

DOI: 10.7667/PSPC171429

一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理

高淑萍¹, 胡振宇¹, 张保会², 宋国兵²

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)作为一种新型多电平拓扑结构的电压源换流器, 具有扩展性强、输出电压质量高、谐波含量少等优点, 已经展现出极其重要的工程应用前景。首先介绍了模块化多电平高压直流输电(Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC)的拓扑结构及运行原理, 然后通过故障附加状态网络分别对区内和区外故障进行了分析, 并利用二阶微分法提取了故障时电压、电流的故障分量, 得出了保护策略。根据故障网络分析可知, 当直流线路发生区内故障时, 电流故障分量极性相同; 当直流线路发生区外故障时, 电流故障分量极性相反。因此, 可以根据电流故障分量的极性是否相同来识别区内、外故障, 利用二阶微分法来提取故障时电流的故障分量, 用以识别区内、外故障。另外, 根据故障网络分析还发现, 当直流线路发生区内故障时, 单极故障时电压故障分量极性相同, 双极故障时电压故障分量极性相反。因此, 可以根据电压故障分量的极性是否相同来识别故障极。利用二阶微分法来提取故障时电压的故障分量, 根据电压故障分量的极性, 识别故障所在的极。最后利用 PSCAD 电磁暂态仿真软件建立了 MMC-HVDC 的仿真模型。仿真结果验证了故障分析以及保护方法的正确性。

关键词: MMC-HVDC; 故障分析; 二阶微分法; 继电保护; PSCAD

A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines

GAO Shuping¹, HU Zhenyu¹, ZHANG Baohui², SONG Guobing²

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As a new type of voltage source multilevel converters, the Modular Multilevel Converter (MMC) has strong expansibility, high output voltage quality, low harmonic content, and it has shown the great prospect of application. This paper firstly introduces the topology structure and operation principle of MMC-HVDC. Then, the internal and external faults are analyzed respectively through the fault added state network, and a protection strategy is given by extracting the fault component of current and voltage fault component by two-order differential method. According to the fault network analysis, when the fault occurs in the DC line, the polarity of the current fault component is the same. When the fault occurs outside the DC line, the polarity of the current fault component is opposite. Therefore, the internal and external faults can be identified according to whether the polarity of the current fault component is identical by extracting the current fault component with two derivative identification. In addition, according to the fault network analysis, when the internal fault occurs in the DC line, voltage fault component has the same polarity while unipolar fault occurs in the DC lines, and voltage fault component has opposite polarity while bipolar fault occurs in the DC lines. Therefore, according to the polarity of the voltage fault component, it can recognize fault polarity and extract the voltage fault component by two-order differential method to identify fault polarity. Finally, simulation model of MMC-HVDC is established in PSCAD. Simulation results are given to verify the correctness of the fault analysis and protection methods.

This work is supported by Key Support Projects of National Natural Science Foundation of China (No. U1766209) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777166).

Key words: MMC-HVDC; fault analysis; two-order differential method; relay protection; PSCAD

0 引言

2001年德国联邦国防军大学的 R.Marquardt 和

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点支持项目 (U1766209) 和国家自然科学基金面上项目 (No. 51777166)

A.Lesnjar 提出了模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)拓扑结构, MMC 作为一种新型的拓扑结构应用到电压源型直流输电当中, 采用模块化设计, 使其便于调整子模块串联数量, 灵活改变电压及功率; 降低了开关频率, 减少了损耗; 高的电平数使输出电压更加接近正弦波,

减少了谐波的含量；在配电网的增容、并网、提高电能质量等方面都有着巨大的市场应用价值。目前，(Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current, MMC-HVDC)已经成为柔性直流输电系统的重要发展方向^[1-4]。

鉴于 MMC-HVDC 有着良好的工程应用前景，而 MMC 的拓扑结构与传统的电压源型换流器不同，两者的故障特征也有所区别，因此研究 MMC-HVDC 的故障特性是非常有必要的。文献[5]针对 MMC-HVDC 各类直流故障进行了定性分析，并设计了相应的保护策略；文献[6]建立了双极短路故障下过电流分析的电路模型，对双极短路故障的故障特性进行了详细的分析，对设备的保护的设计有工程指导意义；文献[7-8]提出了双钳位子模块的拓扑结构，构造了新的子模块拓扑结构和半桥子模块混合的拓扑结构，但是双钳位子模块的拓扑结构会出现并联耦合的现象，且在 IGBT 关闭后，上下桥臂电容会出现不同的状态，仍不能解决子模块电容出现的并联耦合问题。文献[9]采用了全桥拓扑结构实现了电流的阻断能力，但存在器件过多问题。文献[10-16]重点研究具有严重直流故障穿越能力的拓扑结构。

本文对双端 MMC-HVDC 输电系统正、负极可能出现的接地故障进行了故障分析，判断了故障发生在直流线路的正极或负极，并且识别了故障是否为区内故障，为继电保护设备是否动作提供了判断依据。最后利用 PSCAD 电磁暂态仿真软件搭建了 ±20 kV MMC-HVDC 的双端直流输电系统的仿真模型，验证了本文故障分析的正确性和有效性。

1 MMC 的拓扑结构运行原理

1.1 MMC 的拓扑结构及工作原理

MMC 的拓扑结构如图 1(a)所示。它由三个相同的相单元组成，每个相单元有上、下两个对称的桥臂，每个桥臂都由 N 个子模块(submodule, SM)和一个电抗器串联组成。电抗器可抑制直流母线发生故障时的冲击电流。图 1(b)为一个 SM 的拓扑结构， T_1 和 T_2 为 IGBT， D_1 和 D_2 为二极管， C 为储能电容器。

图 2 表明了换流器产生相电压波形的原理，从图中可以看出，相单元上、下桥臂导通模块数的变换情况。每个桥臂可以同时开通的子模块数量为 $0 \sim N$ ，所以 MMC 的输出电平为 $(N+1)$ ，一般情况下，每个桥臂所含有的子模块数 N 为偶数，因为每相同时开通 N 个子模块可以由上、下两个桥臂平均分配，上、下两个桥臂开通的子模块数相等，使得相单元

的交流输出电压为零。

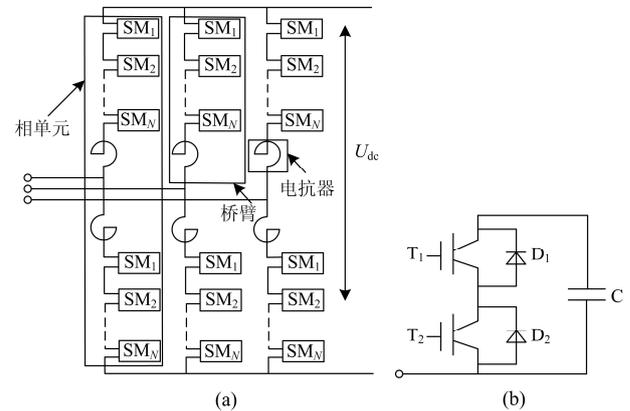


图 1 MMC 及其子模块拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of MMC and its sub-module

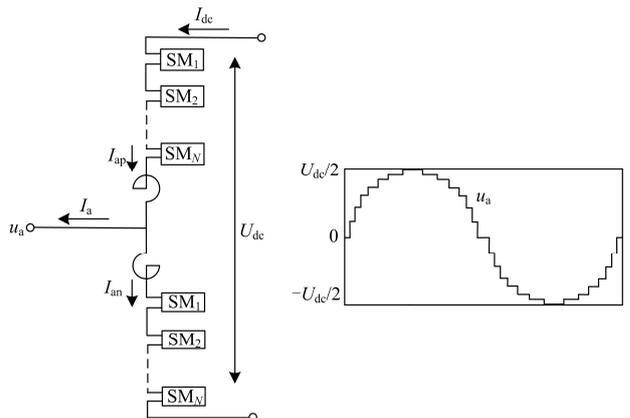


图 2 MMC 相单元运行原理

Fig. 2 Operation principle of phase unit of MMC

1.2 MMC 的模型控制及调制

本文所采用的 MMC-HVDC 的内环电流控制方法如图 3 所示。

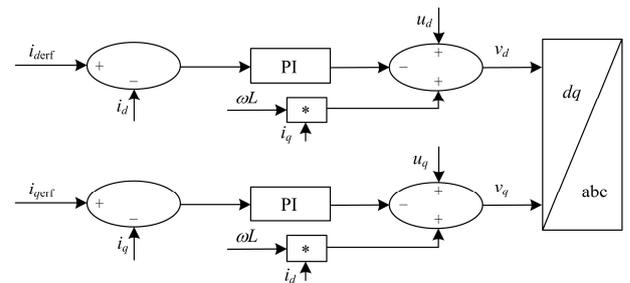


图 3 内环电流控制器框图

Fig. 3 Diagram of inner loop current controller

外环控制如图 4 所示，两端柔性直流输电系统正常运行时，一侧采用定直流电压控制，并配合定无功功率控制，另一侧通常采用定有功功率和定无功功率。

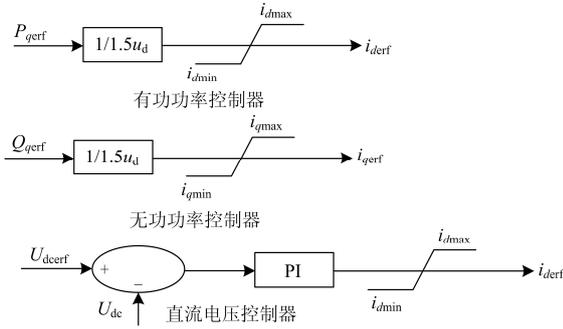


图4 外环控制器框图

Fig. 4 Diagram of outer loop controller

最近电平逼近调制 (Nearest Level Control, NLM)可以得到上、下桥臂各开通多少个子模块,但是不能确定开通哪些子模块。为了确定各个子模块的开通与关断,可以对每个子模块的电压进行实时排序,再根据桥臂电流的方向,通过电容电压均衡控制方法来确定哪些子模块开通,哪些子模块关断。电容电压均衡控制的基本思路是使电容电压高的子模块优先放电,使电容电压低的子模块优先充电。

电容电压均衡控制具体方法如下:

(1) 先确定上、下桥臂各需要开通的子模块的数量;

(2) 对各桥臂电流进行实时测量,确定流过各子模块的电流方向;

(3) 对桥臂的各个子模块电容电压进行实时测量,然后将各个子模块电容电压的测量值进行由大到小的排序;

(4) 当桥臂电流方向为子模块电容充电时,投入子模块由电压最低到最高进行选择;当桥臂电流方向为子模块电容放电时,投入子模块由电压最高到最低进行选择。

电容电压均衡控制方法通过对子模块电压进行排序,选择合适的子模块投切,大大降低了 IGBT 的开关频率,降低了损耗。

2 MMC-HVDC 的故障特性分析

图5所示为双端 MMC-HVDC 输电系统的结构简图。

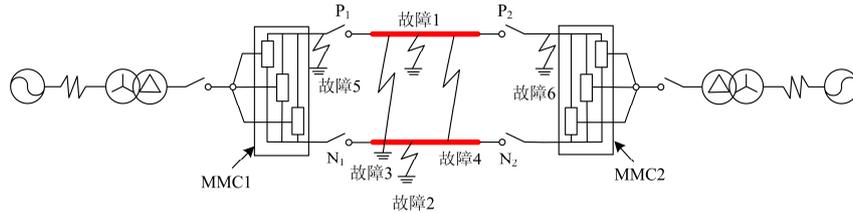


图5 双端 MMC-HVDC 输电系统

Fig. 5 Two terminal MMC-HVDC system

两个换流站 MMC1 和 MMC2 均采用模块化多电平换流器拓扑结构,其中 MMC1 为整流侧,MMC2 为逆变侧, P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2 是四个继电保护设备。图中故障 1 为区内正极接地故障,故障 2 为区内负极接地故障,故障 3 为区内双极短路接地故障,故障 4 为区内双极短路故障,故障 5 为整流侧区外正极短路接地故障,故障 6 为逆变侧区外正极短路接地故障。其中故障 1、2、3 和 4 为区内故障,故障 5 和 6 为区外故障。在故障发生的瞬间,由叠加原理可知,故障状态可以等效为非故障运行状态和故障附加状态的叠加,下面将对其故障附加状态进行分析。

2.1 区内故障的故障附加状态网络分析

如图 6 所示, (a)、(b)、(c)和(d)分别为故障 1、2、3 和 4 的故障等效电路图。其中 u_f 为故障点对地电压, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 和 Z_4 分别代表两边交流侧等效阻抗, Z_{P1} 、 Z_{P2} 、 Z_{N1} 和 Z_{N2} 分别代表故障点到 P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2 的电缆等效阻抗, i_1 、 i_2 、 i_3 和 i_4 分别为 P_1 、

P_2 、 N_1 和 N_2 测量的电流故障分量。 u_1 、 u_2 、 u_3 和 u_4 分别为 P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2 测量的电压故障分量。

故障 1 为区内正极接地故障,由图 6(a)可以得到

$$\begin{cases} u_f = -i_1(Z_1 + Z_{P1}) \\ u_f = -i_2(Z_2 + Z_{P2}) \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, i_1 和 i_2 具有相同的极性。

故障 2 为区内负极接地故障,由图 6(b)可以得到

$$\begin{cases} u_f = -i_3(Z_3 + Z_{N1}) \\ u_f = -i_4(Z_4 + Z_{N2}) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可以看出, i_3 和 i_4 具有相同的极性。

故障 3 为区内正、负极短路接地故障,由图 6(c)可以得到

$$\begin{cases} u_f = -i_1(Z_1 + Z_{P1}) \\ u_f = -i_2(Z_2 + Z_{P2}) \\ u_f = -i_3(Z_3 + Z_{N1}) \\ u_f = -i_4(Z_4 + Z_{N2}) \end{cases} \quad (3)$$

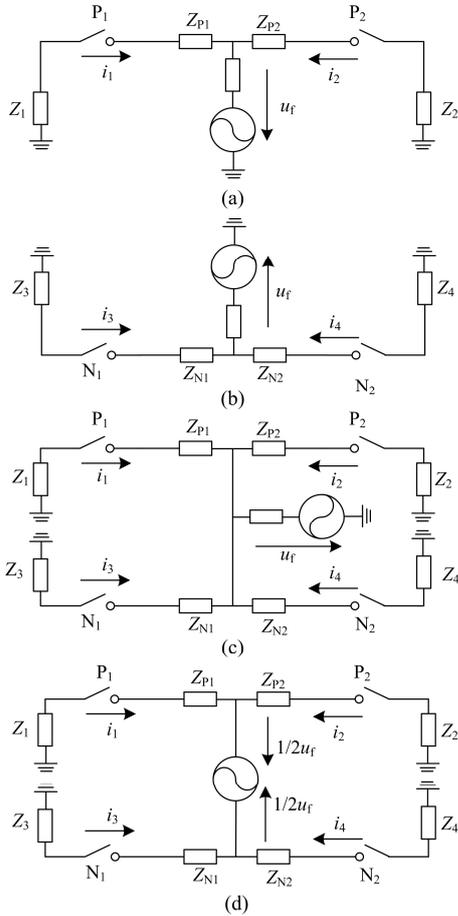


图 6 区内故障的故障状态网络图

Fig. 6 Equivalent circuit of the fault of internal faults

由式(3)可以看出, i_1 和 i_2 具有相同的极性, i_3 和 i_4 具有相同的极性。

故障 4 为区内正、负极短路故障, 由图 6(d)可以得到

$$\begin{cases} \frac{1}{2}u_f = -i_1(Z_1 + Z_{P1}) \\ \frac{1}{2}u_f = -i_2(Z_2 + Z_{P2}) \\ \frac{1}{2}u_f = -i_3(Z_3 + Z_{N1}) \\ \frac{1}{2}u_f = -i_4(Z_4 + Z_{N2}) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, i_1 和 i_2 具有相同的极性, i_3 和 i_4 具有相同的极性。

2.2 区外故障的故障附加状态网络分析

如图 7 所示, (a)和(b)分别为故障 5 和 6 的故障等效电路图。

故障 5 为整流侧区外正极短路故障, 由图 7(a)可以得到

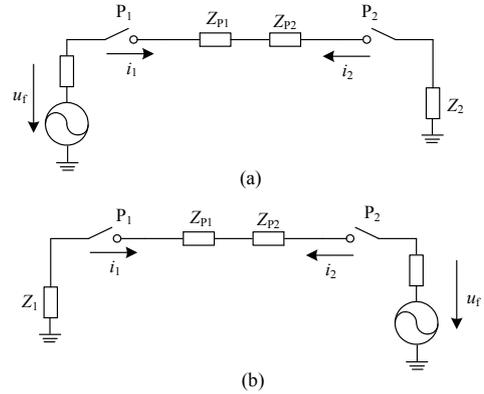


图 7 区外故障的故障状态网络图

Fig. 7 Equivalent circuit of the fault of external faults

$$\begin{cases} u_f = i_1(Z_{P1} + Z_{P2} + Z_2) \\ u_f = -i_2(Z_{P1} + Z_{P2} + Z_2) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, i_1 和 i_2 的极性不同。

故障 6 为逆变侧区外正极短路故障, 由图 7(b)可以得到

$$\begin{cases} u_f = -i_1(Z_{P1} + Z_{P2} + Z_2) \\ u_f = i_2(Z_{P1} + Z_{P2} + Z_2) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, i_1 和 i_2 的极性不同。

如图 6(c)和图 6(d)所示, 当系统发生双极故障, P_1 和 P_2 处电压下降, 而 N_1 和 N_2 处电压上升, 则 u_1 和 u_3 极性不同, u_2 和 u_4 极性不同。当故障为正极故障时, P_1 和 P_2 处电压下降, 而负极由于耦合作用, N_1 和 N_2 处电压也下降, 则 u_1 和 u_3 极性相同, u_2 和 u_4 极性相同。当故障为负极故障时, N_1 和 N_2 处电压上升, 而正极由于耦合作用, P_1 和 P_2 处电压也上升, 则 u_1 和 u_3 极性相同, u_2 和 u_4 极性相同。

由以上分析可知: 当电流故障分量极性相同, 为区内故障, 如故障 1、故障 2、故障 3 和故障 4。当电流故障分量极性不同, 为区外故障, 如故障 5 和故障 6。因此, 可以根据电流故障分量的极性是否一致, 来判别区内、外故障。

当电流故障分量极性相同, 电压故障分量极性也相同, 为区内单极故障, 如果电压故障分量极性为负, 是正极故障, 如故障 1, 如果电压故障分量极性为正, 是区内负极故障, 如故障 2。当电流故障分量极性相同, 电压故障分量极性不同, 为区内双极故障, 如故障 3 和故障 4。据此, 可以根据电压故障分量的极性来识别故障极。

3 保护方法

由上述分析可知, 根据电流故障分量的极性是

否一致, 来判别区内、外故障。当判断为区内故障时, 可以根据电压故障分量的极性是否相同来识别故障极。

3.1 故障分量的提取

在故障发生的瞬间, 由叠加原理可知, 故障状态可视为系统正常运行状态和故障附加状态的叠加, 即

$$I_g = \Delta I + I \quad (7)$$

$$U_g = \Delta U + U \quad (8)$$

式中: I_g 和 U_g 分别为故障时刻的直流线路继电保护设备安装处所测得的电流及电压值; I 和 U 为正常运行时直流线路继电保护安装处所测得的电流及电压; ΔI 和 ΔU 分别为电流故障分量和电压故障分量。

电流(或电压)的故障分量等于故障后的测量电流(或电压)值减去故障前 N 个周波的电流(或电压)测量值, 由于系统存在频率偏差, N 一般取 1 或 2。由式(7)和式(8)可以得到四个继电保护装置处的电流故障分量 ΔI_{P_1} 、 ΔI_{P_2} 、 ΔI_{N_1} 和 ΔI_{N_2} 及电压故障分量 ΔU_{P_1} 、 ΔU_{P_2} 、 ΔU_{N_1} 和 ΔU_{N_2} 。

3.2 二阶微分法提取故障分量

由之前的分析可知, 可以通过判断电流故障分量的极性是否相同, 来判别区内、外故障。可以通过判断电压故障分量的极性是否相同, 来判别故障极。当系统发生经高电阻接地故障时, 故障分量非常小, 可通过二阶微分法提取故障分量, 放大故障分量, 从而可以更容易、更快速地识别故障。

二阶微分公式如式(9)。

$$D \left(\frac{Dy(x)}{Dx} \right) = \frac{y(x+2) - 2y(x+1) + y(x)}{Dx^2} \quad (9)$$

令 y 为电压故障分量, x 为采样时间, 可以通过式(9)得到电流故障分量及电压故障分量的二阶

微分量, 记为 $\Delta^2 I_{P_1}$ 、 $\Delta^2 I_{P_2}$ 、 $\Delta^2 I_{N_1}$ 、 $\Delta^2 I_{N_2}$ 、 $\Delta^2 U_{P_1}$ 、 $\Delta^2 U_{P_2}$ 、 $\Delta^2 U_{N_1}$ 和 $\Delta^2 U_{N_2}$ 。

当系统直流侧发生故障时, 通过电流故障分量的二阶微分量, 可以判断故障发生在区内或区外, 通过电压故障分量二阶微分量, 可以识别故障极。

3.3 保护方法

由上述分析可以得到 MMC-HVDC 直流侧的保护方法, 该方法分为 5 个步骤。

(1) 先检测直流侧电流, 当 $I > I_{set}$, 认为系统发生故障。其中 I 为继电保护装置测量电流, I_{set} 为电流门槛值。

(2) 继电保护装置读取故障后的电流和电压值, 减去故障前两个周波的测量值得到电流故障分量和电压故障分量, 并通过式(9)得到电流故障分量及电压故障分量的二阶微分量。

(3) 如果电流故障分量的二阶微分量的极性不同则判定故障为区外故障。如果电流故障分量的极性相同则判定故障为区内故障。

(4) 当判定为区外故障时, 保护装置不动作。当判定为区内故障时, 若电压故障分量的二阶微分量极性不同, 则为双极区内故障, P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2 动作。电压故障分量的二阶微分量极性相同, 则为单极区内故障。

(5) 当判定为单极区内故障后, 如果电压故障分量的二阶微分量极性为正, 则为负极故障, N_1 和 N_2 动作; 如果电压故障分量的二阶微分量极性为负, 则为正极故障, P_1 和 P_2 动作。

保护方法流程图如图 8 所示。

4 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建直流输电模型, 仿真参数为: 桥臂子模块数 4 个, 交流侧电压 23 kV, 直流额定电压 ± 20 kV, 直流线路电缆长度为 20 km。

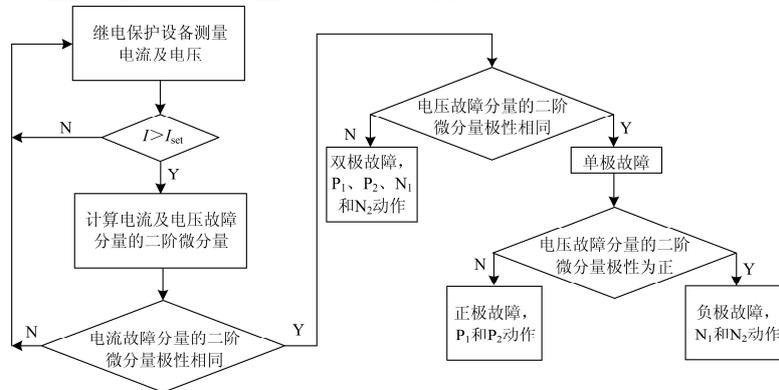


图 8 保护流程图

Fig. 8 Flow chart of the protection method

当系统正常运行时，仿真结果如图 9 所示。系统正常运行时，直流侧电流、电压平稳。

4.1 区内故障仿真结果

当发生故障 1 时，仿真结果如图 10 所示。

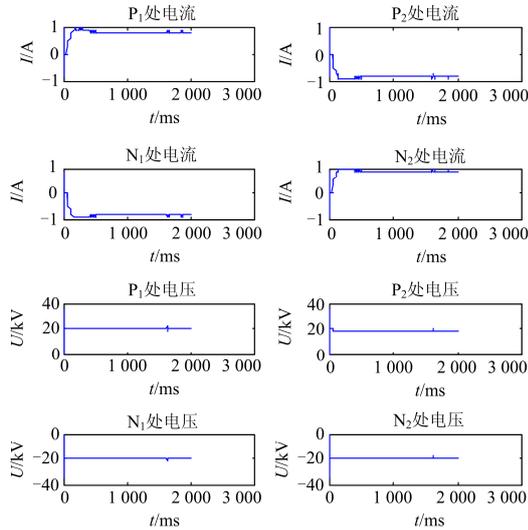


图 9 正常运行仿真结果

Fig. 9 Simulation results of normal operation

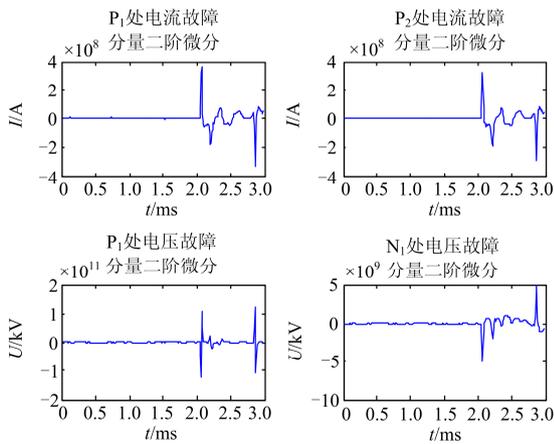


图 10 故障 1 仿真结果

Fig. 10 Simulation results of fault 1

由仿真结果可知： $\Delta^2 I_{P1}$ 和 $\Delta^2 I_{P2}$ 极性相同，说明故障 1 为区内故障， $\Delta^2 U_{P1}$ 和 $\Delta^2 U_{N1}$ 极性同为负，说明故障 1 为区内正极故障。

当发生故障 2 时，仿真结果如图 11 所示。

由仿真结果可知： $\Delta^2 I_{N1}$ 和 $\Delta^2 I_{N2}$ 极性相同，说明故障 2 为区内故障， $\Delta^2 U_{P1}$ 和 $\Delta^2 U_{N1}$ 极性同为正，说明故障 2 为区内负极故障。

当发生故障 3 时，仿真结果如图 12 所示。

由仿真结果可知： $\Delta^2 I_{P1}$ 和 $\Delta^2 I_{P2}$ 的极性相同，说明故障 3 为区内故障， $\Delta^2 U_{P1}$ 和 $\Delta^2 U_{N1}$ 极性不同，

说明故障 3 为区内正、负极故障。

当发生故障 4 时，仿真结果如图 13 所示。

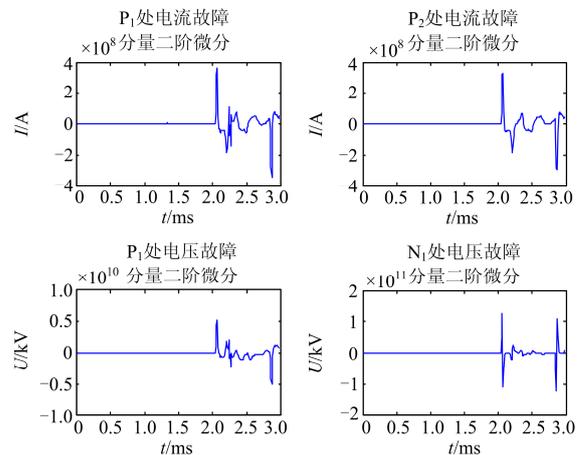


图 11 故障 2 仿真结果

Fig. 11 Simulation results of fault 2

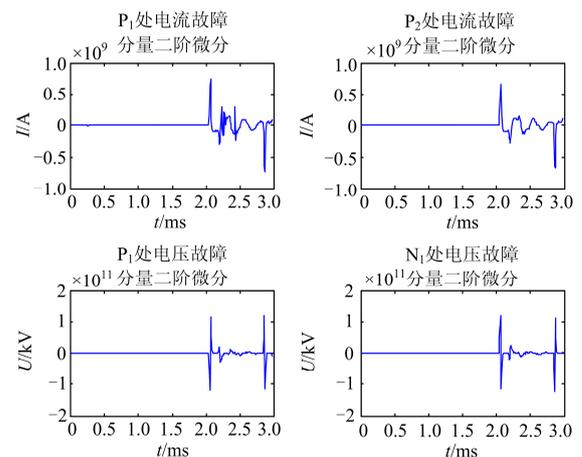


图 12 故障 3 仿真结果

Fig. 12 Simulation results of fault 3

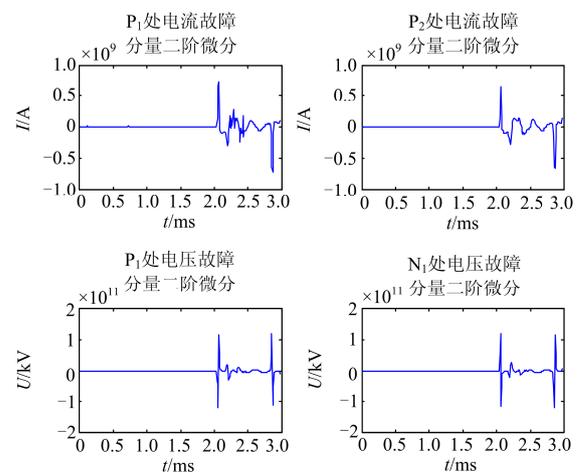


图 13 故障 4 仿真结果

Fig. 13 Simulation results of fault 4

由仿真结果可知: $\Delta^2 I_{P1}$ 和 $\Delta^2 I_{P2}$ 极性相同, 说明故障 4 为区内故障, $\Delta^2 U_{P1}$ 和 $\Delta^2 U_{N1}$ 极性不同, 说明故障 4 为区内正、负极故障。

4.2 区外故障仿真结果

当发生故障 5 时, 仿真结果如图 14 所示。

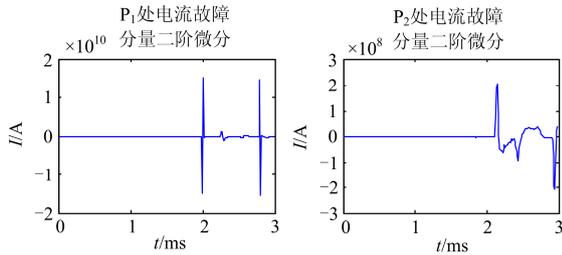


图 14 故障 5 仿真结果

Fig. 14 Simulation results of fault 5

由仿真结果可知: $\Delta^2 I_{P1}$ 和 $\Delta^2 I_{P2}$ 极性不同, 说明故障 5 为区外故障。

当发生故障 6 时, 仿真结果如图 15 所示。

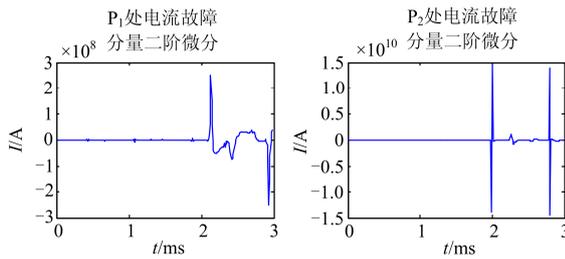


图 15 故障 6 仿真结果

Fig. 15 Simulation results of fault 6

由仿真结果可知: $\Delta^2 I_{P1}$ 和 $\Delta^2 I_{P2}$ 极性不同, 说明故障 6 为区外故障。

由以上仿真结果可以看出: 当发生区内故障时, 电流故障分量二阶微分量极性相同, 如故障 1、2、3 和 4; 当发生区外故障时, 电流故障分量二阶微分量极性不同, 如故障 5 和 6。

当故障为区内故障时, 电压故障分量二阶微分量相同极性同为负, 则为正极故障, 如故障 1; 电压故障分量二阶微分量相同极性同为正, 则为负极故障, 如故障 2; 电压故障分量二阶微分量极性不同, 则为双极故障, 如故障 3 和 4。

为了更详细地说明该保护方法的有效性, 本文做了大量的仿真, 表 1 给出了故障 1—故障 6 在不同接地电阻下的情况。

5 结论

MMC-HVDC 直流侧故障会对直流系统造成极大的损害, 本文对 MMC-HVDC 的故障特性进行了分析。提取电流和电压的故障分量的二阶微分量, 利用电流故障分量二阶微分量的极性是否相同, 可

以判别区内、外故障。区外故障时电流故障分量极性相同, 区内故障时电流故障分量极性相反。

表 1 不同故障接地电阻的仿真结果

Table 1 Simulation results of grounding resistance for different faults

故障位置	接地电阻/ Ω	提取的电流故障分量	电压故障分量	故障极	应动作的继电保护装置
故障 1	0	相同	相同	正极	P_1 和 P_2
	100	相同	相同	正极	P_1 和 P_2
	500	相同	相同	正极	P_1 和 P_2
故障 2	0	相同	相同	负极	N_1 和 N_2
	100	相同	相同	负极	N_1 和 N_2
	500	相同	相同	负极	N_1 和 N_2
故障 3	0	相同	不同	正负极	P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2
	100	相同	不同	正负极	P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2
	500	相同	不同	正负极	P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2
故障 4	—	相同	不同	正负极	P_1 、 P_2 、 N_1 和 N_2
	0	不同	—	正极	—
	100	不同	—	正极	—
故障 5	500	不同	—	正极	—
	0	不同	—	负极	—
	100	不同	—	负极	—
故障 6	100	不同	—	负极	—
	500	不同	—	负极	—

当发生区内故障时, 根据电压故障分量的二阶微分量极性, 来识别故障极。当整流侧正极和负极继电保护安装处所计算的电压故障分量的二阶微分量极性都为负时, 是正极故障; 当整流侧正极和负极继电保护安装处所计算的电压故障分量的二阶微分量极性都为正时, 是负极故障; 当整流侧正极和负极继电保护安装处所计算的电压故障分量的极性一正一负时, 是双极故障。最后, 使用 PSCAD 电磁暂态仿真软件建立了 MMC-HVDC 的仿真模型, 基于该模型进行仿真并给出仿真结果, 仿真结果验证了故障分析理论的正确性, 大量的仿真结果表明了该保护方法可以有效地判别区内、外故障, 并识别故障极。该论文的研究为 MMC-HVDC 的线路保护提供了理论基础。

参考文献

- [1] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.

- ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [2] 刘思源, 徐东旭, 梅付颖, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-54.
- LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Fuying, et al. Research on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-54.
- [3] 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): 594-599.
- [4] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.
- CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.
- [5] 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.
- [6] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 自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.
- [7] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.
- SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-84.
- [8] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2012-2019.
- WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2012-2019.
- [9] 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.
- [10] TANG L X, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [11] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Development of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [12] ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, LI Tan. DC fault ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC systems[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 43(1): 106-114.
- [13] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2318.
- [14] YANG J, 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.
- [15] 薛英林, 徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 63-70.
- XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 63-70.
- [16] ANTONOPOULOS A, ANGQUIST L, HARNEFORS L, et al. Global asymptotic stability of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 603-612.

收稿日期: 2017-09-24; 修回日期: 2017-12-13

作者简介:

高淑萍(1970—), 女, 博士, 研究方向为高压直流输电线路保护及新能源并网关键技术; E-mail: gao.sp2003@163.com

胡振宇(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为多电平直流输电线路继电保护原理研究。E-mail: 308951814@qq.com

(编辑 姜新丽)