



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105823929 B

(45)授权公告日 2018.08.21

(21)申请号 201610402803.9

审查员 李龙

(22)申请日 2016.06.08

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105823929 A

(43)申请公布日 2016.08.03

(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 倪识远

(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 赵丽影

(51)Int.Cl.

G01R 27/08(2006.01)

G01R 27/26(2006.01)

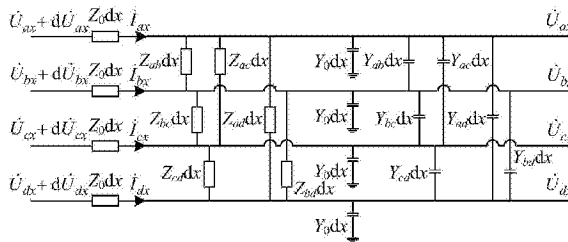
权利要求书3页 说明书11页 附图3页

(54)发明名称

基于双端异步数据的长距离同塔四回输电
线路零序参数精确测量方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于双端异步数据的长
距离同塔四回输电线路零序参数的精确测量
方法。基于同塔四回线路的分布参数模型,得到相
对应的传输线方程;通过本发明给出的测量方式
测量四回输电线路首末两端的稳态零序电压和
稳态零序电流,利用本发明提供的计算方法得到
长距离同塔四回输电线路的零序电阻、零序电
感、零序电容参数。本发明方法基于分布参数模
型,因此特别适合于长距离输电线路,同时本发
明提供的计算方法能在两端电压电流不同步的
情况下,实现线路零序参数的精确测量。



1. 一种基于双端异步数据的长距离同塔四回输电线路零序参数精确测量方法, 所述同塔四回输电线路为线路a、线路b、线路c和线路d, 其特征在于, 包括以下步骤:

步骤1, 线路采用停电或带电方式进行测量;

若线路采用停电方式, 线路接线方式如下:

线路a首端三相短接施加单相电源, 末端三相短接接地; 线路b首端三相短接悬空, 末端三相短接接地; 线路c首端三相短接悬空, 末端三相短接接地; 线路d首端三相短接悬空, 末端三相短接接地;

若线路采用带电方式, 则跳开四回线路中任意一回的任意一相, 0.5-1秒后利用重合闸合上开关, 恢复线路供电, 通过人为制造故障, 注入零序电流;

步骤2, 测量线路a、线路b、线路c和线路d首端和末端的零序电压数据和零序电流数据;

步骤3, 对步骤2所得的零序电压测量数据和零序电流测量数据, 采用傅立叶算法得到该独立测量方式下首端和末端的零序基波电压相量和零序基波电流相量, 再利用这些相量数据将同塔四回输电线路的零序参数求解出来;

所需求解的参数包括零序自阻抗参数 Z_0 , 零序互阻抗参数 Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ad} , 零序自电纳参数 Y_0 , 零序互电纳参数 Y_{ab} 、 Y_{ac} 、 Y_{ad} ; 根据以下两式求解出所有的零序参数:

$$\begin{cases} Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \\ Z_{ab} = R_{ab} + j\omega L_{ab} \\ Z_{ac} = R_{ac} + j\omega L_{ac} \\ Z_{ad} = R_{ad} + j\omega L_{ad} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_0 = j\omega C_0 \\ Y_{ab} = j\omega C_{ab} \\ Y_{ac} = j\omega C_{ac} \\ Y_{ad} = j\omega C_{ad} \end{cases};$$

同塔四回线路定义为平行架设且长度同为1, 定义a、b、c、d四回输电线路首端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a1} 、 \dot{U}_{b1} 、 \dot{U}_{c1} 、 \dot{U}_{d1} , 末端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a2} 、 \dot{U}_{b2} 、 \dot{U}_{c2} 、 \dot{U}_{d2} , 首端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a1} 、 \dot{I}_{b1} 、 \dot{I}_{c1} 、 \dot{I}_{d1} , 末端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a2} 、 \dot{I}_{b2} 、 \dot{I}_{c2} 、 \dot{I}_{d2} ;

所述步骤3中的零序参数求解过程如下:

步骤3.1, 引入同步角, 将双端不同步测量数据转换为双端同步数据;

计算同步角, 将双端不同步测量数据转换为双端同步数据;

按照下式计算首末端的电压电流数据;

$$\dot{f}(0) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(0) \\ \dot{f}_2(0) \\ \dot{f}_3(0) \\ \dot{f}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{g}}(0) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(0) \\ \dot{g}_2(0) \\ \dot{g}_3(0) \\ \dot{g}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{f}}(l) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(l) \\ \dot{f}_2(l) \\ \dot{f}_3(l) \\ \dot{f}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{g}}(l) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(l) \\ \dot{g}_2(l) \\ \dot{g}_3(l) \\ \dot{g}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \end{bmatrix}$$

使用欧拉公式对上述相量进行变换

$$\dot{f}_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \alpha_{si} + j \sin \alpha_{si})$$

$$\dot{f}_i(0) = f_i(0) \cdot (\cos \alpha_{ri} + j \sin \alpha_{ri})$$

$$\dot{g}_i(l) = g_i(l) \cdot (\cos \beta_{si} + j \sin \beta_{si})$$

$$\dot{g}_i(0) = g_i(0) \cdot (\cos \beta_{ri} + j \sin \beta_{ri})$$

其中, $f_i(l)$ 、 $f_i(0)$ 、 $g_i(l)$ 、 $g_i(0)$ 和 α_{si} 、 α_{ri} 、 β_{si} 、 β_{ri} 分别表示对应相量的幅值和相位;

以末端电压电流数据的相位作为参考, 由于计算参数时使用的是稳态状态下的数据, 所以首端数据的幅值保持不变, 并且二者的相位差 φ_{si} 不变; 有:

$$\varphi_{si} = \alpha_{si} - \beta_{si}$$

设同步角为 θ_{si} , 根据以下公式计算同步角 θ_{si} :

$$[g_i(l) \cdot \cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \cos \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \cos \theta_{si} + f_i(0) \cdot \cos \alpha_{ri}) \\ + [g_i(l) \cdot \sin(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \sin \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \sin \theta_{si} + f_i(0) \cdot \sin \alpha_{ri}) = 0$$

使用欧拉公式, 将首端同步相量 $f'_i(l)$ 、 $g'_i(l)$ 写为如下形式:

$$\begin{cases} f'_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \theta_{si} + j \sin \theta_{si}) \\ g'_i(l) = g_i(l) \cdot [\cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) + j \sin(\theta_{si} - \varphi_{si})] \end{cases}$$

步骤3.2按照下式计算四组传播系数:

$$\gamma_i = \frac{1}{l} \operatorname{arch} \frac{f_i(0)g_i(0) + f'_i(l)g'_i(l)}{f'_i(l)g_i(0) + f_i(0)g'_i(l)}$$

步骤3.3将传播系数代入下式计算波阻抗:

$$Z_{ci} = \frac{f'_i(l) - f_i(0)ch\gamma_i l}{g_i(0)sh\gamma_i l}$$

步骤3.4根据四组传播系数和波阻抗计算转换零序参数:

$$\begin{cases} Z_i = \gamma_i Z_{ci} \\ Y_i = \gamma_i / Z_{ci} \end{cases}$$

步骤3.5根据下式求解零序参数,并转换为对应的电阻电感电容参数求解零序参数;

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_{ab} \\ Z_{ac} \\ Z_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_0 \\ -Y_{ab} \\ -Y_{ac} \\ -Y_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix}$$

其中,符号 $\omega = 2\pi f$, f 为电力系统频率50Hz, l 表示线路长度,上述公式中的 $i=1,2,3,4$ 。

基于双端异步数据的长距离同塔四回输电线路零序参数精确测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种零序参数精确测量方法,尤其是涉及一种基于双端异步数据的长距离同塔四回输电线路零序参数精确测量方法。

背景技术

[0002] 输电线路参数对于电力系统有着极其重要的应用,线路参数是距离保护,过电流保护以及差动保护等多种保护的基础数据,用于继电保护装置的整定。同时,线路参数还可用于分析电力系统潮流和网损。线路参数获取精确与否,直接关系到电力系统的稳定运行。

[0003] 输电线路参数可以通过分析塔形结构,导线材料等计算获得。我国在长期的线路运行经验之中,总结出了一些经验公式,用以估计线路参数。但是,就零序参数而言,目前所有相关的电力规程均要求对其进行实测,零序参数的重要性不言而喻。需要零序参数实测不仅有以上的主观原因,还存在大量的客观原因。其中,零序参数受外界环境因素影响很大是非常重要的客观原因,由于各个地区的气候,海拔,土壤电阻率,风速等环境不同,所以即使使用相同的导线材料,零序参数也互不相同,这是由于零序电流在大地中的等值深度不同,所以现今迫切需要一种零序参数的精确测量方法。

[0004] 随着我国大力推进西电东送工程,以及日益增长的负荷需求。长距离,大容量的电能输送成为一种非常重要的方式。对此我国发展了超特高压输电技术,并且针对东部沿海等经济发达地区,由于土地资源稀缺,使得输电走廊不足的矛盾日益凸显。研究表明,多回线路同杆架设有利于节约建设成本,缓解走廊不足的矛盾。因此,在我过许多地区使用了同塔四回的线路架设方式。但是由于同塔四回线路耦合参数众多,电磁场情况复杂,给线路参数的准确测量带来了极大的困难。

[0005] 目前同塔四回输电线路零序参数测量的研究已经取得了一些成果,但是大部分成果主要应用于短距离输电线路,例如干扰法、增量法、异频法等。短距离输电线路的特点在于可以忽略分布电容的影响,因此对于分布效应显著的长距离输电线路,使用上述方法测量线路参数,会导致测量误差非常大,无法满足实际工程测量需求。目前对于分布参数的测量多数采用双端同步测量方法。由于需要同步测量,因此该方法在应用上有很大限制。而本发明方法可以在两端电压电流数据异步的状态下精确测量线路参数。

发明内容

[0006] 本发明主要是解决现有技术所存在的由于采用集中参数忽略分布电容而无法用于长距离(300km及以上)输电线路参数测量的弊端,提供了一种不仅适合短距离四回线路零序参数的测量,也适用于长距离输电线路零序参数测量;解决了异地信号测量的数据不同步问题;可一次性测量出零序电阻、零序电感、零序电容参数。

[0007] 本发明的上述技术问题主要是通过下述技术方案得以解决的:

[0008] 一种基于双端异步数据的长距离同塔四回输电线路零序参数精确测量方法,定义

同塔四回输电线路由线路a、线路b、线路c和线路d组成。测量步骤包括：

[0009] 步骤1,线路可采用停电或带电方式进行测量。

[0010] 若线路采用停电方式,线路接线方式如下：

[0011] 线路a首端三相短接施加单相电源,末端三相短接接地；线路b首端三相短接悬空,末端三相短接接地；线路c首端三相短接悬空,末端三相短接接地；线路d首端三相短接悬空,末端三相短接接地。

[0012] 若线路采用带电方式,则跳开四回线路中任意一回的任意一相,0.5-1秒后利用重合闸合上开关,恢复线路供电,通过人为制造故障,注入零序电流。

[0013] 步骤2,测量线路a、线路b、线路c和线路d首端和末端的零序电压数据和零序电流数据；

[0014] 步骤3,对步骤2所得的零序电压测量数据和零序电流测量数据,采用对称分量法和傅立叶算法得到该独立测量方式下首端和末端的零序基波电压相量和零序基波电流相量,再利用这些相量数据将同塔四回输电线路的零序参数求解出来；

[0015] 所需求解的参数包括零序自阻抗参数 Z_0 ,零序互阻抗参数 Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ad} ,零序自电纳参数 Y_0 ,零序互电纳参数 Y_{ab} 、 Y_{ac} 、 Y_{ad} ,然后根据以下两式求解出所有的零序参数：

$$[0016] \quad \begin{cases} Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \\ Z_{ab} = R_{ab} + j\omega L_{ab} \\ Z_{ac} = R_{ac} + j\omega L_{ac} \\ Z_{ad} = R_{ad} + j\omega L_{ad} \end{cases} \quad (1)$$

$$[0017] \quad \begin{cases} Y_0 = j\omega C_0 \\ Y_{ab} = j\omega C_{ab} \\ Y_{ac} = j\omega C_{ac} \\ Y_{ad} = j\omega C_{ad} \end{cases} \quad (2)$$

[0018] 式(1)和式(2)中, $R_0, R_{ab}, R_{ac}, R_{ad}$ 分别表示对应电阻参数； $L_0, L_{ab}, L_{ac}, L_{ad}$ 分别表示对应电感参数； $C_0, C_{ab}, C_{ac}, C_{ad}$ 分别表示对应电容参数；

[0019] 其中,因为线路的泄漏电流很小,所以不考虑电导参数。

[0020] 同塔四回线路定义为平行架设且长度同为1,定义a、b、c、d四回输电线路首端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a1} 、 \dot{U}_{b1} 、 \dot{U}_{c1} 、 \dot{U}_{d1} ,末端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a2} 、 \dot{U}_{b2} 、 \dot{U}_{c2} 、 \dot{U}_{d2} ,首端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a1} 、 \dot{I}_{b1} 、 \dot{I}_{c1} 、 \dot{I}_{d1} ,末端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a2} 、 \dot{I}_{b2} 、 \dot{I}_{c2} 、 \dot{I}_{d2} 。

[0021] 零序参数求解过程如下：

[0022] 步骤3.1,引入同步角,将双端不同步测量数据转换为双端同步数据。

[0023] 由于多种原因,例如周围电磁环境的干扰,会影响设备中的通信功能,导致双端数据的不同步。因此首先需要计算同步角,将双端不同步数据转换为双端同步数据。

[0024] 按照下式计算首末端的电压电流数据。

$$[0025] \quad \dot{f}(0) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(0) \\ \dot{f}_2(0) \\ \dot{f}_3(0) \\ \dot{f}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[0026] \quad \dot{g}(0) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(0) \\ \dot{g}_2(0) \\ \dot{g}_3(0) \\ \dot{g}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0027] \quad \dot{f}(l) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(l) \\ \dot{f}_2(l) \\ \dot{f}_3(l) \\ \dot{f}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[0028] \quad \dot{g}(l) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(l) \\ \dot{g}_2(l) \\ \dot{g}_3(l) \\ \dot{g}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0029] 使用欧拉公式对上述相量进行变换：

$$[0030] \quad \dot{f}_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \alpha_{si} + j \sin \alpha_{si})$$

$$[0031] \quad \dot{f}_i(0) = f_i(0) \cdot (\cos \alpha_{ri} + j \sin \alpha_{ri})$$

$$[0032] \quad \dot{g}_i(l) = g_i(l) \cdot (\cos \beta_{si} + j \sin \beta_{si})$$

$$[0033] \quad \dot{g}_i(0) = g_i(0) \cdot (\cos \beta_{ri} + j \sin \beta_{ri})$$

[0034] 其中, $f_i(l)$ 、 $f_i(0)$ 、 $g_i(l)$ 、 $g_i(0)$ 和 α_{si} 、 α_{ri} 、 β_{si} 、 β_{ri} 分别表示对应相量的幅值和相位。

[0035] 以末端电压电流数据的相位作为参考。由于计算参数时使用的是稳态状态下的数据,所以首端数据的幅值保持不变,并且二者的相位差 φ_{si} 不变。有：

$$[0036] \quad \varphi_{si} = \alpha_{si} - \beta_{si} \quad (7)$$

[0037] 设同步角为 θ_{si} , 根据以下公式计算同步角 θ_{si}

$$[0038] \quad [g_i(l) \cdot \cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \cos \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \cos \theta_{si} + f_i(0) \cdot \cos \alpha_{ri}) \\ + [g_i(l) \cdot \sin(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \sin \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \sin \theta_{si} + f_i(0) \cdot \sin \alpha_{ri}) = 0 \quad (8)$$

[0039] 使用欧拉公式, 将首端同步相量 $\dot{f}'_i(l)$ 、 $\dot{g}'_i(l)$ 写为如下形式。

$$[0040] \quad \begin{cases} \dot{f}'_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \theta_{si} + j \sin \theta_{si}) \\ \dot{g}'_i(l) = g_i(l) \cdot [\cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) + j \sin(\theta_{si} - \varphi_{si})] \end{cases} \quad (9)$$

[0041] 步骤3.2按照下式计算四组传播系数

$$[0042] \quad \gamma_i = \frac{1}{l} \operatorname{arch} \frac{f'_i(0)g_i(0) + f'_i(l)g'_i(l)}{f'_i(l)g_i(0) + f'_i(0)g'_i(l)} \quad (10)$$

[0043] 步骤3.3将传播系数代入下式计算波阻抗

$$[0044] \quad Z_{ci} = \frac{f_i'(l) - f_i(0)ch\gamma_i l}{g_i(0)sh\gamma_i l} \quad (11)$$

[0045] 步骤3.4根据四组传播系数和波阻抗计算转换零序参数

$$[0046] \quad \begin{cases} Z_i = \gamma_i Z_{ci} \\ Y_i = \gamma_i / Z_{ci} \end{cases} \quad (12)$$

[0047] 步骤3.5根据下式求解零序参数,并转换为对应的电阻电感电容参数。

[0048] 求解零序参数

$$[0049] \quad \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_{ab} \\ Z_{ac} \\ Z_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[0050] \quad \begin{bmatrix} Y_0 \\ -Y_{ab} \\ -Y_{ac} \\ -Y_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0051] 其中,符号 $\omega = 2\pi f$, f 为电力系统频率50Hz, l 表示线路长度。上述公式中的 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

[0052] 本发明具有如下优点:

[0053] 1、不仅适合短距离输电线路零序参数的测量,也适用于长距离输电线路零序参数测量;

[0054] 2、本发明方法测量解决了线路两端不同步测量的问题;

[0055] 3、可一次性测量出零序电阻、零序电感、零序电容参数,且测量精度很高。

附图说明

[0056] 附图1为同塔四回线路导线排布示意图。

[0057] 附图2为同塔四回输电线路的分布参数模型示意图。

[0058] 附图3为本发明方法的PSCAD仿真模型。

[0059] 附图4为本发明方法和同步测量法电阻误差对比图。

[0060] 附图5为本发明方法和同步测量法电感误差对比图。

[0061] 附图6为本发明方法和同步测量法电容误差对比图。

具体实施方式

[0062] 下面通过实施例,并结合附图,对本发明的技术方案作进一步具体的说明。

[0063] 实施例:

[0064] 以下结合附图和实施例详细说明本发明技术方案。

[0065] 1. 超高压交流同塔四回输电线路零序参数精确测量,实施例包括以下步骤:

[0066] 步骤1,可选择停电测量同塔四回输电线路,也可选择带电测量同塔四回输电线路。所述同塔四回输电线路由线路a、线路b、线路c和线路d组成。

[0067] 停电测量同塔四回输电线路零序参数时测量接线如下：

[0068] 线路a首端三相短接，施加单相电压，末端三相短接接地；线路b首端三相短接悬空，末端三相短接接地；线路c首端三相短接接地，末端三相短接接地；线路d首端三相短接接地，末端三相短接接地。

[0069] 带测量同塔四回输电线路零序参数时测量接线如下：

[0070] 断开四回线路中的任意一回的任意一相，例如断开线路a的A相0.5-1秒，再重合上线路，人为注入零序电流。

[0071] 步骤2，采用步骤1所述的测量方式，测量线路a、线路b、线路c和线路d的首、末端的零序电压数据和零序电流数据。

[0072] 步骤3，对步骤2所得每个独立测量方式下得到的零序电压测量数据和零序电流测量数据，采用对称分量法和傅立叶算法得到该独立测量方式下首端和末端的零序基波电压相量和零序基波电流相量，再利用这些相量数据将同塔四回输电线路的零序参数求解出来。

[0073] 实施例在将步骤1中的测量方式下的测量完成后，将所得测量数据保存成的文件汇总到一台计算机中，在各独立测量方式下，首末端均取线路注入零序电流后若干时间内（例如0.2秒至0.4秒间）的测量数据，采用对称分量法和傅立叶算法分别得到各个独立测量方式下输电线路首末两端的零序基波电压相量和零序基波电流相量，然后进行零序参数求解。对称分量法和傅立叶算法为现有技术，本发明不予赘述。

[0074] 虽然同塔四回输电线路耦合参数多，但是由于其塔型结构存在一定的对称性，因此零序参数可以做如下的合理简化。

[0075] 设第i回线路单位长度零序自电阻、零序自电感、零序自电容、零序自阻抗和零序自电纳分别为 R_i 、 L_i 、 C_i 、 Z_i 和 Y_i 。设第i回与第j回线路之间零序互电阻、零序互电感、零序互电容、零序互阻抗和零序互电纳分别为 R_{ij} 、 L_{ij} 、 C_{ij} 、 Z_{ij} 和 Y_{ij} 。且有 $Z_i = R_i + j\omega L_i$ ， $Z_{ij} = R_{ij} + j\omega L_{ij}$ ， $Y_i = j\omega C_i$ ， $Y_{ij} = j\omega C_{ij}$ 。将零序电阻和零序电感参数转化为零序阻抗参数，将零序电容参数转化为零序电纳参数。

[0076] 参见附图1，由于同塔四回输电线路采用对称型塔，四回线路因为电压等级相同，所以使用同样的导线材料，且每回输电线路三相换位，则有： $Z_a = Z_b = Z_c = Z_d = Z_0$ ， $Z_{ac} = Z_{bd}$ ， $Z_{ad} = Z_{bc}$ ， $Z_{ab} = Z_{cd}$ 。上述等式同样适用于对零序电纳参数 $Y_a = Y_b = Y_c = Y_d = Y_0$ ， $Y_{ac} = Y_{bd}$ ， $Y_{ad} = Y_{bc}$ ， $Y_{ab} = Y_{cd}$

[0077] 故简化之后，得到需要求解的零序参数包括零序自阻抗参数 Z_0 零序互阻抗参数 Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ad} ，零序自电纳参数 Y_0 ，零序互电纳参数 Y_{ab} 、 Y_{ac} 、 Y_{ad} 。

[0078] 上述简化零序参数都是依据实际情况进行，其保留了同塔四回线路零序参数的主要特性，因此，可以保证测量结果的合理性。

[0079] 本发明中的电压单位都为伏特，电流单位都为安培。利用各独立测量方式下所测得的四回线路首末端零序基波电压相量和零序电基波流相量，可以计算中间变量，再通过中间变量求出四回输电线路的零序参数。

[0080] 实施例双回输电线路的零序参数求解过程如下：

[0081] 参见附图2，由于电导参数很小，在此忽略不予考虑，如图所示为基于简化零序参数且长度均为1（单位：km）的同塔四回耦合输电线路分布参数模型。

[0082] 在离线路末端x处取一段微元dx。a、b、c、d四回输电线离线路末端x处的微元dx首端电压分别为 $\dot{U}_{ax} + d\dot{U}_{ax}$ 、 $\dot{U}_{bx} + d\dot{U}_{bx}$ 、 $\dot{U}_{cx} + d\dot{U}_{cx}$ 、 $\dot{U}_{dx} + d\dot{U}_{dx}$ ，末端电压分别为 \dot{U}_{ax} 、 \dot{U}_{bx} 、 \dot{U}_{cx} 、 \dot{U}_{dx} ，线路电流分别为 \dot{I}_{ax} 、 \dot{I}_{bx} 、 \dot{I}_{cx} 、 \dot{I}_{dx} 。

[0083] 因为线路的泄漏电流很小，所以不考虑电导参数。

[0084] 同塔四回线路定义为平行架设且长度同为l，定义a、b、c、d四回输电线路首端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a1} 、 \dot{U}_{b1} 、 \dot{U}_{c1} 、 \dot{U}_{d1} ，末端的零序基波电压相量分别为 \dot{U}_{a2} 、 \dot{U}_{b2} 、 \dot{U}_{c2} 、 \dot{U}_{d2} ，首端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a1} 、 \dot{I}_{b1} 、 \dot{I}_{c1} 、 \dot{I}_{d1} ，末端的零序基波电流相量分别为 \dot{I}_{a2} 、 \dot{I}_{b2} 、 \dot{I}_{c2} 、 \dot{I}_{d2} 。

[0085] 零序参数求解过程如下：

[0086] 由零序参数 Z_0 、 Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ad} 和 Y_0 、 Y_{22} 、 Y_{ab} 、 Y_{ac} 、 Y_{ad} 得传输线方程：

$$[0087] \begin{cases} \frac{d\dot{U}_x}{dx} = \mathbf{Z}\dot{I}_x \\ \frac{d\dot{I}_x}{dx} = \mathbf{Y}\dot{U}_x \end{cases} \quad (\text{A1})$$

[0088] 其中参数矩阵Z和Y表示如下

$$[0089] \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_0 & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ad} \\ Z_{ab} & Z_0 & Z_{ad} & Z_{ac} \\ Z_{ac} & Z_{ad} & Z_0 & Z_{ab} \\ Z_{ad} & Z_{ac} & Z_{ab} & Z_0 \end{bmatrix},$$

$$[0090] \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_0 & -Y_{ab} & -Y_{ac} & -Y_{ad} \\ -Y_{ab} & Y_0 & -Y_{ad} & -Y_{ac} \\ -Y_{ac} & -Y_{ad} & Y_0 & -Y_{ab} \\ -Y_{ad} & -Y_{ac} & -Y_{ab} & Y_0 \end{bmatrix}.$$

[0091] $\dot{U}_x = [\dot{U}_{ax} \ \dot{U}_{bx} \ \dot{U}_{cx} \ \dot{U}_{dx}]^T$ 表示微元dx上的末端电压。 $\dot{I}_x = [\dot{I}_{ax} \ \dot{I}_{bx} \ \dot{I}_{cx} \ \dot{I}_{dx}]^T$ 表示微元dx上的电流。 $d\dot{U}_x = [d\dot{U}_{ax} \ d\dot{U}_{bx} \ d\dot{U}_{cx} \ d\dot{U}_{dx}]^T$ 表示微元dx上的电压降落。

[0092] 首先引入变换矩阵 T_s

$$[0093] \mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

[0094] 得到

$$[0095] \begin{cases} \mathbf{T}_s \frac{d\dot{U}_x}{dx} = \mathbf{T}_s \mathbf{Z} \mathbf{T}_s^{-1} (\mathbf{T}_s \dot{I}_x) \\ \mathbf{T}_s \frac{d\dot{I}_x}{dx} = \mathbf{T}_s \mathbf{Y} \mathbf{T}_s^{-1} (\mathbf{T}_s \dot{U}_x) \end{cases} \quad (\text{A2})$$

[0096] 对(A2)两端求导得到二阶微分方程

$$[0097] \quad \begin{cases} T_s \frac{d^2 \dot{U}_x}{dx^2} = T_s Z Y T_s^{-1} (T_s \dot{U}_x) \\ T_s \frac{d^2 \dot{I}_x}{dx^2} = T_s Y Z T_s^{-1} (T_s \dot{I}_x) \end{cases} \quad (A3)$$

[0098] 将(A3)展开,代入电压电流数据得到

$$[0099] \quad \begin{bmatrix} \frac{d^2(\dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx})}{dx^2} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx} \end{bmatrix} \quad (A4)$$

$$[0100] \quad \begin{bmatrix} \frac{d^2(\dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx})}{dx^2} \\ \frac{d^2(\dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx})}{dx^2} \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} \dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx} \end{bmatrix} \quad (A5)$$

[0101] 其中矩阵P和矩阵Q为对角矩阵,计算公式如下

$$[0102] \quad \begin{cases} P = T_s Z Y T_s^{-1} = \text{diag}(Z_i Y_i) \\ Q = T_s Y Z T_s^{-1} = \text{diag}(Y_i Z_i) \end{cases} \quad (A6)$$

[0103] 上式中, $i=1, 2, 3, 4$ 。

[0104] 其中:

$$[0105] \quad \begin{cases} Z_1 = Z_0 + Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{ad} \\ Z_2 = Z_0 + Z_{ab} - Z_{ac} - Z_{ad} \\ Z_3 = Z_0 - Z_{ab} + Z_{ac} - Z_{ad} \\ Z_4 = Z_0 - Z_{ab} - Z_{ac} + Z_{ad} \end{cases} \quad (A7)$$

$$[0106] \quad \begin{cases} Y_1 = Y_0 - Y_{ab} - Y_{ac} - Y_{ad} \\ Y_2 = Y_0 - Y_{ab} + Y_{ac} + Y_{ad} \\ Y_3 = Y_0 + Y_{ab} - Y_{ac} + Y_{ad} \\ Y_4 = Y_0 + Y_{ab} + Y_{ac} - Y_{ad} \end{cases} \quad (A8)$$

[0107] 不妨设:

$$[0108] \quad f = \begin{bmatrix} \dot{f}_{1x} \\ \dot{f}_{2x} \\ \dot{f}_{3x} \\ \dot{f}_{4x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} + \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} + \dot{U}_{cx} - \dot{U}_{dx} \\ \dot{U}_{ax} - \dot{U}_{bx} - \dot{U}_{cx} + \dot{U}_{dx} \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$[0109] \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \dot{g}_{1x} \\ \dot{g}_{2x} \\ \dot{g}_{3x} \\ \dot{g}_{4x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} + \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} + \dot{I}_{cx} - \dot{I}_{dx} \\ \dot{I}_{ax} - \dot{I}_{bx} - \dot{I}_{cx} + \dot{I}_{dx} \end{bmatrix} \quad (A10)$$

[0110] 对(A9)和(A10)使用Laplace变换得到:

$$[0111] \quad \begin{cases} f(s) = \frac{s}{s^2 I - P} f(0) + \frac{T_s Z T_s^{-1}}{s^2 I - P} g(0) \\ g(s) = \frac{T_s Y T_s^{-1}}{s^2 I - Q} f(0) + \frac{s}{s^2 I - Q} g(0) \end{cases} \quad (A11)$$

[0112] 式中,I为四阶单位矩阵。

[0113] 对式(13)作Laplace反变换得到:

$$[0114] \quad \begin{cases} f_i = ch\gamma_i x \cdot f_i(0) + Z_{ci} sh\gamma_i x \cdot g_i(0) \\ g_i = \frac{1}{Z_{ci}} sh\gamma_i x \cdot f_i(0) + ch\gamma_i x \cdot g_i(0) \end{cases} \quad (A12)$$

[0115] 其中,i=1,2,3,4。

[0116] γ_i 和 Z_{ci} 分别表示4组传播系数和波阻抗。表达式如下:

$$[0117] \quad \begin{cases} \gamma_i = \sqrt{Z_i Y_i} \\ Z_{ci} = \sqrt{\frac{Z_i}{Y_i}} \end{cases} \quad (A13)$$

[0118] 设 $x=1$,代入首端同步数据可以得到:

$$[0119] \quad \begin{cases} f_i(l) = ch\gamma_i l \cdot f_i(0) + Z_{ci} sh\gamma_i l \cdot g_i(0) \\ g_i(l) = \frac{1}{Z_{ci}} sh\gamma_i l \cdot f_i(0) + ch\gamma_i l \cdot g_i(0) \end{cases} \quad (A14)$$

[0120] 以下说明一种双端数据的同步方法

[0121] 不妨设 $\dot{U}_{a1}, \dot{U}_{b1}, \dot{U}_{c1}, \dot{U}_{d1}$ 为每回首端测量电压相量; $\dot{i}_{a1}, \dot{i}_{b1}, \dot{i}_{c1}, \dot{i}_{d1}$ 为每回首端测量电流相量; $\dot{U}_{a2}, \dot{U}_{b2}, \dot{U}_{c2}, \dot{U}_{d2}$ 为每回末端测量电压相量; $\dot{i}_{a2}, \dot{i}_{b2}, \dot{i}_{c2}, \dot{i}_{d2}$ 为每回末端测量电流相量。

$$[0122] \quad \dot{f}(0) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(0) \\ \dot{f}_2(0) \\ \dot{f}_3(0) \\ \dot{f}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{c2} - \dot{U}_{d2} \\ \dot{U}_{a2} - \dot{U}_{b2} - \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{d2} \end{bmatrix} \quad (A15)$$

$$[0123] \quad \dot{g}(0) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(0) \\ \dot{g}_2(0) \\ \dot{g}_3(0) \\ \dot{g}_4(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{c2} - \dot{I}_{d2} \\ \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{b2} - \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{d2} \end{bmatrix} \quad (A16)$$

$$[0124] \quad \dot{f}(l) = \begin{bmatrix} \dot{f}_1(l) \\ \dot{f}_2(l) \\ \dot{f}_3(l) \\ \dot{f}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{c1} - \dot{U}_{d1} \\ \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{d1} \end{bmatrix} \quad (A17)$$

$$[0125] \quad \dot{\mathbf{g}}(l) = \begin{bmatrix} \dot{g}_1(l) \\ \dot{g}_2(l) \\ \dot{g}_3(l) \\ \dot{g}_4(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} - \dot{I}_{d1} \\ \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{b1} - \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{d1} \end{bmatrix} \quad (A18)$$

[0126] 使用欧拉公式将上述相量写成如下形式

$$[0127] \quad f_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \alpha_{si} + j \sin \alpha_{si})$$

$$[0128] \quad f_i(0) = f_i(0) \cdot (\cos \alpha_{ri} + j \sin \alpha_{ri})$$

$$[0129] \quad \dot{g}_i(l) = g_i(l) \cdot (\cos \beta_{si} + j \sin \beta_{si})$$

$$[0130] \quad \dot{g}_i(0) = g_i(0) \cdot (\cos \beta_{ri} + j \sin \beta_{ri})$$

[0131] 其中, $f_i(1)$ 、 $f_i(0)$ 、 $g_i(1)$ 、 $g_i(0)$ 和 α_{si} 、 α_{ri} 、 β_{si} 、 β_{ri} 分别表示对应相量的幅值和相位。

[0132] 以末端电压电流数据的相位作为参考。由于计算参数时使用的是稳态状态下的数据, 所以首端数据的幅值保持不变, 并且二者的相位差 φ_{si} 不变。有:

$$[0133] \quad \varphi_{si} = \alpha_{si} - \beta_{si} \quad (A19)$$

[0134] 设同步角为 θ_{si} , 根据以下公式计算同步角 θ_{si}

$$[0135] \quad \begin{aligned} & [g_i(l) \cdot \cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \cos \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \cos \theta_{si} + f_i(0) \cdot \cos \alpha_{ri}) \\ & + [g_i(l) \cdot \sin(\theta_{si} - \varphi_{si}) - g_i(0) \cdot \sin \beta_{ri}] (f_i(l) \cdot \sin \theta_{si} + f_i(0) \cdot \sin \alpha_{ri}) = 0 \end{aligned} \quad (A20)$$

[0136] 使用欧拉公式, 将首端同步相量 $f'_i(l)$ 、 $g'_i(l)$ 写为如下形式。

$$[0137] \quad \begin{cases} f'_i(l) = f_i(l) \cdot (\cos \theta_{si} + j \sin \theta_{si}) \\ \dot{g}'_i(l) = g_i(l) \cdot [\cos(\theta_{si} - \varphi_{si}) + j \sin(\theta_{si} - \varphi_{si})] \end{cases} \quad (A21)$$

[0138] 按照下式计算四组传播系数

$$[0139] \quad \gamma_i = \frac{1}{l} \operatorname{arch} \frac{f_i(0)g_i(0) + f'_i(l)g'_i(l)}{f'_i(l)g_i(0) + f_i(0)g'_i(l)} \quad (A22)$$

[0140] 将传播系数代入下式计算波阻抗

$$[0141] \quad Z_{ci} = \frac{f'_i(l) - f_i(0)ch\gamma_i l}{g_i(0)sh\gamma_i l} \quad (A23)$$

[0142] 根据四组传播系数和波阻抗计算转换零序参数

$$[0143] \quad \begin{cases} Z_i = \gamma_i Z_{ci} \\ Y_i = \gamma_i / Z_{ci} \end{cases} \quad (A24)$$

[0144] 根据下式求解零序参数, 并转换为对应的电阻电感电容参数。

[0145] 求解零序参数, 并将其转换为电阻、电感和电容参数。

$$[0146] \quad \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_{ab} \\ Z_{ac} \\ Z_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{bmatrix} \quad (A25)$$

$$[0147] \quad \begin{bmatrix} Y_0 \\ -Y_{ab} \\ -Y_{ac} \\ -Y_{ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} \quad (A26)$$

[0148] 其中,符号 $\omega = 2\pi f$, f 为电力系统频率50Hz, l 表示线路长度。上述公式中的 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

[0149] 为了说明本发明的效果起见,以500kV同塔四回输电线路为例,表1为该四回线路的零序参数理论值。

[0150] 用本发明测量方法测量该同塔四回线路的零序参数,线路长度从100km到700km变化时,对于线路零序电阻误差低于1.5%,零序电感误差低于0.4%,零序电容误差低于0.5%以内,可以满足工程实际需求。用本发明技术方案对同塔四回线路长度从100km到900km变化时进行仿真测量,测量结果如表2所示。

[0151] 表1零序参数理论值

	零序电阻 (Ohm/km)	R_0	R_{ab}	R_{ac}	R_{ad}
		0.1743	0.1631	0.1604	0.1603
[0152]	零序电感 (mH/km)	L_0	L_{ab}	L_{ac}	L_{ad}
		2.6514	1.7798	1.5537	1.4828
	零序电容 (nF/km)	C_0	C_{ab}	C_{ac}	C_{ad}
		8.1404	2.6023	1.4567	0.6591

[0153] 表2本发明测量方法得到的测量结果

		线路长度(km)	100	300	500	700
[0154]	R_0	计算值(Omh/km)	0.1766	0.1763	0.1764	0.1763
		相对误差(%)	1.3506	1.1796	1.2079	1.1666
	R_{ab}	计算值(Omh/km)	0.1652	0.1650	0.1651	0.1651
		相对误差(%)	1.2518	1.1958	1.2516	1.2348
	R_{ac}	计算值(Omh/km)	0.1624	0.1623	0.1624	0.1624
		相对误差(%)	1.2518	1.1958	1.2516	1.2348
	R_{ad}	计算值(Omh/km)	0.1623	0.1622	0.1623	0.1623
		相对误差(%)	1.2648	1.1844	1.2476	1.2373
	L_0	计算值(mH/km)	2.6467	2.6472	2.6474	2.6477
		相对误差(%)	0.1764	0.1577	0.1478	0.1383
	L_{ab}	计算值(mH/km)	1.7752	1.7757	1.7760	1.7762

[0155]	L_{ac}	相对误差(%)	0.2607	0.2303	0.2156	0.2030	
		计算值(mH/km)	1.5493	1.5496	1.5500	1.5501	
	L_{ad}	相对误差(%)	0.2873	0.2637	0.2410	0.2344	
		计算值(mH/km)	1.4784	1.4788	1.4791	1.4792	
	C_0	相对误差(%)	0.2988	0.2732	0.2513	0.2474	
		计算值(nF/km)	8.1447	8.1442	8.1419	8.1413	
	C_{ab}	相对误差(%)	0.0533	0.0470	0.0181	0.0109	
		计算值(nF/km)	2.6070	2.6032	2.6008	2.6017	
	C_{ac}	相对误差(%)	0.1829	0.0374	0.0571	0.0234	
		计算值(nF/km)	1.4594	1.4563	1.4565	1.4559	
	C_{ad}	相对误差(%)	0.1855	0.0222	0.0124	0.0554	
		计算值(nF/km)	0.6607	0.6588	0.6589	0.6577	
			相对误差(%)	0.2455	0.0410	0.0284	0.2051

[0156] 将本发明所提供的测量方法得到的零序参数与此前的测量方法得到的零序参数进行对比,从表2可以看出,本文方法无论线路长短,测量精度均保持在一个很高的水平,其中电阻误差在1.5%以内,电感误差在0.4%以内,电容误差在0.5%以内。从图4-图6可以看出,在双端数据同步的情况下,双端同步测量方法和本文方法的测量精度都很高,但是当双端出现不同步的情况时,此前的方法出现很大的测量误差,最大测量误差达到了90%,这在工程上是不能被接受的。但是,本发明的方法由于使用了一种双端异步相量的同步技术,所以即使在测量信号不同步的状态下,依然可以保持很高的测量精度,并且本发明的方法可以在线路带电的情况下完成参数测量,使用范围广,操作简便,非常适用于工程实际。

[0157] 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。本发明所属技术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式替代,但并不会偏离本发明的精神或者超越所附权利要求书所定义的范围。

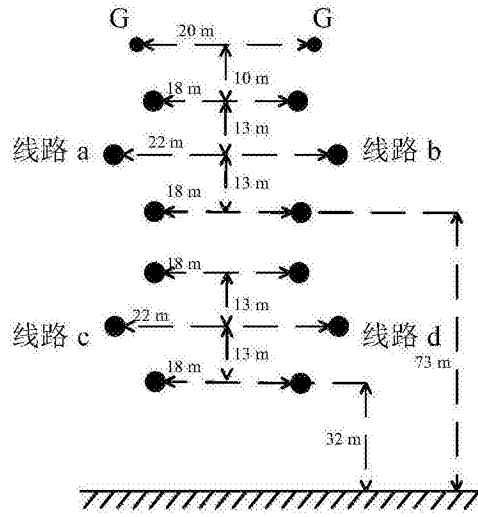


图1

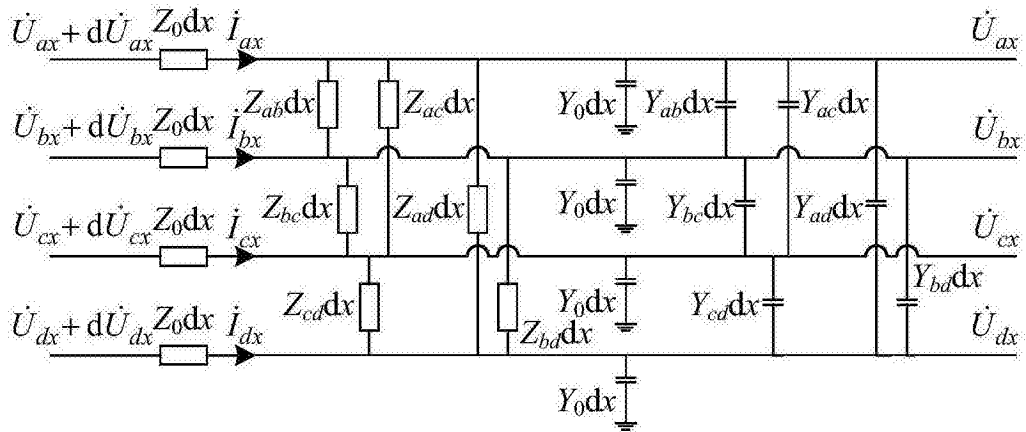


图2

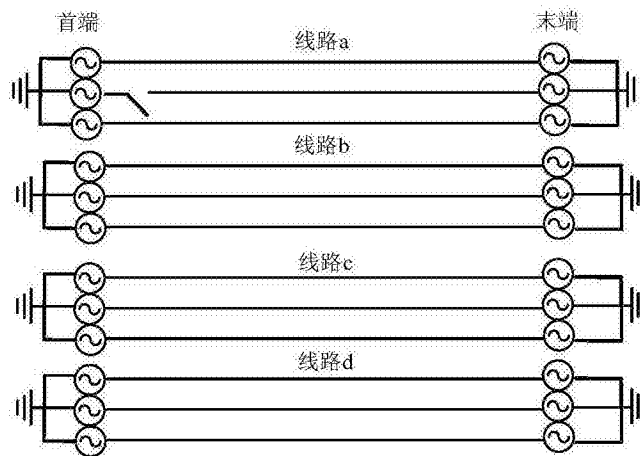


图3

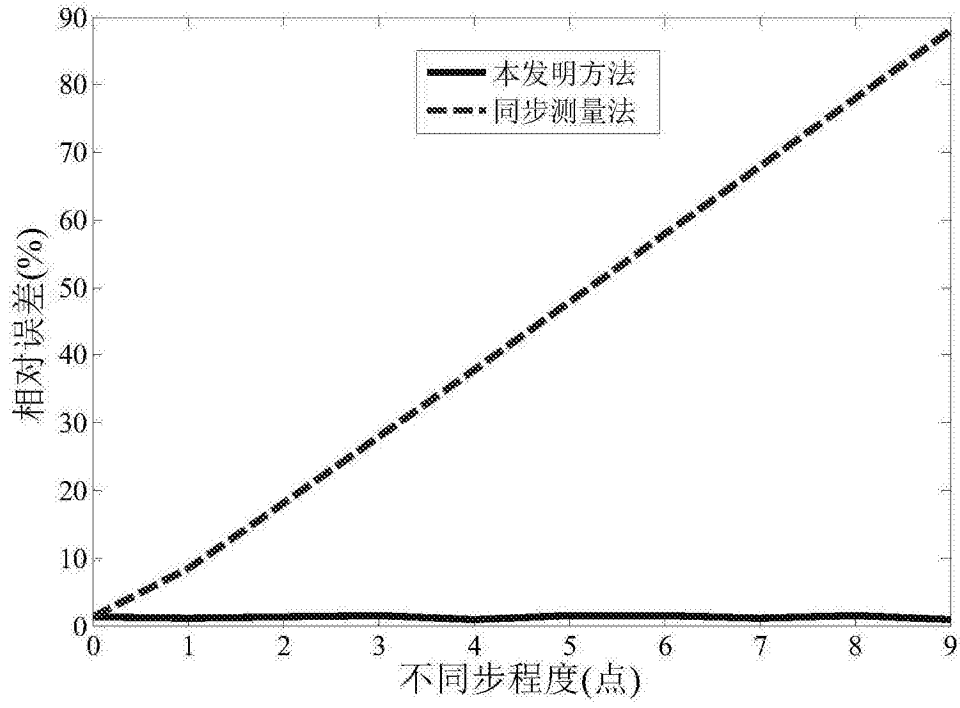


图4

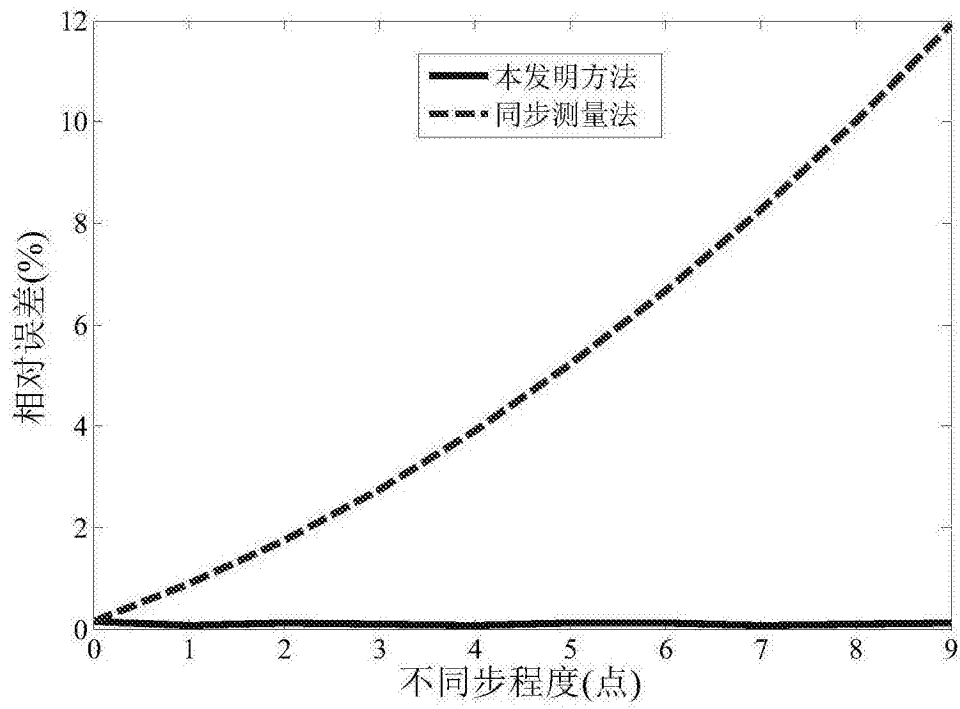


图5

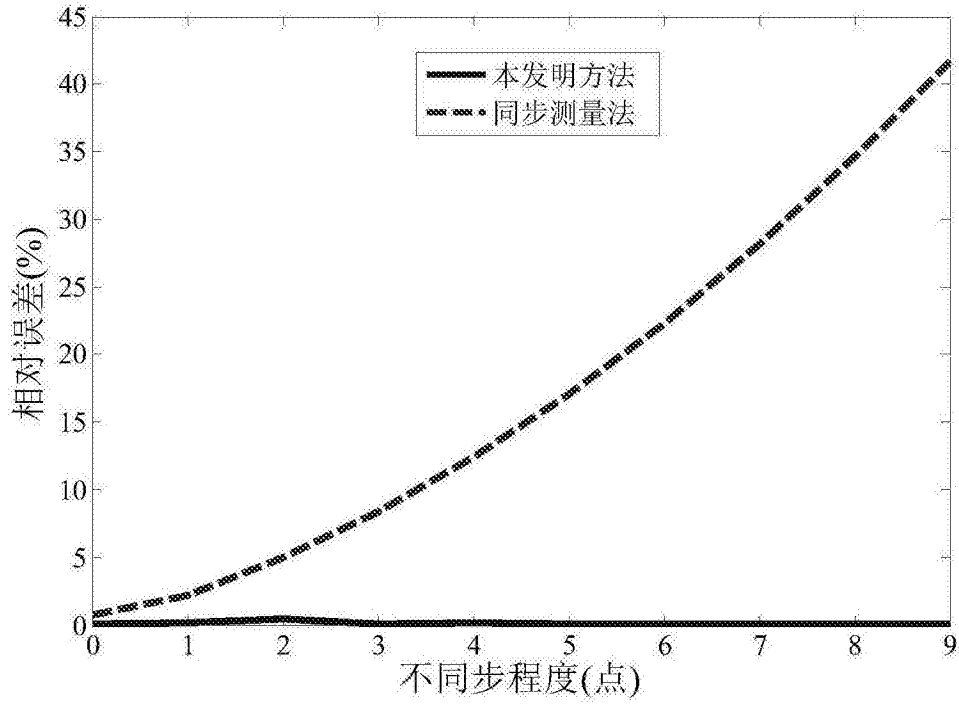


图6