

引用格式:陈永延,骆亮,梅悦,等.基于SFFT的宽频振荡参数快速辨识算法[J].电力科学与技术学报,2026,41(2):314-324.

Citation: CHEN Yongyan, LUO Liang, MEI Yue, et al. Fast identification algorithm for wide-band oscillation parameters based on SFFT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(2): 314-324.

基于 SFFT 的宽频振荡参数快速辨识算法

陈永延¹, 骆亮¹, 梅悦², 夏莹¹, 陆莹¹, 潘中昊², 冯双²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着“双碳”战略目标推进,高渗透率电力电子设备引发的振荡越来越呈现出宽频域、强时变、多模态特性。为监测此类振荡,新型宽频量测装置的采样频率也随之大幅提升,传统快速傅立叶参数辨识方法面临辨识精度和辨识速度之间的矛盾。为此,提出基于稀疏傅里叶变换的多模态宽频信号振荡参数快速辨识算法。先利用电力系统宽频信号在频域的稀疏特性,将多个非零频域系数分桶定位至有限个桶,实现运算优化。再采用多重迭代的方法,对宽频信号进行多次的频谱重排和定位。在保证较高辨识精度的前提下,有效提升辨识过程的计算效率。最后,采用实例对所提算法进行了验证。研究结果表明:所提算法在高采样率场景下对多模态宽频信号的辨识具备较好的精确性、快速性和鲁棒性。

关键词:稀疏傅里叶变换;频谱重排;加窗滤波;分桶定位;估计循环

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.02.028 中图分类号: TM712; TM614 文章编号: 1673-9140(2026)02-0314-11

Fast identification algorithm for wide-band oscillation parameters based on SFFT

CHEN Yongyan¹, LUO Liang¹, MEI Yue², XIA Ying¹, LU Ying¹, PAN Zhonghao², FENG Shuang²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As the “dual-carbon” strategy goals are implemented, the oscillations induced by high-penetration power electronic devices are increasingly characterised by the wide frequency domain, strong time-varying and multimodality. The sampling frequency of modern wide-band measurement devices has been substantially increased accordingly to monitor such oscillations. Traditional fast Fourier transform (FFT) parameter identification methods face a contradiction between identification accuracy and identification speed. To this end, a fast identification algorithm for oscillation parameters of multi-modal wide-band signals based on the sparse Fourier transform (SFT) is proposed. Firstly, by utilizing the frequency-domain sparsity of wide-band signals of power systems, multiple non-zero frequency-domain coefficients are hashed into a limited number of buckets to realize computational optimization. Then, multiple iterations are adopted to perform multiple times of spectral rearrangement and localization for wide-band signals. On the premise of maintaining high identification accuracy, the computational efficiency of the identification process is effectively improved. Finally, case studies are employed to verify the proposed algorithm. The results show that the proposed method achieves high precision, fast processing, and improved robustness in identifying multi-modal wide-band signals under the scenarios of high sampling rates.

Key words: sparse fast Fourier transform; spectral rearrangement; windowed filtering; bucketization-localization; estimation loop

在新型电力系统中,随着新能源装机容量的持续攀升与柔性直流输电的不断推广,电力电子设备

在系统中的渗透率显著提高^[1-2]。这些设备与设备、设备与电网之间的交互作用使宽频振荡频发,严重

收稿日期:2025-07-17;修回日期:2025-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377084);中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司科技项目(EV11011W)

通信作者:陆莹(1981—),女,硕士,正高级工程师,主要从事海上风电等新能源电源接入、远距离输电电气系统设计与研究;

E-mail: luying@gedi.com.cn

威胁系统的安全稳定运行^[3-8]。宽频振荡信号的参数能为振荡的溯源、抑制提供参考^[9-10]。对其进行快速精确的参数辨识对抑制宽频振荡具有重要的实际意义。

现有的电力系统信号辨识算法主要包括傅里叶变换、模态分解和谱估计等。傅里叶变换类算法是基于离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)的辨识算法,主要包括快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法及其改进算法。FFT计算量小,易于硬件实现。但在实际系统中,该算法无法实现同步采样,存在频谱泄露和栅栏效应的问题^[11-14]。目前,一般通过在时域中选用适合的窗函数与在频域中进行插值来对FFT的计算结果进行修正^[15-17],改善其频谱泄露和栅栏效应。文献[18]提出了一种基于主瓣宽度的多谱线插值算法,利用多谱线插值,提高参数辨识的精度,并采用主瓣宽度和采样率来确定参与运算的谱线根数,降低算法计算量。文献[19]提出了一种基于Nuttall窗和双谱线插值的算法,先使用4项3阶的Nuttall窗函数,再使用双谱线插值对其辨识结果进行修正,该算法利用Nuttall窗旁瓣电平低、衰减快的特点来抑制频谱泄露,提高了参数辨识精度。文献[20]提出了一种基于Slepian和Parzen互卷积窗双谱线插值FFT算法,该算法利用互卷积窗函数良好的旁瓣特性来抑制频谱泄露,并使用双谱线插值来提高参数辨识的准确性,该算法可有效检测弱幅值的分量。

模态分解类算法也存在频谱泄露、边界效应和模态混叠的问题,常须结合其他算法实现对信号参数的分析^[21]。文献[22]提出了一种基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)与动态相量模型的宽频信号辨识算法,通过VMD提取宽频信号的模态分量和中心频率,分析基波动态变化,并采用DFT跟踪基波频率,将相关信息代入动态相量模型,实现参数辨识,较好地改善了模态混叠和虚假模态的现象。文献[23]提出了将VMD和压缩感知相结合的宽频振荡监测算法,该改进的VMD算法能自适应模态分解数,滤除噪声并辨识振荡信号的参数信息,通过压缩感知上传振荡信息。希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)将经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和Hilbert变换结合。其中,EMD先将信号分解为一系列固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),再对这些IMF进行Hilbert变换,从而得到信号的瞬时幅度、频率和相位信息,并对其进行自适应信号

分解^[24],实现对时变信号的分析。该方法常用于低频振荡分析,其对高频信号的分析能力较弱^[25-26]。

谱估计类主要有Prony算法^[27]、旋转不变参数估计(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)等。Prony算法利用复指数的线性组合来拟合采样信号的数学模型,可直接辨识信号参数,但其易受噪声的影响。文献[28]通过分析现场数据,建立了动态宽频分量的拟合数学模型,使用改进的Prony算法,实现短时间窗和动态条件下的宽频信号的准确辨识。ESPRIT估计是一种空间谱估计算法,其基于特征值分解划分子空间,利用旋转不变特性,建立矩阵方程,通过矩阵方程的求解获得信号的参数^[29-30]。ESPRIT估计的抗噪能力强于Prony算法的抗噪能力,但其信号子空间和噪声子空间的划分仍易受噪声影响。

随着新型宽频量测采样频率的不断提升,若要获得较高的参数辨识精度,所需的时间窗也须延长,算法计算量也随之大幅提高,这导致算法的运行时间显著增加。类似问题在其他领域也普遍存在。文献[31]采用稀疏傅里叶变换(sparse fast Fourier transform, SFFT)捕获全球导航卫星系统信号,该算法大幅降低了计算复杂度,提升了资源受限接收设备的捕获效率。文献[32]采用SFFT算法,对风电机组齿轮箱的振动信号进行分析,不仅显著提升了算法计算效率,还可有效提取关键频率特征,实现了设备在线监测和早期故障预警。

为解决传统参数辨识方法在宽频信号领域面临的由高采样频率带来的低辨识精度的问题,实现宽频信号的快速、精确辨识,本文提出基于SFFT的多模态宽频信号振荡参数快速辨识算法。所提算法先利用宽频信号在频域上的稀疏性,将多个频域系数分桶定位至有限个桶,实现运算优化。再采用平坦窗函数滤波,将傅里叶系数的能量集中在少数几个有效频率点上,降低其他频率的干扰,保证后续估计的准确性。然后,采用多次循环、不同重排参数,得到定位和估计结果,打乱傅里叶系数的位置,避免多个有效系数落入同一个桶中。最后,采用数值仿真试验,验证所提算法在不同时间窗长、稀疏度和信噪比条件下对辨识多模态宽频信号的精确性、快速性与鲁棒性。

1 宽频振荡机理

在“双碳”战略目标下,大量新能源发电和电力电子设备接入电网,其交互作用极易引发电力系

统宽频振荡,该新型电力系统结构及宽频振荡特征如图1所示。该系统使用了永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)和双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)。对该复杂电力系统进行一般性建模,则有

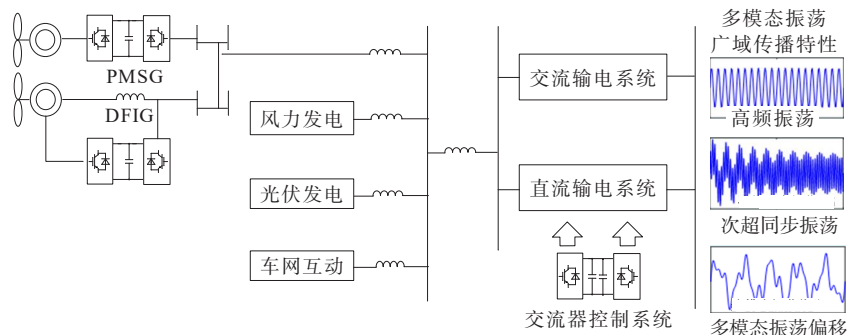


图1 新型电力系统结构及宽频振荡特征

Figure 1 Structure of new power systems and wide-band oscillation characteristics

在不考虑外部输入的前提下,振荡发生时,在系统运行点处对式(1)线性化处理,得到状态向量的高阶微分方程:

$$\Delta \dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{J} \Delta \mathbf{y}(t) \quad (2)$$

式中, $\Delta \mathbf{y}(t)$ 为状态向量 $\mathbf{y}(t)$ 的增量; \mathbf{J} 为雅可比矩阵。

求解式(2)的雅可比矩阵 \mathbf{J} 的特征值,即

$$\det(\mathbf{J} - \lambda \mathbf{E}) = 0 \quad (3)$$

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$$

式中, \mathbf{E} 为单位矩阵; λ 为雅可比矩阵 \mathbf{J} 的特征值; λ_i 为矩阵 \mathbf{J} 的第 i 个特征值; σ_i 为第 i 个衰减因子(阻尼比); ω_i 为第 i 个振荡角频率。

据此,可得该系统状态向量中任意元素 $\mathbf{y}(t)$ 的时域表达式:

$$\begin{cases} y_q(t) = \sum_{i=1}^K A_{iq} e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i t + \varphi_{iq}), q = 1, 2, \dots, m \\ f_{iq} = \frac{\omega_{iq}}{2\pi} \end{cases} \quad (4)$$

式中, t 为时间; K 为该信号的模态个数; A_{iq} 为第 i 个模态的幅值; φ_{iq} 为第 i 个模态的相位 (A_{iq} 与 φ_{iq} 均由振荡发生时的初始值决定); f_{iq} 为第 i 个模态的振荡频率, f_{iq} 范围为 0.1 Hz 到几千 Hz, 呈宽频的特征。

在高比例新能源渗透系统中,宽频振荡频率分布广泛,但在某一时间窗内的能量主要集中于若干显著模态中,即使在风电扰动剧烈或电压波动严重时,只要选择适当的时间窗选择,并结合滤波技术,

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ \dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 为输出向量; $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)]^T$ 为输入向量; $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]^T$ 为状态向量; \mathbf{f}, \mathbf{g} 分别为微分方程和代数函数。

其频谱仍可呈现稀疏或近似稀疏的特点。

2 SFFT 的基本原理

对连续信号 $y_q(t)$ 进行离散采样,获得 n 点的离散序列 $\{y_q(1), y_q(2), \dots, y_q(n)\}$ 。设采样频率 F_s 。对 $y_q(n)$ 进行 DFT, 可得

$$Y_q(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

式中, $Y_q(k)$ 为频谱序列; N 为每次 DFT 所用离散数据点数。

对于长度为 N 的离散信号,若其频域中仅有 K 个显著非零分量 ($K \ll N$), 则称该信号是频域是 K 稀疏的。将系统宽频信号的稀疏度定义为 K/N , 当稀疏度小于 0.1 时, 认为该信号具有频域稀疏特性。

与处理所有频率点的 DFT 不同, SFFT 只关注显著的非零频率点。因此, SFFT 算法处理信号稀疏度高信号的计算速度大幅提升。本文所提算法的主要步骤可分为: 频谱重排、加窗滤波、降采样分桶、定位循环与估计循环。

2.1 频谱重排

n 次频谱重排与分桶定位如图 2 所示。SFFT 的宽频振荡辨识算法在分桶时, 若出现多个非零的频率点分至一个桶中的情况(如图 2 中第 1 次分桶情况), 后续操作中有效频点被抽取的概率会被降低, 这将导致后续频谱无法被正常恢复。为避免这种现象的发生, 须对信号进行多次频谱重排和分

桶。该过程使用了 DFT 的缩放和时移。对 N 点信号 $y_{qa}(n) = y_q(an)$ 的 DFT 为

$$\begin{cases} Y_{qa}(k) = \sum_{n=0}^{N/a-1} y_q(n) e^{-j\frac{2\pi}{N/a}kn} = \sum_{an=0}^{N-1} y_q(an) e^{-j\frac{2\pi}{N/a}k\frac{an}{a}} = \\ \sum_{an=0}^{N-1} y_q(an) e^{-j\frac{2\pi}{N}kan} = \sum_{an=0}^{N-1} y_q(an) W_N^{kan} = Y_q\left(\frac{k}{a}\right) \\ W_N^{kan} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kan} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $Y_{qa}(k)$ 为缩放 a 倍后的频谱序列的第 k 个元素; a 为缩放倍数。

对信号 $y_{\tau q}(n) = y_q(n + \tau)$ 进行 DFT (τ 为时移量), 即

$$\begin{aligned} Y_{\tau q}(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n + \tau) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \\ \sum_{n=\tau}^{N-1+\tau} y_q(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}k(n-\tau)} &= \sum_{n=\tau}^{N-1+\tau} y_q(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} e^{j\frac{2\pi}{N}k\tau} \end{aligned} \quad (7)$$

DFT 假设信号是周期性的, 即 $y(n) = y(n \bmod N)$, 故求和范围可调整为 $n \in [0, N-1]$, 则有

$$\begin{aligned} Y_{\tau q}(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} y_q(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} e^{j\frac{2\pi}{N}k\tau} = \\ Y_q(k) e^{j\frac{2\pi}{N}k\tau} &= Y_q(k) W_N^{-\tau k} \end{aligned} \quad (8)$$

定义频谱重排系数 λ, τ , 则重排变换为 $(P_{\lambda, \tau} y_q)_n = y_q(\lambda n + \tau)$ 。其中, P 为重排操作, λ 为缩

放系数, I 为时移量, 且系数 λ 应与 N 互质。重新排列后的时域信号 $y_{lq}(n)$ 为

$$y_{lq}(n) = y_q(\lambda n + \tau) \quad (9)$$

重排后信号的傅里叶变换 $Y_l(k)$ 为

$$Y_{lq}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_q(\lambda n + \tau) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (10)$$

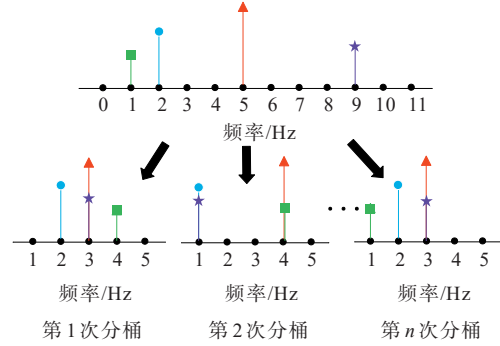


图 2 n -time 频谱重排与分桶定位
Figure 2 n -time spectral rearrangement and bucketization-localization

令 $n' = \lambda n + \tau$, 则式 (10) 可表示为

$$\begin{aligned} Y_{lq}(k) &= \sum_{n'=0}^{N-1+\tau} y_q(n') e^{-j\frac{2\pi}{N}k\frac{(n'-\tau)}{\lambda}} = \\ \sum_{n'=0}^{N-1} y_q(n') e^{-j\frac{2\pi}{N}\frac{k}{\lambda}n'} e^{j\frac{2\pi}{N}\frac{k\tau}{\lambda}} &= \\ Y_q\left(\frac{k}{\lambda}\right) e^{j\frac{2\pi}{N}\frac{k\tau}{\lambda}} &= Y_q\left(\frac{k}{\lambda}\right) W_N^{-\tau k/\lambda} \end{aligned} \quad (11)$$

重排后的时域和频谱如图 3 所示。

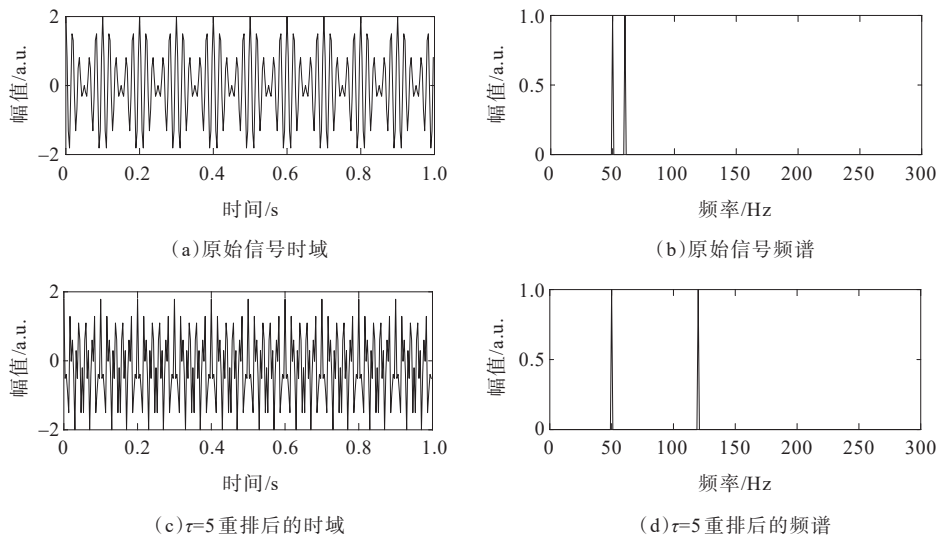


图 3 重排后的时域和频谱
Figure 3 Rearranged time domain and frequency spectrum

由式 (11) 和图 3 可知, 信号的重排操作在频域中仅对频率分量的位置进行了重新分布, 且并未改

变其能量分布特性, 这保证了后续频谱正常恢复的可能性。

2.2 加窗滤波

加窗滤波的目的是将傅里叶系数的能量集中在少数几个有效频率点上,降低其他频率的干扰,保证了后续估计的准确性。

窗函数可分为标准窗函数和平坦窗函数。其中,标准窗函数具有时域局部性和频域集中性,但其频域通带存在纹波效应,易导致信号失真和频谱泄露;平坦窗函数作为标准窗函数的优化形式,通过选取适当的标准窗函数与矩形窗卷积来生成,这种方式不仅保留了时域局部性,还能有效改善通带平坦度。平坦窗函数应满足以下性质:

$$\begin{cases} s(F) \subseteq [-\omega/2, \omega/2] \\ \hat{F}_i \in [1 - \delta, 1 + \delta], i \in [-\epsilon'N, \epsilon'N] \\ |\hat{F}_i| < \delta, i \notin [-\epsilon N, \epsilon N] \end{cases} \quad (12)$$

式中, $s(F)$ 为窗函数 F 取非零值的点的集合; ω 为窗函数 F 在时域上的非零区域的长度, ω 决定了窗函数在时域上的范围; \hat{F}_i 为窗函数 F 在频率 i 处的频率响应; δ 为误差容忍参数; ϵ 为过渡带的边界, $\epsilon \in [0, 1]$, ϵN 规定窗函数 F 阻带的起始点; ϵ' 为通带的边界, $\epsilon' \in [0, 1]$, $\epsilon'N$ 确定窗函数 F 通带的范围,即窗函数 F 在频域上能量集中的区域; N 为一个周期的信号离散点数。

对于任意满足 $\epsilon' < \epsilon$ 的参数 ϵ' 、 ϵ 和 δ ,必存在一个平坦窗函数,其特征参数为 $\left(\epsilon, \epsilon', \delta, O\left(\frac{1}{\epsilon - \epsilon'}, \ln \frac{n}{\delta}\right)\right)$,使用该平坦窗函数 G 对随机重排后的信号 y_{iq} 进行滤波,得到滤波后的信号 y_{Gq} :

$$y_{Gq} = G y_{iq} \quad (13)$$

滤波后的信号 y_G 的傅里叶变换为平坦窗函数 G 的傅里叶变换与随机重排后信号 y_i 的傅里叶变换的卷积,即

$$\hat{y}_{Gq} = \hat{G} * \hat{y}_{iq} \quad (14)$$

式中, \hat{y}_{Gq} 为傅里叶变换后的 y_{Gq} ; \hat{G} 为傅里叶变换后的平坦窗函数; \hat{y}_{iq} 为傅里叶变换后的随机重排信号;*为卷积符号。

2.3 定位循环

定位循环是找到可能包含有效傅里叶系数的位置集合。对数据点总数为 N 的序列 $y_{Gq}(n)$ 而言,若 N 能够被 B 整除,则可通过间隔 N/B 进行频域抽取,将 N 个点信号缩减为 B 个点信号,即通过降采样实现运算效率的提升。在实际中,难以直接对频域

进行抽取,故须通过时域混叠的方式实现频域抽取。设 $y_{Bq}(n)$ 为时域混叠后的序列,则有

$$y_{Bq}(n) = \sum_{i=0}^{N/B-1} y_{iq}(n + Bi) \quad n = 0, 1, \dots, B-1 \quad (15)$$

其离散傅里叶变换 $Y_B(k)$ 为

$$\begin{aligned} Y_{Bq}(k) &= \sum_{n=0}^{B-1} y_{Bq}(n) e^{-j\frac{2\pi}{B}kn} = \sum_{n=0}^{B-1} y_{Bq}(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn\frac{N}{B}} = \\ &= \sum_{n=0}^{B-1} \sum_{i=0}^{N/B-1} y_{iq}(n + Bi) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn\frac{N}{B}} = \\ &= \sum_{n=0}^{B-1} \sum_{i=0}^{N/B-1} y_{iq}(n + Bi) e^{-j\frac{2\pi}{N}k\left(\frac{nN}{B} + \frac{NB}{B}i\right)} = \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} y_{iq}(j) e^{-j\frac{2\pi}{N}kj\frac{N}{B}} = \sum_{j=0}^{N-1} y_{iq}(p) W_N^{kj\frac{N}{B}} = \\ &= Y_{iq}\left(k\frac{N}{B}\right) \quad (p = n + Bi) \end{aligned} \quad (16)$$

由分桶的原理和式(16)可知,基于SFFT的宽频振荡辨识算法通过时域混叠后进行 B 维FFT,其获得的降采样后的频谱与原重排信号的频谱存在特定的映射关系。基于这种映射关系,可从降采样后的频谱 $Y_B(k)$ 中恢复出原始重排频谱 $Y_i(k)$,获得每个频率分量的位置及其幅值信息。

根据式(11)、(16)定义哈希映射 $h_\lambda(i)$: $[B] \rightarrow [N]$,将原始信号频谱 $Y(k)$ 的坐标 k 以 $h_\lambda(k) = \text{round}(\lambda k B/N)$ 的形式,映射到降采样信号 $Y_{Bq}(k)$ 的某个频点处。其中, round 为取整符号。定义对应的偏移量 $o_\lambda: [N] \rightarrow [-N/(2B), N/(2B)]$, o 为 $o_\lambda(i) = \lambda k - h_\lambda(k)(N/B)$ 。给定一个定位参数 d ,定位循环从 $Y_{Bq}(k)$ 中选择 dK 个幅值较大的有效频点坐标 i ,构成集合 I ,其中 K 为模态个数, I 的大小为 dK 。通过哈希映射的逆映射 $[B] \rightarrow [N]$,可从 I 中求出原频谱集合 $S_I = \{s \in [0, N-1] | h_\lambda(s) \in I\}$ 。其中, S_I 的大小为 $dK N/B$ 。集合 S_I 中的坐标 s 是具有较高的概率的对应原始信号频谱中的有效频点的坐标。

2.4 估计循环

估计循环对定位循环中找到的候选位置集合 S_I 中的傅里叶系数进行精确估计。对任意 $s \in S_I$,其原频谱 $\hat{y}_i(s)$ 对应的估计值 $Y'_q(s)$ 可通过降采样频谱的值、相位校正因子和滤波器在偏移量处的频率响应求得,即

$$Y'_q(s) = \frac{Y_{Bq}(h_\lambda(s)) W_N^{s\frac{N}{B}}}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} \quad (17)$$

式中, $Y_{Bq}(h_\lambda(s))$ 为降采样频谱中哈希映射坐标 $h_\lambda(s)$ 的桶值; W_N^τ 为位移 τ 引入的相位校正因子, 其可补偿频谱重排中的时移操作引起的傅里叶系数旋转, 确保频谱系数在估计阶段仍保持正确的相位关系; $\hat{G}_{o_\lambda(s)}$ 为平坦窗函数滤波器 G 在偏移量 $o_\lambda(s)$ 处的频率响应。

式(17)的推导如下:

$$Y'_q(s) = \frac{Y_{Bq}[h_\lambda(s)]W_N^\tau}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} = \frac{Y_{Gq}[\lambda s - o_\lambda(s)]W_N^\tau}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} = \frac{(\hat{G}^* Y_{iq})[\lambda s - o_\lambda(s)]W_N^\tau}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \hat{G}_{[\lambda s - o_\lambda(s)] - j} Y_{iq}(p)}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} W_N^\tau = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \hat{G}_{[\lambda s - o_\lambda(s)] - j} Y_q(p/\lambda) W_N^{-\tau j/\lambda}}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} W_N^\tau \quad (18)$$

由窗函数的对称性, 可知

$$\hat{G}_{[\lambda s - o_\lambda(s)] - j} = \hat{G}_{-[\lambda(s - \lambda^{-1}p) - o_\lambda(s)]} = \hat{G}_{\lambda(s - \lambda^{-1}p) - o_\lambda(s)} \quad (19)$$

SFFT 的核心假设是信号在频域中是稀疏的。故在求和过程中, 大多数的 $Y(p/\lambda)$ 项的值为零, 只有少数非零项对结果有贡献。且窗函数 \hat{G} 只在有限的频率范围内有较大的值, 在其他频率范围内迅速衰减到零。因此, 在求和过程中, 只有 $\hat{G}_{\lambda(s - \lambda^{-1}p) - o_\lambda(s)}$ 在 p 接近 λs 时有较大的值, 其他项可忽略。令 $p = \lambda s$, 结合式(18)、(19), 得到

$$Y'_q(s) = \frac{\hat{G}_{-o_\lambda(s)} Y_q(s) W_N^{-\tau}}{\hat{G}_{o_\lambda(s)}} W_N^\tau = Y_q(s) \quad (20)$$

对集合 S_I 中的每个坐标, 通过多次运行估计循环并结合中位数滤波, 能有效消除信号重排和滤波操作引入的相位变化, 实现对频谱系数的精确恢复, 提高算法的准确性。

3 基于 SFFT 的宽频振荡参数辨识算法的具体流程

文 1 中介绍了基于 SFFT 的宽频振荡辨识算法的关键步骤及其原理, 其具体流程图如图 4 所示。本节将介绍基于 SFFT 的宽频振荡辨识算法的具体步骤:

1) 随机化信号。随机选取重排参数 λ, τ , 其中 λ 与 N 互质、 $\tau \in [0, N]$, 对输入的采样信号 $y_q(n)$ 进

行随机重排, 得到重排后的信号 $(P_{\lambda, \tau} y)_n = y_q(\lambda n + \tau)$, 从而打乱傅里叶系数的位置, 避免多个有效系数落入同一个桶中。

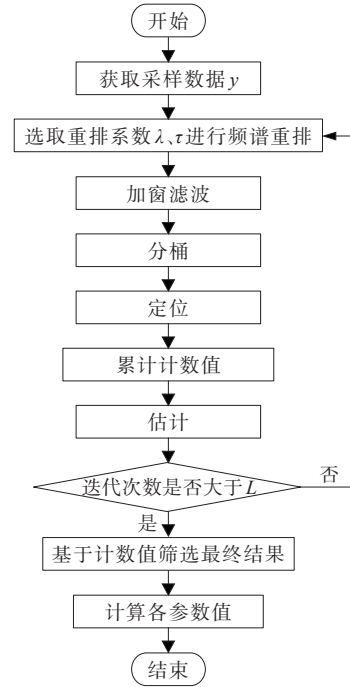


图 4 基于 SFFT 的宽频振荡辨识算法流程

Figure 4 Flowchart of wide-band oscillation identification algorithm based on SFFT

2) 加窗滤波。使用一个参数为 $(\epsilon, \epsilon', \delta, \omega)$ 的平坦窗函数 G 对随机化后的信号 $(P_{\lambda, \tau} y_q)$ 进行滤波, 得到滤波后的信号 $y_G = G(P_{\lambda, \tau} y_q)$, 从而将傅里叶系数的能量集中在少数几个频率上, 同时减少其他频率干扰。

3) 分桶。通过对 y_{Gq} 进行时域混叠 $y_{Bq}(n) = \sum_{i=0}^{N/B-1} y_{Gq}(n + Bi) \quad n = 0, 1, \dots, B - 1$ 得到子采样信号 y_{Bq} , 然后对子采样信号 y_B 进行 B 点的 FFT, 实现频域抽取 $Y_{Bq}(n) = Y_{Gq}(nN/B)$, 将滤波后的信号 y_{Gq} 分成 B 个桶, 每个桶对应一个频率区间, 须保证 N 可以被 B 整除。

4) 定位。根据平坦窗函数 G 参数求得定位系数 $d = O(1/\epsilon)$, 选择 Y_{Bq} 中幅度最大的 dK 个桶的坐标, 记入集合 I 中; 通过 1)~3) 中的参数定义哈希映射函数 $h_\lambda(k) = \text{round}(\lambda kB/N)$, 利用哈希逆映射将集合 I 中的每个桶映射回原始频率空间, 得到可能包含有效系数的位置集合 S_I 。

5) 估计。对集合 S_I 中的每个坐标 $s \in S_I$, 通过公

式 $Y_q'(s) = \frac{\hat{y}_{Bq}(h_\lambda(s))W_N^{\tau s}}{\hat{G}_{O_\lambda(s)}}$ 进行频谱估计。

6) 外循环。选取不同的重排参数 λ, τ , 循环 $1) \sim 5) L$ 次 ($L = O(\log n)$), 从而避免有效系数被遗漏。并对每次定位中得到的候选坐标的计数值进行累计, 得到累计计数值 $f_s = |\{r | s \in s_{lr}\}|$ 。对于每个坐标 $s \in S_l$ 得到 L 个估计值: $Y_{sq}^1, Y_{sq}^2, \dots, Y_{sq}^L$; 对于每个坐标 $s \in S_l$, 取所有估计值的中位数作为最终估计值: $Y_q'(s) = \text{median}\{Y_{sq}^r | r = 1, \dots, L\}$, 从而减少异常值的影响, 提高估计的稳定性。

7) 筛选有效频率点: 对于每个坐标 $s \in S_l$, 根据其在 L 次外循环的定位循环中的累计计数值 f_s , 筛选出被选中次数超过 $L/2$ 的坐标, 记入 $S_l' = |\{s | f_s > L/2\}|$, 集合 S_l' 即为有效频率点。

8) 获取参数信息: 对于每个 $s \in S_l'$, 计算幅值 $A_s = |Y_s'|$, 频率 $f_s = \frac{s}{N} F_s$, 相位 $\theta_s = \arg(Y_s')$, 得到宽频振荡参数信息 (f_s, A_s, θ_s) 。

4 算例验证

为验证本文所提算法在辨识宽频域、多模态宽频信号方面的有效性和优越性, 构建不同幅值、频率参数的宽频信号, 并对其进行仿真验证。仿真试验中, 时域信号的采样频率 F_s 设为 100 kHz。

4.1 不同时间窗长的性能

为验证在不同时间窗长 T 下基于 SFFT 的宽频振荡辨识算法的有效性, 该仿真设置时间窗长的变化范围为 2~10 s, 并以 2 s 为步长。此外, 对比本文所提算法与传统 FFT 算法在不同时间窗长下的辨识精度与计算效率, 验证本文所提算法在多数数据点下处理多模态宽频信号时的优越性。数值信号参数设置见表 1, 辨识结果见表 2, 不同时间窗长下算法运行时间如图 5 所示。

表 1 数值信号参数

Table 1 Numerical signal parameters

模态序号 i	频率/Hz	幅值/a.u.
1	50.0	100.0
2	550.0	10.0
3	78.5	7.5
4	798.5	5.0
5	1 879.0	3.5

由表 2 可知, 这两种算法均能够实现对信号幅值和频率的高精度辨识。通过图 5 的运行时间对比分析可以发现, 本文所提算法在计算效率上显著优于 FFT 算法的, 随着时间窗长的增加, 本文所提算法的优势更明显。

表 2 辨识结果

Table 2 Identification results

模态序号 i	频率/Hz		幅值/a.u.	
	SFFT	FFT	SFFT	FFT
1	50.0	50.0	100.0	100.0
2	550.0	550.0	10.0	10.0
3	78.5	78.5	7.5	7.5
4	798.5	798.5	5.0	5.0
5	1 879.0	1 879.0	3.5	3.5

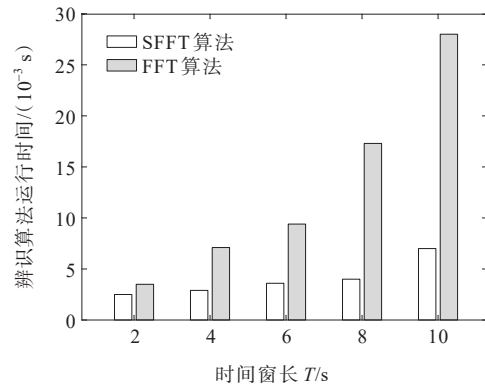


图 5 不同时间窗长下算法运行时间

Figure 5 Algorithm runtime under different time window lengths

4.2 不同稀疏度时的性能

本文所提算法的运行时间与信号的稀疏度密切相关, 稀疏度越低, 算法的计算复杂度越高, 算法运行时间越长。为验证所提算法在模态个数较多、稀疏度较小情况下的性能表现, 本文在不同时间窗长 T 下, 将模态数以 5 为步长, 逐步从 5 递增至 40, 随机产生不同频率、幅值参数的多模态信号, 评估本文所提算法在不同稀疏度条件下的计算效率。这两种算法运行时间如图 6 所示。

从图 6 中可以看出, 在相同时间窗长 T 的条件下, 随着模态个数的增加, 本文所提算法的运行时间呈逐渐延长的趋势, 这一现象与 SFFT 的理论特性一致。相比之下, 传统的 FFT 算法的计算复杂度主要由信号长度决定。故 FFT 算法在不同稀疏度下运行时间基本保持不变。但值得注意的是, 即使在低稀疏度条件下 (如模态个数达到 40 个), 所提算法的运行时间仍然显著短于 FFT 算法的运行时间。

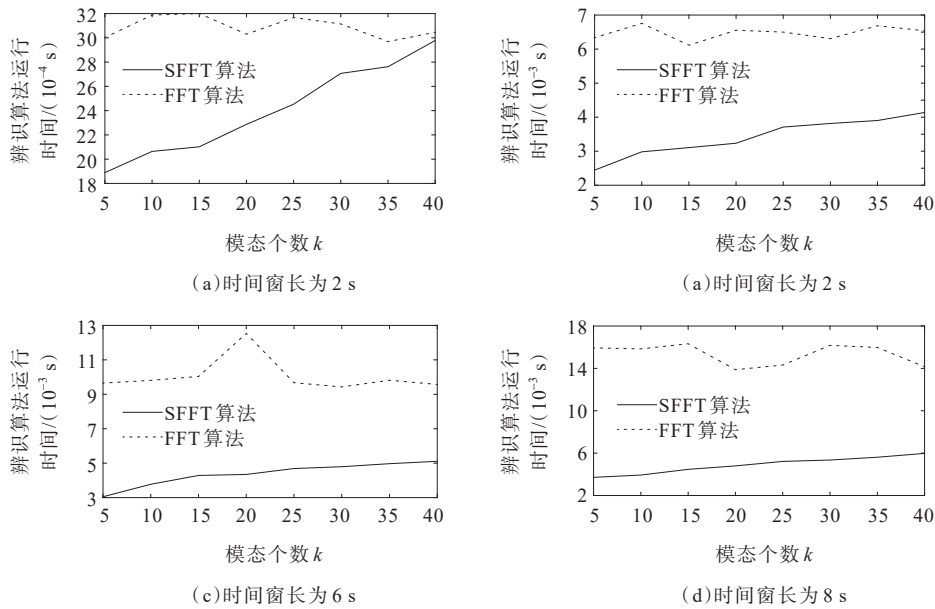


图 6 不同稀疏度时算法运行时间

Figure 6 Algorithm runtime at different sparsity levels

4.3 不同信噪比时的性能

为验证本文所提算法在不同信噪比条件下的性能表现,模拟信噪比以 5 dB 为步长,从 40 dB 逐步递增至 55 dB 的数值信号。时间窗长 T 固定为 2 s, 模式个数为 10, 数值信号参数见表 3。

表 3 数值信号参数

Table 3 Numerical signal parameters

模式序号 i	频率/Hz	幅值/a.u.
1	50.0	100.0
2	550.0	15.0
3	250.0	12.5
4	150.0	10.0
5	1100.0	8.5
6	9.5	7.0
7	78.5	6.0
8	798.5	5.0
9	1879.0	3.5
10	2250.0	2.0

分别本文所提算法与传统 FFT 算法对含噪声信号进行参数辨识,不同信噪比下辨识结果见表 4, 不同信噪比下的 2 种算法的运行时间如图 7 所示。其中,平均相对误差 e_{RE_a} 为

$$e_{RE_a} = \frac{|v - \hat{v}|}{vK} \times 100\% \quad (21)$$

式中, v 为真实值; \hat{v} 为估计值; K 为信号模式分量个数。

表 4 不同信噪比下辨识结果

Table 4 Identification results under different SNRs

信噪比/dB	辨识算法	频率 e_{RE_a}	幅值 e_{RE_a}
40	SFFT	$0 (< 10^{-7})$	7.9×10^{-4}
40	FFT	$0 (< 10^{-7})$	2.5×10^{-4}
45	SFFT	$0 (< 10^{-7})$	5.7×10^{-4}
45	FFT	$0 (< 10^{-7})$	1.3×10^{-4}
50	SFFT	$0 (< 10^{-7})$	5.5×10^{-4}
50	FFT	$0 (< 10^{-7})$	1.0×10^{-4}
55	SFFT	$0 (< 10^{-7})$	5.4×10^{-4}
55	FFT	$0 (< 10^{-7})$	3.3×10^{-4}

由表 4 可知,在噪声环境下,本文所提算法能够保持较高的参数辨识精度,其在噪声干扰下具有优异的鲁棒性与稳定性。

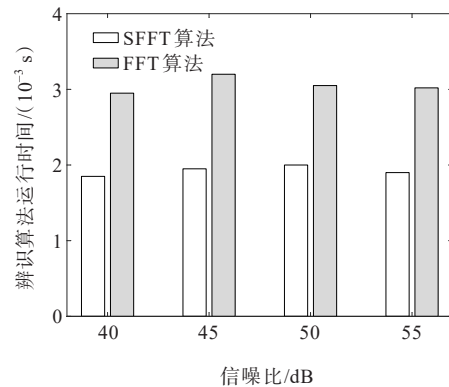


图 7 不同信噪比下的 2 种算法的运行时间

Figure 7 Runtime of two algorithms under different SNRs

从图7中可以看出,本文所提算法在不同信噪比条件下均能保持较高的计算效率,这也验证了其在复杂噪声环境下的适用性。

5 结语

为检测电力系统宽频振荡,新型宽频量测装置设置了高采样频率,这导致传统FFT算法计算效率大幅下降。对此,提出基于SFFT的宽频振荡参数辨识算法。得到如下结论:

1) 基于电力系统宽频振荡信号的频域稀疏性,采用SFFT算法,重点关注其频域中显著的非零成分,在保证精确度的前提下,大幅提高了计算效率。

2) 在窗函数设计方面,提出采用平坦窗函数进行滤波,有效减低标准窗函数纹波效应的影响,解决宽频信号在滤波阶段可能出现的信号失真和频谱泄露问题。

3) 通过多重迭代的方式,对宽频信号进行多次频谱重排和定位,基于其可能有效频点坐标的累计值筛选出信号的有效频点,解决频谱漏检问题,确保所提算法能够精确检测宽频信号的所有成分。

仿真结果表明,无论是在理想无噪声条件还是在含噪声环境下,基于SFFT的宽频振荡辨识算法均能实现对信号频率、幅值参数的高精度辨识,且能大幅降低计算复杂度,其在高采样率、长时间窗与高稀疏度情况下的计算效率优势更突出。此外,通过结合滑动时间窗,对连续时间窗内的模态幅值变化进行指数拟合,可进一步获取阻尼参数。

参考文献:

[1] YI W T, HILL D J, SONG Y. Impact of high penetration of renewable resources on power system transient stability[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta, GA, USA. IEEE, 2020: 1-5.

[2] 张鹏辉,肖东亮,华栋,等.高比例可再生能源电力系统的动态频率安全约束机组组合[J].供用电,2025,42(2):90-99.

ZHANG Penghui, XIAO Dongliang, HUA Dong, et al. Dynamic frequency security constraints unit commitment for high shares of renewables power systems[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(2): 90-

99.

[3] 朱蜀,刘开培,秦亮,等.电力电子化电力系统暂态稳定性分析综述[J].中国电机工程学报,2017,37(14):3947-3962.

ZHU Shu, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Analysis of transient stability of power electronics dominated power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3947-3962.

[4] 赵妍,吴昊鑫,赵宗罗,等.基于深度残差网络和改进时序卷积神经网络的宽频振荡监测[J].电力系统保护与控制,2025,53(24):52-64.

ZHAO Yan, WU Haoxin, ZHAO Zongluo, et al. Wideband oscillation monitoring based on deep residual network and improved temporal convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(24): 52-64.

[5] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-474.

XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.

[6] 张清源,周波,池建飞,等.基于Transformer-GAT的新型电力系统宽频振荡源定位[J].电力建设,2025,46(10):88-98.

ZHANG Qingyuan, ZHOU Bo, CHI Jianfei, et al. Wide-frequency oscillatory source localization of a new power system based on transformer-GAT[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 88-98.

[7] 陈露洁,徐式蕴,孙华东,等.高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2297-2309.

CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2297-2309.

[8] 雷微宇,汪林光,梅勇,等.基于闭环传递函数频率特性的宽频振荡稳定判据[J].电网与清洁能源,2025,41(8):1-9.

LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. Wide-band oscillation stability criterion based on the frequency characteristics of closed-loop transfer functions[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(8): 1-9.

[9] 徐衍会,成蕴丹,刘慧,等.基于瞬时功率的次同步振荡频率提取及振荡源识别方法[J].电工技术学报,2023,38(11):2894-2907.

XU Yanhui, CHENG Yundan, LIU Hui, et al. Subsynchronous oscillation frequency extraction and

- oscillation source identification method based on instantaneous power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11): 2894-2907.
- [10] 柳劲松, 马宁宁, 刘舒. 高比例风电系统宽频振荡紧急控制策略研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(5): 558-566.
- LIU Jinsong, MA Ningning, LIU Shu. Study on emergency control strategy of wideband oscillation in power systems with high-percentage wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 558-566.
- [11] 李庚银, 陈志业, 宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 37-40.
- LI Gengyin, CHEN Zhiye, NING Yu. Two improved algorithms of fast Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 37-40.
- [12] 林建港, 关向雨, 王扬程, 等. 基于FFT奇异值分解与改进VMD的GIS现场振动信号特征增强方法研究[J]. 高压电器, 2025, 61(12): 25-32.
- LIN Jiangan, GUAN Xiangyu, WANG Yangcheng, et al. Study on feature enhancement method for GIS field vibration signal based on FFT singular value decomposition and improved VMD[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(12): 25-32.
- [13] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
- ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. Fft algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [14] 张鸿博, 熊军华, 蔡晓峰. 基于高倍过采样与加窗插值FFT的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 105-115.
- ZHANG Hongbo, XIONG Junhua, CAI Xiaofeng. Power harmonic analysis based on high-rate oversampling and windowed interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 105-115.
- [15] ROMANO P, PAOLONE M. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(12): 2824-2836.
- [16] JIN T, ZHANG W F. A novel interpolated DFT synchrophasor estimation algorithm with an optimized combined cosine self-convolution window[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9000610.
- [17] 仇新艳, 李付亮. 基于Nuttall窗DFT校正的微电网谐波检测算法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 65-70.
- QIU Xinyan, LI Fuliang. Microgrid harmonic detection algorithm based on Nuttall window DFT correction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 65-70.
- [18] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于主瓣宽度多谱线插值的高精度快速谐波分析算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S1): 121-128.
- ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A precise and rapid algorithm for harmonic analysis based on multi-spectrum-line in main lobe width interpolation FFT [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 121-128.
- [19] 卿柏元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于Nuttall窗双谱线插值FFT的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153-158.
- QING Baiyuan, TENG Zhaosheng, GAO Yunpeng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 153-158.
- [20] 曹远远, 李建闽, 林海军, 等. 基于Slepian和Parzen互卷积窗插值FFT的电力系统谐波分析方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 172-178.
- CAO Yuanyuan, LI Jianmin, LIN Haijun, et al. Slepian and Parzen mutual convolution window-based interpolation FFT for harmonic analysis method in power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 172-178.
- [21] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [22] 符玲, 郭颖, 李红艳, 等. 基于变分模态分解的宽频信号估计算法[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 748-758.
- FU Ling, GUO Ying, LI Hongyan, et al. Wide-frequency signal estimation algorithm based on variational mode decomposition[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 748-758.
- [23] 陈志同, 徐晋, 李国杰, 等. 基于变分模态分解和压缩感知的电力系统宽频振荡监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 63-74.
- CHEN Zhitong, XU Jin, LI Guojie, et al. Monitoring method of power system wide-band oscillation based on variational mode decomposition and compressive sensing [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 63-74.
- [24] 伍冲翀, 王健, 龚黎慧倩. 基于改进型贝叶斯网络模型和HHT的电网故障诊断方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 42-49.
- WU Chongchong, WANG Jian, GONG Lihuiqian. Power grid fault diagnosis method based on improved

- Bayesian network model and HHT[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(2): 42-49.
- [25] 杨德昌, C.REHTANZ, 李勇, 等. 基于改进希尔伯特-黄变换算法的电力系统低频振荡分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(10): 102-108.
- YANG Dechang, C. REHTANZ, LI Yong, et al. Researching on low frequency oscillation in power system based on improved HHT algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(10): 102-108.
- [26] LAILA D S, MESSINA A R, PAL B C. A refined Hilbert – Huang transform with applications to interarea oscillation monitoring[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 610-620.
- [27] 戚沁雅, 曹伯仲, 安义, 等. 基于改进 Prony 算法的配电变压器群励磁涌流多特征综合辨识方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(6): 69-78.
- QI Qinya, CAO Bozhong, AN Yi, et al. Comprehensive multi-feature identification method of magnetizing inrush current in distribution transformers based on improved Prony algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(6): 69-78.
- [28] 刘灏, 李进生, 毕天姝, 等. 基于改进 Prony 的动态宽频测量算法[J]. *电网技术*, 2023, 47(5): 2119-2127.
- LIU Hao, LI Jinsheng, BI Tianshu, et al. Dynamic wide-frequency measurement algorithm based on improved prony[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(5): 2119-2127.
- [29] ZEINELDIN H H, ABDEL-GALIL T, EL-SAADANY E F, et al. Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(2): 155-162.
- [30] 毕悦, 方思瑞, 于舒祺. 含光伏并网的弱交流系统低频振荡协调控制策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(4): 59-65.
- BI Yue, FANG Sirui, YU Shuqi. Coordinated control strategy for low frequency oscillations of weak AC grid connected PV systems[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(4): 59-65.
- [31] ZHANG H R, XU Y, LUO R D, et al. Fast GNSS acquisition algorithm based on SFFT with high noise immunity[J]. *China Communications*, 2023, 20(5): 70-83.
- [32] 赵洪山, 高夺, 张健平. 风机齿轮箱振动信号的稀疏傅里叶变换分析[J]. *中国电力*, 2016, 49(8): 69-73+98.
- ZHAO Hongshan, GAO Duo, ZHANG Jianping. Analysis of sparse Fourier transform for vibration signal of wind turbine gearbox[J]. *Electric Power*, 2016, 49(8): 69-73+98.