

# 一种可反映电缆全类型故障的相模变换矩阵

王植<sup>1</sup>, 王宾<sup>2</sup>

(1. 烟台小亨运帷电力技术有限公司, 山东 烟台 264000; 2. 新型电力系统运行与控制  
全国重点实验室(清华大学电机系), 北京 100084)

**摘要:** 相模变换是实现三相耦合电力系统故障分析的基础。相模变换矩阵结构的差异性将直接影响故障辨识的快速性、准确性和基于单一模量进行故障类型辨识的有效性。针对现有相模变换提取的模故障分量不能反映所有故障类型的问题, 提出一种可反映全类型电缆故障的故障分量相模变换矩阵。首先, 基于电缆的物理结构, 对电缆进行故障暂态特征模量分析, 总结各等效导体间的耦合特征。然后, 结合均匀换位电缆线路参数的数学特征, 提出一种可反映全类型电缆故障的故障分量相模变换矩阵, 并分析各模量的传输路径和衰减特性。最后, 以某配网系统为例, 在 PSCAD 中进行仿真验证。结果表明: 所提解耦矩阵能有效解耦电缆系统, 解耦出的单一模量即可反映电缆的全故障类型, 且波速度稳定、衰减小, 适用于电缆测距。

**关键词:** 相模变换; 电缆线路; 故障检测; 行波测距

## A phase-mode transformation matrix for reflecting all types of cable faults

WANG Zhi<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>

(1. Yantai Xiaoheng Yunwei Electric Power Technology Co., Ltd., Yantai 264000, China; 2. National Key Laboratory of New Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

**Abstract:** Phase-mode transformation is fundamental for fault analysis in three-phase coupled power systems. The structural differences in phase-mode transformation matrices directly affect the speed and accuracy of fault identification, as well as the effectiveness of single-mode fault type classification. To address the issue that existing phase-mode transformations fail to extract modal fault components that reflect all fault types, this paper proposes a phase-mode transformation matrix for fault components capable of representing all types of cable faults. First, based on the physical structure of the cables, a transient fault characteristic analysis is conducted to summarize the coupling characteristics between equivalent conductors. Then, considering the mathematical characteristics of uniformly transposed cable line parameters, a fault component phase-mode transformation matrix that reflects all cable fault types is proposed. The transmission paths and attenuation characteristics of each mode are also analyzed. Finally, a case study based on a distribution network system is conducted, and simulation verification is performed in PSCAD. The results show that the proposed decoupling matrix can effectively decouple the cable system, allowing a single extracted mode to reflect all cable fault types while maintaining stable wave velocity and minimum attenuation, making it suitable for cable fault location.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23B20117).

**Key words:** phase mode transformation; power cable; fault detection; fault location based on travelling wave

## 0 引言

随着城市化快速推进, 架空线路替换为地下电缆的比例持续增加, 地下电缆在城市配电网中的关

键地位日益凸显。地下电缆在运行过程中可能受到外部力量破坏、过电压冲击以及动物侵害等多种因素威胁, 同时电缆自身也可能存在绝缘缺陷, 会导致电缆在长时间带电运行中发生故障。对电缆故障进行灵敏检测和准确测距对于保证供电安全性与可靠性具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U23B20117)

电缆故障测距精度要求极高, 基于时域或频域扫描的行波测距是目前唯一可行的技术手段<sup>[4-5]</sup>。行波测距技术的难点与关键点在于波头的准确识别和波速度的精确确定。电缆结构复杂, 各相导芯及金属屏蔽层之间电磁耦合复杂, 会极大地影响行波波头的识别准确性, 从而影响测距精度, 甚至导致测距失败<sup>[6-8]</sup>。因此, 在故障测距之前, 必须对三相电气量进行解耦计算, 这一过程通常通过相模变换来实现。相模变换是一种数学方法, 用于将复杂的耦合线路系统简化为独立的、易于分析的模块。从而为故障测距提供准确且可靠的数据基础。此时对于相模变换矩阵提出了3个要求: 1) 可以简洁高效地进行模量解耦; 2) 得到的某一模量波速度随频率变化基本保持稳定; 3) 某单一模量可以反映全故障类型。

现有的相模变换矩阵主要包括: 对称分量变换、Clarke变换、Karenbauer变换和Wedpohl变换等<sup>[9-12]</sup>。对称分量变换含有复数因子, 适于工频稳态下的相量分析, 具有理论成熟、应用经验丰富等优点, 但由于涉及复数运算, 导致其计算量较大。Clarke变换、Karenbauer变换和Wedpohl变换矩阵中元素全为实数, 计算简洁方便, 在电力系统中得到了广泛应用。然而, 此类相模变换矩阵存在单一模量不能反映所有故障类型的固有局限性。为了提高适应性, 通常需要采用双模量或结合选相技术以确保对各种故障类型的有效识别<sup>[13-16]</sup>。例如: 文献[17]针对均匀换位输电线路并结合相模变换矩阵的数学性质, 提出了一种利用单一线模量即可识别所有故障类型的新时域相模变换矩阵; 文献[10]针对三相四线制系统提出了一种利用单模量进行故障类型辨识的四阶时域相模变换矩阵; 文献[18-19]针对均匀换位输电线路, 依据三相系统和六相系统之间的关联关系, 提出了由单一模量反映所有故障类型的同塔双回线相模变换矩阵。但是, 以上研究均不适用于电缆的解耦分析。

针对以上情况, 本文通过分析电缆各等效导体间的耦合特征, 提出了一种可反映全类型电缆故障的故障分量相模变换矩阵, 分析了各模量的传输路径和衰减特性, 并仿真验证了其有效性。

### 1 三相单芯电缆故障暂态特征模量分析

本文以三相单芯电缆为研究对象, 电缆由导芯、绝缘层、金属屏蔽层以及外护套层4个主要组成部分构成, 如图1所示。

以三相品字形排列为例, 三相电缆可视为均匀换位, 其电气参数具有对称一致性。当电流通过电缆的导芯时, 交变电流会产生变化的磁场, 表现为

导芯与金属屏蔽层之间的互阻抗。同时会产生一个垂直于电缆截面半径方向的电场, 这个电场不仅影响导芯本身, 还会扩散到金属屏蔽层中, 表现为导芯与金属屏蔽层之间的互导纳。对于直埋电缆, 各相电缆之间通过大地隔离, 大地是一种导电介质, 因此会形成屏蔽效应, 两相电缆之间不存在等效互导纳。三相单芯电缆的耦合模型如图2所示, 电磁耦合复杂, 必须通过相模变换, 将耦合系统变为解耦系统, 才能应用于故障测距。

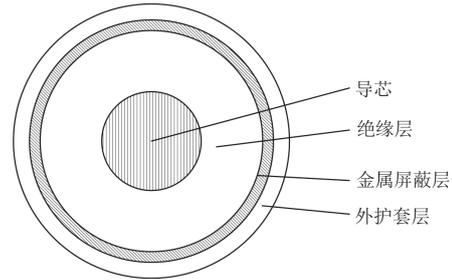


图1 电缆的基本结构

Fig. 1 Basic structure of cable

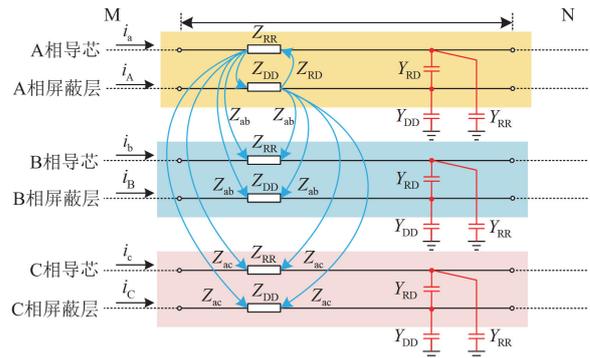


图2 三相单芯电缆的耦合模型

Fig. 2 Coupling model of three-phase single-core cable

将多导体线路中相互耦合的相量简化为多个独立的模量<sup>[20-21]</sup>, 即相当于分析单导体过程, 电缆系统中导体的二维波动方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} -\frac{d^2 \mathbf{U}}{dz^2} = \mathbf{ZYU} = \mathbf{PU} \\ -\frac{d^2 \mathbf{I}}{dz^2} = \mathbf{YZI} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为向量域电压矩阵;  $\mathbf{I}$  为向量域电流矩阵;  $\mathbf{Z}$  为串联阻抗矩阵;  $\mathbf{Y}$  为并联导纳矩阵;  $\mathbf{P}$  为电压传播系数矩阵。模量解耦的过程就是通过变换矩阵, 将电压传播系数矩阵  $\mathbf{P}$  转化为对角矩阵的过程<sup>[22]</sup>。

通过选取适当的电压相模变换矩阵  $\mathbf{S}$  和电流相模变换矩阵  $\mathbf{Q}$ , 可以将向量域电压矩阵  $\mathbf{U}$  和向量

域电流矩阵  $\mathbf{I}$  转化为模量域电压矩阵  $\mathbf{U}_m$  和模量域电流矩阵  $\mathbf{I}_m$ ，转化关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{U} = \mathbf{S}\mathbf{U}_m \\ \mathbf{I} = \mathbf{Q}\mathbf{I}_m \end{cases} \quad (2)$$

对于均匀换位的三相单芯电缆线路，串联阻抗矩阵  $\mathbf{Z}$  为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{RR} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{RD} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{RR} & Z_{bc} & Z_{ab} & Z_{RD} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{RR} & Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{RD} \\ Z_{RD} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{DD} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{RD} & Z_{bc} & Z_{ab} & Z_{DD} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{RD} & Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{DD} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $Z_{RR}$ 、 $Z_{DD}$ 、 $Z_{RD}$  分别为三相导芯的自阻抗、三相金属屏蔽层的自阻抗和三相导芯与金属屏蔽层之间的互阻抗； $Z_{ab}$ 、 $Z_{ac}$ 、 $Z_{bc}$  分别为三相导芯之间的互阻抗，数值上等同于三相金属屏蔽层之间的互阻抗<sup>[23-24]</sup>。

并联导纳矩阵  $\mathbf{Y}$  为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{RR} & 0 & 0 & Y_{RD} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{RR} & 0 & 0 & Y_{RD} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{RR} & 0 & 0 & Y_{RD} \\ Y_{RD} & 0 & 0 & Y_{DD} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{RD} & 0 & 0 & Y_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{RD} & 0 & 0 & Y_{DD} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $Y_{RR}$ 、 $Y_{DD}$ 、 $Y_{RD}$  分别为三相导芯的自导纳、三相金属屏蔽层的自导纳和三相导芯与金属屏蔽层之间的互导纳。

## 2 一种新相模变换矩阵

当频率增高时， $Z_{RD}$  趋近于  $Z_{DD}$ <sup>[25-26]</sup>，因此电压传播系数矩阵  $\mathbf{P}$  为

$$\mathbf{P} = \mathbf{Z}\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} (Z_{RD} - Z_{RR})Y_{RD} & & \\ & (Z_{RD} - Z_{RR})Y_{RD} & \\ & & (Z_{RD} - Z_{RR})Y_{RD} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} Z_{RD}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{ab}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{ac}(Y_{DD} - Y_{RR}) \\ Z_{ab}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{RD}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{bc}(Y_{DD} - Y_{RR}) \\ Z_{ac}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{bc}(Y_{DD} - Y_{RR}) & Z_{RD}(Y_{DD} - Y_{RR}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时引进矩阵  $\mathbf{K}$ ，如式(7)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{J} \\ \mathbf{J} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{J} \\ \mathbf{J} & -\mathbf{J} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{J}$  为三阶单位矩阵； $\mathbf{0}$  为三阶零矩阵。通过矩阵  $\mathbf{K}$  对矩阵  $\mathbf{P}$  进行处理，使  $\mathbf{P}$  矩阵转化，如式(8)所示。

$$\mathbf{K}^{-1}\mathbf{P}\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{P}_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

若将矩阵  $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_2$  分别对角化，便可以实现矩阵  $\mathbf{P}$  的对角化，由式(6)可知矩阵  $\mathbf{P}_1$  已为对角形式，矩阵  $\mathbf{P}_2$  为

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} a = Z_{RD}(Y_{DD} - Y_{RR}) \\ b = Z_{ab}(Y_{DD} - Y_{RR}) \end{cases} \quad (10)$$

由矩阵特征方程  $\det(\mathbf{P}_2 - \lambda\mathbf{I}) = 0$  可得，矩阵特征值为

$$\begin{cases} \lambda_1 = a + 2b \\ \lambda_2 = \lambda_3 = a - b \end{cases} \quad (11)$$

设特征值  $\lambda_i$  的特征向量为  $\mathbf{S}_i$ ， $\mathbf{S}_i = [S_{1i} \ S_{2i} \ S_{3i}]^T$ ，矩阵特征值和特征向量的关系如式(12)所示。

$$(\mathbf{P} - \lambda_i\mathbf{I})\mathbf{S}_i = \mathbf{0} \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)可得

$$\begin{cases} s_{11} = s_{21} = s_{31} \\ s_{12} + s_{22} + s_{32} = 0 \\ s_{13} + s_{23} + s_{33} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

因此，对于任意满足式(13)关系的 3 阶矩阵，都能将矩阵  $\mathbf{P}_2$  对角化。

基于以上分析，构建矩阵  $\mathbf{T}_2^{-1}$ ，如式(14)所示。

$$\mathbf{T}_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

施密特正交化后的矩阵  $\mathbf{T}_2$ 、 $\mathbf{T}_2^{-1}$  分别如式(15)、式(16)所示。

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{5}{\sqrt{42}} & \frac{1}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{42}} & \frac{-3}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-4}{\sqrt{42}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$T_2^{-1} = T_2^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{5}{\sqrt{42}} & \frac{-1}{\sqrt{42}} & \frac{-4}{\sqrt{42}} \\ \frac{1}{\sqrt{14}} & \frac{-3}{\sqrt{14}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

矩阵  $P_1$  是一个对角阵, 经过与任意可逆矩阵的乘法后, 都可转化为对角形式<sup>[26]</sup>。假设  $P_1$  的特征矩阵为  $T_1$ , 若其数值满足  $T_1 = -T_2$ , 则电压相模变换矩阵  $S$  和电流相模变换矩阵  $Q$  如式(17)所示。

$$\begin{cases} S = KT = \begin{bmatrix} J & J \\ J & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_2 & 0 \\ 0 & T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_2 & -T_2 \\ T_2 & 0 \end{bmatrix} \\ Q = (S^{-1})^T = \begin{bmatrix} 0 & -T_2 \\ T_2 & T_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

基于上述分析, 针对均匀换位的电缆线路, 提出一种新的相模变换矩阵, 如式(18)所示。

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{-5}{\sqrt{42}} & \frac{-1}{\sqrt{14}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{42}} & \frac{3}{\sqrt{42}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{3}} & \frac{4}{\sqrt{42}} & \frac{-2}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{5}{\sqrt{42}} & \frac{1}{\sqrt{14}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{5}{\sqrt{42}} & \frac{1}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{42}} & \frac{-3}{\sqrt{14}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{42}} & \frac{-3}{\sqrt{42}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-4}{\sqrt{42}} & \frac{2}{\sqrt{14}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-4}{\sqrt{42}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

电缆三相导芯电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  和三相金属屏蔽层电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  由向量域转化为模量域  $i_1 - i_6$  的计算过程如式(19)所示。

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{42}}(5i_a - i_b - 4i_c + 5i_A - i_B - 4i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{14}}(i_a - 3i_b + 2i_c + i_A - 3i_B + 2i_C) \\ i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{42}}(5i_a + i_b - 4i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{14}}(i_a - 3i_b + 2i_c) \end{cases} \quad (19)$$

新相模变换矩阵各种故障情况下电流行波模量状态如表 1 所示。

表 1 新相模变换矩阵各种故障情况下电流行波模量状态  
Table 1 New phase-mode transformation matrix for the current wave modulus state in various fault conditions

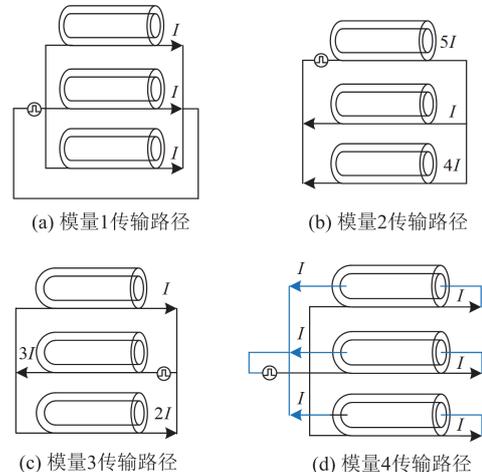
故障类型	模量 1	模量 2	模量 3	模量 4	模量 5	模量 6
A-SA-G	√	√	√	√	√	√
B-SB-G	√	√	√	√	√	√
C-SC-G	√	√	√	√	√	√
A-SA-SB-B	×	√	√	×	√	√
A-SA-SC-C	×	√	√	×	√	√
B-SB-SC-C	×	√	√	×	√	√
A-SA-SB-B-G	√	√	√	√	√	√
A-SA-SC-C-G	√	√	√	√	√	√
B-SB-SC-C-G	√	√	√	√	√	√
A-SA-SB-B-SC-C	×	√	√	×	√	√
A-SA-SB-B-SC-C-G	√	√	√	√	√	√

表 1 中, A、B、C 表示三相的导芯, SA、SB、SC 表示三相的金属屏蔽层, G 表示大地。比如, A-SA-G 表示 A 相导芯与 A 相金属屏蔽层之间的短路接地故障, 其他故障类型可类似推导。“√”表示相应的模量存在, 而“×”表示模量很小或不存在。由表 1 可知, 运用新相模变换矩阵得到的电流模量 2、模量 3、模量 5 和模量 6 均能反映所有故障类型。

### 3 新相模变换矩阵的特性分析

新相模变换矩阵各模量传输路径如图 3 所示。

模量 1 描述了电流从各相金属屏蔽层流出并从大地返回的情况。由于经过大地传输, 所以其传播速度最慢, 且存在巨大的衰减。模量 2、3 描述了电流从某相金属屏蔽层流出, 并从其余两相金属屏蔽层返回的情况。



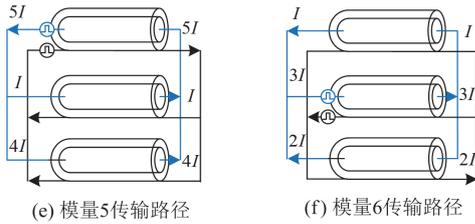


图3 新相模变换矩阵各模量传输路径

Fig. 3 Transmission paths of individual modes in the new phase-mode transformation matrix

模量4描述了电流从各相导芯流出,并从对应的金属屏蔽层返回的情况。模量5描述了电流从某个边相导芯流出,并从中间相和另一个边相导芯返回的情况。这种导芯电流注入会产生磁通,引发感应环流,感应环流的强度受金属护层电阻的影响。在低频条件下,金属护层的电阻较高,感应环流相对较小;随着频率的提高,金属护层电阻减小,感应环流增大。模量6描述了在中间相导芯中注入电流,并从两个边缘相导芯中返回的情况,其特性与模量5相似。

行波传输速度  $v$  和衰减系数  $\alpha$  为描述行波传播特性的两个重要参数,如式(20)所示。

$$\begin{cases} v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ \alpha = \frac{RC}{2\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为电缆的单位长度电阻、电感、电容。以某配网电缆为例进行分析,电缆的敷设方式如图4所示,电缆的参数如表2所示。

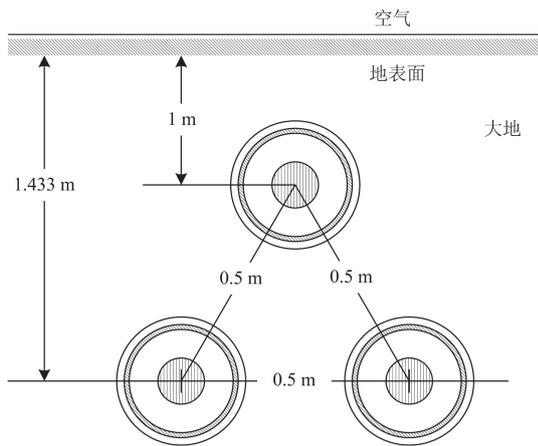


图4 电缆的敷设方式

Fig. 4 Cable laying method

基于表2所列电缆参数,计算单位长度电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$ ,并将计算结果代入到式(20)中,

得到新相模变换矩阵解耦后模量1—模量6的波速和衰减系数随频率变化的曲线分别如图5和图6所示。

表2 电缆的参数

Table 2 Cable parameters

结构	参数	数值
导体	材料/( $\Omega \cdot m$ )	铜
	电阻率	$1.7 \times 10^{-8}$
	外径/mm	18.6
	相对磁导率	1
主绝缘	内径/mm	18.6
	外径/mm	41.6
	相对介电常数	2.3
金属护套	材料/( $\Omega \cdot m$ )	铝
	电阻率	$2.8 \times 10^{-8}$
	内径/mm	41.6
	外径/mm	45.6
护层绝缘	外径/mm	51.6
	相对介电常数	3.5

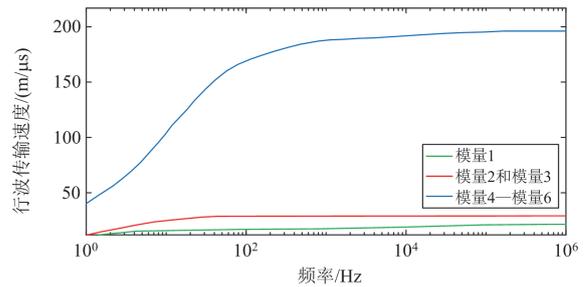


图5 模量1—模量6波速随频率变化的曲线

Fig. 5 Curve of wave velocity of modulus 1—6 changing with frequency

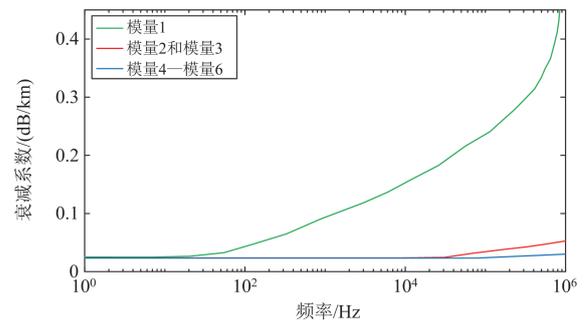


图6 模量1—模量6衰减随频率变化的曲线

Fig. 6 Curve of attenuation of modulus 1—6 with frequency

可见,随着频率的增加各模量的传播速度和衰减系数都随之增大,在频率趋于高频时,传播速度接近稳定。模量1以大地为回路,大地的电阻率远

高于导芯和金属屏蔽层, 因此其传播速度最慢且衰减系数最大。模量 2—模量 3 的波速特性相似, 均高于模量 1, 但低于模量 4—模量 6。模量 2 和模量 3 的衰减特性相似, 均高于模量 4—模量 6, 但低于模量 1。模量 4—模量 6 的波速特性相似, 明显高于模量 1—模量 3, 在频率大于 5000 Hz 后速度上升趋势变缓。模量 4—模量 6 的衰减特性相似, 明显低于模量 1—模量 3, 这是因为导芯的电阻率小于金属屏蔽层和大地的电阻率, 因此更适用于电缆故障测距。

#### 4 算例仿真

在 PSCAD 中建立如图 7 所示的配电网拓扑进行仿真验证, 线路  $L_1$ 、 $L_2$  为架空线路, 线路长度均为 10 km, 线路  $L_3$  为电缆, 线路长度 15 km。仿真的采样率设置为 10 MHz, 故障类型为 B 相金属性接地故障, 将故障点设置为距离测点 M 10 km 处, 故障时刻为 35 ms。

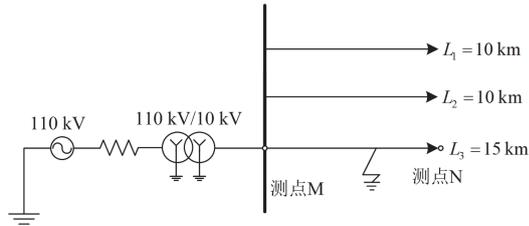


图 7 配电网拓扑图

Fig. 7 Distribution network topology

工程中常用的电缆相模变换矩阵为扩展 Clarke 电流相模变换矩阵, 提取故障发生时刻附近的波形, 测点 M 记录的故障波形经扩展 Clarke 矩阵解耦处理后, 其电流行波模量 3、模量 6 的波形如图 8 所示。可见, 扩展 Clarke 矩阵解耦出的电流行波模量 3、模量 6 均不能反映故障情况。

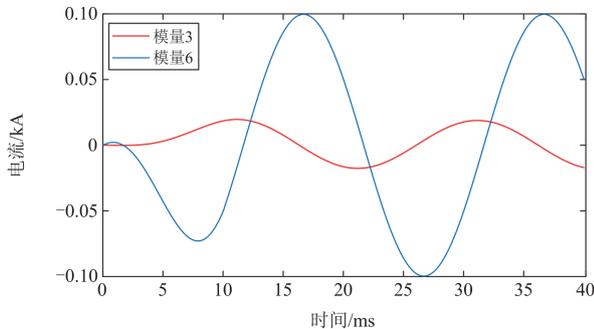


图 8 扩展 Clarke 矩阵解耦后电流行波模量 3 和模量 6 的波形

Fig. 8 Waveform of moduli 3 and 6 after decoupling of the extended Clarke matrix

提取故障发生时刻附近的波形, 测点 M 记录的故障波形经新相模变换矩阵解耦处理后, 其电流行波模量 3 和模量 6 的波形如图 9 所示。可以看出, 新相模变换矩阵解耦出的电流行波模量 3 和模量 6 均可以反映故障情况。

采集测点 M、N 处的电流信号, 并使用本文提出的新相模变换矩阵处理得到电流模量 6 作为行波测距信号, 对电流行波模量 6 进行小波变换, 提取其模极大值分布如图 10 所示。由图 10 可得, 新解耦矩阵得到的电流模量 6 呈现出清晰的模极大值特征, 将模极大值时刻作为行波到达测量端的时刻, 进行故障测距。

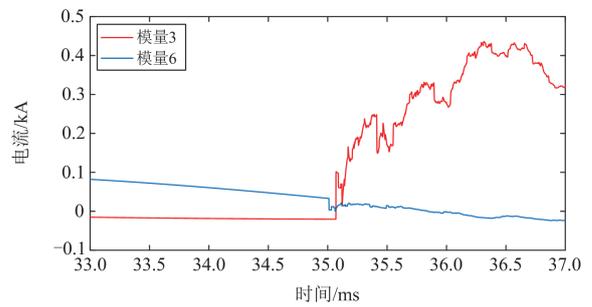


图 9 新相模变换矩阵解耦后电流行波模量 3 和模量 6 的波形

Fig. 9 Waveform of moduli 3 and 6 after decoupling of the new phase-mode transformation matrix

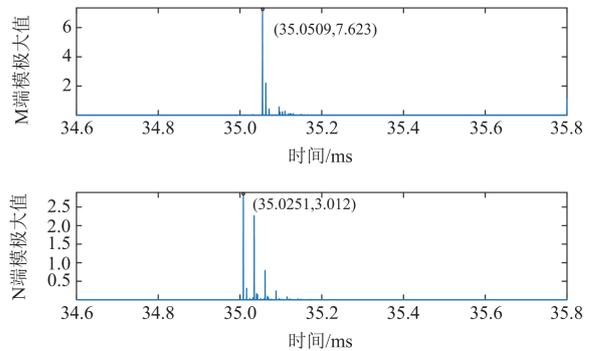


图 10 新相模变换矩阵处理后的模量 6 小波模极大值

Fig. 10 Wavelet modulus maxima of mode 6 processed by the new phase-mode transformation matrix

由图 10 可以得出, 行波到达 M 端的时刻为  $t_1 = 35.0509$  ms, 行波到达 N 端的时刻为  $t_2 = 35.0251$  ms。通过式(20)计算可得模量 6 的波速  $v = 1.9608 \times 10^8$  m/s, 代入双端行波测距式中, 则可得测距结果  $d$  为

$$d = \frac{L_3 + (t_1 - t_2)v}{2} = 10.0294 \text{ km} \quad (21)$$

测距相对误差  $\delta$  为

$$\delta = \left| \frac{D-d}{D} \right| \times 100\% = 0.294\% \quad (22)$$

式中,  $D$  为故障距离。

由上述故障定位结果可知, 经过本文所述新相模变换矩阵处理后所产生的模量适用于电缆行波测距。在其他仿真条件不变的基础上, 设置不同的故障类型, 得到仿真结果如表 3 所示。

建立如图 11 所示的多分支配电网模型, 其中  $M_0$  和  $M_9$  分别为主干线路始末端, 装有行波采集装置,  $M_1 - M_8$  为各线路末端, 所有线路均为参数相同的电缆线路。

表 3 不同故障类型下的仿真结果

Table 3 Simulation results of different fault types

故障类型	测距结果/km	相对误差/%
A-SA-G	9.9983	0.017
B-SB-G	10.0294	0.294
C-SC-G	10.0116	0.116
A-SA-SB-B	9.9839	0.160
A-SA-SC-C	10.035	0.350
B-SB-SC-C	9.9897	0.103
A-SA-SB-B-G	10.021	0.210
A-SA-SC-C-G	10.015	0.150
B-SB-SC-C-G	9.9976	0.024
A-SA-SB-B-SC-C	9.9849	0.151
A-SA-SB-B-SC-C-G	10.037	0.370

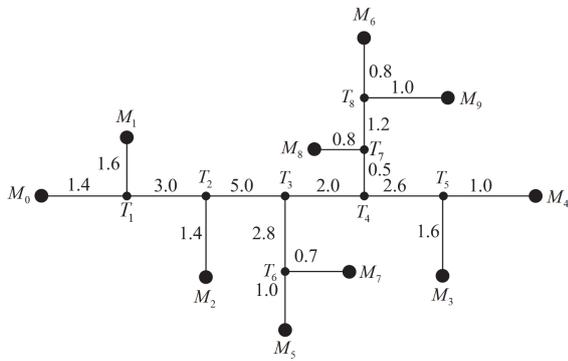


图 11 多分支配电网拓扑图

Fig. 11 Multi-branch distribution network topology

仿真的采样率设置为 10 MHz, 故障点设置在距离分支节点  $T_4$  和  $T_5$  之间, 距离  $T_4$  节点 0.4 km, 即距离线路首端  $M_0$  节点 12 km 处, 其余参数设置与上文相同, 得到多分支线路不同故障类型下的仿真结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 采纳本文所提出的相模变换矩阵, 单一模量即可反映全故障状态, 即使只运用传统的

小波模极大值法, 各故障类型对应的测距相对误差均保持在 0.4% 以内, 反映了该相模变换矩阵应用于电缆行波测距的有效性。

表 4 多分支线路不同故障类型下的仿真结果

Table 4 Simulation results of multi-branch lines of different fault types

故障类型	测距结果/km	相对误差/%
A-SA-G	15.0540	0.360
B-SB-G	15.0590	0.393
C-SC-G	15.0306	0.204
A-SA-SB-B	15.0112	0.075
A-SA-SC-C	14.9600	0.267
B-SB-SC-C	14.9519	0.321
A-SA-SB-B-G	15.0122	0.081
A-SA-SC-C-G	14.9404	0.397
B-SB-SC-C-G	15.0400	0.267
A-SA-SB-B-SC-C	14.9415	0.390
A-SA-SB-B-SC-C-G	14.9696	0.203

## 5 结论

针对现有相模变换矩阵用于电缆精确测距的不足, 本文提出了一新相模变换矩阵, 解决了现有电缆相模变换矩阵单模量不能反映所有故障类型的问题。分析了新相模变换矩阵的模量特性, 发现其模量速度稳定, 衰减小, 适用于行波测距。应用新相模变换矩阵对配网电缆线路进行了测距仿真, 各种故障类型下测距精度都维持在 0.4% 以内, 验证了本文提出的解耦矩阵的有效性。

## 参考文献

- [1] 姜崇学, 李钢, 张宝顺, 等. 长距离直流电缆对柔性直流系统故障影响分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 112-118.  
JIANG Chongxue, LI Gang, ZHANG Baoshun, et al. Analysis of the influence of long-distance DC cable on the fault of flexible HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 112-118.
- [2] 李松峰, 谢书凝, 张彬, 等. 基于切比雪夫窗的配电网电缆缺陷诊断优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 116-124.  
LI Songfeng, XIE Shuning, ZHANG Bin, et al. Research on optimization of distribution cable defect diagnosis based on Chebyshev window[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, (3): 116-124.
- [3] 何嘉弘, 何康, 董博文. 配网电缆接头内部缺陷电场特征研究及电树发展分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 154-161.  
HE Jiahong, HE Kang, DONG Bowen. Electric field

- characteristics investigation and electrical tree propagation of distributed network cable joint with defects[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 154-161.
- [4] TANG Minan, LU Hang, LI Bin. Fault location of untransposed double-circuit transmission lines based on an improved Karrenbauer matrix and the QPSO algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(3): 1-13.
- [5] 刘丰, 谢李为, 蔡军, 等. 基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 59-69.  
LIU Feng, XIE Liwei, CAI Jun, et al. A fault traveling wave detection method based on signal spectral characteristics for a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 59-69.
- [6] 李佳宇, 王光临, 罗建华, 等. 基于多元变分模态分解与峭度的配电电缆故障定位方法[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 92-98.  
LI Jiayu, WANG Guanglin, LUO Jianhua, et al. A cable fault location method of distribution networks based on MVMD and Kurtosis calculation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 92-98.
- [7] 冯尧, 赵鹏, 李文杰, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障机理分析与结构优化[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 242-249.  
FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, et al. Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 242-249.
- [8] 陶政臣, 高湛军, 见文号. 基于投入并联小电阻的含多支配电网单相接地故障行波测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 38-48.  
TAO Zhengchen, GAO Zhanjun, JIAN Wenhao. Traveling wave fault location method for a single-phase ground fault of a distribution network with multiple branches based on input parallel small resistance[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 38-48.
- [9] 谢松伟, 薛永端, 吴卫堃, 等. 单相断线坠地故障暂态特征及暂态选线方法适用性[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(2): 126-136.  
XIE Songwei, XUE Yongduan, WU Weikun, et al. Transient characteristics of single-phase line breaking and grounding fault and applicability of transient line selection methods[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(2): 126-136.
- [10] 单玉凯, 徐丙垠, 薛永端. 基于相模变换的三相四线制系统故障计算方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(2): 726-732.  
SHAN Yukai, XU Bingyin, XUE Yongduan. Three-phase four-wire system fault computing method based on phase-model transformation[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(2): 726-732.
- [11] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(5): 121-128.  
WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. *Electric Power*, 2021, 54(5): 121-128.
- [12] 胡业林, 杨杰. 基于参数优化变分模态分解的电缆故障点中行波测距[J]. *电工技术*, 2023(17): 17-24.  
HU Yelin, YANG Jie. Traveling wave location at cable fault point based on parameter optimized variational mode decomposition[J]. *Electric Engineering*, 2023(17): 17-24.
- [13] 郭壮志, 孔繁镍, 徐其兴. 电力系统相模变换矩阵的最优化建模方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(11): 166-173.  
GUO Zhuangzhi, KONG Fannie, XU Qixing. Optimization method for modeling phase-mode transformation matrix of power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(11): 166-173.
- [14] 朱柏寒, 陈羽, 马金杰. 基于波前陡度的输电线路单端行波故障测距[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 130-135.  
ZHU Baihan, CHEN Yu, MA Jinjie. Wavefront steepness based single-ended traveling wave fault location for transmission lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 130-135.
- [15] 杨明杰, 童晓阳, 张广骁. 基于极波模量时差的高压直流输电线路自适应单端保护[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 117-124.  
YANG Mingjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Adaptive single-end protection for HVDC transmission line based on time difference of pole wave mode components[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 117-124.
- [16] 邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 等. 电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3540-3546.  
XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3540-3546.
- [17] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(14): 57-60.  
SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(14): 57-60.

- [18] 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, et al. Locating arc faults off coupling two parallel transmission lines using the novel phase-model transformation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 480-486.
- [19] 王守鹏, 赵冬梅, 袁敬中, 等. 一种用于同塔双回线故障定位的新相模变换法[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(3): 432-438.  
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei, YUAN Jingzhong, et al. New phase-mode transformation matrix for fault location of double-circuit transmission lines[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3): 432-438.
- [20] 杨明嘉, 夏成军, 池梓斌, 等. 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 54-66.  
YANG Mingjia, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Fault location of cross connecting cable based on fault component difference of along current[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 54-66.
- [21] 梁睿, 彭楠, 张政一, 等. 暂态特征模量时频分析的电缆型配电网单相接地故障区段定位[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9098-9114.  
LIANG Rui, PENG Nan, ZHANG Zhengyi, et al. Single-phase grounding fault section location of the distribution cable networks based on the time-frequency analysis of the transient featured moduli[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9098-9114.
- [22] 沈其工, 方瑜, 周泽存, 等. 高电压技术[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [23] 马驰, 李江涛. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的交叉互联电缆在线故障定位策略研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 10-18.  
MA Chi, LI Jiangtao. Research on online fault location strategy of cross-bonding cables based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 10-18.
- [24] 彭楠, 张鹏, 梁睿. 基于暂态特征模量分析的配网三芯铠装电缆故障感知与测距[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5767-5779.  
PENG Nan, ZHANG Peng, LIANG Rui. Fault sensing and location of the three-core armored cables in distribution network based on the analysis of the fault-featured transient moduli[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5767-5779.
- [25] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [26] 袁超, 储海军, 陈燕擎, 等. 考虑金属护层耦合的高压电缆单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 115-120.  
YUAN Chao, CHU Haijun, CHEN Yanqing, et al. Single phase ground fault location method for high voltage cables considering the metal sheath coupling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 115-120.

收稿日期: 2024-04-21; 修回日期: 2024-10-30

作者简介:

王 植(1997—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统故障测距; E-mail: 1479012572@qq.com

王 宾(1978—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: binw-ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑 张 颖)