

DOI: 10.7667/PSPC160515

# 利用单一电流模量波形互相关系数的故障选相方案

邵文权<sup>1</sup>, 吉玥<sup>1</sup>, 张志华<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了快速识别引起电压暂降的故障相别, 提出一种仅利用单一电流模量波形特征的故障选相方案。采用一种新的相模变换矩阵实现了全部故障类型下电流1模、2模量均不为零, 以1模电流时域波形为基准, 利用三相相电流及其组合电流与1模电流波形互相关系数的不同特征实现故障相的识别。PSCAD仿真计算结果表明, 利用单一电流模量的波形特征的故障选相方法是有效和正确的, 能够在不同过渡电阻、故障位置及故障相角等情况下快速准确的故障选相, 为实施按相电压暂降补偿提供依据。

**关键词:** 短路故障; 故障选相; 相模变换; 单一模量; 互相关系数

## A faulted phase selection scheme using waveform cross-correlation coefficient of single-mode current

SHAO Wenquan<sup>1</sup>, JI Yue<sup>1</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to quickly detect faulted phase in condition of voltage sags for distribution network, this paper proposes a faulted phase selection scheme using waveform characteristic of single-mode current. It uses a novel phase mode transformation matrix to achieve that mode 1 and 2 are not zero in all faulted types, and then taking mode 1 as reference, adopts waveform cross-correlation coefficient characteristics of three-phase current and its combined current and mode 1 current to achieve fault phase identification. PSCAD simulation results indicate that the proposed method is correct and effective, and can quickly and accurately identify faulted types under different fault conditions such as different fault locations, fault resistances and fault inception angles, which provides the basis of implementing phase voltage sag compensation.

This work is supported by Doctoral Initial Fund of Xi'an Polytechnic University (No. BS1018) and Youth Academic Backbone Support Program of Xi'an Polytechnic University.

**Key words:** short-circuit; faulted phase selection; phase mode transformation; single mode; cross-correlation coefficient

## 0 引言

现场运行统计表明: 短路故障是引起配电网电压暂降的主要因素之一<sup>[1-4]</sup>, 电压敏感用户对电压质量的要求愈来愈高, 因此快速准确地识别故障相有助于按相进行电压暂降的精确补偿以满足用户的更高要求<sup>[5]</sup>。现有故障选相方法可以分为两大类: 频域法<sup>[6-7]</sup>、时域法<sup>[8-13]</sup>。频域法即对称分量法<sup>[6]</sup>, 仅用一个序分量就能反映所有故障类型, 但计算序分

量时需复数运算, 导致计算量大大增加, 不利于继电保护动作速度的提高<sup>[7]</sup>。时域故障选相方法通常利用Clarke、Karenbauer等相模变换矩阵计算得到模量完成故障选相<sup>[8]</sup>, 所需数据窗短、计算速度快<sup>[10]</sup>, 但无法利用单一模量反映所有故障类型。文献[11]提出了一种新的相模变换矩阵, 利用单一模量反映所有的故障类型, 并且结合输电线路故障测距验证新相模变换矩阵的有效性, 为本文单一电流模量故障选相方法提供了一个良好的借鉴。

本文结合配电网电压暂降快速故障选相的需求, 在构造一种新的相模变换矩阵的基础之上, 寻求一种利用单一电流模量能够反映所有故障类型的

基金项目: 西安工程大学博士启动基金资助项目(BS1018);  
西安工程大学青年学术骨干支持计划

故障选相方法。根据 1 模电流与其他相电流及其组合电流波形特征的差异给出相应的故障选相方案, 最后大量的仿真分析结果充分验证了所提故障选相方法的准确性和有效性, 该方法原理简单且不受故障位置、过渡电阻、故障相角等因素的影响。

## 1 一种新的相模变换矩阵

在时域分析时, 所采用的 Clark、Karebauer 等相模变换矩阵的一般表达形式如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} i_m^{(0)} & i_m^{(1)} & i_m^{(2)} \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

1) Clarke 相模变换的逆矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2; & 1 & -2 & 1; & 3 & 0 & -3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

如 AC 相间故障时,  $i_b=0$ 、 $i_a=-i_c$ ,  $i_m^{(1)} = (i_a - 2i_b + i_c)/6 = 0$ ; B 相接地故障时,  $i_a = i_c = 0$ ,  $i_m^{(2)} = (3i_a + 0i_b - 3i_c)/6 = 0$ 。因此, Clarke 变换的 1 模量不能反映 AC 相间故障, 2 模量也不能反映 B 接地故障。

2) Karebauer 相模变换逆矩阵如式(3)所示。

$$\mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1; & 1 & -1 & 0; & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

如 C 相接地故障时,  $i_a = i_b = 0$ ,  $i_m^{(1)} = (i_a - i_b + 0i_c)/3 = 0$ ; B 相接地故障时,  $i_a = i_c = 0$ ,  $i_m^{(2)} = (i_a + 0i_b - i_c)/3 = 0$ 。因此, Karebauer 变换的 1 模量不能反映 C 相接地故障, 2 模量也不能反映 B 相接地故障。

由上可知, 现有时域相模变换矩阵计算均不能实现单一模量反映所有的故障类型。因此, 本文以文献[11]的工作为基础, 构造出一种新的时域相模变换矩阵如式(4)所示。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.0667 & 0.0667 & 0.0667 \\ 0.0667 & -0.0551 & -0.0116 \\ 0.0667 & -0.0116 & -0.0551 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)的逆矩阵代入式(1)得

$$\begin{bmatrix} i_m^{(0)} \\ i_m^{(1)} \\ i_m^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -14 & 9 \\ 5 & 9 & -14 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过新相模变换矩阵得到不同故障类型情况下的相应电流量模值如表 1 所示。

由表 1 可知, 利用新的相模变换矩阵计算的 1 模或 2 模量在所有故障类型情况下均不为零, 为采用单一模量进行故障相的识别提供了有利条件。

表 1 各种故障类型下的电流量模值

Table 1 Current modes under different faults

故障类型	边界条件	1 模值	2 模值
AG	$i_b = i_c = 0$	$5i_a$	$5i_a$
BG	$i_a = i_c = 0$	$-14i_b$	$9i_b$
CG	$i_a = i_b = 0$	$9i_c$	$-14i_c$
AB	$i_c = 0, i_a = -i_b$	$19i_a$	$-4i_a$
BC	$i_a = 0, i_b = -i_c$	$-23i_b$	$23i_b$
CA	$i_b = 0, i_a = -i_c$	$4i_c$	$-19i_c$
ABG	$i_c = 0$	$5i_a - 14i_b$	$5i_a + 9i_b$
BCG	$i_a = 0$	$-14i_b + 9i_c$	$9i_b - 14i_c$
CAG	$i_b = 0$	$5i_a + 9i_c$	$5i_a - 14i_c$
ABC	$i_a + i_b + i_c = 0$	$5i_a - 14i_b + 9i_c$	$5i_a + 9i_b - 14i_c$

## 2 基于波形特征的故障选相方法

### 2.1 波形互相关系数的基本理论

相关分析是在统计意义上表征两个或多个变量间的相关程度, 即两波形的线性相似程度<sup>[13-15]</sup>。数字信号  $x(n)$ 、 $y(n)$  的互相关函数定义如式(6)所示。

$$r_{xy}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+j) \quad (6)$$

式中:  $N$  为相关信号的采样点数;  $jT_s$  为时差,  $T_s$  为采样时间间隔,  $j=0, 1, \dots$ , 通常直接称  $j$  为时差。对于已知的信号  $x(n)$ 、 $y(n)$  在时差  $j=0$  时, 它们的能量是确定的, 即

$$r_{xx}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (7)$$

$$r_{yy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \quad (8)$$

均为常数。

为使相关运算的结果更好地反映两个信号之间的相似性, 排除信号幅度的影响, 通常采用归一化处理, 如式(9)所示。

$$\text{corrcoef}(x, y) = \rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n)}{\left[ \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n) \right]^{1/2}} \quad (9)$$

式中:  $\rho_{xy}$  表示两个数字信号  $x(n)$ 、 $y(n)$  的互相关系数, 它的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $\rho_{xy}=1$  表示两个信号形状相位完全相同;  $\rho_{xy}=-1$  表示两个信号形状相位完全相反;  $\rho_{xy}=0$  表示两个信号完全独立, 毫无关系。

相关分析理论已在暂态电流差动保护<sup>[16]</sup>、故障选相<sup>[17-19]</sup>、线路行波测距<sup>[20-21]</sup>、变压器励磁涌流识

别<sup>[22]</sup>等微机保护领域得到广泛应用。本文在分析波形互相关系数的理论基础之上，构造一种利用单一电流模量波形特征的故障选相方法。

### 2.2 电流单一模量波形特征及实现

为了方便分析不同故障情况下的单一电流模量特征，波形互相关系数的定义为  $\rho_1 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_a)$ ， $\rho_2 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_b)$ ， $\rho_3 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_c)$ ， $\rho_4 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_n)$ ， $\rho_5 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_p)$ ， $\rho_6 = \text{corrcoef}(i_m^{(1)}, i_k)$ ，其中组合电流  $i_n = 5i_a - 14i_b$ ， $i_p = -14i_b + 9i_c$ ， $i_k = 5i_a + 9i_c$ 。

结合第1节的模量变换矩阵的结果来详细分析在不同故障类型情况下的单一电流模量波形互相关系数特征。

#### 1) 单相接地故障

单相接地故障时，故障相电流及对应的两个组合电流与1模电流波形完全相似即互相关系数为1，且数量为3。如A相接地故障时， $i_a = i_b = i_c = 0$ ， $i_m^{(1)} = i_n = i_k = 5i_a$ 即互相关系数  $\rho_1 = 1$ 、 $\rho_4 = 1$ 、 $\rho_6 = 1$ 。

#### 2) 两相相间故障

两相相间故障时，对应的故障相电流及故障相组合电流与1模电流的波形完全相似，则互相关系数的绝对值为1的个数为5个。如BC相间故障时， $i_a = 0$ 、 $i_b = -i_c$ ， $i_m^{(1)} = -23i_b$ 、 $i_n = -14i_b$ 、 $i_p = -23i_b$ 、 $i_k = -9i_b$ ，即互相关系数  $\rho_2 = 1$ 、 $\rho_3 = 1$ 、 $\rho_4 = 1$ 、 $\rho_5 = 1$ 、 $\rho_6 = 1$ 。

#### 3) 两相接地故障

两相接地故障时，1模电流与三相相电流均不完全相关，此时1模电流仅与对应故障相组合电流完全相关，则互相关系数有且仅有一个为1。如CAG两相接地故障时， $i_b = 0$ ， $i_m^{(1)} = i_k = 5i_a + 9i_c$ 即互相关系数  $\rho_6 = 1$ 。

#### 4) 三相短路故障

三相短路故障时，由第一节分析可以看出：1模电流量与三相相电流及组合电流  $i_n$ 、 $i_p$ 、 $i_k$  波形均不完全相关。

根据以上特征分析构造如图1所示的故障识别方案。

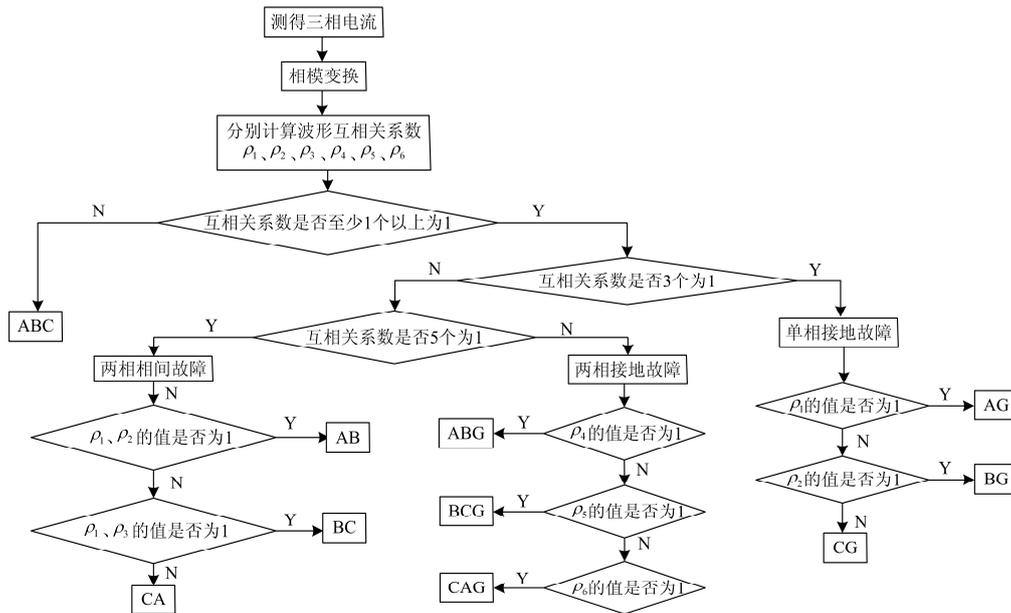


图1 故障选相流程图

Fig. 1 Flow chart of fault phase selection

在电压暂降发生以后，利用测量装置得到三相电流计算相应的1模量与各相电流包括其组合电流的互相关系数，若各相电流及其对应的电流组合与1模电流的互相关系数至少存在一个以上为1，则判断为接地故障与相间故障，否则为三相短路故障。若互相关系数为1的个数为3，则为单相接地故障，否则为相间故障与两相接地故障。若互相关系数为

1的个数为5，则为相间故障，否则为两相接地故障。

在确定为单相接地故障的前提下，若故障相的相电流与1模电流波形特征完全一致，则判为该相接地故障；两相相间故障的分析方法与单相接地故障类似这里不再详述。当确定为两相接地故障时，若1模电流与三相相电流均不相关，仅与对应故障相相电流的组合完全相关，则判为对应故障相接地故障。

### 3 仿真验证

为了验证本文所提故障选相方法的正确性和有效性, 本文选用文献[23]所示的配电网电压暂降仿真系统模型进行仿真, 如图2所示。

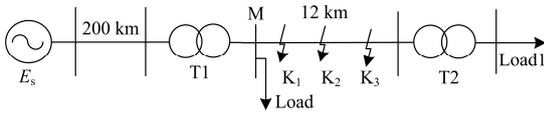


图2 配电网电压暂降仿真模型

Fig. 2 Simulation model of distribution network voltage sag

图2中电压等级的配置为110 kV/10.5 kV/0.4 kV; 变压器 T1 接线方式为YNd11, 变比为110 kV/10.5 kV; T2 接线方式为Yyn0, 变比为10 kV/0.4 kV; 110 kV线路的零序阻抗、正序阻抗、零序电容和正序电容为  $Z_0=0.5301+j0.9185 \Omega/\text{km}$ ;  $Z_1=0.1945+j0.3607 \Omega/\text{km}$ ;  $C_0=6.33 \text{ nF}/\text{km}$ ;  $C_1=9.81 \text{ nF}/\text{km}$ ; 10 kV线路的零序、正序阻抗和电容为  $Z_0=1.2764+j1.6171 \Omega/\text{km}$ ;  $Z_1=1.131+j0.3126 \Omega/\text{km}$ ;  $C_0=3.99 \text{ nF}/\text{km}$ ;  $C_1=11.28 \text{ nF}/\text{km}$ ; 负荷均为恒功率模型, 无功均为感性无功, 功率因数为0.9。

在1.0 s时发生短路故障, 故障持续时间为0.5 s, 采样频率为4 kHz。仿真系统中共设置了三个故障点  $K_1$ - $K_3$ , 依次距离M端母线3 km、6 km、9 km, 选相元件装设在母线M处。线路发生AG、BC、CAG与ABC故障时, 利用单一电流模量所计算的波形互相关系数结果分别如图3~图6所示。

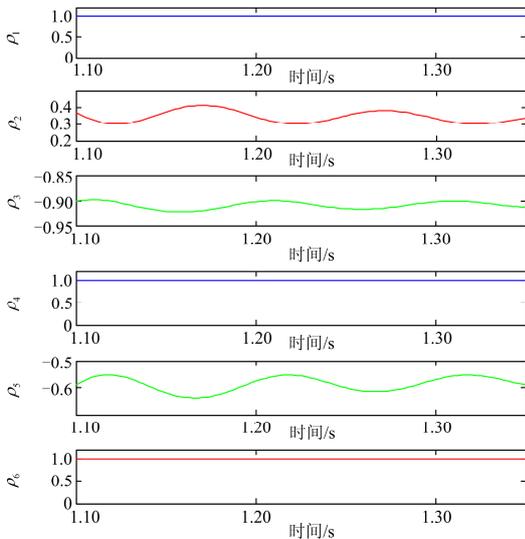


图3 AG故障下的计算结果

Fig. 3 Calculation results of A phase to grounded fault

由图3所示的结果可以看出, 在A相接地故障时, 互相关系数  $\rho_1=1$ 、 $\rho_4=1$ 、 $\rho_6=1$ 、 $\rho_2 \neq 1$ 、 $\rho_3 \neq 1$ 、

$\rho_5 \neq 1$ ; 互相关系数为1的个数为3, 可确定为单相接地故障, 且仅有故障相A相电流波形与1模电流波形特征完全一致, 因此可以确定单相接地故障相为A相接地故障。

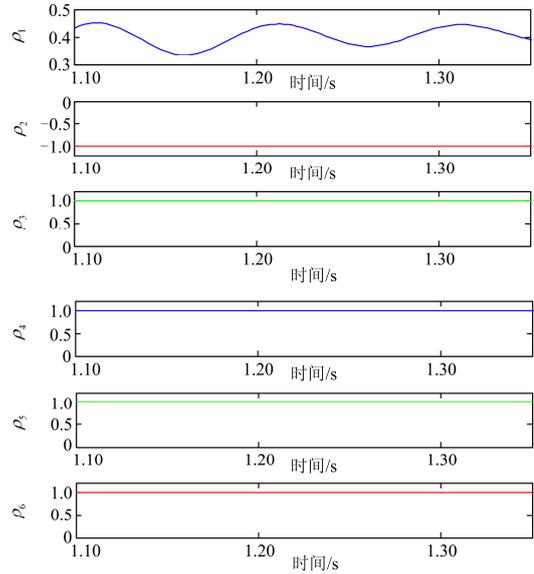


图4 BC故障下的计算结果

Fig. 4 Calculation results of BC phase to phase fault

由图4所示的结果可以看出, 在BC两相相间故障时, 互相关系数  $\rho_2=1$ 、 $\rho_3=1$ 、 $\rho_4=1$ 、 $\rho_5=1$ 、 $\rho_6=1$ 、 $\rho_1=1$ ; 互相关系数为1的个数为5, 可确定为相间故障, 且仅有故障相BC相电流与1模电流的波形特征完全一致, 因此可以确定两相相间故障相为BC相间故障。

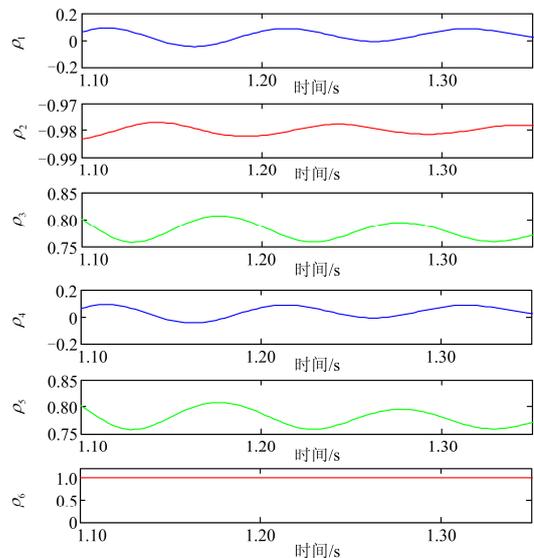


图5 ACG故障下的计算结果

Fig. 5 Calculation results of AC two-phase grounded fault

由图 5 所示的结果可以看出, 在 ACG 两相接地故障时, 互相关系数仅有  $\rho_6=1$ , 可确定为两相接地故障, 且仅有故障相 AC 相电流组合的波形与 1 模电流波形特征完全一致, 因此可以确定两相接地故障相为 AC 相接地故障。

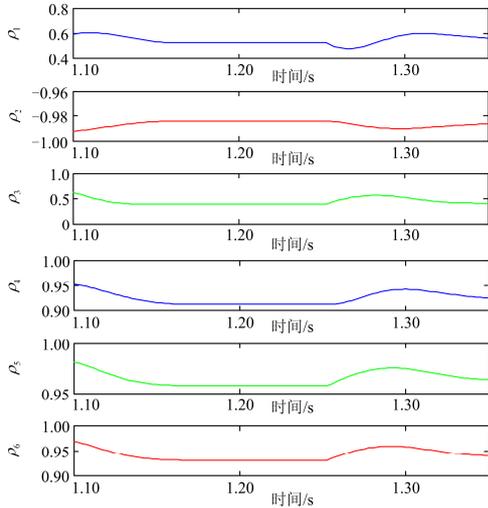


图 6 三相故障下的计算结果

Fig. 6 Calculation results of three-phase fault

由图 6 所示的结果可以看出, 在发生三相相间故障时, 互相关系数为 1 的个数为 0, 可确定为三相短路故障。

为了验证在不同故障位置、过渡电阻及故障相角情况下<sup>[24-25]</sup>, 本文所提故障选相方案的正确性和有效性, 表 2~表 4 分别给出利用单一电流模量波形互相关系数特征进行故障选相的计算结果。

- 1) 故障相角为  $45^\circ$ , 过渡电阻为  $100 \Omega$ , 不同故障位置下的选相结果, 如表 2 所示。
- 2) 故障点距 M 端 6 km, 故障初相角为  $45^\circ$ , 不同过渡电阻下的选相结果, 如表 3 所示。
- 3) 故障点距 M 端 6 km, 过渡电阻为  $100 \Omega$ , 不同故障相角下的选相结果, 如表 4 所示。

表 2、表 3 和表 4 的计算结果与第 2 节的理论分析相一致, 可以准确可靠地确认故障相, 表明本文所提的故障选相方法不受过渡电阻、故障位置和故障相角等因素的影响, 可靠性较高且原理简单、计算量小。

表 2 不同故障位置下的故障选相结果

Table 2 Fault phase selection results under various fault locations

故障位置/km	故障类型	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\rho_6$	选相结果
3	AG	<b>1.0000</b>	0.2408	0.4354	<b>1.0000</b>	0.0272	<b>1.0000</b>	AG
	BC	0.3138	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	BC
	CAG	0.7565	0.5058	0.6956	0.7571	0.6959	<b>1.0000</b>	CAG
6	AG	<b>1.0000</b>	0.2276	0.4408	<b>1.0000</b>	0.0388	<b>1.0000</b>	AG
	BC	0.3175	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	BC
	CAG	0.7754	0.4986	0.6870	0.7560	0.6873	<b>1.0000</b>	CAG
9	AG	<b>1.0000</b>	0.2153	0.4465	<b>1.0000</b>	0.0490	<b>1.0000</b>	AG
	BC	0.3203	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	BC
	CAG	0.7556	0.4903	0.6790	0.7562	0.6793	<b>1.0000</b>	CAG
	ABC	0.5829	0.9880	0.4309	0.9332	0.9674	0.9464	ABC

表 3 不同过渡电阻下的故障选相结果

Table 3 Fault phase selection results under various fault resistances

过渡电阻 / $\Omega$	故障类型	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\rho_6$	选相结果
0.001	BG	0.5963	<b>1.0000</b>	0.2391	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	0.0801	BG
	AC	<b>1.0000</b>	0.4647	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	AC
	ABG	0.9332	0.9922	0.2409	<b>1.0000</b>	0.9922	0.9332	ABG
	ABC	0.8885	0.9981	0.7281	0.9887	0.9945	0.9905	ABC
10	BG	0.5508	<b>1.0000</b>	0.0297	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	0.3204	BG
	AC	<b>1.0000</b>	0.4334	1.0000	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	AC
	ABG	0.8774	0.9860	0.1012	<b>1.0000</b>	0.9859	0.8774	ABG
	ABC	0.8719	0.9982	0.8021	0.9888	0.9951	0.9918	ABC
100	BG	0.4793	<b>1.0000</b>	0.1558	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	0.4891	BG
	AC	<b>1.0000</b>	0.1154	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	AC
	ABG	0.8153	0.9762	0.0168	<b>1.0000</b>	0.9761	0.8156	AG
	ABC	0.5896	0.9882	0.4279	0.9334	0.9678	0.9469	ABC

表 4 不同故障相角下的故障选相结果

Table 4 Fault phase selection results under various fault inception angle

故障相角/(°)	故障类型	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	$\rho_6$	选相结果
0	CG	0.1784	0.4892	<b>1.0000</b>	0.5049	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG
45	CG	0.1758	0.5195	<b>1.0000</b>	0.4775	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG
90	CG	0.1736	0.5931	<b>1.0000</b>	0.4336	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG
120	CG	0.0606	0.6677	<b>1.0000</b>	0.5278	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG
150	CG	0.1074	0.7341	<b>1.0000</b>	0.6318	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG
180	CG	0.2474	0.7345	<b>1.0000</b>	0.6743	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	CG

## 4 结论

本文构造了一种新的相模变换矩阵,使得在不同故障类型情况下计算的 1 模电流分量均不为零。在此基础上,提出一种利用单一模量波形互相关系数特征的故障选相方案,详细分析了在不同故障情况下 6 个互相关系数的特征及差异,并构造了故障类型的识别方案。最后,在 PSCAD 中搭建了一个典型的配电网电压暂降仿真系统模型,验证了在不同故障类型情况下所提单一电流模量波形互相关系数特征的故障选相方法的正确性和有效性。

## 参考文献

- [1] 林海雪. 电网中电压暂降和短时中断问题及其标准介绍[J]. 建筑电气, 2015, 34(6): 3-7.  
LIN Haixue. Introduction to voltage dips & short interruptions and related standards in power grid[J]. Building Electricity, 2015, 34(6): 3-7.
- [2] 王攀, 王泳涛, 王玉玉. 基于特征约简理论的机组振动故障诊断模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 97-100.  
WANG Pan, WANG Yongtao, WANG Baoyu. Fault diagnosis model for steam turbine vibration based on feature reduction theory[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 97-100.
- [3] 陈众励, 许维胜. 电压中断与电压暂降的成因及其防治[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 518-520.  
CHEN Zhongli, XU Weisheng. Reason and prevention of voltage interruption and voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 518-520.
- [4] 赵靛, 柴庆龙. 基于分层模糊符号有向图法的故障诊断方法[J]. 热力发电, 2015, 4(11): 26-31.  
ZHAO Liang, CHAI Qinglong. A fault diagnosis approach based on hierarchical fuzzy signed directed graph model[J]. Thermal Power Generation, 2015, 4(11): 26-31.
- [5] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.  
CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy
- [6] 蒋晨达. 基于简化对称分量法电压选相原理分析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2014, 23(4): 36-40.  
JIANG Chenda. Voltage phase selection principle based on a simplified symmetrical component method[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2014, 23(4): 36-40.
- [7] 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.
- [8] 王安定, 葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 15-25.  
WANG Anding, GE Yaozhong. Application study of modal transformation techniques to microprocessor protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1988, 12(3): 15-25.
- [9] 肖隆恩, 熊榆, 李鹏飞, 等. 新型相模变换矩阵在行波故障选相中的应用[J]. 电气开关, 2016, 1(1): 86-88.  
XIAO Longen, XIONG Yu, LI Pengfei, et al. Application of a new model transformation matrix in the traveling wave fault phase selection[J]. Electric Switchgear, 2016, 1(1): 86-88.
- [10] 施围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [11] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新的相模变换矩阵[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.
- [12] 陈明, 尹慧阳. 新型相模变换矩阵在行波保护中的应用[J]. 供用电, 2013, 30(3): 87-91.  
CHEN Ming, YIN Huiyang. Application of a new model transformation matrix in the traveling wave protection[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(3): 87-91.
- [13] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于暂态电流 Pearson 相关性的两电平 VSC-HVDC 直流电路判断故障[J]. 电

- 工技术学报, 2017, 32(3): 74-85.
- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for two-level VSC-HVDC DC line based on pearson correlation of transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 74-85.
- [15] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于 Nataf 变换含相关性的扩展准蒙特卡洛随机潮流方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 254-263.
- FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. A Nataf transformation based on extended quasi monte carlo simulation method for solving probabilistic load flow problems with correlated random variables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 254-263.
- [16] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 等. 基于相关分析的暂态电流差动保护的原理与性能研究[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 40-42.
- YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, MA Tianhao, et al. Study on transient current differential protection based on correlation analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 40-42.
- [17] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 基于相关分析的故障序分量选相元件[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 17-22.
- LIN Xiangning, LIU Pei, YANG Chunming, et al. A superimposed phase selector based on symmetrical components and correlation analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 17-22.
- [18] 王兴国, 张举. 基于相关分析和模糊推理的故障选相元件[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 93-97.
- WANG Xingguo, ZHANG Ju. A novel faulty phase selector based on correlation analysis and fuzzy reasoning[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 93-97.
- [19] 毛鹏, 段玉倩, 姜娜. 基于相关分析的故障选线方法[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 36-39.
- MAO Peng, DUNA Yuqian, JIANG Na. A correlation analysis based method to detect faulty line under single phase to ground fault occurred in distribution networker with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 36-39.
- [20] 周濂, 卢毅, 廖瑞金, 等. 基于小波包提取算法和相关分析的电缆双端行波测距[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 1-4.
- ZHOU Quan, LU Yi, LIAO Ruijin, et al. Double terminal traveling wave fault location for cable based on the wavelet packet extraction algorithm and correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 1-4.
- [21] 刘慧海, 张晓莉, 姜博, 等. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 145-149.
- LIU Huihai, ZHANG Xiaoli, JIANG Bo, et al. Testing and evaluation method of fault location equipment based on traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 145-149.
- [22] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.
- SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [23] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34, 54.
- WANG Kexing, SONG Zhengxiang, CHEN Degui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-34, 54.
- [24] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 50-54.
- TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 50-54.
- [25] 王爱军, 李宏, 张小桃. 一种基于小波变换的超高压线路故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 92-97.
- WANG Aijun, LI Hong, ZHANG Xiaotao. A scheme of faulted phase selection in EHV transmission line based on wavelet transforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 92-97.

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-06-30

作者简介:

邵文权(1978-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: shaowenquan@xpu.edu.cn

吉 玥(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为继电保护; E-mail: luckmoon7268@sina.com

张志华(1987-), 男, 硕士, 工程师, 从事配电网及其自动化技术等方面的研究。E-mail: 2232189255@qq.com

(编辑 张爱琴)