

# 一种基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距方法

陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 谢佳伟, 束洪春

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 直流输电线路故障时, 高频故障暂态信号将沿线路向两端传播, 线路对故障暂态信号高频分量有衰减作用。研究双极特高压直流输电线路频率特性, 得到特高压直流输电线路对高频量有衰减作用, 线路越长, 衰减作用越剧烈的结论。研究基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理, 推导出故障点距测距装置安装点的距离公式, 得到基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理难以准确实现直流输电点线路故障测距的结论。研究基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理, 推导出故障点距测距装置安装点的距离公式, 提出频带衰减概念, 推导出基于频带衰减的故障距离计算公式。建立云广特高压直流输电系统实际参数仿真模型, 对提出的基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理进行仿真验证, 仿真测距结果有较高的准确度。

**关键词:** 特高压直流输电线路; 频率特性; 单端故障测距; 双端故障测距; 频带衰减

## A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line

CHEN Shi-long, ZHANG Jie, BI Gui-hong, XIE Jia-wei, SHU Hong-chun

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** When HVDC transmission lines fault, the high frequency transient signal travels along the lines, and the high frequency component attenuates during the course. The phase-model transform is analyzed, the frequency characteristic of double-poles UHVDC transmission lines is studied, and the conclusion that the UHVDC transmission lines attenuate the high frequency component, the UHVDC transmission line is longer, the attenuation is acuter is drawn. The single-ended fault location theory of UHVDC transmission line based on high frequency attenuation characteristic is studied, the distance calculation formula of fault position is deduced, and the conclusion that the single-ended fault location theory of UHVDC transmission line based on high frequency attenuation characteristic can not realize the fault location exactly is drawn. The double-ended fault location theory of UHVDC transmission line based on high frequency attenuation characteristic is studied, the distance calculation formula of fault position is deduced, the conception of frequency band attenuation is put forward, the distance calculation formula of fault position based on frequency band attenuation is deduced. The actual parameter simulation model of Yunnan-Guangdong UHVDC system is built up, and the double-ended fault location theory based on high frequency attenuation characteristic studied in this paper is simulated and the simulation location result is higher accurate.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267008).

**Key words:** UHVDC transmission line; frequency characteristic; single-ended fault location; double-ended fault location; frequency band attenuation

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0077-07

## 0 引言

输电线路发生故障后, 快速准确的故障定位不仅可以迅速排除故障防止故障再次发生, 还可以大大节省巡线工作量<sup>[1-3]</sup>, 特别是直流线路, 因其输电

距离长、跨度大, 故障定位工作显得尤为重要。当前输电线路故障测距的主流方法是行波测距<sup>[4-5]</sup>, 单端行波测距原理对硬件要求较低, 容易实现, 在目前电力系统中应用较为广泛, 但单端行波测距中行波折反射过程复杂<sup>[6]</sup>, 实际应用中单端测距精度不够高<sup>[7]</sup>, 一般作为双端行波测距的辅助方法<sup>[8]</sup>。无论是单端行波测距还是双端行波测距, 其关键是波

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51267008)

头的识别和波头在时间上的标定<sup>[9-11]</sup>，波头时间标定不准误差就会非常大。

文献[12]提出了一种利用行波模量传输时间差的测距方法，测距精度得到了提高，但该方法的前提是模量行波波速是固定的，这个假定是否合理还有待论证。文献[13]将模糊算法引入故障测距取得较好的效果。文献[14]提出基于自然频率与人工神经网络相结合的故障定位方法，为直流线路测距提供了新思路，但该方法忽略了线路对端反射波对本侧信号的影响，而作为主要处理模糊和不确定问题的神经网络法能否满足高精度的故障定位要求也有待进一步研究。文献[15-16]分别提出了三色和两色色彩模式的定位法，定位精度较高，但这两种方法也没有从根本上解决波头在时间刻度上的准确标定问题。

直流输电线路发生故障时，故障点产生的高频故障信号将沿线路向两端传播，高频故障信号在电路上传播过程中将发生衰减<sup>[17-20]</sup>。本文分析特高压直流输电线路的频率特性，研究特高压直流输电线路对故障暂态信号高频量的衰减特性；研究基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理，推导出故障点距测距装置安装点的距离公式；研究基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理，推导出故障点距测距装置安装点的距离公式，提出频带衰减概念；建立云广特高压直流输电系统实际参数仿真模型，对基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理进行仿真验证。

## 1 特高压直流输电线路频率特性

### 1.1 特高压直流输电线路参数

输电线路参数是线路电磁特性的集中反映，已知特高压直流输电线路的工程条件：导线几何尺寸、分布与位置、杆塔结构等，就可以计算出线路的相模频变参数，进而计算出该线路的模量特性阻抗，反映输电线路的频率特性<sup>[21]</sup>。本文以云广特高压直流输电线路为例对特高压直流输电线路的频率特性进行研究。

云广特高压直流输电线路的线路结构如图1所示。

云广特高压直流输电线路导线型号为6×LGJ-630/45，导线外径33.6 mm，6分裂，分裂间距450 mm，极间距离22.2 m，塔上悬挂高度33.5 m，弧垂16 m<sup>[22]</sup>。经计算，导线电阻为0.04633 Ω/km，每极自电感L=0.00181 H/km，极间互电感M=0.00099 H/km，每极导体单位长度对地电容为

9.99×10<sup>-9</sup> F/km，每单位长度两极导体间的电容为2.11×10<sup>-9</sup> F/km。

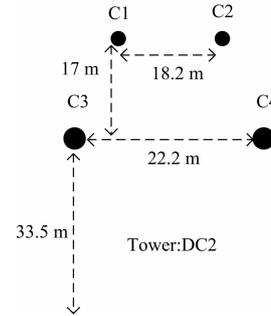


图1 云广特高压直流输电线路的线路结构

Fig. 1 Transmission line configuration of Yunnan-Guangdong UHVDC

### 1.2 特高压直流输电线路频率特性

双极直流输电线路存在两极相互耦合的问题，为消除线路耦合的影响，通常利用模量来进行分析。双极直流输电线路的对称分量变换矩阵为<sup>[23]</sup>

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

而

$$S^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = S \quad (2)$$

线路电压方程

$$-\frac{dU_{\text{对称}}}{dx} = Z_{\text{对称}} I_{\text{对称}} \quad (3)$$

其中

$$Z_{\text{对称}} = S^{-1} \begin{bmatrix} Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_s \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} Z_s + Z_m & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $Z_s$ 为每极导线单位长度的串联自阻抗； $Z_m$ 为单位长度导线的串联互阻抗。

线路电流方程转变为对称分量为

$$-\frac{dI_{\text{对称}}}{dx} = K_{\text{对称}} U_{\text{对称}} \quad (5)$$

其中

$$K_{\text{对称}} = \begin{bmatrix} K_s + K_m & 0 \\ 0 & K_s - K_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $K_s$ 为每极导线单位长度对地以及对另一极导线的电容之和； $K_m$ 为每极导线单位长度对另一极的电容的负值。

长度为 $x$ 的输电线路的传输函数 $A_j$ 为

$$A_j(\omega) = e^{-\gamma_j x} \quad (7)$$

线路第  $j$  个模量 ( $j=0, 1$ ) 的模量特性阻抗 (波阻抗)  $Z_{\text{模}j}$  和模传播系数  $\gamma_j$  分别为

$$Z_{\text{模}j} = \sqrt{\frac{R_{\text{模}j} + j\omega L_{\text{模}j}}{j\omega K_{\text{模}j}}} \quad (8)$$

$$\gamma_j = \sqrt{(R_{\text{模}j} + j\omega L_{\text{模}j}) \times j\omega K_{\text{模}j}} \quad (9)$$

式中,  $R_{\text{模}j}$ 、 $L_{\text{模}j}$ 、 $K_{\text{模}j}$  分别为单位长度线路的模量电阻、模量电感和模量电容。

由线路模传输函数  $A_j(\omega)$  的表达式可知, 其幅频特性随着频率升高而降低, 随着线路的增长而加剧减小, 即: 特高压直流输电系统两极运行时, 特高压直流线路对高频量有衰减作用, 线路越长, 衰减作用越强烈。线路 0 模传输函数的幅频特性与 1 模传输函数的幅频特性相似。本文提取 1 模信号进行分析说明。

## 2 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理

根据特高压直流输电线路的频率特性可知: 特高压直流输电线路对高频量有衰减作用, 线路越长, 衰减作用越强烈, 所以高频量的衰减程度与其通过的直流输电线路长度有密切关系。可见, 在测距装置安装点检测直流输电线路故障时所产生的故障暂态信号高频分量, 研究其通过直流输电线路后的衰减特性, 可以判断故障点故障测距安装点的距离。

基于故障暂态信号高频分量衰减特性的单端故障测距原理如图 2 所示。

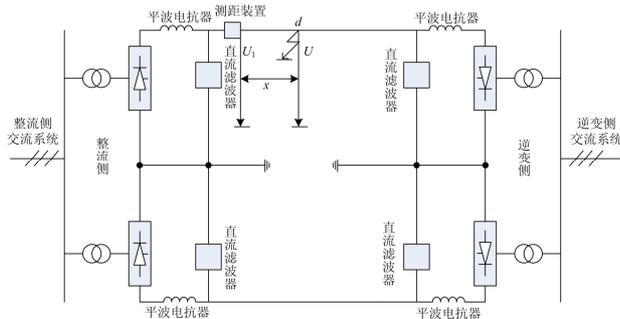


图 2 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理

Fig. 2 Single-ended fault location method of UHVDC transmission line based on high frequency component attenuation characteristic

由图 2 可见, 在测距装置安装点长度为  $x$  的  $d$  点发生直流输电线路故障时,  $d$  点产生的频率为  $f$  的高频暂态电压信号  $U$  沿线路传播至测距装置安装点, 由于直流输电线路对高频量的衰减作用, 该高频暂态电压信号到达测距装置安装点后为  $U_1$ 。根据

输电线路传输函数的定义, 长度为  $x$  的直流输电线路传输函数  $A_j$  为

$$A_j(\omega) = \frac{U_{j1}(j\omega)}{U_j(j\omega)} = e^{-\gamma_j x} \quad (10)$$

式 (10) 中:  $A_j(\omega)$  为长度为  $x$  的直流输电线路模传输函数;  $U_{j1}(j\omega)$  为测距装置安装点检测到的高频分量;  $U_j(j\omega)$  为故障发生点的高频分量;  $\gamma_j$  为模传播系数,  $\gamma_j$  由直流输电线路结构决定;  $x$  为故障发生点距测距装置安装点的长度。

由式 (10) 可以推导出故障距离与高频量衰减特性的关系为

$$e^{-\alpha_j x} = \frac{|U_{j1}(j\omega)|}{|U_j(j\omega)|} \quad (11)$$

$$x = -\frac{1}{\alpha_j} \ln \frac{|U_{j1}(j\omega)|}{|U_j(j\omega)|} = \frac{1}{\alpha_j} \ln \frac{|U_j(j\omega)|}{|U_{j1}(j\omega)|} \quad (12)$$

式 (11)、式 (12) 中:  $x$  为故障发生点距测距装置安装点的距离;  $\alpha_j$  为模传播系数  $\gamma_j$  的实部, 即该模的衰减系数, 由直流输电线路结构决定;  $|U_j(j\omega)|$  为故障发生点高频量的模, 即幅值;  $|U_{j1}(j\omega)|$  为测距装置安装点检测到的高频量的模。

由式 (12) 可见, 对于直流输电线路, 由直流输电线路的结构可以计算出其模衰减系数  $\alpha_j$ , 也可以由实验的方法得到  $\alpha_j$ 。当输电线路区内某点发生故障时, 如能检测到测距装置安装点处  $|U_{j1}(j\omega)|$  和故障点处  $|U_j(j\omega)|$  的值, 根据式 (12) 就能计算出故障发生点距测距装置安装点的距离, 从而实现直流输电线路故障测距。

现实中, 在测距装置安装点检测  $|U_{j1}(j\omega)|$  是可以实现的, 而要检测故障点的  $|U_j(j\omega)|$  则几乎是不可能的。由于故障的多样性, 故障发生点  $|U_j(j\omega)|$  千变万化, 单靠测距装置安装点处的  $|U_{j1}(j\omega)|$  难以判断故障发生点距测距装置安装点的距离。所以, 仅依靠单端测距装置安装点检测到的故障暂态信号高频分量难以实现直流输电线路故障测距。

## 3 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理

由于故障点处  $|U_j(j\omega)|$  难以测量, 基于高频量

衰减特性的直流输电线路单端故障测距难以实现,如果能消除故障发生点的 $|U_j(j\omega)|$ 的影响,就能实现基于高频量衰减特性的直流输电线路故障测距。本文正是从消除故障源信号的影响入手,提出一种特高压直流输电线路双端故障测距方法,其原理如图3所示。

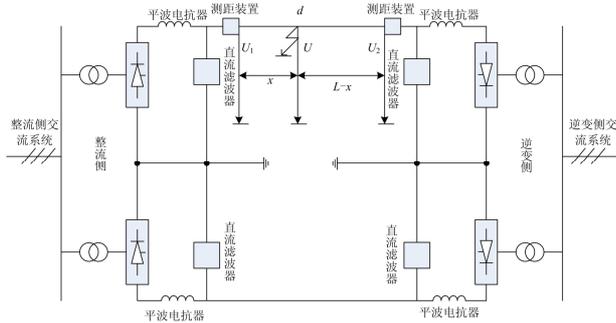


图3 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理

Fig. 3 Double-ended fault location method of UHVDC transmission line based on high frequency component attenuation characteristic

由图3可见,直流输电线路全长为 $L$ ,当距离整流侧测距装置安装点长度为 $x$ 的 $d$ 点发生直流输电线路故障时, $d$ 点产生的频率为 $f$ 的高频电压信号 $U$ ,该高频电压信号沿线路同时向整流侧和逆变侧传播,由于直流输电线路对高频量的衰减作用,高频分量到达整流侧测距装置安装点后为 $U_1$ ,到达逆变侧测距装置安装点后为 $U_2$ 。根据式(11)有

$$e^{-\alpha_j x} = \frac{|U_{j1}(j\omega)|}{|U_j(j\omega)|} \quad (13)$$

$$e^{-\alpha_j(L-x)} = \frac{|U_{j2}(j\omega)|}{|U_j(j\omega)|} \quad (14)$$

由式(13)除以式(14)有

$$e^{\alpha_j(L-2x)} = \frac{|U_{j1}(j\omega)|}{|U_{j2}(j\omega)|} \quad (15)$$

由式(15)可以得到故障发生点距离整流侧测距装置安装点的距离为

$$x = \frac{1}{2} \left( L - \frac{1}{\alpha_j} \ln \frac{|U_{j1}(j\omega)|}{|U_{j2}(j\omega)|} \right) \quad (16)$$

由式(16)可见,对于直流输电线路,根据直流输电线路的结构计算或由实验的方法得到其模衰减系数 $\alpha_j$ , $\alpha_j$ 与频率有关。对于特定的直流输电

系统,某频率的 $\alpha_j$ 是定值。

当输电线路区内某点发生故障时,检测到整流侧测距装置安装点高频分量的 $|U_{j1}(j\omega)|$ 和到达逆变侧测距装置安装点高频分量的 $|U_{j2}(j\omega)|$ ,理论上利用式(16)在完全消除故障源信号的影响下,就能计算出故障发生点距离整流侧测距装置安装点的距离,从而达到故障测距的目的。但是提取非平稳的暂态信号中某单一频率分量的幅值是有难度的。

由直流输电线路传输函数的幅频特性可知道,当频率达到一定的值时,传输函数的幅值基本不变,即可以认为对于高频量,直流输电线路的模衰减系数 $\alpha_j$ 是不变的,高频量的衰减主要由直流输电线路结构和直流线路长度决定,因此可利用某一频带范围内高频量的平均值来代替某一高频量,从而减小误差。为此提出频带衰减和频带衰减系数的概念,对检测到的信号实行小波变换可得到信号中的高频段小波首波头系数的模极大值,小波系数大小反映的是某频段信号的强度,高频段小波系数首波头模极大值则正好反映故障初始时刻高频量的强度,故用高频段小波首波头模极大值代替高频信号是合理的,则式(16)改写为

$$x = \frac{1}{2} \left( L - \frac{1}{\alpha_j} \ln \frac{\text{Fir} |d_1(U_{j1}(j\omega))|}{\text{Fir} |d_1(U_{j2}(j\omega))|} \right) \quad (17)$$

式(17)中: $x$ 为故障点距离整流侧测距装置安装点的距离; $L$ 为直流输电线路全长; $\alpha_j$ 为某一频带范围内直流输电线路衰减系数,定义为频带衰减系数; $\text{Fir} |d_1(U_{j1}(j\omega))|$ 为整流侧测距装置检测到的1模故障信号一层高频小波系数首波头模极大值; $\text{Fir} |d_1(U_{j2}(j\omega))|$ 为逆变侧测距装置检测到的1模故障信号一层高频小波系数首波头模极大值。

#### 4 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理仿真

以云广特高压直流输电系统双极运行为例,建立云广特高压直流输电系统实际参数仿真模型,对本文所提出的基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理进行仿真验证。

对云广特高压直流输电线路400 km、950 km、1 000 km发生接地故障进行仿真,采样率为200 kHz,对整流侧和逆变侧测距装置安装点检测到的1模暂态电压信号进行小波变换,得到一层高频小波

系数首波头模极大值(频带范围为 50~100 kHz), 真试验, 利用式(17)计算故障距离结果见表 1。变换故障极以及改变过渡电阻的大小, 进行大量仿

表 1 故障测距结果

Table 1 Results of fault distance measurement

设置故障距离/km	过渡电阻/ $\Omega$	故障极	整流侧首波头模极大值	逆变侧压首波头模极大值	计算故障距离/km	误差率/%
400	1	负	230.8	160.2	392.139 574 6	1.965 11
	10	正	218.3	151.6	392.576 696 5	1.855 83
	50	负	177.8	123.7	394.160 221 2	1.459 94
	100	正	143.7	100.1	395.237 980 5	1.190 50
	500	负	57.21	39.83	394.760 510 4	1.309 87
950	1	负	154	203.9	952.573 036 5	-0.270 85
	10	正	145.6	192.7	952.221 023 8	-0.233 79
	50	负	118.8	157	950.947 917 8	-0.099 78
	100	正	96.02	126.7	949.612 526 7	0.040 79
	500	负	38	50.07	948.371 810 3	0.171 39
1000	1	负	141.6	199.7	1007.360 171	-0.736 02
	10	正	133.9	188.7	1006.713 778	-0.671 38
	50	负	109.4	153.6	1003.481 838	-0.348 18
	100	正	88.54	123.9	1000.600 23	-0.060 02
	500	负	35.26	48.98	994.215 364 6	0.578 46

由表 1 可见, 在不同故障条件下, 测距结果误差最大不超过 2%。因此, 本文所提出的基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理具有较高的精确性, 是一种可行的特高压直流输电线路故障测距原理。

## 5 结论

本文分析特高压直流输电线路频率特性, 研究特高压直流输电线路长度与故障暂态信号高频量衰减程度的关系, 提出基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路故障测距原理, 得到如下结论:

a) 特高压直流线路对高频量有衰减作用, 线路越长, 衰减作用越强烈, 研究高频量通过直流输电线路后的衰减特性, 可以判断故障点故障测距安装点的距离;

b) 由于故障的多样性, 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路单端故障测距原理仅依靠单端测距装置安装点检测到的故障暂态信号高频分量, 难以实现特高压直流输电线路故障测距;

c) 基于高频量衰减特性的特高压直流输电线路双端故障测距原理消除了故障类型及故障强度对故障测距准确度的影响, 能准确实现直流输电线路故障测距。

## 参考文献

[1] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障

测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.

MA Dan-dan, WANG Xiao-ru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.

[2] 李强, 王银乐. 高压输电线路的测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 192-197.

LI Qiang, WANG Yin-le. Fault location methods for high voltage power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 192-197.

[3] 余畅, 尹项根, 曾祥君, 等. 基于小波分析的多尺度下综合行波故障定位[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(6): 6-9.

YU Chang, YIN Xiang-gen, ZENG Xiang-jun, et al. Fault location based on comprehensive wavelet analysis at different scales[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(6): 6-9.

[4] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.

JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2012, 27(8): 172-178.
- [5] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
- XU Min, CAI Ze-xiang, LIU Yong-hao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [6] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 69-75.
- WU Lin-yong, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A single ended fault location method using travelling wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-75.
- [7] 王宾, 董新洲, 薄志谦, 等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25-29.
- WANG Bin, DONG Xin-zhou, BO Zhi-qian, et al. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25-29.
- [8] 陈平, 徐丙垠, 李京, 等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 66-69.
- CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [9] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 98-103.
- WU Lin-yong, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. A frequency domain approach to single-ended traveling wave fault location[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 98-103.
- [10] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 高压输电线路单端测距新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 42-49.
- HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. A novel principle of single ended line fault location technique for EHV transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 42-49.
- [11] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
- ZHENG Zhou, Lü Yan-ping, WANG Jie, et al. A new two-terminal traveling wave fault location based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [12] 张帆, 潘贞存, 马琳琳, 等. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 78-83.
- ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, MA Lin-lin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 78-83.
- [13] 鲁文, 徐晨亮, 丁孝华, 等. 一种考虑分布电容的模糊故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 57-60.
- LU Wen, XU Chen-liang, DING Xiao-hua, et al. Fuzzy algorithm for fault location with the distributed capacitor taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 57-60.
- [14] 束洪春, 田鑫翠, 张广斌, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路故障定位的单端电压自然频率方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 104-111.
- SHU Hong-chun, TIAN Xin-cui, ZHANG Guang-bin, et al. Fault location for  $\pm 800$  kV HVDC transmission lines using natural frequency of single terminal voltage data[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 104-111.
- [15] EVRENOSOGLU C Y, ABUR A, AKLEMAN E, et al. Bewley diagrams revisited via visualization[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1401-1407.
- [16] 束洪春, 张敏, 张广斌, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路单端行波故障定位的红绿色彩模式检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 155-163.
- SHU Hong-chun, ZHANG Min, ZHANG Guang-bin, et al. A RG color pattern detection of single-ended travelling wave fault location on  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 155-163.
- [17] 王钢, 李志铿, 李海锋.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 40-43.
- WANG Gang, LI Zhi-keng, LI Hai-feng. Transient based protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 40-43.
- [18] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.

- ZHANG Bao-hui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient based protection for HVDC line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [19] 哈恒旭, 于洋, 张旭光, 等. 考虑频率相关参数的直流输电线路故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 70-75.
- HA Heng-xu, YU Yang, ZHANG Xu-guang, et al. Frequency characteristics of fault transients for HVDC transmission line with frequency-dependent distributed parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 70-75.
- [20] 张怿宁, 徐敏, 刘永浩, 等. 考虑波速变化特性的直流输电线路行波故障测距新算法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 227-232.
- ZHANG Yi-ning, XU Min, LIU Yong-hao, et al. A novel travelling wave fault location algorithm for HVDC transmission lines considering variation characteristics of wave speed[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 227-232.
- [21] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43.
- DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, REN Jin-feng, et al. Single ended transient based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43.
- [22] 中国南方电网公司.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [23] 施围, 郭洁. 电力系统过电压计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 
- 收稿日期: 2013-10-31; 修回日期: 2014-01-17
- 作者简介:
- 陈仕龙(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高压直流输电方面的研究; E-mail: chenshilong3@126.com
- 张杰(1988-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统分析与控制方面的研究。