

# 全线有效的线模行波选线法

季晨宇

(南通供电公司, 江苏 南通 226006)

**摘 要:** 基于线模的行波选线法利用的是零模分量到达测量点之前的线模分量, 线模量独自存在的时间很短, 当故障发生在死区内时, 测量到的是零、线模行波的混叠量, 此时原判据不再适用。本文详细分析选线死区内、外电流初始行波特征, 提出全线有效的线模行波选线法, 最后通过仿真试验验证了本方案的有效性。

**关键词:** 线模行波; 选线死区; 全线有效

## 0 引言

小电流接地系统单相故障选线方法中, 利用故障暂态信号的行波选线法因不受中性点接地方式、过渡电阻、故障时刻电压等的影响, 克服了其他选线法的诸多不足, 正在受到关注<sup>[1,2]</sup>。目前有各种基于行波理论的选线方法, 但均存在局限性, 影响了其工程应用的推广, 如零模行波法虽不受线模量的影响<sup>[3]</sup>, 但零模分量衰减大, 受环境影响大<sup>[4]</sup>, 使行波波形分析较为复杂, 测量精度相对较低, 且要求系统安装有三相 TA 或零序 TA; 基于线模量的相电流行波选线存在选线死区<sup>[2]</sup>;  $\beta$ 、 $\gamma$  线模行波选线原理是根据仿真实验数据归纳的故障特征提出的<sup>[5]</sup>, 判据繁琐且同样存在选线死区。

本文考虑行波在电感线圈中的传播, 分别对中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统, 推导选线死区外三相量与  $\beta$ 、 $\gamma$  模量比值关系式, 对现有算法进行理论补充与完善; 进一步推导选线死区内的行波特征, 对选线死区问题做了理论上的探讨, 根据选线死区内、外各相量、模量幅值与相位的显著差异, 构造全线有效的线模行波选线法, 并利用 MATLAB 软件, 结合双树复小波进行仿真试验, 验证了本方法的可行性。

## 1 选线死区外行波特征

设母线上接有  $N$  回路阻抗均为  $Z$  的线路, 并且其中一回线路上发生了接地故障, 由故障点产生的电流初始行波在母线, 即波阻抗不连续点处折、反射的示意图如图 1 所示。

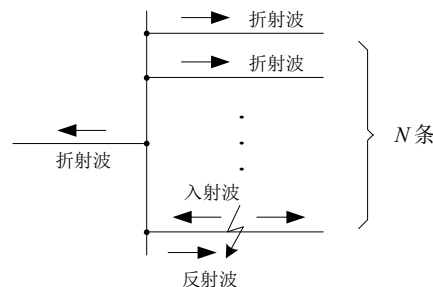


图 1 初始行波在母线处的折反射

对于高频初始行波, 变压器绕组电感、母线处配变电感绕组和电压互感器的电感都很大, 虽然绕组中电流不能突变, 我们仍然考虑行波在电感线圈中的传播, 并将上述电感等效为一个集中总电感  $L$ 。根据零模电流行波在相与地之间传播, 线模电流行波在相与相之间传播, 对于图 1 所示的电网, 考虑由故障点产生并向母线端行进的模量初始电流行波。当系统中性点不接地时, 零模电流行波的入射线路波阻抗为线路波阻抗, 折射线路的波阻抗为非故障的  $N-1$  回路线路波阻抗的并联, 线模电流行波的入射线路波阻抗为线路波阻抗, 折射线路的波阻抗为非故障的  $N-1$  回路线路波阻抗串联一个电感元件, 零、线模初始电流行波遇到母线波阻抗不连续点时的彼得逊等效电路分别如图 2(a)、(b)所示。

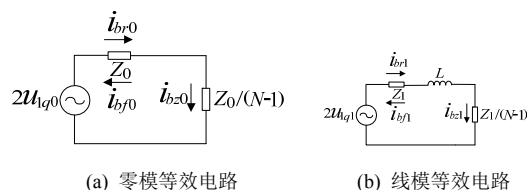


图 2 模量初始行波的彼得逊等效电路

图 2 中,  $u_{lq0}$ 、 $u_{lq1}$  分别为零模、线模初始入

射电压行波,  $i_{br0}$ 、 $i_{bf0}$ 、 $i_{bz0}$  分别为母线上的零模电流初始入射行波、反射行波和折射行波,  $i_{br1}$ 、 $i_{bf1}$ 、 $i_{bz1}$  分别为母线上的线模电流初始入射行波、反射行波和折射行波,  $Z_0$ 、 $Z_1$  分别为线路零模、线模波阻抗。

按图 2(a)的电路, 据电路基本定律、波过程基本规律, 推导母线上的零模电流初始反射行波和折射行波如式(1)所示:

$$\begin{cases} i_{bf0} = \frac{N-2}{N} i_{br0} \\ i_{bz0} = \frac{2(N-1)}{N} i_{br0} \end{cases} \quad (1)$$

由于电磁波的速度很快, 各条线路上的电流测量点距离母线的距离很短, 所以故障线路上测得的零模电流行波为零模入射行波和零模反射行波的叠加, 记为  $i_{LF0}$ , 非故障线路上测得的零模电流行波为零模折射行波的部分, 记为  $i_{LS0}$ 。规定电流的正方向为由线路指向母线, 因此有式(2):

$$\begin{cases} i_{LF0} = \frac{2(N-1)}{N} i_{br0} \\ i_{LS0} = -\frac{2}{N} i_{br0} \end{cases} \quad (2)$$

按图 2(b)电路, 同理得到式(3):

$$\begin{cases} i_{LF1} = \frac{2(N-1)}{N} K i_{br1} \\ i_{LS1} = -\frac{2}{N} K i_{br1} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $K = 1 - e^{-\frac{L}{T}}$ ,  $T = \frac{N-1}{N} \cdot \frac{L}{Z_1}$ ,  $i_{LF1}$ 、 $i_{LS1}$

分别为故障线路、非故障线路线模电流初始行波。

当 C 相故障时, 根据式(4)的初始行波研究成果<sup>[2]</sup>, 结合式(2)、(3), 推导得式(5)、(6):

$$\begin{cases} i_{0f} = -i_{\beta f} = \frac{1}{3} i_{cf} \\ i_{\alpha f} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $i_{0f}$ 、 $i_{\alpha f}$ 、 $i_{\beta f}$  分别为故障支路上零模、 $\alpha$  模、 $\beta$  模电流初始行波。

$$\begin{cases} i_{LF0} = \frac{N-1}{N} i_{0f} \\ i_{LF\alpha} = 0 \\ i_{LF\beta} = -\frac{N-1}{N} K i_{0f} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{LS0} = -\frac{1}{N} i_{0f} \\ i_{LS\alpha} = 0 \\ i_{LS\beta} = \frac{1}{N} K i_{0f} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)中,  $i_{LF\alpha}$ 、 $i_{LF\beta}$  分别为故障线路的  $\alpha$  模、 $\beta$  模电流初始行波, 式(6)中,  $i_{LS\alpha}$ 、 $i_{LS\beta}$  分别为非故障线路的  $\alpha$  模、 $\beta$  模电流初始行波。

当故障发生在选线死区外, 线模行波首先到达测量点, 测量到的相电流初始行波仅由线模行波构成, 通过凯伦贝尔相模变换矩阵, 结合式(5)、(6)可以求测量点的各相初始电流行波, 如式(7):

$$\begin{cases} i_{Lfa} = -\frac{N-1}{N} K i_{0f} \\ i_{Lfb} = -\frac{N-1}{N} K i_{0f} \\ i_{Lfc} = \frac{2(N-1)}{N} K i_{0f} \\ i_{LSa} = \frac{1}{N} K i_{0f} \\ i_{LSb} = \frac{1}{N} K i_{0f} \\ i_{LSc} = -\frac{2}{N} K i_{0f} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)各等式左边各项之比等于等式右边各项消去公共项, 得到选线死区外发生 C 相故障时, 故障线路、非故障线路各相电流比值关系式(8):

$$\begin{aligned} i_{Lfa} : i_{Lfb} : i_{Lfc} : i_{LSa} : i_{LSb} : i_{LSc} \\ = -(N-1) : -(N-1) : 2(N-1) : 1 : 1 : -2 \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 可得 A 相、B 相故障时故障线路、非故障线路各相电流比值关系式:

A 相故障:

$$\begin{aligned} i_{Lfa} : i_{Lfb} : i_{Lfc} : i_{LSa} : i_{LSb} : i_{LSc} \\ = 2(N-1) : -(N-1) : -(N-1) : -2 : 1 : 1 \end{aligned} \quad (9)$$

B 相故障 :

$$\begin{aligned} i_{Lfa} : i_{Lfb} : i_{Lfc} : i_{LSa} : i_{LSb} : i_{LSc} \\ = -(N-1) : 2(N-1) : -(N-1) : 1 : -2 : 1 \end{aligned} \quad (10)$$

系统安装三相 TA 时, 可以根据相电流初始行波特征进行选线选相, 但是当系统安装有 A、C 两相 TA 时, 充分利用两相 TA 测得的电流行波进行选线选相, 更具有实用价值。由凯伦贝尔相模变换矩阵有  $i_{\beta} = \frac{1}{3}(i_a - i_c)$ , 构造  $\gamma$  模分量<sup>[5]</sup>,

$i_\gamma = \frac{1}{3}(i_a + i_c)$ , 当考虑系统中性点不接地, 在选线死区内发生 C 相接地故障时, 将式(7)中相电流表达式代入  $\beta$ 、 $\gamma$  公式, 有式(11)成立:

$$\begin{cases} i_{LF\beta} = -\frac{N-1}{N}Ki_{0f} \\ i_{LF\gamma} = \frac{1}{3}\frac{N-1}{N}Ki_{0f} \\ i_{LS\beta} = \frac{1}{N}Ki_{0f} \\ i_{LS\gamma} = -\frac{1}{3}\frac{1}{N}Ki_{0f} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $i_{LF\beta}$ 、 $i_{LF\gamma}$  分别为故障线路的  $\beta$  模、 $\gamma$  模电流初始行波,  $i_{LS\beta}$ 、 $i_{LS\gamma}$  分别为非故障线路的  $\beta$  模、 $\gamma$  模电流初始行波。

根据式(11)得到故障线路、非故障线路  $\beta$ 、 $\gamma$  模电流比值关系式(12):

$$i_{LF\beta} : i_{LF\gamma} : i_{LS\beta} : i_{LS\gamma} = -(N-1) : \frac{1}{3}(N-1) : 1 : -\frac{1}{3} \quad (12)$$

同理可得 A 相、B 相分别发生接地故障时,  $\beta$ 、 $\gamma$  模量比例关系, 如式(13)、(14)所示:

A 相故障时:

$$i_{LF\beta} : i_{LF\gamma} : i_{LS\beta} : i_{LS\gamma} = (N-1) : \frac{1}{3}(N-1) : -1 : -\frac{1}{3} \quad (13)$$

B 相故障时:

$$i_{LF\beta} : i_{LF\gamma} : i_{LS\beta} : i_{LS\gamma} = 0 : -(N-1) : 0 : 1 \quad (14)$$

当系统中性点经消弧线圈接地时, 设  $L'$  是变压器电感与消弧线圈电感之和, 同样考虑由故障点产生并向母线端行进的模量初始电流行波, 零模电流行波的入射线路波阻抗为线路波阻抗, 折射线路的波阻抗为非故障的  $N-1$  回线路波阻抗与电感线圈  $L'$  的并联, 线模电流行波的入射线路波阻抗为线路波阻抗, 折射线路的波阻抗为非故障的  $N-1$  回线路波阻抗串联一个电感元件  $L$ 。零、线模电流初始行波遇到母线波阻抗不连续点时的彼得逊等效电路分别如图 3 (a)、(b)所示。

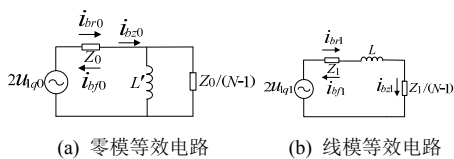


图 3 模量初始行波的彼得逊等效电路

推导得故障发生在选线死区外时, 故障线路和非故障线路对应相电流行波的比值关系式同式(8)~(10), 对应模电流行波的比值关系式同式(12)~(14)。

选线死区外相电流行波特征由式(8)~(10)可知:

(1) 故障线路与非故障线路的同一相电流初始行波的幅值比值等于  $(N-1)$ , 极性相反, 此特征可以用来选线。

(2) 对同一线路而言, 故障相电流初始行波幅值是非故障相电流初始行波幅值的 2 倍, 极性相反。两非故障相电流初始行波幅值相等, 极性相同。此特征可以用来选相。

(3) 另外, 母线故障时各线路对应相电流初始行波幅值相等, 极性相同。此特征可判断母线接地故障。

选线死区外模电流行波特征由式(12)~(14)可知:

(1) 故障线路与非故障线路  $\beta$  模量模值之比等于  $\gamma$  模量模值之比为  $(N-1)$ , 且同一条线上  $\beta$ 、 $\gamma$  模量幅值之比为 3,  $\beta$ 、 $\gamma$  模量极性相同还是相反, 分别反应出是 A 相还是 C 相接地。

(2) 故障线路与非故障线路  $\beta$  模量幅值相等为零, 且故障线路与非故障线路  $\gamma$  模量模值之比为  $(N-1)$ , 极性相反, 表明 B 相接地。

(3) 另外, 母线接地时各线路  $\beta$  模量模值相等, 极性相同,  $\gamma$  模量也有相同特征。

## 2 选线死区内行波特征

上节所述的是故障发生在选线死区外的初始电流行波特征, 不仅对已有相电流行波研究结果中的模型及推导进行了修正, 而且验证了  $\beta$ 、 $\gamma$  模电流行波选线原理的正确性, 对该原理进行理论的补充和完善, 且与其仿真实验结果吻合。

当线路较短或故障点离母线较近时, 零模信号和线模信号极易混叠, 这时, 测量到的初始行波信号是零、线模的叠加量, 各相电流行波及  $\beta$ 、 $\gamma$  模量行波的关系式不再满足上节的推导结论, 如果再按上节的行波特征选线, 必然会导致误判。所以有必要研究选线死区内行波特征, 从而使选线判据全线有效。

当 C 相故障发生在选线死区, 测量到的相电流初始行波由零模、线模初始行波叠加构成, 通过凯

伦贝尔相模变换、式(5)、(6)可以求测量点的各相初始电流行波, 如式(15):

$$\begin{cases} i'_{Lfa} = \frac{N-1}{N}(1-K)i_{0f} \\ i'_{Lfb} = \frac{N-1}{N}(1-K)i_{0f} \\ i'_{Lfc} = \frac{N-1}{N}(1+2K)i_{0f} \\ i'_{LSa} = -\frac{1}{N}(1-K)i_{0f} \\ i'_{LSb} = -\frac{1}{N}(1-K)i_{0f} \\ i'_{LSc} = -\frac{1}{N}(1+2K)i_{0f} \end{cases} \quad (15)$$

得到选线死区内发生 C 相故障时, 故障线路、非故障线路各相电流比值关系式(16):

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(1-K) : (N-1)(1-K) : (N-1)(1+2K) : -(1-K) : -(1-K) : -(1+2K) \end{aligned} \quad (16)$$

同理可得在选线死区内, A 相、B 相分别发生接地故障的情况下, 故障线路和非故障线路对应相电流行波的比值关系式如式(17)、(18)所示:

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(1+2K) : (N-1)(1-K) : (N-1)(1-K) : -(1+2K) : -(1-K) : -(1-K) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(1-K) : (N-1)(1+2K) : (N-1)(1-K) : -(1-K) : -(1+2K) : -(1-K) \end{aligned} \quad (18)$$

根据  $K$ 、 $T$  表达式, 有  $0 < K < 1$ , 故  $0 < 1-K < 1$ 、 $1 < 1+2K < 3$ 。

将式(15)的相量表达式代入  $\beta$ 、 $\gamma$  公式, 可得 C 相发生接地故障时  $\beta$ 、 $\gamma$  模量的比值关系, 如式(19), 同理 A 相、B 相分别发生接地故障时  $\beta$ 、 $\gamma$  模量的比值关系, 如式(20)、(21)所示, 其中,  $i'_{L\beta}$ 、 $i'_{L\gamma}$  分别为故障线路的  $\beta$  模、 $\gamma$  模电流初始行波,  $i'_{LS\beta}$ 、 $i'_{LS\gamma}$  分别为非故障线路的  $\beta$  模、 $\gamma$  模电流初始行波。

$$\begin{aligned} & i'_{L\beta} : i'_{L\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} \\ & = -(N-1)K : \frac{1}{3}(N-1)(2+K) : K : -\frac{1}{3}(2+K) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & i'_{L\beta} : i'_{L\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} \\ & = (N-1)K : \frac{1}{3}(N-1)(2+K) : -K : -\frac{1}{3}(2+K) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & i'_{L\beta} : i'_{L\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} \\ & = 0 : (N-1)(1-K) : 0 : -(1-K) \end{aligned} \quad (21)$$

对于中性点经消弧线圈接地系统, 当单相接地故障发生在选线死区, 故障线路和非故障线路对应相电流行波的比值关系式如式(22)~(24)所示:

C 相故障:

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(PN-NK+K) : (N-1)(PN-NK+K) : (N-1)(PN+2NK-2K) : \\ & -(PN-NK+K) : -(PN-NK+K) : -(PN+2NK-2K) \end{aligned} \quad (22)$$

A 相故障:

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(PN+2NK-2K) : (N-1)(PN-NK+K) : (N-1)(PN-NK+K) : \\ & -(PN+2NK-2K) : -(PN-NK+K) : -(PN-NK+K) \end{aligned} \quad (23)$$

B 相故障:

$$\begin{aligned} & i'_{Lfa} : i'_{Lfb} : i'_{Lfc} : i'_{LSa} : i'_{LSb} : i'_{LSc} = \\ & (N-1)(PN-NK+K) : (N-1)(PN+2NK-2K) : (N-1)(PN-NK+K) : \\ & -(PN-NK+K) : -(PN+2NK-2K) : -(PN-NK+K) \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $P = 1 - \frac{1}{N}e^{-\frac{t}{T'}}$ ,  $T' = N\frac{L'}{Z_0}$ , 可知

$0 < P < 1$ , 且当  $N > 1$  时,  $PN + 2NK - 2K > PN - NK + K > 0$ 。因此在选线死区内, 中性点经消弧线圈接地系统各相电流初始行波特征同中性点不接地系统。

当系统中性点经消弧线圈接地时, 推导得单相接地故障发生在选线死区, 故障线路和非故障线路对应模电流行波的比值关系式如式(25)~(27)所示:

C 相故障:

$$\begin{aligned} & i'_{L\beta} : i'_{L\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} = \\ & -(N-1)K : \frac{1}{3}(2PN + NK - K) : K : -\frac{1}{3}\frac{(2PN + NK - K)}{(N-1)} \end{aligned} \quad (25)$$

A 相故障:

$$\begin{aligned} i'_{LF\beta} : i'_{LF\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} = \\ (N-1)K : \frac{1}{3}(2PN + NK - K) : -K : -\frac{1}{3}\frac{(2PN + NK - K)}{(N-1)} \end{aligned} \quad (26)$$

B 相故障:

$$i'_{LF\beta} : i'_{LF\gamma} : i'_{LS\beta} : i'_{LS\gamma} = 0 : (PN - NK + K) : 0 : -\frac{(PN - NK + K)}{(N-1)} \quad (27)$$

根据式(25)~(27), 当中性点经消弧线圈接地时, 选线死区内各模电流初始行波特征与中性点不接地时的行波特征一致。

选线死区内相电流行波特征由式(16)~(18)可知:

(1) 故障线路与非故障线路的同一相电流初始行波的幅值比值等于 $(N-1)$ , 极性相反。

(2) 对同一线路而言, 故障相电流初始行波幅值大于非故障相电流初始行波幅值, 两非故障相电流初始行波幅值相等, 三相电流初始行波极性相同。

选线死区内模电流行波特征由式(19)~(21)可知:

(1) 故障线路与非故障线路  $\beta$  模量模值之比等于  $\gamma$  模量模值之比为 $(N-1)$ , 且同一线上  $\beta$ 、 $\gamma$  模量幅值之比小于 1,  $\beta$ 、 $\gamma$  模量极性相同还是相反, 分别反应出是 A 相还是 C 相接地。

(2) 故障线路与非故障线路  $\beta$  模量幅值相等约为零, 且故障线路与非故障线路  $\gamma$  模量模值之比为 $(N-1)$ , 极性相反, 表明 B 相接地。

### 3 全线有效的线模行波选线法

上两节推导了选线死区内、外的三相量行波及  $\beta$ 、 $\gamma$  模量行波比值关系式, 充分利用相电流、模电流初始行波模极大值幅值与相位的相对关系可以进行选线选相, 基于此, 构造全线有效的线模行波选线法, 流程图如图 4。

从流程图可以看出, 选线系统启动后, 首先计算各线路对应相相电流初始行波模极大值比值, 判定故障线路; 若系统安装有三相 TA, 比较同一线路各相电流初始行波模极大值比值和极性, 选出故障相; 若系统安装有两相 TA, 将同一线路的  $\beta$ 、 $\gamma$  模量模极大值比值和极性分别进行比较以判定故障相; 同时, 可以判定出故障是否发生在选线死区内, 有利于故障测距。

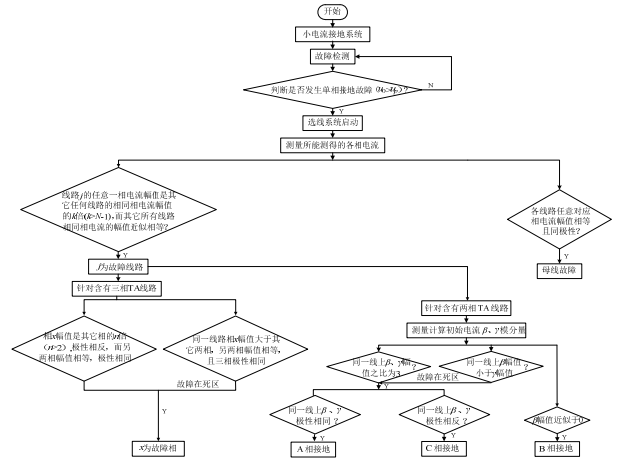


图 4 全线有效线模行波选线选相流程框图

### 4 仿真试验

为验证全线有效的线模行波选线法的正确性, 本文以实际的小电流接地系统为模型, 以双树复小波变换(DT CWT)为工具刻画初始行波特征, 并根据判据流程进行选线和选相。

当故障发生在选线死区内, 产生的初始行波信号在极短的时间内到达测量点并发生混叠, 要提取该信号的故障特征就需要先进的信号处理工具精确捕捉、识别该信号, 以及更为精细地刻画信号幅值、相位特征, DT CWT 的优越性能使我们有条件获取并分析这种信号。本文利用 DT CWT 在有限冗余的代价下同时克服实小波时移敏感性和缺乏相位信息这两个缺陷<sup>[6]</sup>。

在电力系统实际运行情况中, 母线的接线方式很复杂, 在建立仿真模型时应将其线路结构进行简化和综合。本文选用辐射型网络, 电源采用带内阻抗的无穷大功率三相电源; 负荷侧用一个并联的 RLC 回路等效; 输电线路的参数采用分布式参数的贝杰龙数学模型; 并采用 3-phase Fault 器件来模拟接地故障, 它能够准确地模拟线路接地故障的发生和排除。具体参数如下: 电压等级: 10kV; 电源参数:  $R_S=0.312\Omega$ ,  $L_S=6.63 \times 10^{-3}H$ ; 线路正序参数:  $R_1=0.48\Omega/km$ ,  $L_1=0.9337mH/km$ ,  $C_1=0.01274\mu F/km$ ; 线路零序参数:  $R_0=0.79\Omega/km$ ,  $L_0=4.2146mH/km$ ,  $C_0=0.007751\mu F/km$ ; 线路长度:  $l_1=50km$ ;  $l_2=75km$ ;  $l_3=80km$ ;  $l_4=100km$ 。负载参数:  $R_L=100000\Omega$ ,  $L_L=\infty$ ,  $C_L=1 \times 10^{-6}F$ 。

根据模型中设置的线路参数计算模量波速度和选线死区范围: 线模波速度为  $v_1=0.28994 \times 10^6 km/s$ ,

零模波速度： $v_0=0.17496 \times 10^6 \text{km/s}$ ，因为本文设置采样时间间隔为  $1 \times 10^{-6} \text{s}$ ，所以选线死区为  $0.4412 \text{km}$ 。选取具有典型特点的 5 组测试样本进行验证，样本的故障信息如表 1 所示，样本提取的故障特征及选线选相结果如表 2~5 所示。

表 1 测试样本的故障信息

样本	故障线	故障相	故障距离/km	接地电阻/kΩ
1	L1	A	35	0.3
2	L2	C	5	0.3
3	L2	A	0.3	0.1
4	L2	A	0.2	0.1
5	L2	A	0.1	0.1

表 2 5 组样本提取的相电流故障特征及选线结果

样本	各线路A相/A				判线结果
	L1	L2	L3	L4	
1	3.129	1.061	1.032	1.040	L1
2	0.511	1.518	0.575	0.510	L2
3	2.467	7.333	2.467	2.465	L2
4	1.881	5.616	1.876	1.892	L2
5	3.011	9.162	3.001	3.024	L2

表 3 5 组样本提取的相电流故障特征及选相结果

样 本	故障线路各相						选相 结果
	A		B		C		
	幅值/A	相位/rad	幅值/A	相位/rad	幅值/A	相位/rad	
1	3.129	-1.453	1.59	1.688	1.59	1.688	A
2	1.518	-3.141	1.518	-3.141	3.045	0	C
3	7.333	2.142	0	2.142	0	2.141	A
4	5.616	-1.321	2.865	-1.322	2.865	-1.321	A
5	9.162	2.022	0	2.022	0	2.022	A

表 4 5 组样本提取的模电流故障特征

样本	故障线路模量			
	$\beta$		$\gamma$	
	幅值/A	相位/rad	幅值/A	相位/rad
1	1.565	-1.459	0.522	-1.459
2	1.521	-2.961	0.510	0.182
3	2.417	-1.000	2.475	-1.000
4	2.091	-1.500	2.104	-1.500
5	2.927	-1.631	3.199	-1.576

表 5 5 组样本提取的模电流故障特征及判决结果

样本	非故障线路模量				判决 结果
	$\beta$		$\gamma$		
	幅值/A	相位/rad	幅值/A	相位/rad	
1	0.530	1.683	0.177	1.683	L1A
2	0.512	0.182	0.171	-2.961	L2C
3	0.814	2.141	0.832	2.141	L2A
4	0.702	1.639	0.705	1.640	L2A
5	0.992	1.491	1.123	1.491	L2A

以上算例的计算结果表明，在适当的小波尺度下，用双树复小波分析电流初始行波信号，根据全

线有效的线模行波选线判据流程可以正确识别出故障线路与故障相，克服了原基于线模的行波选线法受零模行波影响而存在选线死区的问题。

5 结论

本文针对目前基于线模行波的选线方法存在选线死区的不足，详细分析选线死区内、外相量、模量初始行波特征，补充完善了现有行波选线法的理论根据，并在理论上对选线死区问题给出解决方案，构造全线有效的线模行波选线法，并搭建动态仿真模型，运用双树复小波分解识别、提取行波信号，验证了该方法的有效性。该方法考虑到选线死区问题，使判据全线有效，适用于各种工程实际情况，也为故障测距提供参考；适用于装有两相或三相 TA 的系统，不需要增加设备投入；算法流程简洁明了，通过判定相电流初始行波及两模量模极大值比值和极性进行在线分析即可判断故障线和故障相，以期线模选线法有更为广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 董新洲,毕见广.配电线路暂态行波分析和接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005,25(4): 1-5.  
[2] 施慎行,董新洲. 基于单相电流行波的故障选线原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14):14-16.  
[3] 黄景光,刘会家,胡汉梅,等.行波小波系数极大值极性法接地故障选线研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 100-104.  
[4] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在传输线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-35.  
[5] 毕见广, 董新洲, 周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 17-20.  
[6] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N C. The dual-tree complex wavelet transform[J]. Signal Processing Magazine, IEEE. 2005, 22(6): 123-151.

作者简介：

季晨宇（1986-），女，江苏海门人，硕士研究生，研究方向为电网故障保护。