

基于折反射行波相关性分析的配电电缆单相 接地故障测距

纪良¹, 徐军¹, 管亚¹, 崔景侠¹, 何杰¹, 潘艺航²

(1. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000;

2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221000)

摘要:配电网中三芯地下电缆工作环境恶劣,受老化、外力、高温潮湿等因素的影响,长时间带电运行绝缘极易受损而引发故障。针对配电网电缆单相接地故障,提出了一种基于行波波头折反射特性的故障定位方法。首先获取各线路零模电压,确定波头到达时刻,选取波头到达后一个工频周期内的波形,确定其波头主频率并选取与波头主频率相同频率方波作为初始行波信号,计算该频率下初始行波信号折返射不同次数后首末端的衰减信号波形,若首末两端计算得到的波形对应数据间相关性均满足要求,则认为假设故障点为实际故障点;否则继续缩小故障区间,直至满足波形数据之间的相关性要求。仿真结果表明:该方法能够快速、精准地实现故障测距,降低测距复杂度,具有较强的有效性和实用性。

关键词:配电电缆;故障测距;波形相似度;波头折反射

中图分类号:TM771 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25921

Single-phase Grounding Fault Distance Measurement of Distribution Cable Based on Refraction-reflection Traveling Wave Correlation Analysis

Ji Liang¹, XU Jun¹, GUAN Ya¹, CUI Jingxia¹, HE Jie¹, PAN Yihang²

(1. Lianyungang Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222000,

Jiangsu, China; 2. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: The three-core underground cable in the distribution network works in a harsh environment. Due to the influence of aging, external force, high temperature and humidity, the insulation of long-term live operation is easily damaged and causes faults. Aiming at the single-phase grounding fault of cable in distribution network, a fault location method based on the refraction-reflection characteristics of traveling wave head was proposed. Firstly, the zero-mode voltage of each line was obtained, and the arrival time of the wave head was determined. The waveform in a power frequency period after the arrival of the wave head was selected, and the main frequency of the wave head was determined. The square wave with the same frequency as the main frequency of the wave head was selected as the initial traveling wave signal, and the attenuation signal waveform at the head and end of the initial traveling wave signal after refraction of different times at this frequency was calculated. If the correlation between the corresponding data of the waveform calculated at both ends met the requirements, it was assumed that the fault point is the actual fault point. Otherwise, continue to narrow the fault interval until the correlation between the waveform data is satisfied. Simulation results show that the method can quickly and accurately realize fault distance measurement, reduce the complexity of fault distance measurement, and has strong effectiveness and practicability.

Key words: distribution cables; fault distance measurement; waveform similarity; wavehead refraction reflection

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BE2022609)

作者简介:纪良(1980—),男,硕士,高级工程师,Email:807749223@qq.com

随着城市化和环境美化要求的不断提高,配电网电缆占有率在逐渐上升,在北京、上海等一些大城市中,超过98%的配电线路都是电缆。而城市配电网中的大多数馈线都是三芯地下电缆,地下电缆的工作环境恶劣,受外力破坏、潮湿以及化学污染等因素影响,导致电缆运行数据呈现多源、混杂的特性,再加上本身可能存在绝缘缺陷,长时间带电运行绝缘极易受损而引发故障^[1]。电缆故障过程十分复杂、类型多样,加之工作场景多变、现场干扰因素较多,导致其故障特征不易捕捉和分析特征微弱多变,并且三芯电缆结构更为复杂,为电缆单相接地故障的精准测距带来了诸多技术难题^[2]。

行波法具有高精度、高可靠性的定位效果^[3-5],在故障定位领域具有广泛的应用。行波法在原理上可分为单端法^[6]和双端法^[7]。单端法利用线路故障时测量到的第一个行波与反射的第二个行波的时间差计算故障距离^[8],而双端法则根据初始行波波头到达线路两端的时间差实现故障定位^[9]。

文献[10]在行波法中将频域反射法和快速傅里叶逆变换相组合以估算电缆中故障点的精确位置。文献[11]提出了一种非均匀线路行波故障测距的封闭形式解决方案。文献[12]基于电压行波到达时间序列判别故障区间,然后对确定区间利用双端法实现故障精确定位。文献[13]不仅利用了经验模式分解,还用到了魏格纳威尔分布,它将两者相结合来检测行波到达电缆两端的时刻。文献[14]基于故障行波传输特性,根据多端行波时差以及双端法实现故障测距。文献[15]基于行波特性和参考测量点及其他测量点,计算各个故障点到参考点的距离,通过选取最大值确定故障点位置。

近年来有学者提出根据行波的折反射特性以及波形相似度对输电线路进行保护和故障定位的方法,并取得了一些成果。文献[16]以行波的传输和折反射特性为基础,在此基础上研究故障行波与故障点间的联系,得出了区内外不同故障点处行波全波形相关系数的变化规律。文献[17]基于行波波形的唯一性理论,利用单端时频行波的波形信息,实现了对输电线路的故障定位。文献[18]利用时域电压行波波形之间的余弦相似系数实现了故障判别。

为此,本文将基于行波的折反射特性以及波

形相似度实现故障定位的思想用于电缆型配电网,针对三芯电缆的单相接地故障,提出了一种基于行波波头折反射特性的配电网故障测距新方法。首先,利用安装于配电网各区段电缆首末端的零模电压采集装置获取各线路零模电压,确定波头主频率并选取与波头主频率相同频率的方波作为初始行波信号,计算该频率下初始行波信号经过折返射不同次数后首末端的衰减信号波形,根据计算得到的合成波形与采集装置采集到的波形对应数据间相关性确定故障点。该方法有效性不受电缆长度、故障初相角及故障位置的影响。

1 故障行波折反射特性分析

典型的三芯电缆的横截面如图1所示,其主要的型号有MVV,MYJV,MYP,MYPT等。和输电网高压电缆相比,配电网的三芯地下电缆为包含导芯、金属屏蔽或铠装在内的多导体结构,参数较为复杂,存在着复杂的电磁耦合关系,因此,想要分析其单相接地故障就要先解决各相之间存在的电磁耦合问题以简化电路。

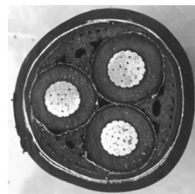


图1 三芯电缆横截面图

Fig.1 Three-core cable cross-section diagram

1.1 传递函数的建立

1.1.1 故障等效电路

目前大多研究都通过相模变换对故障网络进行解耦去除网络方程中的互感耦合从而得到简化的故障等效电路^[19]。相模变换的方法有很多,目前应用比较广泛的主要有对称分量法、Park变换、Clark变换以及Karrenbauer变换。

Karrenbauer变换相电压和模电压之间、相电流和模电流之间的关系矩阵分别如下:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

经Karrenbauer变换将系统A,B,C三相中电流分解为a,b,c三相中0,1,2模电流分量。电流

的 0, 1, 2 模分量在 a, b, c 三相线路上分布如图 2 所示。

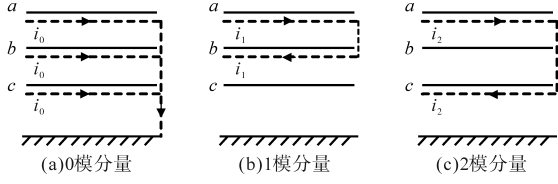


图 2 0, 1, 2 模分量分布图

Fig.2 Distribution chart of 0, 1 and 2 mode components

在计算等效模阻抗时,设变换之前相阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_d & \mathbf{Z}_n & \mathbf{Z}_n \\ \mathbf{Z}_n & \mathbf{Z}_d & \mathbf{Z}_n \\ \mathbf{Z}_n & \mathbf{Z}_n & \mathbf{Z}_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据阻抗矩阵变换的公式:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{T}_m^{-1} \mathbf{Z}_p \mathbf{T}_m \quad (4)$$

可得等效模阻抗矩阵:

$$\mathbf{Z}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_m + 2\mathbf{Z}_n & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Z}_m - \mathbf{Z}_n & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Z}_m - \mathbf{Z}_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

经以上分析可知,通过 Karrenbauer 变换后得到的 1 模分量只在 a, b 两相的导线之间流动, 2 模分量只在 b, c 两相的导线之间流动, 而 0 模分量在三相线路与大地之间流动。

根据上述分析参照图 2 可以得到如图 3 所示的等值电路。

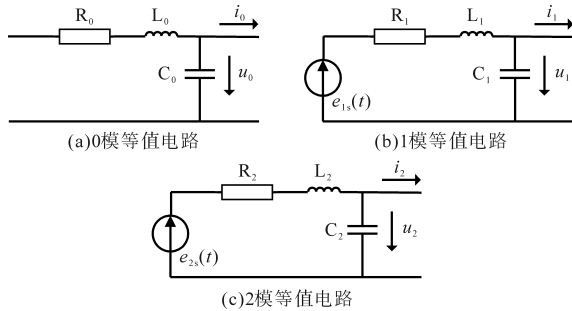


图 3 模分量等值电路

Fig.3 Equivalent circuit of mode components

图 3 中, $R_0, R_1, R_2, C_1, C_2, C_3$ 以及 L_1, L_2, L_3 分别为 0 模、1 模和 2 模网络中的等值电阻、等值电容和等值电感; u_0, u_1, u_2 为故障点对大地的电压的模分量。

E_{1s}, E_{2s} 是 1 模、2 模网络的等效电源, 其表达式为

$$\begin{cases} E_{1s} = \frac{1}{3} (E_a - E_b) = \frac{\sqrt{3}}{3} E_a e^{j30^\circ} \\ E_{2s} = \frac{1}{3} (E_a - E_c) = \frac{\sqrt{3}}{3} E_a e^{-j30^\circ} \end{cases} \quad (6)$$

通过以上的分析讨论可以得到如下结论: Karrenbauer 变换能够去除三相系统中复杂的电磁耦合关系, 将三相系统转化成为可以独立运行的 0 模、1 模和 2 模系统, 最后得到仅具有暂态特性的 0 模等效电路。相较其他变换, Karrenbauer 变换的相模变换矩阵更为简单, 元素全为实数, 计算量相对较小, 因此本文选择 Karrenbauer 变换对配电网进行解耦分析。

利用 Karrenbauer 变换对配电网三芯电缆单相接地故障网络进行解耦得到的故障零模等效电路如图 4 所示。

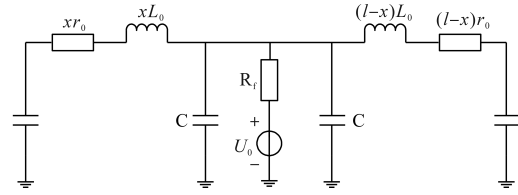


图 4 故障零模等效电路

Fig.4 Zero-mode equivalent circuit for distribution network fault

图 4 中, R_f 为故障电阻; r_0 为故障电缆单位长度零模等效电阻; L_0 为单位长度零模等效电感; C 为零模等效电容; x 为故障点上游长度; l 为故障电缆全长。故障零模等效电路中故障点的上下游均采用 π 型等效电路。

1.1.2 传递函数

传递函数是描述系统输入与输出之间关系的一种数学表示。研究电力系统的传递函数对于电力系统的分析有着十分重要的意义。

这里首先选择故障点上游等效电路来进行研究。故障点上游等效电路如图 5 所示。

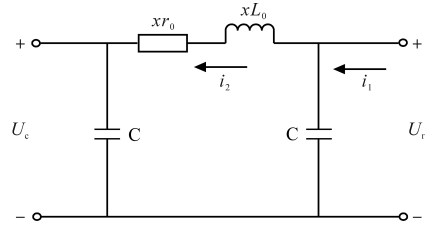


图 5 故障点上游等效电路

Fig.5 Upstream equivalent circuit at the fault point

根据故障点上游等效电路可以得到:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt \quad (7)$$

$$U_r = U_c + xr_0 i_2 + xL_0 \frac{di_2}{dt} \quad (8)$$

式中: i_2 为故障点上游电流; U_c 为故障点上游端口电压; U_r 为故障点处端口电压。

将式 (7) 代入式 (8) 并对其进行拉氏变换整理后可以得到故障点与线路首端之间的传递函

数,即故障点上游信号传递函数 $H_s(s)$:

$$H_s(s) = \frac{1}{xL_0Cs^2 + xr_0Cs + 1} \quad (9)$$

式中: s 为传递函数自变量。

同理也可得到故障点与电缆线路末端之间的传递函数,即故障点下游信号传递函数 $H_x(s)$ 如下:

$$H_x(s) = \frac{1}{(l-x)L_0Cs^2 + 1/2(l-x)r_0Cs + 1} \quad (10)$$

1.2 故障行波的折反射特性

行波在实际传播过程中并非只传递一次,实际上,线路中任意一点的电压值和电流值都是由许多个电压行波和电流行波叠加后形成的。

配电网线路上的波阻抗也并非都是连续的,配电网的线路上不同波阻抗的连接点被称为节点,节点处会出现阻抗不匹配的现象,行波在通过节点的时候能量就会被重新分配,所以行波在经过节点的时候就会发生折射与反射,所以实际过程中初始行波信号在线路上传播,幅值会衰减,故障点折反射和首末端反射会使行波波形成畸变,幅值衰减。因此要分析故障后线路两端的电压情况就需要分析故障行波在故障点与线路首末端发生的折反射过程。利用网格法对故障行波的折反射进行分析。行波的折反射过程如图6所示。

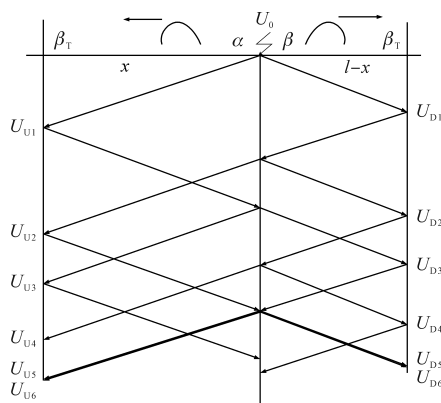


图6 故障行波的折反射过程

Fig.6 The reflection and refraction process of fault traveling waves

图6中, α, β 分别为故障点处的折射系数和反射系数,由于故障点两侧线路单位长度的各个参数都相同,因此故障点两侧线路的波阻抗相同,但故障点处的波阻抗近似等于故障点与大地之间的过渡电阻。 β_T 为电缆首末端的反射系数。

故障点处折射系数 α 和反射系数 β 的计算公

式为

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

式中: Z_1 为电缆线路波阻抗; Z_2 为故障电阻。

电缆首末端的反射系数 β_T 为

$$\beta_T = \frac{Z_T - Z_1}{Z_1 + Z_T} \quad (13)$$

式中: Z_T 为变压器等效阻抗。

以初始行波第一次从故障点向电缆线路首末端的传播为例,初始行波传播到首末端的电压波形变为

$$U_{s1} = H_s \times U_0 \quad (14)$$

$$U_{x1} = H_x \times U_0 \quad (15)$$

将故障线路首段最终测得的电压记作 U_s ,故障线路末端最终测得的电压记作 U_x ,通过以上分析可得:

$$U_s = U_{s1} + U_{s2} + U_{s3} + \dots \quad (16)$$

$$U_x = U_{x1} + U_{x2} + U_{x3} + \dots \quad (17)$$

2 基于行波波头折反射特性的电缆故障定位方法

2.1 行波波头到达时刻标定方法

对于理想的电力系统,线模和零模分量数值都为零;当系统出现故障时,三相不再对称,此时便能分解出有幅值的线模和零模分量。当配电网中发生单相接地故障时会产生零模电压,故障点处零模电压最高,系统中距离故障点越远处的零模电压就越低,并且零模电压的大小还取决于测量点到大地间阻抗的大小。根据这一特点可以形成基于零模电压突变量的行波波头到达时刻标定方法。

安装于配电网各区段电缆首末端的零模电压采集装置能够实时采集各线路的零模电压。当故障发生后,利用零模电压采集装置获取各线路的零模电压。

对零模电压信号进行差分运算:

$$\Delta U_0(k) = U_0(k+1) - U_0(k) \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (18)$$

式中: $U_0(k)$ 为故障电缆首末端测得零模电压信号; k 为采样点数。

由于电压信号在正常工作时呈正弦波,零模电压为0,因此可以推断,只要电压信号保持其正弦波形并且零模电压为0,就没有发生异常事件。

一旦发生故障,波形就会与正弦波形发生瞬间甚至永久的偏差,同时零模电压信号会产生一个突变量。因此可以得到故障发生的判据为

$$|\Delta U_0(k)| > U_{0N} \quad (19)$$

式中: $|\Delta U_0(k)|$ 为计算的电流差分绝对值; U_{0N} 为设定的阈值。

基于仿真系统扰动情况,获得不同扰动下零模电压的最大差分绝对值,取其中的最大值记为阈值 U_{0N} 。

2.2 故障测距方法

根据 1.2 节的分析可以得知,线路首末端测得的电压行波是由许多个电压行波叠加而成的,因此在确定行波波头主频率的情况下,可以选取与波头主频率相同频率的方波作为初始行波信号,根据故障行波的折反射过程合成到达线路首末端的电压行波。并且只有在真实的故障点处合成的波形才与真实波形之间具有最高的相关性。因此可以通过比较合成波形与真实波形之间的相关性确定故障点。

在根据零模电压突变量确定行波波头到达时刻后,利用傅里叶级数法去除周期性窄带干扰,选取波头到达时刻后一个工频周期时窗的波形,利用快速傅里叶变换确定波头主频率。选取与波头主频率相同频率的方波作为初始行波信号,假设故障点位置,根据假设的故障点计算该故障点首末端的折反射系数和传递函数,然后计算该频率下初始行波信号经过折反射不同次数后的衰减信号波形。

皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient) 广泛用于度量两个变量之间的相关程度,适用于连续变量,可以简单直观地进行数据间的分析比较。皮尔逊相关系数常用字母 r 表示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (20)$$

其中, $|r| \geq 0.7$ 时,可认为两变量间强相关^[20]; $0.4 \leq |r| < 0.7$,可认为两变量中度相关; $0.2 \leq |r| < 0.4$,可认为两变量弱相关; $|r| < 0.2$,可认为两变量极弱相关或不相关。

因此本文利用皮尔逊相关系数来衡量合成波形与实测波形数据间的相关性。根据假设故障点首末端折反射系数和信号传递函数得到合成波形 U_U 。那么合成波形与实测波形数据间相

关性的计算公式为

$$r(U_U, U_{UM}) = \frac{\text{Cov}(U_U, U_{UM})}{\sqrt{\text{Var}[U_U] \text{Var}[U_{UM}]}} \quad (21)$$

式中: $\text{Cov}(U_U, U_{UM})$ 为合成波形与实测波形对应数据之间的协方差; $\text{Var}[U_U]$ 为合成波形的方差; $\text{Var}[U_{UM}]$ 为实测波形的方差。

比较首末端合成行波与实测行波对应数据之间的相关性,若首末两端合成行波与实测行波间的相关性同时大于 0.7,说明首末两端合成行波与实测行波间呈强相关关系,可认为假设故障点位置为实际故障点位置;否则,利用二分法继续缩小故障区间,直至两端波形数据相关性同时大于 0.7,若仍不满足则对下一个频率区段利用二分法进行搜索直至两端行波波头数据的相关性同时大于 0.7。

2.3 故障测距流程

综上所述,基于行波波头折反射特性的配电网电缆故障测距方法的具体流程图如图 7 所示。

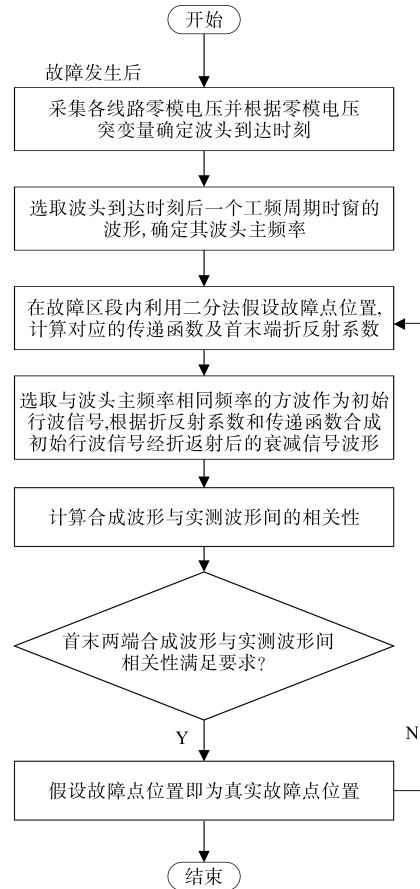


图 7 故障定位流程

Fig.7 Fault location procedure

具体流程如下所述:

1) 利用安装于配电网各区段电缆首末端的

零模电压采集装置获取各线路零模电压,并根据零模电压突变量确定行波波头到达时刻;

2)利用傅里叶级数法去除干扰,选取波头到达时刻后一个工频周期时窗的波形,利用快速傅里叶变换确定波头主频率;

3)在故障区段内根据二分法假设故障点位置,构建故障零模等效电路,计算在对应波头主频率下假设故障点所对应的上、下游信号的传递函数以及该段线路首末端折反射系数;

4)选取与波头主频率相同频率的方波作为初始行波信号,根据假设故障点首末端的折反射系数和传递函数,计算该频率下初始行波信号经过折返射不同次数后的衰减信号波形;

5)计算根据假设故障点得到的合成波形与实测波形间的相关性,若首末两端的波形对应数据间的相关性均满足要求,则认为假设故障点为实际故障点,若不满足要求,则继续缩小故障区间,直至满足波形数据之间的相关性要求。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

为了验证本文所提方法的可靠性和有效性,在PSCAD/EMTDC中搭建如图8所示的电缆型配电网仿真模型,该模型是一条由四条馈线组成的10 kV多出线多分支辐射电缆型配电网模型,其中最长的一条线路为主馈线路。其中三芯电缆线路的参数如表1所示。

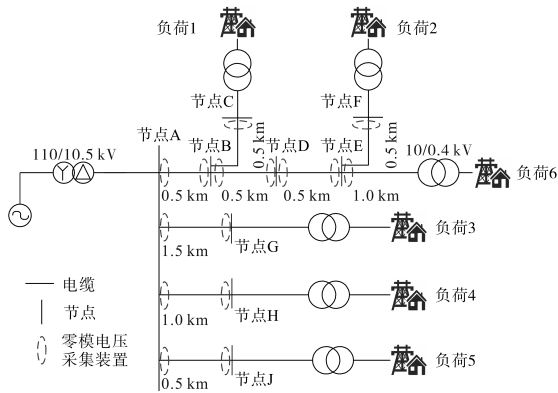


图8 电缆型配电网仿真模型
Fig.8 Simulation model of the cable-based farm distribution network

表1 电缆线路参数

Tab.1 Cable line parameters

相序	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)
零序	2.70	0.280	1.020
正序	0.27	0.340	0.255

图8中,线路最左侧的变压器为配电系统的主变压器,其变比为110 kV/10.5 kV;各分支线路末端所连接的变压器为Dyn型,变比均为10 kV/0.4 kV;线路模型采用电缆线路,末端的负荷采用恒定频率,其中 $P=200 \text{ kW}$, $Q=40 \text{ kvar}$ 。在主馈线的部分端口安装零模电压采集装置,用于采集零模电压行波信号。

3.2 仿真结果分析

为验证所提方法在不同故障位置的定位效果,在系统不同位置及不同电缆长度下设置A相接地故障。采样频率为100 kHz,过渡电阻为50 Ω ,故障初相角分别为60°,90°等。在AB区段距离A点0.1 km处设置故障后在节点A处采集到的零模电压行波如图9所示,根据折反射系数及传递函数利用方波合成的零模电压行波如图10所示。不同故障初相角下的故障定位结果如表2所示。

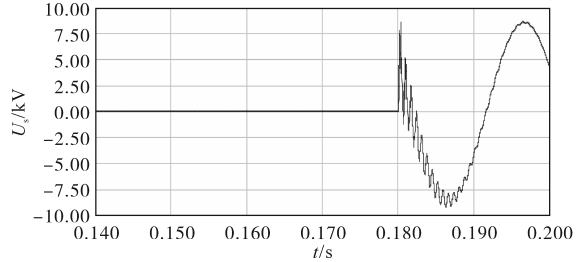


图9 首端采集到的零模电压行波

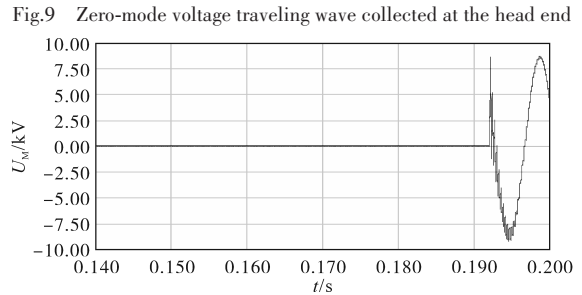


图10 根据折反射计算得到的零模电压行波

Fig.10 The zero-mode voltage traveling wave obtained by catadioptric calculation

表2仿真结果表明,在不同电缆长度、不同初相角及不同故障位置情况下首末端波形间相关性均大于0.7,说明首末端合成行波与实测行波间呈强相关关系,在考虑到线路参数误差以及电压行波发生折反射时误差的情况下可认为假设故障点位置为实际故障点位置,验证了本文所提出的故障定位方法的可行性。并且在不同故障条件下,本文方法的定位误差均小于线路全长的5%,具有较高的定位精度。

不同的过渡电阻可能对定位方法产生影响,在上述对不同故障条件下定位结果分析的基础

表2 不同故障初相角下的故障定位结果
Tab.2 Fault location results at different initial phase angles of faults

故障区段	电缆长度/km	故障初相角/(°)	故障位置/km	首端波形相关性	末端波形相关性	定位误差/%
AB	0.5	60	0.1	0.741	0.753	4.21
AB			0.2	0.802	0.776	3.52
AB			0.3	0.759	0.865	2.10
AB		90	0.1	0.799	0.821	4.84
AB			0.2	0.743	0.782	3.25
AB			0.3	0.840	0.852	3.22
AH	1.0	60	0.3	0.755	0.765	4.89
AH			0.6	0.765	0.871	3.01
AH			0.9	0.761	0.788	4.00
AH		90	0.3	0.803	0.702	4.29
AH			0.6	0.827	0.771	3.87
AH			0.9	0.799	0.864	4.02
AG	1.5	60	0.4	0.786	0.765	2.21
AG			0.8	0.775	0.789 2	3.98
AG			1.2	0.740	0.750	3.58
AG		90	0.4	0.782	0.779	2.34
AG			0.8	0.830 1	0.802	1.54
AG			1.2	0.732	0.801	3.78

上,对本方法在不同过渡电阻下的故障定位结果进行进一步的分析。在采样频率为 100 kHz、故障初相角为 60°情况下设置 A 相接地故障,并设置不同过渡电阻的故障进行定位,结果如表 3 所示。从表 3 中仿真结果可以看出,在不同过渡电阻之下本文所提方法的定位误差均在线路全长的 5% 以内,由此可见,过渡电阻对于故障定位结果的影响几乎可以忽略不计,说明本文方法基本不受过渡电阻的影响,具有较强的耐过渡电阻能力。

表3 不同过渡电阻下定位结果
Tab.3 Location results under different transition resistances

故障区段	电缆长度/km	过渡电阻/Ω	故障位置/km	首端波形相关性	末端波形相关性	定位误差/%
AB	0.5	50	0.1	0.741	0.753	4.21
AB			0.3	0.759	0.865	2.10
AB		100	0.1	0.722	0.791	4.32
AB			0.3	0.798	0.825	3.52
AH	1.0	50	0.3	0.755	0.765	4.89
AH			0.9	0.761	0.788	4.00
AH		100	0.3	0.738	0.820	2.69
AH			0.9	0.802	0.864	3.02
AG	1.5	50	0.4	0.786	0.765	2.21
AG			1.2	0.740	0.750	3.58
AG		100	0.4	0.728	0.797	4.32
AG			1.2	0.743	0.710	4.33

4 结论

本文对配电网中电缆线路故障行波的折反

射特性进行了分析,并在此基础上针对配电网电缆的单相接地故障,提出一种基于行波波头折反射特性的故障测距新方法。该方法根据初始行波信号经过不同次数折返射后,首末端合成的波形与实际测量波形对应数据间的相关性确定故障位置。该方法的有效性不受电缆长度、故障初相角及故障位置的影响,具有精度高、耐误差能力强、适应性高的优势,可以快速、准确地实现故障定位,提高配网运维效率,降低维修成本,保证供电的可靠性。

参考文献

[1] 彭楠,张鹏,梁睿. 基于暂态特征模量分析的配网三芯铠装电缆故障感知与测距[J]. 中国电机工程学报,2021,41(16): 5767-5779.
PENG Nan,ZHANG Peng,LIANG Rui. Fault sensing and location of the three-core armored cables in distribution network based on the analysis of the fault-featured transient moduli[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(16):5767-5779.

[2] 吴卫堃,宫士营,郑耀华,等. 基于DRSN的高噪声环境下XLPE电缆故障识别[J]. 电气传动,2022,52(16):75-80.
WU Weikun,GONG Shiyong,ZHENG Yaohua, et al. Fault identification of XLPE cable in high noise environment based on DRSN[J]. Electric Drive,2022,52(16):75-80.

[3] 王哲,迟福建,赵志斌,等. 基于行波检测的水电配电网单相接地故障定位[J]. 电气传动,2021,51(16):46-50.
WANG Zhe,CHI Fujian,ZHAO Zhibin, et al. Single-phase ground fault location of hydropower distribution network based on traveling wave detection [J]. Electric Drive,2021,51(16): 46-50.

[4] 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.

[5] 刘国威,王琛,李成信,等. 基于地电位行波监测的故障定位技术研究[J]. 电气传动,2022,52(4):62-68.
LIU Guowei,WANG Chen,LI Chengxin, et al. Research on fault location technology based on ground potential traveling wave monitoring[J]. Electric Drive,2022,52(4):62-68.

[6] 梁睿,孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术,2013,37(3):699-706.
LIANG Rui,SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013,37(3):699-706.

[7] SHI S,ZHU B,LEI A. Fault location for radial distribution network via topology and reclosure generating traveling waves[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(6):6404-6413.

- [8] 赵铁军,王秀斌,虞跃. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21):83-91.
ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Electric Power System Protection and Control, 2019, 47(21):83-91.
- [9] 束洪春,杨竞及,张广斌. 高压直流输电线路的双端行波频差比值故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18):6715-6727.
SHU Hongchun, YANG Jingji, ZHANG Guangbin. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on the ratio of two-terminal traveling wave frequency difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18):6715-6727.
- [10] OHKI Y, HIRAI N. Effects of the structure and insulation material of a cable on the ability of a location method by FDR[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1):77-84.
- [11] LEITE J E, LOPES F V, COSTA F B, et al. Closed-form solution for traveling wave-based fault location on non-homogeneous lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3):1138-1150.
- [12] 董新洲,陈彬书,董启环,等. 应用分布式电压传感技术的配电线路行波故障测距[J]. 电网技术, 2023, 47(12):4837-4847.
DONG Xinzhou, CHEN Binshu, DONG Qihuan, et al. Traveling waves fault location of distribution lines based on distributed voltage sensing technology[J]. Power System Technology, 2023, 47(12):4837-4847.
- [13] 刘洋,曹云东,侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4087-4093.
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4087-4093.
- [14] 李练兵,孙腾达,曾四鸣,等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3):140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Electric Power System Protection and Control, 2022, 50(3):140-147.
- [15] 盖志强,薛斌,李雅洁. 基于行波理论的多电源配电网故障定位方法[J]. 电气传动, 2022, 52(13):68-74.
GAI Zhiqiang, XUE Bin, LI Yajie. Fault location method for multi-source distribution network based on traveling wave theory[J]. Electric Drive, 2022, 52(13):68-74.
- [16] 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.
- [17] WANG Y, HAO Z, ZHANG B, et al. A pilot protection scheme for transmission lines in VSC-HVDC grid based on similarity measure of traveling waves[J]. IEEE Access, 2019, 7:7147-7158.
- [18] ZHAO J, ZHANG Y, YUAN Y, et al. Microgrid line protection method using the cosine similarity of the time domain traveling waveform[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153:109335.
- [19] 郭壮志,孔繁锦,徐其兴. 电力系统相模变换矩阵的最优化建模方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11):166-173.
GUO Zhuangzhi, KONG Fannie, XU Qixing. Optimization method for modeling phase-mode transformation matrix of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11):166-173.
- [20] 陈世群,高伟,陈孝琪,等. 一种基于极限学习机和皮尔逊相关系数的光伏阵列故障快速诊断方法[J]. 电气技术, 2021, 22(10):57-64.
CHEN Shiqun, GAO Wei, CHEN Xiaoqi, et al. A fast fault diagnosis method for photovoltaic array via extreme learning machine and Pearson's correlation coefficient[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(10):57-64.

收稿日期:2024-05-09

修改稿日期:2024-06-22