

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181229

# 混合式高压直流断路器暂态分断特性及其参数影响分析

王振浩, 田奇, 成龙, 李国庆

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 混合式高压直流断路器(DC Circuit Breaker, DCCB)的本质是分断故障电流。分断暂态过程中的电气参数是决定断路器分断性能的核心所在。在分析 DCCB 拓扑结构的基础上, 将断路器分断暂态过程划分为三个阶段。通过建立带 DCCB 的直流电网故障等效电路和断路器分断各暂态阶段的系统级等效电路, 来分析分断过程中断路器自身的暂态特性。将断路器自身参数与直流系统参数联合起来, 分别对断路器的两次换流过程进行详细分析。建立了断路器分断电流、暂态电压和开断时间的数学模型, 推导断路器分断全过程中的分断电流以及最大暂态电压的计算表达式, 并分析了断路器参数对分断性能的影响情况。利用 PSCAD/EMTDC 软件, 搭建系统级混合式 DCCB 仿真模型, 验证了所建立的断路器暂态模型的正确性及参数选取对断路器开断性能的影响。

**关键词:** 直流电网; 混合式高压直流断路器; 分断暂态特性; 影响因素

## Transient breaking characteristics and its parameter influence analysis of hybrid DC circuit breaker

WANG Zhenhao, TIAN Qi, CHENG Long, LI Guoqing

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The essence of DC circuit breaker (DCCB) is to break the fault current. The electrical parameters in transient breaking process are the core expression which determines the breaking characteristics of circuit breaker. In this paper, based on the analysis of DCCB topology, the transient process of breakers is divided into three stages. The transient characteristics of the circuit breakers in the breaking process are analyzed by establishing the fault equivalent circuit for the DC grid with DCCB and the system level equivalent circuit for breaker at different breaking transient states. Combining the parameters of the circuit breaker with the parameters of the DC system, the two flow process of the circuit breaker is analyzed in detail. The mathematical model of breaking current, transient voltage and breaking time is established, and the calculation expression of the breaking current and the maximum transient voltage in the whole process of breaking the circuit breaker is derived. The influence of circuit breaker parameters on breaking performance is analyzed. By using PSCAD/EMTDC, a system level hybrid DCCB simulation model is built to verify the transient model of circuit breaker and the influence of parameters selection on the interruption performance of the circuit breaker.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902401) and Science and Technology Department of Jilin Province (No. 20160307014GX).

**Key words:** DC grid; hybrid DC circuit breaker (DCCB); transient breaking characteristics; influence factors

## 0 引言

随着风能、太阳能等新能源的迅速发展以及对环境问题的不断重视, 高压直流输电(High Voltage Direct Current Transmission, HVDC)以其线路功率损耗低、有功及无功功率调节比较容易, 且与传统交

流输电相比运行稳定性更高等优势, 更适合实现远距离、大容量的电能传输<sup>[1-4]</sup>。因此, HVDC 越来越受到产学研各界的广泛关注。

为满足可再生能源高渗透率的要求, HVDC 电网的规模逐渐庞大, 将对整个系统的运行可靠性和稳定性提出更高要求, 而短路故障则是影响系统安全稳定的最常见情况。直流电网与交流电网相比, 整体电抗更小, 而直流侧电容较大, 短路故障发生时, 短路电流的上升速率更快、幅值更高, 并伴随

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902401); 吉林省科技厅项目资助(20160307014GX)

着直流电压的迅速跌落，VSC 换流站将不能正常工作，直流电网面临整体停运危险<sup>[5-7]</sup>。DCCB 作为能够快速切除故障电流、防止电网失稳和大规模停运的关键设备，已成为高压输电线路不可或缺的一部分<sup>[8-11]</sup>。

DCCB 可分为机械式、固态式和混合式 3 类。机械式 DCCB 在断开时两端将产生电弧，因此分断速度较慢，故障电流切除时间较长，且电弧有重燃可能。同时，机械开关反复开断容易磨损开关触头，使其使用寿命大大缩短；由于单体电力电子开关额定电压、电流较小，因此固态式 DCCB 需要串并联非常多的电力电子开关，使断路器成本大幅提高，经济性较差。另外，固态开关的通态损耗较大，使 HVDC 系统正常运行时的电能损耗较大，不适合大面积推广；混合式 DCCB 综合了前两类的优点，既能相对较快地实现无弧分断故障线路，又能保证系统正常运行时的通态损耗较小，一定程度上提高了系统的运行经济性，适合大面积推广应用<sup>[12-15]</sup>。

2012 年，ABB 公司提出基于高速机械开关和 IGBT 串联的混合式高压直流断路器，并完成了 80 kV/5 ms/9 kA 样机的研制<sup>[16]</sup>。2013 年，Alstom 公司提出基于晶闸管的超快速混合式高压直流断路器，研制出该模型的 120 kV/5.5 ms/5.2 kA 样机并通过了试验测试<sup>[17]</sup>。2015 年和 2016 年底，全球能源互联网研究院和南瑞继保公司也先后研制出 200 kV/3 ms/15 kA 和 500 kV/3 ms/25 kA 的混合式直流断路器样机。文献 [18] 提出了一种基于电力电子复合开关的混合式直流断路器，并对断路器的设计参数进行了简要说明，没有对数学模型的详细分析计算。文献 [19] 对应用于中压系统的自然换流型混合式直流断路器分断过程和暂态性能进行了定性分析。目前，国内外对 DCCB 分断电网故障的参数研究相对较少，没有对断路器分断的具体暂态过程和直流电网对断路器配置的参数要求进行详细论证，缺乏对断路器动态参数和影响因素的分析<sup>[20-22]</sup>。

本文将直流电网与直流断路器相结合，综合考虑系统及断路器内部参数，建立电网故障情况下 DCCB 暂态数学模型，分析电网对 DCCB 参数的要求，研究混合式 DCCB 运行时的暂态过程，分析参数对断路器开断的影响情况，为直流断路器的设计和应用提供了必要参考。

### 1 DCCB 拓扑及工作原理

混合式 DCCB 主要分为自然换流型和强制换流型两种。前者依靠机械开关分断产生的弧压高于固态开关支路的导通压降将电流换流，过程中不能实现无弧分断，且若弧压不足，电流可能无法正常转

移；后者通过高速机械开关和少量的电力电子开关实现换流，能够快速完成内部支路的电流转移，且机械开关分断过程中没有电弧产生<sup>[23-24]</sup>。该类型 DCCB 分断速度快，可靠性和实用性更高，因此本文仅以强制换流型混合式直流断路器为研究对象，分析其暂态开断特性及参数配置方法。

强制换流型混合式 DCCB 基本结构如图 1 所示，其内部由载流转移支路、固态开关支路及缓冲吸能支路并联而成。载流转移支路由高速机械开关和载流转移开关构成，载流转移开关包含的 IGBT 数量很少，其正常工作时的断路器通态损耗较小；固态开关支路由若干电力电子开关串联；吸能支路由金属氧化物压敏电阻(Metal Oxide Varistor, MOV)串联构成，能够降低固态开关分断过程中的暂态电压并吸收电路中的剩余能量<sup>[25]</sup>。

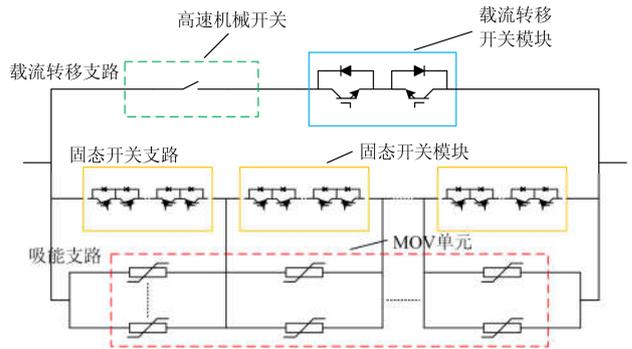


图 1 强制换流型混合式 DCCB 拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of forced current commutation type hybrid DCCB

在电网正常运行情况下，电流流经载流转移支路，固态开关支路处于关断状态。故障发生时，载流转移支路中的载流转移开关首先断开，当断路器两端电压增大至超过固态开关的正向导通压降时，电流将转移至固态开关支路，此时机械开关断开，由于载流转移支路没有电流通过，能够实现机械开关的无弧分断。当机械开关断开至安全开距，固态开关断开，电流转移至吸能支路并衰减，MOV 吸收系统中的剩余能量并耗散，最终实现故障电流的完全开断。

### 2 DCCB 分断暂态特性数学模型

为更加清晰准确地分析 DCCB 分断的暂态特性，根据 DCCB 内部支路的动作特点，将其分断暂态过程分为 3 个阶段：第一阶段是故障发生后固态转移开关断开至电流开始转移；第二阶段是电流开始转移至固态开关关断；第三阶段是吸能支路导通

至故障电流完全开断。

## 2.1 DCCB 分断电压、电流计算

为保证断路器在任何情况下都能正常工作, 考虑电网最严重的故障情况, 即在换流站出口发生双极短路故障。故障电流成分包括直流侧电容放电电流和交流侧馈入的短路电流两部分, 其中子模块电容放电电流是其成分<sup>[26-28]</sup>。将换流阀中放电的子模块电容等效为直流电源, 将馈入短路电流的交流系统等效为交流电源, 双极短路故障下带 DCCB 的双端柔性直流系统等效电路如图 2 所示。其中,  $R_s$  为交流侧的等值电阻;  $L_s$  为交流侧的等值电感;  $L_{arm}$  为桥臂等值电感;  $L_k$  为限流电抗;  $L_{line}$ 、 $R_{line}$  分别为线路的电抗和电阻。

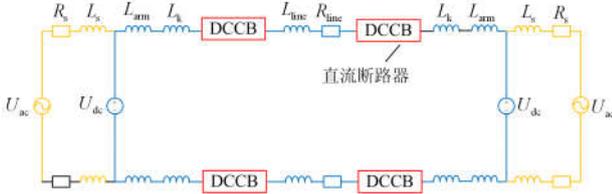


图 2 带 DCCB 的双端 HVDC 双极短路故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DC pole-to-pole fault of two-terminal HVDC with DCCB

三个阶段的直流侧、交流侧等效电路分别如图 3、图 4 所示。根据图 3、图 4 分别求解交流三相短路电流分量和直流侧电容放电短路电流分量。

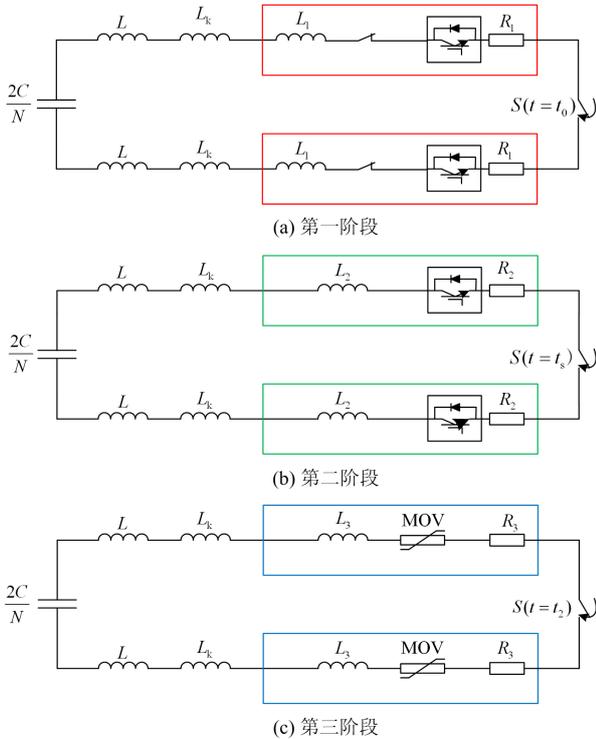


图 3 DCCB 分断暂态阶段直流侧等效电路

Fig. 3 DC equivalent circuit for transient state of DCCB breaking

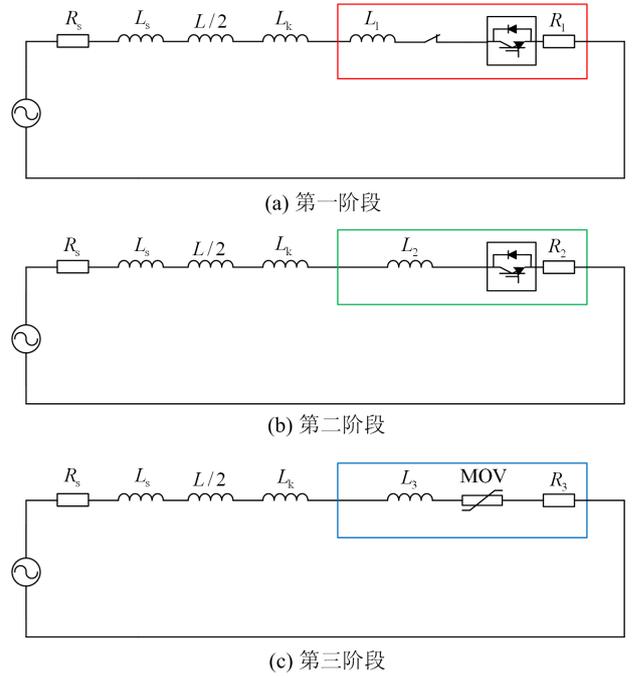


图 4 DCCB 分断暂态阶段交流侧等效电路

Fig. 4 AC equivalent circuit for transient state of DCCB breaking

假设短路故障发生在  $t = t_0$  时刻, 每相上下桥臂的桥臂电感为  $L$ 。DCCB 中三个支路的杂散电感分别用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  表示, 电感大小与支路中器件的等值杂散电感、连接器件的导线长度有关。三个支路的等效电阻为各支路内器件通态和开关损耗的等值杂散电阻, 分别用  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  表示。

### 1) 第一次换流过程

设定第一阶段初始条件:

$$\begin{cases} u_c(t_{0+}) = u_c(t_{0-}) = U_{dc} \\ i(t_{0+}) = i(t_{0-}) = I_0 \end{cases} \quad (1)$$

直流侧电容电压可表示为

$$u_c = e^{-\delta(t-t_0)} \left[ U_{dc} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \omega t_0 + \beta) - \frac{I_0 N}{2C\omega} \sin \omega(t - t_0) \right] \quad (2)$$

式中:  $\omega_0 = \sqrt{N / [4(L + L_1 + L_k)C]}$ ;  $\delta = R_1 / [2(L + L_1 + L_k)]$ ;  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ;  $\beta = \arctan(\omega / \delta)$ 。

则直流侧电流为

$$i = e^{-\delta(t-t_0)} \left[ \frac{U_{dc}}{2\omega(L + L_1 + L_k)} \sin \omega(t - t_0) - \frac{I_0 \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \omega t_0 - \beta) \right] \quad (3)$$

其整定值为

$$I_{10} = e^{-\delta(t_1-t_0)} \left[ \frac{U_{dc}}{2\omega(L+L_1+L_k)} \sin \omega(t_1-t_0) - I_0 \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_1 - \omega t_0 - \beta) \right] \quad (4)$$

此时, 电容电压为

$$U_{C10} = e^{-\delta(t_1-t_0)} \left[ U_{dc} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_1 - \omega t_0 + \beta) - \frac{I_0 N}{2C\omega} \sin \omega(t_1 - t_0) \right] \quad (5)$$

直流侧电流、电压分别为

$$I_{11} = e^{-\delta(t_1+t_j-t_0)} \left[ \frac{U_{dc}}{2\omega(L+L_1+L_k)} \sin \omega(t_1+t_j-t_0) - I_0 \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_1 + \omega t_j - \omega t_0 - \beta) \right] \quad (6)$$

$$U_{C11} = e^{-\delta(t_1+t_j-t_0)} \left[ U_{dc} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_1 + \omega t_j - \omega t_0 + \beta) - \frac{I_0 N}{2C\omega} \sin \omega(t_1 + t_j - t_0) \right] \quad (7)$$

式中,  $t_j$  为故障判断时间, 表示从二次系统信号发出到断路器响应的的时间。

下面分析此阶段交流侧馈入的短路电流。直流侧线路发生短路故障时, 交流系统相当于发生三相短路故障, 由于电路三相对称, 只分析 a 相的短路电流。设 a 相电源电压  $u_{sa} = U_m \sin(\omega_s t + \alpha)$ , 其中,  $U_m$  为电源相电压幅值,  $\omega_s$  为电源角频率。交流侧短路电流的瞬时值满足如下微分方程:

$$(L_s + \frac{L}{2} + L_k + L_1) \frac{di_a}{dt} + (R_s + R_1) i_a = U_m \sin(\omega_s t + \alpha) \quad (8)$$

微分方程的解由稳态强制分量  $i_{\infty a}$  和以指数衰减的自由分量  $i_{\alpha a}$  组成。则交流侧 a 相短路电流为

$$i_a = i_{\infty a} + i_{\alpha a} \quad (9)$$

$$i_{\infty a} = \frac{U_m}{Z_1} \sin(\omega_s t + \alpha - \varphi_1) \quad (10)$$

式中:  $Z_1 = \sqrt{(R_s + R_1)^2 + \omega_s^2 (L_s + L/2 + L_k + L_1)^2}$ ;  $\varphi_1 = \arctan[\omega_s (L_s + L/2 + L_k + L_1) / (R_s + R_1)]$ 。

$$i_{\alpha a} = \left[ \frac{U_m}{Z_{|0|}} \sin(\omega_s t_0 + \alpha - \varphi_{|0|}) - \frac{U_m}{Z_1} \sin(\omega_s t_0 + \alpha - \varphi_1) \right] \cdot e^{-(t-t_0)/\tau_{a1}} \quad (11)$$

式中:

$$Z_{|0|} = \sqrt{(R_s + R_1 + 3R_{line})^2 + \omega_s^2 (L_s + \frac{L}{2} + L_k + L_1 + 3L_{line})^2};$$

$$\varphi_{|0|} = \arctan \left[ \frac{\omega_s (L_s + L/2 + L_k + L_1 + 3L_{line})}{R_s + R_1 + 3R_{line}} \right];$$

$$\tau_{a1} = (L_s + L/2 + L_k + L_1) / (R_s + R_1)。$$

第一阶段结束时 a 相短路电流值为

$$i_{a1} = i_{\infty a1} + i_{\alpha a1} \quad (12)$$

式中:  $i_{\infty a1} = \frac{U_m}{Z_1} \sin(\omega_s t_s + \alpha - \varphi_1)$ ;

$$i_{\alpha a1} = \left[ \frac{U_m}{Z_{|0|}} \sin(\omega_s t_0 + \alpha - \varphi_{|0|}) - \frac{U_m}{Z_1} \sin(\omega_s t_0 + \alpha - \varphi_1) \right] \cdot e^{(t_0-t_s)/\tau_{a1}}。$$

2) 第二次换流过程

第二阶段起始时刻为  $t = t_s$ , 令  $t_s = t_1 + t_j$ , 则第

二阶段初始条件为

$$\begin{cases} u_C(t_{s+}) = u_C(t_{s-}) = u_{C11} \\ i(t_{s+}) = i(t_{s-}) = I_{11} + i_{a1} \end{cases} \quad (13)$$

则直流侧电容电压和直流侧电流分别为

$$u_C = e^{-\delta(t-t_s)} \left[ U_{C11} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \omega t_s + \beta) - \frac{(I_{11} + i_{a1})N}{2C\omega} \sin \omega(t - t_s) \right] \quad (14)$$

$$i = e^{-\delta(t-t_s)} \left[ \frac{U_{C11}}{2\omega(L+L_2+L_k)} \sin \omega(t - t_s) - (I_{11} + i_{a1}) \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \omega t_s - \beta) \right] \quad (15)$$

式中:  $\delta = R_2 / [2(L+L_2+L_k)]$ ;

$$\omega_0 = \sqrt{N / [4(L+L_2+L_k)C]} \quad ; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad ;$$

$$\beta = \arctan(\omega / \delta)。$$

固态开关支路中 IGBT 的关断时刻为

$$t_2 = t_s + t_{transfer} + t_{switch} \quad (16)$$

式中:  $t_{transfer}$  为电流转移的时间;  $t_{switch}$  为机械开关打开至安全开距的时间。

第二阶段结束即固态开关关断时刻, 直流侧短路电流值为

$$I_2 = e^{-\delta(t_2-t_s)} \left[ \frac{U_{C11}}{2\omega(L+L_2+L_k)} \sin \omega(t_2 - t_s) - (I_{11} + i_{a1}) \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_2 - \omega t_s - \beta) \right] \quad (17)$$

$$(I_{11} + i_{a1}) \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega t_2 - \omega t_s - \beta)$$

此阶段交流侧短路电流的分析与第一阶段基本相同, 短路电流瞬时值同样满足式(8)。

则交流侧 a 相短路电流为

$$i_a = i_{\infty a} + i_{\alpha a} \quad (18)$$

$$i_{\infty a} = \frac{U_m}{Z_2} \sin(\omega_s t + \alpha - \varphi_2) \quad (19)$$

式中:  $Z_2 = \sqrt{(R_s + R_2)^2 + \omega_s^2 (L_s + \frac{L}{2} + L_k + L_2)^2}$ ;

$\varphi_2 = \arctan[\omega_s (L_s + L/2 + L_k + L_2) / (R_s + R_2)]$ 。

$$i_{\alpha a} = [i_{\alpha a1} - \frac{U_m}{Z_2} \sin(\omega_s t_s + \alpha - \varphi_2)] e^{-(t-t_s)/\tau_{a2}} \quad (20)$$

式中,  $\tau_{a2} = (L_s + L/2 + L_k + L_2) / (R_s + R_2)$ 。

第二阶段结束时交流侧 a 相短路电流值为

$$i_{a2} = \frac{U_m}{Z_2} \sin(\omega_s t_2 + \alpha - \varphi_2) +$$

$$[i_{\alpha a1} - \frac{U_m}{Z_2} \sin(\omega_s t_s + \alpha - \varphi_2)] e^{(t_s - t_2)/\tau_{a2}}$$

DCCB 分断过程中的故障电流极值, 即 DCCB 最终的开断电流为

$$I_{\text{open}} = 3(I_2 + i_{a2}) \quad (22)$$

断路器在整个分断过程中, 两端承受的最大电压为

$$U_{\text{max}} = \frac{1}{2} (L_{\text{all}} \frac{I_{\text{open}}}{T_{\text{off}}} + U_{\text{dc}}) \quad (23)$$

式中:  $L_{\text{all}} = 2L/3 + 2L_k + 2L_2$ ;  $T_{\text{off}}$  为固态开关支路中 IGBT 关断所需的时间。

## 2.2 DCCB 分断时间确定

DCCB 分断过程的总时间为

$$T_{\text{open}} = T_j + T_{\text{transfer}} + T_{\text{switch}} + T_{\text{absorption}} \quad (24)$$

式中:  $T_j$  为故障判断时间, 指故障电流上升至设定动作阈值后保护识别故障和发出信号到二次系统的响应时间;  $T_{\text{transfer}}$  为电流转移时间, 指固态转移开关关断后电流从载流转移支路转移至固态开关支路所需的时间;  $T_{\text{switch}}$  为机械开关分离时间, 指电流转移完毕后机械开关开始分离直至达到安全开距所需的时间;  $T_{\text{absorption}}$  为避雷器吸收能量持续时间, 指固态开关关断后, 电流在 MOV 中开始衰减至完全消失所需的时间。在这四个时间段中, 机械开关分断时间和避雷器吸收能量时间占较大比重。

混合式 DCCB 整体分断时间内的电流变化过程如图 5 所示。

$t_0$  到  $t_1$  的时间为短路故障发生、故障电流开始升高至达到保护整定值的时间。

由式(22)、式(23)可知, 如果要减小 DCCB 分断过程中的开断电流  $I_{\text{open}}$  和最大暂态电压  $U_{\text{max}}$ , 应尽可能缩短  $t_2$  时刻之前的时间长度, 即故障电流持续升高时间  $T_{\text{rise}}$ 。

$$T_{\text{rise}} = t_1 - t_0 + T_j + T_{\text{transfer}} + T_{\text{switch}} \quad (25)$$

当  $T_{\text{rise}}$  变小, DCCB 整机分断总时间  $T_{\text{open}}$  也将变小, 这说明断路器的整体分断速度更快、电网故障持续时间更短, 能够达到 DCCB 毫秒级分断时间的要求。

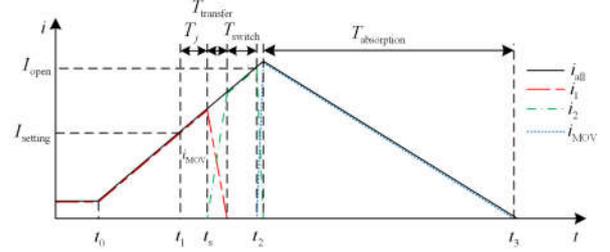


图 5 DCCB 整体分断时间的电流变化示意图

Fig. 5 Diagram of current change for overall time of DCCB breaking

## 3 断路器分断暂态过程影响因素分析

由式(22)可知, 断路器能否正常开断与时间参数、支路电感参数、电流参数、电压参数等因素有关。

在第一阶段中, 主要的影响因素是载流转移开关的最大关断电流、最大可承受电压及固态开关的导通压降。由式(3)可知, 故障发生后, 电网电流迅速增大, 当电流达到断路器设定的短路电流整定值时载流转移开关关断, 因此载流转移开关的最大关断电流应高于式(6)中  $I_{11}$  的值与式(12)中  $i_{a1}$  的值之和, 并留有一定的裕度, 以确保断路器的正常工作。固态转移开关关断后, 支路电流立刻下降, 由于载流转移支路的杂散电感  $L_1$  的存在, 断路器端电压  $U_{\text{break1}} = L_1 \cdot d(I_{11} + i_{a1})/dt$ , 因为时间  $T_{\text{transfer}}$  很短, 电流  $I_{11} + i_{a1}$  相对较大, 导致断路器两端产生的过电压  $U_{\text{break1}}$  较高。因此要求载流转移开关能够承受的电压大于  $U_{\text{break1}}$ , 防止载流转移开关损坏或击穿。载流转移支路中的载流转移开关关断后, 断路器两端电压迅速升高, 当端电压大于固态开关支路中固态开关的正向导通压降  $U_{\text{on}}$  时, 固态开关才能够导通。为了使固态开关尽快导通, 电流转移尽快完成, 因此要求固态开关的导通压降不能太高。

在第二阶段中, 主要的影响因素是固态开关的最大关断电流以及机械开关的安全开距。由式(15)可知, 在电流转移的这段时间内, 由于故障电流还没有分断, 流过整个断路器的总电流依然不断增大。固态开关实际关断的是电流转移完毕并且机械开关完全断开时刻的故障电流值。所以配置断路器时要求固态开关的最大关断电流大于此时刻的故障电流, 即式(22)中的  $I_{\text{open}}$ 。电流转移结束, 载流转移支路的电流降为 0 后, 机械开关开始分离, 固态开

关断前要求机械开关已经断开至安全开距。由式(22)和式(25)可知,机械开关到达安全开距所需的时间 $T_{\text{switch}}$ 越长,固态开关关断的时刻 $t_2$ 越晚,分断电流 $I_{\text{open}}$ 也越大,如果超过固态开关的最大关断电流,将影响断路器的正常安全开断。因此需要机械开关绝缘介质的恢复速度较快,机械开关的分离时间更短,保证固态开关能够关断机械开关分断至安全开距后的故障电流,避免固态开关模块发生损坏或击穿。

电感具有抑制电流变化的作用,电流转移回路中的杂散电感应是电流转移过程的影响因素之一。但对于强制换流型混合式直流断路器,由于载流转移开关模块中 IGBT 瞬间关断,载流转移支路电流能够在很短的时间内迅速降为 0。因此,载流转移支路和固态开关支路中的杂散电感 $L_1$ 和 $L_2$ 对电流转移的影响效果并不明显。

在第三阶段中,主要的影响因素是固态开关关断瞬间的故障电流值以及断路器的端电压。固态开关关断的电流 $I_{\text{open}}$ 越大,其经避雷器吸收的衰减时间 $T_{\text{absorption}}$ 越长,由式(25)可知,断路器整机分断的时间 $T_{\text{open}}$ 增大的更多,电网故障的持续时间更长,严重影响电网恢复正常运行的速度。固态开关关断时,电流从故障电流峰值迅速下降为 0,导致断路器两端出现很大的暂态电压。由式(23)可知,对既定参数的电网配置断路器时要求固态开关模块最大耐受电压大于 $U_{\text{max}}$ 的值。

#### 4 断路器暂态参数仿真分析

针对强制换流型混合式 DCCB 暂态开断特性,本文在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建双端 HVDC 系统仿真模型,对系统故障进行仿真分析。系统的仿真模型参数如表 1 所示。考虑直流系统最严重故障情况,设定在系统运行 2 s 时直流线路发生双极短路。同时搭建强制换流型混合式 DCCB 模型,并将其加入到双端 HVDC 模型中,组合成为完整的仿真模型。

表 1 MMC-HVDC 系统仿真参数

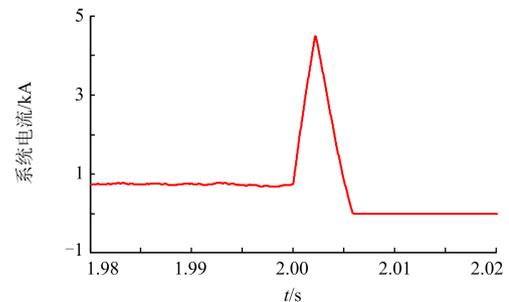
Table 1 Simulation parameters of MMC-HVDC system

参数名	数值
系统额定电压/kV	200
系统额定功率/MW	300
阀侧电感/p.u.	0.07
子模块电容/ $\mu\text{F}$	700
桥臂电感/mH	53
线路长度/km	101
线路电阻/ $(\Omega/\text{km})$	0.01
线路电感/(mH/km)	0.4

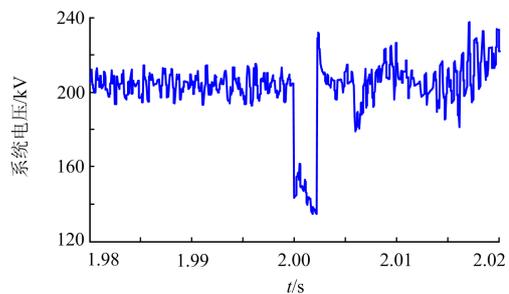
直流断路器的仿真参数如下:载流转移开关中采用 4.5 kV/2 kA 的 IGBT 进行反串联;固态开关由 30 个单向 6 kV/4 kA 的 IGBT、双向共 $30 \times 2 = 60$ 个 IGBT 反串联组成;断路器中所有 IGBT 同时反并联 6.5 kV/4 kA 的二极管;最大关断电流为 9 kA;三条支路的杂散电感分别为 20 nH、300 nH、20 nH,三条支路的等效电阻分别为 0.82 m $\Omega$ 、12.3 m $\Omega$ 、0.82 m $\Omega$ 。在初始条件下,固态开关导通压降为 $3 \times 30 = 90$  V,机械开关断开至安全开距的时间为 2 ms。

图 6 为加入 DCCB 的 HVDC 系统在分断故障电流过程中的电压电流仿真波形。由图 6 可知,DCCB 在系统中完全开断后,电流下降为 0,电压在系统正常运行电压附近波动。图 7 为 DCCB 端电压整体变化波形。DCCB 分断故障电流时,历经两次换流过程,如图 8(a)、图 8(b)所示。同时,结合式(6)、式(7)、式(17)、式(22)和式(23),将理论计算与仿真结果进行比较,对比结果如表 2 所示。

结合表 2 数据和仿真结果图分析,从图 7 可知,断路器两端电压在第二次换流阶段达到最大值,电压幅值为 156.58 kV,与前期对断路器分断电压的理论分析相符。由图 8 可知,两次换流阶段的时间分别为 2.000 15 s 和 2.002 2 s,第一次换流阶段的线路故障电流和第二次换流阶段的分断电流分别为 1.05 kA 和 4.53 kA,电流的仿真值与理论计算值基本吻合,与前期对断路器换流阶段分断电流的理论分析相符。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图 6 DCCB 分断过程的系统电流、电压波形

Fig. 6 Waveform of system current and voltage of DCCB breaking

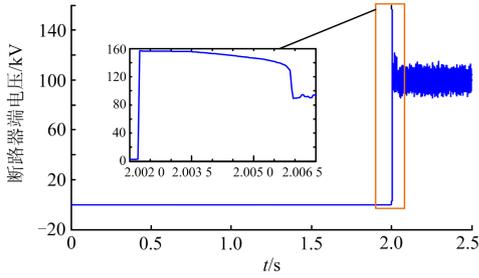
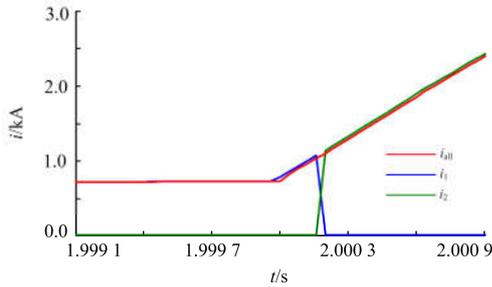
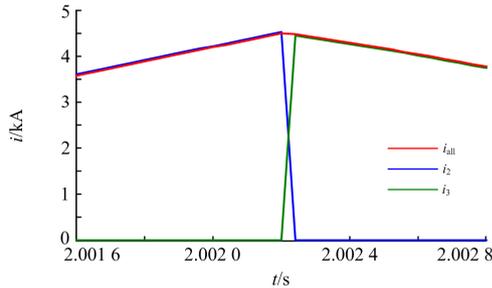


图 7 DCCB 分断全过程端电压仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of overall breaking process of DCCB



(a) 电流转移阶段电流-时间仿真波形



(b) 吸能阶段电流-时间仿真波形

图 8 DCCB 两次换流过程仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of two commutation process of DCCB

表 2 各换流阶段下参数结果对比

Table 2 Comparison of results at different commutation stages

换流阶段	参数名称	理论值/仿真值
第一次换流阶段	第一次换流阶段结束 直流侧电容电压/kV	193.76/188.98
	第一次换流阶段结束交流 侧 a 相馈入短路电流/kA	0.24/0.22
	第一次换流阶段结束 故障电流/kA	1.18/1.05
第二次换流阶段	第二次换流阶段结束交流 侧 a 相馈入短路电流/kA	0.82/0.73
	第二次换流阶段结束故障 电流(断路器开断电流)/kA	4.69/4.53
	第二次换流阶段结束 断路器端电压/kV	159.23/156.58

### 1) 第一阶段暂态过程

通过改变固态开关的导通压降, 电流开始转移时刻的固态开关支路电流以及固态开关端电压仿真结果如图 9 所示。由图可知, 随着固态开关导通压降的增大, 固态开关支路电压上升至一定值时支路电流才开始增大, 固态开关支路导通的起始时刻延后, 电流转移的时间  $T_{transfer}$  变长, 固态开关关断时的开断电流  $I_{open}$  随之增大, 与式(22)和式(25)呈现的规律一致。

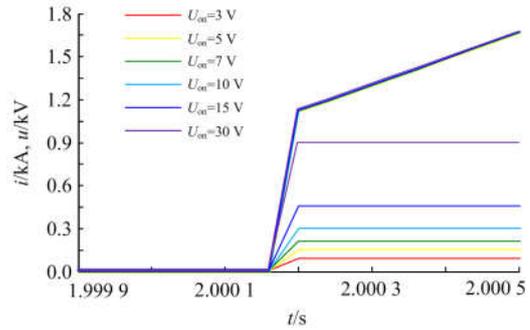


图 9 固态开关导通压降对电流转移影响效果的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of influence of forward voltage drop for solid state switch on current transfer

### 2) 第二阶段暂态过程

分别调整电流转移回路杂散电感的大小及机械开关分离所需时间。改变电流转移回路的综合杂散电感  $L_1$  和  $L_2$ , 电流转移过程的变化情况如图 10 所示。图 10 的仿真结果说明, 随着杂散电感的增大, 电流转移时间基本不变, 但转移电流的值稍微变小, 电流转移的起始时刻逐渐延后, 这是因为电感减小了故障电流的上升率, 导致故障电流达到断路器动作阈值的时间推延, 电流开始转移的时刻也随之延后。但电流转移所花费的时间基本不变, 在几十  $\mu s$  内转移完毕。

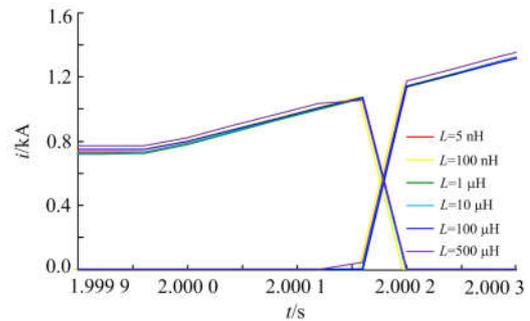


图 10 杂散电感对电流转移影响效果的仿真波形

Fig. 10 Simulation waveform of influence of stray inductance on current transfer

改变机械开关分离的时间长短，固态开关支路电流变化的仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知，随着机械开关分离时间  $T_{switch}$  的增大，固态开关支路导通的时间变长，故障电流进一步上升，固态开关关断时的开断电流值  $I_{open}$  明显增大。

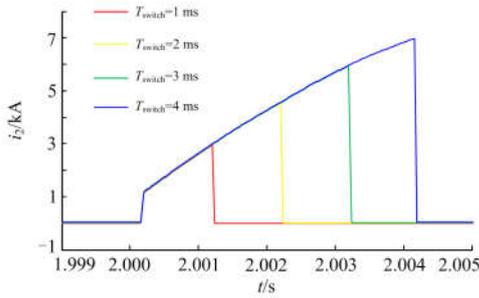


图 11 机械开关分离时间对固态开关分断电流影响效果的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of influence of the opening time for mechanical switch on the breaking-current of solid state switch

### 3) 第三阶段暂态过程

通过改变固态开关关断的时刻来调整固态开关关断电流值，吸能过程随之变化。分别改变固态开关关断时刻为 1 ms、2 ms、4 ms 和 8 ms，吸能支路电流变化的仿真结果如图 12 所示。由图 12 可知，随着开断电流  $I_{open}$  的增大，MOV 吸收电流的峰值逐渐上升，支路电流衰减的持续时间变长，断路器完成整机分断所需的时间  $T_{open}$  增大。

## 5 结论

本文为研究直流电网对混合式 DCCB 的配置要求，对 DCCB 的暂态过程和分断特性进行分析。将混合式 DCCB 与直流电网结合起来，建立了直流侧和交流侧的等效电路模型，推导断路器分断过程中的暂态电流和电压的数学模型，分析断路器参数对分断性能的影响，并进行了仿真验证，得到结论如下：

(1) 在混合式 DCCB 分断电流的暂态过程中，前两个阶段系统和断路器内部支路的故障电流仍然不断增大，断路器实际分断的电流是第二阶段结束时固态开关支路分断的故障电流。

(2) 针对既定参数的直流电网，通过评估最严重的双极短路故障下断路器内部支路分断电流和最大暂态电压来确定混合式 DCCB 的自身配置。这两种应力参数是断路器分断能力的主要体现。

(3) 对于强制换流型混合式 DCCB，断路器载流

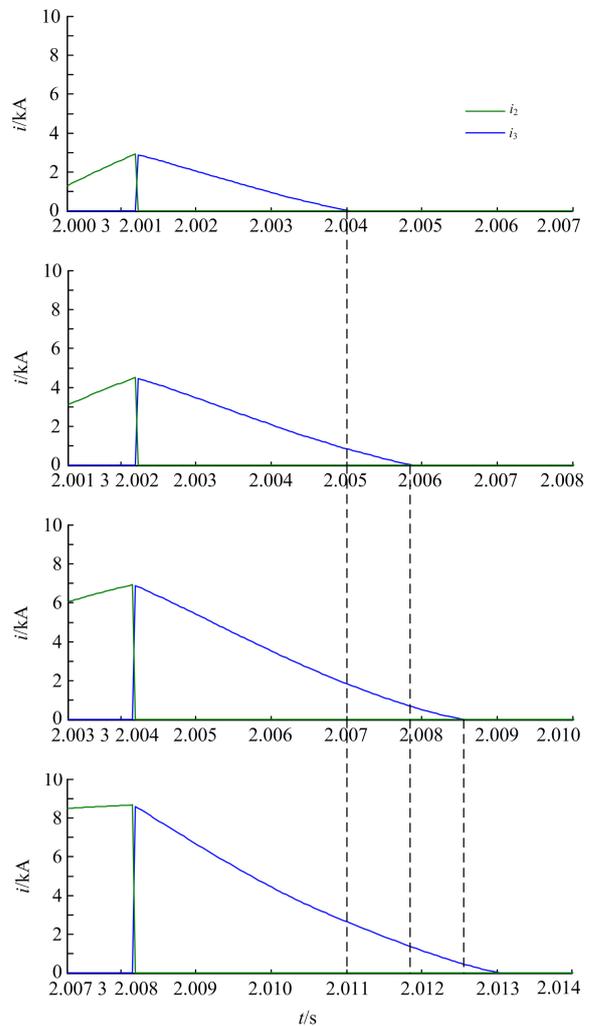


图 12 固态开关分断电流大小对吸能过程影响效果的仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of influence of the breaking-current of solid state switch on absorption process

转移支路杂散电感基本不影响支路换流时间和电流上升率，对断路器整机的分断性能影响不大。

(4) 影响断路器分断过程的主要因素是机械开关断开至安全开距的时间和固态开关支路的导通压降。通过降低机械开关的动作时间和固态开关的导通压降，可以减小分断过程中暂态参数的极值，降低对 IGBT 性能的要求。

### 参考文献

[1] 蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 等. 新型交直流混合微电网结构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 147-154.  
CAI Bingqian, JIA Lihu, ZHU Yongqiang, et al. New architecture design for hybrid AC/DC micro-grid[J].

- Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 147-154.
- [2] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C] // Australasian Universities Power Engineering Conference, September 27-30, 2009, Adelaide, SA, USA: 1-5.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [5] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [6] KONTOS E, TSOLARIDIS G, TEODORESCU R, et al. On DC fault dynamics of MMC-based HVDC connections[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 497-507.
- [7] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVdc system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [8] PUGLIESE H, KANNEWURFF M V. Discovering DC: a primer on DC circuit breakers, their advantages, and design[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2013, 19(5): 22-28.
- [9] SHAN Yunhai, LIM T C, WILLIAMS B W, et al. Successful fault current interruption on DC circuit breaker[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 207-218.
- [10] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. Hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2330-2338.
- [11] 于海, 富银芳, 于锋, 等. 计及母联开关的高压直流工程最后断路器智能判断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 152-158.
- YU Hai, FU Yinfang, YU Feng, et al. Intelligent judgment method for the last breaker in HVDC project including bus-tie switch[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 152-158.
- [12] PIOVAN R, GAIO E, NOVELLO L. Performance analysis of a hybrid IGCTs-mechanical DC circuit breaker for quench protection of superconducting magnets[C] // 22nd Symposium on Fusion Engineering, June 17-21, 2007, Albuquerque, NM, USA: 1-4.
- [13] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [14] PEFTITSIS D, JEHL A, BIELA J. Design considerations and performance evaluation of hybrid DC circuit breakers for HVDC grids[C] // 18th European Conference on Power Electronics and Applications, September 5-9, 2016, Karlsruhe, Germany: 1-11.
- [15] BÖSCHE D, WILKENING E D, KÖPF H, et al. Hybrid DC circuit breaker feasibility study[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(3): 354-362.
- [16] CALLAVIK M, BLOMBERG A, HÄFNER J, et al. The hybrid HVDC breaker, an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids[R] // ABB Grid Systems, Technical Paper, 2012.
- [17] GRIESHABER W, DUPRAZ J P, PENACHE D L. Development and test of a 120 kV direct current circuit breaker[C] // CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2014: B4-301.
- [18] 杜翼, 江道灼, 郑欢, 等. 基于电力电子复合开关的限流式混合直流断路器参数设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 88-95.
- DU Yi, JIANG Daozhuo, ZHENG Huan, et al. Parameter designing of current limiting DC hybrid circuit breaker based on combinatorial electronic switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 88-95.
- [19] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 18-30.
- ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.
- [20] LILJESTRAND L, JONSSON L, BACKMAN M, et al. A

- new hybrid medium voltage breaker for DC interruption or AC fault current limitation[C] // 18th European Conference on Power Electronics and Applications, September 5-9, 2016, Karlsruhe, Germany: 1-10.
- [21] YOKOMIZU Y, OHASHI R, MATSUMURA T. Rush-current breaking properties of IGBT-type DC model circuit breaker with different time constants of gate-emitter voltage[C] // 3rd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, October 25-28, 2015, Busan, South Korea: 341-344.
- [22] DÖRING D, ERGIN D, WÜRFLINGER K, et al. System integration aspects of DC circuit breakers[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 219-227.
- [23] MAGNUSSON J, BISSAL A, ENGDAHL G, et al. Experimental study of the current commutation in hybrid DC-breakers[C] // 3rd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, October 25-28, 2015, Busan, South Korea: 506-511.
- [24] MAGNUSSON J, BISSAL A, ENGDAHL G, et al. Design aspects of a medium voltage hybrid DC breaker[C] // PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, October 12-15, 2014, Istanbul, Turkey: 1-6.
- [25] 冯焜, 杨嫒, 陈超, 等. 短路故障下直流固态断路器缓冲电路的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 98-102.
- FENG Kun, YANG Hua, CHEN Chao, et al. Design of snubber circuit for DC solid-state circuit breaker in short-circuit fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 98-102.
- [26] 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.
- [27] TANG Geng, XU Zheng, ZHOU Yuzhi. 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.
- [28] AUGUSTIN T, JAHN I, NORRGA S, et al. Transient behaviour of VSC-HVDC links with DC breakers under faults[C] // 19th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2017, Warsaw, Poland: 1-10.

---

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-12-09

作者简介:

王振浩(1964—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为柔性直流输电、输变电设备运行状态在线监测与诊断等; E-mail: zhenhaowang@126.com

田奇(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: 2312652416@qq.com

成龙(1988—), 男, 通信作者, 博士研究生, 助理实验师, 研究方向为配电系统建模及运行控制、柔性直流输电技术等。E-mail: chl@neepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)