

DOI: 10.7652/xjtuxb201602015

行波波头的参数识别方法在高压直流输电系统中的应用

徐海洋¹, 宋国兵¹, 樊占峰², 靳幸福³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 许继集团有限公司, 461000, 河南许昌;
3. 国网安徽省电力公司经济技术研究院, 230022, 合肥)

摘要: 为了提高识别电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)系统中的行波波头的可靠性,提出了一种行波波头的参数识别方法。根据 VSC-HVDC 系统零模网络的分析结果,直流线路两端的系统可以等效为电容,利用保护安装处测得的零模电压和零模电流可以计算零模识别电容。当直流线路发生故障后,零模识别电容会在行波波头到达线路两端的时刻突变至等效电容,因此可以根据零模识别电容的突变时刻确定行波波头的到达时刻。仿真结果表明:对于全长为 100 km 的线路,采用行波波头的参数识别方法,故障定位的绝对误差小于 200 m,说明该方法具有较高的识别精度。与传统的行波波头识别方法相比,文中方法的优势在于能够始终可靠识别 VSC-HVDC 系统中行波波头的到达时刻,不受电气量波形渐变和输电线路参数频变的影响,且适用于高阻接地故障,能够应用于 VSC-HVDC 直流线路区内接地故障的定位,因此具有一定的理论和实用价值。

关键词: 高压直流输电;直流线路;行波波头;参数识别

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)02-0085-06

Parameter Identification Method with Applications to Traveling Wave Head in VSC-HVDC

XU Haiyang¹, SONG Guobing¹, FAN Zhanfeng², JIN Xingfu³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang, Henan 461000, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Company Economy and Technology Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: In voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) system, the zero-sequence network at both ends of the DC line can be equivalent to a parallel capacitor, which reduces the slope of voltage traveling waveform to difficultly identify the traveling wave head with electrical quantities. A method is proposed to identify the arriving time of traveling wave head via judging the sudden changing time of the calculated zero-sequence capacitance. The method is used to locate fault points in the DC line of VSC-HVDC system of 100 km, and the absolute location error can be limited within range of 200 m. The theoretical analysis and simulations show that the proposed method is reliable and accurate to identify the arriving time of the traveling wave head, especially, it is immune from the slow change of electrical quantities and the frequency dependent characteristics of DC lines and suitable for high resistance grounding cases.

Keywords: high voltage direct current; DC line; traveling wave head; parameter identification

收稿日期: 2015-06-24。 作者简介: 徐海洋(1992—),男,硕士生;宋国兵(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477131)。

网络出版时间: 2015-11-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20151111.1820.014.html>

1990 年,加拿大学者首次提出了基于电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC) 的概念;1999 年,世界上第一条商业运行的 VSC-HVDC 工程在瑞典的哥特兰岛投入运行^[1-2]。1999 年至今,世界上已经有 30 多个 VSC-HVDC 工程投入运行^[3],成功应用于新能源发电并网、孤岛供电、城市电网改造和异步电网互联等领域,并在构建直流电网方面展现出了良好的应用前景^[4-5]。

直流输电工程两端换流站之间的直流线路一般较长且运行环境恶劣,因而与其他输电设备相比故障率高^[6]。为了保障直流输电系统的安全稳定运行,需要在直流线路发生故障后及时确定故障位置并清除故障,因此精确的故障定位方法是十分必要的。针对高压直流线路的故障定位方法,国内外学者开展了大量的研究工作^[6-14]。文献[6]对目前直流输电线路的故障定位方法进行了较详细的综述。文献[7]求解贝瑞龙模型下输电线路沿线各点电压,利用故障点处两端的计算电压时时相等进行故障定位。文献[8]利用沿线电压和电流计算过渡电阻,根据故障点处的过渡电阻最稳定确定故障点的位置。文献[9]将参数识别的方法应用于故障定位,通过构造故障网络的时域微分方程计算故障距离。文献[10]分析固有频率和故障距离之间的关系,通过频谱分析的方法得到固有频率,进而求取故障距离实现定位。

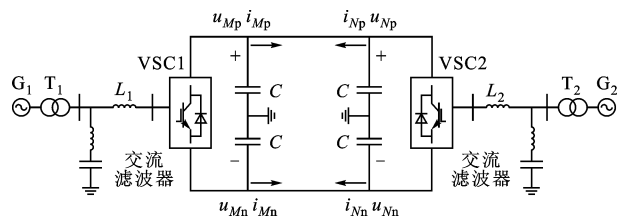
目前,应用于直流输电工程的故障定位方法以行波法为主。行波故障定位具有定位精度高的优点,但定位精度受到采样频率的影响,并且在高阻情况下可能定位失败。同时,行波故障定位需要专业的运行人员进行行波波头的识别,难以实现自动化的定位^[6]。针对行波故障定位存在的问题,国内外学者进行了深入的研究并提出了改进方法^[11-14]。文献[11]利用小波变换的方法识别初始电流行波的波头,构成了行波故障定位原理。文献[12]将红绿色彩模式检测应用于特高压直流线路的故障定位,根据故障电压行波映射得到的色彩模式图确定故障点位置。文献[13]利用行波极性识别初始反行波和对端母线第一次反射的反行波,根据两者到达测点的时间差实现故障定位。文献[14]对行波故障定位中识别波头和确定波速度的问题进行分析,给出了考虑波速度变化的行波故障定位方法。

本文针对 VSC-HVDC 输电系统,充分利用其直流线路两端并联大电容的结构特点,提出了一种能够准确识别行波波头到达时刻的方法,用于故障

定位。通过计算故障后线路两端的识别电容进行行波波头的识别,根据识别电容值的突变时刻确定行波到达线路两端的时刻。由于使用的电压和电流量均为零模量,所以该方法适用于直流线路区内接地故障(单极接地故障和双极接地故障)的故障定位。PSCAD/EMDTTC 仿真验证了行波波头的识别方法有效,且具有较高的识别精度。

1 VSC-HVDC 系统结构

图 1 为 VSC-HVDC 的系统结构图。VSC-HVDC 系统的直流线路两端通常接有并联电容器,为直流电压提供支撑,并起到减小直流侧谐波的作用^[1]。为了防止调整模式引起的零序分量向交流系统传递,交流侧变压器的二次侧通常采用三角形接法^[4]。下文分析仅针对图 1 所示的 VSC-HVDC 系统。



G_1 和 G_2 分别为整流侧和逆变侧的交流电源; T_1 和 T_2 分别为整流侧和逆变侧的换流变压器; L_1 和 L_2 分别为整流侧和逆变侧的换流电抗器;VSC1 和 VSC2 分别为整流站和逆变站; C 为并联电容; M 和 N 分别代表整流侧和逆变侧; p 和 n 分别代表正极和负极; u_{Mp} 、 i_{Mp} 和 u_{Np} 、 i_{Np} 分别代表整流侧和逆变侧正极直流线路的电压和电流; u_{Mn} 、 i_{Mn} 和 u_{Nn} 、 i_{Nn} 分别代表整流侧和逆变侧负极直流线路的电压和电流

图 1 VSC-HVDC 系统结构图

2 区内接地故障的零模网络

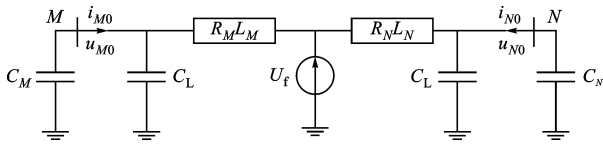
根据文献[9],零模电压和电流的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= \frac{2^{1/2}}{2} (i_p + i_n) \\ u_0 &= \frac{2^{1/2}}{2} (u_p + u_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当 VSC-HVDC 直流线路发生区内接地故障时,零模网络中直流线路两侧的系统可以等效为电容^[15]。VSC-HVDC 的直流线路发生单极接地故障的等效零模网络如图 2 所示。

3 行波波头到达时刻的识别方法

行波波头到达时刻的识别受电压、电流行波渐变的影响,对运行人员素质要求高,且难以实现自动化。鉴于行波电压和电流受两侧系统参数的约束,



u_{M0} 、 i_{M0} 和 u_{N0} 、 i_{N0} 分别为整流侧和逆变侧的零模电压与电流;
 C_M 和 C_N 分别为两侧的并联电容;故障点处 U_f 为等效的零模
 电压源; C_L 为线路等效的对地电容,线路采用 π 模型等效;
 R_M 、 L_M 和 R_N 、 L_N 分别为故障点两侧线路的等效电阻和电抗

图2 直流线路单极接地故障的零模网络

利用行波电压和电流计算系统参数值可以反映行波波头的到达时刻。因此,有必要研究利用识别背侧系统参数反映行波波头到达时刻的方法。

在图2所示的零模网络中,对于两端的大电容而言,由电压、电流关系可以得到如下关系式

$$C_M = \frac{-i_{M0}}{du_{M0}/dt} \quad (2)$$

$$C_N = \frac{-i_{N0}}{du_{N0}/dt} \quad (3)$$

即发生区内单极接地故障时,由线路两端的零模电压和零模电流可以准确计算出两端并联的电容值。

根据行波的相关理论,当发生单极接地故障后,行波由故障点向线路两端传播^[16]。在行波到达线路两端之前,线路两端的零模电流和零模电压均为0,图2所示的零模网络不存在。只有当行波到达线路两端时,图2的零模网络才存在,由式(2)和式(3)计算的识别电容等于并联电容。所以,在区内单极接地故障发生后,由于行波传播的延时,识别电容经过一定的延时会突变至并联电容。因此,可以根据识别电容的突变时刻进行行波波头到达时刻的识别。

对于区内双极接地故障,零模网络与单极接地故障相同,也可以采用该方法进行波头识别。

图3为2s时发生单极接地故障的零模电压、电流波形和识别电容波形的对比图。从图3可以看出,发生故障后,零模电压、电流都在缓慢变化,仅识别出的电容值即可准确反映行波波头的到达时刻。这是因为电压、电流的变化反映背侧系统的等值电

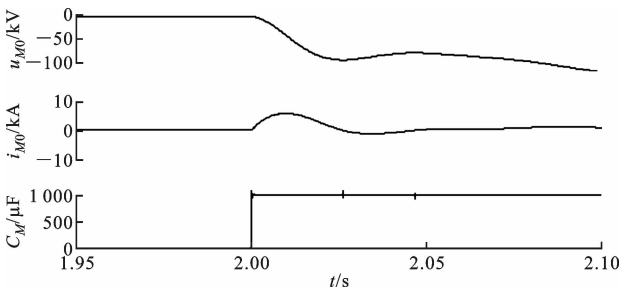


图3 M侧零模电压、电流和零模识别电容波形

容参数,而电压、电流波形的陡度受参数频变、故障严重程度等因素的影响。因此,与传统行波法相比,采用电容突变时刻识别行波波头的到达时刻具有更高的识别精度。

4 行波波头到达时刻的判据

由第3节的分析可知,利用线路两端识别电容的突变时刻可以确定行波波头的到达时刻。VSC-HVDC系统两端并联的电容相同,设为 C_0 。考虑到采样时的不确定性可能造成的数据坏点,取 $C_0 \pm \Delta C_0$ 作为零模识别电容的稳定区间,即用零模识别电容达到稳定区间反映电容的突变时刻,作为行波波头的到达时刻。例如,当 $C_0 = 1\,000\,\mu\text{F}$ 时,若取 $\Delta C_0 = 50\,\mu\text{F}$,则零模识别电容值的稳定区间为 $950 \sim 1\,050\,\mu\text{F}$ 。

采用三点数值微分公式,计算式(1)和式(2)中的零模电压微分

$$\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_s} = \frac{u(t_s + \Delta t) - u(t_s - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (4)$$

取 t_M 和 t_N 分别为整流侧和逆变侧的零模识别电容第一次达到稳定区间的时间。为保证可靠性, t_M 和 t_N 取为连续3点计算的零模识别电容满足稳定区间的第一个点对应的的时间,即行波波头到达时刻的判据为

$$\left. \begin{aligned} |C_K(i) - C_0| &< \Delta C_0 \\ |C_K(i+1) - C_0| &< \Delta C_0 \\ |C_K(i+2) - C_0| &< \Delta C_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: C_K 为K侧的零模识别电容; i 为采样点数。

具体的行波波头识别流程为:由线路两端的电压和电流采样值计算对应的零模电压和电流;根据式(4)计算零模电压微分值;根据式(2)和式(3)计算零模识别电容,从而确定行波波头的到达时刻。

5 仿真实验

本文在PSCAD软件上搭建了VSC-HVDC输电系统的仿真模型。模型具体参数如下:系统容量为60MW,额定直流电压为 $\pm 60\,\text{kV}$ 。直流线路分别采用贝瑞龙模型的架空线和频变参数模型的电缆,线路长度为100km。线路两端的并联电容均为 $1\,000\,\mu\text{F}$,零模识别电容的稳定区间取为 $950 \sim 1\,050\,\mu\text{F}$ 。采样频率为1MHz。仿真时间为2.5s,故障开始时间为2.0s,持续时间为0.1s。

本文采用贝瑞龙模型的线路仿真是为了验证行波波头识别方法的有效性和精确性。由于贝瑞龙模

型下的零模波速度为固定值,根据文献[16]中的双端故障定位方法可知,当故障定位的结果准确时,即证明行波波头的识别具有较高的精度。双端行波定位方法的计算公式如下

$$x_M = [L - v_0(t_N - t_M)]/2 \tag{6}$$

式中: v_0 为零模波速度; L 为区内直流线路全长; x_M 为故障点到 M 端的距离。

为了验证实际 VSC-HVDC 系统中行波波头识别方法的有效性,本文采用频变参数模型进行仿真。频变参数模型的具体参数见文献[15]。

5.1 贝瑞龙模型仿真

贝瑞龙模型的架空线路的具体参数如下:1 模电阻 $R_1 = 36.294 \times 10^{-3} \text{ }\Omega/\text{km}$,0 模电阻 $R_0 = 379.58 \times 10^{-1} \text{ }\Omega/\text{km}$,1 模波阻抗 $Z_{C_1} = 390.141 \text{ }\Omega$,0 模波阻抗 $Z_{C_0} = 753.595 \text{ }\Omega$,1 模波速度 $v_1 = 2.919 \text{ }67 \times 10^5 \text{ km/s}$,0 模波速度 $v_0 = 2.097 \text{ }75 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。

由于篇幅限制,下面仅给出距 M 端 20 km 处发生正极接地故障的仿真结果。由图 4 可以看出,在距离整流侧 20 km 处发生正极金属性接地故障时,整流侧识别电容先达到稳定区间。根据 MATLAB 的数据处理结果,整流侧识别电容达到稳定区间的时间为 2.000 099 s,逆变侧识别电容值达到稳定区间的时间为 2.000 384 s。利用式(6)计算得 $x_M = 20.107 \text{ }1 \text{ km}$ 。对于全长为 L 的直流线路,故障定位结果的绝对误差和相对误差如下

$$\Delta x_M = |x_{re} - x_{id}| \tag{7}$$

$$\delta = \left| \frac{\Delta x_M}{L} \right| \times 100\% \tag{8}$$

式中: x_{re} 为实际故障点到 M 端的距离; x_{id} 为计算得到的故障点到 M 端的距离。

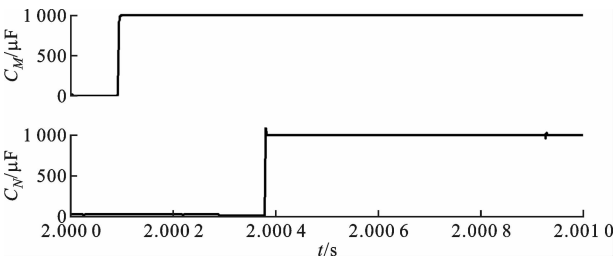


图 4 距 M 端 20 km 处发生正极金属性接地故障的零模识别电容波形

仿真线路全长为 100 km,根据式(7)和式(8)可计算出定位的绝对误差为 0.107 1 km,相对误差为 0.107 1%。从仿真结果可以看出,本文提出的行波波头识别方法具有较高的识别精度。

由图 5 可以看出,在 VSC-HVDC 系统中,由于行波电压或者行波电流的波头变化缓慢且幅值较小,因而传统的波头识别方法难以识别行波波头。相比较而言,本文提出的方法不受行波波头陡度和幅值的影响,能够可靠识别行波波头。

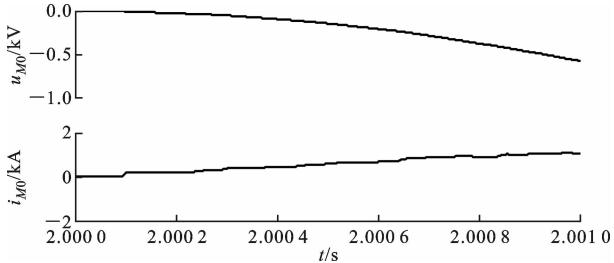


图 5 距 M 端 20 km 处发生正极金属性接地故障的零模电压和零模电流波形

为了验证新的行波波头识别方法对于 VSC-HVDC 直流线路任意位置故障及对于非金属性接地故障的适用性,本文进行了大量的仿真验证。表 1 给出了区内不同位置经不同的过渡电阻发生单极接地故障的仿真结果。

表 1 不同位置发生单极接地故障的仿真结果

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	定位距离/km	定位误差/%
20	0	20.107 1	0.107 1
	100	20.107 1	0.107 1
	300	20.107 1	0.107 1
40	0	40.140 6	0.140 6
	100	40.140 6	0.140 6
	300	40.140 6	0.140 6
60	0	60.069 2	0.069 2
	100	60.069 2	0.069 2
	300	60.069 2	0.069 2
80	0	80.102 7	0.102 7
	100	80.102 7	0.102 7
	300	80.102 7	0.102 7

分析表 1 中的数据可知,在区内不同位置发生单极接地故障时,定位的相对误差小于 0.2%。即对于 100 km 的线路,定位的绝对误差小于 200 m。同时,无论是金属性接地故障,还是经过渡电阻接地故障,定位的结果都相同。由此可知,新的行波波头识别方法能够准确地识别行波波头,且识别精度不受过渡电阻的影响。

在高阻接地故障情况下,由于行波波头幅值受到限制,传统的行波波头识别方法适应性较差,甚至可能无法用于故障定位[6]。由图 6 和图 5 对比可以

看出,故障点过渡电阻的存在会严重降低行波波头的幅值,影响波头识别的可靠性。相比较而言,新的行波波头识别方法由于计算识别电容不受行波波头幅值的影响,仍然可以可靠地进行波头识别。即新的行波波头识别方法能很好地适应高阻接地故障。

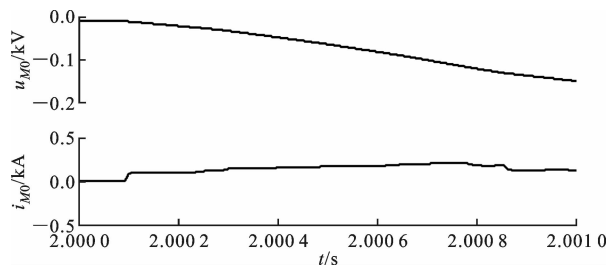


图6 距M端20 km处经300 Ω 发生正极接地故障的零模电压和零模电流波形

5.2 频变参数模型仿真

图7为距M端20 km处发生正极金属性接地故障的仿真结果。由图7可以看出,对于实际的VSC-HVDC系统而言,本文提出的波头识别方法能够准确地识别行波波头,从而确定波头的到达时刻。

根据以上仿真分析可以得出结论:本文提出的行波波头识别方法有效,且具有较高的精度。

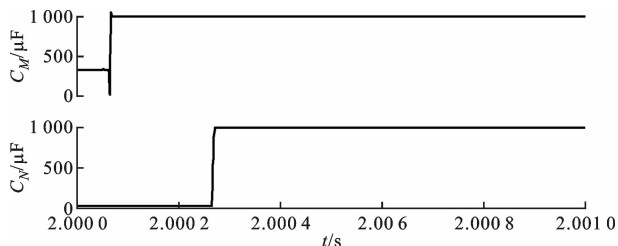


图7 距M端20 km处发生正极金属性接地故障的零模识别电容波形

6 相关问题分析

6.1 行波波头到达时刻识别方法的本质

本文提出的行波波头到达时刻的识别方法,本质是通过识别背侧系统参数反映行波到达时刻,适用于背侧系统参数性质确定的场合。本方法仅利用了参数突变时刻来反映行波波头的到达时刻,关注的是突变时刻的准确性,无须考虑背侧系统参数的具体数值。本文针对的VSC-HVDC系统,其背侧系统可以等效为电容,故能够使用本方法。

6.2 背侧系统参数不确定对本方法的影响

由该方法的本质分析可以看出,本方法仅利用了参数突变时刻来反映行波波头的到达时刻,关注的是突变时刻的准确性,不涉及背侧系统参数的具

体数值。当背侧系统参数性质确定时(容性、感性等),即可使用本方法。

以本文中的VSC-HVDC系统为例,由于电容不精确、寄生电感等因素的影响,无非表现为电容参数的时变或频变特性,只要其总体仍表现为电容特性,则不会影响行波波头到达时刻的确定。

6.3 输电线路参数频变对本方法的影响

输电线路参数频变对行波故障定位影响的本质是,不同频率分量对应不同的波速度,即参数的频变特性不仅影响了波头中频率分量的分布,也影响波速度的确定。需要说明的是,本文仅关注如何利用电气量反映行波波头到达时刻,并不涉及互感器传变能力、A/D转换精度和参数频变带来的波速度确定问题。

事实上,输电线路在参数频变的情况下,互感器和A/D转换系统能够识别的行波波头中最高频率分量受互感器传变特性、A/D转换精度和故障严重程度等因素的影响。对本方法而言,参与电容参数识别的电气量是互感器和A/D转换系统转变的最高频率分量。

7 结论

本文分析了VSC-HVDC直流输电线路发生区内接地故障时的零模网络,根据故障时直流线路两端识别电容的突变时刻进行行波波头的识别,用于故障定位。仿真结果表明,本文提出的行波波头识别方法能够准确地识别行波波头,且识别精度不受过渡电阻的影响。与传统的行波波头识别方法相比,本文方法的主要优势在于行波波头到达时刻的识别更精确,且对于高阻接地故障具有较好的适应性。

目前,行波故障定位的精度取决于波头到达时刻与波速度的精确性。线路参数的频变特性决定了行波波头变化率下降和波速度的依频特性,进而影响了行波波头的识别和波速度的确定。本文提出的故障定位方法主要解决行波波头准确识别的问题,频变参数引起的波速度问题将会在今后继续进行研究。

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: 1-3.
- [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] 乐波, 梅念, 刘思源, 等. 柔性直流输电技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014(5): 43-47.
YUE Bo, MEI Nian, LIU Siyuan, et al. Overview of HVDC flexible [J]. China Electric Power: Technology Edition, 2014(5): 43-47.
- [4] 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.
- [5] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [6] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137.
- [7] 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 Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [8] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter mode [J]. Proceedings of the CSEE, 2010 30(13): 75-80.
- [9] 宋国兵, 李德坤, 褚旭, 等. 基于参数识别原理的 VSC-HVDC 输电线路单端故障定位 [J]. 电网技术, 2012, 36(12): 94-99.
SONG Guobing, LI Dekun, CHU Xu, et al. One-terminal fault location for VSC-HVDC transmission lines based on principles of parameter identification [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [10] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [11] 王少荣, 赵妍卉. 双极 HVDC 输电线路行波故障定位 [J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 124-128.
WANG Shaorong, ZHAO Yanhui. Traveling-wave fault location of double-pole HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 124-128.
- [12] 束洪春, 张敏, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路单端行波故障定位的红绿色模式检测 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 155-163.
SHU Hongchun, ZHANG Min, ZHANG Guangbin, et al. An RG color pattern detection of single-ended traveling wave fault location on ± 800 kV UHVDC transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 155-163.
- [13] 李德坤, 宋国兵, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 输电线路单端行波自动化故障定位方法研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1128-1133.
LI Dekun, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. Study on automatic fault location for VSC-HVDC transmission lines based on one-terminal traveling wave [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1128-1133.
- [14] XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel coordination scheme of wavefront and wave speed for HVDC travelling wave fault location [C]//2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 102-107.
- [15] 靳幸福, 宋国兵, 徐海洋, 等. 利用模量模型识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护新原理 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 100-106.
JIN Xingfu, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. A novel pilot protection for VSC-HVDC transmission lines using modulus model identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 100-106.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 181-182.

(编辑 杜秀杰)