

基于 Stehfest 算法的配网单相接地故障双端测距方法

唐昆明¹, 杨伟¹, 张太勤², 唐辰旭³, 龙泓吉¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 重庆新世杰电气有限公司, 重庆 400030; 3. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 提出了一种基于 Stehfest 算法的双端测距方法。该方法采用配网单相接地故障后半周期内的零序电压、电流暂态信息, 由 Prony 算法得到其时域表达式, 利用零序网络以及线路分布参数的象函数模型, 在不考虑线路零序参数的频率特性和考虑其频率特性两种情况下, 分别列出线路的象函数测距方程。通过 Stehfest 算法对测距方程进行数值反演计算, 并用搜索法求取区间内测距方程的最小值, 得到方程的数值计算矩阵, 进而以该矩阵行元素平方和最小为目标, 确定故障距离。大量的 EMTP-ATP 仿真实验验证了该方法的正确性。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 零序网络; 象函数模型; 频率特性; Stehfest 算法

A new two-terminal fault location method for distribution network based on Stehfest algorithm

TANG Kunming¹, YANG Wei¹, ZHANG Taiqin², TANG Chenxu³, LONG Hongji¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Xinshijie Electric Power Corporation, Chongqing 400030, China; 3. Deyang Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Co., Deyang 618000, China)

Abstract: This paper proposes a new two-terminal fault location method based on Stehfest algorithm. The method uses zero-sequence transient information within first half-cycle after a single-phase ground fault occurred in the distribution network, adopts Prony algorithm to obtain time domain expression of zero-sequence transient information, combines with zero sequence network and image function of distributed parameter line, takes frequency characteristics of lines' zero sequence parameters into account and gets the image function location equation by using the fault feature. Then Stehfest algorithm is adopted to get location equation's numerical inversion and search algorithm is used to find the minimum value of function location equation and obtain the numerical matrix. Last, the method calculates square sums of matrix row elements and takes the minimum value as the target to determine the fault distance. The accuracy and effectiveness of the method has been verified by EMTP-ATP simulation experiments.

Key words: distribution network; single phase grounded fault; zero sequence network; image function model; frequency characteristics; Stehfest algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0076-08

0 引言

目前我国中压配电网属于小电流接地系统, 发生单相接地故障的机率占配电网故障的 80%以上^[1-2], 且绝大多数是瞬时性故障。由于配网单相接地故障后的稳态电流微弱, 特征不明显, 传统的基于故障稳态量的测距方法^[3-7]会受到一定限制。然而, 故障后的暂态信息明显, 完整地反映了故障发生的过程和特点, 不仅能定位永久性的故障点, 而且能定位瞬时性的故障点, 所以基于暂态信息的测距方法更具有研究价值。

现有的基于暂态信息的配网单相接地故障测距方法主要有行波法^[8-10]和故障分析法^[11-15]。行波法由于受行波折反射波识别困难、出口短路存在死区及硬件造价高的影响, 在配网中的应用仍有待研究, 因此故障分析法成为目前配网测距研究的热点。文献[11]通过迭代估算对侧电流, 修正流过故障点的电流, 提出了一种基于微分方程的单端故障测距新方法, 但其线路模型未考虑线路的分布电容, 测距存在一定的误差。文献[12]利用五次谐波实现测距, 但五次谐波分量难以保证在每次故障中都能提取得到。文献[13]基于线路分布参数的改进时域模型,

提出一种双端测距方法, 但该方法需解决暂态数据的高阶求导问题, 对暂态数据拟合的要求较高, 否则会影响测距精度。另外, 大多暂态测距方法均未考虑线路参数的频率特性, 会带来一定的计算误差。

综上, 本文将采用单相接地故障后半周期内的零序电压电流暂态信息, 由 Prony 算法得到其时域表达式, 利用零序网络及线路分布参数的象函数模型, 在不考虑线路零序参数的频率特性和考虑其频率特性两种情况下, 分别列写象函数测距方程。然后通过 Stehfest 算法对方程进行数值反演, 并用搜索法求取区间内测距方程的最小值, 得到测距方程的数值计算矩阵, 进而以该矩阵行元素平方和最小为目标, 确定故障距离。最后通过 EMTP-ATP 仿真计算验证本文算法的正确性, 并通过测距结果对比, 得到线路参数的频率特性对测距精度的影响。

1 线路模型及零序参数的频率特性

1.1 线路分布参数的象函数模型

传统的线路模型主要有集中参数模型、双曲函数模型和贝瑞隆模型。在暂态计算中, 高频分量的个数与对地电容的个数相同, 当采用一个集中(或 T)型模型时, 只能解得一个高频分量。而理论上, 接地电流中含无数多个高频分量。显然, 集中参数模型较为简单, 不易满足暂态计算的要求; 双曲函数线路模型适用于稳态相量计算; 贝瑞隆模型中采用的集中电阻会带来一定的计算误差。故本文将采用适用于暂态计算的线路分布参数的象函数模型^[16]。

实际线路可等效为无数个微元组成, 如图 1 所示。其中 R_0 、 L_0 、 C_0 、 G_0 分别为输电线路单位长度的电阻、电感、电容和电导; Δx 为线路微元长度; l 为线路总长度(单位: km)。

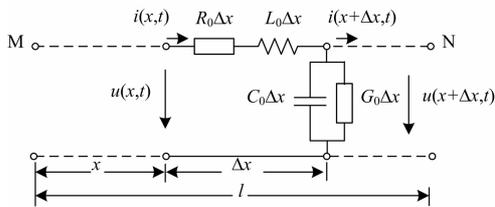


图 1 均匀传输线电路模型

Fig. 1 Uniform transmission line equivalent circuit model

推导可得到传输线的电报方程为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R_0 i(x,t) + L_0 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G_0 u(x,t) + C_0 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

通过对式(1)进行拉氏变换、求解二阶微分方程后, 可得零状态网络的分布参数线路模型的运算模

型为

$$\begin{bmatrix} U(x,s) \\ I(x,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\gamma(s)x & Zc(s)sh\gamma(s)x \\ \frac{sh\gamma(s)x}{Zc(s)} & ch\gamma(s)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_M(s) \\ I_M(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x 表示故障点与首端的距离;

$\gamma(s) = \sqrt{(R_0 + sL_0)(G_0 + sC_0)}$ 为线路的传播系数;

$Zc(s) = \sqrt{(R_0 + sL_0)/(G_0 + sC_0)}$ 表示线路的波阻抗。

1.2 零序参数的频率特性

零序电压、零序电流的暂态信息中含有不同的频率成分, 故在计算时, 不同的频率分量应对其相应频率下的零序参数, 因此在测距计算中应考虑线路参数的频率特性。

由于大地回路的趋表效应与频率密切相关, 使得输电线路零序参数随频率而变化。通过利用卡松(Carson)公式^[17]的分析计算可得零序参数的频率特性如图 2 所示。

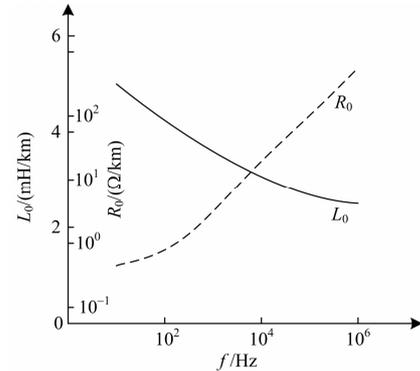


图 2 零序电阻、零序电感的频率特性

Fig. 2 Frequency characteristics of zero-sequence resistance and zero-sequence inductance

2 基于 Stehfest 算法的双端测距方法

2.1 Stehfest 反演算法

本文选用线路分布参数的象函数模型进行测距研究, 在计算求解时需对象函数进行拉氏反变换。采用围线积分法时需要计算被积表达式在各极点上的留数, 但当表达式比较复杂或存在多重极点时, 微分运算用手工实现比较困难, 借助计算机运算时由于数值微分算法具有数值不稳定性使得运算误差不易控制, 而 Stehfest 算法可在计算机辅助下近似实现拉普拉斯反变换, 为此本文将采用 Stehfest 算法。

Stehfest 数值反演^[18]是 Stehfest 提出的 Laplace 数值反演的一个计算公式:

$$f(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^N V_i F(s_i) \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} V_i = (-1)^{\frac{N}{2}+1} \sum_{k=\text{int}(\frac{i+1}{2})}^{\min(i, \frac{N}{2})} \frac{k^{\frac{N}{2}+1} (2k)!}{(\frac{N}{2}-k)!(k!)^2(i-k)!(2k-i)!} \\ s_i = \frac{\ln 2}{t} i \end{cases}$$

式中, N 为偶数, Stehfest 推荐 N 在 4~32 之间选取, 一般情况下取 16。为验证 N 的取值, 针对本文的象函数形式, 以一个已知的暂态信号为例, 通过采用不同的 N 值, 求取其真实值与 Stehfest 算法计算值的残差平方和, 选取残差平方和最小时的 N 值。假设信号的时域表达式为

$$f(t) = 4300e^{-643t} \sin(2449t + 0.977)$$

其象函数为

$$F(s) = 4300 \frac{(s + 643) \sin 0.977 + 2449 \cos 0.977}{(s + 643)^2 + 2449^2}$$

采用 Stehfest 算法, 计算 $t=0.001, 0.002, \dots, 0.01$ 时的值, 可得到结果如图 3 所示。

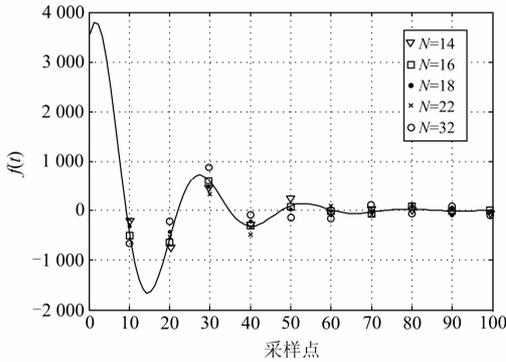


图 3 Stehfest 算法数值计算

Fig. 3 Numerical calculation of Stehfest algorithm

同时, 计算这十个点的真实值与计算值的残差平方和, 结果如表 1 所示。

表 1 残差平方和

Table 1 Residual sum of squares

N	14	16	18	22	32
残差平方和	1 020.5	150.5	1 010.5	2 308.6	15 000.5

由此可见, 对于此类型的象函数和本文所需计算的采样时刻, $N=16$ 时的拉氏反变换的数值计算残差平方和最小。因此在本文计算中, 选取 Stehfest 算法中的 $N=16$ 。

2.2 不考虑线路参数频率特性的测距方法

为不失一般性, 假设线路为均匀传输线, 其参数恒定, 当距离首端 M 端 $x(\text{km})$ 处发生单相接地故障后, 有故障线路在零序网络中的象函数等效电路如图 4 所示。

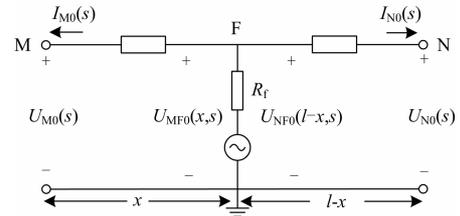


图 4 零序网络象函数等效电路

Fig. 4 Equivalent image function circuit of zero sequence network

设线路单位长度的零序参数分别为: R_0, L_0, C_0 (忽略线路的电导 G_0)。由线路两端的采样信息, 根据 Prony 算法, 可得 M 端和 N 端的零序电压、零序电流的时域表达式分别为: $u_{M0}(t), i_{M0}(t), u_{N0}(t), i_{N0}(t)$, 进而可得其象函数。

以实际容性无功功率方向为参考方向, 结合式 (1)、式 (2) 的线路模型, 可由 M 端算得故障点 F 处的零序电压象函数为

$$U_{MF0}(x, s) = U_{M0}(s) \text{ch} \gamma(s)x + Z_C(s) I_{M0}(s) \text{sh} \gamma(s)x \quad (4)$$

式中: 传播系数 $\gamma(s) = \sqrt{(R_0 + sL_0)sC_0}$; 波阻抗 $Z_C(s) = \sqrt{(R_0 + sL_0)/sC_0}$ 。

同理, 亦可由 N 端算得故障点 F 处的零序电压象函数为

$$U_{NF0}(l-x, s) = U_{N0}(s) \text{ch} \gamma(s)(l-x) + Z_C(s) I_{N0}(s) \text{sh} \gamma(s)(l-x) \quad (5)$$

根据线路单相接地故障后, 零序电压的分布特点可知, 由线路 M 端和 N 端分别推算至故障点处的零序电压象函数相等的原理, 有测距方程为

$$F(x, s) = U_{MF0}(x, s) - U_{NF0}(l-x, s) = 0 \quad (6)$$

将式 (4)、式 (5) 代入式 (6), 化简后可得故障距离的表达式如式 (7) 所示。

$$x(s) = \frac{\ln \left\{ \frac{e^{\gamma(s)l} [U_N(s) + I_N(s)Z_C(s)] - U_M(s) + I_M(s)Z_C(s)}{U_M(s) + I_M(s)Z_C(s) - e^{-\gamma(s)l} [U_N(s) - I_N(s)Z_C(s)]} \right\}}{2\gamma(s)} \quad (7)$$

因此, 可利用 Stehfest 算法对式 (7) 进行拉氏反变换, 计算每个采样时刻所对应的故障距离 $x(t_i)$, 从而可得故障距离为

$$x = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n x^2(t_i)} \quad (8)$$

式中, n 为采样点的个数。

大量实验发现, 若直接对式 (7) 进行拉氏反变换, 计算较为复杂, 且存在较大的累积误差, 计算精度不高, 故本文直接对象函数测距方程进行拉氏

反变换, 即将 $u_{M0}(t)$ 、 $i_{M0}(t)$ 、 $u_{N0}(t)$ 、 $i_{N0}(t)$ 的象函数表达式以及式(4)、式(5)代入式(6)得表达式如式(9)

$$\begin{aligned}
 F(x, s) = & e^{\gamma(s)x} \left\{ \sum_{k=0}^P U_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \varphi_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \varphi_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} + Z_C(s) \sum_{k=0}^P I_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \delta_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \delta_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} - \right. \\
 & e^{\gamma(s)l} \left[\sum_{k=0}^Q U_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \varphi_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \varphi_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} - Z_C(s) \sum_{k=0}^Q I_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \delta_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \delta_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} \right] \left. \right\} + \\
 & e^{-\gamma(s)x} \left\{ \sum_{k=0}^P U_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \varphi_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \varphi_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} - Z_C(s) \sum_{k=0}^P I_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \delta_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \delta_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} - \right. \\
 & e^{\gamma(s)l} \left[\sum_{k=0}^Q U_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \varphi_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \varphi_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} + Z_C(s) \sum_{k=0}^Q I_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \delta_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \delta_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} \right] \left. \right\} = 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

用 Stehfest 算法对上式进行拉氏反变换, 可计算得到采样点为 t_i 时刻的时域测距方程 $f(x, t_i)$, 同时采用搜索法求取 $f(x, t_i)$ 在搜索区间内的最小值, 记 $\min f(x, t_i) = f(x_i, t_i)$, 即可得到 t_i 时刻所对应的故障距离 x_i , 其中搜索区间为线路全长 $l(\text{km})$, 搜索步长为 1 m 。由 x_i 、 t_i 可得测距方程的数值计算矩阵为

$$\mathbf{F}_{n \times n} = \begin{bmatrix} f_{11}(x_1, t_1) & f_{12}(x_1, t_2) & \cdots & f_{1n}(x_1, t_n) \\ f_{21}(x_2, t_1) & f_{22}(x_2, t_2) & \cdots & f_{2n}(x_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1}(x_n, t_1) & f_{n2}(x_n, t_2) & \cdots & f_{nn}(x_n, t_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合最小二乘的思想, 求取式(10)中, 每行元素算术平方和的最小值, 即有目标函数:

$$\min[X_{n \times 1}] = \min \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n f_{1i}^2 \\ \sum_{i=1}^n f_{2i}^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n f_{ni}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

若式(11)中的最小元素在第 j 行, 即可确定故障距离 $x_j (j \in n)$ 。

本文以 YJV22-3*185 型 10 kV 电缆线路为例, 仿真设定其全长为 10 km。采样得到线路 M、N 两端零序电压 $u_{M0}(t)$ 、 $u_{N0}(t)$, 零序电流 $i_{M0}(t)$ 、 $i_{N0}(t)$ (采样频率 10 kHz, 时间窗为故障后的 10 ms)。利用本文的双端测距算法, 在不考虑线路参数频率特性的情况下, 由两端分别算至故障点的零序电压 $u_{MF0}(t)$ 、 $u_{NF0}(t)$ 和故障点的零序电压 $u_{F0}(t)$ 采样值如图 5 所示。

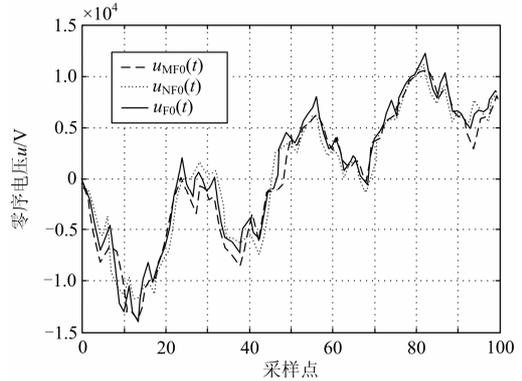


图 5 故障点的采样值与计算值

Fig. 5 Sampling and calculated values at fault location

可见, 在不考虑线路参数的频率特性的情况下, 两端算至故障的零序电压与故障点本身的零序电压之间存在一定的误差, 测距结果存在较大的误差。因此, 为了提高测距的精度, 单相接地故障测距应考虑线路的频率特性。

2.3 考虑线路参数频率特性的测距方法

由本文 1.2 节可知, 线路的零序电阻和零序电感的值是频率的函数, 而零序电容的值为常数, 即为 $R_0(\omega)$ 、 $L_0(\omega)$ 、 C_0 。而零序电压、零序电流中含有丰富的频率信息, 故在计算时, 不同的频率分量应对应其相应频率下的零序参数。考虑到问题的完整性, 本文同时提出考虑参数频率特性的双端测距方法。

根据线路上电压电流的分布及象函数线路模型, 由 M 端算得故障点 F 处的零序电压象函数为

$$U_{MF0}^{\omega_{Mk}}(x, s) = \quad (12)$$

$$U_{M0}(s) \text{ch} \gamma^{\omega_{Mk}}(s)x + Z_C^{\omega_{Mk}}(s) I_{M0}(s) \text{sh} \gamma^{\omega_{Mk}}(s)x$$

式中: 传播系数 $\gamma^{\omega_{Mk}}(s) = \sqrt{(R_0^{\omega_{Mk}} + sL_0^{\omega_{Mk}})sC_0}$;

波阻抗 $Z_C^{\omega_{Mk}}(s) = \sqrt{(R_0^{\omega_{Mk}} + sL_0^{\omega_{Mk}})/sC_0}$ 。

同理, 亦可由 N 端算得故障点 F 处的零序电压象函数为

$$U_{NF0}^{(\omega_{Nk})}(l-x, s) = U_{N0}(s)ch\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)(l-x) + Z_C^{(\omega_{Nk})}(s)I_{N0}(s)sh\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)(l-x) \quad (13)$$

式中: 传播系数 $\gamma^{(\omega_{Nk})}(s) = \sqrt{(R_0^{(\omega_{Nk})} + sL_0^{(\omega_{Nk})})/sC_0}$;

$$F^{(\omega)}(x, s) = \sum_{k=0}^P e^{-\gamma^{(\omega_{Mk})}(s)x} \left[U_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \varphi_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \varphi_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} + Z_C^{(\omega_{Mk})}(s) I_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \delta_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \delta_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} \right] + \sum_{k=0}^P e^{-\gamma^{(\omega_{Mk})}(s)x} \left[U_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \varphi_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \varphi_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} - Z_C^{(\omega_{Mk})}(s) I_{M0k} \frac{(s + \tau_{Mk}) \sin \delta_{Mk} + \omega_{Mk} \cos \delta_{Mk}}{(s + \tau_{Mk})^2 + \omega_{Mk}^2} \right] - \left[\sum_{k=0}^Q e^{-\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)l} \left\{ e^{-\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)l} \left[U_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \varphi_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \varphi_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} - Z_C^{(\omega_{Nk})}(s) I_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \delta_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \delta_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} \right] \right\} + \left[\sum_{k=0}^Q e^{-\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)x} \left\{ e^{-\gamma^{(\omega_{Nk})}(s)l} \left[U_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \varphi_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \varphi_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} + Z_C^{(\omega_{Nk})}(s) \sum_{k=0}^Q I_{N0k} \frac{(s + \tau_{Nk}) \sin \delta_{Nk} + \omega_{Nk} \cos \delta_{Nk}}{(s + \tau_{Nk})^2 + \omega_{Nk}^2} \right] \right\} \right] = 0 \quad (15)$$

利用 Stehfest 算法对式(15)进行拉氏反变换, 计算得到采样点为 t_i 时刻的时域测距方程 $f^{(w)}(x, t_i)$, 同时采用搜索法求取 $f^{(w)}(x, t_i)$ 在搜索区间内的最小值 $f^{(w)}(x_i, t_i)$ (搜索全长和搜索步长如前所述), 从而得到考虑了线路参数频率特性的测距方程的数值计算矩阵为

$$F_{n \times n}^{(\omega)} = \begin{bmatrix} f_{11}^{(\omega)}(x_1, t_1) & f_{12}^{(\omega)}(x_1, t_2) & \cdots & f_{1n}^{(\omega)}(x_1, t_n) \\ f_{21}^{(\omega)}(x_2, t_1) & f_{22}^{(\omega)}(x_2, t_2) & \cdots & f_{2n}^{(\omega)}(x_2, t_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1}^{(\omega)}(x_n, t_1) & f_{n2}^{(\omega)}(x_n, t_2) & \cdots & f_{nm}^{(\omega)}(x_n, t_n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

再令目标函数为

$$\min[X_{n \times 1}^{(\omega)}] = \min \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n f_{1i}^{(\omega)2} \\ \sum_{i=1}^n f_{2i}^{(\omega)2} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n f_{ni}^{(\omega)2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

同样以 YJV22-3*185 型 10 kV 电缆线路为例, 该型号电缆零序电阻和零序电感的参数及频率特性如图 6 所示。

在考虑线路参数频率特性的情况下, 利用本文的双端测距方法, 由两端分别算至故障点的零序电压 $u_{MF0}(t)$ 和 $u_{NF0}(t)$ 如图 7 所示。

可见, 在考虑了线路参数的频率特性后, 由两端算至故障点的零序电压的差值更小, 有利于减小测距误差, 且两者更接近于故障点本身的零序电压 $u_{F0}(t)$, 使得测距结果更精确。

波阻抗 $Z_C^{(\omega_{Nk})}(s) = \sqrt{(R_0^{(\omega_{Nk})} + sL_0^{(\omega_{Nk})})/sC_0}$ 。

因此, 象函数测距方程为

$$F^{(\omega)}(x, s) = U_{MF0}^{(\omega_{Mk})}(x, s) - U_{NF0}^{(\omega_{Nk})}(l-x, s) = 0 \quad (14)$$

将 $u_{M0}(t)$ 、 $i_{M0}(t)$ 、 $u_{N0}(t)$ 、 $i_{N0}(t)$ 的象函数及式(12)、式(13)代入式(14)得表达式如式(15)所示。

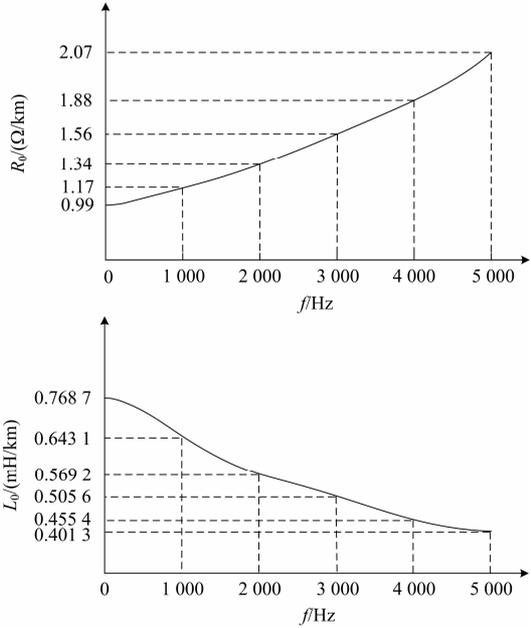


图 6 YJV22-3*185 型电缆参数的频率特性
Fig. 6 Frequency characteristics of YJV22-3*185 cable

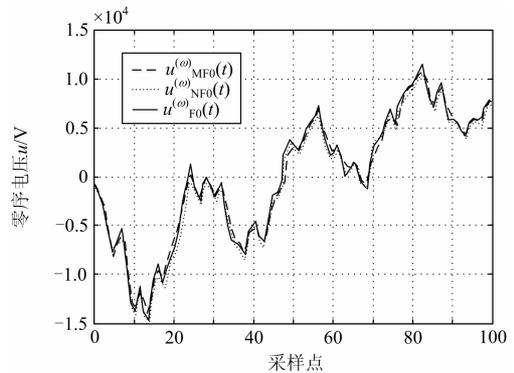


图 7 故障点的采样值与计算值
Fig. 7 Sampling and calculated values at fault location

3 双端测距的仿真实验及结果分析

3.1 仿真模型及参数

为验证双端测距方法的正确性与实用性, 利用 ATP-EMTP 仿真软件建立 10 kV 配电网仿真模型。其中, 线路为频变参数线路, 并以 A 相为参考, 进行单相接地故障的仿真实验, 将仿真后的数据导入 Matlab 进行测距计算, 搜索计算的时刻 t_i 取故障后的 0.001 s, 0.002 s, ..., 0.01 s, 共 10 个点。仿真模型的采样频率 $f_s=10$ kHz, 暂态数据的时间窗为 10 ms。

如图 8 所示, 上级电源为理想无穷大功率电源, 变压器变比为 110/10.5 kV, 容量为 31.5 MVA, Z 型变压器中性点通过开关 K 与消弧线圈串联电阻接地, 设置过补偿度 $P=8\%$ 。电缆型号为 YJV22-3*185, 其工频参数为: $R_1=R_2=0.32 \Omega/\text{km}$, $R_0=0.99 \Omega/\text{km}$, $L_1=L_2=0.2197 \text{ mH}/\text{km}$, $L_0=0.7687 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=0.519 \mu\text{F}/\text{km}$, 该电缆参数的频率特性如图 6 所示。负荷 LD 有功为 1 MW, 无功为 0.4 Mvar(滞后)。测距相对误差= $|\text{计算故障距离}-\text{实际}$

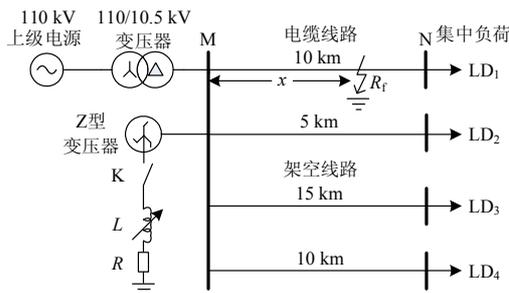


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

故障距离|/实际故障距离 $\times 100\%$ 。

3.2 仿真结果分析

本文设置了不同的仿真条件来模拟线路发生单相接地故障, 并在不考虑线路零序参数的频率特性和考虑其频率特性两种情况下, 进行测距计算。

1) 改变故障位置。系统中性点不接地, 故障初始相角 φ 为 90° , 过渡电阻为 20Ω , 故障点距首端分别为 2 km、4 km、6 km、8 km, 进行测距计算, 可得结果如表 2 所示。

表 2 不同故障点的测距计算结果

Table 2 Fault location result at different fault points

$x_{\text{实}}$	不及线路参数的频率特性			计及线路参数的频率特性		
	$\min \sum f^2$	$x_{\text{计}}$	$\varepsilon / \%$	$\min \sum f^{(\omega)^2}$	$x_{\text{计}}$	$\varepsilon / \%$
2	337.89	2.050	2.50	145.93	1.991	0.45
4	271.15	3.912	2.20	134.87	4.008	0.2
6	288.43	5.928	1.20	137.15	6.007	0.117
8	323.71	8.152	1.90	142.64	8.011	0.1375

其中, 本表格及以下表格中, $x_{\text{实}}$ 表示实际故障距离, 单位 km; $x_{\text{计}}$ 表示计算故障距离, 单位 km; ε 表示相对误差。

2) 不同的故障初始角。系统中性点不接地, 过渡电阻为 20Ω , 本文将故障初始角 φ 分别设置为 0° 、 30° 、 60° 、 90° , 同时在不同的故障位置进行测距计算, 可得结果如表 3 所示。

3) 不同的中性点运行方式。本文研究在系统中性点不接地、经消弧线圈接地、经电阻接地三种情况下, 故障点在 2 km、4 km、6 km、8 km 处的测距结果。仿真条件为: 故障初始角为 90° , 过渡电阻为 20Ω 。经计算, 可得结果如表 4 所示。

表 3 不同故障初始相角的测距计算结果

Table 3 Fault location result with different initial phase angle

$\varphi / (^\circ)$	$x_{\text{实}}$	不及线路参数的频率特性			计及线路参数的频率特性		
		$\min \sum f^2$	$x_{\text{计}}$	$\varepsilon / \%$	$\min \sum f^2$	$x_{\text{计}}$	$\varepsilon / \%$
0	2	381.15	2.050	2.50	170.44	1.989	0.55
	4	323.29	3.912	2.20	163.49	4.010	0.25
	6	333.45	5.927	1.22	160.51	5.992	0.133
	8	390.76	8.152	1.90	175.82	8.013	0.1625
30	2	358.65	2.052	2.60	159.13	1.989	0.65
	4	299.37	3.908	2.30	151.37	4.009	0.225
	6	310.21	5.926	1.23	148.33	6.008	0.133
	8	365.15	8.150	1.875	160.54	7.987	0.1625
60	2	345.12	2.052	2.60	150.98	2.012	0.4
	4	286.45	3.910	2.25	145.12	3.992	0.2
	6	290.52	5.925	1.23	140.61	5.993	0.167
	8	349.01	8.152	1.90	152.77	8.012	0.15
90	2	337.89	2.050	2.50	145.93	1.991	0.45
	4	271.15	3.912	2.20	134.87	4.008	0.2
	6	288.43	5.928	1.20	137.15	6.007	0.117
	8	323.71	8.152	1.90	142.64	8.011	0.1375

表 4 不同中性点运行方式下的测距计算结果

Table 4 Fault location result with different earthed neutral modes

中性点运行方式	$x_{实}$	不及线路参数的频率特性			计及线路参数的频率特性		
		$\min \sum f^2$	$x_{计}$	$\varepsilon/\%$	$\min \sum f^2$	$x_{计}$	$\varepsilon/\%$
不接地	2	337.89	2.053	2.65	145.93	1.991	0.45
	4	271.15	3.915	2.125	134.87	4.008	0.2
	6	288.43	5.926	1.233	137.15	6.007	0.117
	8	323.71	8.150	1.875	142.64	8.011	0.137 5
经消弧线圈接地	2	348.22	2.052	2.60	150.76	2.012	0.6
	4	285.36	3.910	2.25	143.18	4.010	0.25
	6	296.75	5.925	1.23	141.53	6.009	0.15
	8	354.68	8.152	1.90	153.91	8.013	0.162 5
经电阻接地	2	350.73	2.050	2.50	152.33	2.011	0.55
	4	283.14	3.912	2.20	145.54	3.992	0.2
	6	290.54	5.927	1.22	143.37	5.991	0.15
	8	359.19	8.152	1.90	155.22	8.012	0.15

在不考虑线路零序参数的频率特性和考虑其频率特性两种情况下, 仿真结果均验证了本文所提出的双端测距方法基本不受故障位置、故障初始角、中性点接地方式的影响, 但在考虑线路零序参数的频率特性的情况下, 测距结果比较精确, 能满足实际应用要求。

4 结论

为解决配网单相接地故障问题, 本文提出了一种基于 Stehfest 算法的双端测距方法。该方法利用线路分布参数的象函数模型, 得到了双端测距的象函数方程及故障距离的象函数表达式; 利用 Stehfest 算法成功解决了由 S 域反演回时域以及故障距离的求解问题, 并消除了直接进行拉氏反变换存在的累积误差; 对比不考虑线路零序参数的频率特性和考虑其频率特性两种情况, 表明在利用故障后暂态数据进行测距分析计算时, 考虑线路参数的频率特性可以提高测距的精度。

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, 2007: 260-285.

[2] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.

JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.

[3] 王奎鑫, 唐毅, 陈平, 等. 基于组合行波原理的高压架空线—电缆混合线路故障测距方法[J]. 电力系统保护

与控制, 2012, 40(10): 90-94.

WANG Kuixin, TANG Yi, CHEN Ping, et al. Fault location method based on combined travelling wave principle for high-voltage overhead-cable lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 90-94.

[4] 夏伟伟, 袁振海, 黄锋, 等. 基于零序直流原理的单分支故障电缆测距模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 126-131.

XIA Weiwei, YUAN Zhenhai, HUANG Feng, et al. Study on the model of single cable fault location based on zero sequence DC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 126-131.

[5] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据 S 变换能量的缆-线配电网故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 152-159.

SHU Hongchun, PENG Shixin. A fault line detection algorithm for distribution network of overhead line and underground cable mixed lines using S-transform energy from short window data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 152-159.

[6] SILVEIRA E G, PEREIRA C. Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 20(1): 498-499.

[7] 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 Zexiang, LIU Yonghao, 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.

[8] 王敏, 王磊, 陈平. 基于行波原理的 10 kV 电缆单环网

- 故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 38-42.
- WANG Min, WANG Lei, CHEN Ping. Research on fault location of 10 kV single ring cable feeder based on traveling wave principle[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 38-42.
- [9] 全玉生, 李平, 张煜, 等. 基于微分方程的单端故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 47-50.
- QUAN Yusheng, LI Ping, ZHANG Yu, et al. A new one-terminal fault location algorithm based on differential equation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 47-50.
- [10] 胥杰, 张永健, 孙嘉, 等. 基于模式识别的单端行波测距研究[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 28-33.
- XU Jie, ZHANG Yongjian, SUN Jia, et al. Single terminal travelling waves location based on pattern recognition[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 28-33.
- [11] 黄强, 王毅, 刘思佳. 五次谐波法对小电流接地系统的故障定位[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(1): 122-124.
- HUANG Qiang, WANG Jia, LIU Sijia. Fault location for undercurrent earthed system by quintuple harmonics[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2008, 15(1): 122-124.
- [12] 姜杰, 王鹏, 黄正炫, 等. 基于改进线路参数模型的配网电缆单相接地测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 185-189.
- JIANG Jie, WANG Peng, HUANG Zhengxuan, et al. Fault location of single-phase earth for power cable in distribution network based on improved cable line parameters model[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 185-189.
- [13] 唐昆明, 唐辰旭, 罗建, 等. 基于 RLC 模型数辨识的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 54-60.
- TANG Kunming, TANG Chenxu, LUO Jian, et al. A single-ended time domain fault location method for distribution network cable single-phase earth fault based on RLC model parameter identification[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 54-60.
- [14] 唐昆明, 唐辰旭, 罗建. 一种基于特征根的配电网单端故障测距的新方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 762-767.
- TANG Kunming, TANG Chenxu, LUO Jian. A new method of single terminal fault location for distribution network based on eigenvalue[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 762-767.
- [15] 全玉生, 李平, 张煜, 等. 基于主导谐波频率的超高压输电线路单端故障测距算法[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 33-38.
- QUAN Yusheng, LI Ping, ZHANG Yu, et al. EHV power transmission line single-ended fault location algorithms based on dominant harmonic frequency[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 33-38.
- [16] 李友军, 徐丽娜. 电力系统接地短路故障中零模分量的依频关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(15): 4-8.
- LI Youjun, XU Lina. Relationship between earth mode surge and frequency on power system earth fault[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(15): 4-8.
- [17] DOMMEL H W, 李永庄, 林集明, 等. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [18] STEHFEST H. Remark on algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms[J]. Communication of ACM, 1970, 13(1): 47-49.

收稿日期: 2014-10-05

作者简介:

唐昆明(1959-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统保护与综合自动化等;

杨伟(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及自动化. E-mail: cqyweiup@163.com

(编辑 魏小丽)