

DOI: 10.7667/PSPC160756

基于微扰法的不换位输电线路相模变换

张庆超, 易乐钊

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 传统的对称分量法适用于理想换位三相输电线路, 对于不对称程度较大的不换位单回输电线路, 其结果误差较大。为获得更精确的结果, 采用模分量法, 该方法的关键是求解相模变换矩阵。考虑了架空地线对不换位线路阻抗矩阵的影响, 并运用微扰理论, 通过构造因不换位造成的阻抗矩阵微扰量, 可以求解出不同精度的相模变换矩阵。将求得的变换矩阵用于模分量理论进行故障分析, 所得的计算结果与实际结果相比误差很小, 验证了该方法的可行性。

关键词: 不换位输电线路; 相模变换; 模分量法; 微扰法; 故障测距

Phase-mode transformation of un-transposed transmission lines based on perturbation method

ZHANG Qingchao, YI Lezhao

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Traditional symmetrical component method only works under the condition of symmetrical parameters of transposed transmission lines. The error can't be ignored if the transmission lines are un-transposed single-circuit transmission lines. The modal analysis can be used for better results. The key of the modal analysis is to get a phase-mode transformation matrix. This paper considers the effect of the existence of the earth wire and uses perturbation theory to get phase mode transformation matrix of different precisions by building a perturbation made by un-transpose. Applying the obtained matrix to the theory of modal analysis, it finds that the calculated results have small error compared with the real results, verifying the feasibility of the method.

Key words: un-transposed transmission lines; phase-mode transformation; modal analysis; perturbation theory; fault location

0 引言

近年来, 随着超高压输电线路的广泛使用, 出于对成本、技术等因素的考虑, 很多超高压输电线路采用不换位运行, 加之输电导线配置方式不对称, 如导线水平排列等, 使得三相输电线路参数不对称度较大。参数不对称使得输电线路实际运行的某相电压、电流可能偏离基于对称假设的计算结果。输电线路参数不对称产生的负序电流还可能引起发电机负序保护误动作, 导致正常工作的发电机跳闸, 引发停电事故, 造成国民经济损失^[1-3]。因此, 研究不对称输电线路的故障计算具有一定的现实意义。

相模变换是电力系统故障分析的有力工具, 尤其对于故障测距等问题, 其第一步往往就是运用相模变换矩阵对线路参数进行去耦^[4-6]。对称分量法作为一种特殊的相模变换, 其主要用于对三相对称的输电线路进行解耦, 使其转化为正序、负序和零序

三个网络进行求解。然而对于三相不对称输电线路, 对称分量法的前提条件已无法满足, 使用该方法得出的计算结果也会产生较大误差。针对该问题, 目前主要有模分量法和相分量法两种解决方案, 文献[7]采用相分量法对不对称电路的不平衡度进行分析, 但是计算量较大, 文献[8]研究了改进的相分量法在电力系统中的应用, 然而计算效率仍不高。相比之下模分量法将三相电压或电流向量解耦为不同模量进行分析要更为简单。模分量法的核心是求得使输电线路参数矩阵解耦的相模变换矩阵。文献[9]采用平均值近似, 将不对称的输电线路参数矩阵转换为对称的矩阵, 简化了计算过程, 但是误差较大; 文献[10]采用一阶近似的方法获得了较精确的变换矩阵, 但是该方法较为繁琐, 并且无法继续提高精度; 文献[11]通过对已有的变换矩阵进行校正, 求得了更准确的线路状态参数, 但是该校正矩阵不依赖线路参数, 故计算结果精度提升有限。

本文以微扰法为基础, 通过构造因不换位造成的线路参数矩阵微扰量, 提出了一种简单易行并且可以得到任意阶精度的使单回输电线路参数矩阵解耦的变换矩阵的计算方法, 将其应用于模分量理论进行线路故障分析和测距, 计算结果表明本文方法有很高的精度, 验证了本文方法的可行性。

1 不换位输电线路的阻抗矩阵

目前故障分析大多需要先将输电线路阻抗矩阵解耦, 其实质是阻抗矩阵的对角化过程, 即求得相模变换矩阵 \mathbf{S} , 使

$$\mathbf{S}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{S} = \boldsymbol{\lambda} \quad (1)$$

式中: \mathbf{S} 是相模变换矩阵; \mathbf{Z} 是输电线路阻抗矩阵; $\boldsymbol{\lambda}$ 是阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的特征值矩阵, 其反映解耦后的各序阻抗或模量阻抗。

单回输电线路阻抗矩阵 \mathbf{Z} 一般形式为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{s1} & Z_{m1} & Z_{m2} \\ Z_{m1} & Z_{s2} & Z_{m3} \\ Z_{m2} & Z_{m3} & Z_{s3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z_{s1} , Z_{s2} , Z_{s3} 是各相自阻抗; Z_{m1} , Z_{m2} , Z_{m3} 是各相互阻抗。

对于均匀换位的三相输电线, 有

$$Z_{s1} = Z_{s2} = Z_{s3}, Z_{m1} = Z_{m2} = Z_{m3} \quad (3)$$

采用对称分量法对其解耦, 将阻抗参数转换为正序、负序、零序阻抗进行求解, 即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\alpha = e^{j120^\circ}$, 求得的 $\boldsymbol{\lambda}$ 即各序阻抗。

对于水平排列的不换位单回输电线, 采用文献[12]的线路参数计算方法, 若考虑架空地线对线路阻抗矩阵的影响, 有

$$Z_{s1} = Z_{s3} \neq Z_{s2}, Z_{m1} = Z_{m3} \neq Z_{m2} \quad (5)$$

针对上述条件, 使用对称分量法无法将阻抗矩阵 \mathbf{Z} 完全解耦。为此, 本文设计算法对式(1)进行求解, 目前求解不换位单回线相模矩阵 \mathbf{S} 的算法大多精度不高且缺乏一般性, 本文在 Clarke 矩阵的基础上, 运用微扰法提出了一种普遍适用的理论上可以获得任意阶精度相模变换矩阵的计算方法。

2 微扰法的应用

为了对式(1)进行求解, 本文将式(1)对角化的过程转化为求解 λ_n 和 \mathbf{S}_n , 使得

$$\mathbf{Z}\mathbf{S}_n = \lambda_n \mathbf{S}_n \quad (6)$$

对于单回线路 n 取 1, 2, 3。其中 λ_n 为矩阵 \mathbf{Z}

的特征值, \mathbf{S}_n 为相模变换矩阵 \mathbf{S} 的列向量即矩阵 \mathbf{Z} 的特征向量。根据微扰法, 令

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{Z}^0 + \varepsilon \mathbf{Z}^1 \\ \lambda_n = \lambda_n^0 + \varepsilon \lambda_n^1 + \varepsilon^2 \lambda_n^2 + \dots \\ \mathbf{S}_n = \mathbf{S}_n^0 + \varepsilon \mathbf{S}_n^1 + \varepsilon^2 \mathbf{S}_n^2 + \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε 是微扰参数; $\mathbf{Z}^0, \lambda_n^0, \mathbf{S}_n^0$ 是零阶小量; $\varepsilon \mathbf{Z}^1, \varepsilon \lambda_n^1, \varepsilon \mathbf{S}_n^1$ 是一阶小量; $\varepsilon^2 \lambda_n^2, \varepsilon^2 \mathbf{S}_n^2$ 是二阶小量, 以此类推。 $\varepsilon \mathbf{Z}^1$ 即需构造得到的因不换位造成的线路阻抗矩阵微扰量。将式(7)代入式(6)有

$$\begin{aligned} (\mathbf{Z}^0 + \varepsilon \mathbf{Z}^1)(\mathbf{S}_n^0 + \varepsilon \mathbf{S}_n^1 + \varepsilon^2 \mathbf{S}_n^2 + \dots) = \\ (\lambda_n^0 + \varepsilon \lambda_n^1 + \varepsilon^2 \lambda_n^2 + \dots)(\mathbf{S}_n^0 + \varepsilon \mathbf{S}_n^1 + \varepsilon^2 \mathbf{S}_n^2 + \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

整理得

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^0 + (\mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^1 + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0) \varepsilon + (\mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^2 + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1) \varepsilon^2 + \dots = \\ \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^0 + (\lambda_n^0 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^0) \varepsilon + \\ (\lambda_n^0 \mathbf{S}_n^2 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_n^0) \varepsilon^2 + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

令微扰参数 ε 不同阶对应的系数相等有

$$\text{零阶: } \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^0 = \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^0 \quad (10)$$

$$\text{一阶: } \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^1 + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0 = \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^0 \quad (11)$$

$$\text{二阶: } \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^2 + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 = \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^2 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_n^0 \quad (12)$$

$$N \text{ 阶: } \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^N + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^{N-1} = \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^N + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^{N-1} + \dots \quad (13)$$

如果系统只要求零阶精度则只需要满足式(7), 若需要一阶精度则需满足式(10)、式(11), 若需要二阶精度则需满足式(10)一式(12), 以此类推 N 阶精度。由于篇幅有限, 本文只推导至二阶精度。

对于式(4)所示矩阵, 令零阶矩阵

$$\mathbf{Z}^0 = \begin{bmatrix} h & m & m \\ m & h & m \\ m & m & h \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $h = \frac{Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s3}}{3}$; $m = \frac{Z_{m1} + Z_{m2} + Z_{m3}}{3}$ 。

则对应的 $\lambda_1^0 = h + 2m$, $\lambda_2^0 = \lambda_3^0 = h - m$ 。

\mathbf{Z}^0 的特征向量不唯一, 本文选取 Clarke 矩阵彼此正交的列向量作为 $\mathbf{S}_1^0, \mathbf{S}_2^0, \mathbf{S}_3^0$, 即

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1^0 = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^T \\ \mathbf{S}_2^0 = \left(-\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{2}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{6}} \right)^T \\ \mathbf{S}_3^0 = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}} \right)^T \end{cases} \quad (15)$$

将获得的特征值和特征向量应用于模分量法便可以获得具有零阶精度的计算结果。零阶方法的实际意义是将不换位输电线路做平均值近似处理,然后再将其当作换位线路进行分析,但获得的结果有时误差会很大,因此需要计算一阶精度乃至更高精度的方法,为此,本文在满足式(10)的前提下,再考虑式(11),将式(11)做变换有

$$(\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \mathbf{S}_n^1 = -(\mathbf{Z}^1 - \lambda_n^1) \mathbf{S}_n^0 \quad (16)$$

由于 $\mathbf{S}_1^0, \mathbf{S}_2^0, \mathbf{S}_3^0$ 线性无关, 可以设

$$\mathbf{S}_n^1 = \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_l^0 \quad (17)$$

式中, a_{nl}^1 为待求参数, 将式(17)代入式(16), 同时左乘 \mathbf{S}_k^0 的共轭转置 \mathbf{S}_k^{0*} (本文选取的 \mathbf{S}_k^0 没有虚部, 故仅体现转置), k 可以取 1、2、3, 得

$$\mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \left(\sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_l^0 \right) = -\mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^1 - \lambda_n^1) \mathbf{S}_n^0 \quad (18)$$

考虑到 $\mathbf{S}_1^0, \mathbf{S}_2^0, \mathbf{S}_3^0$ 彼此单位正交, 式(18)左边可以变换为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \left(\sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_l^0 \right) &= \\ \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_l^0 - \lambda_n^0 \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_l^0 &= \\ \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_k^{0*} \lambda_l^0 \mathbf{S}_l^0 - \lambda_n^0 \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_l^0 &= \\ \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \lambda_l^0 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_l^0 - \lambda_n^0 \sum_{l=1}^3 a_{nl}^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_l^0 &= \\ a_{nk}^1 \lambda_k^0 - \lambda_n^0 a_{nk}^1 & \end{aligned} \quad (19)$$

综上有

$$a_{nk}^1 \lambda_k^0 - \lambda_n^0 a_{nk}^1 = -\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^0 \quad (20)$$

若 $k=n$, 有

$$\lambda_n^1 = \mathbf{S}_n^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0 \quad (21)$$

若 $k \neq n$, 有

$$a_{nk}^1 = \frac{\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0}{\lambda_n^0 - \lambda_k^0} \quad (22)$$

当 $k=n$ 时或 λ_n^0, λ_k^0 均为重根时, a_{nk}^1 的取值对式(20)不产生影响, 可以令对应的 $a_{nk}^1 = 0$; 并且均为重根时, 经计算有 $\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^0 = 0$ 。取微扰参数 $\varepsilon = 1$, 有 $\mathbf{Z}^1 = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^0$, \mathbf{Z}^1 即不换位造成的线路阻抗矩阵微扰量。在所有参数已知的情况下, 可以求得 $\mathbf{S}_1^1, \mathbf{S}_2^1, \mathbf{S}_3^1$, 再根据式(23)可以获得一阶精度的特征值和特征向量, 再令 $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3)$, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, 便求得了具有一阶精度的相模矩阵 \mathbf{S} 和模阻抗矩阵 λ 。

$$\begin{cases} \lambda_n = \lambda_n^0 + \lambda_n^1 \\ \mathbf{S}_n = \mathbf{S}_n^0 + \mathbf{S}_n^1 \end{cases} \quad (23)$$

求解二阶精度的相模矩阵和模阻抗矩阵在方法上与一阶精度类似, 在满足式(10)、式(11)的基础上进一步满足式(12), 即:

$$\mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_n^2 + \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 = \lambda_n^0 \mathbf{S}_n^2 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_n^0 \quad (24)$$

对上式做变换有:

$$(\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \mathbf{S}_n^2 = -(\mathbf{Z}^1 - \lambda_n^1) \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_n^0 \quad (25)$$

同样令

$$\mathbf{S}_n^2 = \sum_{l=1}^3 a_{nl}^2 \mathbf{S}_l^0 \quad (26)$$

两边左乘 \mathbf{S}_k^0 的共轭转置 \mathbf{S}_k^{0*} , 式(25)左边可以变换为

$$\mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \mathbf{S}_n^2 = \mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^0 - \lambda_n^0) \left(\sum_{l=1}^3 a_{nl}^2 \mathbf{S}_l^0 \right) = \sum_{l=1}^3 a_{nl}^2 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^0 \mathbf{S}_l^0 - \lambda_n^0 \sum_{l=1}^3 a_{nl}^2 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_l^0 = a_{nk}^2 \lambda_k^0 - \lambda_n^0 a_{nk}^2 \quad (27)$$

式(25)右边可以变换为

$$\begin{aligned} -\mathbf{S}_k^{0*} (\mathbf{Z}^1 - \lambda_n^1) \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^0 &= \\ -\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^0 & \end{aligned} \quad (28)$$

综上有

$$a_{nk}^2 \lambda_k^0 - \lambda_n^0 a_{nk}^2 = -\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^1 + \lambda_n^2 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^0 \quad (29)$$

$k=n$ 时, 根据一阶的计算结果有 $\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^1 = 0$, 故

$$\lambda_n^2 = \mathbf{S}_n^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 \quad (30)$$

$k \neq n$, 有

$$a_{nk}^2 = \frac{\mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{Z}^1 \mathbf{S}_n^1 - \lambda_n^1 \mathbf{S}_k^{0*} \mathbf{S}_n^1}{\lambda_n^0 - \lambda_k^0} \quad (31)$$

根据式(26)、式(31)求得 $\mathbf{S}_1^2, \mathbf{S}_2^2, \mathbf{S}_3^2$ 后, 令

$$\begin{cases} \lambda_n = \lambda_n^0 + \lambda_n^1 + \lambda_n^2 \\ \mathbf{S}_n = \mathbf{S}_n^0 + \mathbf{S}_n^1 + \mathbf{S}_n^2 \end{cases} \quad (32)$$

便可以求得具有二阶精度相模矩阵 \mathbf{S} 和模阻抗矩阵 λ 。

运用微扰法进行求解的关键是选取与所求阻抗矩阵 \mathbf{Z} 近似且易于求解特征值和特征向量的零阶矩阵 \mathbf{Z}^0 以及求得彼此正交的 \mathbf{Z}^0 的特征向量 \mathbf{S}_n^0 。通过进一步满足式(9), 理论上能继续获得更高的精度。

将微扰法计算出的相模矩阵 $\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \mathbf{S}_3)$ 和模阻抗矩阵 $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 用于模分量理论^[13], 结合故障类型和线路边界条件, 即可求得不对称线路上任意一点的运行状态, 并用于故障分析与计算。

3 算例分析

3.1 相模变换误差分析

为了验证本文方法的精度与可行性, 通过实例计算相模变换矩阵 \mathbf{S} 并将其应用于模分量理论进行分析, 再用计算得到的结果与用 PSCAD/EMTDC 仿真得到的结果进行比较, 仿真电路图如图 1 所示。

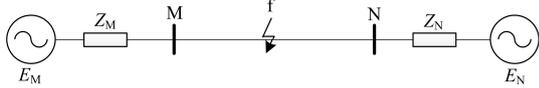


图 1 不换位传输线路电路简化图

Fig. 1 Simplified simulation diagram for un-transposed transmission lines

对全长 200 km 的不换位单回输电线路进行仿真, 输电电压等级为 500 kV, 塔型选用 500 kV 酒杯型自立式杆塔, 如图 2 所示, 具体参数见文献[14]。输电线模型选用 Frequency Dependent(Phase) Model, 导线型号为 4×LGJ-400/35, 分裂间距 $d=400$ mm, 导线半径 $r=13.41$ mm, 导线电阻取 $0.07389 \Omega/\text{km}$; 地线型号为 JLB40-150, 地线半径 $r_d=7.875$ mm, 地线电阻取 $0.2952 \Omega/\text{km}$ 。系统参数值如下: M 端正序阻抗 $Z_{M1}=j50 \Omega$, 零序阻抗 $Z_{M0}=j130 \Omega$, N 端正序阻抗 $Z_{N1}=j40 \Omega$, 零序阻抗 $Z_{N0}=j130 \Omega$ 。

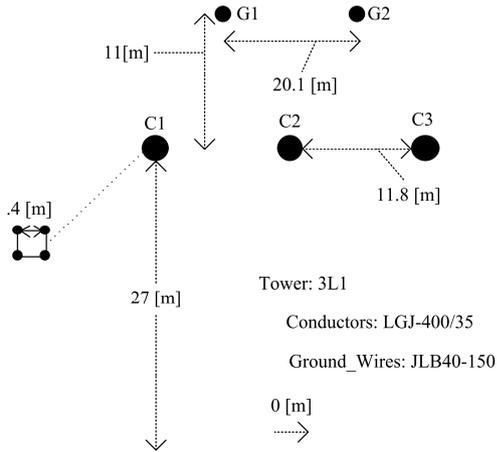


图 2 杆塔参数图

Fig. 2 Parameter graph of the tower

采用文献[12]的参数矩阵计算方法, 考虑两条良导体架空地线和大地电阻率的影响, 根据输电导线和架空地线的排列方式及型号, 计算得到的阻抗矩阵 $\mathbf{Z}(\Omega/\text{km})$ 为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0.0676 + 0.4162i & 0.0497 + 0.1472i & 0.0492 + 0.1069i \\ 0.0497 + 0.1472i & 0.0688 + 0.4099i & 0.0497 + 0.1472i \\ 0.0492 + 0.1069i & 0.0497 + 0.1472i & 0.0676 + 0.4162i \end{bmatrix} \quad (33)$$

通过本文方法计算得到的阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的不同阶精度的特征值和特征向量与用 Matlab 数学工具包求得精确特征值和特征向量如表 1、表 2 所示。

表 1 特征值对比结果

计算方法	λ_1	λ_2	λ_3
Matlab	0.1669+0.6822i	0.0187+0.2508i	0.0184+0.3093i
本文零阶	0.1671+0.6816i	0.0185+0.2803i	0.0185+0.2803i
本文一阶	0.1671+0.6816i	0.0185+0.2514i	0.0184+0.3093i
本文二阶	0.1669+0.6822i	0.0187+0.2508i	0.0184+0.3093i

表 2 特征向量对比结果

计算方法	\mathbf{S}_1	\mathbf{S}_2	\mathbf{S}_3
Matlab	$\begin{bmatrix} 0.5631 - 0.0114i \\ 0.6047 \\ 0.5631 - 0.0114i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.4275 - 0.0087i \\ 0.7965 \\ -0.4275 - 0.0087i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.7071 \\ 0 \\ 0.7071 \end{bmatrix}$
本文零阶	$\begin{bmatrix} 0.5774 \\ 0.5774 \\ 0.5774 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.4082 \\ 0.8165 \\ -0.4082 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.7071 \\ 0 \\ 0.7071 \end{bmatrix}$
本文一阶	$\begin{bmatrix} 0.5627 - 0.0046i \\ 0.6066 + 0.0092i \\ 0.5627 - 0.0046i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.4289 - 0.0065i \\ 0.7958 - 0.0065i \\ -0.4289 - 0.0065i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.7071 \\ 0 \\ 0.7071 \end{bmatrix}$
本文二阶	$\begin{bmatrix} 0.5636 - 0.0040i \\ 0.6049 + 0.0079i \\ 0.5636 - 0.0040i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.4277 - 0.0056i \\ 0.7970 - 0.0056i \\ -0.4277 - 0.0056i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.7071 \\ 0 \\ 0.7071 \end{bmatrix}$

由表 1 和表 2 可以看出, 本文二阶方法计算的特征值已经与 Matlab 计算的准确值几乎相同, 计算出的特征向量误差也很小。以式(34)评判误差。

$$\eta = \frac{\|\delta_{\text{real}} - \delta_{\text{appro}}\|}{\|\delta_{\text{real}}\|} \times 100\% \quad (34)$$

式中: η 是误差; δ_{real} 是真实值; δ_{appro} 为近似值; $\|\cdot\|$ 是向量的二范数。则不同阶方法的误差见表 3。

表 3 不同阶计算方法的误差

计算方法	λ_1	λ_2	λ_3
本文零阶	0.08%	11.74%	9.35%
本文一阶	0.08%	0.22%	0
本文二阶	0.01%	0.02%	0

计算方法	\mathbf{S}_1	\mathbf{S}_2	\mathbf{S}_3
本文零阶	3.76%	3.59%	0
本文一阶	1.35%	0.75%	0
本文二阶	1.32%	0.71%	0

从表 3 可以看出, 本文方法具有较高的精度, 而且随着计算方法阶数的提高, 求得的特征值与特征向量的误差也越小, 即相模变换矩阵 \mathbf{S} 和模阻抗矩阵 λ 误差越小。

3.2 故障测距中的应用

将求得的相模矩阵 \mathbf{S} 应用于模分量理论, 进行故障测距计算, 以验证其在故障分析中的可行性。测距电路图如图 1 所示, 短路故障点 f 位于距 m 端 75 km 处, 线路全长 200 km。接地短路过渡电阻设计为 100 Ω , 相间短路过渡电阻设计为 10 Ω 。

采用文献[13]中介绍的双端测距原理, 对于不换位单回输电线路, 首先运用本文计算得到的相模变换矩阵 \mathbf{S} 将测得的线路两端电压电流相量变换为电压电流模量, 即 $\mathbf{U}_{\text{mode}} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}$, $\mathbf{I}_{\text{mode}} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{I}$, 然后进一步通过 \mathbf{S} 解耦输电线路阻抗矩阵 \mathbf{Z} 和导纳矩阵 \mathbf{Y} , 本文相模矩阵 \mathbf{S} 虽然是通过阻抗矩阵 \mathbf{Z} 推导得出, 但是计算得到的数据显示其对导纳矩阵 \mathbf{Y} 的解耦效果同样十分理想, 将解耦后的模量应用于电报方程有

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{mfi} = \text{ch}(\gamma_{mi}x)\mathbf{U}_{ni} - \mathbf{Z}_{ci}\text{sh}(\gamma_{mi}x)\mathbf{I}_{ni} \\ \mathbf{U}_{nfi} = \text{ch}(\gamma_{mi}(l-x))\mathbf{U}_{mi} - \mathbf{Z}_{ci}\text{sh}(\gamma_{mi}(l-x))\mathbf{I}_{mi} \end{cases} \quad (35)$$

式中: \mathbf{U}_{mi} , \mathbf{U}_{ni} , \mathbf{I}_{mi} , \mathbf{I}_{ni} 分别是故障线路两端变换后的电压电流 i 模量($i=0, 1, 2$); γ_{mi} 是模量 i 的传播系数; \mathbf{Z}_{ci} 是模量 i 的波阻抗, 均通过解耦后的输电线路参数可求; l 是输电线路长度; x 是故障点 f 距 m 端的距离; \mathbf{U}_{mfi} , \mathbf{U}_{nfi} 分别为从 m , n 两端测得的故障点模电压。

令线路两端测得的故障点电压模值相等, 即: $|\mathbf{U}_{mfi}| = |\mathbf{U}_{nfi}|$, 便可求解出故障点 f 距离 m 端的距离。本文取受大地电阻影响较小的线模进行计算, 即 $i=2$, 测距结果见表 4。

表 4 500 kV 不换位单回线故障测距结果及误差
Table 4 Results and error of fault location in 500 kV un-transposed single-circuit transmission lines

故障类型	测量距离/km			测距误差/%		
	对称分量法	本文零阶	本文一阶	对称分量法	本文零阶	本文一阶
AG	79.5429	70.6317	74.9823	6.0572	5.8244	0.0236
BC	75.7987	72.6397	75.0026	1.0649	3.1471	0.0035
BCG	69.0767	72.9834	75.0021	7.8977	2.6888	0.0028
ABC	74.1668	75.5184	74.9917	1.1109	0.6912	0.0111

表 4 中 AG、BCG、ABC 分别代表单相、双相、三相接地故障, BC 代表相间短路故障。由表 4 可以看出, 使用传统的对称分量法进行测距会产生较大误差, 因此对不换位单回线不应直接使用对称分量法; 而本文零阶修正方法同样误差较大, 不能满足精度要求, 一阶修正方法的误差均在 0.1% 以下, 足以满足工程需要, 并且一阶修正方法计算量相对较小, 具有较好的实际应用价值。

本文方法测距结果误差较小, 首先是因为本文

采用微扰法计算出的模阻抗矩阵 λ 和相模矩阵 \mathbf{S} 精度较高, 其次是因为本文故障测距采用了双端量法, 其测距精度不受过渡电阻和对端系统影响, 不存在原理误差。

4 结论

通过构造因线路不换位造成的阻抗矩阵微扰量, 运用微扰法将阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的特征值与特征向量分别展开, 通过满足不同阶数的等式, 得到了不同精度的相模变换矩阵 \mathbf{S} 和模阻抗矩阵 λ , 实现了对不换位单回输电线路阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的解耦。将求得的相模变换矩阵 \mathbf{S} 用于不对称线路的故障分析, 计算结果与实际结果相比误差很小, 因而本文方法具有一定的实际意义。

本文方法求解思路简单, 过程也不复杂, 计算结果具有很高的精度; 易于编程实现, 对设计电力系统故障分析程序有较好的参考价值, 而且该方法虽然是通过水平排列的单回输电导线推导得出, 但对于其他对称排列的导线配置方式也适用。当输电线路为多回线时, 不同回线之间还会存在耦合, 这使得阻抗矩阵 \mathbf{Z} 会更加复杂, 对于这种情况相模变换矩阵的求解, 需要进一步研究。

参考文献

- [1] 丁洪发, 段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 24-28.
DING Hongfa, DUAN Xianzhong. Unbalance issue caused by un-transposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 24-28.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杨萃源, 舒勤. 基于线模行波突变的配电网全架空线路单相接地的多端检测定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 22-28.
YANG Luoyuan, SHU Qin. A new multiterminal

- detecting location method of single-phase grounding to the overhead-line for distribution network based on travelling-wave mutation of line-mode[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 22-28.
- [5] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [6] 陈奎, 周东, 孙建坡. 基于序分量法的D-STATCOM直接功率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 43-49.
CHEN Kui, ZHOU Dong, SUN Jianpo. Study on predictive direct power control of D-STATCOM based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 43-49.
- [7] 李永坚, 黄绍平, 许志伟, 等. 不换位高压线路分相建模研究及其不平衡性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 75-80.
LI Yongjian, HUANG Shaoping, XU Zhiwei, et al. Research of individual phase modeling of un-transposed high voltage transmission lines and analysis of its unbalanced operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 75-80.
- [8] 王安宁, 陈青, 周占平. 改进的相分量法求解电力系统复杂故障新算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 39-43.
WANG Anning, CHEN Qing, ZHOU Zhanping. An improved phase components method for arbitrary complicated power system fault analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 39-43.
- [9] BRANDAO F J A, BRICENO M J. Modal analysis of un-transposed bilateral three-phase lines-a perturbation approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 497-504.
- [10] BRANDAO F J A, BRICENO M J. On the modal analysis of asymmetrical three phase transmission lines using standard transformation matrices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1760-1765.
- [11] 刘博, 张庆超. 不换位输电线路参数变换矩阵的校正方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 62-65.
LIU Bo, ZHANG Qingchao. A method of parameter matrix transformation for un-transposed transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 62-65.
- [12] 杨耿杰. 电力系统不对称计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [14] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
-
- 收稿日期: 2016-05-25; 修回日期: 2016-08-24
作者简介:
张庆超(1956-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化及电力系统继电保护等; E-mail: qc Zhang@tju.edu.cn
易乐钊(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化及电力系统继电保护等。E-mail: yilezhao@tju.edu.cn
- (编辑 葛艳娜)