第 50 卷 第 11 期：4837-4851 高电压技术 Vol.50, No.11: 4837-4851
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240624

复杂多端柔直配电网短路故障全过程全网特征量计算方法

戴志辉，李涵伟，李毅然
（新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，保定 071003）

摘　要：多端柔直配电网短路阻尼小、惯性低，系统中存在大量电力电子器件使得故障发展呈强非线性、阶段性特征，传统短路计算方法关注“点”和“线”的故障特征，难以顾及“网”级特性。为此，着眼短路故障从电容放电到交流侧馈流发展的全过程，系统引入直流故障口理论，首先利用阻抗的高频特性将故障网络合理化简，再经拉普拉斯反变换后得到电容放电阶段的故障电流时域近似解，并通过故障口阻抗求得全网特征量；在交流稳态馈流阶段，建立了换流器端口转移矩阵，经换相重叠修正后消去网络中的混联节点，进而得到适用于多端柔直配电网的稳态短路计算方法。最后，基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建仿真模型，验证了不同故障位置及过渡电阻下所提短路计算方法的准确性。

关键词：多端柔直配电网；短路计算；故障口；高频等效；换相重叠

Short-circuit Calculation Method of Whole Network Characteristic Quantity During the Whole Fault Process in Complex Multi-terminal Flexible DC Distribution Network

DAI Zhihui, LI Hanwei, LI Yiran
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Resources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract：Multi-terminal flexible DC distribution network has small short-circuit damping and low inertia, and the fault development presents the characteristics of strong nonlinearity and stage due to the existance of a large number of power electronic devices in the system. Conventional short-circuit calculation methods concern fault characteristics of “points” and “lines”, making it difficult to consider the network-level characteristics. Therefore, this paper focuses on the whole process of short-circuit fault from capacitor discharge to AC-side feed current, and introduces the theory of DC fault ports. On this basis, the fault network is simplified by using high-frequency equivalent characteristics, and then the approximate solution of the fault current in the capacitor discharge stage is obtained by the Laplace inverse transformation. Subsequently, the characteristic quantity of the whole network is obtained by fault-port impedance. In the steady-state AC feed stage, the converter port transfer matrix is established, the series-connected nodes in the network are eliminated after commutation overlap correction, and then the steady-state short-circuit calculation method suitable for multi-terminal flexible DC power grids is obtained. Finally, a simulation model is built based on PSCAD/EMTDC platform, which verifies the accuracy of the proposed short circuit calculation method under different fault locations and fault resistances.

Key words：multi-terminal flexible DC distribution network; short circuit calculation; fault port; high-frequency equivalence; commutation overlap

0　引言

柔直配电网阻尼小、惯性低[1-2]，发生直流短路故障时，换流器会迅速过流并在 2 ms 内完成保护闭锁[3]，若短路电流未能及时清除极易引起全网停运，故障危害十分严重[4]。对此，一种行之有效的方法是通过快速可靠的保护策略和限流设备、直流断路器之间的协调配合，实现故障隔离与快速清除[5]，而短路电流的准确计算是故障清除设备选型及保护整定的基础。柔直配电网直流故障的发展过程可以分为闭锁前的电容放电阶段以及闭锁后的续流馈入阶段[6]，在含有多类型换流器的复杂系统中，大量

基金资助项目：国家自然科学基金(51877084)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877084).

的电力电子设备使得各阶段的故障特性存在较大差异，且呈现强耦合、非线性特征，给短路电流计算带来了极大挑战[7]。

目前，有关短路计算方法的研究主要聚焦于闭锁前的电容放电阶段，旨在为设计保护判据和整定相关定值提供支撑，但忽视了短路故障发展的全过程，且大部分研究仅涉及故障支路的计算[7-14]，针对“网”级特征量的计算方法相对匮乏。由于电容放电阶段的故障等效网络为高阶系统难以直接求解[8]，文献[9]依据换流站的放电路径，将闭锁前10 ms 内的故障环网简化为两端或开式网络；文献[10]进一步分析了发生非金属性故障时，各换流站经过渡电阻的耦合放电机理，通过定义等效增益系数进行解耦计算。文献[11]深入考虑了正负极线路之间的耦合作用，建立解耦后的复合模量等效网络进行计算。但此类方法[9-14]均需将环网进行开环等效化简，未能充分考虑健全支路馈流，因而无法实现全网特征量的准确计算。为此，文献[14-15]建立故障系统的时域状态空间方程，通过 matlab 数值求解，但在多端复杂系统中状态方程的构建难度较大，求解效率不高；文献[16]依据阻抗的高频特性，将故障初期的等值网络简化为纯感性网络，但在求解过程中近似忽略了电阻和健全极对故障电流的影响，计算精度较低，针对电容放电阶段全网特征量的实用性短路计算方法仍有待进一步研究。

在交流馈入阶段，现有的短路计算方法仍停留于单端换流器放电的机理分析，针对多端网络的系统性短路计算方法鲜有文献提及。文献[17-19]将交流馈入阶段等效为不控整流过程，深入分析了换流器的导通状态对故障电流的影响，并提出了相应的计算方法，但仅适用于单端辐射网络。在多端环状电网中，可能存在多个交流电源同时向故障点馈流，放电回路相互耦合，无法应用上述方法直接求解。因此，建立适用于复杂多端柔直电网全故障类型、全过程特征、全网络电气量的实用性短路计算方法迫在眉睫。

综上，本文着眼于故障发展的不同阶段，提出了针对复杂多端柔直配电网全网络特征量的短路计算方法。在电容放电阶段，建立了直流故障口模型，充分考虑了正负极线路耦合和电阻的影响，将故障系统等效为阻感网络，由于无需将环网开环化简，因而可以实现全网特征量的精确计算；在稳态馈流阶段，利用经换相重叠修正后的换流器端口转移矩阵，消去混联节点，将短路计算方法从单端系统拓展至多端系统全网特征量的求解。最后，基于环状六端柔直配电网模型，仿真验证了所提方法的准确性，为保护整定与断路器等设备选型提供支撑。

1 多端柔直配电网电容放电阶段故障等效模型

1.1 多类型换流器的故障等效模型

目前，多端柔直配电网中使用的换流器主要包括两/三电平电压源控制换流器(voltage source converter, VSC)、多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)及直流变压器(DC transformer, DCT)等。对于 VSC 和 DCT，在故障电流简化计算过程中可将其等效为大电容，如图 1 所示，其中，C_s 为直流侧并联电容。

MMC 型换流器，则可等效为 RLC 串联回路。但考虑到桥臂均压控制作用，需基于能量守恒原则求取各相单元的等效电容 C_{eq} 如式(1)所示[20]：

$$2N\times\frac{1}{2}C_{sm}U_{sm}^2=\frac{1}{2}C_{eq}(NU_{sm})^2 \tag{1}$$

式中：C_{sm} 为子模块的电容值；U_{sm} 为子模块电压；N 为桥臂子模块数。由于 MMC 三相桥臂参数对称，如图 2(a)，可通过电路定理将其进一步化简，得到 MMC 等效参数如式(2)所示。

$$\begin{cases}R_m=2R_{arm}/3\\L_m=2L_{arm}/3\\C_m=6C_{sm}/N\end{cases} \tag{2}$$

式中：R_m、L_m、C_m 分别为 MMC 的等效电阻、电感、电容值；L_{arm} 为单相桥臂电感；R_{arm} 为单相桥臂开关通态电阻。最终，MMC 闭锁前的等值模型如图 2(b)所示。

1.2 直流线路故障等效模型

考虑到正负极线路之间的电磁耦合作用，需通过极模变换[21]将相域中的正负极分量解耦为独立

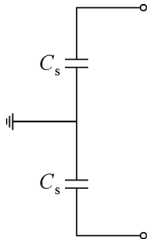


图 1 VSC 及 DCT 电容放电阶段故障等效模型

Fig.1 Equivalent model of VSC and DCT in the capacitor discharge stage

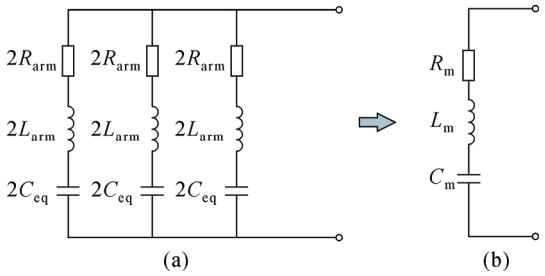


图 2　MMC 电容放电阶段故障等效模型

Fig.2　Equivalent model of MMC in the capacitor discharge stage

的模域分量，如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\mathrm{p}} \\ X_{\mathrm{n}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：X_0、X_1 分别表示 0 模及 1 模分量；X_{p}、X_{n} 分别表示正极和负极分量。0 模分量大小、极性相同，与大地形成回也称地模分量；1 模分量大小相同、极性相反，在正负极之间形成回路，也称线模分量，求得的线路阻抗参数如式(4)。

$$\begin{cases} R_0 = R_{\mathrm{s}}, \quad L_0 = L_{\mathrm{si}} + L_{\mathrm{mi}} \\ R_1 = R_{\mathrm{s}}, \quad L_1 = L_{\mathrm{si}} - L_{\mathrm{mi}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：R_{s} 为线路等效电阻；L_{si} 为线路自感参数；L_{mi} 为线路互感参数；R_0、R_1 分别为线路的 0 模和 1 模电阻值；L_0、L_1 分别为线路的 0 模及 1 模电感。除换流站及直流线路外，在故障电流的解析计算中往往还作以下简化处理：

1）由于中压直流配电网线路传输距离较短，受频变参数影响小，故本文采用线路的集总参数模型，同样能准确描述故障电流变化情况且易于求解。

2）故障初期，短路电流主要由换流站放电电流提供，交流侧三相对称仅提供桥臂电抗续流，并不会直接向故障点馈流，故在电容放电阶段可近似忽略交流侧电流影响[22]。

1.3　故障等效网络

基于上述分析，整个多端柔直电网在故障初期可以简化为一线性系统，因此可以应用叠加定理，将其分解为正常网络与故障附加网络分别求解。本文以附录图 A1 中的环状六端柔直配电网为例，建立了 $\mathrm{f_1}$ 处故障时正常网络与故障附加网络的等效模型，分别如图 3(a)、(b)所示。

图中，R_{ij} 为线路等效电阻、sL_{ij} 为线路等效电抗与限流电抗之和(i、j=1~6)；$R_{\mathrm{m}k}$、$L_{\mathrm{m}k}$、$C_{\mathrm{m}k}$ 为各换流站等效参数(k=1~6)；I_0 为系统正常运行电流；Δi 为故障附加电流分量。

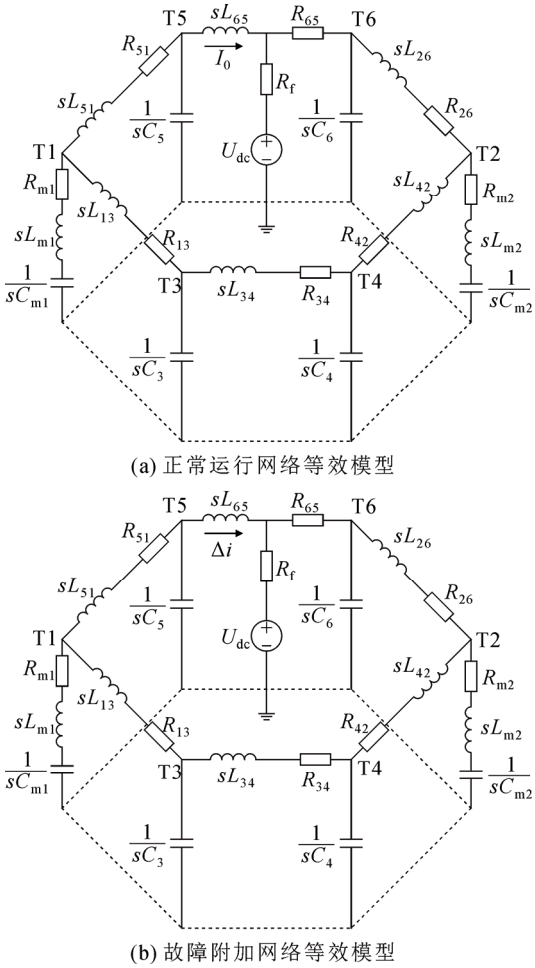


图 3　环状六端柔直配电网故障等效模型

Fig.3　Equivalent model of six-terminal ring flexible DC distribution network

1.4　高频等效化简

由于柔直电网中存在大量的储能元件，每一换流站节点自导纳均可写为式(5)所示的形式：

$$Y = \frac{1}{sL_{\Sigma} + R_{\Sigma}} + sC_{\mathrm{m}} \tag{5}$$

若根据图 3 中的等效模型直接求解，将六阶节点导纳矩阵求逆得到的节点阻抗矩阵阶数过高，从而导致所求的复频域电流表达式难以进行拉普拉斯逆变换获得其时域解析式。

对此，进一步考虑阻抗的高频特性，将故障网络进行降阶处理。在故障初期(2 ms 内)的电容放电阶段，短路电流为非周期性的连续信号，可将其视作高频分量的叠加[9]。图 4 为频率-阻抗特性曲线，由于在高频段电容阻抗趋近于 0 可近似忽略，以往的研究中为计算简便通常将整个系统等值为纯感性网络，但由图 4 可知柔直电网中电阻对故障电流的

抑制作用往往不可忽略。因此，可将电容放电阶段的故障等效模型最终简化为一个阻感网络，相较纯感性网络[16]与开环等效模型[9-14]，模型精度得到提高，可以实现全网特征量的准确计算。

2 电容放电阶段全网特征量近似计算方法

2.1 直流故障口模型

交流系统发生故障时，利用对称分量法在各序网形成的端口称为故障口；同样地，直流电网发生故障时，可将相模变换后的各模域故障端口称为直流故障口(以下简称为故障口)。本文将故障口概念引入直流系统，完成交直流故障的统一理论分析。在此基础上，将图 3 的故障网络进一步简化得到其故障口等值模型，如图 5 所示。需要注意对于横向故障而言只有 F 为独立节点。

选取流入故障口为电流的参考方向，根据图 5 容易得到故障口电压、电流与各节点处电压、电流之间的关系，如式(6)所示(以下电气量无特殊说明，均为复频域参数)。

$$\begin{cases} I_{\mathrm{a}(s)} = I_{\mathrm{F}(s)}^{(\mathrm{F})} = -I_{\mathrm{T}(s)}^{(\mathrm{F})} \ (s = 0,1,\text{下同}) \\ U_{\mathrm{a}(s)} = U_{\mathrm{a}(s)}^{(0)} + U_{\mathrm{a}(s)}^{(\mathrm{F})} = U_{\mathrm{a}(s)}^{(0)} + U_{\mathrm{F}(s)}^{(\mathrm{F})} - U_{\mathrm{T}(s)}^{(\mathrm{F})} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$U_{\mathrm{a}(s)}$，$I_{\mathrm{a}(s)}$ 为故障口电压与电流；$I_{\mathrm{F}(s)}^{(\mathrm{F})}$，$I_{\mathrm{T}(s)}^{(\mathrm{F})}$，$U_{\mathrm{F}(s)}^{(\mathrm{F})}$，$U_{\mathrm{T}(s)}^{(\mathrm{F})}$ 为故障口节点电流与电压的故障附加分量；$U_{\mathrm{a}(s)}^{(0)}$ 为故障口电压的初始分量。

基于故障口模型，运用叠加定理可进一步求解系统故障时的全网特征量，如式(7)所示。

$$\boldsymbol{U}_{(s)} = \boldsymbol{Z}_{(s)}\boldsymbol{I}_{(s)}^{(0)} + \boldsymbol{Z}_{(s)}\boldsymbol{I}_{(s)}^{(\mathrm{F})} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{(s)}$ 为各模域网络的节点阻抗矩阵；$\boldsymbol{I}_{(s)}^{(0)}$ 为各模域网络中节点注入电流的正常分量；$\boldsymbol{I}_{(s)}^{(\mathrm{F})}$ 为各模域网络中节点注入电流的故障附加分量。其中，正常分量可由故障前的潮流计算结果获得，而故障附加分量仅存在于故障口节点，其余节点无故障电流注入，如式(8)所示。

$$\boldsymbol{I}_{(s)}^{(\mathrm{F})} = \left[0 \cdots \underset{\mathrm{F}}{\underset{\uparrow}{I_{\mathrm{a}(s)}}} \cdots \underset{\mathrm{T}}{\underset{\uparrow}{-I_{\mathrm{a}(s)}}} \cdots 0\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

此外，通常定义 $Z_{\mathrm{a}(s)}$ 为各模网的口阻抗，即由故障口向整个系统看去的等值阻抗[23]，如式(9)所示：

$$Z_{\mathrm{a}(s)} = Z_{\mathrm{FF}(s)} + Z_{\mathrm{TT}(s)} - 2Z_{\mathrm{FT}(s)} \tag{9}$$

式中：$Z_{\mathrm{FF}(s)}$ 和 $Z_{\mathrm{TT}(s)}$ 分别为 F、T 节点自阻抗；$Z_{\mathrm{FT}(s)}$ 为两节点互阻抗。

将上述方程联立求解后，最终可以得到如式(10)所示的等值故障口方程。

$$\begin{bmatrix} U_{\mathrm{a}(1)} \\ U_{\mathrm{a}(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\mathrm{a}(1)}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{\mathrm{a}(1)} & \\ & Z_{\mathrm{a}(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\mathrm{a}(1)} \\ I_{\mathrm{a}(0)} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：待求量为 0 模和 1 模的故障口电压与电流，共 4 个未知量。仅由上述两个方程无法直接求解，还需依据故障类型列写相应的边界条件。

2.2 双极短路

当系统发生双极短路故障时，其故障口等效模型如图 6 所示，故障电流仅存在于正、负极之间，只包含 1 模分量，无 0 模分量，因此可在 1 模等效网络中直接求解[24]，如式(11)所示。

$$\begin{cases} I_{\mathrm{a}(0)} = 0 \\ I_{\mathrm{a}(1)} = \dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{dc}}}{Z_{\mathrm{a}(1)} + R_{\mathrm{f}}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：U_{dc} 为直流系统电压；R_{f} 为过渡电阻。

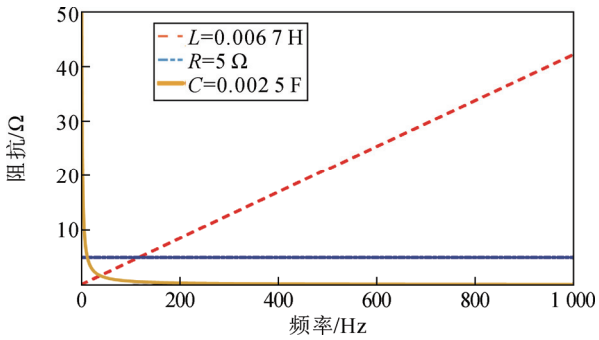


图 4 频率-阻抗特性曲线

Fig.4 Frequency-impedance characteristic curve

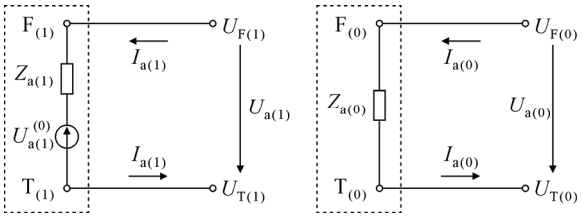


图 5 直流故障口

Fig.5 DC fault port

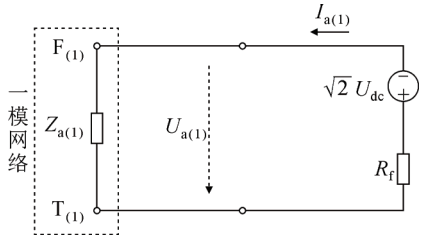


图 6 两极短路等效模型

Fig.6 Equivalent model of bipolar short circuit

2.3 单极短路

当系统发生单极接地短路故障时，同时存在 0、1 模分量，依据接地极的不同，可分为正极接地短路与负极接地短路。

1）在正极接地短路情况下，选取故障点流入大地为电流的参考方向，经相模变换后得到式(12)所示的模域故障口边界条件：

$$\begin{cases} I_{\mathrm{a}(1)} = I_{\mathrm{a}(0)} \\ U_{\mathrm{a}(1)}^{(\mathrm{F})} + U_{\mathrm{a}(0)}^{(\mathrm{F})} = (I_{\mathrm{a}(1)} + I_{\mathrm{a}(0)})R_{\mathrm{f}} - \sqrt{2}U_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{12}$$

由式(12)可知，正极接地短路故障时，故障点处的 0 模电流与 1 模电流的故障附加分量相等，因此可认为其模域故障网络呈串联连接，如图 7 所示。

在此基础上，可以进一步将故障网络简化，建立图 8 所示的故障口串联等效模型。

根据等效模型，将边界条件代入端口方程，易求得正极接地时的故障口电流，如式(13)所示。

$$I_{\mathrm{a}(1)} = I_{\mathrm{a}(0)} = \frac{\sqrt{2}U_{\mathrm{dc}}}{Z_{\mathrm{a}(1)} + Z_{\mathrm{a}(0)} + 2R_{\mathrm{f}}} \tag{13}$$

2）同理，在负极接地故障情况下也可以得到其模域故障口的边界条件，如式(14)所示。

$$\begin{cases} I_{\mathrm{a}(1)} + I_{\mathrm{a}(0)} = 0 \\ U_{\mathrm{a}(0)}^{(\mathrm{F})} - U_{\mathrm{a}(1)}^{(\mathrm{F})} = (I_{\mathrm{a}(0)} - I_{\mathrm{a}(1)})R_{\mathrm{f}} - \sqrt{2}U_{\mathrm{dc}} \end{cases} \tag{14}$$

对上式分析可知：发生负极接地短路故障时，故障点处的 0 模电流与 1 模电流的故障附加分量大小相等，方向相反，故可将其模域故障网络视为并联等效模型，如图 9 所示；图 10 为其简化的并联故障口模型。

$$\begin{cases} I_{\mathrm{a}(0)} = \dfrac{-\sqrt{2}U_{\mathrm{dc}}}{Z_{\mathrm{a}(1)} + Z_{\mathrm{a}(0)} + 2R_{\mathrm{f}}} \\ I_{\mathrm{a}(1)} = \dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{dc}}}{Z_{\mathrm{a}(1)} + Z_{\mathrm{a}(0)} + 2R_{\mathrm{f}}} \end{cases} \tag{15}$$

依据电路并联分流原则，可分别求得 0 模和 1 模的故障口电流，如式(15)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{\mathrm{m}(1)} \\ U_{\mathrm{m}(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\mathrm{m}(1)}^{(0)} + Z_{\mathrm{mF}(1)}I_{\mathrm{a}(1)} \\ Z_{\mathrm{mF}(0)}I_{\mathrm{a}(0)} \end{bmatrix} \tag{16}$$

求得故障口电流之后，将其代入式(16)中即可求解故障时全网络任意节点 m 处的电压与对应支路电流；$U_{\mathrm{m}(1)}$、$U_{\mathrm{m}(0)}$ 分别为 m 节点电压的 1/0 模分量；$U_{\mathrm{m}(1)}^{(0)}$ 为 1 模电压的正常分量；$Z_{\mathrm{mF}(1)}$、$Z_{\mathrm{mF}(0)}$ 分别为任意节点 m 与故障节点之间的 1/0 模互阻抗；再通过反极模变换，得到故障极的电压与电流，

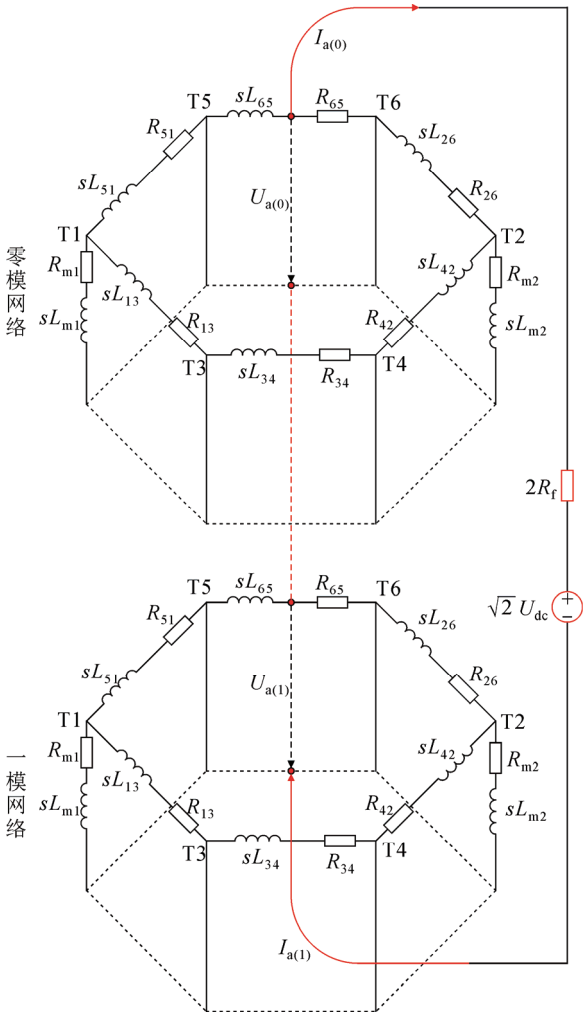


图 7　正极接地短路等效模型

Fig.7　Equivalent model of positive-pole grounding fault

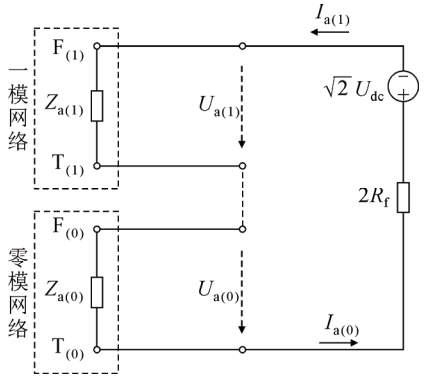


图 8　正极接地短路故障口模型

Fig.8　Fault port model of positive-pole grounding fault

实现故障网络全特征量的求解。

3　交流稳态馈入阶段全网特征量短路计算方法

3.1　交流稳态馈入阶段系统等值模型

由于柔直电网的低阻尼特性，发生短路故障

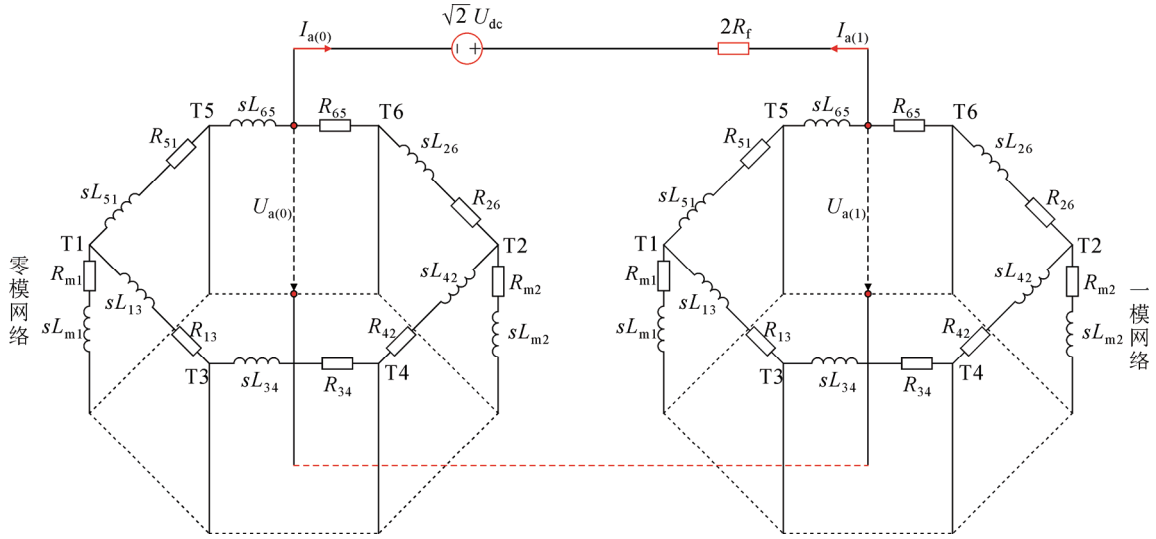


图 9 负极接地短路等效模型

Fig.9 Equivalent model of negative-pole grounding fault

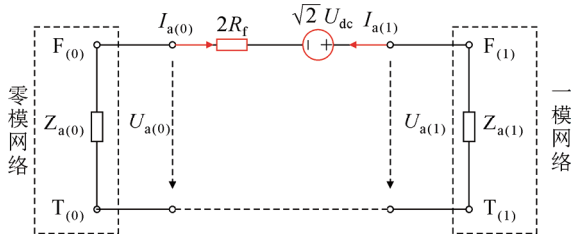


图 10 负极接地短路故障口模型

Fig.10 Fault port model of negative-pole grounding fault

时，短路电流会迅速达到换流器闭锁阈值。换流器闭锁后故障电流将换流至各桥臂反并联的二极管中，期间交流侧经二极管向故障点持续放电，故障最终达到稳态。闭锁后的换流器可等效为三相不控整流桥[17]，在多端口网络中，存在多个交流电源共同向故障点馈流，无法简单地通过单端不控整流电路求解，需重新对故障网络建模分析。

根据换流器是否存在交直流的耦合关系，可将系统中的节点划分为混联节点与非混联节点[25]，如图 11 所示。其中，AA 为交流非混联节点；DD 为直流非混联节点；AD、DA 为交直流混联节点；E_i、U_i (i=1~n)分别为交直流侧系统各电源电动势；X_i、R_i 分别为交直流侧系统各电源内阻抗；Z_{Li}、R_{Li} 分别为交直流侧负荷等值阻抗。

依据故障等值网络，将混联节点与非混联节点分开列写，可分别建立如式(17)所示的交直流侧节点的电压方程：

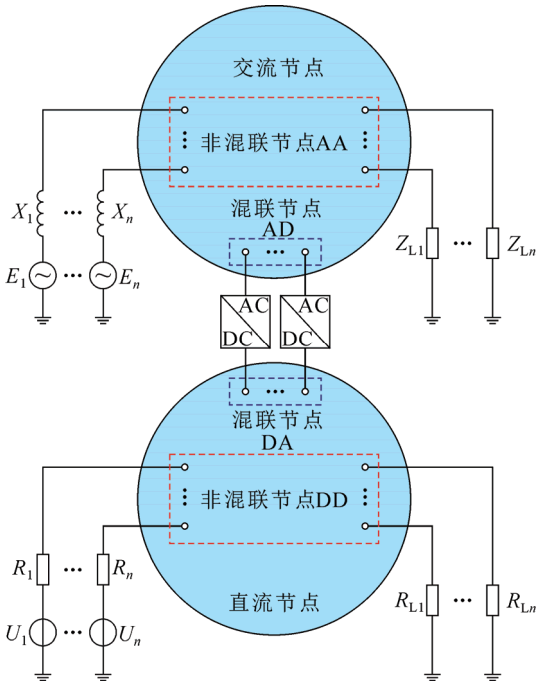


图 11 交流馈入阶段短路电流计算等效模型

Fig.11 Equivalent model for short-circuit current calculation in AC feed-in stage

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{A1}}\\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{A2}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{DD}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{DA}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{D1}}\\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{D2}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{DD}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{DA}}\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{\mathrm{DA}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{DD}}$ 分别为直流侧混联节点与非混联节点电压；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{DA}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{DD}}$ 分别为交流侧经换流器向混

联节点与非混联节点的注入电流；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}}$则分别为混联节点与非混联节点的节点阻抗矩阵；定义$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{D1}}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{D2}}$为两种节点之间的互阻抗矩阵。

在交流馈入的稳态阶段，故障电流经换流器的混联节点注入直流侧网络，使得交直流侧电气量存在强耦合关系，直流故障节点的求解受换流器固有约束条件的制约。因此，通过建立换流器端口转移矩阵T_{AD}，实现全网络特征量的求解，如式(18)所示：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{DA}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{DA}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_{\mathrm{AD}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{\mathrm{uu}} & \boldsymbol{T}_{\mathrm{ui}}\\ \boldsymbol{T}_{\mathrm{iu}} & \boldsymbol{T}_{\mathrm{ii}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix} \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{\mathrm{DA}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{DA}}$为直流侧混联节点的电压电流；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}$为交流侧混联节点的电压电流；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{ii}}$为交直流侧混联节点电流之间的转移矩阵；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{uu}}$为电压之间的转移矩阵；$\boldsymbol{T}_{\mathrm{ui}}$、$\boldsymbol{T}_{\mathrm{iu}}$为电压电流之间的转移矩阵。

3.2 换流器端口转移矩阵的求解

目前，交直流混联电网针对换流器的故障穿越能力提出了更高的要求，通过限流措施与控保装置的协调配合，在某些情况下可以实现故障电流的快速清除从而避免换流器闭锁停运[26]。对于故障穿越状态的换流器，故障电流的计算方法仍可采用第 2 章的故障口等效模型简化计算。因此，在稳态馈流阶段，仅需针对处于闭锁状态下的换流器，建立其端口转移矩阵。

图 12 为含换流器的系统简化等值电路，其中，E_{AD}为交流侧电源电动势；X_{s}为交流系统等值电抗；X_{T}为换流变压器漏抗；X_{L}为换流器桥臂等值电抗；PCC 为系统并网点。

在建立换流器端口方程的过程中，本文做了如下简化：

1）假设所用二极管为理想开关元件，忽略换流器桥臂以及二极管的通态损耗，则换流器的交直流侧满足功率守恒定理。

2）假设直流侧电感趋于无穷大，忽略电流纹波，即在短路电流计算过程中，求得的是直流侧的平均电压与电流。

3）考虑到桥臂电感的续流作用，在不控整流阶段，存在较大的换相重叠角。本文先不计及换相重叠角的影响，在得到端口转移矩阵后再进行修正。由此，可以建立起换流器交直流侧电压电流的端口方程如式(19)所示：

$$\begin{cases}U_{\mathrm{DA}}=\alpha\left|\boldsymbol{E}_{\mathrm{AD}}-\mathrm{j}\boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}(X_{\mathrm{s}}+X_{\mathrm{T}})\right|=\alpha U_{\mathrm{AD}}\\ U_{\mathrm{DA}}\times I_{\mathrm{DA}}=3U_{\mathrm{AD}}\times I_{\mathrm{AD}}\times\cos\varphi_{\mathrm{AD}}\end{cases} \tag{19}$$

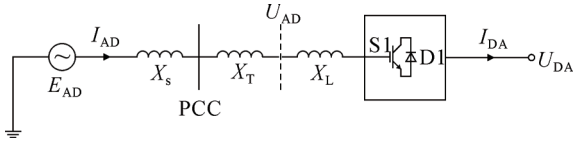


图 12　含换流器系统简化等值电路

Fig.12　Simplified equivalent system circuit with converter

式中：α为定义的电压变换系数，一般取$3\sqrt{6}/\pi$，交流侧的电压以相电压有效值表示。电流同理。φ_{AD}为交流侧电压、电流相量的夹角。

由于在构建端口转移矩阵时仅考虑电气量之间的数值关系，因此将上式中的相量换算为其模量的线性表达，如式(20)所示：

$$U_{\mathrm{DA}}=\alpha E_{\mathrm{AD}}+\alpha\beta I_{\mathrm{AD}}X_{\Sigma} \tag{20}$$

联立求解得到交直流侧耦合关系如式(21)：

$$I_{\mathrm{DA}}=\frac{3\cos\varphi_{\mathrm{AD}}}{\alpha\lambda+\beta X_{\Sigma}}E_{\mathrm{AD}}=\frac{3\cos\varphi_{\mathrm{AD}}}{\alpha}I_{\mathrm{AD}} \tag{21}$$

式中：λ、β为引入的线性系数；X_{Σ}为桥臂电抗与变压器漏电抗之和。

最终，将上述方程联立求解后可以得到如式(22)所示的换流器端口转移矩阵。

$$\begin{bmatrix}U_{\mathrm{DA}}\\ I_{\mathrm{DA}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha & \alpha\beta X_{\Sigma}\\ \dfrac{3\cos\varphi_{\mathrm{AD}}}{\alpha\lambda+\alpha\beta X_{\Sigma}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}E_{\mathrm{AD}}\\ I_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha & 0\\ 0 & \dfrac{3\cos\varphi_{\mathrm{AD}}}{\alpha}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}U_{\mathrm{AD}}\\ I_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix} \tag{22}$$

3.3 计及换相重叠修正的换流器端口转移矩阵

在换流器中安装桥臂电抗器，可实现限制故障电流、抑制环流、控制功率调节的作用[27]。但在稳态交流馈入阶段，桥臂电抗会使得不控整流过程存在较大的换相重叠角，且一般大于 π/3，交直流侧电气量的约束关系与正常情况相比有较大差异，因此，在考虑换相重叠的影响下，需对换流器端口转移矩阵做进一步修正。

图 13 为不控整流阶段的等值电路，理想情况下，上下桥臂的二极管交替导通半个周期，导通区间无重叠；然而，在投入桥臂电抗之后，电感续流使得换相过程中存在多个二极管同时导通，且具体导通模式取决于交直流侧的系统参数。

根据附录表 A1、A2 中的相关参数及仿真情况，本文使用的六端口模型的换相重叠角范围大致在$\pi/3\sim 2\pi/3$之间，在此状态下，可由式(23)进行修正[18]：

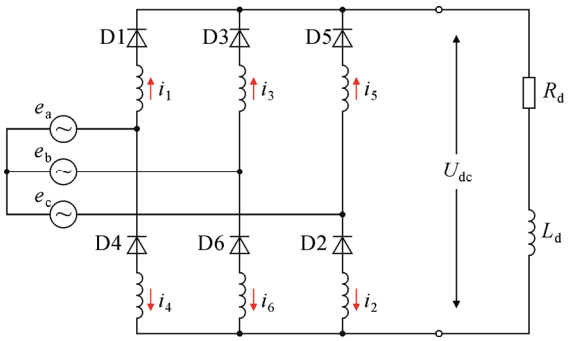


图 13 不控整流等效电路

Fig.13 Equivalent circuit of uncontrolled rectification

$$\begin{cases} U_{\mathrm{dc}}=\dfrac{3\sqrt{3}E}{2\pi}\cos\gamma+\dfrac{3\sqrt{3}E}{2\pi} \\ \gamma=\arccos\left(\dfrac{R_{\mathrm{d}}\pi-3X_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{d}}\pi+3X_{\mathrm{s}}}\right) \end{cases} \tag{23}$$

式中：R_{d} 为直流侧等效负载电阻；E 为交流侧电动势峰值；X_{s} 为桥臂电抗；γ 为换相重叠角。

最终得到经换相重叠修正后的电压变换系数，如式(24)所示：

$$\alpha=\frac{3\sqrt{6}}{2\pi}(1+\cos\gamma) \tag{24}$$

3.4 全网特征量的求解

将换流器端口转移矩阵代入到节点电压方程中，消去混联节点即可建立起交流侧电源与直流网络的电气联系，而无需考虑换流器的耦合作用。

首先，将换流器端口转移矩阵代入式(17)，消去直流侧的混联节点，将非混联节点合并整理，结果如式(25)所示：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{0} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{A1}}\\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{D1}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{iu}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{D1}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{ii}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix} \tag{25}$$

再将交流侧混联节点单独整理，继而建立起交流侧混联节点的电压电流与非混联节点之间的关系，如式(26)所示。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AD}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{AD}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{\Lambda}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix} \tag{26}$$

式中：$\boldsymbol{\Lambda}$ 为与交直流侧节点阻抗及换流器端口转移矩阵有关的系数矩阵，具体结果如式(27)。

$$\boldsymbol{\Lambda}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{1} & -\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AD}}\\ (\boldsymbol{T}_{\mathrm{ui}}-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{ii}})^{-1}(\boldsymbol{T}_{\mathrm{uu}}-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{iu}}) & \boldsymbol{1}\end{bmatrix}^{-1}\times\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{A2}} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & (\boldsymbol{T}_{\mathrm{ui}}-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{ii}})^{-1}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{D2}}\end{bmatrix} \tag{27}$$

再将其代入到式(25)中，至此，交直流侧混联节点均被消除，得到的电网电压方程仅包含非混联节点，实现了对换流器的解耦处理，如式(28)所示。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}}+\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}} & \Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AD}}\\ \Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}} & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}}+\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{AA}}\\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{DD}}\end{bmatrix} \tag{28}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}}$、$\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AD}}$、$\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}}$、$\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DD}}$ 为消去混联节点后定义的阻抗修正矩阵，通过建立换流器的端口转移矩阵并消去混联节点，可直接求解故障网络的电压电流而无需考虑换流器作用。

根据前文，故障网络依据叠加定理可分解成正常网络与故障附加网络。其中，故障分量利用修正后的电压方程进行求解，且在附加网络中同样只有故障节点存在注入电流。设直流侧故障节点为 k 节点，由此建立如式(29)所示的电压方程：

$$\begin{bmatrix}\Delta U_{\mathrm{A1}}\\ \vdots\\ \Delta U_{\mathrm{Am}}\\ \vdots\\ \Delta U_{\mathrm{D1}}\\ \vdots\\ \Delta U_{\mathrm{D}k}\\ \vdots\\ \Delta U_{\mathrm{Dn}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}}+\Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AA}} & \vdots & & \Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{AD}} & & \\ \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ & \vdots & Z_{\mathrm{D11}} & \cdots & Z_{\mathrm{D1}k} & \cdots & Z_{\mathrm{D1n}}\\ & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots\\ \Delta\boldsymbol{Z}_{\mathrm{DA}} & \vdots & Z_{\mathrm{D}k1} & & Z_{\mathrm{D}kk} & & Z_{\mathrm{D}kn}\\ & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots\\ & \vdots & Z_{\mathrm{Dn1}} & & Z_{\mathrm{Dn}k} & & Z_{\mathrm{Dnn}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ \vdots\\ 0\\ \vdots\\ \Delta I_{\mathrm{D}k}\\ \vdots\\ 0\end{bmatrix} \tag{29}$$

电流的故障附加分量则由式(30)进行求解：

$$\Delta I_{\mathrm{D}k}=\frac{U_{\mathrm{D}k|0|}}{Z_{\mathrm{D}kk}+R_{\mathrm{f}}} \tag{30}$$

式中：$U_{\mathrm{Dk|0|}}$ 为故障点电压的初始分量；R_{f} 为过渡电阻。在求取故障电流之后，将其代入到解耦后的电压方程中，可进一步得到故障网络任意节点电压与电流。

综上，针对复杂多端柔直配电网短路故障全过程全网特征量的计算流程如图 14 所示。

4 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建了附录图 A1 所示的六端环状柔直配电网模型，MMC1 换流站采用定直流电压控制，MMC2 换流站采用定功率控制，DCT 换流站均采用单移相控制，VSC 换流站采用定交流电压控制，具体参数如附录表 A1、A2 所示。

4.1 电容放电阶段

针对两极短路、正极接地短路与负极接地短路的情况，分别进行了仿真验证，其中故障时刻设置为 0.5 s。由于实际工程中换流器闭锁阈值较低，故障后 2 ms 内即可实现闭锁，为此仿真着重验证了 2 ms 内所提短路计算方法的准确性，以下图中，曲线 1 为仿真结果，曲线 2 为计算结果。

图 15 为 L2 线路中点 f_1 处发生正极接地短路故障时的短路电流结果，过渡电阻分别为 5 Ω、20 Ω、50 Ω。分析可知，在换流器闭锁前的电容放电阶段，经复频域故障口模型求解得到的短路电流与实际的仿真结果变化趋势一致，且数值误差很小。计算电流变化率相较仿真曲线产生了轻微迟滞，这是由于在对故障网络等效化简的过程中，考虑阻抗的高频特性忽视了电容分流作用，单一的阻感网络使得电流变化趋缓，随着过渡电阻的增大，迟滞作用越明显。但在高阻状态下短路电流发展较慢，不会迅速达到换流器闭锁阈值，而计算结果在 0.4 ms 左右便和仿真结果基本一致，在实际系统中电流迟滞影响较小，可以近似忽略。

对于负极接地故障而言，由并联故障口模型求解的短路电流同样与仿真结果具有较高的拟合度，如图 16 所示，且对比图 15、16 可以发现，在对称双极直流系统中，负极接地故障电流与正极接地故障电流大小相同，方向相反，与文中推导的模量电流关系相吻合。

两极短路是直流系统中危害最严重的故障类型，本文同样在 5 Ω、20 Ω、50 Ω 过渡电阻的条件下进行了仿真验证，如图 17 所示。两极短路的电流变化趋势与单极接地情况类似，但故障电流上升速率加快，数值约为单极接地的两倍，由模域故障口计算得到的结果与仿真结果基本一致。

图 18 分析了正极与两极短路故障(50 Ω 过渡电阻)2 ms 时全网节点电压计算结果，表 1 以不同位置发生两极短路故障为例，选取 1 ms 和 2 ms 时刻的短路电流计算结果进行了误差统计，最大相对误差均在 5%以下。

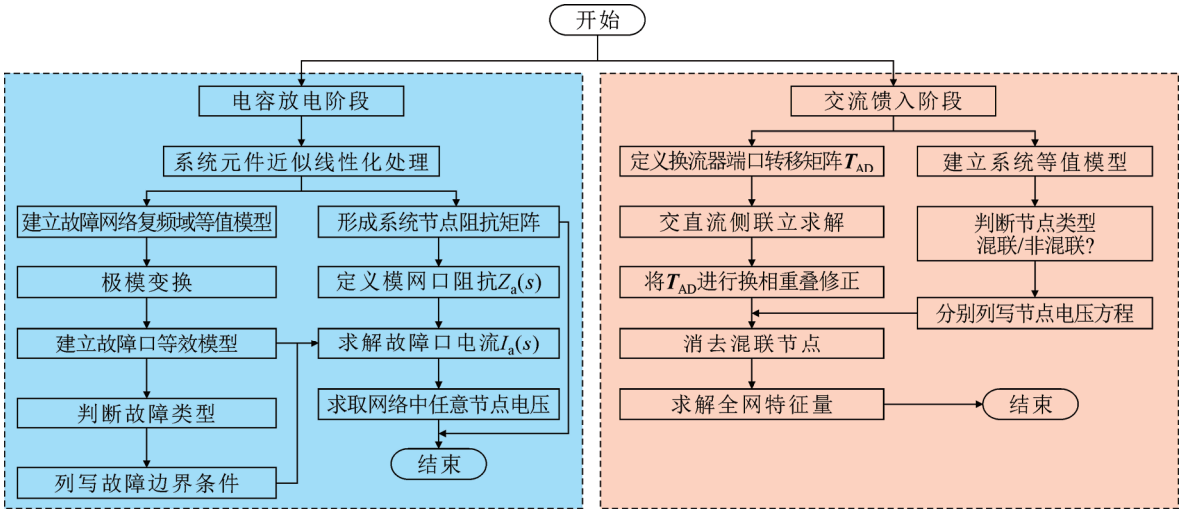


图 14　短路故障全过程全网特征量计算流程

Fig.14　Calculation flow of whole network characteristic quantity in the whole process of short circuit fault

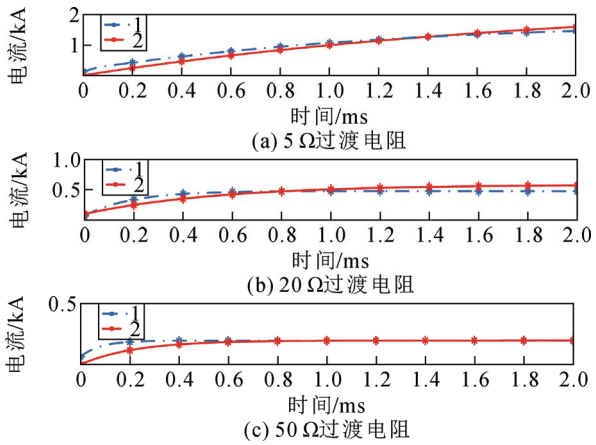


图 15　不同过渡电阻下正极接地短路

Fig.15　Short circuit of positive electrode to ground under different transition resistances

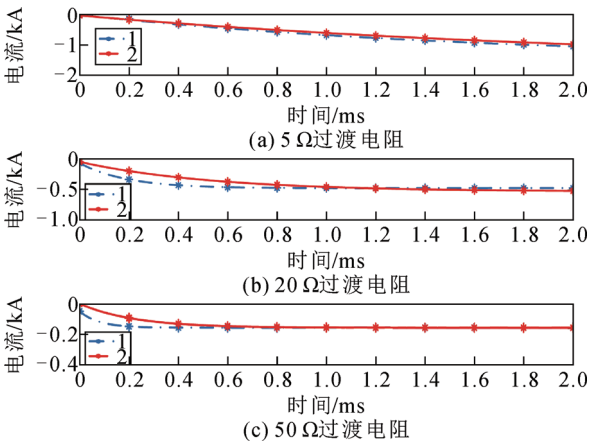


图 16　不同过渡电阻下负极接地短路

Fig.16　Short circuit of negative electrode to ground under different transition resistances

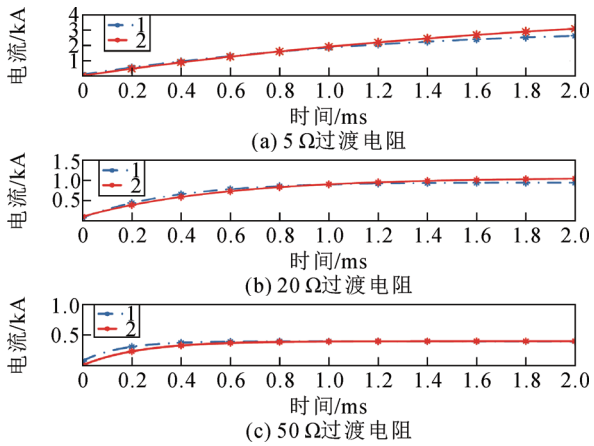


图 17 不同过渡电阻下极间短路

Fig.17 Short circuit between electrodes under different grounding resistances

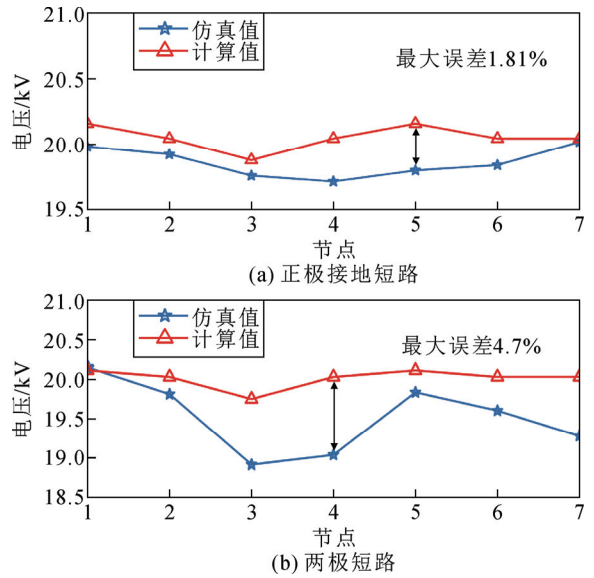


图 18 2 ms 全网节点电压比较

Fig.18 Comparison of node voltages in the whole network at 2 ms

4.2 交流侧稳态馈入阶段

图 19 为 MMC 出口 f_4 处短路时的电流、电压计算结果，其中，曲线 1 为不计换相重叠的结果，曲线 2 为计及换相重叠修正后的结果，曲线 3 为仿真结果。由于换流器桥臂电感的存在，不控整流时多个二极管会同时导通，呈现较大的换相重叠角，进而导致直流侧电压平均值降低，若忽略换相重叠修正，计算误差可达 49.8%；而本文经过换相重叠修正后的故障电流与电压与仿真结果相比，变化趋势一致且拟合度高。

4.3 与其它计算方法的对比

为进一步验证本文所提方法的有效性，图 20 给出了 L2 线路末端 f_3 处发生不同类型故障时电容放电阶段的短路电流结果(过渡电阻为 5 Ω)，并与以

表 1 不同故障位置的短路电流计算误差

Table 1 Calculation error of short-circuit current at different fault locations

故障位置	时刻/ms	仿真值/kA	计算值	
			双极短路/kA	误差/%
换流器出口 f_2	1	0.396 1	0.398 9	0.705
	2	0.387 5	0.398 9	2.935
线路中点 f_1	1	0.383 4	0.396 6	3.431
	2	0.381 6	0.396 6	3.913
线路末端 f_3	1	0.386 5	0.395 2	2.242
	2	0.379 0	0.395 2	4.267

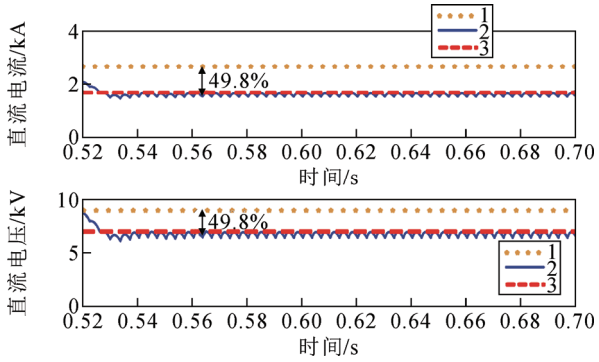


图 19 MMC 出口短路

Fig.19 Short circuit at MMC outlet

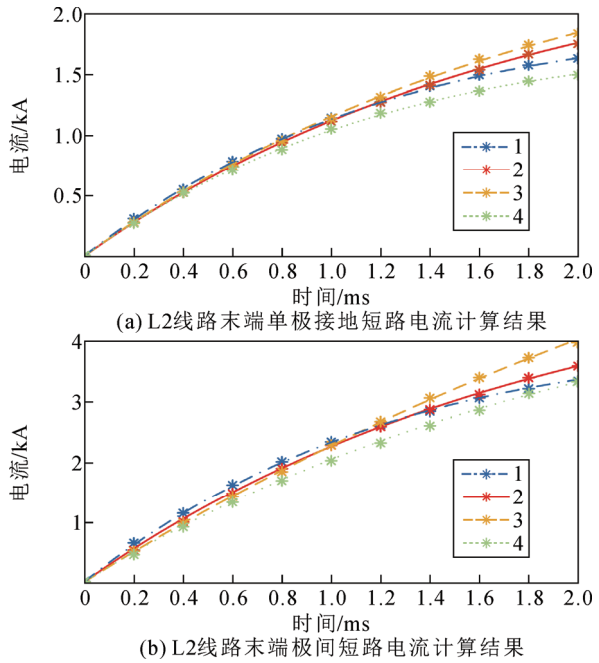


图 20 L2 线路末端短路的故障电流计算结果

Fig.20 Calculation results of fault current of L2 line terminal short circuit

往的研究方法进行对比，其中曲线 1 为仿真结果，曲线 2 为本文方法计算结果，曲线 3 为文献[16]方法计算结果，曲线 4 为文献[9]方法计算结果。

1）与文献[9]所提方法对比，无需开环化简，可以实现全网特征量的准确计算。

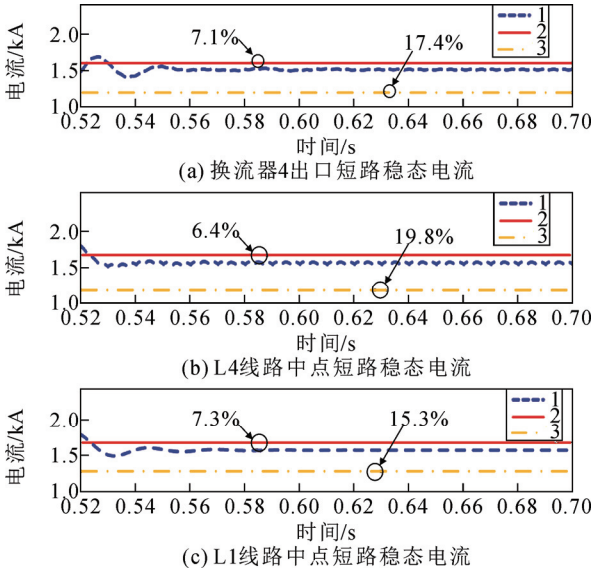
文献[9]将多端环网开环简化为链式支路，并将换流站等效为并联的二端口模型，保证换流站的放电路径不变，有效降低了计算复杂度。但开环化简方法自身存在局限性，无法顾及所有放电回路之间的相互耦合作用；本文方法直接建立直流故障口模型，无需开环处理，模型精度相对较高，且通过网络方程求解，可以准确计算全网特征量，如图 20 所示。

2）与文献[16]所提方法对比，考虑了电阻和健全极影响，计算精度相对较高。

文献[16]考虑阻抗的高频特性，把系统等值为纯感性网络，可将复杂的反拉式变换简化为一次方程组求解，显著提高了计算效率，但化简过程中忽略了电阻和健全极对计算结果的影响，也未拓展至全网特征量的求解；本文方法在此基础上将故障网络简化为阻感网络，利用极模变换将线路解耦，建立复合模网的故障口模型，实现了全网特征量的准确计算，且计算精度相对较高，如图 20 所示。

3）与文献[17]对比，将稳态电流的计算方法由单端网络延申至多端网络。

图 21 为不同位置短路时的稳态电流计算结果，其中，曲线 1 为仿真结果，曲线 2 为本文方法计算结果，曲线 3 为文献[17]方法计算结果。文献[17]分别提出了二极管处于不同导通状态下的故障电压、电流计算方法，对于稳态短路计算的研究具有重要意义，但文献[17]只考虑了单端网络的放电过程，当系统中存在多个交流电源向故障点馈流时，放电路径相互耦合，计算结果会出现偏差，例如，在 L4 中点 f_5 处短路时计算误差约 19.8%；本文方



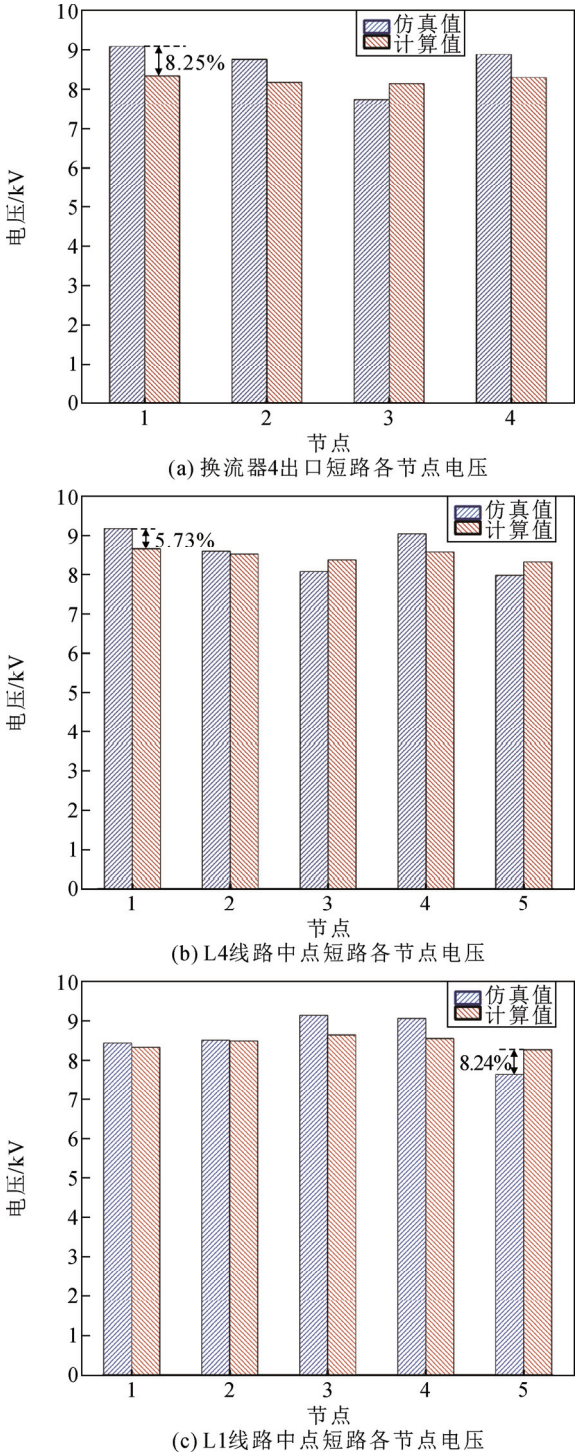
(a) 换流器4出口短路稳态电流

(b) L4线路中点短路稳态电流

(c) L1线路中点短路稳态电流

图 21　不同位置短路的故障稳态电流计算结果

Fig.21　Calculation results of fault steady-state current of short circuit at different positions



(a) 换流器4出口短路各节点电压

(b) L4线路中点短路各节点电压

(c) L1线路中点短路各节点电压

图 22　不同位置短路各节点电压计算结果

Fig.22　Calculation results of voltage at each node of short circuit at different positions

法利用解耦后的节点方程求解不受系统结构的影响，能准确描述故障电流特征。根据附录表 A1、A2 中的系统参数可以计算出 3 种情况下的换相重叠角分别为 71.34°、73.32°、66.17°，经换流器端口转移矩阵化简后得到的短路电流计算值分别为 1.66 kA、1.67 kA、1.62 kA，计算误差较小，分别为 7.1%、6.4%、7.3%。

此外，文献[17]仅能计算故障支路的电压电流，而本文方法还可以实现全网络特征量的求解，如图 22 所示。其中，节点电压最大计算误差分别为 8.25%、5.73%、8.24%，其余节点误差统计如附录表 A3—A5 所示，进一步验证了所提方法的有效性。

5 结论

随着柔直电网朝着多端化、多网孔的复杂形态发展，覆盖故障全过程、包含全网特征量的多端柔直电网短路计算方法亟待研究。本文建立了经高频化简后的直流故障口模型以及换相重叠修正的换流器端口转移矩阵，提出了适用于多端柔直配电网故障全过程、涵盖全网特征量的短路计算方法，经过仿真验证得到以下结论：

1）在电容放电阶段，通过建立直流故障口等效模型，将计算范围由故障支路拓展至整个网络，能准确描述短路电流的变化趋势，且不受故障位置与过渡电阻的干扰，全网节点电压计算误差小于 5%。

2）在换流器闭锁后的稳态馈流阶段，通过建立经换相重叠修正的换流器端口转移矩阵，将稳态短路计算方法由单端换流器延伸至多端柔直电网，所提方法在不同故障位置均有很好的适应性。

3）方法实现了不同故障阶段全网特征量的准确计算，可为故障影响分析、设备选型、保护整定提供参考依据。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 王渝红，傅云涛，曾 琦，等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2362-2374.
WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.

[2] 吴丽丽，茆美琴，施 永. 含主动限流控制的 MMC-HVDC 电网直流短路故障电流解析计算[J]. 电工技术学报，2024，39(3)：785-797.
WU Lili, MAO Meiqin, SHI Yong. Analytical calculation of DC short-circuit fault current of modular multi-level converter-HVDC grid with active current limiting control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 785-797.

[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 Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.

[4] 陈 磊，何慧雯，王 磊，等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(21)：175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.

[5] 刘天琪，舒 稷，王顺亮. 基于混合式直流断路器的柔性直流电网快速重合闸策略[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2635-2642.
LIU Tianqi, SHU Ji, WANG Shunliang. Fast reclosing scheme for VSC-HVDC system based on hybrid DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2635-2642.

[6] 王 彤，孙 奕，裴 林，等. 考虑控制系统的LCC-HVDC直流电流暂态特性分析与交流短路电流近似解析方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(23)：8509-8523.
WANG Tong, SUN Yi, PEI Lin, et al. Analysis of DC current transient characteristics of LCC-HVDC considering control system and approximate analytical method of AC short-circuit current[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8509-8523..

[7] 李杭泽，戴志辉，石 旭，等. 计及控制响应的多端混合直流输电系统短路电流近似计算方法[J]. 电工技术学报，2024，39(9)：2810-2824.
LI Hangze, DAI Zhihui, SHI Xu, et al. Approximate calculation method of short-circuit current of multi-terminal hybrid DC transmission system considering control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2810-2824.

[8] 汤兰西，董新洲. MMC 直流输电网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.
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.

[9] 辛业春，罗 鑫，王 拓，等. 计及过渡电阻影响的直流电网不同拓扑结构故障电流简化计算方法[J]. 电网技术，2023，47(2)：804-814.
XIN Yechun, LUO Xin, WANG Tuo, et al. Simplified calculation method of fault current in different topological structures of DC grid considering the influence of transition resistance[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 804-814.

[10] 王卓雅，郝亮亮，王 乐，等. MMC-HVDC 系统直流侧非金属性短路故障电流计算方法[J]. 电力自动化设备，2024，44(3)：187-194.
WANG Zhuoya, HAO Liangliang, WANG Le, et al. Calculation method of nonmetallic short circuit fault current in DC side of MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 187-194.

[11] LIAO J Q, ZHOU N C, WANG Q G. DC grid protection method based on phase planes of single-end common-and differential-mode components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 299-310.

[12] 郝亮亮，李伟杰，王卓雅，等. MMC-HVDC 电网输电线路双极短路故障电流的实用计算[J]. 电力系统自动化，2020，44(5)：68-76.
HAO Liangliang, LI Weijie, WANG Zhuoya, et al. Practical calculation for bipolar short-circuit fault current of transmission line in MMC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 68-76.

[13] 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.

[14] LUO Y P, HE J H, LI M, et al. Analytical calculation of transient short-circuit currents for MMC-based MTDC grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7500-7511.

[15] 李俊松，张英敏，曾　琦，等. MMC-MTDC 系统单极接地故障电流计算方法[J]. 电网技术，2019，43(2)：546-553.
LI Junsong, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. Pole-to-ground fault current calculation method for MMC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 546-553.

[16] 邓文军，刘麒麟，张英敏，等. 张北柔直电网单极接地故障短路电流计算方法及接地策略[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4050-4059.
DENG Wenjun, LIU Qilin, ZHANG Yingmin, et al. Short circuit current calculation method and grounding strategy of pole-to-ground fault in Zhangbei flexible DC power grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4050-4059.

[17] LI M, LUO Y P, HE J H, et al. Analytical estimation of MMC short-circuit currents in the AC in-feed steady-state stage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 431-441.

[18] 李　斌，李　晔，何佳伟，等. 基于模块化多电平的柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(21)：1-8.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.

[19] 罗易萍. 柔性直流电网故障解析计算与清除技术研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.
LUO Yiping. Research on analytical fault current calculation and fault clearing technology for flexible DC grids[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[20] 戴志辉，刘雪燕，刘自强，等. 基于电流故障分量的柔直配电线路纵联保护原理[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1684-1693.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Pilot protection scheme for flexible DC distribution grids based on superimposed current[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1684-1693.

[21] 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.

[22] YE H, GAO S L, LI G Q, et al. Efficient estimation and characteristic analysis of short-circuit currents for MMC-MTDC grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 258-269.

[23] 刘万顺，黄少锋，徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 3 版. 北京：中国电力出版社，2010.
LIU Wanshun. HUANG Shaofeng. XU Yuqin. Fault analysis of power system[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2010.

[24] 余修勇，顾菊平，张新松，等. 多端柔性直流电网线路故障暂态等值电路及暂态特征分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(24)：9546-9556.
YU Xiuyong, GU Juping, ZHANG Xinsong, et al. Study on the transient equivalent circuits and the transient characteristics of multi-terminal flexible DC grids after line faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9546-9556.

[25] 李钰双. 交直流混联电网故障控制策略及对称短路电流计算方法研究[D]. 重庆：重庆大学，2018.
LI Yushuang. Fault control and symmetrical short-circuit current calculation for AC/DC hybrid power system[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.

[26] 郑　峰，张锦松，林燕贞，等. 基于新型柔性故障限流器的多端直流配电网故障隔离策略[J]. 电力自动化设备，2023，43(1)：73-82.
ZHENG Feng, ZHANG Jinsong, LIN Yanzhen, et al. Fault isolation strategy for multi-terminal DC distribution network based on novel flexible fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 73-82.

[27] 朱思丞，赵成勇，李承昱，等. 含直流故障限流装置动作的直流电网故障电流计算方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(2)：469-478.
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. The DC fault current calculation of DC fault current limiter action included in bipolar MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 469-478.



戴志辉(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力系统保护与控制
E-mail: daihuadian@163.com

DAI Zhihui
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-04-23　修回日期　2024-06-27　　编辑　陈　蔓

附录 A

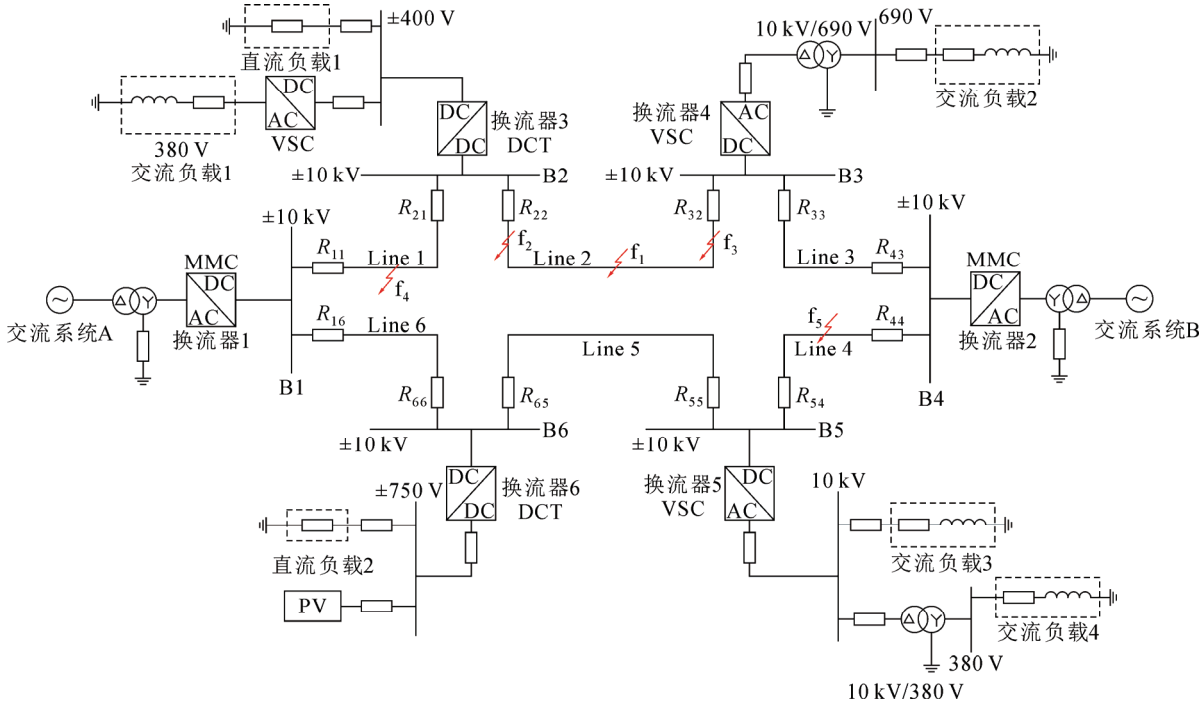


图 A1　环状六端柔性直流配电网

Fig.A1　Ring six-terminal flexible DC distribution network

表 A1　各换流站参数

Table A1　Parameters of converters

换流站	系统参数	数值
MMC 换流站	桥臂子模块数	24
	子模块电容/μF	10 000
	桥臂电感/H	0.01
	平波电抗器/mH	5
	IGBT 导通电阻/Ω	0.01
VSC 换流站	直流侧电容/μF	4 000
	平波电抗器/mH	30
	IGBT 导通电阻/Ω	0.005
DCT 换流站	低压侧电容/μF	4 000
	高压侧电容/F	0.1
	IGBT 导通电阻/Ω	0.01

表 A2　直流系统参数

Table A2　DC system parameters

系统参数	数值
直流电压等级/kV	±10
限流电抗器/mH	2
单位长度线路电感/(mH·km^{-1})	0.78
单位长度线路电阻/(Ω·km^{-1})	0.083
单位长度线路互感/(mH·km^{-1})	0.1
线路 1、2、4、5 长度/km	5
线路 3、6 长度/km	15

按照上述系统参数可以计算出 MMC 等效模型中 L_m 为 6.7 mH，C_m 为 2.5 mF，R_m 为 0.006 7 Ω。

由于负极接地短路与正极接地短路情况下的电流大小相等，方向相反，考虑篇幅原因此处仅给出正极接地情况下的短路电流近似表达式。

1、L2 线路中点短路时的短路电流近似表达式：

(1)正极接地短路：

$$i=\begin{cases}1.515\,4-1.515\,4\mathrm{e}^{587.86(t_0-t)}, & 5\,\Omega\text{过渡电阻}\\ 0.485\,47-0.485\,47\mathrm{e}^{1\,835.1(t_0-t)}, & 20\,\Omega\text{过渡电阻}\\ 0.197\,63-0.197\,63e^{4\,507.7(t_0-t)}, & 50\,\Omega\text{过渡电阻}\end{cases} \tag{A1}$$

(2)两极短路

$$i=\begin{cases}2.525\,9-2.525\,9\mathrm{e}^{472.47(t_0-t)}, & 5\,\Omega\text{过渡电阻}\\ 0.970\,3-0.970\,3\mathrm{e}^{1\,738.3(t_0-t)}, & 20\,\Omega\text{过渡电阻}\\ 0.395\,27-0.395\,27\mathrm{e}^{4\,269.9(t_0-t)}, & 50\,\Omega\text{过渡电阻}\end{cases} \tag{A2}$$

2、L2 线路末端短路时的短路电流近似表达式：

$$i=\begin{cases}0.198\,28-0.198\,28\mathrm{e}^{5\,191.6(t_0-t)}, & \text{正极接地}\\ 0.396\,56-0.396\,56\mathrm{e}^{4\,968.9(t_0-t)}, & \text{极间短路}\end{cases} \tag{A3}$$

3、换流器出口短路时的短路电流近似表达式：

$$i=\begin{cases}0.199\,44-0.199\,44\mathrm{e}^{9\,722.9(t_0-t)}, & \text{正极接地}\\ 0.398\,87-0.398\,87\mathrm{e}^{9\,600.1(t_0-t)}, & \text{极间短路}\end{cases} \tag{A4}$$

上述表达式中，t_0 为故障起始时刻，本文中取 t_0 为 0.5 s。

表 A3　换流器 4 出口短路各节点电压

Table A3　Each node voltage of VSC outlet short circuit

节点	仿真值/kV	计算值	
		双极短路	误差/%
1	9.09	8.34	8.25
2	8.76	8.18	6.62
3	7.74	8.14	5.17
4	8.93	8.30	7.05

表 A4　L4 中点短路各节点电压

Table A4　Each node voltage of L4 mid-point short circuit

节点	仿真值/kV	计算值	
		双极短路	误差/%
1	9.18	8.65	5.73
2	8.59	8.52	0.85
3	8.07	8.37	3.66
4	9.05	8.57	5.34
5	7.98	8.32	4.20

表 A5　L1 中点短路各节点电压

Table A5　Each node voltage of L1 mid-point short circuit

节点	仿真值/kV	计算值	
		双极短路	误差/%
1	8.44	8.33	1.30
2	8.51	8.49	0.24
3	9.14	8.64	5.47
4	9.06	8.55	5.63
5	7.64	8.27	8.24