

含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极 短路故障机理分析

马焕¹, 姚为正², 吴金龙¹, 行登江¹, 杨美娟¹, 孙树敏³, 李广磊³

(1. 西安许继电力电子有限公司, 陕西省 西安市 710075;

2. 许继集团有限公司, 河南省 许昌市 461000;

3. 国网山东省电力公司 电力科学研究院, 山东省 济南市 250002)

Analysis of DC Pole-to-Pole Short Circuit Fault Behavior in MMC-HVDC Transmission Systems With Bridge Arm Damper

MA Huan¹, YAO Weizheng², WU Jinlong¹, XING Dengjiang¹, YANG Meijuan¹, SUN Shumin³, LI Guanglei³

(1. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi Province, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang 461000, Henan Province, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, Shandong Province, China)

ABSTRACT: DC pole-to-pole short circuit fault is a very serious fault in voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) transmission systems. Half bridge modular multilevel converter (HBMMC) with arm damper can help rapid fault current decay, thus realizing fast system recovery. In this paper, a complete analytical model is built to analyze DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with arm damper. Fault mechanism is analyzed in detail, including three stages: before converter blocking, after converter blocking, and after AC circuit breaker tripping. Derived analytical equations are given at each stage. Using the analytical model, fault current and decay time can be accurately and quickly predicted, giving a theoretical basis for fault isolation and system recovery. Finally, the proposed analytical model is verified with Matlab/Simulink and calculated results agree well with simulation results.

KEY WORDS: modular multilevel converter (MMC); VSC-HVDC; arm damper; DC pole-to-pole short circuit fault; analytical model

摘要: 直流双极短路故障是柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)系统最严重的故障之一。具有桥臂阻尼的半桥型模块化多电平换流器在故障后能加快故障电流的衰减速度,实现系统快速重启。基于含桥臂阻尼的 HBMMC(half bridge sub-module modular multilevel converter)-HVDC 系统建立了一套完整的直流双极短路故障机理分析的解析模型,分别对换流器闭锁

前,换流器闭锁后和交流断路器断开后3个阶段的故障机理进行了详细分析,并给出了每个阶段对应的桥臂电流解析表达式。通过此解析模型,可快速准确地计算直流双极短路故障发生后的故障电流及故障衰减时间,为其工程应用提供理论依据。最后,基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了含桥臂阻尼的 HBMMC-HVDC 系统仿真模型,通过仿真验证了该解析模型的可行性与准确性。

关键词: 模块化多电平换流器; 柔性直流输电; 桥臂阻尼; 直流双极短路故障; 解析模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2286

0 引言

模块化多电平换流器高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)系统由于具有对开关器件动态均压要求低、开关频率低、波形质量高等优势,近年来备受学术界和工程界的关注^[1-6]。目前已投运的柔性直流输电工程多采用半桥式模块化多电平换流器结构,该拓扑结构简单,经济性较好,但不具备直流短路故障自清除能力^[7-10]。

直流双极短路故障是柔性直流输电系统最严重的故障类型之一^[11-12]。对柔性直流输电系统直流短路故障机理的分析,有助于深入理解故障发展过程,明确直流短路故障对系统的影响,同时也是故障期间控制保护策略研究的基础^[13-21]。针对传统 HBMMC(half bridge sub-module MMC)、全桥型(full bridge MMC, FBMMC)、双嵌位子模块型(clamping

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX02301003)。

Project Supported by National Science and Technology Major Project of China (2015ZX02301003).

double MMC, CDMMC)等拓扑的直流短路故障机理已有相关文献进行研究。文献[19]对传统 HBMMC 各类直流侧的故障机制进行了分析,总结了不同类型的直流线路故障特点;文献[20]建立了 HBMMC 在双极短路故障下过电流分析的电路模型,对系统故障期间的过电流应力进行分析,对设备的选型具有工程指导意义。文献[21]分析了 FBMMC 系统的运行机理和数学模型,推导了在直流双极短路情况下,放电阶段和闭锁阶段的电容电压和电流解析式。文献[15]分析了 CDMMC 系统的直流短路故障穿越机理,且文中采用了在子模块箝位二极管回路串联阻尼电阻的改进方法,以减少电容电压上升幅值,缩短故障电弧熄灭时间。

具有桥臂阻尼的 HBMMC 拓扑在传统 HBMMC 的各桥臂中增加了桥臂阻尼器,相当于故障期间将阻尼电阻串联在各桥臂中^[22]。该方法可实现故障电流的有效抑制,加快故障电流的衰减,有利于直流故障的快速隔离以及实现系统故障消除后的快速重启动。但目前未有针对该拓扑的详细直流短路故障机理分析。

本文对含桥臂阻尼的 HBMMC-HVDC 的直流短路故障机理进行了详细分析,并建立了一套完整准确的解析模型。通过该模型,可以深入地理解直流短路故障过程,并快速计算出故障电流和故障衰减时间。最后基于 Matlab/Simulink 软件搭建了含桥臂阻尼的 HBMMC-HVDC 系统仿真模型,通过对计算与仿真结果进行对比,验证了本文建立的解析模型的可行性与准确性。

1 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 的工作原理

含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 的主电路拓扑结构如图 1 所示,该拓扑由三相 6 个桥臂构成,每个桥臂由半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)、阻尼模块(damping arm sub-module, DASM)和一个桥臂电抗器串联而成,上、下两个桥臂构成一个相单元, u_a 、 u_b 、 u_c 分别为交流输出相电压。

其中,HBSM 由上管 IGBT 及其反并联二极管、下管 IGBT 及其反并联二极管和子模块电容器组成。DASM 主要由 IGBT、阻尼电阻和吸收电容构成,阻尼模块的主电路是由带反并联二极管的 IGBT 与阻尼电阻构成的并联结构;吸收电容用以吸收 IGBT 关断过程中的电压尖峰,保护阻尼模块免受过电压损坏。

当系统正常运行时,通过控制 HBSM 中 IGBT 的导通与关断可灵活实现 HBSM 的投入和切除,从

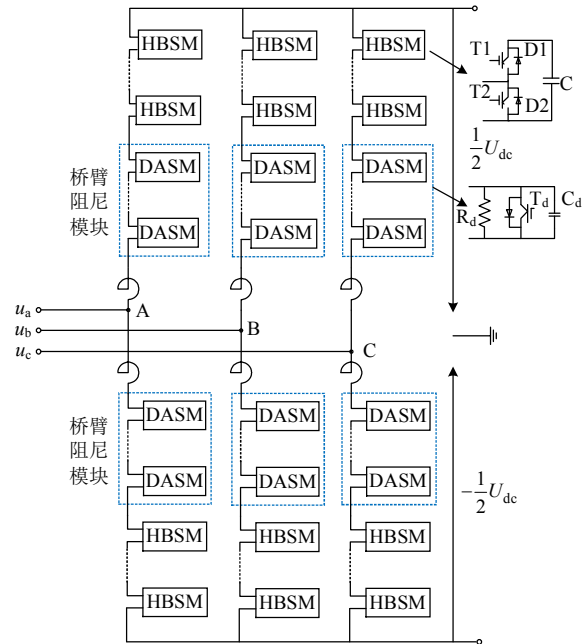


图 1 具有桥臂阻尼的模块化多电平换流器的拓扑结构
Fig. 1 The topology of MMC-HVDC with arm damper

而通过对每相上、下桥臂中处于投入状态的子模块数进行分配来控制换流器交流侧输出电压的波形。而 DASM 中的 IGBT 一直处于导通状态,阻尼电阻被旁路。因此其稳态时的工作原理与传统 HBMMC 相同。

当系统发生直流双极短路故障时,由于半桥子模块电容放电,回路中存在较大的故障电流,一旦检测到故障发生,将立即闭锁 HBSM 与 DASM 中的所有 IGBT,此时 DASM 中的阻尼电阻相当于被串联在各桥臂中,可加快故障电流的衰减速度,从而实现系统的快速重启动。

2 直流双极短路故障的故障机理分析

系统发生直流短路故障时,直流母线电压迅速降为零,半桥子模块电容放电,导致直流母线电流、桥臂电流迅速增大。当控制保护系统检测到直流短路故障后,立刻闭锁换流器,故障电流开始逐渐衰减,经过一段时间后,交流断路器动作,故障电流继续衰减至零。因此直流短路故障机理分析可分为 3 个阶段:换流器闭锁前故障机理分析、换流器闭锁后故障机理分析以及交流断路器断开后故障机理分析,下面将分别对每个阶段下故障电流的发展过程进行分析。

2.1 换流器闭锁前故障机理分析

系统发生直流短路故障后,闭锁前桥臂上流过的电流可以分为 2 个部分:子模块电容放电电流和交流系统馈入电流,即桥臂电流是子模块电容放电电流和交流短路电流的叠加。

闭锁前子模块电容放电回路的等效模型如图 2 所示, 等效电路是一个已知初始状态的 RLC 二阶电路。其中, 上下桥臂电感为串联, 等效电感值为 $2L$; 同一时刻每相参与放电的子模块电容共有 n 个, 这 n 个电容串联, 总容值为 C/n 。不参与放电的子模块电容也是 n 个, 总容值为 C/n 。由于采用子模块均压策略, 这些电容会交替投入, 以确保子模块电容电压近似相等。该放电过程可以等效为这两组电容并联持续放电的情况, 等效电容值为 $2C/n$; R_{stray} 为回路等效杂散电阻。

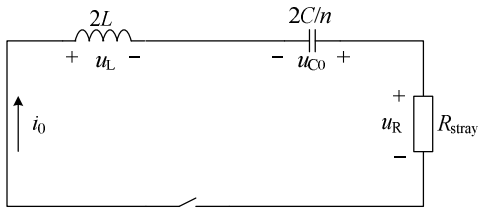


图 2 闭锁前子模块电容放电回路等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit of the HBSM capacitors discharging before blocking the converter.

回路方程如下:

$$\begin{cases} 2L \frac{di_0}{dt} + R_{\text{stray}} i_0 - u_{C0} = 0 \\ -\frac{2C}{n} \frac{du_{C0}}{dt} = i_0 \end{cases} \quad (1)$$

初始状态如下:

$$\begin{cases} u_{C0}(0+) = u_{C0}(0-) = U_{\text{dc}} \\ i_0(0+) = i_0(0-) = I_0 \end{cases} \quad (2)$$

经推导, 子模块电容电压与电容放电电流的解析表达式为

$$u_{C0} = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[\frac{U_{\text{dc}} \omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \alpha) - \frac{nI_0}{2\omega C} \sin(\omega t) \right] \quad (3)$$

$$i_0 \approx e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[U_{\text{dc}} \sqrt{\frac{C}{nL}} \sin(\omega t) + I_0 \cos(\omega t) \right] = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[\sqrt{\frac{C}{nL}} U_{\text{dc}}^2 + I_0^2 \sin(\omega t + \beta) \right] \quad (4)$$

式中: U_{dc} 为额定直流电压; I_0 为故障瞬间桥臂电流直流分量; $\tau_0 = 4L/R_{\text{stray}}$; $\omega_0 = \sqrt{n/(LC)}/2$; $\omega =$

$$\sqrt{n/(LC) - (R_{\text{stray}}/2L)^2}/2; \quad \beta = \arctan \frac{U_{\text{dc}}}{I_0} \sqrt{\frac{C}{nL}};$$

$$\alpha = \arctan \left[\sqrt{4nL/(CR_{\text{stray}}^2)} - 1 \right].$$

系统闭锁前子模块电容放电电流起到主导作用, 对于交流侧而言, 由于故障检测及系统闭锁时间很短, 一般只有几毫秒, 可以认为桥臂交流电流分量与稳态工作时一样, 且网侧三相相电压对直流短路点馈入电流相互抵消, 交流系统馈入仅造成桥

臂故障电流的增大。

综上所述, 闭锁前 A 相上、下桥臂流过的故障电流分别为

$$\begin{cases} i_{u0} = i_0 + \frac{i_s}{2} = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[\sqrt{\frac{C}{nL}} U_{\text{dc}}^2 + I_0^2 \cos(\omega t + \beta) \right] + \frac{I_m}{2} \sin(\omega_n t + \varphi) \\ i_{d0} = i_0 - \frac{i_s}{2} = e^{-\frac{t}{\tau_0}} \left[\sqrt{\frac{C}{nL}} U_{\text{dc}}^2 + I_0^2 \cos(\omega t + \beta) \right] - \frac{I_m}{2} \sin(\omega_n t + \varphi) \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_s 为阀侧交流相电流; I_m 、 φ 分别为其峰值与相位; ω_n 为工频角速度。

从以上公式中可以看出, 闭锁前故障电流与桥臂电感 L 、半桥子模块电容 C 等参数有关, 通过合理的设置这些参数可以适当减小故障电流的大小。另外, 由于放电回路阻抗较小, 桥臂电流急剧增大并迅速超过换流阀保护阈值, 触发换流阀闭锁。

2.2 闭锁后故障机理分析

当系统检测到直流双极短路故障发生后, 同时闭锁半桥子模块与阻尼模块中的 IGBT, 此后电容不再放电, 故障电流开始衰减。由于二极管的单向导电性, 当某一桥臂电流衰减至零时, 该桥臂电流会出现断续, 直到 6 个桥臂均出现电流断续的现象, 系统逐渐进入稳态。这个过程可近似认为三相对称, 对每相单独进行分析。据上述分析, 闭锁后直流短路故障的发展过程可以分为 3 个阶段:

1) 阶段 I, 上下桥臂电流逐渐衰减且均连续。

2) 阶段 II, 上下桥臂电流继续衰减并且出现断续。

3) 阶段 III, 上下桥臂电流衰减至稳态。

换流器闭锁后单相上下桥臂电流波形以及整个过程中可能存在的等效电路如图 3 所示。 u_s 为网侧交流相电压; L_{eq} 、 R_{eq} 分别是交流电源与阀侧电压之间的等值电感与电阻; R_d 为阻尼电阻, 且 $R = R_d + R_{\text{stray}}/2$; D_u 和 D_d 分别代表上、下桥臂所有子模块中下管的反并联二极管。

2.2.1 阶段 I

这一阶段上下桥臂电流均连续, 等效电路如图 3(b)。换流器闭锁后电容放电回路转换成电感续流回路, 同时三相交流系统短路电流通过反并联二极管流入桥臂中。

回路方程如下:

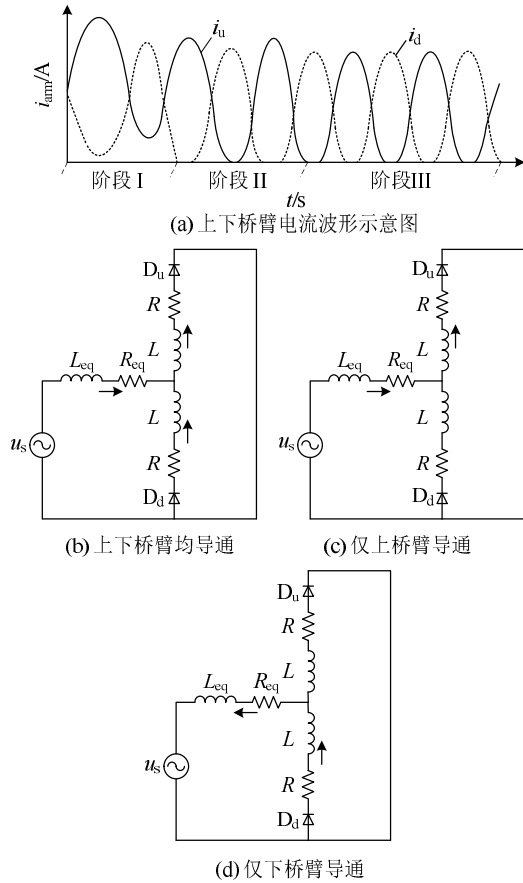


图3 换流器闭锁后的桥臂电流波形及各等效电路

Fig. 3 The arm current waveforms and equivalent circuits after blocking the converter

$$\begin{cases} i_{u1} = i_{dc1} + \frac{i_{s1}}{2} \\ 2L \frac{di_{dc1}}{dt} + 2Ri_{dc1} = 0 \\ (L_{eq} + \frac{L}{2}) \frac{di_{s1}}{dt} + (R_{eq} + \frac{R}{2})i_{s1} = U_m \sin(\omega_n t + \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_{u1} 、 i_{d1} 和 φ 分别为上、下桥臂的电流及电网相电压的初始相位; i_{dc1} 为上桥臂电流的直流分量; $i_{s1}/2$ 为上桥臂电流的交流分量。

初始状态如下:

$$\begin{cases} i_{dc1}(0+) = i_{dc1}(0-) = I_{dc0} \\ i_{s1}(0+) = i_{s1}(0-) = I_{s0} \end{cases} \quad (7)$$

经推导, 这一阶段上、下桥臂电流的表达式为

$$\begin{cases} i_{u1} = I_{dc0} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + [\frac{I_{s0}}{2} - \frac{U_m}{2|Z_1|} \sin(\gamma_1 + \varphi)] e^{-\frac{t}{\tau_{10}}} + \frac{U_m}{2|Z_1|} \sin(\omega_n t + \gamma_1 + \varphi) \\ i_{d1} = I_{dc0} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - [\frac{I_{s0}}{2} - \frac{U_m}{2|Z_1|} \sin(\gamma_1 + \varphi)] e^{-\frac{t}{\tau_{10}}} - \frac{U_m}{2|Z_1|} \sin(\omega_n t + \gamma_1 + \varphi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tau_1 = L/R$; $\tau_{10} = (L_{eq} + L/2)/(R_{eq} + R/2)$; $|Z_1| = \sqrt{(R_{eq} + R/2)^2 + \omega_n^2 (L_{eq} + L/2)^2}$; $\gamma_1 = -\arctan(\omega_n \cdot \tau_{10})$ 。

加入阻尼电阻后, 直流续流回路的衰减时间常数减小, 从而可加快桥臂电流的衰减速度; 另外, 加入阻尼电阻可使交流电流回路的总阻抗变大, 使得交流分量的幅值减小, 从而可减小器件的电流应力, 提高器件的安全性。

当桥臂直流分量在较短时间内衰减至小于于桥臂交流分量时, 桥臂电流将反向, 但由于回路中二极管的单向导通性, 桥臂电流会出现断续的情况。

2.2.2 阶段 II

当某一桥臂出现电流断续的情况时, 进入阶段 II。若下桥臂电流首先降为零, 则下桥臂电流将出现断续, 而当下桥臂所承受的电压反向时, 又将重新流过电流。这一阶段等效电路切换示意图如图 4 所示。

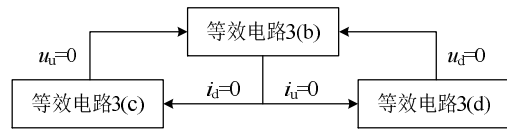


图4 阶段 II 等效电路切换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the equivalent circuit switching process in phase II

下面将以下桥臂电流首先断续为例, 分别对阶段 II 的各种情况进行分析:

1) 情况一, 下桥臂电流降为零, 上桥臂电流尚未降为零。

此时系统等效电路如图 3(c) 所示, 回路方程为

$$\begin{cases} R_{eq} i_{u21} + L_{eq} \frac{di_{u21}}{dt} + L \frac{di_{u21}}{dt} + Ri_{u21} = U_m \sin(\omega_n t + \varphi_{21}) \\ i_{d21} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

初始状态如下:

$$i_{u21}(0+) = i_{u21}(0-) = I_{s1} \quad (10)$$

经推导, 可得上、下桥臂电流的表达式:

$$\begin{cases} i_{u21} = [I_{s1} - \frac{U_m}{|Z_{21}|} \sin(\varphi_{21} + \gamma_{21})] e^{-\frac{t}{\tau_{21}}} + \frac{U_m}{|Z_{21}|} \sin(\omega_n t + \varphi_{21} + \gamma_{21}) \\ i_{d21} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\tau_{21} = (L + L_{eq})/(R + R_{eq})$; $\gamma_{21} = -\arctan(\omega_n \tau_{21})$; $|Z_{21}| = \sqrt{(R + R_{eq})^2 + \omega_n^2 (L + L_{eq})^2}$ 。

当上桥臂承受的电压降为零时, 下桥臂承受的电压将反向, 此时下桥臂电流将从零开始上升, 进

入下一种情况，这个过程的截止条件如下：

$$u_u(t_{21}) = 0 \quad (12)$$

2) 情况二，下桥臂电流从零开始上升，上桥臂电流尚未降至零。

此时等效回路如图 3(b)所示，回路方程如下：

$$\begin{cases} Ri_{u22} + L \frac{di_{u22}}{dt} + Ri_{d22} + L \frac{di_{d22}}{dt} = 0 \\ R_{cq}(i_{u22} - i_{d22}) + L_{cq} \frac{d(i_{u22} - i_{d22})}{dt} + L \frac{di_{u22}}{dt} + Ri_{u22} = U_m \sin(\omega_n t + \varphi_{22}) \end{cases} \quad (13)$$

初始状态如下：

$$\begin{cases} i_{u22}(0+) = i_{u22}(0-) = I_{s2} \\ i_{d22}(0+) = i_{d22}(0-) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

经推导，可得上、下桥臂电流的表达式：

$$\begin{cases} i_{u22} = \frac{1}{2} I_{s2} e^{-\frac{t}{\tau_{220}}} + \left[\frac{U_m}{|Z_{22}|} \sin(\varphi_{22} + \gamma_{22}) - \frac{1}{2} I_{s2} \right] e^{-\frac{t}{\tau_{22}}} + \frac{U_m}{|Z_{22}|} \sin(\omega_n t + \varphi_{22} + \gamma_{22}) \\ i_{d22} = \frac{1}{2} I_{s2} e^{-\frac{t}{\tau_{220}}} - \left[\frac{U_m}{|Z_{22}|} \sin(\varphi_{22} + \gamma_{22}) - \frac{1}{2} I_{s2} \right] e^{-\frac{t}{\tau_{22}}} - \frac{U_m}{|Z_{22}|} \sin(\omega_n t + \varphi_{22} + \gamma_{22}) \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\tau_{220} = L/R$ ； $\tau_{22} = (L + 2L_{cq})/(R + 2R_{cq})$ ； $Z_{22} = \sqrt{(R + 2R_{cq})^2 + \omega_n^2(L + 2L_{cq})^2}$ ； $\gamma_{22} = -\arctan(\omega_n \tau_{22})$ 。

这一情况的截止条件如下：

$$i_{u22}(t_{22}) = 0 \quad \text{or} \quad i_{d22}(t_{22}) = 0 \quad (16)$$

接下来的发展过程与上述 2 种情况类似，此处不再逐一分析。因此阶段 II 上下桥臂电流的表达式可根据上述分析方法得到，经过一段时间，上下桥臂电流将完全对称，进入稳态阶段。

阶段 II 的截止条件如下：

$$i_{u\max} \approx i_{d\max} \quad (17)$$

2.2.3 阶段 III

这一阶段为稳态阶段，上下桥臂电流不再衰减，表达式一致且相位差 180°。阶段 III 的故障机理分析也可分为 4 种情况，与阶段 II 的分析过程类似。由于这一阶段上下桥臂电流波形对称，只需对其中的半个周期进行分析即可。同时，这一阶段的求解过程可独立进行，不依赖于前面几个阶段的求解结果，其初始状态可由下式得到：

$$i_{u3}(t_0) = i_{d3}(t_0 + T/2) \quad (18)$$

稳态阶段桥臂电流中存在直流偏置，这是由于

桥臂电抗续流的作用。求解得到每种情况下的上下桥臂电流表达式后，通过对任意工频周期内的桥臂电流求取平均值即可以得到桥臂电流的直流偏置量。进而可得到阶段 III 的直流电流，表达式如下：

$$I_{dc3} = \frac{3}{T} \int_{t_0}^{t_0+T/2} (i_{u3} + i_{d3}) dt \quad (19)$$

式中： i_{u3} 、 i_{d3} 分别为这一阶段的上下桥臂电流； t_0 为积分初始时刻； T 为工频周期。

2.3 交流断路器跳闸后故障机理分析

交流断路器跳闸后，换流器与交流系统的连接断开，因此各桥臂以及直流侧的电流只包含交流断路器断开前桥臂电流的直流偏置在回路中的续流部分。此时等效电路如图 5 所示，以单相为例。

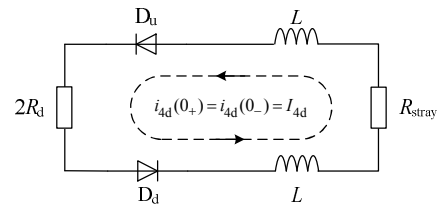


图 5 交流断路器断开后的等效电路模型

Fig. 5 The equivalent circuit after tripping the AC circuit breakers

桥臂电流的表达式如下：

$$i_{u4} = i_{d4} \approx I_{d4} e^{-(t/\tau_4)} \quad (20)$$

式中： I_{d4} 为交流断路器断开瞬间的桥臂电流值； $\tau_4 = 2L/(2R_d + R_{stray})$ 。

而直流侧电流的表达式如下：

$$i_{dc4} = 3I_{d4} e^{-\frac{t}{\tau_4}} \quad (21)$$

交流断路器断开后，由于桥臂阻尼模块中阻尼电阻的存在，回路电流的衰减时间常数明显减小，使得故障电流迅速衰减至零附近，从而直流隔离开关可在较短时间内动作，将故障点隔开。

3 仿真结果

3.1 仿真系统说明

为了验证所建立的解析模型的准确性，基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了具有桥臂阻尼的 HBMMC 的单端系统仿真模型，系统结构图如图 6 所示。其中 MMC 为整流站，具体拓扑结构如图 1 所示，控制策略采用定直流电压/定无功功率控制，直流侧接电阻作为负荷。系统参数见表 1。

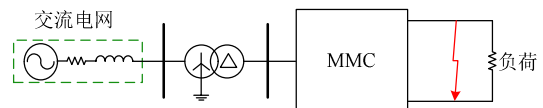


图 6 仿真系统结构图

Fig. 6 Diagram of the simulation system

表 1 系统参数

Tab. 1 Circuit parameters of the MMC transmission system.

参数	额定直流 母线电压/kV	额定 容量/MVA	网侧线电压 (RMS)/kV	变压器 容量/MVA	变压器(Δ/Yn) 变比/kV	变压器 漏抗/pu	桥臂 电感/mH	子模块 电容/mF	阻尼电阻 (单桥臂)/ Ω	半桥子模块 个数(单桥臂)/个
数值	± 200	100	115	120	115/208.2	0.07	350	2	15	264

3.2 仿真实证

首先对比分析了含桥臂阻尼的 HBMMC 系统与传统 HBMMC 系统的直流双极短路故障特性。系统稳态运行于 0.2 s 时发生直流双极短路故障，2 ms 后换流器闭锁，0.3 s 时交流断路器动作。

图 7 给出了传统 HBMMC 与含桥臂阻尼的 HBMMC 系统故障期间的仿真对比波形。从图中可以看出，相比传统 HBMMC，含桥臂阻尼的 HBMMC 在故障期间的直流电流衰减速度较快，在 0.4 s 附近直流电流已衰减至零。其次，相比传统 HBMMC，含桥臂阻尼的 HBMMC 在换流器闭锁后交流电流的衰减速度较快且电流峰值也略小。

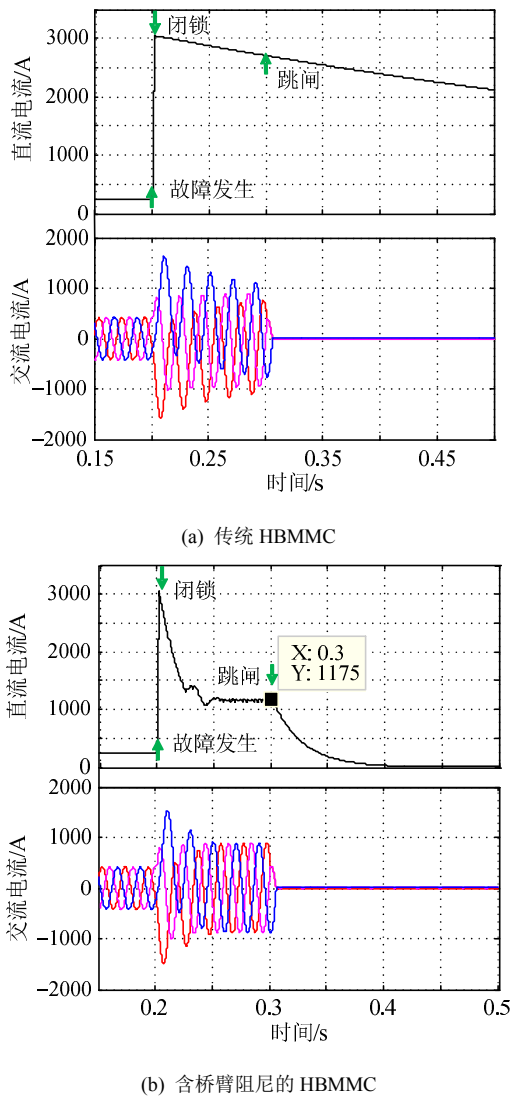


图 7 直流双极短路故障仿真波形

Fig. 7 The simulated waveforms under DC pole-to-pole short circuit fault

另外，由于含桥臂阻尼的 HBMMC 由于故障电流衰减速度较快，在交流断路器动作前进入稳态，与前面的理论分析一致。从图 7(b)中可以读取得到衰减至稳态时的直流电流值为 1175 A，而通过式(20)计算得到的这一阶段的直流电流值为 1137.6 A，相差约 3%，两者较为接近，证明理论分析中的解析方法较为准确。

为进一步验证解析模型的准确性，图 8 给出了故障期间的 A 相上、下桥臂电流的仿真和计算波形。从图 8 中可以看出，从直流短路故障发生至故障衰减为零的整个过程中，上、下桥臂电流的仿真与计算结果均较为吻合，证明本文建立的直流双极短路故障的解析模型具有可行性与准确性。

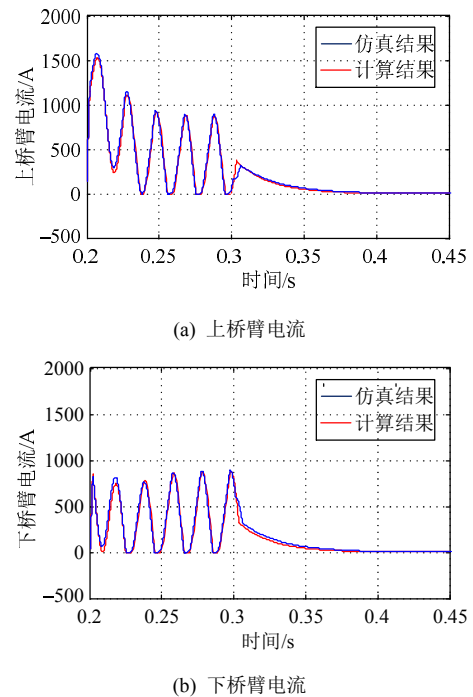


图 8 A 相上下桥臂电流仿真波形与计算波形对比

Fig. 8 The simulated and calculated waveform comparison of arm current of phase A

3.3 阻尼电阻的选取原则

另外，通过该解析模型可以进一步给出阻尼电阻值的选取原则。

由第 2 节的分析可知，故障后加入阻尼电阻可以抑制故障电流且加快故障电流衰减速度。图 9 给出了直流双极短路故障后不同阻尼电阻值下的直流电流衰减曲线；图 10 给出了直流电流衰减时间与阻尼电阻的关系曲线。从图中可以看出电流的衰

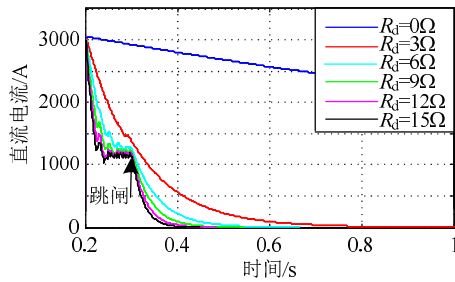


图9 不同阻尼电阻值下的直流电流衰减曲线

Fig. 9 The DC current decay curves under different damping resistances after fault

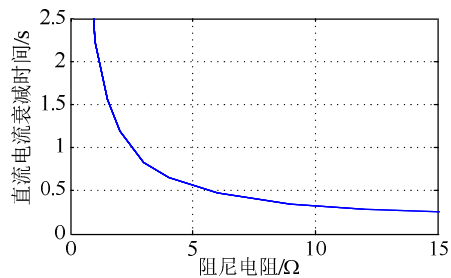


图10 直流电流衰减时间与阻尼电阻的关系曲线

Fig. 10 The relationship curve between DC current fault current decay time with damping resistance

减时间随着阻尼电阻的增大而减小。当 R_d 较大时 ($R_d > 3\Omega$), 直流电流在交流断路器断开前会进入稳态阶段, 出现电流平台, 在交流断路器断开时刻的瞬时值近似相等, 所以阻尼电阻主要影响交流断路器断开后的电流衰减时间。由于交流断路器的响应时间固定, 随着阻尼电阻的增加, 电流衰减时间减小, 并趋近于交流断路器的响应时间。

其次, 阻尼电阻的选取需考虑到阻尼模块的损耗。通过所提出的解析模型, 可以计算得出故障后流过阻尼电阻的电流。进一步地, 可以通过积分求得阻尼电阻所消耗的能量。图 11 给出了不同阻尼电阻下的损耗曲线, 从图中可以看出, 电阻越大, 损耗越大。

综上所述, 阻尼电阻的选取应综合考虑电流衰减时间与阻尼电阻的损耗等因素, 从故障电流衰减

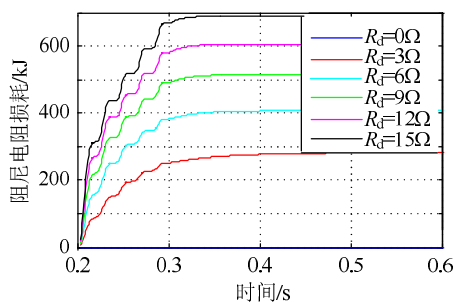


图11 不同阻尼电阻下的阻尼电阻损耗曲线

Fig. 11 The damping resistance loss curve under different damping resistors

时间的角度考虑, 阻尼电阻取值越大越好; 但从阻尼电阻损耗的角度考虑, 阻尼电阻取值越小越好, 实际中应结合工程的具体要求进行折中选取。

另外, 得到桥臂总阻尼电阻值后, 需根据阻尼模块中开关器件能承受的电压等级、散热、占地面积等因素确定阻尼模块的数量。在确定单个桥臂中半桥子模块和阻尼模块的数量后, 一般根据单个桥臂的阀塔数量对半桥子模块与阻尼模块进行平均分配, 此外也可将阻尼模块配置在与半桥子模块相邻的位置, 以便阻尼模块的控制电路可以从相邻半桥子模块取电^[23]。

4 结论

本文深入分析了基于含桥臂阻尼的柔性直流输电系统 HBMMC 的直流双极短路故障过程, 进而建立了直流双极短路故障后各阶段的解析模型。最后通过仿真验证了该解析模型的可行性与准确性。

通过分析得出, 阻尼电阻可有效加快故障电流在换流器闭锁后的衰减速度, 同时减小器件的电流应力; 另一方面, 阻尼电阻的损耗随着阻值的增大而增大, 阻尼电阻值的选取应综合考虑故障电流衰减时间与阻尼电阻的损耗等因素。该解析模型不仅有助于深入理解直流双极短路故障的过程, 还能快速预测故障电流从而为阻尼电阻的选取提供理论依据。

参考文献

- [1] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [2] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
Xu Zheng, Chen Hairong. Review and application of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10(in Chinese).
- [3] 马为民, 吴方劼, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
Ma Weimin, Wu Fangjie, Yang Yiming, et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439(in Chinese).
- [4] Perez MA, Bernet S, Rodriguez J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [5] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Pang Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14(in Chinese).
- [6] Nami A, Liang J, Dijkhuizen F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36(in Chinese).

- [7] 张建坡, 赵成勇, 孙一莹, 等. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1732-1738.
Zhang Jianpo, Zhao Chengyong, Sun Yiyong, et al. Research on topological structure and control strategy for voltage source converter-based direct current power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1732-1738(in Chinese).
- [8] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2012-2019.
Wang Yi, Liu Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2012-2019(in Chinese).
- [9] Tang G, Xu Z, Zhou Y. Impacts of three MMC-HVDC configurations on AC system stability under DC line faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3030-3040.
- [10] Liu G, Xu F, Xu Z, et al. Assembly HVDC breaker for HVDC grids with modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.
- [11] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681-2694.
Wu Jing, Yao Liangzhong, Wang Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 张建坡, 赵成勇, 黄晓明, 等. 基于模块化多电平高压直流输电系统接地故障特性仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2658-2664.
Zhang Jianpo, Zhao Chengyong, Huang Xiaoming, et al. Simulation research on earth fault characteristics of modular multilevel converter based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2658-2664(in Chinese).
- [14] Zhang G, Chen Y, Yue C, et al. DC pole-to-pole short-circuit behavior analysis of modular multilevel converter[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 14-18.
- [15] 薛英林, 徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63-70.
Xue Yinglin, Xu Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70(in Chinese).
- [16] Ahmed N, Angquist L, Mahmood S, et al. Efficient modeling of an MMC-based multi-terminal DC system employing hybrid HVDC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1792-1801.
- [17] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
Kong Ming, Tang Guangfu, He Zhiyuan, et al. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351(in Chinese).
- [18] Cui S, Kim S, Jung J J, et al. Principle, control and comparison of modular multilevel converters (MMCs) with DC short circuit fault ride-through capability[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Fort Worth, Texas, USA: IEEE, 2014: 16-20.
- [19] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
Zhao Chengyong, Chen Xiaofang, Cao Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC and DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1933-1943.
Luo Yongjie, Li Yaohua, Li Zixin, et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1933-1943(in Chinese).
- [22] 曹冬明, 谢晔源, 邵震霞, 等. 一种直流输电保护装置、换流器及保护方法[P]. 中国专利: CN104009446A, 2014-08-27.
- [23] 张建, 范彩云, 姚钊, 等. 一种柔性直流换流阀及其桥臂阻尼模块取能电路[P]. 中国专利: CN105281545A, 2016-01-27.



马焕

收稿日期: 2016-09-08。

作者简介:

马焕(1990), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电技术, E-mail: mahuan1224@126.com;
姚为正(1967), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电换流阀技术、交流柔性输电技术(FACTS)等;

吴金龙(1981), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电技术。

(责任编辑 王金芝)