

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191618

考虑线路电容的 MMC-HVDC 系统 直流接地故障电流计算方法

彭宇锋, 张英敏, 李俊松, 刘天琪, 刘麒麟

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 研究模块化多电平换流站直流侧故障的暂态特性, 对直流系统保护配置的设计、系统参数的优化等有重要的工程意义。考虑直流线路对地电容的影响, 提出了一种直流侧单极接地故障电流计算方法。首先对直流线路进行 π 型等效处理, 分析了 MMC-HVDC 系统在三种不同接地方式下的直流侧单极接地故障电流的产生机理。对不同接地方式下的换流站进行数学建模, 基于基尔霍夫定律建立系统的微分方程, 通过 Matlab 求解系统的故障电流。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 建立 MMC-HVDC 直流系统模型。仿真结果验证了故障电流算法的精确性。

关键词: 高压直流输电; MMC-HVDC; 单极接地故障; 故障电流计算; 线路等效

Ground fault current calculation method for an MMC-HVDC system considering line capacitance

PENG Yufeng, ZHANG Yingmin, LI Junsong, LIU Tianqi, LIU Qilin

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Studying the transient characteristics of DC side faults of a modular multilevel converter (MMC) has important engineering significance for the design of DC system protection configuration and optimization of system parameters. Considering the influence of DC line capacitance on ground, this paper proposes a DC-side single-pole ground fault current calculation method. First, π -type equivalent processing is applied to the DC line, and the generation mechanism of the DC-side single-pole ground fault current in the MMC-HVDC system under three different grounding modes is analyzed. The mathematical modeling of the converter station under different grounding modes is carried out. Based on Kirchhoff's law, the differential equation of the system is established, and the fault current of the system is solved by Matlab. Based on the PSCAD/EMTDC simulation platform, the MMC-HVDC DC system model is established. The simulation results verify the accuracy of the fault current algorithm.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904600).

Key words: high voltage direct current transmission; MMC-HVDC; pole-to-ground fault; fault current calculation; line equivalent

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 作为新一代柔性直流输电技术, 凭借其独立功率调节和灵活运行能力, 为可再生能源的并网提供了有效的解决方案, 全世界越来越多的电力传输项目开始使用基于 MMC 的高压直流系统。考虑到输电距离和线路成本的限制, 长距离大容量的柔性直流输电工程一般采用架空线方案。但

架空线较高的故障率给直流系统的安全运行带来极大挑战^[1-2]。

直流侧单极接地故障是直流系统中最常见的故障, 目前国内外的文献主要研究故障的暂态特性, 故障判别和控制保护策略等^[3-25]。文献[3]提出真双极 MMC 系统单极接地故障机理与伪双极系统双极接地故障相似, 对单极接地故障的研究主要集中在伪双极系统; 文献[4]分析了各种直流侧故障的机理, 建立了故障状态下的等值电路模型, 并给出了数学表达式, 但该模型仅考虑了换流站的特性, 缺少对线路特性的研究; 文献[5]提出对于直流侧经钳

位电阻接地的 MMC 系统,当发生单极接地故障时,由于子模块电容没有放电通路,系统中不会产生故障电流,但该结论忽略了线路分布电容的影响。文献[6]对伪双极 MMC 系统的三种接地方式的应用场景进行了详细说明,换流变压器阀侧中性点接地和直流侧通过钳位电阻接地方式适用于低电压等级的直流系统,阀侧交流母线接星形电抗经电阻接地方式适用于高电压等级大容量的直流系统;在此基础上,文献[6]仅对星形电抗经电阻接地方式的单极接地故障电流进行分析,认为故障电流是由正常工作电流、桥臂子模块电容放电电流和电容对地放电电流组成,但该文献并未对对地放电的电容来源进行详细说明,对电容对地放电的数学模型的研究不够深入;文献[7]对单极接地故障时子模块的开关函数进行了详细说明,在此基础上得到了故障电流的数学表达式,认为单极接地故障电流的上升速度和峰值取决于接地电阻和接地电抗的大小。上述文献研究重点集中在对换流站的数学建模,分析换流站参数对故障电流的影响,但缺乏对直流线路等效模型的研究。

本文针对 MMC-HVDC 单极接地故障,首先考虑了直流线路的对地电容,对直流线路进行 π 型等效,其次分析了不同接地方式下换流站故障电流的产生机理,最后提出了一种计算故障电流的方法。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了两端 MMC-HVDC 系统,通过仿真验证了故障电流计算方法的准确性。

1 直流线路模型

对于短距离低电压等级的输电线路,线路导纳的影响较小,线路分布电容的影响可以忽略不计,一般采用 R-L 集中参数模型进行等效。

现在的直流输电技术一般应用在长距离大容量的直流工程中,线路导纳的影响不能忽略。 π 型模型除了线路阻抗外,把线路对地电容的影响等效为线路首末两端的对地电容,具体模型如图 1 所示。图中等值电路阻抗 $Z = R + jX$, 导纳 $Y = G + jB$, 其中输电线路可按晴天无电晕考虑,电晕影响可以不计, $G = 0$ [18]。

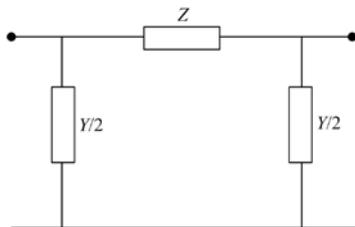


图 1 π 型等效线路

Fig. 1 π -type equivalent line

π 型等效模型的相关参数为

$$\begin{cases} Z = Z_c \sinh \gamma l \\ Y = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{Z_c \sinh \gamma l} \end{cases} \quad (1)$$

式中: γ 为线路的传播常数; l 为线路长度; Z_c 为线路的波阻抗。

当线路长度小于 1 000 km 时,可以对式(1)进行简化处理:

$$\begin{cases} Z = k_r r l + j k_x x l \\ Y = j k_b b l \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} k_r = 1 - \frac{1}{3} x b l^2 \\ k_x = 1 - \frac{1}{6} (x b - r^2 \frac{b}{x}) l^2, \quad r, x, b \text{ 分别为单} \\ k_b = 1 + \frac{1}{12} x b l^2 \end{cases}$$

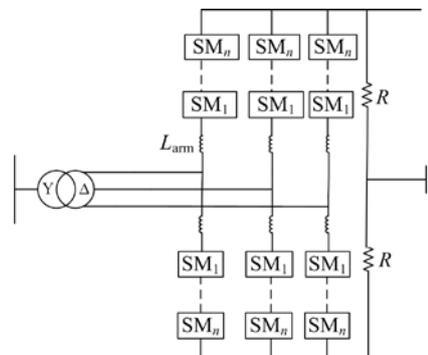
位长度线路的电阻、电抗、电纳, l 为线路长度。

2 MMC-HVDC 单极接地故障

本节首先对伪双极 MMC 系统的三种接地方式进行了详尽阐述。分析了换流站在不同接地方式下,故障电流的产生机理。对不同接地方式下的换流站进行简化等效处理,根据基尔霍夫定律建立系统的微分方程组。

2.1 伪双极 MMC 系统接地方式

对于伪双极 MMC 系统,正负极直流母线上的电压对称是保证系统正常运行的关键,因此伪双极 MMC 系统必须安装接地装置。在实际工程应用中,伪双极 MMC 系统一般采用三种接地方式:直流侧母线通过钳位电阻接地,交流侧采用换流变压器阀侧中性点经电阻接地,换流变压器阀侧交流母线接星形电抗经电阻接地 [9]。具体结构如图 2 所示。钳位电阻的损耗会随直流电流的增大成平方增大,因此直流侧母线通过钳位电阻接地方式适用于低电压



(a) 钳位电阻接地

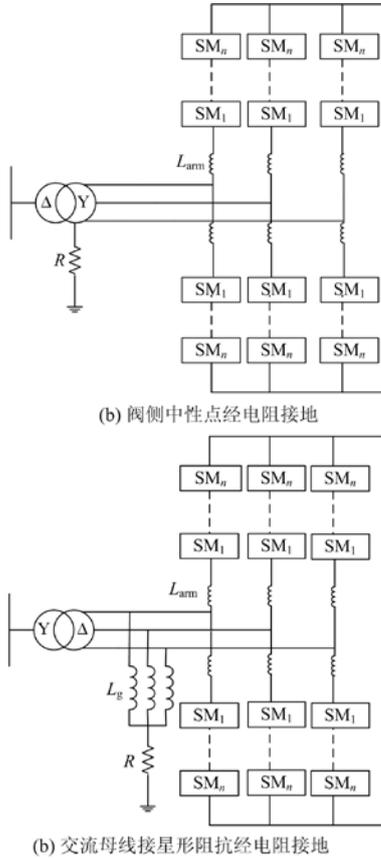


图 2 MMC 系统接地方式

Fig. 2 MMC system grounding method

等级的直流工程中, 国内典型的柔性直流工程大多采用换流变压器阀侧中性点经电阻接地或换流变压器阀侧交流母线接星形电抗经电阻接地方式^[10]。当发生直流侧单极接地故障时, 阀侧中性点接地和星形阻抗经电阻接地的故障机理一样, 可以将两种接地方式归为一类进行分析。

2.2 采用直流侧接地方式的故障暂态特性分析

以两端 MMC-HVDC 系统正极线中点发生接地故障为例。MMC 系统采用直流侧钳位电阻接地, 发生故障时, 正极母线的对地电压变为零, 负极母线的对地电压增加一倍, 换流站出口之间的电压保持不变, 子模块电容的能量保持不变, 可以将换流站等效为一个直流电压源。单个换流站简化模型如图 3 所示。

简化模型的相关参数为

$$L_i = \frac{2L_{arm}}{3} \quad (3)$$

$$R_i = \frac{NR_{on}}{3} \quad (4)$$

$$U_{ci} = U_{dc} \quad (5)$$

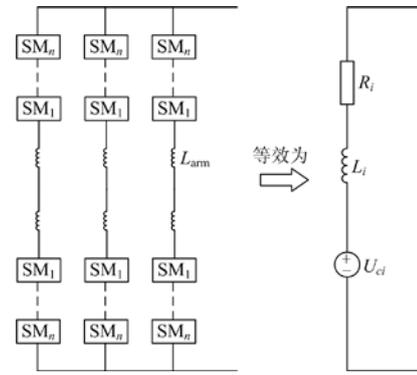


图 3 直流侧接地换流器等效

Fig. 3 DC side grounding converter equivalent

式中: L_{arm} 为换流站桥臂电感; R_{on} 为单个子模块的导通电阻; N 为单相上(下)桥臂的子模块个数; U_{dc} 为换流站正常运行时的母线电压。

考虑输电线路对地电容的存在, 发生故障时, 等效电路如图 4 所示。虚线表示正极线对地电容对故障点的馈入电流路径, 长实线表示负极线近端对地电容对故障点馈入电流路径, 短实线表示负极线远端对地电容对故障点馈入电流路径。根据基尔霍夫定律, 可以得到式(6)微分方程组。

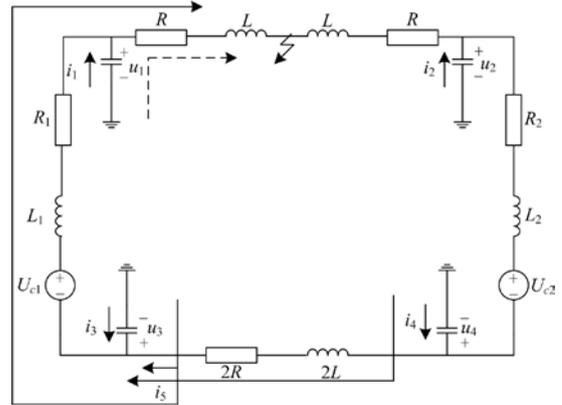


图 4 直流侧接地 MMC 系统简化计算模型

Fig. 4 Simplified calculation model for DC side grounded MMC system

$$\begin{cases} -u_1 + (i_1 + i_3 + i_5)R + L \frac{d(i_1 + i_3 + i_5)}{dt} = 0 \\ -u_3 - U_{c1} + u_1 + (i_3 + i_5)R_1 + L_1 \frac{d(i_3 + i_5)}{dt} = 0 \\ -u_2 + (i_2 + i_4 - i_5)R + L \frac{d(i_2 + i_4 - i_5)}{dt} = 0 \\ -u_4 - U_{c2} + u_2 + (i_4 - i_5)R_2 + L_2 \frac{d(i_4 - i_5)}{dt} = 0 \\ u_3 - u_4 + 2Ri_5 + 2L \frac{di_5}{dt} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, u_i 为正(负)极线对地电容电压。

对地电容电压微分方程组为

$$\begin{cases} C \frac{du_1}{dt} = -i_1 \\ C \frac{du_2}{dt} = -i_2 \\ C \frac{du_3}{dt} = -i_3 \\ C \frac{du_4}{dt} = -i_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中, C 为对地电容。

正常运行时, 对地电容支路电流为 0, 对地电容电压为正负极线电压, 微分方程组变量初值如式(8)所示。

$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = 0 \\ i_3 = 0 \\ i_4 = 0 \\ i_5 = i_5(0) \\ u_1 = u_1(0) \\ u_2 = u_2(0) \\ u_3 = u_3(0) \\ u_4 = u_4(0) \end{cases} \quad (8)$$

将初始条件式(8)输入在 Matlab 中, 使用求解微分方程组数值解的函数包 ODE45 求解系统的微分方程组式(6)、式(7), 即可解得系统的故障电流。

2.3 采用交流侧接地方式的故障暂态特性分析

换流站阀侧接星形阻抗经电阻接地或变压器阀侧中性点经电阻接地, 子模块电容通过阀侧接地点与故障点形成放电通路, 换流站的简化等效电路必须考虑子模块电容的投切。采用换流变压器阀侧中性点经电阻接地方式, 故障点与子模块电容形成的放电通路与星形阻抗经电阻接地方式下相似, 可以将两种接地方式统一为交流侧接地方式进行分析。

忽略换流站损耗, 换流站输入能量与输出能量相等, 三相子模块电容的总能量不变; 不同的故障时刻下, 子模块电容能量释放产生的故障电流特性相同, 子模块电容的等效与故障时刻无关, 可以将三相上桥臂等效为 3 组 $N/2$ 个子模块并联, 考虑子模块的均压策略, 上桥臂可以等效为 2 组 $N/2$ 个子模块快速投切放电, 三相上桥臂的等效电容表示为 $12C_0/N$ ^[9]。换流站简化模型如图 5 所示。

简化模型相关参数为

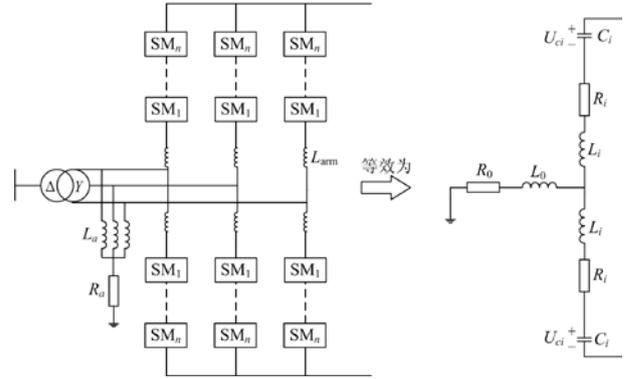


图 5 交流侧接地换流器等效

Fig. 5 AC side grounding converter equivalent

$$L_i = \frac{2L_{arm}}{3} \quad (9)$$

$$R_i = \frac{NR_{on}}{3} \quad (10)$$

$$C_i = \frac{12C_0}{N} \quad (11)$$

$$L_0 = \frac{L_a}{3} \quad (12)$$

$$R_0 = R_a \quad (13)$$

式中: L_{arm} 为换流站桥臂电感; R_{on} 为单个子模块的导通电阻; N 为单相上(下)桥臂的子模块个数; C_0 为子模块电容; L_a 为交流侧接地电感; R_a 为交流侧接地电阻。

对于接地点和桥臂等效电容形成的放电回路, 流经星形电抗的故障电流过流程度不大, 桥臂子模块电容的能量损失不大, 换流站出口母线之间的电压降不大, 故障电流暂态特性分析可以分为对地电容放电过程和桥臂电容放电过程两个部分。

对地电容放电路径如图 6 虚线所示, 由于换流站母线间的电压降不大, 可以将换流站等效为一个直流电压源, 系统的微分方程组描述与 2.2 节相似。

桥臂等效电容放电过程等效电路如图 6 所示。短实线表示上桥臂电容的放电路径, 长实线表示下桥臂电容的放电路径。根据基尔霍夫定律, 可得到放电回路微分方程组:

$$\begin{cases} -u_{c1} + R_0(i_1 + i_3) + L_0 \frac{d(i_1 + i_3)}{dt} + (R_1 + R)i_1 + (L_1 + L) \frac{di_1}{dt} = 0 \\ -u_{c2} + R_0(i_2 - i_3) + L_0 \frac{d(i_2 - i_3)}{dt} + (R_1 + R)i_2 + (L_1 + L) \frac{di_2}{dt} = 0 \\ u_{c3} - u_{c4} + R_0(i_1 + 2i_3 - i_2) + L_0 \frac{d(i_1 + 2i_3 - i_2)}{dt} + \\ (R_1 + R_2 + 2R)i_3 + (L_1 + L_2 + 2L) \frac{di_3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

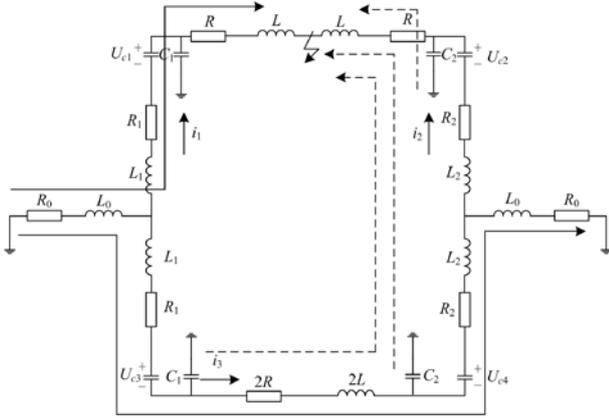


图 6 交流侧接地 MMC 系统简化计算模型

Fig. 6 Simplified calculation model for AC side grounded MMC system

桥臂电容电压微分方程组为

$$\begin{cases} C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = -i_1 \\ C_2 \frac{du_{c2}}{dt} = -i_2 \\ C_1 \frac{du_{c3}}{dt} = i_3 \\ C_2 \frac{du_{c4}}{dt} = -i_3 \end{cases} \quad (15)$$

电流初始值为换流站正常运行时的电流值，电容电压的初始值为换流站直流母线电压，微分方程组的初值如式(16)所示。

$$\begin{cases} i_1 = i_1(0) \\ i_2 = i_2(0) \\ i_3 = i_3(0) \\ u_{c1} = \frac{U_{dc1}}{2} \\ u_{c2} = \frac{U_{dc2}}{2} \\ u_{c3} = \frac{U_{dc1}}{2} \\ u_{c4} = \frac{U_{dc2}}{2} \end{cases} \quad (16)$$

式中： U_{dc1} 、 U_{dc2} 分别为换流站 1、换流站 2 正常运行时的母线电压。

联立式(14)和式(15)即可解得桥臂等效电容的放电电流，线路实际故障电流由线路对地电容放电电流和桥臂等效电容放电电流组成。

3 仿真验证

为了验证上述方法和理论，在 PSCAD/EMTDC 中搭建了一个基于半桥子模块多电平换流器的两端

直流系统，如图 7 所示。MMC 换流站和直流线路相关参数如表 1 和表 2 所示。表 1 中： L_a 为星形接地电抗电感值； R_a 为接地电阻值； L_{arm} 为换流站桥臂电感值； R_{on} 为换流站子模块导通电阻； C_0 为单个子模块电容值； N 为单相上(下)桥臂的子模块数量。

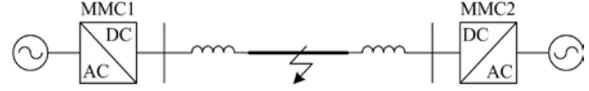


图 7 两端直流系统

Fig. 7 Two-terminal MMC system

表 1 换流站参数

Table 1 Parameters of the converters

| 换流站 | L_a/H | R_a/Ω | L_{arm}/mH | $R_{on}/m\Omega$ | $C_0/\mu F$ | N |
|-----|---------|--------------|--------------|------------------|-------------|-----|
| 1 | 2 | 200 | 29 | 1.361 | 10 000 | 200 |
| 2 | 2 | 200 | 29 | 1.361 | 10 000 | 200 |

表 2 直流线路参数

Table 2 Parameters of DC lines

| 电感/mH | 电阻/ Ω | 对地电容/mF | 平波电抗器/mH |
|-------|--------------|---------|----------|
| 0.812 | 2.184 | 0.067 5 | 100 |

系统采用主从控制策略，换流站 1 采用定有功功率控制(-300 MW)，定无功功率控制(0 Mvar)；换流站 2 采用定直流电压控制(640 kV)，定无功功率控制(0 Mvar)。

在系统稳定运行的 1.7 s 时，正极线中点发生单极接地故障，故障持续 0.05 s。根据本文提出的计算方法建立故障后的微分方程描述。基于 Matlab 求解系统微分方程组，得到故障电流的值，考虑到断路器 6 ms 内的关断能力^[1]，得到故障电流的计算值与仿真值的对比图如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知，当换流站采用直流侧经钳位电阻接地方式，不考虑线路对地电容存在时，接地点与故障点不形成放电回路，线路上不会产生故障电流，

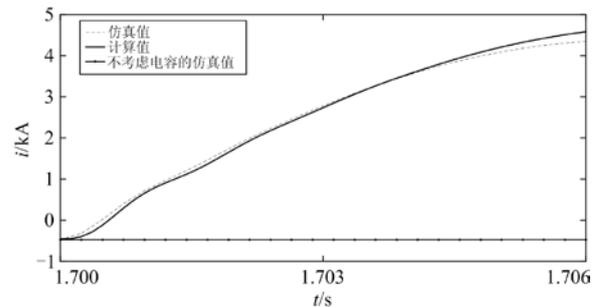


图 8 直流侧接地的故障电流仿真值与计算值的对比

Fig. 8 Comparison of fault current simulation value and calculated value of DC side grounding

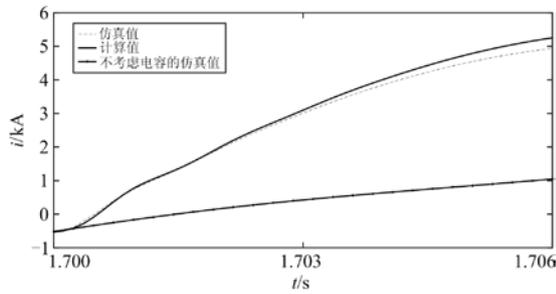


图9 交流侧接地的故障电流仿真值与计算值的对比
Fig. 9 Comparison of fault current simulation value and calculated value of AC side grounding

故障电流仿真曲线是一条平滑的直线；而考虑线路对地电容放电时，线路上会存在故障电流。由图9可知，当换流站采用阀侧中性点经电阻接地或交流母线接星形阻抗经电阻接地方式时，直流线路上会产生故障电流，但由于线路对地电容放电，考虑对地电容存在的线路上的故障电流会远大于不考虑对地电容存在的线路。

由图8和图9可以看出，仿真值与计算值之间有一定的偏差。主要原因是式(6)中 u_i 采用换流站出口母线对地电压，与线路实际的对地电容电压有差值；对星形阻抗接地情况下的故障电流进行分析时，将放电分为两个过程，认为对地电容放电时，换流站母线间的电压保持不变，这与实际情况有所差别；式(14)中的 u_{ci} 采用换流站出口电压，与等效电容的电压有差值；最后，模型的等效过程中也忽略了很多因素，如子模块的投切、换流站的控制方式等。对比仿真结果，故障电流的计算值与仿真值有较高的吻合度，考虑到断路器6ms内的关断能力，本文提出的计算方法对于考虑线路对地电容的故障电流计算有较好的可行性和适用性。该计算方法也可推广到MMC-MTDC系统中。

4 结论

考虑线路对地电容的存在，论文对直流线路进行 π 型等效处理，分析了伪双极MMC-HVDC系统在三种不同接地方式下发生单极接地故障的故障机理。基于该机理分析，本文提出了一种考虑直流线路对地电容的MMC-HVDC系统直流侧单极接地故障电流的计算方法。该方法通过建立微分方程组来描述系统发生故障时的简化等效电路，通过Matlab解得故障电流。对比仿真结果，故障电流的计算值与仿真值有较高的吻合度，能很好地反映系统的暂态特性。本文提出的计算方法充分考虑到直流线路的影响，对于直流系统保护配置、相关参数的优化

具有较大工程意义。该方法忽略了换流站的控制方式的影响，对于线路分布参数的等效也较为简单，有待以后深入研究。

参考文献

- [1] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [2] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3733.
WU Yanan, LÜ Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733.
- [3] 陈继开, 孙川, 李国庆, 等. 双极 MMC-HVDC 系统直流故障特性研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 53-68.
CHEN Jikai, SUN Chuan, LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipole MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-68.
- [4] 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.
- [5] 罗永捷, 徐罗那, 熊小伏, 等. MMC-MTDC 系统直流单极对地短路故障保护策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 98-106.
LUO Yongjie, XU Luona, XIONG Xiaofu, et al. Pole-to-ground DC fault protection of MMC-MTDC systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 98-106.
- [6] XUE Shimin, LIAN Jie, QI Jinlong, et al. Pole to ground fault analysis and fast protection scheme for HVDC based on overhead transmission line[J]. Energies, 2017, 10: 1-17.
- [7] 赵成勇, 李探, 俞露杰, 等. MMC-HVDC 直流单极接地故障分析与换流站故障恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3518-3526.
ZHAO Chengyong, LI Tan, YU Lujie, et al. DC pole-to-ground fault characteristic analysis and converter fault recovery strategy of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2014, 34(21): 3518-3526.
- [8] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [9] 李俊松, 张英敏, 曾琦, 等. MMC-MTDC 系统单极接地故障电流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 213-222.
LI Junsong, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. Pole-to-ground fault current calculation method for MMC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 213-222.
- [10] 梅念, 陈东, 吴方劫, 等. 基于 MMC 的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.
MEI Nian, CHEN Dong, WU Fangjie, et al. Study on grounding methods for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1247-1253.
- [11] 马焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 50-57.
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 50-57.
- [12] 高淑萍, 胡振宇, 张保会, 等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.
- [13] 李国庆, 付贵, 王斯忱, 等. MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 107-112.
LI Guoqing, FU Gui, WANG Sichen, et al. Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 107-112.
- [14] WANG M, BEERTEN J, HERTEM D V. Frequency domain based DC fault analysis for bipolar HVDC grids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(4): 548-559.
- [15] MOKHBERDORAN A, CARVALHO A, SILVA N, et al. Application study of superconducting fault current limiters in meshed HVDC grids protected by fast protection relays[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143(2): 292-302.
- [16] BUCHER M K, FRANCK C M. Fault current interruption in multi-terminal HVDC networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 87-95.
- [17] HU Jiabing, XU Kechen, LIN Lei, et al. Analysis and enhanced control of hybrid-MMC-based HVDC systems during asymmetrical DC voltage fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1394-1403.
- [18] SAAD H, RAULT P, DENNETIERE S. Study on transient overvoltages in converter station of MMC-HVDC links[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 160(7): 397-403.
- [19] LI Rui, XU Lie, YAO Liangzhong. DC fault detection and location in meshed multi-terminal HVDC system based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [20] LI Chengyu, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. A pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4943-4952.
- [21] LI Bin, HE Jiawei, TIAN Jie, et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 275-282.
- [22] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [23] MUSA M H H, HE Z, FU L, et al. A cumulative standard deviation sum based method for high resistance fault identification and classification in power transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 291-302. DOI: 10.1186/s41601-018-0102-4.
- [24] ZHANG Zheren, XU Zheng. Short-circuit current calculation and performance requirement of HVDC breakers for MMC-MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2016, 11(2): 168-177.
- [25] AJAEI F B, IRAVANI R. Cable surge arrester operation due to transient overvoltages under DC-side faults in the MMC-HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1213-1222.

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-03-12

作者简介:

彭宇锋(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: 963150765@qq.com

张英敏(1974—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, 直流输电; E-mail: zhangym_cd@163.com

李俊松(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电. E-mail: 1334519420@qq.com

(编辑 周金梅)