

利用零模电流的 VSC-HVDC 输电线路单端量保护原理研究

宋国兵¹, 冉孟兵², 靳幸福³, 齐倩¹, 刘甜¹, 万青¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 401147;
3. 国网安徽省电力公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 电压源换流器型直流输电 (Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC) 控制系统复杂, 故障承受能力差, 研究适用于 VSC-HVDC 系统的高性能保护十分必要。分析了三相两电平 VSC-HVDC 系统的结构特性及 VSC-HVDC 系统的零模网络, 并在此基础上提出了一种单端电气量保护。该方法仅需单端电流量, 对直流线路一端正负极电流之和进行积分得到零模电流, 根据零模电流的幅值大小可以判断出区内单极故障, 适用于正负极对称运行的三相两电平 VSC-HVDC 系统。算法简单可行, 在时域进行, 计算量小, 对采样率要求低。利用 PSCAD 搭建 VSC-HVDC 系统进行仿真, 仿真结果表明, 该原理能够快速可靠地动作区内单极故障。

关键词: 电压源换流器型直流输电; 输电线路; 单极故障; 单端电流; 零模电流; 继电保护

A novel protection method for VSC-HVDC transmission lines using single-end zero-mode current

SONG Guo-bing¹, RAN Meng-bing², JIN Xing-fu³, QI Qian¹, LIU Tian¹, WAN Qing¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Jiangbei Power Supply Bureau, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401147, China;
3. State Grid Anhui Electric Power Company Economy and Technology Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: As the control system of Voltage Source Converter HVDC (VSC-HVDC) is very complex, its resistance to fault is poor. It's necessary to do research on the protection of VSC-HVDC. This paper analyzes the structural characteristics and zero-mode network of VSC-HVDC, and proposes a single-end protection further. The proposed method needs only single-end zero-mode current which is obtained by integrating the sum of negative pole and positive pole currents. And the amplitude is used to distinguish internal single-pole-to-ground fault. The method applies to three-phase two-level VSC-HVDC system at positive and negative pole symmetrical operation status. The algorithm is very simple and implemented in time domain, needs fewer amount of computations, and its sampling frequency is lower. The PSCAD is used for fault simulation. Simulation results show that the proposed protection principle can find the internal single-pole-to-ground fault reliably and rapidly.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177128) and Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 20110201110056).

Key words: VSC-HVDC; transmission lines; single-pole-to-ground fault; single-end current; zero-mode current; relay protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0001-07

0 引言

电压源换流器型直流输电技术 (Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC) 是一种以电压源换流器、可控关断装置和脉宽调制技术为基础的新型的直流输电技术, 克服了传统的电流源换流器型直

流输电技术 (Current Source Converter HVDC, CSC-HVDC) 的部分缺陷 (如易发生换相失败、需要大量的滤波和无功补偿装置、换流站占地面积大、投资大等), 在可再生能源并网、分布式电源接入、偏远孤立地区供电、城市电网扩容与直流供电等领域有广阔的应用前景^[1-3]。

现有针对 VSC-HVDC 的研究比较多, 但主要集中在其控制策略和保护策略的研究^[4-9]。目前, VSC-HVDC 工程中现采用的保护仅借鉴 CSC-HVDC

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177128); 国家博士点基金资助项目 (20110201110056)

的保护策略，以行波保护作为主保护，电流差动保护作为后备保护，而未考虑到 VSC-HVDC 自身的特点^[10-11]。近年来，国内外陆续出现对于 VSC-HVDC 的继电保护原理的研究报道。

文献[12]分析了输电线路的固有频率特性，提出一种直流输电线路纵联频率保护。区外故障时，直流线路固有频率主频与线路全长相关；区内故障时，固有频率主频与故障线路长度相关，非中点故障时两端得到的频率差为一很大值。据此形成保护原理。文献[13]提出一种基于频变参数电缆线路的电流差动保护新原理。提出一种计算沿线电流分布的新方法，由两端电气量分别计算线路中点电流，并由此构造差动判据。文献[14]基于模型识别思想，提出一种 VSC-HVDC 直流输电线路方向元件，通过模型的模型误差、识别的电感值和电容值与实际值的差异构成方向判据。文献[15]分析了直流输电线路故障电流特征，提出一种利用电流突变量极性的 VSC-HVDC 纵联保护。文献[12-15]提出的方法需要两端电气量，不具有快速性。文献[16]针对高压直流输电线路，提出一种仅利用单端电流实现直流输电线路全线速动的保护原理，该原理采用线路极电流，灵敏度不高，同时需要数字滤波，降低了可靠性。可以看出，现有的研究原理存在着灵敏度不高、需要两端电气量配合、数据需经过复杂的数字处理等问题，从而导致了直流输电线路保护的可靠性不高。因此，研究适用于 VSC-HVDC 直流输电线路的简单可靠的继电保护原理十分重要。

本文在分析三相两电平 VSC-HVDC 直流输电系统结构特性和零模网络的基础上，提出了一种仅利用单端电流量的直流输电线路保护原理。该原理能可靠识别直流线路单极故障，算法简单、灵敏度高。

1 VSC-HVDC 结构特征及零模网络

1.1 VSC-HVDC 系统结构

图 1 为 VSC-HVDC 系统的原理图。

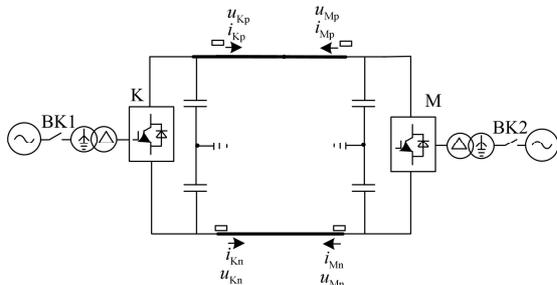


图 1 VSC-HVDC 输电系统

Fig. 1 VSC-HVDC transmission system

图中 K 侧为整流侧，M 侧为逆变侧。系统两侧换流站均采用 VSC 结构，它由换流站、换流变压器、换流电抗器、交流滤波器、直流侧电容器和直流电缆等部分组成。 u_{kp} 、 u_{kn} 为 K 端所测的正、负极电压； i_{kp} 、 i_{kn} 为 K 端所测的正、负极电流； u_{mp} 、 u_{mn} 为 M 端所测的正、负极电压； i_{mp} 、 i_{mn} 为 M 端所测的正、负极电流。

1.2 VSC-HVDC 系统零模网络

文献[17]构造了一种适用于直流输电线路的相模解耦矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}^{-1} = \mathbf{S}^T \\ \begin{bmatrix} x_p \\ x_n \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中： x_p 、 x_n 为直流线路正、负极电气量； x_1 、 x_0 为对应的模量。

根据式(1)，零模电流可定义为

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} (i_p + i_n) \quad (2)$$

式中， i_p 、 i_n 分别为正极、负极电流。

由零模电流的定义可知，直流系统的零模电流和交流系统的零序电流具有类似的性质，零模电流在正负极的流通方向相同，必须经过接地点形成回路。直流系统零模网络的结构和变压器的接线方式、中性点的接地方式以及直流系统的接地点位置有关。

柔性直流输电系统中一端换流站如图 2 所示。变压器通常会选择 Y0/Y 或者 Y0/Δ 接法，靠近交流系统侧绕组多采用 Y0 接法，靠近换流器侧多采用 Y 或者 Δ 接法，起到隔断零序分量在换流器与交流系统之间传递通路的作用^[18]。

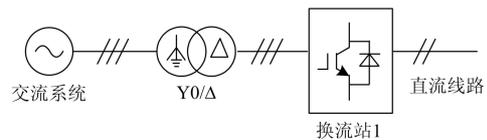


图 2 VSC-HVDC 系统的主变压器接线方式

Fig. 2 Connection type of main transformer in VSC-HVDC system

由文献[1]可知，换流站主要由换流器及其控制系统组成，换流器没有接地支路，控制系统只控制器件关断。因此换流站在零模网络里表现为阻抗。

根据以上分析得到 VSC-HVDC 系统的零模网络如图 3。

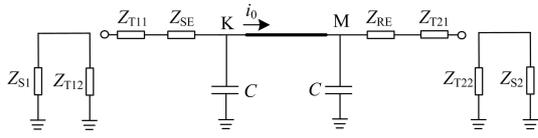


图 3 VSC-HVDC 系统零模网络

Fig. 3 Zero-mode network of VSC-HVDC system

图中,各参数以直流系统为基准计算。 Z_{SE} 、 Z_{RE} 分别为送端、受端换流器零模阻抗; Z_{S1} 、 Z_{S2} 分别为送端、受端交流系统等效零模阻抗; Z_{T11} 、 Z_{T12} 、 Z_{T21} 、 Z_{T22} 为换流变压器等效零模阻抗。

2 故障分析

2.1 交流线路故障分析

以逆变侧(M端)交流线路故障为例,图4给出其零模网络。

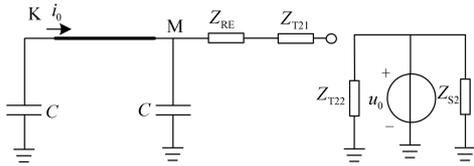


图 4 交流线路故障零模网络

Fig. 4 Zero-mode network when an AC line fault occurs

从图4可以看出,零模网络里直流系统和交流系统是分离的,交流线路故障时,故障电流只会在交流系统里流通,直流线路没有零模电流。

2.2 直流线路单极故障分析

直流线路正极金属接地后的物理过程如下:故障瞬间,故障点电压降为零,由于电容的电压支撑特性,负极(非故障极)与之对应的电压保持不变;故障暂态过程中,首端正极线路电压下降,正极电容开始放电,由于柔性直流输电一端采用直流电压控制,为了保持正负极相对电压不变的趋势,负极电压绝对值逐渐增大,负极电容开始充电;故障稳定后,正极线路电压为零,正极电容电荷基本放完,负极线路电压为两倍的额定值。

图5给出了直流线路故障时的零模网络。

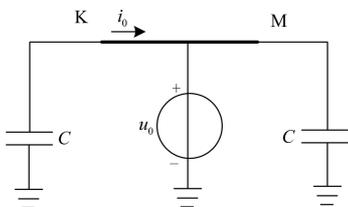


图 5 直流线路故障的零模网络

Fig. 5 Zero-mode network when a DC line fault occurs

从前面的分析可知,正极接地故障发生后,故障点正、负极电压分别为

$$\begin{cases} u_{fp} = 0 \\ u_{fn} = (-U_N \sim -2U_N) \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_N 为额定极电压绝对值。

结合式(1)和式(3),正极故障时,故障点处的零模电压为

$$u_0 = (-\frac{\sqrt{2}}{2}U_N \sim -\sqrt{2}U_N) \quad (4)$$

结合图5和式(4)可知,直流线路正极故障后,零模电压源始终存在于直流网络里,保护安装处有零模电流流过。

类似的,负极故障后的物理过程与正极故障相反。

直流线路负极接地故障后,故障点处的正、负极电压分别为

$$\begin{cases} u_{fp} = (U_N \sim 2U_N) \\ u_{fn} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

结合式(1)和式(5)可知,负极故障时故障点处的等效零模电压源为

$$u_0 = (\frac{\sqrt{2}}{2}U_N \sim \sqrt{2}U_N) \quad (6)$$

观察图5并结合式(6),直流线路负极故障时,零模电压源始终为正,保护安装处的零模电流不为零。

因此根据保护安装处的零模电流的幅值即可判别出单极故障。

2.3 直流线路极间故障分析

直流线路发生极间故障时,故障点处的正极电压下降,负极电压上升,正负极电压的变化始终对称,结合式(1)可知,故障点处的零模电压始终为零。因此,极间故障时,直流线路上测到的零模电流几乎为零。

根据以上分析可得出结论:交流线路故障时,直流线路的零模电流几乎为零;直流线路单极故障时,零模电流不为零,并且幅值可观;直流线路极间故障时,零模电流几乎为零。利用此特征可以提出保护判据,判别直流线路单极故障。

3 保护判据及整定

3.1 保护判据

由上一节的分析可知,利用零模电流可以实现直流输电线路单极故障的识别。零模电流的计算,可采用从一段数据获得的零模电流积分的方法,积

分数据窗长度任意取, 建议取为 5 ms。

在获得零模电流的基础上, 可由如下判据实现直流输电线路单极故障的识别, 如式 (7)。

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\sqrt{2}}{2} |i_{Kpk} + i_{Knk}| > I_{0set} \quad (7)$$

式中: N 为 5 ms 内的采样点个数; i_{Kpk} 、 i_{Knk} 分别为 K 端正、负极电流采样值; I_{0set} 为设定阈值。

式(7)满足时, 表示直流线路发生单极故障。

3.2 阈值电流整定

阈值电流的整定应躲过正常工作情况下的最大不平衡电流和区外故障时可能出现的最大不平衡电流。正常工作情况下的不平衡电流主要取决于电流互感器的传变误差, 按 $0.1I_n$ 整定, I_n 为额定直流电流; 区外故障情况下的不平衡电流主要由直流电容参数不一致决定, 按 $0.1CdU/dt$ 整定, C 为额定直流电容, dU/dt 为区外故障情况下直流电容电压可能出现的最大变化率, 根据仿真获得。综上两点, 阈值电流按式 (8) 整定。

$$I_{0set} = \max \{0.1I_n, 0.1CdU/dt\} \quad (8)$$

4 相关问题讨论

4.1 零模电流的提取及互感器的影响

上一节的判据给出了一种零模电流的提取方法, 即以正负极电流的代数和乘以系数 $\sqrt{2}/2$ 作为零模电流。实际上由图 3 VSC 系统的零模网络可以看出, 直流线路的零模电流与直流电容的零模电流为同一量, 因此结合零模电流的定义, 实际中也可用并联电容对地支路电流 (图 1 中 K 侧电容支路流入大地的电流, 其值与正负极并联电容电流之和相等) 乘以系数 $\sqrt{2}/2$ 作为零模电流。

由图 1 可以看出, 正常运行状态下, K 侧并联电容对地支路电流非常小, 单极故障后其值变化明显, 因此利用电容对地支路电流提取零模电流具有更高的灵敏度, 能够降低互感器饱和的影响。

另外, 利用对地支路电流提取零模电流不再需要分别测量正负极电流, 有效避免了正负极电流互感器参数不一致造成的误差影响。

4.2 原理适用范围

本文提出原理的保护范围为整流侧换流变压器到逆变侧换流变压器之间, 除了直流输电线路外还包括两端换流站。鉴于直流断路器一直是电力工程领域的研究难题, 现有的直流工程大都利用换流站控制或断开交流线路来切除直流线路故障^[19]。并且 VSC-HVDC 主要采用电缆输电, 电缆线路故障都是永久性故障, 不需要重合闸。因此, 本文提出的原理具有实际应用价值。

另外, 双极直流输电线路在实际运行中, 大部分故障为单极故障, 解决输电系统对单极故障的识别问题具有重要意义。

5 仿真验证与分析

仿真采用在 PSCAD 上搭建的双闭环串级 PI 控制^[20]VSC-HVDC 输电系统仿真模型, 模型原理图如图 1 所示。额定电压为 ± 60 kV, 系统容量为 60 MW。本文仿真中采用电缆线路, 线路长度为 300 km。正极和负极的并联大电容取为 1 000 μ F。系统在 0 s 时开始启动, 在 2 s 时发生故障, 故障持续时间为 0.05 s。采样频率为 1 kHz, I_{0set} 按额定直流电容的 0.1 倍选取, 取为 50 A。仿真中的零模电流按式 (7) 计算, 数据窗长取 5 ms。

5.1 交流线路故障仿真结果

图 6 给出了 K 侧区外交流 A 相金属接地故障时, K 侧保护处得到的极电流和零模电流。图中显示的为 1.5~2.5 s 的数据, 故障发生在 500 采样点处, 图 7~图 9 类似。

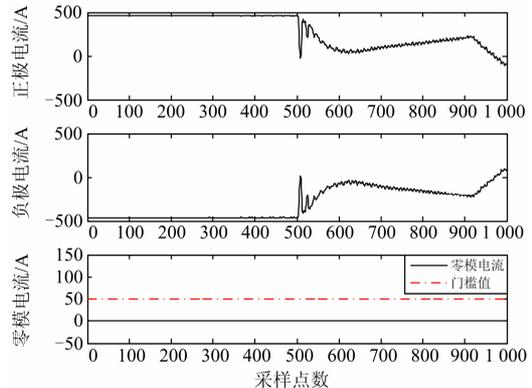


图 6 K 侧交流 A 相金属接地故障时 K 侧保护动作特性

Fig. 6 Result of protection operation when an A phase metal ground fault occurs at K side

由图 6 可以看出, K 侧区外交流 A 相金属接地故障时, 虽然极电流有很大程度的变化, 但正负极电流的变化方向相反, 零模电流几乎为零, 小于整定的阈值, 单极故障保护判据不满足。

表 1 给出了 K 侧发生各种类型的区外交流故障时, K 侧保护的動作情况。

表 2 给出了 M 侧发生各种类型的区外交流故障时, K 侧保护的動作情况。

表 1 和表 2 表明, K 侧和 M 侧区外发生各类故障时, 零模电流基本为零, 远远小于整定的阈值, 保护均可靠不动作。对于区外交流线路的故障, 本

原理不会误动。

表 1 VSC-HVDC 线路 K 侧区外故障保护动作情况

Table 1 Result of protection operation when different types of AC line fault occur at K side

故障类型	零模电流幅值/A	整定值/A	保护是否动作
AG	1.5774×10^{-8}	50	否
ABG	1.4425×10^{-8}	50	否
ABCG	1.6299×10^{-8}	50	否
AB	1.5011×10^{-8}	50	否

表 2 VSC-HVDC 线路 M 侧区外故障保护动作情况

Table 2 Result of protection operation when different types of AC line fault occur at M side

故障类型	零模电流幅值/A	整定值/A	保护是否动作
AG	2.5860×10^{-8}	50	否
ABG	1.5097×10^{-8}	50	否
ABCG	2.0226×10^{-8}	50	否
AB	2.0724×10^{-8}	50	否

5.2 直流线路单极故障仿真结果

图 7 给出了距 K 侧 150 km 处发生正极金属性接地故障时, K 侧保护处得到的极电流和零模电流幅值。

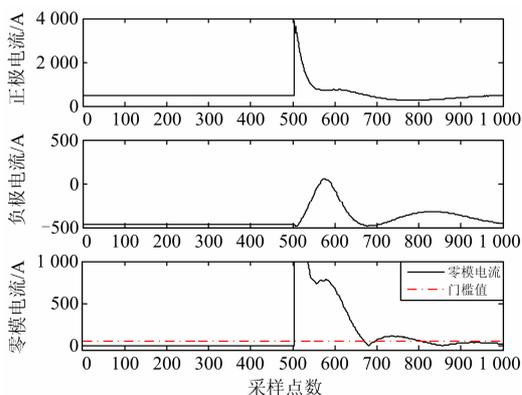


图 7 距 K 侧 150 km 处发生正极金属性接地故障时 K 侧保护动作特性

Fig. 7 Result of protection operation when a positive metal ground fault occurs 150 km away from K side

由图 7 可知, 距 K 侧 150 km 处正极金属性接地时, 正、负极电流均正向突变, 零模电流急剧增大, 远远高于门槛值, 从而保护判定为单极故障。

图 8 给出了距 K 侧 150 km 处发生负极金属性接地故障时, K 侧保护处得到的极电流和零模电流幅值。

由图 8 可知, 距 K 侧 150 km 处负极金属性接地时, 正、负极电流均负向突变, 零模电流幅值远

大于门槛值, 从而保护判定为单极故障。

表 3 给出了直流线路不同位置发生正极金属性接地故障时, K 侧保护的動作情况。

由表 3 可看出, 直流线路任一点发生正极金属性故障, 保护都能作出正确的判断, 正确动作, 实现故障切除。

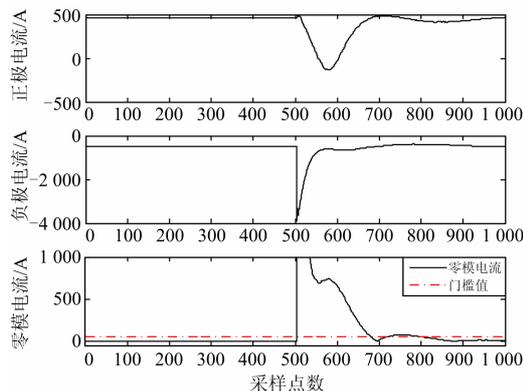


图 8 距 K 侧 150 km 处发生负极金属性接地故障时 K 侧保护动作特性

Fig. 8 Result of protection operation when a negative metal ground fault occurs 150 km away from K side

表 3 VSC-HVDC 直流线路不同位置正极金属接地故障保护动作情况

Table 3 Result of protection operation when positive fault occurs at different distance

故障距离/km	零模电流幅值/A	整定值/A	保护是否动作
30	1.2961×10^4	50	是
90	5.1653×10^3	50	是
150	3.4316×10^3	50	是
210	2.5925×10^3	50	是
270	2.1296×10^3	50	是

表 4 给出了区内 150 km 处正极经不同过渡电阻接地故障时, K 侧保护的動作情况。

表 4 VSC-HVDC 直流线路 150 km 处正极经不同过渡电阻接地保护动作情况

Table 4 Result of protection operation when positive fault occurs with different transition resistance 150 km away from K side

过渡电阻/ Ω	零模电流幅值/A	整定值/A	保护是否动作
0	3 431.6	50	是
50	640.1	50	是
110	328.7	50	是

表 4 表明, 对于单极线路高阻接地故障, 本保护原理仍然能准确识别并动作。

5.3 直流线路极间故障仿真结果

图 9 给出了距 K 侧 150 km 处发生极间金属性故障时, K 侧保护安装处的极电流和零模电流幅值。

从图 9 可看到, 直流线路发生极间故障时, 与区外交流线路故障类似, 正负极电流对称变化, 零模电流几乎为零, 保护不动作。

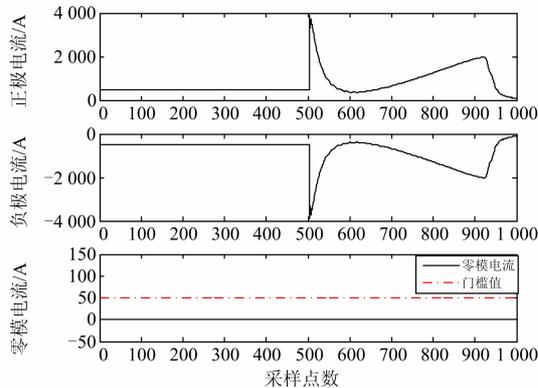


图 9 距 K 侧 150 km 处发生极间金属性接地故障时 K 侧保护动作特性

Fig. 9 Result of protection operation when a bipolar fault occurs 150 km away from K side

大量仿真结果表明: 直流线路单极故障时, 零模电流变化非常明显, 继电保护能在很短的时间内可靠动作; 对于各种类型的交流线路故障以及直流线路极间故障, 零模电流几乎为零, 保护可靠不动作。

仿真结果验证了本保护原理能够灵敏、快速地动作直流线路单极接地故障, 并且几乎不受过渡电阻影响。

6 结论

本文在分析三相两电平 VSC-HVDC 的结构特性和零模网络的基础上, 提出了一种适用于 VSC-HVDC 的单端电气量保护。具有以下特点:

(1) 该原理仅利用一端的电流即可识别区内单极故障, 具有高耐过渡电阻能力, 且能够快速可靠动作。

(2) 该算法在时域进行, 对采样率要求低, 算法简单, 计算量小, 减少数据处理时间, 进一步提高保护动作速度。

(3) 本原理的保护范围是两端换流变压器之间的范围, 主要保护范围为直流输电线路。

参考文献

[1] 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 Hai-rong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
 [2] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明, 等. 一种新的直流输电技术——HVDC light[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 12-16.
 HU Zhao-qing, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. New high voltage direct current transmission technology——HVDC light[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 12-16.
 [3] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
 LI Geng-yin, Lü Peng-fei, LI Guang-kai, et al. Development and prospect for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
 [4] 胡兆庆. 基于 VSC 的 HVDC 控制及其动态特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
 HU Zhao-qing. Research on control and dynamic characteristics of VSC-HVDC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
 [5] 邹超, 王奔, 李泰. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 84-88.
 ZOU Chao, WANG Ben, LI Tai. Control strategy of VSC-HVDC system supplying power for passive networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 84-88.
 [6] 何大清, 蔡旭. 基于平坦系统的 VSC-HVDC 控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 233-239.
 HE Da-qing, CAI Xu. Flatness-based control of VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 233-239.
 [7] 梁海峰, 李庚银, 王松, 等. VSC-HVDC 系统控制体系框架[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 141-147.
 LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, WANG Song, et al. VSC-HVDC control system framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 141-147.
 [8] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
 YAO Wei-zheng, DENG Xiang-chun, YI Ying-ping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.

- [9] 张静, 徐政, 陈海荣. VSC-HVDC 系统启动控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 159-165.
ZHANG Jing, XU Zheng, CHEN Hai-rong. Startup procedures for the VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 159-165.
- [10] ABB. It's time to connect-technical description of HVDC light technology[R]. Sweden: ABB Power Technology, 2005.
- [11] 韩明晓, 文俊. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 185-205.
HAN Ming-xiao, WEN Jun. The principle and operation of HVDC[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 185-205.
- [12] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 利用电流频率特性的 VSC-HVDC 直流输电线路纵联保护[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1989-1996.
SONG Guo-bing, CAI Xin-lei, GAO Shu-ping, et al. New pilot protection for VSC-HVDC transmission lines using natural frequency characteristic of current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1989-1996.
- [13] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
SONG Guo-bing, CAI Xin-lei, GAO Shu-ping, et al. Novel current differential protection principle of VSC-HVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [14] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 基于模型识别的 VSC-HVDC 直流输电线路方向元件[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 78-83.
SONG Guo-bing, CAI Xin-lei, GAO Shu-ping, et al. Directional element for VSC-HVDC transmission lines based on model identification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 78-83.
- [15] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 直流电缆线路电流突变量极性纵联保护适用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 10-16.
CAI Xin-lei, SONG Guo-bing, GAO Shu-ping, et al. Research on applicability of current fault component polarity pilot directional protection for VSC-HVDC cable lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 10-16.
- [16] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用单端电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 107-113.
GAO Shu-ping, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 107-113.
- [17] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.
SONG Guo-bing, ZHOU De-sheng, JIAO Zai-bin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [18] 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, 2009: 17-20.
TANG Guang-fu. VSC-HVDC transmission technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 17-20.
- [19] 李爱民. 高压直流输电线路故障解析与保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LI Ai-min. A study on fault analysis and protection of the HVDC transmission line[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [20] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Hai-rong. Control and protection of VSC based HVDC system under AC system fault conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2013-11-26

作者简介:

宋国兵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护;

冉孟兵(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: ranmb2011@stu.xjtu.edu.cn

靳幸福(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。