

锁相环在电力系统现场测控装置中的应用

江道灼, 马进, 章鑫杰

(浙江大学电气工学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 将锁相环硬件电路应用于电力系统现场测控装置, 可以非常方便地实现自适应采样, 提高电量测量精度, 实现便于与单片机接口的硬件角度检测电路。详细阐述了锁相环在电力系统现场测控装置中的应用, 提出利用锁相环在频率变化情况下实现自适应采样的方案, 也给出了利用锁相环技术测量频率与功率因数角的方案。

关键词: 锁相环; 测控装置; 自适应采样

中图分类号: TM727.2; TM73

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2000)08-0043-03

随着国民经济的发展和人民物质文化生活水平的不断提高, 对电力需求愈来愈大, 促使电力事业迅速发展, 同时, 用户也越来越重视电能的质量和供电的可靠性。“电力法”和承诺制的公布和贯彻执行, 对电力系统的运行水平提出了新的高的要求, 为了满足这些要求, 电力工作者不断应用新的技术与手段, RTU、FIU 等现场测控装置的广泛应用就是一个很好的例子。现场测控装置在现场实时准确测量电量, 进行一定的控制, 及时上传信息, 并执行上位控制机发送的命令。在测控装置对现场电量进行测量、处理的过程中, 利用锁相技术跟踪系统频率的变化, 可以实现自适应采样, 提高对电压、电流、频率、相角等电量的测量精度, 从而有效提高控制的准确度。

1 用锁相技术实现自适应采样

用于继电保护及电网控制的算法中, 往往假定系统频率 f 不变, 则采样频率 $f_s = Nf$ 也保持不变, 当系统频率发生缓慢变化, 如果采样频率不进行自适应调整, 就会造成非预定数据窗长度采样, 影响算法的精度。文献^[1]给出了一种用于数字保护装置的自适应采样算法, 其基本原理是利用文献^[2]提出的频率固定时的 DFT 算法在系统频率变化时产生的误差, 推算出频率变化量 Δf , 从而利用 Δf 对采样频率进行修正, 图 1 给出了其原理框图。对这样一个积分反馈系统, 其传递函数与 f 分别为:

$$\frac{f_{\text{sample}}}{f} = \frac{k}{S + \frac{k}{N}}, \quad f = \frac{f}{1 + \frac{k}{NS}} \quad (1)$$

当输入信号的频率 f 是阶跃信号, 即 $f = a1(t)$ 时, 由终值定理, 可得:

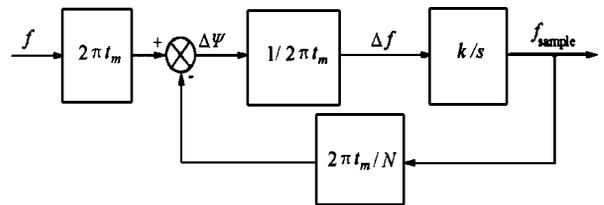


图 1

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f = \lim_{s \rightarrow 0} [S \cdot f(S)] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{S}{1 + \frac{k}{NS}} \cdot \frac{a}{S} \right] = 0 \quad (2)$$

即采样频率 f_{sample} 能够锁定输入频率。

但当输入信号的频率 f 是渐变信号, 即 $f = at(t)$ 时, 由终值定理, 可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f = \lim_{s \rightarrow 0} [S \cdot f(S)] = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{S}{1 + \frac{k}{NS}} \cdot \frac{a}{S^2} \right] = \frac{aN}{k} \quad (3)$$

可见存在静态系统频率误差(大小与频率变化率和采样点数有关), 采样频率不能跟踪系统频率。

另一方面, 上述算法需用软件实现, 增加了 CPU 的开销和软件复杂度。

采用图 2 所示的反馈系统, 可以保证采样频率“跟随”输入信号频率(基频)的变化。

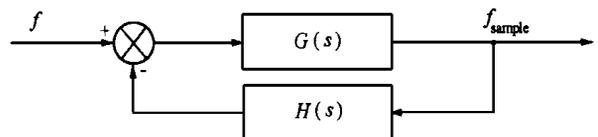


图 2

由图可得:

$$f = \frac{f(S)}{1 + F(S)}, \quad \text{其中 } F(S) = G(S)H(S), \text{ 设}$$

$$F(S) = \frac{k(1+ST_a)(1+ST_b)}{S^n(1+ST_1)(1+ST_2)} \quad (4)$$

考虑到电力系统频率是渐变信号,仍设 $f = atl(t)$, 则由拉氏变换终值定理得稳态时误差:

$$\lim_{s \rightarrow 0} f = \lim_{s \rightarrow 0} [S \cdot f(S)] = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{aS^{n-1}}{S^n + k \frac{(1+ST_a)(1+ST_b)}{(1+ST_1)(1+ST_2)}} \quad (5)$$

当 $n=1$ 时, $\lim_{s \rightarrow 0} f = \frac{a}{k}$, 当 $n \geq 2$ 时, $\lim_{s \rightarrow 0} f = 0$

式(5)表明,要使采样频率跟踪系统频率,须开环传递函数 $F(S)$ 中 $n \geq 2$, 兼顾系统稳定性,取 $n=2$, 并取反馈传递函数 $H(S) = 1/N$ (N 为分频系数), 则采样频率 f_{sample} 就可以实时跟踪系统频率 f 变化。

图2控制环节可以很方便地用锁相环硬件电路来实现,其原理如图3所示。图中,PD为相差比较器,其传递函数为: $u_d = k_p \cdot$; VCO为压控振荡器,其传递函数为 $f_{\text{VCO}} = \frac{k_v u_c}{S}$ 。

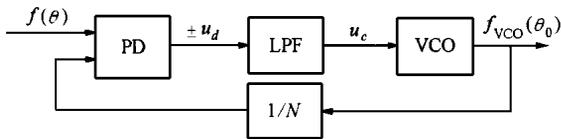


图3

取LPF(低通滤波器)的传递函数为:

$$T(S) = \frac{T_2 S + 1}{T_1 S} \quad (T_1 > T_2), \text{ 且设 } \frac{a}{S^2}, \text{ 则有:}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \cdot \frac{k_p k_v}{S^2} \cdot \frac{T_2 S + 1}{T_1}} \cdot \frac{a}{S^2} = \frac{a}{S^2 + \frac{k_p k_v T_2}{N T_1} S + \frac{k_p k_v}{N T_1}} \quad (6)$$

由拉氏变换终值定理知上式(6)的稳态误差等于零。

据上述原理,我们在电力系统现场测控装置的采样电路中,利用锁相环先将将被采样信号(系统电压、电流)的基波频率 N 倍频并以其作为产生采样脉冲的基准时钟,再根据周期采样点数(即采样频率)的要求,对该基准时钟进行计数分频,就可获得能够自动跟踪输入信号基波频率的等间隔采样脉冲信号,其硬件原理框图如图4所示。

图中,输入信号经带通滤波器后获得一定频带范围内(以基波频率为中心)的输出,再经整形电路形成频率为 f_i 的等间隔方波输出信号;锁相环通过一个 $1/N$ 分频计数器的反馈,将输出信号的频率 f_0

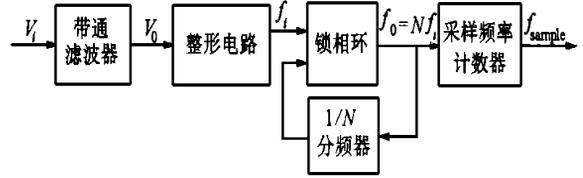


图4

锁定在 Nf_i 上,采样频率计数器按每周波的采样点数,对 f_0 进行分频计数,获得随 f_0 变化而变化的输出脉冲序列 f_{sample} ,作为启动采样的脉冲信号。如上分析,由于该系统的开环传递函数 $F(S)$ 是一个二型积分函数,故采样频率 f_{sample} 经 $1/N$ 分频器反馈后与输入频率 f_i 的稳态频差等于零,从而实现了被测电量频率变化时,采样频率“跟踪并锁定”输入信号频率(基频),保证了在输入信号频率变化情况下,仍能等间隔采样完整数据周波。

2 利用锁相环提高频率测量精度

测量频率一般有两种方法,一种方法是测频法,其原理是在时间宽度为 T_b 的闸门时间(频率 $f_b = 1/T_b$)内对被测信号频率 f_x (周期 $T_x = 1/f_x$) 计数,若计数值为 N ,则:

$$N T_x = T_b \Rightarrow f_x = \frac{N}{T_x} = \frac{N}{T_b} = N f_b \quad (7)$$

另一种方法是测周法,即用被测信号的周期 T_x ($= 1/f_x$) 控制对标准频率信号 f_b (其周期为 $T_b = 1/f_b$) 的计数时间,若计数值为 N ,则:

$$N \cdot T_b = T_x \Rightarrow f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{1}{N T_b} = \frac{f_b}{N} \quad (8)$$

无论用哪种方法,进行频率测量的主要误差源都是由于计数器只能进行整数计数而引起的 ± 1 个脉冲的计数误差,即 $\Delta f = \pm 1/N$,

对于测频法有:

$$\Delta f = \frac{\pm 1}{N} = \frac{1}{N} = \frac{f_b}{f_x} = \frac{T_x}{T_b} \quad (9)$$

对于测周法有:

$$\Delta f = \frac{\pm 1}{N} = \frac{1}{N} = \frac{f_x}{f_b} = \frac{T_b}{T_x} \quad (10)$$

理论上讲,只要测频法的标准闸门时间 T_b 足够长,或测周法的标准频率足够高,都能获得满足精度要求的频率测量值。比如,测量 $f_x = 50\text{Hz}$ 的电力系统频率,为保证测量误差 ≤ 0.05 ,采用测周法需取标准信号频率 $f_b = 1\text{kHz}$,采用测频法需取标准闸门时间 $T_b = 400\text{ms}$;如果测量误差提高为 ≤ 0.005 ,则

测周法的标准信号频率和测频法的标准闸门时间分别提高为 $f_b = 10\text{kHz}$ 和 $T_b = 4000\text{ms}$ 。

很显然,为获取同样精度的测量频率,在不采取任何有效措施情况下,采用测频法所需时间要比测周法长。但是,测周法需要提供频率足够高而且稳定的标准信号源,这在实际应用中实现起来有一定的难度。而对于当前大多数现场测控装置而言,基本上都是以单片机为核心构成的智能测控装置,由于单片机的定时器可以非常方便地产生宽度为 T_b 的闸门脉冲,因而测频法实现起来要比测周法方便得多。

为减小测频法误差,同时能够象测周法那样在较短的时间内获得足够高精度的测量频率,需要对测频法采取必要的改进措施,采用锁相环技术可以很好地解决这一问题,其原理如图5所示。

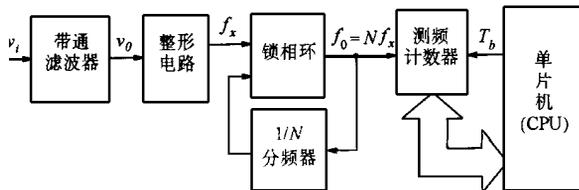


图5

图5所示的测频工作原理:锁相环对待测频率 ($= f_x$) 的交流信号进行锁相倍频,其输出脉冲信号 (频率 $f_0 = N f_x$, N 为倍频系数,可根据精度要求整定) 作为测频计数器的输入信号;测频计数器在标准闸门时间 T_b 内 (由单片机内部定时器或其它标准时钟源产生) 对其输入脉冲进行计数。当闸门计数时间到时,测频计数器停止计数,同时中断 CPU 读取测频计数器计数值,此值经过简单换算即可获得输入信号的实际频率。显然,由于测频计数器在标准闸门时间 T_b 内的计数误差仅 ± 1 个计数脉冲,而经过锁相环输出的计数脉冲信号频率“跟随、锁定”待测信号频率且成 N 倍频关系,若取锁相环倍频系数 $N = 7200$ (即对输入待测信号进行 7200 倍频),则测频法相当于是对频率高达 360kHz 的信号进行测频,因此这种改进的测频法可以大大提高频率测量的精度。表1给出这种测频法在不同闸门计数时间 T_b 情况下对待测信号频率 $f_x = 50\text{Hz}$ 的相对测量误差。

表1

$f_x = 50\text{Hz}, N = 7200, f_0 = 360\text{kHz}, (\%) = 100 / (360 * T_b)$					
$T_b(\text{ms})$	20	40	60	80	100
%	0.0139	0.0069	0.0046	0.0035	0.0028

3 锁相环在其它电量测量方面的应用

在电力系统现场测控装置中,经常需要对一些矩形脉冲的宽度进行计数,由于锁相环脉冲在一个周波内保持固定的数目,因此,每一个脉冲都代表固定的电角度。例如,将系统频率 3600 倍频后的锁相环脉冲,每一个脉冲代表一个周波的 $1/3600$,即 0.1° 电角度。可以利用这一特点简化电力系统中有关电角度的测量与计算,比如为测量功率因数,可以通过简单的电路获得代表电压、电流相差的矩形脉冲,该矩形脉冲信号用来控制计数器的计数使能端,使计数器在代表电压、电流相差的时间内对锁定于系统频率的锁相环输出脉冲进行计数,并在计数结束的同时中断 CPU 读取计数器的计数值,该计数值乘以某一固定的系数 (如每个脉冲代表 0.1° 电角度,则乘以 10) 后便可获得实际角度值,从而可大大减少 CPU 求取功率因数的计算量。

4 结论

将锁相环技术应用在电力系统现场智能测控装置中,利用简单的硬件电路,不但可以实现对交流信号的频率跟踪自适应采样,提高电量测量精度,而且可以简化计算程序,减轻 CPU 的负担。该法已用于我们开发的电力系统智能测控装置中,并取得良好的测量效果。

参考文献:

- [1] Gabriel Benmouyal. An Adaptive Sampling - Interval Generator for Digital Relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 3(7): 1602 ~ 1607.
- [2] Phadkd A G, Thorp J S, Adamiak M G A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency. IEEE Trans, 1983, PAS - 102(5): 1025 ~ 1038.
- [3] 郝鸿安. 常用模拟集成电路手册. 人民邮电出版社, 1991.
- [4] 沈雷. CMOS 集成电路原理及应用. 光明日报社, 1983.
- [5] 张义辉等. 基于富氏测频算法的改进研究. 电网技术, 1998, (3),
- [6] 刘晋. 8031 测量频率的方法研究. 电子测量技术, 1998, (1).

收稿日期: 1999-12-21

作者简介: 江道灼 (1960 -), 男, 副教授, 主要从事直流输电微机控制系统, 配网自动化等领域的科研及教学工作; 马进 (1975 -), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统控制研究; 章鑫杰 (1979 -), 男, 本科生, 主要从事电力系统及其自动化专业的学习与研究。

(下转第 52 页)

保护整定配合是否已满足选择性的配合要求应针对每个系统分别作有代表性的保护配合曲线。如应作低压厂用电源进线开关与PC柜上最大负荷的开关回路(找最可能引起越级跳闸的开关回路,通常最大电动机的保护整定值相对别的回路较高),以及与该段PC柜上熔断器,熔断电流较大的,熔断时间相对较长的回路,校验它们是否能保证选择性。即主要抓住典型回路进行校验就可以了,不必与下面所有回路进行校验,绘制配合曲线。对MCC柜、保安电源等各小系统,也是应抓住进线回路,以进线回路与下面的典型开关及熔断器回路进行配合校验即可,对一个电厂只要细致地这样做工作。对每个系统分别作出该系统的典型配合校验即可,做到对保护的配合心中有数,就可以基本避免保护的非选择性误动。

关于厂变0.38kV侧接地零序保护的配合校验,对直接接地系统而言,应以厂变中性点的定时限或反时限零序过流保护与下级的回路相配合(为保证其选择性,一般不宜采用变压器中性点零序速断保护)。其定时限保护主要可由时限来保证选择性,有条件时尽可能使上下级的电流配合,对反时限零序

保护配合及校验原则同一般电流保护。

对变压器经高阻接地的零序保护,因为不必马上跳闸,故无须时限配合。

5 结束语

从总的原则讲,上下级的保护配合,应是上一级的过流保护与下级的过流保护配合;上一级的限时速断保护与下一级的速断保护配合,特殊情况下可由上一级的限时速断保护(短延时)与下一级的限时速断保护(短延时)配合。

参考文献:

- [1] 西北电力设计院. 电力工程电气设计手册. 水利电力出版社, 1991.
- [2] 低压电器保护配合. 西北电力设计院, 1993.
- [3] 低压断路器的选择及保护配合. 西北电力设计院, 1994.

收稿日期: 1999-11-24

作者简介: 鲍雅萍(1966-),女,讲师,主要从事电力系统继电保护和自动化方面的研究。

Setting and coordination of LV house - service relay

BAO Ya - ping

(Anyang University, Anyang 455000, China)

Abstract: Some problems in setting and coordination of LV house - service relay in power generation plant are presented in this paper. Some requirements for the relay coordination is stated. And some detail coordination schemes are also described. The requirements for testing the relay and ensuring the coordination of selectivity are proposed as well.

Key words: relay; setting; coordination

(上接第45页)

The application of phase locked loop in the data acquisition and control apparatus of power system

JIANG Dao-zhuo, MA Jin, ZHANG Xin-jie

(Dept. of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The Application of Phase Locked Loop (PLL) in the Data Acquisition and Control Apparatus makes it very convenient to realize the adaptive sampling, and in turn improves the precision of measurement. This paper discusses in detail the application of PLL in the design of such a system. It presents the adaptive sampling technique with PLL, and also gives designs to measure the frequency and pluse width.

Key words: phase locked loop; data acquisition and control apparatus; adaptive sampling; the measurement of frequency and pulse width