

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190773

MMC-HVDC 系统阀区单相接地故障定位研究

彭涛¹, 郭贤朝², 吴江一¹, 范心明¹, 李新¹

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 模块化多电平的直流输电系统(MMC-HVDC)换流变压器阀侧中性点采用大电阻接地。任何一换流站阀侧发生单相接地故障后, 导致两个换流站的中性点电流幅值和相位均相等。两个换流站都触发中性点过流保护元件动作, 无法准确定位故障位置, 对后续的柔直检修工作带来极大困扰。针对此问题, 深入分析了阀侧单相故障产生的故障电流通道机理, 指出一条放电回路为非全相放电通道, 结合柔直的平衡性控制特点, 该通道即不可控制通道; 另一条零序放电回路为故障放电通道。提出了在一侧换流站增加零序补偿策略, 该策略在原调制电压上叠加零序电压, 导致两换流站中性点电流出现差值而实现故障准确定位。新策略不增加任何测量装置, 简单可靠, 易于实现。最后通过 RTDS 试验平台验证所提策略的正确性。

关键词: 柔性直流输电系统; 单相接地故障; 中性点电流; 零序电压补偿

Research on location of single-phase grounding fault in valve side of MMC-HVDC system

PENG Tao¹, GUO Xianchao², WU Jiangyi¹, FAN Xinming¹, LI Xin¹

(1. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Foshan 528000, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: High resistance grounding is used in the neutral point of valve-side winding of the converter transformer in a modular multi-level HVDC system. Both the amplitude and phase of neutral point current at the two converter stations are equal when the single-phase grounding fault occurs at the valve-side winding of any converter station. The neutral point over-current protection elements of both converter stations will act. It is then not possible to locate the fault position accurately and brings difficulties for the subsequent maintenance of HVDC. To solve these problems, this paper analyzes the mechanism of the fault current channel caused by a single-phase fault on the valve-side winding, and points out that one discharge circuit is a non-full-phase discharge channel. Combining with the characteristics of balancing control on HVDC, one channel is uncontrolled, and the other through a zero-sequence circuit is a fault discharge channel. A control strategy is proposed to add zero-sequence compensation voltage to the one-side converter station. This strategy superimposes a zero-sequence voltage on the original modulation voltage, resulting in the difference of neutral point current between the two converter stations and thus enabling accurate location of the fault. The new strategy is simple, reliable and easy to implement without adding any measuring devices. Finally, the correctness of the proposed strategy is verified by an RTDS test platform.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid (No. GDKJXM 20180049) and National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901004) "Research on UHV Large Capacity Flexible DC Transmission Control and Protection and Real-time Simulation Test Technology".

Key words: MMC-HVDC system; single-phase ground fault; neutral point current; zero sequence voltage compensation

0 引言

模块化多电平直流输电系统(Modular Multilevel

基金项目: 广东电网科技项目资助(GDKJXM20180049); 国家重点研发计划专项课题资助(2016YFB0901004)“特高压大容量柔性直流输电控制保护及实时仿真试验技术研究”

Converter, MMC-HVDC)较常规直流系统具有网侧谐波小, 独立的有功和无功调节性能, 受端换流站无换相失败风险等优势, 使得柔性直流输电系统受到国内外学者们的广泛关注, 其中换流阀子模块 IGBT 较差过流能力, 使得 MMC-HVDC 的直流保护系统研究成为重中之重^[1-2]。

典型的 MMC-HVDC 系统中, 为保证直流母线

正负对称性，需要在换流变阀侧或者直流侧设置接地点。文献[3-7]介绍了 MMC-UPFC、MMC-HVDC 和直流配网的几种接地方案，对比分析了接地故障的特征差异，得出阀侧经高阻接地为现阶段最佳接地方式这一结论。文献[8]针对中性点高阻接地 MMC-HVDC 系统，依据直流单极接地故障特性，研究了电容电压和保护闭锁配合关系，给出一套中性点电阻参数设计原则。就目前研究现状换流变阀侧中性点高阻接地为当前最优设计，因此本文以换流变阀侧星型结构为例，阀侧中性点大电阻接地方式为研究对象。

文献[9-18]从故障机理上分析了单相接地故障的暂态特性，从控制和保护配合方面着手设计保护动作逻辑。考虑远距离架空线应用，学者们将直流极接地故障作为主要研究方向，通过优化控制策略或采用混合型子模块结构实现可靠的直流故障穿越^[19-23]。但换流变阀侧包含启动冲击电阻和桥臂电抗器等一次设备，该区域的单相接地故障也是 MMC-HVDC 的典型故障之一。目前文献主要集中于故障限流和可靠闭锁，对于交流连接区域单相接地故障定位的文献较少。举例两端的柔直系统，任何一换流变阀侧出现单相接地故障后，两个换流站的中性点均流过小电流，导致两个换流站的中性点过流正确动作。这样的动作行为非常不利于故障的排查和维护，对于多端柔直系统，任何一端换流站阀侧单相故障均可导致所有换流站中性点过流而闭锁，不利于多端柔直系统的可靠运行。因此研究准确定位阀侧单相接地故障的方法将变得非常有意义，且实用性较强。

本文以两端柔性直流输电系统为例，换流变阀侧采用 Y 接中性点高阻接地系统。首先分析了主回路的阀侧发生单相接地故障后的故障电流回路，本

文将其定义为第一条放电回路和第二条放电回路，而故障后两条回路的放电电流幅值和相位均相同。通过对比两条放电回路，针对第二条放电回路提出了零序电压补偿策略，补偿零序电压叠加了故障相电压值，导致第二条回路的中性点电流的幅值较第一条回路电流值出现了偏差，可依据两站中性点电流变化情况准确定位故障换流站。最后搭建 RTDS 数字仿真平台，验证了所提方案的可行性。

1 直流输电单相接地故障研究

本文首先研究单相接地故障的故障特性，研究适用于多端直流输电故障定位策略，本文以两端 MMC-HVDC 为例。

1.1 两端直流输电的主接线图

图 1 为两端 MMC-HVDC 的拓扑结构图，其中上下桥臂完全对称，L 为桥臂电抗器，SM 为桥臂子模块，通过控制图中 T1 和 T2 的开通关断，实现子模块中电容的投入和退出，而投入的子模块起到支撑直流电压作用，对于大容量高压的柔直系统，每个桥臂的子模块有数百个。

本文以图 1 所示的主接线为研究对象，换流变采用 Y 型方式，换流变阀侧中性点采用高阻接地方式，以保证直流电压的对称性。对于阀侧出现两相接地故障、两相相间故障和三相接地故障，故障瞬间产生较大的故障电流可触发阀区差动保护可靠动作，立即闭锁换流阀和跳开交流开关。

但是在换流变阀侧发生单相金属性接地故障，故障相相电压跌落至零，所有对地点电位变为原对地电压和故障相电压的叠加，阀侧非故障相相电压峰值变为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，直流极对地电压中叠加了工频故障相电压，两个换流站的中性点电阻有幅值和相位相同的中性点电流。

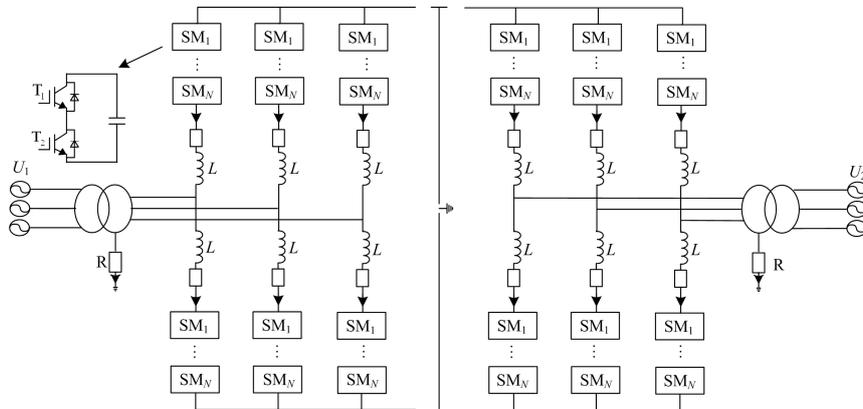


图 1 柔性直流输电的拓扑结构图

Fig. 1 Topology of MMC-HVDC system

单相接地故障主保护一般为中性点过流保护, 该故障将导致两个换流站的中性点过流保护正确动作, 非故障侧保护动作可能干扰运检人员故障定位, 对后续的故障排查和维护带来极大的不便。

1.2 阀侧单相接地故障零序回路的机理分析

假设在 U1 换流站的阀侧发生单相金属性接地故障, 故障后的简化结构图如图 2 所示。

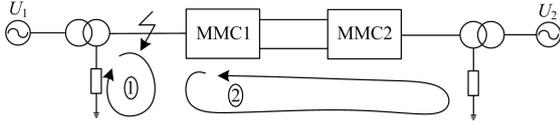


图 2 阀侧单相金属性接地的两条放电通道

Fig. 2 Two discharge channels with single phase metallic grounding on valve side

图 2 描绘了故障后的两条放电通道。第一条回路为 MMC1 非故障相在故障点处等效电压源、故障点和 U1 阀侧中性点电阻组成, 本质是阀侧为非全相对故障点放电; 第二条回路为 MMC1 的故障相、故障点、U2 中性点电阻组成。第二条放电回路中的等效电压源本质上为故障相相电压, 所以两个换流站流过中性点电阻的电流幅值和相位大小近似一致。

下面从原理上进行阐释, 故障发生前阀侧电压即为柔直调制的电压, 如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_{v1a} \\ u_{v1b} \\ u_{v1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1aref} \\ u_{1bref} \\ u_{1cref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{v2a} \\ u_{v2b} \\ u_{v2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{2aref} \\ u_{2bref} \\ u_{2cref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_{v1abc} 和 u_{v2abc} 分别为两个换流站的阀侧电压; u_{1abref} 和 $u_{2abcref}$ 分别为两个换流站柔直调制的阀侧电压目标值。

当 U1 换流站的阀侧 A 相发生单相接地故障, 两换流站的阀侧电压变为

$$\begin{bmatrix} u_{v1a} \\ u_{v1b} \\ u_{v1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{1bref} - u_{1aref} \\ u_{1cref} - u_{1aref} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{v2a} \\ u_{v2b} \\ u_{v2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{2aref} - u_{1aref} \\ u_{2bref} - u_{1aref} \\ u_{2cref} - u_{1aref} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$u_{v1R} = \frac{1}{3}[u_{v1a} + u_{v1b} + u_{v1c}] = -u_{1aref} \quad (5)$$

$$u_{v2R} = \frac{1}{3}[u_{v2a} + u_{v2b} + u_{v2c}] = -u_{1aref} \quad (6)$$

式中, u_{v1R} 和 u_{v2R} 为两个换流站中性点电阻对地电压。式(5)和式(6)的电压表达式结果均为故障相电压, 所以两换流站中性点电流完全相同。

作为第一条回路, 由于 $u_{v1a}=0$, u_{v1R} 可视为非故障相的等效电压, 其中 u_{v1b} 和 u_{v1c} 变为 BA 和 CA 的线电压, 两个换流站中性点电阻对地电压均为 u_{1aref} 。在单相接地故障期间, 第一条回路中零序电流对柔直不平衡控制无任何影响, 若不考虑一次设备耐受能力的话, 柔直单从控制角度上是可以长时间运行在该工况下。而第二条回路零序电压本质上为故障相电压对 U2 换流站的中性点电阻放电, 如果在控制中增加一个零序补偿控制策略, 第一条回路中的等效电压不变, 但第二条放电回路中 u_{v2R} 将叠加零序补偿电压, u_{v2R} 的幅值发生变化, 可依据中性点电流幅值变化情况区别故障位置, 具体策略将在第 2 节详细介绍。

1.3 直流保护的阀侧单相接地故障定位研究

由于单相接地故障后两个换流站中性点电流幅值和相位均相同, 故障期间无法通过差异辨识故障。如果考虑故障定位的时序可发生在保护动作行为之后, 在保护正确动作后毫秒级内正确判断出故障换流站, 对于两端换流站输电系统也是可以接受的。因此直流保护可增加辅助判据, 在换流阀闭锁和断路器跳开期间, 通过故障特性差异区分出故障位置。

仍以图 2 为例, 如果在阀区靠近 U1 侧发生接地故障, 按照图 2 标出两条放电回路, 两个换流站中性点电流都将启动本侧中性点过流动作, 立即闭锁柔直, 跳两侧交流进线断路器。其中放电回路 1 在网侧断路器未跳开前, U1 阀侧中性点电流不会发生任何改变。放电回路 2 故障源为 MMC 故障相调制电压, 随着柔直闭锁, 放电回路 2 中的故障电流瞬时减小为不控充电状态。考虑断路器操作延迟, 通常在换流阀闭锁后到断路器真正跳开需要 40 ms 左右经验值, 所以可以在这个时间差内增加辅助判据: 考虑了有效值计算数据窗, 可比较保护动作出口前 20 ms 和后 20 ms 的中性点电流有效值, 如果故障电流未发生异常变化, 即本侧为故障换流侧; 若中性点电流有效值出现较大变化, 那么本侧为非故障换流站侧。

根据上述保护定位方案, 搭建了两端背靠背的柔性直流输电的 RTDS 试验平台, 详细的系统参数见表 1。图 3 的波形为阀侧 A 相金属性接地故障导致保护触发两侧中性点过流试验波形, 波形自上至下依次为: U1 的阀侧三相电压、U1 侧换流变中性

点电流、U2 的阀侧三相电压、U2 侧换流变中性点电流。

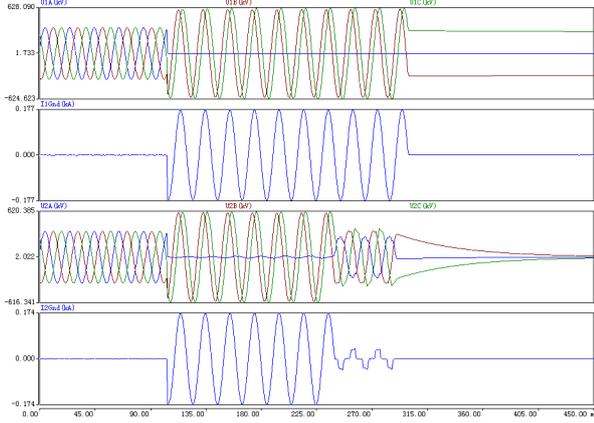


图3 单相接地故障后闭锁柔直

Fig. 3 MMC-HVDC locking after single-phase grounding fault

表1 柔直系统参数表

Table 1 MMC-HVDC parameter table

参数	数值
柔直容量/MW	1 000
额定交流电压/kV	525
额定直流电压/kV	840
桥臂子模块个数/个	500
桥臂电抗值/H	0.14
中性点接地电阻/ Ω	2 000

U1 侧发生单相接地故障，中性点过流保护动作，U1 侧的中性点电流在柔直闭锁前后未发生明显改变，U2 侧的中性点电流有效值由闭锁时刻的 123 A 跌落至 20 A。

对于两端系统，在保护中增加辅助判据是可以判断出故障换流站。但对于三端直流系统来说，阀侧单相故障导致三个换流站均闭锁，通过保护增加辅助判据方法将不适用。

2 阀侧单相接地故障定位研究

1.3 节仅通过保护增加辅助判据已无法实现准确定位，1.2 节已阐释了第一条放电回路不受零序电压影响，但第二条放电回路与零序电压相关。本文则借助这一思想，如果在回路 2 中增加一些特征谐波量或补偿量等，可靠区分 U1 和 U2 的中性点电流，即可实现对故障的准确定位。

目前柔直控制采用电压定向的 dq 轴闭环控制，该策略可独立调节有功和无功。柔直的控制策略中一般不增加零序补偿控制，式(7)为电流内环输出两相静止坐标系下的调制电压，其中零序补偿电压 u_0

为零。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据前文分析的阀侧故障柔直零序回路的产生机理，依据基尔霍夫电压定律，零序补偿电压可表示为

$$u_0 = ki_{gnd}R \quad (8)$$

式中： k 为补偿系数； i_{gnd} 为流过中性点电阻电流； R 为中性点电阻阻值。本文提出只在一个换流站增加零序电压补偿策略，那么有可能出现故障侧补偿零序电压和非故障侧补偿零序电压两种情况，举例故障侧补偿零序电压，故障后的阀侧电压可表示为式(9)和式(10)。

$$\begin{bmatrix} u_{v1a} \\ u_{v1b} \\ u_{v1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{1bref} - u_{1aref} \\ u_{1cref} - u_{1aref} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u_{v2a} \\ u_{v2b} \\ u_{v2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{2aref} - u_{1aref} - u_0 \\ u_{2bref} - u_{1aref} - u_0 \\ u_{2cref} - u_{1aref} - u_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u_{v1R} = \frac{1}{3}[u_{v1a} + u_{v1b} + u_{v1c}] = -u_{1aref} \quad (11)$$

$$u_{v2R} = \frac{1}{3}[u_{v2a} + u_{v2b} + u_{v2c}] = -u_{1aref} - u_0 \quad (12)$$

式中： u_{v1R} 和 u_{v2R} 分别为两个换流站补偿零序电压后的中性点电阻对地电压。其中 U1 换流站的电压幅值不变，但 U2 换流站中电压叠加了补偿零序电压，幅值必然发生改变。若两侧都补偿 u_0 零序电压，两个换流站调制产生的零序电压相互抵消，无法实现补偿效果。因此，本文所提出补偿策略只在一个换流站采用零序补偿策略，本文默认在 U1 交流系统采取零序补偿策略。如采用所提出控制策略存在两个特殊工况，即故障发生在补偿换流站侧和故障发生在非补偿换流站侧。

工况一：补偿侧发生单相接地故障。

上述分析都是考虑补偿侧发生单相接地故障，式(11)和式(12)为补偿侧发生单相接地故障中性点电阻对地电压。

分辨可靠性来说， k 值选取越大，两侧中性点电流差值越大，有利于区分故障发生区域。但非故障相阀侧电压叠加了零序电压增大了阀侧电压值，

对一次设备的耐压值提出了一个较高的要求, 从一次设备耐压角度考虑, k 值选取越小越好。本文综合考虑, 选取 $k=\sqrt{3}/6$ 。

工况二: 非补偿侧发生单相接地故障。

当 U2 换流站的阀侧 A 相发生单相接地故障, 采用补偿策略后的两换流站的阀侧电压表示为

$$\begin{bmatrix} u_{v1a} \\ u_{v1b} \\ u_{v1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1aref} - u_{2aref} + u_0 \\ u_{1bref} - u_{2aref} + u_0 \\ u_{1cref} - u_{2aref} + u_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} u_{v2a} \\ u_{v2b} \\ u_{v2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{2bref} - u_{2aref} \\ u_{2cref} - u_{2aref} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$u_{v1R} = \frac{1}{3}[u_{v1a} + u_{v1b} + u_{v1c}] = -u_{2aref} + u_0 \quad (15)$$

$$u_{v2R} = \frac{1}{3}[u_{v2a} + u_{v2b} + u_{v2c}] = -u_{2aref} \quad (16)$$

式(15)和式(16)为非补偿侧发生单相接地故障, 对比式(11)和式(12)得出结论:

1) 补偿发生在故障侧, 故障侧中性点电流保持不变, 非故障侧中性点电流增大了 k 倍。故障侧阀侧电压不受零序电压补偿影响, 但是非故障侧的阀侧电压增大了 k 倍。

2) 补偿发生在非故障侧, 故障侧中性点电流保持不变, 非故障侧中性点电流变为故障前 $(1-k)$ 倍。故障侧阀侧电压不受零序电压补偿影响, 但是非故障侧的阀侧电压变为故障前 $(1-k)$ 倍。

为了可以准确判断, 零序电压补偿在检测中性点电流超过阈值后, 延迟 20 ms 以上启动零序电压补偿策略, 20 ms 时间为全周计算有效值的时间窗。通过比较中性点电流较补偿前后的电流变化情况即可确定故障发生换流站。对于多端直流输电系统, 可将 k 值选取不相同, 中性点电流变化差值分别对应不同换流站。

这里需要说明两点, 由于换流变采用 Y 型方式, 如果网侧发生单相接地故障, 阀侧的中性点零序通道将产生零序电流, 这种情况下无需柔直提供零序补偿。需要增加零序补偿启动判据: 中性点电流有效值大于网侧不对称故障下阀侧零序电流阈值后启动零序补偿控制; 考虑到单相非金属性接地故障中过渡电阻会减小中性点电流幅值, 较小的 k 值可能无法准确满足辨识中性点电流变化差值, 所以合理的 k 值选取也较为重要。

综上所述, 采用零序补偿方法, 可正确区别出故障所发生区域, 对柔性直流输电系统的维护工作带来很多方便。

3 RTDS 试验研究

为了验证本文所提方法的正确性, 采用图 2 换流变星型结构, 中性点采用高阻接地方式, 其中整流端采用定直流电压控制策略, 逆变站采用有功功率控制模式, 具体系统参数见表 1。

由于柔直传输有功功率对阀侧电压影响较小, 因此本文试验条件仅在有功传输功率为 0 MW 下。

工况一: 整流站 U1 的阀侧发生单相金属性接地故障

工况二: 逆变站 U2 的阀侧发生单相金属性接地故障

图 4 为工况一试验波形, 波形自上至下依次为: U1 的阀侧三相电压、U1 侧换流变中性点电流、U2 的阀侧三相电压、U2 侧换流变中性点电流。U1 阀侧发生单相金属性接地故障, U1 和 U2 侧的中性点电流有效值均为 122 A, 20 ms 后 U1 侧启动零序电压补偿策略, U1 中性点电流不变, U2 侧中性点电流有效值由 122 A 增大为 144 A, 与本文给定的补偿系数 k 一致, 电流增大侧为非故障侧; 图 5 为工

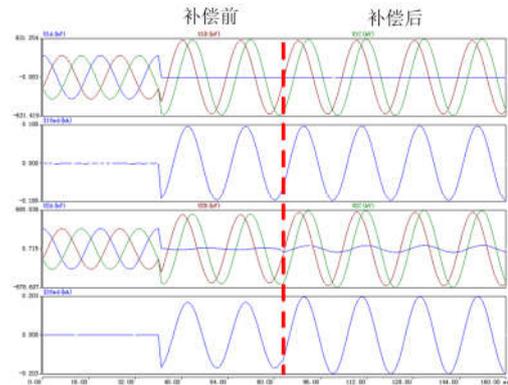


图 4 U1 阀侧发生单相接地故障

Fig. 4 Single-phase grounding fault at U1 valve side

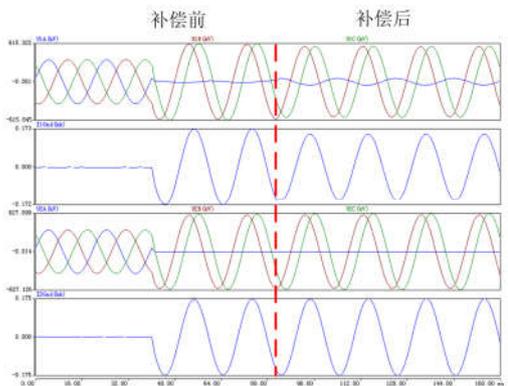


图 5 U2 阀侧发生单相接地故障

Fig. 5 Single-phase grounding fault at U2 valve side

况二试验波形, U2 阀侧发生单相金属性接地故障, U1 侧的中性点电流由未补偿时的有效值 125 A 减小为 105 A, 与本文给定的补偿系数 k 一致, 电流减小侧为非故障侧。通过联合仿真试验验证了本文所提方案的准确性。

4 结论

本文首先以换流变中性点高阻接地的两端直流输电系统为研究对象, 分析了换流变阀侧单相接地故障的两条放电回路的特征:

1) 针对第二条放电回路, 其本质为故障相与对端换流站中性点高阻放电。提出了单一换流站的零序电压补偿控制策略, 并分别说明故障发生在补偿换流站侧和故障发生在非补偿换流站侧。由于补偿零序电压可直接叠加在第二条放电回路中, 导致两条回路中的零序电压幅值发生变化, 可通过中性点电流幅值大小变化关系确定出故障发生换流站。

2) 本文只以两端换流站为实例进行研究, 多端柔直输电也可采用相同做法, 零序电压补偿系数可以修改为大小不一, 用于区别故障换流站。

3) 如果在中性点电阻阻值满足单相接地故障幅值要求, 建议通过一次主接线中将中性点接地电阻阻值修改为大小不一。

参考文献

[1] HAN Xue, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. Transient characteristics underground and short-circuit faults in a ± 500 kV MMC-based HVDC system with hybrid DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1378-1387.

[2] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.

LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.

[3] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1628-1636.

CUI Fubo, GUO Jianpo, JING Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1628-1636.

[4] 郑涛, 吴丹, 陆振纲, 等. MMC-UPFC 不同接地设计的故障特性及对本体保护配置影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 54-67.

ZHENG Tao, WU Dan, LU Zhengang, et al. Impact of MMC-UPFC grounding design on fault characteristics and protection scheme[J]. Electric Power Automation

Equipment, 2017, 37(5): 54-67.

[5] 傅春翔, 汪天呈, 郦洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.

FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integraton[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.

[6] 周廷冬, 徐永海, 吕晓慧. 基于 MMC 的配电网电力电子变压器接地设计及故障特性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 357-368.

ZHOU Tingdong, XU Yonghai, LÜ Xiaohui. Grounding design and fault characteristic analysis MMC based power electronic transformer in distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 357-368.

[7] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 7-16.

DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 7-16.

[8] 彭茂兰, 唐金昆. 一种 MMC-HVDC 系统联接变阀侧中性点电阻参数设计方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 218-223.

PENG Maolan, TANG Jinkun. Design of valve-side neutral-point resistor for connection transformer of MMC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 218-223.

[9] 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.

[10] MA Shuo, XIN Jianyuan, WU Guannan, et al. Characteristic investigation of MMC-HVDC system under internal AC bus fault conditions[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 2228-2232.

[11] LI Gen, LIANG Jun, MA Fan, et al. Analysis of single-phase-to-ground faults at the valve-side of HB-MMCs in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2444-2453.

[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.
- [13] 王振浩, 刘婕, 李国庆, 等. 采用桥臂电抗器耦合的 MMC 直流侧故障过电流抑制新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 18-24.
WANG Zhenhao, LIU Jie, LI Guoqing, et al. A new method of over current suppression based on coupled bridge arm reactors for DC faults of modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 18-24.
- [14] 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.
- [15] 陈勇, 曹伟炜, 柏彬, 等. MMC-UPFC 单相接地故障下运行特性分析及整体保护策略设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 155-166.
CHEN Yong, CAO Weiwei, BAI Bin, et al. Operation characteristics analysis under single-phase grounding fault and overall protection scheme design of MMC-UPFC device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 155-166.
- [16] 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): 53-62.
CHEN Jikai, SUN Chuan, LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-62.
- [17] 裘鹏, 章姝俊, 黄晓明, 等. MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 150-154.
QIU Peng, ZHANG Shujun, HUANG Xiaoming, et al. Research on the protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 150-154.
- [18] LI Rui, XU Lie, YAO Liangzhong. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [19] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 65-74.
QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 65-74.
- [20] 周猛, 向往, 林卫星, 等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2062-2072.
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2062-2072.
- [21] XIANG Wang, YANG Saizhao, XU Lie, et al. A transient voltage-based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 34(1): 334-345.
- [22] 徐征, 刘高任, 郑哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHENG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [23] RAHMAN M H, XU L, YAO L. 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.

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-10-25

作者简介:

彭涛(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护技术的研究和应用工作; E-mail: pt_ao@msn.com

郭贤朝(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向柔性直流控制与保护。E-mail: guoxianchao1990@163.com

(编辑 周金梅)