

基于同步相量数据的次同步振荡检测 与模态参数辨识方法

王渝红¹, 王宏宇¹, 于光远², 尹爱辉², 郑宗生¹, 廖建权¹

(1. 四川大学电气工程学院, 成都 610041; 2. 国网山东省电力公司济南供电公司, 济南 250000)

摘要: 新能源集中并网已引发了多次次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)事故, 严重威胁电力系统安全稳定。为对 SSO 进行实时预警与分析, 提出一种基于同步相量数据的 SSO 检测与模态参数辨识方法。首先, 推导 SSO 与同步相量中 SSO 分量实部、虚部的对应关系, 在此基础上, 选取同步相量实部作为特征量; 其后, 分析了 SSO 振荡特性变化时, 同步相量中 SSO 分量的表现形式, 并引入变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)与希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)对同步相量中 SSO 分量进行模态参数辨识, 进而根据对应关系实现 SSO 模态参数的准确辨识。最后, 利用同步相量中 SSO 分量瞬时幅值的差分来检测 SSO 振荡特性是否变化, 并通过合成信号、电磁暂态仿真数据与实测数据对所提方法的有效性进行验证, 该方法的理论成果有望在未来为 SSO 的实时预警, 辅助决策提供技术支撑。

关键词: 同步相量; 次同步振荡; 振荡检测; 模态参数辨识; 变分模态分解; 希尔伯特变换

Sub-synchronous Oscillation Detection and Modal Parameter Identification Method Based on Synchrophasor

WANG Yuhong¹, WANG Hongyu¹, YU Guangyuan², YIN Aihui², ZHENG Zongsheng¹, LIAO Jianquan¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China;

2. Jinan Power Supply Bureau, Shandong Power Grid, Jinan 250000, China)

Abstract: The centralized connection of new energy to power grid has caused many sub-synchronous oscillation (SSO) accidents, which seriously threaten the security and stability of power system. In order to carry out real-time early warning and analysis of SSO, a method for SSO detection and modal parameter identification based on synchrophasor is proposed. Firstly, the corresponding relationship between SSO and the real and imaginary parts of SSO components in synchrophasor is deduced, and then the real part of synchrophasor is selected as the characteristic quantity. Subsequently, when the SSO characteristics change, the form of SSO component in the synchrophasor is analyzed. The modal parameters of sub-synchronized component in the synchrophasor are identified by Variational Mode Decomposition (VMD) and Hilbert Transform (HT), and the identification results of SSO is realized according to the corresponding relationship. Finally, the difference of instantaneous amplitude of SSO component in the synchrophasor is applied to detect the change of SSO characteristics, and the effectiveness of the proposed method is verified by synthetic signal, electromagnetic transient simulation data, and measured project data. The theoretical results are expected to provide technical supports for real-time warning and decision-making of SSO in the future.

Key words: synchrophasor; sub-synchronous oscillation; oscillation detection; modal parameter identification; variational mode decomposition; Hilbert transform

0 引言

随着新能源并网容量不断增加, 大量电力电子

设备接入电网^[1-2]。在此背景下新能源机组与电网之间相互作用引起的新型次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)问题日益突出。新型 SSO 往往由电力系统谐振电路引起的单一振荡模态与电力电子设备相互作用激发, 导致振荡能量在电网中大范围传播, 使振荡由局部向全局发展, 呈现出广域传播特征, 给事故的分析与抑制带来重

基金资助项目: 国家电网有限公司总部科技项目: 交直流混联电力电子系统全频段振荡分析、定位及控制系统研发(5100-202055459A-0-0-00)。
Project supported by Technology Project of Headquarters of State Grid :Full Frequency Oscillation Analysis, Positioning and Control System of AC-DC Hybrid Power Electronics System(5100-202055459A-0-0-00).

大挑战^[3-6]。因此, 辨识 SSO 模态参数对事故重现、溯源、实时抑制等具有重要意义。

现有的 SSO 模态参数辨识方法主要分为两类, 第 1 类利用采样频率可达 10 kHz 的同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)子站瞬时值数据对 SSO 模态参数进行辨识^[5], 此类方法具有理论难度小、测量频带范围宽、测量精度高等优势^[7-8], 现有研究已较为完善, 如傅里叶变换^[9], 小波变换^[10], 模态分解^[11], Prony 算法^[12], 子空间类算法^[13]等。虽然利用 PMU 子站瞬时值数据能准确辨识 SSO 模态参数, 但其只能用于事后分析, 无法从系统层面对 SSO 传播与发展过程进行实时分析^[7]。

第 2 类方法利用广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)主站同步相量数据进行 SSO 模态参数辨识^[14-15]。WAMS 主站集中了重要节点以 25、50 或 100 Hz 上传的同步相量, 对此进行分析, 可得到 SSO 全局信息, 实现 SSO 广域监测与分析^[16-19]。文献[16]对同步相量幅值进行频谱分析, 提出一种查表算法, 将 SSO 分量的频谱泄露幅值与真实 SSO 幅值对应, 首次实现 SSO 幅值与频率的准确辨识。文献[17]通过对 WAMS 主站同步相量进行频谱分析, 引入插值法提高了频谱分辨率得到了 SSO 的精确频率, 并引入 Hann 窗首次实现了 SSO 衰减因子的辨识。文献[18]在文献[17]的基础上提出了基于加阻尼 Rife-vincent M 阶窗函数的插值方法对同步相量进行频谱分析, 提高了 SSO 辨识精度。文献[19-20]将同步相量数据转化为复指数线性组合形式, 利用传统模态参数辨识算法对 SSO 模态参数进行提取, 并从系统层面使用该方法实现了 SSO 溯源。但上述方法只适用于 SSO 振荡特性不发生变化的情况。一旦 SSO 过程中系统工况发生变化, 导致 SSO 振荡特性变化, 如频率、幅值瞬变或出现新的模态^[21-22], 此情况下, 上述方法将会导致较大的辨识误差。针对此问题, 本文提出一种基于同步相量的 SSO 检测与模态参数辨识方法。

同步相量大多利用离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)得到^[7-8], DFT 是一种线性变换, SSO 振荡特性变化时其非平稳特性将传导至同步相量中。对此, 本文首先通过频谱分析推导振荡特性不变的平稳 SSO 信号在同步相量中的表现形式, 得到同步相量实部、虚部与时域 SSO 存在的对应关系, 选取同步相量实部作为特征量。其后, 由理论推导发现, SSO 振荡特性变化时其非平稳特

性将传导至同步相量中。为此引入时频分析方法变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 与希尔伯特变换 (Hilbert transform, HT) 对特征量进行模态参数辨识, 由对应关系得到时域 SSO 模态参数。最后, 本文提出一种基于同步相量的 SSO 检测方法, 利用同步相量中 SSO 分量瞬时幅值差分来检测 SSO 振荡特性变化, 并通过仿真信号与实测信号验证了本文算法的有效性。

1 SSO 分量在同步相量中的表现形式

1.1 平稳 SSO 分量在同步相量中的表现形式

系统中发生 SSO 时, 可将信号模型建为多个分量的叠加, 其数学描述为

$$x(t) = \sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 中存在 $m+1$ 个分量; A_i 、 α_i 、 f_i 、 φ_i 分别表示第 i 个分量的幅值、衰减因子、频率与初相位。

一般情况下 PMU 以固定频率 f_p 对信号进行采样, 将信号离散化, 第 n 个采样点可以被表示为

$$x(n) = \sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_i \frac{n}{f_p}} \cos(2\pi f_i \frac{n}{f_p} + \varphi_i) \quad (2)$$

定义 $f_{pi} = f_i / f_p = L_i / N_p$, $\alpha_{pi} = \alpha_i / f_p = \hat{\alpha}_{pi} / N_p$, 其中 L_i 和 $\hat{\alpha}_{pi}$ 是归一化的 f_i 和 α_i , $N_p = f_p / f_0$, f_0 为基波频率 50 Hz。当 $f_0 = 50$ Hz 时, $L_0 = 1$ 。将式(2)化简为

$$x(n) = \sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi} n} \cos(2\pi f_{pi} n + \varphi_i) \quad (3)$$

同步相量数据由对 $x(n)$ 采用窗长为基波一个周期的矩形窗(一基波周期内采样点数为 N_p)截断后利用 DFT 得到。对 $x(n)$ 的第 r 个窗进行 DFT 有

$$X(r, k) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi} r} \times \sum_{n=0}^{N_p-1} (e^{\alpha_{pi} n} \cos(2\pi f_{pi} (r+n) + \varphi_i) e^{-j2\pi \frac{kn}{N_p}}) \quad r=1, 2, \dots, k=0, 1, 2, \dots, N_p-1 \quad (4)$$

式中 k 代表谱条序列数。通过欧拉公式与级数求和公式, 式(4)可以被简化为

$$X(r, k) = \frac{1}{2N_p} \sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi} r} (e^{j(2\pi f_{pi} r + \varphi_i)} H(L_i - k) + e^{-j(2\pi f_{pi} r + \varphi_i)} H^*(L_i + k)) \quad (5)$$

式中

$$H(L_i - k) = \frac{1 - e^{(\hat{\alpha}_{pi} + j2\pi(L_i - k))}}{1 - e^{(\hat{\alpha}_{pi} + j2\pi(L_i - k))/N_p}} \quad (6)$$

式(6)中 $H^*(\cdot)$ 代表 $H(\cdot)$ 的共轭。基频对应的谱条($k=1$)

为同步相量, 表示为

$$X(r)=X(r,1)=\frac{1}{2N_p}\sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi}r} (e^{j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H(L_i-1) + e^{-j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H^*(L_i+1)) \quad (7)$$

由式(7)可知, 同步相量 $X(r)$ 中同时包含基频与 SSO 等多频段分量信息, 且呈线性叠加。PMU 子站将同步相量数据转化为幅值与相角信息并加上时间戳后上传至主站, 其幅值关系为

$$|X(r)|=\sqrt{\left|\sum_{i=0}^m \operatorname{Re}(X(r))\right|^2+\left|\sum_{i=0}^m \operatorname{Im}(X(r))\right|^2} \quad (8)$$

相角 λ 为

$$\lambda=\arctan\left(\frac{\sum_{i=0}^m \operatorname{Im}(X(r))}{\sum_{i=0}^m \operatorname{Re}(X(r))}\right) \quad (9)$$

一般情况下, α_i, f_i 在多个连续的短时窗内可以认为不变, 因此, 在确定的 α_i, f_i 下, 式(6) $H(L_i-k)$ 中不存在变量, 在多个连续的短时窗内可以认为不变, 令 $H(L_i-1)=H_{i1}e^{j\theta_{i1}}, H^*(L_i+1)=H_{i2}e^{-j\theta_{i2}}$ 并利用欧拉公式与三角公式对式(7)进行化简。

$$\begin{aligned} X(r)=\frac{1}{2N_p}\sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi}r} (e^{j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H_{i1}e^{j\theta_{i1}} + e^{-j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H_{i2}e^{-j\theta_{i2}}) = \\ \frac{1}{2N_p}\sum_{i=0}^m A_i e^{\alpha_{pi}r} (F_{i1}\cos(2\pi f_{pi}+\varphi_i+\phi_{i1}) + jF_{i2}\sin(2\pi f_{pi}+\varphi_i+\phi_{i2})) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$F_{i1}=\sqrt{H_{i1}^2+H_{i2}^2+2H_{i1}H_{i2}\cos(\theta_{i1}-\theta_{i2})} \quad (11)$$

$$\phi_{i1}=\arctan\left(\frac{H_{i1}\sin(\theta_{i1})+H_{i2}\sin(\theta_{i2})}{H_{i1}\cos(\theta_{i1})+H_{i2}\cos(\theta_{i2})}\right) \quad (12)$$

由式(10)–(12)不难发现时域 SSO 与同步相量实部、虚部存在对应关系, 通过引入模态参数辨识算法对同步相量实部或虚部进行模态参数辨识, 通过对应关系, 可得到时域 SSO 模态参数。因此, 与现有文献不同, 本文采用同步相量实部作为特征量来辨识 SSO 模态参数, 同步相量实部可由主站幅值与相角信息由式(13)计算得到。

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(X(r))=|X(r)|\cos(\lambda)= \\ \frac{1}{2N_p}\sum_{i=0}^m A_i F_{i1} e^{\alpha_{pi}r} (\cos(2\pi f_{pi}+\varphi_i+\phi_{i1})) \end{aligned} \quad (13)$$

1.2 非平稳 SSO 分量在同步相量中的表现形式

本节推导时域 SSO 振荡特性变化(SSO 出现、消失或幅频瞬变)后其在同步相量中的表现形式。本

节将 SSO 信号建模为

$$\eta(t)=x(t)+A_\eta e^{\alpha_\eta t} \varepsilon(t-\tau) \cos(2\pi f_\eta t+\varphi_\eta) \quad (14)$$

式中: A_η 为瞬变后的幅值; α_η 为衰减因子; τ 为 SSO 出现、消失或发生瞬变的时刻, 同样采用 DFT 来求取相量, 式(14)的波形图如图 1 所示。

从图 1 中可以看出, 第 L 之前的窗, SSO 信号对应的相量部分为 0, 第 $L+N_p$ 后的窗对应的相量可由式(10)得到。第 L 个到 $L+N_p$ 的时间窗内既包括瞬变前的采样点, 又包括瞬变后的采样点。由此, 定义 $f_{p\eta}=f_\eta/f_p=L_\eta/N_p$, $\alpha_{p\eta}=\alpha_\eta/f_p=\hat{\alpha}_{p\eta}/N_p$ 。通过定义, 其第 n 个采样点可以表示为

$$\eta(n)=A_\eta e^{\alpha_{p\eta}n} \varepsilon\left(\frac{t-\tau}{f_p}n\right) \cos(2\pi f_{p\eta}n+\varphi_\eta) \quad (15)$$

当 $L < r < L+N_p$ 时定义

$$\frac{r+q}{f_p}=\tau \quad (16)$$

对式(15)的第 r 个窗进行 DFT, 并通过欧拉公式与级数求和公式化简, 取基波分量($k=1$), 可得

$$\begin{aligned} \eta(r,1)=\frac{1}{2N_p}A_\eta e^{\alpha_{p\eta}r} (e^{j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H(q,L_\eta-1) + e^{-j(2\pi f_{pi}+\varphi_i)} H^*(q,L_\eta+1)) \end{aligned} \quad (17)$$

式中

$$H(q,L_i-1)=\frac{e^{(\hat{\alpha}_{pi}+j2\pi(L_\eta-1))q/N_p}-e^{(\hat{\alpha}_{pi}+j2\pi(L_\eta-1))}}{1-e^{(\hat{\alpha}_{pi}+j2\pi(L_\eta-1))/N_p}} \quad (18)$$

同样, 通过令 $H(q,L_i-1)=H_{\eta 1}(q)e^{j\theta_{\eta 1}(q)}$ 来对式(17)进行化简, 则 $H^*(q,L_i+1)=H_{\eta 2}(q)e^{j\theta_{\eta 2}(q)}$ 。两式中 $H_{\eta}(q)$ 与 $\theta_{\eta}(q)$ 不再是常量, 而是随滑窗 r 变化的时变量, 取 $\eta(r,k)$ 的实部, 并将式(16)带入可得

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\eta(r))=\frac{1}{2N_p}A_\eta F_\eta(q) e^{\alpha_{p\eta}r} \cdot \\ (\cos(2\pi f_{p\eta}+\varphi_\eta+\phi_\eta(q))) \end{aligned} \quad (19)$$

式中

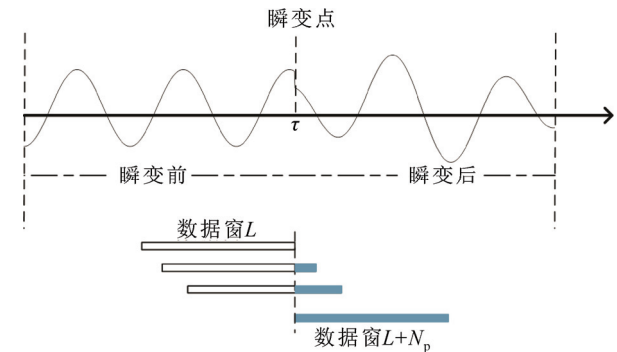


图 1 瞬变过程中的数据窗

Fig.1 Data window during transient

$$F_{\eta}(q) = \sqrt{H_{\eta_1}(q)^2 + H_{\eta_2}(q)^2 + \sqrt{2H_{\eta_1}(q)H_{\eta_2}(q)\cos(\theta_{\eta_1}(q) - \theta_{\eta_2}(q))}} \quad (20)$$

$$\phi_{\eta}(q) = \arctan\left(\frac{H_{\eta_1}(q)\sin(\theta_{\eta_1}(q)) + H_{\eta_2}(q)\sin(\theta_{\eta_2}(q))}{H_{\eta_1}(q)\cos(\theta_{\eta_1}(q)) + H_{\eta_2}(q)\cos(\theta_{\eta_2}(q))}\right) \quad (21)$$

根据式(19)可知, 当时域 SSO 出现、消失或幅频瞬变时, 反应到同步相量上会导致相量幅值与相角随时间窗的滑动而变化, 呈现出时变特性。

2 SSO 模态参数辨识方法

现有文献大多通过对同步相量进行频谱分析获得 SSO 模态参数, 但 SSO 出现、消失或发生幅频瞬变时, 其在同步相量中呈时变特性。因此本文引入时频分析方法 VMD 对同步相量进行分解, 通过 HT, 实现 SSO 检测与模态参数辨识。

2.1 VMD-HT

VMD 是一种自适应、完全非递归的模态变分和信号处理的方法。该方法可以确定模态分解个数, 自适应地匹配每种模态的最佳中心频率和有限带宽, 实现固有模态分量(intrinsic mode functions, IMF)的有效分离、信号的频域划分, 获得变分问题的最优解, 其具体步骤参考文献[23]。

HT 是信号处理领域的重要数学工具, 对信号进行 HT 可以估计该信号的瞬时频率与瞬时幅值, 但 HT 只能辨识窄带信号, 因此将 HT 与 VMD 方法结合。

对 VMD 得到的各 IMF 分量进行 HT 变换

$$\hat{c}_h = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_h(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (22)$$

构建解析信号

$$z_h(t) = c_h(t) + j\hat{c}_h(t) \quad (23)$$

则 IMF 分量的瞬时幅值与瞬时相位分别为:

$$\begin{aligned} a_h(t) &= |z_h(t)| \\ \psi_h(t) &= \arctan(z_h(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

瞬时频率为

$$f_h(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi_h(t)}{dt} \quad (25)$$

根据式(22)~(25)可以计算出的信号瞬时幅频特性。

2.2 基于同步相量的 SSO 检测方法

由 1.2 节的分析可知, 扰动条件下, SSO 出现、消失或发生幅频瞬变情况下, 同步相量的幅值与相角都会呈现出时变特性, 尽管由于噪声影响静态相量模型中幅值与相角也会存在变化, 但波动幅度较

小。由此, 本文提出一种基于同步相量数据的 SSO 检测方法。通过 VMD 将同步相量数据分为基频分量与非基频分量, 对其进行 HT 求得基频分量瞬时幅值 $a_0(n)$ 与非基频分量瞬时幅值 $a_i(n)$ 。如式(26)所示, 设定非基频分量瞬时幅值 a_i 与 1 s(设定 PMU 上报率为 100 Hz)内基频分量瞬时幅值平均值之比为 P , 判定阈值为 P_{set} , 当 P 大于 P_{set} 时则判定存在 SSO。

$$\frac{a_i}{\frac{1}{100} \sum_{n=1}^{100} a_0(n)} = P \geq P_{\text{set}} \quad (26)$$

SSO 出现、消失或发生瞬变时, 在瞬变前后 N_p 个数据窗内既包含瞬变前采样点又包括瞬变后采样点, 考虑到 PMU 子站采样频率一般为 10 kHz, 则一基波周期内采样点数 $N_p = 200$, 为辨识 SSO 模态参数, 将上传频率设置为 100 Hz, 则同步相量在瞬变点前后共 5 个点存在瞬变信息。因此, 构造一个窗长 $l = 5$ 的采样窗以步长为 1 对同步相量进行滑动采样, 利用窗内最后一个量与第一个量差分的绝对值 $|\Delta a(w)|$ 来判断 SSO 是否发生瞬变。

$$|\Delta a(w)| = |a_i(w+l) - a_i(w)| \quad (27)$$

式(27)中 $\Delta a(w)$ 为同步相量数据第 w 个窗内, 最后一个量与第一个量的差分。假定, 当 $w = r$ 时 $|\Delta a(w)|$ 取最大值, 考虑噪声影响导致误判的情况, 本文设定阈值 $J = 2$, 若 $|\Delta a(w)|$ 的最大值 $|\Delta a(r)|$ 与 $|\Delta a(w)|$ 的平均值之比大于阈值, 则判定 SSO 信号存在幅值瞬变, 并取第 r 个时间窗内的第 3 个点对应的的时间作为瞬变发生时间。

本方法可以在扰动发生后的较短时间内将其辨识出来, 且当信号幅值突变, 在幅值增幅与减幅情况下, 本方法均可适用。

2.3 SSO 参数辨识步骤

SSO 振荡参数辨识流程图如图 2 所示, 其具体步骤如下:

- 1) 在 WAMS 主站获取 1 s 内同步相量数据, 根据幅值与相角, 计算同步相量数据实部。
- 2) 对同步相量实部数据进行变分模态分解, 得到固有模态分量 IMF, 信号中包含基频分量与非基频分量, 对两者进行 HT, 求取瞬时幅值 $a_h(r)$ 。
- 3) 基于 SSO 检测判据式(26)对瞬时幅值进行分析, 判断是否存在 SSO, 若存在 SSO 则通过求取瞬时幅值差分 $|\Delta a(w)|$ 判定是否存在幅值瞬变。
- 4) 若存在 SSO 且未发生幅值瞬变, 则根据式

(24), 求取瞬时频率 $f_h(r)$, 并计算振荡模态的振荡频率, 衰减因子与幅值。

振荡频率取 1 s 内瞬时频率的均值, 当 PMU 上传频率为 100 Hz 时有

$$f_h = \frac{1}{100} \sum_{r=1}^{100} f_h(r) \quad (28)$$

振荡模态的幅值与衰减因子通过瞬时幅值 $a_h(r)$ 求得, 由式(13)可知理想情况下

$$a_h(r) = \frac{1}{2N_p} A_i F_{i1} e^{\alpha_{pi} r} \quad (29)$$

通过对 $a_h(r)$ 取对数, 并进行线性拟合求得直线斜率 m 与截距 b , 取斜率为衰减因子 α_{pi} , 可得

$$\ln(a_h(r)) = \alpha_{pi} r + \ln \frac{A_i F_{i1}}{2N_p} = mr + b \quad (30)$$

采用辨识得到的频率与衰减因子, 通过式(6)与式(11)计算 F_{i1} , 则 SSO 幅值 A_i 的计算公式为

$$A_i = 2N_p \frac{e^b}{F_{i1}} \quad (31)$$

5) 若信号出现了幅值瞬变, 则通过检测判据, 得到信号瞬变时间点, 采集信号瞬变后 1 s 内的数据进行希尔伯特变换, 采用式(28)~(31)进行模态参数辨识, 并输出时频图。

3 算法有效性验证

本文中为评估辨识结果的准确性, 引入估计误差率 E 。

$$E = \left| \frac{T - T_e}{T} \right| \times 100\% \quad (T: f_s, A_s, \alpha_s) \quad (32)$$

式中: T 为实际值; T_e 为辨识值。在下述仿真验证中 T 分别为次同步振荡信号的频率 f_s , 幅值 A_s 与衰减因子 α_s 。

3.1 判定阈值的选取

SSO 分量以频谱泄露的方式出现在同步相量数据中, 同时出现的还有电力系统中的噪声, 若判定阈值设定过小则易引起误判, 若设定过大则可能对 SSO 检测失败。参考文献[17-18], 当时域 SSO 幅值与基波幅值之比大于 0.05 时, 需对其进行准确检测。由本文的理论推导部分式(13)可知, 时域基波、SSO 的幅值与同步相量数据中的基波、SSO 幅值之比为 $2N_p/F_{i1}$ ($N_p=200$)。

若时域 SSO 幅值与基波幅值之比为 p_1 , 同步相量数据中的 SSO 幅值与基波幅值之比为 p_2 则

$$p_2 = p_1 \frac{F_{SSO}}{F_0} \quad (33)$$

式中: F_{SSO} 为 SSO 对应的 F_{i1} ; F_0 为基波对应的 F_{i0} 。

由式(6)与式(11)可知, F_{i1} 是衰减因子 α 与频率 f 的函数, 设定频率在 10~50 Hz 内以步长 0.5 变化, 衰减因子在 0~1 的范围内以 0.2 变化, 其 F_{i1} 的变化趋势如图 3 所示。

由图 3 可知, $f=50$ Hz 时 $F_{i1} \approx 200$, $f=10$ Hz 时 $F_{i1} \approx 50$, 则 F_{SSO}/F_0 在 SSO 频率为 10 Hz 时出现最小值, 约为 0.125。为满足时域 SSO 幅值与基波幅值之比大于 0.05 ($p_1=0.05$) 时, 准确检测 SSO, 将最小值乘一个可靠系数, 得到判定阈值 $P_{set}=0.012$ 。

3.2 合成仿真信号验证

根据式(34)建立合成仿真信号, 本节所合成的仿真信号包含基频分量与 SSO 分量。

$$x(t) = x_1(t) + x_s(t) = A_1 e^{\alpha_1 t} \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + A_s e^{\alpha_s t} \cos(2\pi f_s t + \theta_s) \quad (34)$$

同步相量数据由子站以 100 Hz 的上报频率上传至主站, 子站采样频率设定为 10 kHz, 相量的计算方法参考文献[24]。利用主站 1 s 内 100 个同步相量数据进行模态参数辨识。以一合成信号为例, 参数设置如表 1 所示, 示例结果如图 4 所示。

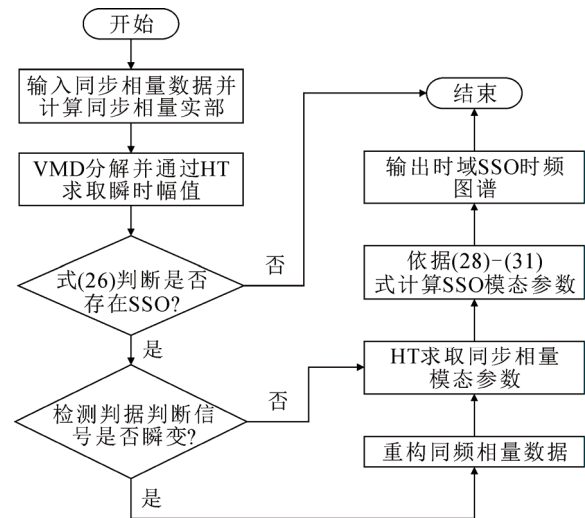


图2 SSO 参数辨识流程图

Fig.2 Flow chart of identification of SSO

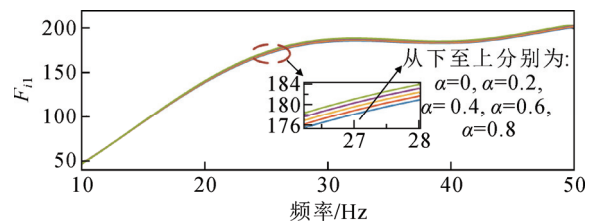


图3 F_{i1} 变化趋势图

Fig.3 Variation trend of F_{i1}

表 1 合成仿真信号参数

Table 1 Parameters of the synthetic signal

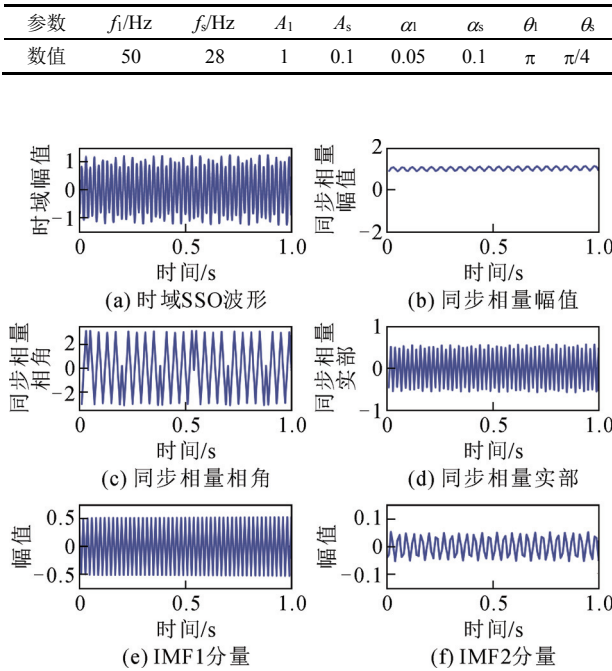


图 4 合成信号

Fig.4 Synthetic signal

图 4(a)为合成信号的时域波形,图 4(b)与图 4(c)为 WAMS 主站获取的同步相量幅值与相角波形,图 4(d)为本文选取的特征量同步相量实部。图 4(e),图 4(f)为对同步相量实部进行 VMD 得到的 IMF,其中 IMF1 为基波分量,IMF2 为 SSO 分量。利用 HT 对 IMF2 进行处理,得到 SSO 模态参数辨识结果如表 2 所示,可见本文方法利用同步相量数据精确辨识了时域 SSO 的频率、衰减因子与幅值。为验证本文方法的有效性,本文测试了不同条件下(基波频率、振荡频率、振荡幅值、衰减因子)对辨识精度的影响,考虑到同步相量中存在噪声,本文在后续验证中均添加信噪比为 45 dB 的高斯白噪声。

3.3 平稳信号算法有效性验证

按照式(34)建立合成信号,其中 A_1 被固定为 1,电力系统中频率波动幅度不超过基频的 2%,本文考虑一定裕度情况下,设置标称频率(50 Hz)和 49~51 Hz 范围内的非标称频率(49.1 Hz, 49.7 Hz, 50.3 Hz, 51.9 Hz)。基波中将 α_1 设置为 0.05,相角 θ_1 设置为 $\pi/3$,并令 $A_s=0.25$, $\alpha_s=0.15$, $\theta_s=\pi/4$,SSO 频率 f_s 在 10~45 Hz 以步长 0.5 Hz 变化。SSO 频率对算法准确度的影响如图 5 所示,不同基波频率对 SSO 频率的辨识结果影响较小,当振荡频率接近基频时由于频谱混叠,频率误差有所增大,但同时随

表 2 合成仿真信号辨识结果

Table 2 Identification results of synthetic simulation signal

参数	理论值	实际值	误差/%
幅值 A_s	0.10	0.10	0
频率/Hz	28	28.05	0.18
衰减因子 α_s	0.1	0.10	0

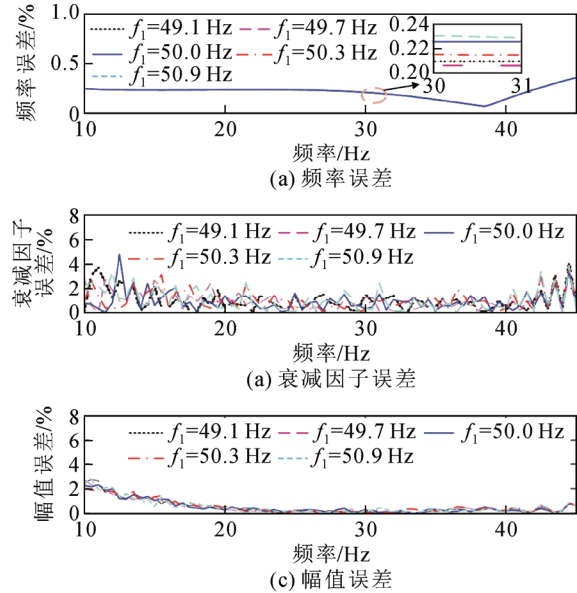


图 5 f_s 在 10~45 Hz 变化时的误差

Fig.5 Error with f_s varying from 10 to 45 Hz

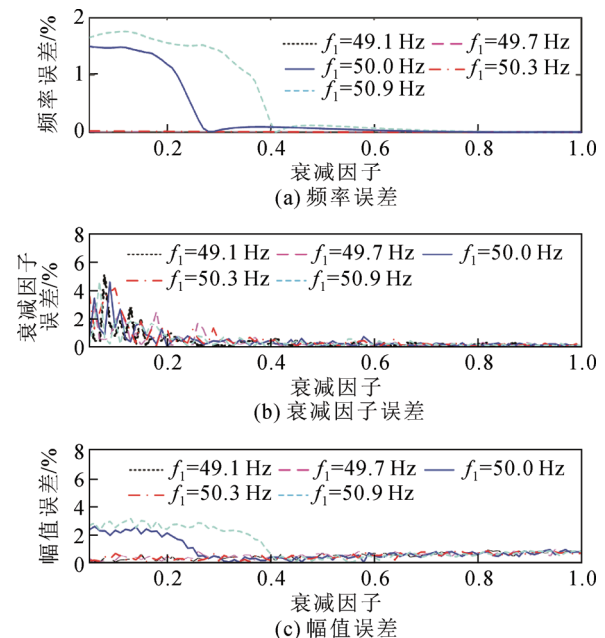


图 6 α_s 在 0~1 变化时的误差

Fig.6 Error with α_s varying from 0 to 1

着频谱泄露分量的增大,幅值误差逐渐降低。

为验证衰减因子对辨识误差的影响,将基波中

α_1 设置为 0.05, 相角 θ_1 设置为 $\pi/4$, 并令 $A_s=0.25$, $f_s=28.75$, $\theta_s=2\pi/3$. 衰减因子 α_s 在 0.01~1 内以步长 0.01 变化, 辨识结果如图 6 所示. 从图 6 中可以看出 3 个参数的辨识误差随 α_s 增大而逐渐减小, 且由于频谱泄露的影响, 基频频率对辨识结果有较大影响, 当基频为非标称频率 50.9 Hz 时, 3 个参数的辨识偏差最大.

为验证 SSO 分量幅值对辨识误差的影响, 基波中 α_1 设置为 0.05, 相角 θ_1 设置为 $\pi/8$, 并令 $\alpha_s=0.15$, $f_s=28.75$, $\theta_s=2\pi/3$, 振荡幅值 A_s 在 0.05~0.5 内以步长 0.01 变化, 辨识结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 当 SSO 幅值大于 0.05 时, 算法可较为可靠的辨识 SSO 参数, 随着幅值的增大, 衰减因子与幅值的辨识误差逐渐降低. 这是由于 A_s 增大会使 SSO 在频谱中更为明显, 从而使辨识结果更为容易.

3.4 非平稳信号算法有效性验证

时域 SSO 信号在出现、消失与幅频瞬变的情况下是典型的非平稳信号, 本文构建如式(35)所示的非平稳信号验证本文方法的有效性:

$$x(t) = \begin{cases} e^{0.05t} \cos(100\pi t + \pi/8) & 0 \leq t \leq 2 \\ 0.2e^{0.15(t-0.4)} \cos(36\pi t + \pi/4) & 0.4 \leq t \leq 1.2 \\ 0.3e^{0.25(t-1.2)} \cos(56\pi t + \pi/3) & 1.2 \leq t \leq 2 \end{cases} \quad (35)$$

在信号中同样加入 45 dB 的高斯白噪声, 其同步相量的幅值、同步相量实部的模态分解结果如图 8 所示.

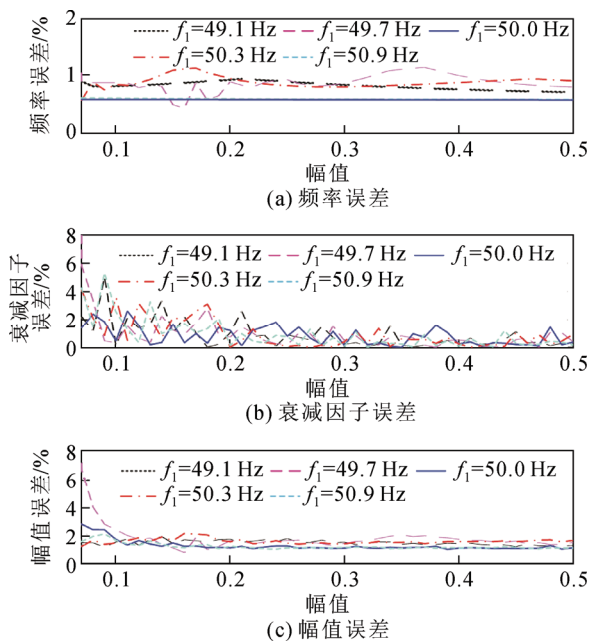


图 7 A_s 在 0.05~0.5 变化时的误差

Fig.7 Error with A_s varying from 0.05 to 0.5

图 8 中, VMD 分解出 3 个模态分量, 分别对应着基波, 以及 $f_s=18$ Hz 与 $f_s=28$ Hz 的两个 SSO 分量. 基于 2.2 节 SSO 检测判据以 IMF2 分量为例进行分析, 通过 HT 求得 IMF2 瞬时幅值 a_i 并同过式(27)算瞬时幅值差分 $|\Delta a|$ 如图 9 所示.

从图 9(a)可以看出 IMF2 分量的瞬时幅值在 1.2 s 前后缓慢增加呈时变特性, 与本文理论推导相互印证. 图 9(b)中, $|\Delta a|$ 最大值出现在 1.2 s, 通过 2.2 节所提 SSO 检测判据可以成功判断瞬变发生时间.

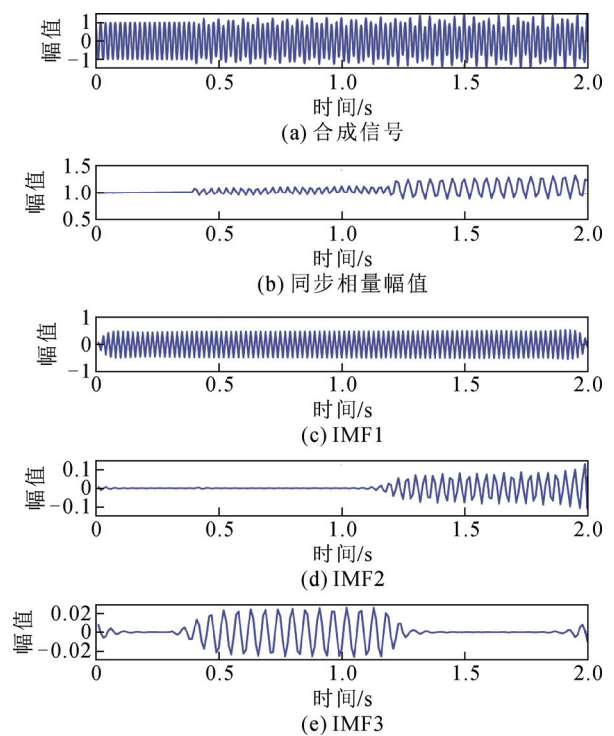


图 8 非平稳信号 VMD 分解结果

Fig.8 VMD decomposition results of non-stationary signal

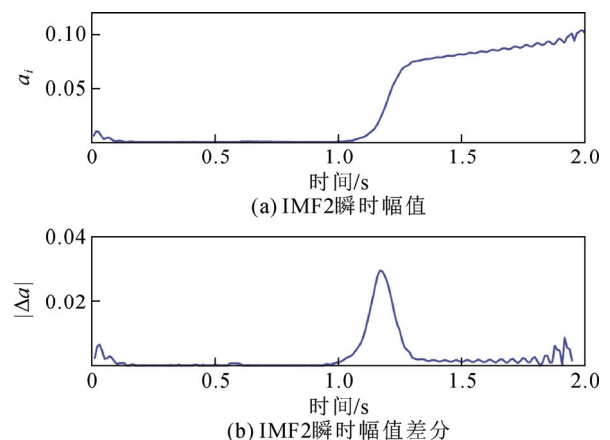


图 9 IMF2 瞬时幅值与瞬时幅值差分

Fig.9 IMF2 instantaneous amplitude difference with instantaneous amplitude

得到信号瞬变时间后, 重构同步相量实部数据, 对信号进行 HT 变换, 根据求得的模态参数, 输出合成信号的希尔伯特时频谱如图 10 所示, 模态参数辨识结果如表 3 所示。

从图 10 中可以看出时域信号中存在 3 个模态分量, 分别为基频分量与频率在 18 Hz 与 28 Hz 附近波动的 SSO 分量, 与理论结果一致。

图 10 与表 3 证明了本文方法使用采样频率较低的同步相量数据对时域 SSO 进行模态参数辨识, 能达到较高的辨识精度, 且能准确检测 SSO 出现、消失或发生瞬变的时间点。可以在系统层面监测 SSO, 并实现动态条件下 SSO 模态参数的准确辨识。

3.5 与 IpDFT 方法的对比

文献[18]采用插值傅里叶算法对同步相量数据进行处理, 得到 SSO 模态参数。本节将本文方法与文献[18]中的方法进行对比, 条件设置与 3.2 节一致, 当基频为 50 Hz 时, IpDFT 方法与本文方法均呈现了较高精度, 但当基频为非标称频率时, IpDFT 方法误差显著增大, 且当次同步频率大于 40 Hz 时, 由于与基频产生频率混叠, 本文方法相较于 IpDFT 方法更具优势。图 11 为基波频率采用非标称频率 49.7 Hz, 处理 1 s 内 100 个同步相量数据的误差。

综上, 本文方法相较于 IpDFT 方法具有更好的鲁棒性, 且能处理非平稳信号, 在实际工程中具有更大的应用价值。

4 仿真与实实验证

4.1 仿真验证

为进一步说明本文方法的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建基于双馈风电场的标准模型, 其系统结构图如图 12 为所示。风电场采用双馈风机, 额定功率为 100 MW, 在电网侧转换器 (grid side conviter, GSC)入口处添加滤波器, 经连接线并入 220 kV 电网, 仿真模型的关键参数见表 4, 模型初始风速为 10 m/s, 线路初始串补度为 15%。

电力系统中, 单一模式的 SSO 在发展一定时间后由于新的扰动出现或与电力系统交互作用易引发新的振荡模式, 针对此现象, 本文通过在仿真模型上叠加扰动, 检验本文方法处理非平稳信号的能力。

扰动参数如表 5 所示, 初始风速为 11 m/s, 串补度为 15%, 模型运行在稳态条件下, 0.5 s 串联补偿由 15%增加到 35%, 1.5 s 时刻串联补偿由 35%增加到 55%, 且风速切换为 9 m/s。仿真结果见图 13。

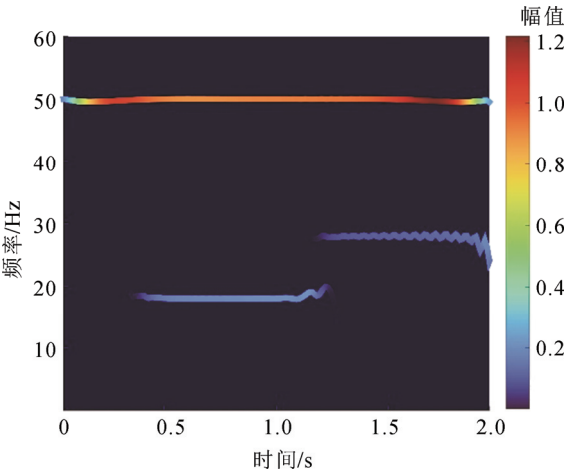


图 10 非平稳信号时频谱

Fig.10 Time-frequency spectrum of non-stationary signal

表 3 非平稳信号辨识结果

Table 3 Identification results of non-stationary signal

模态	参数	频率/ Hz	衰减因子 α_s	幅值 A_s
模态 1	理论值	50	0.05	1
	辨识值	49.823	0.048	0.971
	误差率/%	0.354	4	2.9
模态 2	理论值	18	0.15	0.2
	辨识值	17.994	0.149	0.206
	误差率/%	0.03	0.67	3
模态 3	理论值	28	0.25	0.3
	辨识值	27.98	0.253	0.297
	误差率/%	0.07	1.2	1

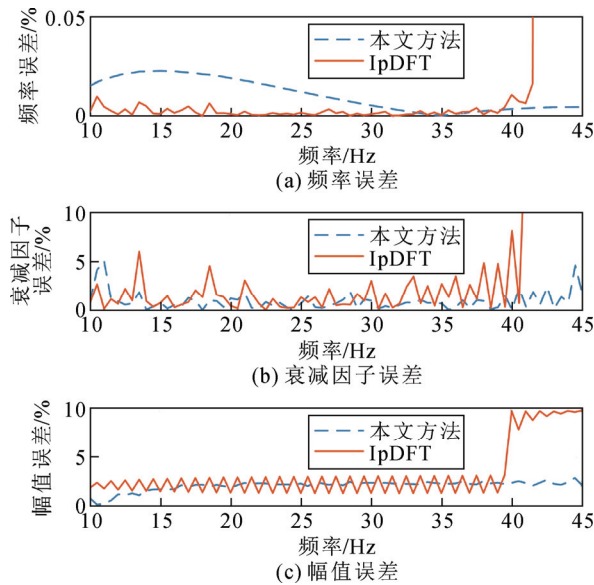


图 11 与 IpDFT 方法对比

Fig.11 Compared with IpDFT method

从图 13 中的时域信号与同步相量幅值可以看出在 0.5 s 与 1.5 s 分别出现了扰动。通过 VMD 对

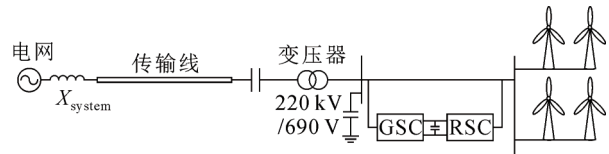


图 12 电磁暂态仿真模型

Fig.12 Model in electromagnetic transient (EMT) simulation

表 4 仿真模型参数

Table 4 Parameters of model

参数	数值
系统电压/kV	220
系统等效阻抗 X_{system}/Ω	24.2
输电线路电感 L/H	0.78
输电线路电阻 R/Ω	9.68
初始串补, $C(15\%)/\mu\text{F}$	87.7
变压器变比	220 kV/690 V

表 5 扰动参数

Table 5 Disturbance parameter

扰动	扰动时间/s	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	串联补偿水平/%
1	0.5	11	35
2	1.5	9	55

同步相量数据进行处理成功分离出了基波分量与两个 SSO 分量, 扰动 1 出现后出现了频率为 21 Hz 的 SSO 分量, 扰动 2 出现后出现了频率为 31 Hz 的 SSO 分量, 经检测判据重构同步相数据后进行模态参数辨识, 辨识结果如表 6 所示, 根据求得的模态参数, 输出仿真信号的希尔伯特时频谱如图 14 所示。

表 6 中, 参考值通过 HHT 变换对 0.5 s 至 3 s 的瞬时波形数据进行处理得到。从表 6 与图 14 中可以看出本文提出的检测判据可以成功判断 SSO 的出现、消失或幅频瞬变, 检测出瞬变点后经本文所提的模态参数辨识方法可以对时域 SSO 模态参数进行精确辨识, 其辨识结果与参考值接近。

4.2 实验验证

以西南阿坝地区某新能源场站发生的 SSO 故障录波数据为例, 对本文算法进行验证。该机组所在场站额定有功出力 50 MW, 附近存在另一额定有功出力 20 MW 的新能源场站。其局部拓扑如图 15 所示。

正常运行方式下最大供电半径 330 km, 所带负荷为纯阻性负荷, 无冲击负荷。该区域振荡首次发生于 2018 年, 振荡持续发生, 持续一年之久。振荡过程中线路电压在 115.8~117.3 kV 间波动, 线路输出有功功率在 10~36 MW 间波动, 振荡幅度较大。

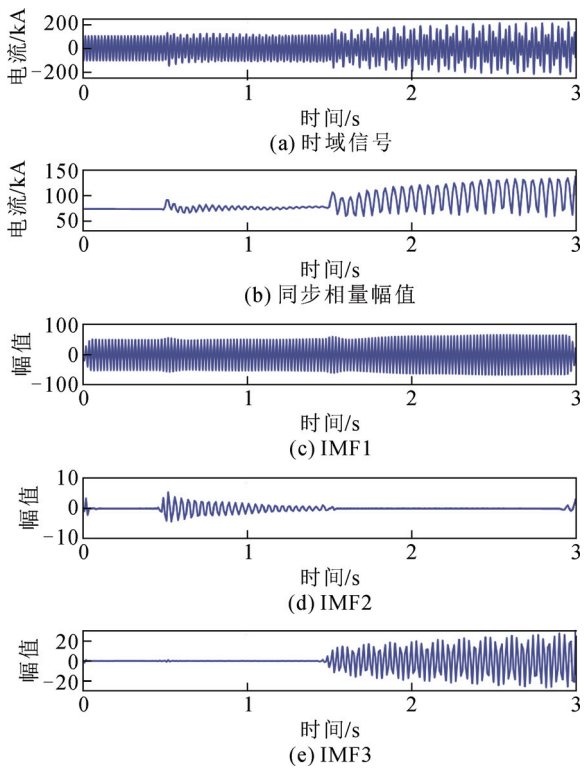


图 13 仿真信号 VMD 分解结果

Fig.13 VMD results of simulated signal

表 6 仿真信号辨识结果

Table 6 Identifications results of simulated signal

方法	模态 1			模态 2		
	f/Hz	α	A/kA	f/Hz	α	A/kA
参考值	21.07	-3.03	21.08	31.30	0.43	45.35
本文方法	21.02	-3.10	22.07	31.10	0.42	44.26

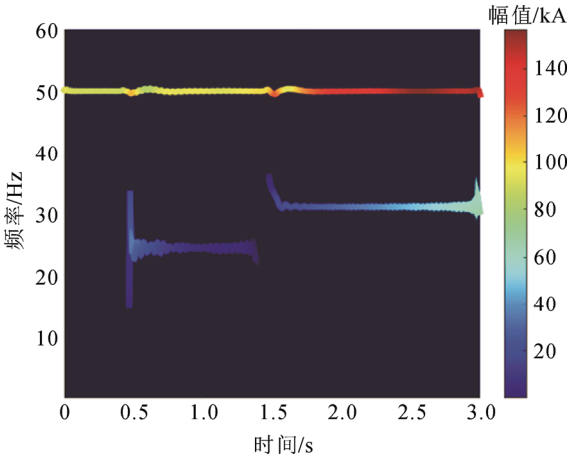


图 14 仿真信号时频谱

Fig.14 Time-frequency spectrum of simulated signal

图 16 给出了记录的某次 SSO 事故中上传的 A 相电流实时录波数据曲线及同步相量信息。

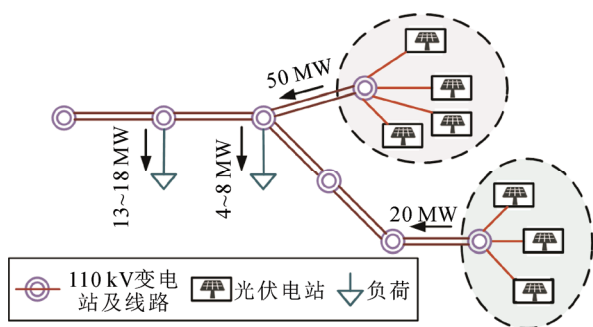
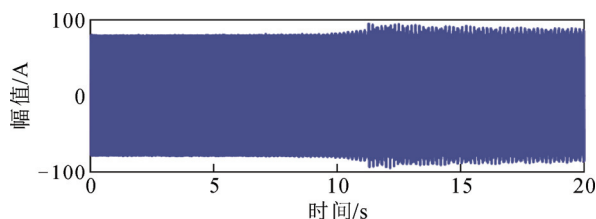
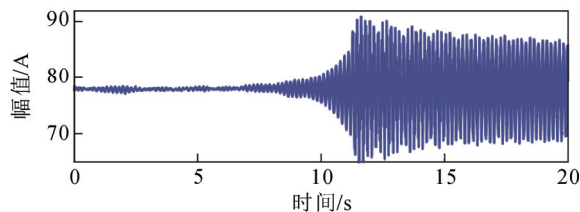


图 15 局部拓扑结构

Fig.15 Local topology



(a) A相电流实时录波数据



(b) A相电流同步相量幅值

图 16 实测信号

Fig.16 Actual measured signal

此实测数据中在 8.21 s 处出现 SSO, 依照本文算法对同步相量数据进行处理, 分离出基频分量与非基频分量, 依据式(26)计算非基频分量瞬时幅值与基频分量瞬时幅值平均值之比 P , 如图 17 所示。

图 17 中虚线为本文所选取的判定阈值 $P_{\text{set}}=0.12$, 从图中可以看出, 本文算法在 8.24 s 检测到 SSO 出现, 与实际 SSO 出现时刻相差 0.03 s, 具有较好的时效性。在检测到 SSO 后重构同步相量数据, 输出希尔伯特时频谱如图 18 所示。

为对本文算法有效性进一步验证, 将本文算法与文献[17]、[20]中的方法进行比较, 利用文献[17]中的插值傅里叶方法与文献[20]中的 prony 方法, 以 1 s 数据为滑动窗对图 18 中同步相量数据进行 SSO 参数辨识, SSO 幅值辨识结果如图 19(a)所示, 截取 SSO 出现后的频率辨识结果如图 19(b)所示。参考值通过 HHT 对瞬时波形数据进行处理得到。

从图 19 中可以看出, 3 种方法对 SSO 频率的

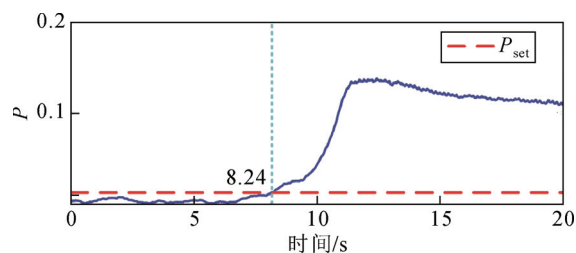


图 17 SSO 检测判据

Fig.17 SSO detection criteria

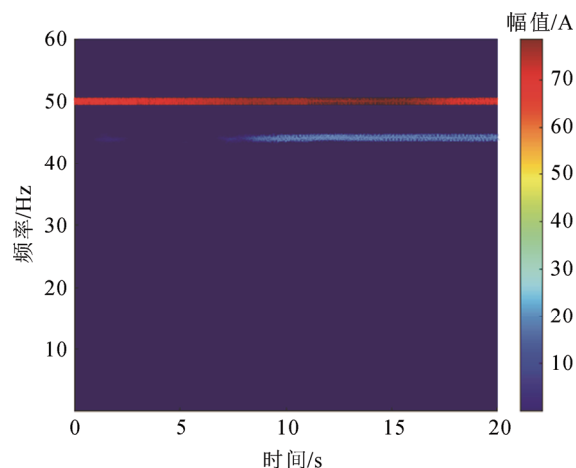
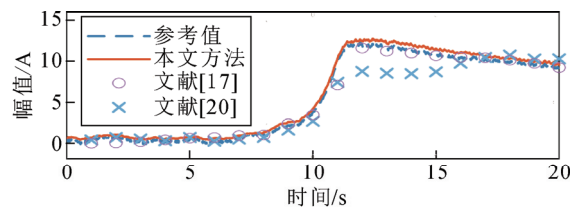
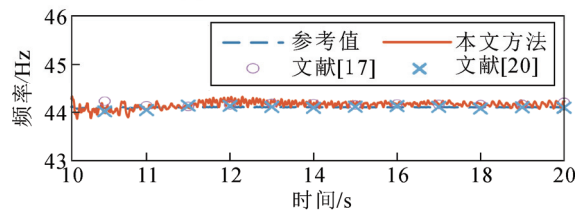


图 18 实测信号时频谱

Fig.18 Time-frequency spectrum of actual measured signal



(a) 次同步振荡幅值辨识结果



(b) 次同步振荡频率辨识结果

图 19 次同步振荡参数辨识结果

Fig.19 Parameter identification results of SSO

辨识结果较好, 在 SSO 振荡特性变化时文献[17]对 SSO 幅值的辨识结果要好于文献[20]所提方法, 但两者的辨识误差均大于本文方法。本文所提方法通过对 SSO 幅值的辨识能很好的反应 SSO 振荡特性变化过程, 为对 SSO 发展过程进行实时分析提供更详细的数据支撑, 这是文献[17]、[20]中所提方法不具备的。

5 结论

本文提出一种基于同步相量数据的 SSO 参数辨识方法, 并通过仿真信号与实测信号进行验证。

1) 本文通过严密的数学推导, 得到平稳与非平稳 SSO 信号在同步相量中的表现形式, 发现时域 SSO 与同步相量中的振荡信息存在对应关系。

2) 本文以同步相量实部数据为特征量, 引入 VMD-HT 方法实现了 SSO 的模态参数辨识。

3) 本文以同步相量瞬时幅值差分为判据, 可以准确判断同步相量中 SSO 的出现、消失或发生幅频瞬变。

后续研究可将本文方法与扰动源定位方法中的阻抗法、能量法结合, 在系统层面检测 SSO 的出现、消失或变化过程, 对 SSO 进行模态参数辨识, 用辨识结果计算次同步阻抗或各线路上能量流大小, 还原 SSO 传播路径, 实现 SSO 扰动源在线定位。

参考文献 References

- [1] 马宁宇, 谢小荣, 亢朋朋, 等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 65-74.
MA Ningning, XIE Xiaorong, KANG Pengpeng, et al. Wide-area monitoring and analysis of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 65-74.
- [2] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.
- [3] XIE X R, ZHAN Y, SHAIR J, et al. Identifying the source of subsynchronous control interaction via wide-area monitoring of sub/super-synchronous power flows[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2177-2185.
- [4] 马宁宇, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.
- [5] 樊陈, 姚建国, 常乃超, 等. 电网宽频振荡实时监测技术方案[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 152-159.
FAN Chen, YAO Jianguo, CHANG Naichao, et al. Technical scheme for real-time monitoring of wide-frequency oscillation in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 152-159.
- [6] 王杨, 宋子宏, 占颖, 等. 风电并网系统次同步振荡监测装置优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 141-150.
WANG Yang, SONG Zihong, ZHAN Ying, et al. Optimal placement method for subsynchronous oscillation monitoring devices in grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 141-150.
- [7] 吴熙, 陈曦, 吕万, 等. 电力系统次同步振荡检测与在线定位技术综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 129-141.
WU Xi, CHEN Xi, LÜ Wan, et al. Review of detection and online localization technology of sub-synchronous oscillation in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 129-141.
- [8] 刘灏, 李珏, 毕天姝, 等. 基于 PMU 相量的次/超同步间谐波识别方法[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3237-3243.
LIU Hao, LI Jue, BI Tianshu, et al. Subsynchronous and supersynchronous inter-harmonic identification method based on phasor measurements[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3237-3243.
- [9] 魏东辉, 房俊龙. 基于高阶傅里叶同步挤压变换与希尔伯特变换的次同步振荡分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1192-1201.
WEI Donghui, FANG Junlong. Analysis of subsynchronous oscillation based on high-order fourier synchrosqueezed transform and hilbert transform[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1192-1201.
- [10] 赵妍, 李武璟, 聂永辉. 次同步振荡的频率切片小波变换检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 106-114.
ZHAO Yan, LI Wujing, NIE Yonghui. A method for subsynchronous oscillation detection using frequency slice wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 106-114.
- [11] 赵峰, 王雅娴, 王英, 等. 基于改进 MVMD-SOBI 算法的直驱风电机组多通道次同步振荡模态辨识[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1365-1374.
ZHAO Feng, WANG Yaxian, WANG Ying, et al. Multi-channel sub-synchronous oscillation mode identification of direct-drive wind turbines based on improved MVMD and SOBI algorithms[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1365-1374.
- [12] NETTO M, MILI L. A robust prony method for power system electromechanical modes identification[C]// Proceedings of 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [13] JAIN S K, SINGH S N. Exact model order ESPRIT technique for harmonics and interharmonics estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(7): 1915-1923.
- [14] 张敏, 沈健, 侯明国, 等. 相量测量单元实现次同步振荡在线辨识和告警的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 143-146, 152.
ZHANG Min, SHEN Jian, HOU Mingguo, et al. Discussion on on-line identification and warning of subsynchronous oscillation for phasor measuring unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 143-146, 152.
- [15] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.
WANG Maohai, QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 149-154.
- [16] ZHANG F, CHENG L, GAO W Z, et al. Synchrophasors-based identification for subsynchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2224-2233.
- [17] YANG X M, ZHANG J N, XIE X R, et al. Interpolated DFT-based identification of sub-synchronous oscillation parameters using synchrophasor data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2662-2675.
- [18] 马钺, 蔡东升, 黄琦. 基于 Rife-Vincent 窗和同步相量测量数

据的风电次同步振荡参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 790-802.

MA Yue, CAI Dongsheng, HUANG Qi. Parameter identification of wind power sub-synchronous oscillation based on Rife-Vincent window and synchrophasor data[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 790-802.

- [19] 王 杨, 晁苗苗, 谢小荣, 等. 基于同步相量数据的次同步振荡参数辨识与实测验证[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 899-908.

WANG Yang, CHAO Miaomiao, XIE Xiaorong, et al. Identification of subsynchronous oscillation parameters and field tests based on PMU data[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 899-908.

- [20] WANG Y, JIANG X L, XIE X R, et al. Identifying sources of subsynchronous resonance using wide-area phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3242-3254.

- [21] 李明节, 于 钊, 许 涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.

LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.

- [22] 王渝红, 廖逸犇, 宋雨妍, 等. 风电场内部分散式无功电压优化控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 5047-5056.

WANG Yuhong, LIAO Yiben, SONG Yuyan, et al. Distributed optimal control strategy of reactive power and voltage in wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5047-5056.

- [23] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.

- [24] IEEE. IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems: C37.118.1—2011[S], 2011.



WANG Yuhong
Ph.D., Professor



WANG Hongyu



LIAO Jianquan
Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

王渝红

1971—, 女, 博士, 教授, 博导

主要研究方向为高压直流输电、电力系统和稳定与控制、新能源并网

E-mail: yuhongwang@scu.edu.cn

王宏宇

1997—, 男, 硕士生

主要研究方向为次/超同步振荡广域监测与定位

E-mail: 2020223035177@stu.scu.edu.cn

廖建权(通信作者)

1994—, 男, 博士, 副研究员, 硕导

主要从事柔性直流输电故障保护、电力系统稳定性分析与控制等研究

E-mail: jqianliao@scu.edu.cn

收稿日期 2022-06-17 修回日期 2023-01-20 编辑 陈 蔓