

# 基于 RLC 模型参数辨识的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法

唐昆明<sup>1</sup>, 唐辰旭<sup>1</sup>, 罗建<sup>1</sup>, 张太勤<sup>2</sup>, 黄翰<sup>3</sup>

(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. 国网重庆市电力公司璧山供电分公司, 重庆 402760)

**摘要:** 提出了一种基于 RLC 模型的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法。该方法利用配网电缆单相接地故障后的暂态信息并结合故障状态网络与零模网络, 建立时域测距方程, 实现故障测距, 且对过渡电阻及其两侧的等值对地电容进行了辨识求值。该算法避免了故障后消弧线圈补偿使得稳态残流微弱、过渡电阻、故障初始角及中性点运行方式等因素对测距精度的影响。大量的 EMTP 数字仿真结果验证了该算法的正确性, 且具有较高的测距辨识精度。测距平均误差在 10 m 内, 最大相对误差小于 0.113%, 计算过渡电阻的最大相对误差小于 1.637%, 满足实际工程应用需求。

**关键词:** 配网电缆; 单相接地故障; 暂态信息; RLC 模型; 单端测距; 参数辨识

## A single-ended time domain fault location method for distribution network cable single-phase earth fault based on RLC model parameter identification

TANG Kun-ming<sup>1</sup>, TANG Chen-xu<sup>1</sup>, LUO Jian<sup>1</sup>, ZHANG Tai-qin<sup>2</sup>, HUANG Han<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Xinshijie Electric Power Corporation, Chongqing 400030, China; 3. Bishan Power Supply Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402760, China)

**Abstract:** This paper presents a single-ended time domain fault location method for distribution network cable single-phase earth fault based on RLC model. The method uses the transient information at a distribution network cable single-phase ground fault to establish the time-domain ranging equation combining with fault state network and fault zero-mode network. The transition resistance and the equivalent capacitance to ground are identified and evaluated. The algorithm avoids the effect on the location accuracy by such factors as weak steady-state residual current caused by the fault arc suppression coil compensation, transition resistance, fault initial angle and the neutral point operation mode. EMTP digital simulation results verify the correctness of the algorithm, and show it has a high accuracy of identification and location. The ranging average error is within 10 m, the maximum relative error is less than 0.113%, and the maximum relative error of calculating the transition resistance is less than 1.637%, which meets the needs of practical application.

**Key words:** distribution network cable; single-phase earth fault; transient information; RLC model; single fault location; parameter identification

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0054-07

## 0 引言

配电网电缆的故障测距一直是电力系统故障分析中的难点, 其中单相接地故障次数约占总数的 70%~80%, 且在短时间内易变为相间故障, 影响电力系统的安全运行<sup>[1-2]</sup>。为解决配电网电缆故障的准确定位问题, 目前的方法主要有两大类。

(1) 行波法<sup>[3-7]</sup>。其基本原理是识别行波波头, 根据其到达测量点的时间, 结合行波波速进行故障

测距。但由于配电网分支多、结构复杂、线路较短等原因, 行波法在配电网中的应用还有待研究。

(2) 故障分析法<sup>[8-16]</sup>。根据其采用电气量的多少, 又可分为双端法和单端法。双端法主要基于从线路两端推算到故障点处, 电压相等的原理构建测距方程, 其原理简单、可靠, 但受双端非同步采样、系统通信设备的制约。另外, 故障后的稳态残流微弱, 信号不易提取。因此, 目前研究的热点是利用暂态信息进行单端法的故障测距。现有的方法主要

基于信号的特征频段 (SFB)、短窗能量, 并利用小波变换及沿线 FTU 作为检测点, 进行故障选线或区段定位<sup>[12-16]</sup>。

鉴于此, 本文提出了一种基于 RLC 模型的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法。该方法利用故障后的暂态信息, 结合故障状态网络与零模网络建立时域测距方程, 实现故障测距, 且对过渡电阻及其两侧的等值对地电容进行辨识求值。本文利用 ATP 建立仿真模型; 采用 Karenbuaer 相模变换对线路进行解耦, 提取暂态信息; 并利用中心差分法和 Prony 算法处理数据; 通过 Newton 法和最小二乘估算优化求取故障距离和辨识参数, 有效地验证了该算法的正确性和适用性。本文所提的方法主要针对直供负荷的单一电缆, 其参数均匀。对于带分支的情况, 则以两分支箱之间的电缆作为研究对象。而受篇幅所限, 缆-线混合线路的测距研究, 将作为本文的后续内容。

## 1 单端测距及参数辨识原理

如图1(a)所示, 某10 kV系统共3回电缆出线, 分别向负荷供电, 上级系统的等值电源及阻抗分别为 $E_M$ 、 $Z_M$ 。其中, 线路III的全长为 $l$  (km)。当距离母线端 $x$  (km) 处发生单相接地故障时, 接地电阻为 $R_f$ , 得到的零模等效网络如图1(b)所示, 并以零模电流的实际流向为参考方向。其中,  $u_{ma}$ 、 $i_{ma}$  分别为A相故障后, 母线 (M端) 所测故障相的电压、电流瞬时值;  $u_{m0}$ 、 $i_{m0}$  分别为M端的零模电压和零模电流瞬时值;  $i_{fa}$ 、 $i_{f0}$  分别为故障点的短路电流和零模电流瞬时值;  $R_1$ 、 $L_1$ 、 $R_0$ 、 $L_0$  分别为线路单

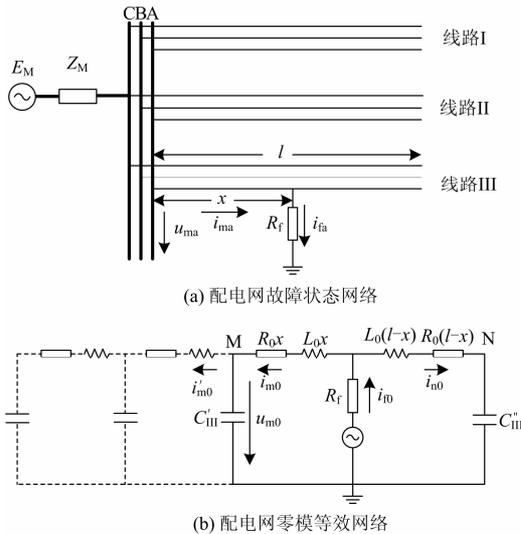


图1 配电网故障状态网络和零模等效网络

Fig. 1 Fault state network and zero-mode equivalent network

位长度的1模电阻、1模电感、0模电阻、0模电感。

由图1(a)可列写该系统模型故障相 (A相) 瞬时电压的时域微分方程

$$u_{ma} = R_1 x \left( i_{ma} + \frac{R_0 - R_1}{R_1} i_{m0} \right) + L_1 x \frac{d \left( i_{ma} + \frac{L_0 - L_1}{L_1} i_{m0} \right)}{dt} + i_{fa} \cdot R_f \quad (1)$$

同时, 在零模等效网络图1(b)中, 由于从电缆线路两端分别计算到故障点处的零模电压相等, 可列写关于故障距离 $x$ 的方程

$$u_{m0} + R_0 x \cdot i_{m0} + L_0 x \cdot \frac{di_{m0}}{dt} = R_0 (l - x) \cdot i_{n0} + L_0 (l - x) \cdot \frac{di_{n0}}{dt} + u_{C_{III}''} \quad (2)$$

式中:  $i_{n0}$  为故障点右端的零模电流瞬时值;  $u_{C_{III}''}$  为故障点右端等效对地电容的电压瞬时值。

实际情况中, M端所测得的零模电流为非故障线路的零模电流的总和<sup>[1]</sup>, 即为 $i'_{m0}$ , 故有

$$i_{m0} = i'_{m0} + C'_{III} \frac{du_{m0}}{dt} \quad (3)$$

式中,  $i'_{m0}$  为故障点左端的等效对地电容。

为消除右端零模电流 $i_{n0}$ 的影响, 需根据零模网络及故障点的边界条件:

$$i_{f0} = i_{m0} + i_{n0} \quad (4)$$

$$i_{fa} = 3i_{f0} \quad (5)$$

并将式(3)~式(5)代入式(1)可得

$$i_{n0} = \frac{1}{3R_f} \left\{ u_{ma} - R_1 x \left[ i_{ma} + \frac{R_0 - R_1}{R_1} (i'_{m0} + C'_{III} \frac{du_{m0}}{dt}) \right] - L_1 x \left[ \frac{di_{ma}}{dt} + \frac{L_0 - L_1}{L_1} \left( \frac{di'_{m0}}{dt} + C'_{III} \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2} \right) \right] \right\} - i'_{m0} - C'_{III} \frac{du_{m0}}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{di_{n0}}{dt} = \frac{1}{3R_f} \left\{ \frac{du_{ma}}{dt} - R_1 x \left[ \frac{di_{ma}}{dt} + \frac{R_0 - R_1}{R_1} \left( \frac{di'_{m0}}{dt} + C'_{III} \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2} \right) \right] - L_1 x \left[ \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} + \frac{L_0 - L_1}{L_1} \left( \frac{d^2 i'_{m0}}{dt^2} + C'_{III} \frac{d^3 u_{m0}}{dt^3} \right) \right] \right\} - \frac{di'_{m0}}{dt} - C'_{III} \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2} \quad (7)$$

$$\int_0^t i_{n0} dt = \frac{1}{3R_f} \left\{ -L_1 x \left[ i_{ma} + \frac{L_0 - L_1}{L_1} (i'_{m0} + C'_{III} \frac{du_{m0}}{dt}) \right] \int_0^t u_{ma} dt - R_1 x \left[ \int_0^t i_{ma} dt + \frac{R_0 - R_1}{R_1} \left( \int_0^t i'_{m0} dt + C'_{III} u_{m0} \right) \right] \right\} - \int_0^t i'_{m0} dt - C'_{III} u_{m0} \quad (8)$$

将式(6)~式(8)代入测距方程(2),化简后可得测距方程

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R_f} M_1(t) + \frac{x}{R_f} M_2(t) + \frac{x C'_{III}}{R_f} M_3(t) + \frac{x^2}{R_f} M_4(t) + \\ & \frac{x^2 C'_{III}}{R_f} M_5(t) + C'_{III} M_6(t) + \frac{1}{C''_{III}} M_7(t) + \\ & \frac{C'_{III}}{C''_{III}} M_8(t) + \frac{1}{R_f C''_{III}} M_9(t) + \frac{x}{R_f C''_{III}} M_{10}(t) + \\ & \frac{x C'_{III}}{R_f C''_{III}} M_{11}(t) = N(t) \end{aligned} \quad (9)$$

显然,式(9)是关于故障距离 $x$ 、过渡电阻 $R_f$ 、故障点两端等效对地电容 $C'_{III}$ 、 $C''_{III}$ 的时域非线性方程,其中:

$$\left\{ \begin{aligned} N &= u_{m0} + R_0 i'_{m0} + L_0 \frac{di'_{m0}}{dt} \\ M_1 &= \frac{1}{3} (R_0 l \cdot u_{ma} + L_0 \frac{du_{ma}}{dt}) \\ M_2 &= \frac{1}{3} \{-R_0 u_{ma} - L_0 \frac{du_{ma}}{dt} - R_0 l R_1 \cdot i_{ma} - \\ & \quad l(R_0 L_1 + L_0 R_1) \frac{di_{ma}}{dt} - L_0 l L_1 \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} - R_0 l (R_0 - R_1) i'_{m0} - \\ & \quad l[R_0(L_0 - L_1) + L_0(R_0 - R_1)] \frac{di'_{m0}}{dt} - L_0 l (L_0 - L_1) \frac{d^2 i'_{m0}}{dt^2}\} \\ M_3 &= \frac{1}{3} \{-R_0 l (R_0 - R_1) \frac{du_{m0}}{dt} - l[R_0(L_0 - L_1) + L_0(R_0 - R_1)] \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2} - \\ & \quad L_0 l (L_0 - L_1) \frac{d^3 u_{m0}}{dt^3}\} \\ M_4 &= \frac{1}{3} \{R_0 R_1 \cdot i_{ma} + (R_0 L_1 + L_0 R_1) \frac{di_{ma}}{dt} + L_0 L_1 \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} + \\ & \quad R_0 (R_0 - R_1) i'_{m0} + [R_0(L_0 - L_1) + L_0(R_0 - R_1)] \frac{di'_{m0}}{dt} + \\ & \quad L_0 (L_0 - L_1) \frac{d^2 i'_{m0}}{dt^2}\} \\ M_5 &= \frac{1}{3} \{R_0 (R_0 - R_1) \frac{du_{m0}}{dt} + [R_0(L_0 - L_1) + L_0(R_0 - R_1)] \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2} + \\ & \quad L_0 (L_0 - L_1) \frac{d^3 u_{m0}}{dt^3}\} \\ M_6 &= -l(R_0 \frac{du_{m0}}{dt} + L_0 \frac{d^2 u_{m0}}{dt^2}) \\ M_7 &= -\int_0^t i'_{m0} dt \quad M_8 = -u_{m0} \quad M_9 = \frac{1}{3} \int_0^t u_{ma} dt \\ M_{10} &= \frac{1}{3} [-R_1 \int_0^t i_{ma} dt - (R_0 - R_1) \int_0^t i'_{m0} dt - L_1 i_{ma} - (L_0 - L_1) i'_{m0}] \\ M_{11} &= -(R_0 - R_1) u_{m0} - (L_0 - L_1) \frac{du_{m0}}{dt} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

将故障后的4个暂态数据,分别代入式(10),计算相应时刻的测距方程系数,同时给定4个参数的初值,通过Newton法解得方程的初解为: $x^{(0)}$ 、 $R_f^{(0)}$ 、 $C'_{III}^{(0)}$ 、 $C''_{III}^{(0)}$ ,再由其余采样数据,对参数进行非线性最小二乘优化,即可求出 $x$ 、 $R_f$ 和辨识

出该线路模型的 $C'_{III}$ 、 $C''_{III}$ 。具体求解过程见2.3节。

## 2 数据处理及方程求解

### 2.1 相模变换

本文采用Karenbauer相模变换将其分解为0模、1模及2模系统,其变换形式为

$$\begin{bmatrix} i'_{m0}(t) \\ i'_{m1}(t) \\ i'_{m2}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ma}(t) \\ i_{mb}(t) \\ i_{mc}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

变换后的零模网络与零序网络具有相同的参数和电气特征。

### 2.2 暂态数据处理

计算式(10)时,需对采样的故障暂态数据及零模数据进行求导和积分,但信号中含有高次谐波分量,若直接对其进行简单的数值计算,可能导致结果发散,影响计算精度。因此本文分别采用中心差分算法和Prony算法<sup>[8]</sup>处理暂态数据。

以采样得到的零模电流 $i'_{m0}$ 为例,其中心差分求导分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di'_{m0}(t_K)}{dt} &= \frac{-i'_{m0}(t_K + 2\Delta t) + 8i'_{m0}(t_K + \Delta t) - 8i'_{m0}(t_K - \Delta t) + i'_{m0}(t_K - 2\Delta t)}{12\Delta t} + \\ & \quad \frac{12\Delta t}{12\Delta t} \\ \frac{di'^2_{m0}(t_K)}{dt^2} &= \frac{-i'_{m0}(t_K + 2\Delta t) + 16i'_{m0}(t_K + \Delta t) - 30i'_{m0}(t_K) + 16i'_{m0}(t_K - \Delta t) - i'_{m0}(t_K - 2\Delta t)}{12\Delta t^2} + \\ & \quad \frac{12\Delta t^2}{12\Delta t^2} \\ \frac{di'^3_{m0}(t_K)}{dt^3} &= \frac{-i'_{m0}(t_K + 3\Delta t) + 8i'_{m0}(t_K + 2\Delta t) - 13i'_{m0}(t_K + \Delta t) + 13i'_{m0}(t_K - \Delta t) - i'_{m0}(t_K - 2\Delta t) + i'_{m0}(t_K - 3\Delta t)}{8\Delta t^3} + \\ & \quad \frac{8\Delta t^3}{8\Delta t^3} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

同理,本文采用Prony算法对故障后1/4周波的暂态数据(采样频率为10kHz)进行数据拟合,再对拟合表达式进行求导和积分计算。零模电压电流的数据拟合结果如图2所示。

其暂态数据的拟合表达式形式均为

$$f(t) = A_1 e^{-\tau t} + A_2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_K A_K e^{-\tau_K t} \sin(\omega_K t + \varphi_K) \quad (13)$$

信号成分即为衰减直流分量、基频分量和若干衰减周期性分量。

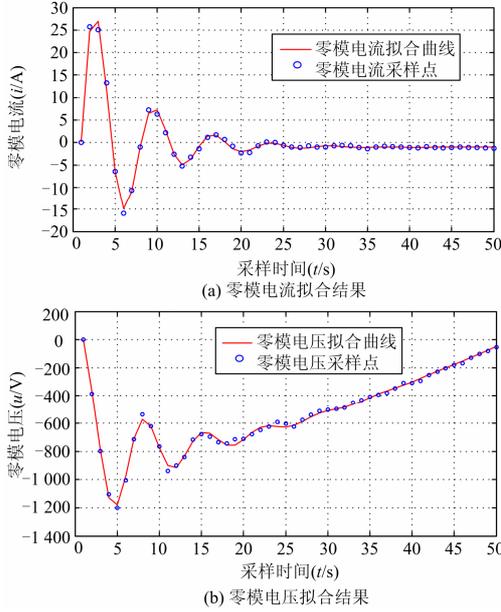


图 2 零模电压电流的数据拟合结果

Fig. 2 Fitting result of zero-mode voltage and current data

### 2.3 方程求解及参数辨识

本文主要采用 Newton 法和最小二乘估计对测距方程进行求解和参数优化。式 (9) 为非线性方程, 不同的采样时刻对应该方程的不同系数, 其形式为

$$\mathbf{X} = \left[ \frac{1}{R_f}, \frac{x}{R_f}, \frac{x C'_{III}}{R_f}, \frac{x^2}{R_f}, \frac{x^2 C'_{III}}{R_f}, C'_{III}, \frac{1}{C''_{III}}, \frac{C'_{III}}{C''_{III}}, \frac{1}{R_f C''_{III}}, \frac{x}{R_f C''_{III}}, \frac{x C'_{III}}{R_f C''_{III}} \right]^T$$

$$\mathbf{e}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} M_1(t_1) + \frac{x}{R_f} M_2(t_1) + \frac{x C'_{III}}{R_f} M_3(t_1) + \frac{x^2}{R_f} M_4(t_1) + \frac{x^2 C'_{III}}{R_f} M_5(t_1) + \dots + \frac{x C'_{III}}{R_f C''_{III}} M_{11}(t_1) - N(t_1) \\ \frac{1}{R_f} M_1(t_2) + \frac{x}{R_f} M_2(t_2) + \frac{x C'_{III}}{R_f} M_3(t_2) + \frac{x^2}{R_f} M_4(t_2) + \frac{x^2 C'_{III}}{R_f} M_5(t_2) + \dots + \frac{x C'_{III}}{R_f C''_{III}} M_{11}(t_2) - N(t_2) \\ \vdots \\ \frac{1}{R_f} M_1(t_k) + \frac{x}{R_f} M_2(t_k) + \frac{x C'_{III}}{R_f} M_3(t_k) + \frac{x^2}{R_f} M_4(t_k) + \frac{x^2 C'_{III}}{R_f} M_5(t_k) + \dots + \frac{x C'_{III}}{R_f C''_{III}} M_{11}(t_k) - N(t_k) \end{bmatrix}$$

式中,  $\mathbf{v}$  为该模型中参数的估计值向量。定义函数  $f(\mathbf{v})$ , 则可进行最小二乘优化, 其目标函数为

$$\min f(\mathbf{v}) = \|\mathbf{e}(\mathbf{v})\|_2^2 \quad (17)$$

采样 Gauss-Newton 法, 可确定参数估计值向量的非线性最小二乘迭代式为

$$\mathbf{v}^{(k+1)} = \mathbf{v}^{(k)} - [\nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T \nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T]^{-1} \nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T$$

式中,  $\nabla \mathbf{e}(\mathbf{v})$  为残差向量的 Jacobi 矩阵, 具体形式为

$$\nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}) = [\nabla \mathbf{e}_1(\mathbf{v}), \nabla \mathbf{e}_2(\mathbf{v}), \dots, \nabla \mathbf{e}_k(\mathbf{v})]^T \quad (18)$$

当辨识参数的初解  $\mathbf{v}^{(0)}$  与真实值相差较大时, 可

$$G(t_k, x, R_f, C'_{III}, C''_{III}) = N(t_k) \quad (14)$$

可先利用 4 个采样数据, 结合式 (12)、式 (13) 计算式 (10) 中的系数  $N(t)$ 、 $M_1(t)$ ~ $M_{11}(t)$ , 从而列写与式 (14) 对应的非线性方程组:

$$\begin{cases} G_1(t_1, x, R_f, C'_{III}, C''_{III}) = N(t_1) \\ G_2(t_2, x, R_f, C'_{III}, C''_{III}) = N(t_2) \\ G_3(t_3, x, R_f, C'_{III}, C''_{III}) = N(t_3) \\ G_4(t_4, x, R_f, C'_{III}, C''_{III}) = N(t_4) \end{cases} \quad (15)$$

同时, 对待求量赋初值, 其中, 故障距离  $x$  的初值可为 0 或全长  $l$ ; 考虑一般过渡电阻  $R_f$  的大小低于  $300 \Omega$ , 其初值可为  $150 \Omega$ ; 两端等效电容的初值相等, 均为线路全长的一半与单位长度电容值的乘积。计算得到的  $x^{(0)}$ 、 $R_f^{(0)}$ 、 $C'_{III}^{(0)}$ 、 $C''_{III}^{(0)}$  为式 (9) 的初解。

对计算初解进行最小二乘优化。由  $K$  个采样时刻  $t_1, t_2, \dots, t_K$  的数据构造测距方程式 (9) 的  $K \times 1$  维残差向量  $\mathbf{e}(\mathbf{v})$

$$\mathbf{e}(\mathbf{v}) = \mathbf{M}_N(t) \mathbf{X} \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{M}_N(t_k) = [M_N(t_1), M_N(t_2), \dots, M_N(t_k)]^T$ ,

定义迭代方向:

$$\boldsymbol{\lambda}^{(k)} = -[\nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T \nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T]^{-1} \nabla \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T \mathbf{e}(\mathbf{v}^{(k)})^T$$

因此从  $\mathbf{v}^{(k)}$  出发沿该迭代方向的最优一维搜索为

$$f(\mathbf{v}^{(k)} + \omega^{(k)} \boldsymbol{\lambda}^{(k)}) = \min_{\omega \geq 0} f(\mathbf{v}^{(k)} + \omega \boldsymbol{\lambda}^{(k)})$$

其中,  $\omega^{(k)}$  为第  $k$  次近似的阻尼系数。通过此方法则可得到参数的最优解:  $x^*$ 、 $R_f^*$ 、 $C'_{III}^*$ 、 $C''_{III}^*$ 。

### 3 仿真分析

为验证本文算法的正确性与有效性, 利用 ATP-EMTP 仿真软件建立 10 kV 配网电缆仿真模

型, 并进行单相接地故障的仿真实验 (以 A 相故障为例)。该仿真模型的采样频率  $f_s=10$  kHz, 暂态数据的时间窗为 5 ms, 测距相对误差= $|\text{计算故障距离}-\text{实际故障距离}|/\text{线路全长} \times 100\%$ , 过渡电阻的计算相对误差= $|\text{过渡电阻计算值}-\text{过渡电阻实际值}|/\text{过渡电阻实际值} \times 100\%$ 。

如图 3 所示, 在该系统中, 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, 接法为  $\Delta/y_0$ , 低压侧中性点通过开关 S 与消弧线圈相连。电缆为分布参数模型, 其参数为:  $R_0=R_1=R_2=0.099 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=L_2=2.197e^{-4} \text{H}/\text{km}$ ,  $L_0=7.691e^{-4} \text{H}/\text{km}$ ,  $C_0=0.519 e^{-6} \text{F}/\text{km}$ 。负荷 LD 以集中负荷表示, 其有功为 1 MW, 无功为 0.4 Mvar (滞后)。

考虑到暂态信息的不确定性, 本文主要针对以下几种情况做了仿真分析。

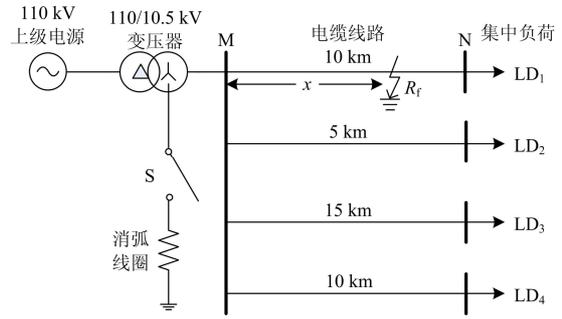


图 3 配电网电缆单相接地仿真系统  
Fig. 3 Distribution network cable single-phase ground simulation system

(1) 故障位置及过渡电阻不同。当系统中性点经消弧线圈接地, 故障初始角为  $90^\circ$ , 即 A 相相电压幅值正向最大时发生单相接地故障, 其测距及辨识结果如表 1 所示。

表 1 故障位置及过渡电阻不同的仿真结果

Table 1 Simulation results with different fault location and transition resistance

| 实际故障<br>距离/km | 实际过渡<br>电阻/ $\Omega$ | 初值计算       |              |                     |                     | 优化值        |              |                     |                     |
|---------------|----------------------|------------|--------------|---------------------|---------------------|------------|--------------|---------------------|---------------------|
|               |                      | $x^{(0)}/$ | $R_f^{(0)}/$ | $C'_{lin}{}^{(0)}/$ | $C'_{lin}{}^{(0)}/$ | $x^{(*)}/$ | $R_f^{(*)}/$ | $C'_{lin}{}^{(*)}/$ | $C'_{lin}{}^{(*)}/$ |
|               |                      | km         | $\Omega$     | F                   | F                   | km         | $\Omega$     | F                   | F                   |
| 2             | 50                   | 1.436      | 41.1         | $0.581e^{-6}$       | $3.711e^{-6}$       | 1.995      | 49.3         | $1.126e^{-6}$       | $4.243e^{-6}$       |
|               | 100                  | 1.366      | 89.6         | $0.573e^{-6}$       | $3.566e^{-6}$       | 1.993      | 101.4        | $1.109e^{-6}$       | $4.206e^{-6}$       |
|               | 300                  | 1.251      | 278.2        | $0.558e^{-6}$       | $3.433e^{-6}$       | 1.989      | 304.6        | $1.074e^{-6}$       | $4.189e^{-6}$       |
| 4             | 50                   | 3.277      | 59.3         | $1.558e^{-6}$       | $2.613e^{-6}$       | 3.992      | 50.6         | $2.138e^{-6}$       | $3.152e^{-6}$       |
|               | 100                  | 3.165      | 85.9         | $1.499e^{-6}$       | $2.339e^{-6}$       | 4.009      | 101.3        | $2.098e^{-6}$       | $3.141e^{-6}$       |
|               | 300                  | 3.037      | 322.7        | $1.444e^{-6}$       | $2.241e^{-6}$       | 4.011      | 295.1        | $2.056e^{-6}$       | $3.127e^{-6}$       |
| 6             | 50                   | 5.311      | 42.2         | $2.554e^{-6}$       | $1.561e^{-6}$       | 5.998      | 50.3         | $3.159e^{-6}$       | $2.112e^{-6}$       |
|               | 100                  | 5.259      | 83.3         | $2.309e^{-6}$       | $1.487e^{-6}$       | 5.997      | 101.2        | $3.144e^{-6}$       | $2.088e^{-6}$       |
|               | 300                  | 5.217      | 277.1        | $2.259e^{-6}$       | $1.453e^{-6}$       | 6.009      | 295.6        | $3.132e^{-6}$       | $2.063e^{-6}$       |
| 8             | 50                   | 7.315      | 44.6         | $3.603e^{-6}$       | $0.590e^{-6}$       | 7.997      | 50.1         | $4.256e^{-6}$       | $1.142e^{-6}$       |
|               | 100                  | 7.233      | 88.7         | $3.553e^{-6}$       | $0.576e^{-6}$       | 8.005      | 98.7         | $4.212e^{-6}$       | $1.129e^{-6}$       |
|               | 300                  | 7.121      | 276.6        | $3.476e^{-6}$       | $0.549e^{-6}$       | 7.989      | 304.8        | $4.198e^{-6}$       | $1.107e^{-6}$       |

由表 1 的仿真结果分析可得: 本文所提出的测距、辨识算法能精确求取故障距离和  $R_f$ , 且测距结果不受过渡电阻的影响, 测距平均误差在 10 m 以内, 最大相对误差小于 0.113%,  $R_f$  的最大相对误差小于 1.637%, 满足实际工程应用的需求。同时也能准确辨识故障点两侧的等值对地电容大小, 其值近似等于单位长度电容值与线路长度的乘积, 验证了该辨识方法的正确性。

(2) 故障初始角不同。当系统中性点经消弧线圈接地, 过渡电阻  $R_f=200 \Omega$ , 故障初始角变化时

的测距及辨识结果如表 2 所示。

由表 2 的仿真结果分析可得: 本文所提出的测距、辨识算法基本不受故障初始角的影响, 满足工程应用要求。相比之下, 故障初始角为  $90^\circ$  时的测距辨识精度最高, 测距相对误差小于 0.0767%,  $R_f$  的相对误差小于 1.203%, 其原因为故障瞬间电压幅值最大, 暂态信息丰富, 与实际情况接近。

(3) 中性点运行方式不同。当故障初始角为  $90^\circ$ , 过渡电阻  $R_f=200 \Omega$ , 中性点运行方式分别为不接地、经大电阻接地和经消弧线圈接地时的仿真结果如表 3 所示。

表 2 故障初始角不同的仿真结果  
Table 2 Simulation results with different fault initial angle

| 故障初始角/<br>(°) | 实际故障<br>距离/km | 初值计算        |               |                      |                       | 优化值         |               |                      |                       |
|---------------|---------------|-------------|---------------|----------------------|-----------------------|-------------|---------------|----------------------|-----------------------|
|               |               | $x^{(0)}$ / | $R_f^{(0)}$ / | $C'_{III}{}^{(0)}$ / | $C''_{III}{}^{(0)}$ / | $x^{(*)}$ / | $R_f^{(*)}$ / | $C'_{III}{}^{(*)}$ / | $C''_{III}{}^{(*)}$ / |
|               |               | km          | $\Omega$      | F                    | F                     | km          | $\Omega$      | F                    | F                     |
| 0°            | 3             | 1.543       | 122.5         | 0.801e <sup>-6</sup> | 2.784e <sup>-6</sup>  | 2.899       | 191.3         | 1.557e <sup>-6</sup> | 3.415e <sup>-6</sup>  |
|               | 7             | 5.353       | 120.7         | 2.778e <sup>-6</sup> | 0.811e <sup>-6</sup>  | 6.903       | 192.7         | 3.421e <sup>-6</sup> | 1.553e <sup>-6</sup>  |
| 30°           | 3             | 1.756       | 145.4         | 0.911e <sup>-6</sup> | 2.962e <sup>-6</sup>  | 2.921       | 193.6         | 1.576e <sup>-6</sup> | 3.577e <sup>-6</sup>  |
|               | 7             | 5.699       | 147.7         | 2.958e <sup>-6</sup> | 0.931e <sup>-6</sup>  | 6.937       | 193.1         | 3.565e <sup>-6</sup> | 1.579e <sup>-6</sup>  |
| 60°           | 3             | 1.947       | 158.9         | 1.015e <sup>-6</sup> | 3.041e <sup>-6</sup>  | 2.956       | 195.7         | 1.589e <sup>-6</sup> | 3.613e <sup>-6</sup>  |
|               | 7             | 5.853       | 160.2         | 3.038e <sup>-6</sup> | 1.035e <sup>-6</sup>  | 6.961       | 195.3         | 3.605e <sup>-6</sup> | 1.587e <sup>-6</sup>  |
| 90°           | 3             | 2.117       | 188.1         | 1.099e <sup>-6</sup> | 3.144e <sup>-6</sup>  | 2.993       | 202.4         | 1.593e <sup>-6</sup> | 3.718e <sup>-6</sup>  |
|               | 7             | 6.098       | 186.7         | 3.141e <sup>-6</sup> | 1.093e <sup>-6</sup>  | 6.992       | 197.7         | 3.723e <sup>-6</sup> | 1.591e <sup>-6</sup>  |

表 3 中性点运行方式不同的仿真结果  
Table 3 Simulation results with different neutral point operation modes

| 中性点运行方式 | 实际故障<br>距离/km | 初值计算        |               |                      |                       | 优化值         |               |                      |                       |
|---------|---------------|-------------|---------------|----------------------|-----------------------|-------------|---------------|----------------------|-----------------------|
|         |               | $x^{(0)}$ / | $R_f^{(0)}$ / | $C'_{III}{}^{(0)}$ / | $C''_{III}{}^{(0)}$ / | $x^{(*)}$ / | $R_f^{(*)}$ / | $C'_{III}{}^{(*)}$ / | $C''_{III}{}^{(*)}$ / |
|         |               | km          | $\Omega$      | F                    | F                     | km          | $\Omega$      | F                    | F                     |
| 不接地     | 4             | 3.153       | 188.4         | 1.588e <sup>-6</sup> | 2.441e <sup>-6</sup>  | 3.997       | 202.1         | 2.233e <sup>-6</sup> | 3.409e <sup>-6</sup>  |
|         | 8             | 7.210       | 188.8         | 3.601e <sup>-6</sup> | 0.709e <sup>-6</sup>  | 8.005       | 197.9         | 4.399e <sup>-6</sup> | 1.245e <sup>-6</sup>  |
| 经大电阻接地  | 4             | 3.129       | 187.5         | 1.507e <sup>-6</sup> | 2.357e <sup>-6</sup>  | 3.992       | 201.9         | 2.176e <sup>-6</sup> | 3.269e <sup>-6</sup>  |
|         | 8             | 7.188       | 188.1         | 3.531e <sup>-6</sup> | 0.647e <sup>-6</sup>  | 8.008       | 198.1         | 4.298e <sup>-6</sup> | 1.167e <sup>-6</sup>  |
| 经消弧线圈接地 | 4             | 3.116       | 188.7         | 1.463e <sup>-6</sup> | 2.288e <sup>-6</sup>  | 3.991       | 202.3         | 2.077e <sup>-6</sup> | 3.135e <sup>-6</sup>  |
|         | 8             | 7.151       | 186.8         | 3.502e <sup>-6</sup> | 0.559e <sup>-6</sup>  | 7.993       | 197.8         | 4.203e <sup>-6</sup> | 1.119e <sup>-6</sup>  |

由表 3 的仿真结果分析可得: 以上三种中性点运行方式下的测距辨识结果差别不大, 均有较高精度, 测距相对误差小于 0.080 6%,  $R_f$  的相对误差小于 1.157%, 可见本文所提出的算法不受中性点运行方式的影响, 满足工程应用要求。

#### 4 结论

本文提出了一种基于 RLC 模型的配网电缆单相接地故障的单端时域测距方法, 并通过仿真计算, 验证了该方法的正确性, 且具有较高的测距精度, 主要结论有:

(1) 该方法利用了配电网电缆单相接地后的暂态信息, 结合故障状态网络与零模网络建立了时域测距方程, 实现了故障测距, 且对过渡电阻及其两侧的等值对地电容进行了辨识求值。

(2) 本文采用了 Karenbauer 相模变换、中心差分法和 Prony 算法处理暂态数据, 通过 Newton 法和最小二乘估计优化求取了故障距离和辨识参

数。

(3) 与传统测距方法不同, 本文的测距算法, 不受故障后稳态残流微弱、过渡电阻、故障初始角、中性点运行方式等因素的影响, 且测距精度较高, 平均误差在 10 m 内, 最大相对误差小于 0.113%, 计算过渡电阻的最大相对误差小于 1.637%, 能够满足实际工程应用的需求。

#### 参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 58-73.
- [2] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.  
MA Shi-cong, GAO Hou-lei, XU Bing-yin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.
- [3] 司大军, 束洪春, 陈学允. 一种基于行波测距的输电线路接地故障距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2003,

- 17(4): 65-69.  
SI Da-jun, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. A new distance protection scheme based on traveling wave fault location for grounded faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 17(4): 65-69.
- [4] 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 Kui-xin, TANG Yi, CHEN Ping, et al. Fault location method based on combined traveling wave principle for high-voltage overhead-cable lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 90-94.
- [5] 郭宁明, 覃剑, 汤飞, 等. 智能电网行波故障测距系统应用方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 72-76.  
GUO Ning-ming, QIN Jian, TANG Fei, et al. Application of transmission lines traveling wave fault location system in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 72-76.
- [6] 卢继平, 黎颖, 李健, 等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 65-69.  
LU Ji-ping, LI Ying, LI Jian, et al. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69.
- [7] Gilany M, Ibrali M, Eldin E. Traveling wave based fault location scheme for multiend-aged underground cable system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 82-89.
- [8] 张新慧. 基于 Prony 算法的小电流接地故障暂态选线技术[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [9] 许珉, 杨艳伟, 申克运, 等. 基于小波变换的电缆短距离开路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 112-116.  
XU Min, YANG Yan-wei, SHEN Ke-yun, et al. Cable short open-circuit fault location based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 112-116.
- [10] 束洪春, 彭仕欣, 李斌, 等. 基于零序电流激励的谐振接地系统故障选线测后模拟方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 106-113.  
SHU Hong-chun, PENG Shi-xin, LI Bin, et al. Simulation after detecting fault line in resonant earthed system through zero sequence current motivation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 106-113.
- [11] 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 Wei-wei, YUAN Zhen-hai, 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.
- [12] 卢继平, 徐兵. 基于小波包能量相对熵的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 26-31.  
LU Ji-ping, XU Bing. Single-phase earth fault section location based on wavelet packet energy relative entropy in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 26-31.
- [13] 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 Hong-chun, PENG Shi-xin. 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.
- [14] 孙波, 张承慧, 孙同景, 等. 基于暂态相电流的小电流接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 69-74.  
SUN Bo, ZHANG Cheng-hui, SUN Tong-jing, et al. Earth fault location based on transient phase current in non-solidly earthed network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 69-74.
- [15] 孙雅明, 严斌. 基于非故障相暂态电流的单相接地故障定位新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 52-55.  
SUN Ya-ming, YAN Bin. A new approach to locate single phase to ground fault based on transient current of healthy phase in faulty feeder[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 52-55.
- [16] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115.  
ZHANG Lin-li, XU Bing-yin, XUE Yong-duan, et al. Transient fault location method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115.

收稿日期: 2013-06-01; 修回日期: 2013-09-12

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;

唐辰旭(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及自动化。E-mail: tcx2011@sina.com