

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231451

## 基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法

刘丰<sup>1</sup>, 谢李为<sup>1</sup>, 蔡军<sup>2</sup>, 喻锐<sup>1</sup>, 王有鹏<sup>1</sup>, 曾祥君<sup>1</sup>, 唐欣<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司  
长沙供电分公司, 湖南 长沙 410015)

**摘要:** 针对配电网干扰情况下微弱故障信号特征不明显导致行波采集设备难以有效检测故障行波信号的问题, 提出一种基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法。首先, 通过分析配电网故障行波的传输特征与频率特性, 建立基于波形增量比值的启动判据, 对设备采样数据进行预处理, 减少行波定位装置的误启动。然后, 引入鲁棒性局部均值分解(robust local mean decomposition, RLMD)方法处理采样数据, 滤除采样过程中的干扰信号, 减少噪声信号的影响。最后, 根据行波低频含量衰减较小而高频含量衰减快的性质, 建立故障行波辨识判据, 辨识配电网故障行波信号。仿真表明, 所提方法能够有效检测微弱故障时的行波信号。

**关键词:** 配电网; 故障行波检测; RLMD; 多分支线路

### A fault traveling wave detection method based on signal spectral characteristics for a distribution network

LIU Feng<sup>1</sup>, XIE Liwei<sup>1</sup>, CAI Jun<sup>2</sup>, YU Kun<sup>1</sup>, WANG Youpeng<sup>1</sup>, ZENG Xiangjun<sup>1</sup>, TANG Xin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410015, China)

**Abstract:** There is a problem in that the characteristics of weak fault signals are not obvious when there is interference on the distribution network. This makes it difficult for traveling wave acquisition equipment to effectively detect the fault traveling wave signals. Thus a method of fault traveling wave detection based on signal spectral characteristics is proposed. By analyzing the transmission characteristics and frequency characteristics of the fault traveling wave in distribution networks, a start-up criterion is established based on the waveform incremental ratio. It can preprocess the sampling data of the equipment, and reduce the false start-up of the traveling wave equipment. Then, the robust local mean decomposition (RLMD) method is used to process the sampling data, filter out the interference signal during the sampling process, and reduce the influence of the noise signal. Finally, given that it is a characteristic of the traveling wave that the low-frequency content attenuates less but the high-frequency content attenuates faster, an identification criterion is established to identify the fault traveling wave signals. Simulations show that the proposed method can effectively detect the fault traveling wave signals during weak faults.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20113).

**Key words:** distribution network; fault traveling wave detection; RLMD; multi-branches

## 0 引言

配电网线路分布广泛且运行环境复杂<sup>[1-3]</sup>。当线路发生微弱故障时, 由于故障特征量不显著, 容易导致现有检测装置难以检测。故障行波信号具有不

受系统运行方式、响应速度快等优势<sup>[4-5]</sup>, 被逐渐应用于故障定位。但如何快速、准确地检测并判别出配电网线路的故障行波信号, 对推进配电网线路行波定位的实用化进程具有重要的意义。

故障行波信号的有效检测是将行波运用于配电网线路故障定位的前提。对于故障行波的检测, 国内外学者进行了大量研究, 取得了丰硕的理论和实践成果。文献[6-8]利用离散小波变换检测数据中的故

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(U22B20113); 湖南省自然科学基金项目资助(2021JJ30729)

障行波数据, 但小波变换与小波基函数和分解尺度有关, 故障行波检测结果受不同小波基函数或分解尺度的影响, 降低故障行波检测的可靠性。文献[9-10]提出一种基于希尔伯特-黄的故障行波检测方法, 可以解决小波变换的函数与层数选择问题, 但其过程中所用的经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法存在端点效应、模态混叠等缺点。为解决 EMD 在信号处理过程中的不足, 文献[11-13]通过对采样信号添加高斯白噪声来抑制信号处理过程中的端点问题和模态混叠问题, 提出一种基于集合经验模态分解(EEMD)的行波检测方法, 但白噪声会导致分解后的信号存在残余噪声, 影响检测效果。文献[14]提出一种基于互补集合经验模态分解(CEEMD)的故障定位方法, 通过在采样信号中同时加入互补的正负噪声, 减少信号处理过程中的残余噪声, 但其分解完备性较差, 不合适的参数将会产生较多的虚假分量。文献[15-16]将自适应的白噪声添加到 EEMD 的分解环节, 提出一种自适应噪声完全集合经验模式分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)方法, 但该方法在分解过程中仍存在虚假分量。文献[17]利用镜像延拓将信号在两端延拓, 消除局域均值分解(local mean decomposition, LMD)存在的端点效应, 同时, 在信号中加入自适应噪声, 克服 LMD 存在的模态混叠现象。但 LMD 在处理数据过程中采用了插值或平滑的估计方法, 易存在部分数据丢失的情况, 导致检测精度下降。同时, 上述方法并未考虑现场干扰信号对行波定位装置误启动的影响, 可能导致故障行波数据丢失, 影响行波定位的可靠性和准确性。

为此, 本文提出一种基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法。首先, 根据配网故障行波的传播机理, 分析配电网故障行波的传输特征和频率特性。然后, 利用导数法的思想建立基于增量比值的行波定位装置启动判据, 减少干扰情况下的定位设备误触发。同时, 引入鲁棒性局部均值分解(robust local mean decomposition, RLMD)方法滤除噪声干扰信号, 然后利用快速傅里叶变换分析重组信号后的频谱特征, 建立行波信号的辨识原则, 实现故障行波信号的有效判定。所提方法能有效减少线路干扰信号的影响, 提高微弱故障情形下行波定位装置的检测可靠性, 具有较好的工程应用价值。

## 1 配电网故障行波传输特征

### 1.1 行波传输原理

行波运动过程中的传输函数与传输距离  $x$  和行波频率  $f$  有关, 传输函数为

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(x, j2\pi f)}{dx^2} = \lambda^2 U(x, j2\pi f) \\ \frac{d^2 I(x, j2\pi f)}{dx^2} = \lambda^2 I(x, j2\pi f) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U(x, j2\pi f)$  和  $I(x, j2\pi f)$  是行波波动方程的频域形式;  $\lambda$  为线路传播常数。

$$\lambda = \alpha + j\beta = \sqrt{(r_0 + j2\pi f l_0)(g_0 + j2\pi f c_0)} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为衰减系数, 描述传播过程中行波幅值的衰减;  $\beta$  为相位系数, 描述传播过程中行波不同频段下相位的变化情况;  $r_0$ 、 $l_0$ 、 $g_0$ 、 $c_0$  分别为线路单位长度的电阻、电感、对地电导和对地电容。

行波传播速度及衰减系数与线路参数相关, 不同频率的故障行波分量对应不同传播速度  $v_p$  和衰减系数  $\alpha$ , 可表示为

$$v_p = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{r_{l0}}{r_{c0}} - r_0 g_0 + \sqrt{(r_0^2 + r_{l0}^2) \left( g_0^2 + \frac{1}{r_{c0}^2} \right)} \right]}} \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ r_0 g_0 - \frac{r_{l0}}{r_{c0}} + \sqrt{(r_0^2 + r_{l0}^2) \left( g_0^2 + \frac{1}{r_{c0}^2} \right)} \right]} \quad (4)$$

式中,  $r_{l0}$ 、 $r_{c0}$  分别为线路单位长度的感抗和容抗,  $r_{l0} = \omega l_0$ ,  $r_{c0} = 1/\omega c_0$ , 但均为与频率相关的函数;  $\omega$  为信号的角频率。

分析不同频段信号的传输特性得到如图 1 所示的传输曲线。

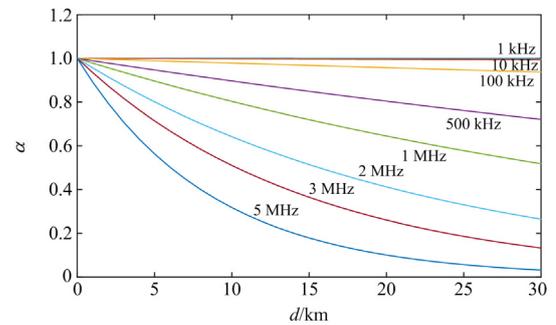


图 1 不同频率幅值随传输距离衰减曲线

Fig. 1 Attenuation curve of different frequency amplitude with transmission distance

由图 1 可知: 当频率一定时, 传输距离越长, 行波衰减越明显; 当距离一定时, 频率越高, 衰减越明显。因为高频信号在线路传输过程中受集肤效应的影响, 导致线路的电阻值随着频率的增大而增加。同时, 由式(3)可知, 行波传输速度与频率有关。因此, 行波信号具有高频分量传播速度快、衰减大

和低频分量传播速度小、衰减小的特点。

### 1.2 故障行波信号衰减特性

#### 1.2.1 线路类型和长度的影响

不同于输电网,配电网存在较多的架空-电缆混合线路<sup>[18]</sup>。在分析线路类型和长度的影响时,考虑电缆线路的影响,为此搭建了如图 2 所示的仿真模型,其中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  分别代表不同位置的检测点,采样率为 10 MHz,采样时长为 1 ms,单相接地过渡电阻为 200  $\Omega$ ,将各检测点的数据进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到如图 3 所示的波形图。

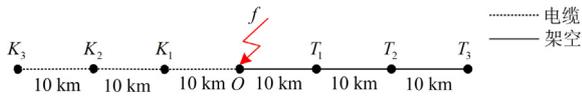
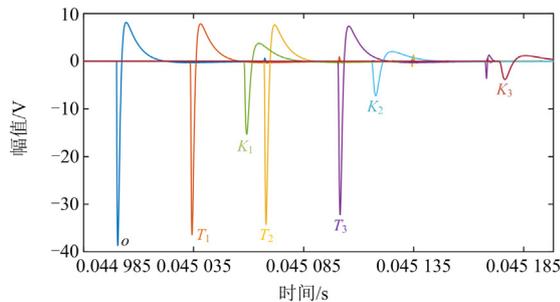
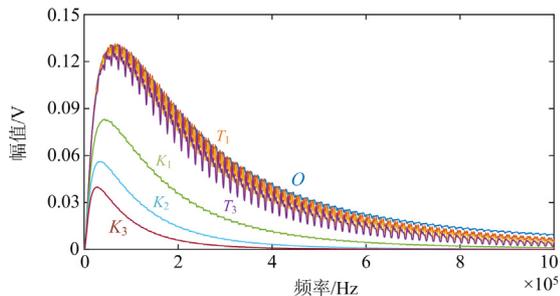


图 2 单一线路图

Fig. 2 A topology of single line



(a) 不同检测处行波波形



(b) 不同检测处行波频率-幅值

图 3 不同检测点数据进行 FFT 得到的波形

Fig. 3 Traveling wave waveforms at different detection points using FFT

从图 3 可知:

1) 当行波在架空线路和电缆线路传输过程时,距离故障点  $O$  越远,故障行波信号衰减越多,但电缆线路衰减更加严重。

2) 针对图 2 的架空线路和电缆线路,故障行波信号的主要频段集中在 1 MHz 以下且距离故障点  $O$  越远,故障行波信号中高频信号幅值衰减更多且电

缆线路衰减更加严重。

#### 1.2.2 多分支线路的影响

配电网结构复杂,线路多呈辐射状,如图 4 所示。当分支线路较短时易存在前行波和大量折反射波相互叠加的情形,导致采样的故障行波波头信号畸变,增加故障行波信号的检测难度。搭建如图 4 所示的模型,行波信号检测点分别在主干路线路末端  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$ 。在  $O$  点模拟单相接地故障,其中过渡电阻为 200  $\Omega$ ,采样频率为 10 MHz,采样时长为 1 ms。同理,利用 FFT 对采样数据进行处理,结果如图 5 所示。

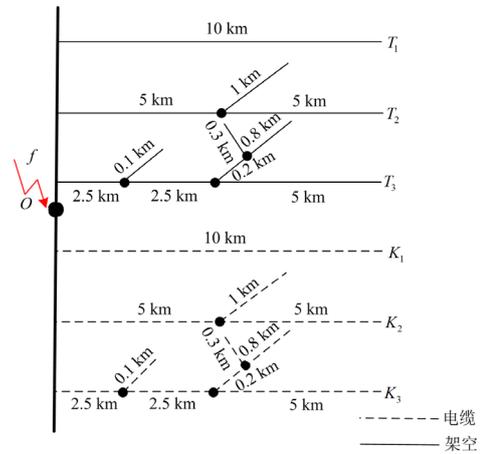
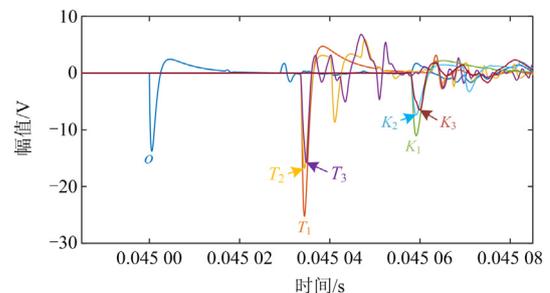
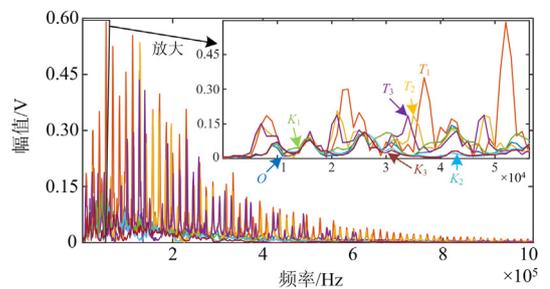


图 4 典型多分支配电网图

Fig. 4 A typical topology of multi-branch distribution network



(a) 不同检测处行波波形



(b) 不同检测处行波频率-幅值

图 5 利用 FFT 对采样数据处理后得到的波形

Fig. 5 Traveling wave waveforms at different detection points using FFT

从图 5 可知:

1) 当行波在架空线路和电缆传输时, 随着线路分支的增加, 不同检测点处的行波信号幅值不同。其中,  $T_2$  处行波信号幅值基本满足  $T_1$  处行波信号幅值的 2/3,  $K_2$  处行波信号幅值基本满足  $K_1$  处行波信号幅值的 2/3。

2) 行波信号的主要频段集中在 600 kHz 以下, 且分支越多行波信号中高频信号衰减越严重。当行波信号的频率在 10~50 kHz 区间时, 不同检测点的行波信号幅值变化趋势基本一致。

## 2 配电网故障行波频率特性

### 2.1 各频段行波信号含量分析

根据上述分析将采样信号的频率段设分别为 10~100 kHz, 100 kHz~1 MHz、1~5 MHz, 并计算各频率段含量的平均值, 即

$$S_{ij} = \sum_i^j F(f) / (j - i + 1) \times M \quad (5)$$

式中:  $S_{ij}$  为所求频率区间含量的平均值;  $F(f)$  为频率为  $f$  时所对应的频率幅值;  $i$ 、 $j$  分别为所求频率区间起始位置、结束位置处对应了点位;  $M$  为放大系数, 文中设为 100。

为比较采样信号中不同频段信号幅值与信号最大幅值间的关系, 定义频率片段幅值占比为

$$P_{ij} = S_{ij} / V_{\max} \times 100 \quad (6)$$

式中:  $P_{ij}$  为频率片段幅值占比;  $V_{\max}$  为信号中最大的峰值。

同理, 分析图 2 和图 5 中的行波信号幅值、频率数据, 利用式(5)和式(6)计算对应频率段的幅值含量, 结果如表 1 和表 2 所示。

根据表 1 和表 2 数据可得:

1) 随着故障点与行波检测处距离的增加, 频率片段幅值含量总体变小; 且频率越高衰减严重, 而低频衰减较弱。相比于架空线路, 电缆线路的衰减更加明显。当故障行波传输距离相同时, 随着分支数的增加, 频率片段幅值含量逐步减少。

2) 在频率片段幅值占比方面, 100 kHz 以下的频段幅值占比含量随线路长度的增加而增加; 而 100 kHz 以上的频段幅值占比含量随线路的增加而减少, 其中, 1 MHz 以上的频段幅值占比含量下降更明显。同时, 小于 100 kHz 的频段幅值占比含量随分支数目的增加而增加; 而 1 MHz 以上的频率段幅值占比含量随分支数的增加而减少。

表 1 线路类型和长度下不同监控点的频率含量表

Table 1 Frequency content of different monitoring points for line types and length

故障类型	检测点	故障距离/km	信号最大幅值/V	频率片段幅值含量			频率片段幅值占比		
				$S_{10-100\text{ kHz}}$	$S_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$S_{1-5\text{ MHz}}$	$P_{10-100\text{ kHz}}$	$P_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$P_{1-5\text{ MHz}}$
A 相接地 过渡电阻 200 Ω	$O$	0	-38.6	11.59	3.84	0.25	30.02	9.95	0.65
	$T_1$	10	-36.4	11.48	3.51	0.077	31.54	9.64	0.21
	$T_2$	20	-34.3	11.28	3.24	0.044	32.87	9.45	0.13
	$T_3$	30	-32.2	11.07	3.01	0.027	34.39	9.35	0.08
	$K_1$	10	-15.3	7.38	1.29	0.011	48.22	8.43	0.07
	$K_2$	20	-7.2	4.71	0.48	0.001	65.47	6.67	0.0
	$K_3$	30	-3.8	3.05	0.19	0.0001	80.33	5.00	0.00

表 2 多分支线路下不同监控点的频率含量表

Table 2 Frequency content of different monitoring points under multi-branch lines

故障类型	检测点	距故障距离 km	信号最大幅值/V	频率片段幅值含量			频率片段幅值占比		
				$S_{10-100\text{ kHz}}$	$S_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$S_{1-5\text{ MHz}}$	$P_{10-100\text{ kHz}}$	$P_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$P_{1-5\text{ MHz}}$
A 相接地 过渡电阻 200 Ω	$O$	0	-38.6	11.59	3.84	0.25	30.02	9.95	0.65
	$T_1$	10	-36.4	11.48	3.51	0.077	31.54	9.64	0.21
	$T_2$	20	-34.3	11.28	3.24	0.044	32.87	9.45	0.13
	$T_3$	30	-32.2	11.07	3.01	0.027	34.39	9.35	0.08
	$K_1$	10	-15.3	7.38	1.29	0.011	48.22	8.43	0.07
	$K_2$	20	-7.2	4.71	0.48	0.001	65.47	6.67	0.01
	$K_3$	30	-3.8	3.05	0.19	0.0001	80.33	5.00	0.00

## 2.2 线路不同工况的影响分析

为分析不同类型故障类型对行波信号频率的影响, 搭建如图 6 所示的线路模型, 分别模拟单相接地故障、相间故障、弧光故障和局部放电等线路运行工况。

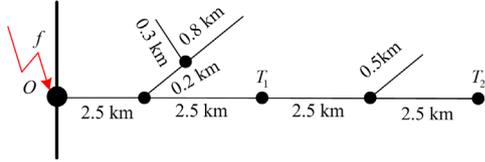


图 6 多分支线路

Fig. 6 A topology of multi branches

### 2.2.1 单相接地故障

在图 6 的  $O$  点模拟 A 相接地故障, 过渡电阻分别为  $1000 \Omega$  和  $4000 \Omega$ , 利用 FFT 变换处理采样数据, 可得如图 7 所示的故障行波信号频率-幅值关系, 并将数据整理到表 3。

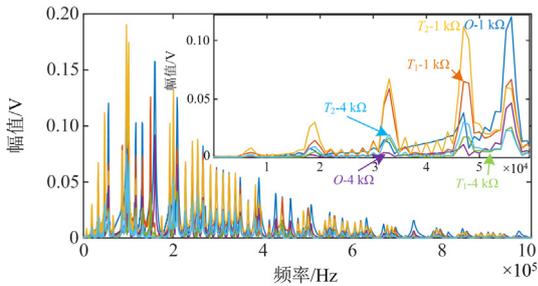


图 7 单相接地故障时行波频率-幅值

Fig. 7 Frequency-amplitude with single-phase grounding faults

### 2.2.2 相间故障

在图 6 的  $O$  点模拟 AB 相间故障, 过渡电阻为  $50 \Omega$ , 同理可得如图 8 所示的故障行波信号频率-幅值关系, 并将数据整理到表 3。

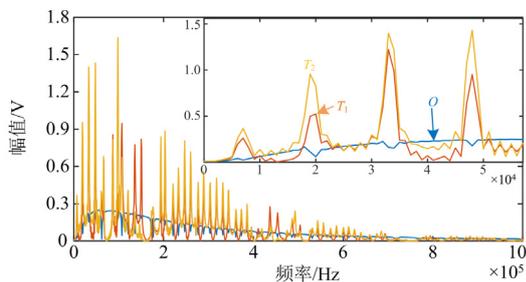


图 8 相间故障行波频率-幅值

Fig. 8 Frequency-amplitude of travelling wave with phase-phase faults

### 2.2.3 单相弧光接地故障

利用 Schwarz 电弧模型, 在  $O$  点设置弧光故障, 可得如图 9 所示的故障行波信号频率-幅值关系, 并

将数据整理到表 3。其中, 电弧模型公式为

$$\frac{1}{g_s} \left( \frac{dg_s}{dt} \right) = \frac{1}{\tau g_s^m} \left( \frac{e \cdot I}{e_0 \cdot I \cdot g_s^n} - 1 \right) \quad (7)$$

式中:  $g_s$  为电导;  $I$  为电弧电流;  $e$  为电弧电压;  $e \cdot I$  是单位长度电弧的输入功率;  $e_0$  是电弧的电压梯度;  $m$ 、 $n$  为影响电导  $g_s$  的参数;  $\tau$  是时间常数。

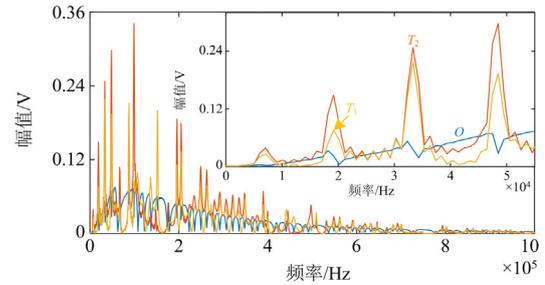


图 9 单相弧光接地故障时行波频率-幅值

Fig. 9 Frequency-amplitude with single-phase arcing ground faults

### 2.2.4 局部放电

配电网局部放电是导致配电网电缆线路、电力设备绝缘性能下降的重要原因, 在运行过程中产生的高频信号可能影响故障行波的检测, 为此, 分析局部放电时的信号特征。同理, 在图 6 的  $O$  点处模拟局部放电, 采集信号频率-幅值关系如图 10 所示, 并将数据整理到表 3。局部放电模型采用双指数振荡衰减模型<sup>[19]</sup>, 其公式为

$$s(t) = \theta_a (e^{-1.3t/\sigma} - e^{-2.2t/\sigma}) \sin(2\pi f_0 t) \quad (8)$$

式中:  $\theta_a$  表示信号幅值;  $\sigma$  表示信号衰减系数;  $f_0$  表示振荡频率。

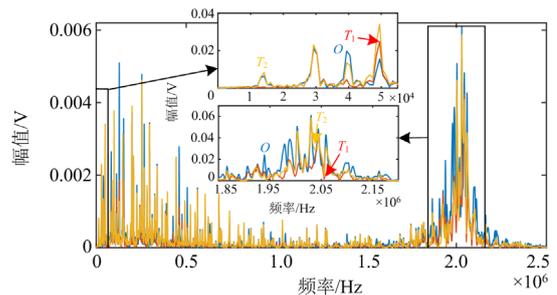


图 10 局部放电时采集信号的频率-幅值

Fig. 10 Frequency-amplitude of acquisition signals with partial discharge

由图 7—图 10 可知, 局部放电时的高频信号频率-幅值特征与其他类型故障时的故障行波信号频率-幅值特征存在较大差别。局部放电信号富含高频信号, 振荡严重且信号微弱, 存在多个频率峰谷。

由表 3 数据可得：在不同故障类型中，行波信号的频率片段幅值占比含量存在一定差异。在相同故障类型中，随着过渡电阻的增加，较低频率的频率片段幅值占比含量缓慢上升。相比于其他故障类型，局

部放电的信号频率片段在 1~5 MHz 时的幅值占比最高。因此，可根据故障信号中高频率的衰减快，而低频信号衰减慢的特征，利用采样信号的 10~100 kHz 和 1~5 MHz 频率数据辨识配电网故障行波信号。

表 3 不同线路工况下的采集信号幅值特征

Table 3 Amplitude characteristics of acquired signals with different operating conditions

故障类型	检测点	故障距离/km	信号最大幅值/V	频率片段幅值含量			频率片段幅值占比		
				$S_{10\sim 100\text{ kHz}}$	$S_{100\text{ kHz}\sim 1\text{ MHz}}$	$S_{1\sim 5\text{ MHz}}$	$P_{10\sim 100\text{ kHz}}$	$P_{100\text{ kHz}\sim 1\text{ MHz}}$	$P_{1\sim 5\text{ MHz}}$
A 相接地 1000 Ω	$O$	0	-7.14	2.12	1.24	0.033	29.71	17.37	0.46
	$T_1$	5	-4.47	1.53	0.86	0.015	34.25	19.24	0.34
	$T_2$	10	-5.37	2.56	1.01	0.0095	47.75	18.81	0.18
A 相接地 4000 Ω	$O$	0	-2.07	0.70	0.419	0.0092	33.83	20.24	0.44
	$T_1$	5	-1.30	0.48	0.276	0.0043	36.65	21.23	0.33
	$T_2$	10	-1.58	0.82	0.328	0.0034	52.11	20.76	0.22
AB 相间 50 Ω	$O$	0	-66.84	20.35	6.77	0.429	30.44	10.13	0.64
	$T_1$	5	-42.82	19.96	7.01	0.110	46.61	16.37	0.26
	$T_2$	10	-52.90	30.96	7.95	0.120	58.53	15.03	0.23
A 相弧光 故障	$O$	0	13.62	4.58	1.52	0.032	33.60	11.16	0.23
	$T_1$	5	8.83	6.17	1.42	0.022	69.85	16.08	0.25
	$T_2$	10	11.07	3.92	1.63	0.023	35.44	14.72	0.21
A 相局部 放电	$O$	0	0.301	0.045	0.0279	0.0139	14.89	9.27	4.62
	$T_1$	5	0.104	0.036	0.0175	0.0082	34.92	16.83	7.88
	$T_2$	10	0.186	0.056	0.0275	0.0114	30.32	14.78	6.13

### 3 配电网故障行波识别方法

#### 3.1 基于波形增量比值的设备启动判据

为避免行波定位设备频繁误触发，根据上述分析结果并利用导数法的思想，提出一种行波故障定位装置的启动判据，具体步骤如下。

步骤 1：当设备采样的离散信号为  $x(i)$  时，为减少数据中部分坏点影响总体判定，计算了采样信号的局部均值。

$$X(i) = \sum_i^{i+k} x(i) / k \quad (9)$$

式中： $X(i)$  为时间窗口内均值； $k$  为时间窗口的长度，其值与采样率及频率有关。

步骤 2：计算相邻单位时间窗口内信号的突变值  $\Delta X(i) = X(i) - X(i-1)$ ，当  $|\Delta X(i) - \Delta X(i-1)| > \varpi$  时，计算步骤 3，其中， $\varpi$  为启动阈值，文中设置为 0.08。否则，返回步骤 1。

步骤 3：计算采样数据的波形增量比值  $\Delta Y(i)$ 。

$$\Delta Y(i) = \frac{\Delta X(i) - \Delta X(i-1)}{\Delta X(i+1) - \Delta X(i)} \quad (10)$$

步骤 4：当连续 3 个  $\Delta Y$  值同时满足分别少于门檻值  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  的条件时，保存采样数据，启动行波定位装置，进行故障数据采集，即

$$\begin{cases} |\Delta Y(i)| < k_1 \\ |\Delta Y(i+1)| < k_2 \\ |\Delta Y(i+2)| < k_3 \end{cases} \quad (11)$$

式中， $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为启动门檻值，文中取 1。

由式(10)和式(11)可知，波形增量比值可放大采样信号的数据突变量，便于数据突变特征的有效检测，减少线路波动信号干扰导致行波定位设备误触发的可能性。

#### 3.2 白噪声干扰抑制方法

考虑白噪声对配电网故障行波数据采集过程的影响，利用鲁棒性局部均值分解(robust local mean decomposition, RLMD)方法分解采样数据，滤除采样数据中的干扰信号，减少白噪声对检测结果的干扰。RLMD 方法是以局部均值分解(LMD)为基础的非线性信号时频分析的方法<sup>[20]</sup>。

步骤 1：信号  $S(n)$  为采样的离散信号，其中  $n=1,2,\dots,N$ ， $N$  为一次采样数据的总数。采用镜像延拓法拓展信号  $S(n)$  的左右端，并找出该区间内所有局部极值点  $m_i (i=1,2,\dots)$ ，其中包含采样点的最大值和最小值。

步骤 2：求解局部均值  $p_i$  和局部包络估计值  $a_i$ 。

$$p_i = (m_i + m_{i+1}) / 2 \quad (12)$$

$$a_i = |m_i - m_{i+1}|/2 \quad (13)$$

步骤 3: 移动平均处理。利用统计法, 根据  $p_i$  和  $a_i$  的值合理且自动地确定固定子集, 通过移动平均算法对  $p_i$  和  $a_i$  平滑处理。处理后的数据和  $S(n)$  数据长度一致。获得局部均值函数  $p_{11}$  和局部包络函数  $a_{11}$ 。

步骤 4: 估计调频信号  $f_{11}$  和零均值信号  $z_{11}(n)$ 。

$$z_{11} = s(n) - p_{11}(n) \quad (14)$$

$$f_{11} = z_{11}(n)/a_{11}(n) \quad (15)$$

步骤 5: 设定目标函数  $t$ , 通过第 1 次分解判断获得的信号  $f_{11}$  是否满足纯频信号。若不满足, 则将  $f_{11}$  作为新信号, 重复步骤 1—步骤 4, 直到满足设定的目标函数要求或达到设定的最大迭代次数。目标函数的要求为: 连续的 3 个连续的迭代  $t_{ij}$ 、 $t_{ij+1}$  和  $t_{ij+2}$  进行判定, 当满足  $t_{ij+1} > t_{ij}$  且  $t_{ij+1} > t_{ij+2}$  时, 迭代停止并返回第  $(j-1)$  次迭代生成的结果, 否则继续。目标函数  $t$  为

$$t = K_{\text{RMS}} + R_{\text{EK}} \quad (16)$$

$$b(n) = a(n) - 1 \quad (17)$$

$$K_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (b(n))^2} \quad (18)$$

$$R_{\text{EK}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (b(n) - \bar{b})^4}{\left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (b(n) - \bar{b})^2 \right)} - 3 \quad (19)$$

式中:  $K_{\text{RMS}}$  为均方根, 用于测量零基线包络信号中的总能量;  $R_{\text{EK}}$  为过度峰值, 用于从局部角度测量局部异常;  $b(n)$  为零基线的局部包络信号;  $\bar{b}$  为离散信号  $b(n)$  的平均值。

步骤 6: 求取第 1 个乘积函数, 根据步骤 5 迭代停止情况, 分两种情况计算调频信号  $f_{11}$  和零均值信号  $z_{11}(n)$ 。

① 当迭代  $p$  次后满足目标函数迭代停止判据时

$$f_1(n) = f_{1p}(n) \quad (20)$$

$$a_1(n) = \prod_{j=1}^p a_{1j}(n) \quad (21)$$

② 当迭代次数达到设定的上限值  $H$  时

$$f_1(n) = f_{1H-1}(n) \quad (22)$$

$$a_1(n) = \prod_{j=1}^{H-1} a_{1j}(n) \quad (23)$$

将包络信号  $a_1(n)$  和纯频信号  $f_1(n)$  相乘, 求取第一个乘积函数  $PF_1(n)$ 。

$$PF_1(n) = f_1(n)a_1(n) \quad (24)$$

步骤 7: 提取 PF 分量。从  $S(n)$  分离第一个  $PF_1(n)$ , 并得到余量信号  $\mu_1(n)$ , 将其作为新信号, 重复步骤 1—步骤 5, 提取所有 PF 分量, 直至  $\mu_q(n)$  为单调数据或常数为止。

步骤 8: 将原始信号  $S(n)$  分解成  $q$  个 PF 分量和余量  $\mu_q(n)$ , 即

$$S(n) = u_q(n) + \sum_{j=1}^q PF_j(n) \quad (25)$$

利用 RLMD 采样信号, 剔除分解出来的干扰项  $PF_1$  信号, 将其余 PF 分量相加, 获得重构信号。

### 3.3 基于频谱特征的故障行波检测判据

利用故障信号中低频含量衰减较小而高频含量衰减快的性质, 建立基于信号频谱特征的行波辨识判据, 区分故障行波与局部放电等干扰信号。具体步骤如下。

步骤 1: 将重组后的数据进行 FFT 分解, 按照 10~100 kHz、100 kHz~1 MHz 和 1~5 MHz 频段段进行整理;

步骤 2: 按照式(5)、式(6)求取频率片段幅值含量和频率片段幅值占比, 并记录重组后数据的首半波峰值。

步骤 3: 根据故障行波传输过程中低频含量衰减较小性质, 采用低频段(10~100 kHz)信号的频率幅值含量作为判据, 进行采样信号的低频特征辨识, 即

$$S_{10\sim 100\text{kHz}} \geq \mu \quad (26)$$

式中,  $\mu$  为 10~100 kHz 频率片段含量的阈值, 本文设置为 0.04。

步骤 4: 当低频段信号幅值含量大于阈值时, 根据故障行波高频含量传输衰减快的性质, 采用高频段(1~5 MHz)信号的频率片段幅值占比的作为判据, 进行采样信号的高频特征辨识, 即

$$P_{1\sim 5\text{MHz}} \leq \psi \quad (27)$$

式中,  $\psi$  为频率幅值片段占比的阈值, 将  $\psi$  设为 2。

### 3.4 配电网故障行波识别方法流程图

根据上述分析, 本文提出一种基于信号频谱特性的配电网故障行波检测方法, 提高了配电网干扰情况下故障行波信号的检测能力, 具体流程如图 11 所示。

步骤 1: 采集线路数据, 利用式(10)计算采集信号的波形增量比值。当比值结果满足式(11)时, 则保存采样数据(启动前 0.5 ms 和启动后 0.5 ms), 启动行波定位装置, 进行步骤 2。否则, 重新采集数据并参与计算。

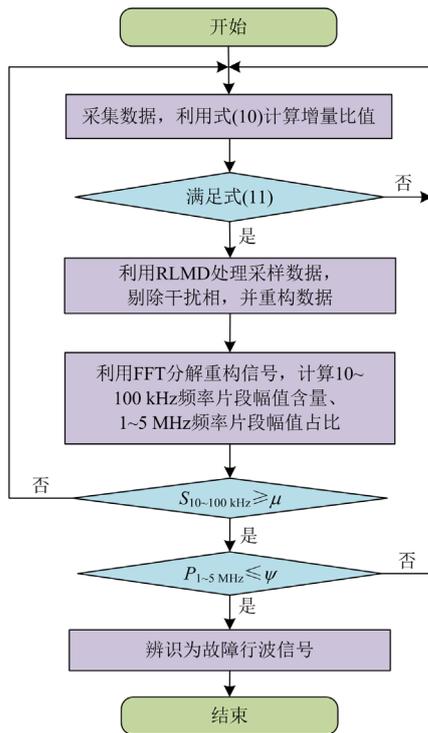


图 11 配电网故障行波辨识方法流程图

Fig. 11 Flowchart of fault traveling wave identification method in distribution network

步骤 2: 利用 RLMD 方法处理采样数据, 通过分解采样数据, 滤除白噪声等干扰信号并重构数据。

步骤 3: 利用 FFT 分解重构数据, 分别计算 10~100 Hz 频率片段的幅值含量与 1~5 Hz 频率片段的幅值占比。

步骤 4: 信号低频特征判定, 比较重构数据 10~100 kHz 的频率片段幅值含量是否满足阈值。当  $S_{10\sim 100\text{ kHz}}$  大于等于阈值时, 进行步骤 5。否则, 重新采集数据参与计算。

步骤 5: 信号高频特征判定, 比较重构数据 1~5 MHz 的频率片段幅值占比是否满足阈值。当  $P_{1\sim 5\text{ MHz}}$  小于等于阈值时, 则辨识为故障行波信号并保存数据, 否则重新参与计算。

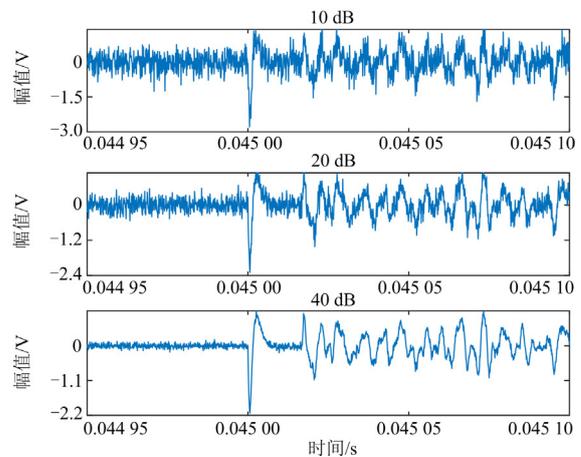
## 4 仿真分析

### 4.1 噪声干扰的影响

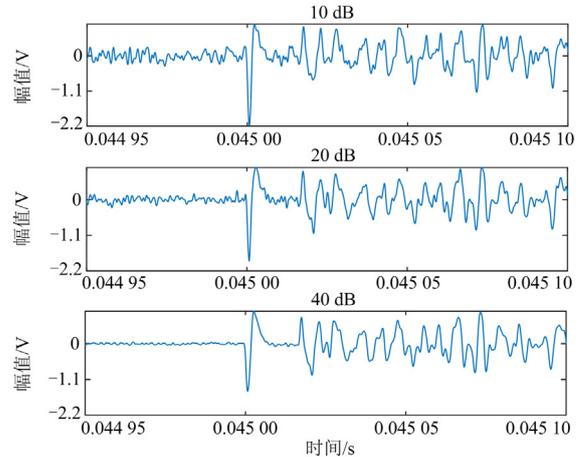
为分析干扰信号对行波检测方法的影响, 搭建如图 6 所示的仿真模型, 模拟 A 相接地故障, 过渡电阻为 4000 Ω。在采样信号中分别添加 10 dB、20 dB 和 40 dB 的白噪声信号。故障点 O 的采样信号如图 12 所示, 其中图 12(a)和图 12(b)分别表示添加白噪声后的采样信号与经 RLMD 处理后的采样

信号。同时, 利用 FFT 计算采样信号频率片段的幅值含量与幅值占比含量, 结果如表 4 所示。

由图 12 和表 4 数据可知, 当采样信号中添加 40 dB 白噪声时, 若不采用 RLMD 方法处理采样数据, 1~5 MHz 的频率片段幅值占比含量将超过所设阈值, 无法实现故障行波信号的有效检测, 导致辨识结果出错。但利用 RLMD 方法处理采样数据后, 所提方法可以实现故障行波信号的有效辨识。当白噪声的信噪比减少至 10 dB 时, 所提方法仍可以有效检测故障行波信号。因此, 所提方法具有较好地抗白噪声干扰能力, 可以实现较强噪声干扰下的故障行波检测。



(a) 添加噪声信号



(b) 经RLMD处理后数据

图 12 不同噪声时故障点 O 的检测结果

Fig. 12 Detection results of monitoring point O at different noise levels

### 4.2 适用性分析

#### 4.2.1 负荷波动的影响

考虑配电线路负荷波动对所提方法的影响, 分别设置了 2 MW 和 4 MW 的对称负荷波动(即三相负

表 4 故障点  $O$  处不同干扰下的信号幅值特征Table 4 Amplitude characteristics with different noise levels at fault point  $O$ 

白噪声/dB	是否采用 RLMD	最大峰值幅值/V	频率片段幅值含量			频率片段幅值占比		
			$S_{10-100\text{ kHz}}$	$S_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$S_{1-5\text{ MHz}}$	$P_{10-100\text{ kHz}}$	$P_{100\text{ kHz}-1\text{ MHz}}$	$P_{1-5\text{ MHz}}$
/	否	-2.07	0.70	0.419	0.0092	33.83	20.24	0.44
10	否	-2.79	0.97	0.867	0.649	34.92	31.08	23.29
20	否	-2.30	0.81	0.62	0.36	35.37	26.96	15.83
40	否	-2.13	0.69	0.46	0.117	32.40	21.57	5.49
10	是	-2.18	1.03	0.734	0.011	47.34	33.67	0.50
20	是	-1.89	0.83	0.578	0.0142	44.08	30.58	0.75
40	是	-1.46	0.69	0.418	0.004	47.15	28.63	0.27

荷同时发生波动)与不对称度为 75%和 50%的负荷波动(即 A、C 两相负荷波动一致,调整 B 相负荷波动与 A、C 两相负荷波动相差 25%和 50%),结果如表 5 所示。

根据表 5 可知,所提方法可以有效区分线路负荷波动与故障行波,无论是对于对称负荷波动,还是对于不对称负荷的波动,所提方法无误判。因此,所提方法具有较好地抗负荷波动的能力。

表 5 不同负荷波动的检测结果

Table 5 Detection results of different load fluctuations

负荷波动/ MW	三相 对称度/%	是否误判		
		$O$	$T_1$	$T_2$
2	100	×	×	×
4	100	×	×	×
2	75	×	×	×
1	50	×	×	×

注: ×表示未误判, √表示误判。

#### 4.2.2 新能源接入的影响

新能源接入配电网后,运行过程将产生谐波,对采样信号进行干扰。目前,电力电子开关开断产生的谐波主要集中在 2 kHz<sup>[21-22]</sup>,但电力电子开关开断所产生的谐波信号经过 LCL 滤波器或 IGBT 的 PWM 滤波后才接入交流测,且国家标准要求电力系统低压电网电压总谐波畸变率低于 5%,其中 36 次谐波含有率低于 0.075%<sup>[23]</sup>。因此,在图 6 所示的模型运行过程中添加 2 kHz 的谐波信号,其幅值为 20 V。同时,模拟 A 相接地故障,过渡电阻为 4000  $\Omega$ ,结果如图 13 所示。

根据上述分析和图 13 可知,当线路正常运行时,加入的谐波信号不满足所提方法的启动判据,不会导致行波定位装置的误启动。但当线路发生接地故障时,所提方法仍可以有效检测故障行波信号,检测结果不受注入谐波的影响。因此,对于新能源接入后产生的谐波,所提方法具有较好的鲁棒,可以用于含新能源运行的配电网线路故障行波检测。

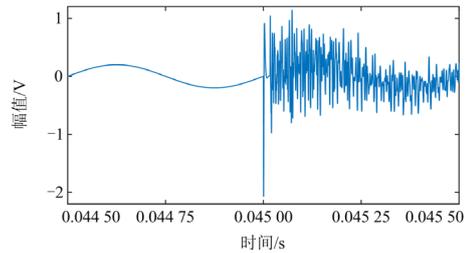


图 13 添加 2 kHz 谐波的故障信号波形图

Fig. 13 Fault signal waveform with 2 kHz harmonics added

#### 4.2.3 不同工况下的影响

考虑线路不同类型故障与局部放电运行情况,在图 6 所示的配电网仿真模型中,仍设置  $O$  为故障点,分别设置 100  $\Omega$ 、2000  $\Omega$ 、5000  $\Omega$  故障过渡电阻单相接地故障和单相弧光接地故障,AB 相间 100  $\Omega$  接地故障,以及局放下分别设置 30°、60°和 90°故障相初相角。仿真验证不同故障初始相角与不同过渡电阻时本文方法的有效性,判定结果如表 6 所示。

根据表 6 可得,针对不同故障类型,所提方法都可以实现故障行波信号的有效检测。当线路发生局部放电时,采集信号满足本文所提方法的行波定位设备启动判据,但不满足频率特征判据,检测为非故障行波信号。同时,当故障初相角大于 60°时,所提方法可以有效检测 5000  $\Omega$  单相接地故障时的故障行波信号。但当故障初相角小于 30°时,对于 5000  $\Omega$  的单相接地故障,所提方法出现误判,无法有效检测线路行波信号。因此,对于不同故障类型、故障初始角和过渡电阻,本文方法能够检测微弱故障时的行波信号,具有较好的抗高阻接地故障能力。

#### 4.3 与现有行波检测方法的对比分析

为分析不同方法对故障行波信号检测的有效性,比较了本文所提方法与文献[5]所提方法的故障行波信号检测效果。同理,以  $T_2$  为参考点,分别模拟 100  $\Omega$ 、2000  $\Omega$  和 4000  $\Omega$  的单相接地故障,故障初相为 60°,添加 40 dB 的白噪声,检测结果如表 7 所示。

表 6 不同工况下数据判定结果

Table 6 Determination results with different fault initial phase angles and transition resistances

故障 初始角/(°)	故障 类型	过渡 电阻/ $\Omega$	行波检测		
			$O$	$T_1$	$T_2$
30	Ag	100	√	√	√
	Ag	2000	√	√	√
	Ag	5000	√	×	×
	Ag	弧光	√	√	√
	ABg	100	√	√	√
	Ag	局部放电	×	×	×
45	Ag	100	√	√	√
	Ag	2000	√	√	√
	Ag	5000	√	√	√
	Ag	弧光	√	√	√
	ABg	100	√	√	√
	Ag	局部放电	×	×	×
90	Ag	100	√	√	√
	Ag	2000	√	√	√
	Ag	5000	√	√	√
	Ag	弧光	√	√	√
	ABg	100	√	√	√
	Ag	局部放电	×	×	×

注：×表示判断为非行波信号，√表示判断为行波信号，/表示无法启动判据。

表 7 不同方法的故障检测结果

Table 7 Fault detection results of different methods

检测方法	参考点	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	行波检测
文献[5]	$T_2$	Ag	100	√
	$T_2$	Ag	2000	√
	$T_2$	Ag	4000	/
本文	$T_2$	Ag	100	√
	$T_2$	Ag	2000	√
	$T_2$	Ag	4000	√

注：×表示判断为不是行波信号，√表示判断为行波信号，/表示无法启动判据。

由表 7 可知，当过渡电阻为 100  $\Omega$  和 2000  $\Omega$  时，本文所提方法与文献[5]方法都可以有效检测故障行波信号。但当过渡电阻为 4000  $\Omega$  时，文献[5]所提方法难以有效检测故障行波信号，而本文所提方法仍可以实现行波信号的有效辨识。因此，本文所提方法具有更好的故障行波检测效果。

## 5 总结

为提升噪声干扰下配电网故障行波信号检测的有效性，本文提出一种基于信号频谱特征的配电网故障行波检测方法。

1) 通过分析故障行波信号的传输特性，建立采样数据的波形增量比值判据，对设备采样数据进行预处理，减少行波定位装置的误启动。进而，利用 RLMD 方法分解采样信号，减少白噪声干扰信号的影响。然后，利用 FFT 计算重构数据的频率段幅值含量与占比，建立相应的辨识判据，实现故障行波信号的有效检测。

2) 仿真分析可知，所提方法能够有效检测线路微弱故障时的行波信号，且检测结果不易受故障类型、故障初相角、过渡电阻、负荷波动和白噪声等因素的影响。同时，所提方法可以有效区分局部放电信号与故障行波信号，减少线路局部放电信号的干扰，具有较好的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于节点电压差值的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 106-116.  
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A novel fault location method employing node voltage difference value for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 106-116.
- [2] 付华, 王婧羽. 基于 SR-VMD 的微弱故障行波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 156-162.  
FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 156-162.
- [3] ABID A, KHAN M T, IQBAL J. A review on fault detection and diagnosis techniques: basics and beyond[J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54: 3639-3664.
- [4] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.  
LEI Chaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [5] 李泽文, 赵廷, 席燕辉, 等. 基于 Kalman 滤波算法的电网故障行波检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 31-38.  
LI Zhewen, ZHAO Ting, XI Yanhui, et al. Traveling wave fault detection method for power grid based on Kalman filtering algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(6): 31-38.
- [6] HAMIDI R J and LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 135-144.
- [7] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.

- ZHENG Zhou, LÜ Yanping, WANG Jie, et al. A new two terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [8] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
- TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.
- [9] 马驰, 李江涛. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的交叉互联电缆在线故障定位策略研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(12): 10-18.
- MA Chi, LI Jiangtao. Research on online fault location strategy of cross-bonding cables based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 10-18.
- [10] DE LA CRUZ J, GÓMEZ-LUNA E, ALI M, et al. Fault location for distribution smart grids: literature overview, challenges, solutions, and future trends[J]. Energies, 2023, 16(5): 2280.
- [11] ZHU W, FAN C, XU C, et al. Anchor fault identification method for high-voltage dc submarine cable based on VMD-Volterra-SVM[J]. Energies, 2023, 16(7): 3053.
- [12] 侯思祖, 郭威. 基于改进 EEMD 与混沌振子的配电网故障选线[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 77-87.
- HOU Sizu, GUO Wei. Fault line selection in distribution network based on modified EEMD and chaos oscillator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 77-87.
- [13] 雷强, 刘光晔, 朱永强, 等. 基于 EEMD 和矩阵束算法的低频振荡主导模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 56-62.
- LEI Qiang, LIU Guangye, ZHU Yongqiang, et al. Identification of the dominant mode based on EEMD and matrix pencil algorithm for low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 56-62.
- [14] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
- BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.
- [15] SHU H C, WANG G X, TIAN X C. MMC-HVDC line fault identification scheme based on single-ended transient voltage information entropy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 107817.
- [16] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 22-27, 2011, Prague, Czech Republic: 4144-4147.
- [17] 徐艳春, 赵彩彩, 孙思涵, 等. 基于改进 LMD 和能量相对熵的主动配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 133-143.
- XU Yanchun, ZHAO Caicai, SUN Sihan, et al. Fault location for active distribution network based on improved LMD and energy relative entropy[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 133-143.
- [18] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2180-2191.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191.
- [19] 许佳杰. 配电电缆局部放电识别与定位研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [20] LIU Zhiliang, JIN Yaqiang, ZUO Ming, et al. Time-frequency representation based on robust local mean decomposition for multicomponent AM-FM signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 95: 468-487.
- [21] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multiterminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [22] 徐少博, 徐永海, 陶顺, 等. 并网换流器采样和 PWM 边带次谐波特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4340-4354.
- XU Shaobo, XU Yonghai, TAO Shun, et al. Research on Sampling and PWM Sideband Secondary Harmonic Characteristics of Grid Connected Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4340-4354.
- [23] 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. Quality of electric energy supply Harmonics in public supply network: GB/T 14549—1993[S].

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-01-25

作者简介:

刘丰(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 350117159@qq.com

谢李为(1993—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: fengxlw@163.com

蔡军(1990—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 1127254786@qq.com

(编辑 姜新丽)