

基于高精度数字倍频原理实现电力系统频率跟踪的新技术

胡晓菁, 宋政湘, 王建华, 耿英三, 申望

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

Novel Technique Based on Digital Frequency Multiplying Principle with
High Accuracy in Power System Frequency Tracking

HU Xiao-jing, SONG Zheng-xiang, WANG Jian-hua, GENG Ying-san, SHEN Wang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 在分析现有频率跟踪技术的原理及特点基础上, 提出了一种基于高精度数字倍频的频率跟踪的新技术, 实现了电能质量在线监测的频率跟踪, 它的自适应补偿功能可以有效地减少倍频误差, 消除了基波波动导致的计算误差, 保证基频偏离工频时有效实现采样窗口与被测周期的同步。同时, 在现场可编程门阵列 FPGA 上验证了该设计的正确性, 使该模块可作为一个独立的单元嵌入到电能质量在线监测装置中。

关键词: 在线监测; 频率跟踪; 数字倍频; FPGA

中图分类号: TM930.12

文献标志码: A

Abstract: This paper analyzed the principle and character of previous frequency tracking technique. A novel technique was represented, in which adaptive compensation was adopted to minimize the error of digital frequency multiplying effectively. This eliminated calculation error caused by frequency deviation, and realized synchronization of sampling windows and period. The results on field programmable gate array indicate that design is validity and can be set in electric energy quality on-line monitor device as an unaided module.

Key words: on-line monitoring; frequency tracing;

digital frequency multiplication;

field programmable gate array(FPGA)

0 引言

频率是电力系统的重要参数。电力系统的频率一方面作为电能质量的指标, 需要动态监测; 另一方面作为实施安全稳定控制的重要状态反馈量, 要求能够实时重构。特别是在电力系统在线监测技术和微机继电保护装置中通常采用同步采集技术以满足数据采集的可靠性和准确性, 这就需要对电网频率进行测量和跟踪。因此, 频率跟踪成为电力系统运行

控制的重要技术。

1 电能质量在线监测中的频率跟踪技术

近年来, 电能质量问题逐渐引起人们的重视。一方面, 基于电力电子技术的装置在电力系统中的广泛应用, 使电网中的电压和电流的波形畸变严重, 同时, 用户负荷种类增多, 特别是一些具有大容量、非线性、冲击性性质的负荷设备接入电网, 对电能质量也会造成严重污染; 另一方面, 基于计算机的控制设备大量应用于工业过程控制, 而这些精细过程控制更容易受到电力系统抖动的影响。因此对电能质量的在线监测技术, 国内外都进行了大量的研究工作^[1-6]。

在线监测技术必须具备 3 个要素: 数据采集、数据处理及分析、处理意见与决策^[7]。其中数据采集是在线监测技术的基础, 是它的准确性和可靠性的重要保证。通常, 电能质量在线监测的数据采集模块就是用来对电网电压电流信号的连续快速采集, 其结构框图见图 1。

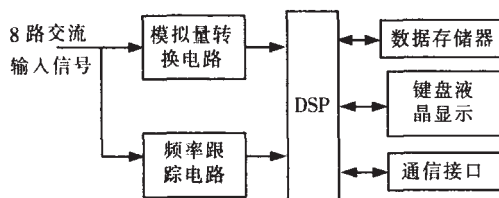


图1 数据采集模块结构框图

考虑到谐波分析的需要, 系统采用 6.4 kHz 的采样频率, 每个工频周期内采集 128 个点。由于电网频率不是固定不变的, 当其发生变化时不能保证后续电参数测量以及谐波分析算法的计算周期与电网

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477026); 新世纪优秀人才资助项目(NCET-04-0924)。

作者简介: 胡晓菁(1981-), 女, 博士研究生, 从事电器智能化技术及数字电路故障诊断的研究。

周期的同步, 将会引起信号较大的测量误差和频谱泄漏^[8,9]。因此, 在现有的系统中通常采用频率跟踪技术, 实时监测电网频率的变化, 及时调整采样间隔完成同步采样。常用的同步采样的方法一般有以下两种: ①硬件同步方法。由集成电路的锁相环 CD4046 实现。该法采用锁相环实时跟踪信号频率变化从而实时调整采样频率, 实现同步采样。但其可靠性不高, 当波形畸变时测量存在较大误差, 而且硬件较复杂, 器件的延迟、漂移等也将引入新的误差^[10]。②软件同步方法。被测信号经去噪处理后, 首先测取被测信号的周期, 计算采样周期并确定定时器的计数值, 然后在定时中断服务程序中采样, 并对定时器重置计数值。该方法简化了硬件电路, 其精度要高于硬件锁相方法, 且频率跟踪时间的可控性强, 但目前软件同步法一般由微处理器实现, 需要进行实时跟踪计算, 增加微处理器的计算量, 并且在这一过程中由于微处理器中计数器的量化误差和中断响应时间的分散性也必然会导致较大的采样误差^[11]。

2 高精度数字倍频技术的实现方法

2.1 数字倍频器的基本原理

数字倍频器的原理见图 2。任意周期信号经整形后, 转换为与原信号同频率的方波信号 $clkx$, 其频率为 f_x , 要求对其 N 倍频, 系统的高速同步时钟信号 clk , 其频率为 f_0 。

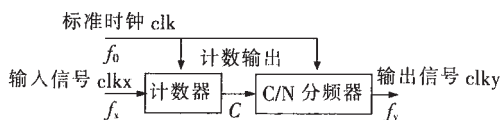


图 2 数字倍频器的原理图

利用分频器对时钟信号 clk 进行分频, 分频系数为计数器计数值的 $1/N$, 若计数值为 C , 则分频系数为 C/N , 输出信号 $clkx$ 的频率 f_y 为

$$f_y = \frac{f_0}{C/N} = \frac{N \times f_0}{C} \quad (1)$$

计数器在输入信号 $clkx$ 一个周期内对时钟信号 clk 计数, 若忽略各种误差计数值为 C , 则

$$C = \frac{f_0}{f_x} \quad (2)$$

由式(1)、(2)有 $f_y = N \times f_x$, 实现对输入信号的 N 倍频。数字倍频器中的计数器实质上完成了输入信号频率的测量, 因此保证数字倍频器跟踪精度的关键是提高周期测量的精度和分频系数的准确度。

2.2 同步测周期的设计

常用数字频率测量法有直接测频法、测周期法和多周期同步法。直接测频法是在给定的闸门时间内测量被测信号的脉冲个数, 进行换算得出被测信号的频率, 该方法较适合测量高频信号的频率。测周期法是通过测量被测信号的周期然后换算得出被测

信号的频率, 该方法比较适合测量频率较低的信号。多周期同步法具有以上两种方法的优点, 它通过测量被测信号数个周期的时间然后换算得出被测信号的频率, 可兼顾低频与高频信号。

笔者针对电网信号的频率跟踪, 通常电网中频率具有变化缓慢、变化范围有限的特点, 一般为 $49.5 \sim 50.5$ Hz, 并且要求频率跟踪的响应时间短, 因此笔者结合测周期法, 设计了一种同步测周期计数器对被测信号进行连续测量, 输出为最新一个周期的计数值。

传统的测周期计数采用门控计数器来实现, 输入信号经过二分频后作为计数器的门控信号, 计数器在门控信号有效时计数, 无效时停止。因此一个门控计数器只能实现输入信号一半时间的测周期计数, 要实现连续的测周期计数需要采用两个计数器^[12]。

同步测周期计数器首先对输入信号 $clkx$ 进行同步上升沿检测, 同步时钟为 clk , 见图 3。

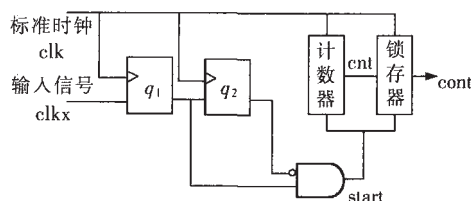


图 3 同步测周期计数器的结构图

由于 D 触发器的输出 q_1 和 q_2 的状态在时序上相差一个时钟周期, 因此在 $clkx$ 的上升跳变后, q_2 的非同 q_1 相与的结果 $start$ 会出现一个时钟周期的高电平脉冲, 该脉冲作为可重载计数器重载端和结果锁存器使能端的触发信号, 在输入信号每个上升沿到来后, 计数器的计数值 cnt 被锁存, 同时计数器置初值, 重新开始计数。锁存器输出的就是输入信号相邻两个上升沿时间间隔内的计数值, 即输入信号的测周期计数值, 见图 4。

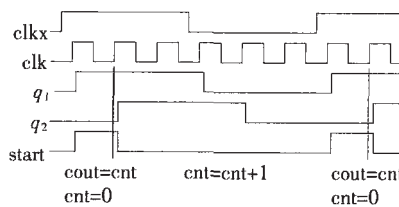


图 4 同步测周期计数器的测量原理

设计数值为 C , 存在量化误差 $\Delta C = \pm 1$, 输入信号周期的测量值为

$$T_{\text{nex}} = \frac{C}{f_0} \quad (3)$$

实际值为 $T_{\text{ex}} = (C + \Delta C) / f_0$, 输入信号周期的绝对误差为

$$\Delta T_x = T_{\text{nex}} - T_{\text{ex}} = \Delta C / f_0 \quad (4)$$

因此测量分辨率主要取决于 f_0 , 可通过使用高频的标准时钟信号提高分辨率。

2.3 自适应补偿数字倍频器实现误差补偿的原理

如图2所示,首先采用上述设计的测周期计数器以clk为标准时钟,频率为 f_0 ,对频率为 f_x 的输入信号clkx进行测周期计数,测周期计数器的结果为C,输入信号频率 $f_x=f_0/C$,计数值C除以分频N的整数商记为 C' ,分频器以 C' 为分频数对clk进行分频,输出信号clk_y,频率记为 f_y ,不考虑C误差的情况下,有 $f_y=f_0/C'$, $C'=C/N$,因此 $f_y=N \times f_x$,即实现了对clkx的N倍频。

实际电路中,C是 C/N 截掉余数的整数商,所以数字倍频器输出频率的误差主要由C产生(测周期计数器计数值C的误差为±1,当 f_0 较大时可忽略), C/N 余数的最大值为N-1,当采用频率为 f_y 的触发脉冲进行同步数据采集时,连续N个采样点的时间间隔为

$$T \pm \frac{N}{f_y} = N \times \frac{C'}{f_0} \quad (5)$$

忽略测周期计数器的误差,由式(3)、(5)可得N个采样点的时间间隔同输入信号周期的采样周期误差 ΔT_s 最大为

$$\Delta T_s = T - T \pm \frac{C - N \times C'}{f_0} = \frac{N-1}{f_0} \quad (6)$$

该误差随着倍频数N的增大而增大,这样实际的采样时刻与同步采样时刻有偏差,在一个周期最后一点处偏差达到最大,并且将累积到下一个周期,因此随着时间的推移,相应的偏差将越来越大。

为此,笔者设计一种具有自适应补偿功能的数字倍频器。对图2中的分频器进行改进,见图5,在原有的分频器前增加一个可重载的加法计数器和一个模N计数器,测周期计数器的结果C送入加法计数器的重载输入端,加法计数器输出除以N求整后的结果在时钟驱动下送入分频器。对于采样点数N通常取为2的n次幂,C的求取可以从C中截取最高位到第n位的数据。

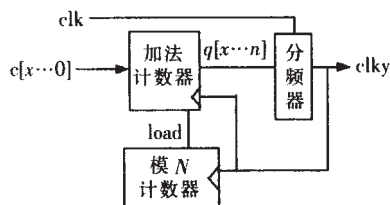


图5 自适应补偿分频器结构图

自适应补偿分频器工作原理如下:加法计数器和模N计数器对分频输出clk_y进行脉冲计数,每计满N,模N计数器发出一个控制信号load使加法计数器重载测周期计数值C作为初值。 C/N 的整数商为 C' ,设余数为M,因此 $C=N \times C' + M$,则在下一个采样周期内,分频器输出N个脉冲,加法计数器的计数值 $C+m$ 的范围为 $0 \sim N-1$,因此分频器输出的脉冲周期分为两个部分。

当 $0 \leq m < N-M$ 时

$$C_1 = \frac{C+m}{N} = \frac{N \times C' + M + m}{N} = C' \quad (7)$$

$$T_{1y} = \frac{C_1}{f_0} = \frac{C'}{f_0} \quad (8)$$

同理,当 $N-M \leq m < N$ 时

$$T_{2y} = \frac{C+1}{f_0} \quad (9)$$

符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算。此时,由式(8)、(9)N个采样点的时间间隔T为

$$T = (N-M) \times \frac{C'}{f_0} + M \times \frac{(C'+1)}{f_0} = \frac{N \times C' + M}{f_0} = \frac{C}{f_0} = T \quad (10)$$

由式(10)可以看出,经过补偿后,N个采样点的时间间隔与输入信号的周期相同。采用补偿方法改进的倍频器输出各个脉冲的周期并不完全相同,有 $1/f_0$ 的差别,但消除了采样周期误差并且解决了未进行补偿前误差累积的问题,且设计电路简单。

3 FPGA实验验证

选用Cyclone系列大规模可编程逻辑器件EP1C12Q240C8作为设计的验证器件,它基于1.5V、0.13 μm及全层铜SRAM工艺,具有丰富的可编程资源和片内RAM资源。在QuartusII软件中的仿真波形见图6。其中标准时钟clk的频率 $f_0=10$ MHz,输入信号clkx的频率 $f_x=50$ Hz,倍频系数为128,测周期计数器的输出值为200 000。分频器的分频系数为1 562,倍频输出信号为clk_y。

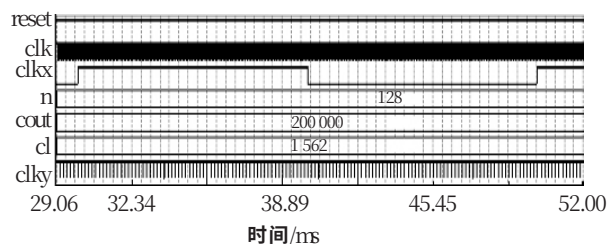


图6 系统仿真波形图

表1为频率的测量结果,满足国家标准对频率测量绝对误差不大于±0.01 Hz的要求。

表1 频率的测量数据

输入信号频率/Hz	实测频率/Hz	测量误差/Hz
48.999 8	48.999 6	-0.000 2
49.699 3	49.699 5	0.000 2
50.099 8	50.099 5	-0.000 3
51.399 8	51.399 9	0.000 1
51.999 9	51.999 6	-0.000 3

将该频率跟踪技术应用到电能质量监测装置中,作为数据采集的触发信号,完成对电网电压、电流、有功功率、无功功率的测量,以及进行电能分析,采用

FFT 算法计算至 63 次谐波的幅值。其中有效值、FFT 基波测量的测量结果见表 2, 表 3 为功率测量的结果。

表 2 有效值、FFT 基波测量的测量结果

信号幅值/V	基波幅值/V	误差/%	理论有效值/V	测量有效值/V	误差/%
1.374	1.362	0.87	0.972	0.969	0.31
1.916	1.906	0.52	1.355	1.356	0.07
3.001	2.982	0.63	2.122	2.119	0.14
3.540	3.520	0.56	2.503	2.500	0.12
4.518	4.497	0.47	3.195	3.192	0.09

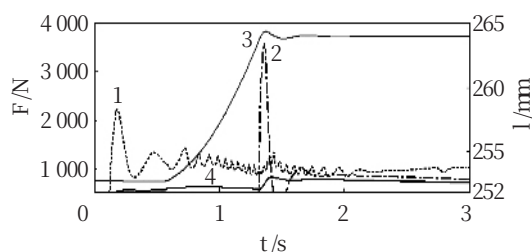
表 3 功率测量的结果

输入信号有效值/V		U _{a rms} =1.960			U _{b rms} =2.156		
相位差/(°)		0	15	30	45	60	90
有功功率	理论值/W	4.226	4.082	3.660	2.988	2.113	0
	测量值/W	4.22	4.07	3.65	2.99	2.11	0
	误差/%	-0.14	-0.29	-0.027	0.07	-0.014	0
无功功率	理论值/var	0	1.094	2.113	2.978	3.660	4.226
	测量值/var	0	1.12	2.13	2.99	3.64	4.21
	误差/%	0	2.30	0.80	0.40	-0.51	-0.38

4 结语

频率跟踪作为电能质量在线监测技术的核心技术之一, 有着极其重要的地位, 其中一个重要环节是保证实时监测系统频率的变化并实时调整数据采样的时间间隔。笔者采用基于高精度数字倍频的频率跟踪技术, 该倍频器具有自适应补偿, 解决了采样周期误差累积的问题。设计经过在 FPGA 上的验证, 结果表明该技术的正确性, 并且设计可以作为子模块

(上接第 171 页)



1——凸轮和滚针轴承之间的接触力变化曲线 2——触头力曲线
3——动触头位移与时间的变化曲线 4——触头弹簧力变化曲线

图 7 合闸弹簧弹性疲劳时位移和力变化仿真曲线

和碰撞力都显著降低, 整个合闸过程比正常情况下延长了约 2.5 ms, 连杆与橡皮缓冲器之间已没有碰撞。

合闸过程中凸轮所受外力非常大, 而且在整个过程中受力幅值存在较大的波动。因此可以根据动触头的动特性需要对样机模型添加理论和经验数据, 对凸轮的升程曲线和分、合闸弹簧刚度系数作适当的修改, 以减小合闸过程中凸轮及滚针轴承的受力, 增加轴承及整个操动机构的使用寿命。

应用到其它数据采集处理系统中, 尤其是基于 FPGA 的电能质量在线监测装置中。

参考文献:

- [1] 王 宾, 潘贞存, 赵建国, 等. 电能质量监测数据的同步处理与装置设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 45-49.
- [2] 丁屹峰, 程浩中, 占 勇, 等. 电能质量监测技术现状及发展[J]. 中国电力, 2004, 37(7): 16-19.
- [3] 杨淑英. 电能质量监测装置研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(2): 58-62.
- [4] 段成刚, 欧阳森, 宋政湘, 等. 新型在线实时电能质量监测设备的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 60-63.
- [5] ANANTH I, MORCOS M M. A Power Quality Monitoring System: a Case Study in DSP-based Solutions for Electric Power Industry [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19(7): 47-50.
- [6] LAKSHMIKANTH A, MORCOS M M. A Power Quality Monitoring System: a Case Study in DSP-based Solutions for Power Electronics [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2000, 50(3): 724-731.
- [7] 刘 强, 张元芳, 张晓冬. 过电压在线监测数据采集的研究[J]. 高压电器, 2002, 38(6): 43-45.
- [8] 刘凤新, 徐晓明. 电力参数非同步采样误差分析 [J]. 电测与仪表, 2003, 40(10): 9-11.
- [9] 肖雁鸿, 毛 筱, 周靖林, 等. 电力系统谐波测量方法综述 [J]. 电网技术, 2002, 26(6): 61-64.
- [10] 王宝安, 蒋 平, 高 亮, 等. 基于 DSP 技术的电能质量监测仪研制[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 56-58.
- [11] 黄 纯, 彭建春, 刘光晔, 等. 周期电气信号测量中软件同步采样方法的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 75-79.
- [12] 林霄舸, 段尚枢, 付景峰. 一种低频高精度全数字化倍频器 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(3): 109-113.

4 结语

以 ZN12-12 型真空断路器为对象, 建立了 ADAMS 仿真模型, 对断路器合闸过程的动力学特性进行了仿真分析, 得到断路器操作过程中机构零部件的相互碰撞的机械力、碰撞力和机械振动过程以及在一次操作过程中产生的几个振动事件。分析还表明, 当合闸弹簧弹性疲劳时上述有关过程都发生明显变化, 这对改善断路器机械设计和帮助断路器机械部分监测及故障诊断都有作用。

参考文献:

- [1] 李 军, 邢陵文, 覃文洁, 等. ADAMS 实例教程 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [2] 郝云堂, 金 烨, 李 辉. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 中的实践[J]. 机械设计与制造, 2003, 7(3): 16-18.
- [3] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 钱家骊, 关永刚. 高压断路器操动机构的碰撞分析 [J]. 高压电器, 2001, 37(6): 20-23.