便捷等固有技术优势,在构建以新能源为主体的新型电力系统中具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。然而,柔性直流电网直流侧发生短路故障后,MMC内部处于投入状态的子模块电容迅速放电,故障电流将在短时间内增大到很高的水平<sup>[3-4]</sup>。柔性直流电网短路故障电流计算能够精准地描述各换流站与各条直流线路的短路故障电流水平,对柔性直流电网的器件选型、参数设计以及继电保护研究十分重要<sup>[5-9]</sup>。

MMC直流侧发生故障后,直流故障电流包括交流故障电流与子模块电容放电电流两部分,且后者为主要成分<sup>[10-11]</sup>。文献[12]根据子模块电容在直流侧发生双极故障后的放电特点,采用由电容、电阻和电感组成的RLC模型表示子模块电容放电过程。文献[13]分析了直流侧单极接地故障下的MMC放电通路,给出了故障电流的数学表达式。等值电容参数对短路故障电流计算十分重要,在实际系统中所有子模块电容轮流放电,非线性特征明显。文献[14]深入讨论了短路时刻、换流站调制比等参数对子模块电容放电过程的影响,并给出了等值电容的计算公式。在换流站闭锁后,交流电网通过子模块内部二极管组成的整流桥继续向直流侧

提供故障电流<sup>[15]</sup>。文献[16]分析了整流桥在不同故障场景下的导通特点,并推导出稳态故障电流的计算公式。文献[17]则建立了MMC在闭锁前、闭锁后以及交流断路器断开后的故障等值模型。

柔性直流电网发生故障后,不仅故障近端MMC存在放电过程,故障远端MMC也通过直流线路向故障点提供故障电流,多个MMC之间相互耦合,使得柔性直流电网的故障暂态过程极为复杂。文献[11-17]仅针对单个MMC的放电过程展开研究,未考虑多个MMC的耦合作用。文献[18]在忽略邻近线路对直流故障影响的基础上,推导了故障电流的近似解析表达式。文献[19]通过健全极开路、接地支路独立化以及戴维南等值等方法,对柔性直流电网解耦降阶,实现了故障电流的近似解析计算。文献[18-19]认为远端MMC电气距离较远,对故障的影响可以忽略。然而,当远端MMC的电气距离较小时,上述近似处理将带来较大的计算误差。文献[20]建立柔性直流电网的离散化模型,求解柔性直流电网电压和电流的方程组,获取故障电流的数值解。文献[21]利用柔性直流电网的节点导纳矩阵来求解故障电流。文献[20-21]均是基于直流输电线路的集中参数模型,而长达数百千米的直流输电线路实际属于分布参数元件。

针对现有故障电流计算方法的不足,文中提出一种基于相模变换的柔性直流电网短路故障电流计算方法,该方法考虑了直流输电线路正极与负极之间的耦合,可实现故障电流的准确计算。首先,建立换流站的故障等值模型以及直流线路的分布

收稿日期:2023-11-07;修回日期:2024-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107130)

参数模型;在相模变换的基础上,获取柔性直流电网在模域的节点阻抗矩阵;结合直流故障边界条件,计算出柔性直流电网短路故障电流的复频域值,并利用矢量拟合得到故障电流的时域值;最后,仿真验证所述故障电流计算方法的有效性。

## 1 故障等值建模

### 1.1 换流站等值模型

在换流站闭锁前,MMC 桥臂中处于投入状态的子模块电容通过桥臂电感向故障侧放电。单个 MMC 的放电可以用 RLC 模型等值<sup>[11-14]</sup>,其中电容带有初始电压,充当提供故障电流的电源,初始电压幅值等于 MMC 的额定直流电压。对于直接接地的真双极换流站,其等值电路如图 1 所示。图中, $C_e$  为等值电容; $L_e$  为等值电感; $R_e$  为等值电阻; $U_{ep}$ 、 $U_{en}$  分别为换流站的正极电压和负极电压; $I_{ep}$ 、 $I_{en}$  分别为换流站的正极电流和负极电流。文中下标 p 和 n 分别表示正极电气量和负极电气量,下文不再赘述。

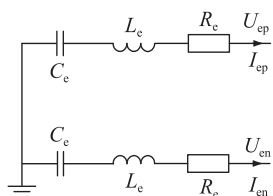


图 1 真双极换流站的故障等值电路

Fig.1 Fault equivalent circuits of bipolar converter stations

$$\begin{cases} R_e = \frac{2R_{arm}}{3} \\ L_e = \frac{2L_{arm}}{3} \\ C_e = \frac{6C_{sm}}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_{arm}$  为桥臂电阻; $L_{arm}$  为桥臂电感; $C_{sm}$  为子模块电容; $n$  为桥臂子模块个数。

在复频域,换流站的直流侧电压和电流存在如下关系:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_{ep} \\ I_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_e & 0 \\ 0 & 1/z_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ep} \\ U_{en} \end{bmatrix} \\ z_e = R_e + sL_e + \frac{1}{sC_e} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $z_e$  为 MMC 的等值阻抗。

### 1.2 直流输电线路等值模型

图 2 为直流线路示意。图中, $I_{ap}$ 、 $J_{an}$ 、 $I_{bp}$ 、 $I_{bn}$  为直流线路的端口电流; $U_{ap}$ 、 $U_{an}$ 、 $U_{bp}$ 、 $U_{bn}$  为直流线路的端口电压; $l$  为线路长度。

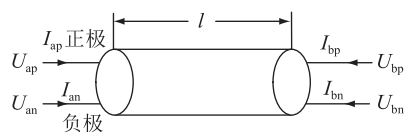


图 2 直流线路示意

Fig.2 Schematic diagram of the DC transmission line

对于图 2 所示直流线路,两端电压和电流满足如下关系:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_{ap} \\ I_{an} \end{bmatrix} = Y_S \begin{bmatrix} U_{ap} \\ U_{an} \end{bmatrix} + Y_T \begin{bmatrix} U_{bp} \\ U_{bn} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{bp} \\ I_{bn} \end{bmatrix} = Y_T \begin{bmatrix} U_{ap} \\ U_{an} \end{bmatrix} + Y_S \begin{bmatrix} U_{bp} \\ U_{bn} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_S = \begin{bmatrix} y_a & y_b \\ y_b & y_a \end{bmatrix} = YQA^{-1} \coth(\Lambda l) Q^{-1} \\ Y_T = \begin{bmatrix} y_c & y_d \\ y_d & y_c \end{bmatrix} = -YQA^{-1} \operatorname{csch}(\Lambda l) Q^{-1} \\ \Lambda^2 = Q^{-1}ZYQ \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Y_S$ 、 $Y_T$  分别为自导纳矩阵和转移导纳矩阵, $y_a$ 、 $y_b$  是  $Y_S$  的元素, $y_c$ 、 $y_d$  是  $Y_T$  的元素; $Q$  为特征量矩阵,其作用是实现直流输电线路正极和负极电气量的解耦,具体表达式将在下文给出; $Z$ 、 $Y$  分别为单位长度直流线路的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵<sup>[22]</sup>。式(3)和式(4)中的矩阵均为  $2 \times 2$  阶矩阵。

## 2 柔性直流电网故障分析

### 2.1 相模变换

柔性直流电网直流侧发生单极接地故障时,由于直流输电线路正、负极间的耦合作用,故障极和非故障极都会出现故障分量。在相域内直接进行故障电流计算较为复杂,为此,可通过相模变换将相互耦合的正极与负极电气量变换为彼此独立的 1 模与 0 模电气量,从而有效减少计算量。

对于双极直流系统,可利用特征量矩阵  $Q$  将相互耦合的相域电气量变换成彼此独立的模域电气量<sup>[23]</sup>。对于正极电压  $U_p$ 、负极电压  $U_n$ 、正极电流  $I_p$ 、负极电流  $I_n$ ,相模变换的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q = Q^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $U_0$ 、 $U_1$  分别为 0 模电压和 1 模电压; $I_0$ 、 $I_1$  分别为 0 模电流和 1 模电流。文中下标 0 和 1 分别表示

0 模分量和 1 模分量,下文不再赘述。

将式(5)、式(6)代入式(3),可得:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_{0,a} \\ I_{1,a} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{m,S} \begin{bmatrix} U_{0,a} \\ U_{1,a} \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_{m,T} \begin{bmatrix} U_{0,b} \\ U_{1,b} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{0,b} \\ I_{1,b} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{m,T} \begin{bmatrix} U_{0,a} \\ U_{1,a} \end{bmatrix} + \mathbf{Y}_{m,S} \begin{bmatrix} U_{0,b} \\ U_{1,b} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{m,S} = \begin{bmatrix} y_a + y_b & 0 \\ 0 & y_a - y_b \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y}_{m,T} = \begin{bmatrix} y_c + y_d & 0 \\ 0 & y_c - y_d \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Y}_{m,S}$ 、 $\mathbf{Y}_{m,T}$ 分别为 $\mathbf{Y}_S$ 、 $\mathbf{Y}_T$ 在模域内对应的矩阵; $I_{0,a}$ 、 $I_{1,a}$ 、 $I_{0,b}$ 、 $I_{1,b}$ 为直流线路端口电流的模域分量; $U_{0,a}$ 、 $U_{1,a}$ 、 $U_{0,b}$ 、 $U_{1,b}$ 为直流线路端口电压的模域分量。

由于直流输电线路的极间耦合作用,正极电气量和负极电气量相互影响。由式(8)、式(9)可知,电气量的 0 模分量和 1 模分量彼此独立,实现了解耦。

将式(5)、式(6)代入式(2),可得:

$$\begin{bmatrix} I_{0,e} \\ I_{1,e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_e & 0 \\ 0 & 1/z_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{0,e} \\ U_{1,e} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $U_{1,e}$ 、 $U_{0,e}$ 分别为换流站电压的 1 模分量和 0 模分量; $I_{1,e}$ 、 $I_{0,e}$ 分别为换流站电流的 1 模分量和 0 模分量。

可以看出,换流站直流出口电气量的 0 模分量和 1 模分量之间不存在耦合。

## 2.2 模域内的故障边界条件

故障发生后,利用相模变换,柔性直流电网可分解为 1 模网络和 0 模网络,并对柔性直流电网的非故障区域进行戴维南等值,得到图 3 所示的模域等值电路。图中, $U_f$ 为故障处的电压, $U_{1,f}$ 、 $U_{0,f}$ 分别为其 1 模分量和 0 模分量; $Z_{eq}$ 为从故障处看向柔性直流电网的等值阻抗, $Z_{1,eq}$ 、 $Z_{0,eq}$ 分别为其 1 模分量和 0 模分量; $U_{eq}$ 为故障前的系统电压, $U_{1,eq}$ 、 $U_{0,eq}$ 分别为其 1 模分量和 0 模分量; $i_f$ 为流向故障点的电流, $i_{1,f}$ 、 $i_{0,f}$ 分别为其 1 模分量和 0 模分量。

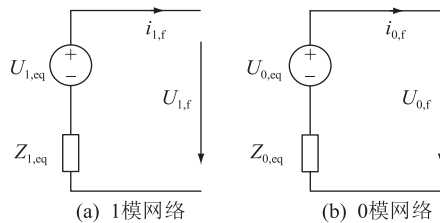


图 3 故障后的柔性直流电网等值电路

Fig.3 Equivalent circuits of the flexible DC grid after fault

故障前系统对称运行,额定电压为 $\pm U_{dc}$ 。由式(5)可知,故障前 $U_{1,eq} = \sqrt{2}U_{dc}$ , $U_{0,eq} = 0$ 。模域电压、电流有如下关系:

$$\begin{cases} \sqrt{2}U_{dc} - i_{1,f}Z_{1,eq} = U_{1,f} \\ 0 - i_{0,f}Z_{0,eq} = U_{0,f} \end{cases} \quad (11)$$

图 4 为直流线路故障示意。图中, $R_f$ 为故障电阻; $i_{fp}$ 、 $i_{fn}$ 分别为故障处正极和负极电流; $U_{fp}$ 、 $U_{fn}$ 分别为故障处正极和负极电压。

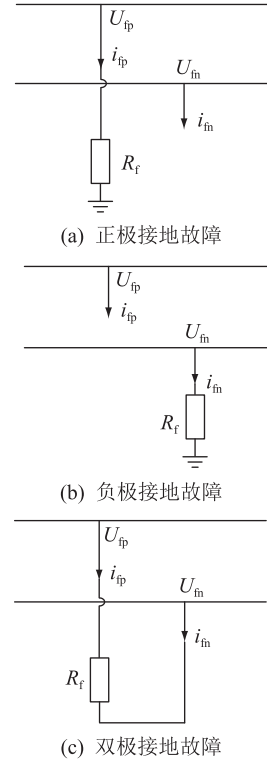


图 4 直流线路故障示意

Fig.4 Schematic diagram of DC line faults

(1) 正极接地故障。如图 4(a)所示,直流线路发生正极接地故障时,故障边界条件为:

$$\begin{cases} i_{fn} = 0 \\ U_{fp} = i_{fp}R_f \end{cases} \quad (12)$$

利用式(5)、式(6),将式(12)变换到模域可得:

$$\begin{cases} i_{0,f} - i_{1,f} = 0 \\ U_{0,f} + U_{1,f} = (i_{0,f} + i_{1,f})R_f \end{cases} \quad (13)$$

结合式(11)和式(13),可得:

$$i_{0,f} = i_{1,f} = \frac{\sqrt{2}U_{dc}}{Z_{1,eq} + Z_{0,eq} + R_f} \quad (14)$$

(2) 负极接地故障。如图 4(b)所示,某直流线路发生负极接地故障时,故障边界条件为:

$$\begin{cases} i_{fp} = 0 \\ U_{fn} = i_{fn}R_f \end{cases} \quad (15)$$

利用式(5)、式(6),将式(15)变换到模域可得:

$$\begin{cases} i_{0,f} + i_{1,f} = 0 \\ U_{0,f} - U_{1,f} = (i_{0,f} - i_{1,f})R_f \end{cases} \quad (16)$$

结合式(11)、式(16),可得:

$$-i_{0,f} = i_{1,f} = \frac{\sqrt{2}U_{dc}}{Z_{1,eq} + Z_{0,eq} + R_f} \quad (17)$$

(3) 双极故障。如图4(c)所示,某直流线路发生双极故障时,故障边界条件为:

$$\begin{cases} i_{fp} = -i_{fn} \\ U_{fp} = i_{fp}R_f + U_{fn} \end{cases} \quad (18)$$

利用式(5)、式(6),将式(18)变换到模域可得:

$$\begin{cases} i_{0,f} = 0 \\ 2U_{1,f} = i_{1,f}R_f \end{cases} \quad (19)$$

结合式(11)、式(19),可得:

$$\begin{cases} i_{1,f} = \frac{\sqrt{2}U_{dc}}{Z_{1,eq} + R_f/2} \\ i_{0,f} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

### 2.3 柔性直流电网的模域故障电流计算

故障发生后,利用等值电流源表示故障支路,则图3所示的模域电路可进一步等值为图5。图中,柔性直流电网包括正常等值电源  $U_{eq}$ 、故障等值电流源  $i_f$  以及戴维南等值电阻  $Z_{eq}$ ,  $U_{j,eq}$ 、 $i_{j,f}$  和  $Z_{j,eq}$  分别为  $U_{eq}$ 、 $i_f$  和  $Z_{eq}$  的  $j$  模分量,  $j$  为 1 或者 0。根据故障类型的不同,等值电流源可由式(14)、式(17)或者式(20)表示。根据叠加定理,故障后的系统响应是系统在正常等值电源单独作用下和故障等值电源单独作用下响应的叠加,图5(b)为正常等值电源单独作用,图5(c)为故障等值电流源单独作用。系统正常运行状态已知,故障电流计算的关键是计算系统在故障等值电源作用下的响应过程。

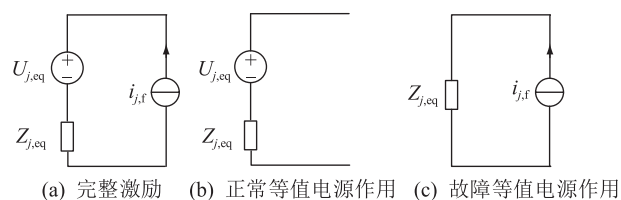


图5 柔性直流电网故障处的等值电路

Fig.5 Equivalent circuits of the flexible DC grid at the fault point

根据式(8)和式(11),结合柔性直流电网的拓扑,建立整个柔性直流电网的节点导纳矩阵  $Y_{grid}$ ,进一步求逆得到柔性直流电网的节点阻抗矩阵  $Z_{grid}$ 。则柔性直流电网各节点的电压可由式(21)求解。

$$\begin{cases} U_{1,grid} = Z_{1,grid}I_{1,grid} \\ U_{0,grid} = Z_{0,grid}I_{0,grid} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $U_{grid}$  为各节点电压组成的列向量;  $I_{grid}$  为各节

点电流源组成的列向量,只有故障节点对应的电流源不为 0,其他节点对应的电流源均为 0。

与节点  $a$ 、 $b$  相连的直流线路电流  $i_{j,ab}$  计算如下:

$$i_{j,ab} = \frac{u_{j,a} - u_{j,b}}{z_{j,ab}} \quad (22)$$

式中:  $z_{j,ab}$  为两节点间的  $j$  模串联阻抗;  $u_{j,a}$ 、 $u_{j,b}$  分别为节点  $a$  和  $b$  的  $j$  模电压。

换流站的故障电流  $i_{j,e}$  为:

$$i_{j,e} = \frac{u_{j,e}}{z_e} \quad (23)$$

式中:  $u_{j,e}$  为换流站直流侧的  $j$  模电压。

由式(21)一式(23)即可求出各直流线路与换流站的故障电流的 0 模分量与 1 模分量的复频域表达式。然而,上述表达式十分复杂,难以直接通过拉普拉斯变换获得时域内的故障电流。为此,可利用文献[24-25]提出的矢量拟合法,将复频域内的响应  $F(s)$  拟合成频域内的连续有理函数:

$$F(s) \approx \sum_{i=1}^B \frac{c_i}{s - a_i} + d \quad (24)$$

式中:  $c_i$ 、 $a_i$ 、 $d$  为拟合得到的常数,  $c_i$ 、 $a_i$  分别为留数和极点;  $B$  为极点个数。

将故障电流在复频域的表达式拟合式(24)所示的表达式后,即可利用拉普拉斯反变换求出故障电流在时域内的表达式。

柔性直流电网的故障电流计算可以归纳为以下步骤。

步骤 1: 利用式(8)一式(10),结合柔性直流电网拓扑,分别建立柔性直流电网的 0 模节点阻抗矩阵和 1 模节点阻抗矩阵。

步骤 2: 利用式(21)一式(23),求出 0 模故障电流和 1 模故障电流在复频域的取值。

步骤 3: 利用式(24)以及拉普拉斯反变换,求出 0 模故障电流和 1 模故障电流在时域的取值。

步骤 4: 利用式(6)获得正极故障电流和负极故障电流。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真模型

参照张北直流电网参数<sup>[26-29]</sup>,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建图 6 所示四端柔性直流电网模型。换流站接线如图 7 所示,可见换流站含有 2 个半桥子模块型 MMC,换流站中性点直接接地,直流侧出口配置限流电感  $L_{bus}$ 。各 MMC 的桥臂均采用 CIGRE 工作组提供的戴维南等值模型<sup>[30]</sup>,从而提高仿真效率;各线路均采用变频参数模型<sup>[31]</sup>,线

路两端配有限流电感  $L_{line}$ 。系统具体参数如表 1 所示。文中线路电流以母线流向线路为正方向,换流站直流出口电流以换流站流向母线为正方向。文中所述故障电流计算在 MATLAB 中编程实现。

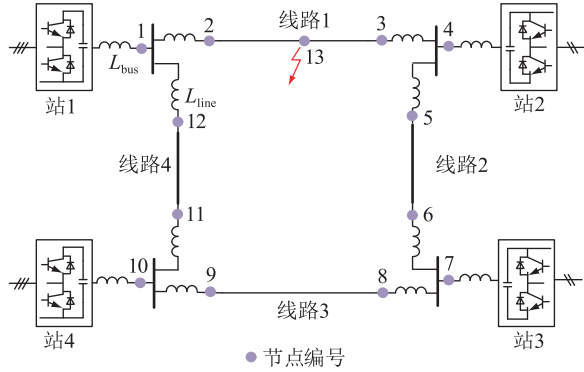


图 6 四端柔性直流电网仿真模型

Fig.6 The simulation model of four-terminal DC grid

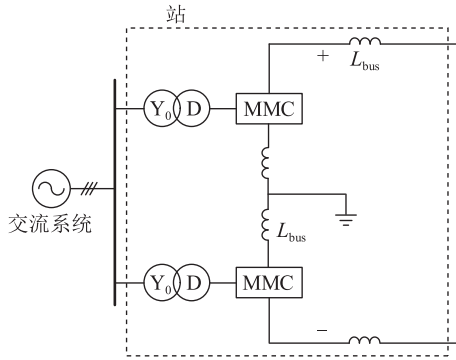


图 7 换流站接线示意

Fig.7 Schematic diagram of the converter station wiring

表 1 柔性直流电网仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the flexible DC grid

参数	数值	参数	数值
极对地电压/kV	±200	站 3 桥臂电感/mH	29
$L_{bus}/H$	0.05	站 1、4 桥臂电阻/ $\Omega$	0.18
$L_{line}/H$	0.1	站 2 桥臂电阻/ $\Omega$	0.55
站 1、4 等值电容/ $\mu F$	450	站 3 桥臂电阻/ $\Omega$	0.27
站 2 等值电容/ $\mu F$	150	线路 1 长度/km	100
站 3 等值电容/ $\mu F$	300	线路 2 长度/km	150
站 1、4 桥臂电感/mH	19	线路 3、4 长度/km	200
站 2 桥臂电感/mH	58		

### 3.2 柔性直流电网节点阻抗矩阵的建立

如图 6 所示,柔性直流电网包含 13 个节点,每个节点由 1 个位于正极的子节点和 1 个位于负极的子节点组成。如果直接在相域内建立柔性直流电网节点阻抗矩阵,则其维度为  $26 \times 26$ 。通过相模变换,相域内  $26 \times 26$  阶的节点阻抗矩阵变换为 2 个模域内  $13 \times 13$  阶的节点阻抗矩阵。可见,相模变换能够有效降低矩阵维度,从而减少计算量。

文中以节点 1 为例介绍柔性直流电网节点阻抗矩阵的建立过程。节点 1 通过 0.1 H 的线路限流电感  $L_{line}$  与节点 2 相连,则两节点之间的 1 模与 0 模互导纳均为  $-10/s$ 。同理,节点 1 与节点 12 之间的 1 模与 0 模互导纳均为  $-10/s$ 。节点 1 与其余节点未直接相连,相应的互导纳均为 0。由图 7 可知,单个 MMC 与 2 个母线限流电感  $L_{bus}$  串联,则该串联支路对应的 1 模与 0 模导纳均为  $y_1$ 。

$$y_1 = \frac{1}{(0.019 \times \frac{2}{3} + 2 \times 0.05) s + 0.18 \times \frac{2}{3} + \frac{1}{0.00045s}} \quad (25)$$

则节点 1 的 1 模与 0 模自导纳  $y_{11}$  均为:

$$y_{11} = \frac{10}{s} + \frac{10}{s} + \frac{1}{0.11267s + 0.12 + 2222.2/s} \quad (26)$$

根据上述步骤并结合式(8)一式(10),获得所有节点的自导纳以及各个节点之间的互导纳,从而根据下述方法建立整个柔性直流电网的节点导纳矩阵:对角元素等于对应节点的自导纳,非对角元素等于对应节点之间的互导纳。对节点导纳矩阵求逆,即可获得柔性直流电网的节点阻抗矩阵。

需要说明的是,文中采用直流输电线路的分布参数模型,特别是考虑线路参数的频变效应后,很难得到输电线路导纳矩阵  $Y_s$  和  $Y_T$  的具体表达式。结合矢量拟合的计算特点,文中实际上计算出  $Y_s$  和  $Y_T$  在一系列离散频率点的取值,因此,故障电流计算的中间变量,包括  $Y_{grid}$ 、 $Z_{grid}$  和故障电流的复频域值,均是在一系列离散频率点的取值。随后,利用矢量拟合将故障电流的离散取值拟合为式(24)所示的连续有理函数。最后,利用拉普拉斯反变换获得故障电流的时域值。

### 3.3 直流故障电流的模量分析

由式(14)、式(17)、式(20)可知,在柔性直流电网某处分别发生正极接地故障和负极接地故障时,故障电流的 1 模分量具有相同的幅值和极性,故障电流的 0 模分量幅值相同、极性相反;柔性直流电网某处发生双极故障时,故障电流的 0 模分量为 0。

在直流线路 1 的中点处分别设置正极接地故障、负极接地故障和双极故障,故障发生时刻为 1 s。线路 1 首端故障电流的 0 模分量的仿真结果如图 8 所示。可见,双极故障时,故障电流的 0 模分量始终为 0;而正极故障和负极故障时,0 模分量具有相同的幅值和相反的极性。该仿真结果充分验证了上

述理论分析的正确性。

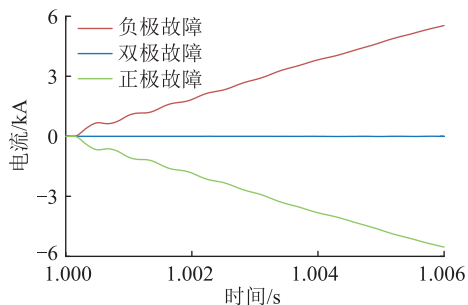


图8 故障电流的0模分量

Fig.8 Waveforms of 0-mode fault current

0模分量在不同故障类型下具有不同的极性,且该结论在不同故障位置、不同故障电阻下均成立。因此,故障电气量的0模分量可用于故障选极。

### 3.4 单极接地故障仿真分析

在直流线路1的中点处设置金属性正极接地故障,故障发生时刻为1s。故障电流的仿真与计算结果如图9和图10所示。图中, $i_{12}$ 为线路1首端流向故障点的正极故障电流; $i_1$ 为换流站1流向母线的正极故障电流; $i_{12m1}$ 、 $i_{12m0}$ 分别为 $i_{12}$ 的1模分量和0模分量。

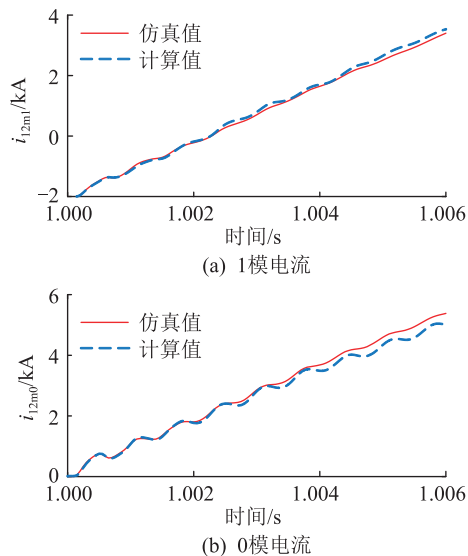


图9 正极故障时模域故障电流波形

Fig.9 Waveforms of fault currents in the mode-domain during the positive pole-to-ground fault

由图9可知,在故障后的短时间内,故障电流的仿真值和计算值基本吻合,随着故障时间的推移,两者逐渐出现偏差。在故障后6ms, $i_{12m1}$ 的仿真值和计算值分别为3.40kA和3.53kA,相对误差为-3.8%; $i_{12m0}$ 的仿真值和计算值分别为5.38kA和5.01kA,相对误差为6.9%。

由图10可知,在故障后的短时间内,故障电流

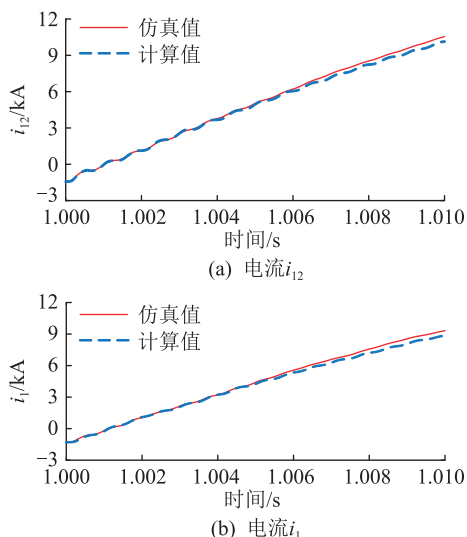


图10 正极故障时相域故障电流波形

Fig.10 Waveforms of fault currents in the phase-domain during the positive pole-to-ground fault

的仿真值和计算值基本吻合,随着故障时间的推移,两者逐渐出现偏差。在故障后10ms, $i_{12}$ 的仿真值和计算值分别为10.55kA和10.14kA,相对误差为3.9%; $i_1$ 的仿真值和计算值分别为9.33kA和8.86kA,相对误差为5.0%。上述结果表明,所提故障电流计算方法具有良好的计算精度。

### 3.5 双极故障仿真分析

在直流线路1的中点处设置金属性双极故障,故障发生时刻为1s。故障电流的仿真与计算结果如图11和图12所示。

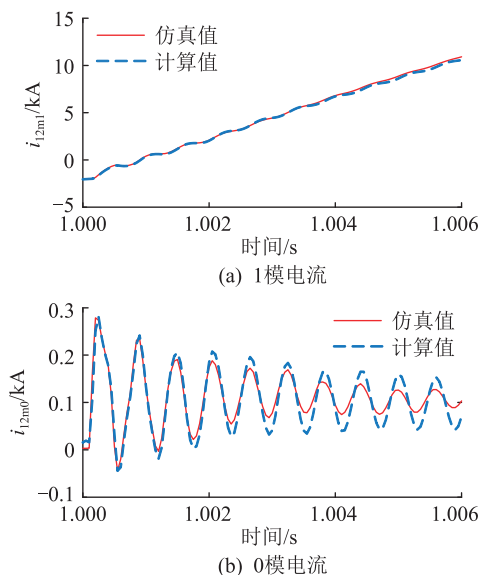


图11 双极故障时模域故障电流波形

Fig.11 Waveforms of fault currents in the mode-domain during the pole-to-pole fault

由图11(a)可知,在故障后6ms, $i_{12m1}$ 的仿真值

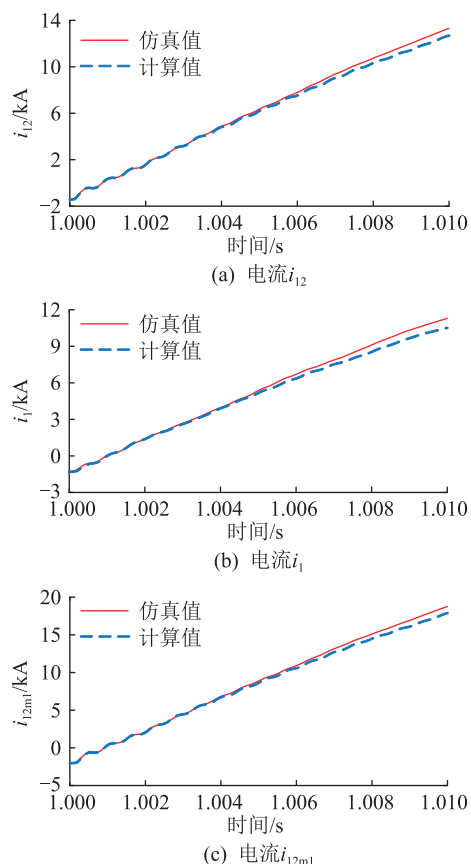


图 12 双极故障时相域故障电流波形

Fig.12 Waveforms of fault currents in the phase-domain during pole-to-pole fault

和计算值分别为 10.91 kA 和 10.57 kA, 相对误差为 3.1%。理想情况下, 直流电网发生双极故障后, 故障电流的 0 模值为 0, 实际上, 直流电网正极与负极并非完全对称, 导致  $i_{12m0}$  在故障发生初期并不为 0。由图 11(b) 可知,  $i_{12m0}$  的计算值与仿真值幅值接近且具有相同的变化规律。

由图 12 可知, 在故障后 10 ms,  $i_{12}$  的仿真值和计算值分别为 13.31 kA 和 12.69 kA, 相对误差为 4.7%;  $i_1$  的仿真值和计算值分别为 11.29 kA 和 10.51 kA, 相对误差为 6.9%。上述结果再次表明, 文中所提故障电流计算方法具有良好的计算精度。

结合图 10 和图 12 可知, 在同一位置发生故障时, 与单极故障相比, 双极故障的故障电流更大, 故障后果更严重。因此, 在设计柔性直流电网参数时, 须确保电网设备在最严重的金属性双极短路故障下仍能安全运行。

## 4 结论

(1) 在直流侧发生短路故障后, 可以利用 RLC 等值电路表示换流站内部子模块电容的放电过程; 利用单位长度的串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵描

述直流线路两端电压和电流的关系。

(2) 在相模变换的基础上, 获得柔性直流电网在模域内的节点阻抗矩阵, 从而有效降低节点阻抗矩阵维度以及故障电流计算量; 结合直流故障边界条件, 获取柔性直流电网的故障电流。

(3) 在直流电网发生故障且换流站尚未过流闭锁的数毫秒内, 所提短路故障电流计算方法能够精准地描述直流故障电流的变化规律。

(4) 直流故障电流的 0 模分量在双极故障、正极故障和负极故障时具有不同的极性, 因此可以利用 0 模分量识别故障极线。

(5) 与单极故障相比, 双极故障的故障电流更大、故障程度更严重, 柔性直流电网参数设计需要以最为严重的双极故障作为约束边界。

## 参考文献:

- [1] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 贺之渊, 杨杰, 吴亚楠, 等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 99-114.  
HE Zhiyuan, YANG Jie, WU Yanan, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 99-114.
- [3] 贺之渊, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 173-183.  
HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 173-183.
- [4] 严俊, 陈力绪, 许建中, 等. 直流电网直流短路故障电流计算方法研究进展[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 19-34, 45, 127.  
YAN Jun, CHEN Lixu, XU Jianzhong, et al. Research progress of calculation method of DC short-circuit current in flexible HVDC grid[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(3): 19-34, 45, 127.
- [5] 郭铭群, 梅念, 李探, 等.  $\pm 500$  kV 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204.  
GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of  $\pm 500$  kV Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204.
- [6] 胡凯凡, 茆美琴, 何壮, 等. 直流短路故障下基于暂态能量抑制的 MMC-HVDC 电网主电路电感参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1680-1690.  
HU Kaifan, MAO Meiqin, HE Zhuang, et al. Optimization of in-

- ductance parameters of main circuit for MMC-HVDC grid based on transient energy suppression under DC short-circuit faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1680-1690.
- [7] 朱琳,寇龙泽,范征,等. 柔性直流并入城市电网后对换流站近区短路电流的影响研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 139-148.
- ZHU Lin, KOU Longze, FAN Zheng, et al. Study on the influence of VSC-HVDC into urban power grid on short-circuit current of the adjacent area of converter station [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 139-148.
- [8] 陈新岗,张金京,马志鹏,等. 基于 MMC 的光伏直流升压并网系统故障分析及限流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 145-154.
- CHEN Xingang, ZHANG Jinjing, MA Zhipeng, et al. MMC-based fault analysis and current-limiting control strategy for a photovoltaic DC boost grid-connected system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 145-154.
- [9] 聂铭,和敬涵,李猛,等. 基于半桥 MMC 特征信号注入的柔性直流线路频变参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 33-43.
- NIE Ming, HE Jinghan, LI Meng, et al. Flexible DC line frequency-dependent parameter identification based on characteristic signal injection with HB-MMC [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 33-43.
- [10] 郝晓弘,黄伟,裴婷婷,等. 基于模块化多电平换流器的高压直流系统直流侧故障限流技术研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 23-36.
- HAO Xiaohong, HUANG Wei, PEI Tingting, et al. Research on current limiting technology of DC-side fault of high voltage direct current system based on modular multilevel converter [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 23-36.
- [11] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
- YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [12] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [13] 王渝红,罗雍溢,曾琦,等. 含直流电压变换的光伏并网系统单极接地短路电流计算[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3283-3291.
- WANG Yuhong, LUO Yongyi, ZENG Qi, et al. Single-pole-grounding short circuit fault current calculation of grid-connected photovoltaic system with DC boost photovoltaic [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3283-3291.
- [14] 段国朝,王跃,尹太元,等. 模块化多电平变流器直流短路故障电流计算[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2145-2152.
- DUAN Guozhao, WANG Yue, YIN Taiyuan, et al. DC short circuit current calculation for modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2145-2152.
- [15] CWIKOWSKI O, WOOD A, MILLER A, et al. Operating DC circuit breakers with MMC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 260-270.
- [16] 李斌,李晔,何佳伟,等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.
- LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [17] 马焕,姚为正,吴金龙,等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2099-2106.
- MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [18] 汤兰西,董新洲. MMC 直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- [19] 刘麒麟,张英敏,张明奇,等. 直流电网输电线路短路故障的单端化近似解析计算方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 47-52.
- LIU Qilin, ZHANG Yingmin, ZHANG Mingqi, et al. A single terminal approximate analytical method for short-circuit fault of transmission lines in DC power grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 47-52.
- [20] 辛业春,王拓,李国庆,等. 基于离散模型的柔性直流电网短路电流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 30-37.
- XIN Yechun, WANG Tuo, LI Guoqing, et al. Short-circuit current calculation method for VSC-HVDC grid based on discrete model [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 30-37.
- [21] GAO S L, YE H, LIU Y T. Accurate and efficient estimation of short-circuit current for MTDC grids considering MMC control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1541-1552.
- [22] MORCHED A S, OTTEVANGERS J H, MARTI L. Multi-port frequency dependent network equivalents for the EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1402-1412.
- [23] ZHANG Y, TAI N L, XU B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [24] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Rational approximation of fre-



- quency domain responses by vector fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):1052-1061.
- [25] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1):97-104.
- [26] 郭贤珊, 卢亚军, 郭庆雷. 张北柔性直流电网试验示范工程直流控制保护设计原则与验证[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2):181-189.  
GUO Xianshan, LU Yajun, GUO Qinglei. Design principle and verification of control and protection system for Zhangbei VSC-HVDC grid demonstration project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2):181-189.
- [27] 郑少明, 刘一民, 董鹏, 等. 张北工程风电柔直汇集系统次、超同步振荡分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6):608-617.  
ZHENG Shaoming, LIU Yimin, DONG Peng, et al. Analysis of sub/super-synchronous oscillation between wind farm and MMC in Zhangbei project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6):608-617.
- [28] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9):164-173.  
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9):164-173.
- [29] 习工伟, 赵兵, 郑帅飞, 等. 新能源基地经特高压交流送出系统输电能力与提升措施[J]. 电力建设, 2022, 43(7):131-138.  
XI Gongwei, ZHAO Bing, ZHENG Shuaifei, et al. Transmission capacity and improvement measures of the UHVAC sending system from new energy base[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7):131-138.
- [30] 宋真宇. MMC-HVDC 系统换流器等效建模及换流站接地保护方案研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2022.  
SONG Zhenyu. Equivalent modeling of converter and research on grounding protection scheme of converter station in MMC-HVDC system[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [31] 杨东睿. 高压直流输电线路频率特性分析及保护方法研究[D]. 南宁:广西大学, 2022.  
YANG Dongrui. Analysis of frequency characteristics of HVDC transmission lines and research on protection methods[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

作者简介:



王泰基

王泰基(1975),男,学士,高级工程师,从事电气自动化以及检修工作(E-mail:7408972-62@qq.com);

张坤(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力系统保护与控制工作;

许壮(1997),男,硕士,研究方向为直流电网故障清除。

## A method for short-circuit fault current calculation in DC grids based on phase-mode transformation

WANG Taiji<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>2</sup>, XU Zhuang<sup>3</sup>, GUO Yanxun<sup>3</sup>

(1. Guoneng Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China;

2. Xuji Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. School of Electrical and

Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Accurate short-circuit fault current calculation is important for device selection, parameter design and protection research of flexible DC grid. To solve the problem that existing fault current calculation methods do not consider the pole-to-pole coupling of DC lines, a short-circuit fault current calculation method based on phase-mode transformation is proposed. First, the equivalent fault models of the converter station and DC line are established. Then, the phase-mode transformation is used to achieve electrical decoupling of positive and negative poles, and the node impedance matrix of the DC grid in the mode-domain is obtained. Subsequently, combining the fault boundary conditions of the DC grid, the fault current of the DC grid is calculated in the complex frequency-domain, and the fault current in the time-domain is obtained by using vector fitting. Finally, the proposed fault current calculation method is verified by PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the proposed method can accurately calculate the DC fault currents after the DC fault occurs and before the converter station blocks.

**Keywords:** flexible DC grid; fault current calculation; converter station; phase-mode transformation; fault boundary conditions; equivalent fault models

(编辑 方晶)