

一种电力系统频率的实时估算方法

王东¹, 毕潇², 王元利³

(1. 南京电力设计研究院, 江苏 南京 210013; 2. 西北电业职工培训中心, 陕西 西安 710054;
3. 河南机电高等专科学校, 河南 新乡 453002)

摘要: 提出了一种曲线拟合结合泰勒级数展开的电力系统实时频率测量算法, 采用分子、分母绝对值相加的方法来避免了计算过程中分母过零点的影响, 理论分析及数字仿真表明, 该算法实现简单, 有很高的计算精度, 对谐波也有一定的抑制能力。完全能满足电力系统实时频率估算的要求。

关键词: 频率测量; 电力系统; 继电保护

中图分类号: TM77; TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0017-03

0 引言

频率是电能生产、消费必须具备的质量检验指标,也是衡量电力系统运行状态的重要参数。电力系统中发电厂内部故障或其出线故障,和系统解列成几个小系统,电源与负荷平衡遭到严重破坏,将导致系统频率大幅度下降或崩溃,甚至系统瓦解,全系统或区域性系统的停电。同样,当系统电源出力高于负荷标称频率下的消耗,且系统中调频容量明显不足时,将使电源机组失去大量的负荷而超速运转,如不采取有效措施,将导致机组损坏、系统瓦解或电厂全停的重大恶性事故。因而可以在现场安装频率保护装置,预测系统是否将失稳,以判断是否切机或切负荷。快速性是继电保护系统的基本要求之一,因此现场安装频率保护,必须对系统电压进行快速测频。现场频率测量是通过对电压瞬时值进行采样,通过数学计算得到频率,由于电压波形畸变、A/D采样误差等原因,使得采集到的数据会有一些的偏差,从而计算出的频率也有偏差。在该种情况下,采用好的测频方法,能使测量频率对采样数据误差的灵敏度很低,从而提高快速测频精度^[1,2]。

文中提出了一种电力系统快速测频新算法,通过计算 $\cos(2fT)$ 的值^[1,4,5],其中 T 为已知的数据采样周期,然后得到测量频率。用泰勒级数截取时有足够的精度,相当于理论误差完全可以忽略不计。该算法无论从理论推导还是仿真实验,都能得到准确可靠的结果。

1 频率测量算法推导

1.1 基本原理

采样电压信号为一正弦电压,假设电压采样期间电压幅值保持不变,系统频率也不迅速改变,系统

电压信号采样值可用下式表示:

$$v(t) = V \sin(2ft) \quad (1)$$

当电压信号以 T 秒为时间间隔采样时,第 k 、 $k-1$ 、 $k-2$ 、 $k-3$ 点的采样值可以表示为:

$$v_k = V \sin(2ft + \varphi) \quad (2)$$

$$v_{k-1} = V \sin[2f(t-T) + \varphi] \quad (3)$$

$$v_{k-2} = V \sin[2f(t-2T) + \varphi] \quad (4)$$

$$v_{k-3} = V \sin[2f(t-3T) + \varphi] \quad (5)$$

其中: V 是电压的幅值, f 是电力系统的频率, t 是时间, φ 是初相角。

将式(2)、(5)相加得:

$$v_k + v_{k-3} = 2V \sin[f(2t-3T) + \varphi] \cos(3fT) \quad (6)$$

将式(3)、(4)相加得:

$$v_{k-1} + v_{k-2} = 2V \sin[f(2t-3T) + \varphi] \cos(fT) \quad (7)$$

将式(6)、(7)相加可以得到:

$$\frac{1}{2}(v_k + v_{k-1} + v_{k-2} + v_{k-3}) = 2V \sin[f(2t-3T) + \varphi] \cos(2fT) \cos(fT) \quad (8)$$

将式(8)除以式(7)得:

$$\frac{v_k + v_{k-1} + v_{k-2} + v_{k-3}}{2(v_{k-1} + v_{k-2})} = \cos(2fT) \quad (9)$$

该文中电压每周波取 12 个采样点,则采样周期为 $T = \frac{1}{12 \times 50} = \frac{1}{600}$ s,所以 $2fT = \frac{1}{6}$,故

$$\frac{v_k + v_{k-1} + v_{k-2} + v_{k-3}}{2(v_{k-1} + v_{k-2})} > 0$$

式(9)左边除 $v_{k-1} + v_{k-2} = 0$ 的点外,任何其它点都是成立的,也就是说,在 $v_{k-1} + v_{k-2}$ 过零点附近,式(9)的计算误差是非常大的。为消除电压过零点对算法精度的影响,我们利用等比定理^[1,2,3]:

如 $\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{e}{f} > 0$, 则 $\frac{|a| + |c| + |e|}{|b| + |d| + |f|} = \frac{a}{b}$ 。

将 m 次计算的 $\cos(2 f T)$ 按上式进行绝对值和补偿, 得到:

$$\cos(2 f T) = \frac{\sum_{k=1}^m |v_k + v_{k-1} + v_{k-2} + v_{k-3}|}{\sum_{k=1}^m |v_{k-1} + v_{k-2}|} \quad (10)$$

式(10)中 $m \geq 2$, 可根据需要来取值。从式(10)可以看出, 尽管单个 $|v_{k-1} + v_{k-2}|$ 可能为零, 但 $\sum_{k=1}^m |v_{k-1} + v_{k-2}|$ 不可能为零, 且式(10)的分子、分母的数值较大, 因而有效地解决了电压过零点问题, 且具有很高的计算精度。另外从式(10)也可以看出, 分子和分母相当于一个滤波器, 因此算法本身对谐波有一定的抑制能力。

1.2 频率的计算方法

以上推导出了 $\cos(2 f T)$ 的计算方法, 本节将讨论如何由 $\cos(2 f T)$ 求出频率 f 。

假设: $x = \cos(2 f T)$, 则:

$$f = \frac{1}{2 T} \arccos x \quad (11)$$

设系统工频为 f_0 , 则 $x_0 = \cos(2 f_0 T)$, 将式(11)在 x_0 附近用泰勒级数展开得:

$$f = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} f_0^{(n)} (x - x_0)^n \quad (12)$$

式(12)是个无穷级数, 实际计算中, 可以根据所要求的最大计算误差及频率的最大变化范围来确定级数的项数, 一般取泰勒前四项都能达到足够的精度要求。 $f_0 = 50 \text{ Hz}$, 可以求得 $x_0 = 0.8660$ 。取前3项和前4项泰勒级数得到测量频率计算公式为:

$$f = 50.0000 - 2.482.8170x + 3.721.4698x^2$$

$$f = 50.0000 - 2.482.8170x + 3.721.4698x^2 - 1.273.2395x^3$$

2 算法的离线仿真结果

由前面的算法推导可以知道绝对值加和取的项数 m 将影响该测频算法的精度, 同时泰勒级数的截断也会引起测频误差。下面表1给出了频率从48~52Hz变化, 不同的绝对值加和项数下, 由泰勒截断引起频率测量绝对误差(单位: Hz)。

从表1可以看出, 绝对值加和的所取的项数基本不影响算法的精度, 泰勒展开截取前3项或前4

项, 算法的精度都很高。

表1 由泰勒截断引起的测频误差

Tab.1 Measurement errors by using the Taylor series

泰勒展开 截断项数	3 ($\times 10^{-3}$)			4 ($\times 10^{-3}$)		
	频率	2	5	8	2	5
48.0	- 3.25	- 3.25	- 3.25	- 4.64	- 4.64	- 4.64
48.5	- 4.10	- 4.10	- 4.10	- 4.69	- 4.69	- 4.69
49.0	- 4.54	- 4.54	- 4.54	- 4.72	- 4.72	- 4.72
49.5	- 4.71	- 4.71	- 4.71	- 4.73	- 4.73	- 4.73
50.0	- 4.74	- 4.74	- 4.74	- 4.73	- 4.73	- 4.73
50.5	- 4.76	- 4.76	- 4.76	- 4.74	- 4.74	- 4.74
51.0	- 4.93	- 4.93	- 4.93	- 4.74	- 4.74	- 4.74
51.5	- 5.37	- 5.37	- 5.37	- 4.73	- 4.73	- 4.73
52.0	- 6.22	- 6.22	- 6.22	- 4.69	- 4.69	- 4.69

在实际电压波形中, 除了基波分量外, 还可能存在少量的谐波分量。在算法中先对采样电压信号进行全周傅氏滤波, 以减少谐波对算法的影响。设电压波形中含有5%的二次谐波, 输入波形由式(13)给出:

$$v = \sin(2 f_0 t) + 0.05 \sin(2 f_0 t + \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

用文中测频算法时, 泰勒展开截取项数为前3项, 防止分母过零点而采用的绝对值相加的累计次数 m 为12, 这样总的计算时间为41.67 ms, 能满足电力系统实时测量的要求, 对频率 f_0 分别为48、50和52 Hz时, 测量到的电压信号频率见图1, 其中横坐标为时间, 纵坐标为对应的测量频率, 由此可见测

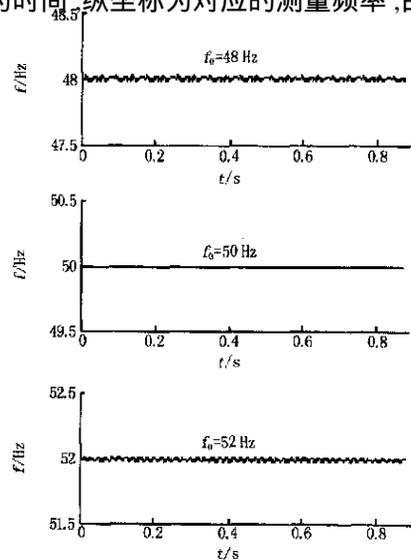


图1 输入电压频率分别为48Hz、50Hz和52 Hz时的测量结果

Fig.1 Measured frequency results of input-voltage signals with the frequency of 48Hz, 50Hz and 52Hz respectively

量频率有很高的精度。

由仿真结果可见,该算法具有非常高的测频精度,频率从 48 Hz 到 52 Hz 范围内,考虑 5% 的二次谐波的情况下,测得频率的绝对误差不超过 0.05 Hz。

3 结论

本文提出了一种电力系统实时频率估算方法,采用分子分母绝对值相加的方法来避免计算过程中分母过零点的影响,该算法实现简单,计算精度高,对谐波也有一定的抑制能力,完全能满足电力系统实时频率估算的要求。

参考文献:

- [1] 索南加乐,葛耀中,等(SUONAN Jiale, GE Yaorzhong, et al). 一种不受电压过零点影响的新型频率测量方法(New Algorithm Avoiding Voltage Cross-zero Point for Measuring the Frequency) [J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1995, 29(3): 84-102.
- [2] 许庆强,索南加乐,等(XU Qing-qiang, SUONAN Jiale, et al). 一种减小测量误差影响的电力系统快速测频算法(New Algorithm of Electric Power System Fast Frequency Measurement Decreasing the Influence Coming from Measurement Errors) [J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 2001, 35(6): 560-585.
- [3] 许庆强,索南加乐,等(XU Qing-qiang, SUONAN Jiale, et al). 振荡时电力系统瞬时频率的实时测量(Real-time Measurement of Power System Instantaneous Frequency While Power Swing) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2003, 23(1): 51-54.
- [4] Tao H, Morrison I F. The Measurement of Power System Frequency Using a Microprocessor [J]. Electric Power System Research, 1986, 11(2): 103-108.
- [5] 王安定,葛耀中,等(WANG An-ding, GE Yaorzhong, et al). 用母线电压测量电力系统频率的一种新方法(A New Algorithm for Power System Frequency Measurements Using Bus Voltage) [J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of Electric Power System Automation), 1992, 3(1): 82-89.

收稿日期: 2003-12-19; 修回日期: 2004-01-19

作者简介:

王东(1976-),男,硕士,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wangdong2k76@sohu.com

毕潇映(1972-),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护。

A new method of real-time estimation for power system frequency

WANG Dong¹, BI Xiao-yi², WANG Yuan-li³

(1. Nanjing Electric Power Research Institute, Nanjing 210013, China; 2. Northwest Electrical Staff Training Center, Xi'an 710054, China; 3. Henan Mechanical and Electrical Engineering College, Xinxiang 453002, China)

Abstract: This paper presents a new algorithm for measuring power system real-time frequency, which is based on the curve fitting technique and Taylor series expansions. Multi-point frequency compensating technique is adopted to avoid voltage crossing zero-point of the denominator. Analysis and digital simulation show that the method provides a fast, simple, accurate and reliable frequency measurement. The proposed algorithm can decrease the errors introduced by harmonic terms and meet the requirement of frequency measurement in real environment.

Key words: frequency measurement; power system; protective relaying

我国区域电力市场化改革取得成果

国家电监会副主席宋密日前表示,电力体制改革取得初步进展,区域电力市场化改革和电价改革正在积极探索和试点,并取得了阶段性成果,电力工业发展运行情况良好,但电力供需矛盾仍很突出。

她要求认真贯彻落实党中央、国务院出台的一系列政策措施;各级电力监管机构要明确职责,找准定位;建章立制,依法监管;强化监管,常抓不懈。同时要求各级电力监管机构以及广大电力企业要统一思想、提高认识,认真做好电价调整宣传和解释工作;认真执行差别电价政策,确保国家宏观调控措施落实到位;继续清理不合理优惠电价和企业乱加价、乱收费现象,对于违反国家电价政策,擅自提高或降低上网电价、销售电价的行为,未经国家批准擅自收取各种费用的行为,发现一起,查处一起,决不手软。