

基于 SURE 小波与 ITD 法的电力系统模态辨识

邱炳林

(厦门大学嘉庚学院, 福建 漳州 363105)

摘要: 针对因互联系统稳定性的下降引起的低频振荡事故,提出了基于无偏似然估计 (stein unbiased risk estimate, SURE) 的自适应小波阈值与固有时间尺度分解 (intrinsic time-scale decomposition, ITD) 的联合辨识算法,以解决在低频振荡的关键模态辨识中提取出的参数精度不够准确的问题。对含有噪声干扰的信号进行小波变换得到其小波系数,根据信号特点按照最小均方误差算法估计其最优阈值,从而进行小波系数的筛选和信号的重构,得到去除噪声后的信号。对处理后的信号进行固有时间尺度分解,构建相应的信号测点矩阵并求解矩阵的特征值,获取系统的关键振荡参数。采用数学测试信号、PSASP 软件中的 8 机 36 节点仿真系统信号以及实测信号,验证了所提方法对实际电网是有效可行的。

关键词: 电力系统;低频振荡;模态辨识;SURE 小波;固有时间尺度

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)04-0370-08

Power system modal identification based on SURE wavelet and ITD method

QIU Binglin

(Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China)

Abstract: Aiming at the low-frequency oscillation accidents caused by the decline of the stability of the inter-connected system, a joint identification algorithm of adaptive wavelet threshold and intrinsic time-scale decomposition (ITD) based on stein unbiased risk estimate (SURE) was proposed to solve the problem that the accuracy of the extracted parameters is not accurate in the identification of key modes of low-frequency oscillation. Firstly, the wavelet transformation was performed on the signal containing noise interference, each wavelet coefficient was obtained, and the optimal threshold was estimated according to the minimum mean square error algorithm based on the characteristics of the signal, so as to screen the wavelet coefficient and reconstruct the signal, thus obtaining the signal after removing noise. Secondly, the processed signal was decomposed on the intrinsic time scale, the corresponding signal measurement point matrix was constructed and the eigenvalues of the matrix were solved, so as to obtain the key oscillation parameters of the system. Finally, the mathematical test signals, 8-machine 36-node simulation system signals and measured signals in PSASP software were used to verify the effective feasibility of the proposed method in practice.

Keywords: power system; low-frequency oscillation; modal identification; SURE wavelet; intrinsic time scale

当前,互联系统区域日趋一体化、能源供给不断协调化,不同地区的能源得以实现跨区、远距离输送,整体电力资源配置越来越优化。大量高放大倍数的快速励磁系统被用来提高系统的暂态与

电压稳定,但也加深了互联系统的弱阻尼与欠阻尼状态,极易引发系统的低频振荡现象^[1]。持续的振荡也将导致系统故障的进一步扩大,甚至可能影响系统的正常供电与运行^[2-3]。实际电网中

在存在大量噪声干扰的背景下,如何对采集到的信号进行准确的参数辨识,是该领域研究的一个亟需解决的问题,对于提高互联电力系统在弱连接下的安全稳定运行具有较大的现实意义。

为此,学者们提出了大致两类解决方案。第一类为基于模型的分析方法,如 PSASP 软件、Simulink 模块。这类方法均是通过对模型的线性化为前提而进行的小干扰分析或系统的特征值求解。由于当下互联系统规模的持续扩大,使用这类方法对整个互联系统进行建模分析、线性化处理,显然不利于实时的在线监测分析和处理。第二类为基于信号的分析方法,常用的方法主要有傅立叶变换(FFT)^[4]、滑动平均模型(ARMA)^[5]、小波变换(WT)^[6]、Prony^[7]和希尔伯特-黄(HHT)^[8]等算法。其中,FFT的主要问题在于不能很好地处理非平稳信号;ARMA的计算量较大,本身的辨识能力容易受到信号的影响,处理信号的可靠性不佳;WT、Prony以及HHT的实际应用较广,但WT的小波基函数难以确定,Prony对抗噪声干扰的能力较差,HHT存在模态混叠和端点效应的问题。

对于系统的关键振荡模态参数的辨识,需要提出在辨识能力上更为准确、计算量较小、抗干扰能力更强的参数提取算法。其中,信号的预处理极为重要。常用的信号处理办法如小波去噪,对不同信号且不同噪声背景下的信号预处理能力缺乏针对性,李志军等提出了小波阈值去噪^[9],针对不同的信号采用不同的阈值处理,但仍然无法自适应地调整阈值,以根据信号特点更好地进行噪声的去除。

综上,本研究提出一种基于 SURE 自适应小波阈值(SURE-WT)预处理与固有时间尺度分解^[10](ITD)提取关键振荡模态参数的联合辨识算法。

1 SURE 自适应小波

现假设 $\mathbf{Y}=[y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}]$ 为实际信号的测量值,它由一系列 t 时刻测点信号 y_t 构成,表达式为:

$$y_t = x_t + e_t \quad (1)$$

其中, x_t 、 e_t 表示对应 t 时刻的纯净信号测量值和高斯白噪声, N 为信号长度。

根据测量值 $\mathbf{Y}$, 计算中每一个测点信号 x 的

估计值 $\hat{x}$, 使估计值 $\hat{x}$ 与测点信号 x 的均方误差最小^[11], 从而用均方值代替数学期望, 并采用正交小波基, 可得

$$\xi(\hat{x}, x) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (\hat{x}_i, x_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{j,k} (\hat{w}_{j,k} - w_{j,k})^2 \quad (2)$$

其中, ξ 表示均方误差; $w_{j,k}$ 和 $\hat{w}_{j,k}$ 分别为测点信号 x 与估计值 $\hat{x}$ 在 j 尺度上的第 k 个小波系数。

通过上述小波变换, 得到每一个小波系数 $w_{j,k}$, 随后对小波系数进行阈值化处理得到新的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$, 根据新的系数进行信号重构得到去除噪声后的信号。

综上可知, 如何确定合适的阈值是解决问题的关键, 因此采用如式(3)所示的阈值确定函数^[11], 基于 SURE 法自适应地估计出最合适的小波系数阈值, 根据信号的特点进行变化。

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(n_j)} = \frac{M_f}{0.674 \cdot 5} \sqrt{2 \ln(n_j)} \quad (3)$$

其中, n_j 、 σ_j 、 M_f 分别为 j 尺度上小波系数的长度和噪声的标准差估计值及系数大小排序中值^[12]。

最优阈值的估计是以最小均方误差为准则, 即下一时刻的阈值 $\lambda(t+1)$ 为当前阈值 $\lambda(t)$ 与一正比于均方误差函数的梯度值 $\Delta \lambda(t)$ 之和, 如式(4)。

$$\lambda(t+1) = \lambda(t) - \mu \Delta \lambda(t) = \lambda(t) - \mu \frac{\partial \xi(t)}{\partial \lambda(t)} \quad (4)$$

其中, μ 表步长, $\xi(t)$ 表示 t 时刻的梯度值。

上述过程实际上是为了求出每一时刻 t 的阈值变化量 $\Delta \lambda(t)$, 从而能够不断地根据信号的特点进行小波阈值的更新, 最终重构出去噪后的信号, 公式推倒和求取过程可参考文献[12]。

信号去噪效果的指标, 将采用信噪比 SNR 和均方误差 MSE 进行表示, 求解公式如式(5)(6)。

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\sum_{n=1}^N x^2(n) / \sum_{n=1}^N (\hat{x}(n) - x(n))^2 \right) \quad (5)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{x}(n) - x(n))^2 \quad (6)$$

其中, N 为信号长度; $x(n)$ 为纯净信号; $\hat{x}(n)$ 为去噪、重构后的信号。通过比较预处理后的信号与纯净信号之间的关系, 来判断信号的去噪效果, 较大的 SNR 和较小的 MSE 则预处理效果更好。

2 固有时间尺度法 (ITD)

通过上述方法对含噪信号 y 进行处理,得到去除噪声后的信号 $x(t)$,并将其表示为如式(7)的形式。

$$x_i(t) = \sum_{r=1}^{2m} \varphi_{ir} e^{\lambda_r t_i} = \sum_{r=1}^{2m} \varphi_{ir} e^{(-\sigma_r + j\omega_r) t_i} \quad (7)$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 个测点在 t 时刻时的自由响应; m 为该振荡信号的模式数或阶数; λ_r 、 σ_r 、 ω_r 、 φ_{ir} 分别表示第 r 个振荡模式对应的特征值、衰减系数、角频率以及相应的振型系数。

由于系统存在 m 个振荡模式,那么在第 i 个量测点处可将式(7)改写为式(8)形式。

$$x_i(t) = [\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \dots, \varphi_{im}] [e^{\lambda_1 t_i}, e^{\lambda_2 t_i}, \dots, e^{\lambda_m t_i}] \quad (8)$$

若系统有 a 个观测点,在任意观测点处以相同的采样时间 Δt 进行采样,则由所有观测点构造出的响应矩阵 Φ 表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_N) \\ x_2(t_1) & x_2(t_2) & \cdots & x_2(t_N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_a(t_1) & x_a(t_2) & \cdots & x_a(t_N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)后,可得 $\Phi = \Psi \Lambda_a$, 其中,

$$\Psi_a = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1m} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{r1} & \varphi_{r2} & \cdots & \varphi_{rm} \end{bmatrix},$$

$$\Lambda_a = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & e^{\lambda_1 t_2} & \cdots & e^{\lambda_1 t_N} \\ e^{\lambda_2 t_1} & e^{\lambda_2 t_2} & \cdots & e^{\lambda_2 t_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{\lambda_m t_1} & e^{\lambda_m t_2} & \cdots & e^{\lambda_m t_N} \end{bmatrix}$$

现对某一个观测点进行等时间间隔 Δt 的采样,以第 i 个量测点为例,可得 $x_i(t_1), x_i(t_2), \dots, x_i(t_N)$,并根据上述数据构造 Hankel 矩阵^[13],如式(10)所示。

$$R = \begin{bmatrix} x_i(t_1) & x_i(t_2) & \cdots & x_i(t_j) \\ x_i(t_2) & x_i(t_3) & \cdots & x_i(t_{j+1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_i(t_j) & x_i(t_{j+1}) & \cdots & x_i(t_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据文献[14],取矩阵 $R_1 = R(:, 1:j-1)$, $R_2 = R(:, 2:j)$,同上操作,将式(8)代入式(10)后,分别得到 $R_1 = \Psi \Lambda$ 与 $R_2 = \Psi \alpha \Lambda$,随后将其进行

联立求解,有 $A\Psi = \Psi\alpha$, $\alpha = \text{diag}[e^{\lambda_1 \Delta t} \quad e^{\lambda_2 \Delta t} \quad \cdots \quad e^{\lambda_m \Delta t}]$,此时问题转化为求解矩阵 A 的特征值,从而得到信号的振荡模态参数,计算方法由如公式(10)^[14]。

$$\begin{cases} s_r = e^{\lambda_r \Delta t}, \lambda_r = 1, 2, \dots, 2m; \\ \sigma_r = -\frac{1}{2\Delta t} \ln(\text{Re}^2(s_r) + \text{Im}^2(s_r)); \\ \omega_r = \frac{\arg(s_r)}{\Delta t}; f_r = \frac{\arg(s_r)}{2\pi\Delta t}; \\ \xi_i = \frac{\sigma_r}{\sqrt{\omega_r^2 + \sigma_r^2}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\omega_r = 2\pi f_r$ 表示系统的振荡频率, ξ_i 为阻尼比, σ_r 为衰减系数, $\arg(s_r)$ 表示求取复数的幅角。

3 SURE-ITD 方法辨识低频振荡模态

3.1 评价指标

对于衡量各方法提取关键振荡模态参数的能力,通常需要引入相关的指标进行对比分析,采用拟合系数(R -square)作为各方法提取振荡信号参数准确度的衡量标准,如下公式(12)所示。

$$R\text{-square} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (12)$$

其中, $\hat{y}_i$ 为拟合曲线; y_i 和 $\bar{y}_i$ 分别为纯净信号及其均值曲线。拟合系数的取值限于 0 至 1 的范围,当拟合系数越接近 1 时,表明相应的参数辨识算法,更准确地提取出了系统的关键振荡模态参数,并且拟合曲线也在最大程度上对纯净信号进行了还原。

3.2 分析步骤及流程

将 SURE 自适应小波阈值(SURE-WT)预处理与固有时间尺度分解(ITD)算法进行联合,用于提取系统的关键振荡模态参数,其处理步骤如下:

Step1:对采集到的含噪信号 Y 作小波(WT)变换,从而获取 j 尺度下的小波系数 $w_{j,k}$;

Step2:根据阈值调整函数对系数 $w_{j,k}$ 做阈值化处理,以此获取新的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$;

Step3:利用新的小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 进行信号的重构,获得估计信号 $\hat{x}(k)$;

Step4:将上述得到的估计信号,即去噪后的信号,作为新的输入信号,并根据如公式(10)所示的采样过程,构造出 Hankel 矩阵;

Step5:根据文中的办法,选取 Hankel 矩阵中的元素,分别得到矩阵 $R_1=\psi A$ 与 $R_2=\psi \alpha A$, 联立求解得 $A\psi=\psi \alpha$, $\alpha=\text{diag}[e^{\lambda_1 \Delta t} \quad e^{\lambda_2 \Delta t} \quad \dots \quad e^{\lambda_m \Delta t}]$;

Step6:通过特征方程 $A\psi=\psi \alpha$,求解矩阵 A 的特征值,从而得到系统的关键振荡参数。

其中,SURE-ITD 的关键参数辨识,如图 1 所示,从中可直观地看出该算法对信号的处理过程。

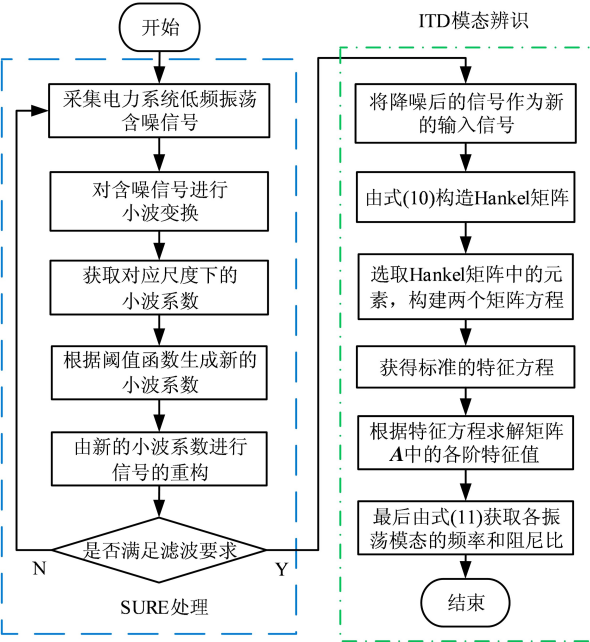


图 1 SURE-ITD 关键参数辨识流程图

Fig.1 SURE-ITD key parameter identification flow chart

4 仿真与实验分析

4.1 测试信号

在电力系统振荡信号的测量中,为模拟实际情况下的噪声干扰,分别由 3 个振荡模态(其频率 f 分别为 0.5、1.0、1.5 Hz,对应的衰减因子分别为 0.1、0.3、0.5)与一个噪声分量 $n(t)$ 构成一个低频振荡数学信号,如公式(13)所示,从而对所提算法的可行性进行初步的测试,并对纯净信号添加不同程度上的噪声干扰,以验证算法的抗噪性能。不同噪声背景下的信号曲线如图 2 所示,其中,纵轴 A 代表比值,pu 表示无量纲。

$$y(t)=5e^{-0.1t}\cos(2\pi\times0.5t+60^\circ)+1.5e^{-0.3t}\cos(2\pi\times t+30^\circ)+e^{-0.5t}\cos(2\pi\times1.5t+45^\circ)+n(t) \quad (13)$$

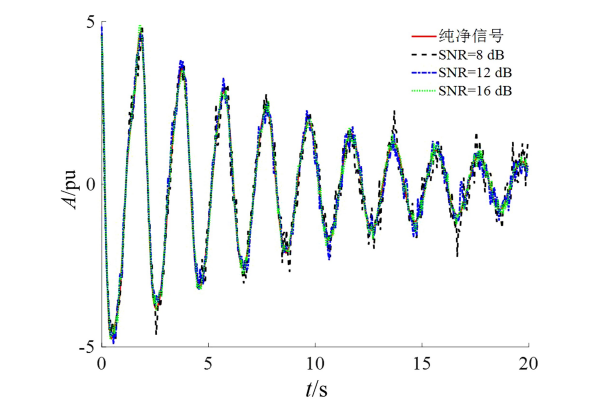


图 2 纯净信号与加噪信号曲线对比

Fig.2 Comparison of curves of pure signal and signal with noise

分别采用 SURE-WT 去噪算法以及 FIRsgolay 和 IIRbutter 滤波器^[15] 进行去噪效果的对比,所得试验结果如表 1 所示,由表中的数据可知,所提算法能更好地提高信号的信噪比,有更好的去噪性能。

表 1 各方法对不同信噪比下的噪声去除能力

Tab.1 Noise removal ability of each method under different SNR

信噪比/dB	辨识方法	SNR/dB	MSE
8	FIRsgolay	16.997 1	0.063 1
	IIRbutter	17.592 9	0.055 0
	SURE-WT	18.825 6	0.041 2
12	FIRsgolay	19.395 4	0.036 3
	IIRbutter	20.101 6	0.026 9
	SURE-WT	21.385 2	0.022 8
16	FIRsgolay	22.810 7	0.016 4
	IIRbutter	22.982 7	0.015 9
	SURE-WT	24.231 3	0.011 9

随后,对预处理后的信号进行关键振荡模态参数的获取,分别采用所提的 SURE-ITD 辨识法、普罗尼(Prony)以及最小二乘旋转不变技术(TLS-ESPRIT)进行关键振荡模态参数获取精度的比较,所得试验结果如表 2 所示,其结果均以最小的算法阶数下,进行参数的最准确辨识, SURE-ITD、Prony、TLS-ESPRIT 法各阶数分别取 20、30、10 阶。由表 2 中的实验数据可知,3 种辨识法对频率的辨识误差均在可接受的范围内,但相对来说, Prony 在对第 3 个振荡模态进

行辨识时,其频率误差分别达到 0.081 4、0.043 7 以及 0.043 3 Hz,相对误差较大,另一方面,Prony 和 TLS-ESPRIT 对衰减因子的辨识能力较差,其 Prony 的误差分别达到 0.334 9、0.236 5、0.174 0, TLS-ESPRIT 的误差值分别达到 0.164 8、0.125 1、0.039 8,远不如 SURE-ITD 的辨识准确度,可见 SURE-ITD 具有更好的辨识能力。

表 2 3 种算法的辨识结果

Tab.2 Identification results of three algorithms					
辨识方法	信噪比/dB	频率/Hz	误差/Hz	衰减因子	误差
Prony	8	0.498 9	0.001 1	0.109 1	0.009 1
		1.014 4	0.014 4	0.634 0	0.334 0
		1.581 4	0.081 4	0.834 9	0.334 9
	12	0.499 6	0.000 4	0.106 1	0.006 1
		0.996 0	0.004 0	0.403 1	0.103 1
		1.543 7	0.043 7	0.736 5	0.236 5
	16	0.499 7	0.000 7	0.097 3	0.002 7
		1.001 0	0.001 0	0.330 5	0.030 5
		1.543 3	0.043 3	0.674 0	0.174 0
TLS-ESPRIT	8	0.500 9	0.000 9	0.112 4	0.012 4
		1.002 1	0.002 1	0.230 9	0.069 1
		1.519 5	0.019 5	0.335 2	0.164 8
	12	0.499 8	0.000 2	0.999 9	0.000 1
		0.995 1	0.004 9	0.267 1	0.032 9
		1.493 4	0.006 6	0.625 1	0.125 1
	16	0.500 0	0.000 0	0.100 7	0.000 7
		0.999 1	0.000 9	0.292 9	0.007 1
		1.490 1	0.009 1	0.539 8	0.039 8
SURE-ITD	8	0.496 2	0.003 8	0.097 1	0.002 9
		0.996 1	0.003 9	0.306 9	0.006 9
		1.514 9	0.014 9	0.480 6	0.019 4
	12	0.498 2	0.001 8	0.098 6	0.001 4
		1.007 3	0.007 3	0.296 5	0.0025
		1.512 7	0.012 7	0.484 1	0.015 9
	16	0.504 5	0.004 5	0.099 9	0.000 1
		1.003 6	0.003 6	0.296 3	0.003 7
		1.510 2	0.010 2	0.499 0	0.010 0

各方法实验结果的拟合曲线如图 3 所示。通过各拟合曲线对原始信号的还原度,即曲线之间距离的远近关系,可初步判断 SURE-ITD 法能够更好地还原出原始信号,并结合表 3 所示的在不同信噪比下,由各方法辨识拟合精度中的拟合系数(R-square)和均方误差(MSE)可知,SURE-ITD 法相对于 Prony、TLS-ESPRIT 算法而言,其拟合效果更好,辨识精度更高。

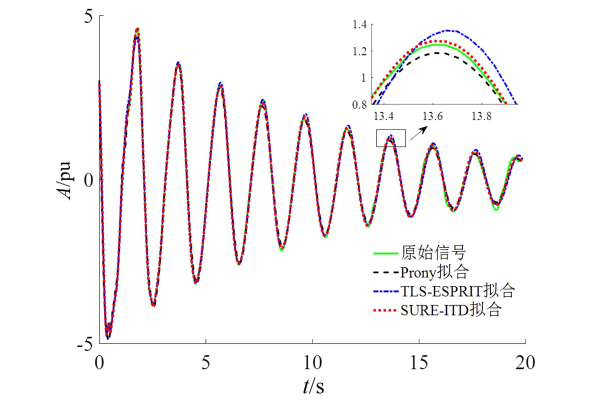


图 3 信噪比 12 dB 下各方法的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of each method under SNR of 12 dB

表 3 不同信噪比下各种方法辨识的拟合精度

Tab.3 Fitting accuracy of each method identification under different SNR			
辨识方法	信噪比/dB	R-square	MSE
Prony	8	0.943 4	0.043 1
	12	0.966 5	0.026 4
	16	0.977 4	0.012 5
TLS-ESPRIT	8	0.868 9	0.056 8
	12	0.879 2	0.045 5
	16	0.876 0	0.049 2
SURE-ITD	8	0.995 2	0.009 5
	12	0.997 6	0.007 2
	16	0.998 1	0.005 3

4.2 EPRI-36 系统算例分析

为进一步验证 SURE-ITD 法的可行性,采用 PSASP 软件中的 8 机 36 节点仿真系统,在母线 20 处设置一 0.2~0.6 s 且大小为 0.5 p.u.的有功冲击负荷,并以 G1 为参考机,取 G1~G7 的相对功角振荡作为输入信号。为模拟实际信号中的噪

声干扰,将分别对信号添加 14、18、22 dB 的高斯白噪声,如图 5 所示,特征值结果如表 4 所示。

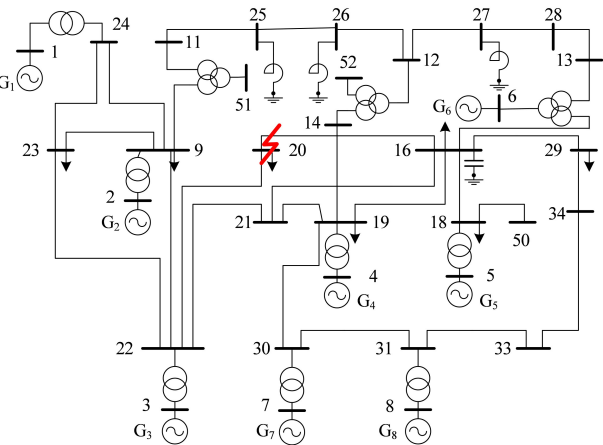


图 4 EPRI-36 节点仿真系统

Fig.4 EPRI-36 node simulation system

表 4 特征值计算结果

Tab.4 Results of eigenvalue calculation

实部	虚部	频率/Hz	衰减因子
-0.792 4	11.473 3	1.826 0	0.792 4
-0.911 5	10.348 6	1.647 0	0.911 0
-0.618 0	7.859 4	1.250 9	0.617 3
-0.673 9	7.157 3	1.139 1	0.673 6
-0.268 1	6.158 6	0.980 2	0.267 5
-0.054 9	4.885 4	0.777 5	0.054 7

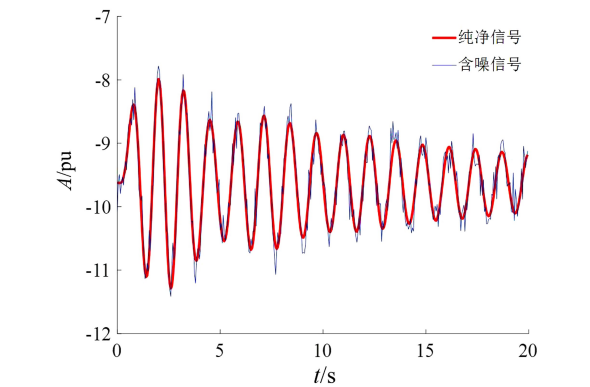


图 5 原始信号与含噪信号曲线对比图

Fig.5 Comparison diagram of original signal curve and that with noise

根据系统的特征值分析结果,采用所提的 SURE-ITD、Prony 以及 TLS-ESPRIT 分别对系统 G1~G7 的相对功角振荡加噪信号进行关键振荡模态参数的提取,发现各算法所辨识出的两个振荡模

式,分别对应着表 4 中的第 5 行和第 6 行,其频率分别为 0.980 2、0.777 5 Hz,衰减因子分别为 0.267 5、0.054 7。为对比各方法在辨识能力上的优劣,将上述 PSASP 软件由小干扰分析模块得到的特征值分析结果,作为标准参考值;将 SURE-ITD、Prony 以及 TLS-ESPRIT 各方法所辨识出的关键振荡模态参数,做误差分析,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,当信噪比为 14、18 dB 时,Prony 法无法识别出第 2 个振荡模态下的衰减因子,对频率的辨识误差较大,最大时达到 0.237 1、0.192 8 Hz;而对于 TLS-ESPRIT 法的主要问题在于其辨识出的衰减因子误差过大,最大时达到 0.048 2、0.038 3 和 0.037 6。衰减因子对应着系统的阻尼系数,过大的误差则意味着无法准确地辨识出系统的阻尼系数,这对于后续抑制低频振荡、构建优化目标函数十分不利。综上所述,在相同的实验条件下,所提 SURE-ITD 法的辨识性能更佳。

表 5 3 种算法的辨识结果

Tab.5 Identification results of three algorithms

辨识方法	信噪比/dB	频率/Hz	误差/Hz	衰减因子	误差
Prony	14	0.786 3	0.008 8	0.079 8	0.025 1
		1.217 3	0.237 1	—	—
	18	0.782 3	0.004 8	0.091 2	0.036 5
		1.038 6	0.058 4	—	—
	22	0.779 3	0.001 8	0.104 6	0.049 9
		0.970 3	0.192 8	0.928 6	0.661 1
TLS-ESPRIT	14	0.776 7	0.000 8	0.063 7	0.009 0
		0.990 7	0.010 5	0.219 3	0.048 2
	18	0.777 0	0.000 5	0.057 6	0.003 0
		0.974 5	0.005 7	0.229 2	0.038 3
	22	0.776 6	0.000 9	0.058 2	0.003 5
		0.966 5	0.013 7	0.447 2	0.037 6
SURE-ITD	14	0.7752	0.002 3	0.062 2	0.007 5
		0.982 9	0.002 7	0.276 4	0.008 9
	18	0.780 3	0.002 8	0.060 3	0.005 6
		0.975 7	0.004 5	0.275 6	0.008 1
	22	0.773 8	0.003 7	0.058 7	0.005 0
		0.983 5	0.003 5	0.274 9	0.007 4

为了更直观地展示各方法的辨识能力,绘制出 SURE-ITD、Prony 以及 TLS-ESPRIT 各拟合曲线与原始信号曲线的对比如图 6 所示。由图 6 的拟合曲线可初步判断,SURE-ITD 法能更好地还原出原始信号曲线。结合表 6 的拟合误差分析可知,SURE-ITD 法具有更高的拟合系数和更小的均方误差,且 Prony 和 TLS-ESPRIT 法的拟合误差较大,表明了在该仿真算例下,两种算法的辨识能力完全失去了优势。综上,所提方法性能更好。

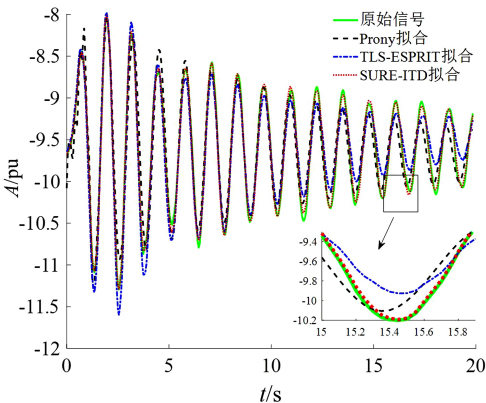


图 6 信噪比 14 dB 下各方法的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of each method based on SNR of 14 dB

表 6 不同信噪比下各方法辨识的拟合精度

Tab.6 Fitting accuracy of each method's identification under different SNR

辨识方法	信噪比/dB	R-square	MSE
Prony	14	0.845 1	0.085 6
	18	0.909 5	0.036 0
	22	0.939 7	0.026 1
TLS-ESPRIT	14	0.893 5	0.046 2
	18	0.912 4	0.032 5
	22	0.943 6	0.025 2
SURE-ITD	14	0.976 3	0.010 1
	18	0.989 7	0.007 5
	22	0.999 0	0.006 2

4.3 实测信号分析

为验证所提联合辨识算法在实际电网中对低频振荡信号的适用性,取国外某地电网发生过的一起低频振荡事故所测取的信号曲线(如图 7)进

行分析。图 7 中,横轴表示测取信号时对应的测取时间,纵轴表示电网系统频率下降时的振荡频率。应用 matlab 软件中的小波分析工具箱对该数据曲线进行时频能量分析,所得结果如图 8 所示,根据图 8 中区域的颜色分布,可初步判断系统的振荡频率位于 1.5~2.0 Hz 的范围,并且,对应的有效信号的测取时间为 15~20 s。

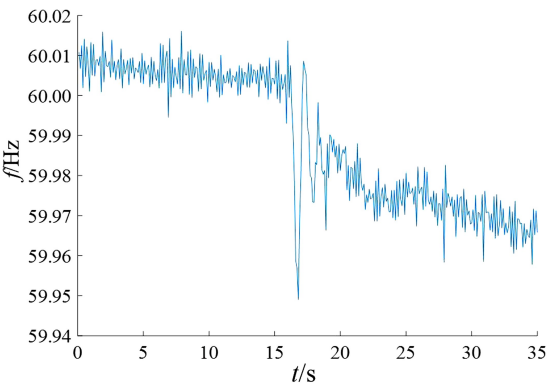


图 7 电网中的实测频率曲线

Fig.7 Measured frequency curve in power grid

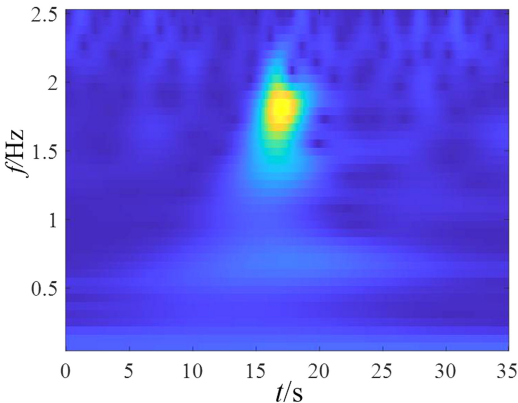


图 8 小波能量分析图

Fig.8 Wavelet energy analysis diagram

综上分析,可知系统振荡信号的有效测取时间段和大致的振荡频率区间。为了更准确地进行参数的辨识,将图 7 中的有效数据段进行信号数据区间的截取,以验证所提出的 SURE-ITD 法的参数辨识能力,并对辨识结果进行参数的拟合,以验证算法辨识结果的准确性,所得结果如图 9 所示。从图 9 可知,此次系统的低频振荡事故中,存在两个起关键作用的振荡模式,其频率分别为 1.588 3、1.900 7 Hz,阻尼比分别为 2.83%、0.47%。通过数据曲线的拟合以及小波能量的时频分析,确定了该结果的正确性,也验证了所提 SURE-ITD 联合辨识算法在实际电网中的可行性。

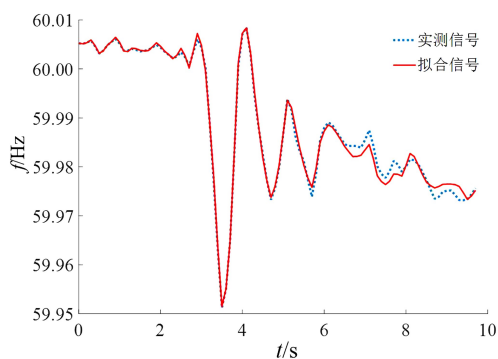


图9 电网中的实测频率曲线

Fig.9 Measured frequency curve in power grid

5 结论

本研究联合了基于无偏似然估计的自适应小波阈值 (SURE-WT) 与固有时间尺度分解法 (ITD), 提出了一种新的低频振荡关键参数的联

合辨识算法, 解决了传统辨识算法抗噪能力不足等问题, 并进行了相关的实验分析, 所得实验结果及结论如下:

1) 在进行低频振荡信号的预处理上, 采用了基于 SURE 的自适应小波阈值处理, 经实验结果表明, 引入了动态的自适应阈值调整公式, 能够更好地实现对含噪信号噪声的去除, 实现完美的信噪分离。

2) 通过最优阈值的估计, 将处理后的信号作为固有时间尺度法新的输入信号, 并以此信号来构建相应的信号测点矩阵及求解其矩阵的特征值, 从而获取对系统起关键作用的振荡模态参数, 实验结果符合预期。

3) 实验分别采用数学信号、PSASP 软件中的 8 机 36 节点仿真系统信号以及实测信号, 并添加不同强度下的干扰噪声, 以模拟实际情况, 经对比多种方法的辨识精度, 验证了所提方法的有效可行性。

参考文献:

- [1] 杨蕾, 黄伟, 张丹, 等. 异步联网下云南电网低频与超低频振荡综合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 133-140.
- [2] 张程, 刘佳静, 匡宇, 等. 基于 FastICA 技术与 TLS-ESPRIT 方法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2214-2222.
- [3] 张扬, 林卫星, 邓才波, 等. 柔性直流输电系统低频振荡机理及抑制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3134-3146.
- [4] PAPADOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, KONTIS E O, et al. Measurement-based hybrid approach for ringdown analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4435-4446.
- [5] IBRAHIM N S, HAYAWI H A A. Employment the state space and Kalman filter using ARMA models[J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2021, 11(1): 145.
- [6] 栾某德, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于改进小波系数奇异值分解和小波去噪的低频振荡时变模式辨识[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 141-147.
- [7] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
- [8] 刘志刚, 李文帆, 孙婉璐. Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 109-116.
- [9] 李志军, 张鸿鹏, 王亚楠, 等. 排列熵-CEEMD 分解下的新型小波阈值去噪谐波检测方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 120-129.
- [10] 李玉刚, 叶庆卫, 周宇, 等. 基于模态参数识别的 ITD 算法改进[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 298-303.
- [11] 李剑, 孙才新, 杨霖, 等. 局部放电在线监测中小波阈值去噪法的最优阈值自适应选择[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 25-30.
- [12] 陈坚, 刘思议, 金涛. 基于 SURE 小波阈值消噪和 MCEEMD-HHT 的低频振荡分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 151-160.
- [13] 吴超, 门锬, 涂亮. ITD 和随机减量法在互联电网振荡特性分析中的应用[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 8-13.
- [14] 区允杰, 陈刚. 基于改进 ITD 法的低频振荡参数辨识研究[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 73-79.
- [15] 洪灿梅, 刘爱莲, 刘名扬, 等. FIR 滤波器与 IIR 滤波器去噪效果对比研究[J]. 微型机与应用, 2015, 34(21): 67-69, 74.