



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112415273 B

(45) 授权公告日 2021.09.03

(21) 申请号 202011088670.5

(22) 申请日 2020.10.13

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112415273 A

(43) 申请公布日 2021.02.26

(73) 专利权人 武汉大学
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学(72) 发明人 胡志坚 高明鑫 倪识远 陈锦鹏
林铭蓉(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222
代理人 许莲英(51) Int. Cl.
G01R 27/04 (2006.01)
G01R 19/28 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106501612 A, 2017.03.15

CN 102435851 A, 2012.05.02

CN 105588984 A, 2016.05.18

CN 110361632 A, 2019.10.22

CN 106680636 A, 2017.05.17

CN 101350521 A, 2009.01.21

CN 106556740 A, 2017.04.05

CN 102043115 A, 2011.05.04

张奋强等. 不并列运行的同杆双回输电线路
跨线故障计算.《电力系统自动化》.2016,第40卷
(第09期),第86-93页.Jun Tang, et al.. A Precise Measurement
Method for Positive Sequence Parameters
of EHV and UHV Transmission Lines and Its
Application.《2011 IEEE Power Engineering
and Automation Conference》.2012,第208-211
页.

审查员 刘绍涛

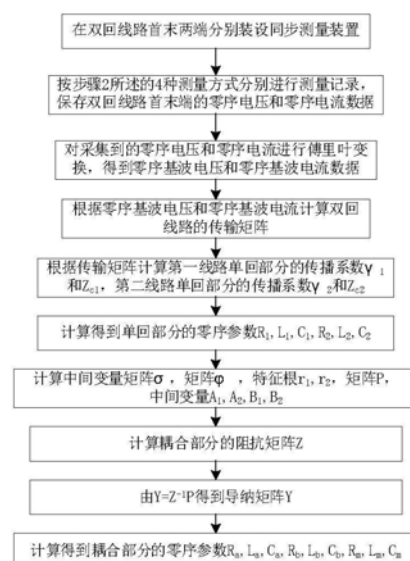
权利要求书6页 说明书17页 附图2页

(54) 发明名称

一种双回非全线平行输电线路零序参数精
确测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法。本发明利用GPS技术,在不同测量方式下同步测量线路首末两端的零序电压和零序电流。根据双回非全线平行输电线路模型得到线路的传输矩阵,再根据本发明给出的停电测量方式或带电测量方式与计算方法得到待测线路的零序电阻、零序电感、零序电容多个零序参数。本发明的方法适用于任意常见的双回线路,测量精度高,可满足工程实际的需要。



1. 一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:定义第一输电线路各部分长度、第二输电线路各部分长度,所述的第一输电线路、第二输电线路为非全线平行输电线路;

步骤2,定义第一停电测量方式、第二停电测量方式、第三停电测量方式、第四停电测量方式,定义第一带电测量方式、第二带电测量方式、第三带电测量方式、第四带电测量方式;

步骤3,人工选择第一停电测量方式至第四停电测量方式或第一带电测量方式至第四带电测量方式作为第一零序测量方式至第四零序测量方式,利用基于GPS的同步相量测量装置,同步测量得到不同零序测量方式下零序分量;

步骤4,对不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量,根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵,根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗,根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳,根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳,计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容,计算第一特征中间变量至第四特征中间变量,计算第一元素中间变量至第四元素中间变量,结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根,结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量,根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征根计算阻抗矩阵,根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵,根据阻抗矩阵以及导纳矩阵,计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳,实现零序参数测量;

步骤4所述不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量为:

第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压即 $U_{k,1,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1,s}^k$;

第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流即 $I_{k,1,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1,s}^k$;

第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压即 $U_{k,2,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2,s}^k$;

第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流即 $I_{k,2,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,s}^k$;

第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压即 $U_{k,1,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1,m}^k$;

第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流即 $I_{k,1,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1,m}^k$;

第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压即 $U_{k,2,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2,m}^k$;

第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流即 $I_{k,2,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,m}^k$;

$k \in [1, 4]$;

步骤4所述根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,s}^1 & \dot{U}_{1,s}^2 & \dot{U}_{1,s}^3 & \dot{U}_{1,s}^4 \\ \dot{U}_{2,s}^1 & \dot{U}_{2,s}^2 & \dot{U}_{2,s}^3 & \dot{U}_{2,s}^4 \\ \dot{I}_{1,s}^1 & \dot{I}_{1,s}^2 & \dot{I}_{1,s}^3 & \dot{I}_{1,s}^4 \\ \dot{I}_{2,s}^1 & \dot{I}_{2,s}^2 & \dot{I}_{2,s}^3 & \dot{I}_{2,s}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,m}^1 & \dot{U}_{1,m}^2 & \dot{U}_{1,m}^3 & \dot{U}_{1,m}^4 \\ \dot{U}_{2,m}^1 & \dot{U}_{2,m}^2 & \dot{U}_{2,m}^3 & \dot{U}_{2,m}^4 \\ \dot{I}_{1,m}^1 & \dot{I}_{1,m}^2 & \dot{I}_{1,m}^3 & \dot{I}_{1,m}^4 \\ \dot{I}_{2,m}^1 & \dot{I}_{2,m}^2 & \dot{I}_{2,m}^3 & \dot{I}_{2,m}^4 \end{bmatrix}^{-1}$$

式中, T_{mn} 表示传输矩阵第m行第n列的元素, $m \in [1, 4]$, $n \in [1, 4]$;

步骤4所述根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗为:

$$\begin{aligned} \text{令} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & 0 & a_8 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_2) \\ \cosh(\gamma_1 l_1) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_2) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) \end{bmatrix} \\ \text{令} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 & b_4 \\ b_5 & 0 & b_6 & 0 \\ 0 & b_7 & 0 & b_8 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_5) \\ \cosh(\gamma_1 l_4) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_5) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) \end{bmatrix} \\ \text{则有} \begin{cases} b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) = b_2(T_{11}a_5 - T_{31}a_1) - b_1(T_{13}a_5 - T_{33}a_1) \\ b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) = b_2(T_{21}a_7 - T_{41}a_3) - b_1(T_{23}a_7 - T_{43}a_3) \\ b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) = b_4(T_{12}a_5 - T_{32}a_1) - b_3(T_{14}a_5 - T_{34}a_1) \\ b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) = b_4(T_{22}a_7 - T_{42}a_3) - b_3(T_{24}a_7 - T_{44}a_3) \end{cases} \end{aligned}$$

式中, γ_1 表示第一输电线路单回部分的传播系数, Z_{c1} 表示第一输电线路单回部分的特性阻抗, γ_2 表示第二输电线路单回部分的传播系数, Z_{c2} 表示第二输电线路单回部分的特性阻抗, l_1 为第一输电线路首端至第一输电线路耦合部分首端的长度, l_4 为第一输电线路耦合部分末端至第一输电线路末端的长度, l_2 为第二输电线路首端至第二输电线路耦合部分首端的长度, l_5 为第二输电线路耦合部分末端至第二输电线路末端的长度, a_i 表示首端第i变量, b_c 表示末端第c变量, $i \in [1, 8]$, $c \in [1, 8]$;

步骤4所述根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳,根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳为:

$$\begin{cases} Z_1 = \gamma_1 Z_{c1} \\ Y_1 = \gamma_1 / Z_{c1} \end{cases} \quad \begin{cases} Z_2 = \gamma_2 Z_{c2} \\ Y_2 = \gamma_2 / Z_{c2} \end{cases}$$

其中, Z_1 表示第一输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_1 表示第一输电线路单回部分的零序自导纳, Z_2 表示第二输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_2 表示第二输电线路单回部分的零序自导纳;

步骤4所述计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容为:

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \\ Y_1 = j\omega C_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \\ Y_2 = j\omega C_2 \end{cases}$$

其中, R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻, L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感, C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容, R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻, L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感, C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容;

步骤4所述计算第一特征中间变量至第四特征中间变量,计算第一元素中间变量至第四元素中间变量为:

$$\begin{cases} \sigma_1 = b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) \\ \sigma_2 = b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) \\ \sigma_3 = b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) \\ \sigma_4 = b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) \end{cases}$$

式中, σ_u 表示第u特征中间变量, $u \in [1, 4]$;

$$\begin{cases} \varphi_1 = b_1(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) - b_2(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) \\ \varphi_2 = b_3(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) - b_4(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) \\ \varphi_3 = b_1(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) - b_2(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) \\ \varphi_4 = b_3(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) - b_4(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) \end{cases}$$

式中, φ_v 表示第v元素中间变量, $v \in [1, 4]$;

步骤4所述结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根为:

$$\begin{cases} ch(r_1 l_3) + ch(r_2 l_3) = \sigma_1 + \sigma_4 \\ ch(r_1 l_3) - ch(r_2 l_3) = -\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_4)^2 + 4\sigma_2\sigma_3} \end{cases}$$

其中, l_3 表示第一输电线路耦合部分的长度, r_1 表示第一特征根, r_2 表示第二特征根;

步骤4所述结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量为:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_4 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_2 = \frac{\sigma_2 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_3 = \frac{\sigma_3 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_4 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_1 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \end{cases}$$

式中, P_d ($d=1, 2, 3, 4$) 表示第 d 矩阵中间变量;

步骤4所述根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征计算阻抗矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} (r_1^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_1^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_1^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_1^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix} - B_2 \begin{bmatrix} (r_2^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_2^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_2^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_2^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}$$

其中, $A_1 = \frac{\cosh(r_1 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第一替换中间变量, $A_2 = \frac{\cosh(r_2 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第二替换中间变量,

$B_1 = \frac{\sinh(r_1 l_3)}{r_1(r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第三替换中间变量, $B_2 = \frac{\sinh(r_2 l_3)}{r_2(r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第四替换中间变量;

式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗;

步骤4所述根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \end{bmatrix}$$

其中, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳;

步骤4所述根据阻抗矩阵以及导纳矩阵, 计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳为:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_a & R_m + j\omega L_m \\ R_m + j\omega L_m & R_b + j\omega L_b \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C_a & j\omega C_m \\ j\omega C_m & j\omega C_b \end{bmatrix}$$

式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳, 其中, $\omega = 2\pi f$, f

为电力系统频率50Hz；

步骤4所述零序参数为：

R_1 、 L_1 、 C_1 、 R_2 、 L_2 、 C_2 、 R_a 、 L_a 、 C_a 、 R_b 、 L_b 、 C_b 、 R_m 、 L_m 、 C_m ；

其中， R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻， L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感， C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容；

R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻， L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感， C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容；

R_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电阻， L_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电感， C_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电容；

R_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电阻， L_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电感， C_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电容；

R_m 表示耦合部分的零序互电阻， L_m 表示耦合部分的零序互电感， C_m 表示耦合部分的零序互电容。

2. 根据权利要求1所述的双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法，其特征在于：

步骤1所述定义第一输电线路各部分长度为：

第一输电线路首端至第一输电线路的耦合部分首端的长度为 l_1 ；

第一输电线路的耦合部分末端至第一输电线路末端的长度为 l_4 ；

第一输电线路的耦合部分首端至第一输电线路的耦合部分末端即第一输电线路耦合部分的长度为 l_3 ；

第一输电线路首端至第一输电线路末端即第一输电线路的长度为 $l_1+l_3+l_4$ ；

步骤1所述定义第二输电线路各部分长度为：

第二输电线路首端至第二输电线路的耦合部分首端的长度为 l_2 ；

第二输电线路的耦合部分末端至第二输电线路末端的长度为 l_5 ；

第二输电线路的耦合部分首端至第二输电线路的耦合部分末端即第二输电线路耦合部分为 l_3 ；

第二输电线路首端至第二输电线路末端即第二输电线路的长度为 $l_2+l_3+l_5$ ；

所述耦合部分为第一输电线路与第二输电线路耦合的部分。

3. 根据权利要求1所述的双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法，其特征在于：

步骤2所述第一停电测量方式为：

第一输电线路首端加单相电源，末端接地；第二输电线路首端悬空，末端接地；

步骤2所述第二停电测量方式为：

第一输电线路首端悬空，末端接地；第二输电线路首端加单相电源，末端接地；

步骤2所述第三停电测量方式为：

第一输电线路首端加单相电源，末端接地；第二输电线路首端接地，末端接地；

步骤2所述第四停电测量方式为：

第一输电线路首端接地，末端接地；第二输电线路首端加单相电源，末端接地；

步骤2所述第一带电测量方式为：

第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路正常带电运行;

步骤2所述第二带电测量方式为:

第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;

步骤2所述第三带电测量方式为:

第一输电线路首端加单相电源,末端悬空;第二输电线路正常带电运行;

步骤2所述第四带电测量方式为:

第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端悬空;

所述悬空表示三相短接并开路。

4. 根据权利要求1所述的双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法,其特征在于:

步骤3所述不同零序测量方式下零序分量包括:

不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压与零序电流;

所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压为:

$$U_{k,1,s}, k \in [1, 4]$$

其中, $U_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压;

所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流为:

$$I_{k,1,s}, k \in [1, 4]$$

其中, $I_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流;

所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压为:

$$U_{k,2,s}, k \in [1, 4]$$

其中, $U_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压;

所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流为:

$$I_{k,2,s}, k \in [1, 4]$$

其中, $I_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流;

所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压为:

$$U_{k,1,m}, k \in [1, 4]$$

其中, $U_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压;

所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流为:

$$I_{k,1,m}, k \in [1, 4]$$

其中, $I_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流;

所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压为:

$$U_{k,2,m}, k \in [1, 4]$$

其中, $U_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压;

所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流为:

$$I_{k,2,m}, k \in [1, 4]$$

其中, $I_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流。

一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种输电线路零序参数精确测量方法,尤其是涉及一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法。

背景技术

[0002] 输电线路是电力系统的重要组成部分,承担着输送电能的重要作用。输电线路参数的准确性对电网的安全稳定运行具有极其重要的作用,尤其对继电保护装置的整定和故障测距有着很大的影响。

[0003] 随着电力工业的高速发展,电力系统的网络构架愈加复杂。因地理环境的限制或是电力需求的影响,双回输电线路已衍生出多种架设方式,由于线路只存在部分耦合,使得沿线参数非均匀分布,即使双回线路在同电压等级下,耦合部分也并非完全对称,这使得耦合部分的自参数不相等。通常情况下,只能在线路的首末端测量电压与电流,无疑给线路参数的精确测量带来了很大的困难。

[0004] 国内外已有很多学者对存在互感耦合的平行线路的零序参数测量做了大量的研究。基于集中参数模型的方法无法运用于长距离输电线路中,而基于分布参数模型的方法目前只适用于同塔全线平行线路。

发明内容

[0005] 本发明解决了现有技术所存在的因采用集中参数模型难以克服分布效应而无法运用于长距离输电线路的弊端,也避免了现有的分布参数模型只能运用于同塔全线平行线路的限制;提供了一种双回非全线平行输电线路零序参数测量;可同时测量多个零序参数。

[0006] 本发明的技术方案为一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法,其特征在于,包括以下步骤

[0007] 步骤1:定义第一输电线路各部分长度、第二输电线路各部分长度,所述的第一输电线路、第二输电线路为非全线平行输电线路;

[0008] 步骤2,定义第一停电测量方式、第二停电测量方式、第三停电测量方式、第四停电测量方式,定义第一带电测量方式、第二带电测量方式、第三带电测量方式、第四带电测量方式;

[0009] 步骤3,人工选择第一停电测量方式至第四停电测量方式或第一带电测量方式至第四带电测量方式作为第一零序测量方式至第四零序测量方式,利用基于GPS的同步相量测量装置,同步测量得到不同零序测量方式下零序分量;

[0010] 步骤4,对不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量,根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵,根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗,根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳,根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第

二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳,计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容,计算第一特征中间变量至第四特征中间变量,计算第一元素中间变量至第四元素中间变量,结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根,结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量,根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征根计算阻抗矩阵,根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵,根据阻抗矩阵以及导纳矩阵,计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳,实现零序参数测量;

[0011] 作为优选,步骤1所述定义第一输电线路为:

[0012] 第一输电线路首端至第一输电线路的耦合部分首端的长度为 l_1 ;

[0013] 第一输电线路的耦合部分末端至第一输电线路末端的长度为 l_4 ;

[0014] 第一输电线路的耦合部分首端至第一输电线路的耦合部分末端即第一输电线路耦合部分的长度为 l_3 ;

[0015] 第一输电线路首端至第一输电线路末端即第一输电线路的长度为 $l_1+l_3+l_4$,

[0016] 步骤1所述定义第二输电线路为:

[0017] 第二输电线路首端至第二输电线路的耦合部分首端的长度为 l_2 ;

[0018] 第二输电线路的耦合部分末端至第二输电线路末端的长度为 l_5 ;

[0019] 第二输电线路的耦合部分首端至第二输电线路的耦合部分末端即第二输电线路耦合部分为 l_3 ;

[0020] 第二输电线路首端至第二输电线路末端即第二输电线路的长度为 $l_2+l_3+l_5$;

[0021] 所述耦合部分为第一输电线路与第二输电线路耦合的部分;

[0022] 作为优选,步骤2所述第一停电测量方式为:

[0023] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路首端悬空,末端接地;

[0024] 步骤2所述第二停电测量方式为:

[0025] 第一输电线路首端悬空,末端接地;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;

[0026] 步骤2所述第三停电测量方式为:

[0027] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路首端接地,末端接地;

[0028] 步骤2所述第四停电测量方式为:

[0029] 第一输电线路首端接地,末端接地;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;

[0030] 步骤2所述第一带电测量方式为:

[0031] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路正常带电运行;

[0032] 步骤2所述第二带电测量方式为:

[0033] 第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;

[0034] 步骤2所述第三带电测量方式为:

[0035] 第一输电线路首端加单相电源,末端悬空;第二输电线路正常带电运行;

[0036] 步骤2所述第四带电测量方式为:

[0037] 第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端悬空;

- [0038] 所述悬空表示三相短接并开路；
- [0039] 作为优选，步骤3所述不同零序测量方式下零序分量包括：
- [0040] 不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压与零序电流。
- [0041] 所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压为：
- [0042] $U_{k,1,s}, k \in [1, 4]$
- [0043] 其中， $U_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压；
- [0044] 所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流为：
- [0045] $I_{k,1,s}, k \in [1, 4]$
- [0046] 其中， $I_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流；
- [0047] 所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压为：
- [0048] $U_{k,2,s}, k \in [1, 4]$
- [0049] 其中， $U_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压；
- [0050] 所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流为：
- [0051] $I_{k,2,s}, k \in [1, 4]$
- [0052] 其中， $I_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流；
- [0053] 所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压为：
- [0054] $U_{k,1,m}, k \in [1, 4]$
- [0055] 其中， $U_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压；
- [0056] 所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流为：
- [0057] $I_{k,1,m}, k \in [1, 4]$
- [0058] 其中， $I_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流；
- [0059] 所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压为：
- [0060] $U_{k,2,m}, k \in [1, 4]$
- [0061] 其中， $U_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压；
- [0062] 所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流为：
- [0063] $I_{k,2,m}, k \in [1, 4]$
- [0064] 其中， $I_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流；
- [0065] 作为优选，步骤4所述不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量为：
- [0066] 第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压即 $U_{k,1,s}$ ，采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1s}^k$ ；
- [0067] 第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流即 $I_{k,1,s}$ ，采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1s}^k$ ；
- [0068] 第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压即 $U_{k,2,s}$ ，采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2s}^k$ ；
- [0069] 第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流即 $I_{k,2,s}$ ，采用傅里叶算法得到

第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,s}^k$;

[0070] 第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压即 $U_{k,1,m}$, 采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1,m}^k$;

[0071] 第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流即 $I_{k,1,m}$, 采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1,m}^k$;

[0072] 第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压即 $U_{k,2,m}$, 采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2,m}^k$;

[0073] 第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流即 $I_{k,2,m}$, 采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,m}^k$;

[0074] $k \in [1, 4]$;

[0075] 步骤4所述根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵为:

$$[0076] \quad \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,s}^1 & \dot{U}_{1,s}^2 & \dot{U}_{1,s}^3 & \dot{U}_{1,s}^4 \\ \dot{U}_{2,s}^1 & \dot{U}_{2,s}^2 & \dot{U}_{2,s}^3 & \dot{U}_{2,s}^4 \\ \dot{I}_{1,s}^1 & \dot{I}_{1,s}^2 & \dot{I}_{1,s}^3 & \dot{I}_{1,s}^4 \\ \dot{I}_{2,s}^1 & \dot{I}_{2,s}^2 & \dot{I}_{2,s}^3 & \dot{I}_{2,s}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,m}^1 & \dot{U}_{1,m}^2 & \dot{U}_{1,m}^3 & \dot{U}_{1,m}^4 \\ \dot{U}_{2,m}^1 & \dot{U}_{2,m}^2 & \dot{U}_{2,m}^3 & \dot{U}_{2,m}^4 \\ \dot{I}_{1,m}^1 & \dot{I}_{1,m}^2 & \dot{I}_{1,m}^3 & \dot{I}_{1,m}^4 \\ \dot{I}_{2,m}^1 & \dot{I}_{2,m}^2 & \dot{I}_{2,m}^3 & \dot{I}_{2,m}^4 \end{bmatrix}^{-1}$$

[0077] 式中, T_{mn} 表示传输矩阵第m行第n列的元素, $m \in [1, 4]$, $n \in [1, 4]$;

[0078] 步骤4所述根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗为:

$$[0079] \quad \text{令} \quad \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & 0 & a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_2) \\ \cosh(\gamma_1 l_1) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_2) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) \end{bmatrix}$$

$$[0080] \quad \text{令} \quad \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 & b_4 \\ b_5 & 0 & b_6 & 0 \\ 0 & b_7 & 0 & b_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_5) \\ \cosh(\gamma_1 l_4) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_5) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) \end{bmatrix}$$

$$[0081] \quad \text{则有} \quad \begin{cases} b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) = b_2(T_{11}a_5 - T_{31}a_1) - b_1(T_{13}a_5 - T_{33}a_1) \\ b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) = b_2(T_{21}a_7 - T_{41}a_3) - b_1(T_{23}a_7 - T_{43}a_3) \\ b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) = b_4(T_{12}a_5 - T_{32}a_1) - b_3(T_{14}a_5 - T_{34}a_1) \\ b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) = b_4(T_{22}a_7 - T_{42}a_3) - b_3(T_{24}a_7 - T_{44}a_3) \end{cases}$$

[0082] 式中, γ_1 表示第一输电线路单回部分的传播系数, Z_{c1} 表示第一输电线路单回部分的特性阻抗, γ_2 表示第二输电线路单回部分的传播系数, Z_{c2} 表示第二输电线路单回部分的特性阻抗, l_1 为第一输电线路首端至第一输电线路耦合部分首端的长度, l_4 为第一输电线路耦合部分末端至第一输电线路末端的长度, l_2 为第二输电线路首端至第二输电线路耦合部分首端的长度, l_5 为第二输电线路耦合部分末端至第二输电线路末端的长度, a_i 表示首端第i变量, b_c 表示末端第c变量, $i \in [1, 8]$, $c \in [1, 8]$;

[0083] 步骤4所述根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳, 根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特

性阻抗计算第二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳为:

$$[0084] \quad \begin{cases} Z_1 = \gamma_1 Z_{c1} \\ Y_1 = \gamma_1 / Z_{c1} \end{cases}$$

$$[0085] \quad \begin{cases} Z_2 = \gamma_2 Z_{c2} \\ Y_2 = \gamma_2 / Z_{c2} \end{cases}$$

[0086] 其中, Z_1 表示第一输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_1 表示第一输电线路单回部分的零序自导纳, Z_2 表示第二输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_2 表示第二输电线路单回部分的零序自导纳;

[0087] 步骤4所述计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容为:

$$[0088] \quad \begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \\ Y_1 = j\omega C_1 \end{cases}$$

$$[0089] \quad \begin{cases} Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \\ Y_2 = j\omega C_2 \end{cases}$$

[0090] 其中, R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻, L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感, C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容, R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻, L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感, C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容;

[0091] 步骤4所述计算第一特征中间变量至第四特征中间变量, 计算第一元素中间变量至第四元素中间变量为:

$$[0092] \quad \begin{cases} \sigma_1 = b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) \\ \sigma_2 = b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) \\ \sigma_3 = b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) \\ \sigma_4 = b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) \end{cases}$$

[0093] 式中, σ_u 表示第 u 特征中间变量, $u \in [1, 4]$;

$$[0094] \quad \begin{cases} \varphi_1 = b_1(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) - b_2(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) \\ \varphi_2 = b_3(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) - b_4(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) \\ \varphi_3 = b_1(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) - b_2(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) \\ \varphi_4 = b_3(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) - b_4(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) \end{cases}$$

[0095] 式中, φ_v 表示第 v 元素中间变量, $v \in [1, 4]$;

[0096] 步骤4所述结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根为:

$$[0097] \quad \begin{cases} ch(r_1 l_3) + ch(r_2 l_3) = \sigma_1 + \sigma_4 \\ ch(r_1 l_3) - ch(r_2 l_3) = -\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_4)^2 + 4\sigma_2\sigma_3} \end{cases}$$

[0098] 其中, l_3 表示第一输电线路耦合部分的长度, r_1 表示第一特征根, r_2 表示第二特征根;

[0099] 步骤4所述结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量为:

$$[0100] \quad \begin{cases} P_1 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_4(r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_2 = \frac{\sigma_2(r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_3 = \frac{\sigma_3(r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_4 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_1(r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \end{cases}$$

[0101] 式中, P_d ($d=1, 2, 3, 4$) 表示第 d 矩阵中间变量;

[0102] 步骤4所述根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征计算阻抗矩阵为:

$$[0103] \quad \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} (r_1^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_1^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_1^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_1^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix} - B_2 \begin{bmatrix} (r_2^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_2^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_2^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_2^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix}$$

$$[0104] \quad Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}$$

[0105] 其中, $A_1 = \frac{\cosh(r_1 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第一替换中间变量, $A_2 = \frac{\cosh(r_2 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第二替换中间变量,

$B_1 = \frac{\sinh(r_1 l_3)}{r_1(r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第三替换中间变量, $B_2 = \frac{\sinh(r_2 l_3)}{r_2(r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第四替换中间变量;

[0106] 式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗。

[0107] 步骤4所述根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵为:

$$[0108] \quad Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \end{bmatrix}$$

[0109] 其中, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳。

[0110] 步骤4所述根据阻抗矩阵以及导纳矩阵, 计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳为:

$$[0111] \quad Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_a & R_m + j\omega L_m \\ R_m + j\omega L_m & R_b + j\omega L_b \end{bmatrix}$$

$$[0112] \quad Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C_a & j\omega C_m \\ j\omega C_m & j\omega C_b \end{bmatrix}$$

[0113] 式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳, 其中, $\omega = 2\pi$

f , f 为电力系统频率50Hz;

[0114] 步骤4所述零序参数为:

[0115] $R_1, L_1, C_1, R_2, L_2, C_2, R_a, L_a, C_a, R_b, L_b, C_b, R_m, L_m, C_m$;

[0116] 其中, R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻, L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感, C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容;

[0117] R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻, L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感, C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容;

[0118] R_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电阻, L_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电感, C_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电容;

[0119] R_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电阻, L_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电感, C_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电容;

[0120] R_m 表示耦合部分的零序互电阻, L_m 表示耦合部分的零序互电感, C_m 表示耦合部分的零序互电容。

[0121] 本发明具有的优点:

[0122] 适用于任意线路长度、任意电压等级的双回非全线平行线路;

[0123] 本发明方法测量利用GPS技术解决了异地信号测量测量的同时性问题;

[0124] 可一次性测出零序电阻、零序电感、零序电容多个零序参数,且测量精度不低于仅测量其中一种零序参数的测量方法。

附图说明

[0125] 图1:为双回线路部分耦合四端口网络模型图。

[0126] 图2:为双回非全线平行线路仿真模型图。

[0127] 图3:为本发明方法和传统方法的测量误差对比图。

[0128] 图4:为本发明方法流程图。

具体实施方式

[0129] 为了便于本领域普通技术人员理解和实施本发明,下面结合附图及实施例对本发明作进一步的详细描述,应当理解,此处所描述的实施例仅用于说明和解释本发明,并不用于限定本发明。

[0130] 下面结合图1至图4介绍本发明的具体实施方式为一种双回非全线平行输电线路零序参数精确测量方法,包括以下步骤:

[0131] 步骤1:定义第一输电线路各部分长度、第二输电线路各部分长度,所述的第一输电线路、第二输电线路为非全线平行输电线路;

[0132] 所述的第一输电线路、第二输电线路如图1所示;

[0133] 步骤1所述定义第一输电线路为:

[0134] 第一输电线路首端至第一输电线路的耦合部分首端的长度为 l_1 ;

[0135] 第一输电线路的耦合部分末端至第一输电线路末端的长度为 l_4 ;

[0136] 第一输电线路的耦合部分首端至第一输电线路的耦合部分末端即第一输电线路耦合部分的长度为 l_3 ;

- [0137] 第一输电线路首端至第一输电线路末端即第一输电线路的长度为 $l_1+l_3+l_4$;
- [0138] 步骤1所述定义第二输电线路为:
- [0139] 第二输电线路首端至第二输电线路的耦合部分首端的长度为 l_2 ;
- [0140] 第二输电线路的耦合部分末端至第二输电线路末端的长度为 l_5 ;
- [0141] 第二输电线路的耦合部分首端至第二输电线路的耦合部分末端即第二输电线路耦合部分为 l_3 ;
- [0142] 第二输电线路首端至第二输电线路末端即第二输电线路的长度为 $l_2+l_3+l_5$;
- [0143] 所述耦合部分为第一输电线路与第二输电线路耦合的部分;
- [0144] 步骤2,定义第一停电测量方式、第二停电测量方式、第三停电测量方式、第四停电测量方式,定义第一带电测量方式、第二带电测量方式、第三带电测量方式、第四带电测量方式;
- [0145] 步骤2所述第一停电测量方式为:
- [0146] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路首端悬空,末端接地;
- [0147] 步骤2所述第二停电测量方式为:
- [0148] 第一输电线路首端悬空,末端接地;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;
- [0149] 步骤2所述第三停电测量方式为:
- [0150] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路首端接地,末端接地;
- [0151] 步骤2所述第四停电测量方式为:
- [0152] 第一输电线路首端接地,末端接地;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;
- [0153] 步骤2所述第一带电测量方式为:
- [0154] 第一输电线路首端加单相电源,末端接地;第二输电线路正常带电运行;
- [0155] 步骤2所述第二带电测量方式为:
- [0156] 第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端接地;
- [0157] 步骤2所述第三带电测量方式为:
- [0158] 第一输电线路首端加单相电源,末端悬空;第二输电线路正常带电运行;
- [0159] 步骤2所述第四带电测量方式为:
- [0160] 第一输电线路正常带电运行;第二输电线路首端加单相电源,末端悬空;
- [0161] 所述悬空表示三相短接并开路;
- [0162] 步骤3,人工选择第一停电测量方式至第四停电测量方式或第一带电测量方式至第四带电测量方式作为第一零序测量方式至第四零序测量方式,利用基于GPS的同步相量测量装置,同步测量得到不同零序测量方式下零序分量;
- [0163] 步骤3所述不同零序测量方式下零序分量包括:
- [0164] 不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压与零序电流、不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压与零序电流。
- [0165] 所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压为:
- [0166] $U_{k,1,s}, k \in [1, 4]$
- [0167] 其中, $U_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压;
- [0168] 所述不同零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流为:

[0169] $I_{k,1,s}, k \in [1, 4]$

[0170] 其中, $I_{k,1,s}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流;

[0171] 所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压为:

[0172] $U_{k,2,s}, k \in [1, 4]$

[0173] 其中, $U_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压;

[0174] 所述不同零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流为:

[0175] $I_{k,2,s}, k \in [1, 4]$

[0176] 其中, $I_{k,2,s}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流;

[0177] 所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压为:

[0178] $U_{k,1,m}, k \in [1, 4]$

[0179] 其中, $U_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压;

[0180] 所述不同零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流为:

[0181] $I_{k,1,m}, k \in [1, 4]$

[0182] 其中, $I_{k,1,m}$ 表示在第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流;

[0183] 所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压为:

[0184] $U_{k,2,m}, k \in [1, 4]$

[0185] 其中, $U_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压;

[0186] 所述不同零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流为:

[0187] $I_{k,2,m}, k \in [1, 4]$

[0188] 其中, $I_{k,2,m}$ 表示在第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流;

[0189] 步骤4, 对不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量, 根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵, 根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗, 根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳, 根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳, 计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容, 计算第一特征中间变量至第四特征中间变量, 计算第一元素中间变量至第四元素中间变量, 结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根, 结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量, 根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征根计算阻抗矩阵, 根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵, 根据阻抗矩阵以及导纳矩阵, 计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳, 实现零序参数测量;

[0190] 步骤4所述不同零序测量方式下零序分量依次采用傅里叶算法得到不同零序测量方式下零序基波分量为:

[0191] 第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电压即 $U_{k,1,s}$, 采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1,s}^k$;

[0192] 第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序电流即 $I_{k,1,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1,s}^k$;

[0193] 第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电压即 $U_{k,2,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2,s}^k$;

[0194] 第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序电流即 $I_{k,2,s}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路首端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,s}^k$;

[0195] 第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电压即 $U_{k,1,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{1,m}^k$;

[0196] 第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序电流即 $I_{k,1,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第一输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{1,m}^k$;

[0197] 第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电压即 $U_{k,2,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电压即 $\dot{U}_{2,m}^k$;

[0198] 第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序电流即 $I_{k,2,m}$,采用傅里叶算法得到第k零序测量方式下第二输电线路末端的零序基波电流即 $\dot{I}_{2,m}^k$;

[0199] $k \in [1, 4]$;

[0200] 步骤4所述根据不同零序测量方式计算线路传输矩阵为:

$$[0201] \quad \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,s}^1 & \dot{U}_{1,s}^2 & \dot{U}_{1,s}^3 & \dot{U}_{1,s}^4 \\ \dot{U}_{2,s}^1 & \dot{U}_{2,s}^2 & \dot{U}_{2,s}^3 & \dot{U}_{2,s}^4 \\ \dot{I}_{1,s}^1 & \dot{I}_{1,s}^2 & \dot{I}_{1,s}^3 & \dot{I}_{1,s}^4 \\ \dot{I}_{2,s}^1 & \dot{I}_{2,s}^2 & \dot{I}_{2,s}^3 & \dot{I}_{2,s}^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1,m}^1 & \dot{U}_{1,m}^2 & \dot{U}_{1,m}^3 & \dot{U}_{1,m}^4 \\ \dot{U}_{2,m}^1 & \dot{U}_{2,m}^2 & \dot{U}_{2,m}^3 & \dot{U}_{2,m}^4 \\ \dot{I}_{1,m}^1 & \dot{I}_{1,m}^2 & \dot{I}_{1,m}^3 & \dot{I}_{1,m}^4 \\ \dot{I}_{2,m}^1 & \dot{I}_{2,m}^2 & \dot{I}_{2,m}^3 & \dot{I}_{2,m}^4 \end{bmatrix}$$

[0202] 式中, T_{mn} 表示传输矩阵第m行第n列的元素, $m \in [1, 4]$, $n \in [1, 4]$;

[0203] 步骤4所述根据传输矩阵求解第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗、第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗为:

$$[0204] \quad \text{令} \quad \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & 0 & a_4 \\ a_5 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & 0 & a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_2) \\ \cosh(\gamma_1 l_1) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_1) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_2) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_2) \end{bmatrix}$$

$$[0205] \quad \text{令} \quad \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & b_3 & 0 & b_4 \\ b_5 & 0 & b_6 & 0 \\ 0 & b_7 & 0 & b_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 & Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) & 0 & Z_{c2} \sinh(\gamma_2 l_5) \\ \cosh(\gamma_1 l_4) / Z_{c1} & 0 & \cosh(\gamma_1 l_4) & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_2 l_5) / Z_{c2} & 0 & \cosh(\gamma_2 l_5) \end{bmatrix}$$

$$[0206] \quad \text{则有} \quad \begin{cases} b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) = b_2(T_{11}a_5 - T_{31}a_1) - b_1(T_{13}a_5 - T_{33}a_1) \\ b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) = b_2(T_{21}a_7 - T_{41}a_3) - b_1(T_{23}a_7 - T_{43}a_3) \\ b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) = b_4(T_{12}a_5 - T_{32}a_1) - b_3(T_{14}a_5 - T_{34}a_1) \\ b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) = b_4(T_{22}a_7 - T_{42}a_3) - b_3(T_{24}a_7 - T_{44}a_3) \end{cases}$$

[0207] 式中, γ_1 表示第一输电线路单回部分的传播系数, Z_{c1} 表示第一输电线路单回部分的特性阻抗, γ_2 表示第二输电线路单回部分的传播系数, Z_{c2} 表示第二输电线路单回部分的

特性阻抗, l_1 为第一输电线路首端至第一输电线路耦合部分首端的长度, l_4 为第一输电线路耦合部分末端至第一输电线路末端的长度, l_2 为第二输电线路首端至第二输电线路耦合部分首端的长度, l_5 为第二输电线路耦合部分末端至第二输电线路末端的长度, a_i 表示首端第 i 变量, b_c 表示末端第 c 变量, $i \in [1, 8]$, $c \in [1, 8]$;

[0208] 步骤4所述根据第一输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第一输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳, 根据第二输电线路单回部分的传播系数以及特性阻抗计算第二输电线路单回部分的零序自阻抗以及零序自导纳为:

$$[0209] \quad \begin{cases} Z_1 = \gamma_1 Z_{c1} \\ Y_1 = \gamma_1 / Z_{c1} \end{cases}$$

$$[0210] \quad \begin{cases} Z_2 = \gamma_2 Z_{c2} \\ Y_2 = \gamma_2 / Z_{c2} \end{cases}$$

[0211] 其中, Z_1 表示第一输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_1 表示第一输电线路单回部分的零序自导纳, Z_2 表示第二输电线路单回部分的零序自阻抗, Y_2 表示第二输电线路单回部分的零序自导纳;

[0212] 步骤4所述计算第一输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容以及第二输电线路单回部分的零序自电阻、零序自电感、零序自电容为:

$$[0213] \quad \begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \\ Y_1 = j\omega C_1 \end{cases}$$

$$[0214] \quad \begin{cases} Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \\ Y_2 = j\omega C_2 \end{cases}$$

[0215] 其中, R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻, L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感, C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容, R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻, L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感, C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容;

[0216] 步骤4所述计算第一特征中间变量至第四特征中间变量, 计算第一元素中间变量至第四元素中间变量为:

$$[0217] \quad \begin{cases} \sigma_1 = b_6(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) - b_5(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) \\ \sigma_2 = b_8(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) - b_7(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) \\ \sigma_3 = b_6(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) - b_5(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) \\ \sigma_4 = b_8(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) - b_7(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) \end{cases}$$

[0218] 式中, σ_u 表示第 u 特征中间变量, $u \in [1, 4]$;

$$[0219] \quad \begin{cases} \phi_1 = b_1(T_{13}a_6 - T_{33}a_2) - b_2(T_{11}a_6 - T_{31}a_2) \\ \phi_2 = b_3(T_{14}a_6 - T_{34}a_2) - b_4(T_{12}a_6 - T_{32}a_2) \\ \phi_3 = b_1(T_{23}a_8 - T_{43}a_4) - b_2(T_{21}a_8 - T_{41}a_4) \\ \phi_4 = b_3(T_{24}a_8 - T_{44}a_4) - b_4(T_{22}a_8 - T_{42}a_4) \end{cases}$$

[0220] 式中, ϕ_v 表示第 v 元素中间变量, $v \in [1, 4]$;

[0221] 步骤4所述结合第一特征中间变量至第四特征中间变量计算第一特征根、第二特征根为:

$$[0222] \quad \begin{cases} ch(r_1 l_3) + ch(r_2 l_3) = \sigma_1 + \sigma_4 \\ ch(r_1 l_3) - ch(r_2 l_3) = -\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_4)^2 + 4\sigma_2 \sigma_3} \end{cases}$$

[0223] 其中, l_3 表示第一输电线路耦合部分的长度, r_1 表示第一特征根, r_2 表示第二特征根;

[0224] 步骤4所述结合第一特征根、第二特征根计算第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量为:

$$[0225] \quad \begin{cases} P_1 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_4 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_2 = \frac{\sigma_2 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_3 = \frac{\sigma_3 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \\ P_4 = \frac{r_1^2 \cosh(r_1 l_3) - r_2^2 \cosh(r_2 l_3) - \sigma_1 (r_1^2 - r_2^2)}{\cosh(r_1 l_3) - \cosh(r_2 l_3)} \end{cases}$$

[0226] 式中, P_d ($d=1, 2, 3, 4$) 表示第d矩阵中间变量;

[0227] 步骤4所述根据第一元素中间变量至第四元素中间变量、第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量、第一特征根、第二特征计算阻抗矩阵为:

$$[0228] \quad \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = B_1 \begin{bmatrix} (r_1^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_1^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_1^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_1^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix} - B_2 \begin{bmatrix} (r_2^2 - P_4)Z_a + P_2 Z_m \\ (r_2^2 - P_4)Z_m + P_2 Z_b \\ (r_2^2 - P_1)Z_m + P_3 Z_a \\ (r_2^2 - P_1)Z_b + P_3 Z_m \end{bmatrix}$$

$$[0229] \quad Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}$$

[0230] 其中, $A_1 = \frac{\cosh(r_1 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第一替换中间变量, $A_2 = \frac{\cosh(r_2 l_3)}{r_1^2 - r_2^2}$ 表示第二替换中间变量,

$B_1 = \frac{\sinh(r_1 l_3)}{r_1 (r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第三替换中间变量, $B_2 = \frac{\sinh(r_2 l_3)}{r_2 (r_1^2 - r_2^2)}$ 表示第四替换中间变量;

[0231] 式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗。

[0232] 步骤4所述根据阻抗矩阵以及第一矩阵中间变量至第四矩阵中间变量计算导纳矩阵为:

$$[0233] \quad Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \end{bmatrix}$$

[0234] 其中, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳。

[0235] 步骤4所述根据阻抗矩阵以及导纳矩阵, 计算得到第一输电线路耦合部分的零序自阻抗、第一输电线路耦合部分的零序自导纳、第二输电线路耦合部分的零序自阻抗、第二输电线路耦合部分的零序自导纳、耦合部分的零序互阻抗、耦合部分的零序互导纳为:

$$[0236] \quad Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_a & R_m + j\omega L_m \\ R_m + j\omega L_m & R_b + j\omega L_b \end{bmatrix}$$

$$[0237] \quad Y = \begin{bmatrix} Y_a & Y_m \\ Y_m & Y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega C_a & j\omega C_m \\ j\omega C_m & j\omega C_b \end{bmatrix}$$

[0238] 式中, Z_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自阻抗, Y_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自导纳, Z_m 表示耦合部分的零序互阻抗, Y_m 表示耦合部分的零序互导纳, 其中, $\omega = 2\pi f$, f 为电力系统频率 50Hz;

[0239] 步骤4所述零序参数为:

[0240] $R_1, L_1, C_1, R_2, L_2, C_2, R_a, L_a, C_a, R_b, L_b, C_b, R_m, L_m, C_m$;

[0241] 其中, R_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电阻, L_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电感, C_1 表示第一输电线路单回部分的零序自电容;

[0242] R_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电阻, L_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电感, C_2 表示第二输电线路单回部分的零序自电容;

[0243] R_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电阻, L_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电感, C_a 表示第一输电线路耦合部分的零序自电容;

[0244] R_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电阻, L_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电感, C_b 表示第二输电线路耦合部分的零序自电容;

[0245] R_m 表示耦合部分的零序互电阻, L_m 表示耦合部分的零序互电感, C_m 表示耦合部分的零序互电容。

[0246] 设置参数 $l_1 = 100\text{km}$, $l_2 = 200\text{km}$, $l_4 = 400\text{km}$, $l_5 = 500\text{km}$ 。用本发明技术方案对双回非全线平行输电线路耦合部分长度 l_3 从 300km 到 600km 变化时进行仿真。根据附图1所示的双回线路部分耦合四端口网络模型, 在PSCAD中建立仿真模型, 如附图2所示。输电线路单位长度的理论值如表1所示。

[0247] 表1零序参数理论值

[0248]

零序参数	线路 1 单回	线路 2 单回	双回耦合部分		
零序电阻/ (Ω/km)	R_1 0.1576	R_2 0.2073	R_a 0.1828	R_m 0.1779	R_b 0.1870
零序电感/ (mH/km)	L_1 2.6365	L_2 3.2879	L_a 2.5608	L_m 1.7217	L_b 2.6509
零序电容/ (nF/km)	C_1 7.5074	C_2 7.0072	C_a 8.5287	C_m -2.4951	C_b 7.9445

[0249] 本发明测量方法得到的测量结果如表2、表3、表4所示。

[0250] 表2本发明方法的零序电阻测量结果

线路长度 l_3/km		300	400	500	600	
[0251]	R_1	测量值/ (Ω/km)	0.1571	0.1574	0.1585	0.1566
		相对误差/%	0.3245	0.1225	0.5988	0.6086
	R_2	测量值/ (Ω/km)	0.2053	0.2047	0.2043	0.2055
		相对误差/%	0.7810	0.4931	0.2939	0.8922
	R_a	测量值/ (Ω/km)	0.1837	0.1827	0.1819	0.1841
		相对误差/%	0.5058	0.0724	0.4822	0.6868
	R_m	测量值/ (Ω/km)	0.1782	0.1778	0.1779	0.1784
		相对误差/%	0.1893	0.0631	0.0276	0.3000
	R_b	测量值/ (Ω/km)	0.1869	0.1873	0.1886	0.1871
		相对误差/%	0.0473	0.1786	0.8412	0.0631

[0252] 表3本发明方法的零序电感测量结果

线路长度 l_3/km		300	400	500	600	
[0253]	L_1	测量值/(mH/km)	2.6360	2.6477	2.6308	2.6370
		相对误差/%	0.0203	0.4248	0.2141	0.0182
	L_2	测量值/(mH/km)	3.2896	3.2745	3.2934	3.2864
		相对误差/%	0.0512	0.4074	0.1671	0.0446
	L_a	测量值/(mH/km)	2.5611	2.5468	2.5671	2.5599
		相对误差/%	0.0106	0.5484	0.2456	0.0354
	L_m	测量值/(mH/km)	1.7223	1.7223	1.7229	1.7222
		相对误差/%	0.0296	0.0326	0.0645	0.0257
	L_b	测量值/(mH/km)	2.6486	2.6761	2.6425	2.6544
		相对误差/%	0.0889	0.9509	0.3188	0.1294

[0254] 表4本发明方法的零序电容测量结果。

线路长度 l_3/km		300	400	500	600
C_1	测量值/(nF/km)	7.5062	7.5415	7.4934	7.5067
	相对误差/%	0.0162	0.4534	0.1864	0.0103
C_2	测量值/(nF/km)	7.0080	6.9684	7.0223	6.9972
	相对误差/%	0.0128	0.5533	0.2159	0.1418
[0255] C_a	测量值/(nF/km)	8.5535	8.4861	8.5476	8.5301
	相对误差/%	0.2914	0.5000	0.2215	0.0161
C_m	测量值/(nF/km)	-2.5074	-2.4909	-2.4950	-2.5007
	相对误差/%	0.4945	0.1680	0.0040	0.2227
C_b	测量值/(nF/km)	7.9437	7.9966	7.9248	7.9551
	相对误差/%	0.0094	0.6562	0.2428	0.1340

[0256] 表5传统方法得到的测量结果

线路长度 l_3/km		300	400	500	600
R_a	测量值/ (Ω/km)	0.2209	0.2568	0.3154	0.4144
	相对误差/%	20.8223	40.4546	72.5595	126.6695
R_m	测量值/ (Ω/km)	0.1420	0.1626	0.1947	0.2482
	相对误差/%	20.1911	8.5740	9.4424	39.5483
R_b	测量值/ (Ω/km)	0.2387	0.2753	0.3365	0.4407
	相对误差/%	27.6607	47.2354	79.9709	135.6777
L_a	测量值/ (mH/km)	2.8300	3.0122	3.2773	3.6489
	相对误差/%	10.5133	17.6277	27.9796	42.4889
[0257] L_m	测量值/ (mH/km)	1.3943	1.4895	1.6235	1.8079
	相对误差/%	19.0204	13.4889	5.7082	5.0038
L_b	测量值/ (mH/km)	3.0766	3.2473	3.5134	3.8963
	相对误差/%	16.0578	22.4961	32.5343	46.9803
C_a	测量值/ (nF/km)	8.6063	9.1705	10.0070	11.2240
	相对误差/%	0.9103	7.5257	17.3329	31.602
C_m	测量值/ (nF/km)	-2.5161	-2.4482	-2.2950	-2.01826
	相对误差/%	0.8408	1.8804	8.0205	19.1131
C_b	测量值/ (nF/km)	8.0552	8.5973	9.3933	10.5430
	相对误差/%	1.3936	8.2176	18.2364	32.7090

[0258] 传统方法得到的测量结果如表5所示。

[0259] 分别取零序电阻、零序电感及零序电容的测量相对误差的最大值,绘制成三维图,得到附图3。

[0260] 结合表2、表3、表4、表5及附图3可知,传统方法是基于集中参数模型的,且认为线路参数沿线均匀分布,其对线路长度变化的适应性很差,具体表现在随着线路长度的增大,零序参数的测量误差大幅增大。集中参数模型将线路看作线性元件,认为模型中的变量与空间位置无关,此种模型在长距离输电线路中无法克服线路分布效应的影响,其对零序电阻的测量尤为明显,在线路长为600km时,误差超过120%。

[0261] 本发明方法建立了线路的分布参数模型,充分考虑了线路参数分布性的特征,其对长距离线路长度的变化具有很好的适应性,具体表现在随着线路长度的变化,算法的精度始终保持在很小的范围内。其中单回部分的零序电阻测量误差小于1%,零序电感测量误差小于0.5%,零序电容测量误差小于0.6%;耦合部分的零序电阻测量误差小于1%,零序电感测量误差小于1%,零序电容测量误差小于0.7%。本发明方法的测量误差在工程允许

的范围内。

[0262] 本文中所描述的具体实施例仅仅是对本发明精神作举例说明。本发明所属领域的技术人员可以对所描述的具体实施例做各种各样的修改或补充或采用类似的方法替代。但不会偏离本发明方法的精神或者超越所附权利要求书所定义的范围。

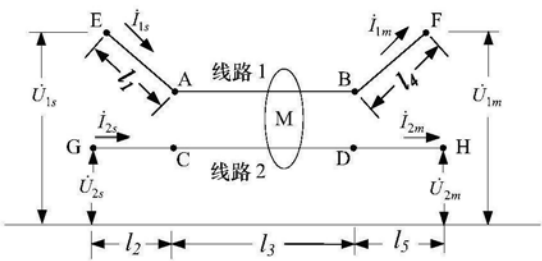


图1

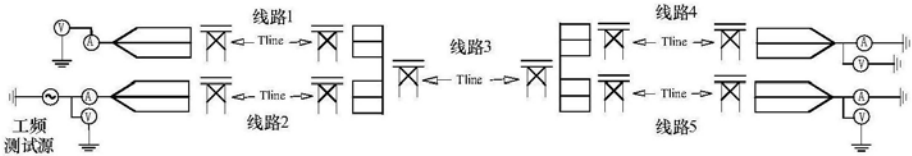


图2

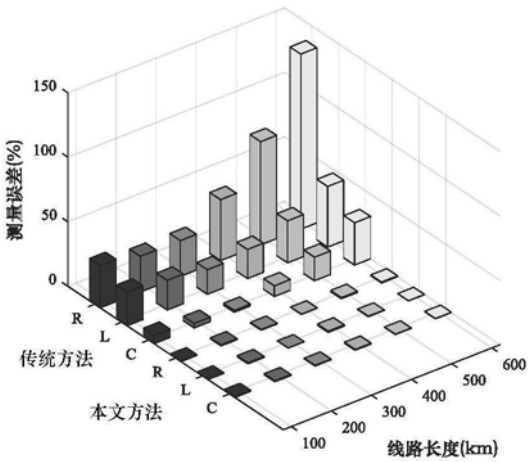


图3

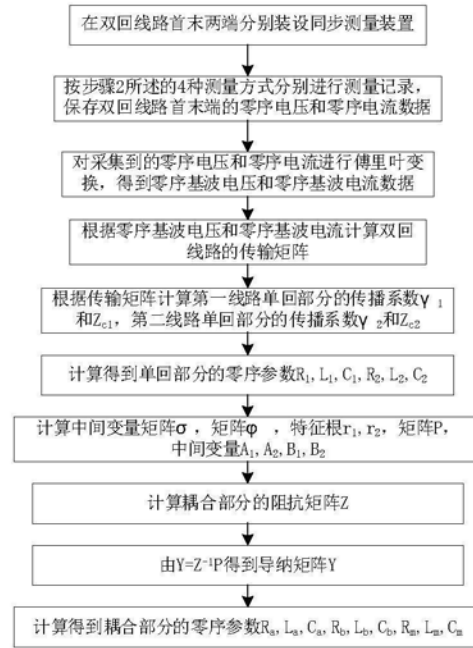


图4