

基于边界电流的柔性直流线路保护新方案

吕承¹, 邵能灵¹, 郑晓冬¹, 刘剑²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网浙江省电力公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电线路保护技术越来越受到关注, 由于 MMC-HVDC 与传统高压直流输电有所差别, 提出一种基于边界电流的新型柔性直流线路保护方案。通过对 MMC-HVDC 直流线路在不同位置发生各类故障时线路边界电流波形的变化特征进行分析, 当线路发生内部故障时, 其暂态过程中线路整流侧出口电流值明显大于逆变侧出口。当线路发生外部故障时, 两端电流值则无明显差异。在此基础上, 提出基于边界电流波形差异度的 MMC-HVDC 直流线路保护判据, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端 MMC-HVDC 模型。大量的仿真结果表明, 该保护方案能够正确地判别区内故障和区外故障, 具有较高的可靠性。

关键词: 波形差异度; 模块化多电平换流器; 柔性直流; 边界电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.015 中图分类号: TM721 文章编号: 1673-9140(2020)01-0115-07

Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current

LV Cheng¹, TAI Nengling¹, ZHENG Xiaodong¹, LIU Jian²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: More and more attentions are paid to the protection strategy for the MMC-HVDC. Due to the difference between the mmc-hvdc and traditional HVDC, a new flexible DC line protection scheme is proposed based on the boundary current. Firstly, transient characteristics of both ends of current waveforms are analyzed when various types of faults in HVDC lines occur in different positions. It is noticed that the line current in the rectifier is significantly greater than that in the inverter side during the transient process of internal fault. Comparably, there are no significant differences between the two ends of current value at external faults. Secondly, a DC line protection strategy for MMC-HVDC is proposed based on boundary current distance. Finally, the simulation and verification of protection strategy are carried out on the 21-level MMC-HVDC system. It is shown that the proposed protection strategy can correctly distinguish the internal fault from the external fault, thus has high reliability.

Key words: waveform difference; modular multilevel converter; boundary current; dc line

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)采用子模块串联的结构^[1-4], 不需要元件具有高度一致性, 采用特殊的调制方法以较低

的开关频率获得很高的等效频率, 因此在当前柔性直流工程中被广泛采用^[5-8]。柔性直流输电发展受电压源换流器对交直流故障的低耐受能力的限制,

且在直流线路发生故障后,线路故障电流很快上升,并伴有很大的峰值,在几毫秒内能危害输电系统的安全^[9-10]。由于直流断路器暂未大量投入使用,往往要由交流侧断路器参与切除线路故障,因此每次直流故障都可能会造成系统停运,不能体现柔性直流系统的优越性^[11-14]。对各种保护方案来说,文献^[15]提出一种新的高压直流线路差动保护方案,不受分布电容电流影响。文献^[16]针对故障后电流较小,线路差动保护定值较低的特点,提出基于频谱比较的直流线路差动保护闭锁判据。文献^[17]通过实例分析高压直流极母线差动保护误动原因,在不平衡电流方面对差动保护进行可靠的改进。文献^[18]考虑平波电抗器两侧特定频段的暂态能量,提出改进的保护方案。但是,MMC-HVDC 与传统高压直流输电在拓扑结构、控制方式和暂态特性等方面有所区别,因此有必要研究针对 MMC-HVDC 的线路保护方案。

该文利用 MMC-HVDC 直流线路在不同位置故障情况下线路两端电流变化的特征,定义边界电流波形差异度。比较线路两端故障电流,通过计算在故障时直流输电线路两端所测电流波形差异度,选择合适的整定值,区分线路区内故障和区外故障。仿真结果表明该保护方案具有较高的可靠性和抗过渡电阻能力。

1 MMC-HVDC 直流故障特性分析

1.1 MMC-HVDC 系统结构

MMC-HVDC 系统由两端 MMC 换流站和直流线路组成,其中一侧换流站的主电路拓扑结构如图 1 所示。开关元件的开断决定子模块的投切,所有投入子模块的电容器电压支撑起直流线路电压^[12]。

MMC-HVDC 系统故障可大致分为直流侧故障、交流侧故障和换流站故障 3 类。如图 2 所示, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 分别指示正极接地短路、负极接地短路、极间短路、整流侧短路和逆变侧短路^[19]。

1.2 单极接地故障特性分析

如图 3 所示,MMC-HVDC 在正常运行状态下虚拟零电位点为点 1。已有研究表明,当直流线路发生单极接地短路时,由于存在直流侧钳位大电阻,子模块电容电压几乎保持不变,仅是虚拟零电位点由 1 转移至 2^[20-21]。

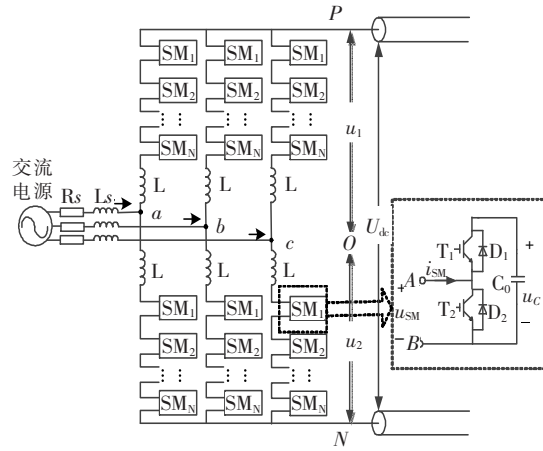


图 1 三相 MMC 主电路拓扑结构

Figure 1 Three phase MMC main circuit topology

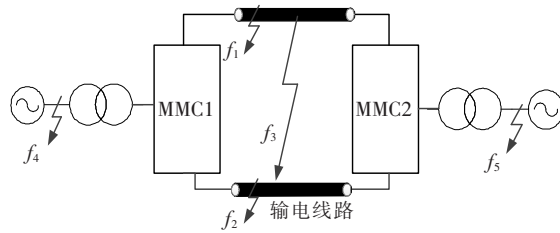


图 2 MMC-HVDC 系统故障示意

Figure 2 MMC-HVDC system fault diagram

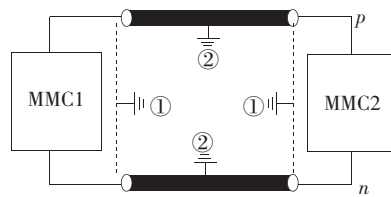


图 3 MMC-HVDC 单极故障示意

Figure 3 MMC-HVDC single pole fault diagram

正常运行时,记 MMC1 侧正极对地电压为 U_{p1} , 负极对地电压为 $U_{n1} = -U_{p1}$; MMC2 侧正极对地电压 U_{p2} , 负极对地电压为 $U_{n2} = -U_{p2}$ 。此时线路两侧电流值相等,等于线路两端的电压差除以线路等值阻抗 Z_L , 即

$$I_{dc1} = I_{dc2} = \frac{U_{p1} - U_{p2}}{Z_L} \quad (1)$$

以正极接地短路为例,故障后单相上桥臂电路如图 4(a)所示。故障点过渡电阻为 R_f , 故障电流为 I_f , 线路模型以故障点为界分为 R_{p1}, L_{p1} 和 R_{p2}, L_{p2} , 线路两侧电流为 I_{dc1}, I_{dc2} , 桥臂电感为 L , 交流系统接地电阻为 R_s , 整流侧输入功率 P_1 , 逆变侧输出功率 P_2 。

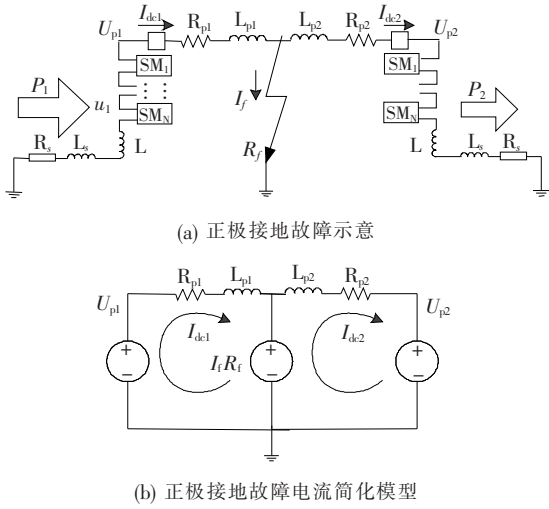


图 4 正极接地故障单相电路

Figure 4 Single phase circuit diagram of positive pole grounding fault

故障后交流系统继续向线路传输功率,而线路接地点与交流系统接地点形成通路,由图 4(b)可知,整流侧边界电流和逆变侧电流为

$$\begin{cases} I_{dc1} = \frac{U_{p1} - U_f}{Z_{p1}} = \frac{U_{p1} - I_f R_f}{R_{p1} + j\omega L_{p1}} \\ I_{dc2} = \frac{U_f - U_{p2}}{Z_{p2}} = \frac{I_f R_f - U_{p2}}{R_{p2} + j\omega L_{p2}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)显示直流线路发生正极接地故障后,整流侧故障边界电流与故障点位置相关,取决于整流侧出口至故障点的线路等值阻抗 Z_{p1} , 电流方向取决于直流电压 U_{p1} 与故障点电压 $I_f R_f$ 的相对大小。逆变侧故障边界电流大小取决于故障点至逆变侧出口的线路等值阻抗 Z_{p2} 。电流方向取决于故障点电压 $I_f R_f$ 与该侧直流电压 U_{p2} 的相对大小。线路两端测得的边界电流变化方向相反。随着过渡电阻 R_f 取值与故障点位置的变化,当 $I_f R_f < U_{p2}$ 时,逆变侧电流 I_{dc2} 为负值,两侧交流系统同时向短路点注入功率。

1.3 极间短路故障特性分析

当线路发生正负极短路故障时,整流侧和逆变侧换流站内的子模块电容通过短路点迅速放电,如图 5 所示。正负极线路电压迅速下降直至放电结束,换流站间功率传输迅速终止^[22-23]。

直流母线发生极间短路故障的分析电路如图 5 所示,换流站闭锁前,投入运行的子模块的电容通过 T_1 迅速放电,而处于切除状态的子模块由于电容被短路,因此仅由二极管 D_2 提供短路电流通路,所有

投入运行的子模块电容器电压串联通过线路阻抗、桥臂及线路感抗和 N 个并联电容快速放电。

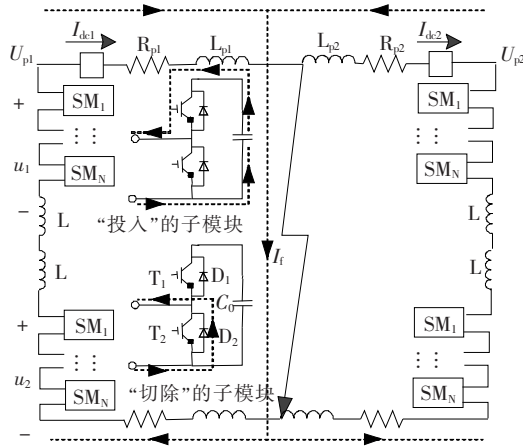


图 5 极间短路故障电路

Figure 5 Pole-to-pole short circuit fault diagram

故障发生后,整流侧边界电流将迅速上升为

$$I_{dc1} = \frac{U_{dc}}{2R_{p1} + 2j\omega L_{p1}} \quad (3)$$

与正常运行时电流值相比,放电开始时电流将急剧增大。逆变侧由投入运行的子模块中的直流电容电压向故障点迅速放电,电流绝对值也将迅速增大为

$$I_{dc2} = -\frac{U_{dc}}{2R_{p2} + 2j\omega L_{p2}} \quad (4)$$

2 波形差异度

波形差异度用来比较 2 个波形之间的相似度,这里引入连续量和离散量的 2 种定义^[24]:

定义 1 假设 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是 2 个随机连续时间函数 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 经采样得到的连续采样函数, $y(t+t)$ 是函数 $y(t)$ 经过时延 t 后的函数,采样周期为 $2T$,则连续采样函数 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的波形差异度为

$$\Delta xy(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - y(t+\tau)] dt \quad (5)$$

波形 $x(t)$ 和时延后的波形 $y(t+t)$ 直接作差表示两波形的差异,该差值在一个采样周期上的时间积分平均值表示 2 个原始函数的差异度。

将不同组波形差异度进行归一化,利用标幺值改进定义 1 可得:

$$\Delta_* xy(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x_*(t) - y_*(t+\tau)] dt \quad (6)$$

微机保护的输入量应是连续函数在一定时间窗内的离散采样值,因此,设定义 1 中的连续随机函数 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 通过离散采样得到 $x(n)$ 、 $y(n)$,由此可得关于离散函数的波形差异度定义。

定义 2 假设 $x(n)$ 、 $y(n)$ 是 2 个随机连续时间函数 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 经采样得到的离散采样函数, $n = 0, 1, 2, \dots, N$, 则离散采样函数 $x(n)$ 、 $y(n)$ 的波形差异度用标幺值定义为

$$\Delta_{*xy}(0) = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N [x_*(n) - y_*(n)] \quad (7)$$

3 直线路保护方案

3.1 区外故障特性分析

交流侧故障对直流线路的影响是通过影响换流站的电压而起作用的,交流电压变化的幅值、速率以及相位的变化都会引起直流线路电量的变化。以下分别分析整流侧外发生交流故障和逆变侧外发生交流故障对直流线路的影响。

若整流侧外发生交流母线短路故障,图 6 是典型的两端 MMC-HVDC 系统主电路,电流参考方向如图中箭头所示,其中正极线路正方向为从整流侧流向逆变侧,负极线路正方向为从逆变侧流向整流侧。由于 MMC-HVDC 调制策略的关系,交流电压的跌落会引起整流侧换流站输出直流电压 U_{dc1} 降低,则线路两侧保护测得的边界电流值均会降低。由行波理论,逆变侧边界电流 I_{dc2} 的变化特征会滞后整流侧边界电流 I_{dc1} 时间 Δt ,其中 $\Delta t = L/v$, L 为两侧保护之间的距离, v 为电流行波传递速率,受对地电容影响,线路两侧边界电流波形会有微小差异^[24]。

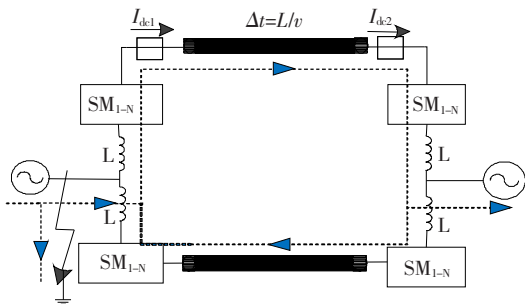


图 6 交流侧故障电路

Figure 6 AC system circuit fault diagram

若逆变侧外发生交流母线短路故障,逆变侧交流电压会跌落。则线路两侧保护测得的边界电流值

都会上升,而由于行波理论,两侧边界电流的变化特征会相差时间 Δt ,但波形相近。

另一类区外故障是换流站直流出口发生接地短路故障,逆变器和整流器直流出口接地短路故障分别如图 7(a)所示,不仅整流侧交流对短路点供电,同时线路对地电容电压也对短路点供电,因此故障发生时两侧保护的边界电流同时增大,且逆变侧边界电流 I_{dc2} 大于整流侧边界电流 I_{dc1} 。整流器直流出口接地短路故障如图 7(b)所示。

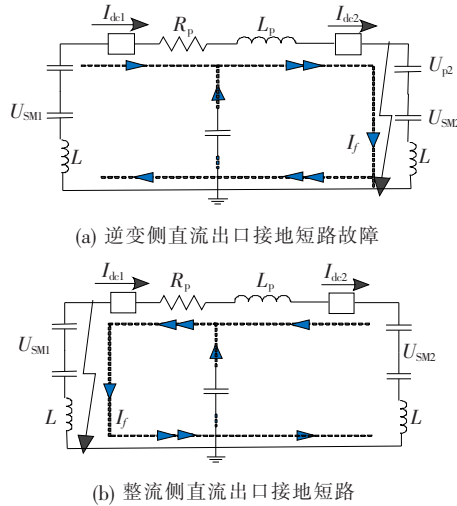


图 7 换流器直流出口接地故障电路

Figure 7 DC ground fault in converter outlet diagram

3.2 区内外故障辨别判据

直流线路发生内部故障和外部故障时,两侧保护的电流变化有不同特征。用直流线路两侧电流量的波形差异度来判断是否发生直流线路内部故障,将线路两侧直流电流值带入式(7),定义线路边界电流波形差异度为

$$\Delta_{*I_{dc}}(0) = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N [I_{dc1*}(n) - I_{dc2*}(n)] \quad (8)$$

式中 $I_{dc1*}(n)$ 和 $I_{dc2*}(n)$ 分别表示换流器 MMC1 和 MMC2 侧保护测到的直流线路电流。

当 MMC-HVDC 系统正常运行时,两侧换流器测到的电流值数值相等,即 $I_{dc1*}(n) = I_{dc2*}(n)$,由此计算的直流电流波形差异度 $\Delta_{*I_{dc}}(0) = 0$;当 MMC-HVDC 系统内部发生接地故障时,由于等效阻抗减小,整流侧电流 $I_{dc1*}(n)$ 急剧增大,因此计算出的差异度 $\Delta_{*I_{dc}}(0) > 0$;当线路发生外部故障时, $I_{dc1*}(n)$ 和 $I_{dc2*}(n)$ 同极性变化,此时的电流差异度 $\Delta_{*I_{dc}}(0) = 0$,类似于正常运行情形。由此,可

以将直流输电线路两侧电流量 $I_{dc1}(n)$ 和 $I_{dc2}(n)$ 的波形差异度 $\Delta^*I_{dc}(0)$ 的大小作为线路内部接地故障的判据。

3.3 保护方案流程框图

基于边界电流的 MMC-HVDC 直流线路保护方案流程如图 8 所示,MMC-HVDC 系统的直流电压在故障发生时有突变,因此可以将直流电压的突变 $|dU_{dc}/dt| > U_{set}$ 作为保护的启动判据。当 $|dU_{dc}/dt| > U_{set}$ 时,保护启动,对直流线路两侧电流值进行采样,由式(8)计算波形差异度 $\Delta^*I_{dc}(0)$,选择适当的 Δ^*I_{set1} 和 Δ^*I_{set2} 作为区内外故障辨别判据的整定值,当 $\Delta^*I_{dc}(0) > \Delta^*I_{set2}$ 时,保护判断 MMC-HVDC 系统发生了区内接地故障,因此保护动作;当 $\Delta^*I_{dc}(0) < \Delta^*I_{set1}$ 时,保护判别 MMC-HVDC 系统处于正常运行或发生区内故障,因此保护不动作。

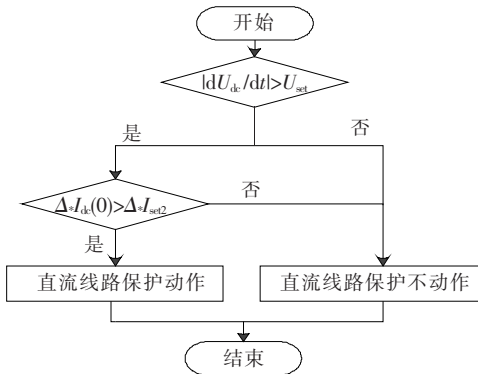


图 8 直流线路保护流程

Figure 8 DC line protection flow diagram

4 仿真验证

为了验证该文所提保护方案的正确性,对 PSCAD/EMTDC 中双端 21 电平 MMC-HVDC 模型进行分析,系统如图 9 所示,系统仿真条件设置如表 1 所示,故障前系统已处于正常运行的稳定状态。

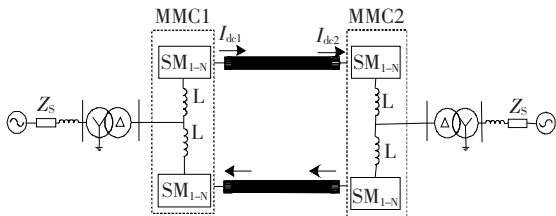


图 9 两端 21 电平 MMC-HVDC 系统

Figure 9 Two end 21-level MMC-HVDC system

表 1 系统仿真条件设置

Table 1 Simulation settings of the system

有功功率/ MW	直流电压/ kV	电缆长度/ km	故障起始时间/ s
400	±200	200	0.6
子模块电容/ μF	桥臂电感/ mH	交流系统电压/ kV	故障持续时间/ s
3 000	60	230	0.4

4.1 区内故障仿真结果

当直流线路在不同距离处发生单极接地和极间故障时,整流侧直流电流波形与逆变侧有明显差异,即整流侧电流数值大于逆变侧电流数值。在两端 21 电平 MMC-HVDC 模型中对基于边界电流波形差异度的保护方案进行仿真验证。首先用式(8)对直流线路内部发生故障进行波形差异度计算。为了保证保护的速动性,取故障发生后 3 ms 内的电流波形采样值计算边界电流差异度,即对 0.6~0.603 s 内的边界电流波形进行差异度计算。

对故障发生在不同距离、经不同过渡电阻值的情形进行仿真,以线路正极接地为例,波形差异度仿真结果如表 2 所示。大量仿真结果表明,直流线路发生内部故障时差异度大于 0,并且随着过渡的增大而减小。考虑到线路末端经高阻接地时保护应可靠动作,过渡电阻为 500 Ω 时差异度 $\Delta^*I_{dc}(0) > 0.2$ 。

表 2 正极故障仿真结果

Table 2 Simulation results under positive pole fault

故障点 距离/km	过渡电 阻/Ω	差异度	判定结果
10	50	1.624 2	区内故障,保护动作
	200	0.519 5	区内故障,保护动作
	500	0.216 5	区内故障,保护动作
100	50	1.676 4	区内故障,保护动作
	200	0.538 3	区内故障,保护动作
	500	0.228 7	区内故障,保护动作
190	50	1.638 3	区内故障,保护动作
	200	0.525 7	区内故障,保护动作
	500	0.222 2	区内故障,保护动作

4.2 区外故障仿真结果

对不同类型区外故障进行波形差异度仿真计算,结果如表 3 所示。由表 3 可知,线路外部故障和正常运行时均有 $\Delta^*I_{dc}(0) < 0.01$,选择整定值

$\Delta * I_{set1} = 0.01$ 、 $\Delta * I_{set2} = 0.2$, 此时保护具有足够的选择性。

表 3 线路区外故障仿真结果

Table 3 Simulation results under external faults

外部故障类型	差异度	判定结果
MMC1 直流出口接地	-1.719 0	区外故障, 保护不动作
MMC1 交流侧单相接地短路	-0.002 5	区外故障, 保护不动作
MMC1 交流侧两相相间短路	0.003 6	区外故障, 保护不动作
MMC1 交流侧三相短路	-0.004 5	区外故障, 保护不动作
MMC2 直流出口接地	-1.150 4	区外故障, 保护不动作
MMC2 交流侧单相接地短路	0.005 4	区外故障, 保护不动作
MMC2 交流侧两相相间短路	-0.000 9	区外故障, 保护不动作
MMC2 交流侧三相短路	0.004 9	区外故障, 保护不动作
正常运行	0.002 1	保护不动作

大量仿真结果发现, 基于边界电流的柔性直流线路保护方案对于线路故障区域具有灵敏的区分能力, 保证区内故障正确动作, 区外故障及正常运行时可靠不误动。当过渡电阻较大、短路电流过载不多时, 仍能较好地区分区内故障和区外故障。该保护方案可靠性高, 计算速度快, 对采样频率要求低, 且受系统参数影响小。

5 结语

该文首先在分析 MMC-HVDC 线路故障暂态特性的基础上针对直流线路内外部故障时线路两侧电流数值进行分析, 根据电流波形特征提出基于边界电流的柔性直流线路保护新方案。

在所搭建的 MMC-HVDC 系统上进行保护方案的仿真验证, 能够正确地判别区内故障和区外故障并正确动作。仿真结果表明: 基于边界电流的保护新方案原理简单、计算速度快, 受过渡电阻和故障距离影响小, 具有较高的可靠性和灵敏性。

参考文献:

- [1] 汤广福, 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 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.
- [3] Ooi B T, WANG Xiao. Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1990, 5(2): 229-235.
- [4] 刘长富, 张玉龙, 竺炜, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统下垂控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 47-53.
- LIU Changfu, ZHANG Yulong, ZHU Wei, et al. Improved droop control strategy for MMC-MTDC system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 47-53.
- [5] 邱欣, 夏向阳, 蔡洁, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流故障自清除控制保护策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 88-94.
- QIU Xin, XIA Xiangyang, CAI jie, et al. Full bridge-type MMC-HVDC with DC fault clearing protection strategies [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 88-94.
- [6] 乔立华, 陶然, 宋国兵, 等. 直流线路边界特性保护综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
- QIAO Lihua, TAO Ran, SONG Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.
- [7] 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 applications of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [8] 张东辉, 冯晓东, 孙景强, 等. 柔性直流输电应用于南方电网的研究 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 1-6.
- ZHANG Donghui, FENG Xiaodong, SUN Jingqiang, et al. Research of VSC HVDC application to china southern power grid [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 1-6.
- [9] 周德生, 李佳朋, 李宇骏, 等. 基于暂态高频能量的多端直流系统故障检测方法 [J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 71-77.
- ZHOU Desheng, LI Jiapeng, LI Yujun, et al. DC fault detection in MTDC systems based on transient high-frequency current [J]. Smart Power, 2019, 47(5): 71-77.
- [10] YANG Jing, 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.
- [11] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-167.

- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167.
- [12] 余超耘,蔡泽祥,李晓华,等.换流器直流差动保护动作特性分析与优化[J].电网技术,2015,39(6):1744-1750.
- YU Chaoyun, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis and optimization on operation characteristics of DC differential protection of HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1744-1750.
- [13] 韩昆仑,蔡泽祥,李佳曼,等.考虑直流控制的换流器交流侧故障及其保护动作行为分析[J].高电压技术,2014,40(8):2531-2540.
- HAN Kunlun, CAI Zexiang, LI Jiaman, et al. Analysis of fault on the AC side of converter and action of converter protection considering DC control [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2531-2540.
- [14] 郭铸,李明,陈艳霞,等.基于故障特征提取及最严苛工况寻找的换流器直流差动保护快速整定[J].电网技术,2016,40(3):944-951.
- GUO Zhu, LI Ming, CHEN Yanxia, et al. Research on rapid setting of converter DC differential protection based on fault feature extracting and harshest condition searching [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 944-951.
- [15] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等.高压直流输电线路电流差动保护新原理[J].电力系统自动化,2010,34(17):45-49.
- GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49.
- [16] 嵇康,邵能灵,刘剑,等.基于暂态电压的多端柔性直流线路保护方案[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):3-10.
- JI Kang, TAI Nengling, LIU Jian, et al. Protection scheme for multi-terminal VSC-HVDC lines based on transient voltage [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 3-10.
- [17] 田庆,原敏宏,王志平,等.高压直流极母线差动保护不平衡电流分析[J].高电压技术,2009,35(4):926-930.
- TIAN Qing, YUAN Minhong, WANG Zhiping, et al. Analysis on the unbalance current of HVDC pole bus differential protection [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 926-930.
- [18] 杨亚宇,邵能灵,刘剑,等.利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5757-5767.
- YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [19] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [20] 索之闻,陈启超,李晖,等.混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):125-132.
- SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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 under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [24] 丁浩寅,邵能灵,郑晓冬.利用信号距离识别的高压直流输电线路保护方案[J].高电压技术,2011,37(5):1186-1193.
- DING Haoyin, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong. HVDC transmission line protection method using signal distance [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1186-1193.