

电力系统软件测频的改进方法

孙莉

(河南公安高等专科学校, 河南 郑州 450002)

摘要: 频率是电力系统中一个非常重要的特征量,同时频率也是继电保护、测控等继电保护装置进行相应动作的重要判据,因此频率测量是电力系统测量装置中十分重要的环节。电力系统最常用的软件测频方法为离散傅氏算法,采用分段三次 Hermite 插值对离散傅氏测频算法进行改进。所提出的新改进方法具有精度高,计算量相对不大,实时性好的优点。通过数值仿真,分析了本改进方法的时间响应数据窗、绝对误差和谐波对本方法的影响。理论和仿真结果都证明本方法的实用性好。

关键词: 频率; 实时测量; 傅氏算法; 分段三次 Hermite 插值

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)19-0038-04

0 引言

电力系统频率作为衡量电能质量的指标之一,同时也是测量和计算电力谐波、功率因数等指标的基础,因而需加以动态监测。微机保护是在满足采样定理的条件下进行交流采样,对采样数据进行计算得出相应的电压、电流量以及相位值,并通过一定的动作判据来实现。我国电力系统的额定频率为工频 50 Hz,然而在实际情况中,系统频率也不是固定不变的,而是在额定频率附近波动;当系统发生故障时,甚至有可能偏离工频很大,这样在固定采样频率下所采样的数据必然有一定的偏差,不能保证在一个周期内所采的点数整数,数字滤波器的输出性能便会变差,相应的保护算法也会产生一定的误差。要彻底消除基频波动引起的计算误差,就需要准确的测量频率。

频率测量方法主要分为两大类:一种就是硬件测频;另一种是软件测频。硬件测频最常用的方法就是硬件锁相环(PLL)电路法。软件测频的优点是:在不需复杂的采样电路的环境中进行采样,采样数据直接由软件计算分析,得出频率测量结果;同时该组采样数据还可用于谐波分析、功率计算等等,不需要再次采样,简化系统设计。软件测频的常用方法有最小二乘法、牛顿类算法、离散卡尔曼滤波算法,离散傅氏算法及其改进算法,正交去调制法等^[1-4]。

本文主要给出的是离散全周傅氏算法计算频率的一种新的改进方法。

1 全周傅氏算法

设电力系统的电压模型为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

其电压相量可表示为 $\vec{U} = U_R + jU_I$

设额定频率为 f_0 ,当前待测频率为 f ,每周期采样 N 点,采样频率为 $f_s = Nf_0$,采样后离散化的采样序列:

$$u_k = U_m \sin\left(\frac{2\pi f k}{f_s} + \theta\right) = U_m \sin\left(\frac{2\pi f k}{N f_0} + \theta\right)$$

其中: $k = 0, 1, 2, \dots$ (2)

设第 m 个数据窗的采样数据为 $(u_{m-N+1}, u_{m-N+2}, \dots, u_{m-N+k}, \dots, u_m)$,根据离散全周傅氏算法所计算的电压相量 \vec{U}^m 为:

$$\begin{cases} U_R^m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u_{m-N+k} \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \\ U_I^m = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N u_{m-N+k} \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \end{cases} \quad (3)$$

设 $f = f_0 + \Delta f$,相邻 N 点傅氏滤波相量间的相角为 ϕ ,而 ϕ 同时也表示电压相量变化的角度。即

$$\phi = 2\pi (f/f_0) = 2\pi (1 + \Delta f/f_0) \quad (4)$$

$$f = f_0 \phi / 2 \quad (5)$$

而实际上

$$\phi = \theta_m - \theta_{m-N} \quad \sin \phi = \frac{U_R^m U_I^{m-N} - U_R^{m-N} U_I^m}{(U_R^m)^2 + (U_I^m)^2} \quad (6)$$

其中: θ_m 为 m 时刻的电压相量相角, θ_{m-N} 为 $m-N$ 时刻的电压相量相角。

所以

$$f = f_0 + \Delta f = f_0 \phi / 2 = f_0 (1 + \phi / 2) \quad (7)$$

2 频率修正

同步采样从理论上讲可达到精确的信号测量和分析的目的,而非同步采样则是截断误差和频谱泄漏误差的根源。利用公式(7)计算的频率因为存在截断误差,与实际频率有很大的偏差,因此需要对上述方法进行改进。

因为公式(7)采用的是间隔 N 点的采样数据来计算,所以最初的频率计算需要两周的数据窗。当我们先用两周数据窗计算出频率的粗略值后,根据此频率粗略值和这两周的数据,利用分段三次 Hermite 插值得到新的插值采样值,利用新的插值采样值和先前的频率计算公式重新再计算一下当前时刻的频率。

若在节点 $x_k (k=0, 1, \dots, n)$ 上除已知函数值 f_k 外还给出导数值 $f'_k = m_k (k=0, 1, \dots, n)$, 这样就可以构造一个导数连续的分段插值函数 $I_h(x)$, 它满足条件:

- 1) $I_h(x) \in C^1[a, b]$ ($C^1[a, b]$ 代表区间 $[a, b]$ 上一阶导数连续的函数集合);
- 2) $I_h(x_k) = f_k, I'_h(x_k) = f'_k (k=0, 1, \dots, n)$
- 3) $I_h(x)$ 在每个小区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 上是三次多项式。

由两点三次 Hermite 插值多项式,可知 $I_h(x)$ 在每个小区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 上的表达式为

$$I_h(x) = \left[\frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}} \right]^2 \left[1 + 2 \frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} \right] f_k + \left[\frac{x - x_k}{x_{k+1} - x_k} \right]^2 \left[1 + 2 \frac{x - x_{k+1}}{x_k - x_{k+1}} \right] f_{k+1} + (x - x_k) f'_k + \frac{(x - x_k)^2}{x_{k+1} - x_k} (x - x_{k+1}) f'_{k+1} \quad (8)$$

具体实现步骤如下:

- 1) 首先根据公式(3)~(7)计算出当前时刻的粗略频率 f , 根据频率 f 得出新的采样时间间隔, 而新频率每周的采样点数仍与工频下的采样点数一致;
- 2) 其次利用分段三次 Hermite 插值公式(8)计算出新的采样值;
- 3) 利用(2)中的新采样值和公式(3)~(7)即可计算出真正的系统频率。

3 算法仿真

1) 取电压信号为:

$$u(t) = 100 \sin(2\pi f_1 t) + 10 \sin(2\pi \times 2 f_1 t), \text{ 每周采}$$

样 24 点。图 1 中的频率 $f = 45 \text{ Hz}$

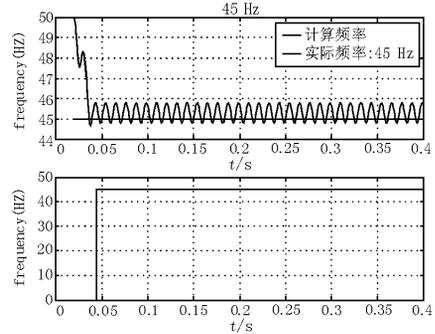


图 1 频率 $f = 45 \text{ Hz}$

Fig 1 Frequency $f = 45 \text{ Hz}$

图 1 的上半部分为直接由公式(3)~(7)直接计算的频率, 而下半部分则是经过插值后所计算的修正频率。从图中我们可以看出经插值修正后的频率真正反映了系统的真实频率。

2) 取电压信号为

$$u(t) = \begin{cases} 100 \sin(2\pi f_1 t) & t \in [0, 0.2] \\ 100 \sin(2\pi f_2 t) & t \in [0.2, 0.4] \end{cases}, \text{ 每周采样 24 点。}$$

图 2 的上半部分为直接由公式(3)~(7)计算的频率, 下半部分则为经插值后所修正计算的频率。

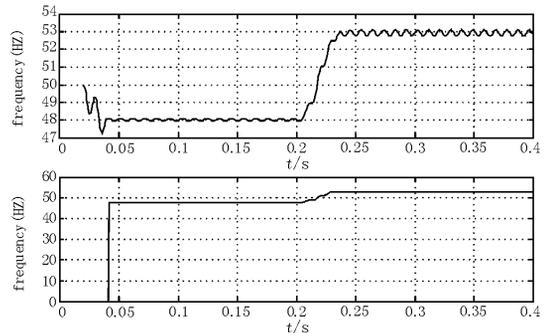


图 2 频率 $f_1 = 48 \text{ Hz}, f_2 = 53 \text{ Hz}$

Fig 2 Frequency $f_1 = 48 \text{ Hz}, f_2 = 53 \text{ Hz}$

从图 2 可以看出, 过渡数据窗最多不超过 50 ms, 多数为 20~30 ms

3) 频率修正法的绝对误差

从表 1、表 2 和表 3 我们看出在 $[49.5, 50.5]$ 范围内直接用公式(3)~(7)计算频率, 它所得到的频率最大绝对偏差不超过 0.01 Hz, 因此对 $[49.5, 50.5]$ 范围内所计算的频率不需要进行频率修正, 就可达到所要求的测量精度, 但是对于不在此范围内的频率, 则需要修正, 此时修正的频率才反映出真实的频率。

表 1 35 ~ 70 Hz 的频率计算情况

Tab 1 The result of frequency computation for frequency 35 ~ 70 Hz

实际频率 /Hz	直接测量的频率 /Hz	修正频率 /Hz	直接测量频率 的绝对误差 (最大)	修正频率的 绝对误差 (最大)
45	45.793 7	45.001 1	0.793 7	0.001 1
46	46.476 1	46.000 8	0.476 1	0.000 8
47	47.248 2	47.003 1	0.248 2	0.003 1
48	48.101 0	47.999 8	0.101 0	- 0.000 2
49	49.022 8	49.006 9	0.022 8	0.006 9
50	50.000 0	50.000 0	0	0
51	51.017 6	50.993 5	0.017 6	0.006 5
52	52.059 1	52.001 3	0.059 1	0.001 3
53	53.107 4	53.000 9	0.107 4	0.000 9
54	54.144 2	54.004 3	0.144 2	0.004 3
55	55.151 2	55.000 1	0.151 2	0.000 1

表 2 49.1 ~ 49.9 Hz 的频率计算情况

Tab 2 The result of frequency computation for frequency 49.1 ~ 49.9 Hz

实际频率 /Hz	直接测量的频率 /Hz	修正频率 /Hz	直接测量频率 的绝对误差 (最大)	修正频率的 绝对误差 (最大)
49.1	49.118 3	49.106 4	0.018 3	0.006 4
49.3	49.310 8	49.303 8	0.010 8	0.003 8
49.5	49.505 4	49.502 9	0.005 4	0.002 0
49.6	49.603 4	49.600 7	0.003 4	0.000 7
49.8	49.800 8	49.798 3	0.000 8	- 0.001 7
49.9	49.900 2	49.898 5	0.000 2	- 0.001 5

表 3 50.1 ~ 50.9 Hz 的频率计算情况

Tab 3 The result of frequency computation for frequency 50.1 ~ 50.9 Hz

实际频率 /Hz	直接测量的频率 /Hz	修正频率 /Hz	直接测量频率 的绝对误差 (最大)	修正频率的 绝对误差 (最大)
50.1	50.100 2	50.101 6	0.000 2	0.001 6
50.3	50.301 7	50.301 4	0.001 7	0.001 4
50.5	50.504 7	50.500 3	0.004 7	0.000 3
50.6	50.606 7	50.600 7	0.006 7	0.000 7
50.7	50.709 0	50.698 2	0.009 0	- 0.001 8
50.9	50.914 4	50.894 5	0.014 4	- 0.005 5

4 结论

本文给出了傅氏算法计算电力系统频率的修正算法。仿真结果证明对于那些在 [49.5, 50.5] 范围内的频率,傅氏算法的计算效果可以达到要求。而对于那些不在 [49.5, 50.5] 范围内的频率,由于直接用傅氏算法计算得到的频率与系统的真正频率相差很大,此时就可利用文中所提到的插值修正频率法来重新计算系统的真正频率,从而使得微机保护正确动作。此改进方法的最大响应数据窗为 50 ms,最突出的特点就是精度高,绝对误差小于 0.01 Hz,并能抗谐波的影响,这主要是因为傅氏算法本身就具有滤掉高次谐波的作用,因此能够满足电力系统继电保护的需求。由于只是对那些不在 [49.5, 50.5] 范围内的频率进行插值计算,所以计算量并不大。由于此方法只

是从软件的角度来修正频率,所以和 A/D 采样没有关联。

参考文献:

- [1] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 54-58
XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo. The Summary of Frequency Measurement in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (30): 54-58
- [2] 周羽生,苏建成,粟时平,等. 自适应微机保护数据采集的频率跟踪 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2003, 26 (3): 41-45.
ZHOU Yu-sheng, SU Jian-cheng, SU Shi-ping, et al. Adaptive Frequency Tracking for Data Acquisition of Digital Protection [J]. Journal of Natural Science Hunan Normal University, 2003, 26 (3): 41-45.

[3] 张义辉. 一种符合电力系统动态频率变化的软件测量算法[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2005, 7(2): 73-75.

ZHANG Yi-hui The Algorithm for Dynamical Frequency Based on Software of Power System [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Sci & Tec), 2005, 7(2): 73-75.

[4] Moore P J, Carranza R D, Johns A T. A New Numeric Technique for High-speed Evaluation of Power System

Frequency[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 1994.

收稿日期: 2006-06-09; 修回日期: 2006-08-02

作者简介:

孙莉(1969-),女,教师,主要从事计算机及自控专业设计。E-mail: bhcpkfb@sina.com

An improved method of frequency measurement for power system

SUN Li

(Information Security Department, Henan College of Public Security, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Frequency is a very important characteristic quantity in power systems, and an important criterion for relay protection, measurement and control, etc. So Frequency measuring plays a very important role in power system measuring equipments. Discrete Fourier algorithm is a common software frequency measurement in power system, this paper describes a new improved method which uses Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial to enhance the effect of Discrete Fourier algorithm. A useful method for frequency measuring is proposed, which has the advantages of high precision, small computation and a good real time performance. By numerical simulation, this paper gives the data windows of time response, the absolute error and the effects of harmonics. The results prove that the method has some practical value.

Key words: frequency; real-time measurement; Fourier algorithm; piecewise cubic hermite interpolating polynomial

(上接第 28 页 continued from page 28)

[4] IEEE Tutorial Course Computer Relaying[Z]. IEEE Inc, 1979.

[5] ADSP-2106x SHARC User's Manual[Z].

徐硕(1981-),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护方面的研究工作; E-mail: coppola@163.com

徐习东(1966-),男,副教授,主要从事电力系统继电保护方面的研究工作;

刘浏(1977-),女,主要从事电子技术的教学与实验工作。

收稿日期: 2006-04-18; 修回日期: 2006-05-08

作者简介:

An improved DFT algorithm based on ADSP - 2106x

XU Shuo¹, XU Xi-dong¹, LU Liu²

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Information Engineering, Zhejiang College of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The calculation of full-wave DFT(Discrete Fourier Transform) algorithm increases with the rising of the sampling frequency, but it is not very suitable for the real-time processing circumstance. The recursive of DFT algorithm reduce the calculation dramatically, but once storage errors occur, an accumulated error will be made which will affect the reliability of the algorithm. This paper presents a new improved algorithm of DFT which use the method of group calculation. This algorithm can reduce the calculation of non-recursive DFT obviously and increase the reliability. ADSP-2106x-based programs are proposed to compare the improved algorithm with the non-recursive algorithm.

Key words: ADSP-2106x; DFT; algorithm; relay protection