

一种提高谐波测量精度的新算法

陈华丽, 陆怀恩, 曾云, 李裕能

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 传统的谐波测量方法产生频谱混叠和频率泄漏, 测量精度不高, 这是一系列窗函数和快速傅立叶变换的主要缺点。本文将一种延长周期法用于谐波测量, 给出了算法表达式, 并在各种性能参数与仿真结果上和以往的方法作了比较, 说明新方法的确从测量步骤、频率分辨率和准确程度上都优于以往的方法。

关键词: 谐波测量; 傅立叶变换法; 补零法

中图分类号: TM711 TM930 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2003)03-0040-04

1 引言

谐波是电力系统中一个不容忽视的问题, 而且随着电子技术的发展, 各种电子设备的广泛应用, 使电力系统谐波问题日趋严重。按照目前的水平, 消灭谐波还不可能, 因此必须对谐波进行管理和控制, 把系统中的谐波影响限制在可接受的范围内, 谐波测量是谐波管理中非常重要的一环。

目前谐波测量用的最多的方法是快速傅里叶变换, 但傅里叶变换会产生频谱混叠、频谱泄漏和栅栏效应。怎样减小这些影响是研究的主要任务, 通过加适当的窗函数, 选择适当的采样频率, 或进行插值, 尽量将上述影响减到最小。但随之而来的是关于谐波测量的又一个问题, 即随着负荷的改变, 电力系统中的谐波类型和次数也会随之改变, 传统的测量方法在处理动态变化的谐波信号方面有与生俱来的缺点。我们采用的解决办法是, 在信号上加一个适当的窗, 得到一个有限长度的数据序列, 使频谱相对稳定, 然后用补零法来提高频率分辨率。但新的延长周期法既简化了步骤, 又获得同样准确或更准确的频谱图。

2 传统的谐波测量方法^[1]

2.1 离散傅立叶变换

设有一长度为 N 的离散序列 $x[n]$, 它的离散傅立叶变换定义为:

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn}, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots, N-1$$

其中: $W_N = e^{-j2\pi/N}$, k 是谐波次数, 下面简单地介绍几种最常用的窗函数。

2.2 窗函数

2.2.1 矩形窗

这种窗函数在整个序列长度上都具有统一数值:

$$w(n) = 1, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1$$

它所对应的频谱函数为:

$$w(\omega) = \frac{\sin(N\omega/2)}{\sin(\omega/2)} e^{-j\omega(N-1)/2} = D(\omega) e^{-j\omega(N-1)/2}$$

$D(\omega)$ 为狄义赫利核。矩形窗在给定的长度 N 下有最窄的主瓣, 但是在常用的几种窗中有最大的旁瓣, 同时主瓣宽度与窗的长度成反比。

2.2.2 $\cos(x)$ 窗

这是一族余弦序列 $\cos(x)$, 这里的指数是一个整数。

偶对称表示的加权序列为:

$$w(n) = \cos\left(\frac{n\pi}{N}\right), \quad n = -\frac{N}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N}{2}$$

用于 DFT 的单边表示的加权序列为: (下面都只提单边序列)

$$w(n) = \sin\left(\frac{n\pi}{N}\right), \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1$$

一般取 $M=1, 2, 3, 4$, 但常用的窗函数 $M=2$, 因为随着余弦指数的增大, 旁瓣压低主瓣变宽, 影响了对小信号的检测能力。

(1) $M=1$ 余弦加权

单边表示:

$$w(n) = \sin(n\pi/N), \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1$$

(2) $M=2$ 余弦平方或汉宁窗

单边表示:

$$w(n) = \sin^2\left(\frac{n\pi}{N}\right) = 0.5[1 - \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right)], \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1$$

它所对应的频谱函数为:

$$w(\omega) = \frac{1}{2} D(\omega) - \frac{1}{4} D\left(\omega - \frac{2\pi}{N}\right) - \frac{1}{4} D\left(\omega + \frac{2\pi}{N}\right)$$

当 $m=2$ 时还有海明窗,布莱克曼窗,Rife-Vincent (I)窗,Rife-Vincent窗,Dolph-Chebyshev窗,Rife-Vincent (III)窗,4项 Blackman-Harris窗等。

海明窗:

$$w(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(2\pi n/N\right)$$

布莱克曼窗:

$$w(n) = 0.42 - 0.50\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right)$$

四种常见窗函数的频谱如图 1 所示。

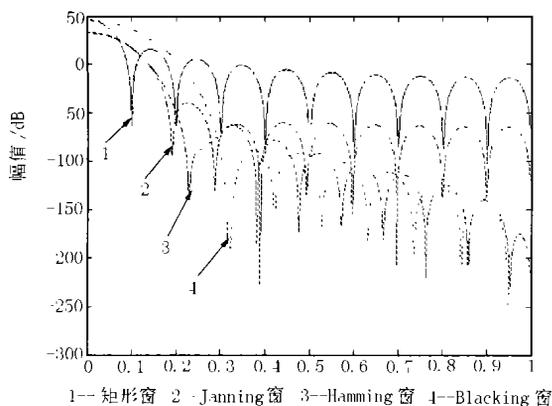


图 1 四种常见窗函数的频谱图

Fig. 1 Spectrum of four kinds of windows function

从图 1 中可看出, m 越大加权序列越平滑,旁瓣跌落越快速,但主瓣变得越来越大。

3. 延长周期法^[2]

3.1 延长周期法

在 FFT 算法中常用补零法来提高频率分辨率。这种方法可表示为:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{mN-1} x[n] w[n] W_{mN}^{kn}$$

其中

$$W_{mN} = e^{j2\pi / (mN)}, m \text{ 是整数。}$$

$$x[n] = \begin{cases} \text{数据序列}, & 0 \leq n < N-1 \\ 0, & N \leq n < mN-1 \end{cases}$$

$$w[n] = \begin{cases} \text{数据窗函数}, & 0 \leq n < N-1 \\ 0, & N \leq n < mN-1 \end{cases}$$

例如,一个基波为 60 Hz 的含有谐波的电力系统电压信号,用频率为 15.36 kHz 的采样频率进行采样,FFT 变换的结果是,每个周期的数据序列长度为 256,能检测到 128 次谐波信号。通过补 63 × 256 个零,变成 64 × 256 点。在补零法中,频率分辨率可提高到 0.9375 Hz ($F = \frac{f_s}{N} = \frac{15.36 \times 10^3}{64 \times 256} = 0.9375$)。

延长周期法把在一个采样周期内采到的 N 个

点扩展任何整数倍,可提高频率分辨率和频谱的准确性。它的表达式为:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{mN-1} x[n] W_{mN}^{kn} \quad (1)$$

其中 $x[n] = \sum_{r=0}^m x[n + rN]$, r, m 都是整数。

和补零法相比,它少乘了一项窗函数,所以延长周期法减少了运算步骤。一般情况下, n 点 FFT 变换就足够了,因为原来的信号可以重构,但它不能测量间谐波,因此,在时域内经常使用补零法,这样傅立叶频谱可以被充分采样,它的重要特征也可很明显地表现出来。从分辨率的角度来考虑,补零法和插值法^[3]达到的目的是是一样的,但插值法不能给出一个足够准确的频谱图,也不能给出频谱峰值的位置和峰值的大小,而延长周期法是通过延长采样周期的整个序列来提高频率分辨率,用的是真实值,因此可以克服上述问题。补零法和延长周期法最大的区别是:补零法除了采样周期内的是真实值外,延长的部分都是零,而延长周期法用的全是真实值。下面从窗函数的各种性能指标来比较新算法和补零法的差别:

(1) 等效噪声带宽:在测量频谱 S_0 时,随着信号一起进来的噪声也将在加权频谱函数的频域内累计起来并作为谱线 S_n 。谱值的偏置量一并输出,这个偏置量的大小,一方面决定于噪声大小,另一方面决定于加权函数 $w(\cdot)$ 的带宽。为了比较各种加权条件下的噪声输出,采用比较噪声带宽这个指标,引入了等效噪声带宽这个概念,定义为

$$B_n = \frac{\frac{N_0}{T} \sum_n^2 (nT)}{[\sum_n (nT)]^2} \quad (2)$$

(2) 处理增益:变换处理后输出的信噪比与输入的信噪比之比

$$PG = \left(\frac{S_0/N_0}{S_i/N_i} \right) = \frac{[\sum_n v(nT)]^2}{\sum_n v^2(nT)} = \frac{1}{B_n} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得,等效噪声带宽和处理增益成反比,因此处理增益要大,等效噪声带宽必须要小。

(3) 栅栏损失:因为信号频率位于两个相邻分辨单元之间而造成的损失。这种损失越小,说明测量方法越有效。

此外,还有最小可分辨率带宽、重叠相干、最大旁瓣电平、扇形损失、频率分辨率等。比较结果如表 1。

表 1 加矩形窗和汉宁窗的补零法与新算法的参数比较

Tab. 1 Comparison of operation parameters of the zero padding method with the Rectangle window and the Hanning window to the Proposed method ($m = 64$)

参数	补零法		新算法
	矩形窗	海宁窗	
主瓣宽度	$2f_s/N$	$4f_s/N$	$2sf_s/(mN)$
主瓣 3dB 处宽度	$0.89f_s/N$	$1.44f_s/N$	$0.89f_s/(mN)$
主瓣 6dB 处宽度	$1.21f_s/N$	$2f_s/N$	$1.21f_s/(mN)$
最大旁瓣电平 (dB)	-13	-32	-43
旁瓣跌落速率 (dB/oct)	-6	-18	-46
相干增益	1.0	0.5	1.0
等效噪声带宽	f_s/N	$1.5f_s/N$	$f_s/(mN)$
处理增益	0	1.76	0
扇形损失	3.92	1.42	$0.01a$
最差情况下的处理损失	3.92	3.18	$0.01a$
频率分辨率	f_s/N	$2f_s/N$	$f_s/(mN)$

3.2 算法的实现步骤

获得数据是在一个带有 16 位模数转换界面的 PC 机上进行的,它包括以下几步:

- (1) 测基波频率,定采样频率;
- (2) 测量;
- (3) 保存数据;

数据分析软件包括补零法和延长周期法。其中补零法软件又包括:

- (1) 装数据;
- (2) 分离出平均值;
- (3) 乘窗函数;
- (4) 补零;
- (5) FFT 变换;
- (6) 计算 THD 和绘制分析结果。

延长周期法包括 5 步,即比补零法少第 (3) 步。前面的方法是传统的谐波分析方法,为了减少 FFT 误差,分离出信号的平均值是必要的,同时窗函数的应用可以减少频谱泄漏。在实际的电力系统中通常负荷不稳定,频率就会发生波动,因此在使用延长周期法进行测量时,在每次测量之前必须先用频率测试仪测出实际的基波频率,选择恰当的整数倍周期,可有效地减少栅栏效应和频率泄漏。

4 仿真研究

通过分析一个基频为 60 Hz 的方波,依次采用加矩形窗补零法、加汉宁窗补零法和延长周期法。

从图 2 可看出,延长周期法可给出波峰最准确的位置,在动态情况下,频谱测量要求有一个变化的窗口,这个窗口随时都满足有最窄的主瓣和最低的旁瓣。我们已经证明延长周期法满足这一要求。图 2 中延长周期法清晰稳定的频谱图也证实了这一点。

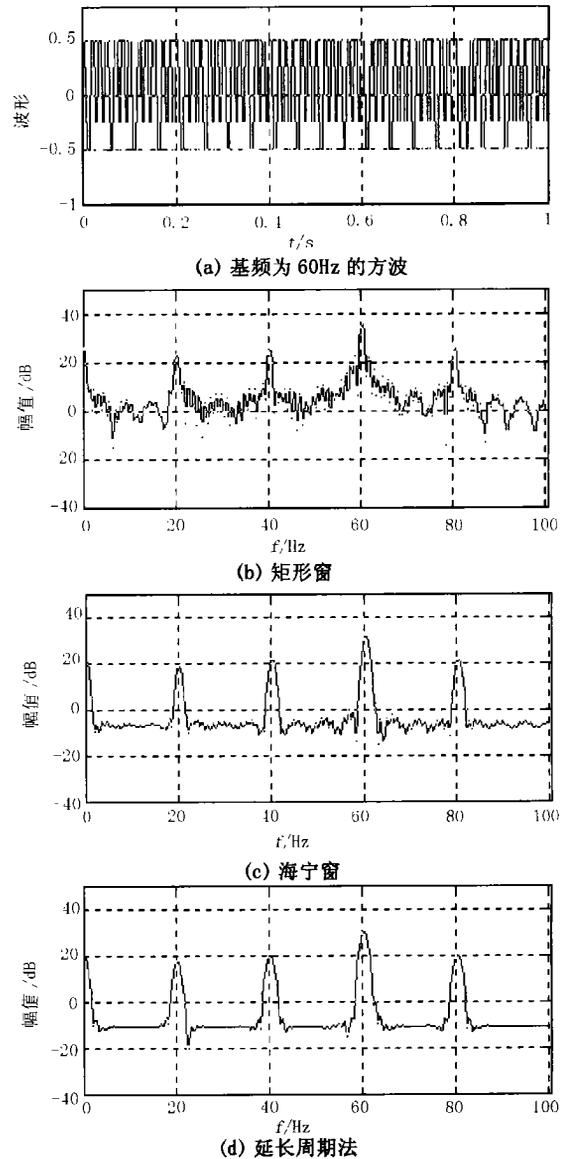


图 2 仿真结果

Fig. 2 The simulation results

5 结论

本文将处长周期法用于谐波测量,该方法和传统的傅立叶变换法相比,有效地避免了频谱混叠、频谱泄漏和栅栏效应。在表 1 中,比较了补零法(加矩形窗、汉宁窗的情况下)和延长周期法的各种性能指

标。从表中可看出,用延长周期法分析谐波频谱的主瓣宽度是最窄的,而且,它的等效噪声宽度、扇形损失、最差情况下的处理损失都更小。和补零法相比,在同样达到 0.9375 的分辨力的情况下,测量起来步骤更简洁,而且频谱图更准确。

参考文献:

- [1] 孙仲康. 快速傅立叶变换及应用[M]. 人民邮电出版社,1982.
- [2] Shur-Li LU, Chin E. LIN. Power frequency harmonic measurement Using integer periodic extension method[J]. Electric

Power system Research,1998,40:107~115.

- [3] 潘文,钱俞寿,周鸷. 基于加窗插值的 FFT 的电力谐波测量理论[J]. 电工技术学报,1994,(2):53~56.

收稿日期: 2002-06-27; 修回日期: 2002-09-09

作者简介:

陈华丽(1978-),女,硕士研究生在读,主要从事电力系统谐波测量;

李裕能(1948-),男,教授,硕士生导师,主要从事电能质量分析,电网中的谐波测量、分析等。

A noted method to advance accuracy in harmonic measurement

CHEN Hua-li, LU Hua-en, ZENG Yun, LI Yu-neng

(Wuhan University, Wuhan, 430072 China)

Abstract: The conventional harmonic measurement methods cause aliasing and spectral leakage, so the measurement accuracy is not high. A novel method of harmonic measurement termed the integer periodic extension (IPE) is proposed and the IPE algorithm is given and is compared with padding zeros method in some characteristics and from test results, which show that the proposed IPE is an effective method and superior to others in aspects of measurement, frequency solution, accuracy and so on.

Key words: harmonic measurement; Fourier transform; the zero padding

(上接第 39 页) 既具有高可靠性和优异的实时性能,又具有良好的开放性和扩展性,许继日立公司基于此平台开发完成的继电保护系列产品已经通过了国家级鉴定,该系列产品还取得了良好的运行业绩,实践证明在继电保护中的应用是十分成功的。

继电保护只是嵌入式系统应用的一个方面,嵌入式系统在未来有着极为广阔的发展空间。要提升我国嵌入式工业的水平,不仅要发展嵌入式微处理器产业,更要发展拥有自主知识产权的嵌入式软件系统,机遇和挑战并存,我们可以借鉴 TRON 的做法加强行业联合,避免无序竞争,通过加强标准化、工程化管理及标准建设以确保我国嵌入式产业健康发展。

参考文献:

- [1] 杨奇逊. 微型机继电保护基础[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [2] 贺家李. 电力系统继电保护技术的现状与发展[J]. 中国电力,1999,(10).

收稿日期: 2002-08-05; 修回日期: 2002-11-21

作者简介:

王若醒(1972-),男,工学硕士,从事继电保护产品开发和软件平台研究;

赵志华(1966-),男,工学硕士,从事继电保护产品开发;

张周胜(1969-),男,工学硕士,从事继电保护产品开发。

The application research of RTOS conforming to uITRON specification in digital relay unit

WANG Ruo-xing, ZHAO Zhi-hua, ZHANG Zhou-sheng, WANG Zhi

(Xi Hitachi Electric Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The article introduces RTOS's application background, uITRON specification and HI-SH7 OS's main characteristics. Then research about HI-SH7 being applied to common soft platform in new digital relay unit. Now, a series of relay products applying HISH7 run well in power system.

Key words: relay protection; uITRON; RTOS