

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211927

基于 MSST-HT 的次同步振荡参数辨识研究*

任旭虎 王浩 刘通 王丽娜 丁仲尧

(中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院 青岛 266580)

摘要: 次同步振荡是在电力系统运行平衡点受到扰动后产生的一种异常电磁及机械振荡现象。针对希尔伯特黄变换在次同步振荡分量提取时存在噪声干扰和模态混叠问题,提出一种适用于次同步振荡参数辨识的多重同步压缩变换(MSST)和希尔伯特变换相结合的方法。该方法在傅里叶同步压缩变换基础上,对次同步振荡信号时频谱进行多次同步压缩,以此来提高信号时频分布的重构精度和能量聚集程度。通过仿真并结合实际工程录波数据进行验证,首先使用多重同步压缩变换方法对信号进行时频分析,得到信号时频图,然后用多重同步压缩变换变换逆变换分解重构出各个模态分量,最后用希尔伯特变换对提取出来的单个模态分量进行参数辨识,识别其频率、阻尼比、衰减因子等主要参数。仿真结果表明,相比于短时傅里叶变换(STFT)、同步提取变换(SET)和傅里叶同步挤压变换(FSST),MSST能够提高信号时频分布的能量聚集程度和重构精度,能够实现多分量的次同步振荡模态分解。实际数据结果表明该方法能有效克服噪声干扰和模态混叠问题,准确辨识次同步振荡参数,对电力系统安全稳定运行具有一定的参考意义。

关键词: 次同步振荡;多重同步压缩变换;希尔伯特变换;参数辨识

中图分类号: TM933 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.4

Research on parameter identification of subsynchronous oscillation based on MSST-HT

Ren Xuhu Wang Hao Liu Tong Wang Lina Ding Zhongyao

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Subsynchronous oscillation is a kind of abnormal electromagnetic and mechanical oscillation which occurs when the equilibrium point of power system is disturbed. Aiming at the problems of noise interference and mode aliasing in the extraction of sub-synchronous oscillation components by the Hilbert Huang transform, a method combining multisyn-chrosqueezing transform (MSST) and Hilbert transform is proposed to identify sub-synchronous oscillation parameters. Based on Fourier synchronous compression transform, the frequency spectrum of sub-synchronous oscillating signal is compressed synchronously for several times, so as to improve the reconstruction accuracy of signal time-frequency distribution and the degree of energy aggregation. Through simulation and verification combined with actual engineering recording data, firstly, the signal time-frequency analysis was carried out using the multi-synchronous compression transform method to obtain the signal time-frequency diagram, and then the multi-synchronous compression transform transform inverse transformation decomposition was used to reconstruct each modal component, and finally the extracted single modal component parameter identification was carried out using the Hilbert transform. Identify its frequency, damping ratio, attenuation factor and other major parameters. The simulation results show that compared with short-time Fourier transform (STFT) and synchroextracting transform (SET) and Fourier-based synchrosqueezing transform (FSST), MSST can improve the energy concentration degree and reconstruction accuracy of signal time-frequency distribution, and realize multi-component sub-synchronous oscillation mode decomposition. The actual data show that the method can overcome the noise interference and mode aliasing effectively, identify the sub-synchronous oscillation parameters accurately, and has certain reference significance for the safe and stable operation of power system.

Keywords: subsynchronous oscillation; multiple synchronous compression transformation; Hilbert transform; parameter identification

0 引言

由于我国新能源发电的持续发展,使得地方电网之间

实现了电互联的同时也增加了整个网络的复杂程度^[1]。由于新能源发电并网中电力设备,开关元件的大规模应用,电机组控制器与交流电网之间的相互作用更加复杂,引发了

收稿日期:2022-11-03

* 基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020ME202)资助

普遍的次同步振荡现象^[2],给常规电力系统安全稳定地运转带来了严峻的挑战。因此,对次同步振荡信号的实时监测和准确辨识,是确保互联电网稳定运行的重要前提^[3]。

目前对电网中次同步振荡分析主要依靠相量测量单元(phasor measurement units, PMU)装置中采集的数据^[4],工程应用上主要利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、小波变换^[5](wavelet transform, WT)和希尔伯特黄变换^[6](Hilbert-Huang transform, HHT)对录波信号进行次同步振荡分析。文献[7]采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对电力系统次同步振荡实现了快速测量和分析,并类比提出 FFT 存在模态混叠、频谱泄漏和栅栏效应等问题,将会导致错误的分析结果。文献[8]提出一种类似分析方法—傅里叶同步挤压变换(Fourier-based synchrosqueezing transform, FSST),FSST 对短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)系数沿频率方向上进行压缩,从而使瞬时频率在实际频率处聚集,从而得到精确的时频特性曲线。文献[9]采用正交小波进行谐波分析,可以有效的提取出次同步振荡信号的基波分量和谐波分量,有效的提高了信号的时域局部性,将信号多余谐波滤除。文献[10]指出,HHT 虽然在非线性和非平稳信号分析中有较好的适应性,但模态分解时难以分辨频率接近的波形分量,可能存在模态混叠效应以及识别波形突然变化的过渡时间方面存在困难,从而无法对谐波进行有效提取和分析。

2019 年,多重同步压缩变换(multisyn-chrosqueezing transform, MSST)被 Gang 等^[11]提出,此方法对信号刻画精细,并且能较好地提高信号时频分析的精度。MSST 是在 STFT 的基础上提出的,相当于在短时傅里叶变换的基础上增加了多次同步压缩操作。多重同步压缩变换首先将短时傅里叶时频谱上真实频率附近的时频能量压缩到真实频率处,得到以此同步压缩变换时频谱,紧接着再对一次同步压缩变换时频谱进行 SST(synchrosqueezing transform)操作,得到二次同步压缩变换时频谱,以此迭代操作得到高时频精度率的 MSST 时频谱。通俗地讲,一次的同步压缩变换能使得信号的时频精度有着较大的提升,那么 MSST 便利用同步压缩的优势对信号进行多次同步压缩,以此来达到提高时频精度。

本文将 MSST 应用到次同步振荡分析中,并结合希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)对重构的单分量信号完成参数辨识。仿真实验表明文中所提出多重同步压缩变换方法在次同步振荡参数辨识中有效的区分相近频率的模态分量,辨识单模态分量参数。

1 传统次同步振荡分析方法

传统的次同步振荡时频分析方法多采用 STFT、FSST 和希尔伯特-黄变换相结合的方法。它无需选择基函数,而是根据信号的特性依次剥离各个模态(intrinsic mode type

functions, IMT),对信号整体以及各个模态分量分别进行逆变换重构,得到短时傅里叶变换时频谱和同步挤压变换时频谱,再对时频谱进行希尔伯特变换(Hilbert-Huang transform, HHT)参数辨识。

1.1 短时傅里叶变换原理

1946 年,Dennis Gabor 因为在信号时频分析中,引用了窗函数的概念,创造了短时傅里叶变换,短时傅里叶变换一定程度上反映了信号瞬时频谱频率的变化。

首先,定义 STFT 信号 $f(t) \in R$,且窗函数 $g(t) \in R$,所以 STFT 是 $f(t)$ 的短时傅里叶变换,可以定义为:

$$V_f(t, \eta) = \int_R f(\tau) g(\tau - t) e^{i\eta\tau} d\tau \quad (1)$$

对添加相位 $e^{i\eta\tau}$ 的信号做 STFT 变换,可以表示为:

$$V_f(t, \eta) = \int_R f(\tau) g(\tau - t) e^{-i\eta(\tau-t)} d\tau \quad (2)$$

根据 parseval 定理,对式(2)进行修正,修正后的 STFT 可以表示为:

$$V_f(t, \eta) = \frac{1}{2\pi} \int_R \hat{f}(\xi) \hat{g}(\eta - \xi) e^{i\xi t} d\xi \quad (3)$$

上述分析可知,短时傅里叶变换的机理是通过分析加窗后的信号,每个窗口内信号进行傅里叶变换,再进行叠加处理,使得信号频域有了时间信息,可以反映非平稳信号频域频率随时间变化的状态。

同时,短时傅里叶变换具有无损可逆性,其逆变换是:

$$f(t) = \frac{1}{\|g\|_2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V_f(t, \eta) \overline{g(t - \tau)} e^{2\pi i \eta \tau} d\tau d\eta \quad (4)$$

1.2 傅里叶同步挤压变换(FSST)原理

2014 年,Oberlin 等^[12]在短时傅里叶变换的基础上推导出傅里叶同步挤压变换,压缩信号频域能量贴近其主频率,提高其时频分析效果。

首先定义多模态分量信号 $f(t)$,每个单模态分量都有时变或者固定的频率,信号可以表示为:

$$f(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) e^{i2\pi\phi_n(t)} \quad (5)$$

其中, $A_n(t)$ 表示信号幅度, $\phi_n(t)$ 表示信号相位,且 $A_n(0), \phi_n(0) > 0, n$ 为有限值。

则信号 $f(t)$ 的 STFT 可以表示为:

$$V_f(t, \eta) = \int_R f(\tau) g(\tau - t) e^{-2\pi i \eta(\tau-t)} d\tau = \int_R \sum_{n=1}^N A_n(t) e^{2\pi i \phi_n} g(\tau - t) e^{-2\pi i \eta(\tau-t)} d\tau = \sum_{n=1}^N f_n(t) \hat{g}(\eta - \phi_n'(t)) \quad (6)$$

其中, $g(t)$ 表示窗函数, $e^{i\eta}$ 为相位。由式(6)可知,定义的多分量信号 $f(t)$ 能量主要集中在脊线 $\eta = \phi_n'(t)$ 附近。

傅里叶同步挤压变换是在短时傅里叶变换的基础上,对信号频率沿频率轴方向进行压缩重排。信号 $f(t)$ 的瞬

时频率可以表示为:

$$f_x = \frac{\frac{\partial}{\partial t} V_f(t, \eta)}{2\pi i V_f(t, \eta)} \quad (7)$$

所以,多分量信号 $f(t)$ 在频域中 $V_f(t, n)$ 点可以表示为式:

$$\omega_f(t, \eta) = \frac{\frac{\partial}{\partial t} V_f(t, \eta)}{2\pi i V_f(t, \eta)} \quad (8)$$

其中, $\omega_f(t, \eta)$ 表示傅里叶同步挤压变换的相关函数。傅里叶同步挤压变换系数 $V_f(t, n)$ 按照 $(\eta, t) - (\overline{\omega_f}(\eta, t), t)$ 的映射关系,在频域对频率变量进行压缩重排。信号傅里叶同步挤压变换后数学表达式是:

$$R_f(t, \xi) = \int_{(\eta, V_f(t, \eta) \neq 0)} V_f(t, \eta) \delta(\omega_f(t, \eta) - \xi) d\eta \quad (9)$$

1.3 希尔伯特变换(HT)原理

单模态分量信号 $f_k(t)$ 的 HT 变换可以表示为:

$$f_k^*(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_k(t)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

$f_k(t)$ 的解析信号是:

$$s_k(t) = f_k(t) + j f_k^*(t) = A_k(t) e^{j\phi_k(t)} \quad (11)$$

分别表示瞬时振幅和瞬时相位,且通过瞬时相位的导数可以求得单模态分量瞬时频率:

$$f = \frac{d\phi_k(t)}{2\pi dt} \quad (12)$$

通过拟合出来的单模态分量衰减因子 α_k 和振荡频率 f 可以求得对应模态的阻尼比:

$$\sigma = \frac{\alpha_k}{\sqrt{\alpha_k^2 + (2\pi f)^2}} \quad (13)$$

针对希尔伯特黄变换^[13-14]在次同步振荡分量提取时存在噪声干扰和模态混叠问题,提出一种适用于次同步振荡参数辨识的 MSST 和希尔伯特变换结合的新方法。

2 基于 MSST-HT 的次同步振荡分析方法

2.1 多重同步压缩变换(MSST)原理

MSST^[13-16]在 STFT 时频谱的基础上,继续执行多重同步压缩变换,有效地提高信号的重构精度和时频聚集程度,简化计算流程,提高运行效率。MSST 本质是迭代执行多个 SST 操作。设给定次同步振荡信号 $x(t)$, 则信号 $x(t)$ 的 STFT 定义为:

$$F_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(u) g(u-t) e^{-j\omega(u-t)} du \quad (14)$$

式中: $g(u)$ 是窗口函数。

信号 $x(t)$ 进一步展开为:

$$x(t) = A(u) e^{-j\varphi(t)} \quad (15)$$

将信号 $A(u)$ 和 $\varphi(u)$ 在时间点 t 处泰勒一阶展开:

$$A(u) = A(t) \quad (16)$$

$$\varphi(u) = \varphi(t) + \varphi'(u)(u-t) \quad (17)$$

所以信号 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = A(t) e^{(\varphi(t) + \varphi'(u)(u-t))} \quad (18)$$

$x(t)$ 的短时傅里叶变换时频谱可得:

$$F_x(t, \omega) = A(t) e^{j\varphi(t)} \int_{-\infty}^{\infty} g(u-t) e^{-j(\omega'(t)(u-t) - \omega(u-t))} d(u-t) = A(t) e^{-j\varphi(t)} \hat{g}(\omega - \varphi'(t)) \quad (19)$$

对式(19)求偏导得:

$$\varphi_t F_x(t, \omega) = F(t, \omega) j\varphi'(t) \quad (20)$$

当 $F_x(t, \omega) \neq 0$ 时, MSST 的瞬时频率估计值表示为:

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \frac{\partial_t F_x(t, \omega)}{jF(t, \omega)} \quad (21)$$

最后对式(19)进行 SST, 得到 MSST 表达式:

$$T_s(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t - \omega) \delta(\alpha - \hat{\omega}(t, \omega)) d\omega \quad (22)$$

式中: δ 表示脉冲函数。当迭代次数为 $N (N \geq 2)$, MSST 可表示为:

$$T_s^{[N]}(t, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t, \omega) \delta(\alpha - \hat{\omega}^{[N]}(t, \omega)) d\omega \quad (23)$$

2.2 计算步骤与流程

1) 假设信号 $f(t)$ 中有多个次同步频率模态分量, 用式(19)对信号 $f(t)$ 进行 STFT, 得到 STFT 系数 $F_x(t, \omega)$;

2) 对短时傅里叶变换时频谱系数 $F_x(t, \omega)$ 进行同步压缩变换, 得到同步压缩变换系数 $T_s(t, \alpha)$;

3) 根据 MSST 变换时频图提取出信号的各模态分量。MSST 通过迭代计算, 对 SST 同步压缩变换系数 $T_s(t, \alpha)$ 进行多次重排, 得到同步压缩变换系数 $T_s(t, \alpha)$;

4) 对信号整体以及各个模态分量分别进行逆变换重构, HT 辨识其参数。

计算流程如图 1 所示。

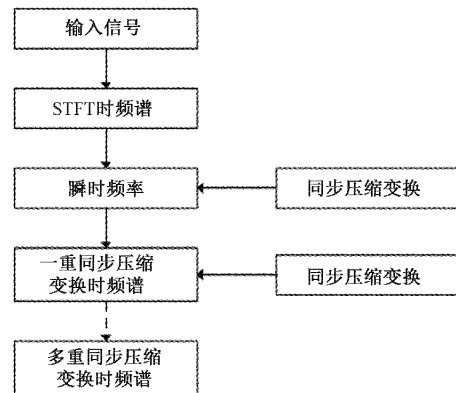


图 1 次同步振荡参数计算流程

3 实验验证

3.1 仿真信号算例分析

为了验证所提方法的可行性, 构造一组常用的理想多模态振荡信号, 可以表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{a_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (24)$$

式中: A_i 表示信号幅值, $e^{a_i t}$ 表示信号衰减函数, f_i 表示信号频率, ϕ_i 表示信号相位, 具体参数如表 1 所示。信号采样频率 100 Hz, 时间为 8 s。原信号如图 2 所示, 该信号包含 4 个次同步频率的单模态分量信号。

表 1 多模态振荡信号参数

单分量信号	幅值	衰减因子	频率/Hz	相位/(°)
$x_1(t)$	9	-0.4	15	30
$x_2(t)$	6	-0.1	17	45
$x_3(t)$	3	0.2	30	60
$x_4(t)$	4	0.25	40	90

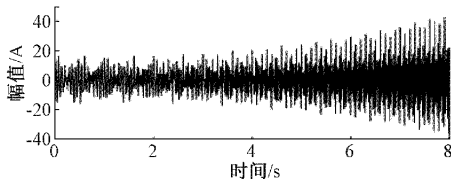


图 2 理想信号波形图

在 MATLAB 平台对算例信号进行仿真分析, 分别使用不同法对信号进行分析, 定义统一的高斯窗 (Gaussian window) 函数。

分别使用 STFT、同步提取变换 (synchroextracting transform, SET)、FSST、MSST 算法对仿真信号进行时频分析, 时频分析结果如图 3~6 所示。由图 3~6 可知, 3 种方法都可以得到 4 个模态分量, 但是 STFT 在处理频率较低的次同步振荡分量时发生模态混叠现象, 对模态分量个数的计算会产生误差。FSST 和 MSST 方法相对能量聚集程度较高, 模态分量个数计算清晰, 很清楚得到信号的模态分量个数。FSST 方法边界效应明显, 且对于频率相近的模态分量不能很好的区分出来, 出现一定的模态混叠现象。MSST 方法基于相位谱压缩变换, 剔除发散能量的时频系数, 提高了相近频率的区分度, 所保留的是时频脊线上时频系数可以清晰的看到各个模态分量的频率。

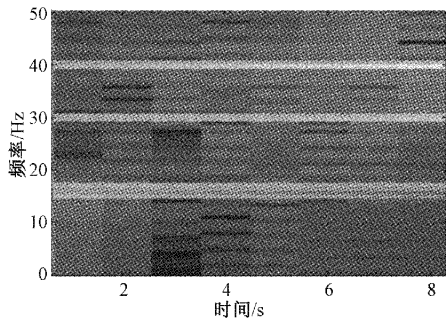


图 3 STFT 时频分析

分别使用 EMD、SET、FSST、MSST 逆变换方法对各模态分量分解重构, 分解重构结果如图 7~10 所示。EMD 方法只能得到 3 个模态分量, 这是因为前两个模态分量频

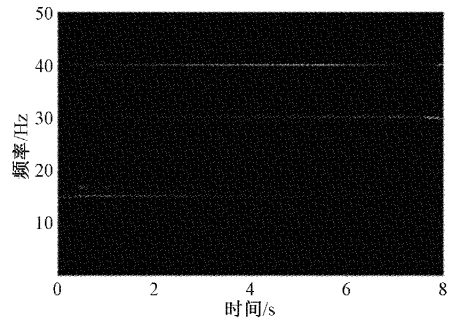


图 4 SET 时频分析

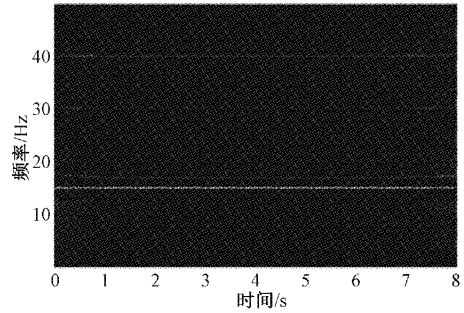


图 5 FSST 时频分析

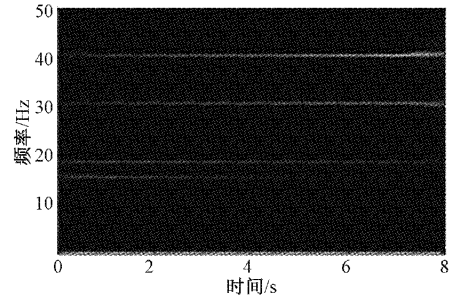


图 6 MSST 时频分析

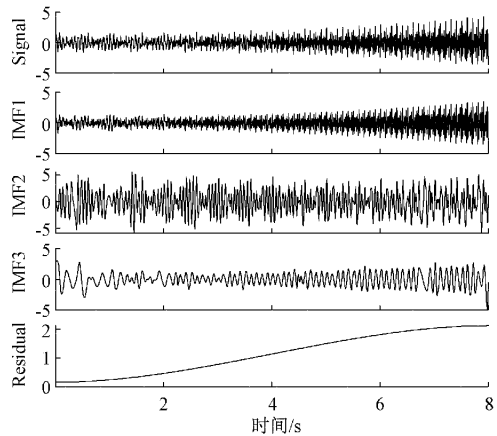


图 7 EMD 单模态分解

率接近, EMD 方法是一种经验模态分解, 不能很好地区分相近的模态分量。FSST 和 MSST 都能正确的分离 4 个模态分量, 但从图中可知 FSST 方法低频的两个模态分量幅

值比 MSST 方法模态分量幅值稍小一些,这是因为 FSST 方法在处理相近低频分量时出现模态混叠现象,剔除多余的幅值能量时,混叠分量频率会产生一定的误差,所以在重构时与原信号产生区别。MSST 方法在处理频率相近的模态分量时,具有更高的频率辨识度,所以在分解重构时可以有更好的恢复各个模态分量信号。

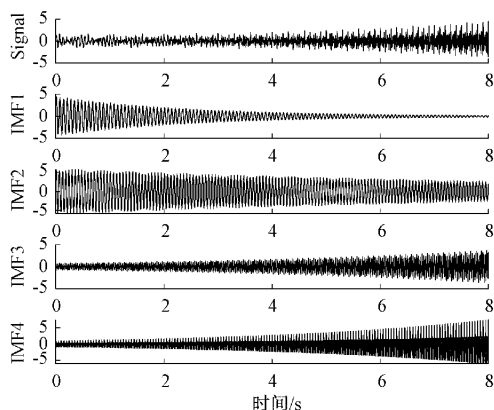


图8 SET单模态分解

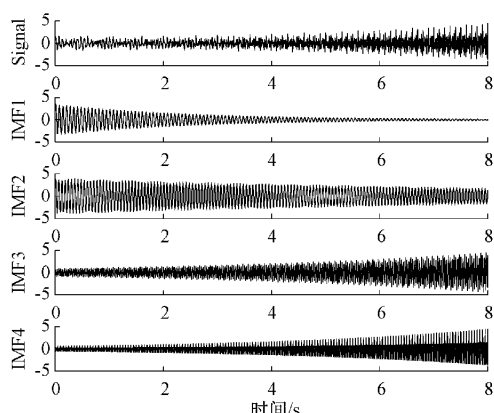


图9 FSST单模态分解

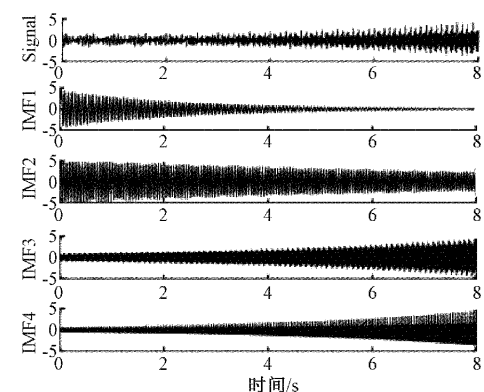


图10 MSST单模态分解

最后,用希尔伯特变换(HT)分别对提取的各个分量信号进行参数辨识。因为EMD分解出现了两个模态混叠在一起,只考虑FSST和MSST分解重构,计算其频率,阻尼

比,衰减性等。表2为两种不同方法参数辨识的结果,由表可知,本文所提MSST-HT方法辨识误差更小,精度更高。

表2 理想信号参数辨识结果

方法	模态分量	频率/Hz	频率误差/%	阻尼比	衰减性
FSST	IMF1	15.32	0.31	0.056	衰减
	IMF2	16.76	0.23	0.019	衰减
	IMF3	30.14	0.15	-0.025	发散
	IMF4	40.28	0.27	-0.047	发散
MSST	IMF1	15.08	0.06	0.054	衰减
	IMF2	17.02	0.01	0.019	衰减
	IMF3	29.97	0.02	-0.024	发散
	IMF4	40.03	0.02	-0.041	发散

3.2 实际信号算例分析

在风能,光伏等新能源发电系统中,次同步振荡的出现给电力系统安全稳定运行带来严峻挑战。选取内蒙某风电场次同步振荡事故A相电压录波数据,信号中含有9.1、42.5、54.3 Hz 3个不同频率的模态分量,分别用文中提出的FSST-HT方法和MSST-HT方法对其进行分析,重构各模态分量信号,辨识参数。录波数据图如图11所示。

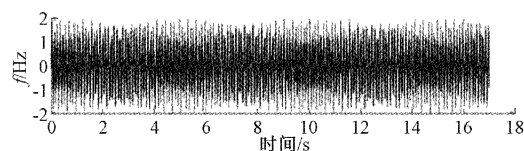


图11 A相电压录波数据图

首先,分别使用STFT、FSST、MSST方法对录波数据进行频域变换,结果如图12~14所示,由图12~14可知,FSST时频分布频带较宽,无法准确得到电流中各频率分量成分,若2个分量频率相近,则可能发生模态混叠,不能准确分解各频率分量。FSST和MSST这两种方法都可以准确将电流中各频率分量分开,得到精细化的时频曲线,使频率能量压缩到主频率范围,很好的识别出3个不同的模态分量。但是,MSST方法比FSST方法频率压缩更加集中,剔除了主要频率附近的多余分量,准确的反应了各分量频率信息,误差更小,且抗模态混叠处理更加优异,通过快速的幅值压缩得到主要频率及主要次同步振荡的主要频率个数信息。

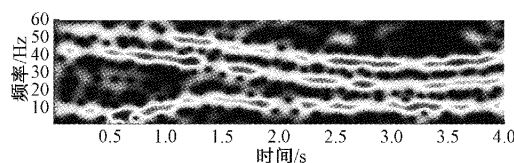


图12 STFT时频分析

然后,用FSST、MSST逆变换对检测出来的各个模态分量进行分解重构,结果分别如图15和16所示,两种方法

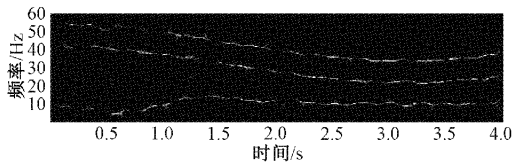


图 13 FSST 时频分析

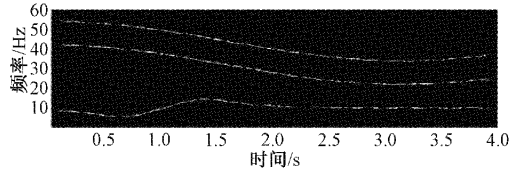


图 14 MSST 时频分析

都可以提取 3 个模态分量,FSST 方法因为模态分量接近以及存在其他噪声,时频分析出现了误差,干扰后续逆变换的单模态分量提取重构。MSST 逆变换方法因为时频分析精准,每个模态分量频率准确,对于压缩后的模态分量进行提取,剔除了主要频率附近的噪声系数,各模态分量的误差更小,精度更高。

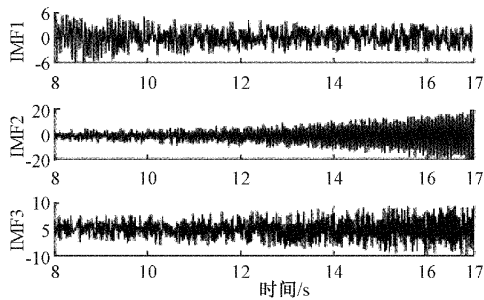


图 15 FSST 单模态分解

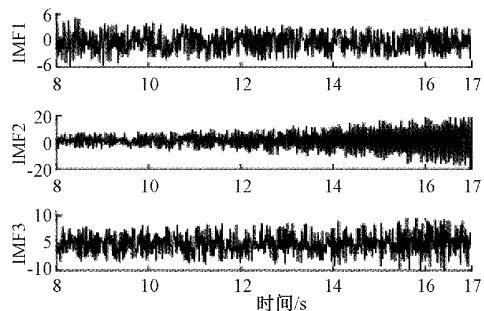


图 16 MSST 单模态分解

最后使用 HT 变换对 FSST 方法和 MSST 方法分解出来的单模态分量进行参数辨识,分别计算两种方法提取出来的单模态分量的频率、阻尼比和衰减性。对比两种不同方法,计算参数结果如表 3 所示。

由表 3 可知,MSST-HT 方法比 FSST-HT 方法辨识精度高,得到的频率、阻尼比等参数误差小。首先,这是因为 MSST-HT 方法可以压缩到各模态分量频率脊线上,具有

表 3 录波实例参数辨识结果

方法	模态分量	频率/ Hz	频率 误差/%	阻尼比	衰减性
FSST	IMF1	9.22	1.31	0.001 6	发散
	IMF2	42.82	0.77	0.001 6	发散
	IMF3	53.96	1.62	-0.003 2	衰减
MSST	IMF1	9.08	0.22	0.001 5	发散
	IMF2	42.53	0.07	0.001 5	发散
	IMF3	54.22	0.14	-0.003 5	衰减

更高的频率分辨率和时间分辨率,频率分量的误差小。其次,MSST 方法的逆变换是一种无损可逆变换,对每一个分量重构误差小,不影响后续对单一模态分量参数的准确辨识。

4 结 论

针对在次同步振荡参数辨识过程中,因为各模态分量频率接近而出现的模态混叠现象,提出 MSST-HT 方法对信号进行时频分析,辨识参数。理想信号仿真与实际录波数据分析结果表明:

1)MSST 在 FSST 的基础上通过对信号幅值和相位的高阶泰勒展开得到的调制算子,可以对瞬时频率进行修正,得到更精确的瞬时频率估计,不仅能增强信号时频分布聚集程度,也能提高各模态分量重构精度。

2)MSST 方法对各模态分量频率进行压缩时,只保留时频脊线上的系数,去除多余频率能量,可以得到更加精细的频率曲线。同时克服了 STFT 方法对于相近的频率产生的模态混叠现象,改善了传统方法不能很好辨识相近频率的现象。但实际工程测试中与实际信号还存在误差,且时频聚集程度还有提升空间,还需要进一步优化算法,以期达到更好地效果。

3)MSST 方法是一种可逆变换,可以无损的恢复原信号,相比较传统的 EMD 方法不能很好的分解模态分量相近信号,FSST 方法可以得到全部的模态分量,同时对比 FSST 方法,分解误差更小。

参考文献

- [1] 汪威,张开颜,刘亚川,等.一种新能源动力电池顶盖平面度检测方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(2):218-225.
- [2] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.电力系统新型振荡问题浅析[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2821-2828,3133.
- [3] 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.
- [4] 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):1192-1203.

- [5] 王建华,杨延西,马晨.基于价值函数的二维小波变换小波脊提取算法[J].仪器仪表学报,2017,38(12):2915-2923.
- [6] 袁家雯,刘文波,杨孟交,等.基于希尔伯特黄变换的雷达HRRP目标识别[J].电子测量技术,2018,41(14):78-82.
- [7] 白旭,胡辉.基于快速傅里叶变换和互相关的多频微弱信号重构法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(3):168-175.
- [8] 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.
- [9] 喻敏,王斌,陈绪轩,等.同步挤压小波变换在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J].电工技术学报,2017,32(6):14-20.
- [10] 童涛,张新燕,孔德钱,等.基于同步挤压变换的电力系统谐波分析[J].太阳能学报,2021,42(8):49-56.
- [11] GANG Y, ZHONGHUA W, PING Z. Multisynchrosqueezing transform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 5441-5455.
- [12] OBERLIN T, MEIGNEN S, PERRIER V. The Fourier-based synchrosqueezing transform [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE, 2014:315-319.
- [13] 张晓琳,冯晓媛,于航,等.基于HHT的转动惯量测量技术研究[J].仪器仪表学报,2022,43(6):38-45.
- [14] 杨孟交,刘文波.巴克豪森信号希尔伯特黄变换分析及特征提取[J].电子测量技术,2017,40(8):180-183,188.
- [15] 李亦佳,王静,王正方,等.基于多重同步压缩变换的微震信号去噪方法研究[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(2):486-500.
- [16] 郑茂然,陈朝晖,余江,等.基于MSST的高压直流线路故障定位方法[J].南方电网技术,2022,16(3):8-15,125.

作者简介

任旭虎,硕士生导师,副教授,主要研究方向为智能测控技术、智能信息处理。

E-mail:lidw365@163.com

王浩(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为信号检测与处理、电力系统次同步振荡的分析与抑制。

E-mail:396601445@qq.com

刘通,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡的分析与抑制。

E-mail:852311969@qq.com

王丽娜,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡的分析与抑制。

E-mail:1071614270@qq.com

丁忠尧,学士,主要研究方向为信号检测与处理。

E-mail:38348814@qq.com