

无功功率计量中移相法的 FPGA 实现

陈宗英, 袁慧梅, 陈卫华

(首都师范大学 信息工程学院, 北京 100089)

摘要: 无功功率计量方法中的移相法有两种实现方法, 一种是基于采样点平移, 另一种是利用希尔伯特滤波器。在 Matlab 上对这两种方法进行了设计、仿真, 并采用 EP2C50 型号的 FPGA 实现了希尔伯特滤波器。数据表明基于采样点平移的方法有局限性, 而希尔伯特移相无功算法具有移相准确的特点, 保证了无功功率的精确计量。

关键词: 无功功率; FPGA; 移相法; Hilbert

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)19-0079-03

FPGA realization of phase-shift method in reactive power measurement

CHEN Zong Ying, YUAN Hui Mei, CHEN Wei Hua

(Information Engineering College, Capital Normal University, Beijing 100089, China)

Abstract: There are two ways to carry out phase-shift which is one way of reactive power measurement, the one is the way which is based on the sampling points, the other one is to use Hilbert filter. In this paper, the two ways are designed and simulated on Matlab, and the Hilbert filter method is verified on a FPGA chip of EP2C50. The results show that the method based on sampling points is limited in practical application, but the Hilbert filter method has the advantages of Phase-shift accuracy, to ensure the accuracy of reactive power measurement.

Key words: reactive power; FPGA; phase-shift method; Hilbert

在电力系统运行时, 电网提供的能量有两部分, 一部分是有功功率, 用于能量单向转换; 一部分是无功功率, 用于电路内电场和磁场的能量交换。无功功率对外不做功, 但是对供电系统和负荷的正常运行十分重要, 在电网中流动会引起电压和功率损耗。因此, 必须计量电力用户从电网吸收以及电网传送的无功功率的大小。

移相法是无功功率计量算法中的一种, 它是利用无功功率和有功功率之间的相位角相差 $\pi/2$ 关系, 用计算有功功率的乘法器来计算无功功率。

本文采用了两种方法来实现移相法, 在 Matlab 上对这两种方法进行了设计、仿真, 并采用 EP2C50 型号的 FPGA 实现了希尔伯特滤波器。

1 无功功率与有功功率的关系

假设电压、电流如式(1)、式(2)所示:

$$u = \sum_{k=0}^n U_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

$$i = \sum_{k=0}^n I_k \cos(k\omega t) \quad (2)$$

则有功功率、无功功率分别为^[1]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \times i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=0}^n U_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \times I_k \cos(k\omega t) dt = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n U_k I_k \cos(\varphi_k) \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n U_k I_k \sin(\varphi_k) = -\frac{1}{2} \sum_{k=0}^n U_k I_k \cos(\varphi_k + \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n U_k I_k \cos(\varphi_k - \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

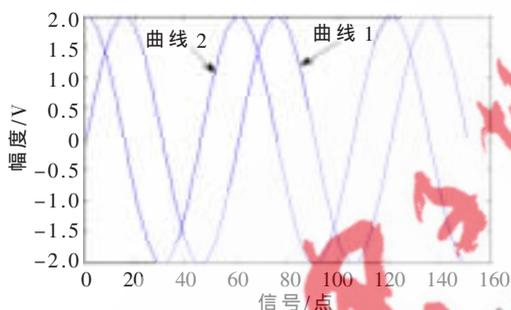
式(1)~式(4)中, $0 \sim n$ 表示谐波次数, U_k 、 I_k 分别为电压电流幅值, φ_k 为电压、电流的相位差; 式(3)表示有功功率, 式(4)表示无功功率。式(4)与式(3)相位角相差 $\pi/2$, 针对无功功率计算的移相法就是为了得到这 $\pi/2$ 相位

技术与方法 Technique and Method

差值,这是利用移相法计算无功功率的理论依据,即用计算有功功率的乘法器来计算无功功率,这在数字信号处理中十分有用。在实际应用中,乘法器的两个输入序列变成移相后的电压序列与电流序列就可以实现无功功率计算。而在计算有功功率时已经获得了电压的采样值、电流的采样值及电压电流之间的相位角,当采样点数满足计算谐波无功电能的奈奎斯特采样定理时,针对计算无功功率,有两种方法可以实现对离散信号的 $\pi/2$ 移相:一种是基于采样点平移来实现;另一种则是通过Hilbert变换来实现^[2]。

2 基于采样点平移的移相法

基于采样点平移的无功计量理论是将得到的离散的采样点信号进行 $\pi/2$ 移相(若 N 为信号一个周期内的采样点数,则 $\pi/2$ 移相就是移动 $N/4$ 个点),然后采用式(3)计算无功功率。如图1所示,曲线1是原正弦波信号;曲线2是基于采样点平移 $\pi/2$ 后的信号,从图中可以看出,基于采样点平移的移相法精确地实现了 $\pi/2$ 移相。

图1 基于采样点平移 $\pi/2$

但是这种方法是针对基波频率的采样点移相,实际应用时有其局限性。

(1)基于采样点平移方法要求被采样的信号只包含基波分量。假如对一个包含基波和3次谐波的信号(基波的每个周期 2π 内)进行100次采样,那么基波的 $\pi/2$ 移相就是移动25个采样点,但是,由于3次谐波的周期缩为基波的 $1/3$,25个采样点对于3次谐波而言,已经是移相 $3\pi/2$ 了。如图2所示,曲线1是原正弦波信号;曲线2是理论上平移 $\pi/2$ 后的信号,曲线3是基于采样点平移后的信号,实际已经平移了 $3\pi/2$ 。

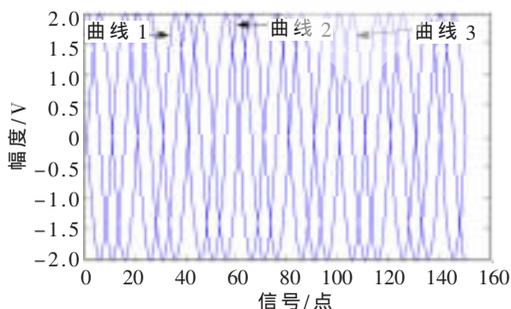


图2 含有谐波的信号基于采样点平移的移相

(2)基于采样点平移还要求每个周期的采样点数是4的整数倍,否则将不能被4整除而得不到 $\pi/2$ 的移相。如图3所示,曲线1为原正弦波信号,一个周期内采样点为75,不是4的整数倍;曲线2为理论移相 $\pi/2$ 的信号,曲线3为基于采样点平移的信号,与曲线2信号对比已有一定的偏移。

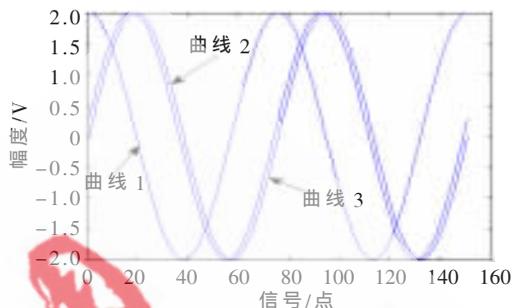


图3 每周期的采样点数不是4的整数倍的信号基于采样点平移的移相

基于采样点平移的无功计量方法虽然存在其局限性,但仍被一些要求不高的场合采用,主要是其实现相对简单,对硬件的性能要求也不是很高,但是当电网中的谐波成分提高时,基于采样点平移计量无功电能的精度就很难保证^[3]。

3 Hilbert变换计算无功功率

3.1 Hilbert数字滤波器基本原理

理想的Hilbert变换的定义为:

$$H_d(w) = \begin{cases} -j & 0 < w < \pi \\ j & -\pi < w < \pi \end{cases} \quad (5)$$

其幅值和相角分别为:

$$|H_d(w)| = 1 \quad (6)$$

$$\varphi(w) = \begin{cases} -\pi/2 & 0 < w < \pi \\ \pi/2 & -\pi < w < \pi \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)~式(7)可以看出,Hilbert数字滤波器的幅值特性为1,信号通过Hilbert数字滤波器后,其负频率成分进行相移 $\pi/2$,正频率成分进行相移 $-\pi/2$ 。可见,Hilbert数字滤波器能用于实现式(4)计算无功功率^[4]。

3.2 FIR型Hilbert数字滤波器的Matlab设计

线性相位FIR数字滤波器的设计方法主要有窗函数法、频率抽样法和等波纹切比雪夫法(即最优法),本文采用等波纹切比雪夫法进行数字滤波器的设计。对于50 Hz的工频基波信号,若考虑最高谐波次数为19,则可以将该数字滤波器所关心的频率范围设计为40 Hz~960 Hz。根据奈奎斯特采样定理,采样频率 F_s 应不小于2倍的最高次谐波频率,所以至少取2 kHz。

Hilbert数字滤波器取 N 为奇数,设所要设计的滤波器的频率响应为 $H_d(e^{jw})$,逼近加权函数为 $W(w)$,用线性相位FIR数字滤波器的 $H(w)$ 做逼近函数,则逼近误

技术与方法 Technique and Method

差函数为:

$$E(w) = W(w)[H_d(e^{jw}) - H(w)] \quad (8)$$

令 $\delta = \max\{|E(w)|\}$, 数字滤波器的设计问题就是寻找使 δ 最小的系统函数 $H(w)$, 即获取最优的单位冲激响应 $h(n)$ 。所以数字滤波器应有式(9)所要求的频率响应^[5]:

$$H_{d2}(e^{jw}) = \begin{cases} -j & w_L < w < \pi \\ j & -\pi < w < w_L \end{cases} \quad (9)$$

图4所示为等波纹切比雪夫法设计的 Hilbert 数字滤波器的幅频特性和相频特性。从图中可以看出该数字滤波器具有良好的幅频特性和相频特性,能获得严格线性相位及很好的衰减特性。

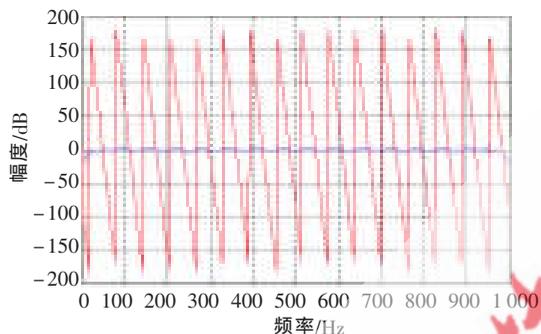


图4 等波纹切比雪夫法设计的 Hilbert 数字滤波器的幅频特性和相频特性

图5为频率为150 Hz的正弦波信号经过 Hilbert 滤波器以后的信号。

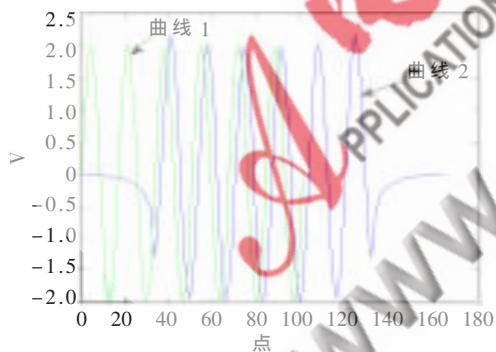


图5 正弦波信号经过 Hilbert 滤波器以后的波形

由仿真结果可知所设计的 Hilbert 数字滤波器能精确地将所输入的电压谐波信号的基波及每次谐波都移相,并在此基础上计算获得精确的无功功率值。

3.3 FIR 型 Hilbert 数字滤波器的 FPGA 实现

3.3.1 FIR IP 核的生成

Altera 公司提供的 FIR IP 核是一个高性能、参数化的 IP 核,可以用来实现 FIR 滤波器。该 IP 核支持全并行结构、全串行结构、多位串行结构、可变的多时钟结构等多种结构,滤波器的参数可以通过该 IP 核的参数化界面进行设计,也可以将在第三方软件中设计好的滤波器

系数导入该 IP 核中从而完成滤波器设计,它的所有输入输出信号格式都与 Avalon 总线的 Streaming 结构的接口相符,可以方便地加入到应用工程中。

本文中 FIR 滤波器的实现方法是将在 Matlab 产生的滤波器系数导入 Quartus ii 中的 FIR IP CORE 中。图6是 Quartus 生成的 FIR IP 核。

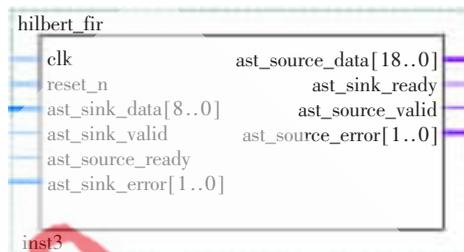


图6 Quartus 生成的 FIR IP 核

3.3.2 FIR IP 核的验证

由于所设计的 Hilbert 滤波器的频率范围为 40 Hz~960 Hz,所以验证时将用频率为 150 Hz 正弦波信号通过所设计的滤波器,观察结果来验证该滤波器是否实现了 $\pi/2$ 移相。

本文讨论了无功功率与有功功率之间的关系,以及计算无功功率方法中移相法的两种方法,根据在 Matlab 中对基于采样点平移的移相法和 Hilbert 滤波器法的仿真可以看出,基于采样点平移的移相法在实际应用中有局限性,只能在一些要求不高的场合采用。而 Hilbert 滤波器法可以做到移相准确、计量精度高,因此,基于 Hilbert 变换的移相算法是无功计量中较好的方法。

参考文献

- [1] 王薇,王晓茹,黄晓青.无功功率测量的 Hilbert 数字滤波器研究[J].电测与仪表,2007,44(3):9-12.
- [2] 吴思聪,赵威威,陈燕红.Hilbert 变换在无功电能计量中的应用研究[J].电测与仪表,2009,46(6):35-38.
- [3] 陈国通.无功功率和电能的移相算法[J].电力学报,2007,22(4):228-231.
- [4] 陈啸晴,栗梅.几种无功功率测量算法的仿真比较[J].广东技术师范学院学报,2008(12):25-28.
- [5] 杨晓洁.基于 SOPC 技术的三相电能计量算法研究[D].北京:首都师范大学,2008.

(收稿日期:2010-03-03)

作者简介:

陈宗英,女,1986年生,硕士,主要研究方向:综合电子系统。