

非整周期采样条件下有功电能计量的新算法*

陈 垒, 赵 伟, 肖 勇, 庄双勇, 黄松岭

(清华大学 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室 北京 100084)

摘 要:非整周期采样条件下,应用 FFT 算法对信号进行分析时,会产生频谱泄漏,从而使有功电能的计量产生误差。在明确基波有功电能和谐波有功电能的定义,并证明负载所消耗的总有功电能与电压电流信号的频谱之间存在一定关系基础上,提出一种基于谐波子组加窗 FFT 的有功电能计量新算法。类似于 IEC 标准中谐波子组的分组方法,对加窗信号的频谱进行分组,并基于加窗前后信号总有功电能保持不变而得到电能恢复系数;同时,应用谐波子组内谱线的参数信息测算出基波有功电能和谐波有功电能值。数值仿真分析和实际应用验证发现,若该新算法配合以 Hanning 窗进行信号处理,其在测算基波有功电能和谐波有功电能时均具有较高的准确度。

关键词:基波有功电能;谐波有功电能;谐波子组;电能恢复系数;窗函数

中图分类号: TH89 TM714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

New active electric energy measurement algorithm under non-integer-period sampling

Chen Lei, Zhao Wei, Xiao Yong, Zhuang Shuangyong, Huang Songling

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: If a signal is analyzed by using FFT algorithm under non-integer-period sampling condition, it will cause spectral leakage, and cause measurement error of active electric energy. After defining fundamental active electric energy and harmonic active electric energy, and proving that there is a certain relationship between the total electric energy consumed by loads and the spectrum of voltage and current signals, the harmonic subgroup windowed FFT algorithm is proposed. Firstly, it groups the spectrum bins of the windowed signal using the harmonic subgroup grouping method in IEC standard. Then, the electric energy recovery coefficient is calculated based on the rule that the total active electric energy remains unchanged after the signals is windowed. Lastly, fundamental electric active energy and harmonic electric active energy is obtained using the coefficient and the harmonic subgroup bins' parameters. Numerical simulation analysis and actual evaluation show that the new algorithm uses Hanning window to process the signals, it can achieve higher accuracy to calculate fundamental electric active energy and harmonic electric active energy.

Keywords: fundamental active electric energy; harmonic active electric energy; harmonic subgroup; electric energy recovery coefficient; window function

1 引 言

有功电能计量,包括基波有功电能计量和谐波有功电能(即总谐波有功电能)计量,是电能计费和电能质量评估等工作的基础^[1-4]。IEC 61000-4-7 标准建议,用快

速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法进行谐波参数测算时,其时间窗为 200 ms^[5]。若构成电能的电压、电流信号中,基波成分的实际频率与额定频率(工频为 50 Hz)存在偏差,就会造成非整周期采样。因此,有必要研究非整周期采样条件下准确测算有功电能的算法。

非整周期采样条件下对有功电能的计量,可转化为

对采样时间窗内瞬时平均功率的测量。传统的瞬时平均功率算法一般分为两类,一类是传统的时域积分法,其主要根据平均功率的定义进行测算;不论整周期采样还是非整周期采样下,它均有较高的准确度^[6]。但这类方法只能测算总瞬时平均功率,不能分别测算基波瞬时平均功率和谐波瞬时平均功率。另一类方法是频域法,主要根据 Budeanu C^[7] 提出的基波瞬时平均功率和谐波瞬时平均功率的定义进行测算。它需要选用一定的具体方法测算出基波和各次谐波的幅值、相角及频率等参数的量值,然后根据上述定义进行测算。因此,测算基波和谐波参数的准确度,便成为影响基波有功电能和谐波有功电能测算能否准确的关键。文献[8-13]提出采用加窗及插值等方法提高基波和谐波参数测算的准确性,且证明了,应用这些方法均能在一定程度上提高有功电能的计量准确性。

本文试提出一种新的基于谐波子组加窗 FFT 的有功电能计量算法,旨在有效提高基波有功电能和谐波有功电能的计量准确性。本文首先明确非整周期采样条件下基波有功电能和谐波有功电能的定义,在此基础上,阐述并论证试提出的有功电能计量算法,最后,结合数值仿真实例和实际应用实验说明该算法的准确性,并讨论选择窗函数时应考虑的主要因素。

2 非整周期采样条件下有功电能的定义

美国电气与电子工程师学会(IEEE)2010年发布的修订版 IEEE 1459 标准中,给出了周期非正弦信号基波瞬时有功功率和谐波瞬时有功功率的定义。本文将根据该标准中的定义进行公式推导及相关证明。

设周期非正弦时域电压信号 $u(t)$ 和电流信号 $i(t)$ 分别为:

$$u(t) = \sum_{h=1}^K A_{u,h} \sin(h\omega t + \varphi_{u,h}) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^K A_{i,h} \sin(h\omega t + \varphi_{i,h}) \quad (2)$$

式中: K 为谐波最高次数, $\omega = 2\pi f$ 代表基波角频率, f 是基波频率, h 为谐波次数 ($h=1$ 时,对应的信号分量为基波分量; $h>1$ 时,对应的信号分量为高次谐波分量), $A_{u,h}$ 和 $A_{i,h}$ 分别表征电压和电流信号第 h 次谐波分量的幅值, $\varphi_{u,h}$ 和 $\varphi_{i,h}$ 分别是电压和电流信号第 h 次谐波分量的初相角。基于上述,可得到其基波瞬时有功功率 p_1 和谐波瞬时有功功率 p_h 分别为:

$$p_1 = P_1 - \frac{A_{u,1}A_{i,1}}{2} \cos(2\omega t + \varphi_{u,1} + \varphi_{i,1}) \quad (3)$$

$$p_h = \sum_{h=2}^K \left(P_h - \frac{A_{u,h}A_{i,h}}{2} \cos(2h\omega t + \varphi_{u,h} + \varphi_{i,h}) \right) \quad (4)$$

式中: $P_h = \frac{A_{u,h}A_{i,h}}{2} \cos(\varphi_{u,h} - \varphi_{i,h})$, $h=1, \dots, K$ 。如此, P_h 即为基波分量和各次谐波分量的有功功率值。在从 t_0 时刻到 t 时刻的时间段内,对式(3)和(4)进行时域积分,就可得到基波有功电能 W_1 和谐波有功电能 W_h 的表达式,具体分别为:

$$W_1 = P_1(t - t_0) - P_1 \frac{\sin(2\omega t + \varphi_{u,1} + \varphi_{i,1}) - \sin(2\omega t_0 + \varphi_{u,1} + \varphi_{i,1})}{2\omega} \quad (5)$$

$$W_h = \sum_{h=2}^K P_h(t - t_0) - \sum_{h=2}^K P_h \frac{\sin(2h\omega t + \varphi_{u,h} + \varphi_{i,h}) - \sin(2h\omega t_0 + \varphi_{u,h} + \varphi_{i,h})}{2h\omega} \quad (6)$$

从式(5)和(6)可以看出,对于周期非正弦电压、电流信号,在非整周期采样条件下,由于同频率的电压分量与电流分量的三角函数之间不再满足正交性,进行时域积分后,其结果与仅通过有功功率与时间间隔 $t - t_0$ 相乘得到的计算值之间存在差异。事实上,非同频率的电压分量与电流分量进行时域积分的结果并不为 0,也会产生额外的有功电能成分^[14-15],但由于此部分量值通常很小,一般可忽略不计。如此,总有功电能 W 可通过式(7)求得,即:

$$W \approx W_1 + W_h \quad (7)$$

3 算法原理

3.1 基于谐波子组 FFT 的有功电能计量算法

对可用式(1)和(2)表征的时域电压、电流信号进行等间隔采样,得到离散的电压、电流信号分别为 $u(n)$ 、 $i(n)$ ($n=1, \dots, N$, N 为所分析数据窗内的采样点数,这里取偶数)。设等间隔采样频率为 f_s ,并取连续 N 个采样点(对应的时间窗为 200 ms)进行 FFT 处理。在非整周期采样条件下,应用 FFT 算法对其进行频谱分析时,会造成频谱泄漏。设电压信号经 FFT 变换,得到各频谱分量的幅值为 U_k (k 为幅频谱线的序号, $k=0, \dots, N-1$),初相角为 ($k=0, \dots, N-1$)。电流信号也经 FFT 处理,得到各频谱分量的幅值为 I_k ($k=0, \dots, N-1$),初相角为 ($k=0, \dots, N-1$)。让电压、电流信号相乘,并做时域积分,就可得到 t_0 时刻到 t 时刻时间段内的瞬时平均功率为:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u(n)i(n) \quad (8)$$

另一方面,分别对式(8)中的 $u(n)$ 和 $i(n)$ 做 FFT 变换,并应用欧拉公式,可得:

$$P = \frac{1}{4} U_0 I_0 + \frac{1}{4} U_{\frac{N}{2}} I_{\frac{N}{2}} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} |U_k| |I_k| \cos(\varphi_{u,k} - \varphi_{i,k}) \quad (9)$$

式(9)表明,一段时间内的瞬时平均功率,可表征为电压、电流信号前 $\frac{N}{2} + 1$ 个频谱分量的有功功率之和。

对式(9),文献[16]中有详细证明,本文不再赘述。如此,该段时间内,负载消耗的总有功电能 W 可表示为:

$$W = P(t - t_0) \quad (10)$$

如此,就可利用式(10)测算出负载所消耗的总有功电能。特别地,结合式(7)可知,当信号中仅含有基波或某次谐波分量时,利用式(10)测算出的电能,就为负载消耗的基波或该次谐波分量的有功电能。

另外,为更准确地测算电力负荷实际消耗的有功电能,就需要分别测算负荷耗用的基波有功电能和谐波有功电能。由于无论在非整周期采样还是整周期采样条件下,基波或某次谐波的幅频谱线总是集中在某一频率范围内,这样,就可采用类似于 IEC 61000-4-7 中谐波子组的分组方法,对信号的频谱进行分组,即,分别划分出谐波子组,再利用这些谱线的参数信息,测算出负荷实际消耗的有功电能。这里提到的谐波子组方法,最早见于 IEC 61000-4-7 中,之后,也有文献将其应用于谐波参数的测量^[17],但未见将这种方法直接应用于有功电能计量的报道。

这里将 $50h \pm 5$ HZ (h 为谐波次数, $h = 1, \dots, K$) 频率范围内的信号频谱分为一组,即将整个信号频谱分为 K 组,其具体的信号频谱的分组方法,如图 1 所示(由于电压、电流信号的频谱分组原则相同,这里只给出电流信号频谱分组的示意图)。如此,采用谐波子组内谱线的参数信息,即可测算出基波有功电能和谐波有功电能的量值。具体地,从 $t_0 \sim t$ 时间段内,当频率分辨率取 5 Hz 时,基于谐波子组法测算基波有功电能的表达式为:

$$W_{sg,1} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^1 U_{10+k} I_{10+k} \cos(\varphi_{u,10+k} - \varphi_{i,10+k})(t - t_0) \quad (11)$$

基于谐波子组法测算谐波有功电能 $W_{sg,H}$ 的表达式为:

$$W_{sg,H} = \sum_{h=2}^K \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^1 U_{10h+k} I_{10h+k} \cos(\varphi_{u,10h+k} - \varphi_{i,10h+k}) \right) (t - t_0) \quad (12)$$

实际上,类似于谐波子组法,IEC 标准还提出了谐波组法,但会引入过多的谱线,从而导致频谱混叠的严重化,因此实际情况下,选择谐波子组法为宜。另一方面,在非整周期采样条件下,电压、电流信号的频谱存在泄漏,会使基波有功电能和谐波有功电能的测算误差增大。这里,考虑采用加窗的方法来减小因非整周期采样带来的负面影响。

3.2 基于谐波子组加窗 FFT 的有功电能计量算法

具体地,在进行电能计量时,首先对电压和电流信号

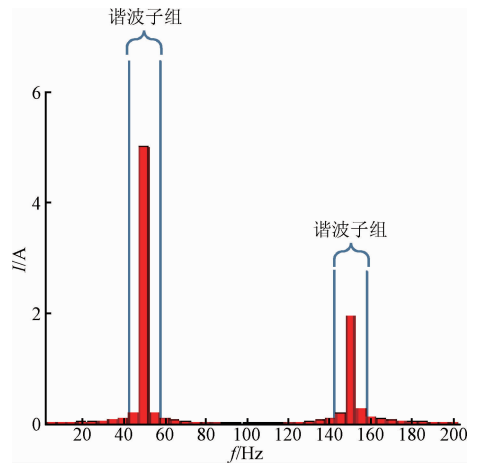


图 1 电流信号谐波子组分组示意
Fig. 1 The grouping schematic of harmonic subgroup of current signal

做加窗处理,再对加窗后的电压、电流信号分别进行 FFT 变换。常用的窗函数有 Hanning 窗、Blackman 窗、Hamming 窗和三角窗等。设电压信号经 FFT 处理,得到其各频谱分量的幅值为 $U_{w,k}$ (k 为幅频谱线的序号, $k = 0, \dots, N-1$), 初相角为 $\varphi_{uw,k}$ ($k = 0, \dots, N-1$); 电流信号经 FFT 分析得到各频谱分量的幅值为 $I_{w,k}$ ($k = 0, \dots, N-1$), 初相角为 $\varphi_{iw,k}$ ($k = 0, \dots, N-1$)。当频率分辨率取 5 Hz 时,基于谐波子组法测算基波有功电能 $W_{sgw,1}$ 和谐波有功电能 $W_{sgw,H}$ 的表达式如式(13)和(14)所示,即:

$$W_{sgw,1} = \frac{1}{2} c_{w,1} \sum_{k=1}^1 U_{w,10+k} I_{w,10+k} \cos(\varphi_{uw,10+k} - \varphi_{iw,10+k})(t - t_0) \quad (13)$$

$$W_{sgw,H} = \frac{1}{2} c_{w,H} (t - t_0) \times \sum_{h=2}^K \sum_{k=1}^1 U_{w,10h+k} I_{w,10h+k} \cos(\varphi_{uw,10h+k} - \varphi_{iw,10h+k}) \quad (14)$$

式中: $c_{w,1}$ 和 $c_{w,H}$ 分别为基波电能恢复系数和谐波电能恢复系数。它们是为了保证施加窗函数前后,相应的有功电能不受影响而设置的。

对被测电压、电流信号做时域截断后,频域分析中引入的电能恢复系数,应使加窗后信号的能量(有功电能)与未加窗时信号的能量(有功电能)相等^[18];其具体计算方法如下。一般地,设电压、电流信号分别为 $u(t)$ 和 $i(t)$, 窗函数为 $w(t)$, 则电能恢复系数 c 为:

$$c = \frac{\int_b^t u(t)i(t)dt}{\int_b^t [w(t)u(t)][w(t)i(t)]dt} = \frac{\int_b^t u(t)i(t)dt}{\int_b^t w(t)^2 u(t)i(t)dt} \quad (15)$$

实际经过等间隔采样后,电压、电流信号均是离散信

号,所加窗函数也是离散的。如此,电能恢复系数的表达式应改为:

$$c = \frac{\sum_{n=1}^N u(n)i(n)T_s}{\sum_{n=1}^N w(n)^2 u(n)i(n)T_s} \quad (16)$$

式中: T_s 为等间隔采样的时间间隔。当采样频率足够高,即采样时间间隔足够小时,由数值积分代替连续积分而产生的误差可忽略不计^[6]。如此,当 $u(n)$ 、 $i(n)$ ($n=1, \dots, N$) 为离散的基波电压和基波电流信号时,基于式(16)测算得到的结果,即为基波电能恢复系数 $c_{w,1}$; 当 $u(n)$ 、 $i(n)$ ($n=1, \dots, N$) 为离散的谐波电压和谐波电流(包含所有次谐波)信号时,其结果即为谐波电能恢复系数 $c_{w,H}$; 而当 $u(n)$ 、 $i(n)$ ($n=1, \dots, N$) 为离散的总电压、总电流(即包含基波和所有次谐波)信号时,则其结果即为总电能恢复系数 c_w 。式(7)就可改写为:

$$c_w W_w \approx c_{w,1} W_{w,1} + c_{w,H} W_{w,H} \quad (17)$$

式中: W_w 、 $W_{w,1}$ 和 $W_{w,H}$ 分别为加窗后信号的总电能理论值、基波有功电能理论值和谐波有功电能理论值。在实际应用中,电压、电流信号是已知的,但其中的基波分量和谐波分量未知,这样,就只能测算出总电能恢复系数 c_w 。这里,再考虑采取一定的方法测算出 $c_{w,1}$ 和 $c_{w,H}$ 的近似值。首先,对式(16)做如下变换:

$$c_w \approx c_{w,1} \frac{W_{w,1}}{W_w} + c_{w,H} \frac{W_{w,H}}{W_w} \quad (18)$$

而实际情况下,谐波有功电能 $W_{w,H}$ 远小于基波有功电能 $W_{w,1}$, 如此,有 $\frac{W_{w,H}}{W_w} \approx 0$, $\frac{W_{w,1}}{W_w} \approx 1$ 。从而可推知:

$$c_w \approx c_{w,1} \quad (19)$$

于是,式(17)就可改写为:

$$c_w W_w \approx c_{w,1} W_{w,1} + c_{w,H} W_{w,H} \quad (20)$$

从而有:

$$c_w (W_w - W_{w,1}) \approx c_{w,H} W_{w,H} \quad (21)$$

另外,由于 $W_w - W_{w,1} \approx W_{w,H}$, 如此,在式(21)中,

$$c_w W_{w,H} \approx c_{w,H} W_{w,H}, \text{ 从而有:}$$

$$c_w \approx c_{w,H} \approx c_{w,1} \quad (22)$$

所以,只要计算出总电能恢复系数 c_w , 也就近似得到了基波电能恢复系数和谐波电能恢复系数。仿真分析表明,上述的近似化简计算方法是可行的。

综上所述,在用本文提出的算法进行有功电能测算时,首先要对电压、电流信号做加窗处理;接着,要对其进行 FFT 变换,从而得到电压、电流信号的频谱;然后,再基于谐波子组的分组方法对其频谱进行分组;另外,还应根据式(16)测算出总电能恢复系数;最后,根据式(13)、(14)和(22),便可测算出基波有功电能和谐波有功电能。

4 算法的数值仿真验证

4.1 新算法与传统算法测算准确性的对比

采用含有多次谐波的电压、电流信号进行数值仿真验证,其数学模型如式(1)和(2)所示;其中,最高谐波次数 $K=11$, 电压、电流信号的基波和各次谐波的具体参数如表1所示。

表1 用于数值仿真验证的电压、电流信号的基波和各次谐波参数

Table 1 The parameters of fundamental and harmonic components of voltage and current signals

h	$A_{u,h}/V$	$\varphi_{u,h}/(^{\circ})$	$A_{i,h}/A$	$\varphi_{i,h}/(^{\circ})$
1	220.5	32	10	29
2	1.2	20	0.15	5
3	3.5	68	0.8	64
4	0.9	46	0.13	77
5	2.1	19	0.65	49
6	0.5	85	0.10	15
7	1.3	53	0.48	61
8	0.4	28	0.05	37
9	1.1	50	0.32	53
10	0.2	16	0.03	20
11	0.5	72	0.21	38

设对电压、电流信号实施等间隔采样的频率均为 $f_s = 10.24$ kHz, 采样数据点数取 $N=2048$ (当 $f=50$ Hz 时, N 对应于电压、电流信号的10个整数基波周期的采样点数), 时间窗为 $0 \sim 0.2$ s。为了能分析、比较不同电能计量算法在非整周期采样和整周期采样条件下的测算准确度性能,本文中,基波正弦电压、电流信号频率 f 的量值,分别取 49.5、49.6、49.7、 \dots 、50.3、50.4、50.5 Hz。接下来,用本文提出的新算法(窗函数以 Hanning 窗为例)以及传统的加窗 FFT 有功电能计量算法(并分别施加了3种窗),分别测算负载消耗的基波有功电能和谐波有功电能量值,并比较这些算法的测算准确性。这里所指的传统的加窗 FFT 有功电能计量算法,具体为:首先对信号进行加窗处理,然后进行 FFT 变换,得到基波和各次谐波的幅值、初相等参数,再应用文献[17]中的方法测算出信号的基波频率,代入式(5)和(6),从而测算出有功电能量值。本文在实现传统加窗 FFT 算法上,还分别选用了 Blackman 窗、Hanning 窗和三角窗等窗函数。

表2和3中,分别给出了基波频率不同时,新算法与传统算法的基波有功电能和谐波有功电能的测算结果,同时也给出了理论值。图2则展示了以新算法和传统算法测算基波有功电能和谐波有功电能的相对误差(绝对值),其中,图2(a)所示为新算法与传统算法测算出的基

波有功电能计量误差的对比图;图2(b)所示为两者测算出的谐波有功电能计量误差的对比图。结合表2、3和图2可以看出,对于基波有功电能,本文提出的新算法的测算准确度高于3种具体传统算法(窗函数不同),且实际频率偏离工频50 Hz越多,新算法的优势越明显;对于谐波有功电能,本文提出新算法的测算准确度比其他3种算法的测算准确度高1个数量级,且实际频率偏离工频50 Hz越多,新算法的优势也越明显。另外,相比于基波有功电能的测算,本文提出的新算法在测算谐波有功电能时,与其他3种传统算法相比优势更明显。

表2 新算法和传统算法的基波有功电能测算结果及理论值

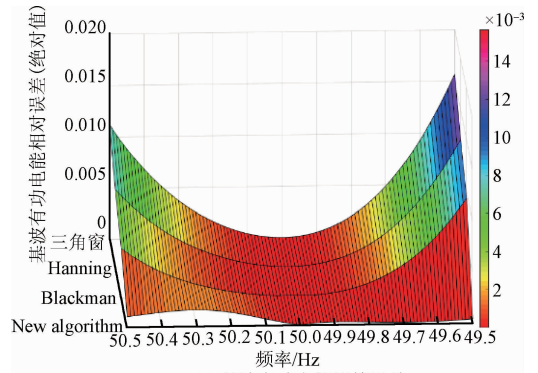
Table 2 The fundamental active electric energy theoretical values and calculation results of the new and traditional algorithms

频率/Hz	基波有功电能测算结果/J				理论值
	新算法	Blackman	Hanning	三角窗	
49.50	222.01	220.03	219.39	218.61	222.09
49.60	221.60	220.48	220.07	219.57	221.64
49.70	221.17	220.64	220.41	220.13	221.20
49.80	220.76	220.59	220.48	220.36	220.80
49.90	220.40	220.42	220.39	220.36	220.46
50.00	220.20	220.21	220.20	220.20	220.20
50.10	220.17	220.01	219.97	219.94	220.03
50.20	220.27	219.85	219.74	219.62	219.98
50.30	220.38	219.73	219.49	219.21	220.03
50.40	220.50	219.59	219.18	218.69	220.19
50.50	220.67	219.38	218.75	217.98	220.45

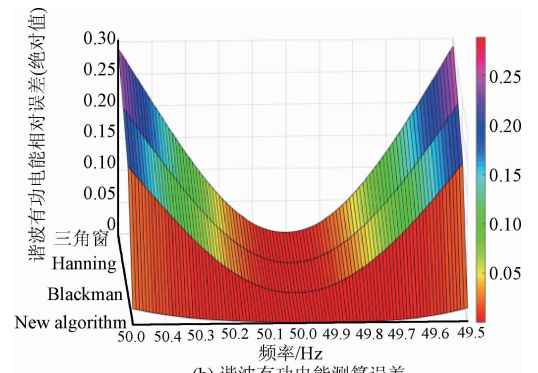
表3 新算法和传统算法的谐波有功电能测算结果及理论值

Table 3 The harmonic active electric energy theoretical values and calculation results of the new and traditional algorithms

频率/Hz	谐波有功电能测算结果/J				理论值
	新算法	Blackman	Hanning	三角窗	
49.50	0.526	0.430	0.405	0.382	0.536
49.60	0.531	0.463	0.445	0.428	0.536
49.70	0.534	0.493	0.481	0.470	0.536
49.80	0.535	0.516	0.510	0.504	0.536
49.90	0.535	0.530	0.529	0.527	0.535
50.00	0.535	0.535	0.535	0.535	0.535
50.10	0.535	0.531	0.529	0.528	0.536
50.20	0.534	0.516	0.511	0.505	0.536
50.30	0.532	0.492	0.481	0.469	0.537
50.40	0.529	0.462	0.444	0.426	0.536
50.50	0.522	0.429	0.405	0.381	0.536



(a) 基波有功电能测算误差
(a) The fundamental electric energy calculation errors



(b) 谐波有功电能测算误差
(b) The harmonic electric energy calculation errors

图2 新算法与传统算法有功电能测算误差的对比
Fig.2 The contrast of active electric energy calculation errors of the new algorithm and the traditional algorithms

4.2 本文新算法与其他新颖算法的测算准确性对比

用本文提出的新算法和其他国内外新颖算法,分别测算负载消耗的基波有功电能和谐波有功电能量值,并比较这些算法的测算准确性。这里提到的国内外新颖算法,主要包括基于 IEC 标准的加窗谐波子组算法^[17](所用窗函数为 Hanning 窗)、三角窗双峰插值算法^[19-20]。其具体计算流程,相关参考文献有详细介绍,本文不再赘述。

表4和5中,分别给出了基波频率不同时,新算法与其他新颖算法的基波有功电能和谐波有功电能的测算结果,同时也给出了理论值。图3则展示了以新算法和其他新颖算法测算基波有功电能和谐波有功电能的相对误差(绝对值),其中,图3(a)所示为新算法与其他新颖算法测算出的基波有功电能计量误差的对比;图3(b)所示为两者测算出的谐波有功电能计量误差的对比。结合表4、5和图3可以看出,本文提出的新算法的测算谐波有功电能准确度要高于其他3种算法,而对基波有功电能的测算,本文提出的算法也有较高准确度。

表4 三种算法的基波有功电能测算结果及理论值

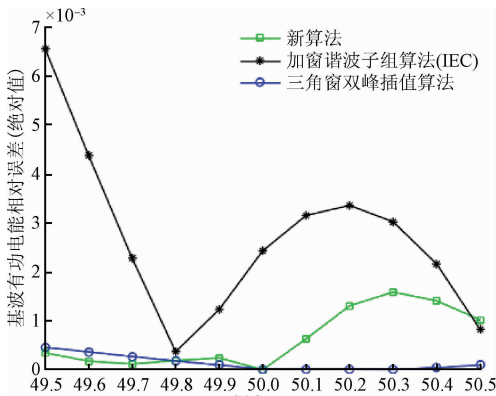
Table 4 The fundamental active electric energy theoretical values and calculation results of the 3 algorithms

频率/Hz	基波有功电能测算结果/J			理论值
	新算法	加窗谐波子组算法(IEC)	三角窗双峰插值算法	
49.50	222.01	220.63	221.98	222.09
49.60	221.60	220.67	221.55	221.64
49.70	221.17	220.70	221.14	221.20
49.80	220.76	220.72	220.75	220.80
49.90	220.40	220.73	220.43	220.46
50.00	220.20	220.73	220.20	220.20
50.10	220.17	220.73	220.03	220.03
50.20	220.27	220.72	219.98	219.98
50.30	220.38	220.70	220.03	220.03
50.40	220.50	220.67	220.20	220.19
50.50	220.67	220.63	220.47	220.45

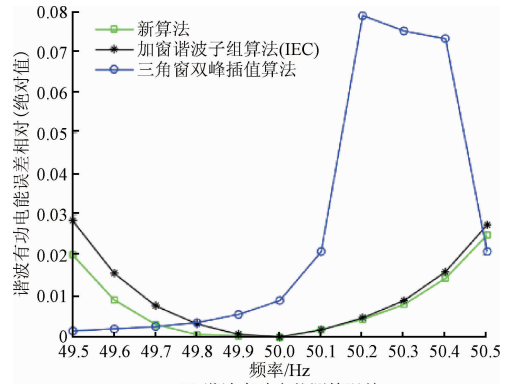
表5 三种算法的谐波有功电能测算结果及理论值

Table 5 The harmonic active electric energy theoretical values and calculation results of the 3 algorithms

频率/Hz	谐波有功电能测算结果/J			理论值
	新算法	加窗谐波子组算法(IEC)	三角窗双峰插值算法	
49.50	0.526	0.521	0.535	0.536
49.60	0.531	0.528	0.535	0.536
49.70	0.534	0.532	0.535	0.536
49.80	0.535	0.534	0.534	0.536
49.90	0.535	0.535	0.532	0.535
50.00	0.535	0.535	0.530	0.535
50.10	0.535	0.535	0.524	0.536
50.20	0.534	0.534	0.494	0.536
50.30	0.532	0.532	0.496	0.537
50.40	0.529	0.528	0.497	0.536
50.50	0.522	0.521	0.547	0.536



(a) 基波有功电能测算误差
(a) The fundamental electric energy calculation errors



(b) 谐波有功电能测算误差
(b) The harmonic electric energy calculation errors

图3 新算法与其他新颖算法有功电能测算误差对比

Fig. 3 The contrast of active electric energy calculation errors of the new algorithm and other new algorithms

4.3 新算法采用不同窗函数的测算准确性对比

对本文提出的新算法,采用不同的窗函数,其测算结果也有差别。这里为新算法分别施加 Hamming 窗、Hanning 窗、三角窗、Blackman 窗和矩形窗等 5 种常用窗函数进行数值仿真计算,并比较它们的测算结果。这里所采用的 5 种窗函数的窗长均为 $L = N = 2048$ 。在表 6 和 7 中,分别给出了基波频率不同时,以本文提出的新算法选配不同窗函数进行测算,分别得到的基波有功电能和谐波有功电能的测算结果,同时也给出了理论值;图 4 则展示了选用不同窗函数进行基波有功电能和谐波有功电能测算的相对误差(绝对值),其中,图 4(a)所示为基波有功电能测算误差的对比图,图 4(b)所示为谐波有功电能测算误差的对比图。

表6 新算法采用不同窗函数的基波有功电能测算结果及理论值

Table 6 The fundamental active electric energy theoretical values and calculation results when using different window function

频率/Hz	基波有功电能测算结果/J					理论值
	Hamming	Hanning	三角窗	Blackman	矩形窗	
49.50	222.06	222.01	221.35	219.45	219.20	222.09
49.60	221.63	221.60	220.89	219.13	219.73	221.64
49.70	221.19	221.17	220.43	218.77	220.06	221.20
49.80	220.77	220.76	219.98	218.40	220.21	220.80
49.90	220.41	220.40	219.61	218.08	220.24	220.46
50.00	220.20	220.20	219.39	217.88	220.20	220.20
50.10	220.18	220.17	219.36	217.85	220.09	220.03
50.20	220.28	220.27	219.46	217.92	219.86	219.98
50.30	220.40	220.38	219.60	217.99	219.43	220.03
50.40	220.54	220.50	219.75	218.05	218.82	220.19
50.50	220.73	220.67	219.96	218.13	218.08	220.45

表7 新算法采用不同窗函数的谐波有功电能
测算结果及理论值

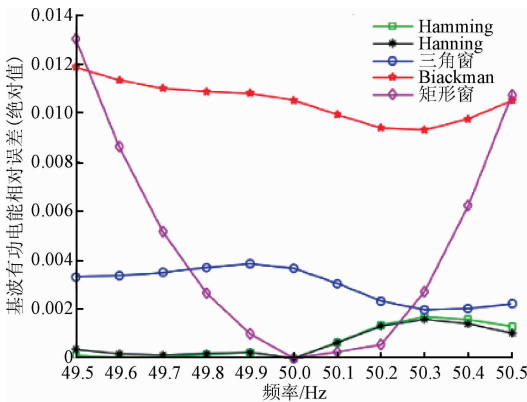
Table 7 The harmonic active electric energy theoretical
values and calculation results when using different
window function

频率/Hz	谐波有功电能测算结果/J					理论值
	Hamming	Hanning	三角窗	Blackman	矩形窗	
49.50	0.534	0.526	0.559	0.511	0.861	0.536
49.60	0.537	0.531	0.564	0.519	0.777	0.536
49.70	0.538	0.534	0.567	0.525	0.709	0.536
49.80	0.537	0.535	0.568	0.528	0.650	0.536
49.90	0.536	0.535	0.568	0.529	0.590	0.535
50.00	0.535	0.535	0.568	0.529	0.535	0.535
50.10	0.534	0.535	0.569	0.528	0.506	0.536
50.20	0.534	0.534	0.569	0.526	0.507	0.536
50.30	0.534	0.532	0.568	0.523	0.522	0.537
50.40	0.532	0.529	0.564	0.517	0.539	0.536
50.50	0.527	0.522	0.557	0.508	0.556	0.536

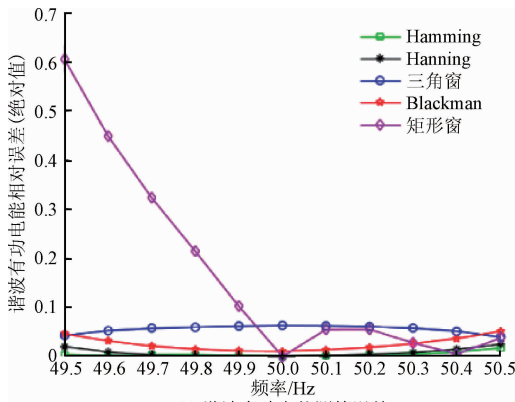
结合表6、7和图4可以看出,对于基波有功电能的测算,相较于其他3种窗函数,采用Hamming窗和Hanning窗时,新算法的测算准确度较高,而采用三角窗和Blackman窗的误差较大;采用矩形窗时,新算法的测算准确度受频率偏差影响较大。对于谐波有功电能的测算,采用Hamming窗、Hanning窗和三角窗时,新算法的测算准确度较高,而采用Blackman窗的误差较大;采用矩形窗的误差也较大,而且其结果受频率偏差的影响较大。分析发现,所提出新算法的测算准确度,不仅与窗函数的旁瓣峰值电平有关,还与其主瓣宽度有关,即旁瓣峰值电平越低,则泄漏越少,但这并不意味着其测算准确度就越高,例如Blackman窗,其旁瓣峰值电平比其他4种窗函数的旁瓣峰值电平都低,但采用它的算法测算误差反而很大。分析发现,这主要是由于Blackman窗的主瓣宽度较大,为 $12\pi/N$;而Hamming窗、Hanning窗和三角窗的主瓣宽度均为 $8\pi/N$ 。本文采用谐波子组分组方法,利用45~55 Hz内的谱线进行测算,更适宜于Hamming窗、Hanning窗和三角窗的主瓣宽度。而对于Blackman窗,它所采用的谱线的频率范围应以40~60 Hz为宜。

5 实际应用

考虑在实际条件下,验证本文提出算法的准确性。本文应用深圳市星龙科技有限公司生产的XL-803型模拟功率源产生表1中所述的电压电流信号,经信号调理电路对上述信号进行调理后,再用TEXAS INSTRUMENT公司生产的24位采样单元ADS1278对电压、电流信号进行采样,最后应用ANALOG DEVICES公司生产的BLACKFIN系列数字信号处理器ADSP-BF609,对采样得到的数字信号进行处理,并分别用本文提出的新算法、基于IEC标准的加窗谐波子组算法(所用窗函数为Hanning窗)和三角窗双峰插值算法进行有功电能测算。图5(a)和(b)所示分别为上述算法在测算基波有功电能和谐波有功电能时的误差。通过对比可知,在实际应用条件下,相比于其他新颖算法,本文提出的新算法在测算基波有功电能和谐波有功电能时均具有较高的准确度。



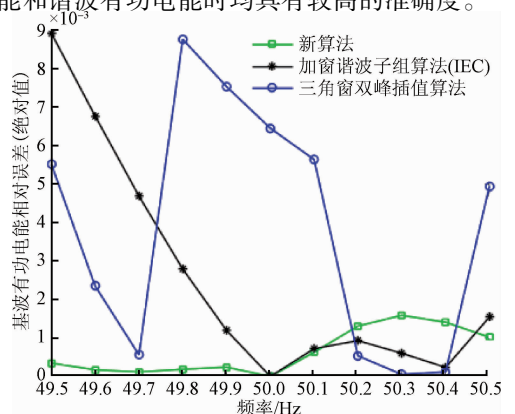
(a) 基波有功电能测算误差
(a) The fundamental electric energy calculation errors



(b) 谐波有功电能测算误差
(b) The harmonic electric energy calculation errors

图4 新算法采用不同窗函数的有功电能
测算误差的对比

Fig. 4 The contrast of active electric energy calculation
errors when using different window functions



(a) 基波有功电能测算误差
(a) The fundamental electric energy calculation errors

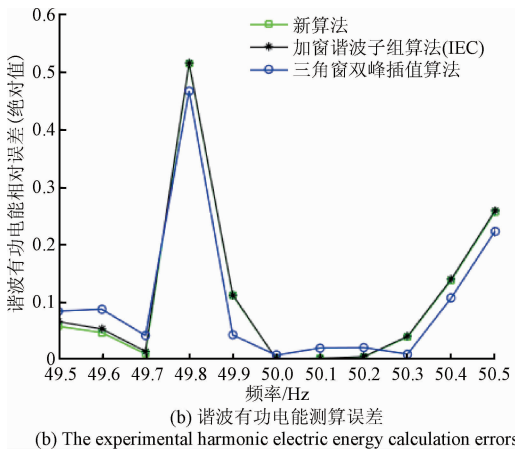


图5 新算法与其他新颖算法有功电能实际
测算误差对比

Fig.5 The contrast of experimental active electric energy
calculation errors of the new algorithm and other
new algorithms

6 结 论

本文提出了一种基于谐波子组加窗 FFT 的有功电能计量算法。它与传统的加窗 FFT 有功电能计量算法相比,无需测算出信号的实际基波频率,计算方法简单,而且基波有功功率和谐波有功功率的测算准确度均更高。本文还推导了非整周期采样条件下基波电能恢复系数和谐波电能恢复系数的测算方法。

数值仿真分析和实际应用验证发现,相比于传统的加窗 FFT 有功电能计量算法(采用的窗函数包括 Blackman 窗、Hanning 窗和三角窗共 3 种)和其他 2 种新颖有功电能计量算法,本文提出的谐波子组加窗 FFT 的有功电能计量算法在测算基波有功电能和谐波有功电能时,均具有更高的准确度。另外,本文提出的新算法的测算准确度与窗函数的旁瓣峰值电平以及主瓣宽度均有关,若采用 45~55Hz 范围内的谱线进行有功电能计量,选用 Hanning 窗和 Hamming 窗更为合适。

致 谢

对本文提出新算法的实验验证,是在深圳市星龙科技有限公司的鼎力协助下完成的,在此,对该公司黄建钟高工、黄清乐工程师和刘明浩工程师在实验工作中给予的指导和帮助表示衷心的感谢。

参考文献

[1] IEEE STANDARD. IEEE 1459-2010-IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or

underbalanced conditions [S]. PE/PSIM-Power System Instrumentation and Measurements, 2010.

- [2] 何学农. 现代电能质量测量技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2014.
HE X N. Modern power quality measurement technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [3] 朱江森, 张森. 电动汽车充电站实时网络电能计量系统的研制 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(12): 53-56.
ZHU J M, ZHANG S. Design of the real-time and network management system for electric vehicles energy measurement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(12): 53-56.
- [4] 孟祥忠, 林存海. 基于灰色模型企业电能预测系统的研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 1-3.
MENG X ZH, LIN C H. Based on grey model to predict enterprise power system research [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9): 1-3.
- [5] IEC I. 61000-4-7: 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 [M]. Switzerland, Geneva: IEC Press, 2002.
- [6] 王乐仁, 雷民, 章述汉. 基于 IEC 61850-9-1 的电能数字算法研究 [J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 13-18.
WANG L R, LEI M, ZHANG SH H. Research on electric energy algorithm by IEC 61850-9-1 protocol [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(2): 13-18.
- [7] BUDEANU C. Puissances réactives et fictives [M]. Institut National Roumain pour l'étude de l'Aménagement et de l'utilisation des sources d'énergie, 1927.
- [8] ANDRIA G, SAVINO M, TROTTA A. FFT-based algorithms oriented to measurements on multifrequency signals [J]. Measurement, 1993, 12(1): 25-42.
- [9] ZHANG F, GENG Z, YUAN W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2001, 16(2): 160-164.
- [10] BORKOWSKI J. LIDFT-the DFT linear interpolation method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(4): 741-745.
- [11] 刘冬梅, 杨重良, 何怡刚, 等. 基于 Rife-Vincent 自卷积窗三谱线插值 FFT 电力谐波分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1351-1360.
LIU D M, YANG CH L, HE Y G, et al. Harmonic

- analysis of power system based on Rife-Vincent self-convolution window triple-spectral-line interpolation FFT[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(9): 1351-1360.
- [12] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(12): 2835-2841.
ZHANG H B, CAI X F, LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12):2835-2841.
- [13] 刘小林,扈罗全. 基于最小二乘法的电力系统谐波与间谐波检测方法[J]. *中国测试*, 2016, 42(9): 31-35.
LIU X L, HU L Q. A method for power system harmonic and interharmonic detection based on least square method[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(9): 31-35.
- [14] PERETTO L, WILLEMS J L, EMANUEL A E. The effect of the integration interval on the measurement accuracy of rms values and powers in systems with nonsinusoidal waveform [J]. *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, 2007, 13(1): 113-119.
- [15] 吴静,赵伟. 非整周期采样下电功率测量的误差分析[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2006, 46(7): 1197-1199.
WU J, ZHAO W. Error analysis for electrical power measurements with non-integer-period sampling [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2006, 46(7):1197-1199.
- [16] 刘金强. 基于非整周期采样谐波有功功率计量研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
LIU J Q. The Research of harmonic active power measurement based on non-integer period sampling [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [17] 王泽,杨洪耕,袁晓冬. IEC 框架下非同步采样时的谐波和间谐波测量方法 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(3): 69-75.
WANG Z, YANG H G, YUAN X D. Measuring method of harmonics and inter-harmonics with nonsynchronous sampling in IEC framework [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(3): 69-75.
- [18] 焦新涛,丁康. 加窗频谱分析的恢复系数及其求法 [J]. *汕头大学学报:自然科学版*, 2003, 18(3): 26-30,38.
JIAO X T, DING K. Resetting moduli and solutions in windowing spectrum analysis [J]. *Journal of Shantou University: Natural Science*, 2003, 18(3): 26-30,38.
- [19] XIAO Y, ZHAO W, CHEN L, et al. Fast quasi-synchronous harmonic algorithm based on weight window function-mixed radix FFT[C]. *proceedings of the IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2016:1-6.
- [20] 林伟斌,陈垒,肖勇,等. 典型电能计量算法数值仿真及性能比较研究 [J]. *电测与仪表*, 2016, 53(21): 1-5.
LIN W B, CHEN L, XIAO Y, et al. Simulation and performance comparison of typical electric energy metering algorithms [J]. *Electrical Measurement & Instrument*, 2016, 53(21): 1-5.

作者简介



陈垒,2015 年于华北电力大学(保定)获得学士学位,现为清华大学博士生,主要研究方向为数字电能计量方法。

E-mail:chenleithu@hotmail.com

Chen Lei received his B. Sc. degree in 2015 from North China Electric Power University (Baoding). Now he is a Ph. D. candidate in Tsinghua University. His main research interest is digital electrical energy measurement.



赵伟(通讯作者),1982 年于清华大学获得学士学位,1991 年于莫斯科动力学院获得博士学位,现为清华大学教授,主要研究方向为现代电磁测量技术及仪器。

E-mail: zhaowei@mail.tsinghua.edu.cn

Zhao Wei (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1982 from Tsinghua University and Ph. D. degree in 1991 from Moscow Energy Institute. Now he is a professor in Tsinghua University. His main research interest is electromagnetic measurement and instrumentation.