

DOI: 10.7667/PSPC161159

# 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究

张冰, 赵书强, 甄永赞

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 柔性直流输电(VSC-HVDC)由于其特殊的控制系统和结构, 线路故障后故障电流上升快, 极易损坏换流器件。在行波保护基本原理的基础上, 研究采样率对于保护灵敏性的影响。仿真分析发现, 合适的高采样率可以显著提高行波保护的灵敏性。配合以极波变化率作为保护启动判据, 以极波斜率区分雷电干扰和短路故障, 以极波差值构造故障选极判据, 提出一种适用于柔性直流输电线路的改进行波保护。在 PSCAD/EMTDC 平台上对双端柔性直流输电系统进行仿真分析, 仿真结果验证了该新型行波保护具有良好的灵敏性, 并且具有较强的抗干扰能力。

**关键词:** 柔性直流输电; 直流线路; 行波保护; 采样率; PSCAD/EMTDC

## Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system

ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Due to the special control system and structure of the VSC-HVDC system, as there is a line fault, the fault current rises quickly and the converter device can be damaged easily. In this paper, the influence of sampling rate on the sensitivity of protection is studied based on the basic principle of traveling wave protection. Simulation analysis shows that the appropriate high sampling rate can improve the sensitivity of traveling wave protection significantly. It presents an improved wave protection which uses pole-wave variance-ratio as the start criterion, adopts the pole-wave slope as a criterion to distinguish lighting interferences and short circuit faults, and employs the pole wave difference value to detect the fault pole. The simulation analysis of a two-terminal VSC-HVDC on PSCAD/EMTDC platform validates that the new wave protection has good sensitivity and strong anti-interference ability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507064).

**Key words:** VSC-HVDC; DC circuit; traveling wave protection; sampling rate; PSCAD/EMTDC

## 0 引言

相比传统的基于电流源变换器的直流输电, 基于电压源变换器的直流输电(VSC-HVDC)是一种更经济有效的电力传输技术, 可以有效克服一些传统直流输电的缺陷, 特别适合于可再生能源并网、城市电网供电和异步交流电网互联等场合。由于其特殊的拓扑结构和控制策略, 线路发生故障后故障电流上升快、极易损坏换流元件, 因此直流线路保护在直流系统中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。

在直流输电系统中利用故障行波作为保护判据, 可以避免电压和电流调节器的影响, 再加上行波快速性的特点, 使其成为目前直流输电系统的主

保护<sup>[2]</sup>。但是综合目前国内外高压直流输电工程的运行经验来看, 行波保护目前普遍存在的问题主要是可靠性差, 易受过渡电阻等干扰的影响。

文献[3]基于分布参数模型, 提出一种电缆线路差动保护, 补偿了电容电流, 可靠性较高; 文献[4]提出利用电流频率特性的纵联保护, 一定程度上解决了保护灵敏性的问题; 文献[5]引入小波变换对暂态电压进行多尺度分析, 提出一种基于小波变换的暂态电压保护原理。上述保护均不同程度地提高了直流保护的可靠性, 但是保护灵敏性仍有提升的空间, 且目前直流输电线路仍以行波保护为主。

本文在行波保护基本原理的基础上分析采样率对保护灵敏性的影响, 提出一种通过提高采样率进而提升灵敏性的改进行波保护, 改进行波保护以极波差分值区分区内、外故障, 利用极波斜率区分雷

电干扰与短路故障, 利用极波差值区分故障极与非故障极。在 PSCAD/EMTDC 环境下进行仿真分析, 验证了改进行波保护能够快速识别故障, 具有良好的灵敏性, 并且可以耐受不低于 500 Ω 的过渡电阻。

## 1 采样率对柔性直流行波保护的影响

### 1.1 双端柔性直流输电系统

柔性直流输电是在常规直流输电(LCC-HVDC)的基础上发展起来的, 两者最根本的区别在于换流站的差异<sup>[6]</sup>, 柔性直流输电基于电压源型换流器, 一般采用 IGBT 阀, 其换流阀结构中含有并联电容<sup>[7]</sup>, 而常规直流输电基于电流源型换流器, 换流阀中不含有并联电容。图 1 和图 2 分别为 VSC 和 LCC 的换流站结构。

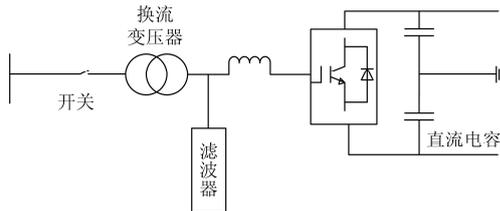


图 1 柔性直流系统换流站结构

Fig. 1 VSC-HVDC converter structure

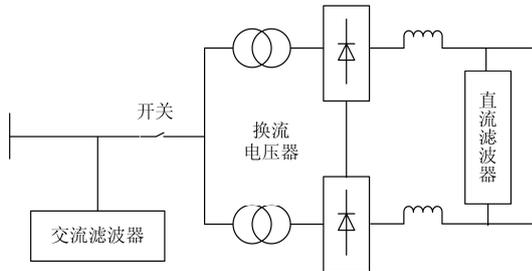


图 2 常规直流系统换流站结构

Fig. 2 LCC-HVDC converter structure

从两者换流站结构图的对比可以看出, 柔性直流输电直流母线间接有电容器组, 当直流侧发生单极接地或双极短路故障时, 电容器组将放电产生较大的冲击电流, 相比常规直流输电系统, 柔性直流输电系统故障电流上升快, 加之 IGBT 阀的耐受过电压和过电流的能力低于晶闸管阀, 柔性直流输电直流侧故障更容易损坏阀元件。

### 1.2 基于极波变化率的行波保护

目前, 主流的直流线路行波保护厂家有 ABB、SIEMENS 和南瑞继保等, 虽然各厂家具体的保护方案不尽相同, 但都利用了故障后暂态行波包含的丰富信息。以 ABB 行波保护原理为例: 当直流线路上发生接地短路故障时, 会从故障点产生故障极

波向线路两端传播, 保护装置通过检测极波  $P$  的变化, 即可检测出直流线路故障, 构成直流线路快速保护<sup>[8-9]</sup>。

极波计算公式为

$$P = Z \cdot I_d - U_d \quad (1)$$

式中:  $Z$  为极波阻抗;  $I_d$  和  $U_d$  分别为线路直流电流和直流电压。极波判据用于快速检测故障, 保护判据公式为

$$\frac{dP}{dt} > \Delta \quad (2)$$

式中:  $dP/dt$  为极波变化率;  $\Delta$  为整定值。当式(2)不等式成立时, 判据动作出口; 若此时其他不等式判据也成立, 则保护动作。

极波的实质是电压反行波, 反行波不受线路末端反射波的影响, 相比于电压变化率, 极波波头更陡峭<sup>[10]</sup>。考虑到工程实际情况, 保护一般采用差分算法计算  $dP_i/dt$ 。当两个采样间隔之间的极波  $P(n)$  和  $P(n-1)$  的差值  $dP(n)$  大于整定值时, 启动判别式。正常运行时,  $dP/dt \approx dP(n)$  的值接近于零; 故障时, 大于一个正值。

### 1.3 采样率对保护灵敏性的影响分析

假设输电线路为无损、无畸变线路, 其中保护区内故障为: 线路 20% 处故障(近端故障)、线路 80% 处故障(远端故障); 区外故障为: 平波电抗器逆变侧故障。图 3 为不同故障情况下测得的故障极波波头。其中, 近端故障、远端故障和区外故障所对应的故障极波分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。

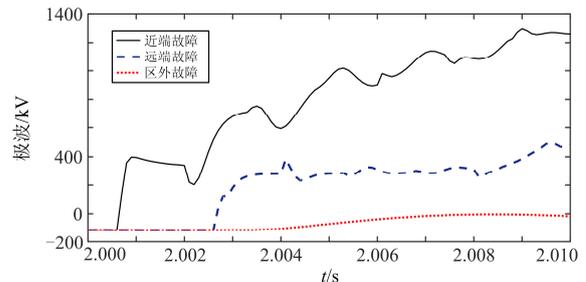


图 3 不同故障情况下的极波

Fig. 3 Pole-waves corresponding to different condition of faults

基于图 3 中的故障极波, 可以计算得到极波差分值, 其中最大差分极波值是保护动作性能的决定因素。计算不同采样率下的最大极波差分值得到表 1, 其中,  $dP_{1max}$ 、 $dP_{2max}$ 、 $dP_{3max}$  分别为对应的极波  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  的最大差分值。

由表 1 可知, 随着采样率的提高, 区内故障时最大极波差分值越来越大, 且和区外故障的最大差分值相比更明显, 更容易分辨出区内和区外故障。因此, 采用较高的采样率可以获取更大的灵敏性。

目前行波保护普遍采用的采样率为 10 kHz, 在这一采样率下保护的抗过渡电阻能力只有 10 Ω 左右, 难以满足实际工程需求<sup>[11]</sup>。因此, 可以通过提高采样率来提升行波保护的灵敏性。

表 1 最大差分极波值随采样率的变化情况

Table 1 Variation of the maximum difference of the pole-waves corresponding to the sampling step

采样率/Hz	dP <sub>1max</sub> /kV	dP <sub>2max</sub> /kV	dP <sub>3max</sub> /kV
100	287.5923	144.1076	8.6955
20	271.1382	142.4117	8.4618
10	228.8348	123.9346	7.6759
5	153.8451	85.0819	6.6929

## 2 改进行波保护

通过上文的分析, 提高采样率后极波判据具有良好的灵敏性, 由于行波属于高频信号, 其主频在 10~100 kHz<sup>[12]</sup>, 过低的采样率无法得到精确的数据, 而过高的采样率又会影响到计算速度, 经综合考虑, 本文所提出的改进行波保护采样率为 100 kHz。结合行波保护快速性的特点, 改进后的行波保护兼具速动性和高灵敏性的优点。

但是采样率的提高也带来更强的噪声, 为了不使保护误动, 需要增加判据识别出故障和干扰。雷电干扰和电磁耦合是两种常见的噪声干扰, 且雷电波通常具有较大的幅值, 电磁耦合具有较长的持续时间, 都对线路保护产生较大的影响。因此, 下面对雷电波和电磁耦合对行波保护的影响进行讨论。

### 2.1 雷电干扰与短路故障的识别

输电线路遭受雷击时, 会在线路上产生故障行波, 雷电波具有很大的上升斜率和幅值, 很容易满足行波启动判据, 造成保护误动。因此有必要增加一个启动判据以识别雷电干扰和线路故障。

雷电波本身为一种高频单极性脉冲波, 根据实测结果, 雷电冲击波的波头多在 2.5~2.6 μs 的范围内变化, 波长多数为 40 μs, 本文采用式(3)所示的标准双指数雷电波模拟雷击产生的雷电波<sup>[13]</sup>。

$$i = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

雷击线路后在线路上将产生类冲击响应<sup>[13]</sup>, 故障极波经过短暂的上升后迅速下降, 极波表现为一个尖脉冲, 并且由于两极直流线路间存在电磁耦合, 两极极波在雷击后起始的一段时间内变化是对称的, 如图 4 所示。

在线路非雷击短路的情况下, 故障点处相当于叠加激励源, 故障极极波震荡上升, 极波波头较陡峭而波尾平缓, 非故障极行波在线路耦合作用下先衰减再震荡上升, 如图 5 所示。

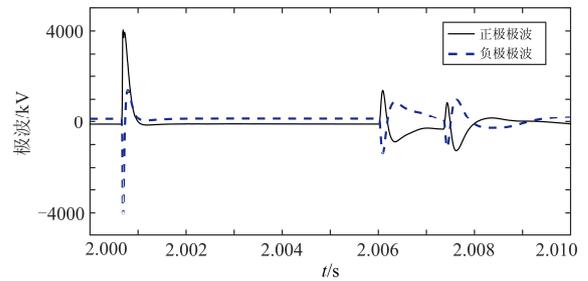


图 4 雷击干扰时极波波形

Fig. 4 Pole-waves with lightning interference

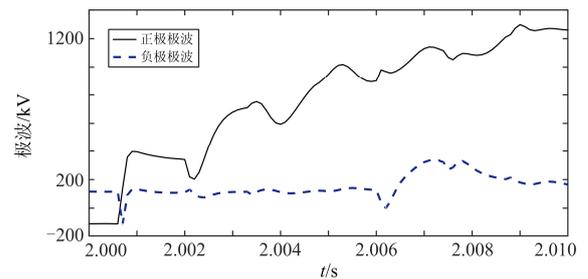


图 5 正极短路故障时两极极波波形

Fig. 5 Pole-waves with the positive pole grounding faults

图 6 所示为不同故障点处(线路 200 km 和 800 km 处)正极短路故障与雷电干扰情况下的故障极极波。

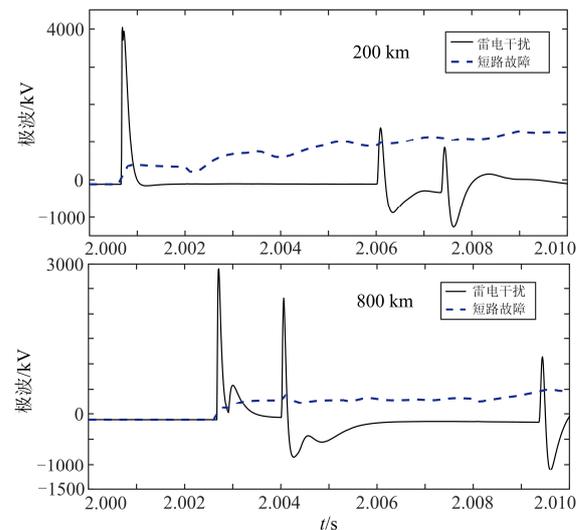


图 6 不同故障点短路故障与雷电干扰情况下的故障极极波  
Fig. 6 Fault pole waves in the case of grounding faults or lightning interference at different fault points

由图 6 可知, 雷电干扰情况下极波突变更陡峭, 极波表现为一尖峰; 相对而言短路故障下极波变化率更平缓。图 4 的数据窗为 10 ms, 雷电干扰时的极波波头非常短暂, 在微秒级, 因此引入波头到来后 1 ms 为数据窗, 利用极波斜率作为保护特征量构

成判据可以快速区分雷电干扰和短路故障, 设极波波头最大上升斜率为  $k_1$ , 最大下降斜率为  $k_2$ , 定义  $K$  为两者比值的绝对值, 表达式见式(4)。

$$K = |k_2 / k_1| \quad (4)$$

根据雷电干扰和接地故障两种情况下极波斜率变化不同的特点, 设置合理的整定值  $K_{set}$ , 在检测到故障极波波头后 1 ms 内, 如果有  $K_r > K_{set}$ , 则可以判定为雷电干扰, 否则为短路故障。

## 2.2 故障选极

由电磁耦合而感应出来的电压波在非故障极沿线传播产生感应极波<sup>[14]</sup>。此感应极波可能会使保护装置误动作, 因此有必要对感应极波进行分析。

单极短路时, 故障点处相当于叠加电流源, 在故障的初始阶段控制系统还来不及进行调整, 故障极极波迅速升高形成波头并向线路两端传播, 非故障极由于电磁耦合也会感应出波头, 但幅值小, 随着故障极极波趋于平稳, 电磁耦合的作用随之减弱。因此, 非故障极的极波变化率与幅值相比于故障极要小得多。

双极短路时, 由于双端柔性直流输电系统的两侧换流站结构对称, 两极线路参数也一致, 因此两极极波的变化也是对称的。据此, 提出采用极波差值作为增加的保护判据以区分双极故障与单极故障。定义  $\Delta p$  为正极极波与负极极波的差值。计算公式如式(5), 其中  $P_1$  和  $P_2$  分别为正极和负极的极波幅值。

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (5)$$

双极故障时  $\Delta P$  的值在零附近; 正极故障时,  $\Delta P$  为正值; 负极故障时,  $\Delta P$  为负值。

由此就构成了现实的极性比较式保护原理, 根据保护装置检测到的极波变化极性以及极波差就可以分辨出故障极与非故障极。

## 3 仿真测试与分析

### 3.1 仿真模型

本文利用 PSCAD/EMTDC 建立柔性直流输电系统模型, 如图 7 所示。

模型中直流线路全长 1000 km, 直流额定电流 800 A, 直流额定电压  $\pm 320$  kV。直流线路采用频率相关(相位)模型。故障开始于 2 s, 永久性故障。以安装于正极上的保护装置作为研究对象。

分别对区内故障( $f_1$ )、区外故障( $f_2$ )以及雷击这三种典型故障进行仿真。工程实践以及仿真表明, 区外故障最严重的情况是电容侧  $0 \Omega$  接地故障( $f_2$ ), 因此本文对  $f_2$  进行区外故障仿真分析。

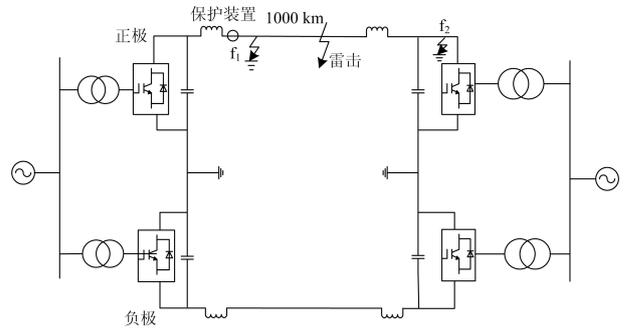


图 7 柔性直流输电系统仿真模型

Fig. 7 Simulation model of VSC-HVDC system

### 3.2 区内故障与区外故障仿真分析

设  $f_1$  位于线路 200 km 处发生接地故障, 图 8 给出了不同采样率下的极波波头, 仿真考虑了  $0 \Omega$  电阻接地、 $100 \Omega$  接地两种情况(故障位置相同)。

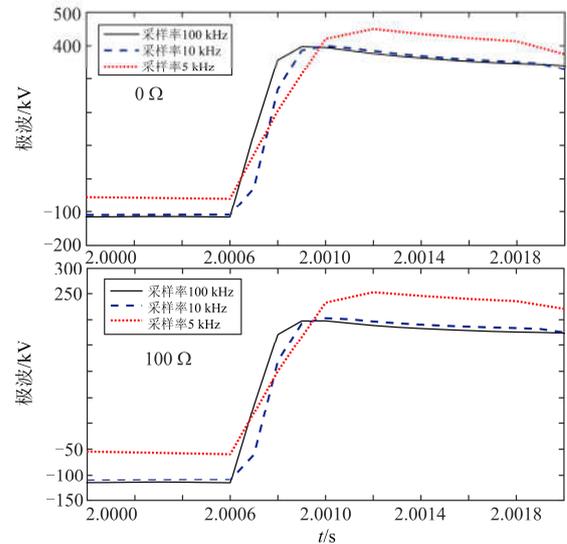


图 8 正极接地故障不同采样率下的极波

Fig. 8 Pole-waves corresponding to different sampling rate with positive pole grounding faults

可以看出, 采样率不仅影响波头的倾斜角, 还对波头到来时间有显著影响。由于提高采样率提高了数据精度, 对于波头的捕捉变得更为精确。从图 8 可以看出, 虽然过渡电阻降低了极波的幅值, 但对于 100 kHz 采样率下波头到来时间更早这一结论是相同的。

对正极不同位置进行故障设置, 分别为线路全长 20%(200 km)、50%(500 km)、80%(800 km), 对比  $f_2$  故障情况下的极波, 采样率分别设置为 100 kHz、10 kHz、5 kHz, 表 2 列出了不同采样率下的最大差分极波值。

表 2 不同故障类型下的最大差分极波  
Table 2 Maximum difference values of pole-waves corresponding to different fault types

采样率/kHz	最大差分极波 $dP_{max}/kV$			
	100	10	5	
区内故障 $f_1$	200 km	473.3742	377.0681	264.7145
	500 km	264.5159	218.8026	195.7873
	800 km	237.0785	203.4881	139.7287
区外故障 $f_2$	107.1605	102.2161	88.8337	

由表 2 可以进一步看出，高采样率可以提高最大差分极波，而最大差分极波数值的提高可以提高保护灵敏度。

表 3 以正极线路接地短路为例说明采样率对耐受过渡电阻的影响。

表 3 不同过渡电阻下的最大差分极波  
Table 3 Maximum difference values of pole-waves corresponding to different transition resistances

过渡电阻/ $\Omega$	最大差分极波 $dP_{max}/kV$				
	0	100	500	1000	
100 kHz	$f_1$	473.3742	287.5923	112.0131	63.6149
	$f_2$	107.1605			
10 kHz	$f_1$	377.0681	228.8348	89.1099	50.6499
	$f_2$	102.2161			

由表 3 可以看出，采样率为 100 kHz 下保护所能检测到的最大过渡电阻可以达到 500  $\Omega$ ，采样率为 10 kHz 下保护最大能检测到的过渡电阻只有 100  $\Omega$ 。仿真得到的数据表明，提高采样率之后的改进行波保护能耐受更大的过渡电阻，从而提升保护灵敏度。

### 3.3 雷电干扰仿真分析

仿真中雷电流取双指数波，波头时间  $t_r=2.3 \mu s$ ，波长  $t_f=40 \mu s$ ，故障点分别为正极线路 200 km、500 km、800 km 处，采样率 100 kHz。表 4 列出了雷电干扰和短路故障下计算得到的极波斜率  $K$ 。保护定值  $K_{set}=0.4$ 。

表 4 不同故障点处故障极极波斜率比值  $K_r$

故障位置	$K_r$	判据	判断结果
200 km	0.7187	$K > K_{set}$	雷电干扰
	0.0314	$K < K_{set}$	短路故障
500 km	0.7178	$K > K_{set}$	雷电干扰
	0.0071	$K < K_{set}$	短路故障
800 km	0.7109	$K > K_{set}$	雷电干扰
	0.1213	$K < K_{set}$	短路故障

仿真结果符合理论分析，通过表 4 可以看出，短路故障情况下的极波斜率比远小于雷击干扰的情

况。通过分析统计实际系统可能发生的各种雷击和短路情况，设置合理的保护定值可以准确区分雷电干扰和短路故障。

### 3.4 故障选极仿真与分析

图 9 所示为不同故障类型下两极极波的差值，采样率为 100 kHz。考虑线路短路处有 500  $\Omega$  过渡电阻，可以看出，正极故障极波差值为正，负极故障极波差值为负，双极故障极波差值接近于零。过渡电阻会减弱极波的幅值，但是对极波差值的故障特性没有影响。从仿真结果来看，保护可以耐受 500  $\Omega$  过渡电阻。

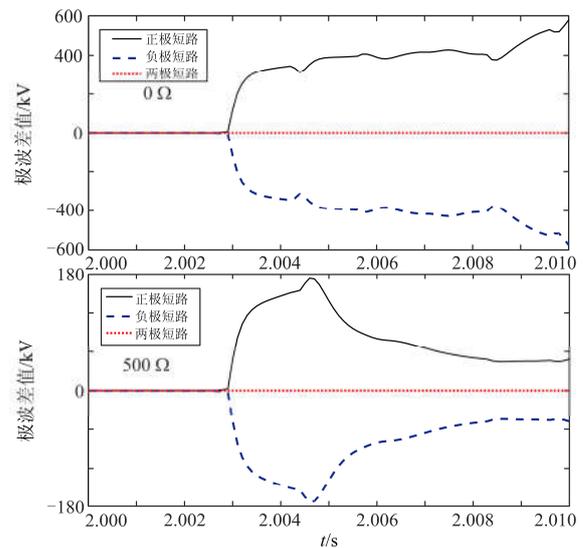


图 9 故障极与非故障极极波差值

Fig. 9 Wave differences between the fault pole and the sound pole

## 4 结论

本文以传统直流输电行波保护为基础，研究了采样率对行波保护灵敏性的影响，以 PSCAD/EMTDC 为平台搭建 VSC-HVDC 仿真模型，通过仿真验证如下结论。

1) 采样率的提高可以提升极波判据的灵敏性，不仅使保护能够耐受不低于 500  $\Omega$  的过渡电阻，还能显著缩短故障检测时间。

2) 为抑制采样率提高带来的干扰，提出以极波斜率比值作为判据用以区分雷电干扰和短路故障，防止雷击直流线路引起保护误动，根据极波变化极性以及极波差值分辨故障极与非故障极。

### 参考文献

[1] 宋国兵, 李德坤, 靳东晖, 等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 83-88.

- SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.
- [2] 孙舒捷. 高压直流输电系统仿真及其输电线路行波保护方案[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- SUN Shujie. The simulation of HVDC system and the study of its transmission line protection scheme[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [3] 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 Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, 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.
- [4] 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 Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, 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.
- [5] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.
- LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [6] 肖永. 柔性直流输电技术及工程应用[M]. 贵阳: 贵州大学出版社, 2014: 22-23.
- [7] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [8] 高本锋, 刘辛晔, 张云晓, 等. 高压直流输电线路行波特性与保护定值整定[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 120-125.
- GAO Benfeng, LIU Xinye, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics and protection value setting of traveling wave on HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 120-125.
- [9] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.
- ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 149-154.
- [10] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
- LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [11] 李爱民, 徐敏, 蔡泽祥, 等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 90-96.
- LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
- [12] 刘可真. 特高压直流输电线路暂态保护和故障测距问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 7-13.
- DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 7-13.
- [14] 王海军, 周全, 梁远升, 等. 基于电压突变量的同塔双回直流输电线路故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 23-29.
- WANG Haijun, ZHOU Quan, LIANG Yuansheng, et al. Fault line selection of double-circuit HVDC transmission line based on voltage variation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 23-29.

收稿日期: 2016-07-28; 修回日期: 2017-01-04

作者简介:

张冰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: zhangbing0514@163.com

赵书强(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制, 电力系统规划与可靠性等; E-mail: zsqdl@163.com

甄永赞(1985-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为直流输电与直流电网。E-mail: zhenyongzan\_001@126.com

(编辑 葛艳娜)