

DOI: 10.7667/PSPC171027

# 基于频率测量值的相量及电气量的 DFT 修正算法

袁石良<sup>1</sup>, 董杰<sup>2</sup>, 徐志强<sup>1</sup>, 宋美杰<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085;  
3. 桂林航天工业学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为解决频率偏移时电力系统相量及电气量的测量误差大的问题, 提出了一种改进的离散傅里叶(DFT)修正算法。建立了相量的实部、虚部与幅值、初相角、频率偏移量之间的函数关系式, 根据此关系式得到实部、虚部与频率之间所满足的一个恒等式。在频率已知条件下计算出修正后的相量幅值和相角, 进一步推导出了修正后的相量实部与虚部, 最后得到其他电气量的修正算法。仿真结果表明, 当系统频率偏移时, 在信号为纯正弦信号, 或者含有高次谐波及随机噪声等情况下, 算法均可有效地提高相量及电气量的计算精度。同时, 该算法对采样频率和频率误差不敏感, 计算量小, 不增加额外的延迟时间。

**关键词:** 非同步采样; 频率; 相角误差; 幅值误差; 修正

## A correction DFT algorithm of phasor and electric parameters based on frequency measurement

YUAN Shiliang<sup>1</sup>, DONG Jie<sup>2</sup>, XU Zhiqiang<sup>1</sup>, SONG Meijie<sup>3</sup>

(1. China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China; 3. Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To solve the problem of the measurement error of phasor and electrical parameters in the power system when frequency offset, an improved DFT correction algorithm is proposed. The function relation between the real part, the imaginary part of the phase and the amplitude, the initial phase angle, the frequency offset is established. According to this relation expression, the real part, the imaginary part and the frequency offset satisfy an identities. Therefore, the correction algorithm of the amplitude and phase angle of the phase can be obtained under the known frequency. Further, the corrected real and imaginary parts of the phasor are derived. Finally, a correction algorithm for other electrical quantities is obtained. Simulation results show that when the system frequency is shifted, the algorithm can effectively improve the accuracy of phasor and electrical quantity when the signals are pure sinusoidal signals or the signals with higher harmonics and random noise. Meanwhile, the algorithm is insensitive to the sampling frequency and frequency error, and the algorithm has a small amount of calculation and does not increase the extra delay time.

**Key words:** asynchronous sampling; frequency; phase angle error; amplitude error; correction

## 0 引言

快速、准确地测量相量和电气量对继电保护的正常工作 and 系统的稳定运行具有重要意义<sup>[1]</sup>。常用的相量算法有卡尔曼滤波算法<sup>[2]</sup>、离散傅里叶变换算法(Discrete Fourier Transform, DFT)、小波变换法<sup>[3]</sup>等。离散傅里叶变换由于算法稳定、可靠, 在嵌入式继电保护装置及自动装置中获得广泛应用。但 DFT 算法在非同步采样时会因频谱泄露和栅栏效应导致精度下降<sup>[4-7]</sup>。为解决此问题, 目前文献中提

出了各种改进 DFT 算法<sup>[8-21]</sup>。其中, 文献[11, 16-20]提出了一类修正算法, 通过对 DFT 计算公式的分析, 将 DFT 算法的误差分为固定误差部分和动态误差部分。动态误差部分与信号的初相角相关, 通过对数据窗平移若干次并进行 DFT 运算, 构造出虚拟相量, 利用相量之间的平衡关系消去初相角, 从而消除动态误差部分。固定误差部分与频率偏差相关。如果频率为已知, 或者通过相关算法得到频率或频率偏差的估计值, 则可消除固定误差部分。文献[11, 17-18]是将频率假定为已知条件进行分析; 文献

[20]通过算法本身先估计出频率, 然后再修正 DFT; 文献[11, 17]提出利用其他算法先计算出频率则可以消除误差, 文献[11]提出利用卡尔曼滤波先估计出频率, 文献[17]提出利用三点法来计算频率。因此, 只要通过相关算法得到频率的估计值, 即可消除 DFT 算法的固定误差部分。

本文首先分析了频率发生偏移时, 非同步采样下傅里叶算法的测量误差, 接着建立了相量的实部、虚部与幅值、初相角、频率偏移量之间的函数关系式。根据此关系式, 得到实部、虚部与频率之间所满足的一个恒等式, 在频率为已知的条件下, 可以计算出修正后的相量幅值和相角。从而进一步推导出了修正后的相量实部与虚部, 然后得到了其他电气量的修正算法, 包括阻抗、有功功率、无功功率。最后通过仿真验证了算法的有效性。

## 1 算法原理

设信号  $u(t)$  中仅含有基波分量, 其频率为  $f$ , 幅值为  $U_m$ , 初相角为  $\varphi_U$ , 则信号可表示为

$$u(t) = U_m \sin(2\pi ft + \varphi_U) \quad (1)$$

若用  $\Delta f$  表示信号频率  $f$  与系统额定频率  $f_0$  之间的差, 则

$$f = f_0 + \Delta f \quad (2)$$

设  $f_0$  对应的工频周期为  $T_0 = 1/f_0$ , 对式(1)所示的信号在时间窗  $[0, T_0]$  上使用傅里叶算法得实部  $U_{R1}$  和虚部  $U_{I1}$ 。

$$U_{R1} = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} u(t) \sin(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m}{T_0} \int_0^{T_0} [\sin(2\pi ft + \varphi_U) \times \sin(2\pi f_0 t)] dt = \quad (3)$$

$$f_0 \times \frac{2U_m f_0 \sin(\pi \Delta f T_0)}{\pi \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \cos(\pi \Delta f T_0 + \varphi_U)$$

$$U_{I1} = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} u(t) \cos(2\pi f_0 t) dt = \frac{2U_m}{T_0} \int_0^{T_0} [\sin(2\pi ft + \varphi_U) \times \cos(2\pi f_0 t)] dt = \quad (4)$$

$$f \times \frac{2U_m f_0 \sin(\pi \Delta f T_0)}{\pi \Delta f (2f_0 + \Delta f)} \sin(\pi \Delta f T_0 + \varphi_U)$$

当信号频率无偏差, 即  $\Delta f = 0$  时, 根据式(3)、式(4)可得  $U_{R1} = U_m \cos \varphi_U$ ,  $U_{I1} = U_m \sin \varphi_U$ , 故傅里叶算法无误差。而当  $\Delta f \neq 0$  时, 由式(3)、式(4)可知, 傅里叶算法得到的实部、虚部就会出现误差。

式(3)、式(4)中均含有一个正弦函数项。为计算方便, 采用以下方法进行计算。设

$$D = \frac{f_0 \sin(\pi \Delta f T_0)}{\pi \Delta f} = \frac{\sin(\frac{\pi \Delta f}{f_0})}{\frac{\pi \Delta f}{f_0}} \quad (5)$$

上式  $D$  与频率偏差  $\Delta f$  有关, 如图 1 所示。

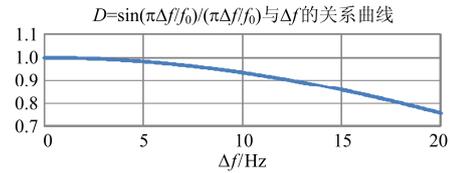


图 1  $D$  与  $\Delta f$  的关系曲线

Fig. 1 Relationship between  $D$  and  $\Delta f$

$D$  可以用二次曲线拟合来计算。

$$D \approx -0.00057\Delta f^2 - 0.00091\Delta f + 1.00167 \quad (6)$$

观察式(3)和式(4), 令其所含有的公共项为  $K$ :

$$K = \frac{2U_m D}{(2f_0 + \Delta f)} \quad (7)$$

则有如下恒等式成立<sup>[14-15]</sup>:

$$K = \sqrt{\left(\frac{U_{R1}}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{U_{I1}}{f}\right)^2} \quad (8)$$

通常保护及自动化装置本身都带有频率测量算法, 可以计算出实时频率  $f$ 。在 DFT 算法计算出实部和虚部 ( $U_{R1}$ ,  $U_{I1}$ ) 后, 可利用式(8)计算出  $K$  值。

根据式(7), 可得修正后的电压幅值:

$$U'_m = \frac{K(f_0 + 0.5 \times \Delta f)}{D} \quad (9)$$

式(4)除以式(3), 得

$$\frac{U_{I1}}{U_{R1}} = \frac{f}{f_0} \times \tan(\pi \Delta f T_0 + \varphi_U)$$

根据上式可得修正后的电压相角:

$$\varphi'_U = \tan^{-1}\left(\frac{f_0}{f} \times \frac{U_{I1}}{U_{R1}}\right) - \pi \frac{\Delta f}{f_0} \quad (10)$$

进一步利用修正后的相量幅值、相角, 对相量的实部、虚部进行修正。以电压为例:

$$\begin{cases} U'_R = U'_m \cos \varphi'_U \\ U'_I = U'_m \sin \varphi'_U \end{cases} \quad (11)$$

上述修正算法是以电压为例得到的, 同理, 可对电流相量进行 DFT 修正。

在对电压及电流相量进行 DFT 修正后, 可以进一步对阻抗  $Z$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$  等进行修正。

$$Z_A = R_A + jX_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A} = \frac{U'_{AR} + jU'_{AI}}{I'_{AR} + jI'_{AI}} \quad (12)$$

设修正后 A 相电压的实部和虚部分别为  $U_{AR}$ 、

$U_{Ai}$ , A 相电流实部和虚部分别为  $I_{Ar}$ 、 $I_{Ai}$ , 则:

$$P_A = U_{Ar} I_{Ar} + U_{Ai} I_{Ai} \quad (13)$$

$$Q_A = U_{Ar} I_{Ai} - U_{Ai} I_{Ar} \quad (14)$$

同理可得 B、C 相有功功率、无功功率。

## 2 算法实现

信号经过 DFT 计算处理完成后, 依次根据式(6)一式(14)计算恒等式的值  $K$ 、幅值、相角、实部、虚部、阻抗、功率。如图 2 所示。

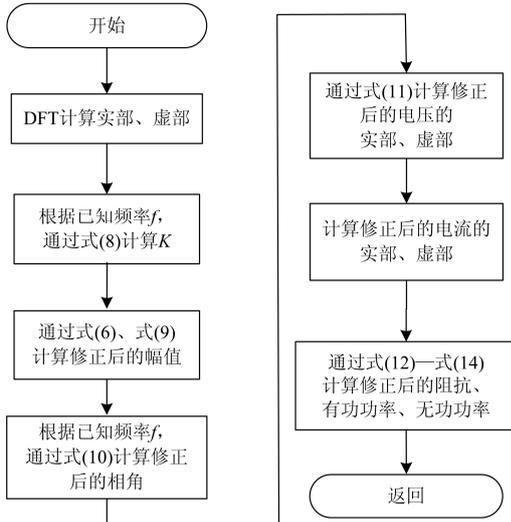


图 2 相量及电气量算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phasor and electric quantity algorithm

## 3 算法仿真

为验证本文算法的正确性和计算精度, 采用 Matlab 工具对纯正弦、叠加高次谐波及噪声两种情况下的信号进行了算法仿真, 同时与传统 DFT 算法和参考文献[16-18]进行了对比分析。考虑到嵌入式装置的频率测量会存在误差, 仿真实验中分别对测频无误差、测频误差  $\pm 0.1$  Hz、测频误差  $\pm 0.001$  Hz 等情况进行算法验证。另外, 通过仿真验证了采样频率对本文所提算法的影响。

### 3.1 纯正弦信号

算例 1 设输入电压和电流信号分别为

$$u(t) = 100 \sin(2\pi ft + \varphi_U), \quad i(t) = \sin(2\pi ft + \varphi_I)$$

其中:  $\varphi_U = \pi/3$ ;  $\varphi_I = \pi/3$ ;  $f = 48 \sim 52$  Hz。

采样频率取 4000 Hz, 即 80 点/周波。仿真结果见图 3—图 5 及表 1 和表 2。图 3—图 5 中, 设定频率无误差、频率误差为  $\pm 0.1$  Hz 与频率误差为  $\pm 0.001$  Hz 进行对比; 表 1 和表 2 在测量频率误差  $\pm 0.1$  Hz 与  $\pm 0.001$  Hz 情况下使用本文算法得到的最大误差进行了对比分析。

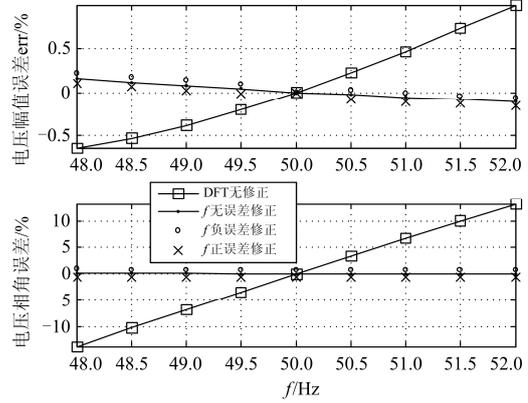


图 3 电压幅值及相角相对误差

Fig. 3 Relative error of voltage amplitude and phase angle

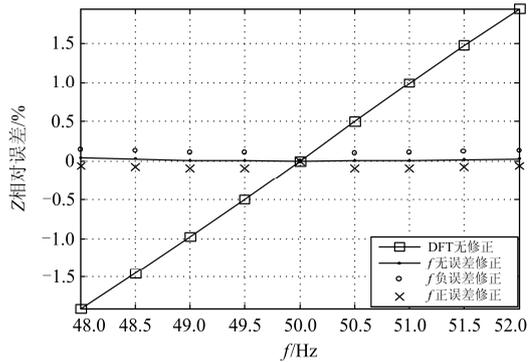


图 4 阻抗相对误差

Fig. 4 Relative error of impedance

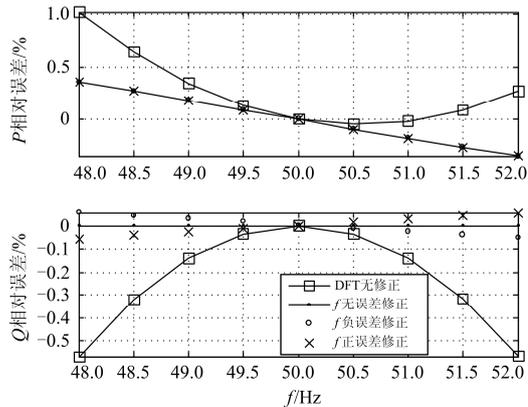


图 5 有功功率(P)、无功功率(Q)相对误差

Fig. 5 Relative error of active and reactive power

表 1 频率 48~52Hz 时相量最大误差对比

Table 1 Comparison of maximum error of phasor at frequency 48~52 Hz

| 误差项      | 传统 DFT 算法 | 本文算法              |                     |
|----------|-----------|-------------------|---------------------|
|          |           | 频率误差 $\pm 0.1$ Hz | 频率误差 $\pm 0.001$ Hz |
| 幅值误差/%   | 0.999     | 0.157             | 0.156               |
| 相角误差/(°) | 8.262 3   | 0.069             | 0.069               |

表 2 频率 48~52 Hz 时电气量最大误差对比  
Table 2 Comparison of maximum error of electrical quantity at frequency 48~52 Hz

| 误差项      | 传统 DFT 算法 | 本文算法         |                |
|----------|-----------|--------------|----------------|
|          |           | 频率误差 ±0.1 Hz | 频率误差 ±0.001 Hz |
| 阻抗误差/%   | 1.931     | 0.045        | 0.043          |
| 有功功率误差/% | 1.023     | 0.352        | 0.350          |
| 无功功率误差/% | 0.567     | 0.000 5      | 0.000 5        |

从算例 1 的仿真结果可得出如下结论。

1) 本文提出的 DFT 修正算法对相量及电气量的计算精度有明显的改善。在 48~52 Hz 的频率范围内, 传统 DFT 算法的幅值误差最大 0.999%, 相角绝对误差达到 8°。经本文修正算法修正后, 幅值误差最大仅为 0.157%, 相角最大误差仅为 0.069°, 其他电气量的误差也都得到了明显改善。

2) 本文提出的 DFT 修正算法对频率测量误差并不敏感。从仿真图 3—图 5 中可见, 频率测量误差达到 ±0.1 Hz, 对本算法的计算精度影响不大; 从表 1 和表 2 可见, 频率误差为 ±0.001 Hz 和 ±0.1 Hz 时相量误差相差不大, 因此算法对频率测量误差不敏感。

### 3.2 叠加谐波、噪声

算例 2 设输入电压、电流信号分别为

$$u(t) = 100 \sin(2\pi ft + \pi/3) + 5 \sin(6\pi ft + \pi/6) + 10 +$$

$$2.5 \sin(10\pi ft + \pi/2) + 2 \sin(14\pi ft + \pi/10) + R_n$$

$$i(t) = \sin(2\pi ft + \pi/6) + 0.05 \sin(6\pi ft + \pi/6) + 0.1 +$$

$$0.025 \sin(10\pi ft + \pi/2) + 0.02 \sin(14\pi ft + \pi/10) + R_n$$

其中,  $R_n$  为信噪比为 50 dB 零均值高斯白噪声。仿真取频率范围为  $f=48\sim 52$  Hz, 频率误差分别设定为频率无误差、误差为 ±0.1 Hz 与误差为 ±0.001 Hz, 采样频率取 4 000 Hz, 即 80 点/周波。仿真结果见图 6—图 8。

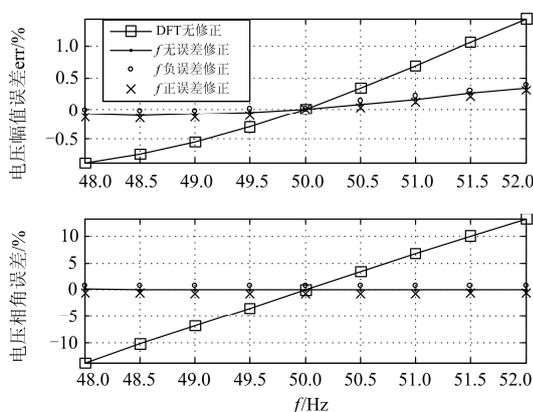


图 6 电压幅值及相角相对误差

Fig. 6 Relative error of voltage amplitude and phase angle

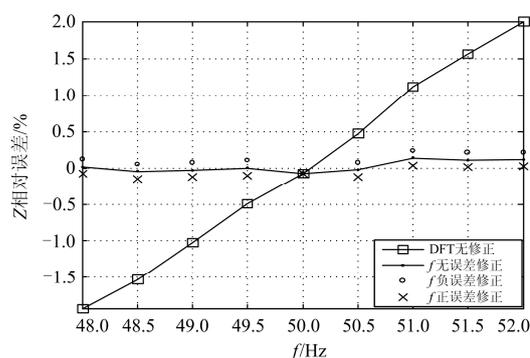


图 7 阻抗相对误差

Fig. 7 Relative error of impedance

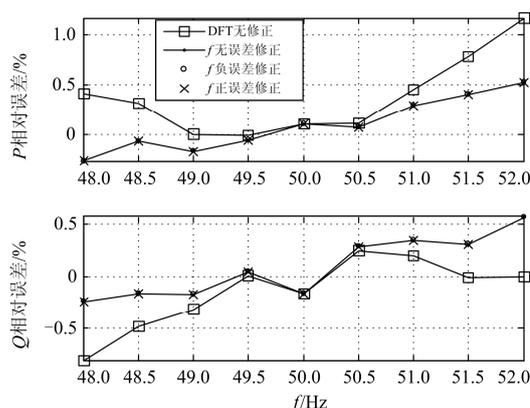


图 8 有功功率(P)、无功功率(Q)相对误差

Fig. 8 Relative error of active and reactive power

从算例 2 的仿真结果可得出如下结论。

1) 在信号中含有高次谐波、固有直流分量、噪声的条件下, 本文提出的 DFT 修正算法对相量及电气量的计算精度有明显的改善。其中, 电压幅值误差最大仅 0.34%, 相角最大误差仅为 0.1°, 阻抗及功率等电气量的计算精度也有明显改善。

2) 在信号含有谐波等干扰因素下, 本文算法对频率测量误差同样是不敏感的。在频率误差高达 ±0.1 Hz 时, 相量及电气量的计算误差与 ±0.001 Hz 相差很小。

### 3.3 采样频率的影响

算例 3 设输入信号为纯正弦信号, 幅值 100, 初相角 70°, 频率取 48~52 Hz, 采样频率取 1.2~6 kHz。设置采样频率分别为 1.2 kHz, 2 kHz, 2.4 kHz, 3.6 kHz, 4 kHz, 4.8 kHz, 6 kHz, 分析对比上述采样频率下的算法计算精度, 仿真结果如表 3 所示。

从表 3 可见:

1) 总体上来说采样频率越高, 则本文算法的精度越高, 计算误差越小;

表 3 不同采样频率下的误差对比

Table 3 Comparison of error at different sampling frequencies

| 采样频率/<br>kHz | 相角绝对误差/(°) |       | 幅值相对误差/% |       |
|--------------|------------|-------|----------|-------|
|              | 传统 DFT     | 本文算法  | 传统 DFT   | 本文算法  |
| 6            | 8.135      | 0.026 | 1.457    | 0.088 |
| 4.8          | 8.128      | 0.033 | 1.445    | 0.111 |
| 4            | 8.12       | 0.04  | 1.433    | 0.133 |
| 3.6          | 8.116      | 0.045 | 1.424    | 0.148 |
| 2.4          | 8.091      | 0.069 | 1.381    | 0.224 |
| 2            | 8.076      | 0.084 | 1.353    | 0.273 |
| 1.2          | 8.011      | 0.148 | 1.234    | 0.461 |

2) 即使在较低的采样频率下, 本文算法也对 DFT 算法有较大的改善。对于 1.2 kHz 较低采样频率(每周波 24 点采样), 本文算法将相角的误差从 8.011° 大幅降低到仅 0.148°, 幅值误差从 1.234% 降低到 0.461%, 算法也有较高的精度。

### 3.4 误差对比分析

算例 4 和算例 5 分别在纯正弦、含谐波及噪声的信号条件下, 与文献[16-18]进行了对比。为便于对比误差情况, 仿真的输入条件与对比文献保持一致, 对比文献的误差数据取自所对比的文献。

算例 4 纯正弦信号输入条件下的误差对比

根据文献[18]数据, 采样率  $N=128$ , 正弦信号的频率范围为 49~51 Hz。初相角 60°。仿真结果见表 4。

表 4 纯正弦信号下的误差对比

Table 4 Comparison of error under pure sinusoidal signals

| 实验项    | 传统 DFT | 文献[18] | 本文算法    |
|--------|--------|--------|---------|
| 相角误差/% | 6.863  | 0.82   | 0.029 6 |
| 幅值误差/% | 0.496  | 0.72   | 0.046   |

从表 4 可见, 纯正弦信号输入条件下, 本文算法的计算精度优于对比文献, 并且远高于传统 DFT 算法, 特别是相角的精度提高了 230 倍。

算例 5 信号中含谐波及噪声下的误差对比

根据文献[17]的数据, 采样率  $N=128$ , 信号的频率为 49~51 Hz, 初相角 60°, 信号中 3, 5, 7 次谐波含量分别为 6%, 4%, 2%, 高斯白噪声 50 dB。仿真结果见表 5。

从表 5 可见, 在信号中含有高次谐波及噪声条件下, 本文算法的计算精度优于对比文献, 并且本文算法具有计算量小、不增加时间窗的优势; 与传统 DFT 算法相比, 本文算法将相角的精度提高了接近 50 倍, 有效地提高了 DFT 的计算精度。

表 5 谐波及噪声条件下的相角误差对比

Table 5 Comparison of phase angle errors under harmonic and noise conditions

| 频率/Hz | 相角绝对误差/(°) |         |         |        |
|-------|------------|---------|---------|--------|
|       | 传统 DFT     | 文献[16]  | 文献[17]  | 本文算法   |
| 49    | -4.178     | 0.384 8 | 0.092 8 | -0.042 |
| 49.5  | -2.088     | 0.192 1 | 0.045 2 | -0.03  |
| 50.5  | 2.078      | 0.193 2 | 0.047 6 | 0.041  |
| 51    | 4.136      | 0.387 6 | 0.093 2 | 0.087  |
| Max   | 4.178      | 0.387 6 | 0.093 2 | 0.087  |

## 4 结论

为消除传统 DFT 算法因非同步采样所带来的误差, 本文在频率为已知条件下, 根据 DFT 的实部和虚部所满足的一个恒等式, 推导出幅值和相角的 DFT 修正算法, 进而推导出实部、虚部的修正算法, 从而得到其他电气量  $Z$ 、 $P$ 、 $Q$  等的修正算法。

Matlab 仿真表明, 当频率偏移时, 本算法在纯正弦信号输入、叠加高次谐波及噪声等情况下, 均可有效地提高计算精度; 本算法对频率测量误差不敏感, 如果算法中使用的频率与实际频率不相等, 误差达到  $\pm 0.1$  Hz, 本算法仍然有较高的计算精度; 本算法即使在较低的采样频率下, 也可对 DFT 算法有较大的改善。

本文所提出的 DFT 修正算法是在 DFT 计算出实部、虚部的基础上进行修正计算即可, 不需要调整采样频率, 不用调整数据窗长度, 不需重新进行 DFT 计算, 计算量小, 比较适合嵌入式保护及自动装置应用。

## 参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 吕思颖, 黎丹, 要航, 等. 基于无迹 Kalman 滤波的基波分量提取[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 79-84.
- [3] LÜ Siying, LI Dan, YAO Hang, et al. Fundamental component extraction based on unscented Kalman filter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 79-84.
- [4] 张姝, 何正友, 何文. 基于递归小波的相量测量算法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 194-200.
- [5] ZHANG Shu, HE Zhenyou, HE Wen. A recursive wavelet-based algorithm for phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 194-200.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [5] 柴旭峥, 文习山, 关根志, 等. 一种高精度的电力系统谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 67-70.  
CHAI Xuzheng, WEN Xishan, GUAN Genzhi, et al. An algorithm with high accuracy for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 67-70.
- [6] SIDHU T S, SACHDEV M S. An iterative technique for fast and accurate measurement of power system frequency[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 109-115.
- [7] BEGOVIC M M, DURIC P M, DUNLOP S, et al. Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(2): 480-485.
- [8] 蔡晓峰, 张鸿博, 鲁改凤. 应用三谱线插值 FFT 分析电力谐波的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 33-39.  
CAI Xiaofeng, ZHANG Hongbo, LU Gaifeng. Improvement algorithm for harmonic analysis of power system using triple-spectrum-line interpolation algorithm based on window FFT[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 33-39.
- [9] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-145.  
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.
- [10] 禹永植, 张忠民, 席志红. 基于傅里叶变换的高精度频率及相量算法[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 83-86.  
YU Yongzhi, ZHANG Zhongmin, XI Zhihong. A high-precision algorithm for frequency and phasor based on Fourier transform[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 83-86.
- [11] 刘世明, 郭韬, 吴聚昆, 等. 适用于频率偏移情况下同步相量测量的 DFT 算法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1522-1528.  
LIU Shiming, GUO Tao, WU Jukun, et al. Study of DFT algorithm for synchrophasor measurement under frequency offset[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1522-1528.
- [12] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.  
WANG Maohai, SUN Yuanzhang. A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.
- [13] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 一种滤除衰减直流分量的全波傅氏改进算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 9-17.  
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. A full-wave Fourier improved algorithm of filtering decaying DC component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 9-17.
- [14] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅立叶测频算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 48-49, 54.  
MO Shaoqing, LI Xiaocong. An improved high-accuracy algorithm for frequency measurement based on Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 48-49, 54.
- [15] 李一泉, 何奔腾. 一种基于傅氏算法的高精度测频方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 26(2): 78-81.  
LI Yiquan, HE Benteng. A high-accuracy algorithm for measuring frequency of power system based on Fourier filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 26(2): 78-81.
- [16] XIA T, LIU Y L. Single-phase phase angle measurements in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 844-851.
- [17] 倪玉玲, 郑建勇, 梅军, 等. 基于偏 p/4 直角坐标的 DFT 相角测量算法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2544-2550.  
NI Yuling, ZHENG Jianyong, MEI Jun, et al. A lean p/4 rectangular coordinate based phase-angle measurement algorithm corrected by discrete Fourier transform[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2544-2550.
- [18] 姚文轩, 滕召胜, 唐求, 等. 非同步采样下电力系统相量测量修正算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1518-1524.  
YAO Wenxuan, TENG Zhaosheng, TANG Qiu, et al. Power system phasor measurement and correction algorithm under asynchronous sampling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1518-1524.
- [19] 周念成, 廖彦洁. 基于虚拟 ab 静止坐标系的相角测量算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 61-65.  
ZHOU Niancheng, LIAO Yanjie. A phase angle measurement algorithm based on virtual ab stationary coordinate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 61-65.
- [20] 王超, 汪芳宗. 基于 DFT 的高精度相量测量的新算法[J]. 电测与仪表, 2009, 46(522): 13-16, 20.  
WANG Chao, WANG Fangzong. A high-precision algorithm for phasor measurement based on DFT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(522): 13-16, 20.
- [21] 邵璞, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 全相位-混合基 FFT 在相量测量装置中的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 65-69.  
SHAO Pu, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al. Realization of all phase-mixed radix FFT on the phase measurement device[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 65-69.

收稿日期: 2017-07-11; 修回日期: 2018-01-10

作者简介:

袁石良(1974—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事继电保护及自动装置研究工作; E-mail: ysl0807@163.com

董杰(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护及自动装置研究工作。E-mail: dongjie@sf-auto.com

(编辑 姜新丽)