基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距

李 斌,张纪航,刘海金,李 晔 (天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:为了克服行波测距原理耐受过渡电阻能力较弱以及所需采样率过高的缺陷,提出了一种基于波形相似 度分析的直流输电线路故障测距方法。基于正向、反向差电流与故障点电流的函数关系,利用 Pearson 相关 系数分析2种差电流波形相似性并提取故障位置的相关信息。所提方法利用线路两端电压、电流的时域信 息,受过渡电阻影响较小,具备较强的抗噪声能力,可靠性高。经过 PSCAD / EMTDC 仿真验证,所提方法能 够实现线路全长的准确故障定位。

DOI:10.16081 / j.epae.201909001

0 引言

高压直流输电HVDC(High Voltage Direct Current)技术具有传输容量大、传输距离远、控制快速灵 活、线路造价低等优点,在我国远距离、大容量输电 和异步联网中占有越来越重要的地位^[1]。由于高压 直流输电线路距离长,往往需穿过各类复杂地形并 且运行在各种极端恶劣的气候条件下,所以线路故 障不可避免。因此,及时地查找和清除直流输电线 路故障点是发展高压直流输电系统面临的一个重大 问题。

目前,直流输电线路的故障测距方法主要可以 分为行波法和故障分析法^[2]2类。近年来,有许多针 对行波测距方法的研究,主要都是围绕如何准确标 定行波波头展开的,如小波变换、希尔伯特--黄变换、 形态学等信号处理手段和数学方法均在直流线路故 障行波波头的提取中得到应用^[3-6]。事实上,行波测 距原理本身存在一些固有的技术难题:①行波定位 的基础是行波波头检测,而当线路发生高阻接地故 障时,行波信号微弱,很可能无法准确识别行波波 头;②行波在输电线路上的传播速度接近光速,准确 标定行波波头的到达时刻对故障测距装置的采样率 提出了极高的要求。

故障分析法通过分析计算电力系统发生故障后 的某些特征进行故障测距^[7-11]。文献[7]分析了行波 自然频率与故障点和线路始端之间反射的关系,提 出了一种单端故障测距方案。文献[8]在文献[7]的 基础上,通过引入人工神经网络提高了故障测距精 度。文献[9]将机器学习运用到故障测距中,但需要 大量的学习样本数据。文献[10]在交流系统中利用

收稿日期:2018-11-28;修回日期:2019-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677126)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677126) 不同模量的行波差动流之间的相角差异构造了故障 测距判据,由于该方法需要用到输电线路发生故障 后的零模分量,所以只适用于输电线路接地故障情 况下的故障测距。文献[11]提出了基于线路的贝瑞 隆模型,并提出了一种基于故障点处电压差值最小 的故障测距方法,但是在发生高阻故障时,电压跌落 并不明显,故障点附近的电压差值都很小,电压差值 的区分不明显,若再考虑电力系统测量采样环节引 入的误差等,利用电压差法可能无法进行正确的故 障测距。为此,本文根据2种差电流与故障点电流 的函数关系,提出一种基于波形相似度分析的故障 测距方法,该方法适用于各类故障类型,受过渡电阻 影响小,且具有较好的抗噪声干扰能力,可靠性高。

1 基于波形相似度分析的故障测距机理

图 1 为无损均匀传输线示意图。图中, JK 为长 度为 l 的单根无损均匀传输线。L 和 C 分别为传输线 单位长度的电感和电容,则输电线路的波阻抗 $Z_{c} = \sqrt{L/C}$,波速 $v = 1/\sqrt{LC}$,线路的传播延时 $\tau = l/v$ 。





定义线路两端电流的正方向为母线流向线路, 行波的正方向为J端指向K端,则线路两端电流行 波为:

$$\begin{cases} i_{j}^{*}(t) = \frac{u_{j}(t)}{Z_{c}} + i_{j}(t) \\ i_{j}^{-}(t) = \frac{u_{j}(t)}{Z_{c}} - i_{j}(t) \end{cases}, \begin{cases} i_{K}^{*}(t) = \frac{u_{K}(t)}{Z_{c}} - i_{K}(t) \\ i_{K}^{-}(t) = \frac{u_{K}(t)}{Z_{c}} + i_{K}(t) \end{cases}$$
(1)

其中, $i_{J}(t)$ 、 $i_{I}(t)$ 分别为J端的正、反向电流行波; $i_{K}^{*}(t)$ 、 $i_{K}(t)$ 分别为K端的正、反向电流行波; $u_{J}(t)$ 、 $i_{J}(t)$ 分别为J端的电压、电流; $u_{K}(t)$ 、 $i_{K}(t)$ 分别为K端的电压、电流。

如图1所示,当输电线路内部点 F 发生故障时, 线路被故障点 F 划分为2段新的传输线 JF 和 FK,长 度分别为 l_{J} 和 l_{κ} ,则 τ_{J} 和 τ_{κ} 分别为故障点 F两侧线路 的传播延时。定义 $\Delta \tau$ 为行波在故障点两侧的传播 时间差并考虑各类故障位置情况,存在如下关系:

$$\begin{cases} \Delta \tau = \tau_J - \tau_K \\ \Delta \tau \in (-\tau, \tau) \end{cases}$$
(2)

结合τ、Δτ与故障点位置和波速的关系,得到线路J端到故障点F距离的计算式为:

$$l_{JF} = \frac{\tau + \Delta \tau}{2} v \tag{3}$$

式(3)正是双端法行波测距的理论基础^[12]。定 义输电线路的正、反向差电流为:

$$\begin{cases} \mathrm{d}i^{+}(t) = i_{J}^{+}(t-\tau) - i_{K}^{+}(t) \\ \mathrm{d}i^{-}(t) = i_{K}^{-}(t-\tau) - i_{J}^{-}(t) \end{cases}$$
(4)

发生故障后,2种差电流与故障电流存在式(5) 所示关系^[13]:

$$\begin{cases} \operatorname{di}^{*}(t) = i_{F}(t - \tau_{K}) \\ \operatorname{di}^{-}(t) = i_{F}(t - \tau_{J}) \end{cases}$$
(5)

由式(5)表明,正向差电流 $di^{+}(t)$ 和反向差电流 $di^{-}(t)$ 分别反映了不同时刻的故障点电流,若将 $di^{+}(t)$ 沿着时间轴向后平移 $\Delta \tau$ 得到 $di^{+}(t-\Delta \tau)$, 则有:

$$\mathrm{d}i^{+}(t - \Delta\tau) = \mathrm{d}i^{-}(t) \tag{6}$$

需要说明的是,式(6)是基于均匀无损传输线的 推导结果。由于实际输电线路存在分布电阻,实际 计算得到的差电流受电阻的影响存在不平衡差 流^[14];同时,分布电阻也使得故障点两端的电流行波 在线路上传播时发生一定程度的衰变。因此, $di^{+}(t-\Delta\tau)与di^{-}(t)$ 的波形并不会完全重合,但二者 仍具有很高的相似度。

根据上述分析可以得到本文的故障测距机理: 将反向差电流 di⁻(t)作为参照标准,使正向差电流 di⁺(t)沿着时间轴向后平移时间 Δt 得到 di⁺(t- Δt), 并比较判断其与 di⁺(t)的波形相似度。那么在平移 过程中,当 $\Delta t = \Delta \tau$ 时,得到的 di⁺(t- $\Delta \tau$)与 di⁻(t)波 形应具有最高的相似度。

高压直流输电线路通常由正、负极2根输电线路构成。两极输电线路之间存在电气耦合,可利用 实数解耦矩阵对两极的电压、电流进行解耦,得到的 电压电流0模分量和1模分量将不再存在电气耦合。

$$S = S^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$
(7)

直流输电线路发生故障后,有以下特点:

(1)直流输电线路发生极间(对称)故障时,故障 电流不会经大地回路回流,不存在0模分量;

(2)直流输电线路参数具有频变特性,由式(3) 可以看出,故障测距的准确度与选取何种频率下的 波速直接相关,0模参数因为受大地回路阻抗的影 响,其波速随频率的变化更为显著。

为此,本文利用1模分量实现故障测距算法。 后文中,用下标"1"表示某变量或参数为1模分量, 例如1模正向差电流表示为di⁺(t)。

2 故障测距方法

2.1 余弦相似度和Pearson相关性分析

由上述故障测距机理可知,如何衡量 $di_1^+(t-\Delta t)$ 和 $di_1^-(t)$ 的波形相似度是提取 $\Delta \tau_1$ 及获得故障位置 信息的关键。

余弦相似度是电力系统中较为常见的分析相关性的手段,有相关研究通过用余弦相似度衡量不同电气量之间的相关度来检测直流输电线路不正常运行情况^[15-16],其表达式如下:

$$R(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} y_i^2}}$$
(8)

其中,R(x,y)为余弦相似度;x = 5y为2组数据; x_i, y_i (*i*=1,2,…,*N*)分别为数据x, y中的第*i*个元素。从 余弦相似度的分子可以看出,只要 x_i 和 y_i 为同号,余 弦相似度的计算结果就为正值,即判断2组数据为 正相关。

Pearson相关系数在对2组数据进行中心化处理的基础上进行余弦相似度的计算,能够更好地衡量2组波形细节处的相似度而非波形符号的相关性, 其表达式如下:

$$P(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j \right) \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} y_j \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} x_j \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} y_j \right)^2}}$$
(9)

其中,P(x,y)为Pearson相关系数。

Pearson 相关系数的分子部分为2组数据x,y的协方差。统计学用协方差表征2组数据变化趋势的一致性,可以看出,只有当 x_i 和 y_i 同时大于或者小于自身的平均值时,协方差为正值,表示二者正相关;反之,协方差为负值,表示二者负相关。利用x,y的标准差乘积对协方差进行归一化处理,便得到了Pearson 相关系数P(x,y),其取值范围为(-1,1),P(x,y)越趋近于1表示x,y的正相关性越高。

以图2给出的3种信号波形为例(其中 y_1 为三角 波),将 y_1 认为是作为参考的1模反向差电流 $di_1(t)$, y_2,y_3 为平移过程中的1模正向差电流 $di_1^*(t)$,对2种 相关性分析手段刻画波形相似性的能力进行分析。



Fig.2 Three kinds of signals

表1给出3种波形之间的余弦相似度和Pearson 相关系数。可以看出,余弦相似度对于平移过程 y_1 、 y_2 和 y_1 、 y_3 的波形相似性结果比较接近,区分度并不 够明显。相反地,Pearson相关性分析在这2种场景 下却给出了明显的区分:对于信号 y_1 、 y_2 ,Pearson相 关系数计算结果为1;对于信号 y_1 、 y_3 ,Pearson相关系 数的计算结果为-1。由此可见,Pearson相关系数可 以更好地反映2组波形变化趋势的一致性。

表1	余	弦相似	度和Pearse	on相	关系数
Table	1	Cosine	similarity	and	Pearson

correlation coefficients

信号波形	余弦相似度	Pearson相关系数
y_1, y_2	0.9703	1
y_1, y_3	0.6883	-1

2.2 故障测距函数

结合上述分析以及本文的故障测距机理,将1 模反向差电流 $di_1^-(t)$ 作为参照标准,令1模正向差电 流 $di_1^+(t)$ 沿着时间轴向后平移 Δt 得到 $di_1^+(t - \Delta t)$,并 不断计算其与 $di_1^-(t)$ 的 Pearson 相关系数。当 $\Delta t =$ $\Delta \tau_1$ 时,二者的 Pearson 相关系数将取得最大值且接 近1。由此,可构造故障测距函数如式(10)所示。

$$\begin{cases} f(\Delta t) = P(\operatorname{d} i_1^+(t - \Delta t), \operatorname{d} i_1^-(t)) \\ f(\Delta \tau_1) = \max\{f(\Delta t)\} \end{cases}$$
(10)

其中, $\Delta t \in (-\tau_1, \tau_1)_\circ$

将式(10)求得的Δτ₁代入式(3)即可获得故障 位置信息,实现故障定位。

2.3 算法数据窗的选取

计算时,需要选取时窗为[t_{st} , t_{st} + t_{w}]的1模正向 差电流 di⁺₁(t)用于平移计算,其中, t_{st} 为冗余窗的起 始时刻,应选取故障后 di⁺₁(t)开始随故障电流1模分 量变化的时刻; t_{w} 为截取波形的冗余窗长,故障后 di⁺₁(t)将增大,故可用 di⁺₁(t)在固定积分窗 ΔT 内的 均值大于某个门槛值 I_{sh} 的时刻来确定 t_{st} ,确保 di⁺₁(t) 已经随故障电流变化,即 t_{st} 由式(11)确定。

$$\frac{1}{\Delta T} \int_{t_{\rm st} - \Delta T}^{t_{\rm st}} \mathrm{d}i_1^+(t) > I_{\rm sh}$$
(11)

利用时窗 $[t_{st}, t_{st} + t_{w}]$ 内的 $di_{1}^{*}(t)$ 波形平移后与 作为参考的 $di_{1}^{-}(t)$ 进行相似度比较, 由式(10) 中 Δt 的取值范围可知, 应有 $[t_{st} - \tau_{1}, t_{st} + \tau_{1} + t_{w}]$ 内的 $di_{1}^{-}(t)$ 与其比较。故由此可知本文所提故障测距算法的总 数据窗长为:

$$T = 2\tau_1 + t_w \tag{12}$$

其中,冗余窗 t_x 取为3 ms; τ_1 与线路的长度和1模 行波的传播速度 v_1 相关, v_1 接近于光速,以长度为 1000 km的线路为例,本文所提算法需要的总时窗 长度接近10 ms。

3 仿真验证

3.1 故障仿真分析

本文在 PSCAD 中搭建了±500 kV 双极 HVDC系统,其示意图如附录中的图 A1 所示,系统参数如附录中的表 A1 所示;线路采用频变模型,杆塔结构同文献[11],线路长度设为1000 km,采样频率设置为100 kHz。

实现算法需要用到线路的1模波阻抗 $Z_{c1} = \sqrt{L_1/C_1}$ 和1模波速 $v_1 = 1/\sqrt{L_1C_1}$,由于直流输电线路中线路参数具有频变特性,本文选取0.1 Hz下的线路参数进行故障测距算法的计算。

图 3(a)给出了长度为1000 km的直流输电线路 在距J端100 km处在2 s发生极间金属性故障的1模 反向差电流 di₁(t)、截取的1模正向差电流 di₁(t)以 及平移后的1模正向差电流 di₁(t- $\Delta \tau_1$),图3(b)给 出了平移过程中 di₁(t- $\Delta \tau_1$)与 di₁(t)的Pearson 相关 系数。



通过对比图 3(a)中的 $di_1^+(t - \Delta \tau_1) = di_1^-(t)$ 的波 形可以发现,由于线路分布电阻的存在,致使二者波 形无法完全重合,但二者波形在变化趋势上仍具有很 高的相似度。图3(b)给出了平移时间 $\Delta t \alpha(-\tau_1, \tau_1)$ 变化时,Pearson相关系数的变化曲线。可以看出, $di_1^+(t-\Delta t) 与 di_1^-(t)$ 的Pearson相关系数随着时移长 度的不同有明显的区分度,且明显存在一个接近1的 最大值。进一步地,根据最大值对应的 Δt =-2.74 ms, 将 $\Delta \tau_1$ =-2.74 ms代入式(3)计算得到的故障距离为 98.57 km,故障测距结果的误差为-0.143%。

图4给出了1000 km的直流输电线路在距J端 100 km处发生正极经300 Ω 高阻接地故障时的仿真 结果。由图4(a)可以看出,由于故障类型为单极接 地故障,且由金属性故障变为高阻故障,故障电流明 显减小, $di_1^-(t)$ 和 $di_1^+(t)$ 也随之减小。但由图4(b)可 以看出,平移得到的 $di_1^+(t-\Delta\tau_1)$ 与 $di_1^-(t)$ 波形仍具有 很高的相似度,利用 Pearson 相关系数提取时间差 $\Delta\tau_1$ 的结果为-2.71 ms,利用式(3)计算得到的故障距 离为102.96 km,故障测距结果的误差为0.296 %。



300 Ω 高阻接地故障时的仿真结果

Fig.4 Simulative results of one-pole-to-ground fault with 300 Ω resistance that occurs 100 km away from *J*-end of 1 000 km transmission line

为验证本文所提故障测距算法的有效性和精确 性,对线路全长的各类故障情况进行了仿真,表2给 出了不同故障距离和不同过渡电阻情况下极间故障 和单极接地故障的测距结果。由于实际情况中,两 极线路一般不会经过较大的过渡电阻故障,故仿真 中极间故障的过渡电阻考虑为0~50Ω。

由表2可以看出,本文提出的利用行波差电流 相关性的故障测距方法在各类故障类型、故障位置、 过渡电阻的情况下均能够实现可靠故障测距,最大 相对误差为0.296%,可以实现全线路的精确故障定 位,且定位精度受过渡电阻的影响较小。

3.2 采样频率对故障测距精度的影响

直流控制保护系统的实际测量采样频率可能受限,因此本文针对实际直流工程中常见的采样频率

表 2	各类故	障的测	距结果

Table 2 Fault location results of various faults

故障与	极间故障			单机	及接地故	障
J端距离 /	过渡	测距结	误差 /	过渡	结果 /	误差 /
km	电阻 / Ω	果 / km	%	电阻/Ω	km	%
	0	9.19	-0.081	0	10.66	0.066
10	10	9.19	-0.081	100	12.12	0.212
	50	9.19	-0.081	300	12.12	0.212
	0	98.57	-0.143	0	101.49	0.149
100	10	100.03	0.003	100	102.96	0.296
	50	98.57	-0.143	300	102.96	0.296
	0	297.82	-0.218	0	297.82	-0.218
300	10	300.74	0.074	100	299.28	-0.071
	50	297.82	-0.218	300	297.82	-0.218
	0	500.00	0	0	500.00	0
500	10	500.00	0	100	500.00	0
	50	500.00	0	300	500.00	0
	0	702.18	0.218	0	699.29	-0.071
700	10	702.18	0.218	100	697.78	-0.221
	50	702.18	0.218	300	697.78	-0.221
	0	899.97	-0.003	0	898.50	-0.150
900	10	901.43	0.143	100	898.50	-0.150
	50	899.97	-0.003	300	897.04	-0.296
	0	990.80	0.080	0	990.80	0.080
990	10	990.80	0.080	100	987.87	-0.213
	50	987.87	-0.213	300	987.87	-0.213

进行了验证,即采用10kHz的采样频率,验证算法的故障测距效果,其结果如表3所示。

表 3 采样频率为 10 kHz 的故障测距结果

Table 3 Fault location results with sampling frequency of 10 kHz

故障与		极间故障		单	极接地故障	<u>r.</u>
J端距	过渡	测距	误差 /	过渡	测距	误差 /
离 / km	电阻/Ω	结果 / km	%	电阻 / Ω	结果 / km	%
	0	104.43	0.443	0	104.43	0.443
100	10	104.43	0.443	100	89.77	-1.023
	50	104.43	0.443	300	89.77	-1.023
	0	895.57	-0.443	0	895.57	-0.443
900	10	895.57	-0.443	100	895.57	-0.443
	50	895.57	-0.443	300	895.57	-0.443

对比表3和表2可看出,当采样频率降为10 kHz 时,本文算法的故障测距误差比采样频率为100 kHz 时有所增加。由本文的故障测距机理可知,算法通 过平移波形来获取 Δr_1 信息,平移的间隔 t_s 为采样频 率 f_s 的倒数,故本文所提算法的故障测距精度其实 与行波机理的故障测距方法具有相同的形式;

$$e = \frac{v_1}{2f_s} = \frac{v_1 t_s}{2}$$
(13)

其中,e为算法的理论故障测距误差范围;本文所仿 真线路的1模波速 v_1 =2.93×10⁸ m/s。由式(13)可 知,当实现算法的采样频率由100 kHz降到10 kHz 时, t_s 由10 μ s上升到100 μ s,e由1.465 km上升到 14.65 km,算法的故障测距精度有所下降。为了解 决这个问题,本文对10 kHz的原始采样数据进行了 三次样条插值,减小采样间隔以提高算法的故障测 距精度。

通过将10kHz采样频率下di⁺₁(t)和di⁻₁(t)的计 算波形原始数据进行插值使其采样点数恢复至与 100kHz的采样率相同,并利用插值后的波形进行故 障测距。表4为利用插值后的波形数据的算法的故 障测距结果,可以看出,相较于表3,表4所示故障测 距结果的误差有一定程度的减小。因此,在实际工 程中应用本文算法时,在采样频率较低的情况下,可 以通过对原始波形数据进行插值的方法提升算法的 故障测距精度。

表4 插值后的故障测距结果

Table 4 Fault location results after interpolation

故障与		极间故障			单极接地故障		
J端距	过渡	测距	误差 /	过渡	测距	误差 /	
离 / km	电阻 / Ω	结果 / km	%	电阻/Ω	结果 / km	%	
	0	98.57	-0.143	0	98.57	-0.143	
100	10	98.57	-0.143	100	95.64	-0.436	
	50	98.57	-0.143	300	95.64	-0.436	
	0	899.97	-0.003	0	897.04	-0.296	
900	10	898.50	-0.150	100	895.57	-0.443	
	50	898.50	-0.150	300	895.57	-0.443	

3.3 频变参数对故障测距算法的影响

由于直流线路参数是与频率有关的变量,故障 情况下,不同频率的故障分量所对应的直流线路参 数不同,对应的波阻抗Z_{e1}和波速v₁也不尽相同。由 前文分析可知,Pearson相关系数与di⁺(t)和di⁻(t) 的波形有关,di⁺(t)和di⁻(t)的波形计算与Z_{e1}和v₁ 有关,故Pearson相关系数可能受到频变参数的影 响;由式(13)可知,最后的故障测距结果与v₁密切相 关。由此可知本文所提故障测距算法的故障测距误 差可能与所选用的某一特定频率的线路参数有关, 有必要验证不同频率下的线路参数对算法的测距误 差造成的影响。当高压直流输电线路发生故障后, 直流线路的故障电流包含各个频段的分量,但主要 以低频段分量为主。因此,本文分别基于0~100 Hz 频段内不同频率下的线路参数实现所提故障测距算 法,得到的故障测距结果及误差如图5所示。

由图5(a)可看出,由不同频率下线路参数计算 得到的di⁺(t)和di⁻(t)波形平移后计算的Pearson相 关系数曲线基本一致。由图5(b)可以看出,1模波 速在整个频域内随频率的变化很小,在0~100 Hz频 段内1模波速的变化基本可以忽略。由图5(c)可 见,本文算法基于不同频率的线路参数得到的故障 测距误差基本都较小,这是因为1模分量所对应参 数受频率的影响较小,这也是本文所提算法采用1 模分量的主要原因之一。由上述分析可知,只要采 用低频段内的线路参数,则具体选取何种频率下的 线路参数对本文算法的故障测距精度基本无影响,



图 5 不同频率参数下 700 km 极间短路故障测距结果 Fig.5 Fault location results of 700 km one-pole-toground metallic fault under different frequencies

均可以实现较为准确的故障定位。

3.4 噪声干扰对故障测距算法的精度影响

实际输电系统中,需考虑数据的对时误差和互 感器误差等,可能会对 $di_1^{+}(t)$ 和 $di_1^{-}(t)$ 波形的计算引 入噪声干扰从而影响算法的故障测距精度。为了验 证噪声干扰对故障测距算法精度的影响,在 $di_1^{+}(t)$ 和 $di_1^{-}(t)$ 的波形数据中叠加高斯白噪声。

以距离 J端 100 km 处发生极间故障为例,在 $di_1^{+}(t)$ 和 $di_1^{-}(t)$ 的波形上叠加信噪比(SNR)为20 dB 的高斯白噪声,如附录中的图 A2(a)所示。附录中 的图 A2(b)给出相应的Pearson相关系数,根据图 A2(b) 可以计算得到故障测距结果为98.57 km,故障测距 误差为-0.143%,与采样原始波形的故障测距结果 精度一致。

表5给出了分别叠加信噪比为20、30、40 dB的高斯白噪声的情况下,距离J端100 km处各类故障的故障测距误差。从表5可以看出,因为发生极间故障时的故障电流通常较大,故障电流波动变化明显,无论在较强或是较弱的噪声干扰下,通过平移波形计算的Pearson相关系数都有很好的区分度,本文算法能够保证很高的精度。由于发生单极接地故障时的故障电流相对较小,噪声对本文算法的故障测距精度略有下降。随着故障的过渡电阻越大,故障电流进一步变小,波形趋于平缓,此时噪声对故障测

距精度的干扰也进一步加剧。由于白噪声本身的随 机性,可能出现部分具有较低信噪比噪声反而故障 测距误差更小的情况,但随着噪声强度的减小,故障 测距误差有下降的趋势。总体而言,本文所提出的 故障测距算法在噪声干扰的情况下,仍能够保证比 较高的故障测距精度。

表5	不同信	噪比的	り噪声下的故障测距结果误差
	Table 5	Error	of fault location results
	under	noise	with different SNRs

故障	过渡	测距结果误差 / %		
类型	电阻 / Ω	SNR=20 dB	SNR=30 dB	SNR=40 dB
	0	-0.143	-0.143	-0.143
极间故障	10	-0.143	-0.143	-0.143
	50	-0.143	-0.143	-0.143
出力がい	0	-0.143	0.003	0.149
甲 恢 按 地 故 陪	100	0.736	-0.143	-0.290
平坝	300	-0.583	-0.436	-0.436

4 结论

本文基于2种差电流波形所具有的相似性,并 利用Pearson相关系数表征二者波形的相似度并提 取故障位置信息,提出了一种高压直流输电故障测 距算法。本文算法利用线路两端的时域电压、电流 信息实现故障测距,适用于各种故障类型,具有较高 的故障测距精度。仿真结果表明,本文算法受过渡 电阻影响较小,在噪声干扰下仍能够可靠地进行故 障测距。此外,在采样频率较低的情况下,可通过对 波形数据进行插值在一定程度上减小算法的故障测 距误差。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:1-25.
- [2] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西 安交通大学出版社,2007:182-187.
- [3] 王少荣,赵研卉.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. Travelling-wave fault location of double-pole HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering,2007,33(7):124-128.
- [4] 刘兵,胡勇,阮江军,等.基于小波分析频差性的电力电缆故障 测距[J].电力自动化设备,2009,29(3):22-27.
 LIU Bing,HU Yong,RUAN Jiangjun, et al. Power cable fault locating based on frequency difference character of wavelet analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3): 22-27.
- [5] 顾艳,王玉忠. 基于小波变换和数学形态学的双回线故障测距 [J]. 电力自动化设备,2011,31(12):34-38.

GU Yan, WANG Yuzhong. Fault location based on wavelet transform and mathematical morphology for double-circuit transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(12):34-38.

- [6] 東洪春,程春和,赵文渊,等. 形态学与HHT检测相结合的行 波波头准确标定方法[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):1-7.
 SHU Hongchun, CHENG Chunhe, ZHAO Wenyuan, et al. Accurate traveling-wave front detection based on morphology and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009,29 (7):1-7.
- [7] 廖凯,何正友,李小鹏.基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J].电力系统自动化,2013,37(3):104-109.
 LIAO Kai,HE Zhengyou,LI Xiaopeng. Fault location for HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [8] 刘可真, 東洪春, 于继来, 等.±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.
 LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for ±800 kV UHVDC transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):141-147.
- [9] MOHAMMAD F, JAVAD S. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on similarity measure of voltage signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013,28(4):2483-2490.
- [10] 宣文博,张艳霞,陈旭,等.基于行波差动电流的输电线路接地 故障测距[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016, 49(6):639-645.
 XUAN Wenbo,ZHANG Yanxia,CHEN Xu,et al. Grounding fault location of transmission line by traveling wave differential current[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2016,49(6):639-645.
- [11] JIALE S, SHUPING G, GUOBING S, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):1203-1209.
- [12] 冯腾,董新洲.双端行波故障测距装置性能测试方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):114-120.
 FENG Teng, DONG Xinzhou. Performance test method of two-terminal traveling wave fault location[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):114-120.
- [13] 董新洲,雷敖宇,汤兰西,等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2018,42(19):185-191.
 DONG Xinzhou,LEI Aoyu,TANG Lanxi,et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(19):185-191.
- [14] 张武军,何奔腾. 行波差动保护不平衡差流分析及实用方案
 [J]. 电力系统自动化,2007,31(20):49-55.
 ZHANG Wujun, HE Benteng. Analysis and application of unbalanced differential current in traveling wave differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(20): 49-55.
- [15] 李斌,邱宏,洪潮,等. 基于电压源型换流器的柔性直流系统快速方向保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):1-8.
 LI Bin,QIU Hong,HONG Chao, et al. High-speed direction protection of flexible DC system based on voltage source converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,28(2): 1-8.
- [16] 孔飞,张保会,王艳婷. 基于行波波形相关性分析的直流输电 线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(20): 108-114.

(下转第53页 continued on page 53)

32

the International Council on Large Electric System. Bologna, Italy:CIGRE,2011:264-272.

作者简介:

赵冠琨(1996—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要研 究方向为柔性直流电网保护与控制(E-mail:zhaoguankun_ ncepu@163.com)

贾 科(1986—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士研



究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为 电力系统保护与控制、新型配电网故障定位 与系统自我恢复(E-mail:ke.jia@ncepu.edu. cn):

王聪博(1990—),男,吉林长春人,博 士研究生,主要研究方向为柔性直流配电网 保护与控制(E-mail: wangcongbo107@163. com)。

Analysis and improvement of protection action of flexible DC transmission system based on dynamic resistance characteristics of DC circuit breaker's transfer branch ZHAO Guankun, JIA Ke, WANG Congbo, XUAN Zhenwen, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract:When the DC circuit breaker clears the fault current through the commutation between its branches, the fault transient electrical quantity of the system will change. The influence of DC circuit breaker's action characteristics is not considered in the principle design of existing DC protection, which may cause the misoperation of the existing DC protection. Therefore for flexible HVDC(High Voltage Direct Current) system, the action characteristic of DC circuit breaker during DC short circuit fault is analyzed, the short circuit current analytical expression considering quench characteristics of fault current in each flow branch of DC circuit breaker is given, the applicability of existing current differential protection, low voltage over-current protection and differential protection is verified, and then a protection algorithm based on the current integral value is proposed, which solves the misoperation problems of the current differential protection with strong ability to resist the transition resistance and noise. Finally, a ± 320 kV double-terminal flexible DC transmission system model is established by PSCAD / EMTDC electromagnetic transient simulation software. The simulative results verify the correctness of theoretical analysis and the applicability of the proposed protection algorithm.

Key words: DC circuit breaker; DC power transmission; DC line protection; adaptive analysis; short circuit currents; relay protection

(上接第32页 continued from page 32)

KONG Fei, ZHANG Baohui, WANG Yanting. A novel pilot pro-tection scheme for HVDC transmission lines based on waveform correlation analysis of traveling wave [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 108-114.

作者简介:

李 斌(1976—),男,甘肃兰州人,教授,博士研究生 导师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:



libin_tju@126.com);

张纪航(1993—),男,福建南平人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统保护 与控制(E-mail:zhangjh_tju@163.com); 刘海金(1990—),男,山西临汾人,博 士研究生,主要研究方向为电力系统保护 与控制(E-mail:liuhaijin@tju.edu.cn)。

Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis LI Bin,ZHANG Jihang,LIU Haijin,LI Ye

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traveling wave fault location principle that performs worse in high-resistance fault and requires extremely high sampling frequency, a fault location method based on waveform similarity for HVDC(High Voltage Direct Current) power transmission lines is proposed. Based on the functional relationship between positive and negative differential currents and fault point current, the waveform similarity between positive and negative differential currents is analyzed by using Pearson correlation coefficient and the corresponding information of fault location is extracted. The proposed method takes use of time-domain information of voltages and currents at both ends, is less affected by the transition resistance and noise, and shows high reliability. PSCAD / EMTDC simulation verifies that the proposed method can achieve accurate fault location of the full length of power transmission line.

Key words: HVDC power transmission; transmission line; electric fault location; differential current; waveform similarity; time shift



	表 A1 HVDC 系统仿真模型参数
Table A1	Parameters of HVDC system simulation model

换流站参数	参数值	
额定直流功率/MW	5000	
额定直流电压/kV	±500	
交流额定电压		
(线电压有效值)/kV	525	
变压器变比	525 kV /209.7 kV	
高低阀组脉动数	12	
直流电抗器/mH	270	



Fig.A2 Pole-to-pole fault with 20dB Gaussian white noise superimposed

附录