

DOI: 10.7667/PSPC170559

# 一种基于信号相关性的低频振荡辨识方法

李 施, 丁仁杰

(清华大学电机工程及应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 相量测量单元(PMU)被广泛用于电力系统数据实时采集和状态监测, 为电力系统的稳定运行提供了可靠的信息保障。在电力系统受到扰动的情况下, 动态过程中会包含低频周期性衰减成分分量, 也可能体现为低频振荡。基于 PMU 实时采集信号, 构建了一种针对低频振荡的相关辨识方法, 可有效辨识系统因短时扰动而产生的低频振荡模式, 并通过量化系统动态过程振荡强度来准确辨识起振时间。通过仿真计算和针对实际变电站 PMU 采集信号的辨识计算, 验证了此方法的可行性。此方法在实际变电站受到短时扰动的情况下可在短时间内准确辨识出低频振荡成分的频率、幅值、衰减系数和动态过程的起止时间等参数, 并能够较好地复原系统由受扰至恢复的动态过程, 为电力系统的低频振荡辨识提供了一种可行的新方法。

**关键词:** 相关分析; 相量测量单元(PMU); 低频振荡; 动态过程; 信号检测

## An identification method for low-frequency oscillation based on signal correlation

LI Shi, DING Renjie

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Phasor Measurement Unit (PMU) is widely used for real-time data acquisition and condition monitoring in power system, which provides reliable guarantee for the stable operation of power system. The dynamic process may contain low-frequency periodic attenuation components and it may also be low-frequency oscillation when a transient disturbance happens in power system. A correlation identification method for low-frequency oscillation based on PMU data is constructed, which can identify the oscillation mode caused by the short-time disturbance effectively, and can identify the starting time of oscillation by quantifying the oscillation intensity of dynamic process. The feasibility of this method is proved by simulation and identification of actual PMU signals in the substation. This method can identify the parameters of low-frequency oscillation timely and exactly, such as frequency, amplitude, attenuation coefficient, starting and stopping time of dynamic process, when the disturbance occurs in the substation, and it can rebuild the dynamic process of the system from disturbance to recovery, therefore it provides a new way of low-frequency oscillation identification in power system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

**Key words:** correlation analysis; phasor measurement unit (PMU); low-frequency oscillation; dynamic process; signal detection

## 0 引言

随着经济的不断发展进步, 当今社会越来越依赖大规模交直流互联的电力系统提供的能源, 这一方面增加了电力系统的规模和复杂程度, 另一方面也对电力系统所提供的电能质量提出了更高的要求。

近年来, 基于 GPS(全球卫星定位系统)的 PMU(相量测量单元)装置已经广泛用于电力系统信息采集和状态监测之中<sup>[1-2]</sup>。PMU 装置采集量具备时间上同步、空间上广域、可直接测量相角等一系列优点, 为电力系统的稳定性分析提供了可靠的数据来源<sup>[2-4]</sup>, 将在线测量和系统辨识结合进行分析也成为对电力系统参数进行分析的一种方法<sup>[5]</sup>。目前, PMU 系统已经广泛应用于电力系统分析及在线监控的各个领域, 如状态监测与稳定性评估、状态估计与参

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600)  
“大型交直流混联电网运行控制与保护”

数辨识、频率稳定与低频减载、低频振荡辨识等<sup>[2-3]</sup>。在低频振荡辨识领域, PMU 系统采集的具备统一时间标度的大量同步相量数据为跨区域、多重扰动、大规模的振荡事故分析提供了可靠的保障<sup>[6-7]</sup>。当前的各类电力系统分析监测方法都紧密依靠 PMU 系统而开展。

在实际的电力系统运行监控和电力系统稳定性分析中, 系统因扰动而产生的低频振荡现象是影响电网稳定运行的重要因素之一, 受到广泛的关注<sup>[6,8]</sup>。对低频振荡的辨识研究主要围绕着振荡产生机理、振荡信号辨识、振荡特征提取和低频振荡抑制等方面展开。其中主要的两种分析方法为基于系统全阶数学模型的离线分析法和基于仿真或实测信号分析的信号分析法<sup>[9]</sup>。依托 PMU 系统实时在线采集的数据, 信号分析法可以回避求解过程中的“维数灾”问题, 更为方便地实现低频振荡的在线监测和参数识别, 也因此广泛受到人们的关注<sup>[10]</sup>。目前比较常用的电力系统低频振荡信号分析方法主要有傅里叶法、小波变换法、Prony 法和 Hilbert-Huang 法等。文献[11-12]采用 FFT 对低频振荡模式进行辨识, 但受限于采样率、信号宽度和数据采集误差等因素而较难投入实际应用; 文献[13]通过小波脊算法对低频振荡进行了特征分析, 但实际振荡持续时间往往较短从而不利于进行小波脊变换; 文献[14]提出了基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识方法, 一定程度上降低了 Prony 算法对噪声的敏感程度, 但信噪比降低程度有限; 文献[15]采用 Hilbert-Huang 实现了振荡模式的辨识, 但仍然存在模态混叠的问题; 文献[16]对 Prony 算法和 Hilbert-Huang 两种算法进行了适用性比较分析, 将扰动源定位与模式辨识结合在一起, 但对于振荡发生的时间特性分析能力并不好。

近些年来, 用信号辨识、弱信号提取与检测等领域的算法来分析低频振荡的思路逐渐受到关注。这些算法主要关注各类强噪声环境下具有特征模式的弱信号, 在提升计算速度的同时提高了分析的准确度。文献[17-18]分别采用弱信号检测领域常用的 Duffing 混沌振子法和共振稀疏分解法, 对电力系统低频扰动进行分析, 取得了较好的成效。

一直以来, 在信号辨识和分析领域, 相关性分析因其具有计算量小、抗噪性好和易于在线化等一系列优点, 被广泛应用于微弱信号的辨识<sup>[19]</sup>。文献[20-21]对低频含噪等幅振荡信号进行了延时自相关性功率谱分析, 并采用奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)对信号进行预处理来适应更低的信噪比, 实现了对单频率等幅振荡的频率辨识。本文

基于上述特点, 提出了一种基于 PMU 的低频振荡相关辨识方法。通过对 PMU 系统实时采集的电压数据进行相关性分析来辨识低频振荡模式的各个参数并复原动态过程。通过仿真分析和对南方电网 500 kV 变电站实测数据的实验分析, 验证了此方法的可靠性, 从而表明了这种基于 PMU 的低频振荡相关辨识方法是可行的。

## 1 低频振荡相关辨识方法

由上所述, 在电力系统受到短时扰动时会产生低频振荡, 本文提出基于 PMU 的扰动信号相关辨识方法, 对扰动信号的低频振荡模式和起振时间分别进行辨识。

### 1.1 相关法辨识低频振荡模式

设待辨识的低频周期信号在任意时刻的时域表现形式为

$$s_d(t) = A_d \sin(\omega_d t + \varphi_d) \cdot e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中:  $\omega_d = 2\pi f_d$  为信号角频率;  $\varphi_d$  为低频信号相位且一般认为其近似为 0;  $A_d$  为信号幅值;  $\alpha$  为信号衰减系数。当电力系统进入稳态时, 状态量在稳定值附近小幅度波动, 认为此种小幅波动在信号特征上体现为类高斯噪声形式。由此可以近似认为在存在扰动的情况下, 干扰信号可表达为

$$s(t) = A_d \sin(\omega_d t) \cdot e^{-\alpha t} + n(t) \quad (2)$$

式中,  $n(t)$  为全频段的高斯白噪声。若对一定时间段内的采样信号序列进行自相关分析, 有:

$$R(\tau) = \int s(t+\tau)s(t)dt = R_s(\tau) + R_n(\tau) + R_{(s,n)}(\tau) + R_{(n,s)}(\tau) \quad (3)$$

对于全频段的高斯噪声, 应有:

$$R_{(s,n)}(\tau) = R_{(n,s)}(\tau) \approx 0$$

上式可转化为

$$R_f(\tau) \approx R_s(\tau) + R_n(\tau) = -\frac{\alpha A_d^2}{\alpha^2 + \omega_d^2} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) - \frac{\omega_d A_d^2}{\alpha^2 + \omega_d^2} e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t) + \delta(t) \quad (4)$$

由此分析可以看出, 信号的自相关序列在频率成分上保留着原信号函数的频率特征, 同时削弱了信号与加性噪声之间的影响, 这也为将周期性的低频振荡成分从信号中辨识出来提供了可能。

在电力系统中, 高斯白噪声的干扰广泛存在。对于大扰动激励下产生的低频振荡模式, 振荡过程和稳态过程都存在一定程度的高斯白噪声。为了进一步排除电力系统工频及更高频率的谐波对低频振荡模式的干扰, PMU 系统采集的信号需要经过低通

滤波器的处理。在此情况下,全频带的高斯白噪声也会转变为窄带的高斯白噪声。图1给出了全频带的高斯白噪声及通过截止频率为25 Hz的低通滤波器后的窄带高斯白噪声波形及自相关函数。

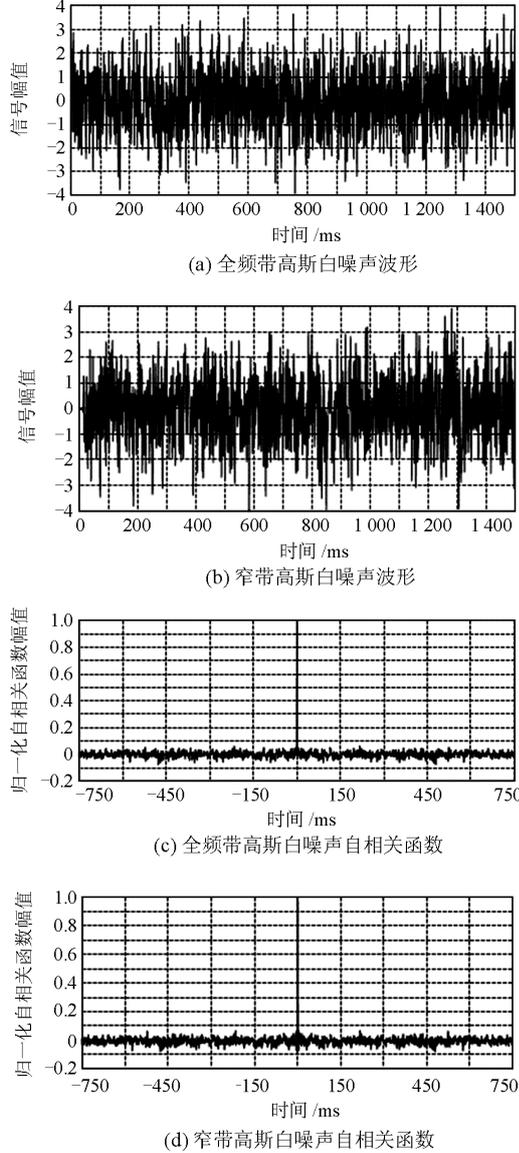


图1 全频带高斯白噪声及窄带高斯白噪声的波形及自相关函数

Fig. 1 Waveform and autocorrelation function of Gaussian noise (full band and narrow band)

由图1可以看出,在经过低通滤波器后的窄带高斯白噪声的波形特性和自相关函数特性与全频带的高斯白噪声差别不大,但依然可以看出在低频分量部分,窄带高斯白噪声的短时相关性相较于全频带高斯白噪声增强了。

综上所述,电力系统在受到大扰动激励进入低

频振荡模式后的主要噪声模式为窄带高斯白噪声,其时域特性和自相关特性与全频带高斯白噪声类似,但在低频部分具有较强的短时相关性,相当于在低频部分降低了信号的信噪比,对形如式(4)的近似结果并没有太大的影响。

更一般地,若希望检测一个确定频率的振荡成分是否存在,可人为给定一个确定频率的模型信号:

$$f_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) \quad (5)$$

考虑实际系统对信号进行采样的抽样频率  $f_s$ , 令  $\omega_s = 2\pi f_k / f_s$ , 信号和模型信号都转化为序列模式,考虑  $f_d \approx f_1$ , 且指定采样时间起点为  $t=0$  时刻,采样时间长度为  $T$ , 信号和模型信号参加相关计算的序列长度相等,记作  $N$ 。

先假定振荡幅度不衰减,有:

$$R_{(F, F_1)}(n) = \frac{1}{N} F(n) \cdot F_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{2N-m-1} A_k \sin(\omega_s n + \varphi_s) \cdot A_1 \sin(\omega_1 m + \omega_1 n + \varphi_1) \quad (6)$$

式(6)结果是关于  $n=N$  对称的,即当频率匹配的情况下相关序列在  $n=N$  处取到极值,此时应有:

$$R_{(F, F_1)}(N) = R_{(f, f_1)}(T) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-m-1} s_d(n) \cdot f_1(n+m) = -\frac{A_1 A_d T}{2} \cos(\tau \cdot \Delta\omega_d + \varphi_d) \quad (7)$$

泰勒展开可将式(7)转化为

$$R_{(F, F_1)}(N) \approx \frac{A_1 A_d T}{2} \left(1 - \frac{1}{2} (\tau \cdot \Delta\omega_d + \varphi_d)^2\right) = \frac{A_1 A_d T}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \varphi_d^2 - \tau \cdot \Delta\omega_d \varphi_d - \frac{1}{2} \tau^2 \Delta\omega_d^2\right) \approx \frac{A_1 A_d T}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \varphi_d^2 - \tau \cdot \Delta\omega_d \varphi_d\right) \quad (8)$$

由此建立起相关序列幅值与频差之间的线性近似关系,分析某一振荡成分的信息实则为求解对应的  $(A_d, \varphi_d)$ 。

辨识过程中针对待分析的频率  $f = f_d$  并且给定模型信号使其满足:  $f_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t)$ ,  $f_2(t) = A_2 \sin(\omega_2 t)$ ,  $f_0(t) = A_0 \sin(\omega_0 t)$  且满足  $f_1 = f_d + \Delta f$ ,  $f_2 = f_d - \Delta f$ 。由于式(8)关系仅在  $\Delta\omega_d \approx 0$  的附近才成立,因此  $\Delta f$  应尽量小。

$$\begin{cases} R_1(\tau) = \frac{A_1 A_d T}{2} (-\tau_1 \varphi_d \Delta\omega_{d1} + 1 - \frac{1}{2} \varphi_d^2) \\ R_2(\tau) = \frac{A_2 A_d T}{2} (-\tau_2 \varphi_d \Delta\omega_{d2} + 1 - \frac{1}{2} \varphi_d^2) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可求得  $A_d$ 、 $\varphi_d$ 。

进一步, 满足条件的低频振荡模式还应满足约束条件:

$$\begin{cases} \varphi_d \approx 0 \\ \tau = N \text{ 时 } R(\tau) \text{ 取到极值} \end{cases}$$

由此即可实现对  $f = f_d$  的低频分量的辨识。

上述分析是建立在假设振荡为等幅振荡的简化前提下。实际的电力系统低频振荡由于存在幅值衰减, 需要对幅值  $A_d$  的估计进行修正。

由式(6)可知, 简化相关序列由于幅值保持不变, 相关序列结果相对  $n = N$  偶对称, 而实际振荡存在幅值衰减项  $e^{-\alpha t}$ , 导致其相关序列失去对称性。由式(4)可知, 相关序列中幅值的衰减规律与原信号幅值的衰减规律相同。为此可分别在模型信号为  $f_1, f_2, f_d$  的情况下对于  $\tau \geq N$  范围内  $R(\tau)$  取到极值的  $(\tau_i, R(\tau_i))$  进行衰减函数模型拟合求得  $\alpha$ 。若  $f = f_d$  的低频振荡成分确实存在, 应满足:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_d$ 。

## 1.2 低频振荡的起振判据设定

由前述分析, 当电力系统产生低频振荡时, 可通过相关分析法对低频振荡的特征参数进行辨识。当低频振荡发生时, 通过 PMU 采集的电压(或电流)信号也表现出低频振荡, 在振荡过程中低频成分的占比(0.1~2.5 Hz 的部分)会显著增大, 由此可以引入判决量来判定系统是否进入了低频振荡状态, 若系统确已进入振荡, 则应对振荡特征进行进一步分析。

设定归一化振荡强度  $\lambda$  为判决系统振荡的判决量, 即有

$$\lambda = \frac{2A_{\max}}{NE} \quad (10)$$

式中:  $N$  为相关序列长度;  $E$  为序列直流分量;  $A_{\max}$  为相关序列频谱最大幅值。在信号处于稳态时,  $\lambda$  的值非常小, 且  $\left| \frac{d\lambda}{dt} \right|$  随时间的变化也很小。根据大量仿真和实际信号的实验结果, 在判断过程中,  $\lambda$  的经验阈值可取 0.001,  $\left| \frac{d\lambda}{dt} \right|$  的经验阈值可取 5。判断若信号中出现低频振荡成分, 则  $\lambda$  的值和  $\left| \frac{d\lambda}{dt} \right|$  都会迅速增加并超过阈值。考虑到实际信号干扰成分多样复杂, 认为进入振荡状态时刻满足:

$$\lambda > 0.001 \text{ 或 } \left| \frac{d\lambda}{dt} \right| > 5$$

则将这一特征作为系统起振进入低频振荡状态的判决依据。

此外, 信号的振荡成分频率复杂程度、信号的信噪比也会影响归一化振荡强度的判据的准确性与阈值选取。信号的振荡成分频率越复杂、信噪比越低, 归一化振荡强度的阈值范围越大, 相应的判断准确度也就越低。在此种情况下, 一种可行的思路是适当调整判决过程中两个判据的权重。一般来说对于准确度较低的信号, 应当适当增大  $\left| \frac{d\lambda}{dt} \right|$  判据的相应权重。

综上所述, 基于相关性分析的低频振荡辨识思路为:

从 PMU 的实时采集量中对系统的短时扰动进行辨识, 判断系统是否进入振荡状态;

若系统进入振荡状态, 对扰动中包含的低频分量进行进一步分析, 通过对设定的一系列模型信号进行判断实现对振荡频率的辨识;

在上一步基础上对振荡频率附近相关序列的幅值进行拟合, 求取对应的信号衰减系数。

接下来利用 Matlab 平台对该辨识方法进行仿真研究。

## 2 仿真分析

### 2.1 低频振荡参数辨识仿真分析

电力系统实际低频振荡频率集中在 0.1~2.5 Hz 内, 由此构造模拟振荡信号:

$$s(t) = e^{-0.5t} + 2e^{-0.6t} \sin(2\pi \times 2t) + 5e^{-0.2t} \sin(2\pi \times 0.5t) + 50 + s_n(t) \quad (11)$$

采样频率选取  $f_s = 50$  Hz, 采样时长  $T = 30$  s, 采样序列点数  $N = 1500$ ,  $s_n(t)$  为利用 wgn 命令产生的与原信号长度相同, 信噪比为 20 dB 的高斯白噪声序列, 得到的模拟信号波形如图 2 所示。

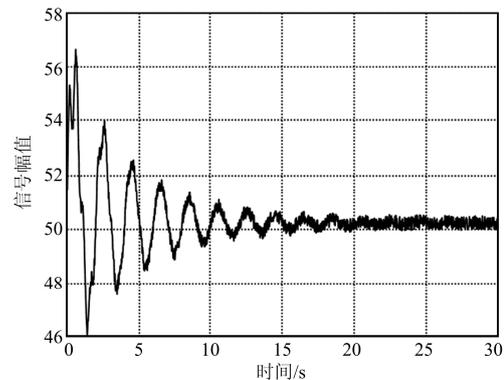


图 2 仿真信号波形

Fig. 2 Simulation signal waveform

对仿真信号进行相关性分析, 辨识到的低频振荡特征如表 1 所示。

表 1 相关性分析辨识振荡模式结果

Table 1 Oscillation mode identified by correlation analysis

序号	$f / \text{Hz}$	$R$	$\alpha_m$
1	0.5	5.017	-0.202 7
2	2.0	2.119	-0.581 9

由表 1 结果比对模拟振荡信号可知, 在此条件下相关性分析可以可靠地辨识低频振荡成分及其特征量。

进一步为考察信号中叠加的噪声成分对低频成分辨识结果的影响, 在保持信号成分不变的前提下对不同信噪比下的信号进行相关性辨识并对含噪情况下的误差率进行 Monte Carlo 分析, Monte Carlo 次数取  $10^5$  次, 辨识结果如图 3、图 4 所示。

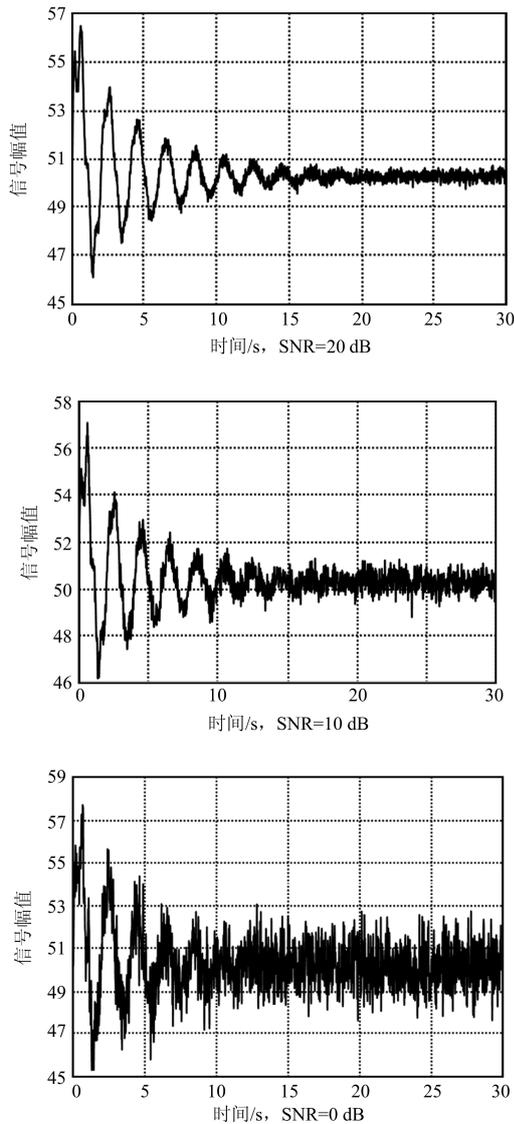


图 3 仿真信号在不同信噪比下的波形

Fig. 3 Simulation signal waveform under different SNR

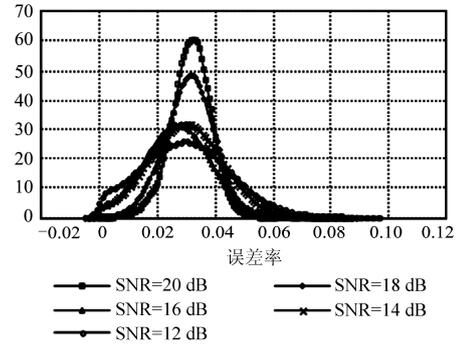


图 4 辨识结果在不同信噪比下的误差率

Fig. 4 Identification error rate under different SNR

由图 4 可以看出, 辨识误差率的概率密度函数最大值随信噪比变化很小, 稳定在 3%, 但随着信噪比的降低, 辨识结果的误差率也逐渐提高, 辨识误差率随信噪比的变化规律如表 2 所示。同等条件下, 直接采用 Prony 算法对仿真信号进行辨识, 其 99.5% 误差率分布在 8%~10%, 从而验证了该算法具有优于 Prony 算法的准确度。

表 2 不同信噪比下的 99.5% 置信误差率

Table 2 99.5% confidence error rate under different SNR

SNR/dB	20	18	16	14	12
99.5% 置信误差率/%	4.16	5.16	5.62	6.26	7.03

## 2.2 动态过程起止判据仿真分析

电力系统因短时扰动产生的动态过程包含不同频率的低频振荡分量, 辨识算法应当能够对动态过程的起止时间进行准确把握。为此调整模拟仿真信号为

$$s(t) = \begin{cases} 50 + 0.3 \times \text{rand}(1, 1500) + s_n(t), & -30 \leq t \leq 0 \\ e^{-0.5t} + 2e^{-0.6t} \sin(2\pi \times 2t) + 5e^{-0.2t} \sin(2\pi \times 0.5t) + \\ 50 + 0.5 \times \text{rand}(1, 1500) + s_n(t), & 0 \leq t \leq 30 \end{cases} \quad (12)$$

仿照 2.1 节,  $s_n(t)$  为利用 wgn 命令产生的与原信号长度相同、信噪比可变的高斯白噪声序列, 同时利用 rand 函数产生一个均匀分布的叠加成分, 模拟信号在系统稳态值附近的随机波动。在此仿真信号中, 为进一步增加辨识难度, 将叠加的高斯白噪声成分的信噪比进一步降低, 得到待辨识的信号波形如图 5 所示, 辨识结果如图 6、表 3 所示。

由图 5 可以看出, 随着信噪比的降低, 从信号幅值上直观分辨低频振荡的发生变得越来越困难, 结合图 6 的辨识结果可以发现, 基于相关性分析的低频振荡辨识算法具有很好的辨识能力, 即使在信噪比低至 -5 dB 的情况下也能对混杂在噪声中的低频振荡起止时间进行辨识, 具有很强的抗干扰能力。

表 3 不同信噪比下起振时间辨识结果偏差  
Table 3 Identification result bias of oscillation starting time under different SNR

信噪比/dB	10	5	2	0	-5
起振时间偏差/s	0	0	0	0	0.02

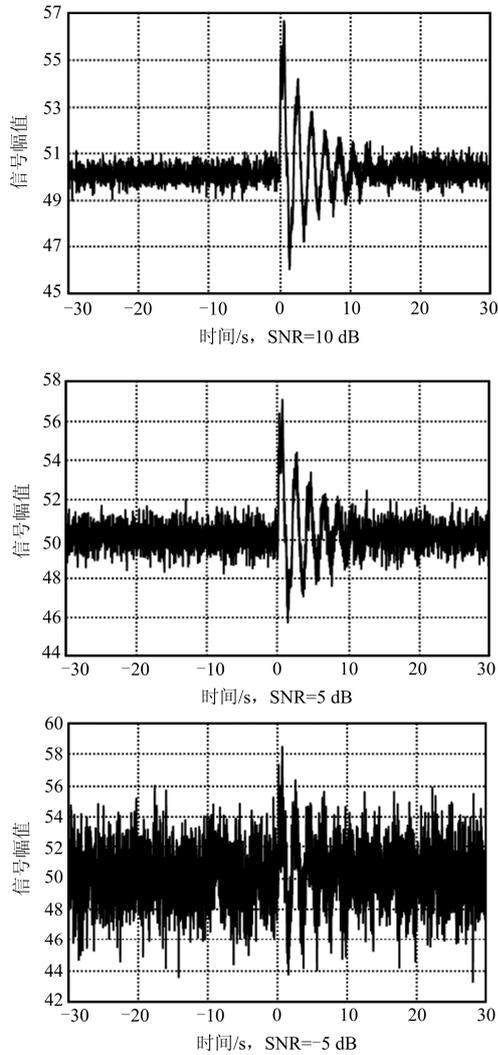


图 5 仿真信号在不同信噪比下的波形

Fig. 5 Simulation signal waveform under different SNR

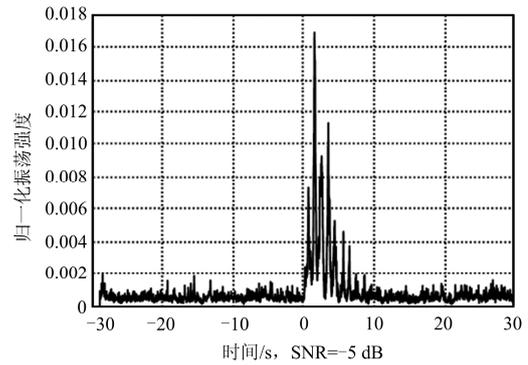
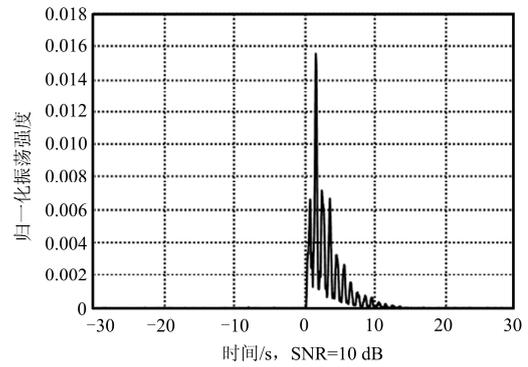
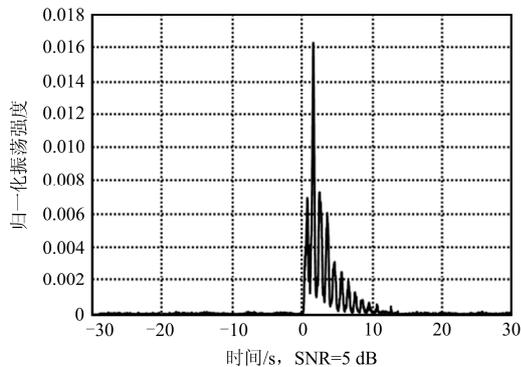


图 6 不同信噪比下低频振荡起止时间辨识结果

Fig. 6 Identification results of starting and stopping time of low-frequency oscillation under different SNR

结合表 3 给出的结果, 可以看到在信噪比不小于 0 dB 的情况下, 起止时间的辨识都完全准确, 充分说明了该辨识算法的可行性和精确性。信噪比进一步降低的情况下, 起止时间的辨识结果产生偏差, 此种误差主要是因 PMU 信号的采样率较低而产生, 若将信号采样率提高(50 Hz 提高至 100 Hz)且结合插值法进行计算, 在低信噪比下可以进一步减小起止时间辨识结果的偏差量。实际的 PMU 信号中噪声较小, 信噪比远大于 0 dB, 此种辨识方法是完全可行的。

综合上述分析, 基于相关性分析的低频振荡辨识方法对于低频振荡仿真信号具有较好的辨识能力, 在具有较大噪声干扰的情况下对于包含低频振荡模式的动态过程的起止时间也可以进行准确的判断。下面基于南方电网某 500 kV 变电站采集的 PMU 数据对实际的低频振荡进行实验分析。

### 3 实验结果

实验系统采用南方电网某 500 kV 变电站系统结构, 设定在实验时间段内电网受到扰动产生低频振荡, 并随后恢复稳态。与实际 PMU 系统保持一致, 采样率设定为 50 Hz, 数据长度为 20 s。待观测线路电压波形如图 7 所示。

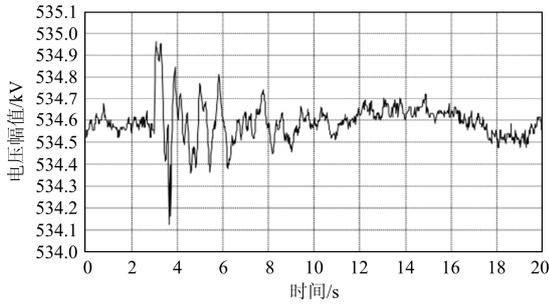


图 7 待观测线路电压波形

Fig. 7 Voltage waveform of the observed line

选取计算序列长度为 1 s，步长为 20 ms，采用相关分析法对待测线路电压波形进行动态过程起止分析，分析结果如图 8 所示。

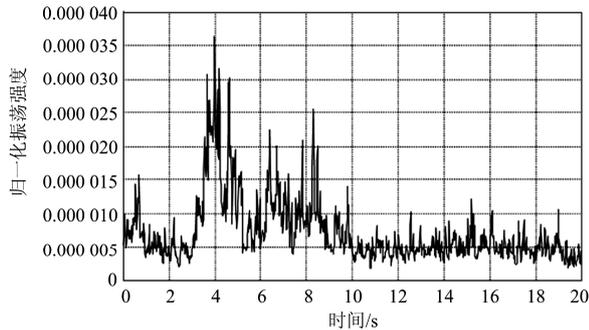


图 8 系统动态过程起止分析结果

Fig. 8 Identification result during a short-time disturbance

由辨识结果可以看出，该扰动前后的动态过程特征如下：在  $t=3.00$  s 之前系统归一化振荡强度较低，此时波动的振荡强度表明系统存在加性噪声的干扰；当  $t>3.00$  s 时归一化振荡强度迅速增加，表明此时系统已经进入因扰动而产生的动态过程；当  $t=10.00$  s 时短时振荡结束，系统恢复至存在加性噪声的干扰叠加状态，振荡强度恢复低水平小幅波动。

由上述分析可以看出，进一步采取相关法对动态过程前后电压信号进行低频振荡分析，分别采用相关性分析法和 Prony 法对 PMU 实测数据进行低频振荡模式辨识，得到的结果如表 4、表 5、图 9 所示。类比传统的分析方法，可以看出相关性辨识方法对系统因扰动而产生的动态过程低频振荡成分辨识具有理想的可靠度。

结合表 4、表 5、图 9 的结果可以看出，相关性分析算法对低频振荡成分的模式辨识优于 Prony 算法，辨识的结果与实际系统的动态过程差别很小。这主要是因为 Prony 算法对噪声的适应能力不好，对信号的信噪比要求很高。而相关性辨识算法在低信噪比的情况下也能准确地契合信号的模型特征，是区别于传统信号分析算法的一个主要优点。

表 4 相关性分析低频振荡模式辨识结果

Table 4 Identification results of low-frequency oscillation mode by correlation analysis

序号	$f / \text{Hz}$	$R$	$\alpha_m$
1	0	534.597 2	0
2	0.464 7	0.251 4	-0.327 9
3	1.112 3	0.321 7	-0.235 2
4	1.521 8	0.301 6	-0.377 1
5	3.600 0	0.200 4	-0.257 6
6	10.217 4	0.162 5	-0.754 1

表 5 Prony 分析低频振荡模式辨识结果

Table 5 Identification results of low-frequency oscillation mode by Prony analysis

序号	$f / \text{Hz}$	$R$	$\alpha_m$
1	0	534.613 3	0
2	0.458 8	0.250 2	-0.304 9
3	1.116 5	0.317 4	-0.251 2
4	1.554 6	0.311 2	-0.389 5
5	3.601 1	0.202 5	-0.253 3
6	8.485 2	0.152 3	-0.442 7
7	10.035 7	0.188 1	-0.754 1

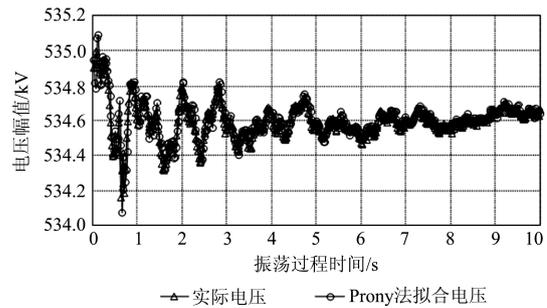
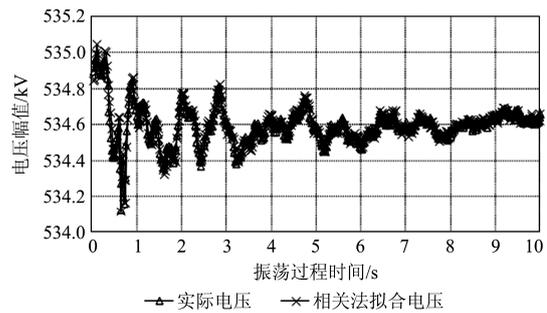


图 9 低频振荡模式辨识结果及动态过程拟合曲线

Fig. 9 Curves of identification results of low-frequency oscillation mode and dynamic process fitting

由上述分析可以看到，采用基于相关性分析的低频 PMU 干扰信号辨识方法在时域上可以精确地辨识系统动态状态的起始和结束，对扰动过后系统

进入恢复期并最终恢复稳态的过程也有清晰的体现。除此之外,该辨识方法还可以对低频振荡的振荡模式进行有效辨识,并且具备一定的抗噪声干扰能力,是对现有电网状态监测手段的一个合理且可行的补充。

#### 4 结论

在实际的电力系统中,PMU是常用且重要的一种信息采集渠道。在当今日益复杂的电力系统中,系统受到扰动可能产生包含低频振荡成分的动态过程,对电力系统经济稳定运行产生很大的影响。PMU装置实时采集的大量数据为基于信号分析的电力系统低频振荡研究提供了便利条件和可靠数据来源。本文从信号分析的大方向入手,提出了一种基于PMU的低频振荡相关辨识方法,可以在时域上精确地辨识系统动态过程的产生与结束,同时对低频振荡模式进行有效辨识,具备一定的抗噪声能力。在同等情况下,该辨识方法的模式辨识精度高于Prony算法。本文通过对模拟仿真信号的处理证明了该算法的可靠性,还利用该辨识算法对南方电网某500 kV变电站的动态过程进行了有效辨识,充分说明了此方法的合理性和可行性,为基于信号分析的电力系统低频振荡分析提供了一个可行的新方法。

#### 参考文献

- [1] 闵勇, 丁仁杰, 任勇, 等. 电力系统全网同步监测系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 86-88.  
MIN Yong, DING Renjie, REN Yong, et al. Investigation of global synchronized monitoring system in power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 1997, 37(7): 86-88.
- [2] 程云峰, 张欣然, 陆超. 广域测量技术在电力系统中的应用研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 145-153.  
CHENG Yunfeng, ZHANG Xinran, LU Chao. Research progress of the application of wide area measurement technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 145-153.
- [3] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [4] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等. 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 18-22.
- XIANG Li, BAO Yanhong, GENG Tianxiang, et al. Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 18-22.
- [5] 段刚, 王茂海, 陈程, 等. 基于瞬时值比较的PMU动态性能在线评测方法及系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 22-27.  
DUAN Gang, WANG Maohai, CHEN Cheng, et al. Instantaneous value comparison based PMU dynamic characteristics evaluation method and system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 22-27.
- [6] 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.
- [7] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.  
DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 73-80.
- [8] 孙迪飞. 电力系统低频振荡综述[J]. 电气开关, 2011(6): 5-9.  
SUN Difei. A summary of electric power system low-frequency oscillation[J]. Electric Switchgear, 2011(6): 5-9.
- [9] 李世明. 基于信号分析的电力系统低频振荡辨识方法研究综述[J]. 电力与能源, 2016, 37(4): 420-426.  
LI Shiming. Review of identification method for power system low frequency[J]. Power & Energy, 2016, 37(4): 420-426.
- [10] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.  
WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.
- [11] O'SHEA P. The use of sliding spectral windows for parameter estimation in power system disturbance monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1261-1267.
- [12] HASHIGUCHI T, YOSHIMOTO M, MITANI Y, et al. Oscillation mode analysis in power systems based on data acquired by distributed phasor measurements[C] // Proceedings of the 2003 International Symposium on

- Circuits and Systems, May 25-28, 2003, Bangkok, Thailand: 367-370.
- [13] DELPRAT N, ESCUDIE B, GUILLEMAIN P, et al. Asymptotic wavelet and Gabor analysis: extraction of instantaneous frequencies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(3): 644-664.
- [14] 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.
- LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.
- [15] 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.
- LI Tianyun, GAO Lei, ZHAO Yan. Analysis of low frequency oscillation using HHT method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 24-30.
- [16] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.
- HU Haoming, ZHENG Wei, XU Wei, et al. Comparison of the applicability of Prony and HHT algorithms for on-line identification of low-frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 33-40.
- [17] 赵妍, 李志民, 李天云. 电力系统低频振荡监测的 Duffing 振子可停振动系统法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 159-167.
- ZHAO Yan, LI Zhimin, LI Tianyun. Duffing oscillator order stopping oscillation system method for monitoring of low-frequency oscillation in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 159-167.
- [18] 赵妍, 李志民, 李天云. 低频振荡模态参数辨识的共振稀疏分解 SSI 分析方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 136-144.
- ZHAO Yan, LI Zhimin, LI Tianyun. Low frequency oscillation modal parameter identification using resonance-based sparse signal decomposition and SSI method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 136-144.
- [19] 陈明奎, 刘正平. 用多重自相关法检测微弱正弦信号[J]. 噪声与振动控制, 2006(5): 28-30.
- CHEN Mingkui, LIU Zhengping. The detection of weak sinusoidal signal by multi-layer auto correlation[J]. Noise and Vibration Control, 2006(5): 28-30.
- [20] ZHOU Ning, DAGLE J. Initial results in using a self-coherence method for detecting sustained oscillation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 522-530.
- [21] YANG Zekun, GHORBANIPARVAR M, ZHOU Ning, et al. Enhancing sustained oscillation detection by data pre-processing using SSA[C] // North American Power Symposium (NAPS), 2017: 1-6.

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-12-27

作者简介:

李 施(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: saihunter718@sina.com

丁仁杰(1957—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: renjied@tsinghua.edu.cn

(编辑 葛艳娜)