



基于改进固有时间尺度分解算法的实时次同步振荡监测方法

周波 石鹏 魏巍 陈刚 肖先勇 杨汉芦

A Real-time Subsynchronous Oscillation Monitoring Method Using Improved Intrinsic Time-scale Decomposition Algorithm

ZHOU Bo, SHI Peng, WEI Wei, CHEN Gang, XIAO Xianyong, YANG Hanlu

引用本文:

周波, 石鹏, 魏巍, 等. 基于改进固有时间尺度分解算法的实时次同步振荡监测方法[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 27–34. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0304

ZHOU Bo, SHI Peng, WEI Wei, et al. A Real-time Subsynchronous Oscillation Monitoring Method Using Improved Intrinsic Time-scale Decomposition Algorithm[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(1): 27–34. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0304

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0304>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

风电并网系统次/超同步振荡的动态监测方法研究

Research on Dynamic Monitoring Method for Sub/Super-synchronous Oscillation in Wind Power Systems

现代电力. 2019, 36(3): 19–26 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/19>

双馈风电场串补送出系统次同步振荡及参数调整分析

Subsynchronous Oscillation Analysis and Parameter Adjustment of Doubly-fed Wind Farm System via Series Compensation

现代电力. 2020, 37(3): 238–244 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0362>

直驱风机对火电机次同步振荡的影响及抑制方法

Impact of PMSG to Thermal Power Units on Sub-synchronous Oscillation Characteristics and Suppression Strategy

现代电力. 2019, 36(5): 31–38 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/31>

大规模可再生能源电网多源实时互补有功控制的评述

Review of Real-time Complementary Active Power Control of Multi-type Power Resources for Large Scale Renewable Energy Grid

现代电力. 2019, 36(4): 1–10 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I4/1>

含并联直驱风电机组并网的风电场多开环模式谐振

Multi Open-Loop Mode Resonance of Wind Farm with Grid-Connected Parallel Permanent Magnet Synchronous Generators

现代电力. 2022, 39(1): 19–25 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0018>

考虑多种储能的微能源网多时间尺度协同调度

Multi-time Scale Optimal Coordinated Dispatch of Micro-energy Grid with Multi-energy Storage

现代电力. 2019, 36(5): 39–46 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/39>

基于改进固有时间尺度分解算法的实时次同步振荡监测方法

周波^{1,2}, 石鹏^{1,2}, 魏巍^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 肖先勇³, 杨汉芦³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川省成都市 610095; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川省成都市 610095;
3. 四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610065)

A Real-time Subsynchronous Oscillation Monitoring Method Using Improved Intrinsic Time-scale Decomposition Algorithm

ZHOU Bo^{1,2}, SHI Peng^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, XIAO Xianyong³, YANG Hanlu³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610095, Sichuan Province, China; 2. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610095, Sichuan Province, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

摘要: 为解决大规模风力发电并网系统中频繁发生次同步振荡的问题, 需要快速准确地识别和检测次同步振荡的方法。次同步振荡发生时具有时变性和不确定性等特征, 这给振荡的实时监测带来了挑战, 针对该问题, 首先提出了基于引入代数估计法改进的固有时间尺度分解算法 (intrinsic time-scale decomposition, ITD) 的解决方案。该方法不需要任何先验信息, 且其性能不受振荡频率构成的影响。其次, 利用合成信号、电磁暂态仿真和振荡实测数据进行了综合对比研究, 结果表明该方法在信号检查的动态性能和参数估计精度等方面都取得了良好的效果。最后, 通过硬件在环测试, 验证了该方法的可行性。

关键词: 次同步振荡; 固有时间尺度分解算法; 风电并网系统; 实时监测; 电力系统保护

Abstract: To cope with the frequently occurred subsynchronous oscillation (abbr. SSO) in large-scale grid-connected wind power system, it is necessary to develop a method to identify and detect SSO quickly and accurately. During the occurrence of SSO there are such features as time-varying characteristics and uncertainty and these bring the challenge to the realtime monitoring of SSO. In allusion to this problem, firstly, a solution based on leading in intrinsic time-scale decomposition (abbr. ITD) improved by algebraic estimation was proposed, the proposed solution did not need any priori information and its

performance was not affected by the frequency constitution of the SSO. Secondly, by use of synthetic signals, simulation results of Electro-Magnetic Transient Program (abbr. EMTP) and the measured data of SSO the research of comprehensive comparison was conducted, and the research results showed that in the aspects of dynamic performance of signal check and the accuracy of parameter estimation the proposed solution achieved good results. Finally, by means of hardware-in-the-loop test the feasibility of the proposed solution is verified.

Keywords: subsynchronous oscillation (SSO); intrinsic time-scale decomposition (ITD); grid-connected wind power system; real-time monitoring; power system protection

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0304

0 引言

大规模应用风力发电系统在提高清洁能源利用率的同时也增加了次同步振荡 (subsynchronous oscillation, SSO) 的风险^[1-4]。近年来, 在美国德克萨斯州电力可靠性委员会 (Electric Reliability Council of Texas, ERCOT) 和中国哈密、河北等地区的多个风电场中都观测到了 SSO 现象^[5]。为了解决这个问题, 相关学者正在寻求有效的方法来快速准确地识别 SSO^[6]。准确的 SSO 参数对于跳闸关键风力发电机、复现 SSO 事件和制定相关应对措施来说至关重要^[7-8]。

现有的电力系统监测设备, 如相量测量单元 (phasor measurement unit, PMU) 是专为 50Hz

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目 (52199720002S)。

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company (52199720002S).

或 60Hz 的基频相量的故障检测设计的。尽管有文献称可以从同步相量中识别 SSO 参数^[8-12], 但其检测精度受到 PMU 的上报率和低通滤波器的影响^[12]。因此, 安装基于波形数据的 SSO 专用监测设备更具有优势, 类似的项目已经在中国新疆启动。

考虑到 SSO 发生具有时变性和频率耦合特性^[5], 用于监测 SSO 的算法需要具有良好的动态性能, 同时对频率耦合具有鲁棒性, 这对算法提出了较高要求。现有常用振荡监测算法如离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 可以对具有多个频率分量的信号进行频谱分析, 但高精度的 DFT 检测结果要求使用较长的分析窗口, 这牺牲了信号检测的动态性能。同时, 频谱混叠效应、频谱泄漏和栅栏效应也会使得估计结果产生误差^[13]。传统的模态识别方法, 如 Prony 算法^[14]、特征系统实现算法 (eigensystem realization algorithm, ERA)^[15]、矩阵束法 (matrix pencil method, MPM)^[16] 和基于旋转不变性技术的信号参数全最小二乘估计 (total least squares-estimation of signal parameters via rotational invariance technique, TLSE-SPRIT)^[17] 等, 已广泛应用于振荡信号的检测或离线分析。然而, 应用这些算法的一个前提是准确选择振荡模态的数量, 这对于实时监测 SSO 来说具有一定的难度。此外, 这些算法需要大量采样数据或具有奇异值分解等复杂矩阵运算, 限制了算法的动态性能和计算速度。常用的时域方法, 如基于递推最小二乘法的方法^[18-19]、基于卡尔曼滤波器的方法^[20] 和基于波形包络的方法^[21-22], 都具有良好的动态性能。但有些方法有的要求基频电流的幅值恒定, 有的要求已知 SSO 的频率, 这并不总是可行的。文献^[23] 利用串联补偿线路两端收集的同步波形数据来检测 SSO, 该方法具有创新性, 但是仅适用于线路两端都装有同步波形测量单元且串联电容器的状态得到实时监测的工况。近年来一些文献也提出了先进的算法, 例如, 文献^[24] 提出了一种基于带通数字滤波器的间谐波参数估计方法, 它利用 50Hz 的 DFT 预先计算间谐波频率并设计滤波器, 但是, 较长的数据窗口将导致较大的检测延时; 文献^[25] 提出了一种改进的基于迭代泰勒-傅里叶多频率模型的检测方法, 然而, 它的性能容易受到宽带噪声、基频偏移和间谐波频率斜坡变化

的影响。此外, 这些先进的算法一般较为复杂, 难以在实际工程中开发和应用。

本文提出一种简单有效, 能够快速准确地提取 SSO 的方法, 适用于振荡信号的实时监测。其基本思想是改进固有时间尺度分解 (intrinsic time-scale decomposition, ITD) 算法, 使其具有更好的性能。利用 ITD 算法提取信号的振荡分量具有优良的动态性能、无需先验信息等优点。然而, ITD 作为时域算法, 易受噪声影响, 不能连续监测振荡能量。针对这一问题, 本文结合代数估计法, 提出 2 阶段 SSO 辨识方法, 在保持 ITD 算法动态性能的同时, 连续跟踪 SSO 参数, 最后通过仿真实验、硬件在环 (hardware in the loop, HIL) 测试和现场数据测试, 验证该方法的有效性和鲁棒性。

1 ITD 算法与振荡监测策略

1.1 ITD 算法

ITD 算法能自适应地把采样到的信号分解成不同频率的振荡分量。其提取原理是利用线性插值拟合原始信号的包络线, 通过原始信号极值点附近的上、下 2 条包络线确定振荡分量的关键点。最后利用关键点得到低频分量, 在原始信号中减去低频分量得到高频分量。ITD 的分解细节如下^[26]:

如图 1 所示, 对于原始信号 $X_t (t \geq 0)$, 定义低频振荡信号提取算子 $\mathcal{L}$, 可分离出一个低频振荡信号 L_t 和一个高频的信号 H_t , X_t 可以被表示为

$$X_t = \mathcal{L}X_t + (1 - \mathcal{L})X_t = L_t + H_t \quad (1)$$

式中: $L_t = \mathcal{L}X_t$, $H_t = (1 - \mathcal{L})X_t$ 。

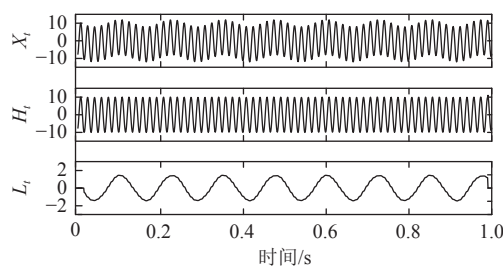


图 1 ITD 算法分解合成的振荡信号

Fig. 1 The oscillation signal decomposed and synthesize by ITD algorithm

确定原始信号 X_t 区间内的所有极值点 X_k 及对映时刻 $\tau_k (k = 1, 2, 3, \dots)$, 如图 2, 假设 L_t 和 H_t 存在于区间 $[0, \tau_k]$, X_t 存在于 $[0, \tau_{k+2}]$, 则可以在 $[\tau_k, \tau_{k+1}]$ 的区间内定义一个低频率信号提取算子 $\mathcal{L}$, 使得:

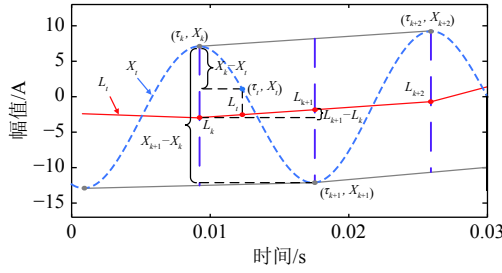


图 2 ITD 算法的分解原理

Fig. 2 The decomposition principle of ITD algorithm

$$\mathcal{L}X_t = L_t = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) (X_t - X_k), t \in (\tau_k, \tau_{k+1}] \quad (2)$$

式中： $L_k = L(\tau_k)$ ， L_{k+1} 决定了低频信号，且

$$L_{k+1} = 0.5 \left[X_k + \left(\frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (X_{k+2} - X_k) \right] + 0.5 X_{k+1} \quad (3)$$

信号分解以后，剩余高频信号 H_t ，定义其提取算子 $\mathcal{H}$ ，那么：

$$H_t = X_t - L_t = (1 - \mathcal{L})X_t = \mathcal{H}X_t \quad (4)$$

在信号分离的过程中，次同步分量对映分离出的低频振荡信号 L_t ，基频分量对映高频振荡信号 H_t 。

1.2 改进 ITD 算法

从上一节可以看出，ITD 算法简单，不需要任何先验模态信息即可分解信号。然而，当算法被应用于 SSO 监测时存在以下问题：

1) ITD 算法仅能拟合振荡分量的波形，即图 1 中的 L_t ，其幅值由波形中的峰值点确定。这意味着只有在检测到波形峰值点时才能估计振荡能量，这使得振荡幅值的检测不连续。

2) 由式 (2)，算法拟合出的曲线 L_t 由原始信号的极值点决定。在某些情况下，估计出的幅值可能会出现较大误差。例如在图 3 中，被拟合出的峰值在 K 点，而实际峰值在 P 点。

3) 超同步振荡的频率范围在 $f_0 \sim 2f_0$ 之间（其中 f_0 是 50Hz 或 60Hz 的基波频率），这个频率范围内的信号很难在基波上产生极值点，这使得 ITD 算法很难准确检测超同步分量。

针对上述 ITD 算法检测 SSO 时所面临的问题，本文提出将代数估计法与 ITD 算法结合，分 2 个阶段辨识振荡参数。

第 1 阶段：频率估计。SSO 通常在电流中表现更明显，所以为了准确估计振荡分量的频率，本文采用电流信号而非电压进行监测。根据式 (2)，

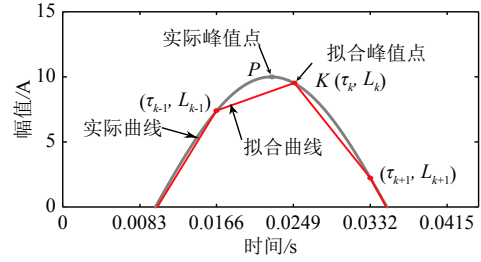


图 3 ITD 算法的拟合误差

Fig. 3 Explanation of the fitting error of ITD algorithm

振荡分量的关键点 L_k 由原始信号的极值点 X_k 决定，对于满足式 (5) 的连续 2 点，必定存在一个过零点 (t_z, L_z) ， $t_z \in [\tau_k, \tau_{k+1}]$ ，而相对应的 X_z 可由 (6) 得到。

$$L_{k+1}L_k < 0 \quad (5)$$

$$L_z = L_k + \left(\frac{L_{k+1} - L_k}{X_{k+1} - X_k} \right) (X_z - X_k) = 0 \quad (6)$$

因为原始曲线 X_z 在 2 个连续的极值点之间单调，所以点 X_z 的横坐标，就是振荡信号过零点 t_z 的横坐标。

根据振荡信号 2 个相邻过零点 (L_{z-1}, L_z) 之间的距离，可以确定振荡分量的频率

$$f_1 = 1/(2d_{t1}(t_z - t_{z-1})) \quad (7)$$

式中： f_1 是次同步分量的瞬时频率，且每当检测到新的过零点就更新 f_1 ， d_{t1} 是原始信号的采样时间。

在测量基频 f_0 时，因为在电压信号中次同步分量对基波的影响比在电流中更小，选用电压信号估计基频会更准确。基频 f_0 可以类似地由式 (8) 估计

$$f_0 = 1/(2d_{t1}(v_i - v_{i-1})) \quad (8)$$

式中： v_i 和 v_{i-1} 是电压信号中 2 个连续过零点的最新横坐标。

第 2 阶段：幅值估计。为了应对前文中提到的幅值估计时出现的问题，第 2 阶段结合代数方法估计振荡分量的参数。

发生次/超同步振荡时，本文设定采样信号模态数 $n=3$ ，即基频、次同步和超同步模态，其中超同步模态由频率耦合效应引起^[5]，其频率 f_2 可由第 1 阶段中得到的瞬时频率 f_1 和 f_0 决定

$$f_2 = 2f_0 - f_1 \quad (9)$$

式 (10) 是采样振荡信号的数学模型，其中 $(A_0, f_0, \varphi_0, \sigma_0)$ 、 $(A_1, f_1, \varphi_1, \sigma_1)$ 和 $(A_2, f_2, \varphi_2, \sigma_2)$ 分别表示基频信号、次同步分量和超同步分量的幅值、频率、相位和阻尼。

$$Y = \sum_{i=0}^2 A_i e^{\sigma_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (10)$$

式中: $\omega_i = 2\pi f_i$, 利用三角恒等式改写式(10)得到

$$Y = \sum_{i=0}^2 e^{\sigma_i t} [\xi_i \sin(\omega_i t) + \rho_i \cos(\omega_i t)] \quad (11)$$

式中: $\xi_i = A_i \cos(\varphi_i)$, $\rho_i = A_i \sin(\varphi_i)$, 由此, 被分解信号中各模态的幅值和相位可以由式(12)得到:

$$A_i = \sqrt{\xi_i^2 + \rho_i^2}, \varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{\rho_i}{\xi_i}\right) \quad (12)$$

为了摆脱计算结果对初始条件的依赖, 将式(11)等号左右2端同时乘以 $(t-t_1)$, 并在闭区间 $[t_1, t_1 + \varepsilon]$ 上对时间 t 积分一次, 得到:

$$d_1 = \sum_{i=0}^2 [c_{1,2i-1} \xi_i + c_{1,2i} \rho_i] \quad (13)$$

式中: ε 是一个很小的正值, 它取决于实时参数估计时算法处理器的采样频率、精度和计算速度, 且

$$\begin{cases} \dot{c}_{1,2i-1} = (t-t_1)e^{\hat{\sigma}_i t} \sin(\hat{\omega}_i t) \\ \dot{c}_{1,2i} = (t-t_1)e^{\hat{\sigma}_i t} \cos(\hat{\omega}_i t) \\ \dot{d}_1 = (t-t_1)y \end{cases} \quad (14)$$

因为积分区间很短且信号阻尼较小, 所以在幅值估计中可以忽略信号的阻尼, 设置 $\hat{\sigma}_i = 0$ 。然后, 再对式(13)等号2边同时对时间 t 做 $2n-1$ 次积分, 得到如下线性方程组

$$\mathbf{C} \times \boldsymbol{\theta} = \mathbf{D} \quad (15)$$

式中: $\boldsymbol{\theta} = [\xi_1 \rho_1 \dots \xi_n \rho_n]^T$ 是待估计的信号参数构成的向量, $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{D}$ 分别是 $2n \times 2n$ 和 $2n \times 1$ 的矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & \dots & c_{1,2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{2n,1} & \dots & c_{2n,2n} \end{pmatrix} \\ \mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_{2n}]^T \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $\dot{C}_{k,j} = C_{k-1,j}$, $\dot{d}_k = d_{k-1}$, $k = 2, 3, \dots, 2n$, $j = 1, 2, \dots, 2n$, 且 $C_{k,j}(t_1) = d_k(t_1) = 0$ 。

因此, 可以通过求解式(15)来得到系统的参数向量 $\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\xi}_1 \hat{\rho}_1 \dots \hat{\xi}_n \hat{\rho}_n]^T$:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{D} = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} \text{adj}(\mathbf{C}) \mathbf{D} = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_{2n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

然而, 当矩阵 $\mathbf{C}$ 的行列式为0时, 即 $\Delta(t) = \det(\mathbf{C}) \equiv 0$, 计算会出现奇点, 这时, 改写式(17)为式(18)从而避免奇点:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} e^{-(t-t_1)} |\Delta| = e^{-(t-t_1)} \begin{bmatrix} |\Delta_1| \\ |\Delta_2| \\ \vdots \\ |\Delta_{2n}| \end{bmatrix} \quad (18)$$

信号的参数 ξ_1 和 ρ_1 可以被表示为:

$$\begin{cases} \hat{\xi}_i = \text{sgn}(\Delta) \text{sgn}(\Delta_{2i-1}) \frac{n_{1,2}}{d_2} \\ \hat{\rho}_i = \text{sgn}(\Delta) \text{sgn}(\Delta_{2i}) \frac{n_{2,2}}{d_2} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, 2n$, 且

$$\begin{cases} \ddot{n}_{1,2} = e^{-(t-t_1)} |\Delta_{2i-1}| \\ \ddot{n}_{2,2} = e^{-(t-t_1)} |\Delta_{2i}| \\ \ddot{d}_2 = e^{-(t-t_1)} |\Delta| \end{cases} \quad (20)$$

因此, 该显式代数方法可以利用式(21)快速估计信号的幅值和相位参数而不会出现奇点问题, 文献[28]对该方法进行了详细介绍。

$$\begin{cases} \hat{A}_i = \sqrt{\hat{\xi}_i^2 + \hat{\rho}_i^2} \\ \hat{\varphi}_i = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{\rho}_i}{\hat{\xi}_i}\right) \end{cases} \quad (21)$$

1.3 SSO的监测策略

SSO监测装置设计包括信号预处理模块、监测模块和决策模块。

1) 信号预处理模块: 该模块利用一个二阶低通滤波器 (low pass filter, LPF) 来滤除采样信号中的噪声和高次谐波, 一个二阶高通滤波器 (high pass filter, HPF) 来滤除采样信号中的直流分量。式(22)是滤波器的传递函数, 其中 ζ 是滤波器的阻尼比, $\omega_n = 2\pi f_n$, f_n 是滤波器的固有频率, 且 $\zeta_{\text{HPF}} = \zeta_{\text{LPF}} = 0.707$, $f_{n_HPF} = 200 \text{ Hz}$, $f_{n_LPF} = 5 \text{ Hz}$ 。

$$\begin{cases} G_{\text{HPF}} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_{\text{HPF}}\omega_{n_HPF}s + \omega_{n_HPF}^2} \\ G_{\text{LPF}} = \frac{\omega_{n_LPF}^2}{s^2 + 2\zeta_{\text{LPF}}\omega_{n_LPF}s + \omega_{n_LPF}^2} \end{cases} \quad (22)$$

2) 监测模块: 在监测模块中, 采用改进后的ITD算法提取振荡分量。根据式(7)、(8)和(9), 一旦检测到过零点, 则更新频率, 同时利用2阶段的代数方法估计振荡信号的幅值。为了保证检测的实时性, 每当采样到新的采样数据时, 就执行一次ITD算法。

3) 决策模块: 如果满足以下3个条件, 则判定检测到SSO的发生, 此后, 振荡监测装置将根据需求发出预警或跳闸信号。

①振荡频率范围: 在50 Hz或60 Hz系统中,

次同步分量的频率一般在基频的 10%~90% 的范围。否则，被检测信号将不被判定为 SSO。

②振荡幅值：合理确定振荡幅值的阈值，可以平衡检测的可靠性和检测速度，在本文中，阈值选取为基波幅值的 10%。

③最小检测时间：为了避免扰动造成监测装置误操作，需要在振荡持续一段时间后才发出预警信号。为此，本文设置了 50 ms 的最小检测时间。

其中，振荡幅值和最小检测时间的选择依据是：双馈风机的承受能力、电力公司和发电公司的要求范围；检测振荡信号的用途和可能发生振荡的类型；振荡检测速度和准确性的平衡。

2 仿真实验验证

本节使用合成信号和 EMTP 仿真来评估所提出的 2 阶段 ITD 算法。本文选用在实际应用中已得到广泛使用的 Prony、ERA、MPM、TLS-ESPRIT 等算法来比较。为了公平比较，所有算法均设置 1000 Hz 采样率，采用 40 ms 长的计算窗口。

2.1 合成信号测试

合成信号的数学模型采用式 (10) 中基波、次同步分量和超同步分量的叠加，其中 $f_0 = 60$ Hz, $A_1 = A_2 = A_0 \times 10\%$ ，次同步和超同步分量的阻尼系数固定 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.2$ 。

2.1.1 参数辨识精度测试

算法对信号参数的辨识精度直接反映了算法的检测性能。为此，建立合成信号 $Y_1(23)$ ，其中 f_{SSO} 是 SSO 频率，附图 A1 展示了各算法对 f_{SSO} 在 5~40 Hz 时的检测精度。

$$Y_1 = 300 \cos(2\pi \cdot 60t + 10^\circ) + 30 \cos(2\pi \cdot f_{SSO}t + 20^\circ) + 30 \cos(2\pi \cdot (120 - f_{SSO})t + 30^\circ) \quad (23)$$

可见本文所提出的方法与 4 种传统算法均能够准确跟踪被测信号 Y_1 中次同步分量的频率和幅值，此外，超同步分量的估计也具有相同结果，由于篇幅有限，本文仅展示次同步分量的估计结果。

2.1.2 动态性能测试

因为风电场不断变化的网络拓扑结构和风力资源的随机性等不确定性，SSO 的频率和幅值通常是时变的。所以，选择具有良好动态性能的算法对监测 SSO 具有重要意义，本实验考虑测试各算法在基波和 SSO 分量的频率和幅值变化时的动态跟踪性能。

首先，考虑基波分量的频率随时间变化，建立合成信号 Y_2 ，附图 A2 展示了各算法的跟踪性能：

$$Y_2 = 100 \cos(2\pi (60 + t)t + 10^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi \cdot 13t + 20^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi (120 - 13)t + 30^\circ) \quad (24)$$

由附图 A2，ITD 算法在基频变化下具有最佳性能，原因是基频的变化对传统算法的特征值估计影响较大，而对所提出的方法影响较小。

类似地，为了模拟 SSO 分量的频率变化，建立合成信号 Y_3 ：

$$Y_3 = 100 \cos(2\pi \cdot 60t + 10^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi (13 + t)t + 20^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi (120 - 13 - t)t + 30^\circ) \quad (25)$$

5 种方法的跟踪结果如附图 A3 所示，由于各算法的模式选择正确，所有方法都具有良好的性能。

然后，考虑基波幅值发生阶跃变化，建立合成信号 Y_4 ：

$$Y_4 = 100[1 - 0.1\varepsilon(t - 0.02)] \cos(2\pi \cdot 60t + 10^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi \cdot 13t + 20^\circ) + 10e^{0.2t} \cos(2\pi (120 - 13)t + 30^\circ) \quad (26)$$

类似地，为了模拟 SSO 分量幅值发生阶跃变化，建立合成信号 Y_5 ：

$$Y_5 = 100 \cos(2\pi \cdot 60t + 10^\circ) + 10e^{0.2t}[1 - 0.1\varepsilon(t - 0.02)] \cos(2\pi \cdot 13t + 20^\circ) + 10e^{0.2t}[1 - 0.1\varepsilon(t - 0.02)] \cos(2\pi (120 - 13)t + 30^\circ) \quad (27)$$

附图 A4(a)，(c) 和 (b)，(d) 分别显示了 5 种算法对 Y_4 和 Y_5 中 SSO 的估计结果。与其他 4 种方法相比，ITD 算法在幅值阶跃变化下性能最好，在表 1 中算法估计值和实际值之间的平均误差和方差验证了这一结果。对频率和幅值的单独估计使该方法具有优越的动态性能，即使在幅值阶跃变化的情况下，ITD 仍能准确地估计 SSO 频率，这有利于振荡参数的辨识。

2.2 EMTP 仿真测试

本文采用图 4 所示的 ERCOT 风力发电系统来测试所提出的 2 阶段改进 ITD 算法^[27]。该系统包含多个基于 DFIG 的风电场，并在 5 号和 6 号母线之间放置一个串联电容器，系统的详细描述见文献^[27]。该系统在 PSCAD/EMTDC 中建模，利用电磁暂态仿真来测试算法性能。在本节中，禁用了最小检测时间模块来观察 5 种算法的跟踪能力。同时，利用一个高阶低通滤波器滤除基波

表1 5种算法在幅值发生阶跃变化下的平均误差和方差
Table 1 Average error and variance of five kinds of algorithms under the step change of the amplitude

算法	Prony	ERA	MPM	TLS-ESPRIT	ITD
频率- Y_4	11.69±547.00	1.10±4.63	1.36±8.58	1.61±9.90	0.02±0.00
幅值- Y_4	33.25±2376.00	3.82±179.00	2.44±77.70	2.96±65.90	0.37±0.50
频率- Y_5	11.78±555.00	0.15±0.10	0.22±0.18	0.17±0.13	0.00±0.00
幅值- Y_5	25.13±2157.00	0.51±0.92	0.58±1.27	0.51±0.98	0.27±0.43

分量以得到各算法的参考值,这种高阶滤波器虽然很难在实时监测中应用,但在离线分析时具有较好的效果。

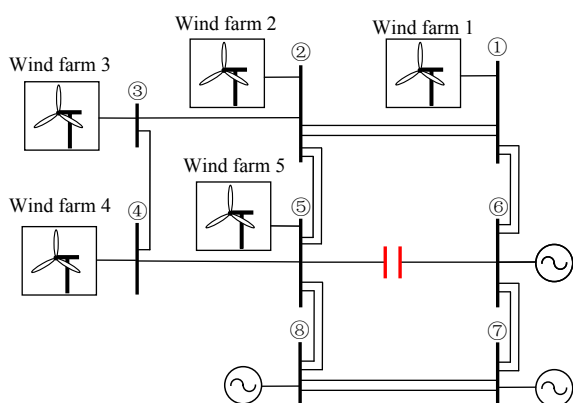


图4 ERCOT 仿真系统拓扑图
Fig. 4 Topology of ERCOT system

在案例1中,串联电容器的补偿水平从25%增加到35%,在 $t=0.5$ s时触发SSO。附图A5(a)展示了时域仿真波形,附图A6展示了5种算法的性能。可见,所有的方法都能准确确定振荡的频率和幅值,但本文提出的方法提供了更快的检测速度。表2比较了不同方法的检测时间,结果表明,该算法的检测速度比传统算法快15 ms,其原因是ITD通过振荡波形的过零点检测SSO,理论上最快。

在案例2中,母线5和8之间的一条线路在 $t=1$ s时发生三相故障,该故障在100 ms(6个周波)后被清除,时域仿真结果如图A5(b)所示。可见,三相故障会导致一个能量较大的暂态过程,

表2 在案例1和案例2中5种算法的预警时间
Table 2 Prewarning time of five kinds of algorithms in case 1 and case 2

算法	Prony	ERA	MPM	TLS-ESPRIT	ITD
案例1时间/s	1.248	1.246	1.246	1.247	1.231
案例2时间/s	1.051	1.046	1.040	1.046	1.089

故障清除后,系统发生SSO。与案例1相比,所有的方法都需要确定故障暂态过程中SSO的振荡参数,相比之下,本文提出的方法所估计的参数更接近参考值,如附图A7所示。传统的方法甚至在故障被清除之前就判定了发生SSO,在暂态过程中提供了错误的结果。各算法检测到SSO的时间如表2所示。

3 实测数据验证

为了进一步验证本文提出方法在实际应用中的性能,本文采集了沽源和哈密SSO事故中测量的电压和电流波形,分别如附图A8(a)、A8(c)和A8(b)、A8(d)所示。5种算法的跟踪结果分别如附图A9(a)、A9(c)和附图A10(a)、A10(c)所示,利用低通滤波器的滤波结果作为结果的参考值。

如附图A9和附图A10所示,与传统算法相比,本文提出的方法更接近参考值。传统方法的模态阶数通过试错来确定,使用该算法最佳的性能来参与对比,如果阶数选择不当,他们的性能会显著下降。通过表3中不同行的比较,可以看出在40 ms的窗长下本文所提出的方法展现出优越的性能,因此该算法在实际应用中可以使用短窗来获得良好的动态性能。

4 实时仿真实验验证

最后在图5所示的硬件在环实验平台中测试所提出的算法。将图4所示的风力发电系统建模置于实时仿真设备“Typhoon HIL 402”中,模拟的电压和电流信号被输入到嵌入ITD算法的DSP 28335控制板中,算法采样频率为1000 Hz。由于4种对比算法计算量较大,无法在DSP控制板中以1000 Hz采样频率运行,因此只在实时仿真实验中测试本文所提出的方法。

实验时间设置为1.5 s,在 $t_1=0.55$ s时,连接串联电容器以触发SSO,仿真模拟结果如附图A11(a)和(b)所示。在附图A11(c)、(d)中,装置在SSO触发之后18 ms检测到振荡信号,并在SSO的能量上升时持续地跟踪其频率和幅值,当振荡信号满足最小检测时间条件时,装置在 $t_2=0.617$ s发出预警信号。该实验表明ITD算法能快速检测SSO,并能在其初始阶段准确辨识SSO参数,另外,该算法简单、计算量小,易于在硬件上实现。

表 3 5 种算法对沽源和哈密振荡分量的频率和幅值估计结果的平均误差和方差
Table 3 Average error and variance of the estimation results of frequency and amplitude of oscillation components in Guyuan and Hami by five kinds of algorithms

算法	Prony	ERA	MPM	TLS-ESPRIT	ITD
沽源-40 ms- 频率	0.28±0.20	0.34±0.36	0.21±0.09	0.26±0.16	0.01±0.00
沽源-40 ms- 幅值	12.25±2922.00	17.10±3755.00	9.50±2929.00	12.89±3229.00	3.40±16.84
沽源-100 ms- 频率	0.06±0.24	0.04±0.09	0.04±0.08	0.06±0.08	0.01±0.00
沽源-100 ms- 幅值	5.49±542.40	3.45±283.60	3.52±122.00	4.95±305.30	3.40±5.88
哈密-40 ms- 频率	0.21±0.07	0.23±0.09	0.20±0.07	0.22±0.60	0.01±0.04
哈密-40 ms- 幅值	2.46±11.25	2.85±16.07	2.52±13.66	2.55±15.32	1.17±2.15
哈密-100 ms- 频率	0.18±0.06	0.09±0.02	0.12±0.02	0.09±0.02	0.01±0.05
哈密-100 ms- 幅值	2.13±11.50	2.45±12.71	1.97±10.98	1.95±12.97	1.17±1.58



图 5 硬件在环实验平台

Fig. 5 Platform for hardware-in-the-loop experiment

5 结论

1) 本文提出的快速检测和识别 SSO 的方法结合了原始 ITD 算法和代数估计法能够提高 ITD 的准确性和鲁棒性的优点, 实现了 2 阶段辨识的过程, 结果表明, 该方法具有良好的动态性能。

2) 该方法简单, 不需要任何先验信息, 易于在硬件上实现实时监测。本文给出了实时仿真实验测试, 验证了该算法可以在 1 ms 内完成计算。

3) 使用合成信号、EMTP 仿真信号和现场实测的 SSO 数据对本文方法进行了全面的验证, 结果表明, 与工业上广泛应用的传统方法相比, 该方法具有更优性能。

值得一提的是, 本文所提出的基于 2 阶段改进 ITD 算法的次同步振荡检测方法仅适用于仅存在单个次同步振荡模态时的检测。考虑到风电场发生振荡时的随机性与不确定性, 可能会出现多个次同步模态同时存在的情况, 此时该方法可能因多个模态的频率很靠近而无法准确分解振荡信号, 所以, 利用该方法对多个次同步模态的检测方法仍待进一步研究。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

参考文献

- [1] ADAMS J, PAPPU V A, DIXIT A. Ercot experience screening for sub-synchronous control interaction in the vicinity of series capacitor banks[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012: 1-5.
- [2] WANG L, XIE X, JIANG Q, *et al.* Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series compensated power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [3] MATSUO I B M, SALEHI F, ZHAO L, *et al.* Optimized frequency scanning of nonlinear devices applied to subsynchronous resonance screening[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2281-2291.
- [4] XIE X, ZHANG X, LIU H, *et al.* Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 1117-1126.
- [5] LIU H, XIE X, HE J, *et al.* Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [6] 陈钦磊, 郭春林, 于鹏, 等. 光伏、火电打捆经串补送出系统的次同步振荡研究[J]. *现代电力*, 2016, 33(5): 59-67.
CHEN Qinlei, GUO Chunlin, YU Peng, *et al.* Research on subsynchronous oscillations in power system with photovoltaic-thermal-bundled power transmitted by series compensation[J]. *Modern Electric Power*, 2016, 33(5): 59-67(in Chinese).
- [7] 吴杨, 肖湘宁, 罗超, 等. 直驱风机对火电机组次同步振荡的影响及抑制方法[J]. *现代电力*, 2019, 36(5): 31-38.
WU Yang, XIAO Xiangning, LUO Chao, *et al.* Impact of PMSG to thermal power units on sub-synchronous oscillation characteristics and suppression strategy[J]. *Modern*

- Electric Power*, 2019, 36(5): 31–38(in Chinese).
- [8] YANG X, ZHANG J, XIE X, *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.
- [9] SHIM K S, KIM S T, LEE J H, *et al.* Detection of low-frequency oscillation using synchrophasor in wide-area rolling blackouts[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 63: 1015–1022.
- [10] RAUHALA T, GOLE A M, JÄRVENTAUSTA P. Detection of subsynchronous torsional oscillation frequencies using phasor measurement[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1): 11–19.
- [11] BONGIORNO M, SVENSSON J, ÄNGQUIST L. Online estimation of subsynchronous voltage components in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 410–418.
- [12] WANG Y, JIANG X, XIE X, *et al.* Identifying sources of subsynchronous resonance using wide-area phasor measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(5): 3242–3254.
- [13] XIE X, ZHAN Y, LIU H, *et al.* Improved synchrophasor measurement to capture sub/super-synchronous dynamics in power systems with renewable generation[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(1): 49–56.
- [14] NETTO M, MILI L. A robust prony method for power system electromechanical modes identification[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017: 1–5.
- [15] SALEHI F, MATSUO I B M, BRAHMAN A, *et al.* Sub-synchronous control interaction detection: a real-time application[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(1): 106–116.
- [16] CHEN J, LI X, MOHAMED M A. *et al.* An adaptive matrix pencil algorithm based-wavelet soft-threshold denoising for analysis of low frequency oscillation in power systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 7244–7255.
- [17] 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.
- [18] BEZA M, BONGIORNO M. Application of recursive least squares algorithm with variable forgetting factor for frequency component estimation in a generic input signal[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(2): 1168–1176.
- [19] BEZA M, BONGIORNO M. A modified RLS algorithm for online estimation of low-frequency oscillations in power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(3): 1703–1714.
- [20] RAJARAM T, REDDY J M, XU Y. Kalman filter based detection and mitigation of subsynchronous resonance with SSSC[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1400–1409.
- [21] ORMAN M, BALCEREK P, ORKISZ M. Method of subsynchronous resonance detection[P]. U. S. Patent 2012, 012/0303306.
- [22] ORMAN M, BALCEREK P, ORKISZ M. Effective method of subsynchronous resonance detection and its limitations[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 43(1): 915–920.
- [23] GAO B, TORQUATO R, XU W, *et al.* Waveform-based method for fast and accurate identification of subsynchronous resonance events[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3626–3636.
- [24] XIE X, LIU H, WANG Y, *et al.* Measurement of sub- and supersynchronous phasors in power systems with high penetration of renewables[C]//2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Ljubljana, Slovenia, 2016: 1–5.
- [25] CHEN L, ZHAO W, WANG F, *et al.* An interharmonic phasor and frequency estimator for subsynchronous oscillation identification and monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(6): 1714–1723.
- [26] FREI M G, OSORIO I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. *Proc R Soc*, 2007, 463(2078): 321–342.
- [27] CHENG Y, HUANG S H, ROSE J. A series capacitor based frequency scan method for SSR studies[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(6): 2135–2144.
- [28] BELTRAN-CARBAJAL F, SILVA-NAVARRO G, TRUJILLO-FRANCO L G. On-line parametric estimation of damped multiple frequency oscillations[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 154: 423–432.

收稿日期: 2021–11–03

作者简介:

周波 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: zbv_s@126.com;

石鹏 (1991), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 810165147@qq.com;

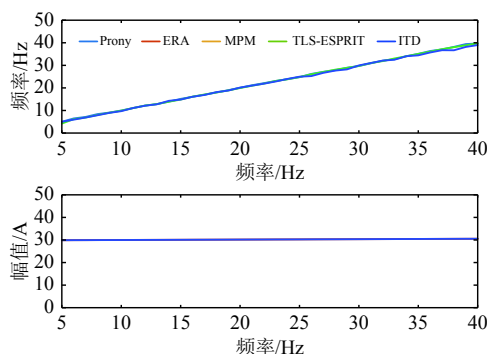
魏巍 (1984), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: weiwei_6898825@163.com;

陈刚 (1985), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 15928960403@163.com;

肖先勇 (1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为电能质量与优质供电, E-mail: xiaoxianyong@163.com;

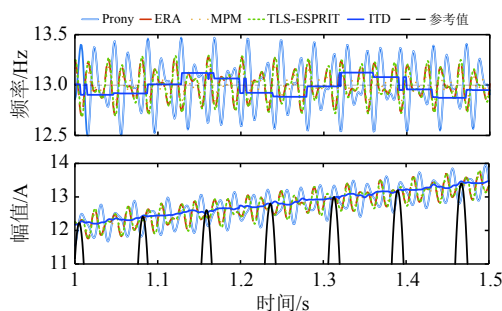
杨汉芦 (1995), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电能质量, E-mail: 18328036566@163.com。

附录 A



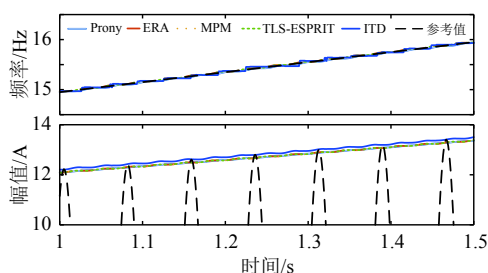
附图 A1 5 种算法对频率、幅值的性能跟踪

Fig. A1 The performance of five algorithms to track frequency and amplitude of SSO components



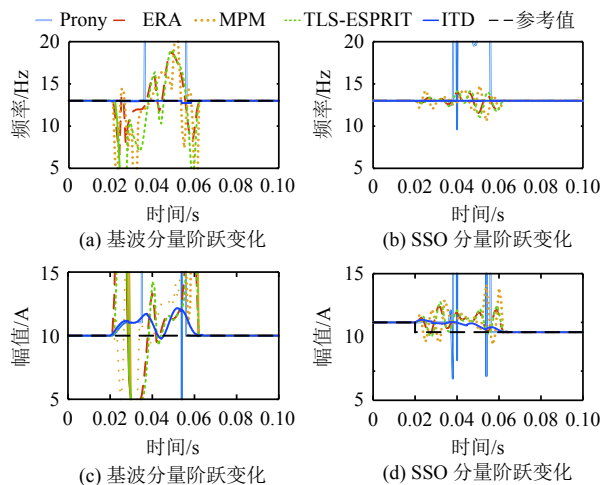
附图 A2 5 种算法在基波频率动态变化下的估计结果

Fig. A2 Estimation results of five algorithms under dynamic variation of fundamental frequency



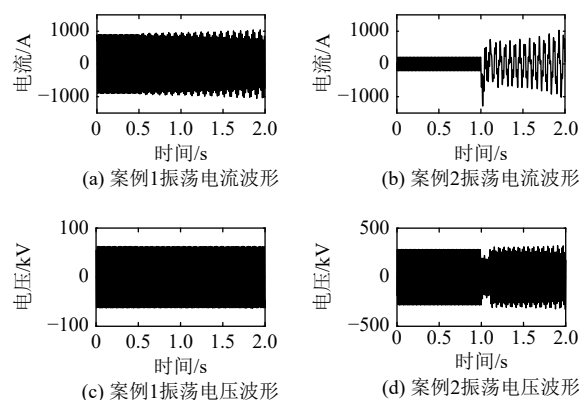
附图 A3 5 种算法在次同步频率动态变化下的估计结果

Fig. A3 Estimation results of five algorithms under dynamic variation of subsynchronous frequency



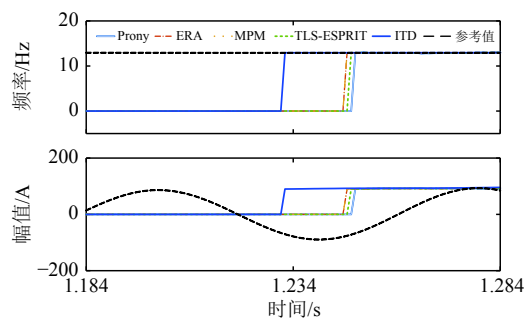
附图 A4 5 种算法在基波和次同步幅度阶跃变化下的频率和幅值跟踪性能

Fig. A4 The performance of tracking frequency and amplitude by five algorithms under step change of fundamental and subsynchronous amplitudes



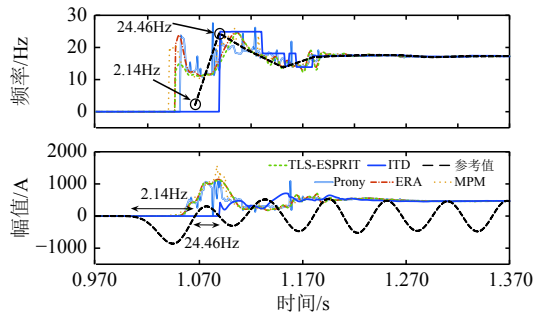
附图 A5 在案例 1 和案例 2 中的电压电流仿真波形

Fig. A5 Simulation waveforms of voltages and currents in case 1 and case 2



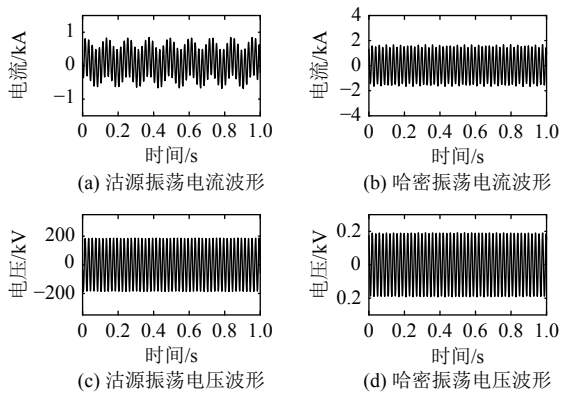
附图 A6 案例 1 中 5 种算法对次同步频率和幅值的跟踪性能

Fig. A6 The performances of tracing subsynchronous frequency and amplitude by five algorithms in case 1



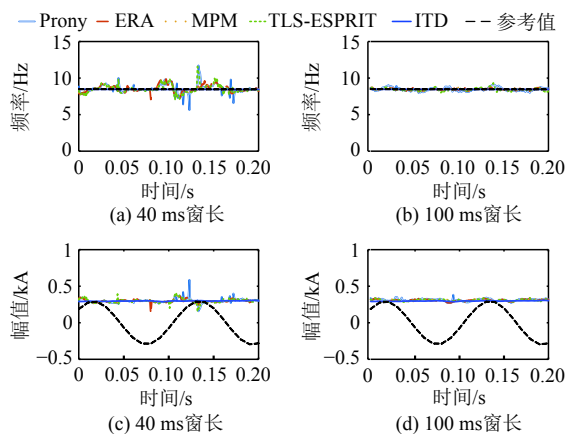
附图 A7 案例 2 中 5 种算法对次同步频率和幅值的跟踪性能

Fig. A7 The performances of tracing subsynchronous frequency and amplitude by five algorithms in case 2



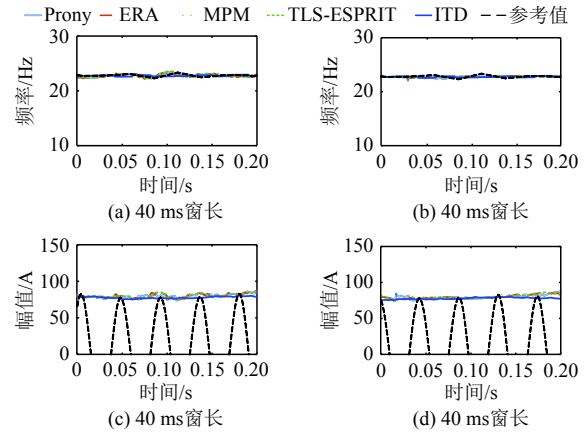
附图 A8 沽源和哈密次同步振荡的电压电流波形

Fig. A8 Current and voltage waveform of SSO in Guyuan and Hami



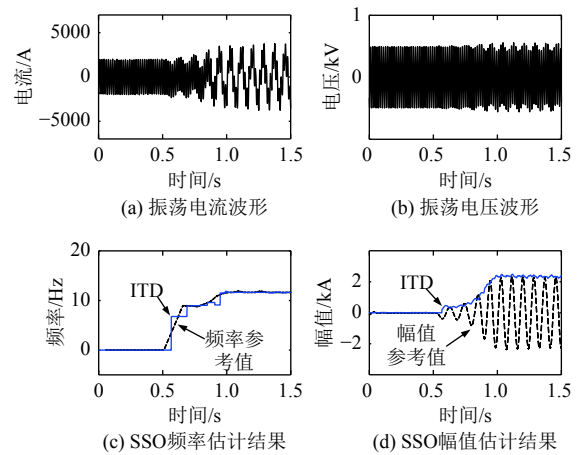
附图 A9 5 种算法对沽源实测数据的估计结果

Fig. A9 Estimation results of the measured data of Guyuan by five algorithms



附图 A10 5 种算法对沽源实测数据的估计结果

Fig. A10 Estimation results of the measured data of Guyuan by five algorithms



附图 A11 硬件在环测试

Fig. A11 Measured results of hardware-in-the-loop measurement