

DOI: 10.7667/PSPC170106

三相不对称 T 型输电线路参数测量方法研究

罗福玲, 胡志坚, 倪识远, 傅晨宇

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 传统的 T 型输电线路参数测量方法基于线路的三相参数对称, 没有考虑线路三相不对称对参数测量的影响, 而现有的不对称输电线路参数测量方法不适用于含 T 型接线的特殊输电线路。提出了三相不对称 T 型输电线路参数测量方法, 应用 Levenberg-Marquardt(简称 L-M)优化算法求解输电线路非线性参数方程组的参数。通过 PSCAD 软件对单回不对称线路参数测量方法的仿真, 验证了用 L-M 算法计算非线性方程组参数的可行性。然后对所提出的不对称 T 型输电线路参数测量方法进行了仿真, 验证了所提出的不对称 T 型输电线路参数测量方法是正确可行的。

关键词: 不对称线路; T 型线路; 线路参数; 参数测量方法; L-M 算法

Study on measurement method of parameters of three-phase asymmetrical T-connection transmission lines

LUO Fuling, HU Zhijian, NI Shiyuan, FU Chenyu

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The traditional parameter measurement methods of T-connection transmission lines are based on the symmetry of three-phase parameters of the lines, without considering the influence of the asymmetry of three-phase lines on the parameter measurement. The existing parameter measurement methods of asymmetrical transmission lines are not applicable to the T-connection transmission lines. A parameter measurement method of three-phase asymmetrical T-connection transmission lines is proposed. The Levenberg-Marquardt (L-M) optimization algorithm is applied to solve the parameters of the nonlinear parameter equations of the transmission lines. The feasibility of using the L-M algorithm to calculate the parameters of the system of nonlinear equations is verified by the simulation of parameter measurement method of the asymmetrical single-circuit line in PSCAD. Then, the parameter measurement method of the asymmetrical T-connection transmission lines proposed is simulated, which proves that the parameter measurement method of the asymmetrical T-type transmission line is correct and feasible.

This work is supported by Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education (No. 20110141110032).

Key words: asymmetrical lines; T-connection transmission lines; line parameters; parameter measurement method; L-M algorithm

0 引言

输电线路参数是进行电力系统暂稳态分析^[1-3]、状态估计^[4]和继电保护整定计算等必需的参数^[5-7], 研究输电线路参数测量方法具有重要意义。为了充分利用线路走廊和优化投资, 采用 T 型接线的输电线路越来越多^[8-9], 因此需要研究 T 型输电线路参数测量方法。

输电线路参数测量采用实测法^[10-11]。文献[12]

研究了 T 型线路零序阻抗参数测量方法, 假设线路参数三相对称, 只能测量 T 接线输电线路的零序自阻抗, 不能测量序耦合阻抗。现有的 T 型输电线路参数测量^[12-14]都是基于线路三相参数对称的前提下进行的, 没有考虑线路三相不对称对参数测量的影响。

目前, 不换位输电线路越来越多, 输电线路参数的不对称性不能忽略^[15-17]。文献[18-19]研究了不对称输电线路参数测量方法, 可以计算线路的序阻抗和反映线路三相不对称性的序耦合阻抗。但一般接线形式的线路参数测量方法, 不适合含 T 型接线的特殊线路。

常规的参数计算方法都是求解线性参数方程,文献[19]中非线性参数方程,是先根据只含导纳参数的线性方程求出导纳参数,然后导纳参数作为已知量,将含有阻抗参数和导纳参数的非线性方程变成只含阻抗参数的线性方程来求解。由于 T 型线路 T 接处的电压无法测量, T 型线路参数方程均为非线性方程,无法转化成线性方程求解,现有的参数计算方法不再适用于 T 型线路。

本文将 L-M 优化算法引入非线性参数方程求解问题中,并通过仿真单回不对称线路参数验证了本文参数计算方法的正确性。然后针对三相不对称 T 型输电线路,介绍了其参数测量模型和参数方程,应用 L-M 优化算法计算出三相不对称 T 型输电线路的参数,仿真结果表明,本文提出的三相不对称 T 型输电线路参数测量方法能够满足实际工程的精度要求。

1 Levenberg-Marquardt 优化算法及仿真

1.1 Levenberg-Marquardt 优化算法原理

L-M 优化算法^[20]是一种结合牛顿法和梯度下降法优点改进的非线性优化方法,能够根据迭代结果调整收敛方向,使目标函数具有较好收敛性,因此各领域具有广泛应用。

求解式(1)的非线性方程组。

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0 \quad (1)$$

其中: $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x}))^T$; $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 。

L-M 优化算法采用式(2)的求解模型。

$$\min \mathbf{S}(\mathbf{x}) = \min \left\| \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)}) \right\|^2 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}^{(k)}$ 是第 k 次迭代点, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^k 处泰勒级数为 $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(k)})$; $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})$ 是 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 在 $\mathbf{x}^{(k)}$ 处的 Jacobi 矩阵; $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ 是 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 的平方和。

L-M 算法的迭代公式为

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)}) + \lambda^{(k)} \mathbf{I} \right]^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})^T \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (3)$$

式中: $\lambda^{(k)}$ 是第 k 次迭代的步长; $\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)})$ 是 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^k 处的函数值。

L-M 算法求解非线性方程组步骤如下。

(1) 初始化: 给定变量初始值 $\mathbf{x}^{(0)}$, 迭代精度 ε , 初始步长 $\lambda^{(0)}$;

(2) 根据迭代公式求出 $\mathbf{x}^{(k+1)}$, 并计算计算目标函数 $S(\mathbf{x}^{(k+1)})$;

(3) 如果 $S(\mathbf{x}^{(k+1)}) \leq \varepsilon$, 则最优解为 $\mathbf{x}^* = \mathbf{x}^{(k+1)}$, 迭代结束; 否则, 转到步骤(4);

(4) 如果 $S(\mathbf{x}^{(k+1)}) \geq S(\mathbf{x}^{(k)})$, 则增大步长 λ , 令 $\lambda^{(k)} = 4\lambda^{(k)}$, 然后进行步骤(6);

(5) 如果 $S(\mathbf{x}^{(k+1)}) < S(\mathbf{x}^{(k)})$, 则减小步长 λ , 令 $\lambda^{(k)} = 0.25\lambda^{(k)}$, 然后进行步骤(6);

(6) 令 $k = k + 1$, 重复步骤(2)。

1.2 L-M 优化算法求解线路参数仿真

在 PSCAD 中建立单回不对称线路模型, 在线路首端各相分别施加单相电源, 线路末端均接地, 然后分别测量各独立测量方式下单回线路首末两端的电压和电流, 将测量的电压和电流数据代入文献[19]单回不对称线路参数非线性方程组中。

本文采用 L-M 优化算法, 直接求解线路参数非线性方程组, 可以同时求解出单回不对称线路的阻抗参数和导纳参数。

为了验证本文参数计算方法的正确性, 采用本文参数计算方法和文献[19]参数计算方法分别仿真计算单回不对称线路的参数, 并计算参数仿真结果与理论值的相对误差。相对误差定义为: 相对误差 = |仿真值 - 理论值| / 理论值 × 100%。

对单回不对称线路, 采用本文方法仿真的阻抗参数和导纳参数结果分别如表 1 和表 2 所示, 采用文献[19]方法仿真的阻抗参数和导纳参数结果分别如表 3 和表 4 所示。表中, Z_a 、 Z_b 、 Z_c 表示各相自阻抗, Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ac} 表示相间互阻抗, Y_a 、 Y_b 、 Y_c 表示各相自导纳, Y_{ab} 、 Y_{bc} 、 Y_{ac} 表示相间互导纳。

表 1 采用本文方法的单回不对称线路阻抗参数仿真结果

Table 1 Simulation results of impedance parameters of asymmetric single-circuit line with the proposed method

阻抗参数	理论值 / (Ω/km)	本文方法 / (Ω/km)	相对误差/%
Z_a	0.118 47+j0.665 63	0.118 27+j0.664 86	0.1172
Z_b	0.132 43+j0.658 12	0.131 85+j0.657 37	0.1265
Z_c	0.118 47+j0.665 63	0.118 27+j0.664 86	0.1172
Z_{ab}	0.090 661+j0.250 74	0.090 373+j0.252 50	0.1514
Z_{bc}	0.090 661+j0.250 74	0.090 373+j0.250 42	0.1514
Z_{ac}	0.084 03+j0.217 79	0.083 651+j0.217 44	0.1991

表 2 采用本文方法的单回不对称线路导纳参数仿真结果

Table 2 Simulation results of admittance parameters of asymmetric single-circuit line with the proposed method

导纳参数	理论值 / (S/km)	本文方法 / (S/km)	相对误差/%
Y_a	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4331 \times 10^{-6}$	0.0556
Y_b	$j2.5538 \times 10^{-6}$	$j2.5611 \times 10^{-6}$	0.2359
Y_c	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4331 \times 10^{-6}$	0.0556
Y_{ab}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.1550 \times 10^{-7}$	2.6099
Y_{bc}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.1550 \times 10^{-7}$	2.6099
Y_{ac}	$-j1.5192 \times 10^{-7}$	$-j1.4798 \times 10^{-7}$	2.2744

表 3 采用文献[19]方法单回不对称线路阻抗参数仿真结果
Table 3 Simulation results of impedance parameters of asymmetric single-circuit line with method in reference [19]

阻抗参数	理论值 /(Ω/km)	文献[19]方法 /(Ω/km)	相对误差/%
Z_a	0.118 47+j0.665 63	0.118 35+j0.664 81	0.1227
Z_b	0.132 43+j0.658 12	0.131 89+j0.657 39	0.1220
Z_c	0.118 47+j0.665 63	0.118 42+j0.665 07	0.0818
Z_{ab}	0.090 661+j0.250 74	0.090 441+j0.250 41	0.1450
Z_{bc}	0.090 661+j0.250 74	0.090 475+j0.250 52	0.1037
Z_{ac}	0.084 03+j0.217 79	0.083 802+j0.217 44	0.1746

表 4 采用文献[19]方法单回不对称线路导纳参数仿真结果
Table 4 Simulation results of admittance parameters of asymmetric single-circuit line with the method in [19]

导纳参数	理论值 /(S/km)	文献[19]方法 /(S/km)	相对误差/%
Y_a	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4247 \times 10^{-6}$	0.2896
Y_b	$j2.5538 \times 10^{-6}$	$j2.5698 \times 10^{-6}$	0.2834
Y_c	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4247 \times 10^{-6}$	0.2896
Y_{ab}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.1529 \times 10^{-7}$	2.5466
Y_{bc}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.3219 \times 10^{-7}$	2.5466
Y_{ac}	$-j1.5192 \times 10^{-7}$	$-j1.5538 \times 10^{-7}$	2.5955

采用本文方法和文献[19]方法仿真单回不对称线路参数结果对比如图 1 所示。

单回不对称输电线路参数仿真结果对比分析：
采用本文方法和文献[19]方法对单回不对称线路参

数进行仿真计算，两种方法的线路参数测量误差基本一致，说明本文采用 L-M 算法计算线路参数非线性方程组方法是正确可行的。

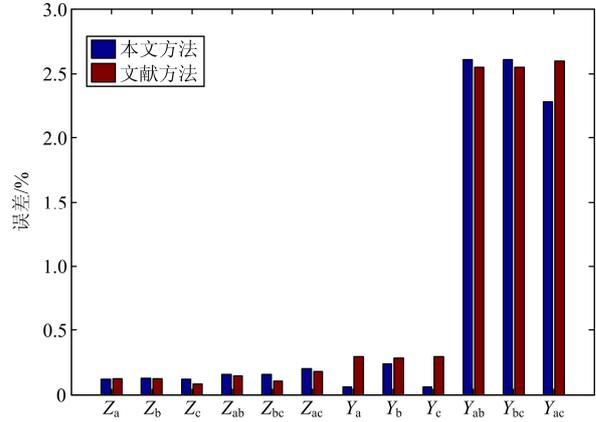


图 1 单回不对称线路参数相对误差对比

Fig. 1 Relative error comparison of parameters of asymmetrical single-circuit line

2 三相不对称 T 型线路参数测量方法

2.1 测量模型

基于不对称输电线路 π 型模型，三相不对称 T 型输电线路的参数模型如图 2 所示。

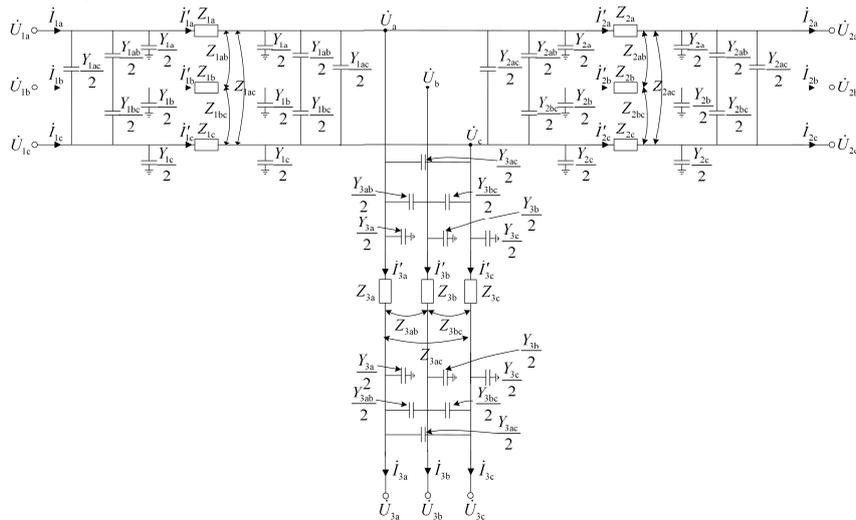


图 2 三相不对称 T 型输电线路参数模型

Fig. 2 Parameter measurement model of three-phase asymmetrical T-connection transmission line

图 2 中， \dot{U}_{ma} 、 \dot{U}_{mb} 、 \dot{U}_{mc} 表示各支路端点三相电压， \dot{I}_{ma} 、 \dot{I}_{mb} 、 \dot{I}_{mc} 表示各支路的三相电流， Z_{ma} 、 Z_{mb} 、 Z_{mc} 、 Z_{mab} 、 Z_{mcb} 、 Z_{mac} 表示各支路阻抗参数， Y_{ma} 、 Y_{mb} 、 Y_{mc} 、 Y_{mab} 、 Y_{mcb} 、 Y_{mac} 表示各支路导纳参数，其中 m 表示 T 型支路编号， $m=1, 2, 3$ 。 \dot{U}_a 、

\dot{U}_b 、 \dot{U}_c 表示 T 触点处的三相电压， \dot{I}'_{ma} 、 \dot{I}'_{mb} 、 \dot{I}'_{mc} 表示流过各支路阻抗的电流，通常只能测量出 T 型各支路端点的电压和电流值，线路中间的电压电流值只能作为参数计算的中间变量。

根据图 2 可以得到三相不对称 T 型输电线路参数方程，见附录 A。消去无法测量的 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 、

\dot{I}'_{ma} 、 \dot{I}'_{mb} 、 \dot{I}'_{mc} ($m=1, 2, 3$) 这些中间变量后, 不对称 T 型线路参数方程变换为式(4)。

$$\begin{cases} (\mathbf{E} + \mathbf{Z}_1 \mathbf{Y}_1) \dot{\mathbf{U}}_1 - (\mathbf{E} + \mathbf{Z}_2 \mathbf{Y}_2) \dot{\mathbf{U}}_2 = \mathbf{Z}_1 \dot{\mathbf{I}}_1 + \mathbf{Z}_2 \dot{\mathbf{I}}_2 \\ (\mathbf{E} + \mathbf{Z}_1 \mathbf{Y}_1) \dot{\mathbf{U}}_1 - (\mathbf{E} + \mathbf{Z}_3 \mathbf{Y}_3) \dot{\mathbf{U}}_3 = \mathbf{Z}_1 \dot{\mathbf{I}}_1 + \mathbf{Z}_3 \dot{\mathbf{I}}_3 \\ (\mathbf{E} + \mathbf{Y}_1 \mathbf{Z}_1) \dot{\mathbf{I}}_1 - (\mathbf{E} + \mathbf{Y}_2 \mathbf{Z}_2) \dot{\mathbf{I}}_2 - (\mathbf{E} + \mathbf{Y}_3 \mathbf{Z}_3) \dot{\mathbf{I}}_3 = \\ (2\mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_1 \mathbf{Z}_1 \mathbf{Y}_1) \dot{\mathbf{U}}_1 + (2\mathbf{Y}_2 + \mathbf{Y}_2 \mathbf{Z}_2 \mathbf{Y}_2) \dot{\mathbf{U}}_2 + \\ (2\mathbf{Y}_3 + \mathbf{Y}_3 \mathbf{Z}_3 \mathbf{Y}_3) \dot{\mathbf{U}}_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 是单位矩阵; \mathbf{Z}_1 、 \mathbf{Z}_2 、 \mathbf{Z}_3 分别表示三相不对称 T 型线路支路 1、支路 2 和支路 3 阻抗参数矩阵; \mathbf{Y}_1 、 \mathbf{Y}_2 、 \mathbf{Y}_3 分别表示支路 1、支路 2 和支路 3 导纳参数矩阵; $\dot{\mathbf{U}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_2$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_3$ 分别表示支路 1、支路 2 和支路 3 端点电压矩阵; $\dot{\mathbf{I}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{I}}_2$ 、 $\dot{\mathbf{I}}_3$ 分别表示支路 1、支路 2 和支路 3 端点电流矩阵。

$$\text{其中: } \mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} Z_{1a} & Z_{1ab} & Z_{1ac} \\ Z_{1ab} & Z_{1b} & Z_{1bc} \\ Z_{1ac} & Z_{1bc} & Z_{1c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} Z_{2a} & Z_{2ab} & Z_{2ac} \\ Z_{2ab} & Z_{2b} & Z_{2bc} \\ Z_{2ac} & Z_{2bc} & Z_{2c} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_3 = \begin{bmatrix} Z_{3a} & Z_{3ab} & Z_{3ac} \\ Z_{3ab} & Z_{3b} & Z_{3bc} \\ Z_{3ac} & Z_{3bc} & Z_{3c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Y}_1 = \begin{bmatrix} Y_{1a} + Y_{1ab} + Y_{1ac} & Y_{1ab} & Y_{1ac} \\ Y_{1ab} & Y_{1b} + Y_{1ab} + Y_{1bc} & Y_{1bc} \\ Y_{1ac} & Y_{1bc} & Y_{1c} + Y_{1ac} + Y_{1bc} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} Y_{2a} + Y_{2ab} + Y_{2ac} & Y_{2ab} & Y_{2ac} \\ Y_{2ab} & Y_{2b} + Y_{2ab} + Y_{2bc} & Y_{2bc} \\ Y_{2ac} & Y_{2bc} & Y_{2c} + Y_{2ac} + Y_{2bc} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Y}_3 = \begin{bmatrix} Y_{3a} + Y_{3ab} + Y_{3ac} & Y_{3ab} & Y_{3ac} \\ Y_{3ab} & Y_{3b} + Y_{3ab} + Y_{3bc} & Y_{3bc} \\ Y_{3ac} & Y_{3bc} & Y_{3c} + Y_{3ac} + Y_{3bc} \end{bmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_1 = [\dot{U}_{1a} \quad \dot{U}_{1b} \quad \dot{U}_{1c}]^T; \quad \dot{\mathbf{I}}_1 = [\dot{I}_{1a} \quad \dot{I}_{1b} \quad \dot{I}_{1c}]^T;$$

$$\dot{\mathbf{U}}_2 = [\dot{U}_{2a} \quad \dot{U}_{2b} \quad \dot{U}_{2c}]^T; \quad \dot{\mathbf{I}}_2 = [\dot{I}_{2a} \quad \dot{I}_{2b} \quad \dot{I}_{2c}]^T;$$

$$\dot{\mathbf{U}}_3 = [\dot{U}_{3a} \quad \dot{U}_{3b} \quad \dot{U}_{3c}]^T; \quad \dot{\mathbf{I}}_3 = [\dot{I}_{3a} \quad \dot{I}_{3b} \quad \dot{I}_{3c}]^T.$$

2.2 测量方式

根据图 2 的三相不对称 T 型输电线路参数模型, 采用停电测量方法时, 支路 2 和支路 3 末端均接地, 在支路 1 的 A、B、C 相和地之间分别接入单相电源, 支路 1 的未加压相可以有接地或者开路两种方式, 然后测量各支路首端的电压与电流以及各支路末端的电压与电流, 在支路 1 加压的测量方式如表 5 所示。

与支路 1 加压的测量方式原理相同, 在支路 2 或者支路 3 分别分相接入单相电源, 其他两条支路末端短路接地, 可以得到多种独立的测量方式。

2.3 测量方法

三相不对称 T 型输电线路参数方程组(4)中所有的方程都是关于阻抗参数 Z 和导纳参数 Y 的非线性方程, 不能再文献[19]的方法求解。

表 5 三相不对称 T 型线路支路 1 加压的测量方式

Table 5 Measurement methods of asymmetrical T-connection lines when branch 1 is applied with power supply

测量方式	支路 1			支路 2	支路 3
	A 相	B 相	C 相		
1	加单相电源	接地或开路	接地或开路	接地	接地
2	接地或开路	加单相电源	接地或开路	接地	接地
3	接地或开路	接地或开路	加单相电源	接地	接地

不对称 T 型线路共有 36 个参数, 式(4)中只有 9 个方程, 因此需要采用多种独立的测量方式来求解出所有的参数。

本文选择 2.2 节中 k 种独立的测量方式, 测量 k 组独立的各支路电压电流数据代入参数方程组中, 则式(4)中 $\dot{\mathbf{U}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_2$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_3$ 、 $\dot{\mathbf{I}}_1$ 、 $\dot{\mathbf{I}}_2$ 、 $\dot{\mathbf{I}}_3$ 变为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{U}}_1 &= \begin{bmatrix} \dot{U}_{1a}^{(1)} & \dot{U}_{1a}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{1a}^{(k)} \\ \dot{U}_{1b}^{(1)} & \dot{U}_{1b}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{1b}^{(k)} \\ \dot{U}_{1c}^{(1)} & \dot{U}_{1c}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{1c}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{I}_{1a}^{(1)} & \dot{I}_{1a}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{1a}^{(k)} \\ \dot{I}_{1b}^{(1)} & \dot{I}_{1b}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{1b}^{(k)} \\ \dot{I}_{1c}^{(1)} & \dot{I}_{1c}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{1c}^{(k)} \end{bmatrix}; \\ \dot{\mathbf{U}}_2 &= \begin{bmatrix} \dot{U}_{2a}^{(1)} & \dot{U}_{2a}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{2a}^{(k)} \\ \dot{U}_{2b}^{(1)} & \dot{U}_{2b}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{2b}^{(k)} \\ \dot{U}_{2c}^{(1)} & \dot{U}_{2c}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{2c}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_2 = \begin{bmatrix} \dot{I}_{2a}^{(1)} & \dot{I}_{2a}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{2a}^{(k)} \\ \dot{I}_{2b}^{(1)} & \dot{I}_{2b}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{2b}^{(k)} \\ \dot{I}_{2c}^{(1)} & \dot{I}_{2c}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{2c}^{(k)} \end{bmatrix}; \\ \dot{\mathbf{U}}_3 &= \begin{bmatrix} \dot{U}_{3a}^{(1)} & \dot{U}_{3a}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{3a}^{(k)} \\ \dot{U}_{3b}^{(1)} & \dot{U}_{3b}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{3b}^{(k)} \\ \dot{U}_{3c}^{(1)} & \dot{U}_{3c}^{(2)} & \dots & \dot{U}_{3c}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{I}}_3 = \begin{bmatrix} \dot{I}_{3a}^{(1)} & \dot{I}_{3a}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{3a}^{(k)} \\ \dot{I}_{3b}^{(1)} & \dot{I}_{3b}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{3b}^{(k)} \\ \dot{I}_{3c}^{(1)} & \dot{I}_{3c}^{(2)} & \dots & \dot{I}_{3c}^{(k)} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

然后采用 L-M 优化算法, 求解式(4)的非线性方程组, 直接求解出三相不对称 T 型输电线路的所有参数。

3 三相不对称 T 型输电线路参数仿真

3.1 仿真模型

在 PSCAD 中搭建三相不对称 T 型输电线路仿真模型, 如图 3 所示。与文献[21]选择 PSCAD 贝杰龙参数线路模型不同, 实际 T 型线路距离较短, 本文设置支路 1、支路 2 和支路 3 线路长度分别为 30 km、20 km 和 15 km, 使用 PI 型线路模型。T 型线路各支路空间位置如图 4 所示, C_1 、 C_2 、 C_3 为三相输电线, G_1 、 G_2 为避雷线, 三个支路线路均采用不换位架构形式。

3.2 仿真结果

文献[12]研究 T 型输电线路零序阻抗参数测量方法, 其中 T 型线路模型只包括阻抗参数。为了验证本文方法测量 T 型线路参数的准确性, 本文利用文献[12]的测量方法来仿真测量三相不对称 T 型线路的阻抗参数, 并与本文方法的阻抗参数测量结果进行对比。

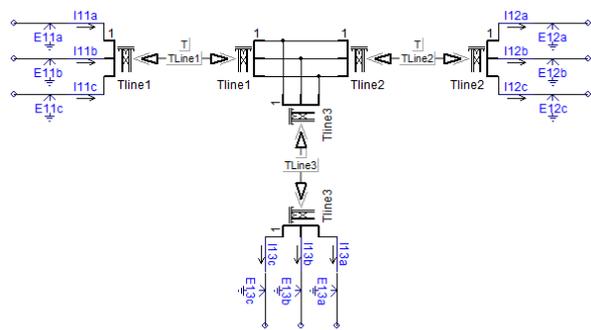


图 3 三相不对称 T 型线路参数仿真模型

Fig. 3 Parameter simulation model for three-phase asymmetrical T-connection lines

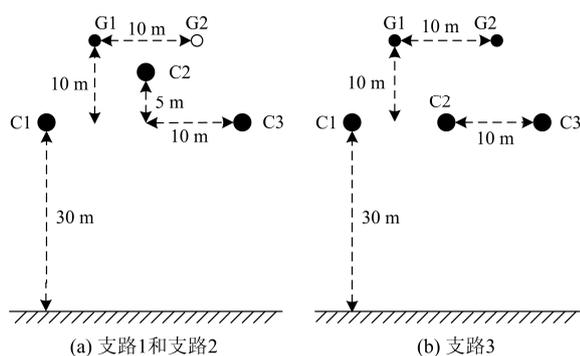


图 4 T 型线路各支路导线空间位置示意图

Fig. 4 Space position diagram of T-connection lines

在 PSCAD 中利用图 3 的仿真模型, 选择 k 种独立的测量方式, 测量 k 组独立的各支路三相端点电压和电流, 然后采用文献[12]方法仿真测量三相不对称 T 型线路阻抗参数 Z , 采用本文方法仿真测量阻抗参数 Z 和导纳参数 Y , 并计算其相对误差。

根据仿真结果, 支路 1、支路 2 和支路 3 的参数测量误差结果大致相同。此处只给出支路 1 的参数仿真结果, 支路 2 和支路 3 的参数仿真结果见附录 B。

采用文献[12]方法仿真的三相不对称 T 型线路支路 1 单位长度阻抗参数结果如表 6 所示; 采用本文方法仿真的支路 1 单位长度阻抗参数 Z 和导纳参数 Y 结果分别如表 7 和表 8 所示。采用文献[12]方法和本文方法仿真测量三相不对称 T 型线路支路 1 阻抗参数相对误差对比如图 5 所示。

由图 5 可知, 采用本文方法的阻抗参数测量相对误差比文献[12]方法要小, 说明本文方法测量的三相不对称 T 型线路阻抗参数结果正确。

采用本文方法测量的三相不对称 T 型线路各支路阻抗参数和导纳参数的相对误差分别如图 6 和图 7 所示。

表 6 采用文献[12]方法的支路 1 单位长度阻抗参数仿真结果

Table 6 Simulation results of unit length impedance parameters of branch 1 with the method in reference [12]

阻抗参数	理论值 /(Ω /km)	文献[9]方法 /(Ω /km)	相对误差/%
Z_{1a}	0.118 47+j0.665 63	0.118 99+j0.666 26	0.1060
Z_{1b}	0.132 43+j0.658 12	0.132 91+j0.658 75	0.1054
Z_{1c}	0.118 47+j0.6656	0.118 99+j0.666 26	0.1060
Z_{1ab}	0.090 661+j0.2507	0.091 148+j0.2512	0.2370
Z_{1bc}	0.090 661+j0.2507	0.091 148+j0.2512	0.2370
Z_{1ac}	0.084 26+j0.2178	0.084 378+j0.2182	0.2210

表 7 采用本文方法的支路 1 单位长度阻抗参数仿真结果

Table 7 Simulation results of unit length impedance parameters of branch 1 with the proposed method

阻抗参数	理论值 /(Ω /km)	本文方法 /(Ω /km)	相对误差/%
Z_{1a}	0.118 47+j0.665 63	0.118 93+j0.666 22	0.0978
Z_{1b}	0.132 43+j0.658 12	0.132 85+j0.658 74	0.1036
Z_{1c}	0.118 47+j0.6656	0.118 93+j0.666 22	0.0978
Z_{1ab}	0.090 661+j0.2507	0.091 085+j0.251 21	0.2171
Z_{1bc}	0.090 661+j0.2507	0.091 085+j0.251 21	0.2171
Z_{1ac}	0.084 026+j0.2178	0.084 321+j0.218 15	0.1902

表 8 采用本文方法的支路 1 单位长度导纳参数仿真结果

Table 8 Simulation results of unit length admittance parameters of branch 1 with the proposed method

导纳参数	理论值 /(S /km)	本文方法	相对误差/%
Y_{1a}	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4190 \times 10^{-6}$	0.2911
Y_{1b}	$j2.5538 \times 10^{-6}$	$j2.5586 \times 10^{-6}$	0.1864
Y_{1c}	$j2.4260 \times 10^{-6}$	$j2.4190 \times 10^{-6}$	0.2911
Y_{1ab}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.2880 \times 10^{-7}$	1.5604
Y_{1bc}	$-j3.2374 \times 10^{-7}$	$-j3.2880 \times 10^{-7}$	1.5604
Y_{1ac}	$-j1.5192 \times 10^{-7}$	$-j1.5498 \times 10^{-7}$	2.0117

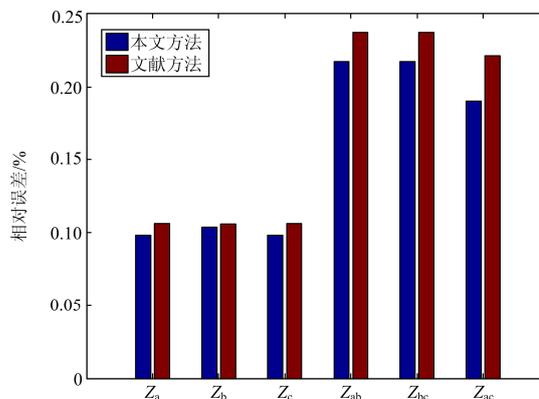


图 5 支路 1 阻抗参数相对误差对比

Fig. 5 Relative error comparison of impedance parameters of branch 1

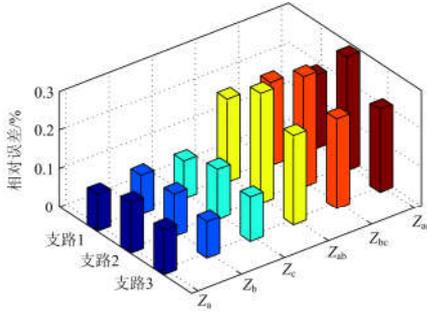


图 6 各支路阻抗参数相对误差对比图

Fig. 6 Relative error comparison of impedance parameters of each branch

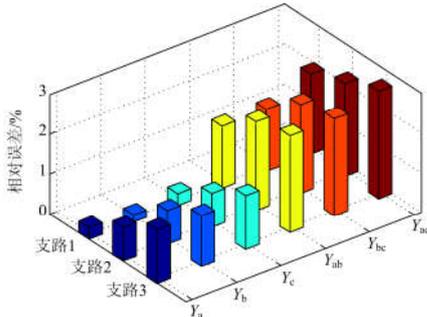


图 7 各支路导纳参数相对误差对比图

Fig. 7 Relative error comparison of admittance parameters of each branch

由图 6 和图 7 可知，采用本文方法测量的三相不对称 T 型线路互阻抗参数误差要大于自阻抗参数误差，但都在 0.3% 以内；互导纳参数误差大于自导纳参数误差，但都在 3% 以内，能够满足实际工程的测量精度要求。

4 结论

本文提出了三相不对称 T 型线路参数测量方法，采用 L-M 优化算法，分别计算单回不对称线路和三相不对称 T 型线路的参数，并与文献[19]中的单回不对称线路和文献[12]中的 T 型线路的参数测量方法进行了对比，结论如下：

(1) 单回不对称线路采用文献[19]方法和本文方法，参数测量误差差别很小，说明本文采用 L-M 优化算法求解非线性参数方程组是正确可行的。

(2) 采用本文方法测量三相不对称 T 型线路的阻抗参数，其测量误差比文献[12]方法的测量误差小，说明本文方法适用于测量参数较多的不对称 T 型线路。

(3) 本文方法测量三相不对称 T 型线路的互参数误差大于自参数误差，但阻抗参数误差在 0.3% 以内，导纳参数误差在 3% 以内，能够满足实际工程的测量精度要求。

附录 A

三相不对称 T 型输电线路参数方程如下：

$$\begin{cases} \dot{U}_{1a} - \dot{U}_{2a} = Z_{1a} \dot{I}'_{1a} + Z_{1ab} \dot{I}'_{1b} + Z_{1ac} \dot{I}'_{1c} + Z_{2a} \dot{I}'_{2a} + Z_{2ab} \dot{I}'_{2b} + Z_{2ac} \dot{I}'_{2c} \\ \dot{U}_{1a} - \dot{U}_{3a} = Z_{1a} \dot{I}'_{1a} + Z_{1ab} \dot{I}'_{1b} + Z_{1ac} \dot{I}'_{1c} + Z_{3a} \dot{I}'_{3a} + Z_{3ab} \dot{I}'_{3b} + Z_{3ac} \dot{I}'_{3c} \\ \dot{I}_{1a} - \dot{I}_{2a} - \dot{I}_{3a} = 0.5 \times Y_{1a} (\dot{U}_{1a} + \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{1ab} (\dot{U}_{1a} - \dot{U}_{1b} + \dot{U}_a - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{1ac} (\dot{U}_{1a} - \dot{U}_{1c} + \dot{U}_a - \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{2a} (\dot{U}_{2a} + \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{2ab} (\dot{U}_{2a} - \dot{U}_{2b} + \dot{U}_a - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{2ac} (\dot{U}_{2a} - \dot{U}_{2c} + \dot{U}_a - \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{3a} (\dot{U}_{3a} + \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{3ab} (\dot{U}_{3a} - \dot{U}_{3b} + \dot{U}_a - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{3ac} (\dot{U}_{3a} - \dot{U}_{3c} + \dot{U}_a - \dot{U}_c) \\ \dot{U}_{1b} - \dot{U}_{2b} = Z_{1ab} \dot{I}'_{1a} + Z_{1b} \dot{I}'_{1b} + Z_{1bc} \dot{I}'_{1c} + Z_{2ab} \dot{I}'_{2a} + Z_{2b} \dot{I}'_{2b} + Z_{2bc} \dot{I}'_{2c} \\ \dot{U}_{1b} - \dot{U}_{3b} = Z_{1ab} \dot{I}'_{1a} + Z_{1b} \dot{I}'_{1b} + Z_{1bc} \dot{I}'_{1c} + Z_{3ab} \dot{I}'_{3a} + Z_{3b} \dot{I}'_{3b} + Z_{3bc} \dot{I}'_{3c} \\ \dot{I}_{1b} - \dot{I}_{2b} - \dot{I}_{3b} = 0.5 \times Y_{1ab} (\dot{U}_{1b} - \dot{U}_{1a} + \dot{U}_b - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{1b} (\dot{U}_{1b} + \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{1bc} (\dot{U}_{1b} - \dot{U}_{1c} + \dot{U}_b - \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{2ab} (\dot{U}_{2b} - \dot{U}_{2a} + \dot{U}_b - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{2b} (\dot{U}_{2b} + \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{2bc} (\dot{U}_{2b} - \dot{U}_{2c} + \dot{U}_b - \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{3ab} (\dot{U}_{3b} - \dot{U}_{3a} + \dot{U}_b - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{3b} (\dot{U}_{3b} + \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{3bc} (\dot{U}_{3b} - \dot{U}_{3c} + \dot{U}_b - \dot{U}_c) \\ \dot{U}_{1c} - \dot{U}_{2c} = Z_{1ac} \dot{I}'_{1a} + Z_{1bc} \dot{I}'_{1b} + Z_{1c} \dot{I}'_{1c} + Z_{2ac} \dot{I}'_{2a} + Z_{2bc} \dot{I}'_{2b} + Z_{2c} \dot{I}'_{2c} \\ \dot{U}_{1c} - \dot{U}_{3c} = Z_{1ac} \dot{I}'_{1a} + Z_{1bc} \dot{I}'_{1b} + Z_{1c} \dot{I}'_{1c} + Z_{3ac} \dot{I}'_{3a} + Z_{3bc} \dot{I}'_{3b} + Z_{3c} \dot{I}'_{3c} \\ \dot{I}_{1c} - \dot{I}_{2c} - \dot{I}_{3c} = 0.5 \times Y_{1ac} (\dot{U}_{1c} - \dot{U}_{1a} + \dot{U}_c - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{1bc} (\dot{U}_{1c} - \dot{U}_{1b} + \dot{U}_c - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{1c} (\dot{U}_{1c} + \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{2ac} (\dot{U}_{2c} - \dot{U}_{2a} + \dot{U}_c - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{2bc} (\dot{U}_{2c} - \dot{U}_{2b} + \dot{U}_c - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{2c} (\dot{U}_{2c} + \dot{U}_c) + \\ \quad 0.5 \times Y_{3ac} (\dot{U}_{3c} - \dot{U}_{3a} + \dot{U}_c - \dot{U}_a) + 0.5 \times Y_{3bc} (\dot{U}_{3c} - \dot{U}_{3b} + \dot{U}_c - \dot{U}_b) + 0.5 \times Y_{3c} (\dot{U}_{3c} + \dot{U}_c) \end{cases}$$

其中:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_{1a} - Z_{1a} \dot{I}'_{1a} - Z_{1ab} \dot{I}'_{1b} - Z_{1ac} \dot{I}'_{1c} = \\ \dot{U}_{2a} + Z_{2a} \dot{I}'_{2a} + Z_{2ab} \dot{I}'_{2b} + Z_{2ac} \dot{I}'_{2c} = \\ \dot{U}_{3a} + Z_{3a} \dot{I}'_{3a} + Z_{3ab} \dot{I}'_{3b} + Z_{3ac} \dot{I}'_{3c} \\ \dot{U}_b = \dot{U}_{1b} - Z_{1ab} \dot{I}'_{1a} - Z_{1b} \dot{I}'_{1b} - Z_{1bc} \dot{I}'_{1c} = \\ \dot{U}_{2b} + Z_{2ab} \dot{I}'_{2a} + Z_{2b} \dot{I}'_{2b} + Z_{2bc} \dot{I}'_{2c} = \\ \dot{U}_{3b} + Z_{3ab} \dot{I}'_{3a} + Z_{3b} \dot{I}'_{3b} + Z_{3bc} \dot{I}'_{3c} \\ \dot{U}_c = \dot{U}_{1c} - Z_{1ac} \dot{I}'_{1a} - Z_{1bc} \dot{I}'_{1b} - Z_{1c} \dot{I}'_{1c} = \\ \dot{U}_{2c} + Z_{2ac} \dot{I}'_{2a} + Z_{2bc} \dot{I}'_{2b} + Z_{2c} \dot{I}'_{2c} = \\ \dot{U}_{3c} + Z_{3ac} \dot{I}'_{3a} + Z_{3bc} \dot{I}'_{3b} + Z_{3c} \dot{I}'_{3c} \end{cases} \begin{cases} \dot{I}'_{1a} = \dot{I}_{1a} - 0.5 \times Y_{1a} \dot{U}_{1a} - 0.5 \times Y_{1ab} (\dot{U}_{1a} - \dot{U}_{1b}) - 0.5 \times Y_{1ac} (\dot{U}_{1a} - \dot{U}_{1c}) \\ \dot{I}'_{1b} = \dot{I}_{1b} - 0.5 \times Y_{1ab} (\dot{U}_{1b} - \dot{U}_{1a}) - 0.5 \times Y_{1b} \dot{U}_{1b} - 0.5 \times Y_{1bc} (\dot{U}_{1b} - \dot{U}_{1c}) \\ \dot{I}'_{1c} = \dot{I}_{1c} - 0.5 \times Y_{1ac} (\dot{U}_{1c} - \dot{U}_{1a}) - 0.5 \times Y_{1bc} (\dot{U}_{1c} - \dot{U}_{1b}) + 0.5 \times Y_{1c} \dot{U}_{1c} \\ \dot{I}'_{2a} = \dot{I}_{2a} + 0.5 \times Y_{2a} \dot{U}_{2a} + 0.5 \times Y_{2ab} (\dot{U}_{2a} - \dot{U}_{2b}) + 0.5 \times Y_{2ac} (\dot{U}_{2a} - \dot{U}_{2c}) \\ \dot{I}'_{2b} = \dot{I}_{2b} + 0.5 \times Y_{2ab} (\dot{U}_{2b} - \dot{U}_{2a}) + 0.5 \times Y_{2b} \dot{U}_{2b} + 0.5 \times Y_{2bc} (\dot{U}_{2b} - \dot{U}_{2c}) \\ \dot{I}'_{2c} = \dot{I}_{2c} + 0.5 \times Y_{2ac} (\dot{U}_{2c} - \dot{U}_{2a}) + 0.5 \times Y_{2bc} (\dot{U}_{2c} - \dot{U}_{2b}) + 0.5 \times Y_{2c} \dot{U}_{2c} \\ \dot{I}'_{3a} = \dot{I}_{3a} + 0.5 \times Y_{3a} \dot{U}_{3a} + 0.5 \times Y_{3ab} (\dot{U}_{3a} - \dot{U}_{3b}) + 0.5 \times Y_{3ac} (\dot{U}_{3a} - \dot{U}_{3c}) \\ \dot{I}'_{3b} = \dot{I}_{3b} + 0.5 \times Y_{3ab} (\dot{U}_{3b} - \dot{U}_{3a}) + 0.5 \times Y_{3b} \dot{U}_{3b} + 0.5 \times Y_{3bc} (\dot{U}_{3b} - \dot{U}_{3c}) \\ \dot{I}'_{3c} = \dot{I}_{3c} + 0.5 \times Y_{3ac} (\dot{U}_{3c} - \dot{U}_{3a}) + 0.5 \times Y_{3bc} (\dot{U}_{3c} - \dot{U}_{3b}) + 0.5 \times Y_{3c} \dot{U}_{3c} \end{cases}$$

附录 B

表 1 采用文献[12]方法和本文方法仿真三相不对称 T 型线路支路 2 和支路 3 单位长度阻抗参数结果

Table 1 Simulation results of unit length impedance parameters of branch 2 and branch 3 using the method in reference [12] and the method in this paper respectively

支路名称	阻抗参数	理论值 /(Ω/km)	文献[12]方法 /(Ω/km)	相对误差/%	本文方法 /(Ω/km)	相对误差/%
支路 2	Z _{2a}	0.118 47+j0.665 63	0.119 66+j0.666 35	0.1359	0.119 58+j0.666 33	0.1316
	Z _{2b}	0.132 43+j0.658 12	0.133 50+j0.658 75	0.1232	0.133 38+j0.658 69	0.1110
	Z _{2c}	0.118 47+j0.6656	0.119 66+j0.666 35	0.1359	0.119 58+j0.666 33	0.1316
	Z _{2ab}	0.090 661+j0.2507	0.091 451+j0.2514	0.3141	0.091 334+j0.251 31	0.2872
	Z _{2bc}	0.090 661+j0.2507	0.091 451+j0.2513	0.3141	0.091 334+j0.251 31	0.2872
	Z _{2ac}	0.084 026+j0.2178	0.084 634+j0.2184	0.3160	0.084 550+j0.218 32	0.2946
支路 3	Z _{3a}	0.118 47+j0.665 63	0.119 48+j0.666 23	0.1147	0.119 17+j0.666 29	0.1154
	Z _{3b}	0.122 99+j0.663 01	0.123 88+j0.663 55	0.1041	0.123 75+j0.663 50	0.0932
	Z _{3c}	0.118 47+j0.665 63	0.119 48+j0.666 23	0.1147	0.119 17+j0.666 29	0.1154
	Z _{3ab}	0.086 459+j0.2600	0.087 009+j0.2606	0.2482	0.086 831+j0.260 56	0.2321
	Z _{3bc}	0.086 459+j0.2600	0.087 009+j0.2606	0.2482	0.086 831+j0.260 56	0.2321
	Z _{3ac}	0.084 026+j0.2178	0.084 367+j0.2182	0.23452	0.084 133+j0.218 29	0.2149

表 2 采用本文方法仿真三相不对称 T 型线路支路 2 和支路 3 单位长度导纳参数结果

Table 2 Simulation results of unit length admittance parameters of branch 2 and branch 3 using the method in this paper

支路名称	导纳参数	理论值 /(S/km)	本文方法 /(S/km)	相对误差/%
支路 2	Y _{2a}	j2.4260 × 10 ⁻⁶	j2.4054 × 10 ⁻⁶	0.8524
	Y _{2b}	j2.5538 × 10 ⁻⁶	j2.5321 × 10 ⁻⁶	0.8490
	Y _{2c}	j2.4260 × 10 ⁻⁶	j2.4054 × 10 ⁻⁶	0.8524
	Y _{2ab}	-j3.2374 × 10 ⁻⁷	-j3.1655 × 10 ⁻⁷	2.2211
	Y _{2bc}	-j3.2374 × 10 ⁻⁷	-j3.1655 × 10 ⁻⁷	2.2211
	Y _{2ac}	-j1.5192 × 10 ⁻⁷	-j1.4838 × 10 ⁻⁷	2.3294
支路 3	Y _{3a}	j2.4383 × 10 ⁻⁶	j2.4052 × 10 ⁻⁶	1.3558
	Y _{3b}	j2.5210 × 10 ⁻⁶	j2.4888 × 10 ⁻⁶	1.2784
	Y _{3c}	j2.4383 × 10 ⁻⁶	j2.4052 × 10 ⁻⁶	1.3558
	Y _{3ab}	-j3.6650 × 10 ⁻⁷	-j3.7540 × 10 ⁻⁷	2.4285
	Y _{3bc}	-j3.6650 × 10 ⁻⁷	-j3.7540 × 10 ⁻⁷	2.4285
	Y _{3ac}	-j1.3968 × 10 ⁻⁷	-j1.3591 × 10 ⁻⁷	2.6991

参考文献

- [1] 卢艳, 王吉峰, 李培江. 输电线路参数对电力系统暂态稳定性的影响研究[J]. 电源技术, 2015, 39(3): 604-605.
LU Yan, WANG Jifeng, LI Peijiang. Effect study of parameters of transmission line on transient stability of power system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(3): 604-605.
- [2] 孙秋芹, 汪泓, 刘洋, 等. 特高压输电线路潜供电流的暂态特性研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 97-103.
SUN Qiuqing, WANG Feng, LIU Yang, et al. Research on transient characteristics of secondary arc current of ultra high voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 97-103.
- [3] 章海静, 梁振锋, 彭书涛, 等. 线路故障引起电压暂降影响因素的研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 7-11.
ZHANG Haijing, LIANG Zhenfeng, PENG Shutao, et al. Study on the influencing factors of voltage sag induced by transmission line faults[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 7-11.
- [4] 王茂海, 齐霞. 输电线路电阻参数误差对无功状态估计结果的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 143-147.
WANG Maohai, QI Xia. Analysis of transmission line resistance parameter's impacts on reactive power estimation results[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 143-147.
- [5] 张苏敏, 古斌, 曹良丰, 等. 输电线路相差保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 76-83.
ZHANG Sumin, GU Bin, CAO Liangfeng, et al. A novel phase comparison protection principle for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 76-83.
- [6] 郭小红, 朱永利, 陈旭, 等. 输电线路雷击组合测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 7-12.
GUO Xiaohong, ZHU Yongli, CHEN Xu, et al. A new combined lightning locating algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 7-12.
- [7] 贾清泉, 王振宇, 王宁, 等. 基于参数辨识的消弧线圈接地电网单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 77-85.
JIA Qingquan, WANG Zhenyu, WANG Ning, et al. A single-phase-to-ground fault locating algorithm for arc-suppression-coil earthed power distribution systems based on parameter estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 77-85.
- [8] 雷振锋, 李旭, 倪传坤, 等. 关于 T 接线路差动保护应用的特殊问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 57-59.
LEI Zhenfeng, LI Xu, NI Chuankun, et al. Discussing some special problems about application of teed line differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 57-59.
- [9] 于仲安, 程明钊, 郭培育, 等. 一侧同杆四回线与两侧同杆双回线构成的 T 型输电线路故障测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 8-14.
YU Zhongan, CHENG Mingzhao, GUO Peiyu, et al. A new fault locating of T-type transmission line consisting of four parallel-line and double circuit[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 8-14.
- [10] 胡志坚, 程小敏. 输电线路零序阻抗参数测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 25-31.
HU Zhijian, CHENG Xiaomin. Measurement methods of zero-sequence impedance parameters for transmission lines[J]. Journal of Electric Science and Technology, 2010, 25(3): 25-31.
- [11] 韦恒, 周嶝, 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.
- [12] 熊启新, 张承学, 胡志坚, 等. T 型输电线路零序阻抗参数带电测量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 65-68.
XIONG Qixin, ZHANG Chengxue, HU Zhijian, et al. Live line measurement to the zero sequence impedance parameters of multi-terminal transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 65-68.
- [13] 方丽华, 胡志坚. 含 T 接线互感线路参数带电测量方法及工程应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 204-208.
FANG Lihua, HU Zhijian. A new method for live line measurement of zero-sequence parameters of transmission line containing T-connection transmission line with mutual

- inductance and its engineering application[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 204-208.
- [14] 李炜, 胡志坚. 基于积分方程的 T 接线输电线路零序参数带电测量方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 86-89.
- LI Wei, HU Zhijian. Live line measurement based on integral equations for zero-sequence parameters of T-connection transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 86-89.
- [15] 朱庆钢, 刘前进, 陈海涛, 等. 同塔双回不换位线路电压不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 73-79.
- ZHU Qinggang, LIU Qianjin, CHEN Haitao, et al. Study on voltage imbalance of un-transposed double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 73-79.
- [16] 隆茂, 李田刚, 安然然, 等. 不换位线路参数不对称对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 90-94.
- LONG Mao, LI Tiangang, AN Ranran, et al. Analysis of line asymmetry parameters' impact on distance protection considering the untransposed transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 90-94.
- [17] 刘琦, 郇能灵, 范春菊, 等. 基于单端电气量的不对称参数同塔四回线选相方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 178-186.
- LIU Qi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault phase selection scheme for quadruple-circuit transmission lines with asymmetrical parameter based on single-ended electrical quantities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 178-186.
- [18] 尹建华, 赵艳军, 陈晓科, 等. 一种三相非对称输电线路工频阻抗参数测试方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 96-98.
- YIN Jianhua, ZHAO Yanjun, CHEN Xiaoke, et al. A new measurement method for power frequency impedance parameters of three phase asymmetric transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 96-98.
- [19] 赵进全, 尹建华, 夏建生, 等. 一种非对称输电线路参数的在线测量方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 80-84.
- ZHAO Jinquan, YIN Jianhua, XIA Jiansheng, et al. An online measuring method of the parameters for asymmetric transmission lines[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 80-84.
- [20] 何叶丹, 马昌凤. 求解非线性方程组的一个修正非单调 L-M 算法[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2013, 29(4): 15-22.
- HE Yedan, MA Changfeng. A modified nonmonotone L-M method for solving nonlinear system of equations[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2013, 29(4): 15-22.
- [21] 程星星, 张怿宁, 王健, 等. 高压直流接地极线路故障特性仿真及其故障测距新算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 105-110.
- CHENG Xingxing, ZHANG Yining, WANG Jian, et al. HVDC grounding electrode line fault simulation and its new fault location algorithm research[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 105-110.

收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-03-24

作者简介:

罗福玲(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与运行; E-mail: 994412234@qq.com

胡志坚(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源接入与分布式发电、输电线路参数带电测量; E-mail: zhijian_hu@163.com

倪识远(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输电线路参数测量。

(编辑 葛艳娜)