

DOI: 10.7667/PSPC180115

## 基于初始行波相位差的同杆双回输电线路故障识别

叶睿恺, 吴浩, 董星星

(四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 为提高行波保护的灵敏性和可靠性, 提出一种基于初始电流行波相位比较的同杆双回线路快速保护新算法。基于 S 变换计算初始行波相位, 通过分析同杆双回线路同端和对端上的初始电流行波相位关系构建保护判据。当内部单回线故障时, 双回线路同一侧上电流行波相位近乎相反; 内部同名相跨线接地故障时, 线路同一侧上的电流行波相位近乎相同, 同一条线路两端的电流行波相位近乎相同; 区外故障时, 两条线路同一侧的电流行波相位近乎相同, 同一条线路两端的电流行波相位近乎相反。引入行波相位差的概念, 通过分析电流行波相位差的变化特征识别同杆双回线路区内外故障。大量的仿真结果表明, 该保护性能灵敏、可靠, 动作速度快, 判据简单, 基本不受故障初始角、故障类型和过渡电阻等因素影响。

**关键词:** 同杆双回线路; 初始电流行波; S 变换; 相位比较; 故障识别

### Fault identification of double lines on same tower based on phase difference of initial traveling wave

YE Ruikai, WU Hao, DONG Xingxing

(Automation and Electronic Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** In order to improve the sensitivity and reliability of traveling wave protection, a new algorithm for fast protection of double transmission lines on same tower is proposed based on initial current traveling wave phase comparison. In view of calculating initial traveling wave phase based on S-transform, and the protection criterion is constructed by analyzing the phasor relations of the initial current traveling wave at the same end and the opposite end of the same line. The current traveling wave phase of the same end is almost the opposite when the internal single line fault occurs. The current traveling wave phase of the same end is almost the same, and the current traveling wave phase of opposite end of the same line is almost the same when the internal cross line of the same phase fault occurs. When the external fault occurs, the current traveling wave phase of the same end is almost the same, and the current traveling wave phase of opposite end of the same line is almost the opposite. This paper introduces the concept of the phase difference of the traveling wave, and identifies the internal and external faults of the double lines on the same tower by analyzing the changing characteristics of the phase difference of the current traveling wave. A large number of simulation results show that the protection performance is sensitive, reliable, fast and simple criteria. The protection is barely influenced by the initial angle, fault type and transition resistance and other factors.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11705122).

**Key words:** double lines on the same tower; initial circuit traveling wave; S-transform; phase comparison; fault identification

## 0 引言

随着电力系统的飞速发展, 同杆双回线路以其

走廊资源占用少和传输效率高等优势, 已广泛应用于我国 500 kV 及以上高压电力系统当中<sup>[1]</sup>。现有理论研究表明, 同杆双回输电电路上出现的故障具有复杂的线间和相间耦合, 增加了故障识别的难度, 这使得传统单回输电线路上的故障识别方法不再适用于同杆双回输电线路<sup>[2]</sup>。

国内外学者对同杆双回输电线路的故障识别方法做了大量的研究<sup>[3-8]</sup>。文献[9-10]描述了同杆双回

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(11705122); 四川省科技厅项目资助(2017JY0338); 人工智能四川省重点实验室项目资助(2015RYY01, 2017RYY02); 四川理工学院研究生创新基金资助(y2017032, y2017033)

输电线路对于电气量的相模分析, 提供了详尽的解耦方案。文献[11]提出一种基于同步相量测量装置的同杆双回继电保护方案, 该方案考虑到了输电线路上的参数分布特性, 但是算法过于复杂, 不利于进行故障识别。文献[12]推导出故障时各相的行波差流特征, 根据特征得到相应的行波差动保护判据, 但该方法适用于简单故障, 对于复杂的跨线故障很可能出现拒动的情况。文献[13]提取横差模量电流高低频段的能量进行故障识别, 保证了故障识别的快速性, 但是复杂跨线故障识别的能力仍显不足。文献[14]使用工频分量获取线路的测量阻抗, 利用对应相的测量阻抗确定故障位置, 算法的特性会受滤波装置精度的影响。文献[15]提出一种适用于低线间距的同杆双回线路故障计算方法, 但是没有提出合适的线路保护方案。

本文借鉴文献[16]中阐述的初始行波相位理论, 结合同杆双回线路中的故障电流初始行波特征<sup>[2]</sup>, 由 S 变换提取单频率电流行波在时域中的相位, 获得初始电流行波相位差; 通过分析比较相位差与整定值的大小识别同杆双回线路区内外故障。大量试验结果表明, 该算法性能灵敏、可靠, 动作速度快, 判据简单, 基本不受故障初始角、故障类型和过渡电阻等因素的影响。

## 1 同杆双回线路故障电流行波分析

图 1 表示的是同杆双回线路的线路模型, M 端和 N 端均为与线路相连接的母线, MN 为双回线路保护区内部, PM 和 NO 为保护区外部, R<sub>1</sub>—R<sub>6</sub> 为相应位置的行波保护单元, 规定行波从母线流向线路为正向。以行波保护单元 R<sub>1</sub> 为例, 设  $\Delta u$  和  $\Delta i$  分别为保护单元 R<sub>1</sub> 检测到的电压与电流行波。

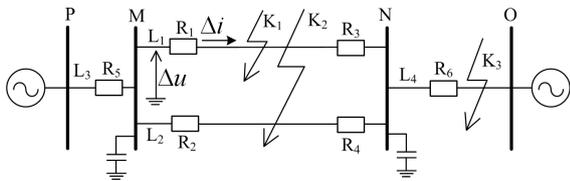


图 1 同杆双回线路简化模型

Fig. 1 Simplified model of the double lines on the same tower

若行波从故障点第一次到达母线 M 的时刻为  $t_0$ , 行波折反射后第二次到达 M 的时刻为  $t_1$ , 则在时间段  $t_0 - t_1$  内, R<sub>1</sub> 获取的故障行波称为初始电压、电流行波<sup>[17]</sup>。

### 1.1 区内单回线路故障时行波特征分析

同杆双回线路 K<sub>1</sub> 点发生故障时, 线路的彼得逊等值电路如图 2 所示。图中:  $\Delta \dot{I}_k$  ( $k=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) 表

示线路对应保护单元检测到的故障电流行波;  $\Delta \dot{U}_M$  和  $\Delta \dot{U}_N$  分别为母线 M 和 N 上的初始电压行波;  $Z_{c1} - Z_{c4}$  分别表示线路 L<sub>1</sub>—L<sub>4</sub> 上的波阻抗;  $Z_{cM}$  和  $Z_{cN}$  分别为母线 M 和 N 对地杂散电容等值阻抗。

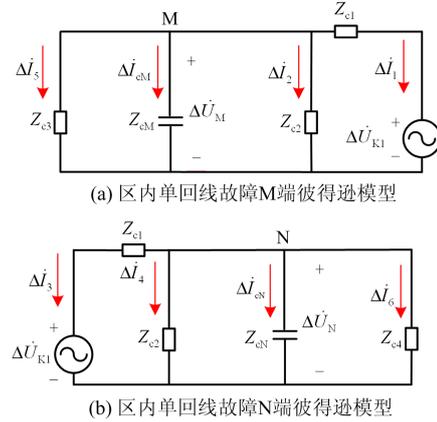


图 2 同杆双回线路 MN 区内单回线路故障彼得逊模型

Fig. 2 Equivalent circuit based on Peterson principle for single line internal fault of the double lines on the same tower

由文献[18]可知, 当行波频率  $f = 50 \sim 100$  kHz 时, 超(特)高压输电线路的波阻抗可近似等效为电阻 R, 即图 2 中  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{c3} = Z_{c4} \approx R$ , 母线对地等值电容波阻抗  $Z_{cM} = 1/j\omega C_M = 1/j2\pi f C_M$ 。

以图 2(a) 所示彼得逊等值模型为例, 可得

$$\Delta \dot{I}_k = \frac{\Delta \dot{U}_M}{Z_{ck}} \approx \frac{\Delta \dot{U}_M}{R} \quad (k=2, 5) \quad (1)$$

$$\Delta \dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_{K1} - \Delta \dot{U}_M}{Z_{c1}} \approx \frac{\Delta \dot{U}_{K1} - \Delta \dot{U}_M}{R} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{I}_{cM} = \frac{\Delta \dot{U}_M}{Z_{cM}} = \Delta \dot{U}_M \times j2\pi f C_M \quad (3)$$

$$-\Delta \dot{I}_1 = \Delta \dot{I}_2 + \Delta \dot{I}_5 + \Delta \dot{I}_{cM} \quad (4)$$

由电路原理, 母线对地电容电流  $\Delta \dot{I}_{cM}$  相位超前非故障线路电流  $\Delta \dot{I}_k$  ( $k=2, 5$ ) 相位  $\varphi_1 = 90^\circ$ , 设  $\varphi_2$  为故障线路与非故障线路的相角差, 则初始电流行波相位关系如图 3 所示。

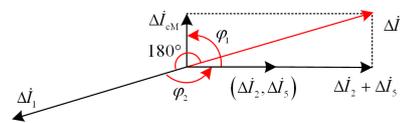


图 3 区内单回线路故障线路同一端电流行波相量关系

Fig. 3 Phasor relation of circuit wave for single line of double lines on same tower internal fault in the same end

由于  $\Delta \dot{I}_{cM} \ll \Delta \dot{I}_k (k=2,5)$ ，因此， $\varphi_2$  接近于  $180^\circ$ ，即内部单回线故障时，线路 I、II 同一侧初始电流行波  $\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_2$  近似反相。

### 1.2 区内同名相跨线接地故障

在同杆双回线上  $K_2$  点发生同名相跨线接地故障时，线路的彼得逊模型如图 4 所示。

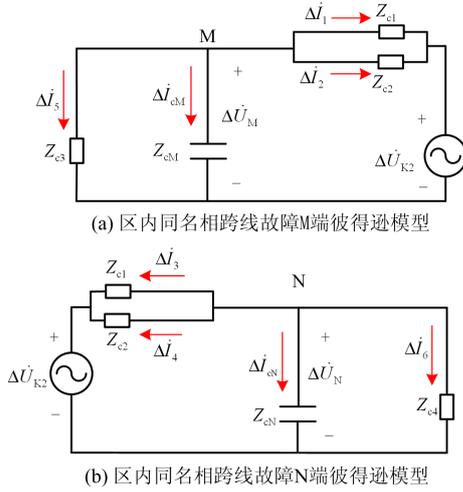


图 4 同杆双回线 MN 区内同名相跨线接地故障彼得逊模型  
Fig. 4 Equivalent circuit based on Peterson principle for internal cross line fault of same phase in double on the same tower

线路同端电流行波可表示为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_1 = \Delta \dot{I}_2 \approx \frac{\Delta \dot{U}_M - \Delta \dot{U}_{K2}}{R} \\ \Delta \dot{I}_3 = \Delta \dot{I}_4 \approx \frac{\Delta \dot{U}_N - \Delta \dot{U}_{K2}}{R} \end{cases} \quad (5)$$

可知两回线路同端故障电流分量大小及相位近似相等。单条线路上两端故障电流分量为(以 I 回线两端  $\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_3$  为例)

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_{K2}}{2(Z_{c3} // Z_{cM} + Z_{c1} // Z_{c2})} \approx \frac{\Delta \dot{U}_{K2}(1 + j\omega C_M R)}{3R + j\omega C_M R} \\ \Delta \dot{I}_3 = \frac{\Delta \dot{U}_{K2}}{2(Z_{c4} // Z_{cN} + Z_{c1} // Z_{c2})} \approx \frac{\Delta \dot{U}_{K2}(1 + j\omega C_N R)}{3R + j\omega C_N R} \end{cases} \quad (6)$$

$\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_3$  的相角值由同杆双回线路两端母线对地电容决定，理想情况下，两端母线对地电容大小近似相等，因此  $\Delta \dot{I}_1 \approx \Delta \dot{I}_3$ ，其相角近似相同。

综上分析，当同名相跨线接地故障时，有：① 两回线路同端初始电流行波相位近似相同；② 同一条线路两端的初始电流行波相位近似相同。

### 1.3 区外故障

当保护区外  $K_3$  点发生故障时，线路的彼得逊模型如图 5 所示。

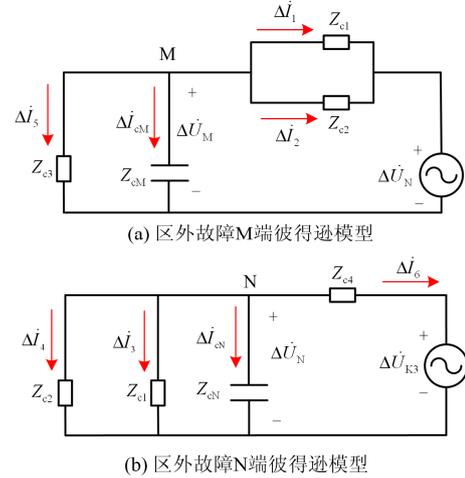


图 5 同杆双回线路区外故障彼得逊模型

Fig. 5 Equivalent circuit based on Peterson principle for external fault of double lines on the same tower

同杆双回线路同端电流行波为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_1 = \Delta \dot{I}_2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \dot{U}_N}{(Z_{c3} // Z_{cM} + Z_{c1} // Z_{c2})} \approx -\frac{\Delta \dot{U}_N}{R} \cdot \frac{3 + \omega^2 C_M^2 R^2 + j2\omega C_M R}{9 + \omega^2 C_M^2 R^4} \\ \Delta \dot{I}_3 = \Delta \dot{I}_4 \approx \frac{\Delta \dot{U}_N}{R} \end{cases} \quad (7)$$

即，两回线路同端的故障电流分量大小及相位近似相等；分析式(7)可得单条线路上两端的故障电流分量为(以 I 回线  $\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_3$  为例)

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_1 = -\Delta \dot{I}_3 \cdot \left( \frac{3 + \omega^2 C_M^2 R^2}{9 + \omega^2 C_M^2 R^2} + j \frac{2\omega C_M R}{9 + \omega^2 C_M^2 R^2} \right) \\ \Rightarrow \Delta \dot{I}_1 = -\Delta \dot{I}_3 (\lambda_1 + j\lambda_2) \end{cases} \quad (8)$$

代入相关参数计算可得( $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 60 \text{ kHz}$ ,  $C_M = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $R \approx 389 \Omega$ )<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \approx 6.700563 \times 10^{-2} \\ \theta_1 = \arctan \lambda \approx 3.833409^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中， $\theta_1$  为  $\Delta \dot{I}_1$  与  $-\Delta \dot{I}_3$  的相位差，则  $\Delta \dot{I}_1$  和  $\Delta \dot{I}_3$  的相量关系如图 6 所示，其中相位差  $\theta_2 \approx 176.16659^\circ$ 。

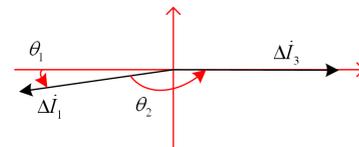


图 6 区外故障同一条线路两端电流行波相量关系

Fig. 6 Phasor relation of circuit wave for two ends of the same line for external fault

综上分析, 区外故障时: ① 两回线路同端故障电流行波相位近似相同; ② 同一条线路两端的故障电流行波相位近似相反。

## 2 算法实现

本文采用类 Clarke 变换对同杆双回线路上的电流进行解耦计算, 使用 S 变换将行波模电流转换为复频域分量, 提取单频率故障初始电流行波计算相应的初始行波电流波峰相角。

### 2.1 相模变换

同杆双回输电线路中存在着较单回输电线路更复杂的耦合情况, 在进行故障分量计算之前需使用相模变换进行解耦。本文选用解耦变换矩阵为类 Clarke 变换矩阵<sup>[2]</sup>。

$$\begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{20} \\ I_{1\alpha} \\ I_{1\beta} \\ I_{2\alpha} \\ I_{2\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: 下标 I 和 II 分别表示同杆双回线路的 I 回线路和 II 回线路; 0、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示相模变换后的零模、 $\alpha$  模和  $\beta$  模分量。

### 2.2 基于 S 变换提取行波初始相位

S 变换是一种对信号时频联合分析的方法, 是对连续小波变换和短时傅里叶变换的发展。设信号  $h(t)$  的离散时间序列为  $h[kT]$  ( $k=0,1,2,\dots,N-1$ ), 其中,  $T$  为时间间隔, 则  $h[kT]$  的离散傅里叶变换为

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (11)$$

式中,  $n=0,1,\dots,N-1$ 。

当  $n \neq 0$  时, 时间序列  $h[kT]$  的离散 S 变换为

$$S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{r=0}^{N-1} H\left[\frac{r+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 r^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi rk}{N}} \quad (12)$$

当  $n=0$  时, 时间序列  $h[kT]$  的离散变换为一个常数, 可得

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} h\left(\frac{r}{NT}\right) \quad (13)$$

式中,  $k, n=0,1,\dots,N-1$ 。信号  $h[kT]$  经过 S 变换之后得到一个二维时频矩阵, 该矩阵的行对应信号

采样时刻, 列对应 S 变换后的离散频率<sup>[19]</sup>。矩阵包含故障信号中的单频率行波以及行波在时域中的幅值及相位信息<sup>[20]</sup>。

### 2.3 初始电流行波相位计算

以图 1 线路  $L_1$  上  $K_1$  点发生三相接地故障为例。故障发生之后, 暂态行波向线路两端传播, 一段时间之后, 保护单元  $R_1$  捕捉到故障初始电流行波, 使用式(10)解耦获得电流模量  $\Delta I_1$ , 根据式(12)、式(13)对电流模量  $\Delta I_1$  进行离散 S 变换, 在选定的频率  $f_z$  上取得一维的复相量<sup>[18]</sup>, 可以表示为

$$\Delta \dot{I}_1(t, f_z) = \Delta I_1(t, f_z) \exp[j\theta_1(t, f_z)] \quad (14)$$

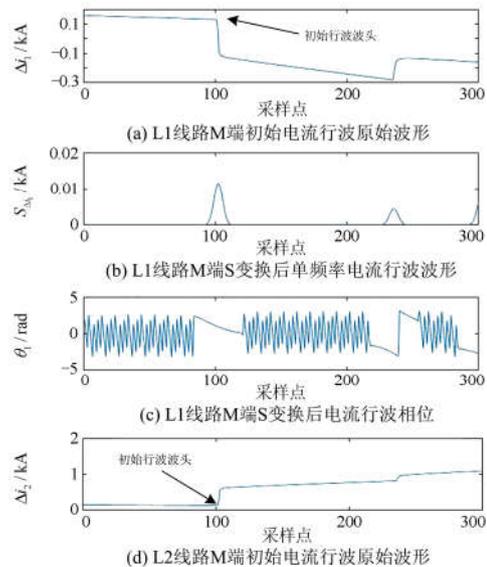
式中,  $\Delta I_1(t, f_z)$ 、 $\theta_1(t, f_z)$  分别为  $\Delta \dot{I}_1(t, f_z)$  的幅值和相位。若在  $t_1$  时刻该行波波头幅值达到最大值  $\Delta I_{\max,1}$ , 则该时刻的模量电流  $\Delta \dot{I}_1(t_1, f_z)$  为选定频率  $f_z$  上的初始电流行波峰值相量<sup>[16]</sup>。同理可得, 同杆双回线路上其他保护单元测量到的初始电流行波峰值相量为:  $\Delta \dot{I}_2(t_1, f_z)$ 、 $\Delta \dot{I}_3(t_1, f_z)$ 、 $\Delta \dot{I}_4(t_1, f_z)$ 。

综上推导, 利用在选定的 S 变换单频率下所得的初始行波峰值相量, 可计算不同故障下同杆双回线路各保护单元所检测到的初始电流行波相位。

### 2.4 样初始电流行波相位提取

以图 1 系统为例, 分别在  $K_1-K_3$  点设置故障, 将 PSCAD 仿真所得的外部故障数据导入 Matlab 进行 S 变换, 分别得到不同故障下保护单元  $R_1-R_4$  检测到的初始电流行波幅值和相位。

图 7、图 8 为区内单回线故障时的初始电流行波幅值和相位图。其中图 7(c)和图 7(f)为 S 变换提取的电流行波相位, 分析可知 M 端  $L_1$  线路与  $L_2$  线路初始电流行波相位相反。同理, 从图 8 可知线路 N 端的初始电流行波相位也相反。



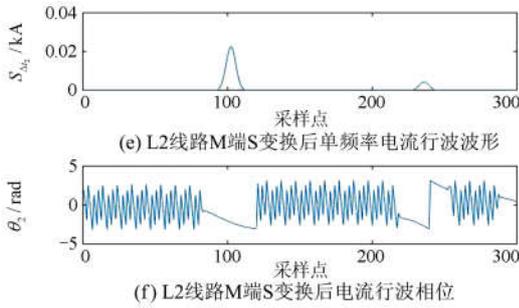


图 7 区内单回线故障 M 端行波幅值和相位

Fig. 7 Phase of bus M for internal single line fault

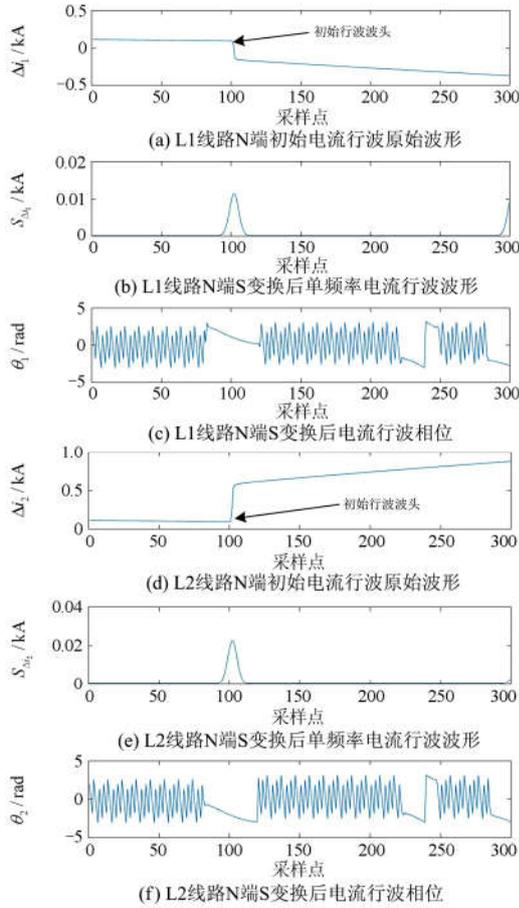


图 8 区内单回线故障 N 端行波幅值和相位

Fig. 8 Phase of bus N for internal single line fault

区内同名相跨线接地故障时，线路初始电流行波幅值和相位如图 9、图 10 所示。分析图 9(c)和图 9(f)相位分布可知，此时线路同端的初始电流行波相位相同；分析图 9(c)和图 10(c)的相位分布可知，此时同一条线路两端的初始电流行波相位相同。

区外故障时，初始电流行波幅值和相位如图 11、图 12 所示，其中图 11(c)和图 11(f)表示线路同端的两回线初始电流行波相位相同，图 11(c)和图 12(c)表示同一条线路两端的初始电流行波相位相反。

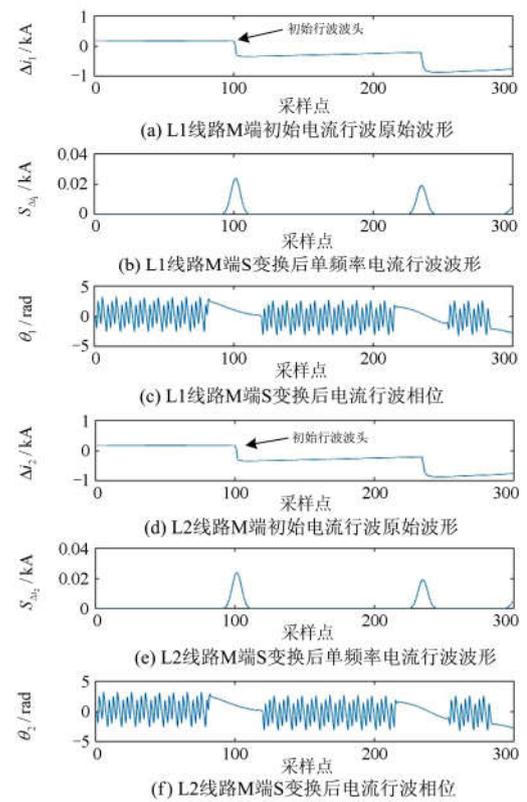


图 9 区内同名相跨线接地故障 M 端行波相位

Fig. 9 Phase of bus M for internal cross line fault

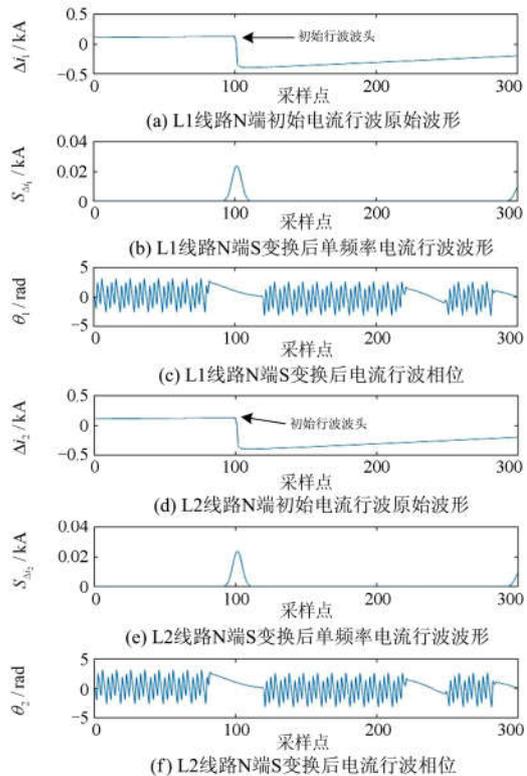


图 10 区内同名相跨线接地故障 N 端行波相位

Fig. 10 Phase of bus N for internal cross line fault

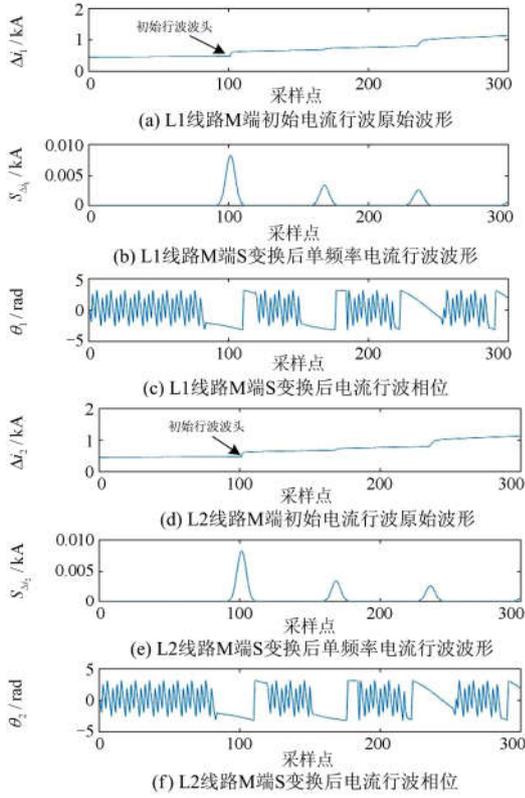


图 11 区外故障 M 端行波相位

Fig. 11 Phase of bus M for external line fault

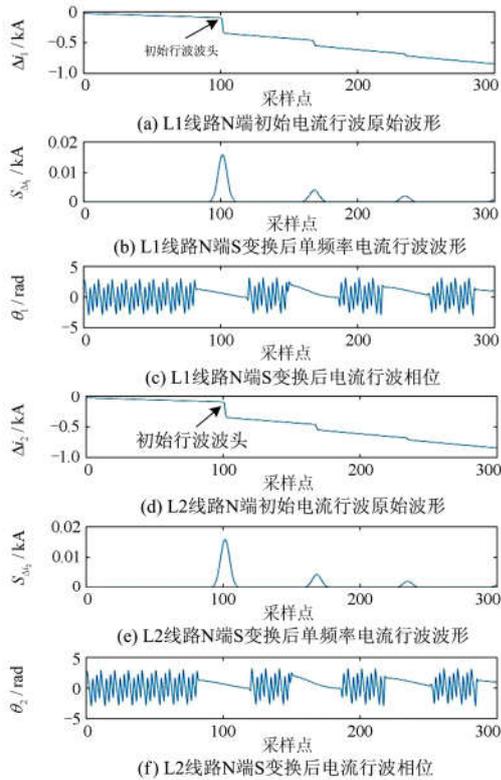


图 12 区外故障 N 端行波相位

Fig. 12 Phase of bus N for external line fault

仿真验证了前文理论推导的正确性, 即同杆双回线路发生区内单回线故障时, 同一母线侧双回线路的初始电流行波相位近似反相; 发生区内同名相跨线接地故障时, 同端两回线路和同一条线路两端的初始电流行波相位皆近似相同; 发生区外故障时, 同端双回线路的初始电流行波相位近似相同, 同一条线路两端的初始电流行波近似反相。

### 3 基于初始行波相位差的故障识别算法

#### 3.1 故障识别判据

依据前文分析初始电流行波相位关系特征, 可构造同杆双回线路的故障识别主判据和辅助判据。

##### 3.1.1 故障识别主判据

以图 1 系统为例, 同杆双回线路上 4 个行波保护单元  $R_1 - R_4$  测量到的初始电流行波相位为  $\theta_{MI}$ 、 $\theta_{MII}$ 、 $\theta_{NI}$  和  $\theta_{NII}$ , 则同杆双回线路同端的初始电流行波相位差为

$$\begin{cases} \Delta\theta_M = |\theta_{MI} - \theta_{MII}| \\ \Delta\theta_N = |\theta_{NI} - \theta_{NII}| \end{cases} \quad (15)$$

利用同杆双回线路同端初始电流行波相位比较构建故障识别主判据为

$$\begin{cases} \Delta\theta_M > \theta_{SET1} \\ \Delta\theta_N > \theta_{SET1} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\theta_{SET1}$  为阈值, 暂定  $\theta_{SET1} = 1.5$ 。当双回线路同一端的初始电流行波相位差  $\Delta\theta_i (i = M, N)$  满足主判据(16)时, 判断为内部故障。

根据统计资料, 同杆双回线路上单回线路故障的概率远大于发生跨线故障的概率<sup>[21]</sup>。主判据仅利用线路同一端的数据就能快速识别大部分区内故障。

##### 3.1.2 故障识别辅助判据

在发生区内复杂跨线故障时, 若仅使用主判据, 很可能造成误判。为了能准确识别区内复杂跨线故障, 本文引入辅助判据。辅助判据使用同一条线路两端的初始电流行波相位计算相位差, 如式(17)。

$$\begin{cases} \Delta\theta_I = |\theta_{MI} - \theta_{NI}| \\ \Delta\theta_{II} = |\theta_{MII} - \theta_{NII}| \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\Delta\theta_I$  和  $\Delta\theta_{II}$  分别表示同杆双回线路中 I、II 回线路两端的初始电流行波相位差。以同一条线路两端的初始电流行波相位差构建辅助判据, 如式(18)。

$$\begin{cases} \Delta\theta_I < \theta_{SET2} \\ \Delta\theta_{II} < \theta_{SET2} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $\theta_{SET2}$  为阈值, 暂定  $\theta_{SET2} = 1.5$ 。当同一条线路两端相位差  $\Delta\theta_i (i = I, II)$  满足辅助判据(18)时, 则判为内部故障, 反之判为外部故障。

### 3.2 算法流程

在同杆双回输电线路路上，当元件检测到线路出现故障行波时，通过解耦变换获得相应电流模量。根据文献[2]可得：当线路保护装置检测到故障为单相故障或两相同名相故障时，使用 $\alpha$ 模量进行故障初始电流行波相角计算，其他故障使用 $\beta$ 模量进行故障初始电流行波相角计算。

选定适当模量后，对相应故障行波进行S变换，利用变换后 60 kHz 对应的单频率故障初始电流行波相位参与计算<sup>[18]</sup>。当相位差满足主判据(16)时，判断为区内故障；不满足主判据(16)时则调用辅助判据(18)。故障识别算法流程图如图 13 所示。

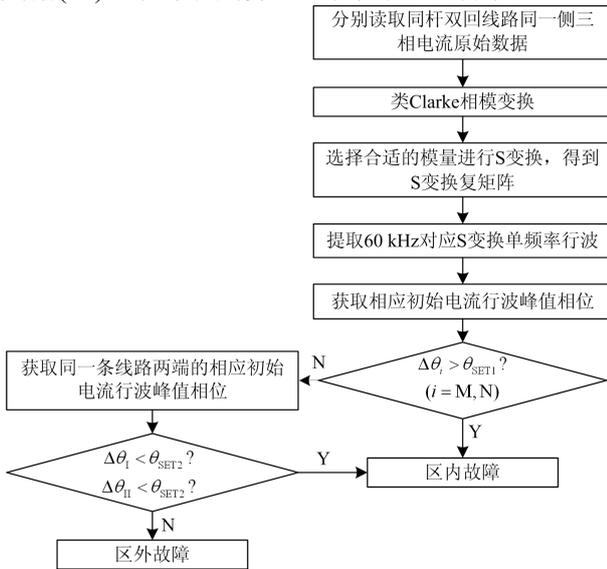


图 13 同杆双回线路故障识别算法流程

Fig. 13 Fault identification algorithm flow of double lines on the same tower

### 4 仿真验证

本文利用 PSCAD 软件建立同杆双回输电线路仿真模型。线路全长 300 km，M 端和 N 端的电压均为 500 kV，50 Hz，保护单元设置如图 1 所示，同杆双回线路的线路参数采用 Tower: 3L12，单回线路采用的线路参数为 Tower: 3H5，采样频率设为 200 kHz。

#### 4.1 区内故障

在同杆双回线路上发生单相接地故障，以 MN 端 I 回线路 C 相接地故障为例。故障点距 N 端 100 km 处，接地电阻 100 Ω，故障初始角度 90°，线路上电流行波如图 2 所示。计算 S 变换之后初始电流行波相位，可得到 M 端的两个电流相角差值  $\Delta\theta_M = 2.899 447$ ，N 端相角差值为  $\Delta\theta_N = 3.141 728$ ，两个相角差值均大于主判据设定门檻值  $\theta_{SET1} = 1.5$ ，故判断为区内故障。

表 1 给出了不同故障类型下的同杆双回线路区内故障仿真。由表 1 可知，同名相跨线故障需要调用辅助判据(18)，而其他跨线故障和单回线故障只需使用主判据(16)即可判断。因此使用双判据，算法能识别线路不同类型故障，不会出现误判。由表 2 可知，当故障初始角度变化时，线路同端检测到的初始电流行波相角差均约为 3.14，均满足主判据(16)；当出现小故障初始角时，相角差值可能会产生波动，但仍能满足主判据(16)，说明该保护算法能准确识别不同故障初始角度的区内故障。

由表 3 分析可知，区内故障时，线路初始电流行波相角差值几乎不受过渡电阻和故障位置的变化影响，均能满足主判据(16)。

表 1 同杆双回内部故障时不同故障类型保护算法的测试结果

Table 1 Results of fault identification algorithms for internal fault in double lines on the same tower under different fault types

故障位置	故障类型	线路	相角变换数据				判定结果
			$\theta_{Mi}$ (i = I, II)	$\Delta\theta_M =  \theta_{Mi} - \theta_{MII} $	$\theta_{Ni}$ (i = I, II)	$\Delta\theta_N =  \theta_{Ni} - \theta_{NII} $	
距离 N 端 150 km 处发生故障; 故障初始角 90°; 过渡电阻 200 Ω	IIAG	I 回线	1.083 395	3.141 375	1.083 395	3.141 375	区内故障
		II 回线	-2.057 980		-2.057 980		区内故障
	IBC	I 回线	-2.063 238	3.141 392	-2.063 236	3.141 387	区内故障
		II 回线	1.078 154		1.078 151		区内故障
	IBCIIA	I 回线	1.071 253	3.132 834	1.071 253	3.132 834	区内故障
		II 回线	-2.061 581		-2.061 581		区内故障
ICIICG	I 回线	-2.058 802	1.776 357e-15	-2.058 802	2.833 289e-13	5.471 331e-08 区内故障	
	II 回线	-2.058 802		-2.058 802		5.471 360e-08 区内故障	
IABIIAB	I 回线	1.080 838	1.065 814e-14	1.080 838	1.998 401e-15	1.035 899e-08 区内故障	
	II 回线	1.080 838		1.080 838		1.035 898e-08 区内故障	
IABC	I 回线	1.200 471	1.747 491e-13	1.200 471	8.992 806e-13	4.632 842e-07 区内故障	
	II 回线	1.200 471		1.200 471		4.632 850e-07 区内故障	

表 2 同杆双回线路内部故障时不同初始角保护算法的测试结果

Table 2 Results of fault identification algorithms for internal fault in double lines on the same tower under different fault initial angles

故障位置 故障类型	故障 初始 角/(°)	相角变换数据						判定结果	
		线路	$\theta_{Mi}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_M =$ $ \theta_{MI} - \theta_{MII} $	$\theta_{Ni}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_N =$ $ \theta_{NI} - \theta_{NII} $	$\Delta\theta_I =  \theta_{MI} - \theta_{NI} $ $\Delta\theta_{II} =  \theta_{MII} - \theta_{NII} $		
距离 N 端 150 km 处发生 IB 与 IIC 短路接地; 过渡 电阻 300 $\Omega$	5	I 回线	-0.960 894	3.141 646	-0.960 894	3.141 646	—	区内故障	
		II 回线	2.180 752		2.180 752		—	区内故障	
	15	I 回线	0.239 817	3.141 835	0.239 817	3.141 836	—	区内故障	
		II 回线	-2.902 018		-2.902 019		—	区内故障	
	45	I 回线	-2.060 186	3.140 818	-2.060 186	3.140 818	—	区内故障	
		II 回线	1.080 632		1.080 632		—	区内故障	
	90	I 回线	2.292 363	3.138 009	2.292 363	3.138 009	—	区内故障	
		II 回线	-0.845 646		-0.845 646		—	区内故障	
	120	I 回线	-0.881 548	3.143 578	-0.881 548	3.143 578	—	区内故障	
		II 回线	2.262 030		2.262 030		—	区内故障	
	距离 N 端 200 km 处发生 IABC 与 IIBC 短路	5	I 回线	0.461 980	3.141 772	0.461 980	1.637 381	—	区内故障
			II 回线	-2.679 792		-1.175 401		—	区内故障
15		I 回线	-1.846 026	4.874 249	-1.846 026	4.790 366	—	区内故障	
		II 回线	3.028 223		2.944 339		—	区内故障	
45		I 回线	-2.062 811	3.141 213	-2.062 812	3.141 213	—	区内故障	
		II 回线	1.078 401		1.078 401		—	区内故障	
90		I 回线	-2.061 631	3.141 213	-2.061 631	3.141 213	—	区内故障	
		II 回线	1.079 582		1.079 582		—	区内故障	
120		I 回线	-1.962 285	3.141 432	-1.962 285	3.138 009	—	区内故障	
		II 回线	1.179 146		1.217 805		—	区内故障	

表 3 同杆双回内部故障时不同过渡电阻下保护算法的测试结果

Table 3 Results of fault identification algorithms for internal fault in double lines on the same tower under different resistances

故障位置 故障类型	过渡电 阻/ $\Omega$	相角变换数据						判定结果	
		线路	$\theta_{Mi}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_M =$ $ \theta_{MI} - \theta_{MII} $	$\theta_{Ni}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_N =$ $ \theta_{NI} - \theta_{NII} $	$\Delta\theta_I =  \theta_{MI} - \theta_{NI} $ $\Delta\theta_{II} =  \theta_{MII} - \theta_{NII} $		
距离 N 端 150 km 处发生 II 回线 AC 相接地短路; 故障 初始角 45°	0	I 回线	1.081 648	3.141 378	1.081 648	3.141 376	—	区内故障	
		II 回线	-2.059 728		-2.059 728		—	区内故障	
	100	I 回线	1.077 961	3.141 376	1.077 961	3.141 376	—	区内故障	
		II 回线	-2.063 415		-2.063 415		—	区内故障	
	300	I 回线	1.076 293	3.141 376	1.076 293	3.141 376	—	区内故障	
		II 回线	-2.065 083		-2.065 083		—	区内故障	
	600	I 回线	1.075 715	3.141 376	1.075 715	3.141 376	—	区内故障	
		II 回线	-2.065 662		-2.065 662		—	区内故障	
	距离 N 端 250 km 处发生 IAB 与 IIC 短路接地; 故障初 始角 90°	0	I 回线	2.351 540	3.140 924	0.130 785	1.720 550	—	区内故障
			II 回线	-0.789 384		1.851 335		—	区内故障
		100	I 回线	2.351 540	3.140 924	0.130 785	1.720 550	—	区内故障
			II 回线	-0.789 384		1.851 335		—	区内故障
300		I 回线	2.351 540	3.140 924	0.130 785	1.720 550	—	区内故障	
		II 回线	-0.789 384		1.851 335		—	区内故障	
600		I 回线	2.351 540	3.140 924	0.130 785	1.720 550	—	区内故障	
		II 回线	-0.789 384		1.851 335		—	区内故障	

上述分析表明,在不同的故障初始角度、不同过渡电阻、不同故障类型和不同故障位置的情况下,仿真数据与理论分析结果一致,保护能准确反映区内故障,可靠动作。

#### 4.2 区外故障

以区外 AC 相短路故障为例,设故障位置为距离 N 端 100 km 处,故障初始角度  $45^\circ$ ,线路电流行波如图 4 所示。依据本文判据,可得到 M 端相角差值为  $\Delta\theta_M = 1.920\ 686 \times 10^{-13}$ ,N 端相角差值为  $\Delta\theta_N =$

$2.970\ 959 \times 10^{-13}$ ,不满足主判据(16),需调用辅助判据(18),计算 I 回线路两端相角差为  $\Delta\theta_I = 1.829846$ ,II 回线路两端相角差为  $\Delta\theta_{II} = 1.829\ 846$ ,符合辅助判据(18),为区外故障。表 4 给出了不同故障类型下的同杆双回线路区外故障仿真。由表 4 分析可知,在不同故障类型中,相位差均不满足主判据(16)和辅助判据(18),说明该算法在不同类型故障情况下能准确识别区外故障。

表 5 分析可知,区外故障时不同故障初始角度

表 4 同杆双回外部故障时不同故障类型下保护算法的测试结果

Table 4 Results of fault identification algorithms for external fault in double lines on the same tower under different fault types

故障位置 故障类型	故障 类型	线路	相角变换数据					判定结果
			$\theta_{M_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_M =$ $ \theta_{MI} - \theta_{MII} $	$\theta_{N_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_N =$ $ \theta_{NI} - \theta_{NII} $	$\Delta\theta_I =  \theta_{MI} - \theta_{NI} $ $\Delta\theta_{II} =  \theta_{MII} - \theta_{NII} $	
距离 N 端 50 km 故障: 过渡电阻 200 $\Omega$ ; 故障 初始角 $15^\circ$	CG	I 回线	0.486 094	$7.609\ 469e-13$	-2.209 512	$9.237\ 056e-14$	2.695 606	区外故障
		II 回线	0.486 094		-2.209 512		2.695 606	区外故障
	BCG	I 回线	-2.214 029	$7.105\ 427e-15$	0.483 633	0.000 000	2.697 663	区外故障
		II 回线	-2.214 029		0.483 633		2.697 663	区外故障
	ABCG	I 回线	-2.214 029	$7.549\ 517e-15$	0.475 562	0.000 000	2.689 592	区外故障
		II 回线	-2.214 029		0.475 562		2.689 592	区外故障
距离 N 端 100 km 故障: 过渡电阻 500 $\Omega$ , 故障 初始角 $120^\circ$	CG	I 回线	-2.745 764	$4.085\ 621e-13$	0.937 459	$4.385\ 381e-14$	3.683 223	区外故障
		II 回线	-2.745 764		0.937 459		3.683 223	区外故障
	BCG	I 回线	-0.537 313	$3.330\ 669e-14$	-3.005 496	$5.462\ 297e-14$	2.468 183	区外故障
		II 回线	-0.537 313		-3.005 496		2.468 183	区外故障
	ABCG	I 回线	-2.749 579	$1.127\ 987e-13$	0.933 807	$2.675\ 637e-13$	3.683 386	区外故障
		II 回线	-2.749 579		0.933 807		3.683 386	区外故障

表 5 同杆双回外部故障时不同初始角保护算法的测试结果

Table 5 Results of fault identification algorithms for external fault in double lines on the same tower under different fault initial angles

故障位置 故障类型	故障初 始角( $^\circ$ )	线路	相角变换数据					判定结果
			$\theta_{M_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_M =$ $ \theta_{MI} - \theta_{MII} $	$\theta_{N_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_N =$ $ \theta_{NI} - \theta_{NII} $	$\Delta\theta_I =  \theta_{MI} - \theta_{NI} $ $\Delta\theta_{II} =  \theta_{MII} - \theta_{NII} $	
距离 N 端 50 km 处发 生 A 相接地 短路; 过渡 电阻 100 $\Omega$	5	I 回线	2.217 207	$2.042\ 810e-14$	0.372 212	$4.528\ 599e-13$	1.844 995	区外故障
		II 回线	2.217 207		0.372 212		1.844 995	区外故障
	15	I 回线	-2.656 004	$1.509\ 903e-14$	0.928 556	$1.240\ 119e-13$	3.584 560	区外故障
		II 回线	-2.656 004		0.928 556		3.584 560	区外故障
	45	I 回线	1.781 150	$1.376\ 677e-14$	-0.797 550	$1.199\ 041e-14$	2.578 703	区外故障
		II 回线	1.781 150		-0.797 550		2.578 703	区外故障
	90	I 回线	1.782 253	$5.995\ 204e-15$	-0.796 704	$4.440\ 892e-16$	2.578 957	区外故障
		II 回线	1.782 253		-0.796 704		2.578 957	区外故障
	120	I 回线	-0.630 785	$1.287\ 859e-13$	-2.427 549	$8.881\ 784e-16$	1.796 764	区外故障
		II 回线	-0.630 785		-2.427 549		1.796 764	区外故障
距离 N 端 100 km 处 发生 AC 相短路	5	I 回线	-3.066 970	$8.215\ 650e-14$	0.731 535	$9.681\ 145e-14$	3.798 504	区外故障
		II 回线	-3.066 970		0.731 535		3.798 504	区外故障
	15	I 回线	-1.895 087	$8.155\ 698e-13$	2.261 780	$1.203\ 482e-13$	4.156 867	区外故障
		II 回线	-1.895 087		2.261 780		4.156 867	区外故障
	90	I 回线	-0.725 079	$1.345\ 590e-13$	-2.555 160	$2.753\ 353e-14$	1.830 081	区外故障
		II 回线	-0.725 079		-2.555 160		1.830 081	区外故障
	120	I 回线	-2.744 743	0.000 000	0.936 064	$5.873\ 080e-14$	3.680 807	区外故障
		II 回线	-2.744 743		0.936 064		3.680 807	区外故障

情况下, 同杆双回线路同端行波相位差基本不变, 均趋于零, 不满足主判据(16); 调用辅助判据(18), 计算可知同一条线路两端行波相位差变化不大, 都在 1.7 以上, 不满足辅助判据(18), 判为区外故障, 即该算法不受故障初始角度影响。

由表 6 分析可知, 在不同过渡电阻条件下发生区外故障时, 同杆双回线路同端的两回线检测到的电流行波相角近似相等, 同一条线路两端检测到的

初始电流行波相位差不满足辅助判据(18)。随着过渡电阻的增大, 电流行波相位差值基本保持不变, 说明该算法不受过渡电阻变化的影响。

综上分析, 该算法能准确识别同杆双回线路上发生的区外故障, 且不受故障初始角、过渡电阻和故障类型的影响, 该算法准确可靠不误动, 试验结果与理论分析结果相符。

表 6 同杆双回外部故障时不同过渡电阻下保护算法的测试结果

Table 6 Results of fault identification algorithms for external fault in double lines on the same tower under different resistances

故障位置 故障类型	过渡 电阻/ $\Omega$	线路	相角变换数据					判定结果
			$\theta_{M_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_M =$ $ \theta_{MI} - \theta_{MII} $	$\theta_{N_i}$ ( $i = I, II$ )	$\Delta\theta_N =$ $ \theta_{NI} - \theta_{NII} $	$\Delta\theta_I =  \theta_{MI} - \theta_{NI} $ $\Delta\theta_{II} =  \theta_{MII} - \theta_{NII} $	
距离 N 端 50 km 处发生 B 相接地短路; 故障初始角 45°	0	I 回线	1.778 904	1.132 427e-14	-0.794 343	1.343 370e-14	2.573 247	区外故障
		II 回线	1.778 904		-0.794 343		2.573 247	区外故障
	100	I 回线	1.774 980	3.352 874e-14	-0.796 442	2.464 695e-14	2.571 422	区外故障
		II 回线	1.774 980		-0.796 442		2.571 422	区外故障
	300	I 回线	1.771 641	6.017 409e-14	-0.798 232	9.992 007e-15	2.569 873	区外故障
		II 回线	1.771 641		-0.798 232		2.569 873	区外故障
600	I 回线	1.769 678	4.285 461e-14	-0.799 287	2.031 708e-14	2.568 965	区外故障	
	II 回线	1.769 678		-0.799 287		2.568 965	区外故障	
距离 N 端 100 km 处发生 AB 相 接地短路; 故障 初始角 90°	0	I 回线	0.583 268	1.332 268e-15	2.422 651	0.000 000	1.839 382	区外故障
		II 回线	0.583 268		2.422 651		1.839 382	区外故障
	100	I 回线	0.583 818	1.887 379e-15	2.421 747	0.000 000	1.837 929	区外故障
		II 回线	0.583 818		2.421 747		1.837 929	区外故障
	300	I 回线	0.584 778	3.552 714e-15	2.420 948	0.000 000	1.836 171	区外故障
		II 回线	0.584 778		2.420 948		1.836 171	区外故障
600	I 回线	0.585 596	1.345 590e-13	2.420 460	0.000 000	1.834 864	区外故障	
	II 回线	0.585 596		2.420 460		1.834 864	区外故障	

## 5 结论

本文提出了基于初始电流行波相位比较的同杆双回线路保护新原理, 分析了同杆双回线路故障时初始电流行波相位变化特征。利用单端和双端线路上的相角差值识别区内外故障: 当单端行波相角接近反相时判断为区内故障; 当单端行波相角同相则对比双端行波相角, 同相为区内故障, 反相为区外故障。仿真结果表明以下几点。

1) 该算法利用 S 变换获取单频率初始电流行波相位, 在不同故障初始角度、不同接地电阻和不同故障位置都能准确地识别区内外故障。

2) 该算法使用双判据, 在出现同名相跨线故障时, 仍可以准确识别故障, 避免出现保护死区。

3) 保护算法仅利用初始电流行波相位信息, 判据简单, 所需数据量小, 计算快速。

4) 该算法是电流行波极性比较原理的延伸, 具有抗 TA 饱和影响、动作速度快、灵敏度高等特点, 有很强的实用性。

## 参考文献

- [1] 毕天姝, 李伟, 徐振宇, 等. 基于单端单回线电气量的同杆双回线单相接地距离保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 88-93.  
BI Tianshu, LI Wei, XU Zhenyu, et al. Single-phase grounding distance protection of parallel transmission lines on same poles based on electric quantities data from single terminal and single line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 88-93.
- [2] 李小鹏, 何正友, 夏璐璐. 同杆双回输电线路的固有频率测距算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 47-51.  
LI Xiaopeng, HE Zhengyou, XIA Lulu. Natural frequencies based fault location algorithm for parallel transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 47-51.
- [3] 张旭升, 李旭, 樊占峰, 等. 同塔四回线路纵向故障对零序方向保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 114-120.  
ZHANG Xusheng, LI Xu, FAN Zhanfeng, et al. Influence research of longitudinal fault on zero sequence direction protection for four parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 114-120.

- [4] 朱忆洋, 都洪基, 赵青春. 不对称参数同杆双回线选相方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 133-139. ZHU Yiyang, DU Hongji, ZHAO Qingchun. Research on phase selection for double-circuit lines on the same tower with asymmetrical parameters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 133-139.
- [5] 陈青, 徐文远. 同杆双回线故障分析新方法研究[J]. 中国机电工程学报, 2005, 25(20): 68-71. CHEN Qin, XU Wenyuan. Research on fault analysis of double circuit lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 68-71.
- [6] 张武军, 何奔腾. 行波差动保护不平衡电流分析及使用方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 49-55. ZHANG Wujun, HE Benteng. Analysis and application of unbalanced differential current in traveling wave different protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 49-55.
- [7] 李小鹏, 何正友, 武骁. 基于 S 变换能量相对熵的高压输电线路极性比较式纵联保护[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2250-2256. LI Xiaopeng, HE Zhengyou, WU Xiao. Polarity comparison pilot protection based on S-transform energy relative entropy for high voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2250-2256.
- [8] RAMAR K, LOW H S, NGU E E. One-end impedance based fault location in double-circuit transmission lines with different configurations[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64(1): 1159-1165.
- [9] 何奔腾, 胡为进. 同杆并架双回线路模变换分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 25-30. HE Benteng, HU Weijin. Mode transformation of double-circuit line tower[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 25-30.
- [10] 钱鑫, 施围. 同杆双回路不同换位下模量分析[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 24-27. QIAN Xin, SHI Wei. Mode analysis of different transported double circuit on same tower[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 24-27.
- [11] 蔡国伟, 周国屏, 李凌. 基于同步相量测量的同杆双回路继电保护方案的研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(6): 56-59. CAI Guowei, ZHOU Guoping, LI Ling. Protection scheme for double-line with same pole based on synchronized phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 56-59.
- [12] 张武军, 何奔腾, 洪光辉, 等. 同杆并架双回线路行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 66-71. ZHANG Wujun, HE Benteng, HONG Guanghui, et al. Traveling-wave differential relay scheme for double-circuit parallel lines on the same pole[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 66-71.
- [13] 范春菊, 郁惟镛, LI K K. 基于横差模电流暂态能量的同杆双回线保护方案[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 69-74. FAN Chunju, YU Weiyong, LI K K. Protection scheme for double lines on same tower based on transient energy of modal differential transverse current[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 69-74.
- [14] EISSA M M, MASOUD M. A novel digital distance relaying technique for transmission line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(3): 380-384.
- [15] 张海, 黄少锋. 一种适用于低线间距的同杆双回线跨线故障等值算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 56-61. ZHANG Hai, HUANG Shaofeng. An interline fault equivalent algorithm for common-tower double-transmission line with narrow line-to-line distance[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 56-61.
- [16] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的新型波阻抗方向继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 113-119. LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel surge impedance directional relay based on S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 113-119.
- [17] 刘兴茂, 林圣, 何正友, 等. 基于 S 变换的行波相位比较式方向继电器[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 744-749. LIU Xingmao, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. S transform based travelling wave phase comparison directional relay[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 744-749.
- [18] 吴浩, 李群湛, 刘炜. 输电线路功率型行波纵联保护新方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 107-113. WU Hao, LI Qunzhan, LIU Wei. A new pilot protection algorithm based on traveling wave power for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 107-113.
- [19] 吴浩. 基于 S 变换样本熵的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 15-22. WU Hao. A new pilot protection principle based on S-transform sample entropy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 15-22.
- [20] 覃星福, 龚仁喜. 基于广义 S 变换与 PSO-PNN 的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 10-17. QIN Xingfu, GONG Renxi. Power quality disturbances classification based on generalized S-transform and PSO-PNN[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 10-17.
- [21] 张太升, 鄢安河, 赵一, 等. 同杆双回线的新型继电保护方案研究[J]. 继电器, 2008, 36(8): 16-19. ZHANG Taisheng, YAN Anhe, ZHAO Yi, et al. Study of a new relay protection scheme for double-circuit lines on the same pole[J]. Relay, 2008, 36(8): 16-19.

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-29

作者简介:

叶睿恺(1992—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护与控制方面的研究; E-mail: pokagic@163.com

吴浩(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: wuhao801212@163.com

董星星(1992—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护与控制方面的研究。

(编辑 葛艳娜)