

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181575

# 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法

赵铁军, 王秀斌, 虞跃

(国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 电缆大部分故障均与金属护层相关, 仅考虑缆芯电气结构参数的模型无法实现护层相关的故障测距。为解决配电网电缆单相故障测距困难的问题, 提出了基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法。以配电网单相故障零模等效网络作为辨识模型, 将故障距离、过渡电阻、对地电容作为模型的未知参数, 利用电缆单相接地故障后缆芯和护层中的暂态信息并结合故障状态网络和零模等效模型, 建立时域测距方程作为参数辨识目标函数, 用最小二乘算法进行最优参数求解, 得到故障距离。ATP-EMTP 仿真结果验证了所提方法的有效性, 且测距精度高。

**关键词:** 配电网; 电缆单相故障; 故障测距; 参数辨识; 最小二乘算法

## A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model

ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue

(Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Most of the cable faults are related to metal sheath, only considering the structural parameters of the guide core electrical model cannot realize the fault location of the protective layer. In order to solve the problem of distribution network single-phase cable fault location difficulties, a single terminal fault location method for cable single phase fault based on metal sheath model parameter identification is proposed. This paper first takes the single-phase distribution network fault zero mold equivalent network as the identification model, and fault distance, fault resistance, and capacitance to ground as the unknown parameters of the model, then uses the transient information cable after the single-phase grounding fault cable core and sheath and combines the fault state network and zero mold equivalent model to establish the time-domain ranging equation as a parameter the identification of the objective function, finally applies the least-square algorithm to solve the optimal parameters, obtaining the fault distance. ATP-EMTP simulation results verify the effectiveness of the proposed method, and the ranging accuracy is high.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477147).

**Key words:** distribution network; single phase fault of cable; fault location; parameter identification; least-square algorithm

## 0 引言

为了降低架空输电线路走廊占地面积大和缓解居民对架空线路电磁辐射的担忧, 电缆线路在配电网中占比越来越高<sup>[1-2]</sup>。虽然电缆线路敷设在地下或电缆沟中, 但人为损坏或电缆质量问题引起的电缆故障时有发生。在所有电缆故障中单相故障占 80%

以上, 因此研究准确有效的电缆单相故障测距方法对及时排除故障、提高供电可靠性具有重要的现实意义。

行波测距法<sup>[3-5]</sup>是在线路行波传输理论的基础上, 通过测量具有固定波速的行波传播时间, 获得线路故障距离的一种故障测距方法。文献[6-7]针对架空线、电缆多段混合线路, 改进传统双端测距算法, 提出一种利用分段补偿原理的混合线路双端行波测距新方法。文献[8-9]研究了模量电流信号在高压交叉互联电缆中的传播特性, 设计了不受电缆波速变化影响的在线行波测距算法。行波法虽理论上

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51477147); 国家电网秦皇岛供电公司 2018 年群众性创新研究开发项目资助(520104170004)

不受故障类型、过渡电阻等影响<sup>[10]</sup>，但存在波头检测困难、需要较高采样频率、易受干扰影响等不足，在配电网电缆测距中应用较少。文献[11]利用零序电压、电流暂态分量的衰减时间常数及频率，提出一种基于特征根的电缆单端测距方法。文献[12]考虑了电缆缆芯的电容效应，设计了故障测距方法。文献[13]构建了考虑多阶距离无穷小的配网电缆分布参数数学模型，但没有考虑三相之间的相互影响。文献[14]提出了一种将故障状态网络微分方程与故障分量网络微分方程联立求解的单端量时域故障测距算法。上述文献构建的电缆模型中不包括金属护层。而金属护层在电缆正常工作时起到屏蔽作用，在电缆绝缘破坏导致故障时，金属护层成为故障电流的通道，因此在进行电缆故障测距时，除了考虑缆芯的电气特性外，还需要考虑金属护层的电气特性。文献[15]分析了金属护层结构，建立了三相单芯电缆等效六导体集中参数模型，并对电缆进行故障定位。文献[16]在文献[15]模型基础上，针对芯-护层接地故障和芯-护层短路故障进行了定位辨识，但其电缆模型忽略了线路电容。文献[17-18]考虑线路电容，基于双 $\pi$ 模型提出了计及电缆金属护层的单端故障测距方法，利用故障分量的相量值实现护层对地故障、芯-护层故障以及芯-护层对地故障的测距。针对三芯电缆，文献[19]考虑了金属护层与缆芯间电阻，该算法假设缆芯对地电容为已知量，将故障初相角作为待求参数，增加了算法复杂性。

实际电缆发生单相接地故障，不仅要考虑金属护层的影响，还要考虑缆芯与金属护层、缆芯与金属护层及大地等不同类型的接地故障；不仅测距模型要符合实际电缆特征，测距所需的电气量也要容易获取。本文针对故障电缆金属护层结构特点，提出了一种基于金属护层模型参数辨识的中性点不接地配电网电缆线路单相故障单端测距方法，仅利用电源侧母线的暂态电压、电流数据，结合故障状态网络和零模等效网络构建基于暂态故障数据的时域测距方程，利用最小二乘参数辨识获得故障距离。方法从故障等效电路的时域关系导出测距方程，综合利用故障暂稳态信息，因而对故障电阻的适应能力强。ATP-EMTP 仿真表明本文所提方法的有效性和故障测距的准确性。

## 1 基于金属护层结构的电缆单相故障测距模型

### 1.1 电缆结构

本文研究对象为三芯电力电缆，由电缆缆芯、

绝缘层、内外屏蔽层、铜屏蔽层、内外护层、钢带铠装层等组成，横截面结构如图 1 所示。这里将铜屏蔽层和钢带铠装层统称为电缆金属护层。

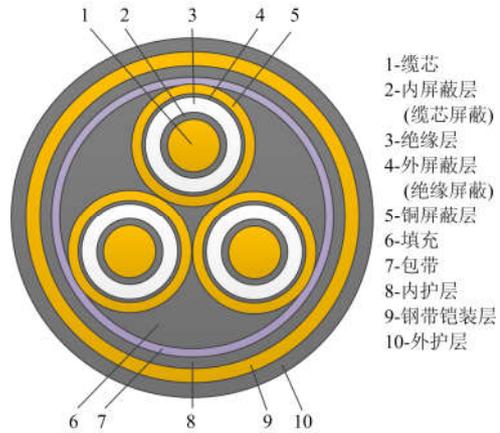


图 1 三芯电缆结构

Fig. 1 Three core cable structure

通常三芯电缆都采用金属护层两端接地方式。在电缆正常运行情况下，金属护层中基本无磁场和感应电压，亦无感应电流。但在故障情况下，金属护层与电缆芯或地之间的绝缘被破坏，导致其电压和电流会有较大变化，此时金属护层中的电气量含有相关故障信息。因此，利用金属护层中相关故障信息可有效地提高电缆故障测距的准确性。

### 1.2 故障测距模型构建

图 2 为有 3 回电缆出线的配电网。线路 3 长度为  $a$  km，在距离母线端  $x$  km 处发生 A 相故障，故障点上游记为  $m$  侧，故障点下游记为  $n$  侧，图中  $u_{ma}$ 、 $i_{ma}$  分别为故障点  $m$  侧的电压、电流， $R_f$  为过渡电阻， $i_{fa}$  为 A 相故障电流。

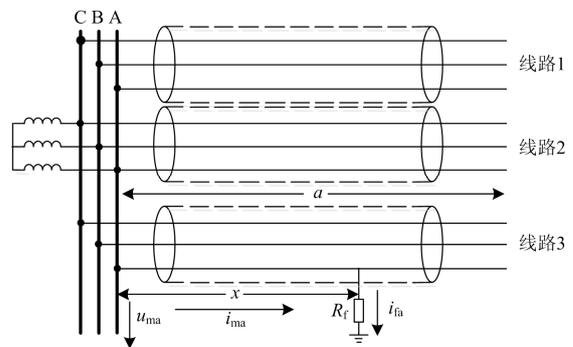


图 2 配电网示意图

Fig. 2 Schematic diagram of distribution network

从图 2 可知 A 相电压的时域微分方程为

$$u_{ma} = r_1 x i_{ma} + l_1 x \frac{di_{ma}}{dt} + i_{fa} R_f \quad (1)$$

式中:  $r_1$ 、 $l_1$  分别为线路单位长度 1 模电阻、1 模电感。

本文采用零模等效电路进行测距辨识, 流过线路电阻和电感的电流需要考虑零序补偿系数<sup>[24]</sup>。因此式(1)变为

$$u_{ma} = r_1 x (i_{ma} + K_R i_{m0}) + l_1 x \frac{d(i_{ma} + K_L i_{m0})}{dt} + i_{fa} R_f \quad (2)$$

式中:  $i_{m0}$  为零模电流;  $K_R$ 、 $K_L$  分别为电阻及电感分量的零序补偿系数。

$$K_R = (r_0 - r_1) / r_1 \quad (3)$$

式中,  $r_0$  为线路单位长度零模电阻。

$$K_L = (l_0 - l_1) / l_1 \quad (4)$$

式中,  $l_0$  为线路单位长度零模电感。

由式(2)可知故障电流  $i_{fa}$  为

$$i_{fa} = \frac{u_{ma} - r_1 x (i_{ma} + K_R i_{m0}) - l_1 x \frac{d(i_{ma} + K_L i_{m0})}{dt}}{R_f} \quad (5)$$

线路 3 的故障状态网络零模等效电路如图 3 所示。图中  $u_{m0}$  为 m 侧零模电压,  $i_{f0}$  为故障点零模电流,  $i_{m0}$  为 m 侧零模电流,  $i_{n0}$  为 n 侧零模电流,  $C'$ 、 $C''$  分别为 m 侧和 n 侧的对地电容。

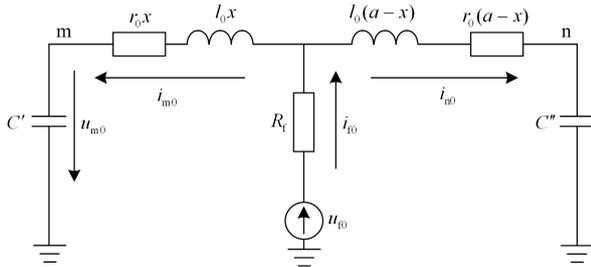


图 3 故障状态网络零模等效电路

Fig. 3 Zero-mode equivalent circuit of fault condition network

由图 3 可得故障距离  $x$  的微分方程为

$$u_{m0} + r_0 x i_{m0} + l_0 x \frac{di_{m0}}{dt} = r_0 (a-x) i_{n0} + l_0 (a-x) \frac{di_{n0}}{dt} + C'' \int_0^t i_{n0} dt \quad (6)$$

对式(6)求导可得

$$\frac{du_{m0}}{dt} + r_0 x \frac{di_{m0}}{dt} + l_0 x \frac{d^2 i_{m0}}{dt^2} = r_0 (a-x) \frac{di_{n0}}{dt} + l_0 (a-x) \frac{d^2 i_{n0}}{dt^2} + C'' i_{n0} \quad (7)$$

其中

$$i_{n0} = i_{f0} - i_{m0} \quad (8)$$

电压、电流零模变换采用 Karenbauer 变换, 以电流为例, 其变换形式为

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可知, 故障点的零模电流为

$$i_{f0} = \frac{1}{3} i_{fa} \quad (10)$$

将式(5)、式(8)、式(10)代入式(7)可得测距方程为

$$A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 C'' + A_4 C'' x + A_5 C'' R_f + A_6 R_f = 0 \quad (11)$$

式(11)是关于  $x$ 、 $C''$ 、 $R_f$  的非线性方程, 其中

$$\left\{ \begin{aligned} A_0 &= -r_0 a \frac{du_{ma}}{dt} - l_0 a \frac{d^2 u_{ma}}{dt^2} \\ A_1 &= r_0 \frac{du_{ma}}{dt} + l_0 \frac{d^2 u_{ma}}{dt^2} + r_0 r_1 a \frac{di_{ma}}{dt} + r_0 r_1 a K_R \frac{di_{m0}}{dt} + (r_0 l_1 a + r_1 l_0 a) \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} + (r_0 l_1 a K_L + r_1 l_0 a K_R) \frac{d^2 i_{m0}}{dt^2} + l_0 l_1 a \frac{d^3 i_{ma}}{dt^3} + l_0 l_1 a K_L \frac{d^3 i_{m0}}{dt^3} \\ A_2 &= -r_0 r_1 \frac{di_{ma}}{dt} - r_0 r_1 K_R \frac{di_{m0}}{dt} - (r_0 l_1 + r_1 l_0) \frac{d^2 i_{ma}}{dt^2} - (r_0 l_1 K_L + r_1 l_0 K_R) \frac{d^2 i_{m0}}{dt^2} - l_0 l_1 \frac{d^3 i_{ma}}{dt^3} - l_0 l_1 K_L \frac{d^3 i_{m0}}{dt^3} \\ A_3 &= -u_{ma} \\ A_4 &= r_1 (i_{ma} + K_R i_{m0}) + l_1 \left( \frac{di_{ma}}{dt} + K_L \frac{di_{m0}}{dt} \right) \\ A_5 &= 3 i_{m0} \\ A_6 &= 3 \frac{du_{m0}}{dt} + 3 a (r_0 \frac{di_{m0}}{dt} + l_0 \frac{d^2 i_{m0}}{dt^2}) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可知, 故障测距方程求解需要求导进行微分计算。一阶、二阶和三阶微分采用中心差分表示。以  $i_{ma}$  为例, 一阶、二阶和三阶中心差分公式分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{ma}(t)}{dt} &= \frac{-i_{ma}(k+2) + 8i_{ma}(k+1)}{12\Delta t} + \\ &\quad \frac{-8i_{ma}(k-1) + i_{ma}(k-2)}{12\Delta t} \\ \frac{d^2i_{ma}(t)}{dt^2} &= \frac{-i_{ma}(k+2) + 16i_{ma}(k+1)}{12\Delta t^2} + \\ &\quad \frac{-30i_{ma}(k) + 16i_{ma}(k-1) - i_{ma}(k-2)}{12\Delta t^2} \\ \frac{d^3i_{ma}(t)}{dt^3} &= \frac{-i_{ma}(k+3) + 8i_{ma}(k+2)}{8\Delta t^3} + \\ &\quad \frac{-13i_{ma}(k+1) + 13i_{ma}(k-1)}{8\Delta t^3} + \\ &\quad \frac{-8i_{ma}(k-2) + i_{ma}(k-3)}{8\Delta t^3} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中:  $\Delta t$  为采样时间间隔;  $k$  为采样时刻。

### 1.3 不同故障类型的测距模型

电缆发生单相故障, 由于电缆金属护层包裹着缆芯, 单相故障可分为芯-护层故障(Core-Sheath, C-S)和芯-护层对地故障(Core-Sheath-Ground, C-S-G)两种。

#### (1) 芯-护层故障(C-S)

当缆芯和金属护层之间发生故障时, 缆芯与护层之间有等效电阻  $R_{f1}$ , 故障点两侧的金属护层等效电阻分别为  $R_{1s}$  和  $R_{2s}$ 。芯-护层故障零模等效网络如图 4 所示。

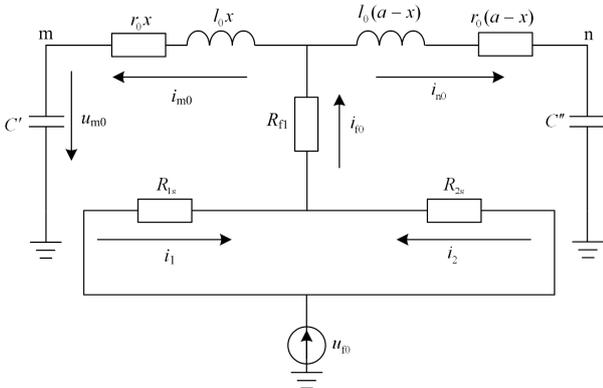


图 4 芯-护层故障零模等效网络

Fig. 4 Zero-mode equivalent network of core-sheath fault

由图 4 可知等效电阻  $R_f$  为

$$R_f = R_{f1} + R_{1s} // R_{2s} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} R_{1s} = r_s x \\ R_{2s} = r_s (a - x) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $r_s$  为金属护层单位长度电阻值。

将式(14)代入式(11)可得测距方程

$$\begin{aligned} A_0 a + (A_1 a + A_6 r_s a)x + (A_2 a - A_6 r_s)x^2 + \\ A_3 a C'' + (A_4 a + A_5 r_s a)C''x - A_5 r_s C''x^2 + \\ A_5 a C''R_{f1} + A_6 R_{f1} a = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

#### (2) 芯-护层对地故障(C-S-G)

当发生芯-护层对地故障时, 即在芯-护层故障的基础上又发生了金属护层接地或经过渡电阻接地。缆芯与护层有过渡电阻  $R_{f1}$ , 护层与大地之间有过渡电阻  $R_{12}$ , 故障点两侧的金属护层等效电阻分别为  $R_{1s}$  和  $R_{2s}$ 。芯-护层对地故障零模等效网络如图 5 所示。

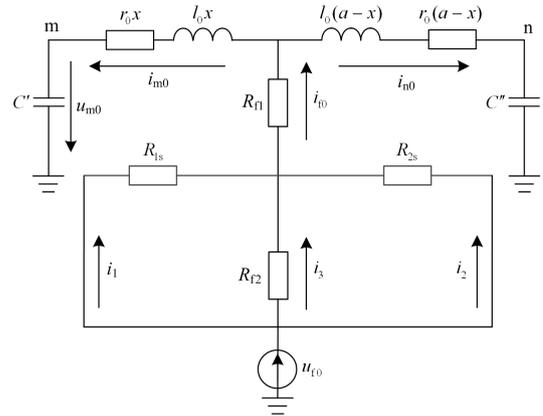


图 5 芯-护层对地故障零模等效网络

Fig. 5 Zero-mode equivalent network of core-sheath-ground fault

由图 5 可知等效电阻  $R_f$  为

$$R_f = R_{f1} + R_{1s} // R_{2s} // R_{12} \quad (17)$$

将式(17)代入式(11)可得测距方程

$$\begin{aligned} (A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 C'' + A_4 C''x) \times \\ [r_s x(a-x) + aR_{12}] + (A_5 C'' + A_6) \times \\ [r_s x(a-x)(R_{f1} + R_{12}) + aR_{f1}R_{12}] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

## 2 电缆单相故障单端测距方法

### 2.1 故障类型辨别方法

本文故障类型辨别方法分为两种, 即基于过渡电阻的故障类型辨别方法和基于零序电流的故障类型辨别方法。基于过渡电阻的故障类型辨别方法是利用芯-护层对地故障测距方程辨识出的过渡电阻  $R_{f1}$  和  $R_{12}$ ,  $R_{f1}$  和  $R_{12}$  之比作为辨别依据。基于零序电流的故障类型辨别方法是利用金属护层中的零序电流和线路的零序电流之间的相对误差作为辨别依据。

### (1) 基于过渡电阻的故障类型判别方法

正常运行状态下, 电缆缆芯与铜屏蔽层之间的主绝缘和钢带铠装层与大地之间的外护套绝缘状态良好, 理论上过渡电阻  $R_{r1}$  和  $R_{r2}$  应为无穷大。当电缆发生芯-护层故障后, 电缆主绝缘被破坏, 过渡电阻  $R_{r1}$  降低为某一定值, 过渡电阻  $R_{r2}$  仍为无穷大,  $R_{r2}$  与  $R_{r1}$  的比值较大。当电缆发生芯-护层对地故障后, 电缆两处绝缘均被破坏, 过渡电阻  $R_{r1}$  和  $R_{r2}$  同时降低, 分别为某一定值, 其值与电弧长度有关, 由于电缆多埋于地下, 两者的电弧长度相差不大,  $R_{r2}$  与  $R_{r1}$  的比值较小。因此, 可以利用  $R_{r2}$  与  $R_{r1}$  的比值来判别故障类型。

利用芯-护层对地故障测距方程进行最小二乘参数辨识, 得到  $x$ 、 $C''$ 、 $R_{r1}$ 、 $R_{r2}$ 。若  $R_{r2}$  和  $R_{r1}$  的比值  $\delta_1$  大于阈值  $\varepsilon_1$ , 可认为金属护层与地之间处于开路状态, 判断为芯-护层故障; 否则, 判断为芯-护层对地故障。  $\delta_1$  计算公式为

$$\delta_1 = \frac{R_{r2}}{R_{r1}} \quad (19)$$

### (2) 基于零序电流的故障类型判别方法

基于零序电流的故障类型判别方法需要测量三相电压、三相电流和电缆首端金属护层零序电流  $i'_1$ 。根据图 3 的故障状态网络零模等效电路, 在芯-护层故障中, 护层中的零序电流应等于故障线路的零序电流, 流过等效电阻  $R_{1s}$  的电流  $i_1$  即为测量得到的首端金属护层零序电流  $i'_1$ 。

由于金属护层两端零序电流与其等效电阻成反比, 而等效电阻与故障距离成正比, 因此只需利用测得首端金属护层电流  $i'_1$  和计算得到的故障距离  $x$  即可计算出末端金属护层零序电流  $i'_2$ , 同时可得金属护层两端零序电流之和  $i'_{10}$ 。如果实际故障为芯-护层对地故障, 那么利用芯-护层故障测距方程计算得到的金属护层两端零序电流之和  $i'_{10}$  与故障线路检测到的零序电流  $i_{10}$  偏差较大。

利用芯-护层故障测距方程进行最小二乘参数辨识, 得到  $x$ 、 $C''$ 、 $R_{r1}$ 。根据  $x$  及测得的金属护层首端电流  $i_1(k)$  计算得到金属护层两端零序电流之和  $i'_{10}(k)$ 。若  $i'_{10}(k)$  与  $i_{10}(k)$  相对误差  $\delta_2$  小于阈值  $\varepsilon_2$  时, 判断为芯-护层故障, 否则, 判断为芯-护层对地故障。相对误差  $\delta_2$  计算公式为

$$\delta_2 = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{|i'_{10}(k) - i_{10}(k)|}{i_{10}(k)}}{N} \times 100\% \quad (20)$$

式中,  $N$  为采样点数。

## 2.2 故障测距方法

本文方法在已判断出故障线路和故障相的基础上进行, 故障测距方法步骤如下。

(1) 考虑到可用暂态信号能够被有效采集, 本文以 6 400 Hz 采样率进行采样。记录故障后的母线电压、故障线路电流、金属护层首端电流数据, 即  $u_{ma}(k)$ 、 $u_{mb}(k)$ 、 $u_{mc}(k)$ 、 $i_{ma}(k)$ 、 $i_{mb}(k)$ 、 $i_{mc}(k)$  和  $i_1(k)$ 。考虑充分利用暂态阶段数据成分丰富的特点, 选取 0.5~1 个工频周期的数据作为故障定位的输入数据。

(2) 根据式(9)得到零模电压  $u_{m0}(k)$ 、零模电流  $i_{m0}(k)$ 。

(3) 利用基于过渡电阻的故障类型判别方法和基于零序电流的故障类型判别方法判断出芯-护层故障或芯-护层对地故障。

(4) 求故障距离  $x$ 。

基于两种故障类型辨识的故障测距方法流程分别如图 6 和图 7 所示。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真参数设置

为了验证本文所提测距方法的有效性 with 正确性, 在 ATP-EMTP 中搭建了 10 kV 配电网仿真系统, 如图 8 所示。该系统共有 3 条电缆出线, 长度分别

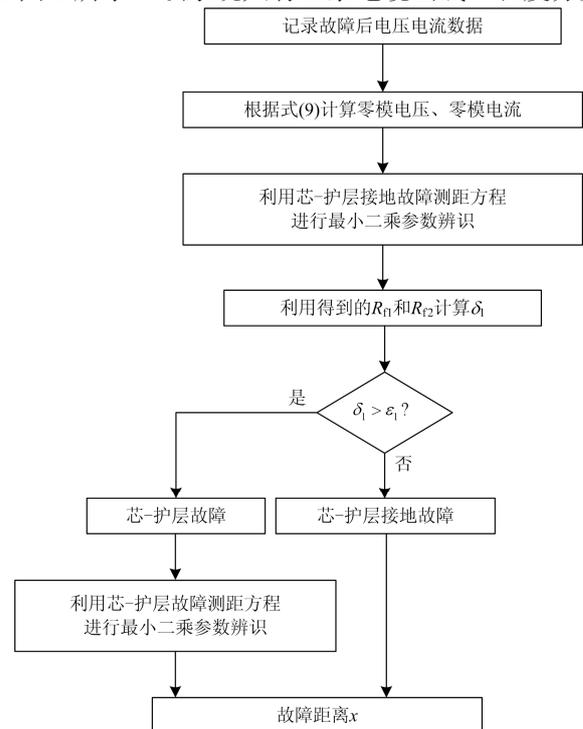


图 6 基于过渡电阻的故障类型判别方法测距流程

Fig. 6 Flow of fault type identification method based on transition resistance

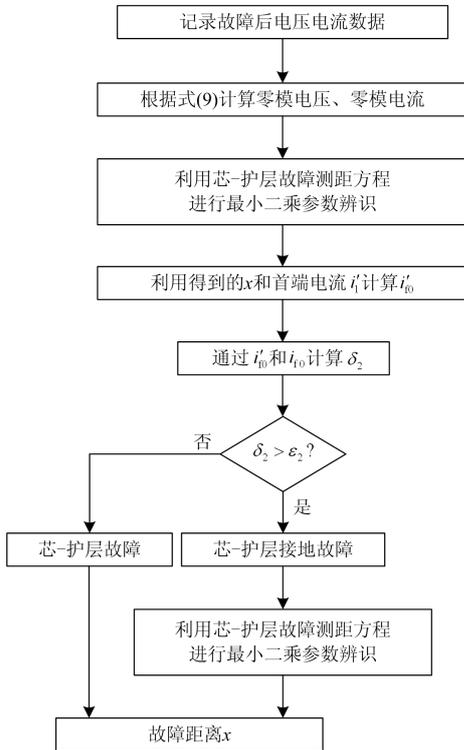


图 7 基于零序电流的故障类型辨别方法测距流程

Fig. 7 Flow of fault type identification method based on zero sequence current

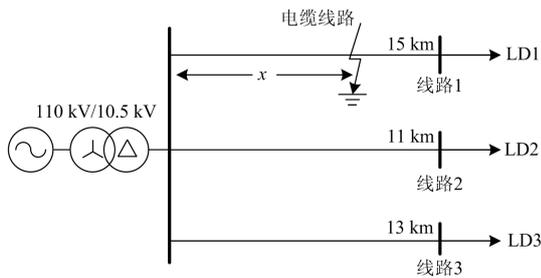


图 8 配电网电缆仿真系统

Fig. 8 Cable simulation system of distribution network

为 15 km、11 km 和 13 km。电源电压为 110 kV，变压器变比为 110 kV/10.5 kV，Y/Δ 联结。负荷采用集中模型表示，有功功率为 1 MW，无功功率为 0.4 Mvar(滞后)。电缆采用 YJV22-10-3×400 参数，正序电阻  $r_1$  和负序电阻  $r_2$  均为 0.064 2 Ω/km，零序电阻  $r_0$  为 0.196 5 Ω/km，正序电感  $l_1$  和负序电感  $l_2$  均为 0.129 mH/km，零序电感  $l_0$  为 0.125 mH/km，正序电容  $c_1$  和负序电容  $c_2$  均为 0.317 μF/km，零序电容  $c_0$  为 0.203 μF/km，金属护层电阻  $r_s$  为 0.132 Ω/km。采样频率 6.4 kHz。这里阈值  $\epsilon_1$  取 20， $\epsilon_2$  取 5%。

### 3.2 故障测距精度分析

对芯-护层故障(C-S)和芯-护层对地故障(C-S-G)两种测距方程辨识故障距离的精度进行验证分析。

#### (1) 不同故障距离的仿真分析

分别设置线路 1 的 A 相发生芯-护层故障和芯-护层对地故障，故障初始角均为 90°，故障距离  $x$  分别为 1 km、3 km、5 km、8 km、9 km、10 km、12 km、14 km。其中芯-护层故障的缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  为 20 Ω。故障距离辨识结果如表 1 所示。

表 1 芯-护层故障不同故障距离辨识结果

Table 1 Different fault distance identification

results of C-S fault

x/km	测距结果		测距误差/%	
	x/km	$R_{r1}/\Omega$	S 级误差	F 级误差
1	1.02	19.76	2.50	0.17
3	3.02	20.85	0.93	0.19
5	4.93	20.15	1.26	0.17
8	8.08	20.38	1.04	0.55
9	9.10	19.77	1.18	0.71
10	10.09	19.59	0.96	0.64
12	11.74	20.52	2.17	1.73
14	13.88	20.15	0.81	0.75

表 1 中，S 级误差为测距绝对误差与设定距离之比的百分数，F 级误差为测距绝对误差与线路总长之比的百分数<sup>[22]</sup>。从表 1 可知，芯-护层故障测距误差中 S 级误差最大为 2.50%，F 级误差最大为 1.73%。不同故障距离对测距方法影响较小，满足工程误差要求，测距精度较高。

对于芯-护层对地故障，故障距离辨识结果如表 2 所示，其中芯-护层故障的缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  为 20 Ω，护层与大地过渡电阻  $R_{r2}$  为 30 Ω。

表 2 芯-护层对地故障不同故障距离辨识结果

Table 2 Different fault distance identification

results of C-S-G fault

x/km	测距结果			测距误差/%	
	x/km	$R_{r1}/\Omega$	$R_{r2}/\Omega$	S 级误差	F 级误差
1	1.01	19.84	29.68	1.90	0.13
3	2.97	19.77	29.83	0.87	0.17
5	5.10	20.16	29.76	2.04	0.68
8	7.92	20.29	30.17	0.99	0.53
9	9.08	20.20	30.29	0.96	0.57
10	10.17	19.87	30.24	1.70	1.13
12	11.79	20.13	29.87	1.73	1.38
14	14.20	19.89	30.12	1.46	1.37

从表 2 可知，芯-护层对地故障测距误差中 S 级误差最大为 2.04%，F 级误差最大为 1.38%。不同故障距离对测距方法影响较小，满足工程误差要求，

测距精度较高。

### (2) 不同过渡故障电阻的仿真分析

分别设置线路 1 的 A 相发生芯-护层故障和芯-护层对地故障。故障初始角均为  $90^\circ$ , 故障距离  $x$  分别为 3 km、7 km 和 10 km。其中芯-护层故障的缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  分别为  $10 \Omega$ 、 $20 \Omega$ 、 $30 \Omega$  和  $40 \Omega$ 。故障距离辨识结果如表 3 所示。

表 3 芯-护层故障不同过渡电阻辨识结果

Table 3 Different transition resistance identification results of C-S fault

$x/\text{km}$	$R_{r1}/\Omega$	测距结果		测距误差/%	
		$x/\text{km}$	$R_{r1}/\Omega$	S 级误差	F 级误差
3	10	3.07	9.94	2.37	0.47
3	20	3.02	20.85	0.93	0.19
3	30	2.95	30.17	1.50	0.30
3	40	3.06	39.79	2.20	0.44
7	10	6.94	9.77	0.76	0.35
7	20	6.95	19.80	0.60	0.28
7	30	6.92	30.45	1.01	0.47
7	40	7.12	39.53	1.74	0.81
10	10	9.90	9.91	0.95	0.44
10	20	10.09	19.59	0.96	0.64
10	30	9.90	29.80	0.93	0.62
10	40	9.86	40.42	1.36	0.91

从表 3 可知, 芯-护层故障测距误差中 S 级误差最大为 2.37%, F 级误差最大为 0.91%。不同过渡电阻对测距方法影响较小, 满足工程误差要求, 测距精度较高。

对于芯-护层对地故障, 故障距离辨识结果如表 4 所示, 其中芯-护层故障的缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  为  $10 \Omega$  和  $20 \Omega$ , 护层与大地过渡电阻  $R_{r2}$  为  $20 \Omega$  和  $30 \Omega$ 。

表 4 芯-护层故障不同过渡电阻辨识结果

Table 4 Different transition resistance identification results of C-S-G fault

$x/\text{km}$	$R_{r1}/\Omega$	$R_{r2}/\Omega$	测距结果			测距误差/%	
			$x/\text{km}$	$R_{r1}/\Omega$	$R_{r2}/\Omega$	S 级	F 级
3	10	20	2.98	9.86	20.23	0.47	0.09
3	10	30	3.01	10.15	30.31	0.53	0.11
3	20	20	2.93	20.08	19.72	2.07	0.41
3	20	30	2.97	19.79	29.83	0.87	0.17
7	10	20	6.96	10.02	19.82	0.54	0.25
7	10	30	7.10	10.49	29.89	1.54	0.07
7	20	20	7.06	20.47	20.75	0.97	0.45
7	20	30	7.18	20.01	30.41	2.64	1.23
10	10	20	9.93	9.817	19.76	0.99	0.46
10	10	30	9.88	9.91	30.07	1.61	0.75
10	20	20	9.97	20.11	20.31	0.61	0.29
10	20	30	9.82	19.87	30.24	1.70	1.13

从表 4 可知, 芯-护层对地故障误差中 S 级误差最大为 2.07%, F 级误差最大为 1.23%。不同过渡电阻对测距方法影响较小, 满足工程误差要求, 测距精度较高。

### (3) 不同故障初始角的仿真分析

分别设置线路 1 的 A 相发生芯-护层故障和芯-护层对地故障。故障初相角分别为  $54^\circ$ 、 $144^\circ$ 、 $270^\circ$  和  $342^\circ$ , 故障距离  $x$  分别为 3 km、7 km 和 10 km, 缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  为  $15 \Omega$ , 护层与大地过渡电阻  $R_{r2}$  为  $30 \Omega$ 。故障测距的辨识结果如表 5 所示。

表 5 不同故障初相角的故障距离辨识结果

Table 5 Fault distance identification results at different fault initial phase angles

$x/\text{km}$	故障初相角/ $^\circ$	测距结果/km	
		C-S	C-S-G
3	54	3.11	3.11
3	144	2.90	2.87
3	270	3.10	3.14
3	342	3.02	2.95
7	54	6.84	7.18
7	144	7.08	6.92
7	270	7.10	7.21
7	342	6.93	7.10
10	54	9.80	10.12
10	144	9.85	9.90
10	270	10.21	9.88
10	342	9.92	10.07

从表 5 可知, 三种故障类型的测距 S 级误差最大为 4.73%, F 级误差最大为 1.68%。不同故障初相角对测距结果影响较小, 可以满足工程误差要求, 测距精度较高。

以上仿真表明, 两种故障类型的测距方程均能对电缆单相故障进行准确测距, 测距方程不受故障距离、过渡电阻和故障初相角的影响, 方法具有较高精度。

## 3.3 故障测距方法有效性分析

利用故障测距方法对两种故障类型辨识的有效性进行验证分析。

### (1) 芯-护层故障的仿真分析

在线路 1 上设置 A 相芯-护层故障, 故障点距母线 8 km, 缆芯与铜屏蔽层之间过渡电阻  $R_{r1}$  为  $10 \Omega$ 。

根据故障测距方法, 首先记录故障后的母线电压、故障线路电流和金属护层电流, 即  $u_{ma}(k)$ 、 $u_{mb}(k)$ 、 $u_{mc}(k)$ 、 $i_{ma}(k)$ 、 $i_{mb}(k)$ 、 $i_{mc}(k)$  和  $i_1(k)$ 。然后根据式(9)得到零模电压  $u_{m0}(k)$ 、零模电流  $i_{m0}(k)$ 。

若采用基于过渡电阻的故障类型辨别方法, 则

利用芯-护层对地故障测距方程进行最小二乘参数辨识。辨识得到的故障距离  $x$  为 4.162 km, 缆芯与铜屏蔽层之间过渡电阻  $R_{r1}$  为 7.871  $\Omega$ , 钢带铠装层与大地之间过渡电阻  $R_{r2}$  为 322.86  $\Omega$ 。  $\delta_1$  为 41.02,  $\delta_1$  大于阈值  $\varepsilon_1$  (本文取 20), 根据测距方法此时故障类型为芯-护层故障。再利用芯-护层故障测距方程进行最小二乘参数辨识, 得到最终故障距离为 8.052 km。

若采用基于故障电流的故障类型辨别方法, 则利用芯-护层故障测距方程进行最小二乘参数辨识。辨识得到的故障距离  $x$  为 8.052 km, 缆芯与护层过渡电阻  $R_{r1}$  为 4.857  $\Omega$ 。从记录的金属护层首端电流  $i'_1(k)$  结合得到的故障距离  $x$  计算出金属护层两端电流之和  $i'_{10}(k)$ , 计算  $i'_{10}(k)$  和  $i_{10}(k)$  的相对误差  $\delta_2$  为 1.74%, 小于阈值  $\varepsilon_2$  (5%), 根据测距方法此时故障类型为芯-护层故障, 无需重新计算故障距离, 故障距离为 8.052 km。

#### (2) 芯-护层对地故障的仿真分析

在线路 1 上设置 A 相芯-护层对地故障, 故障点距母线 8 km, 缆芯与铜屏蔽层之间过渡电阻  $R_{r1}$  为 10  $\Omega$ , 钢带铠装层与大地过渡电阻  $R_{r2}$  为 20  $\Omega$ 。

若采用基于过渡电阻的故障类型辨别方法, 则利用芯-护层对地故障测距方程进行最小二乘参数辨识。辨识得到的故障距离  $x$  为 7.938 km, 缆芯与铜屏蔽层之间过渡电阻  $R_{r1}$  为 9.765  $\Omega$ , 钢带铠装层与大地之间过渡电阻  $R_{r2}$  为 20.667  $\Omega$ 。  $\delta_1$  为 2.12,  $\delta_1$  小于阈值  $\varepsilon_1$ , 根据测距方法此时故障类型为芯-护层对地故障, 无需重新计算故障距离, 故障距离为 7.938 km。

若采用基于故障电流的故障类型辨别方法, 则利用芯-护层故障测距方程进行最小二乘参数辨识。辨识得到的故障距离  $x$  为 9.416 km, 缆芯与铜屏蔽层之间过渡电阻  $R_{r1}$  为 24.187  $\Omega$ 。从记录的金属护层首端电流  $i'_1(k)$  结合得到的故障距离  $x$  计算出金属护层两端电流之和  $i'_{10}(k)$ , 计算  $i'_{10}(k)$  和  $i_{10}(k)$  的相对误差  $\delta_2$  为 25.73%, 大于阈值  $\varepsilon_2$  (5%), 根据测距方法此时故障类型为芯-护层对地故障。再利用芯-护层对地故障测距方程进行最小二乘参数辨识, 得到最终故障距离为 7.938 km。

通过上述分析可以看出, 本文所提出的故障测距方法能够有效的区分芯-护层故障和芯-护层对地故障。

## 4 结论

本文提出一种基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法。针对金属护层结构将单

相故障类型分为芯-护层故障和芯-护层对地故障, 仅利用故障线路母线端电压和电流暂态数据, 根据零模等效电路建立测距方程, 基于最小二乘法对故障测距方程进行参数辨识。仿真表明本方法测距精度高, 且不受电缆故障距离、过渡电阻和故障初相角的影响。为解决电缆单相故障单端测距提供了一种较为实用的方法。

## 参考文献

- [1] DU Y, WANG X H, YUAN Z H. Induced voltage and power losses in single-conductor armored cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2009, 45(6): 2145-2151.
- [2] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用故障特征频率和 TT 变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 31(22): 103-112.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, 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, 31(22): 103-112.
- [3] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 130-136.  
LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 130-136.
- [4] 束洪春, 郭乾晋, 张广斌, 等. 基于神经网络的单端行波故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 85-92.  
SHU Hongchun, GUO Qianjin, ZHANG Guangbin, et al. Single terminal traveling wave fault location method based on ANN[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 85-92.
- [5] 范春菊, 姜军, 郭煜华, 等. 输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 129-134.  
FAN Chunju, JIANG Jun, GUO Yuhua, et al. Development and application of traveling wave fault location technology for transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(4): 129-134.
- [6] 薛永端, 李乐, 俞恩科, 等. 基于分段补偿原理的电缆架空混合香炉双端行波故障测距算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1953-1958.  
XUE Yongduan, LI Le, YU Enke, et al. A sectionalized compensation based two-terminal traveling wave fault location algorithm for hybrid transmission line composed of power cable and overhead line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1953-1958.
- [7] 黄荣辉, 李勋, 张宏钊, 等. 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 73-81.  
HUANG Ronghui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al.

- Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 73-81.
- [8] 杨建, 唐忠. 高压电缆在线行波故障测距算法的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 48-54.  
YANG Jian, TANG Zhong. Design of online traveling wave based fault location algorithm for HV power cable[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 48-54.
- [9] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.  
YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.
- [10] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西. 电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 1-8.  
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi. Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 1-8.
- [11] 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 networks based on eigenvalue[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 762-767.
- [12] YANG X, CHOI M S, LEE S J, et al. Fault location for underground power cable using distribution parameter approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1809-1816.
- [13] 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[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 parameter model[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 185-189.
- [14] 索南加乐, 齐军, 陈福峰, 等. 基于 R-L 模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.  
SUONAN Jiale, QI Jun, CHEN Fufeng, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of traveling wave time and frequency analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 119-125.
- [15] XU Z H, SIDHU T S. Fault location method based on single-end measurements for underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2845-2854.
- [16] 张姝, 林圣, 唐进, 等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 1-10.  
ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables on double impedance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 1-10.
- [17] 唐进, 张姝, 林圣, 等. 计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1748-1756.  
TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal fault locating method of cables considering the metal sheath structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1748-1756.
- [18] 孙建明, 唐进. 考虑金属护层结构的电力电缆单端故障识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 96-101.  
SUN Jianming, TANG Jin. Single-ended fault identification method of cables considered the sheath structure[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 96-101.
- [19] HUANG W Y, ROBERT K. Equivalent circuits for an SLG fault distance evaluation by curve fitting in compensated distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(20): 601-608.
- [20] 薛永端, 李娟, 陈筱蕾, 等. 谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.  
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5037-5048, 5223.
- [21] 杨德昌, 魏向向, 温渤婴, 等. 基于稀疏分解与综合测度值的配电网故障选线方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1526-1534.  
YANG Dechang, WEI Xiangxiang, WEN Boying, et al. Fault line selection method based on sparse decomposition and comprehensive measure values for distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1526-1534.
- [22] 董张卓, 王清亮, 黄国兵. 配电网和配电自动化系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 110-113.

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-02-19

作者简介:

赵铁军(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电缆接地故障测距; E-mail: qhdzhaotj@sina.com

王秀斌(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电缆接地故障诊断与抢修;

虞跃(1982—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电缆接地故障诊断与抢修。

(编辑 张爱琴)