

基于 TMS320F28335 的逆变器重复控制系统设计

生 龙¹, 何顺华²

(1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆维吾尔自治区 克拉玛依 834000;
2. 南京航空航天大学自动化学学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对工业中重复控制在逆变器系统应用困难的问题, 本文详细研究了逆变器重复控制器的参数设计和重复控制器的软件实现。根据逆变器稳定性和稳态误差的要求, 设计了补偿环节的陷波器、低通滤波器和超前补偿, 设计了基于 TMS320F28335 的逆变器控制系统硬件平台, 并详细地阐述了重复控制器各个环节的软件实现。所搭建的逆变器实物平台验证了本系统设计方案的有效性。

关键词: TMS320F28335 芯片; 逆变器; 重复控制; 软件实现

DOI: 10.12067/ATEEE1811004 **文章编号:** 1003-3076(2019)12-0034-06 **中图分类号:** TM464

1 引言

逆变器是一种重要的电力变换装置, 在自动控制 and 电力电子等多个领域得到了广泛的应用^[1-3]。随着发电和用电设备的不断发展, 对逆变器的性能、安全性和可靠性等方面的要求越来越高。传统逆变器采用模拟控制的方案, 使用分离元件且无法实现复杂的算法, 难以满足当前高精度、集成化、安全可靠的需求, 而数字控制的引入则很好地弥补了这些缺点^[4]。

逆变器电压的数字控制采用的控制算法有很多, 其中 PID(PI) 控制是被使用最广泛的, 但是其采用的内模就无法做到无静差控制, 无法满足逆变器周期信号情况的高精度要求^[5]。基于内模原理设计的重复控制, 能够做到对基波的无静差跟踪和对谐波的有效抑制^[6]。不少学者对重复控制的参数设计进行相关研究, 使得重复控制可以得到较高的稳定裕度和很好的控制效果^[7-9]。但是它们为了提高重复控制的稳定性和控制效果加入了滤波器和陷波器, 这使得重复控制的软件实现较为复杂, 不利于工程人员实现。而关于重复控制的软件实现到目前为止鲜有相关的阐述。

为了实现对逆变器电压的数字重复控制, 本文

基于 TI 公司推出的 TMS320F28335 高性能 DSP 芯片, 设计了一套逆变器控制系统, 给出了重复控制参数选取依据, 并且详细地阐述了其软硬件实现过程。

2 系统总体架构

系统结构如图 1 所示, 整个逆变器控制系统由 DSP 控制器、全桥逆变电路、LC 滤波电路、负载、电源、智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM) 驱动模块、信号检测电路等组成。

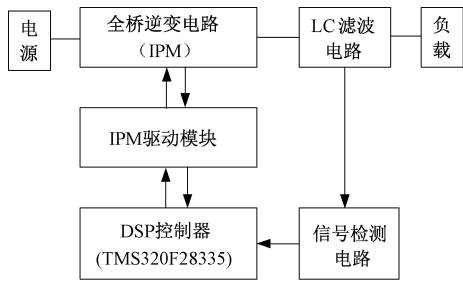


图 1 基于 TMS320F28335 的逆变器控制系统
Fig. 1 Inverter control system based on TMS320F28335

整个系统为单相独立逆变器控制系统, 负载可以为阻性负载、空载或者整流性负载。通过数学建模, 系统可以简单等效为一个二阶系统, 具体传递函数为:

收稿日期: 2018-11-02
基金项目: 中国石油大学(北京)克拉玛依校区科研启动基金(RCYJ2018A02-001)
作者简介: 生 龙(1981-), 男, 江苏籍, 副教授, 博士, 研究方向为迭代学习控制, 半物理仿真;
何顺华(1994-), 男, 安徽籍, 硕士研究生, 研究方向为逆变器控制。

$$\frac{U_o(s)}{U_c(s)} = \frac{R}{LCRs^2 + (rCR + L)s + R + r} \quad (1)$$

式中, R 为负载等效电阻的阻值; L 为滤波电感的感值; r 为滤波电感的寄生电阻; C 为滤波电容的容值。

3 逆变器重复控制

独立逆变器的输出为电压信号,其给定信号为正弦信号,由内模原理可知,常用的 PID 控制器无法很好地跟随正弦信号,不能做到无静差跟踪。基于内模原理,为了跟踪正弦信号,需要引入正弦信号对应的内模,这也就是谐振控制的理论依据。但是独立逆变器的死区和干扰带来的多次谐波问题,需要引入多个谐振项,这往往导致系统稳定性设计复杂且不易实现。根据文献[7]的分析,重复控制的正反馈延时环节可以认为是无数谐振项的叠加,可以很好地跟踪正弦信号并抑制谐波信号。

典型的 LC 滤波的逆变器重复控制器的结构如图 2 所示,由重复控制内模(正反馈延时环节),重复控制增益 K ,超前补偿环节 z^m ,陷波器 $S_1(z)$ 和低通滤波器 $S_2(z)$ 组成。

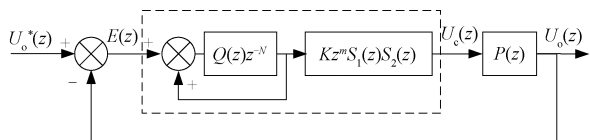


图 2 重复控制结构图

Fig. 2 Block diagram of repetitive control

整个重复控制器的传递函数为:

$$\frac{U_c(z)}{E(z)} = \frac{Q(z)z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}} K z^m S_1(z) S_2(z) \quad (2)$$

按照传统重复控制设计^[8], $Q(z)$ 可以取低通滤波器或者是小于 1 的正常数,一般可以取 $Q(z) = 0.95$ 。重复控制增益 K 反映重复控制的作用大小,取值越大,动态响应越快,但是会减小稳定裕度,一般折中取 $K=1$ 。此外陷波器 $S_1(z)$ 用于抑制对象谐振峰:

$$S_1(z) = \frac{z^l + 2 + z^{-l}}{4} \quad (3)$$

式中, l 根据关系 $l=f_s/(2f_r)$ 来确定, f_s 为控制频率, f_r 为谐振频率。 $S_2(z)$ 为数字低通滤波器,用于滤除高频噪声,可以通过二阶低通滤波器离散化得到,二阶低通滤波器如下。

$$S_2(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中, ξ 为阻尼系数; ω_n 为带宽大小,要包含逆变器输出的主要谐振频率,根据文献[9]可取 $\xi=1$, $\omega_n=4084\text{rad/s}$ 。超前拍次 m 根据理想特性式(5)得到大致搜索范围,具体 m 的最佳参数需要在试验中进行调试。较好的超前拍次可以使得 Q 取得接近于 1 的值,而重复控制的性能主要取决于 Q 。

$$\theta(e^{j\omega T}) + m\omega T = 0 \quad (5)$$

4 硬件设计

4.1 TMS320F28335

TMS320F28335 是 TI 公司推出的一款高性能浮点型的数字信号处理器,具有丰富的片内资源和强大的运算功能^[10]。其高性能 HRPWM 输出非常适合逆变器控制,大容量的 ROM 能够很好地满足重复控制所需要的大量存储单元的要求。

TMS320F28335 作为整个系统的数据处理核心,将来自信号检测模块得到的电压、电流信号使用重复控制算法进行处理,将输出的结果以 PWM 的形式输出给 IPM 驱动模块。同时, DSP 处理芯片还会根据过压过流等异常情况进行相应的保护措施。根据 TI 官方提供的 datasheet 可以设计其最小系统的电路。

4.2 IPM 驱动模块

逆变器的主要部分是由 IPM 组成, IPM 在完成逆变桥驱动的同时,能够起到检测与保护的功能。而为了有效和安全地控制 IPM,需要在控制端进行相应的电气隔离以及安全保护设计。IPM 驱动模块主要是由一块 CPLD 和光耦隔离电路组成。CPLD 一方面将来自 DSP 的 PWM 信号和数字控制信号进行处理,给 PWM 信号插入死区,另一方面处理来自 IPM 的故障信号,防止 IPM 损坏。光耦隔离将来自 CPLD 的高频(10kHz)驱动信号进行电气隔离,给 IPM 提供驱动信号。

IPM 虽然自带保护电路,能够有效防止逆变器发生故障,但是其自身不具备自我保护的能力,所以 CPLD 接受来自 IPM 的故障信号,一旦 IPM 出现故障就立即封锁 PWM 信号的输出来保护 IPM。

4.3 信号检测电路

信号检测电路主要检测和调理逆变器输出电流、电压以及直流电源电压,输出合适的模拟信号供 AD7606 进行采样,采样结果以数字信号的形式提供给 DSP 使用。

信号检测电路如图 3 所示,电压和电流信号都

是使用霍尔器件进行获取,然后对信号进行比例运算,使得其大小正好落入 AD7606 的±10V 的采样范围内。再通过滤波电路滤除信号中的高频噪声,最后 AD7606 芯片对信号进行采样,转换为数字信号提供给 DSP 芯片。

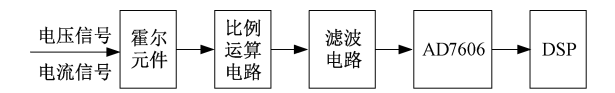


图 3 信号检测电路

Fig. 3 Signal detecting circuit

5 软件实现

系统总体的程序流程图如图 4 所示,系统完成初始化后,在每个控制周期开始后依次进行信号采样、控制算法运算以及控制量更新等工作。程序的控制周期通过定时器来触发开始,而 DSP 芯片 TMS320F28335 的高性能运算能力能够保证正常情况下程序能够在一个控制周期内完成相应操作。为了保证故障处理的快速响应特性,系统的保护措施设置在中断程序中。

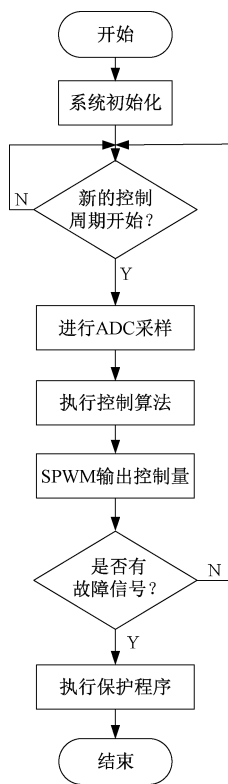


图 4 软件主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of main functions

重复控制算法的具体实现流程图如图 5 所示。

其中的 z^{-l} 运算通过建立对应变数数组来存储 J 拍前的信息的方式实现。

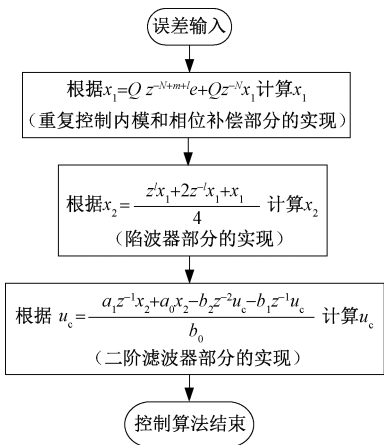


图 5 重复控制算法实现流程图

Fig. 5 Flow chart of repetitive control algorithm

5.1 重复控制内模和超前环节的实现

重复控制内模和超前环节的传递函数可以表示为:

$$\frac{x_1}{e} = \frac{Qz^{-N+m+l}}{1 - Qz^{-N}} \tag{6}$$

所以当前时刻的 x_1 可以通过式(7)确定:

$$x_1 = Qz^{-N+m+l}e + Qz^{-N}x_1 \tag{7}$$

即当前时刻 x_1 等于 Q 倍 $(N-m-l)$ 个控制周期前误差 e 加上 Q 倍 N 个周期前的状态量 x_1 。需在程序中开辟一个长度为 $(N-m-l+1)$ 的数组存储误差 e ,开辟一个长度为 $(N+1)$ 的队列数组存储状态量 x_1 。

5.2 陷波器 $S_1(z)$ 的实现

陷波器 $S_1(z)$ 的传递函数见式(3),为了能够物理实现,提出 z^l 放入内模和超前环节实现,所以陷波器的输出 x_2 与输入 x_1 的关系可以表示为:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{z^{-2l} + 2z^{-l} + 1}{4} \tag{8}$$

则 x_2 可以通过式(9)确定:

$$x_2 = \frac{z^{-2l}x_1 + 2z^{-l}x_1 + x_1}{4} \tag{9}$$

不需要额外开辟数组来存储 x_1 信息,因为在重复控制内模和超前环节的实现过程中已经建立了长度为 N (大于 $2l$) 的数组来存储 x_1 。

5.3 滤波器 $S_2(z)$ 的实现

一个二阶滤波器一般离散形式如式(10)所示:

$$\frac{u_c}{x_2} = \frac{a_1z^{-1} + a_0}{b_2z^{-2} + b_1z^{-1} + b_0} \tag{10}$$

式中, a_1 、 a_0 是分子一次项和常数项的系数; b_2 、 b_1 、 b_0 依次是分母二次项、一次项和常数项的系数。则 u_c 可以表示为:

$$u_c = \frac{a_1 z^{-1} x_2 + a_0 x_2 - b_2 z^{-2} u_c - b_1 z^{-1} u_c}{b_0} \quad (11)$$

这里需要开辟一个长度为 2 的队列数组来存储 x_2 和一个长度为 3 的队列数组来存储 u_c 。

6 实验

为了验证本文介绍的逆变器重复控制系统的参数设计和软件实现的有效性,按照图 1 的总体架构和第 4 节中硬件设计内容,搭建基于 TMS320F28335 的逆变器重复控制系统,并进行了相关实验。实物系统的参数如表 1 所示。

表 1 逆变器系统参数

Tab. 1 Main parameters of inverter system

参数	数值
直流源电压 E_d/V	100
滤波电感 L/mH	3.87
滤波电感等效电阻 r/Ω	1.2
滤波电容 $C/\mu F$	15
负载 R/Ω	100
死区时间 $T_d/\mu s$	3.2
采样时间 $T_{s_control}/\mu s$	100
参考电压幅值 Amp/V	80
参考电压频率 f/Hz	50
整流性负载电容 $C_z/\mu F$	4700
整流性负载电感 L_z/mH	3.8
流性负载电阻 R_z/Ω	100

图 6 是独立逆变器系统在整流性负载情况下开环控制的输出电压波形和电流波形。其中输出电压的总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 为 8.63 %,有较大波形畸变,说明在不引入反馈情况下,开环控制在面对非线性负载不能起到良好的控制效果。图 7 是在整流性负载情况下系统开环输出波形的 FFT 分析,可以看到在 15 次以下的奇数次谐波含量都很大,表明整流性负载给系统带来很大的谐波干扰。

图 8 是重复控制的输出电压波形和电流波形。其中输出电压的 THD 仅为 1.97 %,表明重复控制确实很好地抑制了谐波信号。图 9 是整流性负载情况下重复控制系统输出电压波形的 FFT 分析结果。可以看到除了 13 次谐波外,各次谐波都小于 1 %,表明重复控制算法很好地控制了逆变器输出。

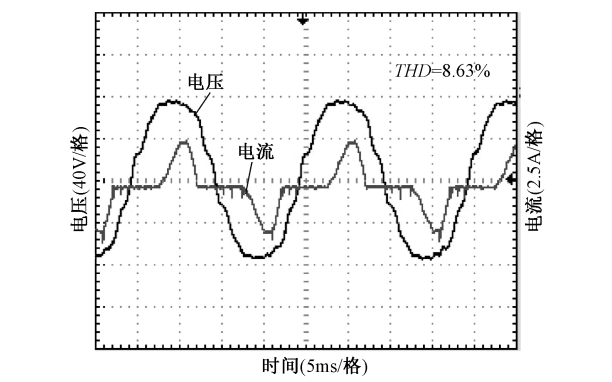


图 6 带整流性负载系统开环输出波形

Fig. 6 Output waveform with open loop under rectifier load

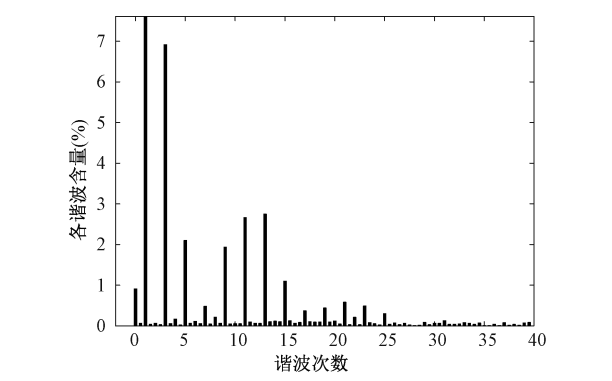


图 7 带整流性负载系统开环输出电压 FFT 分析

Fig. 7 Spectrum of output voltage with open loop under rectifier load

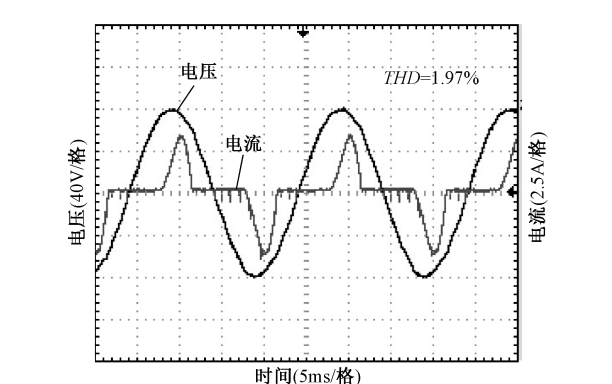


图 8 带整流性负载重复控制系统输出波形

Fig. 8 Output waveform with RC under rectifier load

为对比验证本文介绍的重复控制算法及其实现的有效性,在空载、阻性负载 (负载电阻 $R = 100 \Omega$) 和整流性负载情况分别做了重复控制和 PID 算法的实验。其中 PID 控制参数根据文献 [11] 中介绍的模值优化法,取 $k_p = 0.054$, $k_i = 3000$, $k_d = 0.00017$ 。图 10 是 PID 控制和重复控制在不同负载情况下的输出电压的 THD 对比,图 11 是相应的误

差有效值对比。图 10 表明重复控制在不同情况相对于 PID 控制都能取得较好的谐波抑制效果,能够得到很高质量的波形,特别是在整流性负载情况下。图 11 从误差有效值的角度验证了重复控制相对于 PID 控制有更良好的跟踪性能。

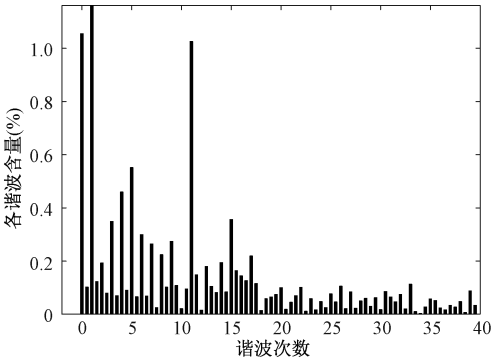


图 9 带整流性负载重复控制系统
输出波形 FFT 分析

Fig. 9 Spectrum of output voltage with RC
under rectifier load

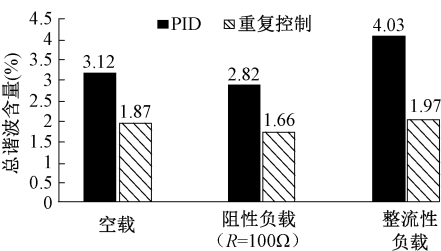


图 10 不同负载下 PID 控制和重复控制的总谐波含量

Fig. 10 Total harmonic distortions with PI control and
RC under different loads

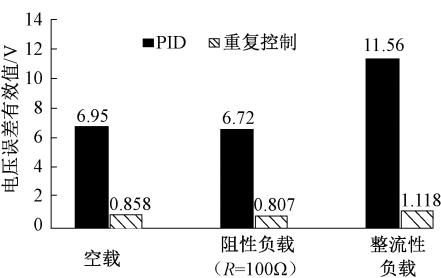


图 11 不同负载下 PID 控制和重复控制的
电压误差有效值

Fig. 11 RMS of voltage error with PI control and
RC under different loads

7 结论

本文基于 TMS320F28355 建立了逆变器控制硬

件系统,设计了重复控制参数,研究了重复控制软件实现。一系列的对比实验表明,按照本文中重复控制设计和实现,控制系统在不同负载情况下均能很好地控制逆变器输出,有效地抑制输出的奇次谐波,大幅度减小输出误差。本文研究的一整套重复控制参数设计和软硬件实现可供工程人员借鉴,减小逆变器重复控制器实际应用的难度。

参考文献 (References):

[1] 张阳, 黄守道 (Zhang Yang, Huang Shoudao). 基于 Z 源逆变器的直驱永磁风力发电并网控制 (Control strategy of three-phase Z-source grid-connected inverter for direct-drive wind generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 14-18.

[2] 吴杰, 赵丽霞, 赵凡凡, 等 (Wu Jie, Zhao Lixia, Zhao Fanfan, et al.). 一种改善三相不平衡下逆变器并网系统电能质量的新方法 (A new method to improve power quality of inverter grid system under three-phase unbalance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 8-13.

[3] 谷鑫, 姜勃, 耿强, 等 (Gu Xin, Jiang Bo, Geng Qiang, et al.). 双永磁同步电机五桥臂变换器模型预测控制 (Model predictive control for two permanent magnet synchronous motors with five-leg voltage source inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 25-30.

[4] 朱文杰, 王鑫, 林旭梅 (Zhu Wenjie, Wang Xin, Lin Xumei). 采用 FPGA 的重复控制三相逆变器 (FPGA based three-phase inverter with repetitive control) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical and Energy Management Technology), 2018, (16): 55-59.

[5] Zhang K, Kang Y, Xiong J, et al. Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (3): 784-792.

[6] 彭力 (Peng Li). 基于状态空间理论的 PWM 逆变电源控制技术研究 (Research on control technique for PWM inverters based on state-space theory) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2004.

[7] Zhao Q, Ye Y. A PIMR-type repetitive control for a grid-tied inverter: structure, analysis, and design [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (3): 2730-2739.

[8] Ye Y, Xu G, Wu Y, et al. Optimized switching repetitive control of CVCf PWM inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (7): 6238-6247.

[9] 张浩 (Zhang Hao). 逆变器分数阶重复控制研究及实验 (Research on fractional order repetitive control for inverter with experiments) [D]. 南京: 南京航空航天大学 (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics), 2013.

[10] 宋莹, 高强, 徐殿国, 等 (Song Ying, Gao Qiang, Xu Dianguo, et al.). 新型浮点型 DSP 芯片 TMS320F283xx (A new floating-point DSP chip TMS320F283xx) [J]. 微处理器 (Microprocessors), 2010, 31 (1): 20-22, 26.

[11] 汤赐 (Tang Ci). 基于 LCL 输出滤波器的并网逆变器四种 PI 控制器设计方法 (Four design methods for proportional-integral controller of grid-connected inverter with LCL output filter) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (11): 3268-3275.

Design of inverter repetitive control system based on TMS320F28335

SHENG Long¹, HE Shun-hua²

- (1. College of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China;
2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In view of the difficult industrial application of repetitive controller to inverter, this paper studies the repetitive controller design and the software implementation of repetitive controller. The notch filter, the low pass filter and phase lead compensator are designed respectively to meet the requirement of the inverter stability and the steady error. In this paper, an inverter repetitive controller system is built based on TMS320F28335 chip. And the software implementation of all parts of repetitive controller is elaborated. A series of experiments about the inverter repetitive control system verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: TMS320F28335 chip; inverter; repetitive control; software implementation