

考虑频率变化暂态过程的自适应测频算法的研究

姜惠兰¹, 单大鹏¹, 徐建强²

(1. 天津大学电气自动化与能源工程学院, 天津 300072; 2. 大庆石油管理局供电公司, 黑龙江 大庆 163454)

摘要: 针对电力系统微机自动安全控制装置对频率信号精度的要求, 全面分析了频率变化暂态过程时的误差情况, 研究推导出了基于傅氏测频算法的理论频率修正系数, 给出了实用的自适应调整策略。通过数字仿真验证了该自适应测频算法的有效性和实用性。

关键词: 电力系统; 傅氏滤波; 自适应; 频率测量

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)02-0020-03

1 引言

频率是电能质量的重要指标之一。电力系统频率的变化对生产率以及发电厂间的负荷分配都有直接的影响。频率过低时, 还会危及全系统的安全运行。所以电力系统运行中的主要任务之一, 就是对频率进行监视和控制。当频率变化超出允许范围时, 就要迅速作出反应, 控制安全自动装置, 采取必要的调节措施, 使频率恢复到保证安全运行的水平以内。

目前, 对电力系统频率的测量已有多种测量算法, 如 cross 算法、最小二乘算法、递推傅氏算法、卡尔曼滤波算法等, 但这些算法在电力系统安全自动装置的实施上却有着这样或那样的缺点。这是因为以往算法的不足之处主要表现在频率的测量受信号中高次谐波的影响较大、算法的计算量大、未考虑频率的暂态变化过程使测量误差较大等等, 这些都限制了它们的实际工程应用。有的虽然考虑了频率变化的暂态过程, 但在算法的理论分析上又作了不同程度的简化, 也影响了测量的精度和算法的适应性。

考虑到傅氏算法具有较强的滤波能力, 而且在电力系统有着广泛的应用, 所以本文对傅氏测频算法, 在全面分析了频率变化暂态过程中测频误差的基础上, 推导出了基于傅氏测频算法的理论频率修正系数, 进一步给出了实用的自适应频率调整策略。通过仿真分析, 说明本文提出的自适应测频算法不仅计算简单, 特别在频率变化的整个过程中都具有较高的测量精度, 是一种用于自动调频和低周减载安全自动装置上的良好算法, 所以该研究是具有理论意义和实用性的。

2 傅氏滤波测频算法

全周傅氏滤波测频算法, 其主要思想是用傅氏

滤波计算出相邻 N 点(每周采样点数)滤波相量间的相角差, 此角也是信号电压一周变化的角度, 即

$$2\pi + \Delta\theta = 2\pi f \frac{1}{f_v}$$

其中 f_v 是采样频率, f 是实际的频率, $\Delta\theta$ 是相邻两周波的相角差 $\Delta\theta = \theta_k - \theta_{k-N}$, 该值可通过傅氏算法计算出来。

$$= 2\pi \left(\frac{f - f_v}{f_v} \right) = 2\pi \frac{f - f_v}{f_v} \quad (1)$$

$$f = f_v/2 \quad (2)$$

于是, 可推导出系统的频率为

$$f = \left(1 + \frac{\Delta\theta}{2\pi} \right) f_v \quad (3)$$

3 计及频率变化暂态过程的误差分析

上面给出的傅氏滤波测频公式(2)和(3), 既不考虑谐波对测频的影响, 也没考虑频率变化的暂态过程, 使得该基本测频算法对频率的测量产生较大的误差。因此, 除了跟踪采样频率尽量消除谐波的影响外, 更重要的还要考虑频率实际变化的暂态过程, 以适应实际的需要。

3.1 频率暂态变化过程描述

电力系统频率反映了系统有功的平衡状况。当系统的有功平衡遭到破坏, 频率将经历一个复杂的暂态过程, 从正常状态过渡到另一频率稳定值。频率随时间变化主要决定于系统中所有转动部分的机械惯性。考虑到发电机组的转动惯量起着决定的作用, 因此频率的变化只考虑系统等值发电机的运动。经过分析, 可知频率变化的动态方程为

$$T_x \frac{df}{dt} + f = P_h / K_L \quad (4)$$

式中 T_x —系统频率下降过程的时间常数;

P_h —系统的功率缺额值;

K_L —负荷的频率调节效应系数;

$f = f - f_0$, f_0 是系统的额定频率。

可见,频率是按典型的一阶微分方程变化,所以其动态特性可用指数曲线描述:

$$f = P_H / K_L + (f_0 - P_H / K_L) e^{-t/T_x} \quad (5)$$

又因为 $P_H / K_L = f = f - f_0$

所以存在关系

$$f - f_0 = (f - f_0) (1 - e^{-t/T_x}) \quad (6)$$

在较短时间内,可假设系统的频率是线性变化的,可将(6)进行线性化处理,得到系统频率变化的方程

$$f = f_0 + (f - f_0) t / T_x = f_0 + mt \quad (7)$$

式中 m 为频率的变化率。

3.2 傅氏算法的误差分析

设单一频率的信号可表达为

$$u(t) = u_m \sin(\omega_0 t + 2\pi f_0 t)$$

当频率线性变化时,一周波内的信号采样值为

$$u_k = u_m \sin\left[2\pi(k-1) \frac{f_0 + mf}{Nf_v}\right] \quad (8)$$

采样时刻的实际频率

$$f_k = f_0 + mk \quad k=1, \dots, N$$

仿真时电压信号的采样方法为改变表达式的初相角, $k-1$ 表示在完成上一个采样点时,电压波形改变的角度。其计算式为

$$\bar{f}_{k-1} = \bar{f}_{k-2} + 2\pi \frac{f_{k-2} + f_{k-1}}{Nf_v} \quad (9)$$

\bar{f} 为采样间隔 时间内的平均频率。

当用基本傅氏测频算法(3)进行仿真计算时,尽管对频率做了跟踪采样,但是始终存在着一个稳态误差值,而且误差的大小与频率变化率有关,频率变化率越大,稳态误差值也越大。因此有必要对误差的变化规律进行分析,以便对基本测频算法进行修正,消除稳态误差。

设系统频率为 $f = f_k = f_v + (k/N) f$, 式中的 f 为一周波内的频率变化,则相邻 N 点傅氏滤波的相角差应为

$$\begin{aligned} &= \theta_k - \theta_{k-N} = \frac{2\pi}{Nf_v} \sum_{i=1}^N \left[\frac{f_i + f_{i-1}}{2} \right] \\ &= \frac{2\pi}{2N^2 f_v} \sum_{i=1}^N (2i-1) f \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2)可以得出 f 的计算值

$$f = \frac{f_v}{2} = \frac{f_v}{2} \left[\frac{2\pi}{2N^2 f_v} \sum_{i=1}^N (2i-1) f \right] = \frac{f}{2} \quad (11)$$

由此可以得到基本傅氏滤波算法的测频误差为

$$\Delta f = f - f = \frac{f}{2} = \frac{m}{2f_v} \quad (12)$$

可见 Δf 值与频率变化率成正比,而与周期采样点数 N 的大小无关。如果输入信号含有高次谐波的话,还会受到谐波分量的影响。知道了用基本傅氏算法进行测频的误差及其影响因素,就可找到对傅氏测频算法的校正方法。

4 自适应测频算法

利用式(11)很容易得到校正基本傅氏测频算法的计算公式

$$f = L \frac{f_v}{2} \quad (13)$$

式中 L 表示频率修正系数,理论值为 $L = 2.0$ 。

本文对上述的校正公式进行了仿真来检测其正确性。系统初始频率设为 $f_0 = 50\text{Hz}$,每周采样 18 个点,频率变化率分别为 $m = -1, -2, -3, 1, 2\text{Hz/s}$,同时输入信号加入了 20% 二次谐波、40% 三次谐波、20% 四次谐波、20% 五次谐波,仿真结果如表 1 所示,图 1 还给出了 $m = -3\text{Hz/s}$ 情况下的测频误差的变化过程。校正后的频率计算公式由于考虑了系统频率变化的暂态过程,增加了理论的频率修正系数 L ,从理论上说应该能够完全消除频率测量误差,然而其效果并非如此。修正后的算法虽然有效地消除了稳态误差,使其动态误差趋于零,但在暂态过程的开始几周却出现了振荡现象。分析原因在于傅氏测频算法本身是利用两周的数据经傅氏滤波进行计算的,当频率开始变化时,傅氏滤波计算的相角是滞后于频率的变化,因此在暂态过程的开始阶段出现了测量误差。因此要消除该误差,必须随着频率的变化进行动态调整。

表 1 固定 $L = 2.0$ 时测频误差比较

m (Hz/s)	收敛周期	最大误差	稳态误差
-1	1	0.00954	0
-2	4	0.01909	0.000013
-3	7	0.02864	0.000034
1	1	0.00954	0
2	4	0.01909	0.000012

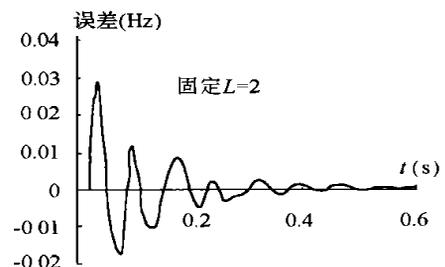


图 1 $L = 2$ 固定修正时测频误差变化

为了消除初始阶段的测量误差,改善频率修正的动态性能,本文提出了一种自适应调整策略。因 L 的值与系统频率变化的动态过程有关,故可用计算出的 f 值来动态调整 L 。用于调整的具体表达式如下:

$$L = 1.0 + \frac{1-f}{0.01} \times 0.5 \quad (14)$$

本文对上述的自适应测频算法又进行了仿真,结果如表2所示,图2也相应给出了 $m = -3\text{Hz/s}$ 情况的测频误差变化过程。结果表明用式(14)动态调整修正系数,不仅有效地去除了基本算法的固定误差,可以加快算法的收敛速度,算法的动态性能也得到了改善。即使在系统频率变化率较大时,也只不过三个周期就可控制频率误差在 0.01Hz 之内。另外当频率变化率小时,该自适应动态调整也能把校正系数调整到接近2.0附近,使其处于接近理论的校正状态,其测频误差远小于 0.01Hz 。

表2 L 动态改变时测频误差比较

m (Hz/s)	收敛周期	最大误差	稳态误差
-1	1	0.00568	0.00227
-2	3	0.02075	0
-3	3	0.02564	0.00001
1	1	0.00563	0.00231
2	3	0.02075	0

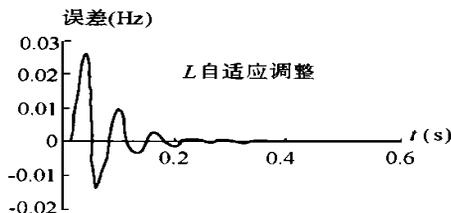


图2 自适应调整时测频误差变化

5 结论

(1) 本文分析了电力系统有功平衡遭到破坏后,系统的实际运行频率变化的暂态过程,给出了频率变化规律的数学描述;

(2) 本文在充分分析频率变化暂态过程对傅氏测频算法精度影响的基础上,从理论上推导出了傅氏测频算法的理论修正系数;

(3) 为了消除因相角滞后频率变化而在暂态过程的初始阶段出现的测量误差,改善频率修正的动态性能,本文提出了一种自适应调整策略,给出了校正公式。

(4) 本文对理论修正和自适应校正方法进行了数字仿真测试,结果表明所提出的自适应调整策略和算法校正公式收敛性强、测量精度高,具有良好的实用性。

参考文献:

- [1] 杨念慈,姜惠兰,等. 电力系统频率偏移对傅里叶算法的影响. 天津大学学报, 1993, 5.
- [2] 杨冠城. 电力系统自动装置原理. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [3] Phadk A G. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system and rate of change of frequency. IEEE Trans on PowAs, 1983, 102(5).
- [4] 张义辉,尹项根,陈德树. 机遇傅氏滤波测频算法的改进研究. 电网技术, 1998, 22(3).

收稿日期: 2000-07-19

作者简介: 姜惠兰(1965-),女,博士,副教授,主要从事人工智能理论、电力系统自动控制的研究工作;单大鹏(1975-),男,硕士,主要从事电力系统运行与控制研究工作;徐建强(1961-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统励磁控制系统研究工作。

Study on self - adaptive frequency measurement algorithm considering frequency transient change process

JIANG Hui-lan¹, SHAN Da-peng¹, XU Jiar-qiang²

(1. Tianjin University, Tianjin 300072; 2. Daqing Oil Manage Bureau Power Supply Company, Daqing 163454, China)

Abstract: On the basis of precision requirement for frequency signal by computer automatic control system in power system, this paper over all analyzes error conditions in frequency transient change process, studies and derives Fourier algorithm based frequency amendment coefficient in theory, and provides practical self-adaptive adjust strategy. Simulation has verified that self-adaptive frequency measurement algorithm presented in this paper is effective and practical.

Key words: power system; Fourier algorithm; self-adaptive; frequency measurement