

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211020

基于VMD-WVD的故障行波全波形时-频分析方法

曾哲, 邓丰, 张振, 曾祥君, 黄懿菲, 冯思旭, 冯杰

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 受高阻接地故障、过零点故障和高频噪声等因素的影响, 行波波头检测困难, 导致行波保护和故障定位方法可靠性不高。由于故障行波具有全时频特性, 检测一定时间窗内时频域行波波形将包含全景故障信息, 从而实现故障特征可观测。融合故障行波时频域信息, 提出了基于全波形信息的故障行波表现形式。在此基础上, 提出了一种基于变分模态分解(VMD)和Wigner-Ville分布(WVD)的行波时频分析方法。对故障行波进行VMD分解, 得到多个单一成分的固有模态分量。利用Wigner-Ville分布分解各固有模态分量, 将分解结果线性叠加即可得到行波时频域波形, 即行波全波形。利用该方法对模拟和实测行波信号进行分析, 结果表明: 该方法具有良好的噪声抑制作用, 同时具有较高的时频分辨率和聚集性, 实现了行波全波形的真实、准确提取。应用于1:1真型配电网实验平台中, 可实现准确故障定位, 且不受高阻接地故障、过零点故障、噪声干扰和采样率等因素的影响, 有望大大提高行波保护和故障定位方法的可靠性。

关键词: 行波全波形; 变分模态分解; Wigner-Ville分布; 时频联合分析

Time-frequency analysis of a traveling wave based on VMD and WVD

ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, ZENG Xiangjun, HUANG Yifei, FENG Sixu, FENG Jie
(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: It is a challenge to accurately extract a traveling wavefront because of the high resistance grounding fault, zero-crossing fault and high frequency noise, resulting in low reliability of traveling wave-based protection and the fault location method. Since the traveling wave has full time-frequency characteristics, the real-time detection of traveling wave in the time-frequency domain will contain panoramic fault information, which can realize the observability of the fault characteristics. Fusing the traveling wave in the time-frequency domain, a new traveling wave representation in 3D subspace, called full waveform, is proposed. A novel time-frequency analysis method based on variational mode decomposition (VMD) and Wigner-Ville distribution (WVD) is presented. The traveling wave signals are decomposed by VMD, and the mode components are extracted. Wigner-Ville distributions of mode components are computed and the Wigner-Ville of each component signal is added linearly to reconstruct the Wigner-Ville of the original signal. The proposed method is applied to analyze the simulated and practical measured traveling wave signals. The results show that the proposed method can guarantee good noise suppression of the VMD, and the high time-frequency resolution and energy aggregation of the Wigner-Ville distribution. The proposed method produces a true and accurate extraction of the full waveform. Applied to a 1:1 real model experimental platform, it can realize accurate fault location in a way that is not affected by high resistance grounding fault, zero-crossing fault, noise interference and sampling rate. It is expected to greatly improve the reliability of the traveling-wave-based protection and fault location method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077008).

Key words: traveling wave full-waveform; variational mode decomposition (VMD); Wigner-Ville distribution (WVD); time-frequency analysis

0 引言

故障行波具有全时频特性^[1], 一定时间窗内的

时频域行波将携带网络拓扑结构、故障点位置、故障点参数等在内的全景故障信息, 对故障行波进行真实、可靠的时频分析, 可获取各行波特征频带的时间、频率、幅值和相角等在内的全景故障特征^[2-6], 实现检测点故障特征可观测, 有望大大提高行波保护和故障定位方法的可靠性。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077008); 2021年大学生创新创业训练项目(S2021105360028)

然而, 现有的行波检测方法主要关注波头的提取^[7-19]。信号处理技术领域中大量时频分析方法为行波波头检测提供了有力的分析工具, 提升了波头检测精度: 文献[7-8]将小波变换(WT)用于行波波头的辨识, 通过有限个具有明确物理意义的小波变换模极大值, 完整、清晰地刻划了行波波头的故障特征; 文献[9]提出通过经验模态分解法提取故障行波信号的固有模态函数, 再进行 Hilbert 变换, 得到各自的瞬时频率, 由瞬时频率进行行波波头到达时刻的检测; 在此基础上, 文献[10]提出了数学形态学与希尔伯特黄变换(HHT)相结合的方法, 实现了强噪声环境下行波波头检测; 文献[11-12]提出了用 EEMD 和 LMD 方法检测行波波头, 可以有效避免行波波头检测中过包络和欠包络现象; 文献[13]将变分模态分解(VMD)应用于行波波头的检测, 并结合 Teager 能量算子(TEO), 快速跟踪各频带行波突变信号的变化。

以上文献都是通过信号处理技术的改进, 提高故障行波波头检测方法的准确性, 实现了不同频段初始行波波头到达时刻的提取, 但是在实际应用中存在以下问题有待解决: (1) 当发生高阻接地故障或电压过零点故障, 波头突变微弱, 行波波头检测非常困难^[20]; (2) 配电网线路短、分支多、结构复杂, 初始行波波头及后续反射波头混叠严重, 难以准确辨识^[21]; (3) 基于波头的行波检测方法对采样率要求较高, 而高采样率容易受到各种噪声的干扰, 使得行波波头的分辨变得愈加困难^[22]。

故障行波是一个全时频信号, 仅提取波头信息, 将会遗失大量的时频域故障特征, 而行波波头受现场运行因素影响严重, 检测困难, 导致现有的行波保护和故障定位方法可靠性不高。针对以上问题, 本文提出了一种基于 VMD-WVD 的行波全波形时频分析方法, 细致地刻画了一定时间窗内行波全波形在时频域上的变化过程, 实现了行波全波形的真实、准确提取。仿真分析和实验结果表明: 本文方法具有良好的噪声抑制作用, 较高的时频分辨率和聚集性, 凸现故障信息, 真实、准确地反映行波全波形的时频特性, 实现故障特征量可观测; 所提方法应用于所搭建的真型配电网实验平台中, 实现了配电网精确故障定位, 定位绝对误差小于 100 m。

1 基于全波形信息的故障行波表现形式

根据叠加定理, 线路上任何故障可被分解为正常运行分量和故障分量, 该故障分量可视为附加电压源在线路上的暂态激励。故障附加电压源将产生具有阶跃性质的宽频带行波信号^[1], 从故障点产生,

沿线向整个网络传播, 并在波阻抗不连续处产生折射和反射^[23]。

从时域的角度分析, 检测点行波波头是初始故障行波及后续折、反射波, 按照一定时序的叠加^[7]。图 1(b)为一定时间窗 $[0, t_7]$ 内, 各次行波浪涌的传输过程及到达时序。若故障位置不同, 行波传输路径不同, 导致折、反射过程和波头到达时序不同, 检测点行波波头存在明显差异, 如图 2(a)所示。

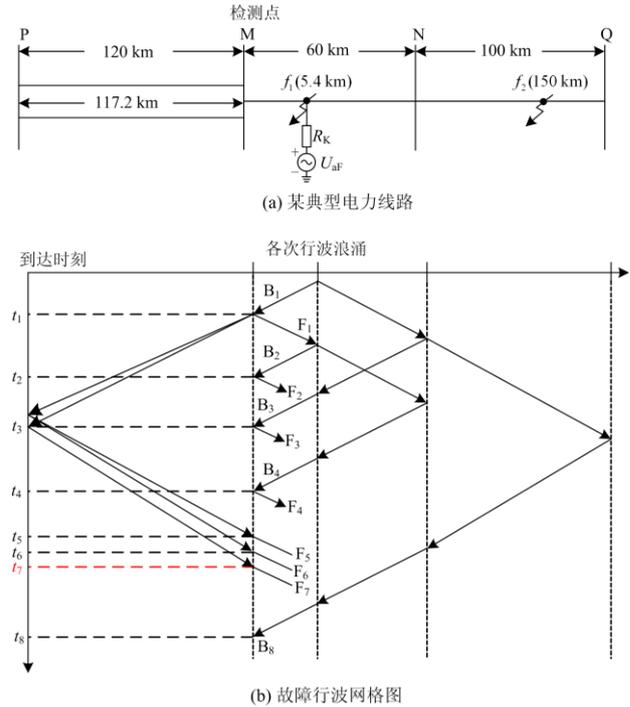


图 1 典型输电线路和波头到达时序

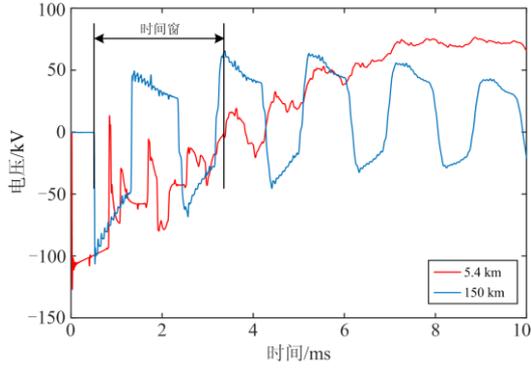
Fig. 1 A typical transmission line and initial traveling wave arrival sequence

从频域的角度分析, 故障行波拥有宽广频带, 波阻抗、传输函数和折、反射系数均是频率的函数, 如式(1)—式(5), 受传输函数、折反射系数等因素的影响, 传输过程中行波各频率分量幅值衰减程度及相位变化不同; 高频分量衰减快, 低频分量衰减慢; 传输距离越远, 衰减越大; 在波阻抗不连续点, 不同频率分量的折、反射程度不同, 因此对于不同故障点, 变电站检测到的各频率分量空间分布不同。如图2(b)所示, 不同故障点, 变电站M检测到的频率分布存在差异。

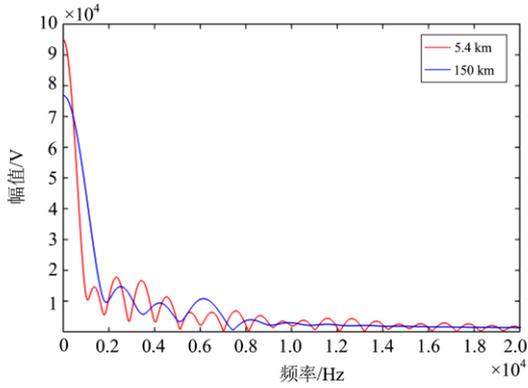
$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (1)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (2)$$

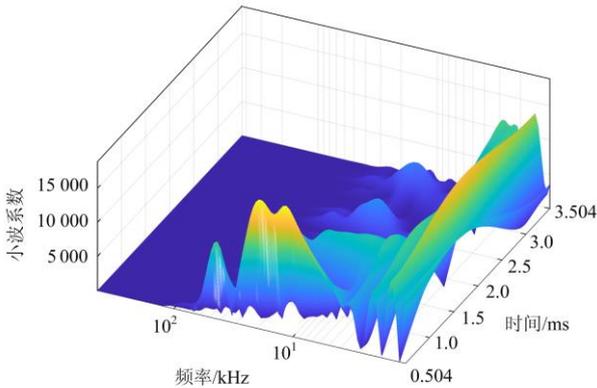
$$A(\omega) = e^{-\gamma x} \quad (3)$$



(a) 不同故障点的行波时域波形



(b) 不同故障点的行波频域波形



(c) 一定时间窗内行波时-频域波形

图 2 故障行波时-频域波形

Fig. 2 Traveling wave in time-frequency domain

$$H_z(\omega) = \frac{2Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (4)$$

$$K_f(\omega) = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (5)$$

式中: $Z_c(\omega)$ 为波阻抗; $A(\omega)$ 为传输函数; $\alpha(\omega)$ 、 $\beta(\omega)$ 为衰减系数; $H_z(\omega)$ 为折射系数; $K_f(\omega)$ 为反射系数; R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 为线路分布参数。

综上所述, 故障行波具有时域和频域的传输和

传变特性, 包含大量时域和频域信息, 可反映网络拓扑结构、行波传输路径、故障点参数等丰富的故障信息。对比图 2(a)和图 2(c)可知, 行波时域波形隐藏了大量频域故障信息。

定义一定时间窗内故障行波时-频域联合波形为故障行波全波形^[2]。对故障行波进行真实、可靠的时频分析, 得到行波全波形, 可获得各行波特征频带的时间、频率、幅值和相角等在内的全景故障特征, 实现故障行波可观测, 有利于多尺度故障信息融合并构建更加可靠与准确的故障行波保护与定位方案。因此, 本文提出的基于 VMD-WVD 的故障行波时频分析方法具有重要的理论研究和实际应用价值。

2 VMD-WVD 时频联合分析方法

2.1 变分模态分解

变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)是一种在变分问题中迭代搜索模型最优解的非递归信号分解方法。根据被分解信号的频域特征, VMD 算法能够自适应地将多分量信号分解为一组有限带宽的固有模态分量 IMFs, 每个 IMF 均有一个中心频率, 且互不相关。VMD 分解过程主要包含两个部分: 变分约束问题的建模和求解。

假设各固有模态分量叠加之和等于原始输入信号 $f(t)$, 为使得各模态的带宽之和最小, 可建立对应的约束变分模型为

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \sum_k u_k = f$$

式中: $\{u\} = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_k\}$ 表示分解得到的 K 个固有模态分量; $\{\omega\} = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k\}$ 表示各模态分量的中心频率; 其中 $k=1, 2, 3, \dots, K$ 。

通过引入二次惩罚因子和 Lagrange 算子, 使上式变为非约束性变分问题, 形成增广拉格朗日 (Lagrange) 函数, 其表达式为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \{\lambda\}) =$$

$$\alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \quad (7)$$

$$\left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle$$

式中: α 是二次惩罚因子; λ 是 Lagrange 算子。

首先将上述问题从时域 t 转换到频域 ω , 再利用交替方向乘法 (Alternate Direction Method of

Multipliers, ADMM)迭代更新 \hat{u}_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 与 λ^{n+1} , 求取式(7)增广 Lagrange 函数的“鞍点”, 即式(6)所列约束模型的最优解。分解得到的固有模态分量 u_k 及其中心频率 ω_k 的频域表达式分别为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega) / 2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (8)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (9)$$

式中: n 为算法迭代求解的次数; $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为当前剩余量 $\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$ 的维纳滤波; ω_k^{n+1} 为当前固有模态分量的中心频率。对 $\{\hat{u}_k(\omega)\}$ 进行傅里叶逆变换, 其实部为模态分量的时域表达式 $\{u_k(t)\}$ 。

不同于 EMD、LMD 等递归分解算法, 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, 可有效避免信号模态混叠, 抑制端点效应, 解决相近频率分量分离困难的问题, 且 VMD 具有很好的噪声抑制作用。

2.2 Wigner-Ville 分布

Wigner-Ville 分布 (Wigner-Ville Distribution, WVD) 是一类双线性时频分布函数, 其不受海森伯格不确定性中时域与频域分辨率互相制约的限制, 能清晰展现信号在时频域上的分布规律。在非平稳信号的处理中原信号所含能量等于该信号 Wigner-Ville 分布所含的总能量。因此, 其时频分布具有清晰的物理意义。

对于连续时间信号 $x(t)$, 其 Wigner-Ville 分布为

$$WVD_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

式中: $x^*(t)$ 为信号 $x(t)$ 的共轭复数; $x(t + \tau/2)x^*(t - \tau/2)$ 为信号的瞬时相关函数; τ 为时间因子。

由式(10)可知, 经过 Wigner-Ville 时频分析, 多分量信号的时频分布将产生虚假的交叉干扰项。且每两个单分量信号会产生一个交叉干扰项, 对准确提取信号时频特征造成干扰, 影响其在工程应用中的效果。

2.3 VMD-WVD 时频联合分析原理

Wigner-Ville 分布出现频率混叠和干扰现象的主要原因是被分析信号不是单分量, 而是由几个或

多个单分量的信号叠加而成的多分量信号。交叉干扰项产生的原因在于双线性核函数的引入, 使得多个信号分量在时频域平面内产生耦合作用。

为解决 Wigner-Ville 分析中存在的交叉干扰问题, 本文提出 VMD-WVD 分析方法对行波全波形进行时频域分析, 如图 3 所示。

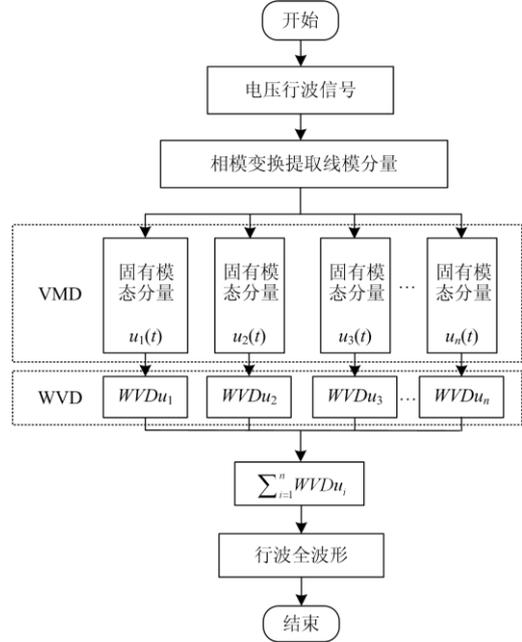


图 3 VMD-WVD 时频分析流程图

Fig. 3 Flow chart of the time-frequency analysis based VMD-WVD

具体实施步骤如下:

(1) VMD 分解故障行波信号。提取故障行波线模分量, 初始化 \hat{u}_k^1 、 ω_k^1 、 λ^1 , 根据式(8)、式(9)更新 \hat{u}_k 和 ω_k , 保存产生的 n 个固有模态分量 $u_i(t)$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

(2) Wigner-Ville 分析。根据式(10), 对 n 个固有模态分量分别进行 Wigner-Ville 分析, 保存各个固有模态分量的 Wigner-Ville 分布。

(3) 将每一个固有模态分量 $u_i(t)$ 的 Wigner-Ville 分布线性叠加, 得到故障行波的时频分布图, 即行波全波形, 表达式为

$$WVD_x(t, f) = \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^{+\infty} u_i(t + \frac{\tau}{2}) u_i^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (11)$$

本文方法不仅可以抑制交叉干扰项, 还具有良好的噪声抑制作用、较高的时频分辨率和时频聚集性, 真实、准确地刻画并展现行波全波形时-频域特征。

3 时-频联合分析方法验证

3.1 模拟行波信号的时频分析

故障行波是一种典型的多分量叠加的非平稳信号。为了验证本文所提故障行波时-频分析方法的有效性, 构造故障行波仿真模拟信号。该模拟信号由波头 r_1 、 r_2 和高斯分布噪声 v_k 叠加组成, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} z_k = r_1 + r_2 + v_k \\ r_1 = A_1 e^{-(t-t_0)/\tau} \sin(2\pi f_1 t) \\ r_2 = A_2 [e^{-1.3(t-t_0)/\tau} - e^{-2.2(t-t_0)/\tau}] \sin[2\pi f_2 (t-t_0)] \\ v_k \rightarrow N(\mu, \sigma^2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_1 和 r_2 为单指数和双指数衰减振荡函数, 用来模拟高频初始行波和后续行波反射波, 考虑到初始行波传输和传变过程中的色散现象, f_1 和 f_2 取不同频率, 分别为 10 kHz 和 3 kHz; A_1 和 A_2 分别为 r_1 和 r_2 的幅值; μ 为高斯分布的均值, σ^2 为高斯分布的方差, $\mu=0$, $\sigma^2=1$; t_0 为行波波头到达检测点的起始时刻; τ 为衰减时间常数。

仿真模拟信号中各分量的参数如表 1 所示, 其中采样频率为 $f_s=1$ MHz。

表 1 仿真模拟信号中各分量参数

Table 1 Parameters of the simulated traveling wave

分量	A_i	f_i/kHz	t_0/ms	τ/ms
r_1	100	10	2	0.2
r_2	50	3	5	0.4

染噪后的仿真模拟行波信号如图 4 所示, 单一采用 Wigner-Ville 方法进行时频分析, 分析结果如图 5 所示。可以看出: 仿真模拟行波信号 z_k 的 WVD 有两个自项, 其时频分布和模拟信号 r_1 、 r_2 的时间位置、频率中心(t_i, f_i)相同, 分别为(2 ms, 1×10^4 Hz)、(5 ms, 0.3×10^4 Hz); z_k 的 WVD 含有一个交叉干扰项, 其时频位置在两个自项的中心连线上, 位置大致在 $(\frac{t_1+t_2}{2}, \frac{f_1+f_2}{2}) = (3.5 \text{ ms}, 0.65 \times 10^4 \text{ Hz})$, 每一个交

叉项都位于产生它的自项的几何中心, 其振荡频率取决于两个自项的时间和频率距离, 两个自项距离越远, 其衰减速度越快, WVD 的交叉项能量越小^[24], 如图 5 所示, 由于自项距离较近, 从等高线的颜色可以看出交叉干扰项能量要大于自项; 由于原始信号中噪声的干扰, 分解后的信号受噪声干扰严重。

为抑制 Wigner-Ville 分解中存在的交叉干扰项, 突显所提方法对行波信号优异的频域自适应剖分能力和噪声抑制作用, 本文对上述染噪的仿真模拟信号分别进行 VMD-WVD 和 EMD-WVD 分解, 并比

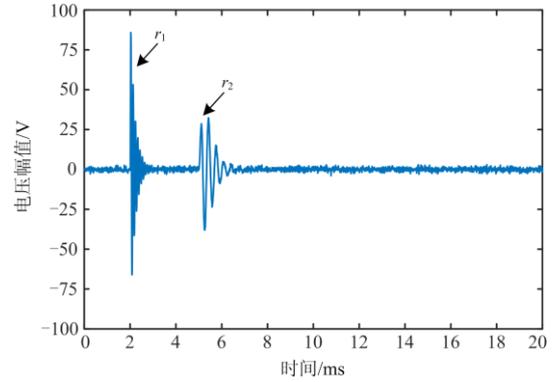


图 4 染噪后的模拟行波信号

Fig. 4 Simulated traveling wave with noise

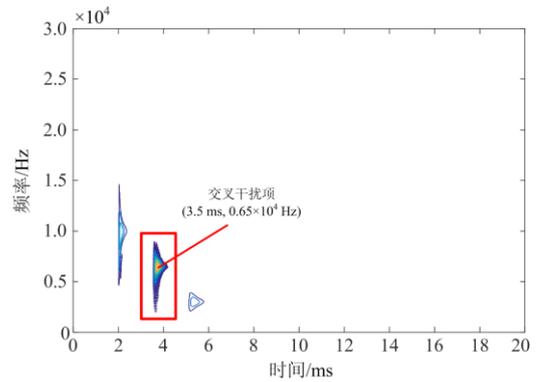


图 5 染噪后模拟行波信号的 Wigner-Ville 分布

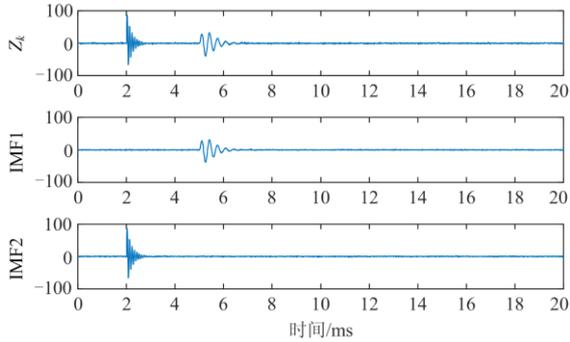
Fig. 5 Wigner-Ville distribution of the simulated traveling wave

较两种方法的时频分析效果。如图 6(a)所示, 原始信号经 VMD 分解, 得到 2 个 IMF 分量, 与原始信号中波头 r_1 、 r_2 相对应。如图 6(b)所示, 原始信号经 EMD 分解, 得到 10 个 IMF 分量。在这些 IMF 分量中存在较多伪分量, 无法与原始模拟信号的各组成部分一一对应。这是由于信号中表征故障特征的频率分量的中心频率和带宽均不能确定, 且 EMD 采用递归分解模式, 使得筛分过程中包络线估计误差不断延续至下一模态分量, 导致模态混叠现象。而 VMD 采用迭代求取各模态分量的频带及中心频率的最优解, 对原始信号的频域特性完成自适应分离, 有效避免模态混叠现象。

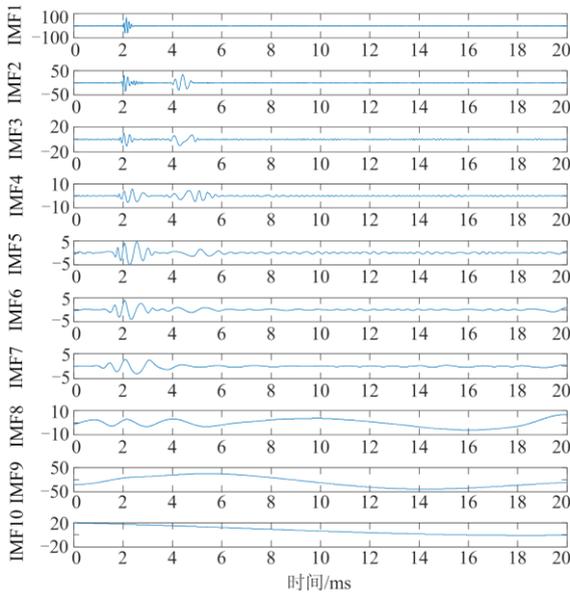
模拟行波信号的 VMD-WVD 分布和 EMD-WVD 分布分别如图 6(c)和图 6(d)所示。从图 6(c)可以清楚地看到 2 ms 附近的 10 kHz 和 5 ms 附近的 3 kHz 两个行波波头频率成分, 与原始信号成分组成一致, VMD-WVD 分布消除了 Wigner-Ville 分解中产生的交叉干扰项, 具有良好的噪声抑制作用、较高的时频分辨率和时频聚集性; 由图 6(d)可见, 各固有模

态分量线性叠加后存在严重的模态混叠，导致无法准确识别行波波头频率成分及波头主要成分出现的时刻。

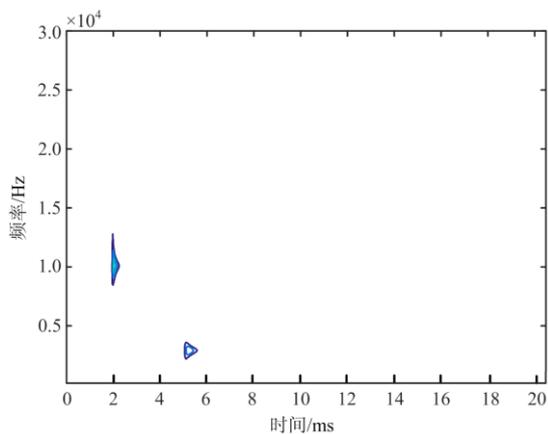
因此，VMD-WVD 分布更适合具有全时频特性的行波全波形时频分析。



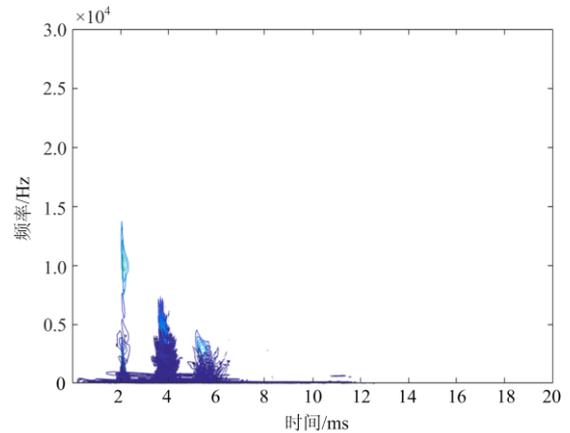
(a) VMD分解结果



(b) EMD分解结果



(c) VMD-WVD时频分布



(d) EMD-WVD时频分布

图6 染噪后模拟行波信号的EMD-WVD和VMD-WVD分布
Fig. 6 EMD-WVD distribution and VMD-WVD distribution of the simulated traveling wave

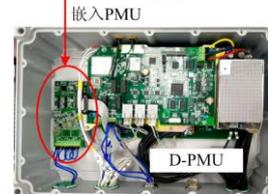
3.2 实测行波信号的时频分析

为进一步验证本文时-频分析方法的真实、准确性，在搭建的真型实验平台中实测行波波头，通过本文方法获得时频域行波全波形。

本文研发了故障行波采集装置，采样率最高可达4 MHz，如图7所示；在实验室搭建了真型配电网实验平台，采用电力电缆搭建配电线路，实现行波过程的模拟，如图8所示。



(a) 适用于输电网的故障行波采集装置



(b) 适用于配电网的嵌入式行波采集模块

图7 故障行波采集设备

Fig. 7 Traveling wave acquisition device



图 8 真型故障行波定位实验平台

Fig. 8 Real model of the traveling wave-based fault location experimental platform

图 9 为真型配电网实验平台中一条馈线的拓扑结构图, 在分支 d-5 上距离分支节点 d 600 m 处设置单相接地故障 $f_1(50 \Omega/90^\circ)$, 采样率取 1 MHz, 在检测点 1#检测到的故障行波波形如图 10(a)所示; 对图 10(a)的时域波形进行 VMD-WVD 分析, 得到图 10(b)所示实际故障行波的 VMD-WVD 时-频分布图, 从时-频分布图可以清晰地得到故障行波的时-频联合分布, 时域图中故障初始行波波头的到达时刻与时-频分布图中的行波波头到达时刻完全吻合。

采用文献[25]提出的基于行波时-频特征匹配的单端行波定位方法, 在图 9 所示网络拓扑结构中设置不同的故障参数: 故障点位置、故障过渡电阻、故障初相角和采样率, 验证本文时频分析方法的真实、准确性。

- (1) 故障点位置: f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 , 具体位置见图 9 标注 ($50 \Omega/90^\circ/1 \text{ MHz}$);
- (2) 故障过渡电阻: 50Ω , 500Ω , $1 \text{ k}\Omega$, $2 \text{ k}\Omega$, $5 \text{ k}\Omega$ ($f_1/90^\circ/1 \text{ MHz}$);
- (3) 故障初相角: 90° , 45° , 30° , 15° , 3° ($f_1/50 \Omega/1 \text{ MHz}$);
- (4) 采样率: 4 MHz , 2 MHz , 1 MHz , 0.5 MHz , 0.2 MHz ($f_1/50 \Omega/90^\circ$)。

首先利用所提时-频联合分析方法, 提取真实、准确的行波全波形, 再依据全景故障特征的差异性和相似性实现精确故障定位^[25], 定位结果如表 2 所示。

表 2 不同故障参数下的定位结果

Table 2 Fault location results under different fault parameters by using VMD-WVD

故障点位置	定位结果/m	绝对误差/m	过渡电阻	定位结果/m	绝对误差/m	故障初相角	定位结果/m	绝对误差/m	采样率/MHz	定位结果/m	绝对误差/m
f_1	647	47	50Ω	647	47	90°	647	47	4	639	39
f_2	588	38	500Ω	641	41	45°	654	54	2	644	44
f_3	75	25	$1 \text{ k}\Omega$	558	42	30°	551	49	1	647	47
f_4	1 734	34	$2 \text{ k}\Omega$	648	48	15°	543	57	0.5	652	52
f_5	分支节点 b	20	$5 \text{ k}\Omega$	669	69	3°	673	73	0.2	665	65

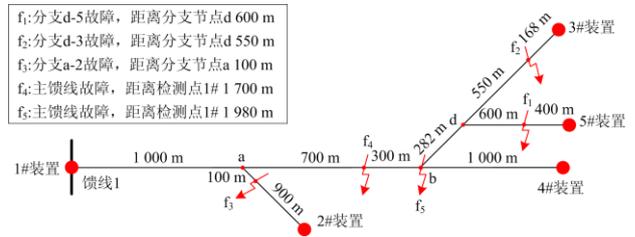
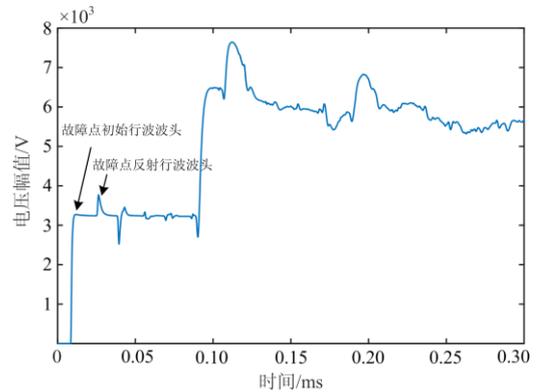
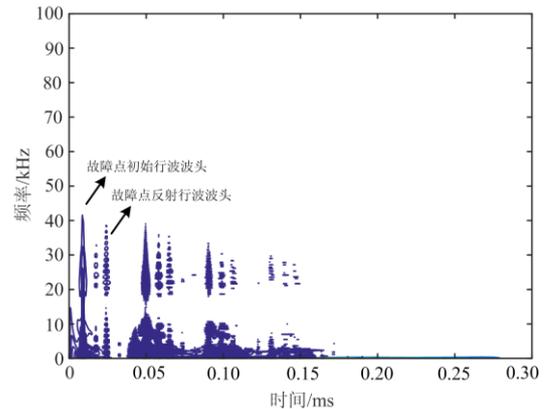


图 9 真型配电网实验平台拓扑结构图

Fig. 9 Topology structure of the real model experimental platform



(a) 检测点1#检测的故障行波时域波形



(b) 等高线图

图 10 实际故障行波的 VMD-WVD 时-频分布图

Fig. 10 VMD-WVD distribution of the practical measured traveling wave

大量实验结果表明:本文所提时-频联合分析方法可真实、准确地提取时频域行波全波形,展现行波全景故障特征,可有效检测高阻接地故障 $5\text{ k}\Omega$ 以内、故障初相角低至 3° 的单相接地故障,对采样率的要求较基于波头的行波定位方法要低得多,当采样率设置为 0.2 MHz 时仍然能实现配电网精确故障定位,定位绝对误差小于 100 m 。

4 结论

(1) 提出了一种基于 VMD-WVD 分布的行波全波形时频分析方法,所提方法有效抑制了 Wigner-Ville 分布中存在的交叉干扰项,具有良好的噪声抑制作用、较高的时频分辨率和时频聚集性,有效克服了现有时频分析方法,如 Wigner-Ville 分布、EMD-WVD 分布等存在的缺陷,可真实、准确地提取行波全波形,凸显行波时频特性,对全频带行波全波形的时频分析具有其他方法无可比拟的优势。

(2) 通过细致刻画并展现信号在时-频域上所发生的变化过程,获得各行波特征频带的时间、频率、幅值和相角等在内的全景故障信息,实现行波全景故障特征可观测;将所提方法应用于真型配电网实验平台,定位绝对误差小于 100 m ,且不受故障过渡电阻、故障初相角和采样率等因素的影响,有望大大提高基于行波的保护和故障定位方法的可靠性。

(3) 下一步为了增强故障特征差异性,拟研究行波信号特征在时频联合分布的最优表达形式;研究基于行波全波形最优表达形式的电网保护和故障定位方法,提高现有方法的可靠性和准确性。

参考文献

- [1] 董新洲,雷傲宇,汤兰西,等.行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J].电力系统自动化,2018,42(19):184-191.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.
- [2] 邓丰,曾祥君,李泽文,等.故障行波全波形时-频特性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3231-3243.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, LI Zewen, et al. Research on characteristics of traveling wave full-waveform in the time and frequency domains[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3231-3243.
- [3] DENG Feng, ZENG Xiangjun, TANG Xin, et al. Travelling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission lines using three-dimensional absolute grey incidence degree[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114.
- [4] BORGHETTI A, BOSETTI M, NUCCI C A, et al. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 3139-3146.
- [5] COZZA A, HE Shaoyin, XIE Yanzhao. Impact of propagation losses on fault location accuracy in full transient-based methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 383-396.
- [6] HE Shaoyin, COZZA A, XIE Yanzhao. On the spatial resolution of fault-location techniques based on full-fault transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1527-1540.
- [7] DONG Xinzhou, GE Yaozhong, HE Jiali. Surge impedance relay[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1247-1256.
- [8] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.输电线路暂态电流行波的故障特征及其小波分析[J].电工技术学报,1999,14(1):59-62.
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Fault characteristic of transient current travelling waves and its analysis with wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(1): 59-62.
- [9] 张小丽,曾祥君,马洪江,等.基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J].电力系统自动化,2008,32(8):64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [10] 束洪春,程春和,赵文渊,等.形态学与 HHT 检测相结合的行波波头准确标定方法[J].电力自动化设备,2009,29(7):1-7,37.
SHU Hongchun, CHENG Chunhe, ZHAO Wenyuan, et al. Accurate traveling-wave front detection based on morphology and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 1-7, 37.
- [11] 王晓卫,高杰,吴磊,等.柔性直流配电网高阻接地故障检测方法[J].电工技术学报,2019,34(13):2806-2819.
WANG Xiaowei, GAO Jie, WU Lei, et al. A high impedance fault detection method for flexible DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2806-2819.
- [12] 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 Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. 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.
- [13] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [14] 席燕辉, 胡康, 王康. 基于自适应卡尔曼滤波残差分析的雷击故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 30-39.
- XI Yanhui, HU Kang, WANG Kang. Lightning strike fault location based on adaptive Kalman filter residual analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 30-39.
- [15] 孙沛瑶, 林圣, 刘磊, 等. 融合行波时频信息的 HVDC 线路雷击点与短路故障点不一致时的定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 88-95.
- SUN Peiyao, LIN Sheng, LIU Lei, et al. Location method for HVDC transmission line under lightning stroke fault with short-circuit fault position different from lightning position based on time-domain and frequency-domain information of traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 88-95.
- [16] 赵海龙, 王鑫红, 高昌龙. 基于 FIMD 和 Hilbert 变换的高压输电线路行波故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 77-82, 89.
- ZHAO Hailong, WANG Xinhong, GAO Changlong. Traveling wave fault location method for high voltage transmission lines based on FIMD and Hilbert transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 77-82, 89.
- [17] FENG Deng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210.
- [18] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18-24.
- FU Hua, LIU Gongquan, XING Liang. Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18-24.
- [19] 李舟, 乔文, 谈震, 等. 基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 33-42, 51.
- LI Zhou, QIAO Wen, TAN Zhen, et al. Fault location method for hybrid lines based on traveling wave characteristic frequency in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 33-42, 51.
- [20] LIU Yu, WANG Binglin, ZHENG Xiaodong, et al. Fault location algorithm for non-homogeneous transmission lines considering line asymmetry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2425-2437.
- [21] 戴锋, 王政, 程孟晗, 等. 考虑短线路折反射的配电网故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 122-130.
- DAI Feng, WANG Zheng, CHENG Menghan, et al. Study on fault location considering refraction and reflection of short lines in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 122-130.
- [22] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
- ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25.
- [23] 陈羽, 刘东, 徐丙垠. 基于广域网络信息的行波测距算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 65-70.
- CHEN Yu, LIU Dong, XU Bingyin. A travelling wave location algorithm based on wide area network information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 65-70.
- [24] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [25] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-10-20

作者简介:

曾 哲(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1009133643@qq.com

邓 丰(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统微机保护、故障定位; E-mail: df_csust@126.com

冯 杰(2001—), 男, 通信作者, 本科在读, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 1982578998@qq.com

(编辑 魏小丽)