



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105738759 A

(43) 申请公布日 2016. 07. 06

(21) 申请号 201410773104. 6

(22) 申请日 2014. 12. 12

(71) 申请人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

申请人 国网安徽省电力公司亳州供电公司
南京南瑞集团公司

(72) 发明人 王吉文 肖拥东 国伟辉 姚庭镜
曲鸿春 郭宁明

(74) 专利代理机构 北京安博达知识产权代理有
限公司 11271

代理人 徐国文

(51) Int. Cl.

G01R 31/08(2006. 01)

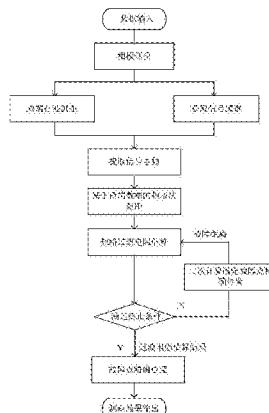
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障
定位方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于暂态录波数据的直流输
电线路故障定位方法,包括对电压相量进行相模
变换;通过行波法确定初始故障点位置;提取行
波测距结果的主频;计算短路过渡电阻和定位故
障点。本发明提供的方法作为行波测距法的后备
及补充。本发明提供的技术方案为在直流输电线
路行波故障测距装置难以正常工作情况下,能利
用保护 / 录波等装置提供的暂态录波数据,综合
应用行波法及频域法,并通过过渡电阻的迭代运
算及波速优化大大提高了故障定位的精度及可靠
性。



1. 一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法, 其特征在于, 所述方法包括下述步骤:

- 步骤 1: 对电压相量进行相模变换;
- 步骤 2: 通过行波法确定初始故障点位置;
- 步骤 3: 提取行波测距结果的主频;
- 步骤 4: 计算短路过渡电阻;
- 步骤 5: 定位故障点。

2. 如权利要求 1 所述的直流输电线路故障定位方法, 其特征在于, 所述步骤 1 中, 采用凯伦贝尔变换对电压相量进行解耦, 凯伦贝尔变换矩阵如下式 (1) 所示:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{R+} \\ u_{R-} \end{bmatrix} \quad (1);$$

式中: u_0 和 u_1 分别为地模分量和线模分量; u_{R+} 和 u_{R-} 分别为正极电压和负极电压。

3. 如权利要求 1 所述的直流输电线路故障定位方法, 其特征在于, 所述步骤 2 中, 利用线路两端的暂态录波数据, 采用双端行波法计算初始故障点位置; 双端行波法计算公式如下式 (2) 所示:

$$d = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (2);$$

式中: d 为故障点距离测量端距离; t_1 、 t_2 分别为行波到达线路两端的时间, L 为线路全长, v 为行波传播速度; 直流换流站中暂态录波数据采样频率在 5kHz 以上, 对应理论测距误差在 20km 左右。

4. 如权利要求 1 所述的直流输电线路故障定位方法, 其特征在于, 所述步骤 3 中, 基于频域法提取行波测距结果的主频, 通过暂态行波主频测量出对应的故障距离 d , 故障点距离如下式 (3) 所示:

$$d = \frac{(\theta_1 + \theta_2)v}{2\omega} \quad (3);$$

式中: d 为故障点距离测量端距离; $\omega = 2\pi f$ 为故障行波固有频率主成分; θ_1 和 θ_2 分别为系统端和故障点的反射角; 对于高频的暂态行波信号, 直流输电换流站线路出口处的平波电抗器处接近于开路, 则反射角 θ_1 近似为 0, 反射角 θ_2 近似为 π , 则公式 (3) 转化为:

$$d = \frac{v}{4f} \quad (4);$$

由步骤 2 得故障点到线路两端换流站距离分别为 d_1 、 d_2 , 结合预设行波波速, 代入公式 (4) 得出主频区间 (f_{\min}, f_{\max}) ; 结合线路两端的暂态行波的信号频谱得到两端暂态电压的准确主频 f_1 、 f_2 , 再将 f_1 、 f_2 代入公式 (4) 得到初始测距结果; 如文献 [] 所述, 频域法的测距误差在故障点距离 2% 以内。

5. 如权利要求 1 所述的直流输电线路故障定位方法, 其特征在于, 所述步骤 4 中, 稳态电流和电压的计算分别如下式 (5) 和 (6) 所示:

$$U_m = I_m R' \quad d_1 + I_f R_g \quad (5);$$

$$I_f = I_m + I_n \quad (6);$$

式中： I_f 、 I_m 、 I_n 分别为故障电流及直流线路两端稳态电流； U_m 为测量端稳态电压； R' 为单位长度直流线路阻抗； R_g 为短路过渡电阻；

过渡电阻估算精度的迭代终止条件如下式(7)所示：

$$\left| R_g^n - R_g^{n-1} \right| < \delta \quad (7);$$

式中： R_g^n 和 R_g^{n-1} 分别为第n轮及第n-1轮过渡电阻估算结果， δ 为定值，定值设置采取以下两种方式：1) 相对值 $0.05*R^{n-1}$, 0.05依据是互感器测量误差5%；2) 可变定值，多轮计算后， $|R^n - R^{n-1}|$ 不再收敛。

6. 如权利要求1所述的直流输电线路故障定位方法，其特征在于，所述步骤5中，故障距离 d' ₁和 d' ₂存在以下关系：

$$L = d'_1 + d'_2 \quad (8);$$

则公式7可转化为下式：

$$L = \frac{(\theta_{m1} + \theta_{m2})v_1}{2\pi f_1} + \frac{(\theta_{n1} + \theta_{n2})v_2}{2\pi f_2} \quad (9);$$

其中， d' ₁和 d' ₂为计算中间值，每轮迭代计算后均有所变化， d_1 和 d_2 为计算最终值； θ_{m1} 、 θ_{m2} 分别为线路两侧系统端的反射角； θ_{n1} 、 θ_{n2} 分别为线路两侧故障点的反射角；公式(9)中，参数设置原则如下：①主频在10kHz以上时，行波波速趋于稳定，即 $v_1 \approx v_2$ ，若线路两端主频差异导致1%以上波速差异时，则引入波速修正系数 k_v ；②系统端反射角总体趋近于0，即 $\theta_{m1}/\theta_{m2} \approx 0$ ；③两端故障点反射角相等 $\theta_{n1} = \theta_{n2}$ ，由下式得到：

$$k_{rf} = \frac{R_g - Z_c}{R_g + Z_c} \quad (10);$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{\operatorname{Re}(k_{rf})}{|k_{rf}|} \quad (11);$$

其中， k_{rf} 为故障点反射系数， R_g 为短路过渡电阻； $\operatorname{Re}(k_{rf})$ 为反射系数实部， Z_c 为线路特征阻抗，为260~400欧姆，过渡电阻对频域法的影响最终以阻抗修正系数 k_g 表示；以主频较高一侧为基准，则根据公式(8)和(9)构建以下方程：

$$\begin{cases} L - \left(\frac{1}{4f_1} - \frac{k_v}{4f_2} \right) k_g v = 0 \\ v_{\min} < v < v_{\max} \end{cases} \quad (12);$$

其中， v_{\max} 、 v_{\min} 分别为波速上下限值，在实际故障分析中，波速初始值以人工短路试验校正波速为基准， k_v 由线路两端主频及线路参数决定， k_g 由初始过渡电阻估算结果决定。

一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种故障定位方法，具体涉及一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法。

背景技术

[0002] 直流输电在长距离、大容量输电方面具有独特的优势，近年来，高压 / 特高压直流输电在中国得到了快速发展。在长达数千公里的直流输电线路要跨越森林、山地和河流等等复杂地形，这无疑给线路的故障后巡线工作带来种种困难。所以快速准确的直流输电线路故障测距，对于线路故障后的快速排除、恢复供电、以及交直流系统的安全稳定具有重要意义。

[0003] 输电线路故障测距方法从原理上分为阻抗法、故障分析法、行波法等；根据对数据源要求的不同可分为例如高采样率数据的行波测距、来源于保护 / 录波等装置的中低采样率数据的常规量测距。阻抗法、故障分析法等现有常规量测距方法的精度受系统运行方式、线路参数、过渡电阻等因素影响较大，现有相关标准中规定测距误差应在线路全长 10% 以内，但实际应用中往往难以达到。目前，直流输电线路主要采用行波测距装置，其精度基本满足了电力运营单位的要求（1km 以内），但长期运行中也暴露出行波故障测距装置可靠性较低的问题，主要体现在以下两点：

[0004] 1) 直流线路行波故障测距装置多为双端模式，工作涉及线路两端授时、通讯、采样等多个环节，若一个环节异常即会导致测距失败。同时，与交流线路不同，直流行波故障测距缺少后备分析手段，例如单端行波故障测距。大量的直流线路故障测距失败就是由一侧装置的问题导致的。

[0005] 2) 由于行波故障测距装置要求较高的数据采样率，所以难以利用保护 / 录波等装置的数据，只能通过噪声滤波器（PLC）中性点电流实现对线路暂态电压变化率的间接采样。而暂态电压变化率与短路过渡电阻、PLC 参数等因素相关，定值整定困难。在高阻故障条件下，由于暂态电压变化率较低，装置启动可靠性也受到一定影响。本申请人进行的大量相关研究表明，在现有间接采样方式下，启动可靠性问题难以彻底解决。

发明内容

[0006] 针对现有技术的不足，本发明的目的是提供一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法，该方法作为行波测距法的后备及补充。在行波故障测距装置难以正常工作情况下，综合应用行波法及频域法，并通过过渡电阻迭代运算及波速优化计算提高故障测距的精度及可靠性。

[0007] 本发明的目的是采用下述技术方案实现的：

[0008] 本发明提供一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法，其改进之处在于，所述方法包括下述步骤：

[0009] 步骤 1：对电压相量进行相模变换；

[0010] 步骤 2 :通过行波法确定初始故障点位置 ;

[0011] 步骤 3 :提取行波测距结果的主频 ;

[0012] 步骤 4 :计算短路过渡电阻 ;

[0013] 步骤 5 :定位故障点。

[0014] 进一步地,所述步骤 1 中,采用凯伦贝尔变换对电压相量进行解耦,凯伦贝尔变换矩阵如下式 (1) 所示 :

$$[0015] \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{R+} \\ u_{R-} \end{bmatrix} \quad (1);$$

[0016] 式中 : u_0 和 u_1 分别为地模分量和线模分量 ; u_{R+} 和 u_{R-} 分别为正极电压和负极电压。

[0017] 进一步地,所述步骤 2 中,利用线路两端的暂态录波数据,采用双端行波法计算初始故障点位置 ;双端行波法计算公式如下式 (2) 所示 :

$$[0018] d = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (2);$$

[0019] 式中 : d 为故障点距离测量端距离 ; t_1 、 t_2 分别为行波到达线路两端的时间, L 为线路全长, v 为行波传播速度 ; 直流换流站中暂态录波数据采样频率在 5kHz 以上, 对应理论测距误差在 20km 左右。

[0020] 进一步地,所述步骤 3 中,基于频域法提取行波测距结果的主频,通过暂态行波主频测量出对应的故障距离 d , 故障点距离如下式 (3) 所示 :

$$[0021] d = \frac{(\theta_1 + \theta_2)v}{2\omega} \quad (3);$$

[0022] 式中 : d 为故障点距离测量端距离 ; $\omega = 2\pi f$ 为故障行波固有频率主成分 ; θ_1 和 θ_2 分别为系统端和故障点的反射角 ; 对于高频的暂态行波信号, 直流输电换流站线路出口处的平波电抗器处接近于开路, 则反射角 θ_1 近似为 0, 反射角 θ_2 近似为 π , 则公式 (3) 转化为 :

$$[0023] d = \frac{v}{4f} \quad (4);$$

[0024] 由步骤 2 得故障点到线路两端换流站距离分别为 d_1 、 d_2 , 结合预设行波波速, 代入公式 (4) 得出主频区间 (f_{min} , f_{max}) ; 结合线路两端的暂态行波的信号频谱得到两端暂态电压的准确主频 f_1 、 f_2 , 再将 f_1 、 f_2 代入公式 (4) 得到初始测距结果 ; 如文献 [] 所述, 频域法的测距误差在故障点距离 2% 以内。

[0025] 进一步地,所述步骤 4 中,稳态电流和电压的计算分别如下式 (5) 和 (6) 所示 :

$$[0026] U_m = I_m R' d_1 + I_f R_g \quad (5);$$

$$[0027] I_f = I_m + I_n \quad (6);$$

[0028] 式中 : I_f 、 I_m 、 I_n 分别为故障电流及直流线路两端稳态电流 (M、N 端电流) ; U_m 为测量端稳态电压 ; R' 为单位长度直流线路阻抗 ; R_g 为短路过渡电阻 ;

[0029] 过渡电阻估算精度的迭代终止条件如下式 (7) 所示 :

$$[0030] \left| R_g^n - R_g^{n-1} \right| < \delta \quad (7);$$

[0031] 式中： R_g^n 和 R_g^{n-1} 分别为第 n 轮及第 n-1 轮过渡电阻估算结果， δ 为定值，定值设置采取以下两种方式：1) 相对值 $0.05*R^{n-1}$, 0.05 依据是互感器测量误差 5% ;2) 可变定值，多轮计算后， $|R^n - R^{n-1}|$ 不再收敛。

[0032] 进一步地，所述步骤 5 中，故障距离 d' ₁ 和 d' ₂ 存在以下关系：

[0033] $L = d'_1 + d'_2 \quad (8)$ ；

[0034] 则公式 7 可转化为下式：

[0035]
$$L = \frac{(\theta_{m1} + \theta_{m2})v_1}{2\pi f_1} + \frac{(\theta_{n1} + \theta_{n2})v_2}{2\pi f_2} \quad (9)$$
；

[0036] 其中， d' ₁ 和 d' ₂ 为计算中间值，每轮迭代计算后均有所变化， d_1 和 d_2 为计算最终值； θ_{m1} 、 θ_{m2} 分别为线路两侧系统端的反射角； θ_{n1} 、 θ_{n2} 分别为线路两侧故障点的反射角；公式 (9) 中，参数设置原则如下：①主频在 10kHz 以上时，行波波速趋于稳定，即 $v_1 \approx v_2$ ，若线路两端主频差异导致 1% 以上波速差异时（即主频较高时），则引入波速修正系数 k_v （主频在 3kHz 以下时，相差 100Hz 就应对波速进行修正）；②系统端反射角总体趋近于 0，即 $\theta_{m1}/\theta_{m2} \approx 0$ ；③两端故障点反射角相等 $\theta_{n1} = \theta_{n2}$ ，由下式得到：

[0037]
$$k_{rf} = \frac{R_g - Z_c}{R_g + Z_c} \quad (10)$$
；

[0038]
$$\theta_2 = \arccos \frac{\operatorname{Re}(k_{rf})}{|k_{rf}|} \quad (11)$$
；

[0039] 其中， k_{rf} 为故障点反射系数， R_g 为短路过渡电阻； $\operatorname{Re}(k_{rf})$ 为反射系数实部， Z_c 为线路特征阻抗，为 260 ~ 400 欧姆，过渡电阻对频域法的影响最终以阻抗修正系数 k_g 表示；以主频较高一侧为基准，则根据公式 (8) 和 (9) 构建以下方程：

[0040]
$$\begin{cases} L - \left(\frac{1}{4f_1} - \frac{k_v}{4f_2} \right) k_g v = 0 \\ v_{\min} < v < v_{\max} \end{cases} \quad (12)$$
；

[0041] 其中， v_{\max} 、 v_{\min} 分别为波速上下限值，在实际故障分析中，波速初始值以人工短路试验校正波速为基准， k_v 由线路两端主频及线路参数决定， k_g 由初始过渡电阻估算结果决定将上述参数代入公式 12 后即可求得符合条件 8 的计算波速 v 。将计算波速代入频域法计算公式即可故障距离 d''_1 、 d''_2 ，将回代入公式 5、6 即可得二次计算过渡电阻 R''_g ，经多轮迭代计算即可得精确过渡电阻估算结果，并代入公式 12 决定最终计算波速，代入频域法计算公式，从而得到最终精确故障距离。

[0042] 与最接近的现有技术相比，本发明提供的技术方案具有的优异效果是：

[0043] 本发明提供的方法作为行波测距法的后备及补充。在行波故障测距装置难以正常工作情况下，综合应用行波法及频域法，并通过对波速的优化计算获得精确故障点位置，具体表现在：

[0044] (1) 高可靠性，频域法主频提取方面基于双端行波法测距结果提取，具有较高的算法可靠性，并且依靠保护 / 录波等装置提供的暂态录波数据，数据来源具有较高可靠性。

[0045] (2) 较高的测距精度，算法实现基于两端数据，综合了行波法 / 频域法，并通过二

次优化完成故障定位,较依靠单侧数据的行波法 / 频域法测距结果具有更好的测距精度。

[0046] (3) 具备初步的故障性质识别功能,本方法具备故障过渡电阻估算功能,而根据过渡电阻估算可以对故障性质进行识别,确定为瞬时故障或永久故障。

[0047] (4) 对硬件条件要求较低,基于线路两侧暂态录波数据完成故障定位,无需额外增加硬件采样装置,实现简单。

附图说明

- [0048] 图 1 是本发明提供的双端行波测距原理图 ;
- [0049] 图 2 是本发明提供的基于行波法结果的主频提取波形图 ;
- [0050] 图 3 是本发明提供的过渡电阻估算原理图 ;
- [0051] 图 4 是本发明提供的过渡电阻估算波形图 ;
- [0052] 图 5 是本发明提供的基于暂态录波数据的直流输电线路故障定位方法的流程图 ;
- [0053] 图 6(a) 是本发明提供的具体实施例的宝安站故障后电压波形图 ;
- [0054] 图 6(b) 是本发明提供的具体实施例的兴仁站故障后电压波形图 ;
- [0055] 图 6(c) 是本发明提供的具体实施例的宝安站暂态电压频谱图 ;
- [0056] 图 6(d) 是本发明提供的具体实施例的兴仁站暂态电压频谱图。

具体实施方式

[0057] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的详细说明。

[0058] 本发明提供了一种基于暂态录波数据的直流输电线路故障测距方法。现有的直流输电线路行波故障测距装置基本工作模式为双端行波测距,涉及 GPS、通讯等多个环节,若线路一侧装置存在问题,则系统就无法正常工作。本发明所提方法利用换流站内保护 / 录波等装置提供的暂态录波数据完成故障定位,由于保护 / 录波装置具有较高的装置及启动可靠性,适合作为行波故障测距装置的后备及补充以提高故障定位系统的可靠性。该方法的流程图如图 5 所示,包括以下步骤 :

[0059] 步骤 1 :相模变换

[0060] 由于直流输电线路多为正负极线路同杆架设,两极导线间存在耦合,对电压 / 电流分析前需对其解耦使其成为相互独立模量(即相模变换)。本发明中采用 Karenbauer(凯伦贝尔)变换对电压相量进行解耦,其变换矩阵如下 :

$$[0061] \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{R+} \\ u_{R-} \end{bmatrix} \quad (1);$$

[0062] 式中 : u_0 和 u_1 分别为地模分量和线模分量 ; u_{R+} 和 u_{R-} 分别为正极电压和负极电压。

[0063] 步骤 2 :基于暂态录波数据的行波法测距

[0064] 利用线路两端的暂态录波数据,采用双端行波法计算获取初始故障点位置。双端行波法计算公式如下 :

$$[0065] d = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (2);$$

[0066] 式中 : d 为故障点距离测量端距离 ; t_1 、 t_2 分别为行波到达线路两端的时间, L 为线

路全长, v 为行波传播速度。行波测距法的理论精度与信号采样频率相关, 直流换流站中暂态录波数据采样频率一般在 5kHz 以上。本文实例中暂态录波数据采样频率为 6.2kHz, 采样点间隔约 161.29us, 对应最大测距误差约 23.63km。该测距精度难以满足巡线要求, 但可为频域法中主频提取提供参考。

[0067] 步骤 3 : 基于行波测距结果的主频提取

[0068] 频域法用于实际故障定位分析时, 首要问题即主频的提取, 通过 FFT 变换等方法可获得信号的频谱。理论上, 最低频信号幅值最高, 用于故障定位计算最合适, 因此, 现有频域法测距中一般选择最低频信号作为主频, 但受采样噪声、换流站谐波等因素的干扰, 实际计算中可靠性受到一定影响。因此, 本发明中提出基于行波测距结果的主频提取。基于行波法结果的主频提取波形图如图 2 所示。频域法计算中, 故障点距离如下:

$$[0069] d = \frac{(\theta_1 + \theta_2)v}{2\omega} \quad (3);$$

[0070] 式中 : d 为故障点距离测量端距离; $\omega = 2\pi f$ 为故障行波固有频率主成分; θ_1 和 θ_2 分别为系统端和故障点的反射角。在直流输电换流站中, 线路出口处都装设有平波电抗器, 对于高频的暂态行波信号, 平波电抗器阻抗值较高, 近似于开路, 因此 θ_1 近似为 0。而过渡电阻大小与主频基本无关, 当过渡电阻较小时, 反射角 θ_2 近似为 π , 则公式 (3) 转化为:

$$[0071] d = \frac{v}{4f} \quad (4);$$

[0072] 由步骤 2 可得故障点到线路两端换流站距离为 d_1 、 d_2 , 结合预设行波波速(可由人工短路试验获得), 代入公式 (4) 即可反推出主频大致区间 (f_{\min}, f_{\max}) 。结合线路两端的暂态行波的信号频谱(如图 2 所示) 即可得两端暂态电压的准确主频 f_1 、 f_2 , 再将 f_1 、 f_2 代入公式 (4) 即可得到初始测距结果。

[0073] 频域法误差一般在故障点距离 2% 以内, 对于线路较长的直流输电线路, 假设线路长度 500km 时, 测距误差则有可能达到 10km, 此误差对于现场运行人员仍相对较大。由公式 (3) 可知, 导致误差的原因主要是: 波速及短路过渡电阻。行波传播波速与频率相关, 当频率较高时, 波速总体是稳定, 但仍受温度等外部条件影响非稳定值。现有频域法计算中一般较少考虑过渡电阻的影响, 但实际故障分析表明, 在高阻故障仍会对频域法测距精度造成较大影响。因此, 本发明提出了针对波速及过渡电阻的优化计算方法, 如步骤 4、5 所示。

[0074] 步骤 4 : 基于暂态录波数据的过渡电阻估算

[0075] 直流线路故障过渡电阻估算原理和波形图分别如图 3 和 4 所示, 计算公式如下:

$$[0076] U_m = I_m R' d_1 + I_f R_g \quad (5);$$

$$[0077] I_f = I_m + I_n \quad (6);$$

[0078] 式中: I_f 、 I_m 、 I_n 分别为故障电流及直流线路两端稳态电流(M、N 端电流); U_m 为测量端稳态电压; R' 为单位长度直流线路阻抗; R_g 为短路过渡电阻。

[0079] 由暂态录波数据可知线路两端稳态电压、电流量, 结合初始测距结果 d_1 , 根据公式 5、6 可求得短路过渡电阻。由公式 (5) 可知, 影响过渡电阻估算的主要因素是故障距离。因此, 本发明中提出通过步骤 4 及步骤 5 的多轮迭代计算提高过渡电阻估算精度, 而迭代终止条件如下:

[0080] $|R_g^n - R_g^{n-1}| < \delta$ (7);

[0081] 式中： R_g^n 、 R_g^{n-1} 为第 n 轮及第 n-1 轮过渡电阻估算结果， δ 为定值，定值设置采取以下两种方式：1) 相对值 $0.05 * R^{n-1}$, 0.05 依据是互感器测量误差 5% ;2) 可变定值，多轮计算后， $|R^n - R^{n-1}|$ 不再收敛。

[0082] 步骤 5 : 基于变量约束条件的波速优化计算。

[0083] 由步骤 3 可得故障距离 $d'_{1,2}$ ，理论上存在以下关系：

[0084] $L = d'_{1,2}$ (8)；

[0085] 则公式 (7) 可转化为下式：

[0086] $L = \frac{(\theta_{m1} + \theta_{m2})v_1}{2\pi f_1} + \frac{(\theta_{n1} + \theta_{n2})v_2}{2\pi f_2}$ (9);

[0087] $d'_{1,2}$ 为计算中间值，每轮迭代计算后均有所变化， d_1 和 d_2 为计算最终值； θ_{m1} 、 θ_{m2} 分别为线路两侧系统端的反射角； θ_{n1} 、 θ_{n2} 分别为线路两侧故障点的反射角；公式 (9) 中，参数设置原则如下：①主频在 10kHz 以上时，行波波速趋于稳定，即 $v_1 \approx v_2$ ，若线路两端主频差异导致 1% 以上波速差异时，则引入波速修正系数 k_v （主频在 3kHz 以下时，相差 100Hz 就应对波速进行修正）；②系统端反射角总体趋近于 0，即 $\theta_{m1}/\theta_{m2} \approx 0$ ；③两端故障点反射角相等 $\theta_{n1} = \theta_{n2}$ ，由下式得到：

[0088] $k_{rf} = \frac{R_g - Z_c}{R_g + Z_c}$ (10);

[0089] $\theta_2 = \arccos \frac{\operatorname{Re}(k_{rf})}{|k_{rf}|}$ (11);

[0090] 其中， Z_c 为线路特征阻抗，一般在 260 ~ 400 欧姆之间，过渡电阻对频域法的影响最终以阻抗修正系数 k_g 表示。以主频较高一侧为基准，则根据公式 (8)、(9) 可构建以下方程：

[0091]
$$\begin{cases} L - \left(\frac{1}{4f_1} - \frac{k_v}{4f_2} \right) k_g v = 0 \\ v_{\min} < v < v_{\max} \end{cases}$$
 (12);

[0092] 其中， v_{\max} 、 v_{\min} 分别为波速上下限值，在实际故障分析中，波速初始值以人工短路试验校正波速为基准， k_v 由图 4 得到， k_g 则由初始过渡电阻估算结果决定，将上述参数代入公式 (12) 后即可求得符合条件的计算波速 v 。将计算波速代入频域法计算公式即可故障距离 $d'_{1,2}$ ，将回代入公式 (5)、(6) 即可得二次计算过渡电阻 R_g ，经多轮迭代计算即可得精确过渡电阻估算结果，并代入公式 (12) 决定最终计算波速，代入频域法计算公式，从而得到最终精确故障距离。

[0093] 实施例

[0094] 以一组实际故障（南方电网公司所属兴仁 - 宝安直流线路故障）为例说明算法应用，该次故障为典型直流线路高阻故障，线路两端双重备份的行波故障测距装置均未启动（但出于正常工作状态），因此，只能通过暂态录波数据完成故障定位。

[0095] 步骤 1 :基于两端暂态录波时标可得故障点位置距离宝安站约 644km, 距离兴仁站约 551km, 测距误差约为 23. 63km。备注 :实际频率为图示 6 所示的 32 倍频。宝安站故障后电压波形图、兴仁站故障后电压波形图、宝安站暂态电压频谱和兴仁站暂态电压频谱图分别如图 6(a)、6(b)、6(c) 和 6(d) 所示。

[0096] 步骤 2 :基于步骤 1 所得测距结果, 对宝安站及兴仁站主频进行筛选, 宝安站主频为 224Hz :故障点距离宝安站 655. 417km, 兴仁站主频为 :259. 2Hz, 故障点距离兴仁站 566. 41km, 参考波速为 293. 627m/us (基于人工短路试验结果)。

[0097] 步骤 3 :基于步骤 2 所得测距结果, 直流特征阻抗按 284.45Ω , 估算本次故障过渡电阻 121.63Ω 。

[0098] 步骤 4 :基于两端暂态录波时标可得故障点位置距离宝安站约 651. 7m, 距离兴仁站约 542. 3km。

[0099] 本发明提供的一种利用暂态录波数据的直流输电线路故障测距方法, 作为行波测距法的后备及补充。在行波故障测距装置难以正常工作情况下, 综合应用行波法及频域法, 并通过对波速的优化计算获得精确故障点位置。

[0100] 最后应当说明的是 :以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制, 尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明, 所属领域的普通技术人员依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换, 这些未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换, 均在申请待批的本发明的权利要求保护范围之内。

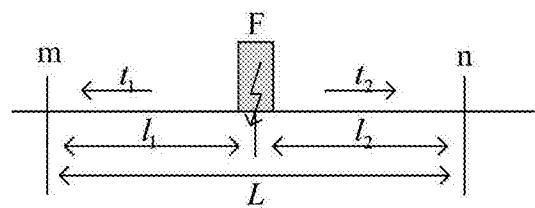


图 1

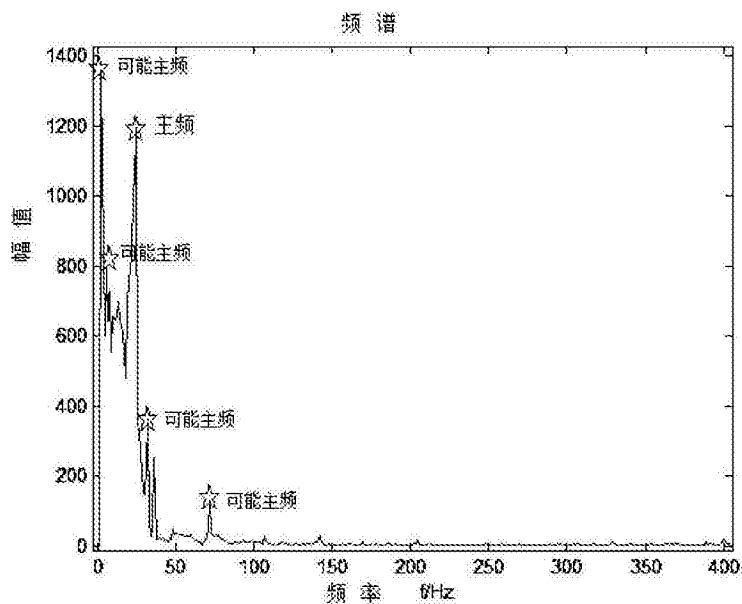


图 2

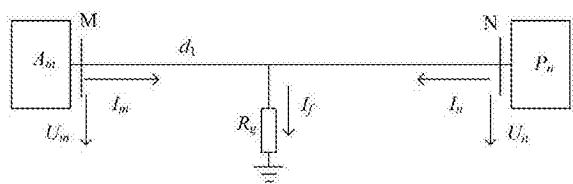


图 3

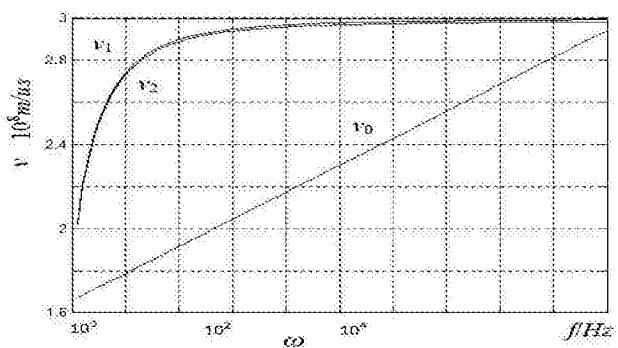


图 4

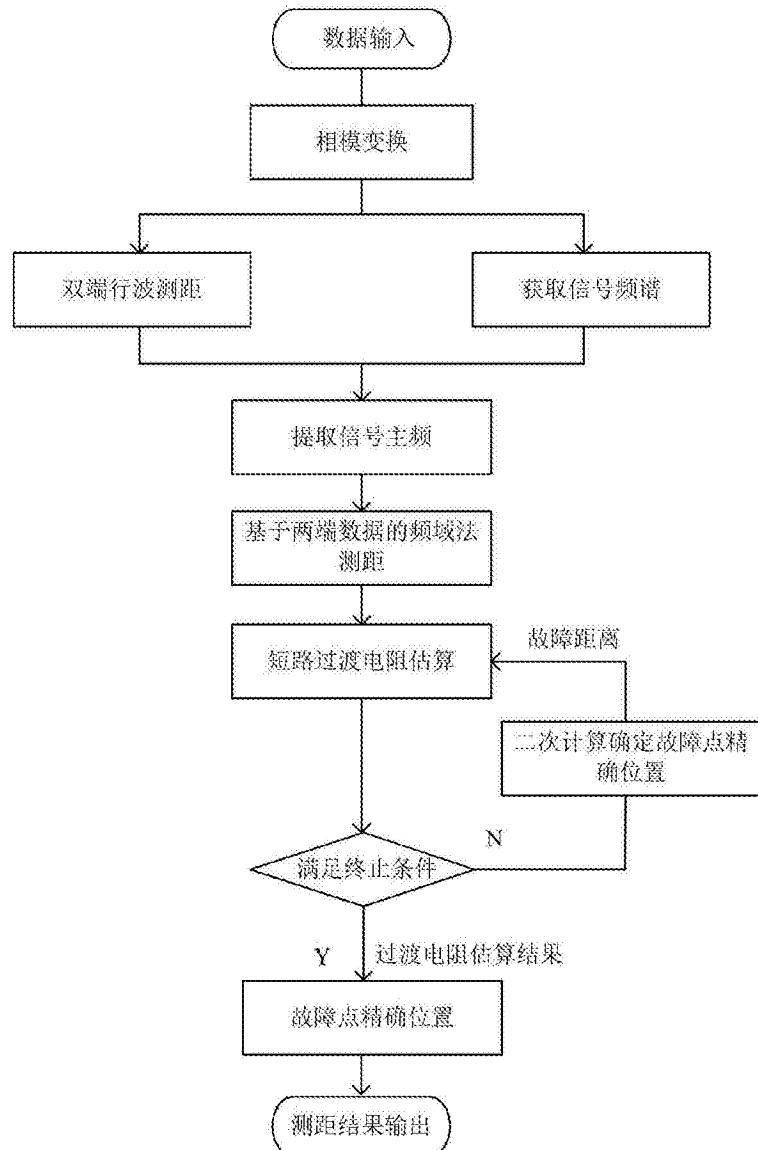
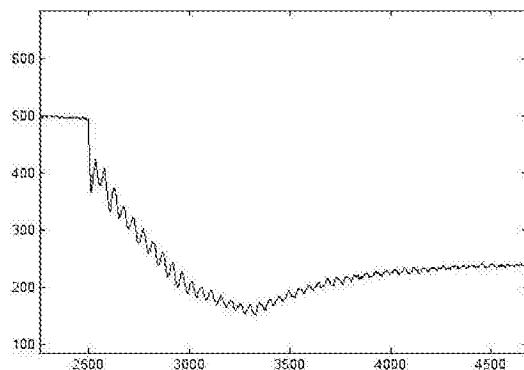
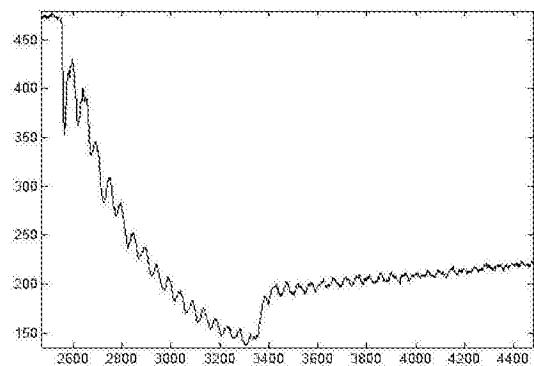


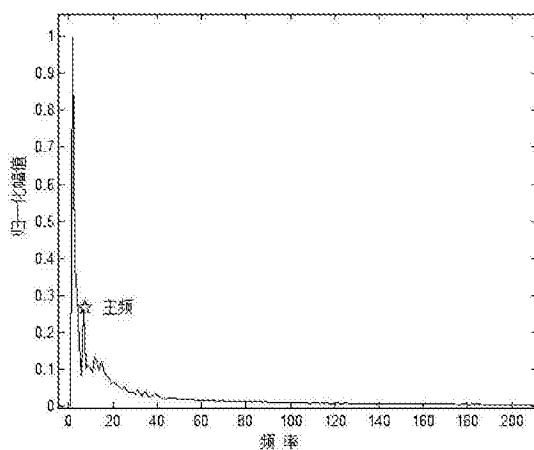
图 5



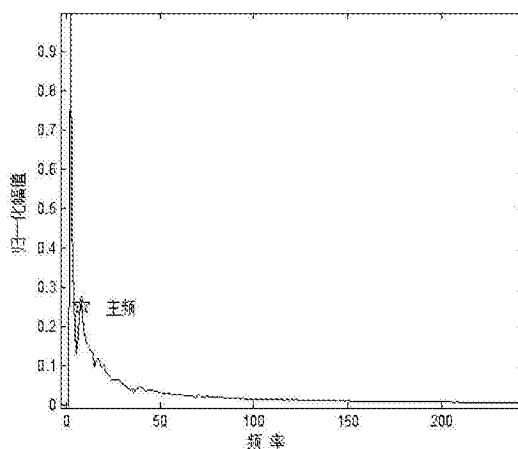
(a)



(b)



(c)



(d)

图 6