

# 混合直流系统中直流侧故障暂态电流的解析 表达与故障特性的研究

李 涛<sup>1\*</sup>, 胡 迪<sup>1</sup>, 刘宏达<sup>2</sup>, 杨 为<sup>1</sup>, 陈 忠<sup>1</sup>, 官玮平<sup>1</sup>

(1. 国网安徽省电力公司 电力科学研究院, 安徽 合肥 230022;

2. 国网浙江省电力公司 宁波供电分公司, 浙江 宁波 315000)

## Research on Analytical Expression of DC Side Fault Transient Current and Fault Characteristics in Hybrid HVDC System

LI Tao<sup>1\*</sup>, HU Di<sup>1</sup>, LIU Hongda<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, CHEN Zhong<sup>1</sup>, GUAN Weiping<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;

2. Ningbo Power Supply Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

**Abstract:** The hybrid high voltage direct current (HVDC) transmission system consists of the line-commutated converter based HVDC (LCC-HVDC) transmission system and the voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) transmission system, which have different fault characteristics than conventional HVDC transmission system. To solve this problem, the DC side fault transient current characteristics in hybrid DC transmission systems are investigated. Firstly, a two terminal hybrid HVDC transmission system with LCC converter station in the sending-end grid and VSC converter station in the receiving-end grid is established. The equivalent circuit in case of DC side fault is derived by using laplace transform theorem, and the simple expressions of DC fault current on LCC side and VSC side are analyzed. Secondly, on the basis of the simple expressions, the accurate fault current expressions on both sides are further analyzed by fully considering the dynamic change process of the trigger angle of the LCC converter station at the sender side and the feed-in of the AC current from the VSC converter station at the receiver side. Then, the variation characteristics of DC side fault current in three HVDC systems are comparatively analyzed in terms of fault current amplitude and harmonic. Finally, the correctness of the proposed analytical expression of DC side

fault current is verified by MATLAB/Simulink simulation.

**Key words:** line-commutated converter based on high-voltage direct current (LCC-HVDC); voltage source converter based on high voltage direct current (VSC-HVDC); hybrid HVDC transmission; DC fault characteristics; trigger angle; the feeding of AC current

**摘 要:** 由基于线性换流器高压直流输电系统(LCC-HVDC)和基于电压源换流器高压直流输电系统(VSC-HVDC)共同构成的混合直流输电系统,其故障特性与传统直流输电系统不同。针对此问题,对混合直流输电系统中直流侧故障暂态电流特性进行了研究。首先建立了送端电网采用LCC型换流站、受端电网采用VSC型换流站的两端混合直流输电系统,利用拉普拉斯变换定理推导了直流侧故障时的等效电路,解析了LCC侧和VSC侧直流故障电流简易表达式。其次,在简易表达式的基础上,充分考虑送端LCC侧换流站的触发角动态变化过程和受端VSC侧换流站交流电流的馈入,进一步解析了两侧精确的故障电流表达式。然后,从故障电流幅值、谐波等方面对比分析了三种高压直流系统中直流侧故障电流的变化特征。最后,通过MATLAB/Simulink仿真验证了所提故障电流解析表达式的正确性。

**关键词:** 线性换流器高压直流输电(LCC-HVDC); 电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC); 混合直流输电; 直流故障特性; 触发角; 交流电流馈入

**基金项目:** 国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202220110A-1-1-2N); 国家自然科学基金-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U2066210)

Science and Technology Project of Headquarters of SGCC (5500-202220110A-1-1-2N); The National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (U2066210)

## 0 引言

常规直流输电<sup>[1-2]</sup>也被称作线性换流器高压

直流输电 (Line Commutated Converter Based on High Voltage Direct Current, LCC-HVDC) 通常需要控制晶闸管的关断来实现换流, 易发生换相失败, 同时需要消耗大量的无功功率。柔性直流输电也被称作基于电压源换流器高压直流输电 (Voltage Source Converter Based on High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)<sup>[3-4]</sup>, 其工程经济成本较高, 尤其是直流输电线路配置的高压直流断路器其成本接近整个工程的 1/3。

结合常规直流输电技术和柔性直流输电技术的优缺点, 研究学者将两种输电技术相结合, 提出了混合直流输电技术的概念<sup>[5-7]</sup>。混合直流输电技术可有效解决多直流馈入问题, 避免换相失败, 且可实现远距离、大容量的多端电能输送。但作为一种新兴的高压直流输电技术, 混合直流尚无运行经验, 对于含混合直流的多端交直流电网, 故障运行技术是保障系统安全运行的首要问题。因此, 研究混合直流输电系统的故障特性, 明确其交直流侧故障传播的机理, 具有重要的理论和工程意义。

混合直流输电系统中直流线路两端包含换相换流器 (Line Commutated Converter, LCC) 换流站和电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 换流站, 故其直流故障特性分析可参考单一的 LCC-HVDC 系统或 VSC-HVDC 系统。针对传统 LCC-HVDC 系统中直流故障特征, 文献[8-9]利用状态空间方程分析了该系统中直流线路短路时的故障电流表达式。文献[10]利用相位模型转换理论剖析了直流故障特征。文献[11]利用等效电路理论计算出直流线路故障时短路电流时域表达式。然而, 上述方法均未详细考虑故障发生时送端 LCC 侧换流站触发角的动态变化对故障电流的影响。

同样, 针对 VSC-HVDC 系统的故障特性, 部分学者进行了详细地研究。文献[12-14]利用拉普拉斯变换理论构建了多端直流输电系统的等效模型, 求解了直流线路故障电流的高频分量与其暂态平均值, 剖析了故障电流的暂态特征。文献[15]利用电容充放电理论分析了直流侧故障时由 VSC 侧电容放电引起故障电流的变化特征。文献[16]将 VSC 型换流站等效为 RLC 型简单电路, 利用叠加定理分析了系统模型并推导出直流

侧故障电流解析表达式。然而, 上述文献均没有考虑交流网络的影响。针对上述文献的研究不足, 文献[17]提出了考虑交流网络阻抗的短路电流表达式, 并分析了不同阻抗的取值对故障电流的影响。文献[18]解析了充分考虑 VSC 换流站中三相桥臂电流的短路电流表达式, 探讨了直流侧故障电流的变化特征。但上述两种方法均没有考虑 VSC 换流站的控制策略对直流侧短路电流的影响。

部分学者对混合直流输电系统中直流线路短路电流进行了研究。文献[19]针对受端电网同时含有 LCC 换流站和模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 换流站的混合直流输电系统, 分别解析了高压阀组 LCC 出口短路和低压阀组 MMC 出口短路时的故障电流表达式, 然而, 该文献并没有详细分析两侧短路电流的变化特征。文献[20]考虑了 LCC 侧触发角的动态变化和 VSC 侧交流电流馈入至直流侧的分量, 解析了两侧短路电流的表达式, 然而, 该文献只分析了单个 LCC-HVDC 或 VSC-HVDC 系统的故障电流表达式, 并没有考虑混合直流输电系统中短路电流的变化特征。文献[21]针对 LCC-MMC 型混合直流输电系统首先建立了考虑 LCC 换流站和 MMC 换流站控制系统的复频域等效模型, 然后计及直流输电线路的频域特性, 推导出直流短路电流的复频域数值, 最后利用拉氏反变换计算出短路电流的时域表达式。然而, 该方法需要进行时域、频域以及复频域之间的数值转换, 计算过程比较繁琐。

因此, 本文建立了两端 LCC/VSC 型混合输电模型, 利用拉氏变换理论获得了直流侧故障时系统等效模型, 推导出两侧故障电流解析表达式。并从故障电流幅值、谐波等方面对比分析了三种高压直流系统中直流侧故障电流的变化特征。

## 1 系统拓扑与等效拉普拉斯变换电路

送端电网和受端电网分别由 LCC 换流站和 VSC 换流站构成的混合直流输电系统如图 1(a) 所示。图中送端电网通过 Y/Δ 变压器连接至送端 LCC 换流站, 直流线路一端连接 LCC 换流站、

另一端连接 VSC 换流站, 受端 VSC 换流站通过 Yg/Δ 变压器连接至受端电网。忽略线路电容参数的影响, 图 1(b) 给出了两端混合直流输电系统的等效电路图。其中:  $L_{dc}$ 、 $R_d$  及  $L_d$  分别为直流线路的限流电抗器、电阻及电感;  $E_d$ 、 $r$  分别为送端 LCC 换流站的等效内电动势、等效内阻;  $u_{dc}$  为直流侧电压。  $E_d$  和  $r$  的数学关系为

$$\begin{cases} E_d = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U \cos \alpha / k_t \\ r = \frac{6}{\pi} x_t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U$ 、 $k_t$ 、 $\alpha$  及  $x_t$  分别整流侧换流站的交流母线电压、变压器变比、触发角及换相电抗。

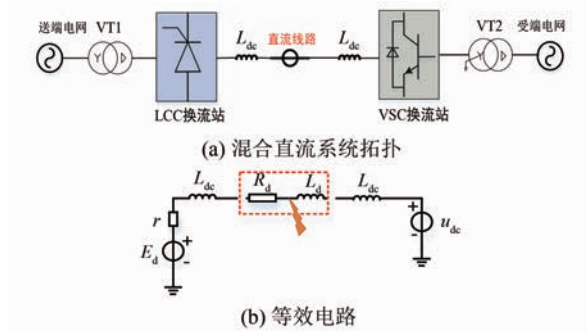


图 1 系统拓扑与等效电路

Fig. 1 System topology and equivalent circuit

对图 1(b) 所示的等效电路进行拉式分析, 并考虑在非零的独立初始条件下附加电源函数的影响<sup>[22]</sup>, 拉式变换电路拓扑如图 2(a) 所示。令  $R_{10} = r + R_{d1}$ ,  $L_{10} = L_{d1} + L_{dc}$ ,  $R_{20} = R_{d2}$ ,  $L_{20} = L_{d2} + L_{dc}$ , 可得到其简化电路如图 2(b) 所示。

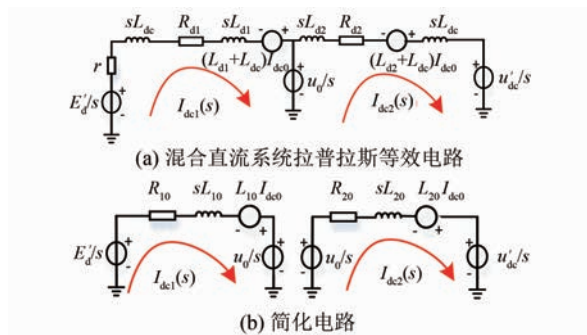


图 2 拉普拉斯变换等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit obtained by Laplace transform

图 2 中:  $E'_d$  和  $u'_{dc}$  分别为故障后 LCC 侧换流站等效内电动势和 VSC 侧直流电压;  $R_{d1}$ 、 $R_{d2}$ 、 $L_{d1}$  及  $L_{d2}$  分别为 LCC 侧、VSC 侧的电阻和电感;

$(L_{d1} + L_{dc})I_{dc0}$ 、 $(L_{d2} + L_{dc})I_{dc0}$  分别为 LCC 侧、VSC 侧的附加电源函数;  $u_0$  为故障点处的电压。

设定图 2(b) 中的环路电流为  $I_{dc1}(s)$  和  $I_{dc2}(s)$ , 可得环路电流方程为

$$\begin{cases} I_{dc1}(s)(R_{10} + sL_{10}) = L_{10}I_{dc0} + \frac{E'_d - u_0}{s} \\ I_{dc2}(s)(R_{20} + sL_{20}) = L_{20}I_{dc0} + \frac{u_0 - u'_{dc}}{s} \end{cases} \quad (2)$$

求解上述环路电流方程, 得到时域内的方程的解为

$$\begin{cases} I_{dc1}(t) = \frac{E'_d - u_0}{R_{10}}(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) + I_{dc0}e^{-\frac{t}{T_1}} \\ I_{dc2}(t) = \frac{u_0 - u'_{dc}}{R_{20}}(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) + I_{dc0}e^{-\frac{t}{T_2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{L_{10}}{R_{10}} \\ T_2 = \frac{L_{20}}{R_{20}} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)可知,  $E'_d$ 、 $u_0$  以及  $u'_{dc}$  都是随时间变化的函数, 因此无法求解  $I_{dc1}(t)$  和  $I_{dc2}(t)$ 。但由图 3 中  $E'_d$ 、 $u_0$  以及  $u'_{dc}$  三个变量在故障后的波形可知, 在故障后的瞬间三个变量可近似为呈线性变化。因此, 本文直接将三个变量的数值代入式(3)求解相应的时域短路电流表达式。例如, 要求解 3 ms 以内故障电流的波形, 就将 3 ms 时的数值代入。为了验证上述分析的正确性, 对 LCC 侧和 VSC 侧故障电流进行了仿真, 计算值和仿真值波形对比如图 3 所示。由图可知, LCC 侧短路电流的仿真值和计算值存在较大差异。分析其原因,  $u_0$  和  $u'_{dc}$  的变化可以近似为线性化。但是,  $E'_d$  中含有变量触发角  $\alpha$ , 其在故障后将呈现非线性变化。如果仅代入  $E'_d$  将无法判断出实际波形的变化趋势。同样, VSC 侧故障电流的仿真值和计算值也存在较大的差异, 其可能原因是式(3)中的 VSC 侧故障电流表达式没有考虑交流电流的馈入。综上所述, LCC 和 VSC 侧故障电流的表达式需要充分考虑触发角的动态变化过程和交流电流的馈入。

## 2 直流侧精确故障电流解析表达式

由于前述 LCC 侧、VSC 侧故障电流表达式的

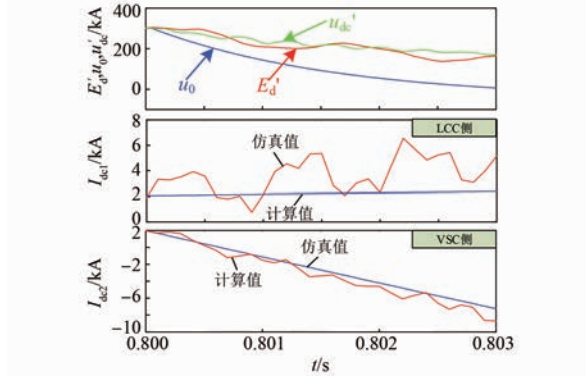


图3 LCC侧、VSC侧故障电流的仿真值和计算值

Fig. 3 Simulated and calculated values of fault currents on LCC-side and VSC-side

计算值与仿真值存在一定的差异,故本节将着重考虑 LCC 侧换流站触发角的动态变化过程和 VSC 侧换流站交流电流馈入至直流侧的成分。

## 2.1 考虑触发角动态变化过程的 LCC 侧故障电流表达式

利用最小二乘法对触发角的非线性过程做近似线性化处理,定义直流系统故障后 LCC 侧换流站触发角变化函数为  $f(\alpha)$ ,可得:

$$f(\alpha) = k(\alpha - \alpha_0) + \cos\alpha_0 \quad (5)$$

式中:  $\alpha_0$  和  $\alpha$  分别为故障前后的触发角;  $k$  为变化系数。

由式(5)可知,  $k$  的取值至关重要。定义以下最小函数存在于触发角变化区间  $[\alpha_0, \alpha_1]$ :

$$\min S = \min \|f(\alpha) - \cos\alpha\|^2 \quad (6)$$

对上式做最小二乘法处理,可得:

$$S = \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} [k(\alpha - \alpha_0) + \cos\alpha_0]^2 d\alpha - 2 \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} [k(\alpha - \alpha_0) + \cos\alpha_0] \cdot \cos\alpha d\alpha + \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} \cos^2\alpha d\alpha \quad (7)$$

式(7)两边同对  $k$  求导,可得:

$$\frac{\partial S}{\partial k} = 2k \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} (\alpha - \alpha_0)^2 d\alpha + 2 \int_{\alpha_0}^{\alpha_1} (\alpha - \alpha_0) (\cos\alpha_0 - \cos\alpha) d\alpha \quad (8)$$

当  $\partial S / \partial k = 0$  时,由式(8)可得:

$$k = \frac{\int_{\alpha_0}^{\alpha_1} (\alpha - \alpha_0) (\cos\alpha - \cos\alpha_0) d\alpha}{\int_{\alpha_0}^{\alpha_1} (\alpha - \alpha_0)^2 d\alpha} =$$

$$\frac{3[(\alpha_1 - \alpha_0)\sin\alpha_1 + \cos\alpha_1 - \cos\alpha_0 - \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_0)^2\cos\alpha_0]}{(\alpha_1 - \alpha_0)^3} \quad (9)$$

结合式(1)、(5)和(9)可得故障后 LCC 侧换流站的等效电动势为

$$E_d' = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U [k(\alpha - \alpha_0) + \cos\alpha_0] / k_i \quad (10)$$

最后,将式(10)代入式(3)可得到新的短路电流表达式。根据以上分析,得到了考虑触发角近似线性化过程的 LCC 侧故障电流的计算值,其与仿真值波形对比如图 4 所示。由图可知,所提的短路电流表达式误差较小,验证了上述分析的正确性。

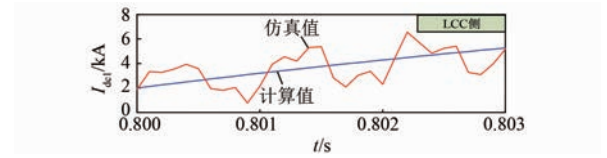


图4 考虑触发角线性化的 LCC 侧故障电流的仿真值和计算值

Fig. 4 Simulated and calculated values of the fault current considering the linearization of the trigger angle on the LCC-side

## 2.2 考虑交流电流馈入至直流侧成分的 VSC 侧故障电流表达式

逆变侧 VSC 换流站其直流侧和交流侧的等效电路如图 5 所示。

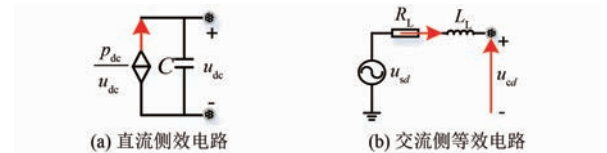


图5 逆变站 VSC 的直流/交流等效电路

Fig. 5 DC side equivalent circuit and AC side equivalent circuit on the inverter station VSC

图 5 中:  $p_{dc}$ 、 $u_{sd}$  及  $u_{cd}$  分别为直流功率、VSC 侧交流电网电压  $d$  轴分量以及换流站出口电压  $d$  轴分量;  $R_L$ 、 $L_L$  分别为交流线路的电阻、电感。

根据 KCL 和 KVL 定理,可得:

$$\begin{cases} u_{sd} - u_{cd} = L_L \frac{di_{sd}}{dt} + R_L i_d - \omega L_L i_q \\ u_{cd} = \frac{m_d u_{dc}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $m_d$  为调制比;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为交流电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。

通常, VSC 侧换流站的调制比通过内环 PI 控制器得到, 其表达式为

$$m_d = \frac{2}{u_{dcN}} \cdot$$

$$\left[ \int_0^t k_i (i_d - i_{dref}) dt + k_p (i_d - i_{dref}) + u_{sd} + \omega L_L i_q \right] \quad (12)$$

式中:  $u_{dcN}$  和  $i_{dref}$  分别为直流电压的额定值和  $d$  轴电流的参考值;  $k_i$  和  $k_p$  分别为积分系数和比例系数。

由于 VSC 侧换流站的分压电容相对较大, 因此假设在直流故障后的初始阶段, VSC 侧的直流电压不发生较大变化<sup>[10-12]</sup>。此外, VSC 站内环 PI 控制器也不会转入限流控制模式。因此, 可根据故障前的条件对式(11)和(12)建立小信号模型, 即:

$$\begin{cases} \Delta u_{sd} - \Delta u_{cd} = sL_L \Delta i_d(s) + R_L \Delta i_d(s) - \omega L_L \Delta i_q(s) \\ \Delta u_{cd} = \frac{1}{2} (\Delta m_d u_{dc0} + \Delta u_{dc} m_{d0}) \\ \Delta m_d = \frac{2}{u_{dcN}} \cdot \left[ \frac{k_i}{s} \Delta i_d(s) + k_p \Delta i_d(s) + \Delta u_{sd} + \omega L_L \Delta i_q(s) \right] \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $u_{dc0}$  为直流电压的初始值;  $m_{d0}$  为调制比的初始值。

求解式(13)可得:

$$\begin{cases} \Delta i_d(s) = -\frac{m_{d0}/2}{k_i/s + k_p + R_L + sL_L} \Delta u_{dc} \\ \Delta i_q(s) = -\frac{m_{d0}/2}{k_i/s + k_p + R_L + sL_L} \Delta u_{dc} \end{cases} \quad (14)$$

根据理想状态下的功率守恒定律可知:

$$\frac{3}{2} u_{cd} i_d = u_{dc} i_{dc} \quad (15)$$

化简式(15)可得:

$$i_{dc} = \frac{3}{4} m_d i_d \quad (16)$$

对式(16)做小信号分析可得:

$$\Delta i_{dc} = \frac{3}{4} (m_{d0} \Delta i_d(s) + \Delta m_d i_{d0}) \quad (17)$$

式中:  $i_{d0}$  为电流  $i_d$  的初始值。

忽略并网电压积分项和  $q$  轴分量的影响, 结

合式(13)、(14)和(17)可得:

$$\Delta i_{dc} = - \left( \frac{3}{8} m_{d0}^2 + \frac{3}{4} \frac{i_{dc0} m_{d0}}{u_{dcN}} \right) \frac{\Delta u_{dc}}{k_p + R_L + sL_L} \quad (18)$$

式(18)即为交流电流馈入至直流侧的分量, 结合式(3)可得 VSC 侧新的故障电流表达式为

$$I_{dc2}(t) = \frac{u_0 - u'_{dc}}{R_{20}} (1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) + I_{dc0} e^{-\frac{t}{T_2}} - \left( \frac{3}{8} m_{d0}^2 + \frac{3}{4} \frac{i_{dc0} m_{d0}}{u_{dcN}} \right) \frac{\Delta u_{dc}}{k_p + R_L} (1 - e^{-\frac{t}{T_3}}) \quad (19)$$

式中:  $T_3 = L_L / (R_L + k_p)$ 。

根据式(19), 可得考虑交流电流馈入的 VSC 侧故障电流的计算值, 其与仿真值的对比如图 6 所示。由图可知, 当考虑交流电流馈入时, 仿真值与计算值之间的差异显著减小, 验证了上述分析的正确性。

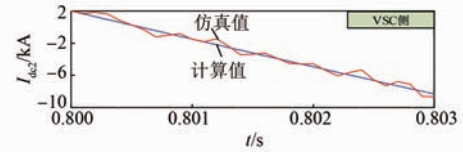


图 6 考虑交流电流馈入至直流侧的 VSC 侧故障电流的仿真值和计算值

Fig. 6 Simulated and calculated values of the fault current considering the feeding of AC current with a control strategy on the VSC-side

## 2.3 接地电阻故障

短路电流表达式的求解主要基于金属性接地故障, 因此对接地电阻故障时短路电流表达式的解析情况进行分析。基于图 2 的等效电路, 得到了接地电阻故障下直流系统的等效电路如图 7 所示

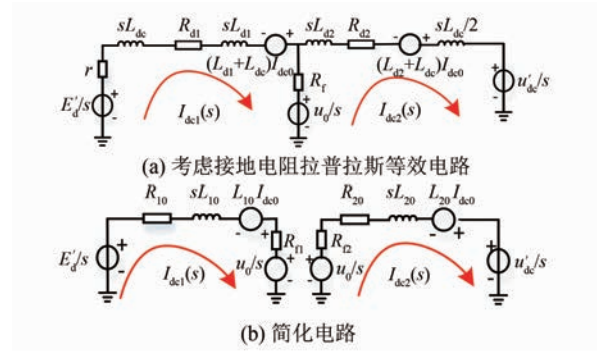


图 7 考虑接地电阻的等效拉普拉斯变换电路

Fig. 7 Equivalent Laplace transformation circuit considering ground resistance

示,其中  $R_f$  为接地电阻。

接地电阻故障下直流系统两侧故障电流表达式为

$$\begin{cases} I_{dc1}(t) = \frac{E'_d(t) - u_0(t)}{R_{10} + R_{f1}}(1 - e^{-\frac{t}{T'_1}}) + I_{dc0}e^{-\frac{t}{T'_1}} \\ I_{dc2}(t) = \frac{u_0(t) - u'_{dc}(t)}{R_{20} + R_{f2}}(1 - e^{-\frac{t}{T'_2}}) + I_{dc0}e^{-\frac{t}{T'_2}} \\ - \left( \frac{3}{8}m_{d0}^2 + \frac{3}{4} \frac{i_{dc0}m_{d0}}{u_{dcN}} \right) \frac{\Delta u_{dc}}{k_p + R_L}(1 - e^{-\frac{t}{T'_3}}) \end{cases} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} T'_1 = \frac{L_{10}}{R_{10} + R_{f1}} \\ T'_2 = \frac{L_{20}}{R_{20} + R_{f2}} \\ R_{f1} = \frac{I_{dc1}(s) - I_{dc2}(s)}{I_{dc1}(s)} R_f \\ R_{f2} = \frac{I_{dc1}(s) - I_{dc2}(s)}{I_{dc2}(s)} R_f \end{cases} \quad (21)$$

由式(20)可知,若能求解出  $R_{f1}$  和  $R_{f2}$ ,则短路电流表达式将被较好解析。对图 7(b)所示的简化电路做进一步简化得到图 8 所示的无源等效电路,可得:

$$\begin{cases} I_{dc1}(s) = \frac{u_0}{R_{10} + sL_{10}} \\ I_{dc2}(s) = \frac{u_0}{R_{20} + sL_{20}} \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21),可得:

$$\begin{cases} R_{f1} = \frac{s(L_{10} + L_{20}) + R_{10} + R_{20}}{sL_{20} + R_{20}} R_f \\ R_{f2} = \frac{s(L_{10} + L_{20}) + R_{10} + R_{20}}{sL_{10} + R_{10}} R_f \end{cases} \quad (23)$$

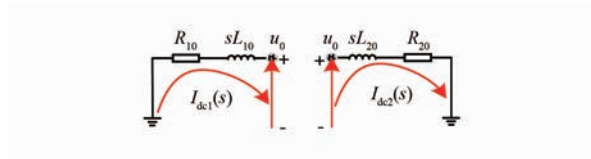


图 8 无源等效电路

Fig. 8 Passive equivalent circuit

根据上述计算即可得到接地电阻故障下的短路电流表达式。

### 3 混合直流系统与传统 LCC-HVDC、VSC-HVDC 系统直流侧故障特征比较

#### 3.1 故障解析表达式在不同系统中的应用

为了验证所提的直流侧故障解析表达式在不同直流系统中的适用性进行了仿真。仿真中,三种直流系统的电压等级为 300 kV,额定直流电流为 2 kA。三种直流输电系统中直流侧故障电流的计算值和仿真值波形如图 9 所示。由图可知,通过所提故障电流解析表达式得到的计算值波形与仿真值波形在故障初始阶段基本变化趋势一致,误差较小。对于 LCC-HVDC 系统,整流侧故障电流的计算值和仿真值在故障发生 2.1 ms 内变化趋势基本吻合;对于 VSC-HVDC 系统,整流侧故障电流的计算值和仿真值在故障发生 4 ms 内变化趋势基本吻合;对于 LCC/VSC 混合系统,整流侧故障电流的计算值和仿真值在故障发生 7 ms 内变化趋势基本吻合。

然而,随着故障时间的延长,故障电流的计算值与仿真值误差较大。以 LCC/VSC 混合系统为例,故障发生 7 ms 后,故障电流的计算值与仿真值出现了明显差异。这是由于故障发生 7 ms 后两侧故障电流呈现非线性变化,而上述对于短路电流表达式都是基于线性化过程分析得到的,故 7 ms 后故障电流的计算值需做分段线性化处理。

LCC-HVDC 系统和 VSC-HVDC 系统的分析与上述一样。同样需对非线性化的故障电流做分段线性化处理,再利用本文所提方法求得不同阶段的短路电流表达式。综上,本文所提方法优先适用于故障发生的初始阶段,即故障电流呈线性趋势变化的阶段,其可为直流线路的保护原理提供一定的参考。

#### 3.2 不同系统直流侧故障电流的变化特征

由图 9 可知不同系统的直流侧故障电流的变化特征不一样。因此,需对不同系统中直流侧故障电流的变化特征进行分析。

仿真设定直流线路的中间段在 0.8 ms 发生短路故障。由图 9(a)可知,传统的 LCC-HVDC 输电系统中整流侧故障电流约在故障后的 2.1 ms 达到最大值 2.513 kA,逆变侧故障电流约在 4.5 ms 达到最小值-48.6 A。此时,两侧故障电流

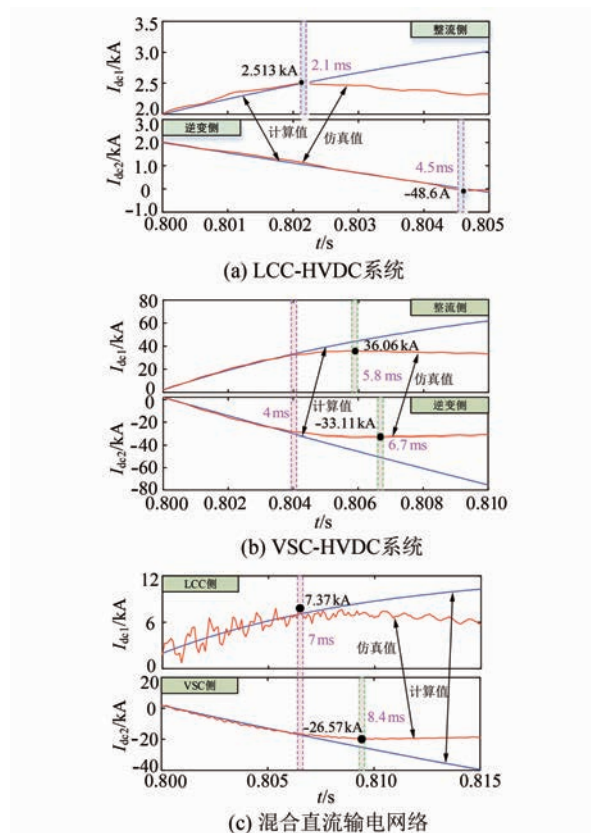


图 9 三种不同输电网络的直流侧故障特性比较  
Fig. 9 Comparison of DC side fault characteristics of three different transmission networks

的变化率分别为 0.244 kA/ms 和 -0.455 kA/ms。

由图 9(b)可知,VSC-HVDC 输电系统中整流侧故障电流约在 5.8 ms 达到最大值 36.06 kA,逆变侧故障电流约在 6.7 ms 达到最小值 -33.11 kA。此时,两侧故障电流的变化率分别为 5.872 kA/ms 和 -5.24 kA/ms。

由图 9(c)可知,混合直流输电系统中整流侧故障电流约在 7 ms 达到最大值 7.37 kA,逆变侧故障电流约在 8.4 ms 达到最小值 -26.57 kA。此时,两侧故障电流的变化率分别为 0.767 kA/ms 和 -3.401 kA/ms。

综上可知,相较于传统的 LCC-HVDC 系统,混合直流输电系统中 VSC-HVDC 子系统的接入延长了 LCC-HVDC 子系统直流故障电流上升至最大值的时间,增加了两侧换流站直流故障电流的幅值;相较于传统的 VSC-HVDC 系统,混合直流输电系统中 LCC-HVDC 子系统的接入,延长了 VSC-HVDC 子系统直流故障电流上升至最大值的时间,降低了两侧换流站故障电流的幅值。

另外,根据三种系统中故障电流的变化速率可知,VSC-HVDC 系统中故障电流的变化速度最快,其次为 LCC/VSC-HVDC 混合系统,LCC-HVDC 系统中故障电流的变化速度最慢。

为了对比不同系统故障电流的谐波特征,对 LCC-HVDC、VSC-HVDC 以及 LCC/VSC-HVDC 混合系统中故障电流进行了谐波分析,其结果如图 10~12 所示。选定时间段为 0.8-0.9 s 的故障电流做谐波分析。由图可知,LCC-HVDC 系统中整流侧故障电流谐波畸变率为 234.48%,逆变侧故障电流谐波畸变率为 326.61%;VSC-HVDC 系统中整流侧故障电流谐波畸变率为 50.33%,逆变侧故障电流谐波畸变率为 33.66%;LCC/VSC-HVDC 混合系统中整流侧故障电流谐波畸变率为 241.67%,逆变侧故障电流谐波畸变率为 185.09%。

分析上述谐波数据可知,相较于传统的 LCC-HVDC 系统,混合直流系统中受端 VSC-HVDC 子系统的接入降低了送端 LCC-HVDC 子系统的谐波畸变率;相较于 VSC-HVDC 系统,混合直流系统中送端 LCC-HVDC 子系统的接入,增加了受端 VSC-HVDC 子系统的谐波畸变率。

综上所述,三种直流输电方式的直流侧故障特征差异明显,可根据实际需求借鉴相应的故障电流波形,提供相应的保护原理或提出相应的抑制故障电流变化的控制策略。

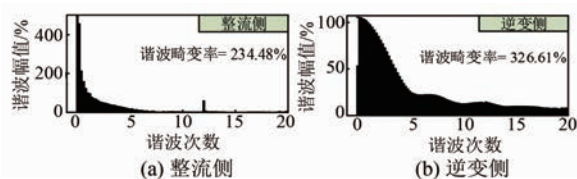


图 10 LCC-HVDC 系统直流侧故障电流谐波分析  
Fig. 10 Harmonics analysis of DC side fault current in LCC-HVDC system

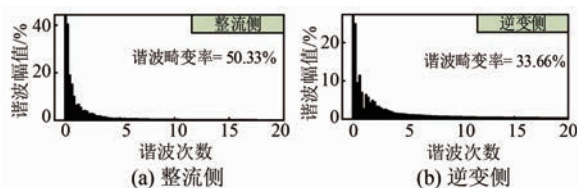


图 11 VSC-HVDC 系统直流侧故障电流谐波分析  
Fig. 11 Harmonics analysis of DC side fault current in VSC-HVDC system

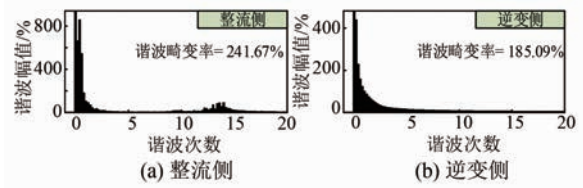


图 12 LCC/VSC-HVDC 系统直流侧故障电流谐波分析  
Fig. 12 Harmonics analysis of DC side fault current in LCC/VSC-HVDC system

## 4 仿真验证

为了验证上述理论分析和设计的正确性,基于 MATLAB/Simulink 软件搭建了图 1(a)所示的两端混合直流输电拓扑。仿真中设定直流线路在 0.8 s 时发生短路故障,故障点的位置位于 1/2 线路处。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

| 参数名称         | 参数值             |
|--------------|-----------------|
| $U_{dc}/kV$  | +300            |
| $P/MW$       | 600             |
| $L_{dc}/H$   | 0.05            |
| $R_d/\Omega$ | 2.085           |
| $L_d/H$      | 0.023 85        |
| $R/\Omega$   | 75e-3           |
| $L/H$        | 25e-3           |
| $C/F$        | 0.002           |
| $I_{dc}/kA$  | 2               |
| VT1、VT2/kV   | 220/150、150/220 |

### 4.1 不同时间尺度的短路电流表达式的验证

图 13 中为 1 ms、2 ms 和 15 ms 时间窗口的两侧短路电流仿真值和计算值比较波形。由图 13(a)和 13(b)可知,两侧短路电流的计算值与仿真值的变化趋势基本一致。由图 13(c)可知,两侧故障电流计算值和仿真值的变化趋势在故障发生的 7 ms 内基本保持一致,7 ms 后两侧故障电流的实际变化趋势将呈现非线性化。本文求解短路电流的过程都是以线性化趋势的数值代入,这是 7 ms 以后计算值与仿真值出现差异的主要原因。但是,这种差异并不影响短路电流表达式的实用性。要想准确获得 7 ms 以后故障电流的波形,可先将其分段线性化,再使用本文所提的故障分析方法进行求解。

### 4.2 不同故障点位置的短路电流表达式的验证

上述理论和仿真的故障点位置都位于 1/2 线路处,因此还需进一步进行验证本文所提方法对

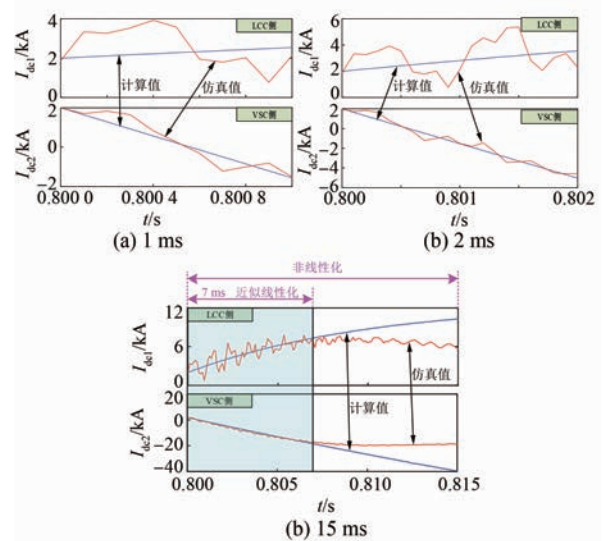


图 13 不同时间窗口的短路电流的仿真值与计算值

Fig. 13 Simulated and calculated values of short-circuit current in different time windows

不同故障点位置的短路电流的适用性。基于此进行了仿真分析,得到了不同故障点处两侧短路电流的计算值和仿真值波形如图 14 所示。由图可知,故障点位置位于直流线路的 1/4 和 3/4 处时,两侧短路电流仿真值和计算值波形的变化趋势也基本保持一致。

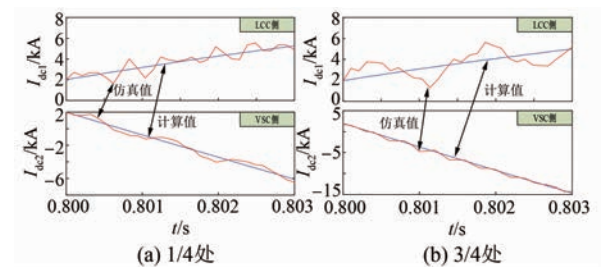


图 14 不同故障点处两侧短路电流的仿真值与计算值

Fig. 14 Simulated and calculated values of short-circuit currents on both sides at different fault points

### 4.3 不同接地电阻的短路电流表达式的验证

图 15(a)~(d)分别为接地电阻为 10  $\Omega$ 、20  $\Omega$ 、30  $\Omega$  以及 40  $\Omega$  情况下短路电流仿真值和计算值波形。由图可知,四种接地电阻取值情况下短路电流计算值与仿真值的变化趋势基本一致,尤其是受端 VSC 侧短路电流计算值与仿真值波形基本吻合,其平均误差约为 100 A。

## 5 结语

本文提出了一种适用于混合直流系统中充分

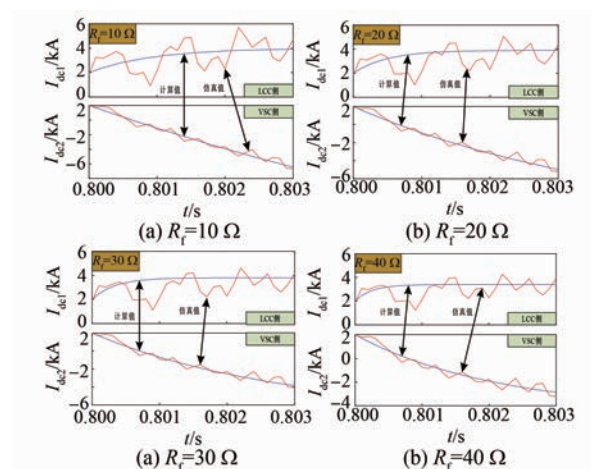


图 15 不同接地电阻下两侧短路电流的仿真值与计算值  
Fig. 15 Simulated and calculated values of short-circuit currents on both sides under different grounding resistances

考虑 LCC 侧换流站触发角的动态变化以及 VSC 侧换流站交流电流馈入至直流侧的故障分析方法,并将其与传统的 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 系统的故障特性进行对比。得出以下结论:

(1) 本文所提故障分析方法的计算值与仿真值变化趋势基本一致,差异较小。尤其是 VSC 侧故障电流的计算值与仿真值的误差小于 100 A;

(2) VSC-HVDC 系统的直流侧故障电流幅值变化率最高,LCC/VSC-HVDC 混合直流系统次之,传统的 LCC-HVDC 系统最小;

(3) 传统 LCC-HVDC 系统直流侧故障电流谐波畸变率最高,LCC/VSC-HVDC 混合直流系统次之,传统的 LCC-HVDC 系统最小;

(4) 针对故障点的位置不同和接地电阻的数值变化,本文所提故障特性方法仍然适用;

(5) 本文所提的直流侧故障特性方法适用于故障发生 7 ms 以内的线性化过程,对于 7 ms 以后的非线性化过程需要使用所提方法进行分段线性化处理。

## 参考文献

[1] 罗慧达,崔学深,崔存岗,等. 面向 LCC 中压直流接入的双馈风力发电系统宽频率范围控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 87-92.

LUO H D, CUI X S, CUI C G, et al. Wide frequency range control of doubly-fed wind power generation system for LCC medium voltage DC access

[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(3): 87-92.

[2] 年珩,刘一鸣,胡彬,等. 计及频率耦合特性的 LCC-HVDC 送端系统阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 876-886.

NIAN H, LIU Y M, HU B, et al. Impedance modeling and stability analysis of LCC-HVDC sending terminal system considering frequency coupling characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 876-886.

[3] 包萌,沈弘,李嘉靓,等. 柔性直流换流站短路工况下直流场磁场计算建模及预测分析[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 55-62.

BAO M, SHEN H, LI J L, et al. Modeling and prediction analysis of magnetic field in DC yard of VSC-HVDC station under short circuit condition [J]. Electric Power, 2021, 54(10): 55-62.

[4] 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 S, XU Z. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 133-144.

[5] 吴芳柱. 基于 LCC-MMC 的混合直流输电系统优化控制方法[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 86-91.

WU F Z. Optimization control method of hybrid DC transmission system based on LCC-MMC [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 86-91.

[6] 王冰倩,赵文强,侍乔明,等. 受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统故障穿越方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 69-76.

WANG B Q, ZHAO W Q, SHI Q M, et al. Fault ride-through method of inverter hybrid cascade LCC-VSC UHVDC transmission system [J]. Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 69-76.

[7] LI T, LI Y L, CHEN X L. Fault diagnosis with wavelet packet transform and principal component analysis for multi-terminal hybrid HVDC network [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1312-1326.

[8] DAI Z H, LIU N N, ZHANG C. State-space analysis based pole-to-ground line fault isolation strategy for LCC-HVDC systems [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(10): 1933-

- 1941.
- [ 9 ] 袁博,王颖,邵华,等. (特)高压直流线路单极故障隔离策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 9-18.
- YUAN B, WANG Y, SHAO H, et al. Isolation strategy for pole-to-ground fault of (U) HVDC lines [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 9-18.
- [ 10 ] MA Y J, LI H F, WANG G. Fault analysis and traveling-wave-based protection scheme for double-circuit LCC-HVDC transmission lines with shared towers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1479-1488.
- [ 11 ] XIAO H, LI Y H, LIU R P, et al. Single-end time-domain transient electrical signals based protection principle and its efficient setting calculation method for LCC-HVDC lines [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1233-1242.
- [ 12 ] LI Y J, WU L, LI J P, et al. DC fault detection in MTDC systems based on transient high frequency of current [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 950-962.
- [ 13 ] LI Y J, LI J P, XIONG L S, et al. DC fault detection in meshed MTDC systems based on transient average value of current [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1932-1943.
- [ 14 ] LI J P, LI Y J, XIONG L S, et al. DC fault analysis and transient average value based fault detection for radial MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1310-1320.
- [ 15 ] LIU D H, WEI T Z, HUO Q H. DC side line-to-line fault analysis of VSC-HVDC and dc-fault-clearing methods [C]//2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015.
- [ 16 ] 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.
- TANG L X, DONG X Z. 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.
- [ 17 ] BUCHER M K, FRANCK C M. Analytic approximation of fault current contribution from AC networks to MTDC networks during pole-to-ground faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 20-27.
- [ 18 ] YANG J, FLETCHER J E, O' REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [ 19 ] 马文轩. 受端混联型 LCC-MMC 直流输电系统故障特性分析与控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- MA W X. Fault characteristics analysis and control strategy research of receiver hybrid LCC-MMC DC transmission system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [ 20 ] LI Y J, LI J P, WU G H, et al. DC fault analysis models of three converter topologies considering control effects [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9480-9491.
- [ 21 ] 李海峰,许灿雄,梁远升,等. 计及换流站控制特性的多端混合直流输电系统故障暂态计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1426-1438.
- LI H F, XU C X, LIANG Y S, et al. Fault transient calculation method for multi-terminal hybrid HVDC systems considering control characteristics of converter station [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1426-1438.
- [ 22 ] 郝亮亮,詹清清,陈争光,等. LCC-MMC 型混合直流送端交流系统故障时直流电流的暂态过程解析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 220-227.
- HAO L L, ZHAN Q Q, CHEN Z G, et al. Analysis of DC current transient process under AC system fault at LCC-MMC hybrid HVDC sending end [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 220-22.
- 收稿日期:2023-09-21  
收到修改稿日期:2023-10-14  
作者简介:  
胡 迪(1994-),女,博士,中级工程师,研究方向为直流输电、电力电容器与无功补偿以及新型储能技术等,498582944@qq.com;  
\* 通信作者:李 涛(1992-),男,博士,中级工程师,研究方向为混联直流电网控制与保护、微网控制与保护以及多电平变换器控制等,litao\_tju@sina.com。

## Research on Analytical Expression of DC Side Fault Transient Current and Fault Characteristics in Hybrid HVDC System

LI Tao<sup>1\*</sup>, HU Di<sup>1</sup>, LIU Hongda<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, CHEN Zhong<sup>1</sup>, GUAN Weiping<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;

2. Ningbo Power Supply Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

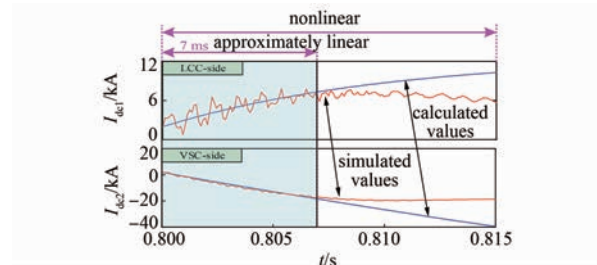
**Key words:** line-commutated converter based on high-voltage direct current (LCC-HVDC); voltage source converter based on high voltage direct current (VSC-HVDC); hybrid HVDC transmission; DC fault characteristics; trigger angle; the feeding of AC current

With the development of the power grid, more and more voltage source converter based on high voltage direct current (VSC-HVDC) will be fed into the load center, forming a pattern where line-commutated converter based on high-voltage direct current (LCC-HVDC) and VSC-HVDC are mixed and fed into the grid. When two types of HVDC transmission systems form the same transmission network, they exhibit different fault characteristics from single-infeed HVDC transmission systems. Therefore, studying the fault characteristics of hybrid multi-terminal HVDC system, especially solving the analytic expressions of the fault current on the LCC-side and the VSC-side when the DC side fails, has important theoretical and engineering significance for the research of the hybrid multi-terminal HVDC system.

Firstly, this paper establishes the equivalent Laplace transform model of the three-terminal LCC-VSC-VSC network, and analyzes the simple expression of the short-circuit current on both sides when the DC line fails. Secondly, considering the shortcomings of the simple current expressions on both sides, the least square method is used to linearize the trigger angle on the LCC-side and the common inner-loop PI controller model on the VSC-side is used to analyze the AC current fed to the DC side, which obtain the accurate expression of fault current on both sides. Then, the variation characteristics of DC side fault current in three HVDC systems are comparatively analyzed in terms of fault current amplitude and harmonic. Finally, the correctness of the proposed analytical expression of DC side fault current is verified by MATLAB/

Simulink simulation.

Fig.1 shows the simulated and calculated waveforms within 15 ms during the post-fault. As observed, the variation trend between the simulated value and the calculated value is basically the same within 7 ms of the fault occurrence, because the dynamic process of the fault current during this period can be approximately considered to be linear. The fault analysis approach described in this paper is solely directed at the linearized process at the beginning of the fault, it concentrates on assessing the 7 ms fault current waveform during the post-fault. For the nonlinear process of the whole fault process, it is necessary to use the data of different stages and the method of this paper to solve the short-circuit current expression. For example, if the current expression between 7–15 ms is to be solved, it is necessary to use the data at 7 ms as the initial value and the data at 15 ms as the final value. The purpose of this study is to solve the short-circuit current expression from the fault occurrence to the maximum value, which provides a theoretical reference for the protection principle of hybrid HVDC system.



**Fig. 1 Simulated and calculated values of short-circuit current in different time window**