

Study of Method Improvement for Racking Frequency of Multi-Source Non-Stationary Signal

Xiangyang Zhao, Peipei Li

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing
Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn, lpp630727@163.com

Received: Nov. 24th, 2011; revised: Dec. 10th, 2011; accepted: Dec. 14th, 2011

Abstract: The applications of Smart MicroGrid are placed more and more attention, and it is becoming one of the hot issues. There are multiple generation sources and loads in the power generation system, and its system current consists of a number of frequency components. In addition, because of the complexity of Smart MicroGrid, the power system is vulnerable to interference and influence, and the current have characteristics of non-stationary. In such cases, this paper proposes the improved method base on short-time Fourier transform and phase modeling. It can effectively realize the separation and frequency tracking of multi-source non-stationary signal, suitable for the signal that energy of each component is very different. At the same time it can accurately extract initial phase estimation of each frequency component of signal.

Keywords: Smart Micro-Grids; Short Time Fourier Transform; Phase Modeling Method; Frequency Tracking

多源非平稳信号频率跟踪的改进方法研究

赵向阳, 李培培

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京
Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn, lpp630727@163.com

收稿日期: 2011年11月24日; 修回日期: 2011年12月10日; 录用日期: 2011年12月14日

摘要: 智能微电网的应用越来越受到重视正逐渐成为研究的热点之一, 其发电系统中存在多个发电源和负载, 其系统电流也是由多个频率分量而组成。由于智能微电网的组成复杂性, 其发电系统更容易受到干扰和影响, 因此系统电流会表现为非平稳特性。本文针对此类情况, 提出了基于短时傅里叶变换, 然后采用了相位建模的改进频率估计方法, 对智能微电网的系统信号进行分析处理, 有效实现了多分量非平稳信号的分离和频率跟踪, 并且适用于能量相差悬殊的多分量信号, 同时可以准确提取各频率分量的初始相位估计。

关键词: 智能微电网; 短时傅里叶变换; 相位建模法; 频率跟踪

1. 引言

随着电网可靠性、能源短缺及环境问题的日益突出, 智能微电网很快被提上议程。智能电网能够很好解决能源的问题, 智能电网可以通过智能方案和创新技术, 集成可再生能源, 降低能耗, 提高效率等。智能微电网存在多个发电单元和多个不同特征智能负载, 包括, 光伏发电单元、风力发电单元、锂电池储

能单元、超级电容单元, 以及开关柜、滤波补偿、智能负载等^[1]。因此, 智能电网中的电流是由不同特征的频率分量而组成, 且有可能存在不同程度的电压波动, 此时电压信号为非平稳信号, 需要进行此类信号进行研究。因此, 对电能质量建立起监测和分析系统, 在线性稳定的情况下对系统的频率进行测量, 以及在时变非平稳的情况下对系统频率变化趋势进行跟踪就非常必要。

对于平稳信号,周期法即过零检测法发展历史最为长远。文献[2,3]中讨论了利用连续的三点交流电压采样值计算频率法、高次修正函数法和最小二乘多项式曲线拟合法等改进算法。FFT算法由于其本身优点在电力系统频率的测量中的研究和应用非常广泛^[4]。对于非平稳估计其瞬时频率、追踪频率变化是一项非常重要的工作。瞬时频率估计是时频分析的典型应用,其估计方法主要有三类:相位差分法、相位建模法和时频分布法三大类^[5,6]。相位差分法只适用于单分量信号频率估计,而相位建模法则适用于多分量信号。此外,文献[7,8]中讨论了离散小波变换及小波包分析在电能质量频率测量和估计中的应用。文献[9,10]讨论了连续小波变化在故障诊断以及电力系统谐波分析等方面的原理和应用,实现信号的频率跟踪。本文在以上研究的基础上提出一种改进算法:基于短时傅里叶变换,并采用了相位建模的频率估计方法。主要优点是可以分辨能量相差悬殊的多分量非平稳信号,并对各分量信号进行初相位估计。

2. 短时傅里叶与相位建模法原理

短时傅里叶变换是时频分析发展过程中的一个里程碑,它最早揭示非平稳信号特征,而且被广泛应用于众多的工程问题当中。它在傅立叶变换的框架内,将非平稳信号看作是由一系列短时平稳信号构成的,短时性通过在时域加窗实现的,并通过平移参数来平移覆盖整个时域。即,采用一个窗函数与待分析非平稳信号相乘,实现在窗口附近的开窗和平移,再进行傅立叶变换。所以短时傅立叶变换(STFT)又称为加窗傅立叶变换。给定一个时间宽度很短的窗函数 $g(t)$,它沿着时间轴滑动,则信号 $x(t)$ 的STFT变换定义为:

$$Sf(t, \xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)g(\tau-t)e^{-i\xi\tau}d\tau \quad (1)$$

可见,正是由于窗函数 $g(t)$ 的存在使短时傅里叶变换具有局部特性,它既是时间函数,也是频率函数。

对于STFT变换来说,短窗函数 $g(t)$ 的形状及窗口宽度的选择是关键,不同类型窗函数的频率特性不同,窗口宽度的选择应适当兼顾时间和频率分辨率。作者尝试了Blackman窗、Hamming窗、Hanning窗、Kaiser窗、Gaussian窗、Rectangular窗和Bartlett窗

等,最后选择高斯函数作为窗口函数,它在空域和频域中存在最小的展开,是最佳的时(空)-频域窗口函数。高斯函数的定义式是为:

$$g_a(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a}\right) \quad (a > 0) \quad (2)$$

短时傅立叶变换中存在时间分辨率和频率分辨率的矛盾:窗函数时宽越窄,时间分辨力越高,但这时带通滤波器的通带越宽,频率分辨率也就越低;反之亦然。正因为如此,短时傅立叶变换中存在窗函数选择的矛盾,即必须在时间域和频率域局部化矛盾中寻求一种折中。对于确定的时域局部化要求(给定的时间分辨力),选定窗函数时,总希望在频域也得到局部化最优的结果(即得到最佳的频率分辨率)。折中的依据是被分析信号的时变特性、窗函数的类型及参数。根据作者反复实验比较,当采样频率 $f_s = 1024$,采样点为1024时,窗长为50时为最佳窗长。

假设实信号 $s(t)$ 的解析信号 $z(t)$, $z(t)$ 可用下式表示:

$$z(t) = a(t)\exp(j\varphi(t)) \quad (3)$$

其中: $a(t)$ 为信号的复幅度, $\varphi(t)$ 为信号的相位。通常,可将 $\varphi(t)$ 用有限次项 p 阶多项式表示:

$$\varphi(t) = k_0 + k_1t + k_2t^2 + \dots + k_pt^p \quad (4)$$

式中, $k_i (i=1,2,3,\dots,p)$ 为 i 次项的系数。已知频率是相位的导数:

$$f_i(t) = \frac{d}{dt}[\varphi(t)] = i \sum_{i=0}^p k_i t^{i-1} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,对瞬时频率的估计问题转化为多项式系数的估计问题。求解多项式系数一般采用最小二乘估计和最大似然估计法。本文采用采用最小二乘法估计准则。值得说明的是,多项式的阶次 p 的选取要适中,一般情况 $p < 7$ 。

至此可得出瞬入时频率的测量步骤:首先通过短时傅里叶变换获取信号 $x(n)$ 的瞬时相位 $\varphi(n)$,然后列写矩阵方程,矩阵行向量的个数等于 $\varphi(n)$ 的点数,列向量的个数为 $p+1$,应用最小二乘法解矩阵方程得到系数 $k_i (i=1,2,3,\dots,p)$,将所得系数代式(5)即可计算出瞬时频率。

3. 实验验证

3.1. 频率曲线跟踪

为验证上一节中提出的基于短时傅里叶和相位建模法的改进算法，通过计算机仿真得到的信号数据，在 matlab 软件平台上实现算法编程，对仿真信号进行分析处理，从其运行结果及分析中进行算法验证。

由计算机仿真生成含有三个频率分量的信号数据进行实验：

$$x_1(t) = \sin(2\pi f_1 t) + 3\sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_3 t)$$

其中， $f_1 = 100(1 + \cos(2\pi t))$ ， $f_2 = 300(1 + \cos(2\pi t))$ ， $f_3 = 500(1 + \cos(2\pi t))$ 。采样频率为 $f_s = 1024$ Hz，采样长度为 1024 个点。

图 1(a)为基于本文改进算法得到的视频图，图(b)

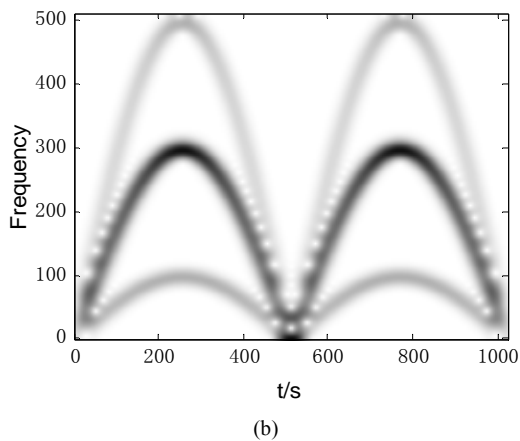
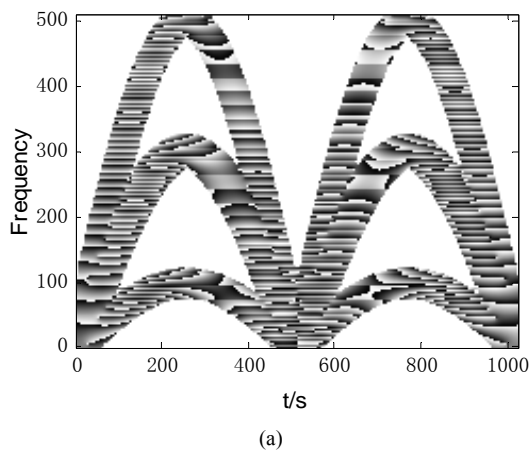


Figure 1. Time-frequency curve of $x_1(t)$: (a) Based on improved Algorithm; (b) Based on STFT

图 1. $x_1(t)$ 时频曲线：(a) 基于本文改进算法；(b) 基于短时傅里叶

为传统短时傅里叶时频图。有图可知，当三个分量幅值相差不大时，通过两种方法都可以追踪到信号各频率分量的时频曲线：频率值随时间以正弦规律变化，个频率分量峰值分别为 100、300、500。频率跟踪效果良好。但是，当不同分量幅值相差比较大时，通过基于短时傅里叶的分析方法则无法得到理想的结果，因为在这样的情况下无论是基于小波变换还是基于短时傅里叶变换的时频分析方法，在时频图上只能看到幅值(能量)绝对占优的频率分量，而对于相差非常小的能量频率分量无法在时频图上反映出来。本文提出的改进算法的优势在于可以有效分析上述类型信号，通过下述信号进行仿真验证：

$$x_2(t) = \sin(2\pi f_1 t) + 200\sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_3 t)$$

图 2 为对信号 $x_2(t)$ 分别采用本文中改进时频跟

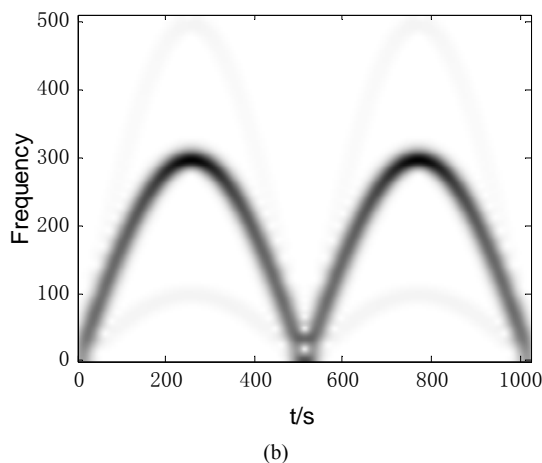
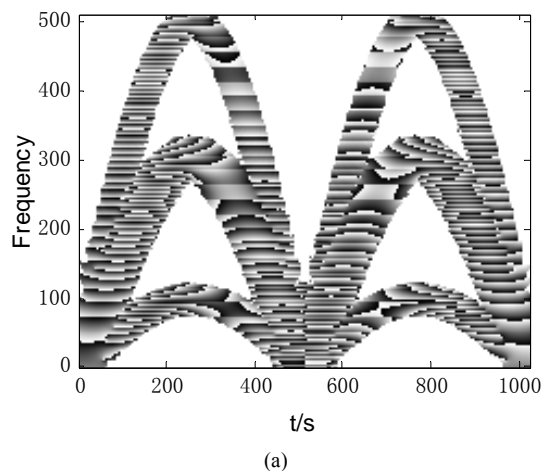


Figure 2. Time-frequency curve of $x_2(t)$: (a) Based on improved Algorithm; (b) Based on STFT

图 2. $x_2(t)$ 时频曲线：(a) 基于本文改进算法；(b) 基于短时傅里叶

踪算法和采用短时傅里叶传统时频算法的结果。信号 $x_2(t)$ 中的 3 个频率分量的幅值分别为 1、200、1，其不同分量幅值相差非常悬殊。由图 2(b)可知，基于短时傅里叶的传统时频分析方法无法观察到所有频率分量，只能显示幅值为 200 的频率分量 f_2 。由图 2(b)可知，虽然信号的 3 个频率分量幅值相差 200 倍之多，采用基于本文改进算法的仿真结果，仍然可以清晰分辨出三个频率分量。且 3 个频率分量的频率值随时间以正弦规律变化，频率峰值以此为 100、300、500(从下到上)，频率跟踪结果与仿真信号相同，检测效果良好。由图 2 对比可知，本文提出的基于短时傅里叶变换和相位建模的改进频率估计方法，可以识别非平稳多源信号中幅值非常微小的频率分量(微弱信号分量)的频率曲线，这在智能微电网的频率跟踪领域有非常重要的现实意义。

3.2. 初始相位估计

上述信号分析中，没有考虑频率分量初相位因素，在实际中，很多情况下各频率分量初相位并不相同。而本文提出的时频分析方法亦可识别估计频率分量的初相位。考虑初相位不同的三频率分量信号：

$$x_3(t) = \sin\left(2\pi f_1 t + \frac{\pi}{3}\right) + 200 \sin(2\pi f_2 t) + \sin(2\pi f_3 t)$$

图 3 为对信号 $x_3(t)$ 采用本文改进时频跟踪算法的时频图。由图 3 可知，信号 $x_3(t)$ 的三个频率分量存在不同的初相位，反映在时频图中，三个分量的频率变化曲线相互交错(达到最大值和最小值的时间不同)，通过时频图上的时间差，转换为分频分量间不同初相位。由算法实现的初始相位的估计，得到计算结果，频率分量 f_1 的初始相位为： 0.335π 。计算误差很小，初始相位估计比较准确。

4. 结论

通过本文提出的基于短时傅里叶变换和相位建

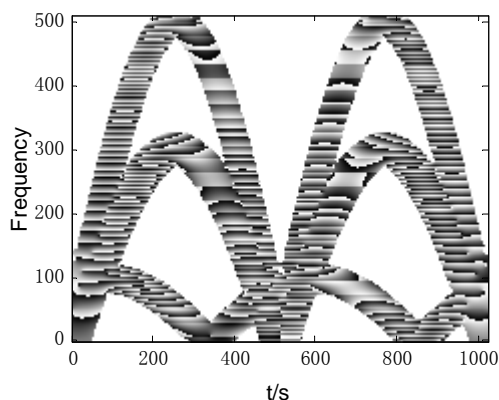


Figure 3. Time-frequency curve of $x_3(t)$

图 3. $x_3(t)$ 时频曲线

模法的改进算法，有效实现了智能微电网中多源非平稳信号的频率估计，且适用于个分量幅值相差非常大的情况，这一点与其他频率估计算法相比有很大优势，同时本算法也可以准确的实现信号中各频率分量的初始相位估计。

参考文献 (References)

- [1] 张梦. 浅谈智能电网[J]. 中国建设教育, 2011, 2(3-4): 93-95.
- [2] 张瑛, 牟龙华, 刘军. 电力系统频率测量与跟踪[J]. 电力系统及其自动化学报[J]. 2003, 15(3): 35-936.
- [3] 吴杰康, 龙军, 王辑祥. 基于数字微分算法的系统频率快速准确测量[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 93-97.
- [4] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅立叶测频算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 27(12): 48-49.
- [5] 冯松立, 陈高平. 瞬时频率估计的相位建模法及 Matlab 的实现[J]. 中国测试技术, 2003, 2(3): 38-42.
- [6] 陈平. 信号瞬时频率的估计方法及其应用[D]. 山东大学, 2007.
- [7] 王肖芬, 徐科军. 基于小波变换的基波提取和频率测量[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(2): 148-151.
- [8] 周林, 夏雪, 万蕴杰等. 基于小波变换的谐波测量方法综述[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 67-74.
- [9] 崔雪梅, 孙才新, 李剑等. 用复小波提取变压器局放脉冲信号特征的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(2): 199-201.
- [10] 赵成勇, 何明锋. 基于复小波变换相位信息的谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 38-42.