

一种基于富氏滤波原理的 电力系统频率测量方法

周大敏 重庆后勤工程学院(630041)

【摘要】 提出了一种利用富氏滤波器的输出测量电力系统频率的算法。该方法采用了一种简化处理方式以消除正、余弦滤波器幅值增益不同的影响,减小了计算量和响应时间,仿真结果表明,该算法不受电压过零点的影响,具有比较高的测量精度。

【关键词】 频率 频率测量 电力系统

引言

频率是反映电力系统运行状态的重要参数。在稳定的运行状态,发电机输出功率与系统负荷及损耗维持平衡,电力系统频率为常数。一般情况下,系统频率随负荷波动将在小范围内缓慢变化。如果电源或输电设备故障,导致能量缺额,破坏了系统功率的平衡状态,当这种不平衡程度相当大时,就可能引起整个电力系统崩溃。功率缺额的严重程度通过频率偏离额定值的大小及频率变化率反映出来。频率继电器通过测量这些参数,去预测系统是否将失去稳定,通过切机、切负荷控制,维持系统的安全运行。

随着计算机在继电保护领域的广泛应用,出现了各种数字频率的计算方法。大部分方法假定测频信号为单一频率的正弦波,在故障情况下的适应性很差。考虑到现在许多保护装置采用富氏算法滤取电力系统的基频分量,用基频分量构成保护的判据。因此,用这些滤波结果计算电力系统频率是很有益的,这样不仅可以完成频率继电器的一些功能,也可以用于自适应地改变采样间隔,确保动作判据不受频率偏移的影响。

用富氏滤波结果进行频率测量已提出了几种算法^[1-3], Phadke 等人提出了一种用电压相量相角变化来测量频率的方法^[1],频率偏离额定值很小时这种测量方法为了获得较精确的测量结果所需时间较长。文献^[2]提出用电压相量虚、实部的比值来确定频率的频率因子法,但要求从信号过零点开始采样。上述两种方法除已提到的不足外,还有一个重要的误差源未加考虑,就是当运行频率偏离额定值时,正、余弦 FIR 滤波器幅值增益出现差异,这必然会影响测频结果。文献^[3]提出的测频算法,为降低用差分近似导数带来的误差,以 4kHz 的采样频率对信号进行采样,对保护硬件要求较高。计算表明,在 4kHz 的采样频率下,算法的精度仍不理想,如取 $f_s = 600\text{Hz}$,误差已大得无法接受。对正、余弦 FIR 滤波器幅值增益不同的影响,算法采用反馈补偿措施,导致频率测量算法的计算量很大,响应时间较长。

本文基于正、余弦 FIR 滤波器的输出,提出一种测量电力系统频率的新方法。该方法首先从滤波结果获得 $\sin(2\pi f T_s)$, 然后从 $\sin(2\pi f T_s)$ 的泰勒级数展开式中计算频率。该方法最显著的特点是将正、余弦 FIR 滤波器的幅值增益不同的影响直接在测频公式中进行了补偿,并且所需计算量较小。

1 算法推导

1.1 测频方法

设电力系统的电压为 $X(t)$, $X(t)$ 的两个相位正交的分量可表示为:

$$X_1(t) = X \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1)$$

$$X_2(t) = X \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (2)$$

式中 X 、 f 分别为电压信号的幅值和频率, φ 为任意相移。对 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$ 以 T_s 进行等间隔采样, 采用值可表示为:

$$X_1(n) = X \cdot \sin(2\pi f T_s n + \varphi) \quad (3)$$

$$X_2(n) = X \cdot \cos(2\pi f T_s n + \varphi) \quad (4)$$

实际运用中, $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ 是通过数字滤波的方式而获得。

以采样周期 T_s 对电压信号 $X(t)$ 进行等间隔采样, 采样值可简计为 $X(n)$, 用正、余弦数字滤波器对其进行处理, 即可获得 $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ 。这一技术实际上就是估算电力系统基频分量的离散富里叶变换(DFT), 然而采用两个相位正交的正、余弦 FIR 滤波器更为方便。根据文献^[3], 滤波器的系数可取为:

$$H_s(k) = \sin\left(\frac{2\pi}{N}k + \frac{\pi}{N}\right) \quad (5)$$

$$H_c(k) = \cos\left(\frac{2\pi}{N}k + \frac{\pi}{N}\right) \quad (6)$$

式中 $k = 0, 1, \dots, N-1$, N 为每个工频周期的采样次数, $N = f_s/f_0$, f_0 、 f_s 分别为电力系统的额定频率和采样频率, $X(n)$ 的两个正交分量就为:

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(n-k)H_s(k) \quad (7)$$

$$X_2(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(n-k)H_c(k) \quad (8)$$

因此, 式 3、4 中的 $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ 实际上是用式 7、8 获得的。

任何 FIR 滤波器, 无论是对称型还是非对称型, 相位特性与频率成线性关系。然而当运行频率偏离额定值时, 正、余弦 FIR 滤波器的幅值增益却不相同。图 1 示出在 45 ~ 55 频率范围时, 正、余弦 FIR 滤波器的幅频响应。

设正、余弦滤波器的幅值增益分别为 K_s 、 K_c , 则式 3、4 更一般地可表示为:

$$X_1(n) = K_s X \cdot \sin(2\pi f T_s n + \varphi) \quad (9)$$

$$X_2(n) = K_c X \cdot \cos(2\pi f T_s n + \varphi) \quad (10)$$

在获得序列 $X_1(i)$ 、 $X_2(i)$ ($i = n, n-1, n-2$) 后, 可推得:

$$\begin{aligned} X_1(n) - X_1(n-2) &= 2\sin(2\pi f T_s)K_s X \cos(2\pi f (n-1) + \varphi) \\ &= 2\frac{K_s}{K_c} \sin(2\pi f T_s)X_2(n-1) \end{aligned} \quad (11)$$

同理可推得:

$$\begin{aligned} X_2(n) - X_2(n-2) &= 2\sin(2\pi f T_s)K_c X \cdot \cos(2\pi f T_s (n-1) + \varphi) \\ &= -2\frac{K_c}{K_s} \sin(2\pi f T_s)X_1(n-1) \end{aligned} \quad (12)$$

由式 11、12 得到:

$$2\sin(2\pi f T_s) = \frac{|X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|}{\frac{K_c}{K_s} |X_1(n-1)| + \frac{K_s}{K_c} |X_2(n-1)|} \quad (13)$$

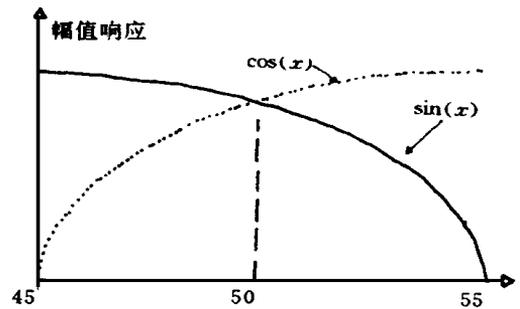


图 1 正、余弦滤波器的幅频响应

将式 11、12 两端分别乘以 $X_2(n-1)$ 、 $X_1(n-1)$ ，又可推得：

$$2\sin(2\pi f T_s) = \frac{[X_1(n) - X_1(n-2)]X_2(n-1) - [X_2(n) - X_2(n-2)]X_1(n-1)}{\frac{K_c}{K_s}X_1^2(n-1) + \frac{K_s}{K_c}X_2^2(n-1)} \quad (14)$$

将式 13、14 中的 $\sin(2\pi f T_s)$ 展开成泰勒级数，即可求出电力系统的运行频率 f 。

将式 14 与文献^[3]的算法表达式比较，可以看出其相似性，只不过式 14 多用一个采样，但正、余弦 FR 滤波器幅值增益的影响却以显示方式表达出来。

从式 13、14 看出，滤波器幅值增益对算法的影响只需校正两个参数 $X_1(n-1)$ 、 $X_2(n-1)$ ，比文献^[3]的反馈补偿校正法简单，且计算量也要小得多，由于式 13 比式 14 更简洁，下面就以式 13 为例进行讨论，所述方法对式 14 同样适用。

设 $f_s = 600\text{Hz}$ ，即 $N = 12$ ，令 $f = f_0(1+a)$ ， a 是运行频率偏离额定值的大小，则 $\sin(2\pi f T_s) = \sin(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}a)$ ，将 $\sin(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}a)$ 在 $\frac{\pi}{6}$ 附近展开成泰勒级数，取前两项为：

$$2\sin(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{6}a) \approx 1 + \frac{\sqrt{3}}{6}\pi a \quad (15)$$

令式 13 右端的计算结果为 K ，并令 $K_R = K_c/K_s$ ，即

$$K = \frac{|X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|}{K_R |X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|/K_R} \quad (16)$$

则可推得： $a = 2\sqrt{3}(K-1)/\pi$ (17)

实际运行频率为： $f = f_0(1+a)$ (18)

1.2 增益补偿

从式 16、17 看出， a 的大小与增益系数 K_s 、 K_c 有关，要使上面所述算法达到一定精度，就必须对 K 进行补偿，以消除正、余弦滤波器幅值增益不同的影响。根据文献^[3]有：

$$K_s = \frac{2\sin(\pi f_0/f_s)\sin(n\pi f/f_s)\cos(\pi f/f_s)}{\cos(2\pi f/f_s) - \cos(2\pi f_0/f_s)} \quad (19)$$

$$K_c = \frac{2\cos(\pi f_0/f_s)\sin(n\pi f/f_s)\sin(\pi f/f_s)}{\cos(2\pi f/f_s) - \cos(2\pi f_0/f_s)} \quad (20)$$

由于 $f = f_0(1+a)$ ，取 $f_s = 600\text{Hz}$ ，得到：

$$K_R = \frac{K_c}{K_s} = \text{ctg}(\frac{\pi}{12})\text{tg}(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{12}a) \quad (21)$$

从式 21 看出，补偿系数是频率偏移度 a 的函数，在未准确求出频率 f 时， K_R 无法确定，况且即使已知 a ，直接按式 21 计算 K_R 也是相当困难的。这里采用一种简化的处理方式，在频率计算式中将幅值补偿直接计入。

将 $\text{tg}(\frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{12}a)$ 在 $\pi/12$ 附近展开成泰勒级数，取前两项得到：

$$K_R = 1 + K_L a \quad (22)$$

式中 $K_L = \pi/3$ ，将 K_R 代入式 16 得到：

$$K = \frac{|X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|}{(1 + K_L a)^2 |X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|} (1 + K_L a) \quad (23)$$

令 $A = |X_1(n) - X_1(n-2)| + |X_2(n) - X_2(n-2)|$ ， $B = |X_1(n-1)| + |X_2(n-1)|$

将式 23 代入式 17，可推得：

$$a = \frac{K_0(A - B)}{B - K_1(A - 2|X_1(n-1)|)} - \frac{K_2|X_1(n-1)|a^2 + K_3|X_1(n-1)|a^3}{B - K_1(A - 2|X_1(n-1)|)} \quad (24)$$

式中 $K_0 = 2\sqrt{3}/\pi$, $K_1 = 2/\sqrt{3}$, $K_2 = (2 + 2/\sqrt{3}) \cdot \pi/3$, $K_3 = K_2^2$

考虑到式 15、22 函数展开时只取前两项引入的误差, 将式 24 改写为:

$$a = K_A - K_B \cdot a^2 + K_D \cdot a^3 \quad (25)$$

式中 $K_A = \frac{K_0(A - B)}{B - K_1(A - 2|X_1(n-1)|)}$, $K_B = \frac{K_2|X_1(n-1)|}{B - K_1(A - 2|X_1(n-1)|)}$

K_D 为校正系数。在实时条件下直接求解式 25 是不现实的。为减小式 25 的计算量, 可分两步进行:

(1) 首先略去式 25 右端 a 的高价项, 得: $a_0 = K_A$ (26)

(2) 用 a_0 代替式 25 右端的 a , 得到: $a = a_0 - K_B \cdot a_0^2 + K_D \cdot a_0^3$ (27)

式中 $K_D = \begin{cases} 3, a_0 < 0 \\ 5, a_0 > 0 \end{cases}$ 可用移位操作来完成。不计加、减及移位运算, 总共只需 6 次乘法、2 次除法就可以由滤波结果计算出 a_0 。

如采用式 14 计算频率, 只需将算法中的 A 、 B 用下式代替即可。

$$A = [X_1(n) - X_1(n-2)]X_2(n-1) - [X_2(n) - X_2(n-2)]X_1(n-1) \quad (28)$$

$$B = X_1^2(n-1) + X_2^2(n-1), X_1^2(n-1) \Rightarrow X_1(n-1)$$

相应地需增加 4 次乘法运算。

2 算法仿真

表 1 给出运行频率为 45~55Hz 时用本文算法的计算结果, 表中同时给出文献^[3]方法的仿真结果。

表 1 算法仿真结果 (单位: Hz)

频率	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
本文	45.0058	46.0057	46.99882	47.99945	48.99979	50.00000	50.99967	51.99884	52.9961	54.00616	54.97697
文 ^[3]	45.0187	46.0201	47.02135	48.02279	49.02428	50.023	51.02739	52.02895	53.0307	54.03241	55.03424

对文^[3]算法仿真时取采样频率 $f_s = 4000\text{Hz}$

从仿真结果可以看出本文算法具有较高的测量精度。

3 结论

本文提出了一种用正、余弦滤波器的输出测量电力系统频率的新方法。该方法对采样频率无特殊要求, 计算量较小, 将正、余弦滤波器的幅值增益影响直接在测频公式中进行了补偿。文中给出了仿真结果, 并与文献^[3]的算法进行了比较。仿真结果说明, 本文算法的原理是正确的, 具有比较高的测量精度。

参考文献

- 1 A. G Phadke, J. S Thorp, M. G Adam iak, A new measurement for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. IEEE PAS- 102, NO. 5, P1025- 1038
- 2 S Paul, S K Basu, U. S Hazra, Novel frequency- factor method for power- frequency measurement and estimation of load shedding IEE PROC- C, Vol 134, No. 6, 1987
- 3 P. J More, R. D. Carranza, A. T. Johns, A new numeric technique for high- speed evaluation of power system frequency. IEE proc- Gener Transm. Distrib, Vol 141, No. 5, September 1994

CONTENTS AND ABSTRACTS (Partial)

THEORETICAL STUDY AND APPLICATION

The Influence of Reclosing Instant to CCT Yuan Yuchun, Zhang Baohui(4)

The critical clearing time (CCT) is defined as a given maximum permissible duration of fault before power system loses its stability. In general, CCT regards fault location, fault type and system structure before and after fault. For a given fault the extent of the CCT is decided on the stable region of the system under the fault. It is indicated from analysis on the transient energy function of the system after reclosing, that the reclosing can decrease the transient energy of the system. If the transient energy is decreased to less than that when not reclosing, the reclosing can improve the system's stability. It is indicated from calculation, for the fault at which the system will lose its stability under the second swing, the reclosing is able to heighten the withstanding capacity of the system to the fault. Comparing with that when not reclosing, the CCT of the fault increases importantly.

Keywords: Reclosing CCT

Node Voltage Analysis Method of Fault on Parallel Double Transmission Lines with Multi-Branches

..... Zhang Xiaoyou, Cao Yijiang(7)

Based on the current measured on each terminal of parallel double transmission lines with multi-branches, calculate the node voltages to detect and diagnose fault on the transmission lines. It is proved from simulation that the method is effective.

Keywords: Multi-branch Parallel double transmission line Fault diagnosis

A Measuring Method of Power System Frequency Based on the Fourier Filtering Principle

..... Zhou Dam in(10)

An algorithm which uses output of the Fourier filter to measure power system frequency is presented. The algorithm adopts a simplified processing mode to eliminate the influence of different amplitude gains of sine and cosine filters and thus decreases calculation and responding time. Simulation result shows that the algorithm doesn't suffer from voltage zero-cross-point and has a higher measuring accuracy.

Keywords: Frequency Frequency measurement Power system

A New Algorithm of Microprocessor-Based Transformer Differential Protection

..... Huang Chun et al(14)

A new algorithm of microprocessor-based transformer differential protection which uses a principle of cross phase angle method is presented. The algorithm can reliably discriminate internal and external faults of transformer and features less internal memory occupied, less calculations and shorter response time to fault.

Keywords: Transformer differential protection Cross phase angle method Microprocessor-based protection

Fast Data Acquisition of Stability Supervisory Control for Power System

..... Ruan Shuhua, Zhou Buxiang(18)

A circuitry design scheme which can fast acquire pre/post fault data to ensure the real-time of stability supervisory control is presented through the analysis on data requirement of stability supervision control of power system and the availability of existing devices.

Key words: Stability supervisory control Data acquisition Realtime

NEW PRODUCT DEVELOPMENT

Development of XWJK-3000 Open Computer-Based Supervision and Control System

..... Cao Quanxi et al(20)

A computer-based supervision & control system with open system structure is introduced. It uses DSP, PC bus and network technique. It can be used to realize integral automation in 35~220kV substations.

The Study of Microprocessor-Based Stability and Control Device Applied in Fengbai System

..... Zhang Tao et al(23)

A new type of microprocessor-based device based on-the-spot is introduced. The device deals with the voltage of busbar and the current of transmission lines which are connected to the device. The device detects type of fault by means of the voltage and current and trips generators according to the settings. The hardware and software of the device are mainly described. Today, the device is applied in Dongfeng substation, Meihe substation, Hadawan substation and Fengman hydropower plant of Fengbai power system.

Analysis on the Technical Features of YTF(S)-500 Remote Trip Signal Transmission Device

..... Zhu Yanzhang, Wang Kuipu(27)