

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106529

一种逆变器并网电流采集与过流检测方法^{*}

梁文科 苏淑靖 梁东飞 邢震震

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对并网逆变器功率控制中电流的高精度反馈及其故障监测中实时电流检测的需求,提出了一种基于Sigma-Delta ADC技术的逆变器并网电流采集和快速过流检测方法。该方法利用两个抽取速率不同的Sinc³滤波器分别对经滤波处理后的调制数据流进行解调,实现了对同一调制数据流的灵活使用,数据流由二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器调制产生,Sinc³滤波器均在数字信号处理器(DSP)内部实现。测试结果表明所提方法实现了逆变器并网电流的13位有效位数的高精度隔离采样和3.4 μs 的快速过流检测。

关键词: Sinc³滤波器;电流测量;过流保护;逆变器

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

A method of current acquisition and over current detection for grid connected inverter

Liang Wenke Su Shujing Liang Dongfei Xing Zhenzhen

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-precision current feedback in power control and real-time current detection in fault monitoring of grid-connected inverters, a new method of grid-connected inverter current acquisition and rapid overcurrent detection based on Sigma-Delta ADC technology was proposed. In this method, two Sinc³ filters with different extraction rates were used to demodulate the filtered data stream respectively, which achieved the flexible usage of the modulation on the same data flow. The data stream was modulated by a second order sigma delta modulator, Sinc³ filters were implemented in the digital signal processor (DSP). Test results show that the proposed method realizes the inverter grid current 13 effective resolution bit isolation sampling and 3.4 μs rapid over-current detection.

Keywords: Sinc³ filter; current measurement; over current protection; inverter

0 引言

并网电流的测量是数字化逆变器控制系统的重要组成部分,能否精确测量出并网电流关乎着控制系统的精度、稳定性和响应速度,同时也是能否实现高性能闭环控制的关键^[1-2]。逆变器在工作过程中始终承受较高的电应力和热应力,发生过流故障在所难免,根据相关并网标准^[3],在发生任何故障后都要对逆变器进行停机检查并排除故障,如果不能迅速检测到逆变器的过流故障,将直接影响系统的正常工作并造成经济损失,甚至危及人身安全,为了并网逆变器的安全可靠运行,减少因过流导致的逆变器损坏,快速过流检测至关重要^[4-6]。

超大规模的集成电路的发展,使得高采样率的 $\Sigma\Delta$ 调制器成为现实, $\Sigma\Delta$ 调制器普遍采用了过采样技术,通过噪声整形,大大提高了其信噪比及有效位数,实现了高精度模数转换。Sinc³滤波器以较高抽取速率工作时,其采样精度高,处理延时高,以较低抽取速率工作时,采样精度低,处理延时低。Sinc³滤波器的工作特点为不同的使用需求提供了相当大的灵活性^[7]。在采样硬件电路方面,常规隔离采样需要模拟电路和数字电路的二级隔离,而基于隔离型 $\Sigma\Delta$ 调制器ADC技术实现的隔离采样将二级隔离简化为一级,减少了采样环节,提高了电路精度^[8]。基于 $\Sigma\Delta$ 调制技术的测量电路已经在低频信号测量场合得到了应用,如使用应用了 $\Sigma\Delta$ 调制技术的模数转换芯片设计的温度测量

收稿日期:2021-04-27

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51875534)项目资助

系统^[9-10]。

为了满足逆变器并网电流的高精度采集及其快速过流检测的需求,本文采用隔离式二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器对取样电压信号进行调制,利用 DSP(digital signal processor)中的两个 Sinc^3 滤波器分别对同一调制数据流按不同抽取速率进行解调和滤波,从而获得高精度电流反馈值和实现低延时过流检测,有效保证了并网逆变器高性能闭环控制的应用和快速过流保护的实现。

1 原理与设计

三相逆变器并网电流采集及过流检测原理如图1所示,主要由取样电阻、取样电压调制转换模块以及由 DSP 完成的控制信号产生和数据处理模块组成。其工作原理为取样电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 将通过它们的并网电流 i_A 、 i_B 、 i_C 转换为电压 v_A 、 v_B 、 v_C , $\Sigma\Delta$ 调制器采用过采样技术将取样电阻检测到的电压信号 v_A 、 v_B 、 v_C 分别转换为 1 位高速数据流 $y(n)_{xA}$ 、 $y(n)_{xB}$ 、 $y(n)_{xC}$ 。同时量化噪声被搬移至有效带宽之外,为滤除高频量化噪声并降低后续数字处理的运算量, DSP 中的 3 个 Sinc^3_D 滤波器首先分别对调制数据流 $y(n)_{xA}$ 、 $y(n)_{xB}$ 、 $y(n)_{xC}$ 进行滤波,然后根据抽取率对经滤波处理后的数据流进行抽取处理,最终还原出并网电流值并送入逆变器控制算法。与此同时,3 个 Sinc^3_C 滤波器工作过程与 Sinc^3_D 滤波器类似,唯一不同之处在于 Sinc^3_C 滤波器以较低速率抽取同一调制数据流,以牺牲一定的采样精度换取低处理延时,从而达到快速检测并网电流的目的,当并网电流高于或低于设定的上下限电流值后, Sinc^3_C 滤波器向 ePWM(enhanced pulse width modulator)发出中断信号 $SDINT$, ePWM 立即停止运行,以保护逆变器。为了同步测量出逆变器每一相并网电流值,在每一个采样周期内, DSP 内的 cPWM11 模块向 Sinc^3_D 滤波器和 Sinc^3_C 滤波器提供同步时钟脉冲 $SYNCLK$,确保同步更新 A、B、C 三相并网电流测量值。 DSP 内的 eCAP(enhanced capture)模块为 $\Sigma\Delta$ 调制器提供频率为 f_M 的时钟信号。

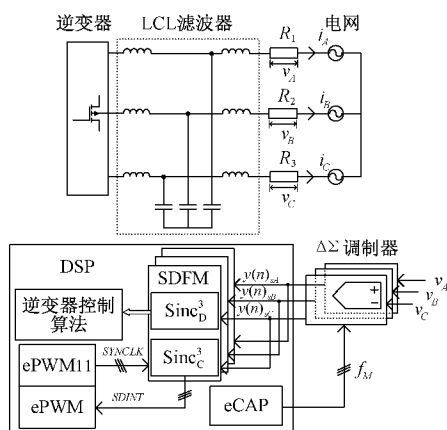


图1 三相逆变器并网电流测量原理

1.1 采集和调制电路设计

一阶 $\Sigma\Delta$ 调制器的结构如图2所示。其工作原理为输出脉冲序列 $y(n)$ 经过 1 位 DAC 转换为 $x(t)$ 后与输入模拟信号 $x(t)$ 相减得到误差信号 $e(t)$, 误差信号 $e(t)$ 送入积分器累加产生的 $I(t)$ 经 1 位 ADC 转换后,生成新的 1 位数据流 $y(n)$ 。 $y(n)$ 包含了输入信号的所有信息,在时间尺度上能够无限逼近模拟信号。

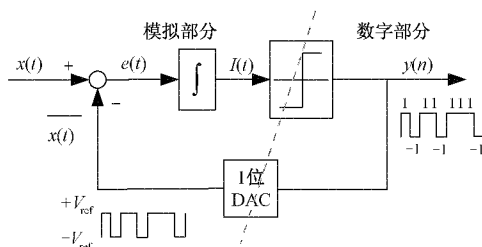


图2 一阶 $\Sigma\Delta$ 调制器的结构

为了达到更好的噪声抑制效果和提高有效位数,采用二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器^[11],如图3所示的二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器结构,由无延迟积分器和有延迟积分器组成,反馈信号同时反馈到两个积分器的前端,可推导得到调制器传递函数为:

$$Y(z) = \frac{1}{z}X(z) + \left(\frac{z-1}{z}\right)^2 E(z) \quad (1)$$

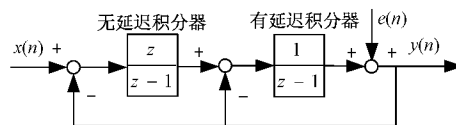


图3 二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器结构

以一额定功率为 5 kW 的并网逆变器为例,选取德州仪器公司的隔离式二阶 $\Sigma\Delta$ 调制器 AMC1306M05,该调制器的模拟差分输入范围 ± 50 mV,16 位分辨率,提供平均 5 000 V 的隔离电压保护,可以将输入的模拟信号转化为最高为 21 MHz 的数据流。根据所选调制器的额定差分输入电压范围,并降低电流采样电路的总功耗,选取额定功率为 4 W,阻值为 2 m Ω ,电阻精度为 1% 的取样电阻,以 A 相为例,并网电流采集电路如图4所示,将取样电阻采集到的电压信号 v_A ,经滤波电路和输入保护电路后送入 AMC1306M05 的模拟差分输入端 ΔINN 、 ΔINP , DSP 内 eCAP 产生的频率为 f_M 的调制时钟信号通过 CLKIN 引脚送入 $\Sigma\Delta$ 调制器内。调制数据流 $y(n)_{xA}$ 通过 $\Sigma\Delta$ 调制器的 DOUT,经 SD-D1 端进入 DSP 中的 Sinc^3 滤波器。

$\Sigma\Delta$ 调制器 AMC1306M05 根据输入的差分电压信号产生占空比不同的脉冲序列,差分输入信号 0 V 时,输出占空比为 50% 的脉冲序列;50 mV 差分输入时,可生成处于高电平状态占 89.06% 的由 0、1 组成的 1 位数据流, -50 mV 差分输入电压信号生成的脉冲信号高电平状态占比为 10.94%。差分输入电压信号与输出脉冲的占空比成线性比例关系,故所测得并网相电流值 I 与高电平状态

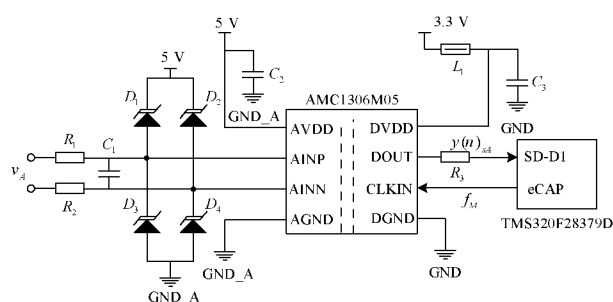


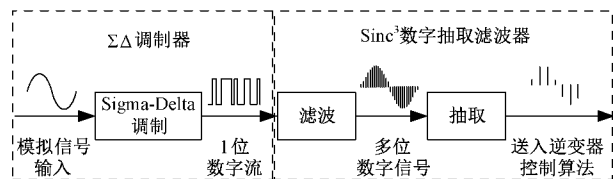
图4 并网电流信号采集电路

所占时间比 D 、取样电阻值 R 的关系式为:

$$I = 64 \times D - 16\,000 \times R \quad (2)$$

1.2 Sinc³ 滤波器设计

$\Sigma\Delta$ 调制输出的一位数字流转换成多位表示的数字信号,之后经抽取(降采样)处理将多位数字信号的更新速度降低以匹配并网逆变器的控制算法,最终实现滤除有用信号以外的噪声,也就是把调制器的高速低分辨率输出转化为高分辨率低速输出,最后达到数字化的效果^[12],基于 $\Sigma\Delta$ 调制技术的模数转换信号链如图5所示。

图5 基于 $\Sigma\Delta$ 调制技术的模数转换信号链

Sinc³ 滤波器的传递函数由如下公式表示:

$$H(z) = \left(\frac{1}{M} \cdot \frac{1 - z^{-M}}{1 - z^{-1}} \right)^3 \quad (3)$$

用 $e^{j\omega}$ 代替 z 后,其传递函数的频率响应函数为:

$$|H(e^{j\omega})| = \left(\frac{1}{M} \cdot \frac{\sin(\omega M/2)}{\sin(\omega/2)} \right)^3 \quad (4)$$

其中, M 为抽取速率, $\omega = 2\pi f/f_s$, f_s 为 $\Sigma\Delta$ 调制器的调制频率,通过上述式(3)和(4)可以得出测得的并网电流分辨率和更新速率取决于 Sinc³ 滤波器的抽取速率 M , Sinc³ 滤波器的延迟公式为:

$$T_d = \frac{\text{order} \cdot M}{f_M} \quad (5)$$

其中, order 为 Sinc 滤波器的阶数, M 为抽取率, f_M 为 $\Sigma\Delta$ 调制器输出 1 位数字流的速率,由于经抽取处理后的电流精度与滤波器延时存在置换关系^[13],即要获得的电流精度越高,需要花费的转换时间越长,若要求转换时间越短,电流精度则会降低,而经过 $\Sigma\Delta$ ADC 采样得到的并网电流值最终要用于电流控制环路算法中,所以 Sinc³ 滤波器不能耗费过长的转换时间,否则最终会造成反馈回路的延时过高,从而影响整个并网逆变器控制器的相位裕度,甚至导致系统不稳定^[14]。在使用闭环电流反馈中, Sinc³ 滤波器的抽取率必须在 85~210 的范围内实现 11~14 位的

ENOB 信噪比在 67~86 dB 之间,这是电流反馈所需的范围。所以在保证采样精度的情况下,抽取率确定为 100,确定 $\Sigma\Delta$ 调制器的时钟频率为 20 MHz,由式(5)可得设计的 Sinc³ 滤波器延时时间为 $T_d = 15 \mu\text{s}$,利用德州仪器公司提供的 Sinc³ 滤波器有效位计算器计算出相应的控制环路有效位数为 13.17,满足闭环电流控制中反馈电流精度的要求。

用于快速过流检测的 Sinc³ 滤波器相对于 Sinc³ 滤波器需要牺牲一定的精度换取低延时,以达到快速响应的目的,以并网逆变器主回路常用的 IGBT 开关管为例,其允许过流时间为 $5 \mu\text{s}$,为达到快速过流保护的日的,所以设计 Sinc³ 滤波器的延时时间 T_{dc} 为 $3 \mu\text{s}$,抽取率 M 为 20, $\Sigma\Delta$ 调制器的时钟频率为 20 MHz,实现 8.29 位的有效位数。

1.3 Sinc³ 滤波器 DSP 实现

TMS320F28379 DSP 中有 4 组 SDFM 模块且每组都有两个 Sinc³ 滤波器,可以分别配置为高精度电流采集使用的 Sinc³ 滤波器和用于快速过流检测的 Sinc³ 滤波器。 $\Sigma\Delta$ 调制器输出的数字流送入 SDFM 的 SD-Dx 端,先通过控制单元进行解码,之后将解码数据流送入 Sinc³ 滤波器进行滤波并按较高速率抽取,最终高精度输出逆变器并网电流值 $SDDATA$,为并网逆变器控制算法提供精确电流反馈信号。同时, Sinc³ 滤波器也会对来自相同的 $\Sigma\Delta$ 调制器输出的数字流进行滤波和按较低速率抽取,从而快速得到每一相并网电流值并与寄存器中设定的电流上下限值进行比较,当检测出并网电流值超出设定值后, COMPH 端或者 COMPH 端输出置高,并产生 CPU 级的中断触发信号作为 ePWM 中 Trip 模块的触发源, ePWM 立即关闭 PWM 输出,以保护逆变器开关管,最终实现实时监测并网电流并在故障情况下提供快速过流保护。

开关控制频率为 50 kHz,故每 $20 \mu\text{s}$ 进入中断服务函数更新采集并网电流值、运行控制算法、更新 PWM 占空比,由于进入中断服务函数后读取的并网电流值已经具有一定的延时,为了尽可能减小延时,提高控制环路的相位裕度,把中断函数放置距 PWM 占空比更新越近越好,而为了避免干扰将 SDFM 模块同步脉冲放置开关周期偏后部分,控制时序图如图6所示。

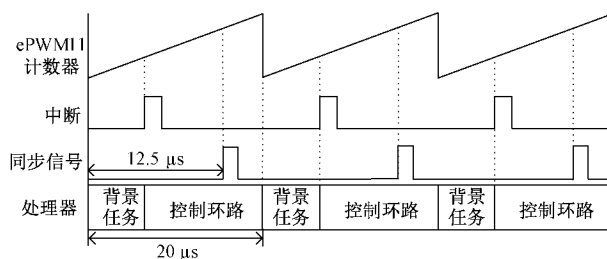


图6 控制时序图

在 CCS9.0.1 集成开发环境中完成 SDFM 模块中的 Sinc³、Sinc³ 滤波器功能的初始化、 $\Sigma\Delta$ 调制器时钟信号产

生、 Sinc^3 滤波器同步的程序设计。配置程序流程如图 7 所示,首先完成系统初始化,配置 eCAP 模块为 $\Sigma\Delta$ 调制器提供外部时钟,对于三相逆变器功率控制中常用的控制算法,都需要同步采集 A、B、C 三相电流值^[15],所以利用 DSP 内部的 ePWM11 模块产生同步脉冲信号为 A、B、C 三相的 SDFM 模块提供同步基准,之后按照上文设计的参数配置 Sinc_D^3 、 Sinc_C^3 滤波器的抽取速率并根据逆变器额定功率计算过流保护上下限值写入相应的寄存器中,最终完成配置程序的编写。

2 实验验证

选用 Keysight 86100D 示波器、Agilent 34410 数字万用表和 DSOX6004A 示波器搭建测试平台进行功能验证与测试,将 -50 、 0 、 50 mV 的模拟电压信号送入 $\Sigma\Delta$ 调制器 AMC1306M05 的差分输入接口对其进行 $\Sigma\Delta$ 调制,调制后分别得到占空比分别为 10.9% 、 50.0% 、 89.1% 的 20 MHz 高速 1 位数据流,如图 8~10 所示。

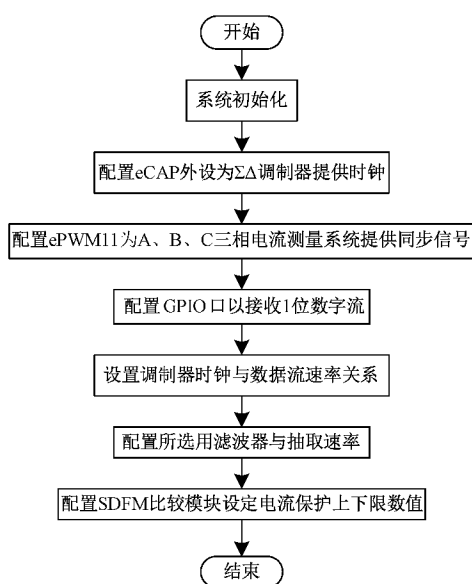


图 7 配置程序流程

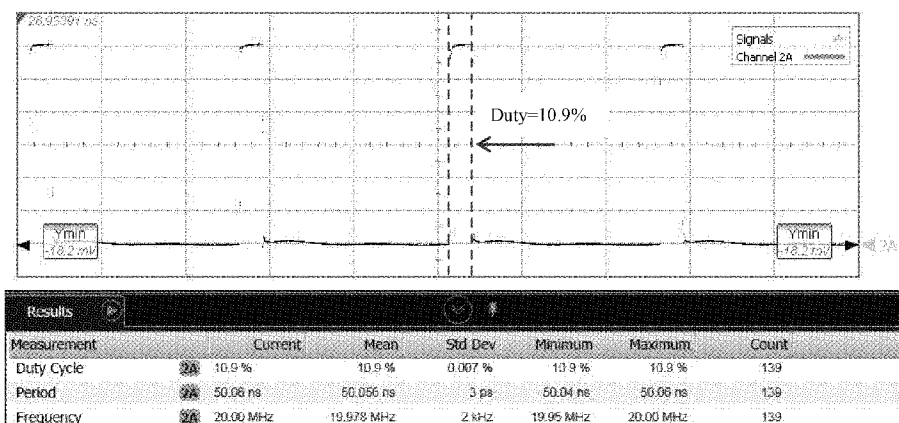


图 8 差分输入 -50 mV 调制器输出波形

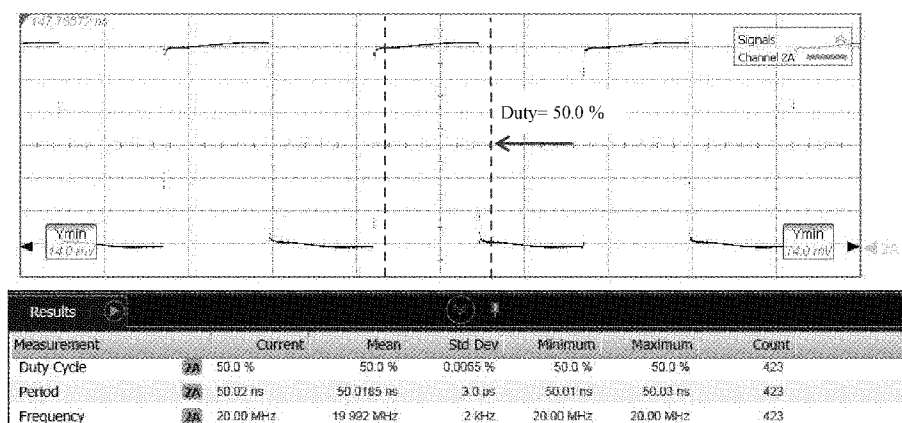


图 9 差分输入 0 mV 调制器输出波形

在 $-50 \sim 50$ mV 范围内选取若干典型模拟电压信号值,在 CCS9.0.1 中读取测量值,测试结果如表 1 所示,可得 ADC 最大测量误差为 0.013 mV,根据设计的 13 位有效

位数和最大满量程输入范围,计算出理论误差为 0.012 mV,基本满足设计要求。

验证过流保护的响应时间,设定上限电流值 10.7 A,

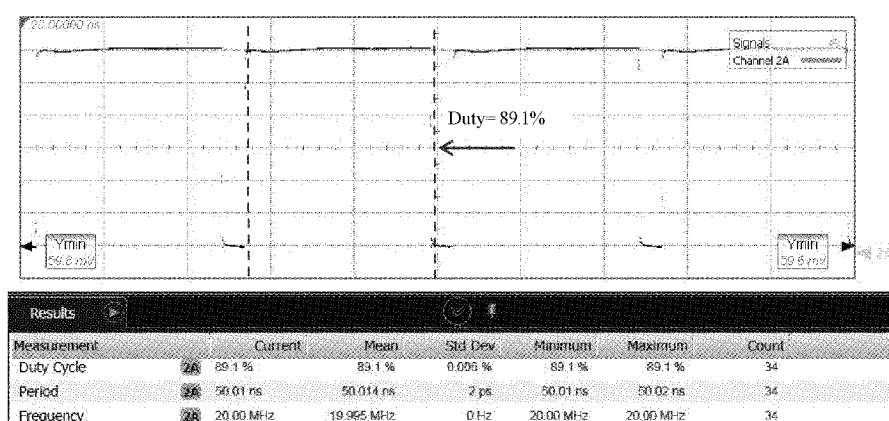
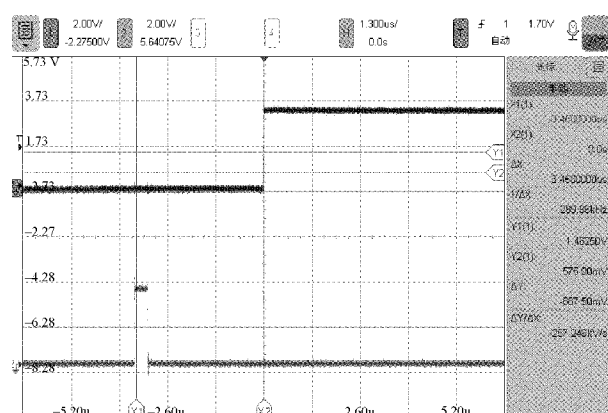


图10 差分输入50 mV调制器输出波形

表1 测试结果

输入电压值/ mV	实际测量值/ mV	占空比	误差/ mV
50.000	49.990	0.891	0.010
40.000	39.989	0.812	0.011
30.000	30.009	0.734	0.009
20.000	19.988	0.656	0.012
10.000	10.010	0.578	0.010
0.000	0.006	0.500	0.006
-10.000	-10.012	0.422	0.012
-20.000	-19.987	0.344	0.013
-30.000	-30.011	0.266	0.011
-40.000	-40.013	0.187	0.013
-50.000	-49.990	0.109	0.010

将模拟过流信号输入信号采集端,如图11中下方较细的曲线为过流模拟信号,ePWM接收 Sinc_c^3 滤波器产生的中断触发信号后,将输出电平置高,如图11中上方较粗的曲线为过流响应信号,通过示波器观测两脉冲的上升沿时间间隔为 $3.45\text{ }\mu\text{s}$,低于 $5\text{ }\mu\text{s}$ 。综上,说明本设计达到了预期目标。

图11 Sinc_c^3 滤波器响应延迟测试图

3 结 论

本文介绍了一种基于 $\Sigma\Delta$ 调制技术的逆变器并网电流高精度采集和快速过流检测方法,并对其主要部分的工作原理和硬件设计进行了详细论述。本设计采用了 $\Delta\text{MC1306M05}$ 实现了二阶 $\Sigma\Delta$ 调制,在DSP中利用 Sinc_b^3 滤波器和 Sinc_c^3 滤波器对同一调制数据流进行滤波后并按不同的抽取速率进行抽取处理,最终实现了逆变器并网电流的13位有效位数的高精度隔离采样和 $3.4\text{ }\mu\text{s}$ 的快速过流检测,满足了并网逆变器功率控制中电流的高精度反馈及其故障监测中实时电流检测的需求,测试结果证明了该方法的有效性和可行性,在工程应用中具有一定的参考和利用价值。

参考文献

- [1] 潘健,陈凤娇,刘孙德,等.一种并网逆变器电流双闭环改进控制策略[J].湖北工业大学学报,2021,36(1):31-35.
- [2] 季三飞,贺圆.单相并网逆变器的PI调节器参数设计[J].国外电子测量技术,2019,38(5):30-34.
- [3] 国家能源局.NB/T 32004-2013 光伏发电并网逆变器技术规范[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [4] 王霞霞,陈超波,高嵩.逆变器开关管故障诊断方法综述[J].计算机测量与控制,2019,27(8):1-6.
- [5] 彭丽维,张彼德,孔令瑜.级联H桥七电平逆变器故障的SKSNN-LPP特征提取方法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(2):110-116.
- [6] 唐圣学,王维威,马强,等.三电平逆变器IGBT器件接线故障在线诊断方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(11):19-30.
- [7] 梁桂林,沈汉林,罗欣,等. $\Sigma-\Delta$ 采样在电机控制中的应用研究[J].工业控制计算机,2018,31(8):142-144.
- [8] 徐国金,吴健,温家鹏,等.基于误差分析的电池组高精度测量系统的设计[J].仪器仪表学报,2013,34(9):1989-1997.

- [9] 黄巧峰,任勇峰,贾兴中. 基于 AD8495 和 Sigma-Delta 的多通道高精度数字测温设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(3):84-88.
- [10] 肖新帅,林晓焕,胡念祖,等. 多类型高精度测温系统设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(3):75-79.
- [11] 王伟. Sigma-Delta 调制技术的研究及其在逆变器中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
- [12] 辛挺战. Sigma-Delta ADC 中数字滤波器的研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [13] 梁学修,陈志,赵博,等. Delta-Sigma 调制器在电机电流高精度测量系统中的应用研究[J]. 机械设计与制造,2018(2):110-112.
- [14] 邹常跃,刘邦银,段善旭,等. 并网逆变器中数字控制延时对系统稳定性的影响及其优化设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):411-417.
- [15] 钟庆昌. 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术[M]. 北京:机械工业出版社,2016:224-241.

作者简介

梁文科,硕士研究生,主要研究方向为能馈电子负载并网技术。

E-mail:165862941@qq.com

苏淑靖(通信作者),博士,教授,主要研究方向为感知与探测、信号处理。

E-mail:1015645377@qq.com