

引用格式:张帝,宋兴荣,唐海国,等.基于自适应VMD和WVD的配电网故障行波检测方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):80-90.

Citation: ZHANG Di, SONG Xingrong, TANG Haiguo, et al. Fault traveling wave detection method of distribution network based on adaptive VMD and WVD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 80-90.

基于自适应VMD和WVD的配电网故障行波检测方法

张帝¹, 宋兴荣¹, 唐海国¹, 李泽文², 孙健², 彭维馨²

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410004; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 精确检测故障行波信号是保证故障定位结果准确可靠的重要因素, 针对 Wigner Ville 分布 (Wigner Ville distribution, WVD) 在检测故障行波时易产生交叉项的问题, 提出一种基于改进变分模式分解 (variational mode decomposition, VMD) 和 WVD 的故障行波检测方法。首先, 通过波形相似性确定 VMD 参数的选取, 利用改进的 VMD 对线模行波信号自适应分解, 实现对故障行波不同频段信号提取的同时保留重要故障信息; 然后, 分别求取各分量信号的 WVD 后叠加得到原始信号的 WVD, 由此解决 WVD 交叉项带来的影响; 最后求取 VMD-WVD 能量谱密度分布, 利用 WVD 良好的时频聚集性检测故障行波 [150, 170] kHz 频段波头位置, 从而实现故障行波波头的精准检测。仿真实验结果表明, 该文所提方法相比小波和 HHT 的故障行波检测方法更加快速、准确。

关键词: 配电网; 行波检测; 改进 VMD; WVD

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.010 中图分类号: TM77 文章编号: 1673-9140(2024)02-0080-11

Fault traveling wave detection method of distribution network based on adaptive VMD and WVD

ZHANG Di¹, SONG Xingrong¹, TANG Haiguo¹, LI Zewen², SUN Jian², PENG Weixin²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Accurate detection of fault traveling wave signals is an important factor to ensure accurate and reliable fault location results. Aiming at the problem that Wigner Ville distribution (WVD) is prone to produce cross terms when detecting fault traveling waves, a fault traveling wave detection method based on improved variational mode decomposition (VMD) and WVD is proposed. Firstly, the selection of VMD parameters is determined by waveform similarity, and the improved VMD is used to adaptively decompose the line mode traveling wave signal, so as to extract signals of different frequency bands of fault traveling wave while retaining important fault information. Then, the original WVD signal is obtained by the calculation and superimposition of each component signal of the WVD, thus solving the influence of cross terms due to WVD. Finally, the energy spectral density distribution of VMD-WVD is obtained, and the good time-frequency aggregation of WVD is used to detect the wave head position from 150 kHz to 170 kHz frequency band of the fault traveling wave, so as to achieve accurate detection of the fault traveling wave head. Simulation results show that the proposed method is faster and more accurate than the wavelet and HHT fault traveling wave detection methods.

Key words: distribution network; traveling wave detection; improved VMD; WVD

收稿日期: 2021-04-27; 修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目 (5216A521003K); 国家自然科学基金 (51877012); 湖南省教育厅科学研究项目 (重点项目) (18A121)

通信作者: 李泽文 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统保护与控制研究; E-mail: 820288556@qq.com

精确检测故障行波信号是保证行波法故障定位结果准确可靠的重要因素之一^[1-4]。由于配电网电压等级低、拓扑结构复杂,故障行波在传播过程中经历了衰减、色散以及多次折反射之后,各线路行波检测装置最终采集到的故障行波信号微弱且伴有噪声干扰,因此,需要对故障行波信号的检测方法展开研究。又由于故障行波是一种非平稳、非线性以及宽广频带的多分量暂态信号,因此,需要研究时频域分析方法提取其中的故障特征,从而保证行波法故障定位结果的准确性^[5-7]。

小波变换可实现对行波信号的多尺度分析。文献[8]利用小波包分析对行波频带进行多层次划分,提取其中大量中、高频信息进行时频局部化分析,以此增加波头的辨识准确率;文献[9]利用经验小波变换对提取出的故障电流行波中的低频分量进行选线和定位。小波变换通过多尺度的方法来实现非平稳信号的处理,若是尺度选取不恰当就会造成对故障特征信息提取失败。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)在行波信号检测及特征提取中被大量应用,但EMD存在的模态混叠、端点效应以及伪分量问题也对其实际应用效果产生了巨大影响^[10-11]。文献[12]为解决模态混叠的影响,利用集合经验模态分解来检测行波波头,但是由于该方法在行波信号分解过程中引入了高斯白噪声,因此分解得到的信号中通常会有噪声残量,造成波头检测的不精确。希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)是在对信号进行EMD分解后,再对模态分量做变换求取瞬时频率的信号检测方法,具有简单、自适应和可重构等良好的性质,但同时也存在EMD所面临的各种缺陷^[13]。Wigner Ville分布(Wigner Ville distribution, WVD)作为一种能量型时频联合分布,对边缘特性、瞬时频率和局域化等都有很好的描述,与傅里叶变换的频谱图相比,WVD在时频分辨率方面表现得更为优异^[14-15]。文献[16-17]提出一种基于WVD的行波检测方法,该方法通过对故障行波信号线模分量的WVD进行时频分析,然后求取线模行波的能量主频带演变谱,实现行波信号的检测,仿真实验表明,该方法的检测结果相比于HHT更加准确有效,并能满足故障定位结果的工程精度要求。然而交叉项成为WVD应用时的瓶颈,交叉项的存在令含有多分量的信号难以表述清楚。文献[18-19]提出一种利用EMD和WVD来实现电缆线路故障定位的方法,该方法在不缺失良好时频分

辨率的情况下,通过EMD来抑制WVD的交叉项影响,从而在一定程度上提高故障行波检测精度,但EMD存在的模态混叠以及伪分量问题却会对故障特征信息的提取产生巨大干扰。变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)通过在变分问题框架中迭代搜索变分模型最优解来实现信号的分解,具有很好的噪声鲁棒性,并且解决了EMD存在的众多缺陷^[20-21]。文献[22]针对现有行波检测方法易受频谱混叠及噪声影响的问题,提出VMD和同步挤压小波变换相结合的故障行波检测方法,仿真结果表明,相较于HHT,该方法的信号分离能力及噪声鲁棒性更好。

综上所述,故障行波检测及故障特征提取方法种类繁多且应用广泛,但不同的方法都有其优缺点。小波变换受限于分解尺度选择的难题,而EMD、HHT存在着模态混叠、筛选停止准则选定以及边界处理结果摆动大等问题。VMD能够避免EMD存在的诸多问题,实现信号的自适应分解,而WVD作为如今非平稳信号分析领域中主流方法之一,具有优良的时频聚集性,因此,本文利用VMD与WVD相结合的方法来检测和提取故障行波特征信息,进一步提高故障定位的准确性。

1 行波信号传播特征分析

由于三相导线之间存在电磁耦合现象,导致各相导线中的故障行波在传播过程受到了其他两相行波的影响,因此,需要对三相电压或电流进行解耦得到互不影响的模量,从而简化波求解过程。凯伦贝尔(Karenbauer)变换通过将原有的三相电压和电流量变换成一组新的电压和电流模量,各模量之间互不影响,适用于暂态时域分析。行波 k 模分量的波速为

$$v_m^{(k)}(\omega) = \frac{\omega}{\beta_m^{(k)}(\omega)} \quad (1)$$

式中, $\beta_m^{(k)}(\omega)$ 为行波相位常数,表示频率为 ω 的行波模分量的相位在传播过程中的变化程度。

架空线路行波线模和零模分量不同频率下的行波传播参数如表1所示,可以看出,线模、零模的线路单位电阻在低频段都较小,但随着频率的变大,零模线路单位阻抗将显著增加,因此相较于行波线模分量,行波零模分量在高频部分会出现更大的衰减。此外,频率的变化对零模分量波速的影响远远大于其对线模分量的影响,从而应用零模分量

进行故障定位将难以实现。为此,本文利用故障行波的线模分量来提取故障特征信息,实现故障行波的信号检测。

表1 架空线路各频段下的行波传播参数

Table 1 Propagation parameters of traveling wave in each frequency band of overhead line

行波 模量	频率/ kHz	单位长度电阻/ (Ω/km)	波阻抗/ Ω	波速/ (10 ⁸ /s)
线模 分量	500.000 0	8.224 29	360.10	2.989 9
	250.000 0	5.349 69	360.24	2.989 9
	125.000 0	3.541 99	360.50	2.987 9
	62.500 0	2.398 99	360.68	2.985 8
	31.250 0	1.661 99	361.09	2.983 1
	15.625 0	1.173 49	361.60	2.977 8
零模 分量	7.812 5	0.841 68	362.79	2.974 0
	500.000 0	511.790 00	720.39	2.891 9
	250.000 0	318.310 00	731.55	2.818 9
	125.000 0	191.850 00	745.19	2.766 8
	62.500 0	112.430 00	761.40	2.709 0
	31.250 0	63.770 00	779.70	2.644 9
15.625 0	35.290 00	799.79	2.577 9	
7.812 5	19.410 00	821.29	2.510 9	

不同线路类型中行波线模分量波速依频变化曲线如图1所示,行波线模分量在电缆线路上的传播速度要低于架空线路,特别是对于高频段信号分量,电缆线路中的波速远低于架空线路中的波速。此外,在架空线路与电缆线路中,行波线模分量低频段部分的波速变化都较为剧烈,但随着频率的提高,[150,170]kHz高频范围内的线模波速将趋于稳定。为此在后续的行波检测中,本文将针对该频段内的线模信号进行分析,以该频段内的线模行波波速作为故障行波的波速,并以该频段内的线模行波到达检测点的时间作为故障初始行波的到达时间。

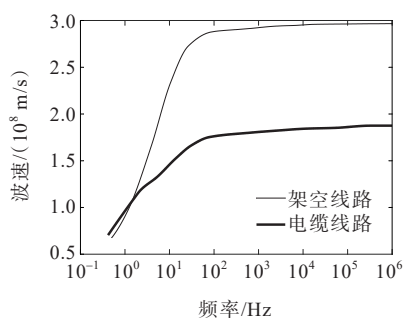


图1 不同线路类型行波线模分量波速曲线

Figure 1 Wave velocity curves of traveling wave line-module components for different line types

2 故障行波检测方法

2.1 Wigner Ville分布

设信号 $x(t)$ 的自WVD定义为 $x(t)$ 的瞬时自相关函数 $r_x(t, \omega) = x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)$ 关于时延 τ 的Fourier变换,即

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (2)$$

对信号的WVD求取数学期望,即可得到原信号的能量谱密度分布,即

$$S_x(t, \omega) = E\left[\int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j\omega\tau}d\tau\right] = E[W_x(t, \omega)] \quad (3)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示求取数学期望。

另设信号 $y(t)$,对于信号 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互Wigner Ville分布定义为

$$W_{x,y}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)y^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j\omega\tau}d\tau \quad (4)$$

设一多分量信号为 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$,通过式(2)、(4)计算得到 $x(t)$ 的WVD为

$$W_x(t, \omega) = W_{x_1}(t, \omega) + W_{x_2}(t, \omega) + 2\text{Re}[W_{x_1, x_2}(t, \omega)] \quad (5)$$

其中, $2\text{Re}[W_{x_1, x_2}(t, \omega)]$ 为交叉项。对于由 N 个独立信号组成的多分量信号,其WVD分布的结果中将会出现 $N(N-1)/2$ 个交叉项。而故障行波信号是一种宽广频带的多分量信号,直接求取其WVD将出现严重的交叉项干扰。

故障行波具有多分量叠加的非平稳特征,为分析交叉项的影响,本文构建一个由幅值、频率双调制信号与一余弦信号叠加的多分量仿真信号,即

$$z(t) = [1 + 0.8 \sin(20\pi t)] \sin[80\pi t + 0.5 \sin(40\pi t)] + \cos(40\pi t) \quad (6)$$

对式(6)中的仿真信号求取其WVD,如图2所示,可以看出,仿真信号的WVD结果中除了存在200、20~50 Hz的频率成分,即各单分量信号的自WVD结果,还存在110~130 Hz的频率成分,该部分即为式6所述多分量信号WVD结果的交叉项;交叉项的能量密度非常高,且出现在单分量信号的自WVD中间,给信号特征分析与提取带来巨大的影响,特别是对于低噪声比的情况,交叉项的存在将严重影响对信号时变的分析。为此,虽然WVD具有很高的时频聚集性,但在工程应用中,直接使用WVD对信号的特征信息进行分析是难以达到实际要求的。

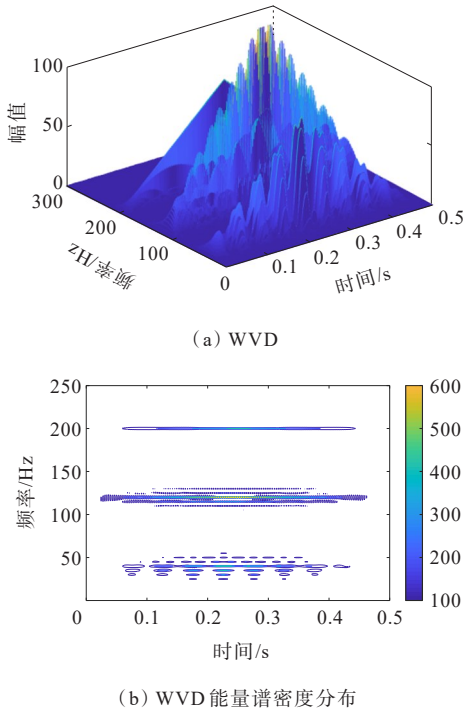


图 2 仿真信号的 WVD

Figure 2 WVD results of simulated signals

2.2 自适应变分模态分解

VMD 分解的实质就是变分问题构造和求解过程。将原信号分解得到中心频率为 ω_k 的 k 个分量,目标是使 k 个模态分量的估计带宽之和最小;约束是使分解得到的所有分量叠加后的结果仍等于分解前的原始信号。分解的目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min_{\{x_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k=1}^K x_k = x \end{cases} \quad (7)$$

式中, K 为分解尺度; x_k 为原始信号 x 经分解后得到的第 k 个固有模态分量 (intrinsic mode functions, IMF), 其中 $k=1, 2, \dots, K$; $\{x_k\}$ 为所有 IMF 分量的集合; ω_k 为第 k 个 IMF 分量的中心频率; $\{\omega_k\}$ 为所有 IMF 分量对应的中心频率的集合。

引入 Lagrange 乘法算子 $\lambda(t)$ 和二次惩罚因子 α , 将式 (7) 中带约束的极值问题转换为无约束问题进行求解, 即

$$L = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_k x_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), x(t) - \sum_k x_k(t) \right\rangle \quad (8)$$

VMD 属于完全非递归分解, 通过设置合理的收敛条件并迭代寻优, 将信号分解为 k 个有限带宽的固有模态分量, 每个分量均有一个中心频率。当 k 取值合适时, VMD 能够很好地将信号分解为包含不同频段的固有模态分量, 可以有效避免信号模态混叠、抑制端点效应。当 k 取值过大时, 因信号过度分解会产生虚假 IMF 分量; 当 k 取值过小时, 会因为某 IMF 分量中包含过多的频率分量致使模态混叠。因此, 本文设计 k 取值选取流程如下:

- 1) 求取原信号的频谱, 初始化 $k=2$;
- 2) 对原信号 VMD 分解, 各 IMF 分量依中心频率由低到高排序, 求取各 IMF 分量的频谱;
- 3) 计算各 IMF 分量与原信号的波形相似度, 即

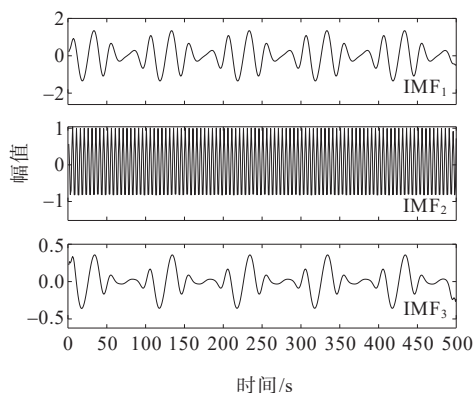
$$\rho_k(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(a_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \right) \left(b_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(a_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \right)^2 \left(b_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \right)^2}} \quad (9)$$

- 4) 根据波形相似度计算结果, 若 ρ_k 均大于阈值, 则 $k=k+1$, 再回到步骤 2) 循环;
- 5) 若存在 ρ_k 小于阈值, 则原信号存在过度分解, 该 IMF 分量与原信号微相关, 此时 $k=k-1$ 。

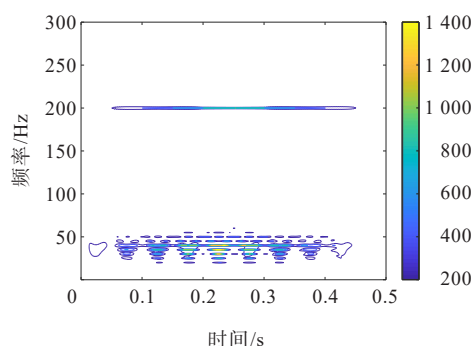
2.3 基于 VMD-WVD 的行波检测算法

WVD 作为一种双线性时频分布, 满足“二次叠加原理”, 即多分量信号的 WVD 等于各单分量信号的 WVD 线性叠加之后的结果^[14]。因此, 本文利用 WVD 满足的“二次叠加原理”, 先通过改进的 VMD 算法对原始信号自适应分解, 再求取各分量信号的 WVD 并进行叠加, 从而获取原始信号的 WVD, 可在保证 WVD 良好性质的同时实现对交叉项的抑制。

对式 (6) 所示的调制信号进行 VMD 分解, 其中阈值取 0.3, 原信号自适应分解为 3 个 IMF 分量, 求得各 IMF 分量的 WVD 并线性叠加, 可得信号的 VMD-WVD, 如图 3 所示, 可见该信号的 VMD-WVD 结果中只存在频率为 200、20~50 Hz 的成分, 且成分明显易见。对比图 2 所示直接求取信号的 WVD, 可以看出, 多分量信号的 WVD 中有着非常明显的交叉项, 且它们出现在两信号之间的位置 (110~130 Hz 频率分量在 20~50、200 Hz 频率分量之间), 而本文采用的基于改进 VMD 的交叉项抑制方法得到的 VMD-WVD 结果, 不仅可以有效地消除交叉项的干扰, 同时还保持了 WVD 优良的时频聚集性, 从而提高了准确辨识信号真实特征信息的能力。



(a) 改进VMD分解结果



(b) VMD-WVD能量谱密度分布

图3 仿真信号的VMD-WVD结果

Figure 3 VMD-WVD results of simulated signals

由上述分析可知,基于改进VMD算法的交叉项抑制方法不仅可以削弱WVD的交叉项干扰,还能保证WVD的优良特性不受影响。因此,本文提出一种基于VMD-WVD的故障行波检测方法,该方法的实现流程如图4所示,具体步骤如下。

1) 将获取到的故障行波信号进行相模变换,取线模分量设为 $x(t)$,利用改进VMD算法将 $x(t)$ 分解成 K 个IMF分量。

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) \quad (10)$$

式中, $x_k(t)$ 为第 k 个IMF分量。

2) 计算各个IMF分量 $x_k(t)$ 的WVD。

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{x_1}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_1^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ W_{x_2}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_2\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ \vdots \\ W_{x_K}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_K\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_K^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \end{array} \right. \quad (11)$$

3) 将步骤2)中计算得到的各IMF分量的WVD进行线性叠加,最终求得故障行波信号 $x(t)$ 的VMD-WVD结果。

$$W_x(t, \omega) = \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} x_k\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x_k^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (12)$$

4) 利用式(3)计算步骤3)中得到的VMD-WVD的数学期望,获取故障行波信号 $x(t)$ 的VMD-WVD能量谱密度分布 $S_x(t, \omega)$ 。

由文1中分析可知,线模分量的高频部分波速依频变化平缓,该部分波速可视为定值,为此,根据能量谱密度分布求取频率为 $[150, 170]$ kHz的能量演变谱:

$$Z_x(t, \omega) = \frac{1}{N_{f_1} - N_{f_2}} \sum_{\omega=2\pi f_1}^{2\pi f_2} S_x(t, \omega) \quad (13)$$

式中, f_1, f_2 分别为150、170 kHz; N_{f_1}, N_{f_2} 分别为频率 f_1, f_2 在VMD-WVD矩阵中对应的频率点位置; $N_{f_1} - N_{f_2}$ 表示频率范围为 $[f_1, f_2]$ 的频带长度。

5) 对得到的故障行波信号的VMD-WVD能量谱密度分布及能量演变谱进行分析,获取故障定位所需的初始行波时间信息。

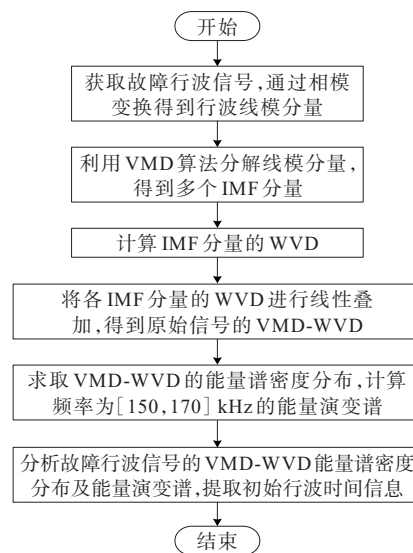


图4 基于VMD-WVD的故障行波检测方法

Figure 4 Fault traveling wave detection method based on VMD-WVD

3 仿真与分析

以架空—电缆混合配电网为例,如图5所示。在PSCAD仿真软件中搭建该系统模型,仿真模型中各线路终端均配置故障行波检测装置,采样频率为5 MHz,线路模型参数设置如表2所示,各段线路的长

度如表 3 所示。根据行波波速计算公式可以得到理论上故障行波在架空线路上的波速为 297 311 km/s,在电缆线路中的波速为 174 567 km/s。

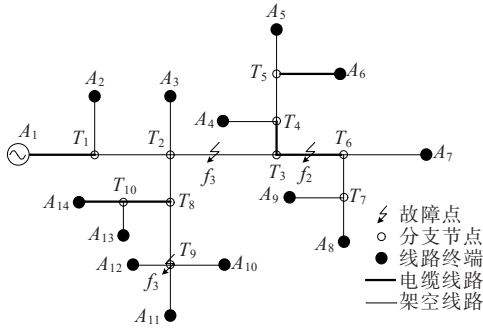


图 5 典型配电网拓扑结构

Figure 5 Topology of typical distribution network

表 2 配电网线路参数

Table 2 Line parameters of distribution network

线路类型	电阻/(Ω /km)		电感/(mH/km)		电容/(μ F/km)	
	正序	零序	正序	零序	正序	零序
架空	0.170	0.230	1.257	5.475	0.009	0.006
电缆	0.270	2.700	0.968	0.255	0.339	0.280

表 3 配电网线路长度

Table 3 Line lengths of distribution network km

线路	长度	线路	长度	线路	长度
A_1T_1	1.6	T_8T_9	2.5	T_5A_6	0.8
T_1A_2	3.3	T_9A_{10}	2.1	T_5A_5	0.4
T_1T_2	2.6	T_9A_{11}	2.7	T_3T_6	4.0
T_2A_3	2.1	T_9A_{12}	0.8	T_6T_7	3.2
T_2T_8	3.7	T_2T_3	6.6	T_7A_8	1.3
T_8T_{10}	4.1	T_3T_4	2.8	T_7A_9	0.9
$T_{10}A_{13}$	1.5	T_4A_4	1.2	T_6A_7	5.3
$T_{10}A_{14}$	1.0	T_4T_5	1.9		

3.1 VMD-WVD 检测方法仿真分析

1) 三相金属性接地故障。

在架空线路 T_2A_3 上,距离 T_2 为 1.215 km 的 f_1 点处设置三相金属性接地故障,故障初相角为 60° ,故障发生时刻为 0.06 s,持续时间为 0.03 s。在靠近故障点的 A_3 处和远离故障点的 A_7 处,故障行波检测装置采集得到的故障电流波形如图 6 所示。对采集到的信号添加 30 dB 的白噪声,通过相模变换后得到的线模分量如图 7 所示,可以看出,当故障行波经过架空、电缆线路以及多个线路分支节点后,由于其存在的衰减、色散和折反射现象,使得距离故障点较远的 A_7 处检测到的行波衰减严重、初始波头变缓,且噪声对其影响更加严重。

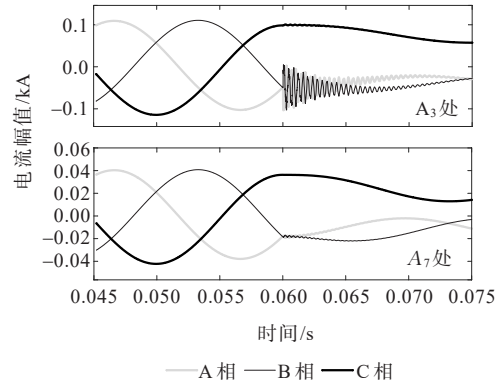
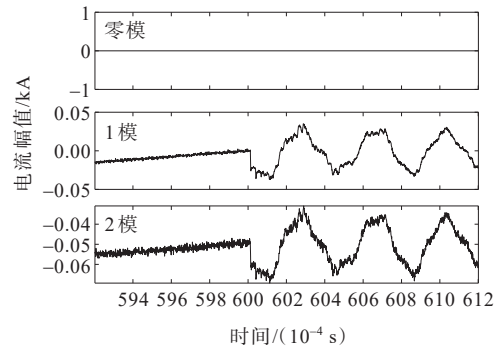
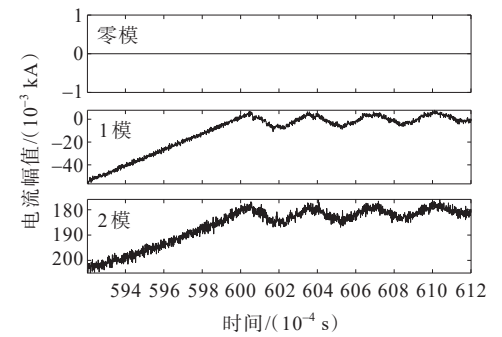


图 6 三相金属性接地故障电流波形

Figure 6 Current waveforms under three-phase metal grounding fault



(a) A_3 处



(b) A_7 处

图 7 三相金属性接地故障电流相模变换结果

Figure 7 Phase-mode transformation results for fault current under three-phase metal grounding fault

对 2 处检测点的故障电流线模分量进行 VMD,如图 8 所示,可见 VMD 将故障电流线模分量分解为 3 个 IMF 分量,每个分量具有不同的频段,依次求得各分量的 WVD 并进行线性叠加,可以得到故障电流线模分量的 VMD-WVD 结果,并由此计算出 $[150, 170]$ kHz 的能量演变谱,如图 9 所示,可知提取故障行波到达 2 个检测点的时间分别为 0.060 011 2 (理论上为 0.060 011 15)、0.060 058 8 s (理论上为 0.060 058 85 s)。

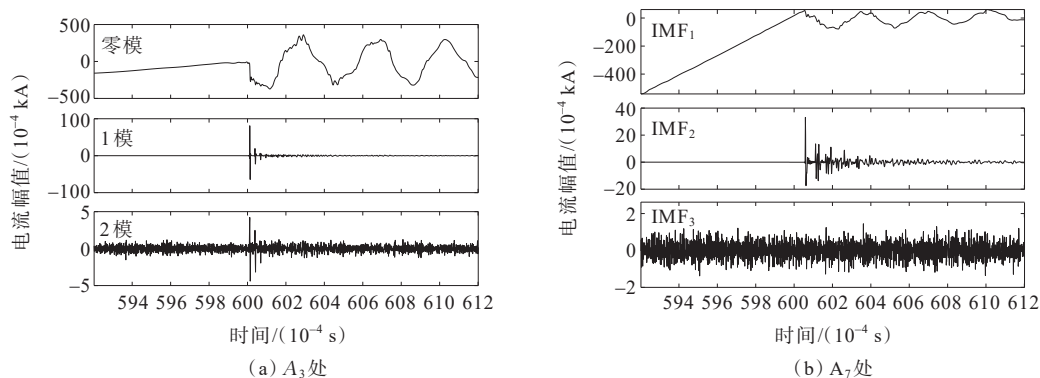


图8 三相金属性接地故障电流VMD分解结果

Figure 8 VMD results for fault current under three-phase metal grounding fault

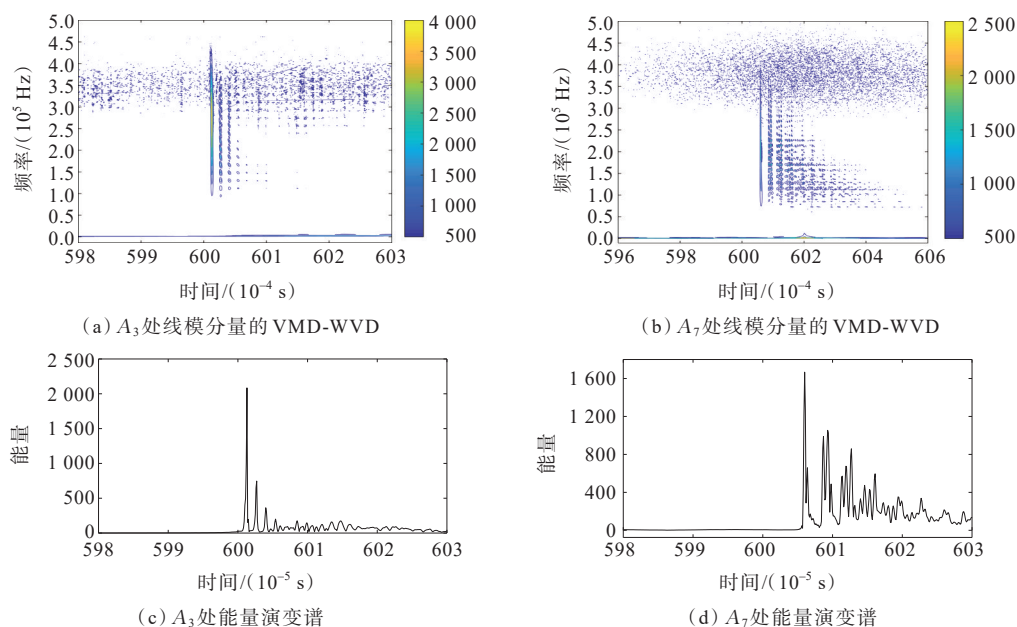


图9 三相金属性接地故障电流VMD-WVD结果及其能量演变谱

Figure 9 Results and energy evolution spectrum of VMD-WVD for fault current under three-phase metal grounding fault

由图9可以看出,虽然故障行波沿配电线路传播后暂态特征受到削减,但本文方法获取的VMD-WVD中初始行波的高频部分仍具有很高的能量,并且能量聚集性良好,同时在经过VMD分解后,高频噪声分量被分离出来。由于本文只计算VMD-WVD中 $[150, 170]$ kHz的能量演变谱,并且避开了噪声分量所在的高频区域,从而使得初始行波波头在能量演变谱中具有很好的奇异性,有益于初始行波时间信息的准确提取。

2) 单相高阻接地故障。

单相接地故障是配电网中最常见的故障类型,发生此类故障且过渡电阻较高时故障行波微弱,将对故障行波的检测带来巨大困难。为此,本文在 f_1 处设置A相发生接地故障,过渡电阻为 $800\ \Omega$,故障初相角为 60° 。 A_3 和 A_7 处故障行波检测装置采集到的故障波形如图10所示,添加30 dB的白噪声并进

行相模变换后得到的零、线模分量如图11所示。

取线模分量进行VMD处理结果如图12所示,最后计算得到的VMD-WVD结果及能量演变谱如图13所示。

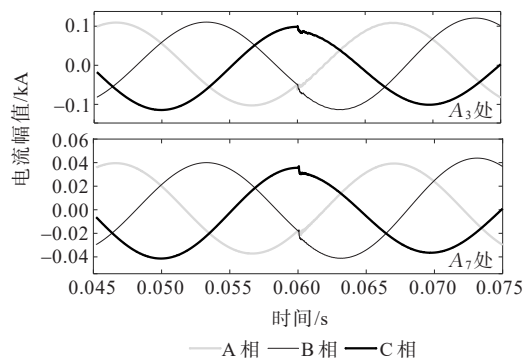


图10 单相高阻接地故障电流波形

Figure 10 Current waveforms under single-phase high resistance grounding fault

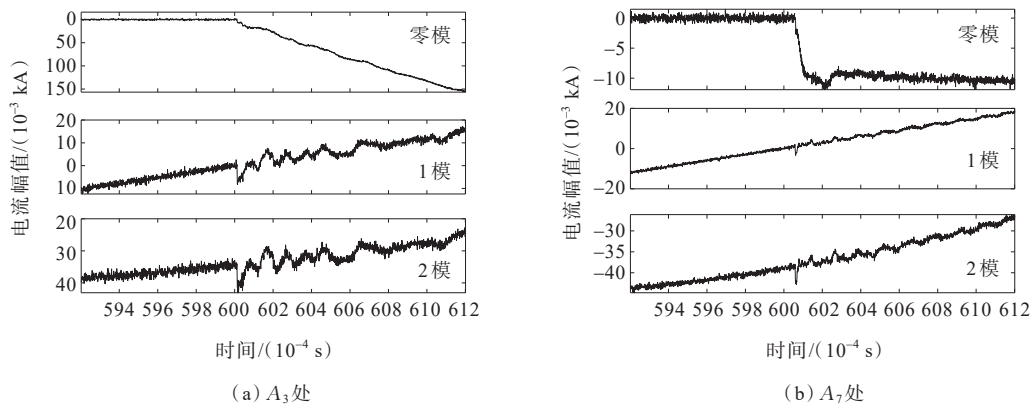


图 11 单相高阻接地故障电流相模变换结果

Figure 11 Phase-mode transformation results for fault current under single-phase high resistance grounding fault

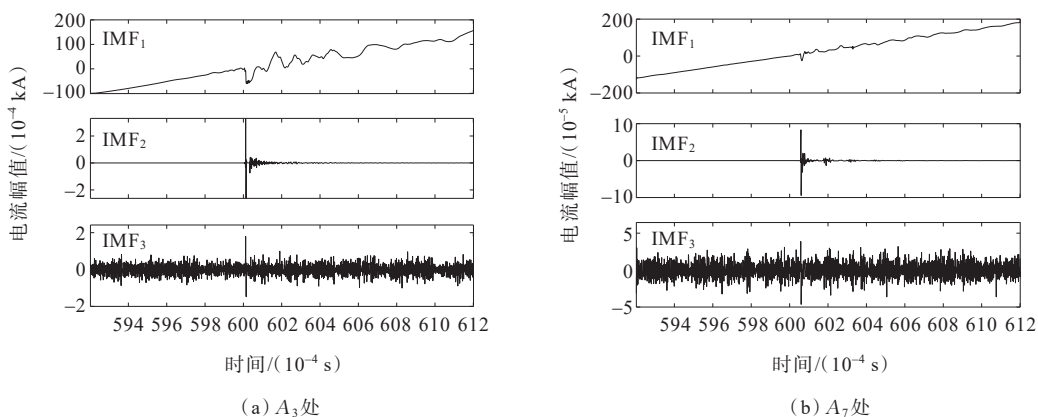


图 12 单相高阻接地故障电流 VMD 分解结果

Figure 12 VMD results for fault current under single-phase high resistance grounding fault

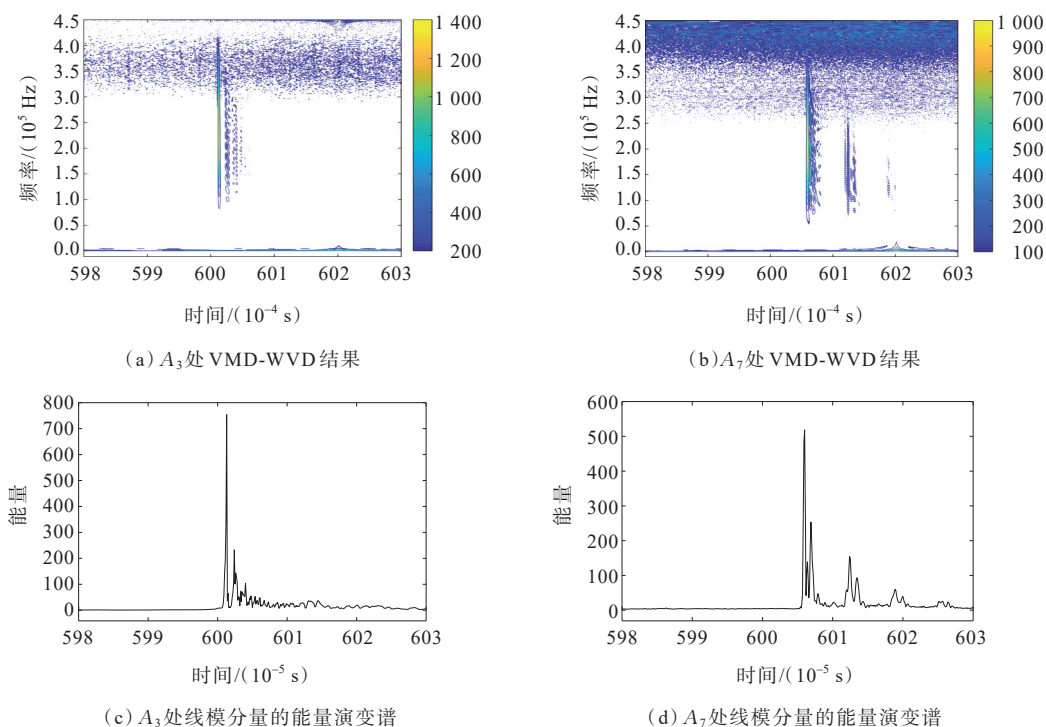


图 13 单相高阻接地故障电流 VMD-WVD 结果及其能量演变谱

Figure 13 Results and energy evolution spectrum of VMD-WVD for fault current under single-phase high resistance grounding fault

从图13可见,即使在单相高阻接地故障情况下,故障电流线模分量的VMD-WVD结果及其能量演变谱依然具有良好的时频聚集性,最终可以得到故障行波到达 A_3 和 A_7 处的时间分别为0.060 011 4、0.060 059 4 s,由于故障类型的改变以及过渡电阻的增加,初始行波波头衰减、变缓导致最终的检测结果出现了一定的误差,但由于误差较小,所以仍可用于故障定位。

3.2 方法对比分析

小波变换具有在时、频域描述信号局部特征的能力,可实现对行波信号的多尺度分析;HHT不需选择固定的基函数,能够对行波信号进行自适应分析,这2种方法在信号分析领域具有诸多优点且便捷易行,已成为行波检测最常用的方法。为此,本文以单相高阻接地情况下 A_3 和 A_7 处获取的加噪故障电流线模分量为例,采用三次B样条小波变换和HHT对该信号进行分析,然后对基于VMD-WVD的方法和传统的小波变换、HHT方法在检测效果上进行对比分析。本文设置小波变换的分解层数为5,相应结果如图14所示,可以看出,由于不同分解尺度中信号的分辨率不同,在低尺度信号中(尺度1、2)存在众多高频分量,初始行波导致的信号突变点较为明显,但尺度越低其中包含的噪声分量也就越多,从而给检测效果带来巨大影响;在高尺度的信号中(尺度3、4、5)虽然噪声分量少,但同时也缺失了大量的行波分量,尺度越高初始行波造成的信号突变越平缓,从而使得提取到的初始行波到达时间越不准确。

本文选用噪声分量较少同时行波分量较丰富的尺度2信号进一步分析,提取的初始行波到达时间分别为0.060 011 8、0.060 051 2 s,相比于基于VMD-WVD的方法误差更大。同时,实际应用中小波变换需要考虑小波基函数和分解层数带来的影响,想要得到较为理想的分解结果,就需要不断调整小波基函数的选择和分解层数的设定,因此,在面对不同特点的故障行波信号时检测适应性有待提高。

HHT的分析结果如图15、16所示(本文此处只列出了EMD结果中前7个IMF分量),可知通过EMD获取的各IMF分量的频段范围逐渐减小,IMF₁分量的频段最高,故障行波信息最丰富,但与此同时噪声分量的影响也最为严重,以致于图16(a)中IMF₁分量的噪声分量已经完全掩盖住行波分量。为此,本文分别对图15(a)中IMF₂分量和图16

(a)中IMF₃分量进一步做HHT处理,结果见图15(b)、16(b),可见HHT中有多个疑似初始行波的突变变量,因此,难以根据HHT结果提取有效的初始行波到达时间。

综上所述,小波变换可以较为准确地实现故障行波检测,提取初始行波到达时间信息,但提取的时间信息误差较大,且需要选对合适的小波基函数和分解尺度;HHT受无用的信号分量影响较大,难以从中找到初始行波信息,无法实现有效的故障行波检测,相比之下基于VMD-WVD的检测方法充分利用了WVD良好的时频聚集性,所提取的初始行波时间信息更为准确,可为故障定位提供更有利的保障。

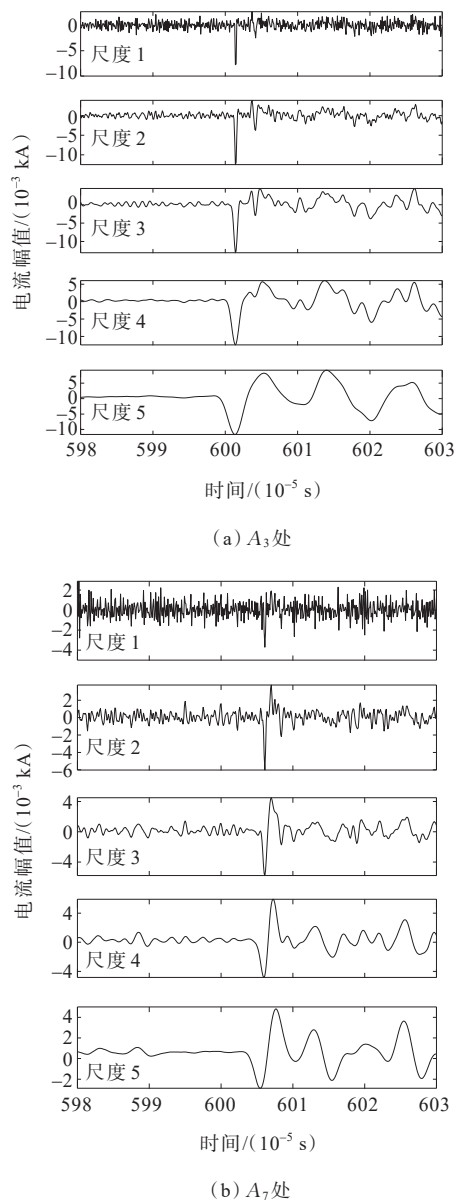
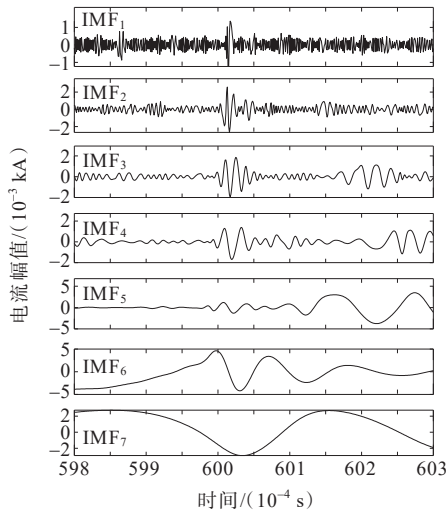
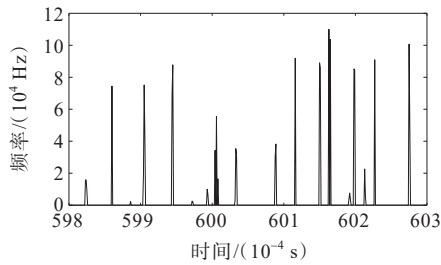


图14 故障电流的小波变换结果

Figure 14 Wavelet transformation results of fault current



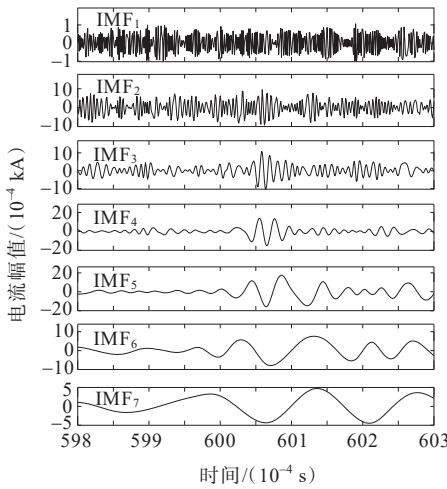
(a) EMD 结果



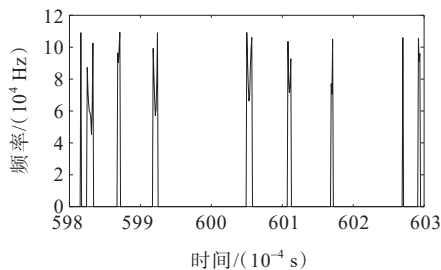
(b) IMF₂分量的 HHT 结果

图 15 A₃处故障电流的 HHT 结果

Figure 15 HHT results of fault current at A₃



(a) EMD 结果



(b) IMF₃分量的 HHT 结果

图 16 A₇处故障电流的 HHT 结果

Figure 16 HHT results of fault current at A₇

4 结语

针对配电网中故障行波信号微弱难以被有效检测的问题,本文利用 WVD 良好的时频聚集性来实现故障行波的准确检测。为此,本文首先介绍了 WVD 的求取方法,分析了 WVD 交叉项的产生及影响,并通过利用改进的 VMD 对行波信号先分解,再分别求取各分量信号 WVD 后叠加得到原始信号的 WVD,由此解决了 WVD 交叉项带来的影响,最后提出了一种基于 VMD-WVD 的故障行波检测方法,通过仿真对比分析,验证了本文所提检测方法的准确性。

参考文献:

- [1] 刘基典.基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[D].长沙:长沙理工大学,2020.
LIU Jidian. Distribution network fault location method based on transient waveform correlation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology,2020.
- [2] 丁嘉,朱永利.图学习与零序分量相结合的风电场集电线单相接地故障定位[J].电工技术学报,2023,38(17): 4701-4714.
DING Jia, ZHU Yongli. A fault localization scheme for single-phase-to-ground faults on collecting lines in wind farms combining graph learning and zero-sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38 (17): 4701-4714.
- [3] 刘宝稳,曾祥君,马宏忠,等.参数不对称配电网的等效模型与接地故障检测方法[J].电力系统自动化,2022, 46(13):159-167.
LIU Baowen, ZENG Xiangjun, MA Hongzhong, et al. Equivalent model and grounding fault detection method for distribution lines with asymmetry parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (13): 159-167.
- [4] 黄鸣宇,祁升龙,芦翔,等.基于轨迹去伪的输电线路故障定位方法[J].电测与仪表,2022,59(7): 85-90.
HUANG Mingyu, QI Shenglong, LU Xiang, et al. A novel trajectory purification based fault location method for transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(7): 85-90.
- [5] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [6] 高正创,李凤婷,解超,等.基于电压行波陡度的柔性直

- 流送出线路快速保护方案[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4):84-93.
- GAO Zhengchuang, LI Fengting, XIE Chao, et al. Fast protection scheme for flexible DC transmission line based on voltage traveling wave steepness[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 84-93.
- [7] 李泽文, 刘基典, 席燕辉, 等. 基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 72-79.
- LI Zewen, LIU Jidian, XI Yanhui, et al. Fault location method for distribution network based on transient waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21):72-79.
- [8] 乔文, 师琛, 李舟, 等. 基于行波折反射特征和网络拓扑的配电网单相接地故障定位方法[J]. 供用电, 2022, 39(1):65-73.
- QIAO Wen, SHI Chen, LI Zhou, et al. Single-phase ground fault location method of distribution network based on traveling wave refraction and reflection characteristics and network topology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 33(1) 6:65-73.
- [9] 杜雪. 基于经验小波变换的混合线路故障定位研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- DU Xue. Research on fault location of hybrid line based on empirical wavelet transform[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [10] 何星, 王宏力, 姜伟, 等. 改进的自适应EEMD方法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(4):869-873.
- HE Xing, WANG Hongli, JIANG Wei, et al. Improved adaptive EEMD method and its application[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(4):869-873.
- [11] 曹赋禄, 赵晋斌, 潘超, 等. 基于DFFT的低压直流线路主动式接地故障定位方法[J]. 中国电力, 2023, 56(4):184-191.
- CAO Fulu, ZHAO Jinbin, PAN Chao, et al. An active ground fault location method for low-voltage DC lines based on DFFT[J]. China Electric Power, 2023, 56(4): 184-191.
- [12] 杨明嘉, 夏成军, 池梓斌, 等. 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19):54-66.
- YANG Mingjia, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Fault location of cross connecting cable based on fault component difference of along current[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 54-66.
- [13] 何明, 王利平, 杨琪, 等. 考虑拓扑关联与信息关联的电网故障解析诊断方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(6):42-49.
- HE Ming, WANG Liping, YANG Qi, et al. Analytical diagnosis method of power grid fault considering topology relationship & information relationship[J]. Smart Power, 2022, 50(6):42-49.
- [14] MAYER J E, BAND W. On the quantum correction for thermodynamic equilibrium[J]. Journal of Chemical Physics, 1947, 15(3):141-149.
- [15] Ville J. Theorie et applications de la notion de signal analytique[J]. Cables et Transmissions, 1948, 2A:61-74.
- [16] 王德真, 王众毅, 王晓东. 基于Wigner-Ville时频分析的行波信号检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3):128-133.
- WANG Dezhen, WANG Zhongyi, WANG Xiaodong. The detection method for traveling wave based on Wigner-Ville time-frequency analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3):128-133.
- [17] 黄博, 李文亮, 徐学帅, 等. 35 kV中压配电网单相接地故障行波定位方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1):58-63.
- HUANG Bo, LI Wenliang, XU Xueshuai, et al. A study on the traveling wave location method of single-phase grounding fault in 35 kV medium voltage distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1):58-63.
- [18] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4086-4093.
- LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [19] 白星振, 宋昭杉, 葛磊蛟, 等. 含分布式电源的复杂配电网相间故障定位等效解耦模型[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 45-53.
- BAI Xingzhen, SONG Zhaoshan, GE Leijiao, et al. An equivalent decoupling model for fault location in complex distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 45-53.
- [20] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [21] 马向南, 杨涛, 王云龙, 等. 基于轻量化神经网络及模型压缩的变压器油色谱故障诊断方法[J]. 供用电, 2023, 40(5):84-91.
- MA Xiangnan, YANG Tao, WANG Yunlong, et al. Transformer dissolved gas fault diagnosis method based on lightweight neural network and model quantization[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 84-91.
- [22] 付华, 刘超, 张松, 等. VMD-SWT联合算法在故障行波检测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 55-61.
- FU Hua, LIU Chao, ZHANG Song, et al. Application of VMD-SWT joint algorithm in fault traveling wave detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(5): 55-61.