

# 基于小波和扩展 Prony 算法的电压闪变检测新方法

沈 杨, 戴本祁, 张惠东

(华东理工大学信息科学与工程学院, 上海 200237)

**摘要:** 实际信号中通常叠加有随机噪声, 针对 Prony 算法对噪声较为敏感的不足, 将小波变换和扩展 Prony 分析相结合应用于电压闪变检测分析。采用一种基于新阈值函数的小波去噪法对含噪闪变信号进行去噪预处理, 并通过扩展 Prony 分析提取去噪后信号的特征信息。仿真实验结果表明, 该方法有助于提高扩展 Prony 算法对电压闪变信号检测的精确性, 并验证了其准确性和有效性。

**关键词:** 电压闪变; 小波阈值去噪; 阈值函数; 扩展 Prony; Hilbert 变换

## A new method based on wavelet and Prony analysis for voltage flicker detection

SHEN Yang, DAI Ben-qi, ZHANG Hui-dong

(School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** The actual signals usually include stochastic noise, while the Prony algorithm is sensitivity to noise. In this paper, extending Prony analysis and wavelet transform are integrated and applied to voltage flicker detection to avoid that. The wavelet transform based on a novel thresholding function is adopted for denoising pretreatment, then the parameters of voltage flicker are precisely calculated by extending Prony analysis. The results of simulation show that this method can improve the accuracy of voltage flicker analysis detected by extending Prony analysis, and the effectiveness is verified.

**Key words:** voltage flicker; wavelet shrinkage; thresholding function; extending Prony analysis; Hilbert transform

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0043-05

## 0 引言

现代社会电网中非线性及冲击性负载不断增加, 使得电能质量问题日趋严重, 电压波动和闪变已经成为威胁许多重要用户供电可靠性的一个重要方面, 必须对其进行有效的检测和抑制。

目前常用的电压闪变检测方法有小波变换法、FFT/STFT、半波有效值法等, 但都存在不同的缺点, 应用于实际电网信号都不是很理想。Prony 算法是一种基于最小二乘法的线性拟合方法, 所需原始数据较少, 实时性较高, 能够有效提取信号的特征量并进行特征分析, 目前已在电能质量检测分析中获得了广泛应用<sup>[1]</sup>。

本文结合电压波动信号的特点, 针对 Prony 算法对噪声较为敏感的不足, 首先提出了一种基于新阈值函数的小波去噪法对采样信号进行预处理, 再采用 Prony 分析提取去噪信号各频率分量的特征参数, 经仿真验证了该方法的可行性。

## 1 小波变换去噪

### 1.1 小波阈值去噪原理

1995 年, D.L.Dohono<sup>[2-4]</sup>在小波变换的基础上提出了阈值去噪方法。设有观测信号  $f(t) = s(t) + n(t)$ , 其中,  $s(t)$  为原始信号,  $n(t)$  为方差为  $\sigma^2$  的 Gaussian 白噪声, 服从  $N(0, \sigma^2)$ 。

(1) 对  $f(t)$  进行离散采样, 得到离散信号  $f(n)$ ,  $n=0, 1, \dots, N-1$ 。对含噪信号  $f(k) = s(k) + n(k)$  作小波变换, 得到一组小波系数  $w_{j,k}$ 。 $w_{j,k}$  仍由两部分组成, 分别为  $s(k)$  对应的小波系数  $u_{j,k}$ ,  $n(k)$  对应的小波系数  $v_{j,k}$ ; (2) 对  $w_{j,k}$  作阈值处理, 使用一合适的数  $\lambda$  作为阈值, 把低于  $\lambda$  的  $w_{j,k}$  设为零, 而高于  $\lambda$  的  $w_{j,k}$  予以保留或收缩, 从而得到估计小波系数  $\hat{w}_{j,k}$ , 它可理解为基本上是由信号  $s(k)$  引起的; (3) 利用  $\hat{w}_{j,k}$  进行小波重

构, 得到估计信号  $\hat{f}(k)$ , 即为去噪之后的信号。

Donoho 定义硬阈值函数为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k}, & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

软阈值函数为:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda), & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 新的小波去噪阈值函数

小波软、硬阈值法在实际中得到广泛应用, 但本身都存在一些潜在缺点<sup>[5]</sup>。硬阈值法中,  $\hat{w}_{j,k}$  在  $\lambda$  处是不连续的, 其重构信号可能会产生振荡。而软阈值法估计出来的  $\hat{w}_{j,k}$  整体连续性好, 但当  $|w_{j,k}| > \lambda$  时,  $\hat{w}_{j,k}$  与  $w_{j,k}$  总存在恒定的偏差, 直接影响着重构信号与真实信号的逼近程度。阈值处理的目的是使  $\|\hat{w}_{j,k} - u_{j,k}\|$  尽量小, 因此  $|\hat{w}_{j,k}|$  的取值介于  $|w_{j,k}| - \lambda$  和  $w_{j,k}$  之间可能使估计出的  $\hat{w}_{j,k}$  更加接近于  $u_{j,k}$ 。而且软阈值函数的导数不连续, 在实际应用中具有一定的局限性。

基于上述思想, 本文构造了一种新阈值函数:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(w_{j,k}) \left[ |w_{j,k}| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|w_{j,k}| - \lambda}{b}\right)} \right], & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $a$ 、 $b$  ( $b \neq 0$ ) 为调节因子, 可取 0 或任意正常数, 一般取任意正整数。

Donoho 和 Johnstone 给出的通用阈值  $\lambda = \sigma\sqrt{2\log(N)}$  在各个尺度上是固定不变的, 但由于噪声对应的小波系数在每一尺度上均匀分布, 并且随着尺度的增加, 其幅值有所减小, 这对在不同尺度上进行噪声抑制显然不够合理。所以仿真试验中取  $\lambda = \sigma\sqrt{2\log(N)}/\log(j+1)$ , 其中  $j$  为分解尺度,  $\sigma^2$  为噪声的方差,  $N$  为离散采样信号的长度。显然, 随着尺度  $j$  的增加,  $\lambda$  逐渐减小, 这与噪声在小波变换各尺度上的传播特性相一致。由于实际应用中, 噪声方差  $\sigma$  总是不可知的, 所以去噪处理时可以取  $\sigma = \text{median}(|w_{j,k}|)/0.6745$ <sup>[6]</sup>。

新阈值函数同软阈值函数一样具有连续性, 且当  $|w_{j,k}| > \lambda$  时高阶可导, 便于各种数学处理。

在式 (3) 中, 当  $|w_{j,k}| \geq \lambda$  时, 有

$$\lim_{b \rightarrow +\infty} \text{sign}(w_{j,k}) \left[ |w_{j,k}| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|w_{j,k}| - \lambda}{b}\right)} \right] = w_{j,k} \quad (4)$$

$$\lim_{b \rightarrow +\infty} \text{sign}(w_{j,k}) \left[ |w_{j,k}| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|w_{j,k}| - \lambda}{b}\right)} \right] = \text{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) \quad (5)$$

式 (4)、(5) 说明, 当  $b \rightarrow 0$  和  $b \rightarrow \infty$  时, 式 (3) 分别接近硬、软阈值函数。因此, 新阈值函数是介于软、硬阈值函数之间的一个灵活选择, 可以根据实际灵活调整  $a$ 、 $b$  的取值, 得到有效的阈值函数。参数  $a$ 、 $b$  的选取可针对具体信号形式, 尝试几个相差较大的值, 根据效果作选择。对于细节较多的信号, 一般选取较小的  $a$ 、 $b$ , 这样有利于保持信号的细节; 对于细节较少的信号, 一般选取较大的  $a$ 、 $b$ , 这样更利于消噪。

考察函数

$$f(x) = \text{sign}(x) \left[ |x| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|x| - \lambda}{b}\right)} \right] \quad (6)$$

当  $x > 0$  时,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{x - \lambda}{b}\right)}}{x} = 1$ ;

当  $x < 0$  时,  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{-x - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{-x - \lambda}{b}\right)}}{x} = 1$ 。

且  $\lim_{x \rightarrow \infty} (f(x) - x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \left[ \text{sign}(x) \left[ |x| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|x| - \lambda}{b}\right)} \right] - x \right] = 0$ ,

这说明式 (6) 是以直线  $y = x$  为渐近线的, 即新阈值函数是以  $\hat{w}_{j,k} = w_{j,k}$  为渐近线的, 随着  $w_{j,k}$  的增大,  $\hat{w}_{j,k}$  逐渐接近  $w_{j,k}$ , 从而克服了软阈值函数中  $w_{j,k}$  与  $\hat{w}_{j,k}$  之间有恒定偏差的缺点。

再次考察式 (6), 当  $|x| = \lambda$  时,  $f(x) = 0$ , 且

$$\lim_{|x| \rightarrow \lambda} f(x) = \lim_{|x| \rightarrow \lambda} \text{sign}(x) \left[ |x| - \frac{(a+1)\lambda}{a + \exp\left(\frac{|x| - \lambda}{b}\right)} \right] = 0$$

所以  $f(x)$  在  $|x| = \lambda$  点处是连续的, 即新阈值函数中  $\hat{w}_{j,k}$  在  $|w_{j,k}| = \lambda$  点处是连续的, 从而克服了硬阈值函数中  $\hat{w}_{j,k}$  在  $\lambda$  点处不连续的缺点。

此外,新阈值函数可以根据实际应用同时调节  $a$ 、 $b$  的取值,是介于软、硬阈值之间的一种灵活选择,具有更广阔的发展优势和应用前景。

### 1.3 小波阈值去噪仿真实验

为了说明新阈值函数的优越性和有效性,本文分别采用传统软、硬阈值法和新阈值法对同一含噪采样信号进行 Matlab 仿真实验。

原始信号取一单频闪变信号:

$$x(t) = [1 + 0.2 \cos(0.2 \times 2\pi f_0 t)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

叠加均方差为 0.3、均值为 0 的随机噪声。 $f_0$  取 50 Hz,采样频率为 1 000 Hz,采样点数为 250 点。采用的小波基为 sym8 小波,分解层数为 5 层,新阈值函数中取  $a = 0, b = 1$ 。

图 1 为原始信号和含噪信号,图 2 为三种阈值法处理后的重构信号。可以看出,三种阈值法均能有效消除毛刺,滤除噪声,而本文所提出的新阈值法的去噪效果视觉上更优于软、硬阈值方法,重构信号平滑且逼近程度高。新阈值法处理后虽然损失了信号的部分细节,但能够较好地保持原始信号的特征尖峰点以及整体特征,从而保证了去噪后信号的真实性和有效性。

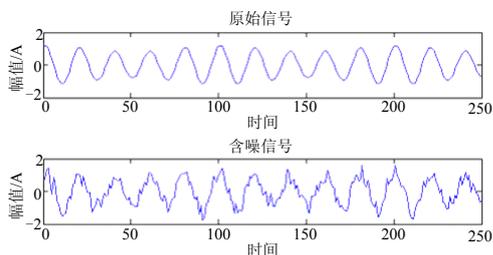


图 1 原始信号和含噪信号  
Fig.1 Natural and noisy signal

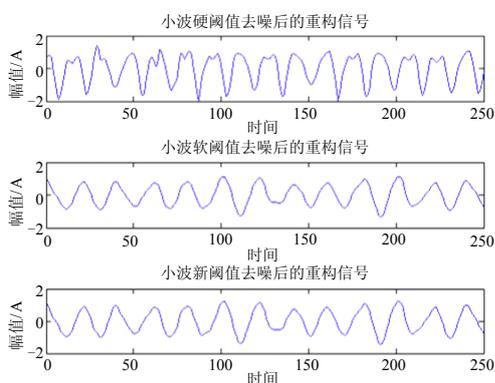


图 2 三种阈值法处理后的重构信号

Fig.2 Signal reconstruction using three different thresholding algorithms

为了更客观地评价各阈值法的优劣,表 1 给出了三种阈值法的去噪性能比较。实验数据表明新阈

值法确实能够得到较好的去噪效果,其去噪性能在 SNR 和 MSE 意义上均优于软、硬阈值法。

表 1 三种阈值算法的去噪性能比较

	硬阈值法	软阈值法	新阈值法
平均误差	0.238 2	0.184 5	0.167 2
最大绝对误差	0.749 0	0.519 3	0.436 6
均方差 MSE	0.291 8	0.223 8	0.198 2
信噪比 SNR/dB	7.803 7	10.104 8	11.162 4

## 2 扩展 Prony 算法

### 2.1 Prony 基本原理

扩展 Prony 采用的数学模型为一组  $p$  个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数,其离散时间的函数形式为<sup>[7-8]</sup>:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

其中:  $b_i = A_i \exp(j\theta_i)$ ,  $z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t]$ ,  $A_i$  为幅值,  $\theta_i$  为相位(弧度),  $\alpha_i$  为衰减因子,  $f_i$  为振荡频率,  $\Delta t$  为采样间隔。

构造代价函数  $\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2$ , 使误差平方

和  $\varepsilon$  为最小,即可求出参数四元组  $(A_i, \theta_i, \alpha_i, f_i)$ 。

Prony 算法的关键在于式(8)的拟合为一常系数线性差分方程式(9)的齐次解:

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i), \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

定义  $x(n) = \hat{x}(n) + e(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i) + e(n) =$

$$-\sum_{i=1}^p a_i \hat{x}(n-i) + \sum_{i=0}^p a_i e(n-i), \quad n=0, 1, \dots, N-1.$$

参数  $a_1, a_2, \dots, a_p$  的最小二乘估计的准则是使误

差平方和  $\sum_{n=p}^{N-1} |e(n)|^2$  为最小。定义:

$$\varepsilon(n) = \sum_{i=0}^p a_i e(n-i), \quad n = p, \dots, N-1 \quad (10)$$

则求解方程式  $Xa = \varepsilon$  的线性最小二乘方法称为扩展 Prony 方法。

定义样本函数  $r(i, j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j)x^*(n-i),$

$i, j = 0, 1, \dots, p$ , 由输入信号序列构造  $r(i, j)$ , 并构

造扩展阶矩阵  $R_e$  ( $p_e \gg p$ ):

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

用 SVD-TLS 算法确定  $R_e$  的有效秩  $p$  及系数  $a_1, a_2, \dots, a_p$  的总体最小二乘估计。求取特征多项式  $1+a_1z^{-1}+\dots+a_pz^{-p}=0$  的根  $z_1, \dots, z_p$ 。并根据递推差分方程 (9) 计算出  $\hat{x}(n)$ ,  $n=1, 2, \dots, N-1$ , 其中  $\hat{x}(0)=x(0)$ 。计算  $Zb=\hat{x}$  的最小二乘解  $b=(Z^H Z)^{-1} Z^H \hat{x}$ , 求出参数  $b_1, b_2, \dots, b_p$ 。

最后计算各频率分量的参数四元组:  $A_i = |b_i|$ ,  $\theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)]/(2\pi\Delta t)$ ,  $\alpha_i = \ln|z_i|/\Delta t$ ,  $f_i = \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)]/(2\pi\Delta t)$ 。

### 2.2 包络线的形成—Hilbert 变换原理

根据所求得的参数四元组, 可得到 Prony 重构信号序列  $\hat{x}(n)$  及其 Hilbert 变换  $\hat{x}_H(n)$  [9]:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i \cos(2\pi f_i n + \theta_i) \quad (12)$$

$$\hat{x}_H(n) = \sum_{i=1}^p A_i \sin(2\pi f_i n + \theta_i) \quad (13)$$

这样, 信号的包络就可通过式 (14) 求得:

$$U(n) = \sqrt{\hat{x}^2(n) + \hat{x}_H^2(n)} \quad (14)$$

## 3 仿真分析

为了验证算法的有效性, 本文在 Matlab7.0 平台上分别对原始闪变信号和含噪闪变信号进行了仿真分析, 采样频率为 1 000 Hz, 基波频率  $f_0$  取 50 Hz, 采样点数为 200。

### 3.1 基于扩展 Prony 算法的仿真实验

电压闪变信号取一个单一低频带间谐波引起的幅值调制的电压信号, 如式 (15) 所示:

$$x(t) = [1 + 0.2 \cos(0.2 \times 2\pi f_0 t)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (15)$$

经过扩展 Prony 分析, 得到了一个幅值 (pu) 为 1 的 50 Hz 的基频分量, 和幅值 (pu) 均为 0.1、频率分别为 40 Hz 和 60 Hz 的两个低频间谐波分量, 且其相位和衰减系数均近似为零, 如表 2 所示。可以看出, 在不含噪声时, 采用 Prony 法可以精确地

估计出信号各频率分量的特征参数。

表 2 原始信号的 Prony 分析结果

Tab.2 Prony analysis result of natural signal

频率分量 $i$	频率实际值 $f_i$ /Hz	频率估计值 $f_i$ /Hz	幅值估计值 $A_i$ /pu	相位估计值 $\theta_i$ / (°)	衰减系数估计值 $\alpha_i$
1	40	40.0000	0.100 0	-0.0748*e-010	-0.3331*e-011
2	50	50.0000	1.000 0	0.1333*e-010	0.4663*e-011
3	60	60.0000	0.100 0	-0.4379*e-010	-0.2442*e-011

图 3 为原始信号的 Prony 拟合结果。可以看出 Prony 拟合信号与原始信号几乎重合, 拟合逼近程度较高, 且提取出的包络可以准确地表现出电压闪变信号的变化趋势。

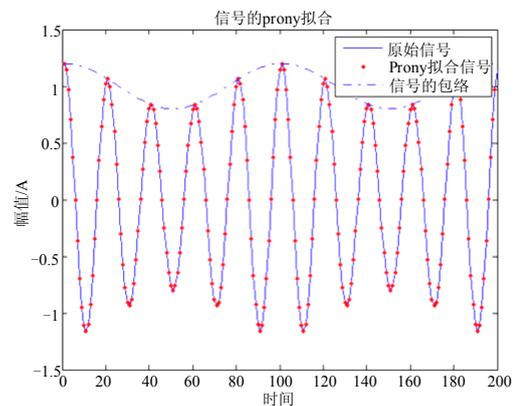


图 3 原始信号的 Prony 拟合

Fig.3 Prony fitting result of natural signal

### 3.2 基于小波和 Prony 分析的仿真实验

对式 (15) 所示信号叠加均方差为 0.3、均值为 0 的随机噪声, 分别对含噪信号和三种阈值法处理后的去噪信号进行仿真实验, 并对 Prony 估计值进行分析比较, 如表 3 所示。

可以看出, 含噪信号的 Prony 估计值与实际值的相对误差较大, 且存在一定波动, 特别在估计 40 Hz 频率分量时, 幅值估计的相对误差高达 428.50%。而采用小波去噪法进行预处理后的 Prony 估计值均较接近实际值, 与去噪前相比, 频率估计和幅值估计的相对误差明显降低。可见 Prony 分析受噪声影响较大, 采用去噪预处理确实可以有效地提高 Prony 估计特征参数的精确度。而相比软、硬阈值法, 新阈值法与 Prony 结合后的估计值与实际值更为接近, 性能更好, 更加稳定, 频率估计时相对误差都稳定在 1% 以内, 特别在估计 50 Hz 基频分量时, 频率相对误差降低至 0.004 4%, 而幅值估计

结果也明显优于其他两种阈值法的估计结果。

表 3 含噪信号的 Prony 分析结果

Tab.3 Prony analysis result of noisy signal

频率分量 $i$	频率 $f_i$ /Hz			幅值 $A_i$ /pu		
	1	2	3	1	2	3
实际值	40	50	60	0.1	1.0	0.1
去噪前估计值	38.343 9	49.695 3	57.624 5	0.528 5	1.239 7	0.048 2
去噪前相对误差 / %	4.14	0.61	3.96	428.50	23.97	51.80
新阈值法估计值	40.243 5	50.002 2	59.871 2	0.101 1	0.991 4	0.101 5
新阈值法相对误差 / %	0.61	0.004 4	0.21	1.10	0.86	1.50
硬阈值法估计值	40.715 9	49.872 6	57.872 6	0.165 1	1.052 7	0.137 4
硬阈值法相对误差 / %	1.79	0.25	3.55	65.10	5.27	37.40
软阈值法估计值	39.293 8	49.940 5	59.563 0	0.125 5	0.800 6	0.134 2
软阈值法相对误差 / %	1.77	0.12	0.73	25.50	19.90	34.20

图 4、5 分别为去噪前和新阈值法去噪后的 Prony 拟合结果。可以看出, Prony 法对噪声比较敏感, 其拟合信号更为逼近含噪信号, 而与原始信号的误差较大。通过新阈值法去噪预处理后, 图 5 中

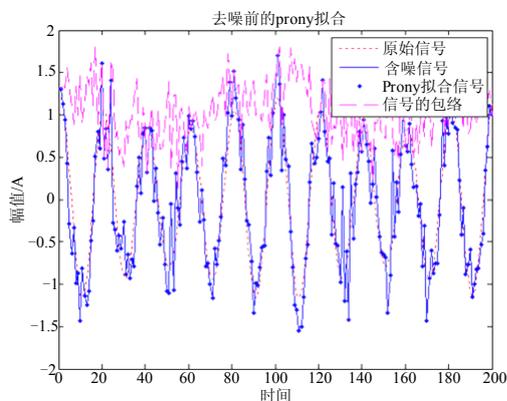


图 4 去噪前的 Prony 拟合

Fig.4 Prony fitting result of non-denoised signal

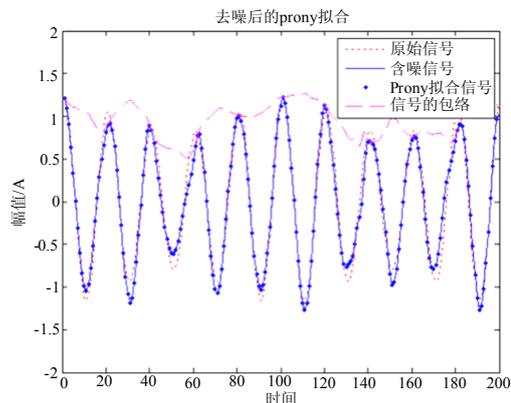


图 5 新阈值法去噪后的 Prony 拟合

Fig.5 Prony fitting result of signal denoised by new thresholding algorithm

的 Prony 拟合信号比较平滑, 与原始信号较为接近。可见将新阈值法与 Prony 算法结合, 确实可以有效弥补 Prony 抑制噪声能力较差的缺点, 从而提高电压闪变检测的精确性和准确度。

#### 4 结论

Prony 算法是一种有效的电压闪变检测分析方法, 借助该方法可以准确地估计出信号各频率分量的特征参数, 但不足之处在于其对噪声的抑制能力较弱。本文采用小波新阈值函数去噪法对含噪污染的电压闪变信号进行预处理, 再用扩展 Prony 算法进行检测和分析。经仿真实验证明, 可以较大地提高 Prony 算法检测的精确性和有效性, 以及估计信号各分量特征参数的准确性, 是一种有效的电压闪变检测和分析的方法。

#### 参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] XIAO Xiang-ning. Analysis and control of power quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] Donoho D L, Johnston I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81 (12): 425-455.
- [4] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on IT, 1995, 41 (3): 613-627.
- [5] Donoho D L, Johnston I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of American Stat Assoc, 1995, 12 (90): 1200-1224.
- [6] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析·应用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 104-111.

(下转第 78 页 continued on page 78)

上相当于传统变电站中保护测控装置的跳合闸回路，其地位已经上升到和继电保护及安全自动装置同样的高度，所以应该提高对网络重要性的认识，需要像对保护装置检验一样对通信网络开展测试工作。本文从数字化变电站网络性能测试的必要性出发，以国家颁布的验收测评规范 GB/T 21671-2008 为参照，结合变电站自动化的实际，提出了数字化变电站通信网络的具体测试项目和测试方法。

对于保护装置来说已经有成熟的《继电保护和自动装置检验规程》等规范提供检验方法和指标，数字化站的通信网络测试也需要一个类似的规范文件来提供参考。对数字化站的网络测试方法和结果进行规纳总结，可以形成通信网络的测评规范，对以后的测试工作提供指导。

**参考文献**

[1] GB/T 21671-2008 基于以太网技术的局域网系统验收测评规范[S].  
GB/T 21671-2008 acceptance test specification for local area network (LAN) systems based on Ethernet technology[S].

[2] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. 变电站自动化系统中内部通信网的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 42-44.  
REN Yan-ming, QIN Li-jun, YANG Qi-xun. Study on communcation network in substation automation system[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 42-44.

[3] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-89.  
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al.

Research and implementation of the communication of process bus based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-89.

[4] 辛建波, 蔡子亮. 数字化变电站通信网络的传输时延不确定性分析[J]. 继电器, 2007, 35(5): 45-49.  
XIN Jian-bo, CAI Zi-liang. Study on the delay-non-determinism of communion network of digital substation[J]. Relay, 2007, 35(5): 45-49.

[5] 董楠, 朱林, 段献忠. 基于 OPNET 的变电站过程层网络的仿真研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 40-46.  
DONG Nan, ZHU Lin, DUAN Xian-zhong. Study on process-level network in substation using OPNET simulation[J]. Relay, 2006, 34(21): 40-46.

[6] IEC61850 communication networks and systems in substations Part 3: General Requirements, IEEE[S].

[7] 曹津平, 李伟, 秦应力, 等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 60-63.  
CAO Jin-ping, LI Wei, QIN Ying-li, et al. Research on digital substation proless level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 60-63.

[8] YD/T 1141-2001 以太网交换机测试方法[S].  
YD/T 1141-2001 testing methods for ethernet switch[S].

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-12-30

**作者简介:**

何 磊 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 从事数字化变电站方面的研究; E-mail: ksc200420042004@163.com  
郝晓光 (1980-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护及智能电网。

(上接第 47 页 continued from page 47)

XU Chen, ZHAO Rui-zhen, GAN Xiao-bing. Wavelet analysis: application algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2004. 104-111.

[6] 桂延宁, 焦李成, 张福顺. 航空制导炸弹惯性参数遥测中的小波去噪[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30 (1): 117-119.  
GUI Yan-ning, JIAO Li-cheng, ZHANG Fu-shun. Study of the inertia parameter measurement in telemetering for guided bombs with a wavelet de-noise technique[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30 (1): 117-119.

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

ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[8] Tayjasanant T, Wang W, Li C, et al. Interharmonics-flicker curves[J]. IEEE Trans Power Del, 2005, 20 (2): 1017-1024.

[9] Feilat E A. Detection of voltage envelope using prony analysis-hilbert transform method[J]. IEEE Trans Power Del, 2006, 21 (4): 2091-2093.

收稿日期: 2009-07-07; 修回日期: 2009-09-17

**作者简介:**

沈 杨 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压闪变检测分析. E-mail: yshen2021@126.com