

关于电力系统 FFT谐波检测存在问题的研究

郑恩让,杨润贤,高森

(陕西科技大学电气与电子工程学院,陕西 咸阳 712081)

摘要: 快速傅立叶变换 FFT(Fast fourier transform)是应用最广泛的一种谐波检测方法,但利用 FFT进行谐波测量时存在较大的误差,影响谐波分析结果准确性,无法直接应用于电力系统谐波分析中。对使用 FFT进行电力系统谐波检测时存在的问题从产生原因和改进方法两个方面进行了详细分析和总结。分析了目前已有的改善这些问题的新途径和新方法的优缺点,表明这些方法在不同方面提高了信号的分析精度和谐波测量参数的可信度。最后对预防、补偿电力系统 FFT谐波检测存在问题的措施进行了总结并提出了看法。

关键词: 快速傅立叶变换; 谐波检测; 电力系统; 频谱泄漏; 栅栏效应; 窗函数

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)18-0052-06

0 引言

近年来,随着电力电子技术的快速发展,各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛,使电网中产生了大量的高次谐波,造成了电压电流波形发生严重的畸变。当电网中存在的谐波成分超过了限制标准时,将严重影响电力系统和用电设备运行的安全性、可靠性、稳定性和经济性,同时也严重污染了周围的电气环境。因此,电力系统中谐波分量的快速、准确检测对电能质量的治理具有十分重要的意义。FFT是当前谐波检测中应用最为广泛的一种谐波检测方法,它实质上是离散傅立叶变换(DFT)的一个高效率算法。但是利用FFT进行谐波分析主要存在着频谱混叠、频率分辨能力、栅栏效应及频谱泄漏等问题,使分析的信号参数(频率、幅值和相位)不准,尤其是相位误差很大,无法满足电力谐波测量要求。针对FFT算法应用于谐波检测带来的这几种主要误差,国内外许多学者提出了很多误差校正方法,本文对这些方法进行了归类总结,并综合分析了这些方法的优缺点。

1 FFT谐波分析混叠失真现象

1.1 混叠产生原因

在对连续信号的频率谱进行分析时首先要对其采样,变成时域离散信号后才能用FFT进行谱分析。采样频率 f_s 必须大于最高信号频率 f_c 的两倍时($f_s > 2f_c$)才能得到各次谐波对应的全部频谱。当 $f_s < 2f_c$ 时谐波频率最高只能得到 $f_s/2$ 。由于频谱的周期性,其它各周期中原有的频率高于 $f_s/2$ 的谐波

频谱都将混叠到该周期频率低于 $f_s/2$ 的谐波频谱中去,造成频谱混叠而产生误差。 f_s 越低则产生的频谱混叠误差越大。

1.2 改进方法

减小频谱混叠的方法一般有两种:

1) 模拟滤波^[1]。该方法通过在信号输入通道上加截止频率为 $f_s/2$ 的前置滤波器(防混叠滤波器)对信号进行预处理,能有效地抑制频谱混叠。但由于滤波器的幅频特性不可能是理想的矩形,从而导致信号的幅值和相位产生了失真,给谐波检测带来一定的误差。

2) 数字滤波^[2]。该方法在对信号采样后,用数字滤波的方法对信号进行滤波。其处理精度高、滤波特性好,可以通过改变参数来方便地针对信号处理要求改变滤波器特性。但运算量较大,对系统要求较高。

2 FFT谐波分析频率分辨能力

FFT谐波分析时,需要对频率函数进行抽样,变成离散的序列。设其抽样间隔为 F_0 (频率分辨力),且有采样区间 $T_0 = 1/F_0$ 。对于频率分辨力(F_0 减小)的提高,可以通过增加 T_0 来实现。但由于抽样点数 N 满足 $f_s/F_0 = T_0/T = N$,在 N 给定时, T_0 的增加会引起 T 的增加(f_s 减小),可能引起频谱混叠失真;在 N 一定时,增加采样频率 f_s 会导致 F_0 的增加,使频率分辨力下降。

要在兼顾不产生频谱混叠的基础上提高频率分辨力 F_0 ,一般有两类解决办法。

2.1 对于未采用任何特殊数据处理(未加窗进行数据截断)的情况下

通过增加采样点数 N 来兼顾对谐波高频容量 F_c (高次谐波)的计算能力和获得高的频率分辨力 F_0 ^[3]。

2.2 对于加窗进行数据处理的情况下

由于 FFT算法的频率分辨力 F_0 仅与数据序列的长度有关,因此可以通过增加采样时间 T_s ($T_s = 1/f_s$)来提高 FFT算法的频率分辨率。但是,在实际应用中,通过增加采样时间来获得较高的频率分辨力是不允许或不可能实现的,对于这种情况可以通过现代谱估计算法来克服这个困难。

现代谱估计算法^[4]中的参量法具有估计精度高和高分辨率特性,但是其高分辨率和高估计精度只能在高信噪比条件下才能实现。而文献[5]提出的基于最大似然法的交替陷波周期图离散谱估计算法(ANPA),在分辨率、精度和信噪比门限三项指标上都达到了较好的性能,但是 ANPA 的运算量和所需存储的数据量庞大,难于实时运算。而文献[6]提出的一种基于 FFT的快速功率谱估计算法(清除算法)进一步将基于傅立叶变换(FFT)的“迭代清除算法”用于相互临近的多线谱估计,这种算法计算简单快速,并具有超分辨率、高精度的特性。

3 FFT电力谐波分析过程

使用 FFT进行电力谐波分析时一般涉及三个过程:(1)对连续时间信号进行采样,变换为离散序列。在谐波测量中,所要处理的信号都是通过采样和进行 A/D 转换后得到的数字信号。(2)建立数据窗,忽略数据窗前后信号波形。由于理想傅立叶变换要求时域信号是无限长的,而在实际的谐波测量中,FFT只能对有限长的采样信号进行变换,相当于使用数据窗对无限长连续信号进行了截断。(3)应用 FFT得到谐波分析结果。通过 FFT算法获取谐波信号的参数(频率、幅值、相位)。以上步骤的操作过程会不同程度为谐波测量结果带来一定的误差。其误差来源主要有:连续波形离散化时引入的误差、采样周期变动引入的误差、A/D 转换时的量化误差、数据处理中的运算误差、同步误差等,其中同步误差对谐波分析结果的准确度影响最大。当采样周期与信号周期不同步时,会产生频谱泄漏和栅栏效应。

4 FFT电力谐波分析频谱泄漏

4.1 泄漏产生原因

频谱泄漏是由于采样周期与信号周期不同步时出现的频谱泄露误差。用 FFT对其进行谱分析时,使用数据窗使无限长连续信号截断成有限长序列,被截断后的信号谱线由原来的离散谱线向附近展宽,造成频谱泄漏,使谱分辨率降低。当对周期信号进行谐波分析时,只有当各次谐波成分对应的谱线位于 FFT的计算点上时,才能准确地计算出各谐波的频谱值,否则由于频谱泄漏的原因,计算出的将是泄漏谱,引入较大的误差。频谱泄漏包括长范围泄漏和短范围泄漏两部分,长范围泄漏是由于信号截断造成的信号频谱旁瓣之间的相互干扰;短范围泄漏是指由于离散频谱的栅栏效应导致的信号峰值点观测上的偏差。

4.2 改进方法

4.2.1 利用加窗插值法或其改进算法对 FFT进行修正的方法

加窗插值算法通过加窗减小频谱泄漏,通过插值消除栅栏效应引起的误差。因此算法中涉及两方面的内容,即窗函数的选择和插值(修正)算法的选择。

在加窗插值方法中,窗函数的选择非常重要,可以通过选择适当的窗函数来抑制长范围泄漏。在频谱分析时要求窗函数主瓣窄、旁瓣低且跌落速度快,但对同一窗函数,这几个要求很难同时满足。在信号处理时,应根据信号特征和研究目的来选择窗,目前,常用的窗函数有 20 余种。主要包括余弦窗和卷积窗。一般电网信号主要含有整数次谐波,因而常采样基于余弦窗的组合窗,这类窗只要选取观测时间是信号周期的整数倍,其频谱在各次整数倍谐波频率处幅值为零,因而谐波之间不发生相会泄漏。即使信号频率作小范围波动,泄漏误差也较小。窗的项数越多,主瓣宽度越大,从而引起频谱分辨率的降低。但同时较多项数的窗函数能够产生交大的旁瓣衰减,有利于提高频谱计算精度,但组合窗的项数一般不大于 4。在实际测量中用得最多的窗是两项汉宁(Hanning)窗、三项布莱克曼(Blackman)窗、四项布莱克曼-哈里斯(Blackman-Harris)窗。Blackman窗虽然旁瓣衰减大,但其计算相对复杂,Hanning窗不但计算量小,同时可以通过调节采样长度达到减小谐波间泄漏的目的^[7],文献[8]提出的 Blackman-Harris窗(简称 B-H窗)无论在插值计算结果的精度上还是在窗函数的旁瓣衰减上都优于 Hanning窗。研究表明^[9],加 4 项余弦窗 B-H

窗时,谐波分析可以得到较满意的精度,但存在实现时计算量较大的问题。文献[10]提出了一种减小频谱泄漏且易于实现的改进余弦窗,通过对一般的余弦窗函数施加一个指数 m ,根据对频率分辨率和幅值精度、旁瓣抑制的侧重不同,改变 m 的值,得到不同性能的改进余弦窗。文献[11]提出了一种新的离散窗函数——矩形自卷积窗和相应的插值算法,加这类窗可以最大限度地减小基波及各次谐波相会之间的谐波泄漏,这种算法易于实现,能够显著提高谐波分析精度和减小计算量。

窗函数不同,各插值算法对应的参数也不同。文献[7]给出了基本的插值算法,根据求出的偏移量可以获得电网谐波信号的频率、幅值、相角参数的修正值。在选择适当窗函数的基础上,根据所选择的窗函数对频率、相位和幅值进行插值修正,在一定程度上弥补短范围泄漏造成的误差。文献[12~16]提出的加窗插值算法——单峰谱线修正算法在修正幅值只利用了靠近被测频点的一根最高谱线幅值进行插值,这种方法能够在一定程度上补偿短范围泄漏造成的影响,从而改善分析结果,但是当选择解析形式较为复杂的窗函数时,在实现上比较困难。而文献[17,18]提出的基于两根谱线的加权平均来修正幅值的双峰谱线修正算法通过结合多项式逼近方法解决了修正算法的数值计算问题,简化了算法的实现。

经过对FFT加窗插值算法进行不断地修正,采用窗函数和内插技术可以较精确地测量到各次谐波电压和电流的幅值及相位。但由于窗函数法和内插技术的计算量和所需的存储容量大,大大影响了系统的运算精度。

4.2.2 同步采样法

同步采样的实现包括硬件和软件两种方案:

1)基于软件(算法)的改进方法。软件同步法^[19]通过测量信号周期来适时调整采样间隔,从而保证信号频率和采样频率的同步,其主要由软件来实现。文献[20]采用了一种自适应调整采样率的软件同步采样算法,提出了一种适于高精度实时电力谐波分析的自适应调整采样率的谐波分析方法,该方法在谐波分析的同时调整采样间隔,跟踪电网频率,大大地减少了频谱泄漏。这类方法实时性较硬件方案稍差,但其硬件电路简单,较易实现。

2)基于硬件(同步装置)的改进方法。包括采用过零比较器、锁相环同步采样装置硬件装置实现同步采样。

过零比较器用于检测电压波形的负向过零点,并向系统中的微处理器申请中断。根据两次中断之间的时间,计算出电压波形的周期,然后按预置的采样次数,计算出两个采样点之间的时间间隔,通过软件设置给出启动采样的同步脉冲。这种方法硬件简单、速度较快,但对于畸变波形的信号容易产生误动作,而且抗干扰能力差,且测量周期用波形和实际采样的波形不一致,当被测信号频率发生抖动时将会产生很大的误差,适用于被测波形畸变小且较稳定的地方。

锁相环同步采样装置用锁相环路来控制采样的定时和速率,从而达到同步采样的目的。缺点是同样存在测量畸变波形时存在较大误差,由于锁相环对频率的跟踪是动态的跟踪,其误差不稳定,而且延迟、漂移等可引入新的误差,且硬件较复杂。由于全部由硬件完成,一次速度快,实时性好,但同时也增加了成本和硬件的复杂度。

针对以上两种方法的缺陷,文献[21]提出了一种新的同步采样计算方法。通过对信号实现等间隔采样,在不考虑被测信号抖动的基础上启动A/D转换,寻找被测信号的正向过零点,然后定时的采样方法,同时提出了对采样点数的修正和采样值的修正算例,为减少频谱泄漏提出了一种新的应用方法。

总的来说,软件方法可以灵活地应用,在很大程度上提高了精度,但是实时性不能得到很好的保证,硬件方法通过优化每周采样点数或采样周期来逼近信号频率,实时性得到保证,但精度受到了一定的影响。

4.2.3 修改理想采样频率法^[22]

当采样区间长度 T_0 与采样时间间隔 T_s 的比值 N (采样点数)为整数时,就不会发生频谱泄漏现象。如果 N 不是整数时,可以通过修正实际采样序列 $X_0(n)$ 来得到理想采样频率的 $X(n)$,理想采样频率为 T_{s0}

$$T_s - T_{s0} = e \quad \text{且} \quad |e| < T_{s0}/2N \quad (1)$$

上式表示实际采样频率和理想采样频率之差。在第一个采样点处两者的值相等。随着时间的增加,实际采样频率和理想采样频率之间的偏差会增大,在 n 次采样以后,其偏差为 $(n-1)e$,将式展开得

$$X_0(n) = X(nT_s - n_e) = X_a(nT_s) - X_a(nT_s) n_e \quad (2)$$

对 $X_a(nT_s)$ 进行估计,推得下式成立

$$X_0(n) = X(n) + n[X(n) - X(n+N)]/N,$$

$$n=0, 1, 2, \dots, M_1 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,这种方法的主要思想是对每个采样点进行修正,得到理想采样频率下的采样值。该方法不需要添加任何硬件,实时性好,适合在线测量,但它与前两种方法相比较误差稍大一些,只能减少50%的泄漏。

4.2.4 自适应调整采样率等角度采样法

加窗插值算法和同步采样装置都不能解决主瓣处偏离零点值而导致的误差,所以选择窗函数对减少泄漏的作用也是有限的。插值算法几乎可以消除泄漏的影响,但算法数据处理量大,实时性差。文献[23]提出了自适应调整采样率等角度间隔采样原则,根据当前频率随时调整采样率,可有效地消除由于信号频率变化所带来的各种误差,但算法是建立在谐波分析基础上实现的,每一步都必须作FFT运算。而文献[24]基于等角度间隔采样原理提出并证明了离散傅立叶变化的基相量循环移位性质。基于循环移位的基相量的DFT很容易确定信号频率变化引起的相角误差,因此可以即时修正下一采样时刻。大大减少了计算量,而且该算法在信号幅值,相位变换情况下也能正确跟踪信号频率,而且跟踪性能较好。

4.2.5 准同步采样法

这种方法是在同步采样的基础上,通过适当增加采样点及采用相应的算法进行数据处理的一种新技术,它比较好地解决了同步误差对测量准确度的影响问题。从理论上来说,一个周期电量,不论是否是正弦量,其电压、电流有效值的计算,或者平均功率的计算,总是涉及到一个函数在一个或几个周期内平均值的计算,周期信号 $f(t)$,求其平均值 $\overline{f(t)}$,表达式如下:

$$\overline{f(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (4)$$

若将 $[t_0, t_0 + T]$ 区间等分为 N 段,由梯形求积公式当 $N > M$ (M 为最高谐波分量)

$$\overline{f(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i) \quad (5)$$

只要增加 N 的值,总可以使结果达到满意的精度,这就是同步采样的基础。如果区间不是 T 而是 $T \pm \epsilon$,为同步误差,这时就由于同步误差的存在,不可能通过提高每周期采样次数或增加连续采样周期数来消除同步误差。这样准同步采样法在允许不大的 ϵ 存在的情况下,通过适当增加采样区间来消除同步误差带来的影响——频谱泄漏误差和栅栏效

应,文献[25,26]详细介绍了准同步采样法内容及准同步技术与DFT算法结合的谐波测量方法。应用准同步法来测量电网参数,能有效地抑制谐波对测量参数的影响及减小未完全同步产生的误差,获得较高的测量精度。但是这种算法需要处理的数据量非常大,实时性不够理想,而且相位误差较大。

5 FFT电力谐波分析栅栏效应

5.1 栅栏效应产生原因

电力系统中电流、电压信号可用一个周期函数来表示,即:

$$x(t) = x(t + kT) \quad (6)$$

式中: T 是周期函数的周期, k 为整数; $f=1/T$ 代表电力系统的工频频率; $\omega=2\pi f$ 为其相应的角频率。

电力系统中电流、电压信号一般都满足狄里赫利条件,因此可以分解成如下形式的傅立叶级数

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (7)$$

式中:第一项 A_0 为直流分量;第二项中的 $C_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ 称为基波分量,其他的为高次谐波。

从式(7)中可以看出,谐波分析时只能观测到基波频率 f 整数倍处的谐波频谱,而不是连续频谱,这就像通过一个“栅栏”观看一个景象一样,只能在离散点的地方看到真实景象,把这种现象称为“栅栏效应”。

5.2 改进方法

减小栅栏效应的一个方法就是使频域抽样更密,即增加频域抽样点数 N ,在不改变时域数据的情况下,必然是在时域数据末端添加一些零值点,使一个周期内的点数增加,但并不改变原有的记录数据。频域抽样为 $(2/N)k$, N 增加,必然使样点间距离更近(单位圆上样点更多),谱线更密,谱线变密后原来看不到的谱分量就有可能看到了。文献[27]提出了要减小FFT的栅栏效应,提高谐波分辨率,需要延长采样区间的方法。目前经常使用的方法是通过插值算法来消除栅栏效应对谐波分析时引起的误差,这种方法也取得了很好的效果。

6 结论

本文分析了电力系统中使用FFT谐波检测存在的主要误差,总结了近些年来用于预防或减小这些误差的文献和资料,并对各种改进方法进行了分析比较,通过在数字采集模块前安装前置滤波器(防混叠滤波器)来预防频谱混叠现象;通过增加采

样时间提高频率分辨力;通过加窗(B-H窗)插值(双峰谱线加权平均修正算法)FFT方法减小频谱泄漏误差;通过插值算法减小栅栏效应。当然在实际系统应用中,往往应根据现场情况合理地选择相应的改进方法来获得较高的谐波测量精度。

参考文献:

- [1] Sevino A G, Trotta M. A Windows and Interpolation Algorithm to Improve Electrical Measurement Accuracy[J]. IEEE Trans on M, 1989, 38(4): 856-863.
- [2] Ferrero A. High-accuracy Fourier Analysis Based on Synchronous Sampling Techniques[J]. IEEE Trans on M, 1992, 41(4): 780-785.
- [3] 程佩清. 数字信号处理教程(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.
CHEN Pei-qing Digital Signal Processing Tutorial, Second Edition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [4] Kay S M. A New ARMA Spectral Estimation[J]. IEEE Trans, 1980, 28(5).
- [5] Hwang Jeng-Kuang. Superresolution Frequency Estimation by A Iterating Notch Periodogram[J]. IEEE Trans, 1993, 41(2): 727-741.
- [6] 潘明海,刘永坦,赵淑清,等. 基于傅立叶变换的超分辨率快速谱估计算法[J]. 电子技术应用, 1999, (11): 49-50.
PAN Ming-hai, LIU Yong-tan, ZHAO Shu-qing, et al A Fast Spectral Estimation Algorithm with Super Resolution Based FFT[J]. Application of Electronic Technique, 1999, (11): 49-50.
- [7] 祁才君,陈陇道,王小海. 应用插值FFT算法精确估计电网谐波参数[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, (1): 112 - 116.
QI Cai-jun, CHEN Long-dao, WANG Xiao-hai High-accuracy Estimation of Electrical Harmonic Parameters by Using the Interpolated FFT Algorithm[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2003, (1): 112-116.
- [8] 李红伟,李在玉. FFT分析电力系统谐波的加窗插值算法[J]. 电工技术杂志, 2004, (10): 62-64.
LI Hong-wei, LI Zai-yu FFT Algorithm Based on Cosin-window and Interpolation for Harmonic Analysis in Power System[J]. Electrotechnical Journal, 2004, (10): 62-64.
- [9] 潘文,钱俞寿,周鸢. 基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论(D窗函数的研究)[J]. 电工技术学报, 1994, 9(1): 50-54.
PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT(D
- Study of Windows[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 1994, 9(1): 50-54.
- [10] 朱冰莲,梁立宏,张文明,等. 一种改进的余弦窗及其DSP实现[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, (8): 64-67.
ZHU Bing-lian, LIANG Li-hong, ZHANG Wen-ming, et al Improved Cosine Window and Its Implementation with DSP[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, (8): 64-67.
- [11] 黄纯,江亚群. 谐波分析的加窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 26-32.
HUANG Chun, JIANG Ya-qun Improved Window and Interpolation Algorithm for Analysis of Power System Harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 26-32.
- [12] Andria G, Savino M, Trotta A. Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(4): 856-863.
- [13] 潘文,钱俞寿,周鸢. 基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论(II)双插值FFT理论[J]. 电工技术学报, 1994, 9(2): 53-56.
PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E Power Harmonic Measurement Based on Windows and Interpolated FFT(II) Dual Interpolated FFT Algorithm[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 1994, 9(2): 53-56.
- [14] ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, YUAN Wei The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 160-164.
- [15] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [16] 赵文春,马伟明,胡安. 电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Weiming, HU An FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in the Electric Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87.
- [17] 梅红伟,纪延超. 改善电力系统谐波分析的加窗插值算法和递推傅氏算法[J]. 继电器, 2004, 32(24): 6-9.
MEI Hong-wei, JI Yan-chao Window Functions, Interpolation and Fourier Transform Recursive Algorithm for Improving the Harmonic Analysis of Power System[J]. Relay, 2004, 32(24): 6-9.

- [18] 庞浩,李东霞,俎云霄,等.应用 FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J].中国电机工程学报,2003,23(6):50-54.
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [19] 李艳.谐波检测中软件测频方法探讨[J].宁夏电力,1998,(4):34-36.
LI Yan The Study of the Method of Measuring Frequency with Soft in Harmonic Measurement [J]. Ningxia Electric Power, 1998, (4): 34-36
- [20] 汪晓强,陈明凯.一种高精度实时电力谐波分谱算法的实现[J].电测与仪表,2004,41(4):32-34.
WANG Xiao-qiang, CHEN Ming-kai The Realization of Precise Real Time Harmonic Analysis in the Electric Power System [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(4): 32-34.
- [21] 李君凯,丁化成.一种新的电力系统谐波分析仪采样计算方法[J].电测与仪表,2000,37(10):5-7.
LI Jun-kai, DING Hua-cheng New Type Calculating Method Based on Sampling for Harmonic Analysis Instrument on Power System [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2000, 37(10): 5-7.
- [22] JIANG Tao-xi A New Algorithm for Improving the Accuracy of Periodic Signal Analysis [J]. IEEE Trans on M, 1996, 45(8): 827-830.
- [23] 马仁政,陈明凯.减少频谱泄漏的一种自适应采样算法[J].电力系统自动化,2002,26(7):55-58.
MA Ren-zheng, CHEN Ming-kai An Adaptive Sampling Algorithm for Reducing Spectrum Leakage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 55-58.
- [24] 陈明凯,郑翔骥,汪晓强.减少频谱泄漏的一种新的等角度间隔采样递推算法[J].电工技术学报,2005,20(8):94-98.
CHEN Ming-kai, ZHENG Xiang-ji, WANG Xiao-qiang A Novel Algorithm for Reducing Spectrum Leakage Based on Equal Angle-Interval Sampling Principle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(8): 94-98.
- [25] 刑书珍.工程技术应用数学[M].北京:中国铁道出版社,1990.
XING Shu-zhen Engineering Technique & Application Math [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1990.
- [26] 史旭光,裴海龙.一种改进的FFT方法在谐波测量中的应用[J].计算技术与自动化,2005,24(2):24-26.
SHI Xu-guang, PEI Hai-long An Approach of Analyzing Power Harmonics Based on Improved FFT Algorithm [J]. Computing Technology and Automation, 2005, 24(2): 24-26.
- [27] 黄方能,吴玉燕.FFT谐波检测存在的问题[J].广西电力,2005,(4):39-41.
HUANG Fang-neng, WU Yu-yan Problems in Detecting FFT Harmonics [J]. Guangxi Electric Power, 2005, (4): 39-41.

收稿日期: 2006-04-12; 修回日期: 2006-05-22

作者简介:

郑恩让(1962-),男,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为控制系统建模与优化及工业过程智能控制;

杨润贤(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程。E-mail: yrxianh@sina.com

Study on problems about detecting harmonic based on FFT in power system

ZHENG En-rang, YANG Run-xian, GAO Sen

(College of Electric and Electronic Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xianyang 712081, China)

Abstract: FFT is the most comprehensive method in harmonic measurement fields, but there are obvious errors in harmonic analysis using FFT algorithm, which affects the accuracy of measurement results. So it can't be directly applied to harmonic analysis in power system. The paper analyses and summarizes problems brought by using FFT method to analyze harmonic of power system with cause and improved methods. It analyses the advantages and disadvantages of different measures used as ways and means for compensating those problems, which demonstrates that the analysis accuracy of the signal and the credible degree of the measurement parameters are further improved in different aspects. In the end, the paper summarizes precautionary and improved measurements.

Key words: FFT; harmonic measurement; power system; spectral leakage; picket fence effect; window function