基于EEMD和Prony方法的低频振荡类噪声辨识

针对Prony算法抗干扰差，对输入信号要求较高的缺点，提出一种基于总体平均经验模态分解(EEMD)结合Prony算法的低频振荡类噪声模态参数辨识方法。首先利用EEMD有效对抗模态混叠的能力依据频段大小对原始类噪声信号进行线性化处理得到IMF分量，根据IMF能量权重比的大小找到主导模式分量，最后对这些分量进行Prony分析得到信号的模态参数。与传统Prony方法相比，该方法具有良好的抗噪性，同时可以减少模型阶数，从而提高计算速度。通过对四机两区系统类噪声信号和四川电网仿真信号的模态辨识，验证了此方法的有效性和优越性。

高洁[1] 郭成[2] 周阳[1] 高曙光[1]/1.西南交通大学 电气工程学院 2.云南电力试验研究院有限公司电力研究院

高洁/博士研究生

关键词/Keywords

低频振荡·
类噪声信号·
EEMD·
Prony算法·
信号能量·
模态辨识·

0 引言

随着我国电力工业的高速发展，系统规模的不断扩大，使得区域电力系统的互联，长距离输电成为电力系统发展的必然趋势。由于弱联网的增多，弱阻尼的低频振荡时有发生，严重威胁电网的安全稳定运行，制约了互联电网传输能力的提升[1]，因此，快速而准确地对系统低频振荡特性进行监测和分析，不仅有助于系统整体动态特性的了解，还为电网稳定控制提供重要的参考依据[2]。

目前，基于相量测量单元（PUM）的广域测量系统（WAMS）在电网中得到了广泛应用与发展。WAMS作为新一代的稳控技术，为大电网的实时检测提供了先进的信息技术平台，提高了电力系统的可观察性。通过对系统动态过称的分析，为广域控制提供了充分的动态信息。但采取何种算法对WAMS量测信号进行在线分析，并快速准确地提取电网振荡特性，已经成为了电力系统稳定研究的一个重要课题[3~5]。目前，基于WAMS 量测数据的低频振荡模态参数辨识方法主要有短时傅里叶变换（FFT）、小波分析、Prony 算法以及希尔伯特–黄变换算法（HHT）等。FFT识别原理成熟，速度快，但不能处理非平稳信号，对密集耦合模态的分离精度不高[6]。小波算法[7]能很好地应用于非平稳信号的特性辨识，但如何有效地对小波基进行选取以及辨识精度存在限制成为辨识过程中一直存在的问题[8]。Prony方法于文献[9]中首次提出应用于低频振荡模态分析，近年来在低频振荡分析中得到广泛的应用，但该算法在抑制噪声以及对非平稳信号拟合等方面的效果不够理想。为此，相关学者对Prony算法提出了各种改进，但由于原理本身的缺陷，算法的抗噪性能与模型定阶等问题依然存在。近年来，一种有效分析非线性、非平稳信号的方法－HHT[14]（Hilbert－HuangTransform)被提出并在多个领域成功应用。文献[15-16]将其应用于低频振荡模式分析，验证其有效性。HHT的核心是EMD，其本质是将信号分解为有限个能反应原信号局部特征的固有模态函数（IMF），具备较高的时频分辨率和短时信号处理能力。但其缺点在于EMD存在模式混淆等问题。众多研究成果表明， EMD无法将频率相差1倍以内的2个模式进行有效的分离[17-18]。而低频振荡多

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为低密集耦合模态，很可能彼此频率较为接近，因此采用EMD对于电力系统低频振荡模态进行分解时，这种局限性是一个很大的问题。针对这个问题，文献[19]提出了改进算法EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)，该算法有效消除噪声的同时也解决了EMD模态混淆的问题。

结合以上研究，针对Prony算法在非线性低频振荡分析中的不足，以及抗噪性能差，本文提出一种基于EEMD和Prony 算法相结合的低频振荡类噪声信号模态辨识方法。首先，通过EEMD对非平稳的量测数据进行平稳化预处理，得到能反应低频振荡局部特征的各模态分量IMF，再根据分量信号的能量权重大小找到含有主导模式的IMF。最后，对主导模式 IMF采用 Prony算法进行模态分析，从而实现对低频振荡模态参数的快速有效提取。由于EEMD能完全自适应地处理非线性、非平稳信号，且预处理过程十分快速简单，辨识精度高，将其与Prony算法相结合运用在低频振荡类噪声信号辨识中能快速且准确的得到模态参数。本文通过仿真与实例分析对该方法的有效性与优越性进行了验证。

1 总体平均经验模态分解（EEMD）

1.1 IMF和EEMD

为了解决模式混叠的问题[20]，E Huang等人对EMD方法做出了改进，并提出了EEMD方法。其本质为通过叠加高斯白噪声后的多次EMD分解。当原始信号加入频率均匀的白噪声背景时，不同时间尺度的信号区域都能自动映射到与背景白噪声相关的适当尺度上。利用不相关随机序列的统计均值为0的原理，对多次加入噪声后的总体取均值后，噪声将会被消除，总体均值被认为是信号本身，从而消除模态混叠现象。其算法步骤如下[21]。

1）在原始信号$x(t)$中多次添加等长度随机正态分布的白噪声$n_i(t)$（白噪声标准差取原始信号标准差的0.1~0.4倍）即

$$x_i(t)= x(t)+ n_i(t) \tag{1}$$

式中，$x_i(t)$表示第i次加入高斯白噪声的合成信号。所加噪声的幅度会直接影响EEMD的分解效果，如果幅度过小，噪声将失去补充尺度的作用，无法构成不同频率上的连续性。

2）对$x_i(t)$分别进行EMD分解，得到各个IMF分量记为$C_{ij}(t)$，与一个余项记为$r_{in}(t)$。则

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{n} c_{ij}(t) + r_{in}(t) \tag{2}$$

3）重复步骤1和步骤2 N次。将上述各个IMF进行总体平均运算，得到最终的MF分量组

$$c_j(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} c_{ij} \tag{3}$$

式中$c_i(t)$表示EEMD分解后得到最终的第j个IMF分量。N为加入高斯白噪声的总体个数， N越大，对应的白噪声的IMF和将趋于0，分解结果也越趋近于真实值。

1.2 EEMD主导模式识别

根据信号谱分析中的Parseval定理[22-23]，可以得到IMF分量信号$E_{imf,i}$的能量

$$E_{imf,i} = \int_0^T |f_{i,j}(t_j)|^2 \mathrm{d}t = \sum_{j=1}^{m} |x_{i,j}|^2 \tag{4}$$

式中， $x_{i,j}$(i=IMF分量个数；j为信号离散采样点数)为IMF分量$f_{i,j}(t_j)$的离散点幅值。

通过对原始信号$x(t)$的EEMD分解可以得到n个IMF分量，寻找信号主导模式步骤如下。

1）利用式（4）计算出各个IMF分量信号能量$E_{imf}(i)$，同时n个IMF的能量之和应该恒等于原始振动信号的总能量E_{IMF}

$$E_{IMF} = \sum_{i=1}^{n} E_{imf}(i) \tag{5}$$

2）由于各个IMF分量包含不同的频率成分，具有不同的能量 ，从而形成振动信号在频率域的能量分布。由此得到第i个本征模态函数IMF的能量权重如下

$$\eta_i = \frac{E_{imf}(i)}{E_{IMF}} \times 100\% \tag{6}$$

电力系统低频振荡信号的能量主要集中在阻尼较小且振荡幅度较大的频带内，其能量权重比

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较高，而存在噪声或非主导模式的IMF分量其能量权重比较小。因此，通过计算各个IMF振荡能量权重的大小，选择能量权重较大的IMF可作为含主导模式信号进行分析。

2 Prony算法

早在1795年由法国数学家Prony就提出用多个复指数函数对等间距采样的数据模型进行线性拟合。自20世纪90年代，该算法被引入电力系统低频振荡分析，并得到广泛的应用。其数学描述如下：假设等间隔采样数据$x(1)\cdots\cdots x(n)$的模型，可由p个具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的复指数函数线性拟合[24]，即

$$\hat{x}(n)=\sum_{i=1}^{p}b_i z_i^n \tag{7}$$

式中，$\hat{x}(n)$ 为 $x(n)$ 的估计值，p为模型的阶数。假定b_i，z_i是复数且

$$\begin{cases} b_i=A_i e^{j\theta_i} \\ z_i=e^{(\alpha_i+j2\pi f_i)\Delta t} \end{cases} \tag{8}$$

式中，A_i、θ、α_i、f_i分别为振幅、相位、衰减因子和频率，Δt为采样间隔。

为了使拟合信号向原始信号逼近，根据平方误差最小原则即

$$\min(\varepsilon=\sum_{n=0}^{N-1}|x(n)-\hat{x}(n)|^2) \tag{9}$$

如果把z_i看作线性常系数差分方程的根，那么满足特征方程

$$\psi(z)=\sum_{i=0}^{p}a_i z^{p-i}=0\ (a_0=1) \tag{10}$$

由式(7)构造常系数差分方程式为

$$\hat{x}(n)=-\sum_{i=1}^{p}a_i\hat{x}(n-i)(p\leqslant n\leqslant N-1) \tag{11}$$

则式(7)是式(11)的齐次解，式(11)展开成矩阵形式，即为

$$-\begin{bmatrix} \hat{x}(p) & \cdots & \hat{x}(0) \\ \hat{x}(p+1) & \cdots & \hat{x}(1) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \hat{x}(N-1) & \cdots & \hat{x}(N-p-1) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \hat{x}(p) \\ \hat{x}(p+1) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \tag{12}$$

当$N>2p$时，通过式(12)即可求出a_i，这是一个求解非线性的最小二乘问题。代入式(10)进而求出z_i，将z_i代入式(7)即可求出b_i，于是式(8)中的衰减因子、频率、幅值和初相位可依据式(13)求出，即

$$\begin{cases} \alpha_i=\ln|z_i|/\Delta t \\ f_i=\arctan[\mathrm{Im}(z_i)/\mathrm{Re}(z_i)]/2\pi\Delta t \\ A_i=|b_i| \\ \theta_i=\arctan[\mathrm{Im}(b_i)/\mathrm{Re}(bi)] \end{cases} \tag{13}$$

3 基于EEMD和Prony的低频振荡模态识别

基于线性拟合思想的Prony算法对噪声十分敏感，对系统实际阶数的识别以及非平稳信号拟合能力不是很理想。文献[25]指出，对信号噪声过大，其信噪比小于40 dB时， Prony分析很难辨识出正确的结果。文献[26]提出了利用离散卡尔曼滤波进行数据预处理方法。但在实际量测信号多为非平稳的类噪声信号，且缺少对其真正特性认识的情况下，无法建立较为准确的系统模型。然而EEMD方法将噪声辅助分析应用于EMD中以促进抗混分解，在抑制模式混叠同时也能实现很好的降噪。因此类噪声信号经过EEMD分解后的固有模态分量更好地揭示原信号的物理内涵，使其物理本质更加清晰。因此本文先对信号进行EEMD分解，然后对分解后的各IMF分量进行能量权重比计算，选择权重比大的IMF进行Prony分析，从而快速而准确的识别出振荡模态参数。

本文所提出的基于EEMD和Prony算法相结合的电力系统低频振荡类噪声信号辨识方法如图1所示。

4 算例分析

4.1 四机两区域系统

通过四机11节点系统，仿真验证EEMD和Prony相结合应用于电力系统低频振荡类噪声信号模态辨识的有效性。

系统接线图如图2所示，利用Matlab平台搭建仿真系统，具体参数见文献[1]。0.5 s时在发电机组G1机端处加入20 Mvar无功扰动，扰动持续0.5 s后解除，选取基准功率1 000 MW。仿真时间超过

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

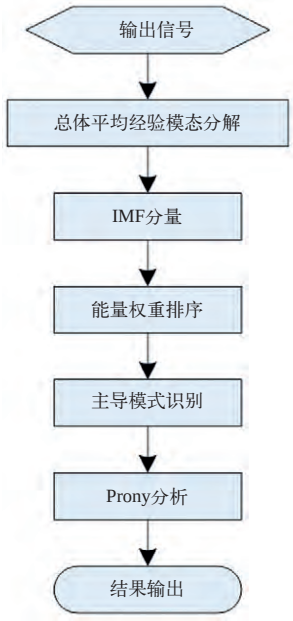

图1　基于EEMD和Prony模式分析流程图

24 s，发电机电磁功率出现了增幅振荡，逐渐失去与系统保持同步的能力，从而导致系统解列。

实测受扰轨迹在采集的过程中不可避免会受到噪声的影响，因此在仿真过程中，于系统各负荷处注入通过低通滤波器的20 dB高斯白噪声进行模拟。采集G3输出的有功功率曲线，如图3所示，利用EEMD和Prony相结合的方法提取此信号的振动特性，检验此方法的准确性及抗噪性。

由图4的分解结果可以发现：EEMD分解后噪声抑制效果明显。第一个IMF分量信号平稳，振幅最大，包含振荡信号的主导模式；而剩余分量*r*幅值变小且呈现不规律性，包含过滤后的噪声以及虚假模态分量。文献[17]通过图像识别技术将EMD分解后振幅最大的IMF分量与原始振荡信号进行比较，从而判定其包含该振荡信号的主导模式，但同时也为辨识过程增加了难度。本文通过对IMF能量权重比的计算寻找含有主导振荡模式的IMF分量，过程简单快速，避免了人为因素的影响，达到了同样的效果且数字化结果直观方便，如表1所示。

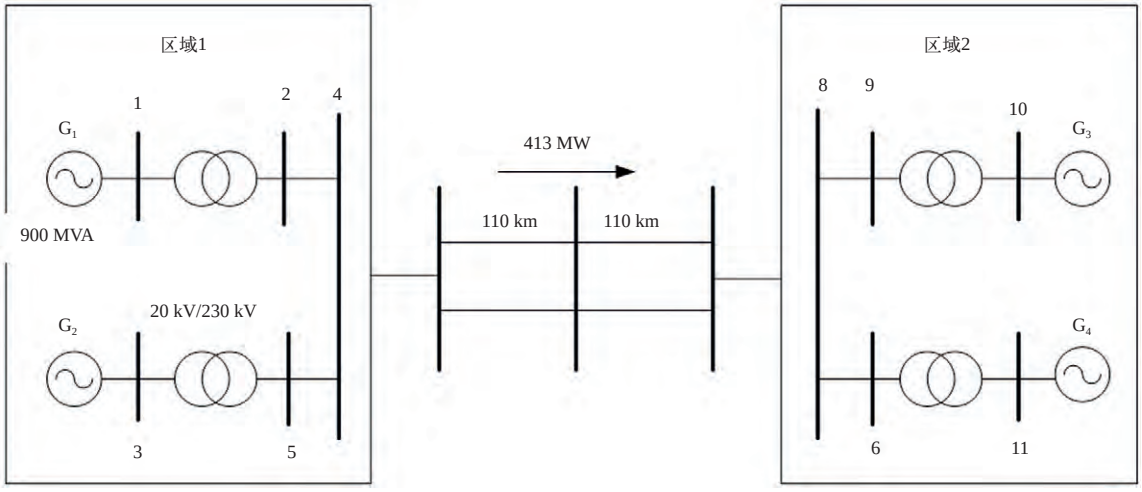

图2　四机两区域系统接线图

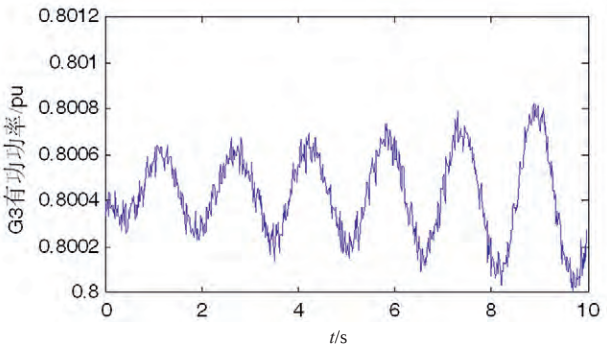

图3　G3输出有功功率类噪声信号

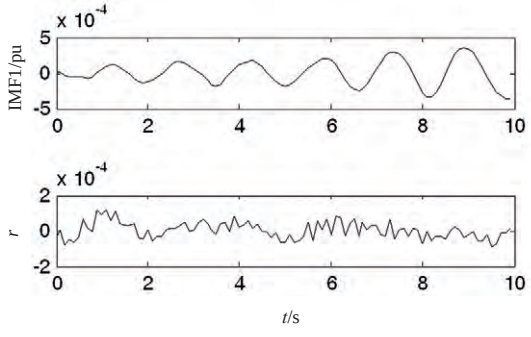

图4　有功功率类噪声曲线的EEMD分解

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 IMF能量及权重比

IMF	信号能量$E_{imf}(i)$	权重比η/(%)	E_{IMF}
IMF1	$2.89e^{-6}$	93.59	$3.09e^{-6}$
IMF2	$1.98e^{-7}$	6.41	

从表1中可以看出，IMF1的能量权重比达到了93.59%，而信号剩余能量权重比仅为6.41%，由此可以判定IMF1包含此类噪声信号的主要振荡模态。因此通过能量权重比进行IMF筛选具有很好的实用性。

分别以原始信号和IMF1为对输入进行Prony分析如表2所示。为验证此算法分析结果的有效性和优越性，根据系统线性化模型，通过特征根计算得到该系统理论上存在的模态信息，以及直接应用Prony算法分析的结果。

表2 基于4机系统的低频振荡类噪声辨识结果

辨识方法	模型阶数	模式1		模式2	
		频率/(Hz)	衰减因子/α	频率/(Hz)	衰减因子/α
EEMD+Prony	11	0.64	0.11	1.3	−0.81
Prony	29	0.63	0.18	1.5	−0.94
理想值	7	0.64	0.11	1.3	−0.86

由表2分析结果得出的结论如下：EEMD结合Prony算法与直接Prony分析，均可以的较准确的两个振荡模态。但直接采用Prony方法处理类噪声信号，误差相对较大，同时计算阶数相对主导模式而言显得过多，影响对主导模式的判断。而采用EEMD和Prony方法相结合的方法，提高了模态参数辨识的准确度，并且大大减少了Prony算法对系统的识别阶数，减少了噪声引起的非主导模式对Prony算法的影响。

图5所示为原始采样信号和通过EEMD与Prony分析后所得参数拟合曲线的逼近结果。可以看出两者取得了很好的吻合，说明基于EEMD预处理后的Prony分析结果可以较准确的逼近原始振荡曲线。

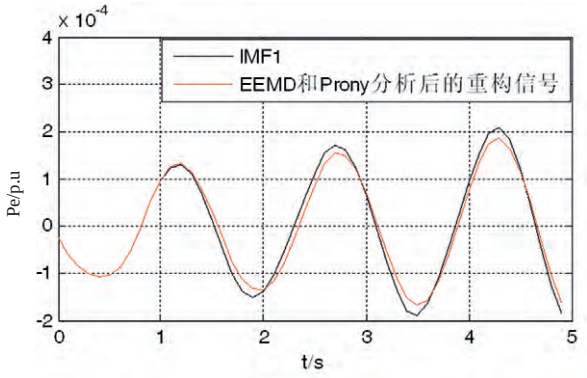

图5 基于EEMD和Prony的主导模式拟合结果

4.2 电网实例

图6为四川电网尖山高压侧发生瞬时接地故障时，用BPA稳定计算程序得到的洪板线(洪沟变—板桥变)与黄万线(黄岩变—万州变)的有功功率时域仿真曲线，采样时间间隔为0.01 s。

对图6的洪板和黄万的有功功率曲线进行EEMD分解，得到线路中含主导模式的IMF分量，再利用Prony算法对这些IMF分量进行模态辨识，得到所有振荡模态的参数，如表3、4所示。为验

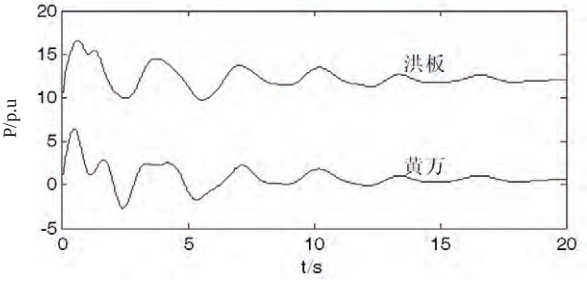

图6 国家电网洪板线和黄万线有功功率曲线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

证方法的优越性，再直接利用Prony算法对洪板线低频振荡模态进行识别，得到一组辨识结果，如表5所示。

表3 基于EEMD和Prony洪板线低频振荡主导模式分析

幅值	频率/Hz	衰减因子	能量
3.2	0.31	−0.12	110
1.0	0.14	−0.39	15
0.63	0	−4	0.18
0.35	0.58	−0.14	1.1
…	…	…	…

模型阶数p=31

表4 基于EEMD和Prony黄万线低频振荡主导模式分析

幅值/pu	频率/Hz	衰减因子	能量
4.1	0	−0.4	55
2.5	0.31	−0.13	63
2.0	0.1	−0.12	4.4
0.5	0.73	−0.38	24
…	…	…	…

模型阶数p=31

表5 基于Prony洪板线低频振荡主导模式分析

幅值/pu	频率/Hz	衰减因子	能量
3.8	0.32	−0.13	130
2.7	0	−3.8	3.4
0.89	0.12	−0.13	7.3
0.69	1.5	−1.1	0.58
…	…	…	…

模型阶数p=41

由表3、4可以看出，洪板线和黄万线均含有0.31 Hz的振荡频率，由此可以确定这个振荡频率就是四川与重庆强相关的区域振荡模式。同时计算出各个振荡模式的衰减因子全为负，功率曲线也呈振荡衰减，由此判断系统最后是趋于稳定的。由表4、5可以看出，采用EEMD对主导模式提取后再进行Prony分析，大大减少了计算阶数，可以更快速的判断其主导模式和主导频率。

5 结束语

本文提出将EEMD和Prony相结合的方法对电力系统低频振荡类噪声信号进行模态辨识。该方法不必考虑产生低频振荡的单一或多重机理，可直接对WAMS量测数据进行模态识别。在系统正常运行或者小扰动下，先采用EEMD分解得到不同频段的IMF分量，再利用能量权重比对含有主导模态的IMF分量进行筛选，最后利用Prony算法辨识出这些分量中所包含的模态参数信息。算例验证结果表明，经过EEMD后的Prony分析可以很好的消除噪声影响，降低系统识别阶数，同时提高了计算速度和参数辨识精度。随着WAMS 的广泛应用，基于EEMD和Prony的低频振荡类噪声识别算将为电力系统低频振荡分析提供新思路与方法。

参考文献

[1] 倪以信，陈寿孙，张宝霖．动态电力系统的理论和分析[M]．北京：清华大学出版社，2002：235-270.

[2] 陈实，许勇，王正风，等．电网实时动态监测技术及应用[M]．北京：中国水利水电出版社，2010：140-144.

[3] 鞠平，谢欢，孟远景，等．基于广域测量信息的在线辨识低频振荡[J]．中国电机工程学报，2005，25(22)：56-60.

[4] Korba P， Uhlen K． Wide-area monitoring of electromechanical oscillations in the Nordic power system: practical experience[J]．IET Generation Transmission & Distribution，2010，4(10)：1116-1126.

[5] Lee K C，Poon K P．Analysis of power system

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

dynamic oscillations with beat phenomenon by fourier transformation[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1990, 5(1): 148-153.

[6] 刘森,赵书强,于赞梅,等.基于小波预处理技术的低频振荡Prony分析[J].电力自动化设备, 2007, 27(4): 64-67.

[7] 张鹏飞，薛禹胜，张启平．电力系统时变振荡特性的小波脊分析[J]．电力系统自动化，2004，28(16)：32-35.

[8] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial results in prony analysis of power system response signals[J].IEEE Trans. on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.

[9] Trudnowski D J, Johnson J M, Hauer J F. Making prony analysis more accurate using multiple signals[J].IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.

[10]郭成，李群湛，王德林，等．互联电力系统低频振荡的广域Prony分析 [J]．电力自动化设备，2009，29(5)：69-73.

[11]吴超, 陆超 韩英铎等. Prony方法和ARMA法在低频振荡模式辨识中的适用性比较[J]电力自动化设备,2010,30(3):30-34

[12]孙晓明，高孟平，刘涤尘，等．采用改进自适应Prony方法的电力故障信号的分析与处理[J]．中国电机工程学报，2010，30(28)：80-87.

[13]Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.

[14]李天云，高磊，赵妍．基于 HHT 的电力系统低频振荡分析[J]．中国电机工程学报，2006，26(14)：24-30.

[15]穆钢，史坤鹏，安军，等．结合经验模态分解的信号能量法及其在低频振荡研究中的应用[J].中国电机工程学报，2008，28(19)：36-41.

[16]李天云，谢家安，张方彦，等．HHT 在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]．中国电机工程学报，2007，27(28)：79-83.

[17]RILLING G, FLANDRIN P. One or two frequencies? The empirical mode decomposition answers. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(1): 85-95.

[18]WU Zhaohua, HUANG Norden E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J].Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1):1-41.

[19]WU Zhaohua, HUANG Norden E.A study of the characteristics of white nosie using the empirical mode decomposition method[J]. Proc R Soc Lond: A, 2004, 460: 1 579-1 611.

[20]张超，陈建军．EEMD方法和EMD方法抗模态混叠对比研究[J]．振动与冲击，2010,29(S)：87-90

[21]穆钢，王宇庭，安军，等．根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法研究[J]．中国电机工程学报，2005，24(9)：7-11.

[23]周德廉,邵国友.现代测试技术与信号分析[M].徐州:中国矿业大学出版社,2005.

[24]竺炜，唐颖杰，周有庆等. 基于改进Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别张超[J]. 电网技术，2009，33(5):44-47

[25]Grund C E, Paserba J J, Hauner J F, et al. Comparison of Prony and Eigen-analysis for Power System Control Design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(3): 964-971.

[26]JOHNSON M A, ZARAFONITIS I P, CALLIGARIS M. Prony analysis and power system stability—some recent theoretical and applications research// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 3, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2000: 1 918-1 923.

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

高洁（1985-），女，博士研究生，研究方向为电力系统稳定分析以及信号处理在电力系统中的应用。

郭成（1978-），男，博士，高级工程师，主要从事电力系统分析、电能质量控制研究工作；

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net