

# 一种估算对侧信息的配电网单端故障测距方法

冉伊<sup>1</sup>, 周步祥<sup>1</sup>, 杨植雅<sup>1</sup>, 唐辰旭<sup>2</sup>, 王鹏<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000;  
3. 广州供电局, 广东 广州 510000)

**摘要:** 提出了一种估算对侧信息的配电网单端故障测距方法。该方法基于线路的分布参数时域模型及0、1、2模网络, 根据首端的采样信息, 先推算故障端口的模电压及首端流入故障支路的模电流, 并由故障端口的模电压估算末端的电压电流信息, 进而得到末端流入故障支路的模电流。利用故障支路的0、1、2模电流瞬时值相等的边界条件, 建立了测距函数, 并通过搜索法求解, 实现了故障测距。所提出的算法可同时利用故障后的稳态量及暂态量进行测距计算, 且仅需采样单端信息, 不受配网分支、过渡电阻、故障点位置及中性点运行方式等因素的影响。大量的EMTP数字仿真结果验证了该算法的准确性和适用性。

**关键词:** 单端; 对侧信息; 时域模型; 边界条件; 配电网故障测距

## A method of single ended fault location for distribution network based on estimated contralateral information

RAN Yi<sup>1</sup>, ZHOU Bu-xiang<sup>1</sup>, YANG Zhi-ya<sup>1</sup>, TANG Chen-xu<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;  
2. State Grid Sichuan Electric Power Co. Deyang Power Supply Company, Deyang 618000, China;  
3. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** This paper presents a method of single ended fault location for distribution network based on estimated contralateral information. This method is based on time-domain distributed parameter line model and 0, 1, 2-mode network, according to the head-end sampling information, firstly calculates mode voltage of the failed port and mode current which flows from the first end to the fault branch, then estimates the voltage and current information of the end by the mode voltage of the failed port, and then gets the mode current which flows from the end to the fault branch, establishes ranging function by using the boundary condition about the fault branch 0, 1, 2-mode current equal to the instantaneous value, and through the search method, finally achieves fault location. The proposed algorithm can take advantage of both transient and steady state volumes after a fault for distance calculation by requiring only a single ended of sampling information, and unaffected by distribution network branch, transition resistance, fault location and the neutral point operation mode and other factors. A large number of EMTP simulation results show that the algorithm is accurate and applicable.

**Key words:** single ended; contralateral information; time-domain model; boundary condition; distribution network fault location

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0025-07

## 0 引言

配电网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%, 且易变为相间故障, 影响电力系统的安全运行<sup>[1-2]</sup>。现有的方法主要有行波法<sup>[3-8]</sup>和故障分析法<sup>[9-16]</sup>。行波法受配网分支、馈线较短、采用频率及设备成本过高的影响, 在配网中少有

采用; 故障分析法的主要思想则是根据故障后的电压电流信息, 结合线路模型、边界条件、功率平衡等故障特征, 建立故障距离( $x$ )的测距方程, 求解之。其中, 双端法原理简单可靠, 但会受数据同步、数据丢包、通信等因素的影响; 单端法是现在研究的热点, 但在理论上又无法避免过渡电阻的影响。

鉴于此, 本文仅由单端的采样信息, 提出了

一种估算对侧信息的配电网单端故障测距方法。该方法结合线路的分布参数时域模型<sup>[2]</sup>及故障后的 0、1、2 模网络，先由首端的采样信息，得到电压电流的各个模分量，从而推算故障端口的模电压和首端流入故障支路的模电流；再由故障端口的模电压估算末端的电压电流信息，进而得到末端流入故障支路的模电流，最后利用故障支路的 0、1、2 模电流瞬时值相等的边界条件，建立测距函数，实现故障测距。本文在 ATP-EMTP 中建立了仿真模型，采用 Karenbauer 相模变换得到电压电流的 0、1、2 模分量，并分别利用两点法和 Prony 算法处理故障后的数据，得到电压电流的表达式，通过搜索法，求得搜索区间内测距函数的最小值及相应的故障距离。

配电网发生单相接地故障后，模电流的稳态幅值较小，但一般使用的 100/5 A 的 CT 能够满足测量精度和计算要求。而暂态过程的特征明显，故，本文同时提出了基于暂态量的估算测距原理。出于理论分析，本文所提的方法主要针对直供负荷的单一线路或单分支线路，其参数均匀。对于多分支的情况，则以两分支箱之间的线路作为研究对象。而受篇幅所限，缆-线混合等参数不均匀线路的测距研究，将作为本文的后续内容。

### 1 线路的分布参数时域模型

鉴于传统的集中参数线路模型不够精确、双曲函数线路模型不适用于时域计算且模型本身忽略了二阶小量、贝瑞龙 (Bergeron) 模型采用的集中电阻存在一定模型误差等因素的考虑，本文采用文献[2]中提出的一种精确分布参数时域模型。

如图 1 所示，该线路模型由无穷多个微元级联构成，其中  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$ 、 $G_0$  分别是单位长度的等效电阻、电感、电容和电导， $\Delta x$  为线路微元长度， $l$  为线路总长度（单位：km）。

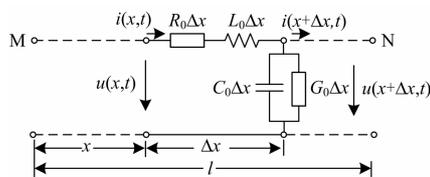


图 1 分布参数线路时域等值电路

Fig. 1 Time domain equivalent circuit of distributed parameter transmission line model

通过对微元两侧及线路两端的电压电流关系进行反复推算，并考虑该线路模型中  $\Delta x$  的多阶无穷小量，经数学归纳后，可得线路分布参数时域模型为

$$\begin{cases} u_N(t,l) = u_M(t-t_0) - l(R_0 i_M(t-t_0) + L_0 i'_M(t-t_0)) + \sum_{j=1}^{\infty} A(j) \\ i_N(t,l) = i_M(t-t_0) - \sum_{j=1}^{\infty} B(j) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} A(j) = \frac{l^{2j}}{(2j)!} \sum_{i=0}^j C_j^i R_0^i L_0^{j-i} (C_0^j u_M^{(2j-i)}(t-t_0) + G_0^j u_M^{(2j+i)}(t-t_0)) - \frac{l^{2j+1}}{(2j+1)!} \sum_{i=0}^{j+1} C_{j+1}^i R_0^i L_0^{j-i} (C_0^j i_M^{(2j+i)}(t-t_0) + G_0^j i_M^{(2j-i)}(t-t_0)) \\ B(j) = \frac{l^{2j-1}}{(2j-1)!} \sum_{i=0}^{j-1} C_{j-1}^i R_0^i L_0^{j-i} (C_0^j u_M^{(2j+i)}(t-t_0) + G_0^j u_M^{(2j-i)}(t-t_0)) - \frac{l^{2j}}{(2j)!} \sum_{i=0}^j C_j^i R_0^i L_0^{j-i} (C_0^j i_M^{(2j-i)}(t-t_0) + G_0^j i_M^{(2j+i)}(t-t_0)) \end{cases}$$

式中： $C_j^i = \frac{j!}{(j-i)!i!}$ ； $t_0 = l\sqrt{L_0 C_0}$ ，为 M 端至 N 端传输延时。

### 2 估算对侧信息的测距原理

为不失一般性，假设线路为均匀传输线，其参数恒定，如图 2 所示。本文以配电网单相接地故障为例，结合上一节中的线路模型，介绍单端故障定位的基本原理。

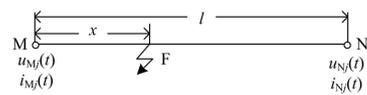


图 2 单相接地故障示意图

Fig. 2 Diagram of the single-phase ground fault

图中： $j=a、b、c$  为采样得到的三相电压电流瞬时值； $l$  为线路全长。在 F 点发生 A 相接地故障，故障点到首端 M 的距离为  $x$ 。采用相模变换的方法可得到 0 模电压电流、1 模电压电流和 2 模电压电流： $u_{Mi}(t)$ 、 $i_{Mi}(t)$ ， $i=0, 1, 2$ 。由故障分析理论<sup>[1]</sup>可得其模分量网络如图 3 所示。

#### 2.1 利用稳态量的估算测距原理

该原理利用故障后电压电流的稳态量，以零模网络为例：本文首先采用两点法<sup>[1]</sup>求得将首端

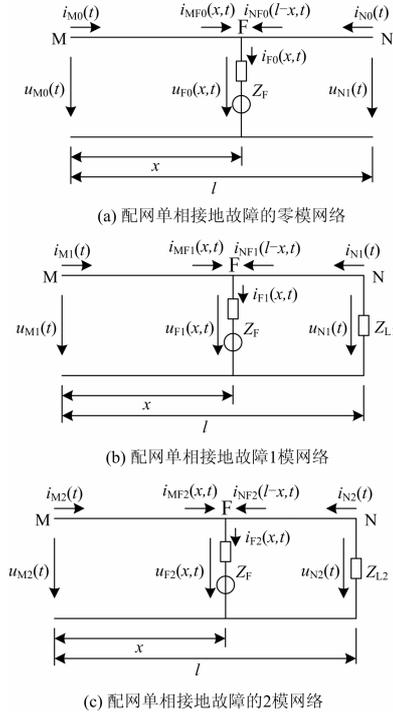


图3 配网单相接地故障的模分量网络

Fig. 3 Negative-sequence network of single-phase ground fault

(M 端) 零模电压  $u_{M0}(t)$ 、零模电流  $i_{M0}(t)$  的稳态表达式, 再结合故障距离  $x$  (未知数), 并代入式 (1), 可推算出故障点处零模电压的函数表达式  $u_{MF0}(x, t)$  及其从首端流入故障支路的零模电流  $i_{MF0}(x, t)$ 。同时, 根据  $u_{MF0}(x, t)$  和线路长度  $(l-x)$  估算 N 端零模电压电流的稳态表达式, 其具体方法如下。

令:  $u_{N0}(x, t) = U_{N1}(x) \sin \omega t + U_{N2}(x) \cos \omega t$ ,  $i_{N0}(x, t) = I_{N1}(x) \sin \omega t + I_{N2}(x) \cos \omega t$ , 其中,  $U_{N1}(x)$ 、 $U_{N2}(x)$ 、 $I_{N1}(x)$ 、 $I_{N2}(x)$  为待估算系数。利用已推算的故障点零模电压的稳态表达式  $u_{MF0}(x, t)$  和式 (1) 中的电压关系, 取  $t_1, t_2, \dots, t_n$  个采样时刻, 可写成矩阵形式:  $\mathbf{AX} = \mathbf{Y}$ , 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} U_{N1}(x, t_1) & U_{N2}(x, t_1) & I_{N1}(x, t_1) & I_{N2}(x, t_1) \\ U_{N1}(x, t_2) & U_{N2}(x, t_2) & I_{N1}(x, t_2) & I_{N2}(x, t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{N1}(x, t_n) & U_{N2}(x, t_n) & I_{N1}(x, t_n) & I_{N2}(x, t_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

系数矩阵  $\mathbf{A}$  中的元素  $U_{N1}(x, t_k)$ 、 $U_{N2}(x, t_k)$ 、 $I_{N1}(x, t_k)$ 、 $I_{N2}(x, t_k)$  分别为 (忽略电纳  $G_0$ )

$$\begin{cases} U_{N1}(x, t_k) = \cos \omega(t_k - t_0) + L_0(l-x) \sin \omega(t_k - t_0) - \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2i+1)} \omega^{(2j-1)}}{(2i)!} C_{2j+1}^i R_0^{(2i+1)} L_0^{i+j} C_0^{(2j-1)} \cos \omega(t_k - t_0) + \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2i-1)} \omega^{(2j+1)}}{(2i)!} C_{j+1}^i R_0^{(2i+1)} L_0^{i+j} C_0^{(2j-1)} \sin \omega(t_k - t_0) \\ U_{N2}(x, t_k) = -\sin \omega(t_k - t_0) + (l-x) \cos \omega(t_k - t_0) + \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2i+1)} \omega^{(2j-1)}}{(2i)!} C_{2j+1}^i R_0^{(2i+1)} L_0^{i+j} C_0^{(2i-1)} \cos \omega(t_k - t_0) - \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2i-1)} \omega^{(2j+1)}}{(2i)!} C_{j+1}^i R_0^{(2i+1)} L_0^{i+j} C_0^{(2i-1)} \sin \omega(t_k - t_0) \\ I_{N1}(x, t_k) = -R_0(l-x) \cos \omega(t_k - t_0) + L_0(l-x) \sin \omega(t_k - t_0) + \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2j+1)} \omega^{(2i-1)}}{(2j-1)!} C_{j+1}^i R_0^{(2i+1)} L_0^{2i} C_0^{(2i-1)} \cos \omega(t_k - t_0) - \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2j-1)} \omega^{(2i+1)}}{(2j+1)!} C_{2j+1}^i R_0^{(2j+1)} L_0^{2j} C_0^{(2j-1)} \sin \omega(t_k - t_0) \\ I_{N2}(x, t_k) = R_0(l-x) \sin \omega(t_k - t_0) - L_0(l-x) \cos \omega(t_k - t_0) - \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2j-1)} \omega^{(2i+1)}}{(2j+1)!} C_{j+1}^i R_0^{(2i-1)} L_0^{2i} C_0^{(2i+1)} \cos \omega(t_k - t_0) + \\ \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^j \frac{(l-x)^{(2j+1)} \omega^{(2i-1)}}{(2j-1)!} C_{2j+1}^i R_0^{(2j-1)} L_0^{2j} C_0^{(2j+1)} \sin \omega(t_k - t_0) \end{cases}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} U_{N1}(x) \\ U_{N2}(x) \\ I_{N1}(x) \\ I_{N2}(x) \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} u_{MF0}(x, t_1) \\ u_{MF0}(x, t_2) \\ \vdots \\ u_{MF0}(x, t_n) \end{bmatrix}$$

当采样点数  $n > 4$  时, 其最小二乘解为

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (3)$$

算出系数  $U_{N1}(x)$ 、 $U_{N2}(x)$ 、 $I_{N1}(x)$ 、 $I_{N2}(x)$ , 即可得到 N 端零序电压电流关于故障距离  $x$  的函数表达式:  $u_{N0}(x, t)$ 、 $i_{N0}(x, t)$ 。

再将  $u_{N0}(x, t)$ 、 $i_{N0}(x, t)$  的表达式及线路长度  $l-x$  代入到式 (1) 中的电流关系中, 即可推得从末端流入故障支路的零模电流表达式  $i_{NF0}(l-x, t)$ 。

基于此思路, 同样可在 1 模网络中, 得到从 M 端流入故障点的 1 模电流  $i_{MF1}(x, t)$ , 从 N 端流入故障点的 1 模电流  $i_{NF1}(l-x, t)$ ; 亦可在 2 模网络中, 得到从 M 端流入故障点的 2 模电流  $i_{MF2}(x, t)$ , 从 N 端流入故障点的 2 模电流  $i_{NF2}(l-x, t)$ , 从而求出在各网络中, 故障支路的电流瞬时值为

$$\begin{cases} i_{F0}(x, t) = i_{MF0}(x, t) + i_{NF0}(l-x, t) \\ i_{F1}(x, t) = i_{MF1}(x, t) + i_{NF1}(l-x, t) \\ i_{F2}(x, t) = i_{MF2}(x, t) + i_{NF2}(l-x, t) \end{cases} \quad (4)$$

由单相接地故障的边界条件可知, 故障点的 0、1、2 模电流瞬时值分别相等, 与过渡电阻的性质无关, 因此可建立测距函数:

$$F(x) = \sum_{k=1}^n \{ [i_{F0}(x, t_k) - i_{F1}(x, t_k)]^2 + [i_{F1}(x, t_k) - i_{F2}(x, t_k)]^2 + [i_{F2}(x, t_k) - i_{F0}(x, t_k)]^2 \} \quad (5)$$

理论上, 该测距函数的值应等于 0, 但由于采样误差和计算误差的存在, 本文采用搜索法得到  $F(x)$  在搜索区间内的最小值  $\min F(x^*)$ , 及其对应的故障距离  $x^*$ 。其中, 搜索区间为线路全长  $l(\text{km})$ , 搜索步长为 1 m。

## 2.2 利用暂态量的估算测距原理

考虑到配网单线接地后, 由于消弧线圈的补偿作用, 使得稳态零模电流较小, 信号可能不易提取, 可能影响计算精度, 且故障类型可能为瞬时性故障等因素的影响, 本文同时提出了利用故障后暂态量估算对侧信息的测距方法。

故障后的暂态量可统一表示为

$$\mathbf{UI}_{N0}(l-x, t) = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N U_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_1-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_1-t_0) + \phi_k(x)] + (l-x) \left\{ R_0 \sum_{k=1}^N I_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_1-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_1-t_0) + \delta_k(x)] + H(x, t_1) \right\} + G(x, t_1) \\ \sum_{k=1}^N U_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_2-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_2-t_0) + \phi_k(x)] + (l-x) \left\{ R_0 \sum_{k=1}^N I_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_2-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_2-t_0) + \delta_k(x)] + H(x, t_2) \right\} + G(x, t_2) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^N U_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_n-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_n-t_0) + \phi_k(x)] + (l-x) \left\{ R_0 \sum_{k=1}^N I_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_n-t_0)} \sin[\omega_k(x)(t_n-t_0) + \delta_k(x)] + H(x, t_n) \right\} + G(x, t_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} H(x, t_i) = L_0 \sum_{k=1}^N I_k(x) \left\{ e^{-\tau_k(x)(t_i-t_0)} \left\{ -\tau_k(x) \sin[\omega_k(x)(t_i-t_0) + \delta_k(x)] + \omega_k(x) \cos[\omega_k(x)(t_i-t_0) + \delta_k(x)] \right\} \right\} \\ G(x, t_i) = \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \frac{(l-x)^{2j}}{(2j)!} \sum_{i=0}^j C_j^i R_0^i L_0^{j-i} C_0^j P(x, t_i) - \frac{(l-x)^{2j+1}}{(2j+1)!} \sum_{i=0}^{j+1} C_{j+1}^i R_0^i L_0^{j-i+1} C_0^j Q(x, t_i) \right\} \\ P(x, t_i) = \left\{ \sum_{k=1}^N (-1)^{2j-i} U_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_i-t_0)} \sum_{r=0}^{2j-i} C_{2j-i}^r \tau^{2j-i-r} (-1)^r \omega_k^r(x) \sin[\omega_k(x)(t_i-t_0) + \phi_k(x) + \frac{r\pi}{2}] \right\} \\ Q(x, t_i) = \left\{ \sum_{k=1}^N (-1)^{2j-i+1} I_k(x) e^{-\tau_k(x)(t_i-t_0)} \sum_{r=0}^{2j-i+1} C_{2j-i}^r \tau^{2j-i+1-r} (-1)^r \omega_k^r(x) \sin[\omega_k(x)(t_i-t_0) + \phi_k(x) + \frac{r\pi}{2}] \right\} \end{cases}$$

当采样点的个数  $n \geq 6N$  时, 可求得

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} U_1(x) & U_2(x) & \cdots & U_N(x) \\ I_1(x) & I_2(x) & \cdots & I_N(x) \\ \tau_1(x) & \tau_2(x) & \cdots & \tau_N(x) \\ \omega_1(x) & \omega_2(x) & \cdots & \omega_N(x) \\ \phi_1(x) & \phi_2(x) & \cdots & \phi_N(x) \\ \delta_1(x) & \delta_2(x) & \cdots & \delta_N(x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

即估算得到  $u_{N0}(x, t)$ 、 $i_{N0}(x, t)$ 。将其表达式及线路长度  $l-x$  代入到式 (1) 中的电流关系中, 即可推得从末端流入故障支路的零模电流表达式  $i_{NF0}(l-x, t)$ , 进而可由  $i_{MF0}(x, t)$  和  $i_{NF0}(l-x, t)$ , 求得 0 模网络中故障支路的 0 模电流表达式  $i_{F0}(x, t)$ 。

同理, 在 1 模、2 模网络中分别求得两端流入

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k e^{-\tau_k} \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (6)$$

其中,  $N$  为暂态信号中, 所含分量的个数。因此, 可先采用 Prony 算法<sup>[17]</sup>求得  $M$  端零模电压、电流的表达式, 再令末端的零模信息  $u_{N0}(x, t)$ 、 $i_{N0}(x, t)$  的表达式为

$$\begin{cases} u_{N0}(x, t) = \sum_{k=1}^N U_k(x) e^{-\tau_k(x)t} \sin[\omega_k(x)t + \phi_k(x)] \\ i_{N0}(x, t) = \sum_{k=1}^N I_k(x) e^{-\tau_k(x)t} \sin[\omega_k(x)t + \delta_k(x)] \end{cases} \quad (7)$$

此时的待估算量为  $U_k(x)$ 、 $I_k(x)$ 、 $\tau_k(x)$ 、 $\omega_k(x)$ 、 $\phi_k(x)$ 、 $\delta_k(x)$ , 故将式 (7) 代入式 (1) 中的电压等式, 线路长度为  $l-x$ , 可得非线性方程组为

$$\mathbf{UI}_{N0}(l-x, t) = \mathbf{Y} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{Y}$  与式 (2) 相同,  $\mathbf{UI}_{N0}(l-x, t)$  为

故障支路的模电流表达式  $i_{F1}(x, t)$  和  $i_{F2}(x, t)$ , 从而得到式 (5) 的测距方程, 通过搜索计算, 求得故障距离  $x^*$ 。

## 3 数据处理

### 3.1 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

$$\begin{bmatrix} u_{M0}(t) \\ u_{M1}(t) \\ u_{M2}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Ma}(t) \\ u_{Mb}(t) \\ u_{Mc}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

该变换可直接由采用信息得到各模量的时域信息。

### 3.2 信号的提取

如前所述, 故障后, 稳态量的表达式可采用两点法<sup>[1]</sup>求得, 同时, 本文采用 Prony 算法<sup>[3]</sup>求取暂态量的表达式, 以  $u_{M0}(t)$  为例, 采样信息及各分量如图 4 所示 (数据窗为故障后的 10 ms, 采样频率为 10 kHz)。

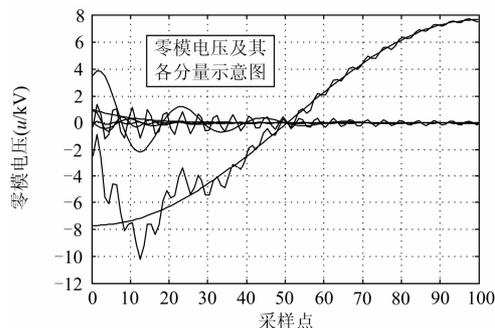


图 4 零模电压及其各分量

Fig. 4 Negative-sequence network of single-phase ground fault

## 4 仿真分析

为验证本文所提算法的正确性和实用性, 利用 ATP-EMTP 仿真软件建立配网仿真模型, 进行单相接地故障仿真实验 (以 A 相故障为例)。仿真后的数据调入 Matlab 进行分析计算。

如图 5 所示, 该仿真模型为某 10 kV 配网系统, 变压器接法为  $\Delta/y_0$ , 容量为 31.5 MVA, 其低压侧中性点通过开关 S 与消弧线圈相连。I 段母线共 4 回架空出线, 馈线 I 距分支点 N 为 10 km, 模型中将架空线路设置为分布参数模型, 其电气参数为:  $R_0=0.75 \Omega/\text{km}$ ,  $R_1=R_2=0.46 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=4.188 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $L_1=L_2=0.929 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.0447 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $C_1=C_2=0.071 \mu\text{F}/\text{km}$ 。测距误差 = |计算故障距离 - 实际故障距离| / 线路全长  $\times 100\%$ 。本文针对不同的情况, 有如下仿真分析。

(1) 当系统发生 A 相接地故障, 中性点经消

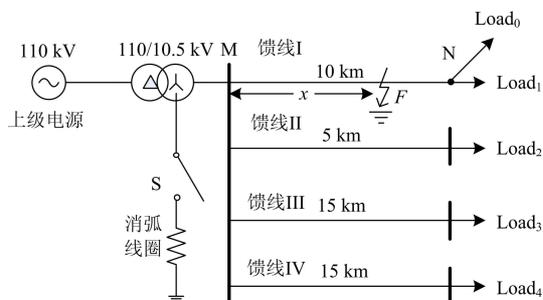


图 5 配网单相接地仿真系统

Fig. 5 Distribution network single-phase ground simulation system

弧线圈接地, 故障初始相角为  $90^\circ$ , 分别采用故障后的稳态量和暂态量进行计算, 其结果如表 1 所示。

表 1 稳态量和暂态量的测距结果

Table 1 Simulation results with steady-state and transient information

实际故障距离/km	稳态量计算		暂态量计算	
	计算故障距离/km	误差/%	计算故障距离/km	误差/%
2	2.029	0.29	2.009	0.09
4	4.023	0.23	4.007	0.07
6	6.022	0.22	6.006	0.06
8	8.031	0.31	8.008	0.08

由表 1 的测距结果可知: 利用故障后的暂态量进行计算的精度较高, 原因在于暂态信息中, 含有充分的故障信息, 而稳态信息受消弧线圈的补偿, 对测距有一定的影响。故本文主要采用暂态信息, 进行测距研究。

(2) 当系统发生 A 相接地故障, 中性点经消弧线圈接地, 故障初始相角为  $90^\circ$ , 采用不同大小及性质的过渡阻抗, 在不同的故障点对配网单相接地故障进行仿真。其结果如表 2 所示。

表 2 故障位置及过渡电阻不同的仿真结果

Table 2 Simulation results with different fault location and transition resistance

实际故障距离/km	实际过渡电阻/ $\Omega$	计算结果		
		测距函数最小值	计算故障距离/km	测距误差/%
2	20	6.379	1.999	0.01
	100	7.053	1.990	0.10
	500	7.662	1.962	0.38
	$100+j20$	7.059	1.987	0.13
4	20	6.378	3.999	0.01
	100	6.705	3.994	0.06
	500	7.651	3.969	0.31
	$100+j20$	7.052	3.989	0.11
6	20	6.378	6.001	0.01
	100	6.703	5.994	0.06
	500	7.638	5.974	0.26
	$100+j20$	7.044	5.991	0.09
8	20	6.383	8.002	0.02
	100	7.051	7.989	0.11
	500	7.639	7.963	0.27
	$100+j20$	7.063	7.985	0.15

通过表 2 的仿真数据分析可得, 本文所提出的算法, 其测距精度不受接地点过渡阻抗的大小和是否为纯电阻的影响, 在接地点故障阻抗较高时, 也有较高精度, 相对误差在一定范围内, 满足工程实际需求。

(3) 当系统发生 A 相接地故障, 故障初始相角为  $90^\circ$ , 过渡电阻为  $100 \Omega$ , 中性点运行方式改变时, 在不同的故障点对配网单相接地故障进行仿真, 其中消弧线圈的过补偿度  $P=8\%$ 。结果如表 3 所示。

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

中性点运行方式	实际故障距离/km	mode		
		计算结果		
		测距函数最小值	计算故障距离/km	测距误差/%
不接地	2	6.441	1.991	0.09
	4	7.399	3.994	0.06
	6	7.467	5.994	0.06
	8	7.363	7.989	0.11
经消弧线 圈接地 (谐振接 地)	2	6.483	1.992	0.08
	4	6.377	3.993	0.07
	6	7.583	5.994	0.06
	8	7.274	7.991	0.09
经电阻 接地	2	6.342	1.990	0.10
	4	6.656	3.993	0.07
	6	7.533	5.994	0.06
	8	7.356	7.990	0.10

通过表 3 的仿真数据分析可得, 在系统的中性点为不接地、经消弧线圈接地、经电阻接地时, 本文所提出的算法均有较高的测距精度, 且不受中性点运行方式改变的影响。

## 5 结论

针对直供负荷或单分支参数均匀的配电线路, 本文提出了一种估算对侧信息的配电网单端故障测距的方法, 并通过仿真验证了该方法的正确性。主要结论有:

(1) 结合线路分布参数的时域模型及故障后的 0、1、2 模网络, 本文分别提出了基于稳态量和暂态量估算对侧信息的测距原理。

(2) 本文采用 Karenbauer 相模变换处理电压电流的采样信息, 并采用了两点法和 Prony 算法分别处理暂态信息和稳态分量, 得到其表达式。

(3) 本文利用 ATP-EMTP 搭建配网模型, 验证了该方法的正确性, 且不受配网分支、故障点的位置、过渡电阻、中性点运行方式的影响, 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.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power system relay protection principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 58-73.
- [2] 赵国富. 基于线路分布参数电路模型的纵联保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.  
ZHAO Guo-fu. Research on longitudinal protection based on the distributed parameter circuit model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [3] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波

- 测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.  
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. A new double terminal method of travelling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10.
- [4] 周淙, 卢毅, 廖瑞金. 基于小波包提取算法和相关分析的电缆双端行波测距[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 1-4.  
ZHOU Quan, LU Yi, LIAO Rui-jin. Double terminal traveling wave fault location for cable based on the wavelet packet extraction algorithm and correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 1-4.
- [5] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用故障特征频带和 TT 变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 22(33): 103-112.  
SHU Hong-chun, TIAN Xin-cui, DONG Jun, et al. A single terminal cable fault location method based on fault characteristic frequency band and TT transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 22(33): 103-112.
- [6] 陈玉林, 陈允平, 龚庆武. 基于时频分量相关分析的高压电缆双端行波测距[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 16-20.  
CHEN Yu-lin, CHEN Yun-ping, GONG Qing-wu. Double-terminal traveling wave fault location for HV cable based on time-frequency correlation analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 16-20.
- [7] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 76-81.  
WEI Shao-kang, CHEN Ping, JIANG Ying-hui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 76-81.
- [8] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 49-52.  
ZHANG Zheng-tuan, WEN Feng, XU Bing-yin. Wavelet analysis based power cable fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 49-52.
- [9] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.  
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.

- [10] 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.
- [11] 姜杰, 王鹏, 黄正炫, 等. 基于改进线路参数模型的配电网电缆单相接地测距方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 185-189.  
JIANG Jie, WANG Peng, HUANG Zheng-xuan, et al. A fault location method study for distribution network cable single-phase earth fault based on improved line parameter model[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 185-189.
- [12] 王伟, 余锐, 陈愚, 等. 特高压输电线路保护故障测距的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 40-46.  
WANG Wei, YU Rui, CHEN Yu, et al. Application research of fault location of UHV transmission line protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 40-46.
- [13] 索南加乐, 王增超, 康小宁, 等. 基于线性微分方程参数识别的单端准确故障测距算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 9-14.  
SUONAN Jia-le, WANG Zeng-chao, KANG Xiao-ning, et al. Accurate fault location algorithm based on parameter identification of linear differential equation with single end data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 9-14.
- [14] 郑荣进, 林湘宁, 赵峰. 基于最小相位差全局搜索的高压输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 58-61.  
ZHENG Rong-jin, LIN Xiang-ning, ZHAO Feng. Fault location based on global search of minimum phase difference for high voltage transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 58-61.
- [15] 徐子华, 王艳松. 基于强跟踪滤波器的输电线路单端故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 54-59.  
XU Zi-hua, WANG Yan-song. A new one-terminal fault location for transmission lines based on strong tracking filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 54-59.
- [16] 刘亚东, 盛戈皞, 王葵, 等. 输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 923-929.  
LIU Ya-dong, SHENG Ge-hao, WANG Kui, et al. Method and simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 923-929.
- [17] 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.  
ZHANG Xin-hui. Transient fault feeder selection techniques for non-effectively earthed network based on prony algorithm[D]. Jinan: Shandong University, 2008.

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-03-26

作者简介:

冉伊(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网故障分析及调度自动化; E-mail: rany2012@sina.com

周步祥(1965-), 男, 教授, 研究方向为调度自动化及计算机信息处理等。