

# 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究

李安娜<sup>1</sup>, 吴熙<sup>1</sup>, 蒋平<sup>1</sup>, 徐钢<sup>2</sup>, 王成亮<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 针对传统 Prony 方法对噪声敏感导致辨识精度不高的问题, 提出了一种基于形态滤波和 Prony 算法相结合的低频振荡模式辨识的方法, 实现了在有混合噪声干扰情况下低频振荡模式的准确辨识。基于数学形态学, 设计了一种基于半圆形结构元素的形态滤波器, 在选取合适的元素尺寸情况下, 可以有效滤除混合噪声。对于去噪声之后的信号采用 Prony 算法进行辨识, 可准确获取低频振荡各个模式参数。通过 Matlab 进行算例仿真, 表明了对电力信号进行预处理的必要性以及所提出的方法能相对精确地进行振荡模式辨识, 验证了其有效性。

**关键词:** 低频振荡; 数学形态学滤波; Prony 算法; 模式辨识

## Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm

LI Anna<sup>1</sup>, WU Xi<sup>1</sup>, JIANG Ping<sup>1</sup>, XU Gang<sup>2</sup>, WANG Chengliang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** A method based on morphological filtering theory and power algorithm is put forward to identify low frequency oscillation modes, aiming at how to avoid the limitation of Prony methods that is sensitive to noise thus to cause the inaccuracy. It realizes accurate identification of oscillation modes in the condition of fixed noises. A morphology filter, which is based on mathematical morphology and hemicycle structure element is designed to effectively suppress the noise in the condition of proper size of the element. Prony algorithm is then used to detect the de-noised signal and obtain the low frequency oscillation parameters of every mode. The Matlab simulation results show that it is very necessary to preprocess the data of electric signal. Effectiveness and relatively accuracy are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407028) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20140633).

**Key words:** low frequency oscillation; morphology filter; Prony algorithm; oscillation mode identification

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0137-06

## 0 引言

大区域电网互联在满足了生产需求的同时, 也使得互联电网运行接近极限临界点, 导致振荡失稳问题日渐显著<sup>[1-2]</sup>。低频振荡问题影响了电网安全运行、制约了电网传输能力<sup>[3]</sup>。为保持系统安全稳定运行, 抑制低频振荡的关键在于获得主导振荡模式参数<sup>[4]</sup>, 从而实现了对低频振荡波形的准确分析。

目前用在识别低频振荡模式的方法有 ARMA 算法及其改进算法<sup>[5]</sup>、快速傅里叶算法(FFT)、小波

算法、Prony 算法、ESPRIT 算法等。ARMA 算法不能满足在线监视的要求; 实时 FFT 的精度受数据窗限制, 经 FFT 变换能直接获取低频振荡主导模式的频率, 但是其幅值、相位和衰减系数可能需要采取智能算法进行逼近<sup>[6]</sup>, 且在许多领域中只能定性而不能精确定量分析和解决问题; 小波算法可以反映信号时变特性<sup>[7]</sup>, 但小波基选取比较困难<sup>[8]</sup>; ESPRIT 算法没有同时利用复观测数据及其共轭数据进行信号参数估计, 且在低信噪比下的性能较低, 使得辨识精度不高<sup>[9]</sup>; Prony 算法用一组指数项的线性组合来拟合等间隔采样数据, 从中直接计算信号的幅值、频率、初相、衰减因子等信息, 凭借其准确性和便捷性, 被广泛运用在电力系统低频振荡模式的识别<sup>[10]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金(51407028); 江苏省自然科学基金(BK20140633)

然而实际电力系统中存在噪声,若使用 Prony 算法进行辨识,在信噪比不低于 50~60 dB 的情况下,能得到较为理想的拟合效果<sup>[9]</sup>。针对 Prony 算法对噪声的敏感性,文献[11-12]提出了改进 Prony 算法,但是研究表明<sup>[13]</sup>,当信噪比低于 40 dB 时,也难以得到相对准确的辨识结果。文献[14]提出对采集信号进行分类,利用同类、非同类等多信号分析方法对低频振荡进行分析,通过数据预处理减少噪声对算法精度的影响,但若不能正确的判别同类信号可能会出现辨识错误。文献[15]提出了采用自适应神经模糊滤波方法进行数据预处理,但需要对大量数据进行训练、调整,计算量比较大,另外隶属度函数的确立也比较困难;卡尔曼滤波需要建立一个系统模型,然而实际情况下,难以得到输入信号的真实特性<sup>[9]</sup>;自适应滤波算法简单,计算量小,但是收敛过程慢,步长与收敛速度、失调之间存在矛盾<sup>[16]</sup>;小波去噪方法虽然实现简单且效果良好,但是其阈值的估计不能太大或太小,否则会引起很大的偏差<sup>[17]</sup>。除此之外,传统数字滤波器常伴有畸变现象,是由自身存在时滞、非线性相移引起的,当噪声与监测信号的频谱有重叠时,这种数字滤波器并不能有效滤除噪声。

本文提出将数学形态滤波和 Prony 算法相结合,首先利用数学形态学原理对实际数据进行滤波,而后采用 Prony 算法进行辨识。通过对实例的分析,验证了该方法的有效性。

## 1 形态学消噪理论及滤波器结构元素选取

### 1.1 数学形态学消噪理论

数学形态学是一门密切联系实际的科学,以积分几何和随机集论等严格数学理论为基础,利用“探针”收集待处理信号的信息,考察信号之间的相互关系,并获取信号全局或局部的有用特征<sup>[18]</sup>。其中,“探针”即结构元素的选取,是形态学处理的关键。

数学形态学的基本运算有四种,包括膨胀、腐蚀运算以及由膨胀腐蚀引出的开、闭运算。

假设采集到的一维多值信号  $f(n)$  定义域为:  $D[f] = \{0, 1, 2, 3, \dots, N\}$ , 选择结构元素序列为  $g(x)$ , 且定义域为  $D[g] = \{0, 1, 2, 3, \dots, P\}$ ; 其中  $P$  和  $N$  为整数。分别定义腐蚀与膨胀运算如下:

$$(f \ominus g)(n) = \min_{x \in D[g], n = (1, 2, \dots, N)} \{f(n+x)\} - g(x) \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \min_{x \in D[g], n = (1, 2, \dots, N)} \{f(n-x)\} + g(x) \quad (2)$$

由膨胀腐蚀运算引出的形态学开、闭运算表达

式如式(3)、式(4)。

$$f \circ g = f \ominus g \oplus g \quad (3)$$

$$f \bullet g = f \oplus g \ominus g \quad (4)$$

式中:  $\circ$  为开运算;  $\bullet$  为闭运算。

通过上式可以看出,由腐蚀膨胀运算引出的开运算能够抑制曲线中出现的尖峰,去掉曲线上出现的细突出,能使曲线更为平滑;闭运算可以填充信号波形中出现的低谷,同样达到平滑曲线的目的<sup>[19]</sup>。虽然形态开闭和闭开滤波器可以同时滤除信号中的正、负低谷噪声,但仍存在统计偏差,这是由开运算和闭运算的特性造成,单独使用它们得到的滤波效果并不理想。本文采用这两种滤波器的平均组合抑制信号中的噪声。

由于形态开闭滤波器输出幅度偏小,闭开滤波器输出幅度偏大,可取形态开闭滤波器结果的最大值和形态闭开滤波器结果的最小值,再取两者的平均值即可得到滤波后的信号:

$$\varphi[f(n)] = \frac{\varphi_{oc}[f(n)] + \varphi_{co}[f(n)]}{2} \quad (5)$$

### 1.2 形态滤波器结构元素选取

形态学中常用的结构元素有直线、曲线、三角形、圆形、十字形及其他多边形等。应用于电力系统时,常采用的结构元素有直线、半圆和三角折线。然而针对具体应用背景,形态学分析在结构元素选取方面还没有提出具体选取原则。除结构元素形状之外,滤波效果还与结构元素尺寸有关<sup>[18]</sup>。若尺寸合适,则能有效抑制信号类别内的细节差异,且不会弱化类别间的边界。本文构造了含白噪声的低频振荡测试数据,比较了直线、半圆和三角折线三种结构元素及其尺寸的数学形态滤波效果,并基于实测数据进行验证。

为了定量评估形态学的滤波效果,引入一个系数  $E$ , 定义为

$$E = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=0}^N (y_{i0} - y_i)^2} \quad (6)$$

式中:  $N$  为总采样点个数;  $y_{i0}$  是未叠加噪声的输入信号离散采样点;  $y_i$  是经过形态学滤波器滤波后的输出信号离散采样点。  $E$  越小,说明滤波后的信号和未加噪声的信号越接近。

## 2 基于数学形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识

### 2.1 数学形态滤波器设计

由于实际电力系统中存在噪声,直接使用 Prony 算法进行辨识,结果误差将会较大,改进后算法本身仍对噪声十分敏感<sup>[11,20]</sup>,难以得到准确的辨识结果。

因此, 为了使 Prony 算法能够更准确地辨识出主导模式, 需要设计滤波器对现场采集的数据进行预处理。

本文采取数学形态学原理设计滤波器, 关键在于结构元素的选取, 事实上, 结构元素的尺寸和形状的设计与变换后要保持的信号形状相匹配, 考虑到形状复杂的结构元素需要的计算量比较大, 因此直接采用 1.2 节提出的三种结构元素进行对比分析, 经过多次试探和证明, 本文选取半圆形结构元素设计滤波器, 对含有噪声的信号进行去噪处理, 最后对去噪后的信号使用 Prony 算法进行辨识, 得到主导模式的信息。

## 2.2 基于 Prony 算法的模式辨识

对于去噪后的信号  $x(n)(n=0\sim N)$ , 可选用如下模型进行 Prony 辨识<sup>[6]</sup>。

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

式中:  $\hat{x}(n)$  为  $x(n)$  的近似值;  $p$  为模型阶数。

一般地, 假定  $b_i$ 、 $z_i$  是复数, 且

$$b_i = A_i e^{j\theta_i} \quad (8)$$

$$z_i = e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t} \quad (9)$$

式中:  $A_i$  为振幅;  $\theta_i$  为相位;  $\alpha_i$  为衰减因子;  $f_i$  表示对应的振荡频率;  $\Delta t$  代表采样时间间隔。

通过采样点信号计算样本函数  $r(i, j)$ , 并构造扩展阶的矩阵  $\mathbf{R}_e$ :

$$r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j) * x(n-i) (i, j = 0, 1, \dots, p_e) \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_e = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,p_e) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,p_e) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(p_e,0) & r(p_e,1) & \cdots & r(p_e,p_e) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $p_e$  是扩展后的阶数。

这里使用奇异值分解和最小二乘法(SVD-TLS)确定矩阵  $\mathbf{R}_e$  的有效秩  $p$ , 并根据下式确定系数  $a_1, a_2, \dots, a_p$  的总体最小二乘估计:

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \cdots & r(0,p) \\ r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(p,0) & r(p,1) & \cdots & r(p,p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

一旦  $a_1, a_2, \dots, a_p$  得到后, 即可求出多项式  $1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-p} = 0$  的根  $z_i$ ,  $z_i$  被称为 Prony 极点。于是, 指数模型(7)简化为未知参数  $b_i$  的线性方程。用矩阵形式表示之, 即为

$$\mathbf{Z}\mathbf{b} = \hat{\mathbf{x}} \quad (13)$$

式中:

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}(0), \hat{x}(1), \dots, \hat{x}(N-1)]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T \quad (16)$$

这里  $\mathbf{Z}$  是一  $N \times p$  维的 Vandermonde 矩阵, 由于  $z_i$  各不相同, 故  $\mathbf{Z}$  的各列线性独立, 即满秩, 于是, 式(13)的最小二乘解为

$$\mathbf{b} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (17)$$

然后通过式(18)~式(21)获得幅值  $A_i$ , 相位  $\theta_i$ , 频率  $f_i$  和衰减因子  $\alpha_i$ :

$$A_i = |b_i| \quad (18)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \right] / (2\pi\Delta t) \quad (19)$$

$$\alpha_i = \ln |z_i| / \Delta t \quad (20)$$

$$f_i = \frac{\tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(z_i)}{\text{Re}(z_i)} \right]}{2\pi\Delta t}, i = 1, 2, \dots, p \quad (21)$$

考虑到电力系统实际采样数据的特点, 本文提出基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识算法, 该算法克服了 Prony 算法本身对噪声的敏感, 提高了 Prony 辨识精度, 具体步骤如下:

1) 将实际采集的数据使用形态学原理进行滤波。

2) 计算出定量评估系数  $E$ , 判断滤波效果。若  $E$  值较大, 则改变结构元素尺寸重新滤波, 若  $E$  值较小, 则进行步骤 3)。

3) 使用 Prony 算法对滤波后的数据进行辨识, 得出模式信息。

## 3 算例分析

### 3.1 有效性验证

构造一个测试信号, 比较滤波前后使用改进 Prony 算法进行辨识的效果。有功功率信号为

$$y = 1.2e^{-0.4t} \cos(2\pi \times 0.5t) + 0.8e^{-t} \cos(2\pi \times (1.5t + \pi) + e^{-1.2t} \cos(2\pi \times 0.9t) + \omega(t) \quad (22)$$

该信号包含 3 个振荡模式, 频率分别为 0.5 Hz、1.5 Hz、0.9 Hz, 该信号被信噪比为 10 db 和信噪比为 20 db 的混合高斯白噪声  $w(n)$  污染。

选择半径为 0.2 个单位长度的半圆形结构元素设计数学形态滤波器对含噪信号进行滤波, 结构元

素序列如下：

$$g(x) = \sqrt{0.2^2 - \left(\frac{10-k}{200}\right)^2}, (k = 0, 1, 2, \dots, 10) \quad (23)$$

得到理想扰动信号、含噪声信号、去噪声后信号如图 1 所示。

分别对图 1 中的含噪声信号和去噪后的信号，使用 Prony 算法进行辨识，辨识结果如表 1。

由表 1 可知，对含有混合噪声的信号，基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识方法能更为准确地提取振荡模式参数，且相对于理想扰动的误差较小。根据表 1 分别作出使用 Prony 方法以及本文方法进行辨识的拟合曲线，如图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出，对含有混合噪声的信号直接使用 Prony 辨识，得到的拟合曲线有偏移，而基于数学形态滤波和 Prony 算法的辨识方法拟合效果更为准

确，验证了其有效性。

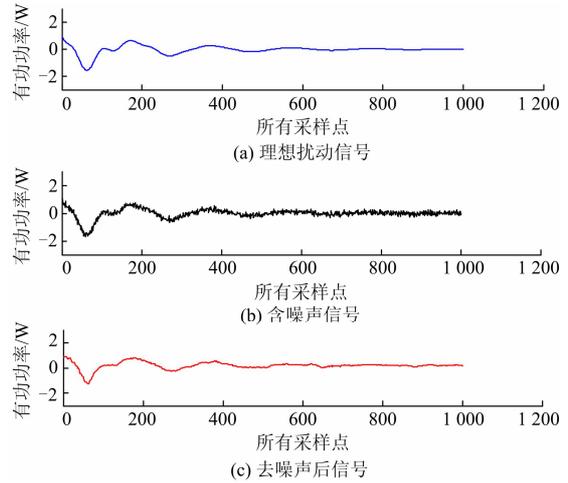


图 1 理想扰动、含噪声信号、去噪声后信号  
Fig. 1 Ideal signal, noisy signal and de-noising signal

表 1 两种方法辨识结果

Table 1 Identifying results of both methods

模式	辨识参数	理论值	Prony 辨识	本文方法	误差 1%	误差 2%
模式 1	幅值	1.200 0	1.344 0	1.200 2	12.0	0.02
	频率/Hz	0.500 0	0.472 4	0.499 9	5.52	0.02
	初相/rad	0.785 4	1.153 8	0.784 1	46.9	0.17
	衰减系数	-0.400 0	-0.427 3	-0.400 2	24.3	0.05
模式 2	幅值	1.000 0	1.06	0.999 8	6.83	0.02
	频率/Hz	0.900 0	1.102 3	0.900 1	22.5	0.01
	初相/rad	0.523 6	0.628 3	0.524 5	20.0	0.17
	衰减系数	-1.200 0	-1.503 0	-1.199 8	25.3	0.02
模式 3	幅值	0.800 0	0.864 0	0.800 4	8	0.05
	频率/Hz	1.500 0	1.553 4	1.500 0	3.56	0
	初相/rad	3.141 6	2.827 0	3.141 3	10	0
	衰减系数	-1.000 0	-1.325 1	-1.000 0	32.5	0

注：误差 1 为 Prony 辨识结果的误差；误差 2 为使用本文方法进行辨识的误差。

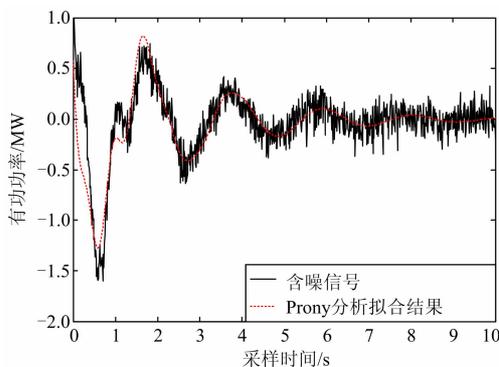


图 2 Prony 分析拟合结果

Fig. 2 Fitting results of Prony analysis

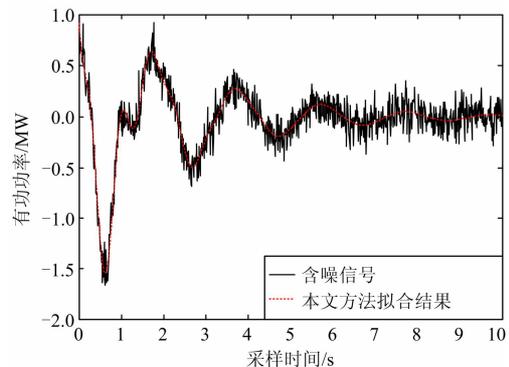


图 3 本文方法拟合结果

Fig. 3 Fitting results of the method proposed in this paper

### 3.2 工程应用实例

以某厂 2 号机组获得的 PMU 数据为例, 根据当日 6:41:48 至 6:41:58 时段每隔 10 ms 采样测得的数据, 进行 Matlab 仿真, 发现在采样点为 5 000 附近, 产生了小扰动并放大如图 4 所示。

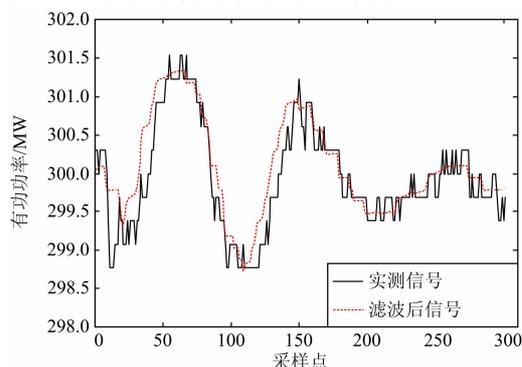


图 4 滤波处理

Fig. 4 Filtering processing

然后使用 Prony 算法进行辨识, 得到拟合曲线如图 5 所示, 表 2 列出了识别出的各参数。

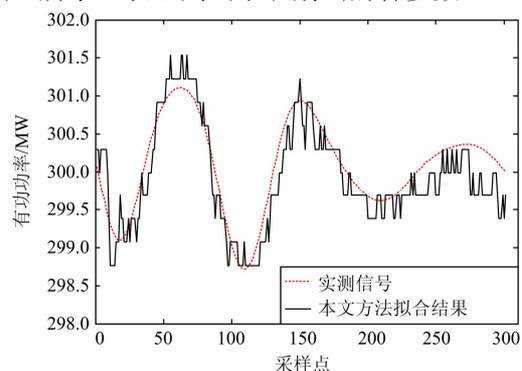


图 5 本文方法拟合结果

Fig. 5 Fitting results of the method proposed in this paper

表 2 扰动部分辨识结果

Table 2 Analysis results of the disturbance

模式	幅值	频率/Hz	初相/rad	衰减系数
1	1.381	0.929 9	-3.019 3	-0.479 2
2	1.360 2	1.343 9	0.165 5	-1.066 1
3	0.505	1.967 7	1.504 2	-1.114 8

结果表明, 该厂 2 号机组在 49.5~51.5 s 之间确实发生了低频振荡现象, 且使用本文提出的方法进行辨识能得到较为理想的拟合曲线, 进一步说明了基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识具有工程实用性。

## 4 结论

本文根据电力系统实际采集数据的特点, 对低

频振荡模式辨识提出了一种新的方法。该方法基于形态滤波和 Prony 算法进行模式辨识, 克服了 Prony 以及改进 Prony 算法本身对噪声的敏感。通过对已知 3 阶信号的辨识, 证明了所提算法的有效性。工程实际算例表明, 将数学形态滤波算法和 Prony 算法相结合, 进行低频振荡模式辨识, 可以得到很好的拟合效果。

## 参考文献

- [1] 杨慧敏, 易海琼, 文劲宇, 等. 一种实用的大电网低频振荡概率稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 124-129.  
YANG Huimin, YI Haiqiong, WEN Jinyu, et al. A practical stability analysis method for large-scale power system based on low-frequency-oscillation probability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 124-129.
- [2] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 多重扰动下的跨区电网低频振荡研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 290-296.  
CHEN Enze, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Research on low frequency oscillation of interconnected power grid based on multiple disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 290-296.
- [3] 石辉, 张勇军, 徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 242-247.  
SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [4] 李天云, 袁明哲, 李军强, 等. 基于 EMD 和 SSI 的电力系统低频振荡模态参数识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 6-10.  
LI Tianyun, YUAN Mingzhe, LI Junqiang, et al. Method of modal parameter identification of power system low frequency oscillation based on EMD and SSI[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 6-10.
- [5] 陈刚, 龚啸, 李军, 等. 基于改进的 ARMA 的递推算法的低频振荡模式在线辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 12-17, 49.  
CHEN Gang, GONG Xiao, LI Jun, et al. Improved ARMA recursive algorithm for online identification of low frequency oscillation mode[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 12-17, 49.
- [6] 马建伟, 竺炜, 曾喆昭, 等. FFT 结合神经网络的低频振荡主导模式识别[J]. 电力科学与技术学报, 2012,

26(4): 88-93.

MA Jianwei, ZHU Wei, ZENG Zhezhao, et al. Power system low frequency oscillation dominant pattern recognition based on FFT and neural network algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 26(4): 88-93.

[7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 143-150.

[8] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.

LU Boyong, HUANG Wenqing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.

[9] 郭成, 李群湛. Prony 算法辨识传递函数的模型阶数选取研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7042-7044.

GUO Cheng, LI Qunzhan. Research on model order selection of transfer function identification using Prony method[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7042-7044.

[10] 杨玉坤, 杨明玉. Prony 算法在谐波, 间谐波参数辨识中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 121-126.

YANG Yukun, YANG Mingyu. Application of Prony algorithm in parameter identification of harmonics and inter-harmonics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(3): 121-126.

[11] JUN W. Feature extraction of localized scattering centers using the modified TLS-Prony algorithm and its applications[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2002, 13(3): 31-39.

[12] LAU W H, AUSTIN J, VILAR E. Improved Prony algorithm to identify multipath components[J]. Electronics Letters, 1987, 23(20): 1059-1060.

[13] GRUND C E, PASERBA J J, HAUER J F, et al. Comparison of Prony and eigenanalysis for power system control design[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 964-971.

[14] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140-145.

WANG Hui, SU Xiaolin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140-145.

[15] 侯王宾, 刘天琪, 李兴源. 基于自适应神经模糊滤波的低频振荡 Prony 分析[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 53-58.

HOU Wangbin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Prony analysis of low frequency oscillations based on adaptive neural-fuzzy filtering[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 53-58.

[16] 刘贵富. 低频振荡模式的鲁棒递推及自适应滤波辨识算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

LIU Guifu. Research on identification for low frequency oscillation modes based on robust recursive and adaptive filter algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[17] 李海东, 李青. 基于阈值法的小波去噪算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(7): 56-58.

LI Haidong, LI Qing. Wavelet denoising based on technique of threshold[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(7): 56-58.

[18] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 435-438.

[19] 李双科, 吴记群. 基于数学形态滤波的电力系统采样信号降噪处理[J]. 工业仪表与自动化装置, 2012(3): 88-90.

LI Shuangke, WU Jiqun. De-noising of sampled power system data based on morphological filtering[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2012(3): 88-90.

[20] 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[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-47.

ZHU Wei, TANG Yingjie, ZHOU Youqing, et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-47.

收稿日期: 2014-04-22; 修回日期: 2014-07-06

作者简介:

李安娜(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 1183617158@qq.com

吴熙(1987-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

蒋平(1954-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与控制 and 电力电子在电力系统中的应用方面的研究工作。