

杨杰豹, 于少娟, 马瑞, 等. 基于改进型同步挤压小波变换的次同步振荡分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(4): 153-161.

YANG Jiebao, YU Shaojuan, MA Rui, et al. Analysis of Sub-synchronous Oscillation Based on Improved Synchrosqueezing Wavelet Transform [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 153-161.

# 基于改进型同步挤压小波变换的次同步振荡分析

杨杰豹, 于少娟, 马瑞, 杨嘉其

(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 针对电力系统次同步振荡分量提取存在模态混叠问题, 将同步挤压小波变换(synchrosqueezing wavelet transform, SWT) 应用于次同步振荡分析中。该方法结合连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT) 和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD) 的优点, 通过对连续小波变换值同步挤压处理, 得到精细化的次同步振荡时频分布, 同时把次同步振荡信号分解为基波分量和各次同步/超同步谐波分量, 并结合希尔伯特变换完成各分量参数提取。为提高次同步振荡分析精度, 定义调制算子修正瞬时频率估计来增强次同步振荡时频聚集性和重构精度, 从而提出一种改进型同步挤压小波变换(improved synchrosqueezing wavelet transform, ISWT)。与连续小波变换和经验模态分解对比, 所提方法能得到更好的次同步振荡时频分布, 有效抑制次同步振荡分量提取模态混叠和噪声干扰。仿真算例和实际应用验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 同步挤压小波变换; 瞬时频率估计; 次同步振荡; 模态混叠

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.016

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)04-0153-09



## Analysis of sub-synchronous oscillation based on improved synchrosqueezing wavelet transform

YANG Jiebao, YU Shaojuan, MA Rui, YANG Jiaqi

(College of electronic information engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of mode aliasing in the extraction of power system sub-synchronous oscillation components, the synchrosqueezing wavelet transform is applied to the analysis of sub-synchronous oscillation. Combining the advantages of continuous wavelet transform and empirical mode decomposition, the refined time-frequency distribution of sub-synchronous oscillation is obtained by synchronously extruding the continuous wavelet transform values. At the same time, the sub-synchronous oscillation signal is decomposed into the fundamental component and each synchronous/supersynchronous harmonic component, and the parameters of each component are extracted by combining the Hilbert transform. In order to improve the analysis accuracy of sub-synchronous oscillation, a modulation operator is defined to modify the instantaneous frequency estimation to enhance the time-frequency aggregation and reconstruction accuracy of sub-synchronous oscillation. Thus, an improved synchrosqueezing wavelet transform is proposed. Compared with continuous wavelet transform and empirical mode decomposition, the proposed method can obtain better time-frequency distribution of sub-synchronous oscillation, and effectively suppress the mode aliasing

收稿日期: 2020-07-27

基金项目: 山西省互联网+3D打印协同创新中心项目资助(20180011)

作者简介: 杨杰豹(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网谐波抑制方法研究。E-mail: 66310806@qq.com

and noise interference of sub-synchronous oscillation component extraction. Simulation examples and practical applications verify the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** synchrosqueezing wavelet transform; instantaneous frequency estimation; sub-synchronous oscillation; mode aliasing

## 0 引言

由于我国的风能资源和负荷呈逆向分布, 风电往往采用大规模集中式并网、高压远距离传输<sup>[1]</sup>, 同时大量的电力电子设备的应用, 导致电网中产生大量谐波<sup>[2]</sup>。除了影响系统电能质量外, 还可能引起大型火电机组轴系扭振保护, 从而导致火电机组的脱网, 发生次同步振荡事故, 严重危害电力系统的安全稳定运行。风电机组和光伏等新能源与传统旋转发电机不同, 采用大量电力电子设备接入电网, 电力电子设备与电网之间动态相互作用, 由于电力电子设备的快速响应特性, 引发的振荡频率介于整数次谐波频率与低频振荡频率之间, 振荡特性也受变流器群聚效应、电网参数和风光条件影响, 呈现一种时变且复杂的特点。因此, 对次同步振荡进行深入分析, 对预防电网次同步振荡、研究振荡机理, 最终解决次同步振荡问题, 具有重要意义。

目前, 次同步振荡分析主要是分析相量测量单元 (phasor measurement units, PMU) 装置采集的数据<sup>[3]</sup>。快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 原理简单, 能够快速检测出次同步振荡谐波频率和幅值<sup>[4]</sup>。然而该方法无法分析次同步振荡的时频特性, 且仅能对平稳信号进行分析, 无法分析非平稳信号, 另外由于频谱泄露问题, 常规的抽取和还原方法会产生的误差较大。小波变换 (wavelet transform, WT) 能将次同步振荡信号按照一定尺度进行小波分解, 将各频率的信号可以分解到不同频段, 进而根据重构公式提取出不同频率的次同步振荡信号<sup>[5]</sup>。WT 克服了 FFT 不能时频分析的局限, 但 WT 的基函数和分解层数无法确定, 可能需要多次尝试。希尔伯特-黄变换 (Hilbert-Huang transform, HHT) 是一种自适应时频分析方法, 对次同步振荡信号进行经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD), 分解为一系列的内蕴模态函数 (intrinsic mode functions, IMFs), 再利用希尔伯特变换 (Hilbert transform, HT) 提取各 IMF 分量中的次同步振荡参数<sup>[6]</sup>。然而, EMD 分解时, 易受噪声干扰, 可能产生严重的模态混叠问题。常规方法次同步振荡分析时, 易受噪声干扰, 次同步振荡时频分布不清晰, 时频聚集性不足, 各振荡模态提取易发生模态混叠问题, 导致次同步振荡参数检测误差较大, 无法

准确揭示次同步振荡规律。同步挤压小波变换 (synchrosqueezing wavelet transform, SWT) 是由国外学者提出的一种新型时频分析方法<sup>[7]</sup>, SWT 在频率方向对连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 系数同步挤压处理, 使得各时频曲线不发生交叉, 可以较好解决频率混叠问题。同时, SWT 在压缩时通过设定阈值可以滤除信号中的噪声信号, 具有较好的抗噪声能力。目前, SWT 已广泛应用于故障诊断、噪声滤波、地震波分析中<sup>[8-10]</sup>, 但在电力系统次同步振荡分析上研究较少。

本文利用 SWT 方法对电力系统次同步振荡信号时频分析和模态分解, 提取次同步振荡分量, 并与 HT 方法结合得到各分量振荡参数。为提高次同步振荡分析精度, 通过改进瞬时频率估计来增强次同步振荡时频分析精度和重构精度, 从而提出一种改进型同步挤压小波变换 (improved synchrosqueezing wavelet transform, ISWT)。仿真实验和实测数据验证了所提方法的有效性。

## 1 同步挤压小波变换理论分析

次同步振荡信号可表示为

$$s(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (1)$$

式中,  $A_k(t)$  为第  $k$  个分量幅值;  $\phi_k(t)$  为第  $k$  个分量相位;  $\dot{\phi}_k(t)$  为第  $k$  个分量频率。

对  $s(t)$  进行连续小波变换

$$W_s(t, a) = \frac{1}{a} \int s(\tau) \overline{\psi\left(\frac{\tau-t}{a}\right)} d\tau \quad (2)$$

式中,  $\overline{\psi}$  为小波基函数的共轭函数;  $a$  为尺度因子。

当  $W_s(t, a) \neq 0$  时, 可以得到瞬时频率为

$$\tilde{\omega}_s(t, a) = R(\omega_s(t, a)) = R\left\{\frac{1}{i2\pi} \frac{\partial_t W_s(t, a)}{W_s(t, a)}\right\} \quad (3)$$

式中,  $R(Z)$  为取  $Z$  的实部。

由式 (3) 可知, SWT 通过在时间  $t$  和尺度  $a$  时的瞬时频率估计对锐化连续小波变换时频分布。

利用式 (4) 将小波系数  $W_s(t, a)$  重新分配到新的位置  $(t, \tilde{\omega}_s(t, a))$ 。

$$S^\gamma(t, \omega) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\{t, a \mid |W_s(t, a)| > \gamma\}} W_s(t, a) \delta \times$$

$$(\omega - \tilde{\omega}_s(t, a)) \frac{da}{a} \quad (4)$$

式中,  $\gamma$  为阈值;  $C_\psi = \int_0^\infty \bar{\psi}(\eta) \frac{d\eta}{\eta} < \infty$ 。

由于 CWT 的系数沿“尺度”轴重新分配, SWT 保持了因果关系特性, 因此在时频面上对  $S^\gamma(t, \omega)$  在脊线  $(t, \frac{1}{\phi'_k(t)})$  附近积分, 可以重构第  $k$  个分量, 即

$$s_k(t) \approx \int_{\{\omega, |\omega - \varphi_k(t)| < d\}} S^\gamma(t, \omega) d\omega \quad (5)$$

式中,  $\varphi_k(t)$  为  $\phi'_k(t)$  的估计值;  $d$  为补偿因子。

## 2 改进型同步挤压小波变换理论分析

为得到更精确的次同步振荡时频分布, 重构更精确的次同步振荡分量, 提出一种改进型同步挤压小波变换。首先定义一个局部调制算子

$$q(t, a) = \frac{\partial_t \omega_s(t, a)}{\partial_t \tau(t, a)} \quad (6)$$

式中,  $\tau(t, a) = t + a \frac{W_s^\psi(t, a)}{W_s(t, a)}$ , 其中,  $W_s^\psi(t, a)$  为小波基函数为  $t\psi(t)$  时的连续小波变换值。

此时改进型瞬时频率为

$$\omega_s^{[2]}(t, a) = \begin{cases} \omega_s(t, a) + q(t, a)(t - \tau(t, a)) & \text{if } \partial_t \tau(t, a) \neq 0 \\ \omega_s(t, a) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

取  $\tilde{\omega}_s^{[2]}(t, a) = R(\omega_s^{[2]}(t, a))$ 。由式(7)可知, 改进型瞬时频率是在 SWT 瞬时频率  $\omega_s(t, a)$  基础上, 添加一项由调制算子  $q(t, a)$  组成的修正项进行瞬时频率修正, 使得瞬时频率估计更精确, 从而能够得到更精确的重构分量。用  $\tilde{\omega}_s^{[2]}(t, a)$  代替  $\tilde{\omega}_s(t, a)$ , 可得到改进型同步挤压小波变换值为

$$S_2^\gamma(t, \omega) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\{\omega_s(t, a) > \gamma\}} W_s(t, a) \times \delta(\omega - \tilde{\omega}_s^{[2]}(t, a)) \frac{da}{a} \quad (8)$$

与式(5)类似, 可以重构第  $k$  个分量为

$$s_k(t) \approx \int_{\{\omega, |\omega - \varphi_k(t)| < d\}} S_2^\gamma(t, \omega) d\omega \quad (9)$$

## 3 基于改进型同步挤压小波变换的次同步振荡分量的提取

基于改进型同步挤压小波变换的次同步振荡分量的提取步骤如下。

(1) 利用式(2)对次同步振荡信号  $s(t)$  进行连续小波变换, 得到连续小波变换值  $W_s(t, a)$ 。

(2) 利用式(3)得到瞬时频率  $\omega_s(t, a)$ 。

(3) 利用式(6)计算调制算子  $q(t, a)$ 。

(4) 利用式(7)得到改进型瞬时频率  $\omega_s^{[2]}(t, a)$ 。

(5) 利用式(8)对小波系数  $W_s(t, a)$  在中心频率处同步挤压处理, 得到同步挤压小波变换值  $S_2^\gamma(t, \omega)$ 。

(6) 利用式(9)对次同步振荡各分量进行重构, 将次同步振荡信号分解为一组由高频到低频的内蕴模态类函数分量 (intrinsic mode type functions, IMTs), 即基波分量和各次同步(超同步)谐波分量。

(7)  $s_k(t)$  的 Hilbert 变换为

$$y_{Hk}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s_k(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

则次同步振荡分量的瞬时幅值、瞬时相位和瞬时频率分别为

$$\begin{cases} a_k(t) = \sqrt{s_k^2(t) + y_{Hk}^2(t)} \\ \phi_k(t) = \arctan \frac{y_{Hk}(t)}{s_k(t)} \\ \omega_k(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_k(t)}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

## 4 算例分析

为验证所提方法的有效性, 构造某次同步振荡电流信号(幅值单位: A), 表达式为

$$f(t) = \cos(2\pi \times 88t) + \cos(2\pi \times 50t) + \cos(2\pi \times 12t) \quad (12)$$

采用 Morlet 小波基函数, 其表达式为  $\psi(t) = \sigma^{-1/2} e^{-\pi\sigma^2(1-\eta)^2}$ , 带宽参数  $\sigma = 5$ , 采样频率为 1 024 Hz, 采样时间为 1 s, 阈值  $\gamma = 0.001$ 。无噪声时, 对次同步振荡信号时频分析, 如图 1 所示。

在图 1 中, 可清晰看出该次同步振荡基波分量、12 Hz 次同步分量和 88 Hz 超同步分量在整个时间段的分布情况。由图 1(a) 可知, CWT 次同步振荡时频曲线较粗, 时频聚集性不足, 无法精准定位各分量频率。在图 1(b) 中, SWT 能够改善 CWT 时频分布效果, 得到精细化的时频曲线, 可准确定位各分量频率。由图 1(c) 可知, ISWT 时频分布效果与 SWT 类似, 利用瑞利熵定量衡量所提方法的聚集效果, 瑞利熵值越小, 时频聚集效果越好。计算公式为

$$H = \frac{1}{1 - \alpha} \log_2 \left( \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_2^\gamma(t, \omega)|^\alpha d\omega dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_2^\gamma(t, \omega)| d\omega dt} \right) \quad (13)$$

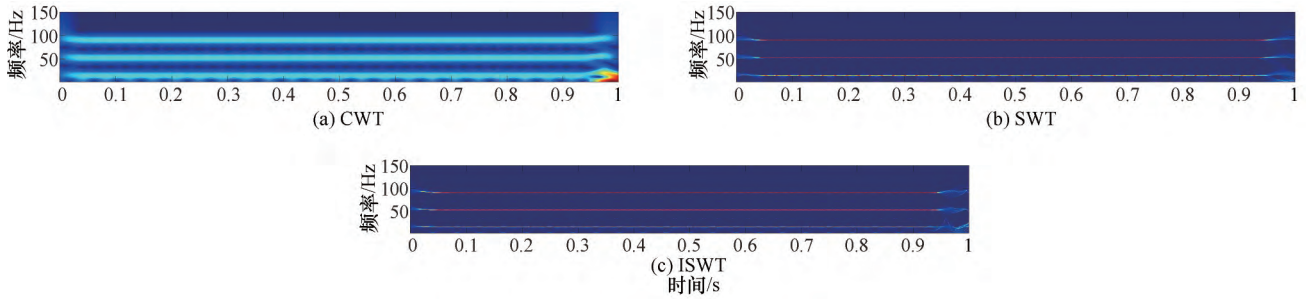


图 1 次同步振荡时频分布

Fig. 1 Time frequency distribution of sub-synchronous oscillation

式中,  $\alpha$  为阶数, 取瑞利熵阶数  $\alpha = 3$ 。

对次同步振荡信号模态分解, 得到 EMD、SWT 和 ISWT 分解结果分别如图 2—图 4 所示。

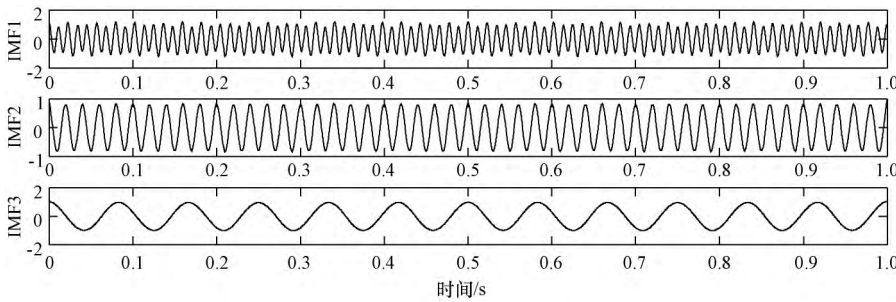


图 2 次同步振荡 EMD 分解

Fig. 2 EMD decomposition of sub-synchronous oscillation

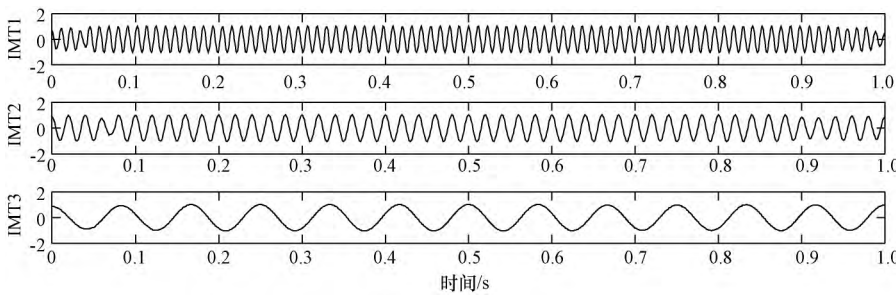


图 3 次同步振荡 SWT 分解

Fig. 3 SWT decomposition of sub-synchronous oscillation

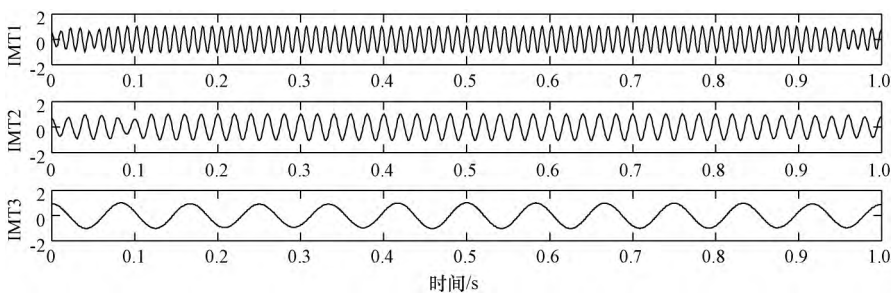


图 4 次同步振荡 ISWT 分解

Fig. 4 ISWT decomposition of sub-synchronous oscillation

CWT、SWT 和 ISWT 瑞利熵值分别为 6.283 4、2.190 4 和 2.087 5, 因此 ISWT 时频聚集能力更强, 得到的时频分布效果更好。

由图 2—图 4 可知, 在无噪声时, EMD、SWT 和 ISWT 均能准确将次同步振荡信号分解为 3 个分量, 分别为 88 Hz 超同步谐波分量、50 Hz 基波分量和 12 Hz 次同步谐波分量。

在信号中添加信噪比为 20 dB 的高斯白噪声, 次同步振荡电流波形如图 5 所示。

含噪时次同步振荡信号时频分布如图 6 所示。由图 6 可知, 当次同步振荡信号中含有噪声时, 其时频分布中的时频曲线仍清晰可见, 但在图 6(a) 中时频曲线周围还出现部分浅蓝色区域, 说明其受到噪声影响, 而在图 6(b) 和图 6(c) 中, 时频曲线仍然非常精细, 几乎不受噪声影响。CWT、SWT 和 ISWT 瑞利熵值分别为 6.962 1、2.582 9 和 2.488 6, 说明在噪声环境下 SWT 和 ISWT 仍保持较好的时频聚集能力。

对含噪次同步振荡信号模态分解, 得到 EMD、SWT 和 ISWT 分解结果分别如图 7—图 9 所示, 其中 EMD 分解结果有 10 项, 取前 5 项。

由图 7 可知, EMD 分解时产生了严重的模态混叠问题, 如 IMF1 和 IMF2 均为多个频率的模态分量, 同时产生大量的伪谐波分量, 不能准确提取电流中的次同步振荡分量。这是因为噪声对 EMD 极值点产

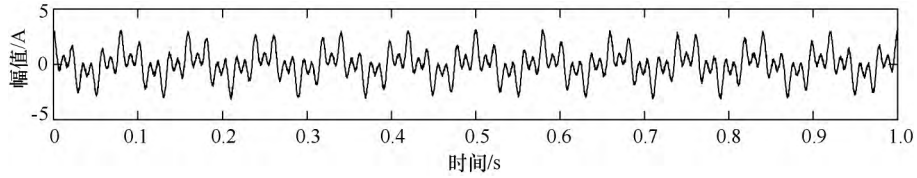


图5 含噪声次同步振荡电流波形

Fig. 5 Waveform of sub-synchronous oscillation current with noise

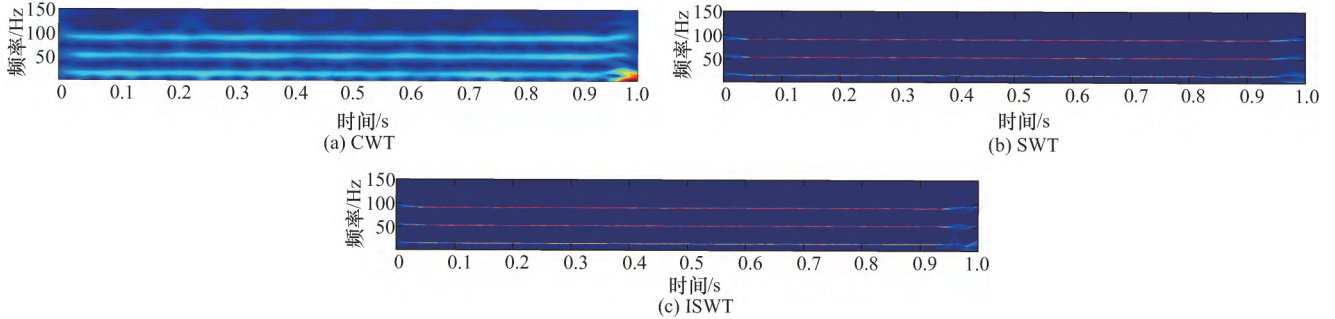


图6 含噪声次同步振荡时频分布

Fig. 6 Time frequency distribution of sub-synchronous oscillation with noise

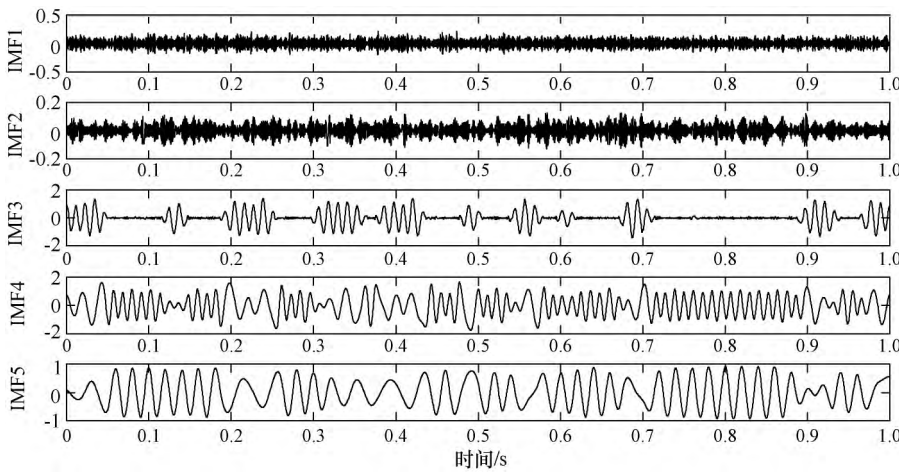


图7 含噪声次同步振荡 EMD 分解

Fig. 7 EMD decomposition of sub-synchronous oscillation with noise

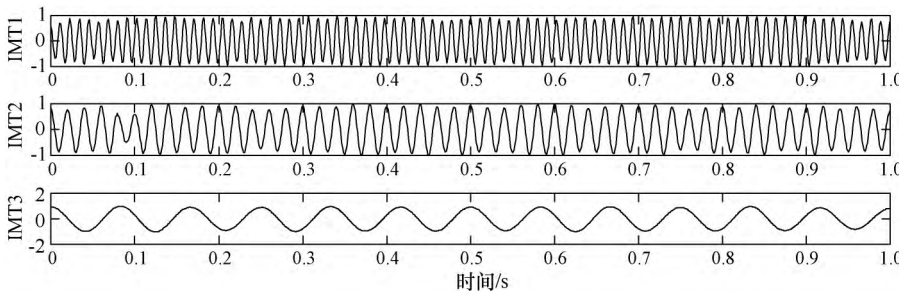


图8 含噪声次同步振荡 SWT 分解

Fig. 8 SWT decomposition of sub-synchronous oscillation with noise

生影响, 从而影响包络线的拟合, 拟合的结果进而影响 EMD 分解结果。在图 8 中, SWT 分解出 3 个分量, IMT1-IMT3 分量的频率分别为 88 Hz、50 Hz 和

12 Hz, SWT 能够准确提取电流信号中的各次同步振荡分量, 这是因为 SWT 通过阈值处理, 丢掉部分含噪声的连续小波变换系数, 滤除了信号中的噪声信号, 减少噪声对次同步振荡模态分解效果的影响。同时, SWT 通过对连续小波变换系数同步挤压, 将时频曲线细化, 使得各个频率分量不发生交叉, 从而准确提取出各频率分量。由图 9 可知, ISWT 也分解出 3 个分量, IMT1-IMT3 分量的频率分别为 88 Hz、50 Hz 和 12 Hz, 也能准确提取出次同步振荡信号中超同步谐波、基波和次同步谐波。

当信号中无噪声, 对这三种方法分解结果进行 Hilbert 变换, 通过求取平均值的方式对次同步振荡参数检测, 检测结果如表 1 所列。

由表 1 可知, 无噪声环境下, EMD、SWT 和 ISWT 三种方法均能有效提取三种不同频率分量, 比较三种方法检测误差发现, 频率误差由小到大依次是 EMD<ISWT<SWT, 幅值检测误差由小到大依次是 ISWT<SWT<EMD。ISWT 检测

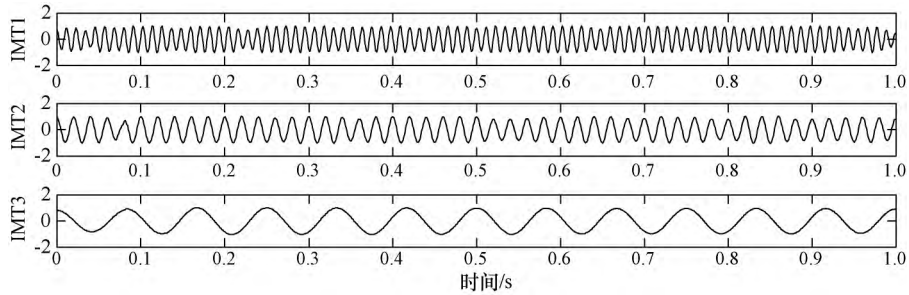


图 9 含噪声次同步振荡 ISWT 分解

Fig. 9 ISWT decomposition of sub-synchronous oscillation with noise

表 1 EMD、SWT 和 ISWT 次同步振荡参数检测结果

Table 1 Detection results of sub-synchronous oscillation parameters with EMD, SWT and ISWT

方法	频率/Hz			幅值/A		
	实际值	检测值	误差/%	实际值	检测值	误差/%
EMD	88	88.005 5	0.006 2	1	1.009 9	0.99
	50	49.994 6	0.010 8	1	0.804 6	19.54
	12	11.996 0	0.033 3	1	0.969 9	3.01
SWT	88	88.082 4	0.093 5	1	0.992 3	0.77
	50	50.048 0	0.095 9	1	0.976 6	2.34
	12	12.010 8	0.089 9	1	0.982 1	1.79
ISWT	88	88.076 0	0.086 3	1	0.999 3	0.07
	50	50.046 8	0.093 5	1	0.996 0	0.40
	12	12.010 1	0.084 1	1	0.994 8	0.52

精度高于 SWT, 这是因为 ISWT 在 SWT 基础上, 通过调制算子对瞬时频率估计进行修正, 从而提高频率估计精度, 使得各次同步振荡分量幅值重构误差减少。

### 5 实际应用分析

新疆哈密风电基地将配套建设 800 万 kW 风电, 150 万 kW 光伏, 600 万 kW 火电。天中±800 kV 特高压直流送端(新疆哈密地区)是风、光、火打捆, 直流送出的复杂系统, 存在次同步振荡的风险。次同步谐波除了影响系统电能质量外, 还可能影响火电机组安全运行。大型火电机组轴系存在 10~40 Hz 范围内的固有扭振频率, 若系统谐波频率与机组轴系频率吻合则会导致火电机组发生轴系扭振, 造成轴系损坏, 严重危害系统安全稳定运行。哈密地区电网网架结构图如图 10 所示。

哈密电网次同步振荡主要分布于山北站、哈密站、天山站、花园厂、南湖厂沿线, 即哈山线—哈天线—园天线及南山线。哈密地区的次振荡现象是不带串补情况下有新能源厂站参与的次同步振荡, 其振荡机理不明确、传播路径复杂, 严重危害电网、电厂的安全稳定运行。加强电网侧次同步谐波监测, 构建次同步振荡监测系统, 收集、分析大量现场运行数据,

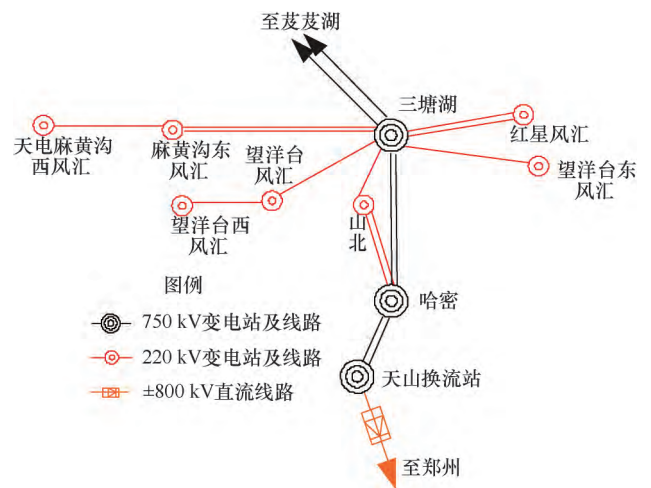


图 10 哈密电网部分网架结构

Fig. 10 Structure diagram of Hami power grid

对预防电网次同步振荡和研究振荡机理, 最终解决哈密地区次同步振荡问题, 具有重要意义。

次同步振荡时山北地区哈山线 A 相电流暂态录波图如图 11 所示, 该电流信号时频分布如图 12 所示。由图 12 可知, 该次同步振荡发生时, 电流中除基波分量外, 还产生两对频率互补的次同步振荡分量。在时频分布中, CWT 仍然频带较宽, 各频率分量发生交叉, 无法准确将各分量分离, SWT 能较

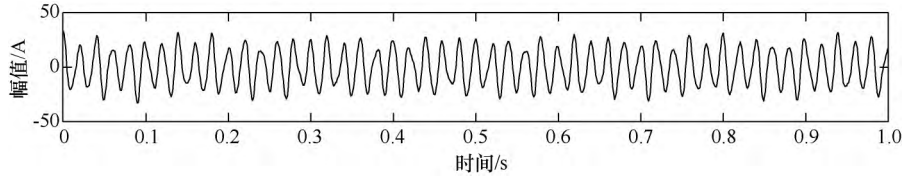


图 11 哈山线电流录波

Fig. 11 Current recording diagram of Hasan line

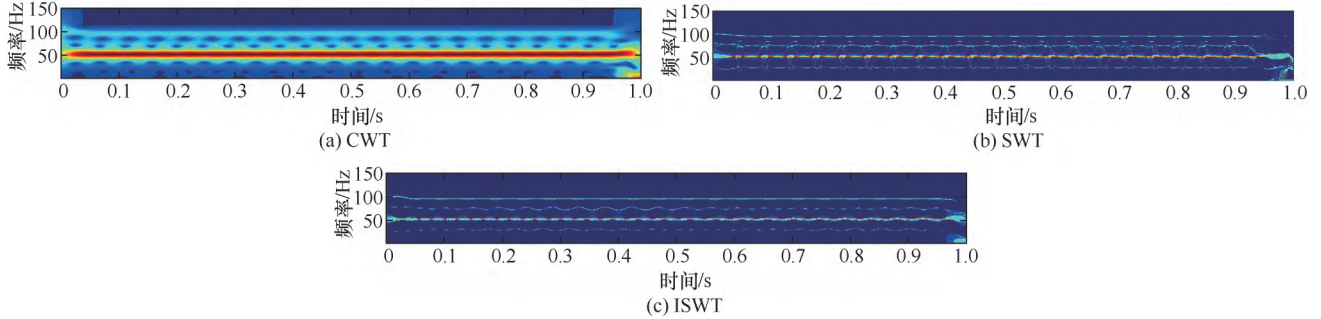


图 12 含噪声次同步振荡时频分布

Fig. 12 Time frequency distribution of subsynchronous oscillation with noise

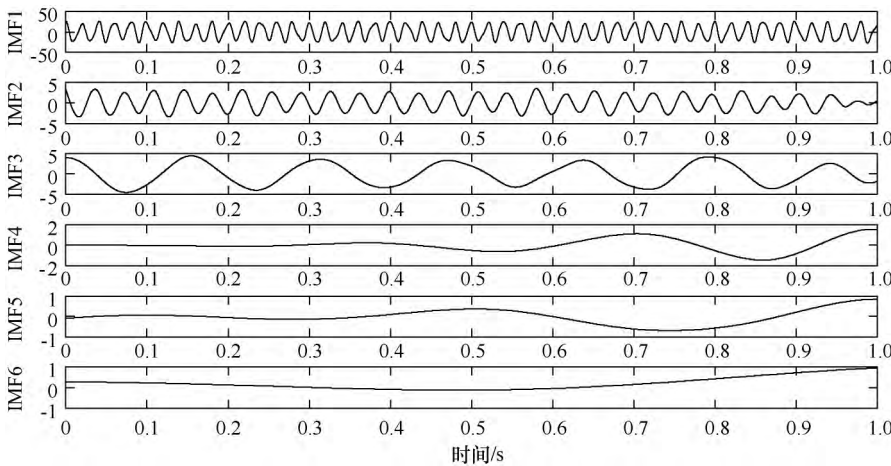


图 13 次同步振荡 EMD 分解

Fig. 13 EMD decomposition of sub-synchronous oscillation

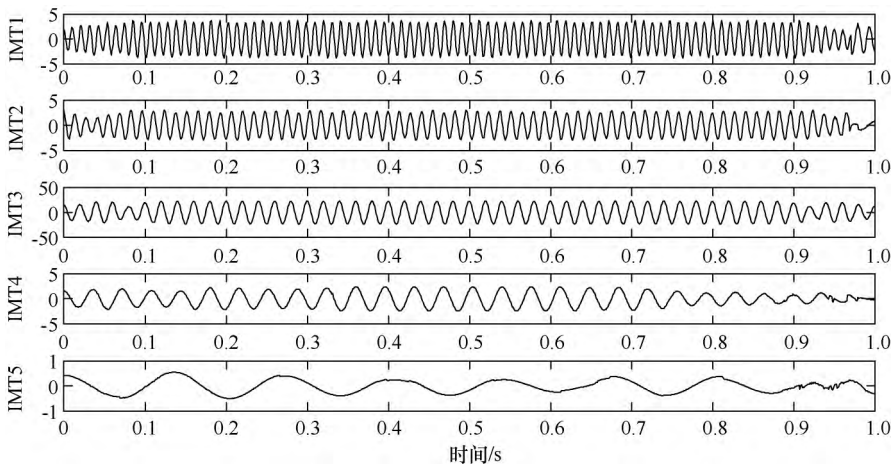


图 14 次同步振荡 SWT 分解

Fig. 14 SWT decomposition of sub-synchronous oscillation

好改善 CWT 时频聚集性, 能有效锐化次同步振荡时频曲线, 展示出更清晰的时频分布。ISWT 时频分布与 SWT 类似, 但各时频曲线分离更准确, 时频聚集性更好。三种方法的瑞利熵分别为 5.453 1、1.788 4 和 1.619 7, 也验证了 ISWT 的有效性。

对次同步振荡电流信号模态分解, 得到 EMD、SWT 和 ISWT 分解结果分别如图 13—图 15 所示。

由图 13 可知, EMD 分解出 6 个分量, 而原电流信号只有 5 个分量, IMF1 检测出的频率包含 50 Hz、73 Hz 和 94 Hz 左右频率, 说明发生频率混叠现象, IMF2—IMF3 检测出的频率分别为 31 Hz 和 7 Hz 左右, 其他分量均为虚假分量, 这是因为实际次同步振荡电流中, 含有多个频率相近的分量, 且含有噪声, 让 EMD 分解时发生误判, 从而无法准确提取次同步振荡分量。在图 14 中, SWT 分解出 5 个分量, IMT1—IMT5 分别对应频率为 94 Hz、73 Hz、50 Hz、31 Hz 和 7 Hz 左右分量, 没有发生模态混叠现象和产生虚假分量, 这是因为 SWT 瞬

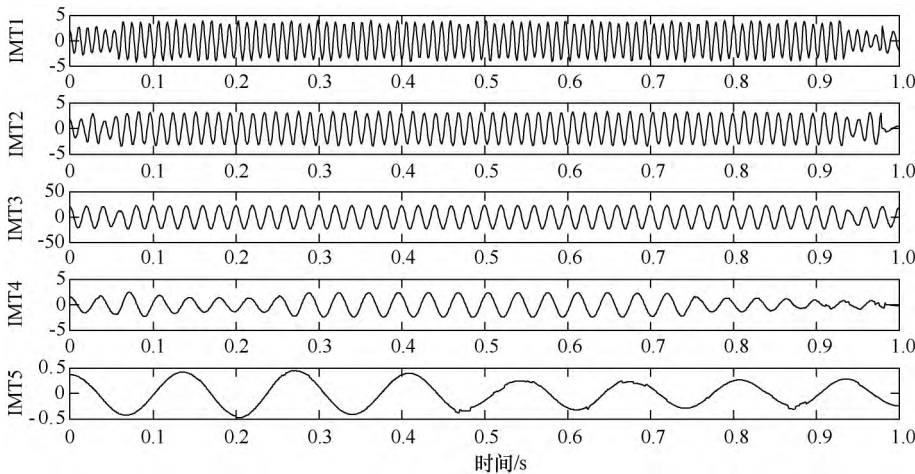


图 15 次同步振荡 ISWT 分解

Fig. 15 ISWT decomposition of sub-synchronous oscillation

时频率估计时滤除信号中的噪声系数, 通过同步挤压处理得到更精确的瞬时频率, 从而重构出更准确各频率分量。由图 15 可知, ISWT 分解结果与 SWT 类似, 也分解出 5 个分量。

对 SWT 和 ISWT 分解结果进行 Hilbert 变换, 通过求取平均值的方式对次同步振荡参数检测, 检测结果如表 2 所列, 而 EMD 由于发生模态混叠, 各分量失去原来的物理意义, 无法进行参数检测。

表 2 次同步振荡参数检测结果

Table 2 Detection results of sub-synchronous oscillation parameters

方法	分量	频率检测值 / Hz	幅值检测值 / A
SWT	IMT1	93.900 1	3.338 7
	IMT2	73.989 7	2.645 2
	IMT3	50.046 6	21.461 4
	IMT4	32.378 7	1.869 1
	IMT5	7.391 1	0.352 1
ISWT	IMT1	93.893 5	3.500 2
	IMT2	73.017 6	3.027 3
	IMT3	50.048 4	22.412 6
	IMT4	30.877 8	1.848 8
	IMT5	7.386 5	0.344 3

由表 2 可知, SWT 和 ISWT 检测出次同步振荡电流中 5 种不同频率的分量, 说明电流中除了 50 Hz 基波外, 还存在 94 Hz、73 Hz 左右的超同步谐波分量和 31 Hz、7 Hz 左右的次同步谐波分量, 表明该地区存在严重的次同步振荡问题, 同时存在多个 100 Hz 互补频率的振荡模态, 超同步谐波幅值明显大于次同步谐波幅值, 谐波成分复杂, 严重危害电网、电厂的安全稳定运行。

## 6 结论

针对电力系统次同步振荡分量提取存在模态混叠问题, 本文利用同步挤压小波变换方法对次同步振荡信号时频分析和模态分解, 提取次同步振荡分量, 并与希尔伯特变换方法结合得到各分量振荡参数。为提高次同步振荡分析精度, 提出一种改进型同步挤压小波变换方法。经仿真算例和实际应用分析, 可得到以下结论:

(1) SWT 通过对 CWT 同步挤压处理, 能够改善 CWT 时频分

析精度, 提高次同步振荡信号时频聚集性, 得到更精细化的时频曲线。

(2) ISWT 在 SWT 基础上, 通过定义调制算子修正瞬时频率估计, 可以提高 SWT 时频分析效果, 重构出更精确的次同步振荡分量。

(3) SWT 和 ISWT 能够改善 EMD 对次同步振荡分量提取时模态混叠问题, 准确将次同步振荡分量模态分解, 与 HT 结合可以准确检测次同步振荡参数, 有较好的抑制噪声能力。

(4) 新疆哈密地区存在严重的次同步振荡问题, 且主要是由于新能源并网引起的谐波振荡, 其振荡机理不明确, 谐波成分复杂, 频率存在传播距离远、传播路径复杂、穿透能力强, 严重危害电网、电厂的安全稳定运行。与常规意义的串补、直流引起的次同步振荡现象不同, 是一种新型、复杂的次同步振荡问题。

### 参考文献 (References):

[1] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.

[2] 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): 3237-3245.  
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): 3237-3245.

- [3] ZHANG F, CHENG L, GAO W, et al. Synchrophasors-Based Identification for Subsynchronous Oscillations in Power Systems[J]. IEEE Transactions, 2019, 10(2): 2224-2233.
- [4] 陶顺, 郭傲, 赵蕾, 等. 基于六项最快旁瓣衰减速度窗和六谱线插值算法的谐波间谐波检测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 110-116.  
TAO Shun, GUO Ao, ZHAO Lei, et al. Harmonic detection method of inter-harmonics based on six term window functions with maximum side lobe decay speed and six-spectrum-line interpolation algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 110-116.
- [5] 刘香银, 粟时平, 粟渊恺, 等. 暂态电能质量扰动的小波谱峭度法检测与辨识研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 140-145.  
LIU Xiangyin, LI Shiping, SU Yuankai, et al. Detection and identification of transient power quality disturbances based on wavelet transform and its spectral kurtosis [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 140-145.
- [6] 胡雷, 陈湘波, 熊魁, 等. 基于改进 HHT 的电能质量扰动检测方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 105-111.  
HU Lei, CHEN Xiangbo, XIONG Kui, et al. Power quality disturbance detection method based on improved HHT [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 105-111.
- [7] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied & Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [8] 刘景良, 郑锦仰, 林友勤, 等. 变分模态分解和同步挤压小波变换识别时变结构瞬时频率[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 24-31.  
LIU Jingliang, ZHEN Jinyang, LIN Youqin, et al. Instantaneous frequency identification of time-varying structures using variational mode decomposition and synchrosqueezing wavelet transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 24-31.
- [9] 张志禹, 刘彦霞, 李向月. 同步挤压小波变换提取地震信号瞬时属性[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(10): 260-263.  
ZHANG Zhiyu, LIU Yanxia, LI Xiangyue, et al. Extracting instantaneous attribute of seismic signals with synchrosqueezing wavelet transform [J]. Computer Measurement and Control, 2018, 26(10): 260-263.
- [10] AUGER F, FLANDRIN P, LIN Y T, et al. Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: an overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(6): 32-41.
- [11] 童涛, 张新燕, 刘博文, 等. 基于傅里叶同步挤压变换和希尔伯特变换的谐波间谐波检测分析[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4200-4208.  
TONG Tao, ZHANG Xinyan, LIU Bowen, et al. Analysis of harmonic and inter-harmonic detection based on Fourier-based synchrosqueezing transform and Hilbert transform [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4200-4208.
- [12] LEONOWICZ Z, LOBOS T, REZMER J. Advanced spectrum estimation methods for signal analysis in power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 514-519.
- [13] 何柳, 粟时平, 罗雪莲, 等. 风电并网暂态电能质量扰动的检测与识别[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 221-226.  
HE Liu, LI Shiping, LUO Xuelian, et al. Detection and identification of transient power quality disturbance of wind power grid? connection [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 221-226.
- [14] 段建东, 李浩, 雷阳, 等. 利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3833-3842.  
DUAN Jiandong, LI Hao, LEI Yang, et al. Transient-based directional protection using synchrosqueezing wavelet transforms for AC transmission lines in HVAC/DC hybrid system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3833-3842.
- [15] SYLVAIN M, THOMAS O, DUONG H P. Synchrosqueezing transforms: From low- to high-frequency modulations and perspectives [J]. Comptes rendus - Physique, 2019, 20(5): .
- [16] 薛安成, 王子哲, 付潇宇, 等. 基于非光滑分叉的直驱风机次同步振荡机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 87-95.  
XUE Ancheng, WANG Zizhe, FU Xiaoyu, et al. Mechanism analysis of subsynchronous oscillation in direct-driven wind turbine based on non-smooth bifurcation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 87-95.
- [17] 高本锋, 王飞跃, 于弘洋, 等. 应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1346-1356.  
GAO Benfeng, WANG Feiyue, YU Hongyang, et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1346-1356.
- [18] 周彦彤, 郝丽丽, 王昊昊, 等. 大容量风电场柔直并网系统的送/受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 100-106.  
ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 100-106.
- [19] 肖湘宁, 罗超, 廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 85-97.  
XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97.

(责任编辑 郭利娜)