

利用富里叶变换实现微机自动准同期

李振然 广西大学电气系(530004)

摘要 本文根据富里叶变换从受到干扰污染的输入信号中抽取基波分量,利用电压相角变化来测量频率、电压幅值以及发电机电压与系统电压的相位差。通过自适应调整采样间隔的技术使频率测量的精度得到很大的提高。所提出的方法具有很强的抗干扰能力,计算及外围硬件设备都很简单。

关键词 富里叶变换 自动准同期 自适应采样

引言

目前我国应用最为广泛的自动准同期装置是利用模拟原理构成的,在原理上存在着参数不稳定、整定误差大和并列时间长等缺点。随着计算技术的发展,出现各种微机自动准同期装置。

在电力系统运行中,噪音、谐波和随机干扰对测量点电压信号造成污染,各种扰动和操作等造成相位跃变,以及在瞬变过程和各类非正常、非稳态运行情况下电力系统的电流或电压的波形都要发生畸变。传统的基于计算电压波形的过零点个数或时间的周期法测频方案,得不出令人满意的频率测量结果^[1]。近年来许多学者提出大量的频率测量的算法。^[2]提出一种先从采样值获得 $\cos 2\pi ft$, 然后从 $\cos 2\pi ft$ 的泰勒级数展开式来估计频率。^[3]采用自适应调整采样间隔的技术,提出一种测频方法。虽然二者的测频精度很高,计算也不复杂,但都要求输入信号为正弦波,即没有考虑电力系统中的谐波、噪音以及开关操作之类随机干扰所造成输入信号波形的畸变对频率测量结果的影响。此外尚有基于线性插值原理的 CROSS 法^[4],快速富里叶法^[5]及卡尔曼滤波法^[6]等,这些算法的计算量都偏大,并且在精度上和测量速度上不能获得较好的统一,影响了实际应用。

本文根据富里叶变换,从受到干扰污染的输入信号中抽取基波分量,利用电压相角的变化来测量频率、电压幅值以及发电机电压与系统电压的相位差,通过自适应调整采样间隔的技术,具有很高的频率测量精度。

1 基于富里叶变换的微机自动准同期原理

1.1 频率的测量

假设输入信号是频率为 ω 的正弦电压。

$$\begin{aligned} u(t) &= A \sin(\omega t + \varphi) \\ &= A \sin(\omega_0 t + \psi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \Delta\omega \\ \psi &= \Delta\omega t + \varphi = 2\pi\Delta f t + \varphi \end{aligned}$$

本文 1994 年 8 月 9 日收稿

$u(t)$ 可用矢量 \bar{U} 的虚部表示。

$$\begin{aligned}\bar{U} &= Ae^{j\psi}e^{j\omega_0 t} \\ &= A[\cos\psi + j\sin\psi][\cos\omega_0 t + j\sin\omega_0 t] \\ &= A\cos\psi\cos\omega_0 t - A\sin\psi\sin\omega_0 t + j[A\sin\psi\cos\omega_0 t + A\cos\psi\sin\omega_0 t]\end{aligned}\quad (2)$$

若将 $Ae^{j\psi}$ 看作 \bar{U} 的复数振幅 u_m

$$u_m = Ae^{j\psi} = A\cos\psi + jA\sin\psi \quad (3)$$

对 $u(t)$ 信号每周采样 N 次 ($N=12$) 产生采样序列 $\{u_k\}$,

$$u_k = A\sin(2\pi f_0 k \frac{T_0}{N} + \psi) = A\sin(\frac{2\pi}{N}k + \psi) \quad (4)$$

对 $\{u_k\}$ 进行离散富里叶变换, 得到基波分量的频谱系数

$$\begin{aligned}u_1(k) &= \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \\ &= \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k \cos \frac{2\pi}{N}k - j \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k \sin \frac{2\pi}{N}k \\ &= u_I - ju_R\end{aligned}\quad (5)$$

式中

$$u_I = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k \cos \frac{2\pi}{N}k \quad (6)$$

$$u_R = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k \sin \frac{2\pi}{N}k \quad (7)$$

u_I 和 u_R 分别在 $u_1(k)$ 表达式中是余弦项之和与正弦项之和, 将它展开得下面两式:

$$u_I = \frac{2}{N} [u_0 - u_6 + \frac{\sqrt{3}}{2}(u_1 - u_5 - u_7 + u_{11}) + \frac{1}{2}(u_2 - u_4 - u_8 + u_{10})] \quad (8)$$

$$u_R = \frac{2}{N} [u_3 - u_9 + \frac{\sqrt{3}}{2}(u_2 + u_4 - u_8 - u_{10}) + \frac{1}{2}(u_1 + u_5 - u_7 - u_{11})] \quad (9)$$

可见, 计算 u_I 或 u_R 时只需进行三次乘法 9 次加(减)法, 计算量不大。对正弦输入信号可以证明(略)

$$\left. \begin{aligned}u_I &= A\sin\psi \\ u_R &= A\cos\psi\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$u_1(k)$ 是输入信号的基波频谱系数, 由式 3, 5 和式 10 可得出 $u_1(k)$ 与 u_m 的关系为

$$\begin{aligned}ju_1(k) &= j[u_I - ju_R] \\ &= u_R + ju_I \\ &= A\cos\psi + jA\sin\psi = u_m\end{aligned}\quad (11)$$

从上可见 $u_1(k)$ 和 u_m 都是表示输入信号基波分量的复数振幅, 由式 10 可得到输入信号的振幅 A 为

$$A = \sqrt{u_R^2 + u_I^2} \quad (12)$$

在上式中, 从 u_R, u_I 求 A 时要求平方根, 占太多时间, 根据式 7 提出的近似算法。

$$A = L + \frac{S}{3} \quad (13)$$

$$L = \max\{|u_R|, |u_I|\}$$

$$S = \min\{|u_R|, |u_I|\}$$

由式 10 可求出基波分量相位变化

$$\psi = \arctan \frac{u_I}{u_R} \quad (14)$$

由 u_I 、 u_R 通过查表可求得 ψ 。

为了测量频率的变化 Δf ，每周采样 12 次，得到 12 个采样值，用式 8、9 示出 u_I 、 u_R ，再用式 14 求出 ψ_1 。同样利用后 12 个采样值求出 ψ_2 ，利用式 15 即可求出 Δf 。

$$\therefore \psi = 2\pi\Delta f t + \varphi$$

$$\frac{d\psi}{dt} = 2\pi\Delta f$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta f &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{N\Delta t} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{N \cdot \frac{T_0}{N}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{T_0} \end{aligned} \quad (15)$$

式中， $T_0 = \frac{1}{f_0}$ ， $f_0 = 50\text{Hz}$

$$f = f_0 + \Delta f \quad (16)$$

1.2 发电机电压与系统电压的相位差 δ ，角频率差 ω_s 和幅值差 Δu 的计算

设发电机电压相位为 ψ_F

$$\psi_F = 2\pi f_0 t + \psi_F \quad (17)$$

系统电压相位为 ψ_S

$$\psi_S = 2\pi f_0 t + \psi_S \quad (18)$$

两电压的相位差 δ 为

$$\delta = \psi_F - \psi_S = \psi_F - \psi_S \quad (19)$$

两电压的角频率差 ω_s 为

$$\omega_s = 2\pi(\Delta f_F - \Delta f_S) \quad (20)$$

两电压的幅值差为

$$\Delta u = A_F - A_S \quad (21)$$

式中， ψ_F 、 A_F 和 ψ_S 、 A_S 分别为发电机电压的相位变化与幅值和系统电压的相位变化与幅值。

1.3 并列合闸角 δ_Y 的计算

模拟式自动准同期装置一般认为发电机电压与系统电压相位差 δ 的变化是匀速变化，事实上，滑差角频率 ω_s 是变化的，所以并列合闸角按下式计算更为合理^[8]。

$$\delta_Y = \omega_s t_{DL} + \frac{1}{2} a_s t_{DL}^2 \quad (22)$$

式中

t_{DL} 断路器合闸时间

$\omega_s t_{DL}$ 恒定频差时的提前合闸角。

a_s 角频率差加速度

$\frac{1}{2} a_s t_{DL}^2$ 考虑角频率差加速度后对 δ_Y 的修正。

$$a_s = \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{\omega_{S(n+m)} - \omega_{S(n)}}{m \cdot \frac{T_0}{N}} \quad (23)$$

由于每周采样 12 次，每两个周期计算一次 u_I 、 u_R 、 ψ 、 Δf 、 f 、 T 和 δ 一次，因此 δ 的计算值不

是连续的。为了避免漏掉合闸机会,给定一个合闸误差角,当实时计算的 δ 值与并列合闸角之间的差值小于或等于此误差角时,装置即发出合闸命令(在电压差频率差小于允许值条件下)。这样可以做到不漏掉第一次出允许合闸条件时并列机会。

1.4 断路器合闸时间的测量

断路器的合闸时间指从发出合闸脉冲到断路器主触头闭合这段时间。实践证明,断路器的合闸时间是变化的。因此必须带电测量断路器的合闸时间。目前已有利用发电机电压与系统电压异或得到的 U_{XOR} 是否消失来判断断路器是否已合闸,这方法不但复杂且易受干扰的影响。这里我们提出一种极其简单不用增加任何设备的测量断路器合闸时间的方法。在自动准同期装置发出合闸脉冲后,立即起动一个定时器开始计时,并不断检查两电压的幅值差、频率差以及相位差是否都为零,等于零表示断路器已合上,两个电压变成一个电压,于是停止计时,从定时器的读数可求得断路器的合闸时间,为下次进行自动并列提供较为准确的断路器合闸时间。

2 采样间隔的自适应调整

当用式 15 求 Δf 时,由于实际频率未知,只能用采样间隔 $\frac{T_0}{N}$ 采样,当信号频率偏离 50Hz 时,计算出 Δf 以及基波信号的幅度相位将存在采样不同步误差,如表 1 中的第一次测量值就是用采样间隔 $\frac{T_0}{N}$,经过富里叶变换后测量出结果。结果表明,在 $f=50\text{Hz}$ 时测出的频率无误差,当频率偏离 50Hz 时,虽然它还能基本上跟踪实际频率,但有一定误差。为了提高频率测量精度,在第二次测量时,采样间隔根据第一次测量到的频率进行自适应调整,采样间隔取为 $\frac{T}{N}$, T 为第一次测量到的周期。同时式 15 变成

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{T} \quad (24)$$

经过这样自适应调整后,得到的第二次频率测量值具有很高的精度如表 1 所示。采用自适应调整采样间隔的技术,可以解决固定采样间隔所产生的误差。采用上述方法测量频率,测量一次频率需 4 个周波,其中两个周期来进行第一次频率测量,另外两个周期用来进行第二次频率测量。

表 1 $N=12$

单位 Hz

实 测 值		实 际 频 率								
		40	45	49	49.5	50	50.5	51	55	60
测 量 值	第一次	38.08146	45.45729	48.8473	49.59308	50	50.5023	51.0132	55.2843	57.9855
	第二次	40.0065	44.99915	49.00088	49.4999	50	50.4998	51.0002	55.00024	59.9965

根据奈奎斯采样定理,为了避免造成频谱混叠,采样频率必须大于两倍信号频谱的最高频率。当 $N=12$ 时,在被采样信号包含 7 次以上的谐波时,将会出现频谱混叠误差。由于 7 次以上谐波的幅值已很小,而且当采用自适应调整采样间隔技术后,这误差可减小。为了减轻计算机负担仍采用 $N=12$ 为宜。

3 结论

本文提出一种新的频率以及两电压相位差测量方法,它是基于富里叶变换和自适应调整采样间隔的技术。此外又提出一种测量断路器合闸时间的新的方法。这些测量方法可以避免

干扰的影响,频率测量和相位差测量的精度都比较高,测量范围大,计算简单和易于实现,外围硬件设备较少。

自动准同期装置是用 MCS—8098 单片机构成,采用双重结构。程序框图如图 1、图 2 和图 3 所示,试验结果表明,取得良好效果,表 1 试验所用框图与图 3 稍有不同。

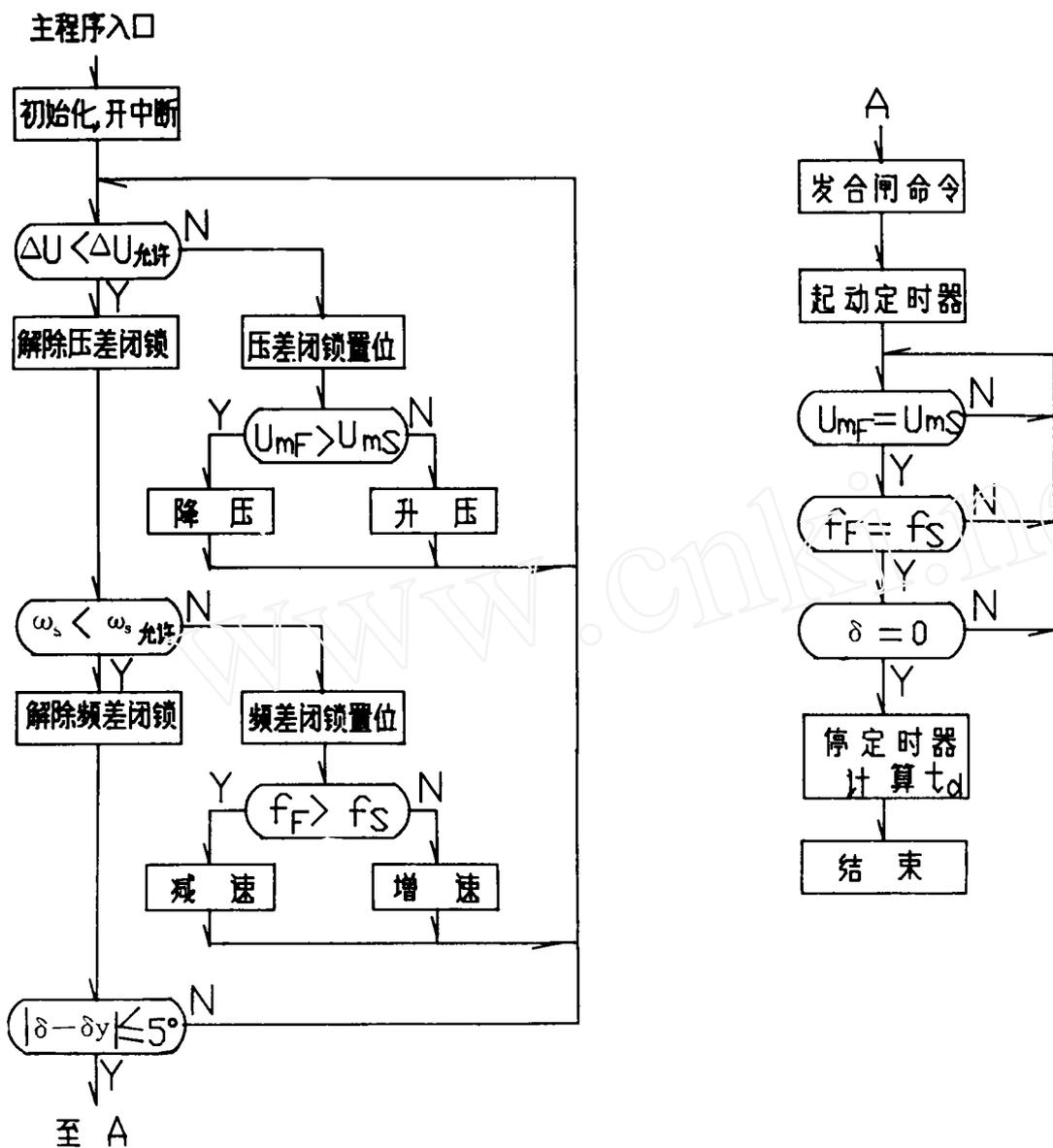


图 1 主程序流程图

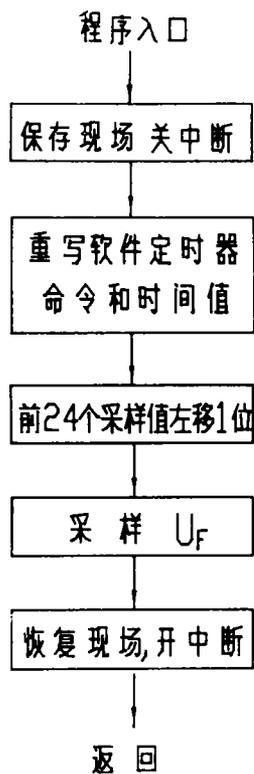


图2 u_r (或 u_s) 采样程序

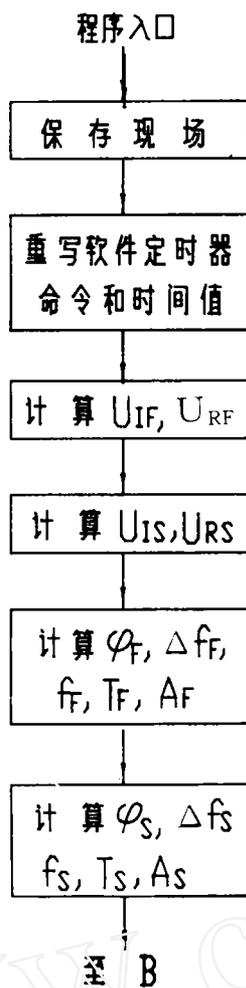
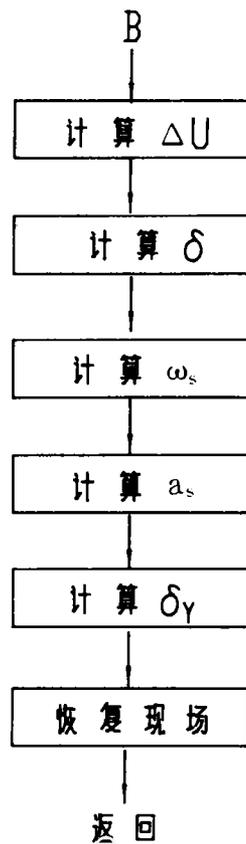


图3 40毫秒中断服务程序



参考文献

- 1 韩英铎等. 电力系统动态频率的新概念和新算法. 电力系统自动化, 1993. 10
- 2 王安定、葛耀中. 用母线电压测量电力系统频率的一种新方法. 电力系统及其自动化学报, 第3卷第1期.
- 3 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, 第3卷第2期.
- 4 Nguyen C. T. etc. A New Technique for Rapid Tracking of Frequency Deviations. Based on I-avel crossing, IEEE Trans, PAS-103 NO. 8 1984.
- 5 Girgis, A. A. etc. A New FFT Baced Digital Frequency relay For load shedding. IEEE Trans PAS-101 NO. 2 1982.
- 6 Adly A. Girgis etc. Adaptive Estimation of Power Systems Frequency Daviaton and Its Rate of Change for calculating Sudden Power System Overloads. IEEE PWRD-5, NO. 2 1990.
- 7 胡立华. 简化高压输电线计算机阻抗保护计算的方法. 继电器, 1983. 3.
- 8 叶念国. 带微处理机的同步发电机快速准同期控制器. 电力系统自动化, 1983. 6.