

双回耦合输电线路的零序参数在线测量

梁志瑞, 宫瑞邦, 牛胜锁, 赵 飞, 张思为

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 分析了双回耦合输电线路的结构, 建立了其零序分布参数电路模型和“双Π形”零序集中参数电路模型; 将增量法与“双Π形”电路相结合, 提出了零序集中参数在线测量算法; 推导了零序集中参数与分布参数间的转换关系, 提出了零序分布参数在线测量算法; 对不同长度的 500 kV 双回耦合输电线路进行仿真实验。仿真结果表明, 所提出的电路模型及在线测量算法适用于电力系统的零序参数在线测量。

关键词: 在线测量; 零序参数; 分布参数; 集中参数; 双Π形; 电路模型; 输电

中图分类号: TM 934

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.012

0 引言

在电力系统中, 需要测量线路的零序集中参数和零序分布参数。线路的零序集中参数表征的是线路的零序参数整体集中的效应, 零序分布参数表征的是均匀分布在线路上的零序电气参数。目前, 在很多地方由于线路走廊受限, 同杆架设的线路日益增加, 若采用传统离线测量方法, 停电的影响范围将越来越广。因此, 为了尽可能地避免因测量造成线路断电, 通过尽量少次数的测量获得线路零序参数, 提出了在线测量方法。

国内外针对输电线路零序参数在线测量的研究已进行了十几年。文献[1]在“一字形”零序集中参数电路模型的基础上提出了增量法, 文献[2-4]介绍了增量法相关的硬件组成及测量过程, 文献[5-7]在增量法的基础上提出了微分法、积分法等。“一字形”电路模型只考虑线间电磁耦合, 忽略线路对地及线间的导纳, 随着线路长度的增加及电压等级的升高, 若不考虑线路的电容电流, 使用该模型来测量计算会造成偏差。文献[8]对线路模型进行了改进, 考虑了线路的对地零序导纳, 通过建立零序分布参数和零序集中参数间的转换关系, 将测量线路零序集中参数和测量零序分布参数结合起来。但是由于文献[8]所使用的线路模型没有考虑线间零序导纳的影响, 而且对于线路参数矩阵的转换不够准确, 最终未得到线路参数的精确测量算法。

本文针对双回耦合输电线路, 综合考虑其线间电磁耦合和线路对地及线间电容的影响, 建立它的零序分布参数电路模型和零序集中参数电路模型, 推导零序集中参数与分布参数间的转换矩阵, 研究其线路零序集中参数和分布参数的在线测量算法。

1 双回耦合输电线路的零序电路模型

1.1 零序分布参数电路模型

平行架设的双回耦合输电线路 1、2 参数完全一

样, 导线采取逆相序布置, 沿线路近似采取一个全循环换位方式, 线路参数沿线均匀分布。

根据零序电气量具有“大小相等、相位相同”的特征, 对两回线进行解耦, 最终可以用 2 根线路来代替原线路, 构成两线-地的零序分布参数电路模型, 如图 1 所示。记 i 回线路 j 端零序电压、零序电流分量分别为 U_{ij} 、 I_{ij} , $j=1$ 时表示线路的首端, $j=2$ 时表示线路末端。

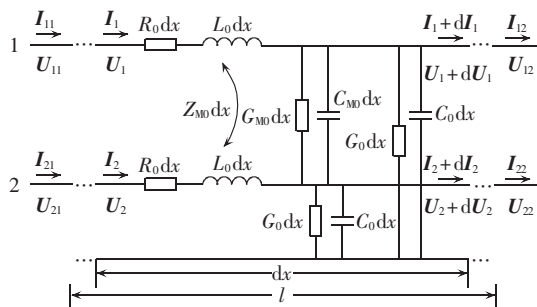


图 1 零序分布参数电路模型

Fig.1 Circuit model with zero-sequence distributed parameters

图中, R_0 、 L_0 为单位长度线路零序自电阻、自电感, Z_{M0} 为两回线间单位长度线路零序互阻抗, G_0 、 C_0 为线与地之间单位长度线路的零序漏电导、零序电容, G_{M0} 、 C_{M0} 为两回线间单位长度线路的零序漏电导、耦合电容, dx 无限趋近于零, l 为线路耦合段总长度。

记由 R_0 、 L_0 、 R_{M0} 、 L_{M0} 构成的矩阵 Z_0 为线路的零序分布阻抗参数矩阵, 由 G_0 、 C_0 、 G_{M0} 、 C_{M0} 构成的矩阵 Y_0 为线路的零序分布导纳参数矩阵。 Z_0 、 Y_0 分别为:

$$Z_0 = \begin{bmatrix} R_0 + j\omega L_0 & R_{M0} + j\omega L_{M0} \\ R_{M0} + j\omega L_{M0} & R_0 + j\omega L_0 \end{bmatrix}$$

$$Y_0 = \begin{bmatrix} G_0 + G_{M0} + j\omega C_0 + j\omega C_{M0} & -(G_{M0} + j\omega C_{M0}) \\ -(G_{M0} + j\omega C_{M0}) & G_0 + G_{M0} + j\omega C_0 + j\omega C_{M0} \end{bmatrix}$$

记 $U_1 = [U_{11}, U_{21}]^T$, $U_2 = [U_{12}, U_{22}]^T$, $I_1 = [I_{11}, I_{21}]^T$,

$I_2=[I_{12}, I_{22}]^T$ 。经过推导,双回耦合输电线路零序分布参数电路模型的网络传输方程如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{Z_0 Y_0} l) & Z_C \sinh(\sqrt{Y_0 Z_0} l) \\ Z_C^{-1} \sinh(\sqrt{Z_0 Y_0} l) & \cosh(\sqrt{Y_0 Z_0} l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $Z_C=Y_0^{-1}\sqrt{Y_0 Z_0}=Z_0(\sqrt{Y_0 Z_0})^{-1}$ 。

1.2 “双 Π 形”零序集中参数电路模型

根据电力系统分析的一般原理,当只关心线路两端的电气量时,可以将双回耦合线路等值为一个四端口的网络,进一步将其等值为“双 Π 形”零序集中参数电路模型,如图 2 所示。

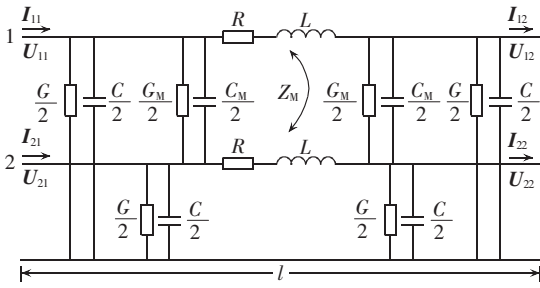


图 2 “双 Π 形”零序集中参数电路模型
Fig.2 Double-Π-shaped circuit model with zero-sequence lumped parameters

在此电路模型中,将线路总阻抗串联在线路上,将线路的总导纳等分为两部分,分别并联在线路的始、末端。图 2 中, R, L 为线路零序集中自电阻、自电感, Z_M 为两回线间零序集中互阻抗, G, C 为线与地之间的零序集中漏电导、零序电容, G_M, C_M 为两回线间零序集中漏电导、耦合电容。

记由 R, L, R_M, L_M 构成的矩阵 Z_{Π} 为线路的零序集中阻抗参数矩阵,由 G, C, G_M, C_M 构成的矩阵 Y_{Π} 为线路的零序集中导纳参数矩阵。 Z_{Π}, Y_{Π} 分别为:

$$Z_{\Pi} = \begin{bmatrix} R+j\omega L & R_M+j\omega L_M \\ R_M+j\omega L_M & R+j\omega L \end{bmatrix}$$

$$Y_{\Pi} = \begin{bmatrix} G+G_M+j\omega C+j\omega C_M & -(G_M+j\omega C_M) \\ -(G_M+j\omega C_M) & G+G_M+j\omega C+j\omega C_M \end{bmatrix}$$

“双 Π 形”零序集中参数模型的网络传输方程如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\Pi} Y_{\Pi}/2 + I & Z_{\Pi} \\ Y_{\Pi} (Z_{\Pi} Y_{\Pi}/4 + I) & Y_{\Pi} Z_{\Pi}/2 + I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 2 种电路模型的转换

零序分布参数电路模型和“双 Π 形”零序集中参数电路模型是针对同一系统的不同表示形式,所以二者是等价的,因而 2 个电路模型的网络传输函数相等。根据式(1)和式(2),可以求出 2 种电路模型相应参数矩阵间的转换关系,如式(3)所示。

$$\begin{cases} Z_{\Pi} = Z_C \sinh(\sqrt{Y_0 Z_0} l) \\ Y_{\Pi} = 2 [\sinh(\sqrt{Y_0 Z_0} l)]^{-1} Z_C^{-1} [\cosh(\sqrt{Z_0 Y_0} l) - I] \end{cases} \quad (3)$$

为讨论线路零序参数的分布特性与线路长度间的关系,进一步将式(3)变形为式(4)。式(4)中 k_Z, k_Y 分别表示由 Z_0, Y_0 构成的转换矩阵。可以证得,当 l 趋于 0 时, k_Z, k_Y 趋近于单位阵 I 。

$$\begin{cases} Z_{\Pi} = Z_0 l k_Z \\ Y_{\Pi} = Y_0 l k_Y \\ k_Z = \frac{1}{l} (\sqrt{Y_0 Z_0})^{-1} \sinh(\sqrt{Y_0 Z_0} l) \\ k_Y = \frac{2}{l} [\sinh(\sqrt{Y_0 Z_0} l)]^{-1} (\sqrt{Y_0 Z_0})^{-1} \times \\ \quad \cosh(\sqrt{Z_0 Y_0} l - I) \end{cases} \quad (4)$$

因此在线路长度较短时,双回耦合输电线路零序参数的分布特性可以忽略,线路的零序集中参数可以近似等于零序分布参数与线路长度的乘积。当线路较长时,必须考虑分布特性。

2 双回耦合输电线路零序参数在线测量原理

输电线路零序参数在线测量是指在尽可能减少系统停电的前提下,测量线路两端的零序电压、电流,通过求解由线路参数、线路两端零序电气量构成的方程,获得输电线路的零序参数。

电力系统在正常运行时,线路两端的零序电压、电流很小,不能满足测量要求。因此,就需要通过改变运行状态,在线产生较大的零序增量,求解由线路参数、线路两端零序电气增量构成的方程,获得输电线路的零序参数。为保证准确地测量线路两端的零序增量,需要满足 2 个条件:一是在线产生足够大的零序增量;二是需同步测量线路两端的电气量。目前,多篇文献^[9-14]描述了在线产生零序增量的方法,诸如将系统的运行方式从正常运行变为首端断相、末端接不平衡负荷、区外单相接地短路和区外双相接地短路等;线路两端电气量同步测量主要通过日渐成熟的基于 GPS 同步测量技术实现。

2.1 增量法原理

在改变系统运行方式后,会产生零序增量,记 $\Delta U_{11}, \Delta U_{21}, \Delta U_{12}, \Delta U_{22}, \Delta I_{11}, \Delta I_{21}, \Delta I_{12}, \Delta I_{22}$ 为线路首末端产生的零序电压、电流增量, $\Delta U_1 = [\Delta U_{11}, \Delta U_{21}]^T, \Delta U_2 = [\Delta U_{12}, \Delta U_{22}]^T, \Delta I_1 = [\Delta I_{11}, \Delta I_{21}]^T, \Delta I_2 = [\Delta I_{12}, \Delta I_{22}]^T$ 。

根据图 2 所示的“双 Π 形”零序集中参数模型,由式(2)推导出系统的伏安特性方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_1 - I_2 + (\Delta I_1 - \Delta I_2) = \\ \quad \frac{1}{2} Y_{\Pi} (U_1 + U_2) + \frac{1}{2} Y_{\Pi} (\Delta U_1 + \Delta U_2) \\ U_1 - U_2 + (\Delta U_1 - \Delta U_2) = \\ \quad Z_{\Pi} \left(I_1 - \frac{1}{2} Y_{\Pi} U_1 \right) + Z_{\Pi} \left(\Delta I_1 - \frac{1}{2} Y_{\Pi} \Delta U_1 \right) \end{cases} \quad (5)$$

一般情况下,输电线路是一个线性系统,满足叠加原理。因此,式(5)可以认为是正常运行状态和零

序增量的叠加。最终,基于线路首末端零序增量的增量方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} \Delta I_1 - \Delta I_2 = \frac{1}{2} Y_{\Pi} (\Delta U_1 + \Delta U_2) \\ \Delta U_1 - \Delta U_2 = Z_{\Pi} \left(\Delta I_1 - \frac{1}{2} Y_{\Pi} \Delta U_1 \right) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 零序集中参数测量算法

线路的零序集中阻抗参数矩阵 Z_{Π} 的对角元素相等,非对角元素相等,同理于零序集中导纳参数矩阵 Y_{Π} 。令 2 个矩阵的对角元素为 Z, Y , 非对角元素为 Z_M, Y_M 。对式(6)所示的增量方程进行等价变形,得到用矩阵相乘形式表示的新增量方程,如式(7)、(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{11} - \Delta I_{12} \\ \Delta I_{21} - \Delta I_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \Delta U_{11} + \Delta U_{12} & \Delta U_{21} + \Delta U_{22} \\ \Delta U_{21} + \Delta U_{22} & \Delta U_{11} + \Delta U_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ Y_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{11} - \Delta U_{12} \\ \Delta U_{21} - \Delta U_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{11} - \frac{Y \Delta U_{11} + Y_M \Delta U_{21}}{2} & \Delta I_{21} - \frac{Y_M \Delta U_{11} + Y \Delta U_{21}}{2} \\ \Delta I_{21} - \frac{Y_M \Delta U_{11} + Y \Delta U_{21}}{2} & \Delta I_{11} - \frac{Y \Delta U_{11} + Y_M \Delta U_{21}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Z \\ Z_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(7),零序集中导纳参数矩阵 Y_{Π} 中的对角元素 Y 和非对角元素 Y_M 的测量算法如式(9)所示。

$$\begin{cases} Y = \frac{2(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})(\Delta I_{11} - \Delta I_{12})}{(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})^2 - (\Delta U_{21} + \Delta U_{22})^2} - \frac{2(\Delta U_{21} + \Delta U_{22})(\Delta I_{21} - \Delta I_{22})}{(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})^2 - (\Delta U_{21} + \Delta U_{22})^2} \\ Y_M = \frac{2(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})(\Delta I_{21} - \Delta I_{22})}{(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})^2 - (\Delta U_{21} + \Delta U_{22})^2} - \frac{2(\Delta U_{21} + \Delta U_{22})(\Delta I_{11} - \Delta I_{12})}{(\Delta U_{11} + \Delta U_{12})^2 - (\Delta U_{21} + \Delta U_{22})^2} \end{cases} \quad (9)$$

将 Y 和 Y_M 代入式(8)中,得到 Z 及 Z_M 。 Z 和 Z_M 的表达式比较复杂,由于篇幅限制就不再列出,其测算原理与导纳的测算原理一致。经过上述一系列的工作,最终得到矩阵 Z_{Π}, Y_{Π} 。

零序集中参数的测量算法如式(10)所示。

$$\begin{cases} R = \text{Re}(Z_{\Pi}(1, 1)) \\ L = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Z_{\Pi}(1, 1)) \\ L_M = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Z_{\Pi}(1, 2)) \\ C = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Y_{\Pi}(1, 1) + Y_{\Pi}(1, 2)) \\ C_M = -\frac{1}{\omega} \text{Im}(Y_{\Pi}(1, 2)) \end{cases} \quad (10)$$

2.3 零序分布参数测量算法

在分布参数电路模型中,由于电阻、电感、电容

和电导这些参数是均匀分布在线上的,因此必须用单位长度的输电线所具有的参数表示^[15]。统称单位长度的输电线上具有的零序参数为线路的零序分布参数,在电力系统中,单位长度通常取 1 km。

2.3.1 短线路零序分布参数测量算法

在线路长度较短时,对式(4)分析可知,“双 Π 形”集中参数电路模型与零序分布参数模型的转换矩阵 k_Z, k_Y 近似于单位阵 I 。因此在测算短距离线路的零序分布参数时,可以令 k_Z, k_Y 等于 I ,忽略线路波过程的影响。

短线路零序分布参数的测量算法如式(11)所示。

$$\begin{cases} R_0 = \frac{1}{l} \text{Re}(Z_{\Pi}(1, 1)) \\ L_0 = \frac{1}{\omega l} \text{Im}(Z_{\Pi}(1, 1)) \\ L_{M0} = \frac{1}{\omega l} \text{Im}(Z_{\Pi}(1, 2)) \\ C_0 = \frac{1}{\omega l} \text{Im}(Y_{\Pi}(1, 1) + Y_{\Pi}(1, 2)) \\ C_{M0} = -\frac{1}{\omega l} \text{Im}(Y_{\Pi}(1, 2)) \end{cases} \quad (11)$$

2.3.2 长线路零序分布参数测量算法

对于长距离输电线路,转换矩阵 k_Z, k_Y 受线路长度的影响,已不能近似于单位阵 I ,需要对零序集中参数矩阵进行准确修正。根据式(3),将分布参数矩阵 Z_0, Y_0 用 Z_{Π}, Y_{Π} 表示,如式(12)所示。

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{1}{l} Z_{\Pi} \left(\sqrt{Z_{\Pi} \left(\frac{Z_{\Pi} Y_{\Pi} + I}{4} \right) Y_{\Pi}} \right)^{-1} \times \text{arcsinh} \left(\sqrt{Z_{\Pi} \left(\frac{Z_{\Pi} Y_{\Pi} + I}{4} \right) Y_{\Pi}} \right) \\ Y_0 = \frac{1}{l} \text{arcsinh} \left(\sqrt{Z_{\Pi} \left(\frac{Z_{\Pi} Y_{\Pi} + I}{4} \right) Y_{\Pi}} \right) \times \left(\frac{Z_{\Pi} Y_{\Pi} + I}{4} \right) Y_{\Pi} \left(\sqrt{Z_{\Pi} \left(\frac{Z_{\Pi} Y_{\Pi} + I}{4} \right) Y_{\Pi}} \right)^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

在测得线路的零序集中参数矩阵 Z_{Π}, Y_{Π} 后,代入式(12)测算分布参数矩阵 Z_0, Y_0 。最后,长距离输电线路零序分布参数的测量算法如式(13)所示。

$$\begin{cases} R_0 = \text{Re}(Z_0(1, 1)) \\ L_0 = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Z_0(1, 1)) \\ L_{M0} = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Z_0(1, 2)) \\ C_0 = \frac{1}{\omega} \text{Im}(Y_0(1, 1) + Y_0(1, 2)) \\ C_{M0} = -\frac{1}{\omega} \text{Im}(Y_0(1, 2)) \end{cases} \quad (13)$$

3 仿真及分析

为讨论本文所提耦合输电线路零序参数在线测量算法的准确性,在 MATLAB 中建立双回 500 kV 线路系统,进行数字仿真。以三峡电站的出线为例^[16],

导线型号为 LGJ-630/55×4,分裂导线的分裂间距为 450 mm,避雷线型号为 LHAGJ-150 / 25,杆塔为 S1 型,500 kV 双回耦合输电线路元件模块分布参数如下: $R_0=0.045\,44\,\Omega/\text{km}$; $L_0=1.551\,9\,\text{mH}/\text{km}$; $L_{\text{M0}}=0.53105\,\text{mH}/\text{km}$; $C_0=5.658\,\text{nF}/\text{km}$; $C_{\text{M0}}=2.7894\,\text{nF}/\text{km}$ 。

本文将仿真 5 种能产生零序电流增量的运行方式,即离线注入零序电流、首端断相、末端接不平衡负荷、区外单相接地短路和区外双相接地短路等,

表 1 基于短线路零序分布参数测量算法的仿真结果及误差

Tab.1 Simulative results and error of measuring algorithm for zero-sequence distributed parameter of short line

线路 长度/km	R_0		L_0		L_{M0}		C_0		C_{M0}	
	结果/ [$\Omega\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{nF}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{nF}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%
60	4.631×10^{-2}	1.91	1.5504	-0.096	0.53270	0.31	5.6598	0.031	2.7912	0.064
90	4.418×10^{-2}	-2.77	1.5498	-0.130	0.52905	-0.37	5.6661	0.140	2.7913	0.064
150	4.622×10^{-2}	1.72	1.5477	-0.270	0.52870	-0.44	5.6682	0.180	2.7961	0.240
300	4.393×10^{-2}	-3.32	1.5247	-1.750	0.52214	-1.67	5.7069	0.860	2.8135	0.860
500	4.111×10^{-2}	-9.54	1.4790	-4.700	0.50500	-4.91	5.7988	2.490	2.8561	2.390

表 2 基于长线路零序分布参数测量算法的仿真结果及误差

Tab.2 Simulative results and error of measuring algorithm for zero-sequence distributed parameter of long line

线路 长度/km	R_0		L_0		L_{M0}		C_0		C_{M0}	
	结果/ [$\Omega\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{mH}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{nF}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%	结果/ [$\text{nF}\cdot\text{km}^{-1}$]	误差/%
60	4.6370×10^{-2}	2.050	1.5514	-0.027	0.53310	0.380	5.65780	-0.003	2.79030	0.033
90	4.4352×10^{-2}	-2.400	1.5526	0.048	0.53005	-0.180	5.66073	0.048	2.78870	-0.025
150	4.6632×10^{-2}	2.610	1.5523	0.025	0.53101	-0.006	5.65586	-0.037	2.79028	0.031
300	4.5499×10^{-2}	0.121	1.5511	-0.050	0.53139	0.065	5.65701	-0.017	2.79031	0.032
500	4.5414×10^{-2}	-0.057	1.5520	0.006	0.53149	0.080	5.65700	-0.018	2.78990	0.018

结果的误差较小,随着线路长度增加,误差增大。从表 2 可以看出,5 条不同长度线路的仿真结果的误差都很小,除电阻外其他参数误差的数量级都为 10^{-4} 。综合对比表 1 和表 2,仅线路长度为 60 km 时,两表仿真结果的误差相近。

在实际中,当线路长度较短时,线路参数的分布特性可能没有仿真模型中的理想,应用中长线路零序分布参数测量算法测量短距离线路的零序参数可能会有较大的误差。因此,综合仿真结果,短线路零序分布参数测量算法适用于测量长度小于 60 km 的 500 kV 线路,长线路零序分布参数测量算法适用于测量长度大于 60 km 的 500 kV 线路。

此外,从表 2 中可以看出,线路长度小于 150 km 时,线路零序自电阻的测量误差相比其他参数略大,约为 2%。这是由于线路零序自电阻要比电抗小一个数量级,在仿真中会有截断误差,因此不以电阻值的测量误差作为判断算法准确性的标准。随着线路长度逐渐增加,由数量级差异造成的截断误差会减小,如表 2 中当线路长度为 500 km 时,误差的绝对值已经减小到 0.057%,可以证明这一点。

4 结论

本文建立了双回耦合输电线路的零序分布参数

其中离线注入零序电流属于离线测量方法。
基于短线路零序分布参数测量算法在断开一回线路 A 相运行方式下的测量结果及误差如表 1 所示。基于长线路零序分布参数测量算法在断开一回线路 A 相运行方式下的测量结果及误差如表 2 所示。其他 4 种运行方式的仿真结果及误差的变化规律与表 1 及表 2 中的一致,限于篇幅,此处不再列出。
从表 1 可以看出,线路长度小于 100 km 时,仿真

电路模型和“双 Π 形”零序集中参数电路模型,推导了零序集中参数与零序分布参数间的转换关系,提出了短线路零序分布参数在线测量算法和长线路零序分布参数在线测量算法,并进行了仿真验证。仿真结果表明,短线路零序分布参数测量算法适用于测量长度小于 60 km 的线路,长线路零序分布参数测量算法适用于测量长度大于 60 km 的中长距离线路,实验结果误差的数量级为 10^{-4} 。本文提出的“双 Π 形”零序集中参数模型考虑了对地导纳和线间导纳影响,将输电线路零序集中参数在线测量与分布参数在线测量结合起来,可以为电力系统潮流计算和继电保护提供参考。

参考文献:

[1] 陈允平,王旭蕊,韩宝亮. 带互感的输电线路零序参数带电测量研究[J]. 电力系统自动化,1995,19(2):38-42.
CHEN Yunping,WANG Xurui,HAN Baoliang. The principles and computer-based realization of zero-sequence parameter measurement of transmission line with mutual inductance[J]. Automation of Electric Power Systems,1995,19(2):38-42.
[2] 胡志坚,陈允平,张承学. 基于 GPS 的互感线路零序参数带电测量方法[J]. 电网技术,1999,23(9):4-7.
HU Zhijian,CHEN Yunping,ZHANG Chengxue. A new method of parameters live line measurement of transmission line based on GPS technology[J]. Power System Technology,1999,23(9):4-7.

- [3] 胡志坚,刘美观,张承学,等. 互感线路参数带电测量研究与实现[J]. 电力系统自动化,1999,23(24):32-35.
HU Zhijian,LIU Meiguan,ZHANG Chengxue,et al. Principles and realization of live line measurement to parameters of transmission lines with mutual inductance[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(24):32-35.
- [4] 胡志坚,张翊飞,陈允平,等. 长距离高压电缆线路互感参数测量[J]. 高电压技术,2002,28(5):17-18,23.
HU Zhijian,ZHANG Chifei,CHEN Yunping,et al. Measurement of mutual inductance parameters of long-distance high-voltage cable lines[J]. High Voltage Engineering,2002,28(5):17-18,23.
- [5] 胡志坚,陈允平,徐玮,等. 基于微分方程的互感线路参数带电测量研究与实现[J]. 中国电机工程学报,2005,25(2):28-33.
HU Zhijian,CHEN Yunping,XU Wei,et al. Principles and realization of live line measurement to parameters of transmission lines with mutual inductance based on differential equations[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(2):28-33.
- [6] 胡宁,郑罡,胡志坚. 基于积分方程的互感线路参数带电测量的研究[J]. 继电器,2005,33(16):22-25.
HU Ning,ZHENG Gang,HU Zhijian. Study of live line measurement of parameters of transmission line with mutual inductance based on integral equations[J]. Relay,2005,33(16):22-25.
- [7] 胡宁,胡志坚,郑罡. 基于全球定位系统与积分方程的互感线路零序参数带电测量[J]. 电网技术,2005,29(16):76-80.
HU Ning,HU Zhijian,ZHENG Gang. Live line parameter measurement of transmission lines with mutual inductance based on GPS technology and integral equations[J]. Power System Technology,2005,29(16):76-80.
- [8] 郭建全,胡志坚,郭建新,等. 互感输电线路零序分布参数带电测量方法研究[J]. 高压电器,2005,41(6):425-427.
GUO Jianquan,HU Zhijian,GUO Jianxin,et al. Study on zero-sequence distributed parameter live line measurement of transmission lines with mutual inductance[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(6):425-427.
- [9] 韦恒,周颀,王毅. 基于故障录波装置的双回输电线路参数在线测量方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):138-142.
WEI Heng,ZHOU Di,WANG Yi. Online parameter measurement of double-circuit transmission lines based on fault recorder[J]. Power System Protection and Control,2011,39(23):138-142.
- [10] 梁志瑞,武长青,苏海锋,等. 一种耦合传输线参数在线测量方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(8):126-130.

- LIANG Zhirui,WU Changqing,SU Haifeng,et al. A parameter measuring method of coupling transmission lines[J]. Power System Protection and Control,2012,40(8):126-130.
- [11] 王春娜,梁志瑞,薛志英,等. 互感线路零序参数带电测量方法研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):87-90.
WANG Chunna,LIANG Zhirui,XU Zhiying,et al. Live line measurement of zero sequence parameters for transmission lines with mutual inductance[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(4):87-90.
- [12] 梁志瑞,杨子强,李鹏,等. 电网输电线路工频参数测量系统的研究[J]. 电网技术,2001,25(3):34-37.
LIANG Zhirui,YANG Ziqiang,LI Peng,et al. Study on measuring system for power frequency parameters of power transmission line[J]. Power System Technology,2001,25(3):34-37.
- [13] HU Zhijian,CHEN Yunping. New method of live line measuring the inductance parameters of transmission lines based on GPS technology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(3):1288-1295.
- [14] XUE Zhiying,LIANG Zhirui. An on-line measurement method of zero-sequence parameters of double-line on the same tower based on WAMS[C]//Power and Energy Engineering Conference 2009. APPEEC,2009. Wuhan,China:[s.n.],2009:1-4.
- [15] 邱光源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2003:426-430.
- [16] 陈国庆,孙才新,张志劲,等. 计及风速影响的500 kV同杆双回线路绕击耐雷性能计算模型研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):108-111.
CHEN Guoqing,SUN Caixin,ZHANG Zhijin,et al. Study on the calculation model of lightning protection performance of shielding failure for 500 kV double circuit transmission line[J]. Proceeding of the CSEE,2003,23(5):108-111.

作者简介:



梁志瑞

梁志瑞(1959-),男,河北邯郸人,教授,从事电力系统自动化、电力系统监测与故障诊断技术的教学与研究工作(E-mail:Zhiruil@sohu.com);

宫瑞邦(1988-),男,山西晋中人,硕士研究生,从事智能化检测与控制、输电线路参数测量方面的研究工作。

Online measuring of zero-sequence parameters for coupled double-circuit transmission line

LIANG Zhirui,GONG Ruibang,NIU Shengsuo,ZHAO Fei,ZHANG Siwei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The structure of coupled double-circuit transmission line is analyzed and its circuit model of zero-sequence distributed parameters and double- Π -shaped circuit model of zero-sequence lumped parameters are built. By combining the increment method with the double- Π -shaped circuit model,an algorithm is developed for the online measuring of zero-sequence lumped parameters. The conversion relationship between zero-sequence lumped parameters and distributed parameters is deduced,based on which,an algorithm is proposed for the online measuring of distributed parameters. Simulative experiments are carried out for 500 kV coupled double-circuit transmission line with different lengths. The simulative results show that the proposed circuit model and online measuring algorithms are applicable to the online measuring of power system zero-sequence parameters.

Key words: online measuring; zero-sequence parameter; distributed parameter; lumped parameter; double- Π -shaped; circuit model; electric power transmission