

基于双曲正弦函数相位特性高压故障线路相位测距法

林富洪, 王增平, 李金龙, 曾惠敏

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 提出一种基于双曲正弦函数相位特性高压故障线路相位测距法。该方法在将故障位置作为已知条件看待并引入参考点与之匹配的思想基础上, 构造了一个具有双曲正弦函数相位特性的故障测距函数。根据所取参考点与故障点相匹配时测距函数相位过零这一特征进行定位。该方法原理上不存在伪根, 所需运算量远小于传统方法的运算量, 能有效克服传统方法存在的测距精度和测距速度此消彼长的矛盾。仿真结果表明, 该方法受过渡电阻、故障位置和故障发生角等因素的影响很小, 具有很高的测距精度。

关键词: 分布参数; 双曲正弦函数; 测距函数; 相位特性

Fault location algorithm for HV transmission line based on phase characteristics of hyperbolic sine function

LIN Fu-hong, WANG Zeng-ping, LI Jin-long, ZENG Hui-min

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A new fault location function is generated based on the concept of selecting a reference point to match the fault position. It concludes that, the phase characteristics of the function is determined by the phase characteristics of hyperbolic sine function. The function has different phase characteristics between the reference point located at the left of the fault position and the reference point located at the right of the fault position, and the phase of the function equals to zero when the reference point matches the fault position. Based on the phase characteristics of the function, a new fault location algorithm is proposed. The proposed method has less calculation burden than the traditional methods, and can effectively overcome the contradiction between fault location precision and fault location speed which lies in the traditional methods. The accuracy is independent of fault transition impedance, fault type, fault location and incidence angle of the fault occurrence. The proposed method has no false root in theory. Results of EMTDC based simulation prove that the proposed method is correct and efficient.

The work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50777016 and No.50837002) .

Key words: distributed parameter; hyperbolic sine function; fault location function; phase characteristics

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0028-06

0 引言

迅速、准确地查找高压输电线路故障点, 有利于减少巡线工作、缩短故障排除时间, 对电力系统的安全经济运行具有重要作用^[1-3, 10]。

近年来, 通信技术的发展和PMU的推广运用使得两端数据能很方便地取得, 为此人们提出许多双端测距算法^[3-15]。但这些算法或者基于采用未能真

实反映实际情况的线路集中参数模型^[3-5]; 或是虽采用分布参数模型但计算很复杂, 不易实现^[6-9]; 或是只适用于纯电阻故障及事先需要知道故障类型的情况^[10]; 或是在原理上有伪根存在的可能, 在某些情况下甚至会得到错误的测距结果^[11-14]。而且现已提出的测距算法大多利用搜索法求故障点, 这使得测距精度受迭代步长和迭代次数等因素的影响, 要想获得较高的测距精度就必须进行大量的计算, 即利用搜索法求故障点的双端测距方法存在着测距精度与测距快速性此消彼长的矛盾^[6-15]。在实际输电系统中, 高压线路常常跨越不同地带, 如平原、高原

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50837002); 国家自然科学基金项目(50777016)

或山区等, 不同地带的环境因素对该部分线路分布参数的影响也不同, 即在不同地区环境因素的影响下高压线路可能出现间隔区段线路分布参数不同的情况, 这种变化会对测距精度造成何种程度的影响, 目前所提出的双端故障测距方法在仿真结果里皆未给出^[3-15]。

本文通过将故障点作为已知条件看待, 并引入参考点与之匹配的思想基础上构建了一个新的测距函数。该测距函数相位特性是由双曲正弦函数相位特性所决定。基于此相位特性提出一种高压线路故障测距新原理。该方法原理上不存在伪根, 所需运算量小, 具有良好的快速性。大量仿真结果表明, 当因环境因素影响而出现间隔区段线路分布参数不同时, 本文方法依然具有较高的测距精度。

1 基于分布参数模型负序电流分配系数

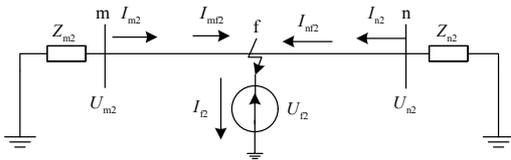


图1 不对称性故障时的系统负序等值网

Fig.1 Negative sequence equivalent circuit of system with internal fault

图1为不对称性故障时的系统负序等值网。设故障点到m端的距离为 l_f , 被保护线路全长为 l 。则有

$$I_{mf2} = -U_{f2} / Z_{c1} \tanh \gamma_1 (l_m + l_f) \quad (1)$$

$$I_{nf2} = -U_{f2} / Z_{c1} \tanh \gamma_1 (l_n + l - l_f) \quad (2)$$

于是得

$$\frac{I_{f2}}{I_{mf2}} = \frac{I_{mf2} + I_{nf2}}{I_{mf2}} = 1 + \frac{\tanh \gamma_1 (l_m + l_f)}{\tanh \gamma_1 (l_n + l - l_f)} \quad (3)$$

$$\text{又由于} \begin{cases} U_{m2} = U_{f2} \cosh \gamma_1 l_f + I_{mf2} Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_f \\ I_{m2} = I_{mf2} \cosh \gamma_1 l_f + \frac{U_{f2}}{Z_{c1}} \sinh \gamma_1 l_f \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{计算得} \quad I_{mf2} / I_{m2} = \cosh \gamma_1 l_f + \tanh \gamma_1 l_m \sinh \gamma_1 l_f \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)得

$$\begin{aligned} I_{f2} / I_{m2} &= (\cosh \gamma_1 l_f + \tanh \gamma_1 l_m \sinh \gamma_1 l_f) \cdot \\ &\left(1 + \frac{\tanh \gamma_1 (l_m + l_f)}{\tanh \gamma_1 (l_n + l - l_f)} \right) = p(l_f) \end{aligned} \quad (6)$$

其中: U_{f2} 、 I_{f2} 分别为故障点的负序电压、电流。 I_{mf2} 、 I_{nf2} 分别为 m 、 n 侧流向故障点的负序电流; Z_{c1} 、 r_1 分别为负序波阻抗、传播常数; Z_{m2} 、 Z_{n2} 分别为 m 、 n 侧负序系统等值阻抗; l_m 、 l_n 是分别由 Z_{m2} 、 Z_{n2} 决定的虚拟等值线路长度, 且 $l_m = \operatorname{atanh}(Z_{m2} / Z_{c1}) / \gamma_1$; $l_n = \operatorname{atanh}(Z_{n2} / Z_{c1}) / \gamma_1$ 。

2 构造故障测距新函数

图2为不对称性故障时的线路负序等值网, 取k点为参考点。由图2所示, 可得:

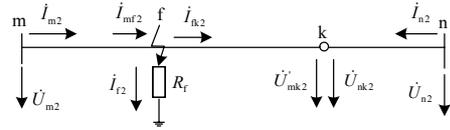


图2 不对称性故障时的线路负序等值网

Fig.2 Negative sequence equivalent circuit of transmission line with internal fault

$$\begin{cases} \dot{U}_{f2} = \dot{U}_{m2} \cosh \gamma_1 l_{mf} - \dot{I}_{m2} Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{mf} \\ \dot{I}_{mf2} = \dot{I}_{m2} \cosh \gamma_1 l_{mf} - \dot{U}_{m2} \sinh \gamma_1 l_{mf} / Z_{c1} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{fk2} = \dot{I}_{mf2} - \dot{I}_{f2} \\ \dot{U}'_{mk2} = \dot{U}_{nk2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\dot{U}'_{mk2} = \dot{U}_{f2} \cosh \gamma_1 l_{fk} - \dot{I}_{fk2} Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{fk} \quad (9)$$

将式(7)、(8)代入式(9)得:

$$\dot{U}_{mk2} - \dot{U}_{nk2} = \dot{U}'_{mk2} - \dot{I}_{f2} Z_{c1} \sinh \gamma_1 l_{fk} - \dot{U}_{nk2} = \dot{I}_{f2} Z_{c1} \sinh \gamma_1 (l_f - l_k) \quad (10)$$

同理, 当故障发生在参考点右侧时, 也满足式(10)的关系。将式(6)代入式(10)得

$$(\dot{U}_{mk2} - \dot{U}_{nk2}) / \dot{I}_{m2} = Z_{c1} \sinh \gamma_1 (l_f - l_k) p(l_f)$$

$$\text{定义测距函数} \quad f(l_k) = \frac{\dot{U}_{mk2} - \dot{U}_{nk2}}{\dot{I}_{m2}} \quad (11)$$

其中: U_{mk2} 为 k 点实际电压; U_{mk2} 、 U_{nk2} 分别为 m 、 n 侧电量推算出的 k 点电压; I_{fk2} 为 k 点流向故障点的负序电流; l_k 、 l_{mf} 分别为 k 点和故障点到 m 侧的距离; l_{fk} 为 k 点与故障点 f 之间的距离。

所构造的式(11)测距函数虽然是在负序等值网中推导出来, 但也适用于对称故障类型。根据电路叠加原理, 故障后的网络可以等效为正常状态网络和故障分量网络的叠加。正序故障分量序网图与图1相似, 因此, 当发生对称故障时, 可采用正序故障分量代替前文的负序分量进行测距, 此时前文的推理过程对正序故障分量依然成立。

3 双端故障测距新算法

假设线路全长为 600 km，故障点距 m 端 300 km，以我国京津唐 500 kV 超高压输电线路参数进行仿真，不同参考点时测距函数 $f(l_k)$ 、 $\sinh r_1(l_f - l_k)$ 和负序电流分配系数的相位特性如图 3 所示。

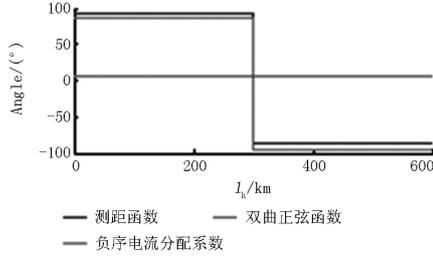


图 3 故障点位于 300 km 处时测距函数、双曲正弦函数和负序电流分配系数的相位特性

Fig.3 Phase characteristics of fault location function and hyperbolic sine function and negative sequence current coefficient with internal fault at 300 km

观察图 3 可知，当 $l_f > l_k$ 时， $\arg(f(l_k))$ 和 $\arg(\sinh r_1(l_f - l_k))$ 一直位于 90° 附近；当 $l_f < l_k$ 时， $\arg(f(l_k))$ 和 $\arg(\sinh r_1(l_f - l_k))$ 则一直位于 -90° 附近；当 $l_f = l_k$ 时， $\arg(f(l_k))$ 和 $\arg(\sinh r_1(l_f - l_k))$ 理论上都等于零；当 $l_f \neq l_k$ 时， $\arg(f(l_k))$ 和 $\arg(\sinh r_1(l_f - l_k))$ 相差一固定值，且该定值理论上等于 $\arg(p(l_f))$ 。事实上，测距函数的这种相位特性是由双曲正弦函数相位特性所决定，因为由测距函数表达式可知，当故障已经发生后，故障距离 l_f 为一未知的定值，此时负序电流分配系数的相角也将为一定值且不受参考点选取的影响，所以测距函数和双曲正弦函数具有相同相位特性，只是在所取参考点与故障点不匹配时，二者相角相差一固定值 $\arg(p(l_f))$ 。基于此相位特性，提出一种适用于高压线路双端故障相位测距法如下。

(1) 将线路全长进行 n 等分，分别计算各等分点处测距函数的相角。

(2) 确定 l_f 所属的等分区 ($l_{begin} \sim l_{end}$)。

由双曲正弦函数相位特性可知，当线路内部发生不对称故障时，必存在两个等分点 kl/n 和 hl/n 使得 $\arg(f(kl/n)) > 0$ 和 $\arg(f(hl/n)) < 0$ ($h=k+1$)。于是取 $l_{begin} = kl/n$ ， $l_{end} = hl/n$ 。

(3) 取 l_k 从 l_{begin} 开始，以 Δl 为步长递增至 l_{end} 结束计算各 $\arg(f(l_k))$ 值。若存在某一参考点 l_k 满足 $\arg(f(l_k - \Delta l)) > 0^\circ$ 且 $\arg(f(l_k)) < 0^\circ$ ，则取故障点距 m 端的故障距离 $l_f = (2l_k - \Delta l)/2$ 。

当且仅当所取参考点与故障点相匹配时，测距函数的相角才等于零，即测距函数的解具有唯一性，

因此本文方法在原理上不会出现伪根^[13]。

当步骤 (1) 中的 n 合理地取较大时，由于只需在某一包含故障点的等分区内搜索故障点，因此，本文方法的运算时间约等于传统方法运算时间的 $1/n$ ，具有良好的快速性。

4 仿真验证

4.1 均匀传输线路模型

参考京津唐 500 kV 超高压输电线路参数，按照分布参数模型建立了一条 600 km 长的输电线路 EMTDC 仿真模型，如图 4 所示，其参数如下。



图 4 500 kV 系统仿真模型

Fig.4 Simulation model of 500 kV power system

(1) 线路参数

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.02083 \Omega/\text{km} ; l_1 = 0.8948 \text{ mH}/\text{km} ; \\ C_1 &= 0.0129 \mu\text{F}/\text{km} ; r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km} ; \\ l_0 &= 2.2886 \text{ mH}/\text{km} ; C_0 = 0.00523 \mu\text{F}/\text{km} \end{aligned}$$

(2) m、n 侧系统阻抗参数

$$\begin{aligned} R_{m1} &= 1.0515 \Omega ; L_{m1} = 0.13743 \text{ H} ; R_{n0} = 0.6 \Omega ; \\ L_{n0} &= 0.0926 \text{ H} ; R_{n1} = 26 \Omega ; L_{n1} = 0.14298 \text{ H} ; \\ R_{n0} &= 20 \Omega ; L_{n0} = 0.11927 \text{ H} \end{aligned}$$

采样频率为 6 kHz，线路全长 60 等分，采用差分全波傅氏算法滤波，并提取故障后第二周波线路两端基频分量。 R_g 、 R_f 分别为接地电阻和相间过渡电阻。

当故障发生角为 $\delta=30^\circ$ 且故障点分别位于 83 km 和 325 km 时，AB 相间短路时测距函数的相位特性分别如图 5、7 所示。根据算法步骤 2 可迅速确定故障点所属的等分区分别为 [80 km 90 km] 和 [320 km 330 km]。图 6、7 分别给出了在这两个范围内测距函数的相位特性，根据算法步骤 3 可求得：当故障点位于 83 km 时，不同过渡电阻所对应的测距结果分别为 84.73 km、82.99 km、82.81 km、82.81 km、82.83 km、82.83 km、82.85 km 和 82.85 km。当故障点位于 325 km 时，不同过渡电阻所对应的测距结果分别为 324.21 km、324.69 km、324.99 km、325.07 km、325.07 km、325.07 km、325.07 km 和 325.07 km。由此可见，本文方法具有良好的快速性。

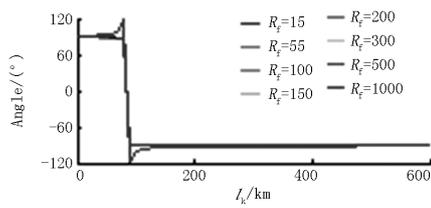


图 5 83 km 处 AB 相间故障时测距函数的相位特性
Fig.5 Phase characteristics of fault location function with internal A-B fault at 83 km

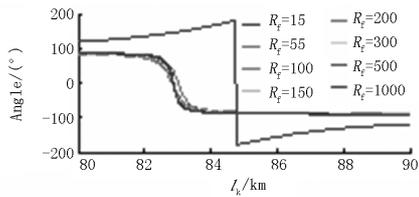


图 6 83 km 处 AB 相间故障时[80 km 90 km]区段线路内测距函数的幅值特性
Fig.6 Phase characteristics of fault location function in the zone [80 km 90 km] with internal A-B fault at 83 km

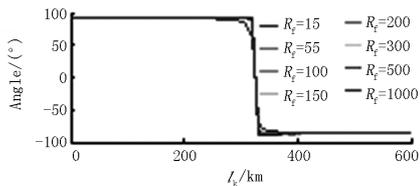


图 7 325 km 处 AB 相间故障时测距函数的相位特性
Fig.7 Phase characteristics of fault location function with internal A-B fault at 325 km

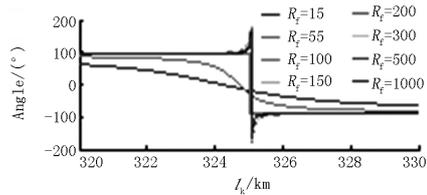


图 8 325 km 处 AB 相间故障时[320 km 330 km]区段线路内测距函数的幅值特性
Fig.8 Amplitude characteristics of fault location function in the zone [320 km 330 km] with internal A-B fault at 325 km

表 1 列出了故障点位于 325 km 处时, 故障发生角和故障类型对测距结果的影响。由表 1 知, 测距结果受故障类型和故障发生角影响很小, 相对测距误差小于 0.501 7%。

表 2 列出了故障发生角 $\delta=30^\circ$ 时, 接地电阻及性质和故障位置对 A 相接地故障测距结果的影响。由表 2 知, 接地电阻及性质和故障位置对 A 相接地故障测

距结果的影响很小, 相对测距误差小于 0.198 3%。

表 1 故障发生角对各故障类型测距结果的影响

Tab.1 Influence of incidence angle on fault location

故障类型	不同故障发生角下的测距结果/km				
	15°	45°	60°	75°	90°
AG	324.99	326.21	326.51	326.69	324.99
BG	325.03	323.35	323.51	323.77	325.01
CG	324.99	325.29	324.85	325.01	325.01
ABG	325.03	324.55	325.01	324.97	324.97
BCG	325.03	324.93	324.51	325.07	325.07
CAG	324.93	328.01	327.97	324.97	324.97
AB	325.03	324.79	325.09	324.99	324.97
BC	325.01	325.15	324.85	325.05	325.05
CA	324.95	327.09	327.09	324.97	324.99
ABCG	325.65	325.65	325.65	325.65	325.65

表 2 接地电阻和故障位置对 AG 故障测距结果的影响

Tab.2 Influence of grounding resistance and fault position on fault location when occurs A-G fault

过渡电阻/ Ω	不同故障位置的测距结果/km				
	19 km	35 km	325 km	500 km	587 km
15	19.33	35.33	325.27	501.19	587.93
55	18.79	34.81	325.03	500.25	587.17
100	18.79	34.81	325.07	500.35	587.27
150	18.81	34.81	325.09	500.37	587.29
200	18.81	34.83	325.11	500.37	587.29
300	18.81	34.83	325.13	500.37	587.29
500	18.83	34.85	325.17	500.35	587.29
100+j50	18.81	34.83	324.99	500.05	586.95
300+j120	18.79	34.81	325.13	500.03	586.97

表 3 过渡电阻和故障位置对 BCG 测距结果的影响

Tab.3 Influence of transition impedance and fault position on fault location when occurs BCG fault

过渡电阻/ Ω	不同故障位置的测距结果/km				
	19 km	83 km	325 km	500 km	587 km
15	17.91	82.31	325.37	500.89	586.35
55	19.09	83.01	325.17	500.25	588.05
100	19.09	83.05	325.03	499.71	587.93
150	19.05	83.05	324.99	499.65	587.89
200	19.01	83.05	324.99	499.69	587.85
300	18.93	83.03	324.97	499.81	587.79
500	18.71	82.99	324.97	500.01	587.69
100+j50	18.81	82.79	325.71	498.39	588.25
300+j120	18.89	82.93	325.03	499.75	587.97

表 4 过渡电阻和故障位置对 ABC 故障测距结果的影响

Tab.4 Influence of transition impedance and fault position on fault location when occurs ABC fault

过渡电阻/ Ω	不同故障位置的测距结果/km				
	19 km	35 km	325 km	450 km	591 km
0.001	18.61	34.63	325.65	450.53	592.15
15	18.75	34.75	325.43	450.43	592.01
55	18.89	34.89	325.17	450.33	591.83
100	18.91	34.91	325.07	450.27	591.73
150	18.91	34.91	325.03	450.25	591.71
200	18.89	34.91	325.01	450.23	591.69
300	18.89	34.91	325.01	450.17	591.65
500	18.89	34.89	324.99	450.09	591.59

表 3 列出了故障发生角 $\delta=30^\circ$ 时, BCG 故障测距精度受过渡电阻及性质和故障位置的影响情况。由表 3 知, 过渡电阻及性质和故障位置对 BCG 故障测距结果的影响很小, 相对测距误差小于 0.268 3%。

表 4 列出了故障发生角 $\delta=75^\circ$ 时, ABC 故障测距精度受过渡电阻和故障位置的影响情况。由表 4 知, 过渡电阻和故障位置对 ABC 故障测距结果的影响很小, 相对测距误差小于 0.191 7%。

4.2 不均匀传输线路模型

在实际系统中, 高压线路常会跨越不同地带, 不同地区的环境因素对线路参数的影响也截然不同, 因环境因素造成线路分布参数变化对故障测距结果的影响情况通过图9仿真模型进行验证。

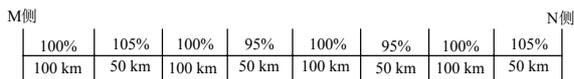


图 9 高压线路不均匀传输线路模型简化示意图

Fig.9 Simplified inhomogeneous line model for simulation

在图4仿真模型基础上, 将线路全长分成8段, 每段长度分别为100 km、50 km、100 km、50 km、100 km、50 km、100 km、50 km。每段线路参数 r_1 、 l_1 、 C_1 和 r_0 、 l_0 、 C_0 分别为图4模型线路参数的100%、105%、100%、95%、100%、95%、100%、105%, 如图9所示。故障点选择从590 km逐渐递减到20 km, 步长为15 km, 仿真验证故障类型、过渡电阻和故障位置对测距结果的影响情况如图10~13所示, 仿真时线路参数仍采用图4仿真模型的理想线路参数。

由图 10~13 可知, 在 AG、BC、ABG、ABCG 四种故障类型的各 234 组仿真结果里, 最大绝对测

距误差分别为 6.05 km、7.73 km 和 6.75 km, 最大相对测距误差分别小于 1.008%、1.288%和 1.125 %。由 936 组仿真结果可知, 在出现间隔区段线路参数发生达 $\pm 5\%$ 不均匀偏离设计值时, 本文方法最大相对测距误差小于 1.5%, 能满足电力生产的需求。

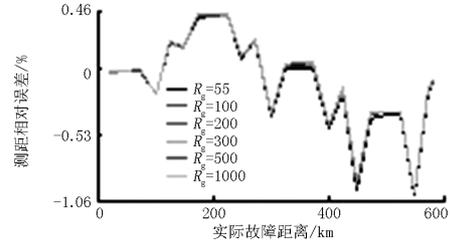


图 10 AG 故障时测距新算法的测距误差特性

Fig.10 Fault location error curve with the proposed algorithm when occurs AG fault

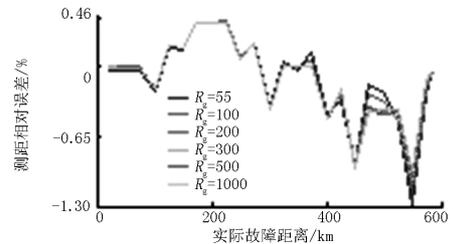


图 11 BC 故障时测距新算法的测距误差特性

Fig.11 Fault location error curve with the proposed algorithm when occurs phase B to phase C fault

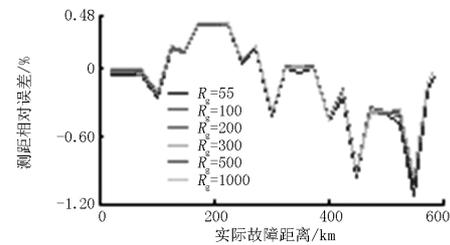


图 12 ABG 故障时测距新算法的测距误差特性

Fig.12 Fault location error curve with the proposed algorithm when occurs ABG fault

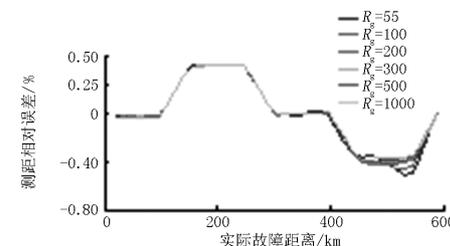


图 13 ABCG 故障时测距新算法的测距误差特性

Fig.13 Fault location error curve with the proposed algorithm when occurs ABCG fault

5 结论

提出一种基于双曲正弦函数相位特性高压故障线路相位测距法, 该原理具有如下特点:

(1) 可将高压线路的故障测距问题转化为某一等分分段线路的测距问题, 因此, 该方法运算量小, 具有良好快速性。

(2) 当且仅当所取的参考点与故障点相匹配时, 双曲正弦函数的相角才等于零, 因此本文方法原理上不存在伪根问题, 测距函数具有唯一解。

(3) 测距精度受过渡电阻、故障类型、故障位置和故障发生角等因素的影响很小。当线路分布参数因环境等因素影响而发生严重不均匀变化时, 本文方法依然具有较高的测距精度。

(4) 选取未知参考点与已知故障点相匹配的思想引入也为研究高压线路故障测距问题提供了一种新的思维。

参考文献

- [1] 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, 1994.
- [2] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析[M]. 北京: 北京水利电力出版社, 1990.
- [3] 全玉生, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 27-33.
QUAN Yu-sheng, YANG Min-zhong, WANG Xiao-rong, et al. A fault location method for overhead high voltage power transmission line[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 27-33.
- [4] Abe M, Otsuzuki N, Emura T, et al. Development of a new fault locate system for multi-terminal single transmission line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (1): 159-168.
- [5] Kezunovic M, Mrkic J, Perunicic B. An accurate fault location algorithm using synchronized sampling[J]. Electric Power System Research, 1994, 29 (1): 161-169.
- [6] 杜召满, 赵舫. 一种新的超高压输电线路双端测距算法[J]. 高电压技术, 2003, 29(11): 11-12.
DU Zhao-man, ZHAO Fang. A new fault location algorithm using asynchronized two-terminal data[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(11): 11-12.
- [7] 刘涤尘, 杜新伟, 李媛, 等. 基于遗传算法的高压长线路双端故障测距研究[J]. 高电压技术, 2007, 33 (3): 21-25.
LIU Di-chen, DU Xin-wei, LI Yuan, et al. Fault location using two-terminal data for HV & long transmission line based on genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3): 21-25.
- [8] 苏进喜, 罗承沐, 解子凤, 等. 利用双端电气量的高压长线路故障测距算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(7): 27-30.
SU Jin-xi, LUO Cheng-mu, XIE Zi-feng, et al. Fault location algorithm for long distance transmission lines using samples at both ends[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2000, 40(7): 27-30.
- [9] 毛鹏, 张兆宁, 苗友忠, 等. 基于双端电气量的输电线路故障测距的新方法[J]. 继电器, 2000, 28(5): 24-27, 46.
MAO Peng, ZHANG Zhao-ning, MIAO You-zhong, et al. A novel technique for locating transmission line fault based on the two-terminal electrical quantities[J]. Relay, 2000, 28(5): 24-27, 46.
- [10] 施世鸿, 何奔腾. 不受 TA 饱和和影响的高压输电线路故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 67-71.
SHI Shi-hong, HE Ben-teng. Fault location algorithm for HV transmission lines immune to saturation of current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 67-71.
- [11] 束洪春, 司大军, 陈学允, 等. 基于分布参数模型的串补线路故障测距方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 72-76.
SHU Hong-chun, SI Da-jun, CHEN Xue-yun, et al. Study on location faults on series compensated lines based on distributed parameter line model[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 72-76.
- [12] 滕林, 刘万顺, 李营, 等. 一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 24-27.
TENG Lin, LIU Wan-shun, LI Ying, et al. A novel practical accurate fault location algorithm for HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 24-27.
- [13] 辛振涛, 尚德基, 尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器, 2005, 33(6):36-38,45.
XIN Zhen-tao, SHANG De-ji, YIN Xiang-gen. False root and its improvement of a two-terminal fault location algorithm on transmission line[J]. Relay, 2005, 33(6): 36-38, 45.
- [14] 周大敏, 冯璞乔, 易良廷. 一种使用两端电气量的高压输电线路故障测距的新算法[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 47-51.
ZHOU Da-min, FENG Pu-qiao, YI Liang-ting. A new algorithm to estimate fault location on a high voltage transmission line using two terminal's voltage and current[J]. Power System Technology, 1997, 21(7): 47-51.
- [15] 全玉生, 王晓蓉, 杨敏中, 等. 工频双端故障测距算法的鲁棒性问题和算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 28-32.

(下转第 97 页 continued on page 97)

- Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32 (9) : 33-36.
- [2] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
JIANG Xing-liang, YI Hui. Icing and its protection of transmission lines[J]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] Horwill C, Davidson C C, Granger M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE PES. 2005/2006:529-534.
- [4] Petrenko V, Sullivan C. Methods and systems for removing ice from surfaces[P]. US: PCT/ US99/ 28330 (CIP), 1999-11-30.
- [5] McCurdy J D, Sullivan C R, Petrenko V F. Using dielectric losses to deice power transmission lines with 100 kHz high-voltage excitation[C]//Industry Application Conference 2001, Thirty-sixth IAS annual meeting conference record of the 2001 IEEE. 2001: 2515-2519.
- [6] Petrenko V F, Higa M, Starostin M, et al. Pulse electro thermal de-icing[C]//Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference. 2003: 434-438.
- [7] 山霞, 舒乃秋. 关于架空输电线除冰措施的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32 (4) : 25-27.
SHAN Xia, SHU Nai-qiu. Discussion on methods of de-icing for overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (4) : 25-27.
- [8] 许树楷, 黎小林, 饶宏, 等. 南方电网500 kW直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2 (4) : 32-36.
XU Shu-kai, LI Xiao-lin, RAO Hong, et al. Development and test of 500 kW DC de-Icer in China Southern Power grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2 (4) : 32-36.
- [9] 梁一桥. 具有静止式动态无功补偿功能的直流大电流融冰装置: 中国, 200810060026[P]. 2008-08-06.
LIANG Yi-qiao. DC-deicer with SVC function: China, 200810060026[P]. 2008-08-06.
- [10] 彭卫, 李晓莉, 谭富堂, 等. 融冰装置在韶关现场试验成功. [N/OL]. 2009-03-01. http://www.ycwb.com.
PENG Wei, LI Xiao-li, TAN Fu-tang, et al. DC-deicer is tested and operated successfully in shaoguan[N/OL]. 2009-03-01. http://www.ycwb.com.
- [11] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
DAI Xi-jie. Basic of HVDC[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990.
- [12] 黄凯. 交直流混合电力系统概率稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
HUANG Kai. The probabilistic stability research for hybrid AC/DC power system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002.
- [13] Sood V K. HVDC and FACTS controllers[M]. Netherlands: KAP, 2004.

收稿日期: 2009-08-21; 修回日期: 2009-10-21

作者简介:

郭捷(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柔性交直流输电技术; E-mail: guojie@zju.edu.cn

江道灼(1960-), 男, 教授, 主要研究方向是交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术等; E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

李海翔(1963-), 男, 教授级高工, 浙江省电力公司总工程师, 主要研究方向为电力系统运行、调度控制技术。

(上接第 33 页 continued from page 33)

QUAN Yu-sheng, WANG Xiao-rong, YANG Min-zhong, et al. Two new algorithms and their robustness for two-terminal fault location on HV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 28-32.

作者简介:

林富洪(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zhubolinfuluhong@163.com

王增平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等;

李金龙(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统广域保护。

收稿日期: 2009-08-12; 修回日期: 2009-11-03