

# 应用复幅度实时检测电网频率的新算法

章熙<sup>1</sup>, 唐婧<sup>2</sup>, 李培芳<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气学院, 浙江 杭州 310027; 2. 华北电力大学电气学院, 河北 保定 071003)

摘要: 首先简要分析了频谱泄漏的成因和其对频率分析中 DFT 算法的影响。在理想同步采样的条件下, 提出了一种基于简谐信号复幅度的频率偏差求取算法。再依据实际采样和电网信号的特点, 修正了该算法, 并得出了电网频率实时检测的迭代公式。仿真结果表明, 该算法在非同步采样条件下能精确、快速地跟踪频率变化, 且运算量小、收敛性好、抗谐波干扰能力强, 在以交流电信号实时检测为基础的系统中有较强的应用价值。

关键词: 频谱泄漏; 电能质量; 快速傅里叶变换; 复幅度; 自适应采样

中图分类号: TM935 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)14-0048-04

## 0 引言

电网频率的稳定性是电能质量的核心指标。电网频率的波动会给电力用户和电力系统带来很多的危害。如当发电厂由于故障而突然甩负荷时, 将造成电网频率的急剧下降; 又如, 当电网上的负荷急剧增加时, 也会引起电网频率的下降, 如不及时地采取措施, 将会导致整个电网崩溃。可见对电网频率的实时检测具有十分重要的意义。

对电网频率的分析方法中, FFT 算法是目前比较理想和成熟的一种。但该算法对周期信号频谱的精确分析是建立在对信号进行同步采样的基础之上, 即采样时间和信号周期要成整数倍的关系, 否则就会造成频谱泄漏, 影响分析结果的精确性<sup>[1]</sup>。为了保证同步采样国内外学者提出了许多方法: 一是采用锁相环电路, 由硬件实现同步采样<sup>[2]</sup>, 但其响应速度较慢, 可靠性也不高; 二是先对信号进行均匀采样, 再采用一定的算法实现同步采样, 即软件同步采样<sup>[3,4]</sup>, 它具有通用性和灵活性的特点。另外, 电力系统的频率具有较强的时变性, 固定的采样频率必然会产生频谱泄漏, 故需采用自适应采样算法<sup>[5,6]</sup>来不断地调整采样频率, 以实现实时的频率检测。

本文重点讨论了电网频率的实时检测算法, 首先在详细分析基于简谐信号复幅度的频率偏差求取算法的基础上, 依据实际采样和电网信号的特点提出了一种新的电网频率实时检测算法, 并给出了迭代公式。仿真结果表明该算法具有很好的精确性、实时性、收敛性和抗谐波干扰性。

## 1 基于简谐信号复幅度的频率偏差求取算法

为方便起见假设简谐信号只含基波分量, 则其解析表达式为:

$$x_a(t) = A_1 \cdot e^{j(2\pi f_1 t + \varphi_1)} \quad (1)$$

式中:  $A_1$  为基波的幅值;  $f_1$  为基波频率;  $\varphi_1$  为基波的初相位。

当频率出现偏差  $f = f_1 + \Delta f$  时, 由式 (1) 得:

$$x_a(t) = A_1 e^{j(2\pi(f_1 + \Delta f)t + \varphi_1)} = A_1 e^{j(2\pi f_1 t + \varphi_1)} e^{j(2\pi \Delta f t)} \quad (2)$$

其中  $\Delta f = 2\pi f t + \varphi_1$ , 有:

$$\frac{d}{dt} = 2\pi \Delta f \quad (3)$$

假设简谐信号  $x_a(t)$  在第  $l$  时段, 即  $[0, (N-1)t_{sl}]$  内的频率为  $f = f_1 + \Delta f$ , 且取  $f_{sl} = 1/t_{sl}$  能对  $x_a(t)$  在第  $l$  时段内实现  $N$  点同步采样, 并将在此时段内的采样序列记为  $x(n)$ , 有:

$$x(n) = A_1 e^{j(2\pi(f_1 n t_{sl} + \varphi_1))} = A_1 e^{j(2\pi f_1 n t_{sl} + \varphi_1)} e^{j(2\pi \Delta f n t_{sl})} \quad (4)$$

记  $X = A_1 e^{j(2\pi f_1 n t_{sl} + \varphi_1)} = A_1 e^{j(2\pi f_1 n t_{sl} + \varphi_1)}$ , 则  $X$  称为  $x(n)$  的复幅度。

由 DFT 的定义有:

$$X(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (5)$$
$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1)$$

将式 (4) 代入式 (5), 有:

$$X(k) \Big|_{k = \frac{f}{f_{sl}} N} = 2X \quad (6)$$

故:

$$\angle(X(k) \Big|_{k = \frac{f}{f_{sl}} N}) = \varphi_1 = \varphi_1 \quad (7)$$

若  $x_a(t)$  在第  $l$  时段, 即  $[(N-1)t_{s1} + t_{s2}, (N-1)t_{s1} + Nt_{s2}]$  内的频率为  $f = f_2 = f_1 + \Delta f$ ,  $f \neq 0$ , 且取

$f_{\Omega} = 1/t_{\Omega}$ 能对  $x_a(t)$  在第 I 时段内实现  $N$  点同步采样,并将在此时段内的采样序列记为  $x(n)$ ,有:

$$x(n) = A_1 e^{j[2(f_1 + f_{\Omega} n t_{\Omega} + 1)]} = A_1 e^{j(1+2f_{\Omega} n t_{\Omega})} \cdot e^{j(2f_1 n t_{\Omega})}, \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

记  $X = A_1 e^{j(1+2f_{\Omega} n t_{\Omega})} = A_1 e^j$ , 则  $X$  称为  $x(n)$  的复幅度。

同理可得:

$$X(k) / k = \frac{f_2}{f_{\Omega} N} = 2X \quad (9)$$

故:

$$\text{angle}(X(k) | k = \frac{f_2}{f_{\Omega} N}) = 1 + 2f_1 n t_{\Omega} = \quad (10)$$

由式 (3), 得:

$$\frac{d}{dt} = \frac{-}{t} = 2f \quad (11)$$

其中,  $t$  代表简谐波信号  $x_a(t)$  在第 I 时段和第 II 时段内对应采样点间的时间间隔, 则:

$$t = (N-1-n)t_{s1} + (n+1)t_{\Omega} \quad (12)$$

所以, 由式 (11)、(12) 得:

$$f = \frac{-}{2t} \quad (13)$$

## 2 电网频率实时检测算法

在理想同步采样的条件下, 基于简谐波信号复幅度的频率偏差求取算法可仅通过一次迭代, 便可对变化后的频率得出精确的估计。但在工程实践中对变频率简谐波信号进行理想同步采样很难实现, 只能在非同步采样条件下通过迭代算法来逐步逼近频率变化以后的真实值。

通过软件同步采样的算法来对恒定频率简谐波信号进行检测已比较成熟, 比如运用文献 [4] 中提出的插值 FFT 算法 (但该算法计算量大、耗时长, 不适合作为实时检测算法) 就能对电网信号各次谐波分量进行精确的估计, 故可用该算法来对 I 中简谐波信号  $x_a(t)$  在第 I 时段的  $f_1$  做出精确的预估为  $f_1$ 。

同时考虑到, 实际 I 中的  $x(n)$  是在非同步采样条件下获得, 其理想  $t_{\Omega}$  无法确定, 故将基于简谐波信号复幅度的频率偏差求取算法修正为:

$$t_{\Omega} = t_{s1}, \quad k = k = \frac{f_1}{f_{s1}} N \quad (14)$$

再设  $f_2^{(i)}, i=1, 2, 3, \dots$ , 为对  $x_a(t)$  在第 II 时段实际频率  $f_2$  的第  $i$  次估计值, 由  $f_2^{(i)}$  构造一理论简谐波序列来不断修正  $x_a(t)$  在第 II 时段的  $N$  点采样序列, 得:  $x^{(i)}(n)$ :

$$X^{(i)}(n) = A_1 \cdot e^{j(2f_2^{(i)} n t_{s1}^{(i)} + 1)} = A_1 e^j \cdot e^{j(2f_2^{(i)} n t_{s1}^{(i)})}, \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (15)$$

其中:  $t_{s1}^{(i)} = 1/f_{s1}^{(i)}$  为对  $f_2$  第  $i$  次估计时在第 II 时段的采样周期, 且对  $x^{(i)}(n)$  实现同步采样。

由式 (14) 取  $f_{\Omega}^{(i)} = f_2^{(i)}$  对  $x_a(t)$  实际  $N$  点采样, 即  $x_a(t)$  在第 II 时段内的采样序列为  $x_{II}^{(i)}(n)$ :

$$X_{II}^{(i)}(n) = A_1 \cdot e^{j(2f_2^{(i)} n t_{s1}^{(i)} + 1)} = A_1 \cdot e^j \cdot e^{j(2f_2^{(i)} n t_{s1}^{(i)})}, \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

同时取迭代初值为:

$$f_2^{(1)} = f_1 \quad (17)$$

由式 (15)、(16)、(17), 再依据式 (7)、(10)、(13), 可得如下迭代公式和算法流程图 (如图 1)。

$$f_2^{(i)} = \frac{f_2^{(i-1)} - f_2^{(i-1)}}{2t} \quad (18)$$

$$f_2^{(i+1)} = f_2^{(i)} + f_2^{(i)} \quad (19)$$

式中:  $f_2^{(i)}, t^{(i)}, t^{(i)}$  分别为对  $f_2$  第  $i$  次估计时的频率偏差、复幅度和时间间隔。

注意到实际电网信号往往含有丰富的谐波分量, 而  $x^{(i)}(n)$  是在非同步采样下获得的, 在频谱分析时会产生频谱泄漏。由于基波受其它次谐波泄漏的影响最小, 而本算法是由仅含基波分量的简谐波信号推导而来的, 故其具有很好的抗谐波干扰性能。

## 3 仿真结果及结论

为了验证上述算法的准确性, 依据实际电网信号特点, 假定电网电压波形可表达为:

$$u(t) = \sum_{m=1}^6 U_m \cos(2\pi m f_1 t + \phi_m) \quad (20)$$

其中:  $f_1 = 49.7$  Hz, 其它参数如表 1。

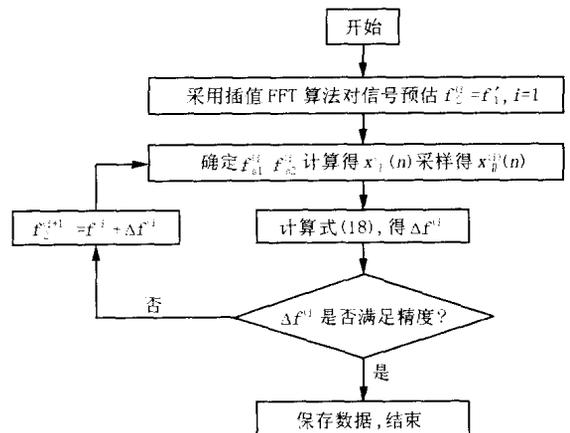


图 1 算法的流程

Fig 1 Flow chart of the algorithm

依据文献 [4] 的插值 FFT 算法来对式 (20) 电压信号进行预估计, 取  $N = 1024$ ,  $f_s = 2560$  Hz 在 Matlab6.5 下仿真得:  $f_1 = f_2^{(1)} = 49.698$  Hz,  $U_1 = 309.8$  V,  $\varphi_1 = 4.919^\circ$ 。

GB/T15945-1995 允许电网频率在  $\pm 0.4\% \sim \pm 1.0\%$  内变化。假定: 电网正常运行条件下, 式 (20) 电压信号的基波频率  $f_1$  在某一时刻从 49.7 Hz 变化到 49.5 Hz; 电网在故障条件下, 式 (20) 电压信号的基波频率  $f_1$  在某一时刻从 49.7 Hz 变化到 45.0 Hz。取  $N = 64$ ,  $f_{sl}^{(i)} = N f_2^{(i)}$ , 在 Matlab 6.5 下仿真结果分别见表 2、表 3; 在 TI 公司的 VC5402 芯片上仿真结果分别如图 2、图 3。

表 1 谐波参数的设置

Tab 1 Harmonic parameters

参数	谐波次数					
	1	2	3	4	5	6
幅度 / V	310.0	1.55	9.30	1.24	15.5	0.93
初相位 / (°)	5.0	10.0	20.0	120.0	150.0	210.0

表 2 频率从 49.7 Hz 变化到 49.5 Hz 的仿真结果

Tab 2 Simulation results of frequency ranging from 49.7 Hz to 49.5 Hz

迭代次数 $i$	$f_2^{(i)}$ / Hz	$f_2^{(i)}$ / Hz	$f_Q^{(i)}$ / Hz	频率偏差 / (%)
1	49.698	-0.0746	3180.7	0.248
2	49.623	-0.0465	3175.9	0.155
3	49.577	-0.0290	3172.9	0.096
4	49.548	-0.0180	3171.1	0.060
5	49.530	-0.0113	3169.9	0.038
6	49.519	-0.0070	3169.2	0.024
7	49.512	-0.0044	3168.7	0.014
8	49.507	-0.0027	3168.5	0.010
9	49.505	-0.0017	3168.3	0.006
10	49.503	-0.0011	3168.2	0.004

表 3 频率从 49.7 Hz 变化到 45.0 Hz 的仿真结果

Tab 3 Simulation results of frequency ranging from 49.7 Hz to 45.0 Hz

迭代次数 $i$	$f_2^{(i)}$ / Hz	$f_2^{(i)}$ / Hz	$f_Q^{(i)}$ / Hz	频率偏差 / (%)
1	49.698	-1.7766	3180.7	6.491
2	47.921	-1.1099	3067.0	4.024
3	46.811	-0.6877	2995.9	2.497
4	46.124	-0.4257	2951.9	1.551
5	45.698	-0.2639	2924.7	0.964
6	45.434	-0.1639	2907.8	0.600
7	45.270	-0.1019	2897.3	0.373
8	45.168	-0.0635	2890.8	0.233
9	45.105	-0.0395	2886.7	0.144
10	45.065	-0.0245	2884.2	0.090

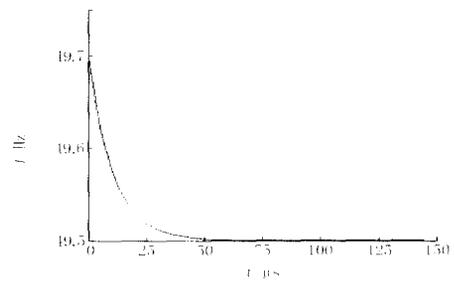


图 2 频率测量结果 (49.7 Hz ~ 49.5 Hz)

Fig 2 Result of frequency measurement (49.7 Hz ~ 49.5 Hz)

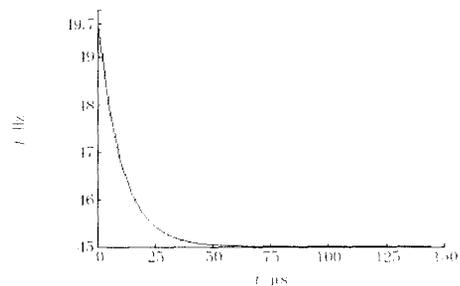


图 3 频率测量结果 (49.7 Hz ~ 45.0 Hz)

Fig 3 Result of frequency measurement (49.7 Hz ~ 45.0 Hz)

分析表 2、图 2 和表 3、图 3 的结果, 可得出如下结论: 应用复幅度实时检测电网频率的新算法精度很高: 仿真结果表明在完成 10 次迭代后偏差率仅为 0.004% (正常状态)、0.090% (故障状态); 该算法运算量小, 用时少: 一次迭代仅需计算两个特定频点 ( $X_I(k_I)$ ,  $X_{II}(k_{II})$ ) 的 DFT 和 2 次加法、4 次乘法, 若采用 FFT 算法较低的采样点数就可以满足精度要求和实时要求; 算法抗谐波干扰能力强; 收敛性好: 一般迭代 10 次左右就可满足精度要求。

#### 4 结语

本文提出的应用复幅度实时检测电网频率的新算法, 现已运用于电厂电能质量实时监测系统的设计中。与文献 [6] 相比较: 本算法精度更高、运算量更小、并具有很好的抗谐波干扰性和收敛性, 适合作为非同步采样条件下频率实时检测的算法。但, 当电网信号包含强噪声时, 如何保持本算法的收敛性和精度还值得作进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

HU Guang-shu Digital Singal Processing——Theory, Al-

- gorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 周箭,陈隆道. 新型电力参数测试与分析[J]. 中国电力, 1998, 31(11): 18-20  
ZHOU Jian, CHEN Long-dao A New Power Parameter Testing and Analyzing System[J]. Electric Power, 1998, 31(11): 18-20
- [3] ZHANG Fu-sheng, GENG Zheng-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
- [4] 祁才君,陈隆道,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, 37(1): 112-116  
QI Cai-jun, CHEN Long-dao, WANG Xiao-hai High-accuracy Estimation of Electric Harmonic Parameters by Using the Interpolated FFT Algorithm[J]. Journal of Zhejiang University, Engineering Science, 2003, 37(1): 112-116
- [5] Lobos T, Rezmer J. Real-time Determination of Power System Frequency[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(4): 877-881.
- [6] 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

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2004-12-11

作者简介:

章 熙(1981-),男,硕士研究生,从事数字信号处理在电力系统中的应用研究;E-mail: zxigz@yahoo.com.cn

唐 婧(1981-),女,硕士研究生,从事电力信息和电力市场方面的研究;

李培芳(1944-),男,教授,从事数字信号处理和高性能数字电路方面的研究。

### A novel algorithm for real-time determination of power network frequency by using complex magnitude

ZHANG Xi, TANG Jing, LI Pei-fang

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** First, the reason for spectrum leakage and its influence to DFT used in frequency analysis is introduced. Based on the complex magnitude of harmonic signals and under the condition of ideal synchronous samplings, an algorithm for computing the frequency deviation is proposed. Second, this algorithm is further modified according to actual sampling and the power network signals. Finally, the iterative formulas for real-time determination of power network frequency are presented as well. Simulation results show that the algorithm can follow up the frequency deviation accurately and quickly. Moreover, the algorithm will be of potential applications in the fields of AC real-time determination due to its features of less computation time, fast convergence and ability of against harmonic interference.

**Key words:** spectrum leakage; power quality; FFT; complex magnitude; adaptive sampling

(上接第 31 页 continued from page 31)

作者简介:

李 钢(1966-),男,高级工程师,研究方向为继电保护

和变电站综合自动化。E-mail: lig@nari-china.com

### Analysis and studies on universal platform of relays

LI Gang<sup>1</sup>, WANG Shan-xiang<sup>1</sup>, SU Wen-hui<sup>2</sup>, FAN Zhi-gang<sup>1</sup>, WU Ming<sup>1</sup>, LU Qi<sup>1</sup>, REN Jian-feng<sup>1</sup>

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Fujian Electric Power Design Institute, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Systematic analysis and studies on either hardware platform of relays such as multi-CPU, error detection on AD channels, design of power and LCD, anti-interference and intelligence module design, or mechanical platform such as dimensions of module and case, anti-interference design are proposed. In the end of this paper, some constructive suggestions on outward appearance design are submitted.

**Key words:** relay protection; uniform platform; hardware; mechanical structure; outward appearance