

DOI: 10.7667/PSPC201861

基于变分模态分解的电力系统泛频带振荡辨识方法

汤吉鸿¹, 朱军飞¹, 李勇², 左剑³, 马俊杰⁴, 陈崇刚⁴

(1. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410007; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007;

4. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 振荡问题已成为现代电网面临的重要问题之一, 电力系统中多种类型的振荡可能同时出现且频段跨度极大。针对含泛频带振荡模态的信号, 首先通过带通滤波器实现不同频段信号的分离, 再利用有高噪声鲁棒性的变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)方法提取各个振荡模态信号, 最后通过 Prony 算法实现对不同模态参数的辨识。仿真与实际算例分析表明, 该方法能够对信号中不同类别振荡模态进行有效区分与提取, 精确识别出每个模态的信息。无论针对已发生剧烈振荡的信号或是含有潜在振荡的类噪声信号, 该方法均能有效地进行模态辨识。

关键词: 泛频带振荡; 模态辨识; 变分模态分解(VMD); 电力系统; 低频振荡; 次同步振荡

VMD based mode identification for broad-band oscillation in power system

TANG Jihong¹, ZHU Junfei¹, LI Yong², ZUO Jian³, MA Junjie⁴, CHEN Chonggang⁴

(1. State Grid Hunan Electrical Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;

2. College of Electrical Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;

4. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Oscillation is one of the most important stability problems of modern power system. In a power system, multiple types of oscillation crossing a broad-band may occur at a same time. In this paper, the mode identification for broad-band oscillation signal is proposed. First, the signal is decomposed to signals of different frequency bands by band pass filters. Then, the mode signals of the decomposed signals are extracted by using Variational Mode Decomposition (VMD) method. The mode parameters can be identified from the mode signals by Prony algorithm. The simulation and case study show that this method can distinguish and extract different kinds of oscillation modes of signals effectively and identify each mode's information accurately. It can accurately identify mode information from both oscillation signal and damped oscillation in ambient noise.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51520105011) and Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company Limited (No. 5216A5170012).

Key words: broad-band oscillation; mode identification; variational mode decomposition (VMD); power system; low frequency oscillation; sub-synchronous oscillation

0 引言

随着可再生能源的规模化接入、电力电子设备的广泛应用以及交直流大规模互联, 现代电网在优

化资源配置、提高系统可靠性的同时, 系统内薄弱环节增多、抗干扰性降低, 出现了新类型故障, 安全稳定性问题凸显^[1-3]。振荡是威胁电力系统稳定运行的问题之一, 当前电力系统常见的典型振荡包括: 由区域或区间弱阻尼效应引发的低频振荡(Low Frequency Oscillation, LFO)^[4-6]以及由串联补偿电容或电力电子设备与发电机组之间的能量交互引发的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51520105011); 国网湖南省电力有限公司科技项目资助(5216A5170012)

次同步振荡(Sub-synchronous Oscillation, SSO)^[7-10]。此外, 超同步振荡(Super-synchronous Oscillation, SurSO)伴随次同步振荡偶有发生^[11]。振荡如果没有得到及时抑制, 将会造成电网的不稳定乃至解列。

根据阻尼不同, 电力系统的振荡信号可分为两类: (1) 维持或发散的振荡信号(当系统处于弱阻尼或负阻尼); (2) 阻尼振荡信号(当系统处于正阻尼)。前者出现频率低, 但是一旦发生将对系统造成较大危害; 后者出现更为频繁且容易被噪声掩盖, 也被称为类噪声振荡信号。从振荡信号中快速、实时地辨识模态信息, 有助于电网的调度以及控制策略的调整; 在振荡发生前, 从类噪声振荡信号中进行模态辨识, 能发现系统潜在振荡模态, 从而为系统提供预警。振荡模态辨识是电力系统进行实时高效控制以及风险预警的关键。

频率、阻尼比与振荡幅值是振荡模态的关键信息, 也是实现振荡监测、预警、控制和保护研究的关键参数。目前, 电力系统振荡的研究方法主要包括模型分析和量测分析两种。模型分析方法依赖于系统的精确模型, 大型系统和非线性电力电子器件都会对模型精度造成影响, 导致分析的误差^[12]。量测分析则是对系统实际测量数据进行分析, 分析结果更贴近于运行情况。将实测数据与信号处理技术相结合是目前电力系统振荡辨识的常用方法。

Prony 算法能对信号的特征量进行直接提取, 从而辨识出较为准确的振荡模态信息^[13-14], 但 Prony 算法对噪声敏感程度高。在实际工程中常将滤波算法与 Prony 算法结合, 通过滤波算法对信号进行降噪, 或从中提取模态信号。均值滤波(Average Filter, AF)、经验模态分解、自回归移动平均算法、小波方法、奇异值分解等方法常用的滤波算法, 并已在振荡模态辨识中有所应用^[15-21]。然而, 均值滤波只能降低噪声的干扰而无法滤除噪声; 小波去

噪的本质是对信号在特定频段进行拟合, 如果有多个频率相近的振荡模态, 小波方法无法对其进行区分; 希尔伯特变换、奇异值分解等方法在处理低信噪比信号时可能存在较大误差。此外, 面对多种类别并存、振荡频率跨度大的泛频带振荡问题, 上述方法在处理过程中常常会将幅值较高的振荡辨识出来, 其他振荡可能被认为是噪声而被忽略了。如何对泛频带振荡信号进行统一的模态辨识, 提取多类别振荡的模态信息, 是当前电力系统振荡模态辨识面临的重要问题。

变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)算法能有效分离出模态信号, 并且对噪声不敏感^[22]。本文基于 VMD 方法, 提出了一种复杂电力系统泛频带振荡辨识方法。首先通过带通滤波器将不同类型振荡进行分离; 其次利用 VMD 提取各带通滤波信号中的振荡模态信号; 最后采用 Prony 算法对 VMD 提取的模态信号进行辨识, 从而实现泛频带振荡的统一辨识。

1 泛频带振荡模态辨识框架

1.1 泛频带振荡信号

振荡中可能包含有多个不同频段的振荡模态信号以及由于测量产生或系统本身存在的噪声信号。含泛频带振荡的原始测量信号 S_0 可表述为

$$S_0(t) = \sum_{n=1}^N S_n(t) + S_{\text{Noise}}(t) \quad (1)$$

式中: $S_{\text{Noise}}(t)$ 为噪声信号; $S_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, N$) 为 N 个不同频段的模态信号, 且

$$S_n(t) = A_n(t)e^{-D_n f_n t} \cos(2\pi f_n t) \quad (2)$$

式中: $A_n(t)$ 为第 n 个振荡模态在 t 时刻的幅值; D_n 和 f_n 分别为振荡的阻尼比和振荡频率。

1.2 模态辨识框架

泛频带振荡模态辨识框架如图 1 所示。辨识过程分为以下三步。

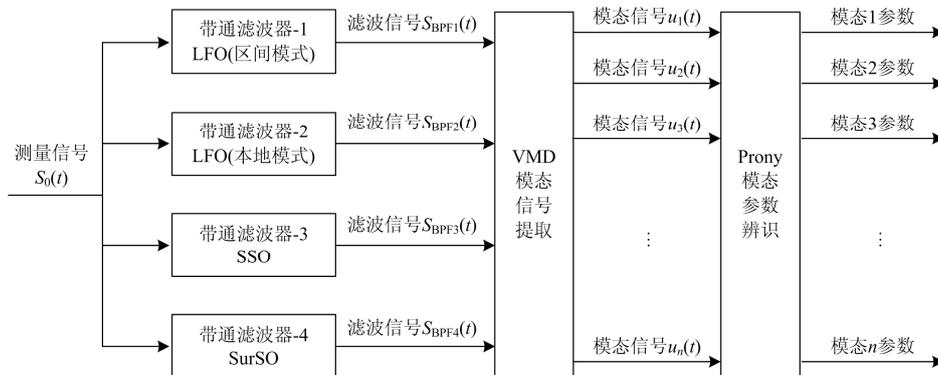


图 1 泛频带模态辨识框架

Fig. 1 Framework of the mode identification for broad-band oscillation

Step-1 使用多个带通滤波器(Band Pass Filter, BPF), 将原始信号分解为多个不同频段的滤波信号, 从而实现不同频段振荡信号的分离;

Step-2 利用 VMD 算法从各 BPF 滤波后信号中提取出振荡模态信号;

Step-3 通过 Prony 算法对 VMD 提供的振荡模态信号进行辨识, 获取各振荡模态的信息。

通过将原始信号经带通滤波器滤波、VMD 模态信号提取以及 Prony 辨识, 即可获得模态参数。

2 基于 VMD 的泛频带振荡模态辨识

2.1 带通滤波器设计

目前, 电力系统中造成事故的振荡主要归于三种类型, 即: 低频振荡、次同步振荡和超同步振荡。其中低频振荡又进一步划分为本地模式和区间模式。各类振荡的频率所处范围均不相同。因此, 本文将 BPF 设计为 4 个。

选择合适的信号长度可以提高模式识别的准确性, 确保辨识的快速性。由于各振荡频率不同, 采用同样时长的数据进行辨识显然是不合适的。本文中各类振荡对应的 BPF 滤波带宽、辨识采样时长如表 1 所示。

表 1 不同带通滤波器时间尺度与频率范围选取

Table 1 Time lengths and frequency bands for different BPFs

带通滤波器	振荡类别	采样 时长/s	振荡 频段/ Hz
BPF-1	LFO(区间模式)	10	0.2 ~ 1
BPF-2	LFO(本地模式)	2	1 ~ 5
BPF-3	SSO	0.4	10 ~ 50
BPF-4	SurSO	0.4	70 ~ 110

通过对模态辨识算法的分析可知^[23], 如果需要对较准确地获取振荡频率与振荡幅值, 辨识信号的采样时长需在 1 个振荡周期以上; 为获取准确的阻尼比信息, 采样时长则需高于 2 个振荡周期。

因此, 针对低频振荡, 为保证辨识的快速性, 本文以带通滤波器的最低带通频率 0.2 Hz 为基准, 采样时长选择为振荡周期的 2 倍, 即 10 s; 针对次同步振荡, 综合精度与辨识速度进行考虑, 以最低振荡频率 10 Hz 为基准, 采样时长为振荡周期的 4 倍, 即 0.4 s; 超同步振荡的机理决定了其与次同步振荡成对出现且频率互补, 因此超同步振荡采样时长与次同步振荡一致, 也为 0.4 s。

2.2 基于 VMD 算法的模态信号提取

VMD 算法是由 Dragomiretskiy 等人于 2014 年提出的一种新型自适应信号分解新方法, 通过固有

模态函数对目标模态进行求解^[22]。鉴于 VMD 算法的精确性与噪声鲁棒性, 本文采用 VMD 方法进行模态信号的提取分离。具体而言, 使用 VMD 算法提取 BPF 滤波信号中的模态信号流程如下。

首先, 经由 BPF- i ($i=1\sim 4$)后的滤波信号 $S_i(t)$, 可被认为含有 K 个模态函数 $u_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, K$)。

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\varphi_k(t)) \quad (3)$$

式中: $A_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值; $\varphi_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的相角, 是一个递增函数。定义 $\omega_k(t)$ 是 $u_k(t)$ 的瞬时频率, 且数值为正, 则

$$\omega_k(t) = d\varphi(t) / dt \quad (4)$$

当时间 $t \in [t-2\pi/\omega_k(t), t+2\pi/\omega_k(t)]$ 时, $u_k(t)$ 可被认为是幅值为 $A_k(t)$ 、频率为 $\omega_k(t)$ 的谐波。经希尔伯特变换, 估计中心频率 $e^{-j\omega_k(t)}$ 的单边谱方程为

$$\left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k(t)} \quad (5)$$

式中, $\delta(t)$ 为单位脉冲函数。通过计算二次梯度将原始信号分解成固有模态函数集合 $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_K\}$, 则约束变分问题被转化为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k(t)} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k(t) = S(t) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: ω_k 表示对应固有模态 u_k 的频率中心; ∂_t 表示对 t 的偏导数; S 为原始信号。

为求取上述约束变分问题的最优解, 引入二次罚函数项 α 和 Lagrange 乘子, 通过求极小化问题的拉格朗日 L^* 的鞍点, 将约束变分问题转化为一个不具约束力的变分问题。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k(t)} \right\|_2^2 + \left\| X(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), X(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (7)$$

式中: α 为惩罚因子; $\lambda(t)$ 为 Lagrange 乘子。

通过 VMD 对 BPF 提供信号分解, 即可获得各 VMD 提取的振荡模态 $u_n(t)$ 。当 BPF 与 VMD 精度足够高时, 对于第 n 个提取的模态信号, 有

$$u_n(t) \approx S_n(t) \quad (8)$$

通过 BPF 与 VMD, 所有振荡模态信号都从原始信号中分离出来。在获取模态信号 VMD 分解得到的各模态信号 $u_n(t)$ 后, 通过 Prony 算法即可实现振荡频率、幅值、阻尼比等模态参数的辨识。Prony 算法是成熟的模态辨识算法, 计算方式详见文献[23]与文献[24], 本文不再赘述。

3 仿真分析

为验证本文方法的有效性，通过仿真构造振荡信号 S_{test} 。

$$S_{test} = S_{LFO1} + S_{LFO2} + S_{SSO1} + S_{SSO2} + S_{SurSO} + S_{WN} \quad (9)$$

式中： S_{LFO1} 为低频振荡区间模式； S_{LFO2} 为低频振荡本地模式； S_{SSO1} 为次同步振荡，且与超同步振荡信号 S_{SurSO} 成对； S_{SSO2} 为另一个独立的次同步振荡； S_{WN} 为白噪声。

为与真实情况切合，测试信号已满足如下条件与假设：(1) 所有振荡频率均在其所属振荡类型频段内随机选择；(2) 低频振荡为主要振荡模态，幅值高于次同步振荡，低频振荡本地模式幅值高于区间模式；(3) 成对出现的次同步与超同步振荡中，次同步振荡模态幅值略高于超同步模态。基于上述假设，最终选取测试信号的各模态的具体参数为

$$\begin{cases} S_{LFO-1} = 1.46 \times \sin(2\pi \times 0.68) \\ S_{LFO-2} = 2 \times \sin(2\pi \times 1.95) \\ S_{SSO-1} = 0.49 \times \sin(2\pi \times 26.58) \\ S_{SSO-2} = 0.22 \times \sin(2\pi \times 21.94) \\ S_{SurSO} = 0.32 \times \sin(2\pi \times 93.42) \\ S_{WN} = 0.16 \times \text{random}[-1,1] \end{cases} \quad (10)$$

即测试信号 S_{test} 中包含 5 个不同频率的振荡信号以及幅值为 0.16 的白噪声信号。测试信号 S_{test} 振荡模态频段涵盖 0.63~93.42 Hz。各测试信号均为等幅振荡。测试信号 S_{test} 时域形式如图 2 所示。

采用本文方法，将所构造的测试信号 S_{test} 经带通滤波、VMD 提取后，其各频段振荡模态信号如图 3 所示。从图 3 可看出，本文所提方法能对各个不同频段的模态进行准确的区分，有效提取所有对应的模态信号。

表 2 测试信号模态辨识结果

Table 2 Mode identification of test signal

测试信号		本文方法		MF-Prony		EMD-Prony		
振荡模态	频率/ Hz	幅值	频率/Hz, 误差/%	幅值, 误差/%	频率/Hz, 误差/%	幅值, 误差/%	频率/Hz, 误差/%	幅值, 误差/%
S_{LFO-1}	0.68	1.46	0.68, 0	1.37, -6.16	0.67, -1.47	1.20, -17.81	0.68, 0	1.25, -14.38
S_{LFO-2}	1.93	2.00	1.90, -1.55	2.0, 0	2.0, 3.63	2.0, 0	1.95, 1.04	2.0, 0
S_{SSO-1}	26.58	0.49	26.82, 0.90	0.49, 2.04	27.0, 1.58	0.49, 2.04	26.37, -0.79	0.60, 22.45
S_{SSO-2}	21.94	0.22	22.04, 0.46	0.21, -9.09	无, 无	无, 无	51.0, 132.45	0.25, 13.64
S_{SurSO}	93.42	0.32	93.00, 0.45	0.32, 0	无, 无	无, 无	无, 无	无, 无

从表 2 的对比可知，当测试信号振荡跨越多个频段时，本文方法能对所有振荡模态进行有效辨识。振荡频率辨识结果最大误差为 1.55%，平均误差为

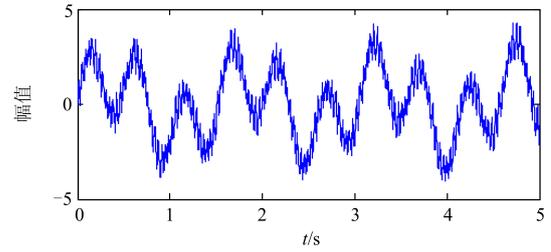


图 2 测试信号 S_{test}

Fig. 2 Test signal S_{test}

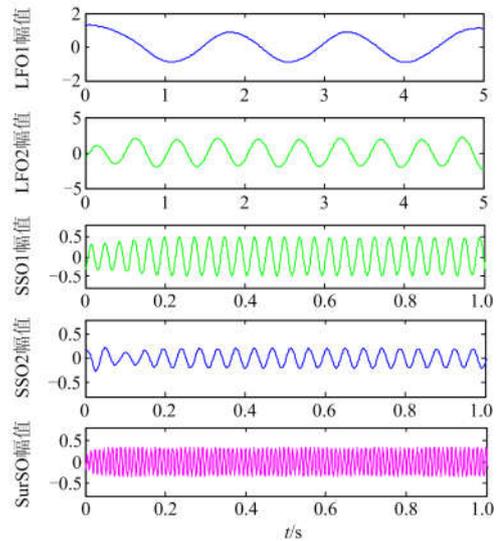


图 3 VMD 提取的振荡模态信号

Fig. 3 Mode signals extracted by VMD

对图 3 所得的各 VMD 提取模态信号，通过 Prony 算法分别进行模态辨识，即可获得对应模态的参数信息。将本文方法辨识结果与其他方法辨识结果进行对比，如表 2 所示。所选对比方法为：(1) 经典方法，基于均值滤波的 Prony 算法(MF-Prony)；(2) 先进方法，基于经验模态分解的 Prony 算法(EMD-Prony)。

0.67%；振荡幅值辨识结果最大误差为 9.09%，平均误差为 2.54%。需说明的是，由于振荡幅值辨识结果保留小数点后 2 位，因此对幅值较低的模态 S_{SSO-2}

辨识时较小的误差绝对值也可能导致较大的误差百分比。本文模态 S_{SSO-2} 幅值辨识结果为 0.21, 实际值为 0.22。

相较而言, MF-Prony 方法无论是频率辨识与幅值辨识结果均为最差, 平均误差也最高。EMD-Prony 方法在幅值最高的主导振荡模态(S_{LFO-2})有不错的辨识效果, 频率与幅值辨识结果稍优于本文方法; 对于次模态 S_{LFO-1} 与 S_{SSO-1} , EMD-Prony 频率辨识效果与本文方法接近, 但幅值辨识结果远差于本文所提方法。

特别地, 对于低幅值、高频率的模态, MF-Prony 与 EMD-Prony 辨识结果较差。对于幅值最低的模态 S_{SSO-2} , MF-Prony 无法辨识, 而 EMD-Prony 的辨识结果与实际不一致。对于频率为 93.42% 的超同步振荡模态 S_{SurSO} , 两种对比方法均未能辨识出来。因此, 本文所提方法在多模态并存的泛频带振荡辨识上, 相较其他方法有显著的优势。

4 实际算例分析

4.1 实际算例数据

为证明本文方法的有效性, 选取湖南电网实际振荡数据, 采用本文所提方法进行振荡模态辨识分析。振荡事件如下: 2018 年 6 月 24 日, 湖南电网某火力发电厂发生低频振荡, 电网监测软件记录振荡信号如图 4 所示。

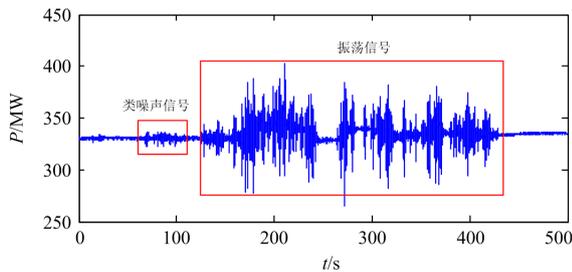


图 4 湖南电网某火电厂实测振荡信号

Fig. 4 Measured oscillation signal of a thermal plant in Hunan

系统于第 120 s 开始发生低频振荡, 振荡发生 30 s 后迅速发散, 系统开始发出警报, 振荡维持约 180 s。在振荡发生前的第 60~120 s, 系统存在类噪声振荡, 此时系统未发出警报。振荡信号与类噪声信号区间在图中已标出。系统采样频率为 100 Hz。

针对振荡信号与类噪声信号两类不同类型数据, 选用第 165~195 s 的振荡信号以及第 65~95 s 的类噪声信号, 分别采用本文方法对其进行模态辨识。用于辨识的原始信号如图 5 所示。

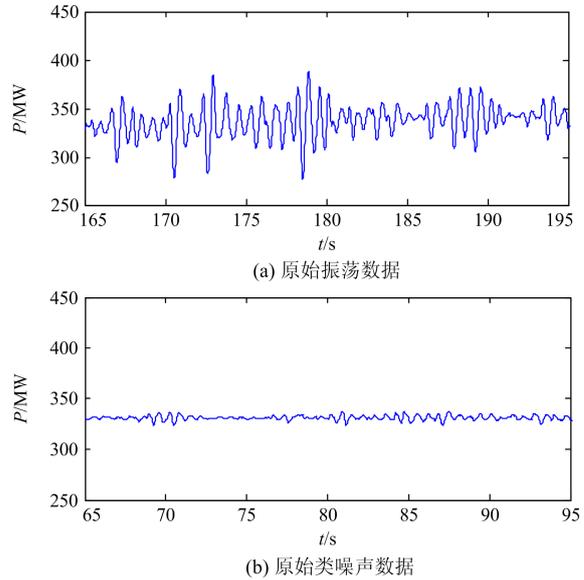


图 5 两类用于模态辨识的原始振荡数据

Fig. 5 Two types of original data used for mode identification

从图 5 中可看出, 振荡信号幅值较高, 最高频率波动超过 100 MW, 高于 30% 系统输出功率, 此时信号信噪比高, 辨识受噪声影响较小。而类噪声信号中振荡幅值低, 频率波动不超过 10 MW, 振荡与系统随机波动的形态接近, 此时信号信噪比较低, 振荡信息与噪声、随机波动难以区分。

4.2 振荡信号模态辨识

针对图 5(a)所示原始振荡信号数据, 经本文所提算法, 提取其中模态信号如图 6 所示。本文方法从振荡信号数据中分解出了 3 个模态, 即为系统振荡的主要模态。该 3 个模态中, 第 1 模态幅值最高, 为振荡主导模态。将提取的各模态信号线性叠加, 重构所得信号如图 7 所示。

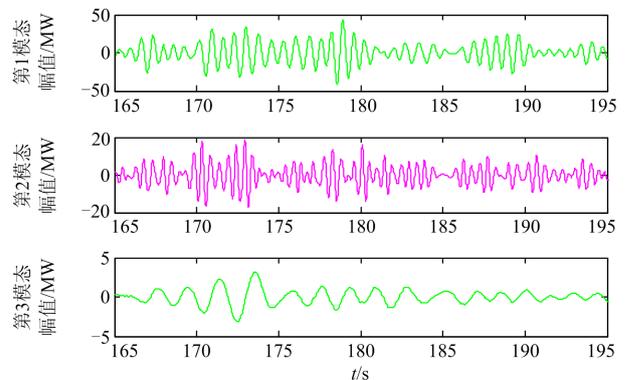


图 6 原始振荡数据中提取的模态信号

Fig. 6 Mode signals extracted from original oscillation data

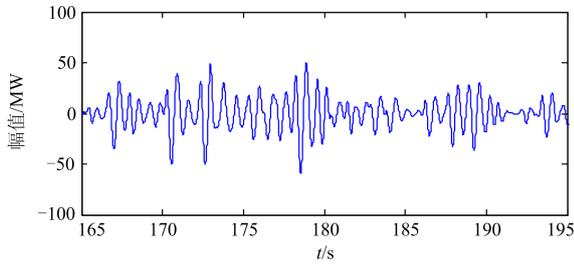


图 7 基于 VMD 提取模态的重构信号

Fig. 7 Reconstructed signal based on mode signals from VMD

比较图 7 与图 5(a), 不难发现重构信号与原始信号波形基本一致。就是说, 所分离出的 3 个模态信号即涵盖了系统主要的振荡, 本文方法能有效提取信号中所有主要的振荡模态信号。

采用 Prony 算法对图 6 模态信号进行参数辨识, 即可获得主要振荡模态的信息。将本文方法与 MF-Prony、EMD-Prony 参数辨识结果对比如表 3 所示。通过对比结果可发现, 针对振荡信号, 无论是本文方法、MF-Prony 或是 EMD-Prony 均能将幅值最高的模态辨识出来。三种方法中, MF-Prony 频率辨识误差最高, 本文方法与 EMD-Prony 方法结果相近。系统在剧烈振荡期间, 主导振荡模态频率为 1.48 Hz 左右, 次主导模态频率为 2.02 Hz 左右。

表 3 原始振荡数据模态辨识对比

Table 3 Mode identification result and comparison of original oscillation data

方法	模态	频率/Hz	幅值/MW	阻尼系数
本文方法	1	1.48	32.7	-0.94
	2	2.02	17.9	-1.40
	3	0.49	3.2	0.18
MF-Prony	1	1.44	28.2	-1.18
	2	1.61	13.7	-1.59
	3	2.32	8.5	-2.31
EMD-Prony	1	1.48	30.6	-0.52
	2	1.51	16.3	-1.01
	3	1.08	8.7	-1.03

4.3 类噪声信号模态辨识

类似地, 采用本文方法对图 5(b)所示类噪声数据进行模态信号提取与模态辨识。所提取模态信号如图 8 所示。从图 8 可看出, 经本文方法, 从类噪声数据中分解出了 4 个主要的模态信号, 其中模态 1 幅值最高, 为主导模态; 其次是模态 2、3 幅值。

对类噪声信号的模态参数辨识结果及对比如表 4 所示。从表 4 可知, 通过本文方法可从系统类噪声信号中准确辨识出 4 个振荡模态。其中主导模态为 1.47 Hz, 次要模态分别为 1.78 Hz、3.59 Hz 和 0.32 Hz。对比表 4 与表 3 可发现, 在被抑制的类噪

声信号中, 潜在的主导模态与振荡发生时的主导振荡模态频率基本一致, 为 1.47~1.48 Hz。本文方法无论是针对振荡信号或是类噪声信号, 均能准确地辨识出信号的主导振荡模态, 从而有助于振荡的及时抑制。MF-Prony 在应用于类噪声信号时无法辨识出 1.48 Hz 左右的模态; EMD-Prony 方法辨识出的主导振荡模态频率为 1.55 Hz, 与振荡信号中的主导模态频率 1.47 Hz 相比存在较高的误差。因此在针对类噪声信号的模态辨识时, 本文方法有着更好的应用效果。

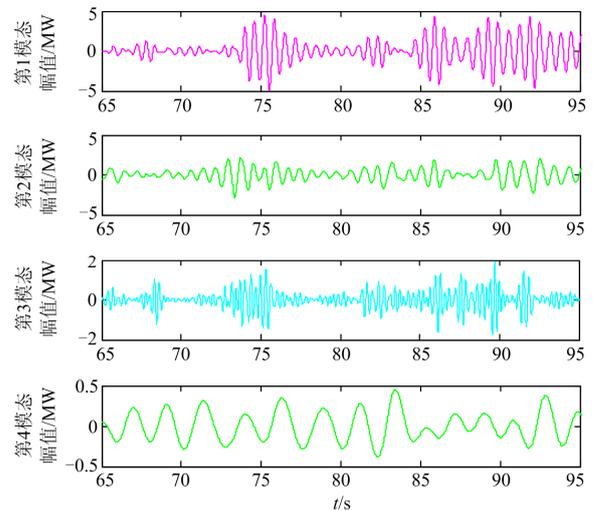


图 8 原始类噪声数据中提取的模态信号

Fig. 8 Mode signals extracted from original ambient noise data

表 4 原始类噪声数据模态辨识

Table 4 Mode identification of original ambient noise data

方法	模态	频率/Hz	幅值/MW	阻尼系数
本文方法	1	1.47	4.82	-0.064
	2	1.78	1.56	-0.26
	3	3.59	1.32	-0.23
	4	0.32	0.43	-0.13
MF-Prony	1	3.74	7.90	-0.016
	2	1.57	5.54	-0.74
	3	35.2	3.72	-5.90
EMD-Prony	1	1.55	5.93	-0.29
	2	1.29	1.44	-3.11
	3	0.82	0.97	0.035

5 结论

本文提出了一种基于 VMD 的电力系统泛频带振荡信号提取与模态辨识方法, 能够有效地从电力系统运行数据中对低频振荡、次同步振荡、超同步振荡等多类型、泛频带的振荡进行振荡区分、模态提取与参数辨识。辨识结果对于系统动态稳定分析与控制、振荡源辨识定位等方面都有重要作用。此

外, 本文所提方法既可用于已发生的振荡信号, 又可用于含有被抑制振荡的类噪声信号, 因此有助于对系统振荡进行预警和及时抑制。

参考文献

- [1] QUINTERO J, VITTAL V, HEYDT G T, et al. The impact of increased penetration of converter control-based generators on power system modes of oscillation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (5): 2248-2256.
- [2] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828, 3133.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828, 3133.
- [3] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.
- [4] ZHANG Xinran, LU Chao, LIU Shichao, et al. A review on wide-area damping control to restrain inter-area low frequency oscillation for large-scale power systems with increasing renewable generation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 45-58.
- [5] 李生虎, 孙琪, 石雪梅, 等. 基于区域极点配置的风电系统弱阻尼低频振荡模式抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 14-20.
LI Shenghu, SUN Qi, SHI Xuemei, et al. Suppression of weakly damped low-frequency modes of wind power system based on regional pole placement[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 14-20.
- [6] 高海翔, 伍双喜, 苗璐, 等. 发电机组引发电网功率振荡原因及其抑制措施研究综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 49-55, 66.
GAO Haixiang, WU Shuangxi, MIAO Lu, et al. Overview of reasons for generator-induced power oscillations & its suppression measures[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 49-55, 66.
- [7] SURIYAARACHCHI D H R, ANNAKAGE U D, KARAWITA C, et al. A Procedure to study sub-synchronous interactions in wind integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 377-384.
- [8] KARAAGAC U, FARIED S O, MAHSEREDJIAN J, et al. Coordinated control of wind energy conversion systems for mitigating subsynchronous interaction in DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2440-2449.
- [9] 崔亚辉, 张俊杰, 赵宗彬, 等. 高压直流输电超临界 600 MW 机组次同步振荡扭振模型及仿真[J]. 热力发电, 2016, 45(6): 106-110.
CUI Yahui, ZHANG Junjie, ZHAO Zongbin, et al. Subsynchronous oscillation torsional vibration model and simulation for a supercritical 600 MW unit with high voltage direct current transmission[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(6): 106-110.
- [10] 张帆, 张东辉, 柳勇军, 等. 鲁西背靠背混合直流输电工程引发次同步振荡的风险评估及抑制方法研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(4): 30-33, 43.
ZHANG Fan, ZHANG Donghui, LIU Yongjun, et al. Risk assessment and suppression method study on sub-synchronous oscillation resulted from Luxi mixed back-to-back HVDC project[J]. Smart Power, 2017, 45(4): 30-33, 43.
- [11] 徐衍会, 曹宇平. 直驱风机网侧换流器引发次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1556-1564.
XU Yanhui, CAO Yuping. Research on mechanism of sub/sup-synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1556-1564.
- [12] WANG Henan, ZHENG Chao, REN Jie, et al. Review on mechanism and analysis methods of low frequency oscillation in power system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 986-987: 2010-2013.
- [13] WADDUWAGE D P, ANNAKAGE U D, NARENDRA K. Identification of dominant low-frequency modes in ring-down oscillations using multiple Prony models[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2015, 9(15): 2206-2214.
- [14] 金涛, 刘对. 基于改进去噪性能的Prony算法电网低频振荡模态辨识研究[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(5): 33-41.
JIN Tao, LIU Dui. Power grid low frequency oscillation recognition based on advanced Prony algorithm with improved denoising feature[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21 (5): 33-41.
- [15] 李宽, 李兴源, 胡楠, 等. 基于经验模态分解自适应滤波的次同步振荡 ESPRIT 分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 18-23.
LI Kuan, LI Xingyuan, HU Nan, et al. ESPRIT analysis of subsynchronous oscillation based on the empirical

- mode decomposition self-adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 18-23.
- [16] 张煜林, 陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 115-121.
ZHANG Yulin, CHEN Hongwei. Parameter identification of harmonics and inter-harmonics based on CEEMD-WPT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 115-121.
- [17] WANG Shen, HUANG Songling, WANG Qing, et al. Mode identification of broadband Lamb wave signal with squeezed wavelet transform[J]. Applied Acoustics, 2017, 125: 91-101.
- [18] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 122-128.
REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 122-128.
- [19] 潘晴, 冉福星, 李雅昆. 基于 EMD 的前后置滤波语音增强算法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 33-39.
PAN Qing, RAN Fuxing, LI Yakun. Speech enhancement algorithm based on EMD for pre and post filter[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(3): 33-39.
- [20] 蒋平, 史豪, 吴熙. 风电功率波动引发的强迫振荡扰动源定位方法[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 1-6.
JIANG Ping, SHI Hao, WU Xi. Localizing disturbance source of power system forced oscillation caused by wind power fluctuation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 1-6.
- [21] 徐琪, 徐箭, 施微, 等. 基于奇异值分解的含风电电力系统强迫振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4817-4827, 5105.
XU Qi, XU Jian, SHI Wei, et al. The forced oscillation analysis of wind integrated power systems based on singular value decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4817-4827, 5105.
- [22] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [23] HAUER J F, DEMEURE C J, SCHARF L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [24] OUIBRAHIM H. Prony, Pisarenko, and the matrix pencil: a unified presentation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(1): 133-134.

收稿日期: 2018-06-10; 修回日期: 2018-12-01

作者简介:

汤吉鸿(1971—), 男, 本科, 教授级高工, 研究方向为电力系统运行分析及规划; E-mail: 18075100359@163.com

朱军飞(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度及控制; E-mail: mrzif2008@163.com

李勇(1982—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为能源电力系统运行优化与控制。E-mail: yongli@hnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)