DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.022

一种用于同塔双回线故障定位的新相模变换法

王守鹏[1,2]，赵冬梅[2]，袁敬中[1]，高　杨[1]

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院，北京 100038；2.华北电力大学 电气与电子工程学院，北京 102206)

摘要： 本文结合均匀换位的输电线路性质，根据三相系统和六相系统之间的关系，构造出一种适用于同塔双回线的新相模变换矩阵。该矩阵用于相模变换，可用单一模量反映各种短路故障，并且矩阵的运算因子均为实数，可使计算量大大减少。用此相模变换矩阵将双回线解耦，可在某一模量下完成同塔双回线发生各种短路故障时的故障定位。大量仿真结果表明，所提方法可行、有效。

关键词： 相模变换；六相系统；同塔双回线；故障定位

中图分类号： TM773　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1006-4710(2020)03-0432-07

New phase-mode transformation matrix for fault location of double-circuit transmission lines

WANG Shoupeng[1,2], ZHAO Dongmei[2], YUAN Jingzhong[1], GAO Yang[1]

(1. State Grid Jibei Electric Economic Research Institute, Beijing 100038, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: On the basis of the relationship between three-phase system and six-phase system, this study considers the property of uniformly transposed lines to present a new phase-mode transformation matrix for double-circuit lines. The transformation matrix can use a single modulus to reflect various fault types, with its operational factors being real numbers, thus greatly reducing the amount of calculation. Using this transformation matrix to decouple double-circuit lines, fault location can be confirmed under various types of short-circuit faults by using a certain modulus. A large number of simulation results show that the proposed method is feasible and effective.

Key words: phase-mode transformation; six-phase system; double-circuit transmission lines; fault location

同塔双回输电线路[1-2]架设于同一铁塔，线间距离紧凑，具有占地少、输送能力强、投资效益高等优点[3]，因此，近年来同塔双回输电线路在工程领域得以广泛应用，其故障定位方法亦受到广大学者的关注，并已经取得了大量的科研成果[4-11]。其中，单端故障定位法[4-5]仅使用一端的电气量，采集数据量小，但结果受过渡电阻、系统阻抗的影响严重；双端故障定位法[6-11]因引入双端的电气量，从原理上消除了过渡电阻、系统阻抗对结果的影响，并且随着电力通信技术的发展，应用前景良好。从解耦方法来看，目前解耦计算中比较经典的相模变换有对称分量、Clarke、Karenbauer 等变换[6]。其中，对称分量变换可用正序分量反映各种故障类型，但其矩阵因子含有复数，使得故障分析中的计算量大大增加；Clarke 变换、Karenbauer 变换的矩阵因子均为实数，实数运算具有计算简单、计算量小的优点，但 Clarke 变换、Karenbauer 变换无法用单一模量反映各种故障类型，在故障定位时要与选相配合或采用双模量分析[7]。

本文从三相输电系统出发，推导新的相模变换矩阵。结合均匀换位的输电线路的相模变换矩阵的数学性质，根据三相系统和六相系统之间的关系，推导出了一种新的双回线相模变换矩阵。该变换矩阵的运算因子全为实数，用于相模变换时可用单一模量反映各种短路故障。用此变换矩阵将同塔双回线解耦，可在某一模量下实现同塔双回线发生各种短

收稿日期： 2019-04-09；　**网络出版日期：** 2020-04-21

网络出版地址： http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200421.1226.004.html

基金项目： 国家自然科学基金面上项目(51377054)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017XS019)

第一作者： 王守鹏，男，博士，工程师，研究方向为电力系统保护与控制、电网故障诊断、人工智能在电力系统中的应用。E-mail：wsp_ep@163.com

路故障时的故障定位。大量 ATP-EMTP 仿真结果表明，故障定位结果不受故障类型、过渡电阻和数据不同步的影响，具有较高精度。

1 相模变换

1.1 三相系统相模变换矩阵

图 1 为三相系统图。其中 $\dot{I}_{\mathrm{A}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{B}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{C}}$ 分别表示 A、B、C 三相电流相量，Z_{M} 、Z_{S} 分别为互阻抗、自阻抗，m、n 分别为系统的始、末端。

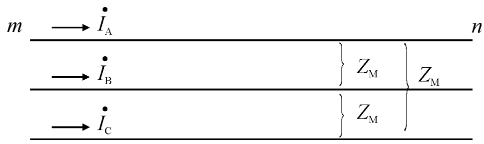

图 1 三相系统图

Fig. 1 Schematic of three-phase system

对于图 1 所示的三相系统，在线路均匀换位情况下，线路参数对称，且参数矩阵为平衡矩阵，则有：

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{\mathrm{mnA}} \\ \dot{U}_{\mathrm{mnB}} \\ \dot{U}_{\mathrm{mnC}} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} \\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} \\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{\mathrm{mnA}} \\ \dot{I}_{\mathrm{mnB}} \\ \dot{I}_{\mathrm{mnC}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中平衡参数矩阵为：

$$\boldsymbol{Z} = \begin{pmatrix} Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} \\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} \\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} \end{pmatrix}$$

式中：$\dot{U}_{\mathrm{mnA}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnB}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnC}}$ 分别为始末端 A、B、C 三相电压相量差；$\dot{I}_{\mathrm{mnA}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnB}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnC}}$ 分别为流过始末端的 A、B、C 三相电流相量。由 $\boldsymbol{Z}$ 可知，线路间存在耦合，在故障分析时需要进行解耦计算。

解耦计算就是使 $\boldsymbol{Z}$ 对角化，求解特征方程 $\det(\boldsymbol{Z} - \lambda_i \boldsymbol{I}) = 0$ ，可得：

$$\begin{cases} \lambda_1 = Z_{\mathrm{S}} + 2Z_{\mathrm{M}} \\ \lambda_2 = \lambda_3 = Z_{\mathrm{S}} - Z_{\mathrm{M}} \end{cases} \tag{2}$$

则对应于特征值 λ_i 的特征向量为 $\boldsymbol{T}_i = (t_{1i}, t_{2i}, t_{3i})^{\mathrm{T}}$ ，$i = 1,2,3$ 。令矩阵 $\boldsymbol{T} = (T_1, T_2, T_3)$，则有可逆矩阵 $\boldsymbol{T}^{-1}$ 、对角阵 $\boldsymbol{\Lambda}$ ，使 $\boldsymbol{T}^{-1}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{T} = \boldsymbol{\Lambda}$ ，其中 $\boldsymbol{\Lambda} = \mathrm{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 。

由特征值和特征向量的数学性质，有：

$$(\boldsymbol{Z} - \lambda_i \boldsymbol{I})\boldsymbol{T}_i = 0 \tag{3}$$

把式(2)中的 λ_1 代入式(3)，可求得：

$$t_{11} = t_{21} = t_{31} \tag{4}$$

同理，把式(2)中的 λ_2 、λ_3 代入式(3)，可求得：

$$t_{12} + t_{22} + t_{32} = 0 \tag{5}$$

$$t_{13} + t_{23} + t_{33} = 0 \tag{6}$$

对于任意三阶矩阵，如果满足式(4)～式(6)，则均可作为三相系统的相模变换矩阵。验证易知，对称分量变换、Clark 变换、Karenbauer 变换的矩阵均满足式(4)～式(6)。

基于上述分析，对于图 1 所示三相系统，根据式(4)～式(6)可构造用于三相系统的相模变换矩阵：

$$\boldsymbol{T} = \frac{1}{15}\begin{pmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{pmatrix} \tag{7}$$

其逆矩阵为：

$$\boldsymbol{T}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{pmatrix} \tag{8}$$

利用矩阵 $\boldsymbol{T}$ 可将存在互感的三相系统解耦，得到 3 个相互独立的 0、1、2 模分量。用 $\boldsymbol{T}$ 将三相系统中的电流相量变换为模量的形式：

$$(\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2)^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{T}^{-1}\,(\dot{I}_{\mathrm{A}}, \dot{I}_{\mathrm{B}}, \dot{I}_{\mathrm{C}})^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

将式(8)代入式(9)，展开可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{\mathrm{A}} \\ \dot{I}_{\mathrm{B}} \\ \dot{I}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{\mathrm{A}} + \dot{I}_{\mathrm{B}} + \dot{I}_{\mathrm{C}} \\ \dot{I}_{\mathrm{A}} + 2\dot{I}_{\mathrm{B}} - 3\dot{I}_{\mathrm{C}} \\ \dot{I}_{\mathrm{A}} - 3\dot{I}_{\mathrm{B}} + 2\dot{I}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：$\dot{I}_0$ 、$\dot{I}_1$ 、$\dot{I}_2$ 分别表示 0、1、2 电流模分量。

表 1 给出了各种短路故障下用变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 做解耦计算取得的电流模分量值。

表 1 各种短路故障下的电流模分量

Tab. 1 Current modulus components under all kinds of fault types

短路故障	相边界条件	1 模量	2 模量	0 模量
A-G	$\dot{I}_{\mathrm{B}} = \dot{I}_{\mathrm{C}} = 0$	$\dot{I}_{\mathrm{A}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}}$
C-G	$\dot{I}_{\mathrm{A}} = \dot{I}_{\mathrm{B}} = 0$	$-3\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$2\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$\dot{I}_{\mathrm{C}}$
B-G	$\dot{I}_{\mathrm{A}} = \dot{I}_{\mathrm{C}} = 0$	$2\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$-3\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$\dot{I}_{\mathrm{B}}$
AB	$\dot{I}_{\mathrm{C}} = 0,\ \dot{I}_{\mathrm{A}} = -\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$-4\dot{I}_{\mathrm{B}}$	0
CA	$\dot{I}_{\mathrm{B}} = 0,\ \dot{I}_{\mathrm{C}} = -\dot{I}_{\mathrm{A}}$	$4\dot{I}_{\mathrm{A}}$	$-\dot{I}_{\mathrm{A}}$	0
BC	$\dot{I}_{\mathrm{A}} = 0,\ \dot{I}_{\mathrm{B}} = -\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$5\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$-5\dot{I}_{\mathrm{B}}$	0
ABC	$\dot{I}_{\mathrm{A}} + \dot{I}_{\mathrm{B}} + \dot{I}_{\mathrm{C}} = 0$	$\dot{I}_{\mathrm{B}} - 4\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$-4\dot{I}_{\mathrm{B}} + \dot{I}_{\mathrm{C}}$	0
AB-G	$\dot{I}_{\mathrm{C}} = 0$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} + 2\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} - 3\dot{I}_{\mathrm{B}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} + \dot{I}_{\mathrm{B}}$
CA-G	$\dot{I}_{\mathrm{B}} = 0$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} - 3\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} + 2\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$\dot{I}_{\mathrm{A}} + \dot{I}_{\mathrm{C}}$
BC-G	$\dot{I}_{\mathrm{A}} = 0$	$2\dot{I}_{\mathrm{B}} - 3\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$-3\dot{I}_{\mathrm{B}} + 2\dot{I}_{\mathrm{C}}$	$\dot{I}_{\mathrm{B}} + \dot{I}_{\mathrm{C}}$

由表 1 可知，通过变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 解耦而得的 1 模

量和 2 模量始终存在,因此可以利用解耦后的 1 模量或 2 模量进行故障分析,从而完成各种短路故障情况下的故障定位。

1.2 六相系统相模变换矩阵

与三相系统相比,六相系统存在相间和线间耦合。图 2 为完全换位情况下的双回线六相系统。图中,$\dot{I}_{\mathrm{IA}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{IB}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{IC}}$ 和 $\dot{I}_{\mathrm{IIA}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{IIB}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{IIC}}$ 分别表示Ⅰ、Ⅱ回线的 A、B、C 三相电流相量;Z_{S} 为各回线自阻抗;Z_{M} 为Ⅰ、Ⅱ回线的相间互阻抗;Z'_{M} 为Ⅰ、Ⅱ回线的线间互阻抗;m、n 分别为系统的始、末端。图 2 所示六相系统的电压、电流关系为:

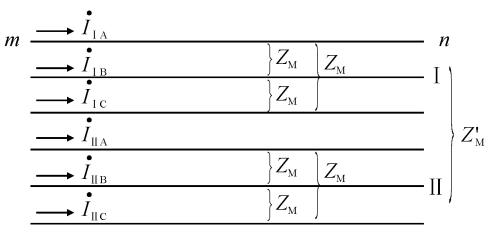

图 2 六相系统图

Fig. 2 Schematic of six-phase system

$$\begin{pmatrix}\dot{U}_{\mathrm{mnIA}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIB}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIC}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIA}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIB}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIC}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}}\\ Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}\\ Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}} & Z_{\mathrm{M}}\\ Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{I}_{\mathrm{mnIA}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIB}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIC}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIA}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIB}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIC}}\end{pmatrix} \tag{11}$$

式中:$\dot{U}_{\mathrm{mnIA}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnIB}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnIC}}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{mnIIA}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnIIB}}$ 、$\dot{U}_{\mathrm{mnIIC}}$ 分别为Ⅰ、Ⅱ回线的始末端 A、B、C 三相电压相量差;$\dot{I}_{\mathrm{mnIA}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnIB}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnIC}}$ 和 $\dot{I}_{\mathrm{mnIIA}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnIIB}}$ 、$\dot{I}_{\mathrm{mnIIC}}$ 分别为Ⅰ、Ⅱ回线流过始末端的 A、B、C 三相电流相量。

结合文献[3]、[8]采用的六序分量法线间解耦矩阵 $\boldsymbol{P}$ 将式(11)的电压、电流相量分解为同、反向量,以及将Ⅰ、Ⅱ回线之间解耦,得:

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{TF}}=\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{P}\,\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{TF}} \tag{12}$$

式中:

$$\boldsymbol{P}=\begin{pmatrix}1&0&0&1&0&0\\0&1&0&0&1&0\\0&0&1&0&0&1\\1&0&0&-1&0&0\\0&1&0&0&-1&0\\0&0&1&0&0&-1\end{pmatrix};$$

$\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{TF}}=(\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{T}},\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{F}})^{\mathrm{T}}$,$\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{TF}}=(\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{T}},\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{F}})^{\mathrm{T}}$,下标 T、F 分别表示同、反向网;$\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{T}}$ 、$\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{F}}$ 和 $\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{T}}$ 、$\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{F}}$ 分别表示同、反向网电压和电流相量。

将式(12)表示为同向量和反向量的形式,即:

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{T}}\\ \dot{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{F}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{T}} & \\ & \boldsymbol{Z}_{\mathrm{F}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{T}}\\ \dot{\boldsymbol{I}}_{\mathrm{F}}\end{pmatrix} \tag{13}$$

式中:

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{T}}=\begin{pmatrix}Z_{\mathrm{S}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}+Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}}+Z'_{\mathrm{M}}\end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{F}}=\begin{pmatrix}Z_{\mathrm{S}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}}\\ Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{M}}-Z'_{\mathrm{M}} & Z_{\mathrm{S}}-Z'_{\mathrm{M}}\end{pmatrix}。$$

$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{T}}$ 、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{F}}$ 存在耦合阻抗,需要进行解耦计算。由 1.1 节可知,$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{T}}$ 、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{F}}$ 可由矩阵 $\boldsymbol{T}$ 解耦,从而可将同向量和反向量分别变换成同向网和反向网的 0、1、2 模量。结合同、反向量的变换矩阵 $\boldsymbol{P}$ 和三相系统的相模变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 可得六相系统的相模变换矩阵 $\boldsymbol{S}=\boldsymbol{P}\begin{pmatrix}\boldsymbol{T} & \\ & \boldsymbol{T}\end{pmatrix}$,即:

$$\boldsymbol{S}=\frac{1}{15}\begin{pmatrix}5&5&5&5&5&5\\5&-1&-4&5&-1&-4\\5&-4&-1&5&-4&-1\\5&5&5&-5&-5&-5\\5&-1&-4&-5&1&4\\5&-4&-1&-5&4&1\end{pmatrix}。$$

由此得到解耦后的模量与相量之间的关系:

$$\dot{\boldsymbol{U}}'_{\mathrm{TF}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{TF}}\dot{\boldsymbol{I}}'_{\mathrm{TF}} \tag{14}$$

式中:

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{TF}}=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{Z}\boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}Z_{\mathrm{S}}+2Z_{\mathrm{M}}+3Z'_{\mathrm{M}} &&&&&\\ & Z_{\mathrm{S}}-Z_{\mathrm{M}} &&&&\\ && Z_{\mathrm{S}}-Z_{\mathrm{M}} &&&\\ &&& Z_{\mathrm{S}}+2Z_{\mathrm{M}}+3Z'_{\mathrm{M}} &&\\ &&&& Z_{\mathrm{S}}-Z_{\mathrm{M}} &\\ &&&&& Z_{\mathrm{S}}-Z_{\mathrm{M}}\end{pmatrix};$$

$$\dot{\boldsymbol{U}}'_{\mathrm{TF}}=\begin{pmatrix}\dot{U}_{\mathrm{T0}}\\ \dot{U}_{\mathrm{T1}}\\ \dot{U}_{\mathrm{T2}}\\ \dot{U}_{\mathrm{F0}}\\ \dot{U}_{\mathrm{F1}}\\ \dot{U}_{\mathrm{F2}}\end{pmatrix}=\boldsymbol{S}^{-1}\begin{pmatrix}\dot{U}_{\mathrm{mnIA}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIB}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIC}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIA}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIB}}\\ \dot{U}_{\mathrm{mnIIC}}\end{pmatrix};$$

$$\dot{\boldsymbol{I}}'_{\mathrm{TF}}=\begin{pmatrix}\dot{I}_{\mathrm{T0}}\\ \dot{I}_{\mathrm{T1}}\\ \dot{I}_{\mathrm{T2}}\\ \dot{I}_{\mathrm{F0}}\\ \dot{I}_{\mathrm{F1}}\\ \dot{I}_{\mathrm{F2}}\end{pmatrix}=\boldsymbol{S}^{-1}\begin{pmatrix}\dot{I}_{\mathrm{mnIA}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIB}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIC}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIA}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIB}}\\ \dot{I}_{\mathrm{mnIIC}}\end{pmatrix};$$

$\dot{U}_{\mathrm{T0}}$、$\dot{U}_{\mathrm{T1}}$、$\dot{U}_{\mathrm{T2}}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{F0}}$、$\dot{U}_{\mathrm{F1}}$、$\dot{U}_{\mathrm{F2}}$ 分别表示同、反向网 0、1、2 电压模分量；$\dot{I}_{\mathrm{T0}}$、$\dot{I}_{\mathrm{T1}}$、$\dot{I}_{\mathrm{T2}}$ 和 $\dot{I}_{\mathrm{F0}}$、$\dot{I}_{\mathrm{F1}}$、$\dot{I}_{\mathrm{F2}}$ 分别表示同、反向网 0、1、2 电流模分量。

由式(14)可知，存在互感的双回线通过变换矩阵 $\boldsymbol{S}$ 变换为 6 个相互独立的模量，而且矩阵 $\boldsymbol{S}$ 的运算因子均为实数，实数不但可简化运算，而且能够大大减少运算量。线间解耦矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的引入，既保留了Ⅰ、Ⅱ回线间的关联性，又具有类似六序分量法变换矩阵的性质，如应用同向网 1 模量，故障定位可以不受短路故障类型的束缚；结合变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的性质，相模变换矩阵 $\boldsymbol{S}$ 解耦后的同向网 1 模量和 2 模量在发生各种类型短路故障情况下均存在，从而可以应用同向网 1 模量或 2 模量实现各种短路故障下的故障定位。

2　同塔双回线的双端故障测距原理

通过上述对六相系统的相模变换矩阵的分析，可使用相模变换矩阵 $\boldsymbol{S}$ 来对同塔双回线进行解耦，并应用某一模分量来完成故障定位。首先以单相系统为例推导故障定位算法，输电线路采用分布参数线路模型，线路的故障示意图如图 3 所示。

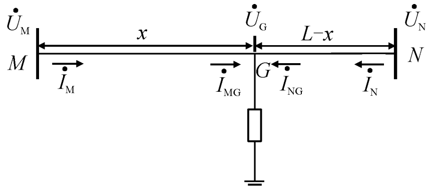

图 3　线路故障示意图

Fig. 3　Schematic diagram of line fault

图 3 中，$\dot{U}_{\mathrm{M}}$、$\dot{I}_{\mathrm{M}}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{N}}$、$\dot{I}_{\mathrm{N}}$ 分别为故障发生后在 M 侧和 N 侧所测得的电压、电流相量；线路总长为 L；G 为故障点，且到 M 侧的距离为 x；$\dot{U}_{\mathrm{G}}$ 为故障点电压相量；$\dot{I}_{\mathrm{MG}}$ 和 $\dot{I}_{\mathrm{NG}}$ 分别为 M 侧和 N 侧注入故障点的电流相量。依据文献[9]～[11]，在故障点 G 处，利用 M 侧和 N 侧的电压、电流推算求得的电压幅值分布存在相等关系，从而可构建故障定位函数：

$$F(x)=|\dot{U}_{\mathrm{M}i}\cosh\gamma_i x-Z_{\mathrm{c}i}\dot{I}_{\mathrm{M}i}\sinh\gamma_i x|-|\dot{U}_{\mathrm{N}i}\cosh\gamma_i(L-x)-Z_{\mathrm{c}i}\dot{I}_{\mathrm{N}i}\sinh\gamma_i(L-x)|\tag{15}$$

式中：下标 i 代表模分量序号；$\dot{U}_{\mathrm{M}i}$、$\dot{I}_{\mathrm{M}i}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{N}i}$、$\dot{I}_{\mathrm{N}i}$ 分别为 M 侧和 N 侧的电压、电流相量；$Z_{\mathrm{c}i}$ 为特性阻抗，$Z_{\mathrm{c}i}=\sqrt{Z_i/Y_i}$；$\gamma_i$ 为传播常数，$\gamma_i=\sqrt{Z_iY_i}$；Z_i 为线路的阻抗参数；Y_i 为线路的导纳参数。

对于式(15)，令 $F(x)=0$，可得故障定位方程。

根据叠加原理，故障定位亦可采用线路两侧电压、电流故障分量进行分析，从而消除故障定位使用工频电气量时所受负荷电流的影响[12-13]。则式(15)可改写为相应故障分量表示的形式：

$$F(x)=|\Delta\dot{U}_{\mathrm{M}i}\cosh\gamma_i x-Z_{\mathrm{c}i}\Delta\dot{I}_{\mathrm{M}i}\sinh\gamma_i x|-|\Delta\dot{U}_{\mathrm{N}i}\cosh\gamma_i(L-x)-Z_{\mathrm{c}i}\Delta\dot{I}_{\mathrm{N}i}\sinh\gamma_i(L-x)|\tag{16}$$

式中：$\Delta\dot{U}_{\mathrm{M}i}$、$\Delta\dot{I}_{\mathrm{M}i}$ 和 $\Delta\dot{U}_{\mathrm{N}i}$、$\Delta\dot{I}_{\mathrm{N}i}$ 分别为 $\dot{U}_{\mathrm{M}i}$、$\dot{I}_{\mathrm{M}i}$ 和 $\dot{U}_{\mathrm{N}i}$、$\dot{I}_{\mathrm{N}i}$ 的故障分量。

对式(16)求解，具体方法采用迭代搜索法[14]，选取步长 Δx，分别从线路双端推导沿线电压幅值分布曲线，两条曲线交点的位置则为故障点的位置。需要说明的是，Δx 取值越小，故障定位精度越高，但同时计算量也越大，计算时间亦越长。对于故障定位而言，并不要求有很高的实时性，因此有足够的时间来进行运算，实际计算中步长可根据工程需要进行选择。

式(16)所示的故障定位方程计算的是模值差，是根据在故障点处模值差为零而求得故障距离。对于同塔双回线系统，可应用某一模分量来实现故障定位。应用前文介绍的六相系统相模变换矩阵 $\boldsymbol{S}$ 进行解耦计算，采用同向网 1 模量或 2 模量，故障定位可以不受故障类型的束缚。需要说明的是，所采用的同向网 1 模量或 2 模量，在不同故障条件下线路双端测量点处模值会有所差别，但对于式(16)而言，故障点处模值差始终为零。考虑工程实际应用于故障定位的模分量在不同故障条件下的模值差别不是

双端故障定位计算的影响因素,因此本文仅应用同向网1模量或2模量进行计算亦不会影响到工程实际应用。

3 算例仿真分析

采用ATP-EMTP搭建同塔双回线模型进行仿真分析,如图4所示。系统及线路参数设置为:

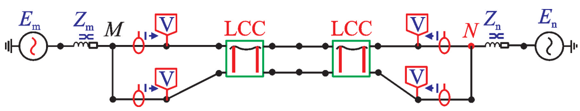

图4 同塔双回线仿真模型

Fig. 4 Simulation model for double-circuit lines

线路长度:$L = 250\text{km}$;

M 侧系统:电源电压 $\dot{E}_m = 220\angle 0^\circ$ kV,电源正序阻抗 $Z_{m1} = \text{j}28.3\ \Omega$,电源零序阻抗 $Z_{m0} = \text{j}26.3\ \Omega$;

N 侧系统:电源电压 $\dot{E}_n = 220\angle 30^\circ$ kV,电源正序阻抗 $Z_{n1} = \text{j}13.1\ \Omega$,电源零序阻抗 $Z_{n0} = \text{j}29.4\ \Omega$;

单位正序阻抗:$Z_1 = 0.0387 + \text{j}0.3098\ \Omega/\text{km}$;

单位零序阻抗:$Z_0 = 0.1865 + \text{j}0.7316\ \Omega/\text{km}$;

单位正序导纳:$\text{j}\omega C_1 = \text{j}3.7640\ \text{uS/km}$;

单位零序导纳:$\text{j}\omega C_0 = \text{j}2.0375\ \text{uS/km}$;

单位零序互阻抗:$Z_{M0} = 0.1478 + \text{j}0.4218\ \Omega/\text{km}$;

单位零序互导纳:$\text{j}\omega C_{M0} = \text{j}0.5429\ \text{uS/km}$。

本文为获取较高的精度,Δx 取值与定位精度一致,为0.1 m。故障定位采用双端电压、电流的故障分量。解耦计算采用所提的相模变换阵 $\boldsymbol{S}$,并应用求得的同向网1模量进行故障定位。以100 kHz采样频率对故障后的第二周波进行采样,并采用全周傅氏算法进行滤波。

首先对本文所提相模变换矩阵的有效性进行仿真验证。表2列出了同塔双回线在几种比较典型的短路故障下,与六序分量变换矩阵的对比结果,其中相间和接地的过渡电阻均设为50 Ω,故障距离设为50 km。可见,本文所提的相模变换法能够在单模量下完成测距,并满足故障定位的要求。

表3列出了同塔双回线在故障距离为50 km、90 km、160 km和230 km时,发生几种比较典型的短路故障情况下的故障定位结果,其中相间和接地的过渡电阻均设为50 Ω。由表3可知,同塔双回线在发生不同短路故障情况下,该算法均可以满足故障定位要求,并可避免短路故障类型的影响。

表2 故障定位比较结果

Tab. 2 Comparison results of fault location

短路故障	故障定位/km	
	六序分量变换	本文所提方法
Ⅰ A-G	49.957 1	49.957 4
Ⅰ AB	49.953 9	49.953 9
Ⅰ AB-G	49.951 8	49.613 6
Ⅰ ABC	49.778 9	49.598 1
Ⅰ BⅡ C-G	49.780 2	49.650 2
Ⅰ BⅡ C	49.648 9	49.648 9
Ⅰ AⅡ BC-G	49.778 9	49.598 1
Ⅰ AⅡ BC	49.778 9	49.598 1
Ⅰ ABⅡ BC-G	49.936 3	49.601 8
Ⅰ ABⅡ BC	50.050 9	50.050 8
Ⅰ AⅡ ABC-G	49.950 6	49.498 8
Ⅰ AⅡ ABC	49.945 3	49.945 3

表3 不同短路故障情况下故障定位结果

Tab. 3 Location results of different faults

短路故障	故障定位/km			
	230	160	90	50
Ⅰ A-G	229.942 3	160.276 1	90.109 6	49.957 4
Ⅰ AB	230.062 0	160.079 8	90.095 5	49.953 9
Ⅰ AB-G	230.066 1	160.077 5	89.875 3	49.613 6
Ⅰ ABC	230.148 1	159.850 1	89.621 2	49.598 1
Ⅰ BⅡ C-G	230.145 4	159.911 5	89.710 1	49.650 2
Ⅰ BⅡ C	230.164 4	159.913 5	89.716 0	49.648 9
Ⅰ AⅡ BC-G	230.066 1	159.851 2	89.616 7	49.598 1
Ⅰ AⅡ BC	230.062 0	160.079 8	90.097 6	49.598 1
Ⅰ ABⅡ BC-G	230.216 7	159.937 1	89.712 5	49.601 8
Ⅰ ABⅡ BC	230.089 0	159.941 9	89.961 3	50.050 8
Ⅰ AⅡ ABC-G	230.203 8	159.902 9	89.682 6	49.498 8
Ⅰ AⅡ ABC	230.075 2	159.991 6	89.955 6	49.945 3

同塔双回线经不同过渡电阻(过渡电阻分别取0 Ω、50 Ω、100 Ω、300 Ω)发生短路故障时的仿真结果如表4所示。由表4可知,同塔双回线在发生不同短路故障情况下,该算法无论过渡电阻大小,故障定位结果均可取得较高精度,可避免过渡电阻的影响。

表5列出了Ⅰ回线发生单相接地短路故障时,数据不同步的故障定位结果。其中过渡电阻设为

50 Ω，不同步角设为−π/3、−π/6、0、π/6、π/3。由表 5 可知，故障定位结果不受不同步角的影响。

表 4 过渡电阻对定位结果的影响

Tab. 4 Effect of location results on different transition resistances

短路故障	距离/km	故障定位/km			
		300 Ω	100 Ω	50 Ω	0 Ω
ⅠA-G	90	89.856 3	90.025 5	90.109 6	89.252 7
	160	159.484 7	160.045 6	160.276 1	160.630 0
ⅠAB-G	90	89.314 5	89.747 9	89.875 3	90.546 5
	160	160.286 4	159.965 4	160.077 5	160.375 9
ⅠBⅡC-G	90	89.566 4	89.712 5	89.710 1	90.092 4
	160	160.098 3	159.935 9	159.911 5	160.128 6
ⅠAⅡBC-G	90	89.443 4	89.630 7	89.616 7	90.124 2
	160	160.094 2	159.910 8	159.851 2	159.934 3
ⅠABⅡBC-G	90	89.421 8	89.660 3	89.712 5	89.955 8
	160	160.341 3	159.955 2	159.937 1	160.100 5
ⅠAⅡABC-G	90	89.371 5	89.575 5	89.682 6	90.103 6
	160	160.431 9	159.930 0	159.902 9	159.657 6

表 5 数据不同步对故障定位结果的影响

Tab. 5 Effect of fault location on different non-synchronous angles

不同步角	IA-G	
	故障距离/km	故障定位/km
−π/3	90	89.995 0
	160	159.989 4
−π/6	90	90.109 6
	160	160.276 1
0	90	90.193 0
	160	160.565 4
π/6	90	90.120 6
	160	160.430 0
π/3	90	90.022 3
	160	160.286 9

4 结 语

同塔双回线存在相间和线间耦合，因此在进行故障定位前需要对六相系统进行解耦计算，本文结合均匀换位线路的相模变换矩阵的数学性质，根据三相系统和六相系统之间的关系，推导出了能够适用于同塔双回线的新相模变换矩阵。该矩阵可用单一模量反映各种短路故障类型，且运算因子均为实数，实数运算相对简单，并且可减少计算量。ATP-EMTP仿真结果表明，将新相模变换矩阵用于同塔双回线的故障定位中，故障定位结果不受故障类型、过渡电阻和数据不同步的影响。

参考文献：

[1] 梁振锋，宋国兵，康小宁，等. 数字化变电站同杆并架平行双回线路保护的研究[J]. 西安理工大学学报，2012，28(4)：444-448.
LIANG Zhenfeng，SONG Guobing，KANG Xiaoning，et al. Research on the protective relaying for double-circuit lines on the same tower in digital substation[J]. Journal of Xi'an University of Technology，2012，28(4)：444-448.

[2] 李世龙，陈卫，邹耀，等. 同杆并架线路阻抗比横联差动保护研究[J]. 电工技术学报，2016，31(21)：21-29.
LI Shilong，CHEN Wei，ZOU Yao，et al. Transverse differential protection based on the ratio of impedance for double circuit lines on the same tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(21)：21-29.

[3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距原理与技术[M]. 西安：西安交通大学出版社，2007.

[4] 马静，史宇欣，马伟，等. 基于分布参数的同杆双回线跨线及接地故障单端定位方法[J]. 电网技术，2014，38(9)：2525-2531.
MA Jing，SHI Yuxin，MA Wei，et al. Distributed parameter based one-end fault location for inter-line fault and earth fault in double-circuit transmission lines on

same tower[J]. Power System Technology，2014，38(9)：2525-2531.

[5] LIN B S，ELANGOVAN S. A fault location method for parallel transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems，1999，21(4)：253-259.

[6] 孙立山，张晓友，陈学允. 平行双回线故障测距算法的研究[J]. 电力系统自动化，1999，23(5)：28-30.
SUN Lishan，ZHANG Xiaoyou，CHEN Xueyun. Research on a new fault location method for parallel transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems，1999，23(5)：28-30.

[7] 束洪春，刘振松，彭仕欣. 耦合双回线路电弧故障测距的新相模变换方法[J]. 高电压技术，2009，35(3)：480-486.
SHU Hongchun，LIU Zhensong，PENG Shixin. Locating arc faults on coupling two parallel transmission lines using the novel phase-model transformation[J]. High Voltage Engineering，2009，35(3)：480-486.

[8] 李振兴，田斌，李振华，等. 适用于单/双回线的双端非同步故障测距方法[J]. 电力系统自动化，2016，40(22)：105-110.
LI Zhenxing，TIAN Bin，LI Zhenhua，et al. Two-terminal nonsynchronized fault location algorithms for single/double transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(22)：105-110.

[9] 桂勋，刘志刚，韩旭东，等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报，2009，29(19)：63-69.
GUI Xun，LIU Zhigang，HAN Xudong，et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(19)：63-69.

[10] 王守鹏，赵冬梅，商立群，等. 基于线路分段参数的非全程同塔双回线故障定位算法[J]. 电工技术学报，2017，32(20)：261-270.
WANG Shoupeng，ZHAO Dongmei，SHANG Liqun，et al. Fault location algorithm for incomplete double-circuit transmission lines based on line segement parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2017，32(20)：261-270.

[11] MAZÓN A J，MIÑAMBRES J F，ZORROZUA M A，et al. New method of fault location on double-circuit two-terminal transmission lines[J]. Electric Power Systems Research，1995，35(3)：213-219.

[12] 刘琦，邰能灵，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.

[13] 肖先勇，何婧宇，陈缨，等. 非有效接地配电网单相接地故障定位的技术难点[J]. 电力科学与技术学报，2018，33(4)：168-176.
XIAO Xianyong，HE Jingyu，CHEN Ying，et al. Technological difficulty of single line ground fault location in neutral un-effective grounded distribution system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2018，33(4)：168-176.

[14] 辛振涛，尚德基，尹项根. 一种双端测距算法的伪根问题与改进[J]. 继电器，2005，33(6)：36-38,45.
XIN Zhentao，SHANG Deji，YIN Xianggen. False root and its improvement of a two-terminal fault location algorithm on transmission line[J]. Relay，2005，33(6)：36-38,45.

(责任编辑 周 蓓)