

DOI: 10.7667/PSPC171104

# 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法

李自乾<sup>1,2</sup>, 樊艳芳<sup>1</sup>, 胡剑生<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网甘肃电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000;  
3. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 现行特高压直流输电线路故障测距大多采用行波法, 但单端/双端行波测距受行波波速影响较大, 加上输电线路弧垂效应, 测距精度较差。利用对端行波到达本端测距装置的时刻, 通过公式推导消除行波波速的影响, 推导出一种不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障行波测距方法, 将无需准确计算线路沿线波速也能实现直流输电线路故障测距。在 PSCAD/EMTDC 中搭建哈郑±800 kV 特高压直流输电系统模型, 在不同故障位置和不同过渡电阻下进行仿真。大量仿真结果表明, 该改进单端测距方法不受输电线路沿线波速和故障位置影响且耐受过渡电阻能力强。

**关键词:** 特高压直流输电线路; 单端故障测距; 行波波速

## Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed

LI Ziqian<sup>1,2</sup>, FAN Yanfang<sup>1</sup>, HU Jiansheng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Pingliang Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Pingliang 744000, China; 3. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The current UHVDC transmission lines mainly adopt traveling wave fault location method, but the single/double terminal traveling wave fault location is affected by the velocity and the transmission line sag effect, thereby such fault location has low accuracy. Based on the moment of the opposite terminal traveling wave arriving at the measuring terminal of location device, the influence of traveling wave velocity is eliminated through the formula derivation and single terminal fault location method for UHVDC transmission line is deduced which is not affected by wave velocity and can realize fault location without accurately calculating the velocity along the line. The model of Ha-Zheng ±800 kV UHVDC transmission system is built in PSCAD/EMTDC and simulated under different fault locations and different transition resistances. A large number of simulation results show that the improved single terminal ranging method is not affected by the wave speed along the transmission line and the location of the fault, and has the strong ability to tolerate transient resistance.

This work is supported by Joint Natural Science Foundation of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2017D01C028).

**Key words:** UHVDC transmission line; single ended fault location; wave velocity of traveling wave

## 0 引言

我国发电资源与用电负荷之间呈逆向分布, 决定了我国“西电东送”的能源政策。特高压直流输电以其在远距离大容量输电方面特有的优势形成了“强直弱交”的发展趋势。特高压直流输电线路长、途径多雷区、线路故障多, 据统计, 特高压直流输

电线路故障约占整个直流输电系统故障的 50%以上, 为减小巡线工作量和提高巡线精度, 研究特高压直流输电线路故障定位显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。

现阶段的直流输电线路故障定位主要分为两大类: 故障分析法和行波法<sup>[4]</sup>。故障分析法是在线路故障时根据系统结构和参数, 利用单端或双端故障电气量求取直流线路故障距离, 计算复杂且实际线路参数存在困难, 测距精度不高。行波测距则是通过提取故障行波在故障发生点和测距装置处之间来回反射的时间, 或提取故障行波初始波头传播到达

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金联合项目资助 (2017D01C028)

两端测距装置处的时间, 利用时间差进行测距的算法<sup>[5-7]</sup>, 受制于直流输电线路波速影响和弧垂效应的影响较大<sup>[8-9]</sup>。文献[10]采用人工神经网络的方法来拟合逼近故障特征量与故障距离之间的非线性关系, 提出基于人工神经网络的故障特征量测距算法, 该种算法要求有大量训练集样本以保证测距精度。利用暂态故障信息固有频率进行测距也较为新颖, 但测距精度受限于固有频率的准确获取<sup>[11-15]</sup>。

本文通过对特高压直流输电线路传统单端行波测距算法的改进, 推导出一种不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法。改进的测距方法无需获取输电线路实际参数, 不用考虑输电线路沿线波速度, 只需获取故障时故障电压初始行波、故障点电压反射波和对端母线电压反射波到达测距装置处的时间即可实现准确测距。通过搭建哈郑±800 kV 特高压直流输电系统模型, 进行算法验证, 该测距方法理论上不受故障距离、过渡电阻采样频率和及线路模型的影响, 只需准确识别出故障行波模极大值即可实现较高的定位精度。

## 1 传统特高压直流输电线路单端测距算法

### 1.1 特高压直流输电系统结构

图1所示即为特高直流输电系拓扑图。其中M端为整流侧系统, N端为逆变侧系统。特高压直流输电系统主要由整流侧交流系统、换流变压器、交流滤波器、直流滤波器、无功补偿装置、整流器、直流输电线路、逆变器和逆变侧交流系统等组成。图中1~6分别代表换流变压器、交流滤波器、双十二脉动换流器、平波电抗器、直流滤波器、直流输电线路。

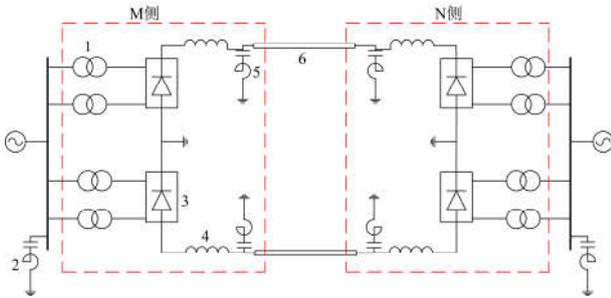


图1 特高压直流输电系统拓扑图

Fig. 1 Topological diagram of UHVDC transmission system

### 1.2 传统单端故障测距原理

图2所示即为特高压直流输电线路传统单端暂态行波故障测距方法故障行波传播网格图, 波速  $v$  为恒定值( $v$  取光速),  $L$  为直流线路全长,  $x$  为故障发生点  $F$  距  $M$  端测距装置距离, 直流线路故障发生

的绝对时刻为  $t_0$ , 初始行波波头首次到达  $M$  端测距装置的时间为  $t_1$ , 故障点反射波到达  $M$  端测距装置的时刻为  $t_2$ , 由图2可列得方程组(1)。

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x \\ v(t_2 - t_0) = 3x \end{cases} \quad (1)$$

求解得到:

$$x = \frac{v(t_2 - t_1)}{2} \quad (2)$$

式(2)即为特高压直流输电线路传统单端行波测距算法, 不仅与初始行波与故障发生点反射波首次到达测距装置处的时间差有关, 还与直流线路上行波波速有很大的关系。实际工程应用中把波速当成一个接近光速  $c$  的值来处理<sup>[16]</sup>。国内外现有直直流线路行波测距中, 波速取值约为  $0.936c \sim 0.987c$ , 波速误差为  $0.013c \sim 0.064c$ , 这对于超长距离的特高压直流输电线路而言误差是极大的<sup>[17]</sup>。

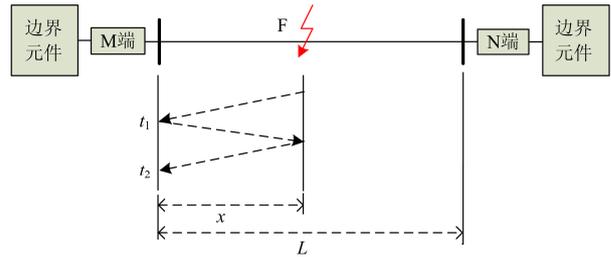


图2 单端暂态行波故障测距方法原理网格图

Fig. 2 Schematic diagram of single ended transient traveling wave fault location method

$$v = \frac{c\omega}{\sqrt{\omega^2 + \left[ \frac{R_m/L_m - G_m/C_m}{2} \right]^2}} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $R_m$  为各模分量的单位长度电阻;  $L_m$  为各模分量的单位长度电感;  $G_m$  为各模分量的单位长度电导;  $C_m$  为各模分量的单位长度电容。

式(3)即为特高压直流输电线路的行波波速表达式。实际直流输电线路的行波波速和线路实际参数是频率相关的, 直流线路行波波速是由角频率和单位长度电阻、电感、电导、电容共同决定的。

特高压直流输电线路沿途地形复杂, 测量其单位参数有一定困难, 且在不同时间段, 对同一输电线路而言, 其参数也是略有不同的<sup>[18]</sup>, 因此选择准确又合适的特高压直流输电线路波速有一定难度。同时特高压直流输电线路输电距离远, 在线路架设过程中弧垂效应明显, 此时若继续选用传统行波测距将带来更大的误差。行波波速对测距结果的影响, 表现为测距结果与波速呈正比关系。可见行波波速

对特高压直流输电线路的测距结果不容忽视。

## 2 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法

### 2.1 近端故障

以 M 端测距装置处为准, 当距离 M 端测距装置处发生故障且故障距离小于直流输电线路全长二分之一时, 画出对应的故障行波传播网格图。

从图 3 中可以看出, 当特高压直流输电线路某极线路 F 点发生接地故障时, 将会由故障点向两侧测距装置传递故障行波, 根据行波传播特点, 行波遇到阻抗不连续处<sup>[19]</sup>, 将会产生折射和反射现象, 且特高压直流输电系统两侧的直流滤波器和电抗器构成的“边界元件”折射率近乎为 1<sup>[20-21]</sup>。

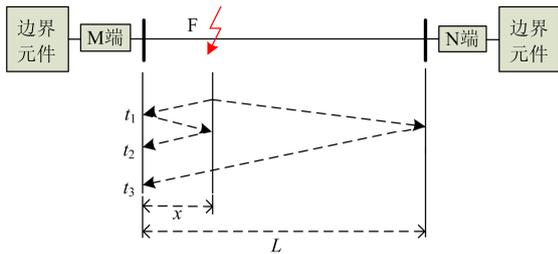


图 3 近端故障行波传播网格图

Fig. 3 Near-terminal fault traveling wave

式(2)利用直流线路故障时故障初始行波和故障点反射行波波头首次到达测距装置处之间的时间差, 进行直流线路测距。当故障发生点 F 距离 M 端测距装置大于线路全长 L 的二分之一时, 第二个到达 M 端测距装置的是对端直流母线的故障反射波。若利用该波头进行故障测距, 将得到故障点 F 至对端测距装置处之间的距离。特高压直流输电线路传统单端行波故障测距须对第二个波头极性进行判断, 若为对端直流母线反射波, 则将其丢弃, 采用第三个波头进行计算。

由对端直流母线反射的故障行波也含有大量故障信息, 可将其也纳入特高压直流输电线路单端行波故障测距算法中进行故障测距:

$$x = 2L - v(t_3 - t_0) \quad (4)$$

设线路全长为 L, 故障点 F 距 M 端距离为 x(0 ≤ x ≤ L/2), 本文忽略直流输电线路的弧垂效应。并记 t<sub>0</sub> 为故障发生的绝对时刻, t<sub>1</sub> 为故障初始行波首次到达 M 端测距装置的时刻, t<sub>2</sub> 为故障点反射行波首次到达 M 端测距装置的时刻, t<sub>3</sub> 为对端母线反射行波首次到达 M 端测距装置的时刻, 联立方程:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x \\ v(t_2 - t_0) = 3x \\ v(t_3 - t_0) = 2L - x \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)一式和二式相比可得:

$$\frac{t_1 - t_0}{t_2 - t_0} = \frac{1}{3} \quad (6)$$

$$t_0 = \frac{3t_1 - t_2}{2} \quad (7)$$

将(5)二式和(7)代入式(8)可得:

$$\frac{t_2 - t_0}{t_3 - t_0} = \frac{3x}{2L - x} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)

$$\frac{t_2 - \frac{3t_1 - t_2}{2}}{t_3 - \frac{3t_1 - t_2}{2}} = \frac{3x}{2L - x} \quad (9)$$

由式(9)可求出直流线路故障信息:

$$x = \frac{(t_2 - t_1)L}{(t_3 - 2t_1 + t_2)} \quad (10)$$

式(10)即为改进的不受波速影响特高压直流输电线路单端测距算法, 故障距离 x 与输电线路波速 v 无关, 测距结果不受波速的影响, 只与故障行波三个突变点时刻 t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>、t<sub>3</sub> 有关。式中 t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>、t<sub>3</sub> 可通过特高压直流输电系统两端测距装置处测得的故障数据, 经小波模极大值变换方法确定, 为已知量, 线路长度 L 也是已知量, 则方程中共有 v、t<sub>0</sub> 和 x 三个未知量, 因此可得唯一解。

### 2.2 远端故障

设直流线路全长为 L, 故障发生点 F 距 M 端测距装置距离为 x(L/2 ≤ x ≤ L), 根据图 4 所示行波传播网格图亦可列出式(5), 推导过程同 2.1 节一致, 可同样得出故障测距信息式(10)。

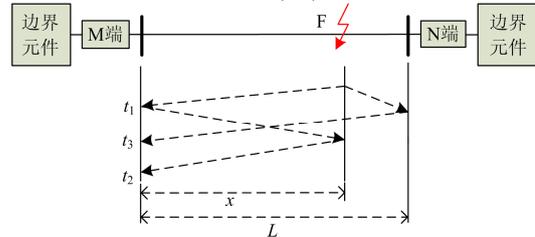


图 4 远端故障行波传播网格图

Fig. 4 Remote-terminal fault traveling wave

但需注意, 此时在 M 端测距装置处测得的故障电压行波第二个突变点将不再是故障点反射波而是来自对端直流母线反射波, 但并不影响改进测距算法的应用。

### 3 仿真分析

本文参照哈郑±800 kV 特高压直流输电工程主接线及其参数,在电磁仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建其仿真模型。哈郑直流系统电压等级为±800 kV,直流额定电流 5 kA,额定输送功率 8 000 MW,直流输电线路全长 2 192 km,沿线大地电阻率平均值为 1 000 Ω·m,采用 6×LGL—630/45 导线,采用 Bergeron Model Options 模型。输电线路参数如下:

$$R_1=3.576e-3 \text{ } \Omega/\text{km}, R_0=0.363 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_{L1}=0.578 \text{ } \Omega/\text{km}, X_{L0}=1.323 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_{C1}=3.058e5 \text{ } \Omega/\text{km}, X_{C0}=4.306e5 \text{ } \Omega/\text{km}$$

特高压直流输电线路控制系统采用国际大电网会议 CIGRE 标准测试模型的控制方式,即整流侧采用定电流控制和定最小触发角控制。逆变侧配有定电流控制和定关断角控制,同时配有电流偏差控制(Current Error Controller, CEC)。且两侧皆配有低压限流环节(Voltage Dependent Current Order Limit, VDCOL)。图 5 所示即为哈郑±800 kV 特高压直流输电工程双极正常运行情况下整流侧正负极线路电压/电流信息波形图,与 CIGRE 提供的标准测试模型稳态和暂态仿真结果基本一致,验证所搭建模型的有效性。图中 IR1、IR2、VR1、VR2 分别代表整流侧正负极电压电流信息。

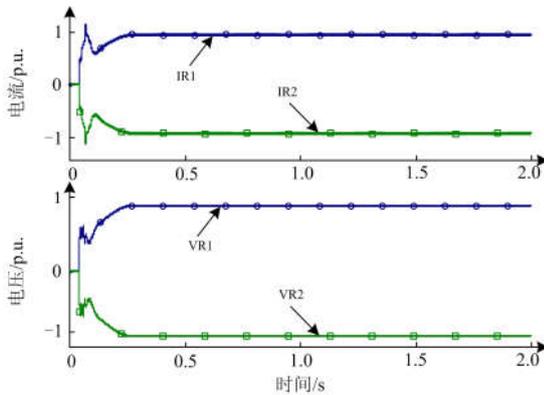


图 5 正常运行时整流侧正负极电压电流

Fig. 5 Positive and negative voltage and current at rectifier side when operating normally

#### 3.1 不同故障距离

直流线路全长  $L=2\ 192\ \text{km}$ ,以整流侧 M 端测距装置处为准,选正极线路每隔 300 km 设置非金属接地故障,过渡电阻为  $1\ \Omega$ ,如图 6 所示通过 M 端测距装置采集到故障电压信息,利用小波模极大值法辨识故障后故障电压行波的突变点,提取故障

行波首次到达 M 端测距装置的时间  $t_1$ 、反射波首次到达 M 端测距装置的时间  $t_2$  和对端直流测距装置故障行波反射波首次到达 M 端测距装置的时间  $t_3$ ,代入式(10)计算得距 M 端测距装置的故障距离。故障时整流侧正极线路局部电压行波如图 7 所示。

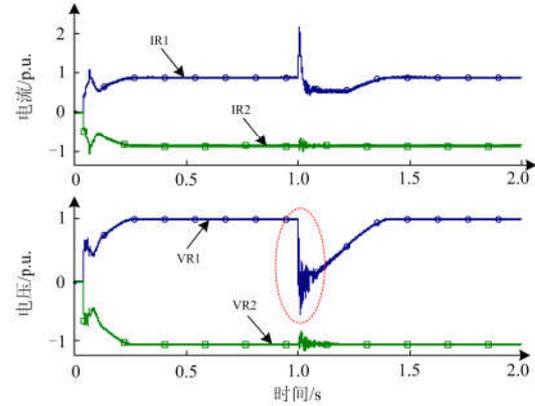


图 6 正极接地故障时整流侧正负极电压电流

Fig. 6 Positive and negative pole voltage and current at rectifier side when positive grounding fault

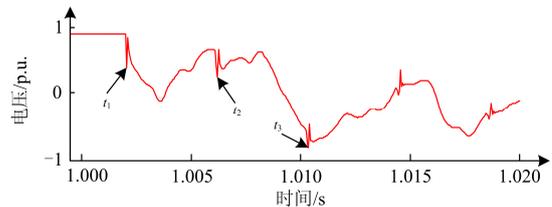


图 7 故障时整流侧正极线路局部电压行波

Fig. 7 Local voltage traveling wave at positive side of rectifier at fault

表 1 过渡电阻为  $1\ \Omega$  时不同故障距离的测距结果

Table 1 Range results of different transition resistances when transient fault is  $1\ \Omega$

$d/\text{km}$	$t_1/\text{s}$	$t_2/\text{s}$	$t_3/\text{s}$	$x/\text{km}$	$\varepsilon/\%$
300	1.001 25	1.002 75	1.010 75	298.909 090 9	-0.36
600	1.002 35	1.007 30	1.015 55	597.818 181 8	-0.36
900	1.003 55	1.011 20	1.014 50	901.548 387 1	0.17
1200	1.007 55	1.014 95	1.013 65	1 201.54074 1	0.13
1500	1.004 30	1.019 10	1.011 15	1 498.45727 5	-0.10
1800	1.007 65	1.034 45	1.013 40	1 804.78033 8	0.27
2100	1.009 65	1.036 20	1.010 75	2 104.7956 6	0.23

注:  $d$  为实际故障距离;  $x$  为测距结果;  $\varepsilon$  为相对误差百分数,表 2 同。

特高压直流输电线路故障行波是由一系列高、低频谐波构成,具有明显的突变性和奇异性,而小波变换信号突变点具有较好的检测能力,小波变换的模极大值点与暂态信号的突变点对应,可用来检

测故障行波的极性和时刻。文献[22]指出, SWT 平稳小波分解适合消噪, 模极大值分析等。对 M 侧测距装置处测得的故障电压行波 VR1 进行平稳小波 6 层变化, 长度仍与原信号长度相同。小波基函数选用二次中心 B 样条函数。图 8、图 9 分别为故障电压行波经 B2 样条小波分析的第 1、2 尺度分解结果图及其模极大值图。

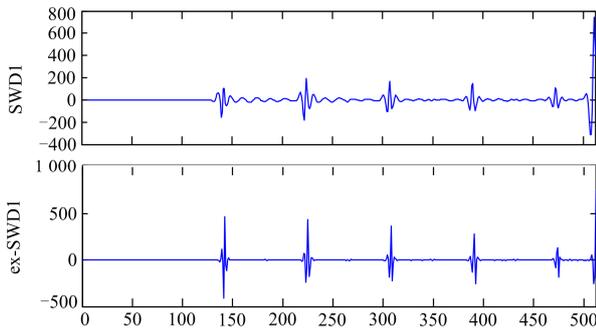


图 8 第 1 尺度分解及模极大值

Fig. 8 First scale decomposition and modulus maxima

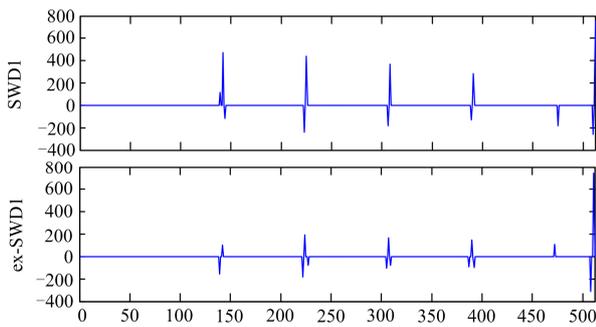


图 9 第 2 尺度分解及模极大值

Fig. 9 Second scale decomposition and modulus maxima

通过小波分析过后的第 1、2 尺度分解图及其模极大值图可以准确、快速地获取故障电压行波的三个突变点时刻, 代入式(10)可得到不受波速影响的特高压直流输电线路测距结果。

### 3.2 不同过渡电阻

为验证该改进单端测距算法的耐过渡电阻能力, 在正极线路距 M 端测距装置 1 000 km 处设置不同过渡电阻  $R=0 \Omega$ 、 $10 \Omega$ 、 $50 \Omega$ 、 $200 \Omega$ 、 $500 \Omega$ , 获得三个时间点代入式(10)验证改进单端测距算法的测距精度。

由表 2 测距结果可知, 改进单端侧测距算法基本不受过渡电阻的影响, 只与故障发生后, M 端测距装置处所测得初始行波、故障点反射波和对端母线反射波突变点有关。测距误差基本控制在  $\pm 0.5\%$  之内, 测距精度较高, 极大程度上减小了直流线路

故障时巡线工作量。

表 2 故障位置 1 000 km 时不同过渡电阻的测距结果

Table 2 Range results of different transition resistances when fault location is 1 000 km

$R/\Omega$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$x/km$	$\epsilon/\%$
0	1.003 95	1.012 75	1.014 40	1 002.057 143	0.15
10	1.003 95	1.014 80	1.016 95	997.199 161 4	-0.20
50	1.004 05	1.014 95	1.017 00	1 001.794 549	0.13
200	1.003 95	1.012 30	1.013 95	997.449 591 3	-0.18
500	1.003 95	1.014 35	1.016 30	1 002.057 143	0.15

## 4 结论

通过传统单端行波传播网格图, 合理利用对端故障信息, 列出对应的方程组, 消去波速的影响, 推导出不受输电线路波速影响的特高压直流输电线路单端测距算法, 通过建立哈郑士 800 kV 特高压直流输电系统进行仿真验证, 得到以下结论:

(1) 直流输电线路故障时, 故障点会向两端产生故障行波, 行波受两端“边界元件”的影响将发生全反射, 故障点所处位置不同, 由一端测距装置获得的波头信息不同。

(2) 沿线不同位置设置同一故障(单极非金属故障, 相同过渡电阻), 通过表 1 可知, 该改进算法对特高压直流输电线路具有很好的测距精度, 不受故障位置的影响。

(3) 在特高压直流线路同一位置设置不同过渡电阻单极接地故障, 由表 2 可知, 该改进算法对特高压直流输电线路具有良好的耐过渡电阻能力。

本文提出的改进不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法的有效性和准确性已通过理论推导和仿真验证, 作者希望在后续的研究中, 利用动模实验对该原理进行更深层次的研究。

## 参考文献

[1] 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 model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.

[2] 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.
- [3] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.  
HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.
- [4] 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, 147.  
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, 147.
- [5] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.  
LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [6] 康丽红, 唐昆明, 罗建, 等. 直流输电线路单极接地双端故障测距[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2268-2273.  
KANG Lihong, TANG Kunming, LUO Jian, et al. Two-terminal fault location of monopolar earth fault in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2268-2273.
- [7] 蔡新雷. 柔性直流输电线路双端故障定位新方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 24-28.  
CAI Xinlei. A new method of fault-location for VSC-HVDC transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 24-28.
- [8] 张恽宁, 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 Yining, XU Min, LIU Yonghao, 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.
- [9] 商立群, 梁文丽. 高压直流输电线路故障定位综述[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 1-6.  
SHANG Liqun, LIANG Wenli. Review of high voltage DC transmission lines fault location[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 1-6.
- [10] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.  
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [11] 杨立红, 杨明玉. 基于固有频率的高压直流输电线路故障测距[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 82-86.  
YANG Lihong, YANG Mingyu. Fault-location method for HVDC transmission lines based on natural frequency[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 82-86.
- [12] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.  
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [13] 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.
- [14] 束洪春, 田鑫萃, 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 Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, 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] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等.  $\pm 800$  kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al.  $\pm 800$  kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.
- [16] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.

- GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.
- [17] BO Z Q, WELLER G, JIANG F, et al. Application of GPS based fault location scheme for distribution system[C] // 1998 International Conference on Power System Technology Proceedings, August 18-21, 1998, Beijing, China: 53-57.
- [18] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [19] 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 Hongchun, ZHANG Min, ZHANG Guangbin, et al. A RG color pattern detection of single-ended traveling wave fault location on  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 155-163.
- [20] 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.
- [21] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.
- XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39.
- [22] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路故障定位小波能量谱神经网络识别法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 141-147, 154.
- LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 141-147, 154.

收稿日期: 2017-07-24; 修回日期: 2017-09-01

作者简介:

李自乾(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电线路保护与测距; E-mail: 1142217665@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究。E-mail: 410849062@qq.com

胡剑生(1979—), 男, 工程师, 研究方向为新能源发电系统控制及嵌入式技术。

(编辑 葛艳娜)