

电力系统频率的实时估算

金华烽 何奔腾 浙江大学电机系 杭州 (310027)

【摘要】 提出了一种基于过零点检测的电力系统频率估算的新方法。所提出的方法计算简单、跟踪速度快,并具有较高的精度。同时对系统谐波分量和随机噪声对该方法的影响以及频率跟踪方面进行了仿真试验。

【关键词】 电力系统 频率估算 过零点检测

引言

频率是电力系统的一个重要参数。如何精确地实时估算系统频率,一直是大家所关心的问题。另外,在一些继电保护和安全自动装置中,也需要实时地估算系统频率。大多数数字式保护的算法都是按系统额定频率设计的,当系统频率变化时,这些算法会产生误差,这个误差在继电保护中往往是不容忽略的。随着微电子技术的应用,利用故障分量实现的保护方法得到了很快的发展(如线路暂态量超高速方向保护,变压器差动保护等)。在这些保护中,系统频率变化时产生的不平衡输出会影响保护的灵敏度,这时往往需要采用频率跟踪技术来消除此影响。因此频率估算方法的研究已经越来越引起人们的重视。



图1 系统频率变化曲线

对频率估算的要求是多方面的,在低频减负荷等装置中,对系统频率及频率变化率估算精度要求都比较高,理想的低频减负荷级差在0.1Hz以下。图1为某系统在扰动后频率变化的仿真计算结果,从图1中看到,系统频率的下

降过程中还伴随着随机变化,若频率检测时间过长,或算法运算量大而不能实时检测时,都将影响检测的准确性。当应用于频率跟踪技术时则要求能实时地跟踪系统频率的变化,同时算法的计算量要很小,因为保护装置同时要处理许多其它任务。

一种主要由硬件构成的数字式频率检测装置是采用高速脉冲计数的方法来检测系统频率,这种方法的精度受到电压过零点检测误差、参考时钟的速度和精度的影响。近年来人们提出了大量频率检测的算法,例如基于线性插值原理的CROSS法、快速富里叶法、全波富氏法、最小二乘法以及卡尔曼滤波法等等。这些算法的计算量都偏大,并且在精度和检测速度上不能获得较好的统一,从而影响了实际应用。

本文提出了一种基于过零点检测的电力系统频率估算的新方法。所提出的方法计算简单、跟踪速度快,并具有较高的精度等优点。

1 系统频率估计的基本原理

电力系统正常运行时,系统频率 f 在工频50Hz左右。对于 f 的估计,可以直接通过对电压或电流信号的采样值进行一些简单的处理求得。以电压为例,设其为纯正弦量,即

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

$u(t)$ 的波形如图2所示, $t_1 \sim t_4$ 为 $u(t)$ 过零点,系统频率 f 可以由 $t_1 \sim t_4$ 确定,例如:

$$f = \frac{1}{t_3 - t_1} = \frac{1}{t_4 - t_2} \quad (2)$$

或 $f = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} = \frac{1}{2(t_4 - t_3)} \quad (3)$

式(2)需一个周波信息,式(3)则只需半周

波信息,检测速度快,但在实现时受元器件零漂等影响较大,故本文采用式(2)的形式.

设 $u(t)$ 的采样值为:

$$u(k), k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

对应于图 2, $u(k)$ 的波形如图 3 所示.

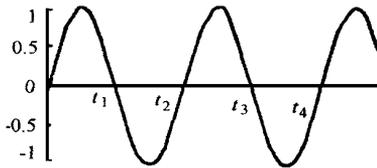


图 2 正弦电压连续波形

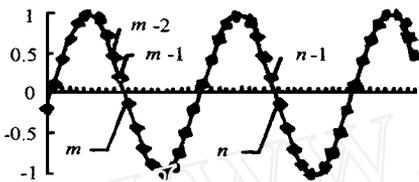


图 3 正弦电压采样值

如图 3 所示,一般情况下, $t_1 \sim t_4$ 点不是采样点.因此,只能通过各个采样点上的电压值来间接地确定电流过零点的时刻.对于 $t_1 \sim t_4$ 点的确定,需要先判断前后两点电压采样值的符号是否相反.若前后两点符号位相同,如图中所示, $m-2, m-1$ 点上的采样值,表明两个采样点之间电压没有过零点.若符号相反,如 $m-1, m$ 点,表明在 $m-1$ 到 m 这一时段内的某一时刻,电压穿过零点,符号发生了改变.此时,需要设法求出电压过零点的这一时刻,如图 2 所示的 t_1 . 本文采用线性插值的方法来求 t_1 .

设采样间隔为 Δt , 采样点 $m-1$ 处的电压值为 $u(m-1)$, m 处的电压值为 $u(m)$. 则可求出处在 $m-1, m$ 点之间的 t_1 的值为:

$$t_1 = \frac{-u(m)\Delta t}{u(m) - u(m-1)} + m\Delta t \quad (5)$$

同理,可求出 t_3 的值为:

$$t_3 = \frac{-u(n)\Delta t}{u(n) - u(n-1)} + n\Delta t \quad (6)$$

由式(5)、(6)求出 t_1, t_3 后,代入式(2)后即可求得从 t_1 到 t_3 这一时段内的平均系统频率 f . 然后,可将 t_2 看成是求下一时段频率的 t_1 ,

等待电压的再一次过零点,实现对频率的实时估算.

图 4 所示的是频率测量的程序流程图.其中判断 n 是否大于 3 是为了避免程序在判定最初两次过零点时,采用式(2)所示算法,由于 $t_1 = 0$ 时刻并非是电压真正过零点而可能引起的对频率的错误估算.

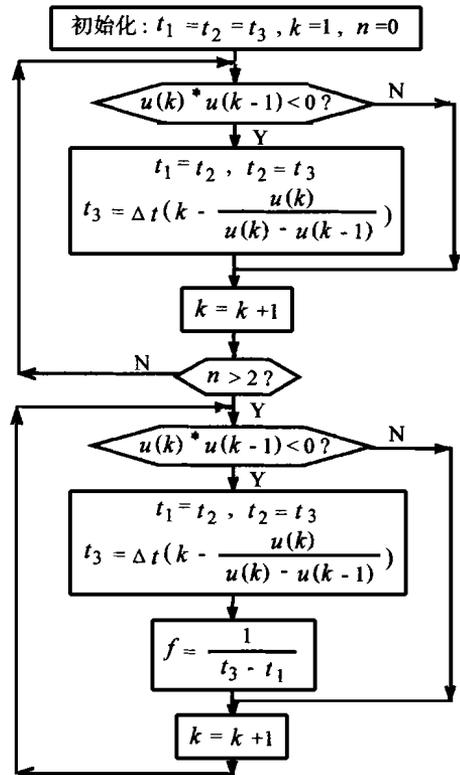


图 4 频率估算程序框图

微机保护中,采样率的高低是影响保护性能的一个重要因素.本文所提的方法中,由于采用了线性插值的方法实现对过零点的检测,采样率的高低对频率估算精度的影响,主要表现在过零点左右两采样点的直线连接对原始信号的逼近程度.通过分析可知,当采样率为每周 40 点时,由插值引起的误差仅为 0.008%; 采样率为 20 点时,误差为 0.032%; 采样率为 12 点时的误差为 0.084%.由此可见,虽然误差会随着采样率的降低而有所增加,但即使采样率降到每周 12 点,误差也仅为 0.084%,完全满足工程实际的需要.因此,本文的方法适用于低采样率的装置.

2 滤波器的设计

与传统的脉冲计数法一样,通过过零点检测估算系统频率的方法只有在电压为纯正弦波时才能得到精确值.由于实际电压波形中,除了基波分量外,还可能存在着少量的谐波分量.设电压波形中含有5%的谐波分量,即:

$$u(t) = \sin(2\pi f_0 t) + 0.05\sin(2\pi f t + \varphi) \quad (7)$$

其中 f_0 为基波频率, f 为谐波频率.

用过零点检测方法对在不同 φ 的情况时的最大误差如图5所示.

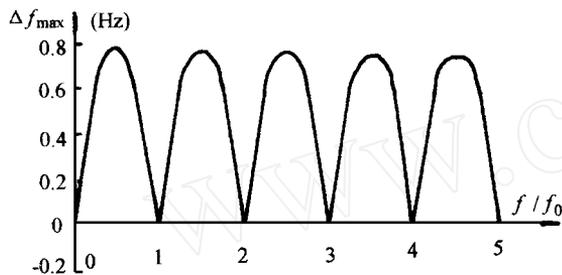


图5 用过零点检测方法估算频率在不同 φ 时的误差

从图5中可看出,直流分量和整数次谐波,不会引起频率估算误差,但非整数次谐波则会引起估算误差,其最大值约达0.8Hz,不能满足工程实际的需要.消除误差的一个有效途径是用滤波器来滤除电压中的谐波分量,本文采用数字式的切比雪夫滤波器对原始信号进行滤波.表1列出了2~4阶三种滤波器的Z变换表达式及其运算量,其中 $y(z)$ 为滤波器的输出, $x(z)$ 为滤波器的输入.各滤波器的截止频率均为60Hz.下面在滤波效果及跟踪速度等方面对这三种滤波器进行考察.

表1 滤波器参数及其运算量

滤波器阶数	滤波器参数	运算量	
		乘法	加法
二阶	$x(z) = \frac{0.0205152247(1+z^{-1})^2}{1-1.61852z^{-1}+0.71060z^{-2}}$	5	4
三阶	$x(z) = \frac{0.0016409876(1+z^{-1})^3}{1-2.62250z^{-1}+2.36916z^{-2}-0.73353z^{-3}}$	7	6
四阶	$x(z) = \frac{0.0001298496(1+z^{-1})^4}{1-3.60790z^{-1}+4.97947z^{-2}-3.11076z^{-3}+0.74152z^{-4}}$	9	8

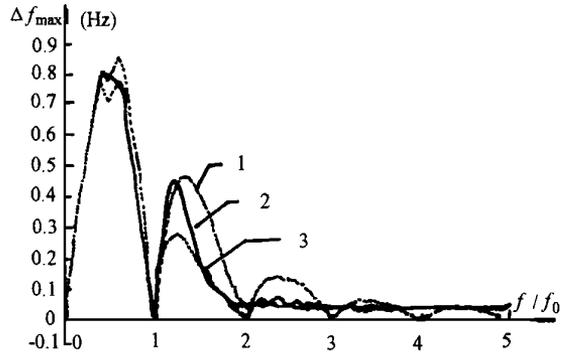


图6 经2~4阶切比雪夫滤波器滤波后频率估算的误差

图6中曲线1~3所示的是式(7)所表示的信号,经2~4阶切比雪夫滤波器滤波后频率估算的最大误差.从图中可以看出,谐波次数大于两次时,频率估算的最大误差随着滤波器阶数的增加而减小.由曲线1可知,若采用两阶切比雪夫滤波器滤波,频率估算的最大误差仍然约有0.2Hz左右,还不能满足工程实际的需要.当采用三阶滤波器时,由曲线2可知,频率估算的最大误差小于0.07,能够满足工程实际的需要.若再次提高滤波器的阶数,如曲线3所示,频率估算的最大误差和采用三阶滤波器相比较并没有明显的降低.

表2 频率突然从50Hz跳变到60Hz时,滤波器对频率估算跟踪速度的影响

	无滤波器	二阶	三阶	四阶
时延(ms)	9	22	34	100

表2列出了当系统频率突然由50Hz跳变到60Hz,从跳变时刻到得出频率精确估算结果(误差小于0.1Hz)所需的延时.随着滤波器阶数的增高,频率估算的跟踪速度有所减慢,但即使采用三阶滤波器,频率跟踪的延时也没有超过40ms.

实际系统中,频率变化属于机电暂态过程,变化速度相对缓慢,此时能更加快速地对频率的跟踪.

综合考虑滤波器的滤波效果、跟踪速度及运算量,对基于过零点检测的频率估算方法,宜采用3阶切比雪夫

数字滤波器。

3 随机噪声对频率估计的影响

实际应用中,频率估计除了需要考虑谐波及直流分量外,还需要考虑由于各种原因,如系统中的电磁干扰、保护装置信号采样通道的误差及量化过程等所引入的白噪声对频率估计的影响。当然,实际噪声甚至可能是有色噪声,但对此可通过预白化将有色噪声看成白噪声来处理。

对于白噪声的模拟,可以由随机信号来完成。考虑装置具有 12 位的 A/D 转换器,去掉 1 位符号位,同时对电压信号的转换时 A/D 满标为额定值的 2 倍,若只考虑量化误差,则引入的白噪声可表示为 $\pm U_N * R_{nd}/2^{11}$,其中 U_N 为额定电压, R_{nd} 为 $-1 \sim 1$ 的随机数。实际情况下,除了量化误差外,还有很多因素会给原始信号引入白噪声,本文中考虑白噪声的最大值为量化误差的 32 倍,即 5 位 A/D 误差。此时,经三阶切比雪夫滤波器后频率估算的最大误差如表 3 所示,从所列结果可以看出,白噪声对频率估算的影响不是很大。因此,可以不考虑白噪声对频率估算的影响。

表 3 不同噪声水平及不同采样率下的频率估算误差

噪声水平	0 位	1 位	2 位	3 位	4 位	5 位
Δf_{\max}	0.000076	0.0032	0.064	0.013	0.025	0.051

4 结论

本文提出了一种基于过零点检测的电力系统频率估算方法。仿真计算结果表明,结合三阶切比雪夫数字滤波器,考虑 5% 的谐波含量,频率估算的最大误差为 0.07Hz;当信号频率发生

10Hz 的突变时,该方法也能在 40ms 内实现对频率作误差小于 0.1Hz 估算,即具有较快的跟踪速度,能满足工程实际的需要。

参考文献

- 1 Adly A Girgis, Fredric M Ham. A new FFT- based digital frequency relay for load shedding. IEEE Transaciton on Power Apparatus and Systems, 1982, PA S- 101(2) : 433~ 439.
- 2 Phadke A G, Thorp J S, Adam iak M G. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PA S- 102(5) : 1025~ 1033.
- 3 Nguyen C T, Srinivasan K. A new technique for rapid tracking of frequency deviations based on level crossings. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1984, PA S- 103(8) : 2230~ 2236.
- 4 Sachdev M S, Giray M M. A least error squares technique for detemining power system frequency. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1985, PA S- 104(2) : 437~ 443.
- 5 Adly A Girgis, William L Peterson. Adaptive estimation of power system frequency deviation and its rate of change for calculating sudden power system overloads. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2) : 585~ 594.
- 6 Moor P J, Almeling J H and Johns A T. Frequency relaying based on Instantaneous frequency measurement. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4) : 1737~ 1743.
- 7 宗孔德, 胡广书. 数字信号处理. 清华大学出版社, 1988.
- 8 何奔腾, 李菊. 电力系统频率的自适应测量. 电力系统及其自动化学报, 1991, (2)

REAL TIME ESTIMATION OF POWER SYSTEM FREQUENCY

J in H uaf eng, H e B eng teng (Zhejiang University, Hangzhou, China, 310027)

Abstract A new method based on zero crossing is presented for estimating power system frequency. This method can estimate power system frequency precisely through simple calculating and follow the tracks of the frequency deviation quickly. In this paper, some simulation are presented for evaluating the influences by hammonics and random noises, and the property for following the tracks of the frequency deviation.

Keywords power system frequency estimation zero crossing detection