



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105842584 A

(43)申请公布日 2016.08.10

(21)申请号 201610201329.3

(22)申请日 2016.04.01

(71)申请人 昆明理工大学

地址 650093 云南省昆明市五华区学府路  
253号

(72)发明人 束洪春 田鑫萃

(51)Int.Cl.

G01R 31/08(2006.01)

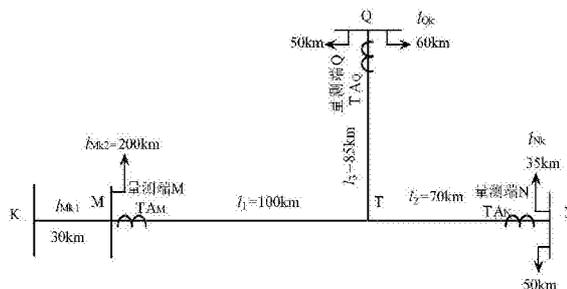
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路  
多端行波测距方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,属于电力系统继电保护技术领域。当线路发生故障时,首先,分别于量测端M、量测端N和量测端Q,通过高速采集装置获取量测端故障电流行波数据;其次,分别于行波观测视窗 $[t_0, t_0+l_1/(2v)]$ 、 $[t_0, t_0+l_2/(2v)]$ 和 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ ,构建量测端M、量测端N和量测端Q的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ;最后,根据测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 沿线突变的分布规律得到T接线路的故障距离。本发明利用贝杰龙线路模型具有沿线长维度上的高通滤波器作用,易于实现故障测距的实用化。



1. 一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,其特征在于:当线路发生故障时,首先,分别于量测端M、量测端N和量测端Q,通过高速采集装置获取量测端故障电流行波数据;其次,分别于行波观测时窗 $[t_0, t_0+l_1/(2v)]$ 、 $[t_0, t_0+l_2/(2v)]$ 和 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ ,构建量测端M、量测端N和量测端Q的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ;最后,根据测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 沿线突变的分布规律得到T接线路的故障距离,其中, $l_1$ 为MT支路的全长, $l_2$ 为NT支路的全长, $l_3$ 为QT支路的全长。

2. 根据权利要求1所述的基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,其特征在于具体步骤为:

第一步、分别于量测端M、量测端N和量测端Q,由高速采集装置获取量测端故障电流行波数据,并截取故障初始行波到达前 $l/v$ 时窗长和故障初始到达后 $2l/v$ 时窗长的行波数据,其中, $l=\max(l_1, l_2, l_3)$ , $l$ 为 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 中最长支路, $l_1$ 为MT支路的全长, $l_2$ 为NT支路的全长, $l_3$ 为QT支路的全长;

第二步、构建测距函数:

首先,根据式(1)和(2)计算沿线电压分布;

$$u_{s,x}(x,t) = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t + \frac{x}{v} \right) - i_s \left( t + \frac{x}{v} \right) \left( Z_c + \frac{rx}{4} \right) \right] + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t - \frac{x}{v} \right) + i_s \left( t - \frac{x}{v} \right) (Z_c - rx) \right] - \left( \frac{rx/4}{Z_c} \right)^2 u_s(t) - \frac{rx}{4} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) i_s(t) \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3 \quad (1)$$

$$i_{s,x}(x,t) = \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t+x/v) - i_s(t+x/v) \cdot (Z_c + rx/4)] - \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t-x/v) + i_s(t-x/v) \cdot (Z_c - rx/4)] - \frac{1}{2Z_c} \cdot \frac{rx}{2Z_c} [u_s(t) - i_s(t)(rx/4)] \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3 \quad (2)$$

式(1)中, $u_s = i_k \times Z_c$ , $Z_c$ 为线路波阻抗, $i_k$ 为相邻健全线路量测端获取到的电流行波,式(1)和(2)中, $s$ 下标的取值为M、N和Q,表示采用式(1)和(2),计算出量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的电压分布和电流分布; $x$ 为离开量测端的距离, $r$ 单位长度的线模电阻, $Z_c$ 为线模波阻抗, $v$ 线模波速度;

其次,计算方向行波沿线路分布,根据式(1)和式(2)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q的电压行波和电流行波,通过式(3)和(4)计算正向行波和反向行波;

$$\text{正向行波: } u_{s,x}^+ = (u_{s,x} + Z_c i_x) / 2 \quad (3)$$

$$\text{反向行波: } u_{s,x}^- = (u_{s,x} - Z_c i_x) / 2 \quad (4)$$

在式(3)和式(4)中, $u_{s,x}^+$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的正向行波, $u_{s,x}^-$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的反向行波;

再次,提取正向行波和反向行波的突变:先采用式(5)和(6)差分运算得到 $c_{dif-u_s^+}(t)$ 和 $c_{dif-u_s^-}(t)$ :

$$c_{dif-u_s^+}(t) = [u_{s,x}^+(t) - u_{s,x}^+(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (5)$$

$$c_{dif-u_s^-}(t) = [u_{s,x}^-(t) - u_{s,x}^-(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (6)$$

$c_{dif-u_s^+}(t)$ 为正向行波的差分结果, $c_{dif-u_s^-}(t)$ 为反向行波的差分结果, $\Delta t$ 为采样间隔;

再计算差分结果 $c_{dif}$ 在一段时间的能量 $S_{2u}(x, t)$ ,即:

$$S_{2u_s^+}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{dif-u_s^+}(t)]^2 \quad (7)$$

$$S_{2u_s^-}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{dif-u_s^-}(t)]^2 \quad (8)$$

式中, $S_{2u_s^+}(x, t)$ 为正向行波在一段时间内的能量, $S_{2u_s^-}(x, t)$ 为反向行波在一段时间内的能量;

最后,构建测距函数:式(5)~(8)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q正向行波和反向行波的沿线突变分布,现分别于 $[t_0, t_0+l_1/(2v)]$ 、 $[t_0, t_0+l_2/(2v)]$ 和 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ 时窗长度内,得到量测端M、量测端N和量测端Q测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ;

$$f_{Mu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+l_1/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9a)$$

$$f_{Nu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+l_2/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9b)$$

$$f_{Qu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+l_3/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9c)$$

第三步、甄选出反映故障位置的突变点:

将 $[t_0, t_0+l_1/(2v)]$ 时窗内计算得到量测端M测距函数 $f_{Mu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Mu} = [x_{M1}, x_{M2}, \dots]$ ;

将 $[t_0, t_0+l_2/(2v)]$ 时窗内的计算得到量测端N测距函数 $f_{Nu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Nu} = [x_{N1}, x_{N2}, \dots]$ ;

将 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ 时窗内的计算得到量测端Q测距函数 $f_{Qu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Qu} = [x_{Q1}, x_{Q2}, \dots]$ ;

首先,确定 $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$ 和 $f_{Qu}$ 解集是否有空集,若有空集,则该空集对应支路为未故障支路;

其次,先将 $f_u$ 含有突变点的个数定义为 $f_u$ 的长度,比较 $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$ 和 $f_{Qu}$ 的长度,将长度最长 $f_{u,max}$ 作为基准突变解集,则将另外两个突变解集中的突变点依次与基准突变解集的突变点按照式(10)进行匹配,采用欧式距离度量匹配误差,匹配误差最小对应的突变点即为反映故障位置的突变点;

$$x_M = x_N = x_Q \quad x_M \in f_{Mu}, x_N \in f_{Nu}, x_Q \in f_{Qu} \quad (10)$$

在式(10)中, $x_M$ 为量测端M的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离, $x_N$ 为量测端N的测距函数 $f_{Nu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离, $x_Q$ 为量测端Q的测距函数 $f_{Qu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离;

第四步、确定故障支路和故障距离:

现采用符号函数sgn获取到 $x_M$ 、 $x_N$ 和 $x_Q$ 对应突变点的极性,并记为 $\text{sgn}(x_M)$ 、 $\text{sgn}(x_N)$ 和 $\text{sgn}$

( $x_Q$ );

若 $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 0$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 且 $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 1$ , 则故障位MT支路;

若 $\text{sgn}(x_M) < 0$ , 则故障距离量测端 $M_{Xf} = x_M$ ;

若 $\text{sgn}(x_M) > 0$ , 则故障距离量测端 $M_{Xf} = l_1 - x_M$ ;

若 $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 0$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 1$ , 且 $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 则故障位于NT支路;

若 $\text{sgn}(x_N) < 0$ , 则故障距离量测端 $N_{Xf} = x_N$ ,

若 $\text{sgn}(x_N) > 0$ , 则故障距离量测端 $N_{Xf} = l_2 - x_N$ ;

若 $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 1$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 且 $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 则故障位于QT支路;

若 $\text{sgn}(x_Q) < 0$ , 则故障距离量测端 $Q_{Xf} = x_Q$ ;

若 $\text{sgn}(x_Q) > 0$ , 则故障距离量测端 $Q_{Xf} = l_3 - x_Q$ 。

## 一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,属于电力系统继电保护技术领域。

### 背景技术

[0002] 故障测距的任务就是当线路的某一点发生故障时,通过线路两端的实测电流、电压及线路阻抗等参数计算出故障距离。通常,输电线故障测距方法主要有两类,一类是阻抗法,是直接计算故障阻抗或其百分比的算法;另一类是行波法,利用高频故障暂态电流、电压的行波等来间接判定故障点的距离。

[0003] 输电线路行波故障测距经历了早期行波故障测距和现代行波故障测距两个阶段。近年来随着硬件制造水平以及计算机技术的飞速发展,现代行波测距技术在很多方面遇到的困境都得到了突破,但仍存在一些尚未解决或者急需要改进的问题,这些问题主要有:故障行波的辨识准确度如何提高,行波波头到达测量端时刻如何准确的捕捉,不同输电线路及电压等级对应的波速怎样选取,利用其它健全线路含有的故障信息怎样实现广域行波测距等方面。因此,现代行波故障测距在未来发展之路中还要面对许多技术和原理层面上的挑战。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是提出一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,用以解决上述问题。

[0005] 本发明的技术方案是:一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法,当线路发生故障时,首先,分别于量测端M、量测端N和量测端Q,通过高速采集装置获取量测端故障电流行波数据;其次,分别于行波观测时窗 $[t_0, t_0+l_1/(2v)]$ 、 $[t_0, t_0+l_2/(2v)]$ 和 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ ,构建量测端M、量测端N和量测端Q的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ;最后,根据测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 沿线突变的分布规律得到T接线路的故障距离,其中, $l_1$ 为MT支路的全长, $l_2$ 为NT支路的全长, $l_3$ 为QT支路的全长。

[0006] 具体步骤为:

[0007] 第一步、分别于量测端M、量测端N和量测端Q,由高速采集装置获取量测端故障电流行波数据,并截取故障初始行波到达前 $l/v$ 时窗长和故障初始到达后 $2l/v$ 时窗长的行波数据,其中, $l=\max(l_1, l_2, l_3)$ , $l$ 为 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 中最长支路, $l_1$ 为MT支路的全长, $l_2$ 为NT支路的全长, $l_3$ 为QT支路的全长;

[0008] 第二步、构建测距函数:

[0009] 首先,根据式(1)和(2)计算沿线电压分布;

[0010]

$$\begin{aligned}
u_{s,x}(x,t) = & \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t + \frac{x}{v} \right) - i_s \left( t + \frac{x}{v} \right) \left( Z_c + \frac{rx}{4} \right) \right] \\
& + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t - \frac{x}{v} \right) + i_s \left( t - \frac{x}{v} \right) \left( Z_c - rx \right) \right] \\
& - \left( \frac{rx/4}{Z_c} \right)^2 u_s(t) - \frac{rx}{4} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) i_s(t) \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3
\end{aligned} \tag{1}$$

[0011]

$$\begin{aligned}
i_{s,x}(x,t) = & \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t + x/v) - i_s(t + x/v) \cdot (Z_c + rx/4)] \\
& - \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t - x/v) + i_s(t - x/v) \cdot (Z_c - rx/4)] \\
& - \frac{1}{2Z_c} \cdot \frac{rx}{2Z_c} [u_s(t) - i_s(t)(rx/4)] \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3
\end{aligned} \tag{2}$$

[0012] 式(1)中,  $u_s = i_k \times Z_c$ ,  $Z_c$ 为线路波阻抗,  $i_k$ 为相邻健全线路量测端获取到的电流行波, 式(1)和(2)中,  $s$ 下标的取值为M、N和Q, 表示采用式(1)和(2), 计算出量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ ,  $l_2$ 和 $l_3$ 的电压分布和电流分布;  $x$ 为离开量测端的距离,  $r$ 单位长度的线模电阻,  $Z_c$ 为线模波阻抗,  $v$ 线模波速度;

[0013] 其次, 计算方向行波沿线路分布, 根据式(1)和式(2)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q的电压行波和电流行波, 通过式(3)和(4)计算正向行波和反向行波;

$$[0014] \quad \text{正向行波: } u_{s,x}^+ = (u_{s,x} + Z_c i_x) / 2 \tag{3}$$

$$[0015] \quad \text{反向行波: } u_{s,x}^- = (u_{s,x} - Z_c i_x) / 2 \tag{4}$$

[0016] 在式(3)和式(4)中,  $u_{s,x}^+$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ ,  $l_2$ 和 $l_3$ 的正向行波,  $u_{s,x}^-$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ ,  $l_2$ 和 $l_3$ 的反向行波;

[0017] 再次, 提取正向行波和反向行波的突变: 先采用式(5)和(6)差分运算得到  $c_{\text{dif}_-u_s^+}(t)$  和  $c_{\text{dif}_-u_s^-}(t)$ ;

$$[0018] \quad c_{\text{dif}_-u_s^+}(t) = [u_{s,x}^+(t) - u_{s,x}^+(t - \Delta t)] / \Delta t \tag{5}$$

$$[0019] \quad c_{\text{dif}_-u_s^-}(t) = [u_{s,x}^-(t) - u_{s,x}^-(t - \Delta t)] / \Delta t \tag{6}$$

[0020]  $c_{\text{dif}_-u_s^+}(t)$ 为正向行波的差分结果,  $c_{\text{dif}_-u_s^-}(t)$ 为反向行波的差分结果,  $\Delta t$ 为采样间隔;

[0021] 再计算差分结果  $c_{\text{dif}}$  在一段时间的能量  $S_{2u}(x, t)$ , 即:

$$[0022] \quad S_{2u^+}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{\text{dif}_-u_s^+}(t)]^2 \tag{7}$$

$$[0023] \quad S_{2u_s^-}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{diff u_s^-}(t)]^3 \quad (8)$$

[0024] 式中,  $S_{2u_s^+}(x, t)$  为正向行波在一段时间内的能量,  $S_{2u_s^-}(x, t)$  为反向行波在一段时间内的能量;

[0025] 最后, 构建测距函数: 式(5)~(8)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q正向行波和反向行波的沿线突变分布, 现分别于  $[t_0, t_0+1_1/(2v)]$ 、 $[t_0, t_0+1_2/(2v)]$  和  $[t_0, t_0+1_3/(2v)]$  时窗长度内, 得到量测端M、量测端N和量测端Q测距函数  $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$  和  $f_{Qu}(x)$ ;

$$[0026] \quad f_{Mu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+1_1/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9a)$$

$$[0027] \quad f_{Nu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+1_2/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9b)$$

$$[0028] \quad f_{Qu}(x) = \int_{t_0}^{t_0+1_3/(2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9c)$$

[0029] 第三步、甄选出反映故障位置的突变点:

[0030] 将  $[t_0, t_0+1_1/(2v)]$  时窗内计算得到量测端M测距函数  $f_{Mu}(x)$  的突变点记为突变解集  $f_{Mu} = [x_{M1}, x_{M2}, \dots]$ ;

[0031] 将  $[t_0, t_0+1_2/(2v)]$  时窗内的计算得到量测端N测距函数  $f_{Nu}(x)$  的突变点记为突变解集  $f_{Nu} = [x_{N1}, x_{N2}, \dots]$ ;

[0032] 将  $[t_0, t_0+1_3/(2v)]$  时窗内的计算得到量测端Q测距函数  $f_{Qu}(x)$  的突变点记为突变解集  $f_{Qu} = [x_{Q1}, x_{Q2}, \dots]$ ;

[0033] 首先, 确定  $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$  和  $f_{Qu}$  解集是否有空集, 若有空集, 则该空集对应支路为未故障支路;

[0034] 其次, 先将  $f_u$  含有突变点的个数定义为  $f_u$  的长度, 比较  $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$  和  $f_{Qu}$  的长度, 将最长  $f_{u, \max}$  作为基准突变解集, 则将另外两个突变解集中的突变点依次与基准突变解集的突变点按照式(10)进行匹配, 采用欧式距离度量匹配误差, 匹配误差最小对应的突变点即为反映故障位置的突变点;

$$[0035] \quad x_M = x_N = x_Q \quad x_M \in f_{Mu}, x_N \in f_{Nu}, x_Q \in f_{Qu} \quad (10)$$

[0036] 在式(10)中,  $x_M$  为量测端M的测距函数  $f_{Mu}(x)$  反映故障位置的突变点对应的距离,  $x_N$  为量测端N的测距函数  $f_{Nu}(x)$  反映故障位置的突变点对应的距离,  $x_Q$  为量测端Q的测距函数  $f_{Qu}(x)$  反映故障位置的突变点对应的距离;

[0037] 第四步、确定故障支路和故障距离:

[0038] 现采用符号函数  $\text{sgn}$  获取到  $x_M$ 、 $x_N$  和  $x_Q$  对应突变点的极性, 并记为  $\text{sgn}(x_M)$ 、 $\text{sgn}(x_N)$  和  $\text{sgn}(x_Q)$ ;

[0039] 若  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 0$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 且  $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 1$ , 则故障位MT支路;

[0040] 若  $\text{sgn}(x_M) < 0$ , 则故障距离量测端  $M_{xf} = x_M$ ;

[0041] 若  $\text{sgn}(x_M) > 0$ , 则故障距离量测端  $M_{xf} = 1_1 - x_M$ ;

[0042] 若  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 0$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 1$ , 且  $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 则故障位于NT支路;

[0043] 若  $\text{sgn}(x_N) < 0$ , 则故障距离量测端  $N_{xf} = x_N$ ,

- [0044] 若 $\text{sgn}(x_N) > 0$ , 则故障距离量测端 $N_{xf} = l_2 - x_N$ ;
- [0045] 若 $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_N) = 1$ ,  $\text{sgn}(x_M) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 且 $\text{sgn}(x_N) \& \text{sgn}(x_Q) = 0$ , 则故障位于QT支路;
- [0046] 若 $\text{sgn}(x_Q) < 0$ , 则故障距离量测端 $Q_{xf} = x_Q$ ;
- [0047] 若 $\text{sgn}(x_Q) > 0$ , 则故障距离量测端 $Q_{xf} = l_3 - x_Q$ 。
- [0048] 本发明的有益效果是:
- [0049] (1)不需要量测端M、量测端N和量测端Q三端同步, 适用现场实际;
- [0050] (2)利用贝杰龙线路模型具有沿线长维度上的高通滤波器作用, 使得测距方法更具鲁棒性和普适性, 易于实现故障测距的实用化。

### 附图说明

- [0051] 图1为本发明实施例1、实施例2和实施例3中的线路结构图, 其中MT支路 $l_1 = 100\text{km}$ , NT支路 $l_2 = 70\text{km}$ , QT支路 $l_3 = 85\text{km}$ ;
- [0052] 图2(a)为本发明实施例1中, 于量测端M, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_1$ 线长范围内突变分布;
- [0053] 图2(b)为本发明实施例1中, 于量测端N, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_2$ 线长范围内突变分布;
- [0054] 图2(c)为本发明实施例1中, 于量测端Q, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_3$ 线长范围内突变分布;
- [0055] 图2(d)为本发明实施例1中, 于量测端N, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_2$ 线长范围内突变分布。
- [0056] 图3(a)为本发明实施例2中, 于量测端M, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_1$ 线长范围内突变分布;
- [0057] 图3(b)为本发明实施例2中, 于量测端N, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_2$ 线长范围内突变分布;
- [0058] 图3(c)为本发明实施例2中, 于量测端Q, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_3$ 线长范围内突变分布;
- [0059] 图4(a)为本发明实施例3中, 于量测端M, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_1$ 线长范围内突变分布;
- [0060] 图4(b)为本发明实施例3中, 于量测端N, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_2$ 线长范围内突变分布;
- [0061] 图4(c)为本发明实施例3中, 于量测端Q, 时窗取为 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ , 得到测距函数沿 $l_3$ 线长范围内突变分布。

### 具体实施方式

- [0062] 下面结合附图和具体实施方式, 对本发明作进一步说明。
- [0063] 一种基于故障行波沿线分布特性的T接线路多端行波测距方法, 当线路发生故障时, 首先, 分别于量测端M、量测端N和量测端Q, 通过高速采集装置获取量测端故障电流行波数据; 其次, 分别于行波观测时窗 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ 、 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ 和 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ , 构

建量测端M、量测端N和量测端Q的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ；最后，根据测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 沿线突变的分布规律得到T接线路的故障距离，其中， $l_1$ 为MT支路的全长， $l_2$ 为NT支路的全长， $l_3$ 为QT支路的全长。

[0064] 具体步骤为：

[0065] 第一步、分别于量测端M、量测端N和量测端Q，由高速采集装置获取量测端故障电流行波数据，并截取故障初始行波到达前 $l/v$ 时窗长和故障初始到达后 $2l/v$ 时窗长的行波数据，其中， $l = \max(l_1, l_2, l_3)$ ， $l$ 为 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 中最长支路， $l_1$ 为MT支路的全长， $l_2$ 为NT支路的全长， $l_3$ 为QT支路的全长；

[0066] 第二步、构建测距函数：

[0067] 首先，根据式(1)和(2)计算沿线电压分布；

[0068]

$$\begin{aligned}
 u_{s,x}(x,t) = & \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t + \frac{x}{v} \right) - i_s \left( t + \frac{x}{v} \right) \left( Z_c + \frac{rx}{4} \right) \right] \\
 & + \frac{1}{2} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right)^2 \left[ u_s \left( t - \frac{x}{v} \right) + i_s \left( t - \frac{x}{v} \right) \left( Z_c - rx \right) \right] \\
 & - \left( \frac{rx/4}{Z_c} \right)^2 u_s(t) - \frac{rx}{4} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) i_s(t) \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3
 \end{aligned} \tag{1}$$

[0069]

$$\begin{aligned}
 i_{s,x}(x,t) = & \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c + rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t+x/v) - i_s(t+x/v) \cdot (Z_c + rx/4)] \\
 & - \frac{1}{2Z_c} \left( \frac{Z_c - rx/4}{Z_c} \right) [u_s(t-x/v) + i_s(t-x/v) \cdot (Z_c - rx/4)] \\
 & - \frac{1}{2Z_c} \cdot \frac{rx}{2Z_c} [u_s(t) - i_s(t)(rx/4)] \quad x \in [0, l_i], i=1,2,3
 \end{aligned} \tag{2}$$

[0070] 式(1)中， $u_s = i_k \times Z_c$ ， $Z_c$ 为线路波阻抗， $i_k$ 为相邻健全线路量测端获取到的电流行波，式(1)和(2)中， $s$ 下标的取值为M、N和Q，表示采用式(1)和(2)，计算出量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的电压分布和电流分布； $x$ 为离开量侧端的距离， $r$ 单位长度的线模电阻， $Z_c$ 为线模波阻抗， $v$ 线模波速度；

[0071] 其次，计算方向行波沿线路分布，根据式(1)和式(2)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q的电压行波和电流行波，通过式(3)和(4)计算正向行波和反向行波；

$$[0072] \quad \text{正向行波: } u_{s,x}^+ = (u_{s,x} + Z_c i_x) / 2 \tag{3}$$

$$[0073] \quad \text{反向行波: } u_{s,x}^- = (u_{s,x} - Z_c i_x) / 2 \tag{4}$$

[0074] 在式(3)和式(4)中， $u_{s,x}^+$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的正向行波， $u_{s,x}^-$ 为由量测端M、量测端N和量测端Q沿线长 $l_1$ 、 $l_2$ 和 $l_3$ 的反向行波；

[0075] 再次,提取正向行波和反向行波的突变:先采用式(5)和(6)差分运算得到 $c_{dif\_u_s^+}(t)$ 和 $c_{dif\_u_s^-}(t)$ :

$$[0076] \quad c_{dif\_u_s^+}(t) = [u_{s,x}^+(t) - u_{s,x}^+(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (5)$$

$$[0077] \quad c_{dif\_u_s^-}(t) = [u_{s,x}^-(t) - u_{s,x}^-(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (6)$$

[0078]  $c_{dif\_u_s^+}(t)$ 为正向行波的差分结果, $c_{dif\_u_s^-}(t)$ 为反向行波的差分结果, $\Delta t$ 为采样间隔;

[0079] 再计算差分结果 $c_{dif}$ 在一段时间的能量 $S_{2u}(x, t)$ ,即:

$$[0080] \quad S_{2u_s^+}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{dif\_u_s^+}(t)]^2 \quad (7)$$

$$[0081] \quad S_{2u_s^-}(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{dif\_u_s^-}(t)]^2 \quad (8)$$

[0082] 式中, $S_{2u_s^+}(x, t)$ 为正向行波在一段时间内的能量, $S_{2u_s^-}(x, t)$ 为反向行波在一段时间内的能量;

[0083] 最后,构建测距函数:式(5)~(8)计算得到量测端M、量测端N和量测端Q正向行波和反向行波的沿线突变分布,现分别于 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ 、 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ 和 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ 时窗长度内,得到量测端M、量测端N和量测端Q测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ ;

$$[0084] \quad f_{Mu}(x) = \int_{t_0}^{t_0 + l_1 / (2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9a)$$

$$[0085] \quad f_{Nu}(x) = \int_{t_0}^{t_0 + l_2 / (2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9b)$$

$$[0086] \quad f_{Qu}(x) = \int_{t_0}^{t_0 + l_3 / (2v)} S_{2u_s^+}(x, t) \times S_{2u_s^-}(x, t) dt \quad (9c)$$

[0087] 第三步、甄选出反映故障位置的突变点:

[0088] 将 $[t_0, t_0 + l_1 / (2v)]$ 时窗内计算得到量测端M测距函数 $f_{Mu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Mu} = [x_{M1}, x_{M2}, \dots]$ ;

[0089] 将 $[t_0, t_0 + l_2 / (2v)]$ 时窗内的计算得到量测端N测距函数 $f_{Nu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Nu} = [x_{N1}, x_{N2}, \dots]$ ;

[0090] 将 $[t_0, t_0 + l_3 / (2v)]$ 时窗内的计算得到量测端Q测距函数 $f_{Qu}(x)$ 的突变点记为突变解集 $f_{Qu} = [x_{Q1}, x_{Q2}, \dots]$ ;

[0091] 首先,确定 $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$ 和 $f_{Qu}$ 解集是否有空集,若有空集,则该空集对应支路为未故障支路;

[0092] 其次,先将 $f_u$ 含有突变点的个数定义为 $f_u$ 的长度,比较 $f_{Mu}$ 、 $f_{Nu}$ 和 $f_{Qu}$ 的长度,将最长 $f_{u,max}$ 作为基准突变解集,则将另外两个突变解集中的突变点依次与基准突变解集的突变点按照式(10)进行匹配,采用欧式距离度量匹配误差,匹配误差最小对应的突变点即为反映故障位置的突变点;

$$[0093] \quad x_M = x_N = x_Q \quad x_M \in f_{Mu}, x_N \in f_{Nu}, x_Q \in f_{Qu} \quad (10)$$

[0094] 在式(10)中, $x_M$ 为量测端M的测距函数 $f_{Mu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离, $x_N$ 为量测端N的测距函数 $f_{Nu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离, $x_Q$ 为量测端Q的测距函数 $f_{Qu}(x)$ 反映故障位置的突变点对应的距离;

[0095] 第四步、确定故障支路和故障距离:

[0096] 现采用符号函数 $\text{sgn}$ 获取到 $x_M$ 、 $x_N$ 和 $x_Q$ 对应突变点的极性,并记为 $\text{sgn}(x_M)$ 、 $\text{sgn}(x_N)$ 和 $\text{sgn}(x_Q)$ ;

[0097] 若 $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_N)=0$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=1$ ,则故障位MT支路;

[0098] 若 $\text{sgn}(x_M)<0$ ,则故障距离量测端 $M_{xf}=x_M$ ;

[0099] 若 $\text{sgn}(x_M)>0$ ,则故障距离量测端 $M_{xf}=l_1-x_M$ ;

[0100] 若 $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_N)=0$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=1$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,则故障位于NT支路;

[0101] 若 $\text{sgn}(x_N)<0$ ,则故障距离量测端 $N_{xf}=x_N$ ,

[0102] 若 $\text{sgn}(x_N)>0$ ,则故障距离量测端 $N_{xf}=l_2-x_N$ ;

[0103] 若 $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_N)=1$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,则故障位于QT支路;

[0104] 若 $\text{sgn}(x_Q)<0$ ,则故障距离量测端 $Q_{xf}=x_Q$ ;

[0105] 若 $\text{sgn}(x_Q)>0$ ,则故障距离量测端 $Q_{xf}=l_3-x_Q$ 。

[0106] 实施例1:以图1所示的输电线路为例,假设MT支路距离M端40km处发生A相接地故障。

[0107] 根据说明书中步骤一和步骤二,得到测距函数量测端M、量测端N和量测端Q测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 。根据步骤三得到 $f_{Mu}=[40.0]$ , $f_{Nu}=\phi$ (表示空集), $f_{Qu}=[39.8]$ 。由 $f_{Nu}=\phi$ ,可知故障不位于NT支路,则采用量测端N数据,计算 $[t_0, t_0+l_3/(2v)]$ 时窗内的测距函数沿 $l_3$ 线长范围内突变分布 $f'_{Nu}=[40.0]$ 。可知, $x_{M1}=x'_{N1}\approx x_{Q1}$ ,且 $\text{sgn}(x_{M1})\&\text{sgn}(x_N)=0$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=1$ 。可知,故障位于MT支路,且距离M端40.0km。

[0108] 实施例2:以图1所示的输电线路为例,假设NT支路距离T节点25km处发生A相接地故障。

[0109] 根据说明书中步骤一和步骤二,得到测距函数量测端M、量测端N和量测端Q测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 。根据步骤三得到 $f_{Mu}=[24.7\ 44.9]$ , $f_{Nu}=[24.7]$ , $f_{Qu}=[24.7]$ ,可知, $x_{M1}=x_{N1}=x_{Q1}$ ,且 $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_N)=0$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=1$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ 。可知,故障位于NT支路,且距离J节点24.7km。

[0110] 实施例3:以图1所示的输电线路为例,假设QT支路距离T节点20km处发生A相接地故障。

[0111] 根据说明书中步骤一和步骤二,得到测距函数量测端M、量测端N和量测端Q测距函数 $f_{Mu}(x)$ 、 $f_{Nu}(x)$ 和 $f_{Qu}(x)$ 。根据步骤三得到 $f_{Mu}=[20.0]$ , $f_{Nu}=[20.0]$ , $f_{Qu}=[20.0]$ ,可知, $x_{M1}=x_{N1}=x_{Q1}$ ,且 $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_N)=1$ , $\text{sgn}(x_M)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ ,且 $\text{sgn}(x_N)\&\text{sgn}(x_Q)=0$ 。可知,故障位于QT支路,且距离J节点20.0km。

[0112] 以上结合附图对本发明的具体实施方式作了详细说明,但是本发明并不限于上述实施方式,在本领域普通技术人员所具备的知识范围内,还可以在不脱离本发明宗旨的前提下作出各种变化。

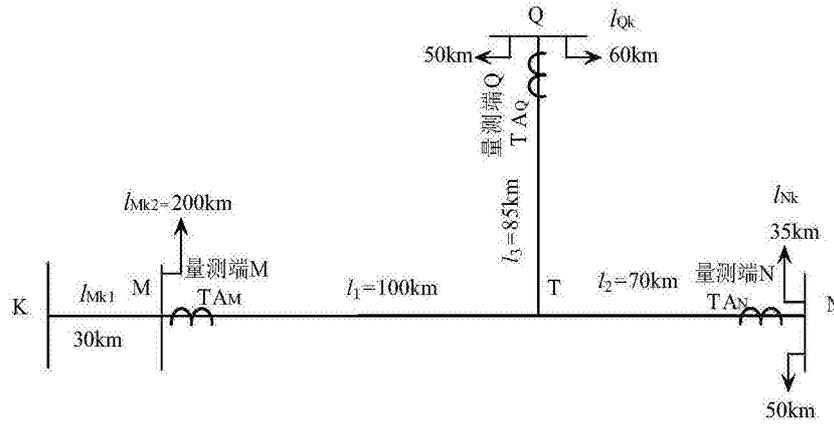


图1

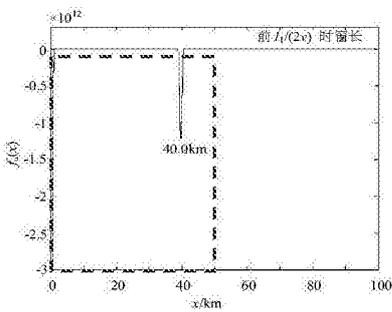


图2(a)

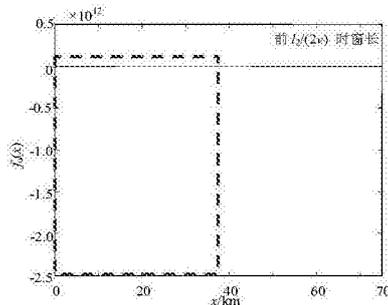


图2(b)

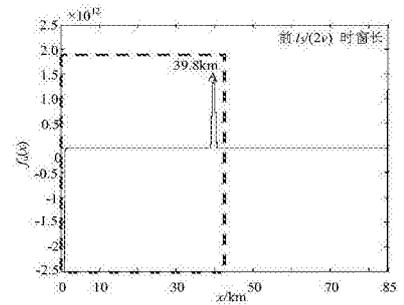


图2(c)

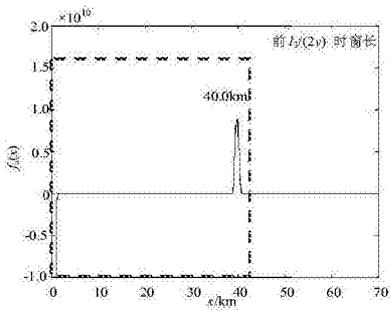


图2(d)

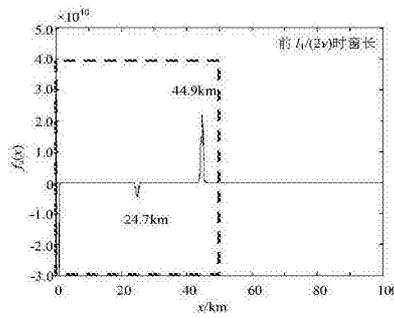


图3(a)

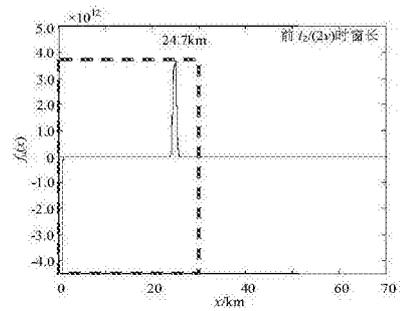


图3(b)

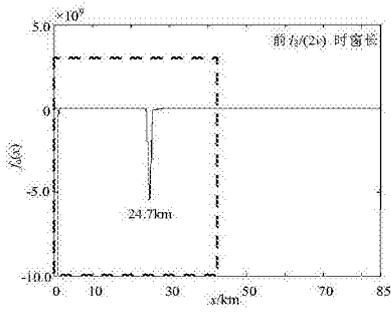


图3(c)

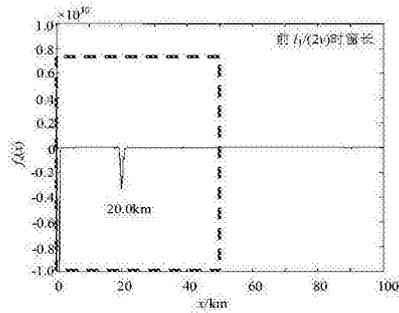


图4(a)

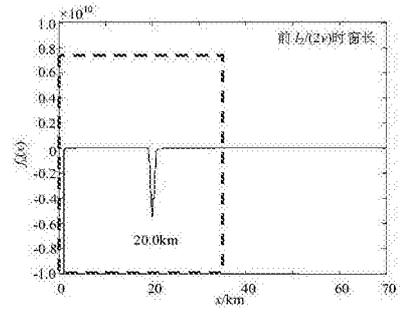


图4(b)

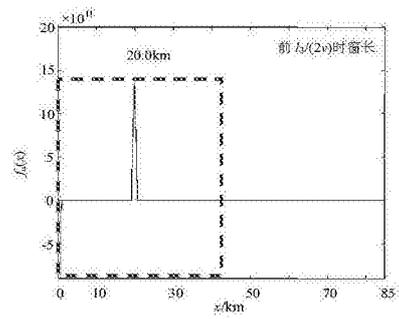


图4(c)