

## 基于S变换的多端输电网故障定位方法

钱佳琪<sup>1</sup>, 叶佳卓<sup>1</sup>, 旷哲<sup>1</sup>, 谭阳红<sup>1</sup>, 陈希华<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省电力公司长沙电业局, 湖南 长沙 410015)

**摘要:** 针对现有对于多端输电线路故障定位方法研究的不足, 提出了一种基于暂态行波的多端输电网故障定位新方法。对各检测端母线电压线模分量应用S变换, 从中提取出奈奎斯特频率分量单频率行波的幅-时变化特性, 幅值最大值对应的时刻即为行波波首的到达时刻。采用该频率分量对应的行波波速作为计算用波速, 解决了波速不确定的问题。将多端输电网看作含有一条干路和若干支路的集合, 形成从支路到干路逐一排除的故障定段方案。最后, 依定段结果与双端测距原理计算出故障点准确位置。仿真分析结果表明, 定位精确、可靠, 算法抗噪性及适应性强。

**关键词:** 故障定位; 多端输电网; S变换; 行波波头; 双端行波原理

### A fault-location method for multi-terminal transmission network based on S transform

QIAN Jia-qi<sup>1</sup>, YE Jia-zhuo<sup>1</sup>, KUANG Zhe<sup>1</sup>, TAN Yang-hong<sup>1</sup>, CHEN Xi-hua<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Changsha Electrical Power Bureau, Hunan Electric Power Company, Changsha 410015, China)

**Abstract:** To improve the existing fault location methods in multi-terminal transmission network, a novel method based on transient traveling wave is presented. S-transform is applied to the aerial modal components of synchronized measured voltages at all the terminals to extract the Nyquist frequency components of transient traveling waves. The moment corresponding to the maximum component in the Nyquist frequency component is exactly the initial traveling wave arrival time. Using the wave velocity corresponding to the Nyquist frequency component as the calculation wave velocity, the problem of the wave speed uncertainty is solved. According to the number of T nodes passed through by each line, all the lines can be classified into branch section and artery section. Based on double-terminal traveling wave theory and the result of the identification theory for fault section, the final fault distance can be achieved. The simulation results prove good performance of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61102039).

**Key words:** fault location; multi-terminal transmission network; S-transform; traveling wave front; double-terminal traveling wave theory

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0082-07

## 0 引言

输电线路是电力系统的大动脉, 它承载着传输电能的重担。由于长期裸露在大气下经受恶劣环境的冲击, 它又是系统中故障的高发区, 并且难以排查。目前已有故障定位算法主要针对双端线路, 而出于压缩投资成本、节约占地面积等考虑, 多端线路( $N \geq 3$ )也较多存在于输电系统中。故此, 研究如何精确、可靠地定位多端线路的故障点具有现实意义与价值。

多端输电线路的故障定位方法依据原理可分为

阻抗法和暂态法。基于阻抗参数的故障定位方法<sup>[1-4]</sup>易受到系统运行方式、频率变化及接地电阻等因素的影响, 在现场应用中可能出现较大误差。暂态行波法被认为是理论上故障定位的最佳方法之一, 伴随着行波消噪和GPS技术的成熟, 其在多端线路故障定位方面的应用也受到了较多关注。文献[5]提出一种用各端行波到达时刻两两配对得出的故障距离形成故障支路判定矩阵, 进而实现故障定位的方法, 但方法实现较为繁琐。文献[6]针对三端线路, 比较两次双端测距结果中的较大值直接作为最终故障距离, 化简掉了故障定段这一过程, 计算简便, 但判据难以扩展到多端线路上。文献[7]不再检测行

波到达时刻, 而是通过相关性分析得出两两端的行波到达信号延时, 从而实现故障定位。但这种方法易受到反射波的干扰, 可靠性不高。以上方法计算距离时均要用到行波波速, 但均未考虑行波波速的不确定性<sup>[8]</sup>。文献[9]根据同等情况下行波波速相等的原理, 仅根据线路参数和行波到达各端的时刻进行故障定段和位置计算, 完全排除了波速的影响, 但这种方法适用范围非常有限, 局限性较大。

无论是何种算法, 准确得出两两端行波首波头到达时差都是关键。在行波波头检测研究中, 小波变换的方法<sup>[10-11]</sup>取得效果较为突出。但为了获得预期的效果, 小波变换需要结合待处理信号的特征选取合适的基函数和分解尺度, 这为检测增加了难度。本文对故障行波信号进行 S 变换, 从中分解出奈奎斯特频率分量单频率行波的幅-时变化情况, 其中的模最大值对应的时刻即为行波首波头到达该端的时刻。同时采用该频率分量的行波波速作为计算用波速, 解决了波速不确定的问题。

就多端输电线路而言, 其与双端线路最大的差异就是支路、节点数较多, 故此先进行故障定段再完成最终距离计算。对多端输电网各线路段合理划分有助于简化故障定段算法。本文在此基础上, 并依据双端行波原理, 提出了一套简单、可靠、适用范围广的故障定段算法, 最后, 依据判据结果计算出故障点准确位置。仿真分析表明, 算法定位结果精确, 适应性及抗噪性强。

## 1 S 变换检测行波首波头到达时刻

### 1.1 S 变换基本原理

S 变换是 stockwell 于 1996 年提出的一种时频分析方法, 是对连续小波变换和短窗傅里叶变换思想的拓展, 兼顾二者多分辨率分析和单频率独立分析<sup>[12-13]</sup>的优点。信号的 S 变换定义<sup>[14]</sup>为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) w(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中:  $f$  为频率;  $t$  为时间;  $w(\tau - t, f)$  为高斯窗函数;  $\tau$  为时移因子。

由式(1)可知, 高斯窗的高度和宽度随频率而变化, 且窗口随频率的升高而变窄, 从而克服了短窗傅里叶变换窗口固定的不足。故此, 通过 S 变换可获得某一时刻信号的频变信息, 还能够获取某一频率上信号的时变信息, 即 S 变换具备良好的时频特性。

$h[kT]$  ( $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 为信号  $h(t)$  的离散序列,  $T$  为采样间隔,  $h[kT]$  的离散傅里叶变换为

$H[n/NT]$ , 则  $h[kT]$  的一维离散 S 变换为

$$\begin{cases} S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] G(m, n) e^{\frac{2\pi imj}{N}} & k \neq 0 \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k, n=0, 1, 2, \dots, N$ ;  $G(m, n)$  为高斯窗函数的快速傅里叶变换, 且有

$$G(m, n) = e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} \quad (3)$$

由此可见, 可以利用快速傅里叶变换实现对某离散信号的一维离散 S 变换。S 变换的结果是二维复矩阵, 可表示为

$$S(k, n) = A(k, n) e^{j\varphi(k, n)} \quad (4)$$

式中:  $A(k, n)$  为复矩阵的幅值矩阵;  $\varphi(k, n)$  为复矩阵的相位矩阵。两个矩阵的行对应采样时刻, 列对应离散频率。

S 变换的结果体现了信号的时频分辨特性。对某一信号应用 S 变换, 不但可以从中分解出单频率行波, 而且能确定每个单频率行波的时变规律。这为检测某一频率分量故障初始行波到达母线端的时刻提供了方法。

### 1.2 故障行波首波头到达时刻检测

考虑到故障初始时刻产生较大的故障电流可能会造成电流互感器饱和, 从而影响测量结果, 本文选取各母线处电压量作为检测量。首先求取各母线处故障电压行波信号, 利用克拉克变换对其进行解耦。选取解耦后的  $\alpha$  模电压分量进行故障定位研究。

多端输电网某处出现短路故障, 网络中将产生自故障点处向所有母线终端传播的暂态行波。当暂态行波首波头到达各母线终端时, 会导致母线  $\alpha$  模电压发生突变。对其应用 S 变换结果得一复矩阵。如前所述, 变换结果的幅值矩阵的各行向量反映了不同频率分量的母线  $\alpha$  模电压幅值的时变情况。母线模电压的幅值突变点包含丰富的高频分量, 它们集中体现在 S 变换所得幅值矩阵中频率较高的行中<sup>[15]</sup>。本文检测奈奎斯特频率分量对应行向量中各元素的模最大值, 此模最大值所对应的采样时刻即为母线  $\alpha$  模电压信号幅值突变的时刻, 即可标定为故障电压行波首波头到达该母线端的时刻。

某输电线路发生短路故障, 在某检测端检测到的故障电压量经克拉克变换解耦后得到故障前一段时间内  $\alpha$  模电压分量如图 1 所示。

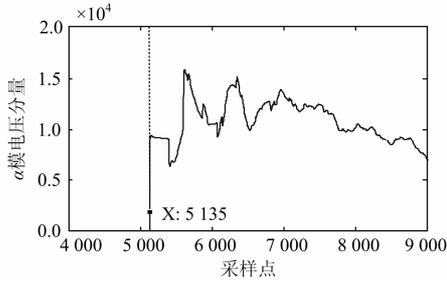


图 1 故障  $\alpha$  模电压分量

Fig. 1  $\alpha$ -mode voltage component

由图 1 可见, 由于故障初始行波的到来,  $\alpha$  模电压分量在第 5 135 个采样点处开始出现较大波动。对该采样点附近的点做一阶差分, 可以得出从该点处  $\alpha$  模电压分量出现了剧烈的突变, 也说明了故障行波首波头的到来。为了进一步佐证该采样点即为行波波头的实际到达时刻, 通过仿真中已知故障点与检测端的距离及故障发生的初始时刻, 并选取合适的行波波速 (在本文第二部分中详述), 可以计算出故障行波的实际到达时刻, 与此采样点对应的时刻相一致。以上说明该采样点即为故障行波首波头的实际到达时刻。

图 2 为对故障  $\alpha$  模电压分量应用 S 变换提取出的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线, 可以看到其模最大值对应的采样时刻为第 5 135 个采样点处, 与前述故障行波首波头的到达时刻相吻合。因此, 奈奎斯特频率分量幅-时曲线中模最大值对应时刻即为故障行波首波头的到达时刻。从大量仿真分析结果来看, 利用此种方法能够精确检测故障行波首波头的到达时刻。

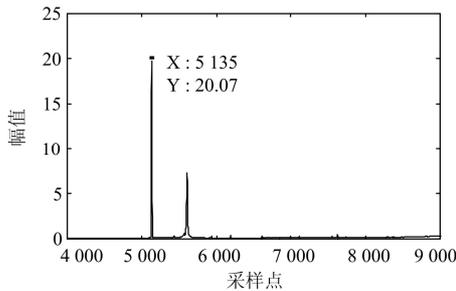


图 2 S 变换所得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线

Fig. 2 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component obtained by S-transform

## 2 多端输电线路故障定位原理

### 2.1 三端输电线路故障定段原理

如图 3 所示, 三端输电线路各参数已知。线路发生故障后, 将产生由故障点向各母线终端传播的

暂态行波。通过 GPS 技术实现各端时钟精确同步<sup>[16]</sup>, 对同步采样的各终端电压应用前述算法可得故障行波首波头到达时刻分别为  $t_{T1}$ 、 $t_{T2}$  和  $t_{N1}$ 。在实际计算中, 由于线路上的暂态行波具有从高频到低频的连续频谱, 而不同频率分量的行波具有不同的传播速度, 这就使得行波波速有很大的不确定性, 从而影响测距精度。本文采用前述检测行波到达时刻所提取出的奈奎斯特频率分量行波的波速  $v$  进行故障测距计算, 以此弥补了波速不确定的缺陷。下面, 首先针对三端输电线路的网络情况提出故障定段原理。

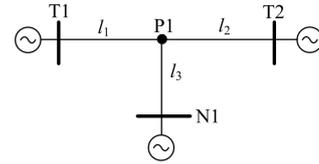


图 3 三端输电线路示意图

Fig. 3 Diagram of three-terminal transmission lines

图 3 中假设故障发生在三端输电线路上的某处。基于双端行波定位原理, 利用线路 T1-N1 和 T2-N1 可分别得出以 N1 端为始端的故障点到 N1 检测端的故障距离, 则有

$$\begin{cases} d_{N1-T1} = \frac{l_{T1N1} + v(t_{N1} - t_{T1})}{2} \\ d_{N1-T2} = \frac{l_{T2N1} + v(t_{N1} - t_{T2})}{2} \end{cases} \quad (5)$$

在进行故障定段前, 首先定义多端输电线路中两终端之间经过所有 T 型节点的线路为干路; 其余各终端至其所连节点间线路 (含该节点) 为支路。这样的划分使得整个多端输电网可被看作是一个集合, 而一条干路和若干支路共同构成了这个集合, 且各个子集之间没有交集。故障定段既是判定故障点位于干路上还是某条支路上。依照此定义, 在图 3 的三端输电线路中, 假设 T1-T2 间线路为干路, N1-P1 间线路 (含 P1 节点) 为支路, 则其故障定段原理如下:

① 若  $d_{N1-T1} \leq l_{P1N1}$  且  $d_{N1-T2} \leq l_{P1N1}$ , 则可判定故障发生在支路 N1-P1 上。

② 若  $d_{N1-T1} > l_{P1N1}$  或  $d_{N1-T2} > l_{P1N1}$ , 则可判定故障发生在干路 T1-T2 上。

### 2.2 多端输电线路故障定段原理

将三端输电线路故障定段原理推广到多端输电网中。多端输电线路简图如图 4 所示。对同步采样的各端电压量应用前述算法可以检测到暂态行波首波头到达各终端的时刻分别为  $t_{T1}$ 、 $t_{T2}$  及  $t_{Ni}$  ( $i=1,2,\dots,k$ )。根据前述定义, T1-T2 段线路为

干路;  $N_i-P_i(i=1,2,\dots,k)$ 段线路为支路, 共  $k$  条。则对任意支路终端, 可与  $T_1$ 、 $T_2$  端共同构成三端输电网。根据上一节对三端输电网的分析, 分别利用线路  $T_1-N_i$  和  $T_2-N_i$  可求得以  $N_i$  端为始端的两个双端线路的对应故障距离, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} d_{N_i-T_1} = \frac{l_{T_1N_i} + v(t_{N_i} - t_{T_1})}{2} \\ d_{N_i-T_2} = \frac{l_{T_2N_i} + v(t_{N_i} - t_{T_2})}{2} \end{cases} \quad (6)$$

依据前述三端输电网故障定段原理有:

- ① 若  $d_{N_i-T_1} \leq l_{P_iN_i}$  且  $d_{N_i-T_2} \leq l_{P_iN_i}$ , 则可判定故障发生在支路  $N_i-P_i$  上。
- ② 若  $d_{N_i-T_1} > l_{P_iN_i}$  或  $d_{N_i-T_2} > l_{P_iN_i}$ , 则可判定故障

障发生在除支路  $N_1-P_1$  以外的多端输电网中的其他线路段上。

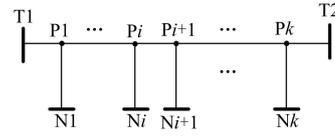


图 4 多端输电网络示意图

Fig. 4 Diagram of multi-terminal transmission network

基于以上判定原理, 可首先对多端输电网中的所有支路, 就是否为故障点所在线路段按顺序进行逐一判定。若所有支路均一一被排除, 则最终可判定故障点位于干路上。多端输电网故障定段算法流程如图 5 所示。

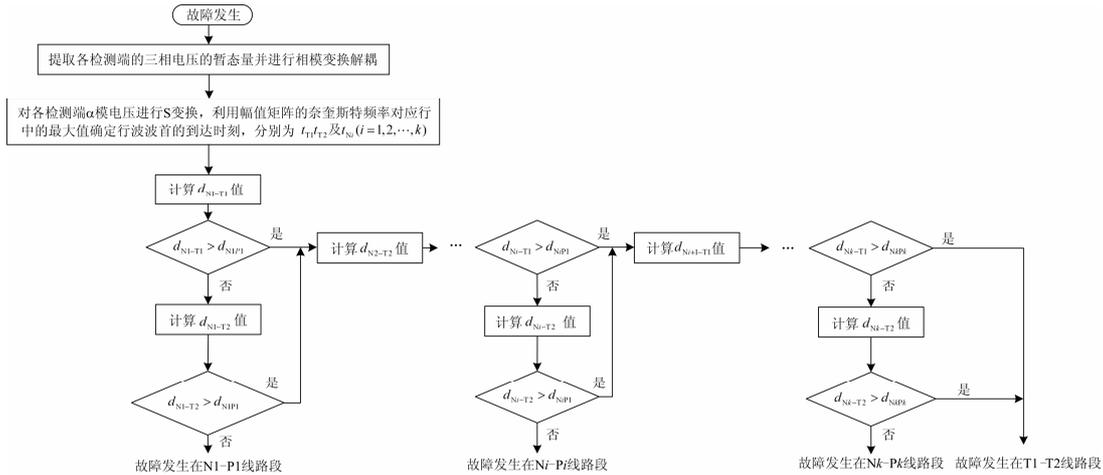


图 5 多端输电网故障定段算法流程图

Fig. 5 Flowchart of fault section identification for multi-terminal transmission network

### 2.3 最终故障距离的计算

根据以上原理判定出故障点所在线路段后, 可根据判定结果, 分类进行最终故障距离的计算。

1) 当故障发生在某支路  $N_i-P_i$  上时, 故障距离  $d_{N_i-T_1}$  与  $d_{N_i-T_2}$  的平均值即为  $N_i-P_i$  线路上故障点距离  $N_i$  端的最终故障距离。

2) 当故障发生在干路  $T_1-T_2$  上时, 最终故障距离即以  $T_1$  端为始端的双端线路  $T_1-T_2$  的故障距离, 如式(7)所示。

$$d_{T_1-T_2} = \frac{l_{T_1T_2} + v(t_{T_1} - t_{T_2})}{2} \quad (7)$$

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型

采用 ATP 软件对图 6 中 220 kV 的 5 端输电网络建立仿真模型并仿真其故障的电磁暂态过程。

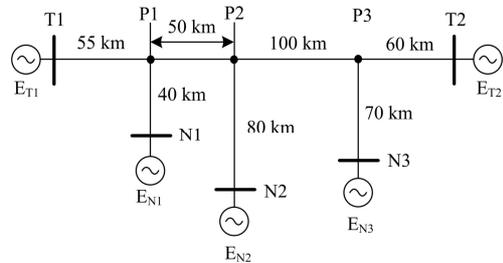


图 6 仿真系统模型

Fig. 6 Model of the system

为了准确体现故障中的暂态现象, 输电线路模型采用具有频率相关参数的 J.Marti 线路模型。线路配置及参数如图 7 及表 1 所示。

仿真采样频率设置为 1 MHz, 根据线路参数及配置可得出奈奎斯特频率 (即 500 kHz) 下的行波波速为  $v = 2.963 \times 10^5$  km/s, 接下来的计算均采用此波速。同时, 由于现场电磁环境复杂,

故对仿真中所得到的各端电压故障分量均混入信噪比为 40 dB 的白噪。

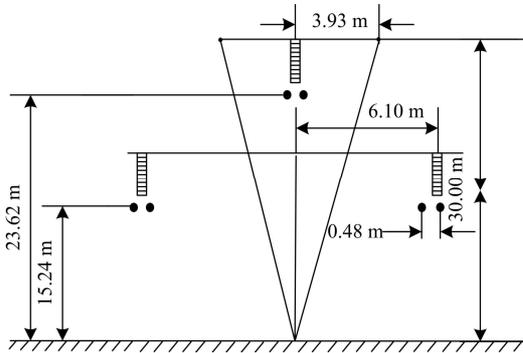


图 7 输电线路配置

Fig. 7 Transmission lines configuration

表 1 输电线路参数

Table 1 Parameters of transmission lines

线型	参数	数值
相线	导线半径/cm	2.034 5
	分裂导线数	2
	直流电阻/( $\Omega$ /km)	0.032 4
地线	导线数量	2
	地电阻率/( $\Omega \cdot \text{km}$ )	100
	直流电阻/( $\Omega$ /km)	1.621 8

### 3.2 故障定位计算及算法性能分析

以故障发生在节点 P3 处为例，故障类型为单相接地故障，接地电阻为  $10 \Omega$ ，故障初相角  $90^\circ$ 。仿真得到各端电压故障分量并加噪。数学形态学滤波法<sup>[17]</sup>在抑制高频噪声方面效果显著，且计算简单、快速。故取各端故障发生前后各 1/4 周期故障电压数据经克拉克变换解耦，对解耦得到各端  $\alpha$  模电压分量经过形态学滤波处理后再进行 S 变换，从而得出故障行波首波头到达各检测端的时刻。

图 8~图 12 为对各检测端的  $\alpha$  模电压分量形态学滤波后进行 S 变换，得到的奈奎斯特频率分量行波对应的幅-时变化曲线。各图中幅值的最大值对应的采样时刻即为故障行波波首到达各检测端的时刻。表 2 列出了各检测端行波波首到达时刻对应的采样点。

表 2 故障行波波首到达各检测段的采样时刻  
Table 2 Sampling time of the initial traveling wave arriving at each measurement

检测端	T1	T2	N1	N2	N3
采样时刻	5 692	5 202	5 641	5 607	5 235

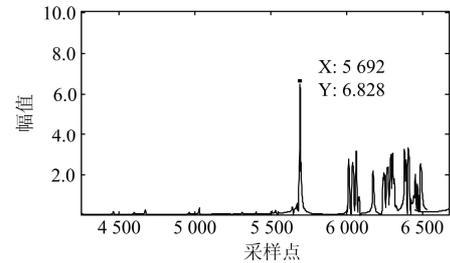


图 8 T1 端测得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线  
Fig. 8 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component measured at measurement T1

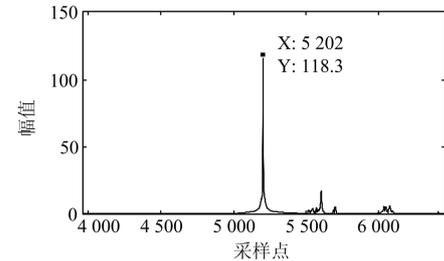


图 9 T2 端测得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线  
Fig. 9 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component measured at measurement T2

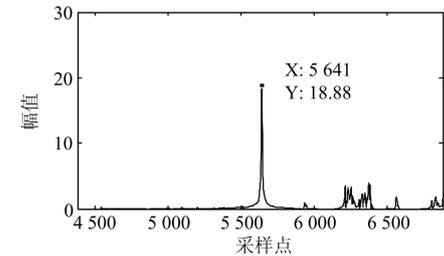


图 10 N1 端测得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线  
Fig. 10 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component measured at measurement N1

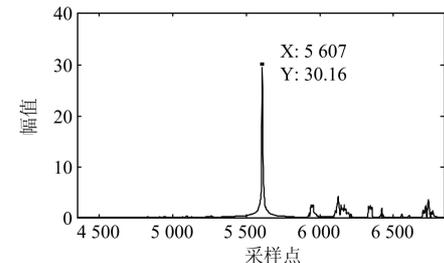


图 11 N2 端测得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线  
Fig. 11 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component measured at measurement N2

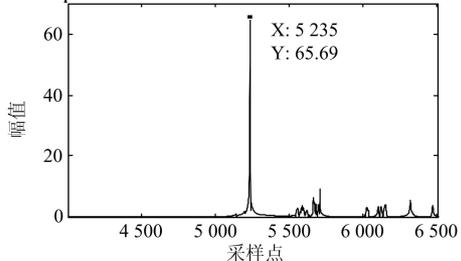


图 12 N3 端测得的奈奎斯特频率分量的幅-时曲线  
Fig. 12 Amplitude-time curve of Nyquist frequency component measured at measurement N3

根据所得的到达时刻, 基于双端行波测距原理, 利用线路 T1-N1 可得出故障距离为

$$d_{N1-T1} = [L_{T1N1} + v(t_{N1} - t_{T1})] / 2 = [95 + 2.963 \cdot (5641 - 5692) \cdot 10^{-1}] / 2 = 39.944 \text{ km}$$

同理, 可计算得出判断其他线路段上是否存在故障点所需的故障距离, 并与对应线路段长度进行比较, 实现故障所在线路段定位。表 3 列出了 5 端输电网故障定段流程。

表 3 5 端输电网故障定段流程

Table 3 Flowchart of fault section identification for five-terminal transmission network

线路段	以 T1 为终端计算故障距离	以 T2 为终端计算故障距离	定段结果
线路段 N1-P1	$d_{N1-T1} < d_{N1P1}$	$d_{N1-T2} > d_{N1P1}$	否
线路段 N2-P2	$d_{N2-T1} < d_{N2P2}$	$d_{N2-T2} > d_{N2P2}$	否
线路段 N3-P3	$d_{N3-T1} < d_{N3P3}$	$d_{N3-T2} < d_{N3P3}$	是
线路段 T1-T2	×	×	否

注: × 表示无需计算; 否表示故障不在此段; 是表示故障在此段。

由此判定故障点在支路 N3-P3 上。则故障距离  $d_{N3-T1}$  与  $d_{N3-T2}$  的平均值即为 N3-P3 线路上故障点距离 N3 端的最终故障距离  $d_{N3k}$ :  $d_{N3k} = (d_{N3-T1} + d_{N3-T2}) / 2 = (69.80 + 69.89) / 2 = 69.845 \text{ km}$ , 定位误差为 155 m。

利用以上方法对不同故障位置、不同故障类型、不同过渡电阻及故障初相角等多种故障情况进行故障定位仿真, 仿真结果如表 4 所示。综合仿真结果可见, 对于不同故障情况, 算法均能精确定位故障点, 说明算法适应性强; 由于本文用 S 变换从暂态信号中提取出特定频率分量进行分析, 这一过程本身就对信号中其他频率分量具有一定滤除作用, 故尽管原始行波信号掺入强噪, 但定位效果依旧良好, 说明算法抗噪性强; 而且, 在 T 型节点处及附近位置发生故障时, 算法仍能够得出较好的定位结果, 说明算法能较好地克服 T 节点附近定位死区的缺陷。

表 4 故障定位仿真结果

Table 4 Simulation results of fault location

故障位置	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	故障初始角/ $(^\circ)$	判断故障始端	测距结果/km	定位误差/m
N1-P1 段距离 N1 端 30 km	AG	1	10	N1	29.870	130
	ABG	10	20	N1	29.870	130
	BC	100	50	N1	29.870	130
N2-P2 段距离 N2 端 79 km	BG	1	10	N2	79.935	65
	BC	10	20	N2	79.935	65
	ABCG	100	50	N2	79.935	65
P2 节点	AG	1	10	N2	79.917	83
	ABG	10	20	N2	79.917	83
	BC	100	50	N2	79.917	83
T1-T2 段距离 T1 端 105.5 km	CG	1	10	T1	105.684	184
	ABG	10	20	T1	105.684	184
	BC	100	50	T1	105.684	184
T1-T2 段距离 T1 端 104 km	CG	1	10	T1	104.055	55
	AC	10	20	T1	104.055	55
	ABG	100	50	T1	104.055	55

## 4 结语

本文对多端输电网络的故障定位方法进行了研究。首先利用 S 变换的方法从暂态信号中提取出特定频率分量信号的幅-时变化情况, 利用幅值最大值对应的时刻确定行波首波头到达各检测端的准确时刻。把输电网中经过节点数最多的双端线路段归类为干路, 其他终端到各自所连接节点

的各线路段则为支路, 形成基于双端行波定位原理的从支路到干路逐一排除的故障定段原理, 通过定段结果及相应故障距离可得出最终故障位置。仿真分析表明, 算法适应性及抗噪性强, 能够较好地克服定位死区, 且简单易于实现, 具有一定工程应用价值。

## 参考文献

[1] 姚亮, 陈福锋, 陈琦. 一种应用于 T 接线路的自适应

应故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 26-30.

YAO Liang, CHEN Fu-feng, CHEN Qi. An adaptive method of fault locator for T transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 26-30.

[2] 王波, 周昱勇. 基于 PMU 的多端传输线路故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 32-35.

WANG Bo, ZHOU Yu-yong. A novel PMU-based fault location algorithm for multi-terminal transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 32-35.

[3] MANASSERO G, SENGER E C, NAKAGOMI R M, et al. Fault-location system for multiterminal transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1418-1426.

[4] DA SILVA M, COURY D V, OLESKOVICZ M, et al. Combined solution for fault location in three-terminal lines based on wavelet transforms[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(1): 94-103.

[5] 范新桥, 朱永利. 基于双端行波原理的多端输电线路故障定位新方法[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 261-269.

FAN Xin-qiao, ZHU Yong-li. A novel fault location scheme for multi-terminal transmission lines based on principle of double-ended traveling wave[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 261-269.

[6] 李传兵, 谭博学, 高鹏, 等. 基于D型行波原理的T接线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 78-82.

LI Chuan-bing, TAN Bo-xue, GAO Peng, et al. A fault location method for T-connection lines based on D-type traveling wave theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 78-82.

[7] 卢毅, 韩志锬, 汪焱春, 等. T型输电线路行波故障测距的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 17-21.

LU Yi, HAN Zhi-kun, WANG Yi-chun, et al. Improved fault location algorithm based on traveling waves for Teed-circuits[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 17-21.

[8] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35.

QIN Jian, GE Wei-chun, QIU Jin-hui, et al. Analysis on main influencing factors for transmission lines fault location precision based on traveling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.

[9] 郭亮, 吕飞鹏. T型线路的行波测距原理与算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 64-67.

GUO Liang, LÜ Fei-peng. Fault location algorithm based on wavelet transform for T-connection transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 64-67.

[10] NGU E E, RAMAR K. A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(10): 1767-1775.

[11] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.

ZHU Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.

[12] 杜林, 戴斌, 陆国俊, 等. 基于S变换局部奇异值分解的过电压特征提取[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 147-153.

DU Lin, DAI Bin, LU Guo-jun, et al. Overvoltage features extraction based on S transform and local singular value decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 147-153.

[13] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.

HUANG Chun, ZHU Zhi-jun, CAO Yi-jia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.

[14] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.

[15] 束洪春, 彭仕欣. 配电网单相故障馈线的S变换检测新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2963-2969.

SHU Hong-chun, PENG Shi-xin. S-transform approach for detecting the single-phase fault feeder in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2963-2969.

[16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 301-316.

[17] 吴军基, 吴伊昂, 贺济峰, 等. 数学形态学在行波滤波中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(17): 21-26.

WU Jun-ji, WU Yi-ang, HE Ji-feng, et al. Application of mathematical morphology in transmission line fault location[J]. Relay, 2005, 33(17): 21-26.

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-07-07

作者简介:

钱佳琪(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微机继电保护, 电网故障定位; E-mail: qjq19891@163.com

叶佳卓(1965-), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化;

旷哲(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气工程及其自动化。