

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210325

基于行波波形综合相似度比较的电缆故障选线

王雪菲¹, 李京^{1,2}, 陈平¹, 刘洋¹, 张文轩¹, 于毅¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 针对现有小电流接地故障行波选线方法高度依赖行波初始波头的不足, 通过分析三芯电缆故障行波折、反射过程, 提出了基于行波电流波形综合相似度比较的小电流接地系统电缆故障选线方法。该方法首先利用 S 变换提取电缆故障产生的金属护层接地线行波电流时频信息, 然后构造行波电流信号的时频能量矩阵和波形相似度矩阵, 进而根据波形相似度矩阵计算每条线路和其他线路的行波波形综合相似度系数, 最后通过比较波形综合相似度系数实现故障选线。仿真和实测数据分析表明, 所提出的方法可以充分利用暂态行波故障信息, 且不受系统中性点接地方式、故障位置、过渡电阻等因素影响, 选线结果准确、可靠。

关键词: 三芯电缆; 金属护层; 行波; 波形相似度; 故障选线

Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms

WANG Xuefei¹, LI Jing^{1,2}, CHEN Ping¹, LIU Yang¹, ZHANG Wenxuan¹, YU Yi¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: Existing traveling wave fault line selection methods for a small current grounding system highly rely on the initial head of the traveling wave. To help overcome this deficiency, this paper proposes a fault line selection method based on the comparison of comprehensive similarity of traveling wave current waveforms for a small current grounding system by analyzing the refraction and reflection process of the fault traveling wave in three-core cable. First, it extracts the time-frequency information of the traveling wave current caused by cable faults in metal sheath grounding wire by S-transform, then constructs the time-frequency energy matrix and waveform similarity matrix of the traveling wave current signal. It then calculates the comprehensive similarity coefficient of traveling wave shape of each line with other lines according to the waveform similarity matrix. Finally, it accomplishes the fault line selection by comparing the comprehensive similarity coefficient. Simulation and measured data analysis shows that the proposed method can make full use of the transient traveling wave fault information, and is not affected by the neutral point grounding mode, fault location and transition resistance of the system, and the line selection results are accurate and reliable.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: three-core cable; metal sheath; traveling wave; waveform similarity; fault line selection

0 引言

我国 10~35 kV 配电网主要采用中性点不接地或中性点经消弧线圈接地的运行方式(统称为小电流接地方式), 其存在的主要问题是单相接地故障时稳态电流小、故障检测困难^[1-4]。随着我国城市化进程的迅速发展, 电缆线路在城市配电网得到广泛应

用。由于电力电缆敷设于地下的特殊结构, 故障后无法通过巡线等直接观察法发现故障, 进一步为故障线路的判定增加了难度^[5-6]。电力电缆故障类型主要为单相故障, 由于电缆结构原因, 常见故障几乎均与护层有关。这些故障轻则引起电缆缺相运行, 降低电能质量, 重则使电缆绝缘遭到破坏, 进而危及电缆的运行安全, 引发停电、火灾等更为严重的事故^[7-8]。因此, 快速准确地检测单相故障并确定故障线路对电缆配电网的可靠运行具有重要的意义。

目前应用的小电流接地系统电缆故障选线方法

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902800);
国家电网公司科技项目资助(52094017003D)

大多由现有的架空线选线方法转化而来,主要有基于稳态信息的选线方法、基于暂态信息的选线方法、基于行波信息的选线方法等。基于稳态信息的选线方法^[9]是最先发展起来的一类监测方法,但受到稳态信号幅值小,受消弧线圈补偿作用影响大等因素的制约,不适用于现有的谐振接地系统。基于暂态信息的选线方法^[10-11]选用了故障后特征明显、幅值较大的暂态信息,有效避免了消弧线圈补偿作用对选线方法的影响,但现有的暂态分析方法受数学分析的限制,难以准确描述和定量计算,且暂态时频段难以准确界定,给实际应用带来困难。行波法在行波理论的基础上发展而来,具有不受系统参数、过渡电阻大小及系统运行方式等因素影响的优点,在配电网故障选线中具有较大的优势。文献[12]提出了基于故障行波初始波头极性比较的选线方法;文献[13]提出了自适应时频窗的初始波头检测方法,弥补了传统固定窗口检测的不足;文献[14]提出了通过比较 S 变换后零模电流幅角差的选线方法,降低了对采样频率的要求;文献[15]提出了基于时差矩阵变化特征的选线方法,并引入了最小二乘法减小初始行波波头标定误差。现有行波选线方法多着眼于故障行波初始波头信息,但配电网线路长度短,故障行波将在短时间内发生多次折、反射,仅依赖行波初始波头信息的方法对采样设备要求较高^[16],若未能准确捕捉初始波头将导致选线失败。现有电缆故障判别方法多使用简化的电缆结构模型,没有考虑电缆金属护层包含的故障信息。目前,现场已经可以很方便地测得电缆首端护层接地线电流数据,如何有效利用护层中的故障信息实现电缆故障监测,及时准确地排除故障,对提高供电可靠性具有重要意义。

本文在分析小电流接地系统电缆故障行波折、反射过程的基础上,提出一种基于行波电流波形综合相似度比较的电缆故障选线方法,充分利用了暂态行波所包含的故障信息。

1 电缆故障行波电流特征分析

当小电流接地系统电缆网络发生单相主绝缘故障时,故障产生的行波将从故障点向线路两端传播,零模行波电流具体传播过程如图 1 所示。图中, i_{F0} 表示故障初始行波电流, t_1 表示初始零模行波电流到达母线端测量点的时刻, t_2 表示零模行波经最短非故障线路末端反射后到达母线端测量点的时刻。

设母线含 N 回电缆出线,所有出线的零模波阻抗均为 Z_0 ,相对任一线路的母线等效波阻抗可以看作其余 $N-1$ 条线路波阻抗的并联,则母线处零模电

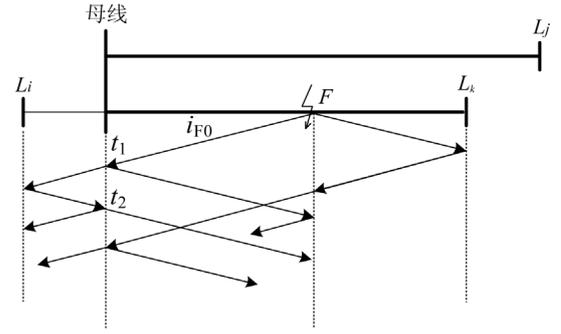


图 1 电缆网络零模故障行波传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of zero-mode fault traveling wave propagation in cable network

流行波折射系数和反射系数分别可以表示为

$$\alpha_1 = \frac{2(N-1)}{N} \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{N-2}{N} \quad (2)$$

以线路 L_k 发生单相主绝缘故障为例,假定电流参考方向为母线指向线路,则故障初始行波到达母线时,故障线路及所有非故障线路首端测量到的零模行波电流可以表示为

$$i_{k,t1} = (-i_{F0}) + \beta_1(-i_{F0}) = -\frac{2(N-1)}{N}i_{F0} \quad (3)$$

$$i_{i,t1} = i_{j,t1} = \alpha_1 i_{F0} \left(\frac{1}{N-1} \right) = \frac{2}{N}i_{F0} \quad (4)$$

式中, $i_{k,t1}$ 、 $i_{i,t1}$ 、 $i_{j,t1}$ 分别为故障线路 L_k 、最短非故障线路 L_i 、其他非故障线路 L_j 在 t_1 时刻所测量到的零模行波电流。

由于在配电网中母线大多数均含有多条出线,因此 $N > 2$ 。结合式(3)、式(4)可知,故障线路初始零模行波电流幅值大于非故障线路且极性相反,而所有非故障线路初始零模行波电流极性相同,幅值相等。

由于线路末端均接有变压器,对于行波信号而言可等效为开路^[17],因此零模电流行波将在线路末端发生全反射,则非故障线路 L_i 末端零模行波反射系数 $\beta_2 = -1$ 。

当最短非故障线路末端反射波到达测量端母线时,在本线路及其他所有线路(含故障线路)测量到的零模行波电流可以表示为

$$i_{i,t2} = \beta_2 \alpha_1 i_{F0} + \beta_1 \beta_2 \alpha_1 i_{F0} = -\frac{4(N-1)}{N^2}i_{F0} \quad (5)$$

$$i_{j,t2} = i_{k,t2} = \alpha_1 \beta_2 \alpha_1 i_{F0} = \frac{4}{N^2}i_{F0} \quad (6)$$

式中, $i_{k,t2}$ 、 $i_{i,t2}$ 、 $i_{j,t2}$ 分别为故障线路 L_k 、最短非故障线路 L_i 、其他非故障线路 L_j 在 t_2 时刻所测量到的

零模行波电流。

由于 $N > 2$, 结合式(5)、式(6)可知, 当最短非故障线路末端反射波到达测量端母线时, 该线路零模行波电流幅值大于其他所有线路(含故障线路)且极性相反。

以上分析表明, 在测量点, 从故障初始行波到达开始到相邻最短非故障线路末端反射波到来之前, 故障线路零模行波电流与所有非故障线路零模行波电流在波形上存在反极性相似的关系, 如图 2 所示。

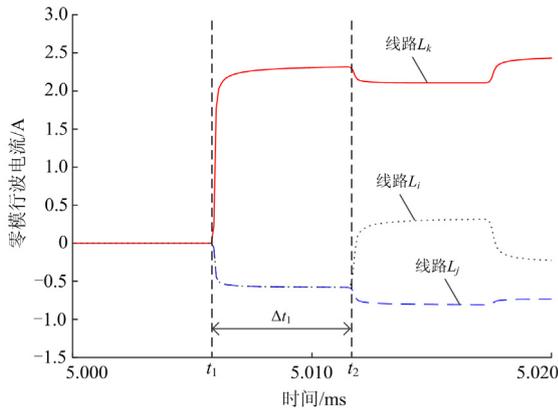


图 2 零模行波电流波形示意图(短数据窗)

Fig. 2 Schematic diagram of zero-mode traveling wave current waveform (short data window)

行波幅值的变化过程可以看作能量的传播过程, 故障发生后, 故障线路行波能量远大于其他非故障线路。通过大量仿真发现, 线路的长短只影响局部行波波形, 非故障线路行波波形整体而言相对平缓, 而故障线路波形变化更加剧烈。后续零模行波电流波形如图 3 所示。图中, t_3 表示零模行波电流经最长非故障线路末端反射后到达母线端测量点的时刻。

由图 3 可以看出: 从故障初始行波到达开始到相邻最长非故障线路末端反射波到来之前, 所有非故障线路零模行波电流波形相似程度明显大于故障线路与非故障线路零模行波电流波形相似程度。因此, 可以通过比较同母线电缆线路的零模行波电流在该段时间内的波形相似度实现故障选线。

当电缆网络发生单相主绝缘故障时, 故障产生的零模行波将以金属护层作为传播回路, 并经过金属护层接地点流入大地。在这种情况下, 无论是故障电缆, 还是非故障电缆, 其金属护层接地点的行波电流均等于该点的 3 倍零模行波电流, 从而可以通过比较同母线电缆线路的金属护层接地点行波电流在一段时间内的波形相似度实现故障选线。

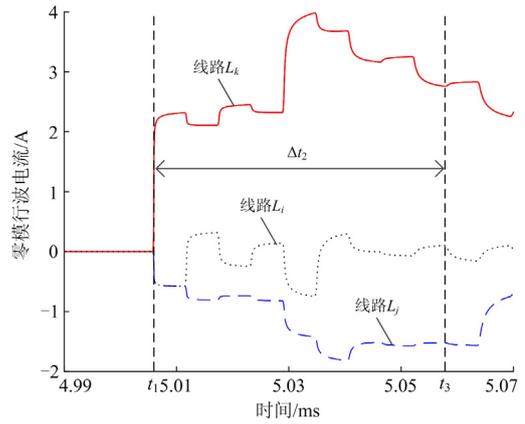


图 3 零模行波电流波形示意图(长数据窗)

Fig. 3 Schematic diagram of zero-mode traveling wave current waveform (long data window)

2 基于行波波形相似度的电缆故障选线算法

2.1 S 变换及时频能量矩阵

当线路发生故障时, 实际测量到的故障行波均为一系列时变行波的叠加, 其在不同时段内的含量受到故障条件等因素的影响, 因此, 可将获取到的行波信号转变为时-频信息, 充分利用故障行波在时域和频域上的传输特性^[18-20]。S 变换是在连续小波变换及短时傅里叶变换基础上发展而来的一种时频分析方法, 可以兼顾二者的优点, 近年来被广泛应用于处理行波等非线性、非平稳信号, 处理结果呈现为一个时频复矩阵, 简单直观^[21-22]。

行波电流信号 $i(t)$ 的离散 S 变换可以表示为^[23]

$$\begin{cases} S[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} I[n+k] e^{-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi km}{N}}, (n \neq 0) \\ S[m, n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i[k], (n = 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中, $I[n]$ 为行波电流信号 $i(t)$ 的离散傅里叶变换:

$$I[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i[k] e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (8)$$

式中: k 为时间参数, $k=0, 1, \dots, N-1$; n 为频率参数, 当 $n > N/2$ 时, 对应采样点位于负频率范围, 由离散傅里叶变换原理可知, 若 $i(t)$ 为实数信号, 此时负频率范围结果与正频率范围结果呈共轭关系, 因此设定 $n=0, 1, \dots, N/2$ 。离散 S 变换结果为一个二维矩阵:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S(0,0) & \cdots & S(0,b) & \cdots & S(0,N-1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S(a,0) & \cdots & S(a,b) & \cdots & S(a,N-1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S(\frac{N}{2},0) & \cdots & S(\frac{N}{2},b) & \cdots & S(\frac{N}{2},N-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了凸显故障信号的时频局部化特性,同时便于计算,将 \mathbf{S} 矩阵各频段的信号等分为 M 个时段,得到多个时频小块,定义第 a 个频段下第 x 个时段对应的时频小块的能量幅值为

$$E_{a,x} = \sum_{b=(x-1)\frac{N}{M}}^{x\frac{N}{M}} \text{Re}[\mathbf{S}_{a,b}] \quad (10)$$

式中, $\text{Re}(\mathbf{S})$ 表示对复数矩阵 \mathbf{S} 求实部。

所有的时频小块能量元素构成时频能量矩阵如式(11)所示。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{0,1} & \cdots & E_{0,x} & \cdots & E_{0,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{a,1} & \cdots & E_{a,x} & \cdots & E_{a,M} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ E_{\frac{N}{2},1} & \cdots & E_{\frac{N}{2},x} & \cdots & E_{\frac{N}{2},M} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 基于波形相似度比较的选线算法

设 E_p, E_q 为任意两回线路 L_p 和 L_q 首端护层接地线行波电流信号的时频能量矩阵,线路 L_p 和线路 L_q 的首端金属护层接地线行波电流波形相似度系数可表示为^[24]

$$r_{pq} = \frac{\sum_{j=0}^{\frac{N}{2}} \sum_{i=1}^M \mathbf{E}_p(j,i) \mathbf{E}_q(j,i)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{\frac{N}{2}} \sum_{i=1}^M (\mathbf{E}_p(j,i))^2 \sum_{j=0}^{\frac{N}{2}} \sum_{i=1}^M (\mathbf{E}_q(j,i))^2}} \quad (12)$$

波形相似度系数的取值区间为 $[-1,1]$,正负号表示相似的方向,绝对值的大小表示相似的程度,绝对值越接近于 1,则两信号波形相似程度越高^[25-26]。

分析表明,电缆线路发生故障后,故障线路与任一非故障线路的金属护层行波电流波形相似度系数明显小于任意两非故障线路金属护层接地线行波电流波形相似度系数。设系统包含 N 回电缆出线,定义波形相似度矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{iN} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ r_{N1} & \cdots & r_{Nj} & \cdots & r_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, r_{ij} 为线路 L_i 与线路 L_j 的金属护层接地线行波电流波形相似度系数。

定义线路 L_i 与其他线路的行波电流波形综合相似度系数为

$$r_{ci} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N r_{ij}^2} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (14)$$

显然,故障线路与其他线路的行波电流波形综合相似度系数小于任何非故障线路与其他线路的行波电流波形综合相似度系数。为可靠起见,确定线路 L_k 为故障线路的判据可以表示为

$$\begin{cases} r_{ck} = \min(r_{ci}) < \lambda r_{cm} \quad (i=1,2,\dots,N) \\ r_{cm} = \min(r_{ci}) \quad (i=1,2,\dots,N, i \neq k) \end{cases} \quad (15)$$

式中: λ 为可靠系数; r_{cm} 为整定值,数值上等于所有行波电流波形综合相似度系数中的次小值。经过大量的仿真验证,本文设定 $\lambda=0.5$ 。

若式(15)表示的故障选线判据成立,则判定线路 L_k 为故障线路,否则判定为母线故障。

具体的故障选线步骤如下。

1) 参数设置: 根据实际线路结构参数计算零模行波波速度,根据最长出线长度确定仿真所用时窗宽度。

2) 时频信息提取: 利用 \mathbf{S} 变换提取电缆故障产生的金属护层接地线行波电流时频信息。

3) 矩阵构建: 分别构建各线路金属护层行波电流信号的时频能量矩阵、波形相似度矩阵。

4) 综合相似度系数计算: 根据波形相似度矩阵计算每条线路和其他线路的行波波综合相似度系数。

5) 故障线路判别: 根据式(15)判别故障线路。

图 4 给出了基于行波电流波形综合相似度比较的电缆故障选线流程。

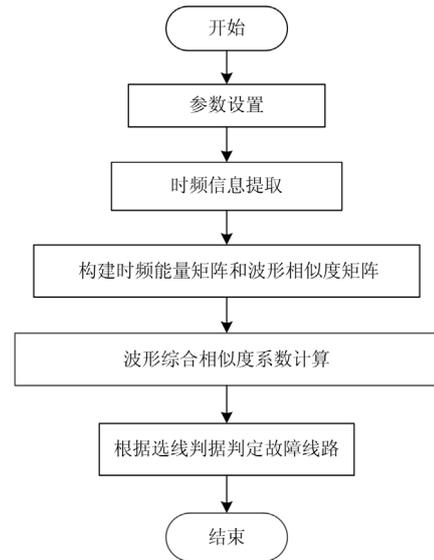


图 4 故障选线流程

Fig. 4 Flowchart of fault line selection

3 仿真验证

3.1 仿真模型

在仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建10 kV配电网仿真模型如图5所示。该模型共有4回电缆出线,长度分别为 $L_1=5$ km, $L_2=3$ km, $L_3=2$ km, $L_4=0.5$ km,仿真所用参数均参考ZR-YJV22-8.7/15kV-3×400实际电缆参数,金属护层采用两端接地方式,采样频率为10 MHz,电源电压为110 kV,变压器变比为110 kV/10 kV, Y/△联结。消弧线圈补偿度取8%。图中, I_{D1} 、 I_{D2} 、 I_{D3} 、 I_{D4} 分别表示线路 L_1 、线路 L_2 、线路 L_3 、线路 L_4 金属护层首端接地线行波电流。

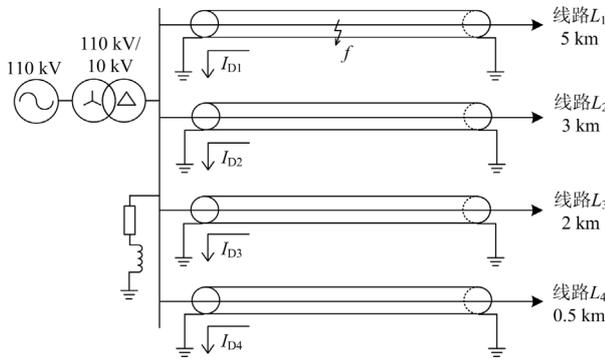


图5 电缆故障仿真模型

Fig. 5 Cable fault simulation model

在计算波形相似度时,时间窗的选择一定程度上影响到波形相似度的计算。根据最长出线长度选定检测时间窗宽度,以行波在最长线路往返一次的时间为基准,考虑一定的裕度(10%),可以计算出图5所示模型的时间窗为

$$\Delta t = \frac{L_{\max} \times 2}{v_c} \times (1 - 10\%) = 50.4 \mu\text{s}$$

式中: L_{\max} 为最长线路长度; v_c 为行波在电缆中的波速度,计算可得本模型中 $v_c=178.57$ m/ μs 。

3.2 仿真分析

以线路 L_3 发生单相主绝缘故障为例,设定故障距离 $X_f=1$ km,过渡电阻 $R_f=20$ Ω ,故障线路及非故障线路金属护层首端接地线行波电流波形如图6所示。

计算可得故障行波电流波形相似度矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0.908 & -0.281 & 0.864 \\ 0.908 & 1 & -0.340 & 0.885 \\ -0.281 & -0.340 & 1 & -0.228 \\ 0.864 & 0.885 & -0.228 & 1 \end{bmatrix}$$

各线路分别与其他线路的行波电流波形综合相似度系数计算如下:

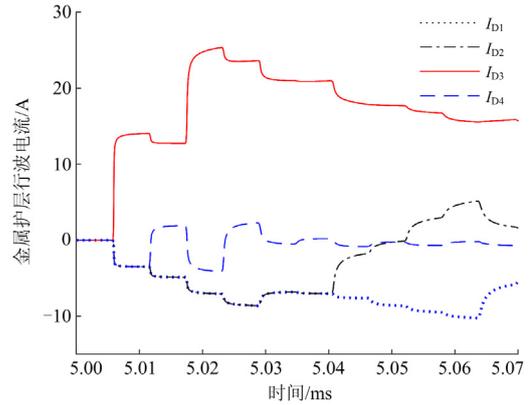


图6 金属护层接地线行波电流波形

Fig. 6 Traveling wave current waveform of metal sheathed ground wire

$$r_{c1} = \sqrt{\frac{1}{3}(r_{12}^2 + r_{13}^2 + r_{14}^2)} = 0.742$$

$$r_{c2} = \sqrt{\frac{1}{3}(r_{21}^2 + r_{23}^2 + r_{24}^2)} = 0.758$$

$$r_{c3} = \sqrt{\frac{1}{3}(r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{34}^2)} = 0.287$$

$$r_{c4} = \sqrt{\frac{1}{3}(r_{41}^2 + r_{42}^2 + r_{43}^2)} = 0.726$$

根据式(15)可知, $r_{c3} = \min(r_{c1}, r_{c2}, r_{c3}, r_{c4}) = 0.287$, $r_{cm} = \min(r_{c1}, r_{c2}, r_{c4}) = 0.726$,满足 $r_{c3} < 0.5r_{cm}$,可判定线路 L_3 为故障线路。

针对系统不同故障位置,分别于各电缆出线近母线端10%线路总长处、中点处、远母线端90%线路总长处及母线设置单相主绝缘故障,过渡电阻 $R_f=10$ Ω 。不同故障位置故障选线结果如表1所示。表中, L_n 表示故障线路, L_0 表示母线故障, X_f 为故障点到母线的距离。

表1 基于不同故障位置的仿真结果

Table 1 Simulation results based on different fault locations

故障位置	X_f/km	综合相似度系数 $[r_{c1} r_{c2} r_{c3} r_{c4}]$	选线结果
L_1	0.5	[0.248 0.692 0.724 0.698]	L_1
L_1	2.5	[0.235 0.689 0.718 0.686]	L_1
L_1	4.5	[0.223 0.683 0.709 0.679]	L_1
L_2	0.3	[0.684 0.253 0.719 0.703]	L_2
L_2	1.5	[0.679 0.238 0.712 0.698]	L_2
L_2	2.7	[0.671 0.210 0.708 0.691]	L_2
L_3	0.2	[0.693 0.727 0.213 0.675]	L_3
L_3	1.0	[0.687 0.721 0.206 0.667]	L_3
L_3	1.8	[0.681 0.193 0.199 0.651]	L_3
L_4	0.05	[0.745 0.731 0.705 0.178]	L_4
L_4	0.25	[0.739 0.728 0.697 0.172]	L_4
L_4	0.45	[0.730 0.722 0.691 0.165]	L_4
L_0	0	[0.812 0.803 0.793 0.782]	L_0

传统行波选线方法通过小波变换模极大值 (Wavelet Transform Modulus Maxima, WTMM)表示行波初始波头的幅值和极性, 进而通过比较各线路行波电流模极大值的差异实现故障选线^[27-28]。以线路 L_2 发生单相主绝缘故障为例, 设定故障距离 $X_f=1.5$ km, 过渡电阻 $R_f=20 \Omega$, 故障线路及非故障线路电缆金属护层接地线行波电流及其小波模极大值如图 7 所示。

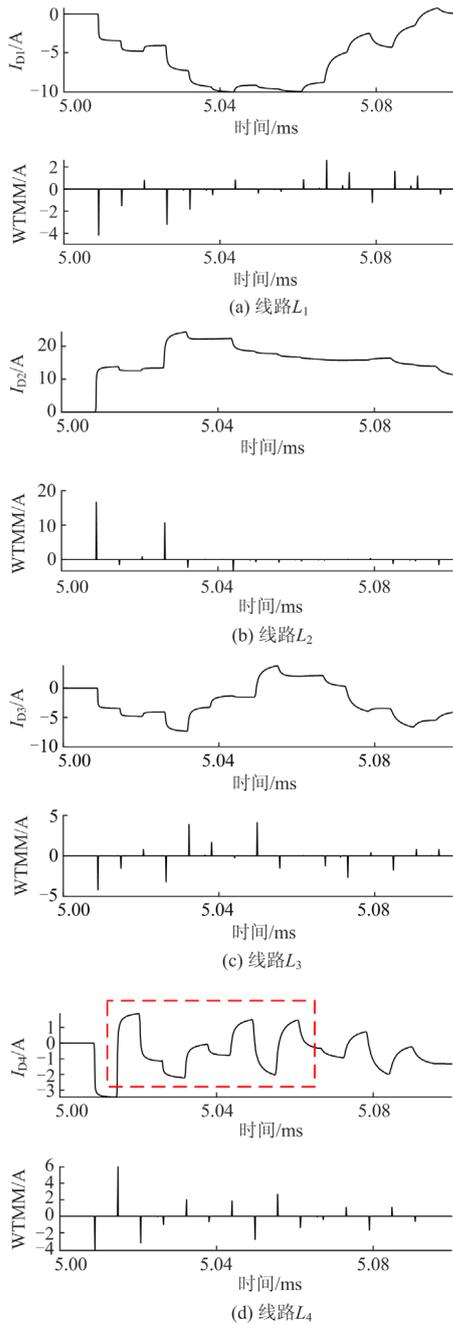


图 7 电缆金属护层接地线行波电流及其小波模极大值
Fig. 7 Traveling wave current of cable metal sheath grounding wire and its WTMM

传统的行波选线方法高度依赖行波初始波头的准确判定, 一旦错过初始波头, 相邻非故障线路末端反射波的到来将引起选线装置误判。以图 7 所示故障行波电流波形为例, 当选线装置错过行波初始波头时, 传统的行波选线方法将误判线路 L_4 为故障线路。

本文所提选线方法检测时间窗如图 7(d)标记所示, 计算可得各线路分别与其他线路的行波电流波形综合相似度系数如表 2 所示, 结合式(15)即可判定线路 L_2 为故障线路。

表 2 波形综合相似度系数

Table 2 Comprehensive similarity coefficient

线路	L_1	L_2	L_3	L_4
r_{ci}	0.601	0.198	0.682	0.617

通过对比分析可知, 本文所提选线方法可以有效弥补传统行波选线方法仅依赖初始波头的不足, 当选线装置错过初始波头时, 本文所提方法通过后续波形相似度的计算, 仍然可以正确选出故障线路, 有效提高了行波选线方法的可靠性。

电缆线路发生单相主绝缘故障后, 故障处过渡电阻阻值大小将影响故障行波电流波形。分别于线路 L_1 、线路 L_4 、母线设置单相主绝缘故障, 过渡电阻阻值分别为 0Ω 、 50Ω 、 100Ω 、 500Ω 。不同过渡电阻故障选线结果如表 3 所示。

表 3 基于不同过渡电阻的仿真结果

Table 3 Simulation results based on different transition resistance

故障位置	X_f/km	R_f/Ω	综合相似度系数 $[r_{c1} r_{c2} r_{c3} r_{c4}]$	选线结果
L_1	3	0	[0.127 0.612 0.624 0.658]	L_1
L_1	3	50	[0.152 0.633 0.656 0.670]	L_1
L_1	3	100	[0.183 0.649 0.672 0.681]	L_1
L_1	3	500	[0.201 0.660 0.695 0.711]	L_1
L_4	0.2	0	[0.712 0.703 0.683 0.170]	L_4
L_4	0.2	50	[0.719 0.710 0.691 0.178]	L_4
L_4	0.2	100	[0.726 0.718 0.700 0.185]	L_4
L_4	0.2	500	[0.738 0.727 0.709 0.193]	L_4
L_0	0	0	[0.803 0.799 0.786 0.779]	L_0
L_0	0	50	[0.809 0.805 0.793 0.782]	L_0
L_0	0	100	[0.819 0.811 0.800 0.794]	L_0
L_0	0	500	[0.833 0.820 0.815 0.805]	L_0

由表 3 可以看出: 故障处过渡电阻的阻值大小对本算法无影响。

配电网小电流接地系统根据实际情况存在不同中性点接地方式, 分别于线路 L_1 、线路 L_2 、母线设置电缆单相主绝缘故障, 过渡电阻 $R_f = 10 \Omega$, 不同中性点接地方式下故障选线结果如表 4 所示。

表 4 基于中性点不同接地方式的仿真结果

Table 4 Simulation results based on different neutral grounding modes

中性点接地方式	故障位置	综合相似度系数				选线结果
		$[r_{c1}$	r_{c2}	r_{c3}	$r_{c4}]$	
经消弧线圈接地	L_1	0.235	0.689	0.718	0.686	L_1
	L_2	0.679	0.238	0.712	0.698	L_2
	L_0	0.812	0.803	0.793	0.782	L_0
不接地	L_1	0.235	0.689	0.718	0.686	L_1
	L_2	0.679	0.238	0.712	0.698	L_2
	L_0	0.812	0.803	0.793	0.782	L_0

由表 4 可以看出:对于不同的中性点接地方式,本算法均有良好的选线效果。

大量仿真结果表明,在不同故障位置、不同过渡电阻等情况下,本文所提算法均能准确识别故障线路。

4 现场实际数据验证

为进一步验证所提算法的有效性,选取某 10 kV 电缆网络实际故障数据对所提方法进行检验。该网络线路长度及结构如图 8 所示。

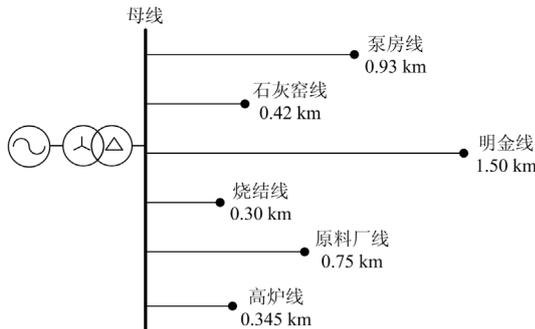


图 8 某 10 kV 电缆网络结构图

Fig. 8 A 10 kV cable network structure diagram

图 9 给出明金线发生单相主绝缘故障时各线路金属护层接地线行波电流实测波形。该波形数据通过专门研制的传感器耦合获得,由于传感器的高通滤波作用,实测波形与仿真波形存在差异,但故障线路与其他非故障线路的行波电流波形相似程度仍然明显小于所有非故障线路之间的行波电流波形相似程度。

根据最长出线长度 1.5 km 计算可得检测时间窗宽度为

$$\Delta t = \frac{L_{\max} \times 2}{v_c} \times (1 - 10\%) = 15.12 \mu\text{s}$$

根据式(13)可得故障行波电流波形相似度矩阵为

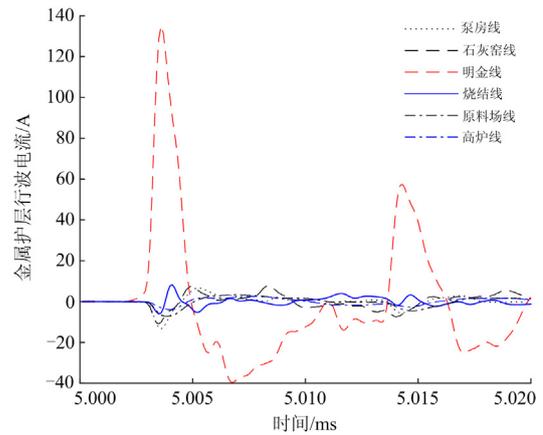


图 9 金属护层接地线行波电流实测波形

Fig. 9 Measured waveforms of traveling wave current of metal sheath grounding wire

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.911 & 0.126 & 0.701 & 0.735 & 0.579 \\ 0.911 & 1 & 0.145 & 0.638 & 0.697 & 0.543 \\ 0.126 & 0.145 & 1 & 0.121 & 0.103 & 0.112 \\ 0.701 & 0.638 & 0.121 & 1 & 0.753 & 0.506 \\ 0.735 & 0.697 & 0.103 & 0.753 & 1 & 0.717 \\ 0.579 & 0.543 & 0.112 & 0.506 & 0.717 & 1 \end{bmatrix}$$

各线路与其他线路的行波电流波形综合相似度系数如表 5 所示。

表 5 实测波形综合相似度系数

Table 5 Comprehensive similarity coefficient of measured waveform

线路	泵房线	石灰窑线	明金线	烧结线	原料厂线	高炉线
r_c	0.665	0.638	0.122	0.598	0.651	0.542

由表 5 数据结合式(15)可判定明金线为故障线路,验证了本文所提方法的有效性。

5 结论

本文针对小电流接地系统电缆故障选线问题,提出一种基于行波电流波形综合相似度比较的小电流接地系统电缆故障选线方法。仿真和实测结果表明:

1) 该方法仅需获取电缆故障产生的金属护层接地线行波电流,简单易行,且能够有效弥补现有行波选线方法高度依赖行波初始波头的不足,充分利用后续行波所包含的故障信息,提高了故障选线的可靠性。

2) 该方法不受故障点位置、过渡电阻、系统中性点接地方式等因素的影响。

参考文献

- [1] 张国军, 张文周, 葛群, 等. 基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 1-9.
ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 1-9.
- [2] 王栋, 邱志斌, 魏巍, 等. 220 kV 某变电站GIS 单相接地故障分析及处理措施[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 259-265.
WANG Dong, QIU Zhibin, WEI Wei, et al. Single-phase grounding fault analysis of a GIS in a 220 kV substation and treatment measures[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 259-265.
- [3] 刘渝根, 陈超, 杨蕊菁, 等. 基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 169-174.
LIU Yugen, CHEN Chao, YANG Ruijing, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 169-174.
- [4] 刘健, 张志华, 李云阁, 等. 基于故障相接地的配电网单相接地故障自动处理[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 169-177.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, LI Yunge, et al. Automatic processing of single-phase grounding fault in distribution network based on fault phase grounding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 169-177.
- [5] 袁超, 储海军, 陈燕擎, 等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 115-120.
YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115-120.
- [6] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [7] 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.
- [8] 廖星, 冯玉雷, 李健, 等. 距离保护应用于共相并联电缆的适用性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 98-105.
LIAO Xing, FENG Yulei, LI Jian, et al. Applicability analysis of distance protection used in common-phase parallel cables[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 98-105.
- [9] 李振兴, 王新, 王鹏飞, 等. 综合工频与特征频率零序导纳角差的选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 13-21.
LI Zhenxing, WANG Xin, WANG Pengfei, et al. Line selection method based on the zero-sequence admittance angle difference of power frequency and characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 13-21.
- [10] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网线路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.
- [11] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电网线路接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [12] 董新洲, 毕见广. 配电网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): 3-8.
DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 3-8.
- [13] 姜博, 董新洲, 施慎行, 等. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6387-6397.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.
- [14] 束洪春, 彭仕欣. 配电网单相故障馈线的S变换检测新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2963-2969.
SHU Hongchun, PENG Shixin. S-transform approach for detecting the single-phase fault feeder in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2963-2969.
- [15] 邓丰, 李鹏, 曾祥君, 等. 基于 D-PMU 的配电网故障选

- 线和定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 4(19): 160-167.
DENG Feng, LI Peng, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 160-167.
- [16] XU Y, LIU J, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276.
- [17] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 70-75.
ZHANG Fan, PAN Zhencun, ZHANG Huifen, et al. Fault line selection in non-solidly earthed network based on direction traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 70-75.
- [18] 李泽文, 贺子凝, 郭田田, 等. 基于时频矩阵相似度的输电线路暂态保护方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 121-128.
LI Zewen, HE Zining, GUO Tiantian, et al. Transient protection method for transmission lines based on similarity of time-frequency matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 121-128.
- [19] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [20] 邓丰, 曾祥君, 李泽文, 等. 故障行波全波形时-频特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3231-3243.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, LI Zewen, et al. Research on characteristics of traveling wave full-waveform in the time and frequency domains[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3231-3243.
- [21] 束洪春, 彭仕欣. 基于短窗数据S变换能量的缆-线混合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.
- [22] LEE I W C, DASH P K. S-transform based intelligent system for classification of power quality disturbance signal[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 800-805.
- [23] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于S变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119.
LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel surge impedance directional relay based on S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 113-119.
- [24] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于S变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67-71.
LIU Shouliang, XIAO Xianyong, YANG Honggeng. Classification of short duration power quality disturbance based on module time-frequency matrixes similarity by S-transform[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 67-71.
- [25] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32.
- [26] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.
- [27] 梅念, 苑宾, 乐波, 等. 对称单极接线柔直系统联结变阀侧单相接地故障分析及保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 116-122.
MEI Nian, YUAN Bin, YUE Bo, et al. Analysis and protection of single-phase-to-ground fault on valve side of interface transformer in VSC-HVDC system with symmetrical monopolar configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 116-122.
- [28] 黄景光, 刘会家, 胡汉梅, 等. 行波小波系数极大值极性法接地故障选线研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 100-104.
HUANG Jingguang, LIU Huijia, HU Hanmei, et al. Distribution grid earth fault line detection study by traveling wave wavelets coefficient maximum polarities[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 100-104.

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-06-09

作者简介:

王雪菲(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障监测; E-mail: sduatdq_wxf@163.com

李京(1967—), 男, 硕士, 应用研究员, 研究方向为电力系统故障监测; E-mail: lijing@kehui.cn

陈平(1969—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统故障监测。E-mail: pingchen1969@163.com

(编辑 葛艳娜)