

# 基于电压故障分量的超高压线路故障选相新方法

陈 旸, 胡 炎, 邵能灵, 张沛超

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 针对目前超高压线路中所用选相方法不能快速准确地识别所有故障类型的问题, 提出一种基于电压故障分量和卡尔曼滤波算法的新型选相方法。该方法定义每相电压故障分量和其余两相电压故障分量差值的比值为故障相识别系数。通过研究该系数在不同故障条件下的变化特征, 可实现快速选相的目的。仿真结果表明, 在高压线路故障中利用卡尔曼滤波算法提取基波相量速度快、准确率高。同时该选相算法受过渡电阻、故障位置、故障初相角的影响很小, 在半周期内可准确选出故障相, 且在强弱电源侧均具有较高的选相灵敏度。

**关键词:** 超高压输电线路; 故障选相; 电压故障分量; 卡尔曼滤波算法; 傅里叶算法

## A new method of fault phase identification for EHV lines based on the fault component of phase voltage

CHEN Yang, HU Yan, TAI Neng-ling, ZHANG Pei-chao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Since the existing fault phase identification methods can not identify all fault types quickly and accurately for EHV transmission lines, this paper proposes a new method of fault phase identification based on the fault component of phase voltage difference and the Kalman filter algorithm. The method defines the fault component's ratio of one phase voltage to the difference of the other two phase voltages as a fault phase identification coefficient. By analyzing the characteristics of fault phase identification factors in each fault type, the fault phase can be identified. Simulation results show that using the Kalman filter algorithm to extract fundamental component is faster and more accurate. Meanwhile, the method can identify fault phases within half a cycle and is scarcely influenced by fault resistances, fault locations and fault initial phase angles. It also has a high sensitivity when the fault is on the side of strong source.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177066) and Shanghai Science and Technology Commission (No. 09dz1205703).

**Key words:** EHV transmission line; fault phase identification; fault component of phase voltage; Kalman filter algorithm; Fourier algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0008-07

## 0 引言

目前, 自动重合闸和距离保护元件都需要正确地选出故障相别, 同时要求选相快速, 准确度高。根据采用电气量的不同, 可以将选相方法分为实测量选相和故障分量选相。基于故障分量的选相元件从理论上消除了负荷电流的影响, 与传统方案相比, 有较为突出的优越性。其中, 突变量选相和序

分量选相为电力系统中应用较为广泛的两种故障分量选相元件<sup>[1-3]</sup>, 但序分量选相在弱电源侧灵敏度不足, 且序分量的计算是对三相正弦分解的结果, 在暂态过程中电流不完全是正弦的, 分析比较困难, 正、负序分量的计算需要移相, 只有对稳态正弦量才能移相, 因此对快速保护应用正、负分量选相方式需慎重<sup>[4]</sup>。突变量选相主要包括相电流差突变量选相、相电压差突变量选相及电流电压综合突变量选相。其中, 相电流差突变量选相具有灵敏度高、受负荷分量、系统频率偏移及过渡电阻影响小等优点, 但短路电流中含有非周期分量, 三种相电流突

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51177066); 上海市科委资助项目(09dz1205703)

变量可能存在很大偏差, 会把三相短路误判为两相短路故障; 且在弱电源侧由于故障电流分配系数的影响, 弱电源侧仅仅流过零序分量, 相电流差突变量选相会出现灵敏度不足的问题<sup>[5-6]</sup>; 而电压突变量选相在弱电源侧具有较高的灵敏度, 在强电源侧灵敏度不足<sup>[7]</sup>; 电压电流复合突变量在大部分情况下都会收到很好的选相效果, 但是当系统和故障参数满足一定条件时, 仍然存在灵敏度不足和两相接地故障误判为三相接地故障<sup>[8]</sup>等缺陷。因此, 目前高压输电线路中所采用的选相元件在不同的过渡电阻、故障位置、故障类型、强弱电源侧等故障条件下, 都存在着无法快速准确识别故障相的情况。

本文提出利用卡尔曼滤波算法提取电压故障分量, 通过分析各种故障类型下电压故障分量和其余两相电压故障分量差量的比值特征, 实现故障选相。大量 PSCAD 仿真实例表明, 该算法在多种故障条件下 (包括在不同的故障位置、故障类型、过渡电阻、初始相角等) 均具有较高的灵敏度和可靠性, 并可在故障后半周波内快速准确地选出故障相; 同时, 该方案在强弱电源侧均具有足够的灵敏度。

## 1 输电线路的故障电压特征分析

如图 1 所示为简化双端电源系统, 以其为例分析线路故障时保护安装处的各相电压故障分量与其他两相电压故障分量差量的比例关系。

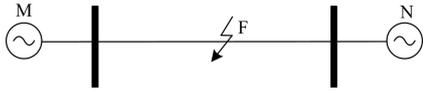


图 1 双端电源模型

Fig. 1 Two-terminal source model

母线 M 侧保护安装处的各相电压故障分量为

$$\begin{cases} \Delta U_A = s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + s_2 I_{M_{A2}} Z_{2S} + s_0 I_{M_{A0}} Z_{0S} \\ \Delta U_B = \alpha^2 s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + \alpha s_2 I_{M_{A2}} Z_{2S} + s_0 I_{M_{A0}} Z_{0S} \\ \Delta U_C = \alpha s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + \alpha^2 s_2 I_{M_{A2}} Z_{2S} + s_0 I_{M_{A0}} Z_{0S} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\alpha = e^{j120^\circ}$ ;  $\Delta U_A$ 、 $\Delta U_B$ 、 $\Delta U_C$  分别为母线 M 处 A、B、C 三相电压故障分量;  $I_{M_{A1}}$ 、 $I_{M_{A2}}$ 、 $I_{M_{A0}}$  分别为故障点 F 处的 A 相各序故障电流;  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_0$  分别为正序、负序和零序电流分布系数;  $Z_{iS}$  为 M 侧母线到故障点之间的线路各序阻抗 ( $i=1, 2, 0$ )。由于高压输电线路较长, 因此可近似认为系统正负序阻抗和正负序电流分布系数相等, 以下故障分析中即假设:  $s_1 = s_2$ ,  $Z_{1S} = Z_{2S}$ 。

1) 当发生单相 (AG) 接地故障时

$$I_{M_{A1}} = I_{M_{A2}} = I_{M_{A0}} \quad (2)$$

若  $s_1 Z_{1S} = s_2 Z_{2S}$ , M 侧各相的电压突变量 (即故障分量) 为

$$\begin{cases} \Delta U_A = 2s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + s_0 I_{M_{A1}} Z_{0S} \\ \Delta U_B = (\alpha^2 + \alpha) s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + s_0 I_{M_{A1}} Z_{0S} \\ \Delta U_C = (\alpha^2 + \alpha) s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} + s_0 I_{M_{A1}} Z_{0S} \end{cases} \quad (3)$$

定义故障相识别系数: 保护安装处的各相电压故障分量与其余两项故障分量差的比值, A、B、C 三相故障相识别系数分别为

$$\begin{cases} Y_A = \frac{|\Delta U_A|}{|\Delta U_B - \Delta U_C|} \\ Y_B = \frac{|\Delta U_B|}{|\Delta U_A - \Delta U_C|} \\ Y_C = \frac{|\Delta U_C|}{|\Delta U_A - \Delta U_B|} \end{cases} \quad (4)$$

在单相故障中

$$\Delta U_{AB} = \Delta U_{CA} = 3s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S}, \quad \Delta U_{BC} \approx 0$$

因此存在如下关系:

$$Y_A \gg Y_B \approx Y_C \quad (5)$$

2) 当发生两相 (BC) 相间故障时, 根据边界条件  $I_{M_{A1}} + I_{M_{A2}} = 0$ ,  $I_{M_{A0}} = 0$  计及式 (1), 可得 M 侧的电压故障分量为

$$\begin{cases} \Delta U_A = 0 \\ \Delta U_B = (\alpha^2 - \alpha) s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} \\ \Delta U_C = (\alpha - \alpha^2) s_1 I_{M_{A1}} Z_{1S} \end{cases} \quad (6)$$

将此时的故障分量代入式 (4) 中, 求得的三相故障相识别系数满足

$$0 = Y_A \ll Y_B \approx Y_C \approx 1 \quad (7)$$

3) 当发生两相接地 (BCG) 故障时, 根据边界条件  $I_{M_{A1}} + I_{M_{A2}} + I_{M_{A0}} = 0$ , 计及式 (1), 可得 M 侧的电压故障分量为

$$\begin{cases} \Delta U_A = (s_1 - \frac{s_1 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}} - \frac{s_0 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}}) I_{M_{A1}} Z_{1S} \\ \Delta U_B = (\alpha^2 s_1 - \alpha \frac{s_1 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}} - \frac{s_0 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}}) I_{M_{A1}} Z_{1S} \\ \Delta U_C = (\alpha s_1 - \alpha^2 \frac{s_1 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}} - \frac{s_0 Z_{0S}}{Z_{1S} + Z_{0S}}) I_{M_{A1}} Z_{1S} \end{cases} \quad (8)$$

将此时的故障分量代入式 (4) 中, 求得的三相故障相识别系数满足

$$\begin{cases} Y_A \ll Y_B \\ Y_A \ll Y_C \end{cases} \quad (9)$$

4) 当发生三相接地(ABCG)故障时, 根据边界条件  $I_{MA2} = I_{MA0} = 0$ , 计及式(1), 可得 M 侧的电压故障分量为

$$\begin{cases} \Delta U_A = s_1 I_{MA1} Z_{IS} \\ \Delta U_B = \alpha^2 s_1 I_{MA1} Z_{IS} \\ \Delta U_C = \alpha s_1 I_{MA1} Z_{IS} \end{cases} \quad (10)$$

将此时的故障分量代入式(4)中, 求得的三相故障相识别系数满足

$$Y_A \approx Y_B \approx Y_C \approx 1/\sqrt{3} \quad (11)$$

## 2 滤波算法的选择

在电网发生故障时, 交流信号中含有谐波分量和衰减直流分量, 因此不能通过以正弦函数模型的算法来计算, 如半周积分法和导数法、两点乘积算法等<sup>[9]</sup>。而在一般输电线路(指中、低压网络或不长的高压输电线)上发生短路时, 可以不用考虑非整数倍的高频分量; 这种情况下就可以通过采样周期函数模型的算法, 即假设输入信号可分解为基波的整数倍频率分量, 如傅里叶变换或沃尔什函数算法, 来计算需要分解的基波分量, 但沃尔什函数尤其在相位计算时, 计算量较大、耗时较长; 傅氏变换算法易受系统运行方式、故障位置、过渡电阻等因素的影响且需要较长的数据窗<sup>[10]</sup>。

相比而言在高压输电网络中, 用基于随机模型的卡尔曼滤波算法能在较短的数据窗内给出基波分量的最优估计<sup>[11]</sup>。此外, 在构建卡尔曼滤波算法模型时, 由于暂态电流信号中含有较大的衰减直流分量, 其状态方程相比于采用电压信号的更加复杂。下例针对考虑到 5 次谐波时的电压电流状态转移方程做比较分析<sup>[12]</sup>。

采用电流信号时的卡尔曼状态转移方程为

$$\begin{bmatrix} x1_{rk+1} \\ x1_{ik+1} \\ \vdots \\ x5_{rk+1} \\ x5_{ik+1} \\ x0_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & e^{-\beta\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_{rk} \\ x1_{ik} \\ \vdots \\ x5_{rk} \\ x5_{ik} \\ x0_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ w_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

采用电压信号时的卡尔曼状态转移方程为

$$\begin{bmatrix} x1_{rk+1} \\ x1_{ik+1} \\ \vdots \\ x5_{rk+1} \\ x5_{ik+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x1_{rk} \\ x1_{ik} \\ \vdots \\ x5_{rk} \\ x5_{ik} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $x1_{rk}$ 、 $x1_{ik}$  表示基波分量的实部虚部;  $x0_k$  为直流分量部分;  $w_k$  为一方差固定的高斯白噪声。相比以上两式可知, 采用电流信号作为输入数据会使卡尔曼滤波模型更复杂, 加大算法的运算量并降低了提取基波分量的速度, 同时模型中对应衰减直流分量的参数 ( $e^{-\beta\Delta t}$ ) 受线路参数影响较大, 降低了模型的普遍适用性。此外电流互感器的磁饱和也会影响采样数据的准确性, 因此采用卡尔曼滤波算法分析电压数据, 会得到更好的滤波效果。

## 3 基于故障相识别系数的选相流程

通过比较故障相识别系数在不同故障条件下的变化特征, 可实现选相的目的。具体选相流程如图 2 所示, 按大小对计算得到的故障相识别系数进行排序, 分别定义为  $Y_{max}$ 、 $Y_{mid}$ 、 $Y_{min}$ , 然后计算这三个系数所符合的判据, 依次识别出单相故障、两相相间故障、三相故障和两相接地故障, 四个判据如下。

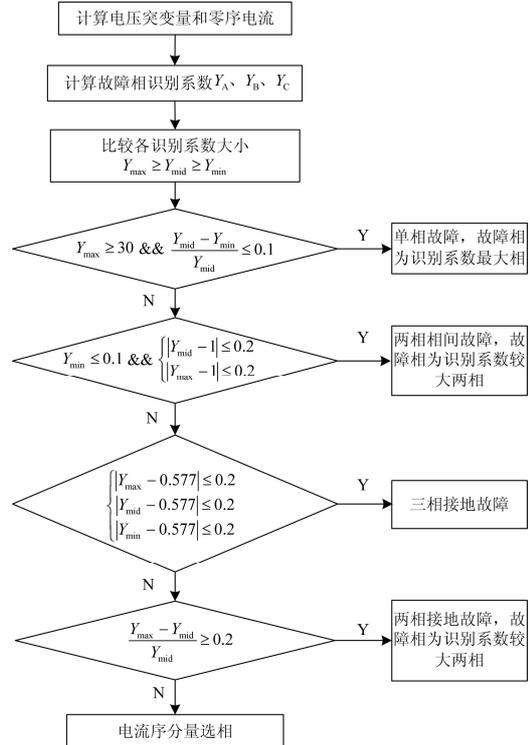


图 2 故障选相流程图

Fig. 2 Flow chart of the fault phase identification

(1) 单相接地故障判据为

$$Y_{\max} \geq 30 \&\& \frac{Y_{\text{mid}} - Y_{\min}}{Y_{\text{mid}}} \leq 0.1 \quad (14)$$

故障相为识别系数最大相。

(2) 两相相间故障判据为

$$Y_{\min} \leq 0.1 \&\& \begin{cases} |Y_{\text{mid}} - 1| \leq 0.2 \\ |Y_{\max} - 1| \leq 0.2 \end{cases} \quad (15)$$

故障相为识别系数较大两相。

(3) 三相接地故障判据为

$$\begin{cases} |Y_{\max} - 0.577| \leq 0.2 \\ |Y_{\text{mid}} - 0.577| \leq 0.2 \\ |Y_{\min} - 0.577| \leq 0.2 \end{cases} \quad (16)$$

(4) 两相接地故障判据为

$$\frac{Y_{\max} - Y_{\text{mid}}}{Y_{\text{mid}}} \geq 0.2 \quad (17)$$

故障相为识别系数较大两相。

当故障相识别系数不满足以上四个判据时, 再通过电流序分量法进行故障选相。

## 4 仿真验证及分析

参考京津唐 500 kV 超高压输电线路参数, 本文采用 PSCAD 仿真软件搭建了一条长度为 300 km 的分布参数输电线路模型<sup>[13]</sup>, 如图 3, 线路参数为  $r_1 = 0.02083 \Omega/\text{km}$ ;  $l_1 = 0.8948 \text{ mH}/\text{km}$ ;  $c_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$ ;  $l_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$ ;  $c_0 = 0.00523 \mu\text{F}/\text{km}$

两侧发电机的系统参数为

$$L_{M0} = 0.0926 \text{ H}, R_{M0} = 0.6 \Omega, L_{M1} = 0.13743 \text{ H}, R_{M1} = 1.0515 \Omega$$

$$L_{N0} = 0.11927 \text{ H}, R_{N0} = 20 \Omega, L_{N1} = 0.14298 \text{ H}, R_{N1} = 26 \Omega$$

并联电抗器按补偿度为 70% 来整定, 取

$$L_{ML} = 7.4803 \text{ H}, L_{NL} = 2.4934 \text{ H}$$

仿真系统共设置了 4 种故障类型 AG、AB、ABG、ABCG, 4 个故障点 (依次距离 M 母线  $f_1=1 \text{ km}$ 、 $f_2=100 \text{ km}$ 、 $f_3=200 \text{ km}$  和  $f_4=300 \text{ km}$ ), 4 种过渡电阻 ( $0 \Omega$ ,  $100 \Omega$ ,  $200 \Omega$ ,  $300 \Omega$ ) 以及 7 个故障初相角, 依次为 (以 M 母线 A 相电压为准)  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$ , 以上共组成 448 个样本。仿真中, 没有考虑电容式电压互感器 (CVT) 的暂态特性对该选相系统的影响, 有待进一步的分析研究。

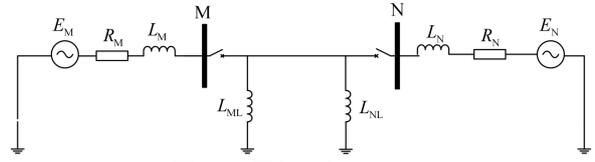


图 3 高压线路仿真模型

Fig. 3 Simulation model of high voltage transmission line

### 4.1 滤波算法的比较分析

本文所用卡尔曼模型, 考虑的谐波成分为 2~5 次谐波, 因此系统状态矩阵为 10 阶方阵<sup>[14]</sup>, 其状态方程为

$$x(t_{k+1}) = \phi_k x(t_k) + w(t_k) \quad (18)$$

测量方程为

$$z(t_k) = H_k x(t_k) + v(t_k) \quad (19)$$

其中:  $x(t_k) = [x1_{r(t_k)} \ x1_{i(t_k)} \ \dots \ x5_{r(t_k)} \ x5_{i(t_k)}]^T$ ;  $H_k = [1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0]$ ;  $w(t_k)$  为均值为零且其协方差矩阵为  $Q_k = \sigma_q^2 I$ ,  $\sigma_q^2 = 0.4$ ;  $v(t_k)$  为均值为零的高斯白噪声, 其协方差为 0.001。

状态转移矩阵为

$$\phi_k = \text{diag}[M_1 \ \dots \ M_5]$$

$$M_n = \begin{bmatrix} \cos(nw_0 \Delta t) & -\sin(nw_0 \Delta t) \\ \sin(nw_0 \Delta t) & \cos(nw_0 \Delta t) \end{bmatrix}$$

$$w_0 = 50 \text{ Hz}, \Delta t = 0.2 \text{ ms}$$

为了验证卡尔曼滤波算法比目前常用的全周傅氏算法在高压线路故障中提取基频电压更准确快速, 同时用两种算法对仿真模型中一个三相故障样本 (过渡电阻为  $0 \Omega$ , 故障点为  $f_2$ , 故障时刻为  $t=0.02 \text{ s}$ ) 的故障相进行滤波处理, 并与理论计算得到的故障后稳态基频电压进行对比, 如图 4 所示 (图中实线为基频电压理论计算值, 虚线为两种滤波算法得到的滤波结果)。

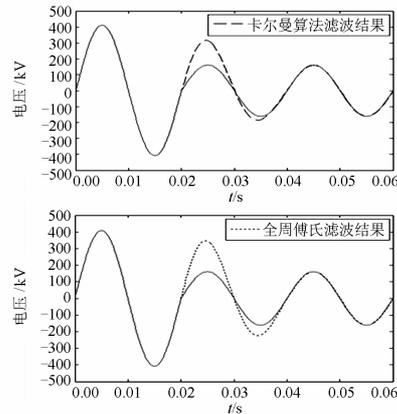


图 4 全周傅氏和卡尔曼滤波结果对比

Fig. 4 Results of filtering algorithms based on Fourier transform and Kalman filter algorithm

以理论计算得到的基频电压值为准确值，对两种滤波算法得到的基波量进行误差分析，如表 1 所示。

表 1 滤波结果误差度

Table 1 Degree of error of filter results

取样时间 <i>t/s</i>	误差度/%	
	全周傅氏滤波算法	卡尔曼滤波算法
0.024	147	118
0.028	78.4	52.4
0.032	48.8	28.5
0.036	33.2	13.2
0.040	2.01	1.06
0.044	0.26	0.08

由表 1 可知，卡尔曼滤波算法在故障后 17 ms 内基本可以准确得到基频电压量，而傅氏算法则需要近一周波的时间。仿真结果验证了在高压输电线路故障中，卡尔曼滤波算法相比于傅氏算法有更准确更快速的滤波效果，能在故障一个周波内较精确地提取基频信号分量。

#### 4.2 不同故障条件下的识别系数

##### 1) 过渡电阻、故障类型及故障位置的影响

由于篇幅有限，文中仅列出在故障后半周波，故障初相角为 120° 时各种故障条件下的各相识别系数数值，如表 2 所示。

表 2 不同故障条件下的故障相识别系数

Table 2 Fault phase identification factors under various fault conditions

故障类型	相别	0 Ω				100 Ω				200 Ω				300 Ω			
		$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$												
AG	$Y_A$	3 846	3 512	3 228	2 884	3 522	331	2 956	2 712	3 128	2 715	2 560	2 356	2 894	2 710	2 420	2 122
	$Y_B$	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.09	0.12	0.14	0.17	0.12	0.14	0.16	0.20
	$Y_C$	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.11	0.13	0.09	0.12	0.13	0.18	0.12	0.13	0.17	0.21
BCG	$Y_A$	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	$Y_B$	1.13	1.11	1.09	1.02	1.11	1.08	1.05	1.00	1.09	1.05	1.01	0.97	1.06	1.02	0.99	0.94
	$Y_C$	1.46	1.42	1.36	1.30	1.41	1.38	1.32	1.29	1.35	1.31	1.26	1.27	1.30	1.26	1.22	1.17
BC	$Y_A$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$Y_B$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
	$Y_C$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
ABCG	$Y_A$	0.57	0.58	0.58	0.57	0.57	0.58	0.58	0.60	0.58	0.58	0.60	0.69	0.59	0.61	0.67	0.79
	$Y_B$	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.57	0.57	0.58	0.57	0.56	0.58	0.60	0.58	0.61	0.58	0.70
	$Y_C$	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.58	0.57	0.59	0.59	0.59	0.58	0.60	0.62	0.65

经仿真验证，在该仿真模型中，当过渡电阻为 300 Ω 时，在线路全长的 92%，该系统均能准确选相；当过渡电阻不超过 275 Ω 时，在线路全长，该系统均能准确选相。针对该选相元件对线路末端高阻接地灵敏度不足的问题，通过结合序电流进行选相，序电流选相方法见文献[15]。

##### 2) 故障初相角的影响

对仿真结果进行分析可知：当发生单相接地故障时，故障相的识别系数会远远大于其余两相的识别系数，且非故障相的系数接近相等；当发生两相接地故障时，三相识别系数均不相等，故障相的系数大于非故障相的系数，且非故障相的系数接近于零；当发生两相相间故障时，两故障相的识别系数接近于 1，非故障相的识别系数几乎为零；当发生三相接地故障时，三相的识别系数均接近 0.58，与理论分析一致。

此外，对比表 2 中其他故障条件相同仅过渡电阻变化时的各组数据，可以得出：随着过渡电阻的增大，会降低该选相元件的灵敏度。分析仅故障位置变化时的各组数据，可知故障位置距离 M 侧母线越大，该选相元件的灵敏度越低。对于相间故障时的识别系数，受故障条件影响较小，该选相系统对相间故障始终有很高灵敏度。虽然会因故障位置和过渡电阻的变化，对单相故障、两相接地故障及三相接地故障的故障相识别系数数值造成影响，但其特征依然明显，符合前文中对故障相识别系数的理论分析，该选相系统对绝大多数故障仍具有较高的灵敏度，可以快速准确地完成选相。在线路末端发生高阻接地时，此时该选相系统的灵敏度不足，尤其对于末端的三相高阻接地，可能无法正确识别故障相，如表 2 中线路末端三相接地且过渡电阻为 300 Ω 时的  $Y_A$  为 0.79。

由于非周期分量的存在，不同的故障时刻也对应着不同的暂态特性，通过设置故障初相角为 0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°（以 M 母线 A 相电压为准），研究故障时刻对选相系统的影响。图 5 所示为  $f_1$  处发生三相接地故障（过渡电阻为 100 Ω）后，故障初相角为 0°、60°、90°、150° 的故障相识别系数。

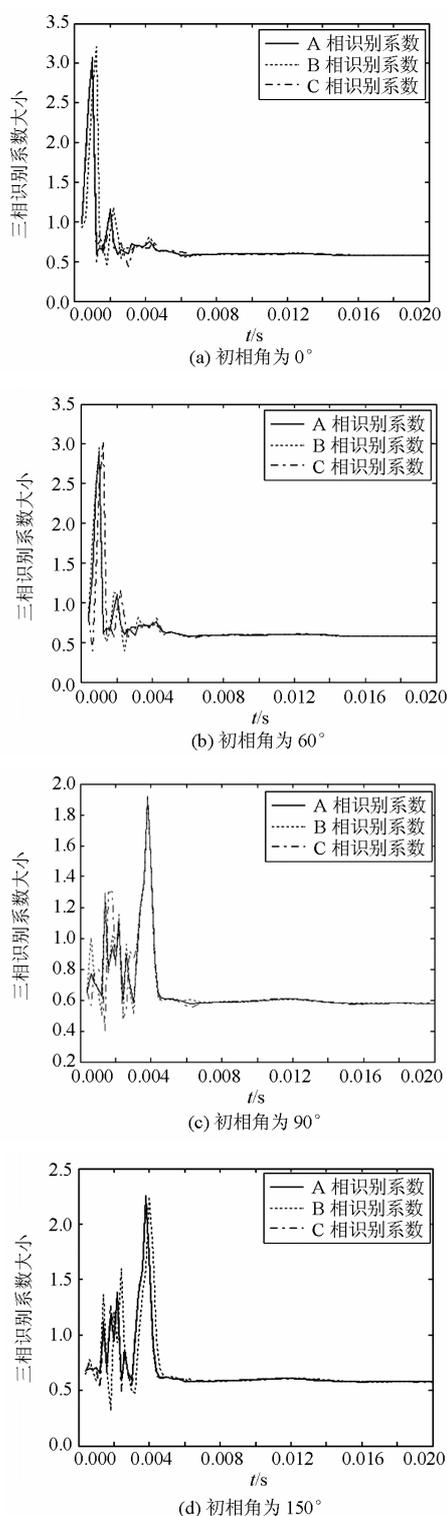


图 5 ABCG 故障初相角为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $150^\circ$  时对应的识别系数

Fig. 5 Fault phase identification factors for ABCG when the fault initial phase angle equals  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $150^\circ$

故障初相角影响着非周期分量起始值, 因此不同的初相角会使故障相识别系数在故障初始阶段波

动的幅度和时间各异, 但针对图 3 所示模型中各初相角, 该识别系数在 6 ms 内都能稳定。在全部样本的仿真结果中, 变化的故障初相角也不会影响该选相算法在 10 ms 后输出的识别系数大小。说明该选相算法受故障初相角影响很小。

经仿真测试, 该算法对于 448 个样本的识别准确率为 99% (其中单相故障准确率为 100%; 相间故障准确率为 100%; 两相接地故障准确率为 99%; 三相接地故障准确率为 97%); 选相元件动作时间在故障后半周以内。

#### 4.3 强电源侧故障

利用电压突变量选相, 克服了电流突变量选相在弱电源侧灵敏度不足的缺陷, 但也存在在强电源侧灵敏度不足的弱点, 为了验证该系统在强电源侧的选相效果, 将仿真系统 N 侧的发电机容量减小 100 倍, 此时, M 侧相当于强电源侧。当 M 侧母线出口处发生非金属性故障 (过渡电阻分别为  $100 \Omega$ 、 $200 \Omega$ ) 时, 故障后半周波的故障相识别系数及选相结果如表 3 所示。

表 3 强电源侧故障选相结果

Table 3 Results of fault phase identification with a fault on the side of strong source

过渡电阻	故障类型	故障相识别系数			选相结果
		$Y_A$	$Y_B$	$Y_C$	
$100 \Omega$	AG	2.213	0.1108	0.1241	AG
	BCG	0.0431	0.9515	1.195	BCG
	BC	0.0001	0.9916	1.0018	BC
	ABCG	0.5755	0.5645	0.5712	ABCG
$200 \Omega$	AG	1.880	0.1526	0.1644	AG
	BCG	0.089	0.828	1.151	BCG
	BC	0.0002	0.9895	1.0001	BC
	ABCG	0.5855	0.5623	0.5751	ABCG

比较表 3 与表 2 中对应 M 侧母线出口处发生非金属性故障 (过渡电阻为  $100 \Omega$ 、 $200 \Omega$ ) 的故障相识别系数, 可知本选相方法在强电源侧故障选相时, 虽然灵敏度有所降低, 但仍能满足选相要求, 可靠、准确地选出故障相, 且能在半周波内完成故障选相。因此, 该选相系统克服了运用电压突变量在强电源侧选相灵敏度不足的缺点, 能够在强电源系统中适用。

## 5 总结

本文提出了一种新型的电压故障分量选相方法。该方法首先利用卡尔曼滤波算法提取相量, 然后将每相电压故障分量与其余两相故障分量差量的

比值, 定义为故障相识别系数, 通过分析该系数在不同故障类型下呈现的特性进行选相。最后利用 PSCAD 对该选相系统进行验证。仿真结果表明: 在高压线路故障中, 卡尔曼滤波算法相比全周傅氏算法有更好的滤波效果, 能在较短的时间内更准确地提取基频电压分量; 该选相系统选相速度快, 能够在半周波内准确识别各种故障类型, 且受过渡电阻、故障初相角和故障位置的影响很小, 在极端情况下, 线路末端高阻接地时需采用序电流选相元件作为补充; 同时该系统克服了电压突变量选相在强电源侧灵敏度不足的缺陷, 在系统中强电源侧同样适用。

参考文献

[1] 梁景芳, 高厚磊, 苏文博, 等. 一种适用于特高压线路的快速选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 95-99.  
LIANG Jing-fang, GAO Hou-lei, SU Wen-bo, et al. A method of fast faulted phase detection suitable for UHV transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 95-99.

[2] 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 Ai-jun, LI Hong, ZHANG Xiao-tao. 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.

[3] 卜春霞, 张义含, 姜自强, 等. 超高压线路暂态保护选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 30-34.  
BU Chun-xia, ZHANG Yi-han, JIANG Zi-qiang, et al. Research on phase-selection of transient based protection for EHV line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 30-34.

[4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
ZHU Sheng-shi. The protection theory and technology in HV power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[5] 吴烈, 古斌, 谭建成. 一直基于功率增量的高压线路保护选相元件[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 125-129.  
WU Lie, GU Bin, TAN Jian-cheng. A fault phase selector for HV transmission line protective relaying based on power increment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 125-129.

[6] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 对模故障分量选相元件的一些探讨[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 70-75.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. Studies on phase selector based on modal transformation and fault component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(6): 70-75.

[7] 钱国民, 陈福锋, 王帆, 等. 单相接地故障时电压选相元件的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 100-104.

QIAN Guo-min, CHEN Fu-feng, WANG Fan, et al. Research on voltage selector for single-phase earth fault[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 100-104.

[8] 王亚强, 焦彦军, 张延东. (超)高压输电线路故障选相现状以及发展[J]. 继电器, 2004, 32(24): 72-77.  
WANG Ya-qiang, JIAO Yan-jun, ZHANG Yan-dong. Current status and development of fault phase selection of (E)HV transmission lines[J]. Relay, 2004, 32(24): 72-77.

[9] 李骏年. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.  
LI Jun-nian. Relay protection of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1993.

[10] 姚亮, 胡再超, 杭泱. 常见傅里叶变换的滤波性能分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 73-76.  
YAO Liang, HU Zai-chao, HANG Yang. Performance analysis of filtering algorithms based on Fourier transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 73-76.

[11] GIRIGS A A, HART D G. Implementation of Kalman and adaptive Kalman filtering algorithms for digital distance protection on a vector signal processor[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 141-156.

[12] GIRIGS A A, BROWN R G. Application of Kalman filtering in computer eelaying[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7): 3387-3397.

[13] 索南加乐, 许庆强, 李小斌, 等. 超高压输电线路的发展性故障判别元件[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 93-98.  
SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, LI Xiao-bin, et al. An evolved fault criterion for UHV transmission line protective relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 93-98.

[14] LE C D, GU I Y H, BOLLEN M H J. Joint causal and anti-causal segmentation and location of transitions in power disturbances[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-6.

[15] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002.  
XU Zheng-ya. New types of distance protection for transmission lines[M]. Beijing: China Water Conservation and Electric Power Press, 2002.

收稿日期: 2013-07-03; 修回日期: 2013-08-23

作者简介:

陈 旻 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护及含分布式能源的配电网; E-mail: eechenyang@126.com

胡 炎 (1975-), 男, 研究员, 主要研究方向为电力系统继电保护与变电站综合自动化;

邵能灵 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制及电力市场。