

基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法研究

黄旭¹, 刘轶超^{1,2}, 朱汉卿¹, 刘扬¹

(1. 国网天津市电力公司 天津 300171; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: MMC直流故障电流计算方法是研究柔性直流电网直流故障暂态特性、实现快速故障隔离的核心与关键。首先, 针对两种典型MMC故障等效模型, 对比分析了二者的拓扑结构和故障时刻等效电容电压变化规律; 其次, 考虑MMC各桥臂子模块电容电压均衡机制, 提出了MMC平均电容的计算方法, 在此基础上提出了基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法; 最后, 通过在PSCAD/EMTDC搭建MMC-HVDC模型进行仿真, 验证了提出MMC直流故障电流计算方法的准确性和适用性。

关键词: 模块化多电平换流器; 直流故障电流; 故障等效模型; 平均电容

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22578

Research on MMC DC Fault Current Calculation Method Based on Average Capacitance

HUANG Xu¹, LIU Yichao^{1,2}, ZHU Hanqing¹, LIU Yang¹

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300171, China;

2. The Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: The DC fault current calculation method of modular multilevel converter (MMC) is the key to study the DC fault transient characteristics and isolate the fault point rapidly in VSC-HVDC grid. Firstly, aiming at two typical MMC fault equivalent models, the topology and the capacitor voltage characteristics when the fault occurs were compared and analyzed. Secondly, considering the submodules' capacitor voltage balancing mechanism of each MMC arm, the average capacitance calculation method of MMC was proposed, and then the MMC DC fault current calculation method based on average capacitance was proposed. Finally, the MMC-HVDC model was built on PSCAD/EMTDC and the precision and applicability of the DC fault current calculation method was verified.

Key words: modular multilevel converter (MMC); DC fault current; fault equivalent model; average capacitance

以电压源型换流器(voltage source converter, VSC)为核心的柔性直流输电技术是实现大范围能源互联的重要手段^[1]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)采用多电压源子模块串联的方式实现交、直流转换, 具有开关频率低、输出谐波小等诸多技术优势, 在工程实际中得到越来越多的应用^[2]。MMC-HVDC输电系统直流侧阻尼小, 发生双极短路故障后子模块电容迅速放电, 直流电流急剧上升, 对系统和设备的安全运行造成威胁, 精确计算其直流故障电流是保护定值整定及实现快速故障隔离的基本前提^[3]。

直流故障后, 对MMC进行准确暂态等效, 研

究其直流故障电流计算方法是精确计算MMC-HVDC系统直流故障电流的核心与关键。MMC故障后暂态过程可分为闭锁前和闭锁后两个阶段^[4], 考虑到闭锁前是直流电流上升、直流电压跌落的主要阶段, 本文重点研究MMC闭锁前阶段(直流故障初始阶段)的直流故障电流计算方法。针对MMC直流故障初始阶段暂态等效模型的研究, 国内、外研究团队已取得大量的研究成果^[5-10]。文献[5]通过对换流器每个桥臂进行等效, 建立了六桥臂MMC故障等效模型, 需采用数值计算的方式进行故障电流求解, 该计算方法具有较高精度, 但计算复杂度也相对较高; 为了简化计算, 文献[6-7]忽略直流故障期间交流系统的

作者简介: 黄旭(1984—), 男, 高级工程师, Email: huangxu335@163.com

通讯作者: 刘轶超(1993—), 男, 博士研究生, Email: liuyichao@tju.edu.cn

馈入作用,将MMC等效成RLC串联支路的形式,该方法计算复杂度较低,适用于大规模直流电网的直流故障电流计算;文献[8-9]根据MMC平均值模型的基本原理,提出考虑交流系统影响的MMC故障等效模型,但未通过与忽略交流系统影响的等效模型进行对比来验证提出等效模型的准确性和适用性。另一方面需要注意的是,已有的RLC支路模型均将换流器上、下桥臂进行统一等效,未充分考虑上、下桥臂分别进行子模块电容电压均衡控制的机制,计算得出的等效电容值具有一定偏差。

本文将两种已有的MMC故障等效模型进行对比分析,充分考虑MMC各桥臂子模块电容电压均衡机制,研究MMC平均电容的计算方法,在此基础上研究基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法。

1 MMC直流故障等效模型

模块化多电平换流器主要由6个桥臂构成,每个桥臂串联若干个子模块和1个限流电感,其拓扑结构如图1所示。

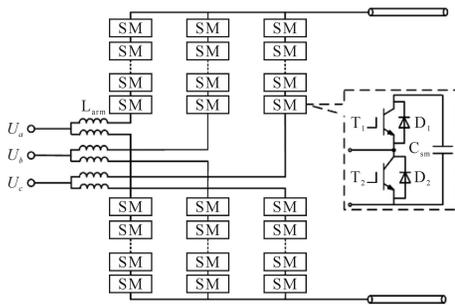


图1 模块化多电平换流器拓扑结构

Fig.1 Topology of MMC

图1中 L_{arm} 为限流电感, C_{sm} 为子模块电容, T_1, T_2 为子模块中的全控型开关器件IGBT。MMC正常运行时,通过控制 T_1, T_2 的开关状态来控制每个桥臂投入的子模块数量,改变桥臂电势,进一步实现对传输功率及交、直流端口电压的精确控制。另一方面,为了维持直流电压稳定,需要采取特定的子模块电容电压均衡算法来保持子模块电容电压的一致性。以最近电平逼近调制方法(nearest level modulation, NLM)为例,当桥臂电流对子模块电容进行充电时,投入电容电压较低的子模块;当桥臂电流对子模块电容进行放电时,投入电容电压较高的子模块。

直流故障发生后,对MMC进行等效是精确

计算直流故障电流的基础。考虑到直流故障发生后初始阶段,直流故障电流的主要成分为子模块电容的放电电流,国、内外大部分研究团队忽略故障初始阶段交流系统的馈入作用,将MMC等效成一个RLC串联支路进行分析,如图2a所示。

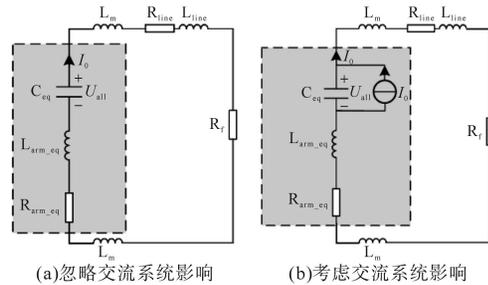


图2 MMC故障等效模型

Fig.2 MMC fault equivalent model

图2中, L_m 表示装设在换流器出口的限流电感; L_{line} 和 R_{line} 分别表示线路电感和电阻; R_f 表示故障点过渡电阻; C_{eq}, L_{arm_eq} 和 R_{arm_eq} 分别表示MMC等效电容、等效电感和等效电阻; U_{all} 表示单相桥臂所有子模块电容电压之和。 C_{eq}, L_{arm_eq} 和 R_{arm_eq} 的具体计算方法为

$$C_{eq} = \frac{6C_{sm}}{N} \tag{1}$$

$$L_{arm_eq} = \frac{2L_{arm}}{3} \tag{2}$$

$$R_{arm_eq} = \frac{2R_{arm}}{3} \tag{3}$$

式中: R_{arm} 为换流器桥臂电阻。

式(1)是目前比较普遍的计算等效电容 C_{eq} 的方法,其基本原理如下:MMC单相桥臂共包含 $2N$ 个子模块,且任意时刻上、下桥臂投入子模块数量之和为 N ,考虑到MMC运行过程中调制模块通过电容电压均衡算法控制子模块投切,使所有子模块电压保持一致,该相桥臂等效电容可表示为 $2C_{sm}/N$,进一步可得三相桥臂并联后的等效电容值为 $6C_{sm}/N$ 。

需要注意的是,图2a所示等效电路仅考虑了故障初期子模块电容的放电电流,忽略了该过程中交流系统的馈入作用。为了更加精确地计算直流故障电流,根据MMC平均值模型建立了一种考虑交流系统馈入作用的MMC故障等效模型,其拓扑结构如图2b所示^[10]。

图2b与图2a的区别在于,其等效电容两端并联有恒定电流源,该恒定电流源表示故障初始阶段交流系统的馈入分量,其值为换流器稳态运行时的直流电流 I_0 。除恒定电流源外,图2b所示等效电路

中其余电气元件的参数与图2a完全相同。

另一方面,MMC稳态运行时,考虑到相间环流及上、下桥臂之间的环流,所有子模块电容电压之和的波动基本为0,因此在直流故障瞬间,等效电容两端电压变化率 du/dt 应为0。图2a所示等效电路中,故障后瞬间等效电容支路的电流不为0,与上述情况不相符;图2b所示等效电路中,故障后瞬间等效电容支路的电流为0,与上述情况相符。因此在进行直流故障电流计算时,图2b所示故障等效电路理论上更加精确,本文将在第3节进行进一步的仿真验证。

2 基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法

MMC故障等效电路中等效电容的值是精确计算直流故障电流的关键。在计算单相桥臂的等效电容时,前文所述计算方法将上、下桥臂子模块电容统一考虑。实际上,MMC稳态运行时,调制模块以固定控制频率分别计算上、下桥臂应投入的子模块数量,进一步根据桥臂电流方向及上、下桥臂子模块电容电压的值计算每一个子模块的开关信号,即上、下桥臂独立进行子模块电容电压均衡。

以MMC单相桥臂为例进行分析,上、下桥臂分别包含 N 个子模块及一个桥臂限流电感 L_{arm} 。

根据文献[5]提出的基于能量守恒的桥臂等效电容计算方法,可得上、下桥臂等效电容分别为

$$C_p = \frac{C_{sm} N}{x_p^2} \quad (4)$$

$$C_n = \frac{C_{sm} N}{x_n^2} \quad (5)$$

式中: x_p, x_n 分别为上、下桥臂投入的子模块数量。

根据式(4)和式(5)计算得出的单桥臂等效模型如图3所示。

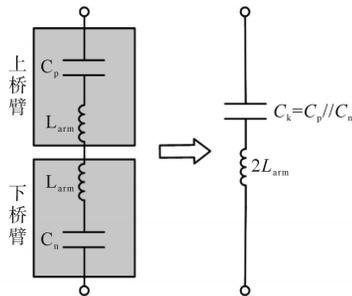


图3 单桥臂等效模型

Fig.3 Equivalent model of single bridge arm

上、下桥臂电容串联后的等效电容值为

$$C_k = C_p // C_n = \frac{C_{sm} N}{x_p^2 + x_n^2} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,单相桥臂的等效电容值与上、下桥臂投入的子模块数量相关,当且仅当上、下桥臂投入子模块数量均为 $N/2$ 时,单相桥臂等效电容值最大,为 $C_k = 2C_{sm}/N$ 。需要注意的是,MMC正常运行时,各桥臂投入的子模块是随时间变化的。以11电平MMC单相桥臂为例,其不同时间段内的等效电容值如图4所示。

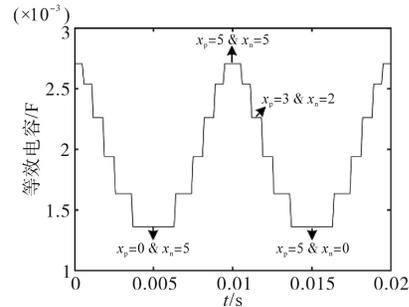


图4 11电平MMC单相桥臂等效电容值

Fig.4 Single bridge arm equivalent capacitance of 11-level MMC

在故障后初始阶段,MMC控制系统仍在根据指定的控制目标输出调制波信号,各桥臂投入的子模块数量不断变化,图4中单相桥臂的等效电容值也是不断变化的。为了计算直流故障电流,可将该不断变化的电容值进一步等效成一个恒定的平均电容,具体方法如下。

考虑到在直流故障后初始阶段MMC控制系统计算得出的调制波形畸变不大,根据MMC基本控制原理,上、下桥臂投入的子模块数量为阶梯波形,可表示为

$$x_p(t) = \text{round} \left\{ \frac{N}{2} [1 - \sin(\omega t)] \right\} \quad (7)$$

$$x_n(t) = \text{round} \left\{ \frac{N}{2} [1 + \sin(\omega t)] \right\} \quad (8)$$

式中: ω 为调制波角频率。

在实际工程中,MMC单桥臂子模块数量一般多达数百个,上、下桥臂投入子模块数量的变化规律接近正弦波:

$$x_p(t) \approx \frac{N}{2} [1 - \sin(\omega t)] \quad (9)$$

$$x_n(t) \approx \frac{N}{2} [1 + \sin(\omega t)] \quad (10)$$

假设故障初始时刻为 t_0 ,换流器闭锁时刻为 t_1 ,则故障初始阶段为 t_0-t_1 。根据能量守恒定律,上、下桥臂中每个子模块电容电压增量可表示为

$$\Delta U_{sm-p} = \frac{1}{N} \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{C_p} i dt = \frac{1}{C_{sm} N^2} \int_{t_0}^{t_1} [x_p(t)]^2 i dt \quad (11)$$

$$\Delta U_{sm-n} = \frac{1}{N} \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{C_n} idt = \frac{1}{C_{sm} N^2} \int_{t_0}^{t_1} [x_n(t)]^2 idt \quad (12)$$

式中: i 为电容电流。

令故障后初始阶段上、下桥臂平均电容分别为 C_{eq-p} , C_{eq-n} ,则该阶段上、下桥臂子模块电容电压增量可表示为

$$\Delta U'_{sm-p} = \frac{1}{C_{eq-p} N} \int_{t_0}^{t_1} i dt \quad (13)$$

$$\Delta U'_{sm-n} = \frac{1}{C_{eq-n} N} \int_{t_0}^{t_1} i dt \quad (14)$$

令 $\Delta U_{sm-p} = \Delta U'_{sm-p}$, $\Delta U_{sm-n} = \Delta U'_{sm-n}$,可得:

$$C_{eq-p} = \frac{C_{sm} N \int_{t_0}^{t_1} i dt}{\int_{t_0}^{t_1} [x_p(t)]^2 i dt} \quad (15)$$

$$C_{eq-n} = \frac{C_{sm} N \int_{t_0}^{t_1} i dt}{\int_{t_0}^{t_1} [x_n(t)]^2 i dt} \quad (16)$$

将式(9)及式(10)代入式(15)及式(16),进一步可计算得出该单相桥臂等效电容值为

$$C_k = \frac{2C_{sm}}{N} \cdot \frac{1}{1+q} \quad (17)$$

其中

$$q = \frac{\int_{t_0}^{t_1} [\sin(\omega t)]^2 idt}{\int_{t_0}^{t_1} idt} \quad (18)$$

从式(18)可以看出,单相桥臂平均电容值与该时间段内的电流及调制波相关,并非恒定值。当 $\omega t = 0$ 或 $\omega t = \pi$ 时,上、下桥臂投入子模块数量均为 $N/2$,此时 $q=0$,平均电容值最大, $C_k = 2C_{sm}/N$ 。当 $\omega t = \pi/2$ 或 $\omega t = 3\pi/2$ 时,上、下桥臂中某一桥臂投入子模块数量为 N ,另一桥臂投入子模块数量为 0 ,此时 $q=1$,平均电容值最小, $C_k = C_{sm}/N$ 。考虑到 $0 < [\sin(\omega t)]^2 < 1$,则可确定 q 的范围为 $0 \sim 1$ 。令 $k = 1/(1+q)$,则可进一步确定 k 的取值范围为 $0.5 \sim 1$ 。经过大量仿真计算,可得 k 可取 $0.7 \sim 0.8$ 之间。单相桥臂平均电容值可表示为

$$C_k = k \frac{2C_{sm}}{N} \quad (19)$$

进一步可得换流器平均电容值为

$$C_{av} = k \frac{6C_{sm}}{N} \quad (20)$$

通过式(20)计算得到的换流器平均电容值充分考虑了上、下桥臂子模块分别进行轮换投切的情况,相比于传统计算方法更加精确。考虑故障期间交流馈入作用,构造基于平均电容的MMC故障等效电路并进行简化,如图5所示。

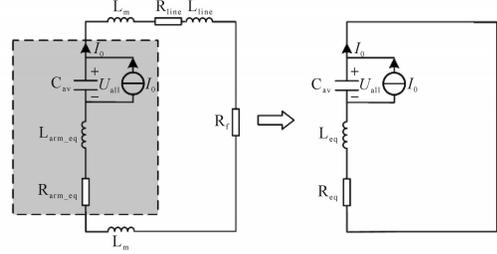


图5 基于平均电容的MMC故障等效模型

Fig.5 MMC fault equivalent model based on average capacitance

图5中, $L_{eq} = L_{arm_eq} + 2(L_m + L_{line})$, $R_{eq} = R_{arm_eq} + 2R_{line} + R_f$

对于图5所示等效电路,可通过复频域方法进行求解。令 $\sigma = R_{eq}/2L_{eq}$, $\omega = \sqrt{1/L_{eq}C_{av} - (R_{eq}/2L_{eq})^2}$,直流故障电流及等效电容电压可表示为

$$\begin{cases} i_{dc} = I_m e^{-\sigma t} \sin(\omega t) + I_0 \\ u_c = U_m e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta) \end{cases} \quad (21)$$

其中

$$I_m = \frac{U_{all}}{\omega L_{eq}}$$

$$U_m = \sqrt{U_{all}^2 + \left(\frac{U_{all} \sigma}{\omega} - \frac{I_0}{\omega C_{av}} \right)^2}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{U_{all}}{U_m} \right)$$

式中: U_{all} 为等效电路电容两端初始电压。

3 直流故障电流计算方法准确性及适用性验证

为了验证本文提出的基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法的准确性和适用性,参考张北 ± 500 kV柔性直流电网工程,在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台搭建双端MMC-HVDC模型进行仿真验证,模型拓扑结构如图6所示。



图6 双端MMC-HVDC输电系统模型

Fig.6 Two-terminal MMC-HVDC system model

图6所示系统的具体仿真参数如表1所示。

表1 双端MMC-HVDC输电系统参数

Tab.1 Two-terminal MMC-HVDC system parameters

序号	参数	值
1	电压等级	交流侧 500 kV; 直流侧 ±250 kV
2	线路长度	100 km
3	限流电感	0.1 H
4	子模块数量	228
5	子模块电容	0.015 F
6	桥臂电感	0.1 H
7	调制方式	最近电平逼近(NLM)
8	控制频率	10 000 Hz
9	控制方式	m 端定功率; n 端定直流电压

$t=1.5$ s 时,在距 m 端换流站 30 km 处发生金属性双极短路故障,10 ms 后换流器闭锁。采用前文所述的三种方法来计算 m 端换流站的直流故障电流与子模块电容电压:

计算方法 1:忽略交流系统馈入作用的直流故障电流计算方法(图 2a);

计算方法 2:考虑交流系统馈入作用的直流故障电流计算方法(图 2b);

计算方法 3:基于平均电容的直流故障电流计算方法(图 5)。

为了充分验证三种不同计算方法的计算精度,对如下两种工况进行仿真:

工况一:MMC 稳态运行时, m 端交流系统向直流侧注入有功功率为 1 500 MW;

工况二:MMC 稳态运行时, m 端交流系统向直流侧注入有功功率为 -1 500 MW。

将通过三种不同计算方法得出的直流故障电流波形、电容电压波形与仿真波形进行对比,结果如下。

当故障前交流系统输入功率为 1 500 MW,直流电流为 3 kA 时,直流故障电流仿真波形和计算波形的对比结果如图 7 所示,电容电压仿真波形和计算波形的对比结果如图 8 所示。

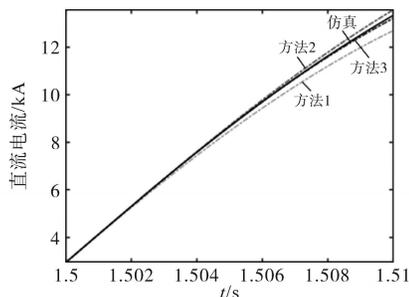


图7 故障电流波形对比 ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

Fig.7 DC fault current comparison ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

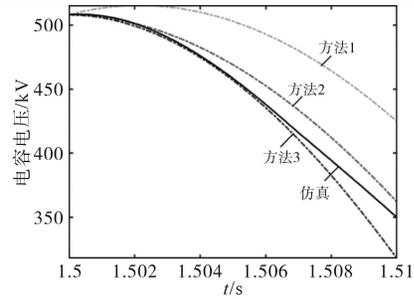


图8 电容电压波形对比 ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

Fig.8 Capacitor voltage comparison ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

将方法 1、方法 2 及仿真波形进行对比可以看出,考虑交流系统馈入作用的 MMC 故障等效模型具有更高的精度。图 8 中故障初始时刻仿真波形电容电压变化率为 0,进一步验证了考虑交流馈入作用的 MMC 故障等效模型的准确性。另一方面,通过对比方法 2、方法 3 及仿真波形可以看出,本文提出的基于平均电容的 MMC 直流故障电流计算方法使计算精度进一步提升。

为了进一步比较三种不同计算方法的计算精度,分别计算三条计算曲线与仿真曲线的欧氏距离,结果如表 2 所示。

表2 欧氏距离对比 ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

Tab.2 Euclidean distance comparison ($P_0=1\ 500\ \text{MW}, I_0=3\ \text{kA}$)

序号	方法	直流故障电流	等效电容电压
1	方法 1	4.28	220.34
2	方法 2	1.49	163.87
3	方法 3	0.51	147.68

从表 2 可以看出,方法 3 对应曲线与仿真曲线的欧氏距离最小,进一步验证了本文提出的直流故障电流计算方法的准确性。

当故障前交流系统输入功率为 -1 500 MW,直流电流为 -3 kA 时,直流故障电流仿真波形和计算波形的欧式距离如表 3 所示。

表3 欧氏距离对比 ($P_0=-1\ 500\ \text{MW}, I_0=-3\ \text{kA}$)

Tab.3 Euclidean distance comparison ($P_0=-1\ 500\ \text{MW}, I_0=-3\ \text{kA}$)

序号	方法	直流故障电流	等效电容电压
1	方法 1	7.34	262.89
2	方法 2	1.59	221.53
3	方法 3	0.35	87.20

从表 3 可以看出,当故障前交流系统输入功率为负时,考虑交流馈入作用的直流故障电流计算方法具有更高精度,本文提出的基于平均电容的直流故障电流计算方法使计算精度进一步提升。

综上所述,本文提出的基于平均电容的 MMC 直流故障电流计算方法,在换流器工作于整流模

式与逆变模式时,都能够准确计算直流故障电流,具有较高的精度和适用性。

4 结论

本文在对比分析两种不同MMC故障等效模型的基础上,提出一种基于平均电容的MMC直流故障电流计算方法,通过在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台进行仿真,验证了提出直流故障电流算法的准确性和适用性。本文得出的主要结论如下:

1)当故障前交流系统输入功率不为0时,与忽略交流系统馈入作用的MMC直流故障电流算法相比,考虑交流系统馈入作用的故障电流算法具有更高精度;当故障前交流系统输入功率为0时,后者的计算精度与前者基本相同。

2)故障初始阶段MMC等效电容随时间变化,其值与该阶段故障电流和调制波形相关,在进行直流故障电流计算时,可取 $0.75 \times 6C_{sm}/N$ 。考虑交流馈入作用并采用平均电容进行直流故障电流计算时,计算结果具有更高精度。

参考文献

- [1] Xu Lie, Yao Liangzhong, Sasse Christian. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.
- [2] Lesnicar A, Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//IEEE Power Tech, Bologna, Italy, 2003.
- [3] 薛士敏,张超,高博,等. 基于模块化多电平换流器的直流电网保护方案[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(3): 8-16.
Xue Shimin, Zhangchao, Gao Bo, *et al.* Protection scheme for DC grid based on modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(3): 8-16.
- [4] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
Zhang Jianpo, Zhao Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 32-37.
- [5] Li Botong, Liu Yichao, Li Bin, *et al.* Study on the development process and analytical method of the pole-to-pole DC fault in the MMC-MVDC system[J]. IET Power Electronics, 2018, 10(15):2085-2091.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Li Jiapeng, Li Yujun, Xiong Liansong, *et al.* DC fault analysis and transient average current based fault detection for radial MTDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1310-1320.
- [9] Xu J, Gole A M, Zhao C. The use of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 519-528.
- [10] Beddard A, Sheridan C E, Barnes M, *et al.* Improved accuracy average value models of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2260-2269.

收稿日期:2020-10-25
修改稿日期:2021-02-28