

基于中国国家标准和 IEC 标准的 谐波及间谐波测量方法

侯立峰, 黄纯, 李波, 周璐

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Harmonic and Interharmonic Measurement Methods Based on Chinese National Standard and IEC Standard

HOU Li-feng, HUANG Chun, LI Bo, ZHOU Lu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: A new harmonic and interharmonic measurement method is recommended by Chinese National Standard GB/T 17626.7-2008 and IEC 61000-4-7: 2002 standard. In this paper, the differences between traditional measuring methods for harmonics and interharmonics and the recommended method in new Chinese National Standard and IEC standard are presented. From the viewpoints of spectrum leakage and measurement accuracy the characteristics of recommended measuring method are analyzed and some improving measures to remedy the insufficiency of the recommended method are proposed. Simulation measurements of various typical signals are performed by traditional method, recommended method and its improving measures respectively. Simulation results show that the recommended method is suitable for the harmonic and interharmonic measurement of non-stationary signals, and the improving measures can further ensure the measurement accuracy under various conditions. The recommended method and its improving measures are more suitable for the measurement of complex harmonics and interharmonics in engineering practice.

KEY WORDS: harmonic; interharmonic; IEC standard; Chinese National Standard; spectrum leakage

摘要: 中国国家标准 GB/T 17626.7—2008 和 IEC 61000-4-7: 2002 标准推荐了新的谐波与间谐波测量方法。介绍了国家和 IEC 新标准推荐方法与传统谐波、间谐波检测方法的不同, 从频谱泄漏、测量精度等角度分析了新方法的特点, 针对其不足提出了改进措施。采用传统方法、新推荐方法及其改进方法, 对多种典型信号进行了仿真测量。仿真结果表明, 推荐方法适用于非平稳信号的谐波、间谐波测量, 改进措施可以进一步保障各种情况下的测量精度。推荐方法及其改进方法与传统方法相比, 更适于实际工程中的复杂谐波与间谐波的测量。

基金项目: 湖南省科技重大专项基金项目(2009FJ1014); 湖南省电力科技重点项目(KZ09K15003)。

关键词: 谐波; 间谐波; IEC 标准; 国家标准; 频谱泄漏

0 引言

近年来, 电能质量问题日益受到相关部门的重视, 其中谐波和间谐波测量问题一直是人们关注的焦点。1993 年, 我国国家技术监督局颁布了电能质量系列标准之一的 GB/T 14549—93《电能质量 公用电网谐波》^[1]。随后国际电工委员会陆续出版了 IEC 61000 电磁兼容系列标准和技术报告, 我国依据 IEC 61000-4-7:1991^[2], 等同地颁布了 GB/T 17626.7—1998《电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则》^[3](导则中的谐间波, 本文按习惯称为间谐波)。这些标准的颁布使我国电网谐波、间谐波的测量与评估有了依据。

但这些标准在实际应用中出现了一些问题。国标 GB/T 14549—93 中没有间谐波测量的规定, 而且有关谐波测量的规定也不完善。文献[4-9]对谐波国标的修订和间谐波国标的制定工作提出了意见; 文献[10]介绍了 IEC 61000-4-7:1991 有关谐波和间谐波测量的规定。国标 GB/T 17626.7—1998 也等同 IEC 61000-4-7:1991 添加了有关间谐波测量的内容, 并将谐波按变化性态分为准稳态谐波、波动谐波和快速变化谐波, 同时介绍了快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 测量仪的框架。

此外, 相关文献提出了加窗插值 FFT 算法^[11-15]、同步采样算法^[16-18]等谐波、间谐波高精度测量算法, 但只有在原信号是平稳信号时, 这些方法才能得到预期的效果。

随着谐波分析和检测技术的发展, IEC 修订标准 IEC 61000-4-7:1991, 颁布了标准 IEC 61000-4-

7:2002^[19]。我国也等同推出了国家标准 GB/T 17626.7—2008《电磁兼容 试验和测量技术供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则》^[20]。国标 GB/T 17626.7—2008 和标准 IEC 61000-4-7:2002 中详细地介绍了使用 DFT 算法的测量规范,并提出了结合 DFT 算法的谐波群、谐波子群、间谐波群和间谐波中心子群的后续处理方法(简称 IEC 方法)。

本文首先介绍国家标准 GB/T 17626.7—2008 (以下简称新标准)推荐的 IEC 方法;然后采用 IEC 方法对多种典型非平稳信号进行谐波、间谐波的仿真测量和分析,并针对 IEC 方法的不足提出了相应的改进措施;最后给出 IEC 方法及其改进方法的一般使用原则。

1 谐波、间谐波测量新标准及分析

国家新标准等同 IEC 61000-4-7:2002 标准,规定了实际供电系统中电流和电压谐波和间谐波测量仪器的框架。

新标准里,测量仪器的一般结构由主要部分和后续处理部分组成。仪器主要部分包括:带抗混叠滤波器的输入回路、含有采样/保持单元的模/数转换器、同步和窗口单元(如需要)、计算傅里叶系数的 DFT 处理器。

新标准推荐采用加矩形窗的 DFT 算法。为满足标准测量要求,窗口宽度应选为 10 个(50 Hz 系统)或 12 个(60 Hz 系统)周期。同时时间窗应与每一组根据电力系统 50 Hz 或 60 Hz 频率对应的 10 个或 12 个周期同步,即第 1 个采样脉冲和第($M+1$)个采样脉冲(M 是采样数)的上升沿之间的时间,应等于特定数目的电力系统周期的持续时间,最大允许误差为 $\pm 0.03\%$ 。

仪器后续处理部分对信号 DFT 计算结果进行分群、平滑和加权等运算,实现对谐波和间谐波的测量评估,定义了谐波群、谐波子群、间谐波群和间谐波中心子群等概念。

新标准定义谐波群的有效值为:某一个谐波有效值以及它邻近频谱分量有效值的方和根,如式(1)和图 1 所示(以下只考虑 50 Hz 系统)。

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (1)$$

式中: $G_{g,n}$ 表示谐波群的有效值; C_{k+i} 表示 DFT 输出频谱谱线分量的有效值; 谐波次数 $n = k/N$; k

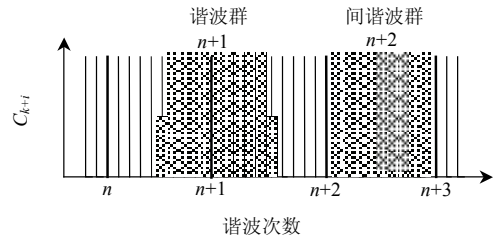


图 1 谐波群和间谐波群示意图

Fig. 1 Illustration of harmonic and interharmonic groups 是傅里叶频谱分量的个数; N 是时间窗截断信号周期数(50 Hz 系统中 $N = 10$), DFT 输出频谱中各谱线的间隔(即频谱分辨率)为 5 Hz。

新标准还定义谐波子群的有效值为:某一谐波有效值以及与之直接相邻的 2 个谱线分量的方和根,如式(2)和图 2 所示。

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2)$$

式中 $G_{sg,n}$ 表示 n 次谐波子群的有效值。

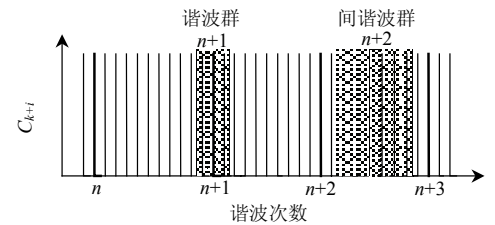


图 2 谐波子群和间谐波中心子群示意图

Fig. 2 Illustration of a harmonic subgroup and an interharmonic centred subgroup

同时新标准定义间谐波群的有效值为:在 2 个连续谐波频率之间所有间谐波分量有效值的方和根,如式(3)和图 1 所示。

$$C_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad (3)$$

式中 $C_{ig,n}$ 表示 n 次间谐波群的有效值,与 n 和 $n+1$ 次谐波之间的频谱分量有关。如:在 5 次谐波和 6 次谐波之间的间谐波群表示为 $C_{ig,5}$ 。

新标准也定义了间谐波中心子群的有效值为:2 个连续谐波频率之间,不包括与谐波频率直接相邻的频率分量的全部间谐波分量有效值的方和根,如式(4)和图 2 所示。

$$C_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{k+i}^2 \quad (4)$$

式中 $C_{isg,n}$ 表示第 n 次间谐波中心子群的有效值。如:在 5 次和 6 次谐波之间的间谐波群表示为 $C_{isg,5}$ 。

当信号中只含稳态的基波和谐波,且采样为同步采样(同步误差在 IEC 标准要求范围内)时,通过 DFT 单频谱谱线可以较精确地估计信号的基波或某次谐波分量。

当信号含幅值波动的基波和(或)谐波时,波动的基波和谐波分量会将其能量扩散到邻近的间谐波频率分量中去。这时用 IEC 方法的谐波群或谐波子群参数估计基波和谐波,可提高准确度,但不提供相位信息。

当信号中含有间谐波时,一般情况下很难实现同步采样,间谐波的频谱泄漏现象和栅栏效应使得间谐波测量变得很复杂。

IEC 方法对间谐波测量问题做了很大的简化,采用间谐波群和间谐波子群来估计间谐波,即用 2 个连续谐波频率 f_n 、 f_{n+1} 之间的 DFT 频谱谱线来估计频率 f_n 、 f_{n+1} 之间的所有间谐波,不给出间谐波的具体频率和相位。

对邻近的谐波和间谐波进行测量时,为保证能量守恒,需遵守新标准中推荐的每根 DFT 频谱谱线只使用一次的原则。这样同时测量谐波和间谐波时,只能采用 2 种方式。方式 1:谐波单谱线+间谐波群方式,即用单频谱谱线估计谐波,用间谐波群估计间谐波;方式 2:谐波子群+间谐波子群方式,即用谐波子群估计谐波,用间谐波子群估计间谐波。

2 典型信号仿真和分析

2.1 典型信号的获取

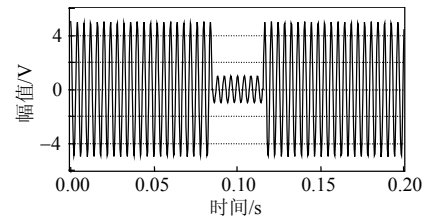
基于虚拟仪器 LabVIEW 平台,采用 IEC 方法对多种含有不同特征的谐波和间谐波的典型信号进行仿真和分析。这些信号来源于 IEC 61000-4-7:2002^[19],部分直接取用,部分为说明问题的方便修改了谐波或间谐波的频率、幅值或相角。仿真中基波频率为 50 Hz,采样频率为 3 200 Hz,时间窗 0.2 s 内采样点数为 640 个,即对基波采样 10 个整周期。

2.2 幅值波动的谐波测量

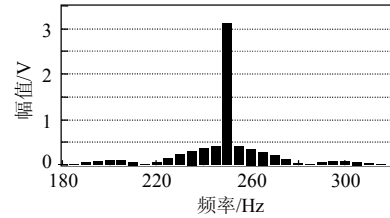
图 3(a)是幅值波动的 5 次谐波信号波形,图 3(b)是信号频谱。该波动信号初相位是 90° ,初始有效值为 3.536 V,21.25 个周期后有效值突变为 0.707 1 V,再经过 7.5 个周期恢复原值。测量可得 0.2 s 时间窗内的总有效值为 3.272 V。

进行信号频谱分析,250 Hz 谱线有效值为 3.112 V,以此估计 5 次谐波有效值,误差为-4.89%。IEC 方法的谐波子群的有效值为 3.165 V,以此估计 5 次谐波有效值,误差缩小到-3.26%;谐波群的有效值为 3.251 V,以此估计 5 次谐波有效值,误差缩小到-0.64%。改变信号初相位,测量结果变化不大。可见采用合理的测量方式可以减小误差。

在对以上信号以及其 DFT 频谱进行分析时发



(a) 5 次谐波波动信号示意图



(b) 5 次谐波波动信号频谱

图 3 5 次谐波波动信号

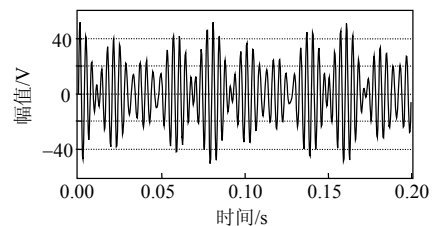
Fig. 3 Fluctuation signal of 5th order harmonic

现,原信号频谱中除了含有 250 Hz 谱线之外,还有以它为中心逐渐向两边衰减的间谐波谱线,即频谱泄漏现象。然而在采样系统 200 ms 时间窗内,截取了 5 次谐波信号的 50 个整“周期”,表明频谱泄漏不是由非整周期采样引起的,而是由于信号幅值变化引起的。采用 IEC 方法进行处理可得到较好的效果;谐波群包含的泄漏频谱分量更充分,比采用谐波子群测量更精确。

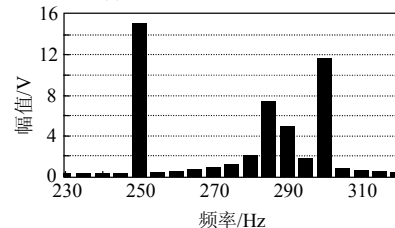
2.3 谐波和间谐波测量

图 4(a)是有效值为 9.8 V 的 287 Hz 间谐波、有效值为 15 V 的 5 次谐波和有效值为 12 V 的 6 次谐波的叠加信号,它们初相位都为 0° ,图 4(b)是信号的频谱。谐波、间谐波测量估计采用以下 2 种方式:

1) 谐波单谱线+间谐波群方式。250 Hz 单谱线的值为 15.21 V,误差为 0.81%。300 Hz 单谱线的值为 11.69 V,误差为-2.58%。5 次间谐波群的有效值



(a) 叠加信号波形示意图



(b) 叠加信号频谱

图 4 287 Hz 的间谐波和 5 次、6 次谐波的叠加信号
Fig. 4 Superimposed signal of 5th harmonic, 6th harmonic and an interharmonic at 287 Hz

为 9.53 V，误差为-2.77%。

2) 谐波子群+间谐波子群方式。5 次谐波子群的有效值为 15.13，误差为 0.89%。6 次谐波子群的有效值为 11.86 V，误差为-1.15%。5 次间谐波子群的有效值为 9.34 V，误差为-4.73%。

在对上述信号的谐波和间谐波进行 DFT 分析时，叠加信号中 5 次和 6 次谐波都是整周期采样，不会造成频谱泄漏；而在 0.2 s 时间窗内，截断 287 Hz 间谐波周期数为 57.4，则引起 DFT 频谱的严重频谱泄漏。287 Hz 的频谱不能由 DFT 直接求得，而它的能量分散到该频率的邻近谱线上，可以采用 5 次间谐波子群或间谐波群来估计。相对而言，由于 5 次谐波和 6 次谐波对间谐波测量影响很小，而间谐波群比间谐波中心子群包含泄漏的频谱分量更充分，所以用间谐波群误差会更小些。

由于叠加信号中各频谱分量的叠加是向量的叠加，所以信号中各分量相对相位的变化对测量的精度也有影响。此例中受影响较大的是 6 次谐波的测量。当 287 Hz 间谐波初相位取 90° 时，300 Hz 单谱线的值为 13.11 V，误差为 9.25%；6 次谐波子群的有效值为 13.27 V，误差为 10.57%。这时不管采用哪种方式，IEC 方法的测量误差均已超出国家标准 5% 的允许范围。

2.4 波动的谐波与间谐波测量

图 5(a)是有效值为 10 V 的幅值波动的 5 次谐波，其表达式为

$$u = 10\sqrt{2}[1 + 0.2\sin(2\pi f_2 t)]\sin(2\pi f_1 t) \quad (5)$$

其中： $f_1 = 250 \text{ Hz}$ ； $f_2 = 5 \text{ Hz}$ 。

在 0.2 s 内，采样信号的总有效值为 10.1 V。其频谱包含一根值为 10 的 250 Hz 谱线，以及在两侧分别为 245 Hz 和 255 Hz 的 2 根幅值为 1 的谱线，如图 5(b)所示。如果以 250 Hz 处单谱线估计 5 次谐波有效值，误差为 0.99%，而以谐波子群估计 5 次谐波，误差几乎为 0。

在式(5)信号中加入频率为 287 Hz、有效值为 9.8 V 的信号，得到叠加信号图 5(c)。图 5(d)是信号的频谱。谐波、间谐波测量估计采用 2 种方式：

1) 谐波单谱线+间谐波群方式。250 Hz 单谱线的值为 10.16 V，相对于 10.0V(图 5(b) 250 Hz 单谱线)的误差为 1.6%。5 次间谐波群的有效值为 9.36 V，误差为-4.5%。

2) 谐波子群+间谐波子群方式。谐波子群有效值为 10.23 V，相对于 10.1 V(图 5(b)5 次谐波子

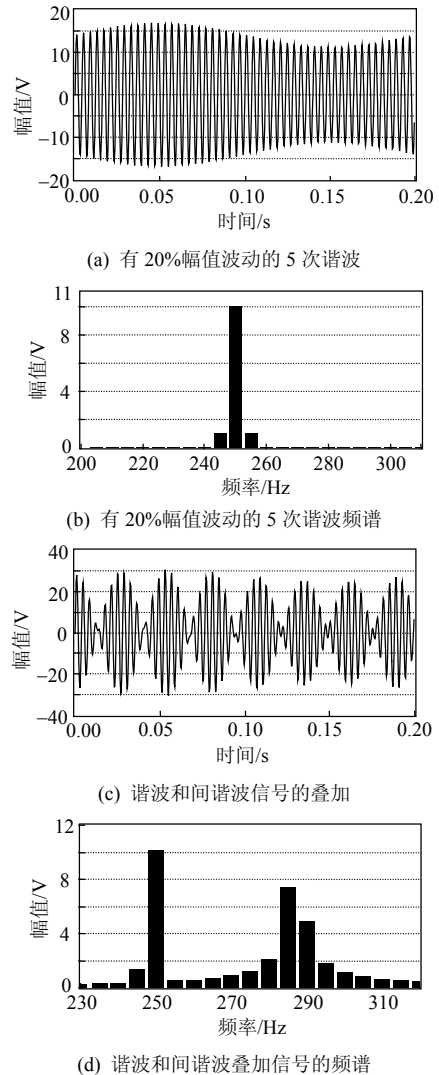


图 5 调制后的 5 次谐波和 287 Hz 的间谐波叠加信号
Fig. 5 Superimposed signal of 5th harmonic and an interharmonic at 287 Hz

群)的误差为 1.29%。5 次间谐波子群的有效值为 9.34 V，误差为-4.7%。

式(5)信号的频谱具有以下特点：250 Hz 处谱线值等于 10，两边间隔 f_2 (即 245 Hz 和 255 Hz)处谱线值均等于 1(采样系统的频率分辨率为 5 Hz，如果 f_2 不是 5 的整数倍，就会产生相应非规则的频谱泄漏)。

在对图 5(c)叠加信号频谱进行分析发现，该信号含有非周期采样的间谐波，所以频谱中发生了严重的频谱泄漏，如图 5(d)所示。间谐波测量时，间谐波子群不包含 245 Hz 和 255 Hz 频谱对间谐波测量的影响，所以谐波子群+间谐波子群方式相对更合理一些。

但存在估计精度不高的情况。随着叠加信号各分量相对相位的改变，尽管采用理论精度较高的谐波子群+间谐波子群方式，测量误差仍可能大于 5%。如 287 Hz 间谐波初相位取 135° 时，式(5)信号

初相不变，测得 5 次间谐波子群有效值为 9.31 V，误差为 5.05%。

针对 IEC 方法测量精度不高的情况，本文提出了 IEC 方法的改进措施，并提出了 IEC 方法及其改进方法的一般使用原则。

3 IEC 测量方式的改进及选用

如前所述，采用 IEC 方法一般能得到较好的测量效果，但也有精度不满足要求的情况发生。

在对图 4(a)信号进行测量时，随着信号初相位的改变，6 次谐波测量可能出现较大的误差。针对这种情况，可以适当增大时间窗的宽度，这样可以提高信号频谱的频率分辨率，间谐波频谱分量对 6 次谐波子群频谱的影响就大大减小了。将采样时间窗增大到 0.4 s，其它参数不变，则采样点数增大为 1 280，频率分辨率变为 2.5 Hz。仍然采用谐波子群估计 6 次谐波，精度得到显著提高。表 1 为 287 Hz 间谐波在不同初相位时，时间窗改变前后的 6 次谐波误差对比。

表 1 改进测量方法前后 6 次谐波测量误差对比

Tab. 1 Comparison of 6th harmonic errors by the IEC method and its improved method

间谐波初相位/(°)	0.4 s 单谱线误差/%	0.4 s 间谐波子群误差/%	0.2 s 单谱线误差/%	0.2 s 间谐波子群误差/%
0	2.437	2.530	-2.585	-1.146
45	2.960	3.058	4.723	6.036
90	1.789	1.885	9.253	10.57
135	-0.428	-0.335	8.729	10.08
180	-2.410	-2.312	3.383	4.740
225	-2.958	-2.854	-4.051	-2.619
270	-1.732	-1.633	-9.182	-7.601
315	-0.509	-0.601	8.530	6.930

此外，采用增加数据窗长度的方法来提高测量精度，运算数据虽有所增加，亦能实现实时测量。因为 IEC 标准测量方法本身计算量很小，即使计算量成倍增加，改进方法的计算量还是要远远小于其它改进算法(加窗插值算法等)。而且以目前微处理器芯片或 DSP 芯片的计算速度，采用改进算法实现实时测量绰绰有余。

另外，在对图 5(c)信号进行测量时，用间谐波子群估计间谐波的精度不高。为解决这一问题，首先对叠加信号的频谱图 5(d)进行分析。采用间谐波子群估计间谐波，虽避开了波动的 5 次谐波引起的 255 Hz 频谱分量，但同时也舍去了必要的 295 Hz 频谱分量，误差相应增大了。而且间谐波频谱并没有受 6 次谐波的影响，所以应根据实际情况对 IEC 方法进行适当调整，间谐波可用式(6)来估计

$$C_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^9 C_{k+i}^2 \quad (6)$$

式中： n 值取 5； k 值取 50。

这样间谐波估计时避开了 255 Hz 频谱分量，也没有漏掉必要的 295 Hz 频谱分量，减小了测量误差。相应地，5 次谐波用谐波子群估计，而 6 次谐波用单谱线估计。本文将这种不同于单谱线+间谐波群方式和谐波子群+间谐波子群方式的改进方法称为混合方式。

表 2 为 287 Hz 间谐波在不同相位时，采用间谐波子群和采用混合方式估计 5 次间谐波的误差对比情况，可见灵活采用混合方式可以提高测量精度。

表 2 改进测量方法前后 5 次间谐波测量误差对比

Tab. 2 Comparison of 5th interharmonic error by the IEC method and its improved method

间谐波初相位/(°)	改进方法误差/%	间谐波子群误差/%
0	-2.891	-4.732
22.5	-2.791	-4.600
45	-2.789	-4.598
67.5	-2.886	-4.726
90	-3.026	-4.911
112.5	-3.127	-5.043
135	-3.129	-5.046
157.5	-3.031	-4.917

在实际工程中，谐波和间谐波的评估应根据信号的频谱特征判断采用何种方式进行。下面以 n 、 $n+1$ 次谐波以及它们之间的间谐波测量为例，介绍具体实施的一般原则。

1) 采用 DFT 算法对初始信号进行分析，得到粗略信号频谱图。

2) 判断 n 、 $n+1$ 次谐波幅值是否波动。若信号频谱中 f_n 或 f_{n+1} 处呈衰减中心状(以 f_n 或 f_{n+1} 谱线为中心向两旁递减)，则认为相应谐波是波动的，否则认为谐波是基本稳定的(谐波幅值稳定或谐波含量很低)。

3) 若 n (或 $n+1$)次谐波分量是波动的，用谐波子群估计该次谐波；若 n (或 $n+1$)次谐波分量不是波动的，用单谱线估计该次谐波。

4) n 与 $n+1$ 次谐波之间的间谐波评估，应根据信号每条 DFT 频谱谱线用且仅用 1 次的原则，用谐波单谱线+间谐波群方式、谐波子群+间谐波子群方式或混合方式中与谐波测量相对应的测量方式。

经综合考虑，谐波和间谐波测量方式使用原则可以概括为： n 、 $n+1$ 次谐波均不波动，采用单谱线+间谐波群方式； n 、 $n+1$ 次谐波均波动，采用谐波子群+间谐波子群方式； n 次谐波波动、 $n+1$ 次谐波不波动或 n 次谐波不波动、 $n+1$ 次谐波波动，

采用混合方式。

若谐波谱线与间谐波谱线之间的频率间隔很小,即使采用上述方法,测量精度仍然可能不满足要求,这时可通过增加时间窗宽度来减小误差。

4 结论

1) IEC方法计算量小,易于理解和应用。该方法基于DFT算法,仅添加了简单处理,计算量比一些追求高精度的算法要小得多,而且大部分情况下测量误差可控制在允许范围之内。

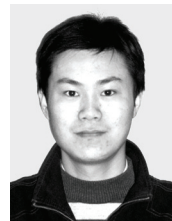
2) IEC方法能适应于多种非平稳信号的测量,可较好地处理非同步采样、信号幅值波动和间谐波等因素引起的频谱泄漏,具有普遍适应性。

3) 在某些情况下,IEC方法的测量精度达不到国家标准误差要求,本文根据信号DFT频谱特征提出的改进措施,可改善这一情况。

参考文献

- [1] GB/T 14549—93 电能质量 公用电网谐波[S].
- [2] IEC 61000-4-7: 1991, Electromagnetic compatibility(EMC), part 4-7: testing and measurement techniques-general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto[S].
- [3] GB/T 17626.7—1998 电磁兼容 试验和测量技术供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则[S].
- [4] 林海雪. 从IEC电磁兼容标准看电网谐波国家标准[J]. 电网技术, 1999, 23(5): 64-67.
Lin Haixue. On difference between national standard and IEC 61000 standards of EMC in harmonic[J]. Power System Technology, 1999, 23(5): 64-67(in Chinese).
- [5] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001, 18(3): 6-9.
Lin Haixue. Interharmonics in electrical power system[J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(3): 6-9(in Chinese).
- [6] 林海雪. 公用电网谐波国标中的几个问题[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 65-70.
Lin Haixue. Some problems in national standard for harmonics in public supply network[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 65-70(in Chinese).
- [7] 林海雪. 英国电气协会工程导则G5/4评述[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 90-93.
Lin Haixue. Review for the engineering recommendation G5/4 by electricity association in the UK[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 90-93(in Chinese).
- [8] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 谐波国家标准有关问题的探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 94-97.
Xie Shaofeng, Li Qunzhan, Zhao Liping. Some discussion of state standard of harmonics[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 94-97(in Chinese).
- [9] 林海雪. 国外谐波测量标准的新进展[J]. 供用电, 2008, 25(6): 13-16.
Lin Haixue. Latest progress on foreign harmonic measurement standards[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(6): 13-16(in Chinese).
- [10] 林海雪. 国际电工委员会谐波标准简介[J]. 中国电力, 1998, 31(10): 55-58.
Lin Haixue. A brief introduction to IEC harmonic standard[J]. Electric Power in China, 1998, 31(10): 55-58(in Chinese).

- [11] Andria G, Savino M, Trotta A. Windows and interpolation algorithms to improve electric measurement accuracy[J]. IEEE Transaction on Instrument and Measurement, 1989, 38(8): 856-863.
- [12] 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 Fusheng, Geng Zhongxing, Ge Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66(in Chinese).
- [13] 黄纯, 江亚群. 谐波分析的开窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 26-32.
Huang Chun, Jiang Yaquin. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 26-32(in Chinese).
- [14] 钱昊, 赵荣祥. 基于插值FFT算法的间谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 87-91.
Qian Hao, Zhao Rongxiang. Interharmonics analysis based on interpolation FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 87-91(in Chinese).
- [15] 庞浩, 李东霞, 祖云霄, 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 Dongxia, Zu Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54(in Chinese).
- [16] 门长有, 王荣华, 谭年熊. 一种用于谐波测量的全数字同步采样算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 83-86.
Men Changyou, Wang Ronghua, Tan Nianxiang. An entire digital synchronous sampling algorithm for harmonic measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 83-86(in Chinese).
- [17] 黄纯, 彭建春, 刘光晔, 等. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 75-79.
Huang Chun, Peng Jianchun, Liu Guangye, et al. Research on software synchronous sampling in measurement of period electric signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 75-79(in Chinese).
- [18] 于海生, 潘松峰, 吴贺荣. 基于复序列FFT和锁相原理的电参数测量[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 59-61.
Yu Haisheng, Pan Songfeng, Wu Herong. Measurement of electrical parameters based on complex sequence FFT and phase locking principle[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 59-61(in Chinese).
- [19] IEC 61000-4-7:2002, Electromagnetic compatibility(EMC), part 4-7: testing and measurement techniques-general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto[S].
- [20] GB/T 17626.7—2008 电磁兼容 试验和测量技术供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则[S].



侯立峰

收稿日期: 2010-01-11。

作者简介:

侯立峰(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制, E-mail: qitian61@163.com;

黄纯(1966—), 男, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统及其自动化、电能质量分析与控制;

李波(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

周璐(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(责任编辑 王晔)