

文章编号:1005—7277(2017)01—0008—07

基于 DSP28335 和双 ARM 的太阳能 光伏逆变器控制器的设计*

杨清波, 欧阳森, 曾 江, 杨 林

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 设计了一种基于数字信号处理器 28335(DSP28335)和双 ARM 为核心的太阳能光伏逆变器控制系统。详细地对该控制器各处理器的功能、硬件系统架构、核心硬件电路进行了介绍和分析,并基于设计的硬件系统对 DSP28335 的程序、系统控制以及 ARM 的程序进行设计。最后将其应用在试制的 10kW 光伏逆变器上进行实验,验证了该设计控制器的可行性。

关键词: DSP28335; 双 ARM; 光伏逆变器; 控制器

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Design of a solar photovoltaic inverter controller based on DSP28335 and dual ARM

YANG Qing-bo, OUYANG Sen, ZENG Jiang, YANG Lin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The control system of the solar PV inverter based on digital signal processor 28335 (DSP28335) and dual ARM is presented. The controller functions, the hardware structure and the key hardware circuits are introduced in detail. Based on the hardware system, the DSP28335 programmes, the system control and the ARM programmes are designed. The feasibility of the designed controller is also verified by carrying the experiments on 10kW PV inverter.

Key words: DSP 28335; dual ARM; photovoltaic inverter; controller

1 引言

光伏发电的应用日益普遍^[1-3]。光伏并网逆变器的控制器是光伏设备中的核心部件之一,其硬件性能、软件设计与系统控制直接影响光伏逆变器的功能和稳定性。

目前,光伏逆变器控制器的设计基本上采用 DSP、ARM、FPGA 以及它们的组合来实现^[4-13]。文献^[4]采用基于 ARM 为核心的逆变器显控系统,但 ARM 的开发成本高,特别是实时性控制不方便;文献^[5,6]采用单 DSP 设计的控制器,受限于 DSP 性能,稍微复杂的控制策略就很难兼顾实时性与性能;文献^[7-9]设计的 DSP+FPGA 逆变器控制器使得硬件电路的逻辑设计可以像软件一样编程实

现,但 FPGA 的设计、调试要比 MCU 复杂的多;文献^[10,11]采用“DSP+单 ARM”架构的系统设计,DSP 用于控制,ARM 用于系统数据显示,可以实现人机交互,但这种结构在应对日益复杂的信息处理、通信等情景会存在资源不足的问题。为此,考虑到当前的光伏逆变器要保证控制周期延长和控制精度的实现,也要同时兼顾运算、输出控制、故障检测、通信等功能要求,本文拟采用“DSP28335+双 ARM”的硬件架构设计光伏逆变器控制系统,以 DSP28335 为主控制芯片,其中一块 ARM 为辅助芯片,另一块 ARM 供显示用。该光伏逆变器硬件系统设计体系通用性强,便于移植,具有研发周期短、成本较低,避免重复设计、扩展功能较强和软硬件升级方便等优点。

* 项目名称:广东省自然科学基金项目(2016A030313476)

2 DSP+双 ARM 的控制器硬件系统设计

2.1 控制器结构设计

图 1 所示为本文设计的控制器结构框图。

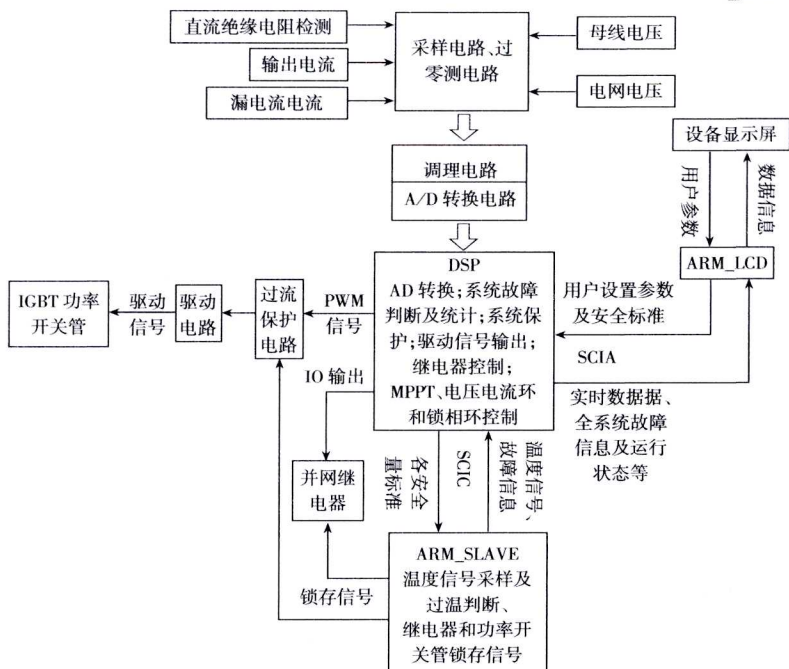


图 1 逆变器控制器结构框图

DSP 选用 TMS320F28335 芯片,ARM 是基于 Cortex-M3 内核的 LPC1768 嵌入式微控制器。

光伏逆变器控制器的功能主要包括数据采集、电压电流环控制、锁相环控制、显示通信等。DSP28335 是 28XX 中的高端芯片,将其作为主控芯片,既可以保证系统数据处理速度和控制精度,且其又具有足够的存储空间,能输出 18 路驱动信号,满足三电平光伏逆变器设计的需要,避免了双 DSP 设计造成的资源浪费、底层电路设计困难等问题。此外,设计两片 ARM 作为辅助芯片(简称 ARM_SLAVE),其中一片作为安全控制辅助,另一片则进行人机交互与通信。

DSP 主要实现 6 个功能:①数据采集和转换;②驱动信号输出,控制功率开关管的导通和关断;③故障判断和保护,把实时检测的数据与硬件保护或显示屏设置的安全值进行比较,如有异常,设备将

进入保护程序或立即停机;④MPPT、电压电流环和锁相环的控制;⑤统计系统实时数据、故障和运行状态等数据信息,并通过 SCIA 通信口传送给 ARM_LCD,在人机交互界面显示,同时接收人机界面设置的用户参数和安全标准;⑥控制输出并网继电器的开关信号。

ARM_SLAVE 辅助 DSP 信号检测、故障判断和输出控制信号。ARM_SLAVE 通过 SCIA 从 DSP 获取各电气量安全标准,检测设备的环境和 IGBT 模块温度,并进行越限判断,将检测后的信息传送给 DSP,温度异常时直接封锁 DSP 输出的并网继电器开关信号和驱动信号。

ARM_LCD 负责人机交互。用户通过显示屏设置运行参数和安全标准,同时接收 DSP 发送的实时数据、运行状态、故障信息,在显示屏上显示。

2.2 光伏逆变器主电路设计

图 2 所示为本文设计的双级式太阳能光伏逆变器控制器的拓扑结构图。其中, L_1 为 0.74mH , C 为 $6.6\mu\text{F}$, L_2 为 $55\mu\text{H}$, 电感 L_3 为 0.86mH , V_{a0} 、 V_{b0} 、 V_{c0} 为逆变器输出相电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器并网电流, V_a 、 V_b 、 V_c 为电网电压。逆变器直流输入端接入光伏组件,当输入电压较低时,经

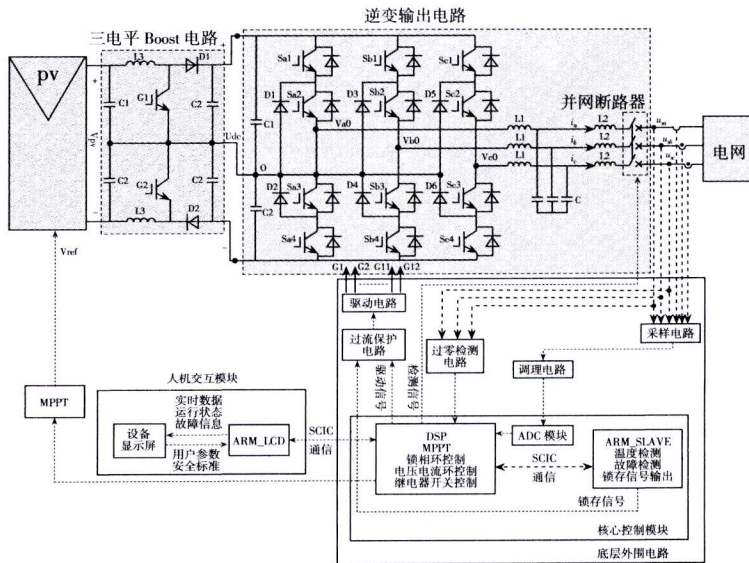


图 2 太阳能光伏逆变器拓扑结构图

过三电平 Boost 电路直流升压,以满足并网要求。后级为二极管中点钳位型三电平逆变电路,将直流电压变换为交流量,经过 LCL 型低通滤波器后实现光伏逆变器并网,给电网输送电能。

3 核心硬件电路模块的设计

核心硬件电路主要包括电流调理电路、驱动电路、电流保护电路、过零检测电路等 4 个模块,下面分别对设计的硬件电路模块分别进行详细介绍分析。

3.1 电流调理电路

图3所示为通过电流传感器 4640-X400 测量的逆变器并网电流,比例系数为 1:1000,在传感器输出侧通过 100Ω 的电阻上形成与原电流信号成比例的正弦小电压信号,为了稳压,在输出端通过电阻分别接入运算放大器 UM721A。由于三相并网电流采用相同的采集电路,通过比较三相并网电流前级运放输出端 I_{out} 值的大小,得到三相并网电流最大最小值 $I_{gridMAX}$ 和 $I_{gridMIN}$, I_{out} 与 1.5V 的直流偏置电压作为后级运放加法器的同相输入端,由于所设计的逆变器输出交流电流有效值为 15.15A,峰值在 -21.43A 至 +21.43A 之间,经计算调理后的电流信号在 0.071V~2.928V 之间,满足 DSP 信号输入要求。

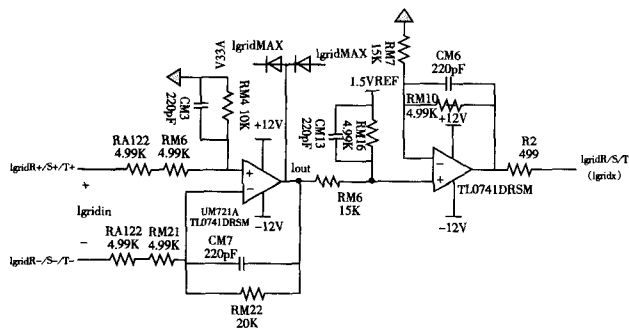


图3 电流调理电路图

3.2 驱动电路

DSP 输出的驱动信号由于电压低、功率小,无法直接驱动功率开关管,必须经过驱动电路,才可以实现功率开关管的导通和关断,驱动电路的作用是完成

控制信号的转换和电气隔离。驱动电路原理如图 4 所示,驱动电路的输入信号 Drive_A 和 Drive_K 由 DSP 产生,输出信号为 Drive_G 和 Drive_S。TLP350 为光耦驱动,开关频率可达 50kHz,内部集成了发光二极管、光电二极管和两个 MOSFET, V_{cc} 外部接入电源。当 DSP 输出使得 Drive_A 和 Drive_K 为低电平时,发光二极管和光电二极管均不导通, Drive_G 和 Drive_S 输出反向电压作用于功率开关管,开关管不导通;当 Drive_A 为高电平, Drive_K 为低电平时,发光二极管和光电二极管均导通, Drive_G 和 Drive_S 输出正向电压,开关管导通。

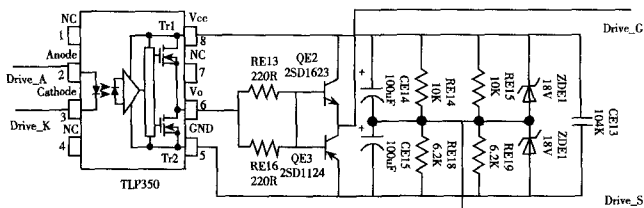


图4 驱动电路图

3.3 电流保护电路

设备运行时具有最大输出电流限制,电流过大,会导致器件乃至设备烧坏,危及操作人员安全。图 5 所示为过流检测电路,输入信号 $I_{gridMAX}$ 为图 3 检测的电流最大值,通过电阻把电流信号变为电压信号,经过电压跟随器 DM11,把输出信号输入比较电路,与 2.5V 直流基准电压进行比较,正常情况下,反相器输出信号 SOCP 为高电平;当电流异常时,转换后的电压值将大于 2.5V, SOCP 输出低电平,三极管 QM2 导通, OUTOCP 为高电平,同时将输出端信号 SOCP 送给 DSP。当任一相输出电流发生过流故障时, DSP 检测到高电平,将标志故障位置位,系统根据故障标志位信息控制逆变器运行状态;输出信号 OUTOCP 经过分频输出两

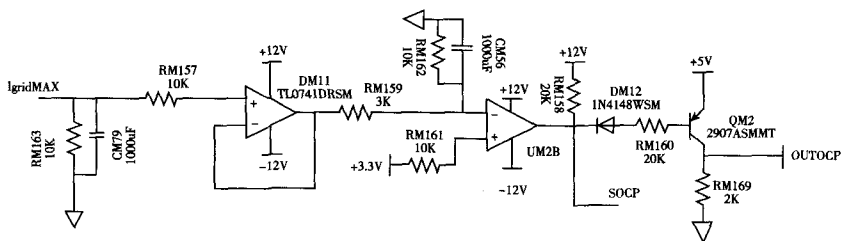


图5 过流检测电路图

个控制信号 OUTOCP1-OFF 和 OUTOCP2-OFF, 分别接在不同缓冲芯片 74VC541AW 的 OE2 引脚上, OE1 接入 ARM_SLAVE 的输出信号 S_INV_OFF, 逆变器电路每相功率开关管 3, 2 和 4, 1 的驱动信号分别接入不同的缓冲芯片, 图 6 所示为其中一块缓冲芯片引脚连接情况。由于缓冲芯片的引脚 OE2 和 OE1 均为低电平有效, 当发生过流和 IGBT 模块温度过高时, OE1 和均将输入高电平的控制信号, 使缓冲芯片快速封锁逆变电路功率开关管的驱动信号, 避免设备因过流故障而损坏。

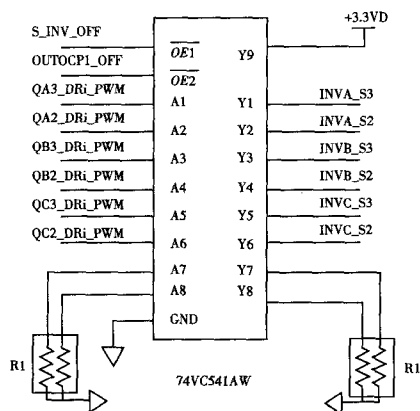


图 6 过流保护电路图

3.4 过零检测电路

为检测电网电压的过零点, 需要将正弦交流电网电压信号转换成脉冲方波信号, 输入到 DSP 的引脚, DSP 以 20kHz 的中断频率检测该引脚的电平。图 7 所示为过零检测电路, 输出端 M_Vgrid_ZERO 接入 DSP, 由图可知, 后级运放的反相输入端电压 $V_{o1} = 1.5 + 0.0036V_{gridin}$, 与正相端的 1.5V 参考电压比较, 当输入电压 V_{gridin} 位于正半周时, DSP 检测到低电平; 否则, 为高电平, 过零检测电路用在锁相环控制中。

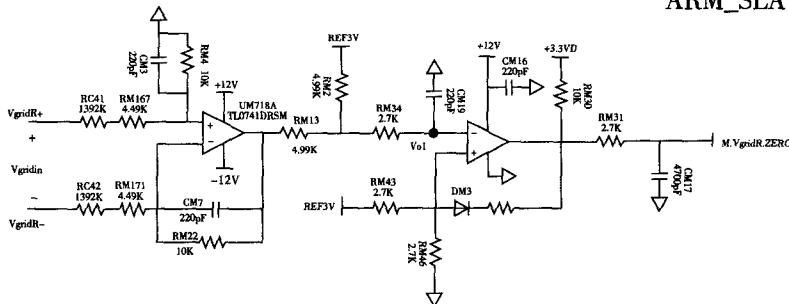


图 7 过零检测电路图

4 DSP 和双 ARM 的主要程序设计和系统控制

4.1 DSP 程序设计和系统控制

4.1.1 程序框架

图 8 所示为 DSP 的程序设计图。其中, 系统初始化是指 DSP 初始化看门狗、锁相环、使能各模块时钟、外部中断扩展模块 PIE、中断向量表、GPIO 口、SCI 通信模块、ADC 模块、EPWM 模块、ECAP 模块、CPU 定时器等。DSP 先通过 SCIA 通信口读取显示屏上设置的用户参数和安全量运行标准, 并将相关参数通过 SCIC 通信口传送给 ARM_SLAVE, 然后进入等待状态, DSP 以 20kHz 的频率对输入、输出、电压、电流进行采样, 系统根据实时采样的数据判断是否发生过压、过流等故障; 如果系统各参数满足安全运行标准, 设备进入检测状态, 并判断并网漏电流和光伏电池板的绝缘电阻是否满足要求, 在两者数值均正常时, 通过 Boost 电路把母线电压升高到指令电压值, 并检测逆变器并网继电器是否能正常开通关断; 如果继电器没有故障, DSP 控制继电器合闸, 系统进入正常运行状态, 执行 MPPT、锁相环和电压电流环控制程序, DSP 输出驱动信号控制开关管动作。在系统正常运行过程中, 实时检测系统的运行状态, DSP 通过 SCIC 接收 ARM_SLAVE 的

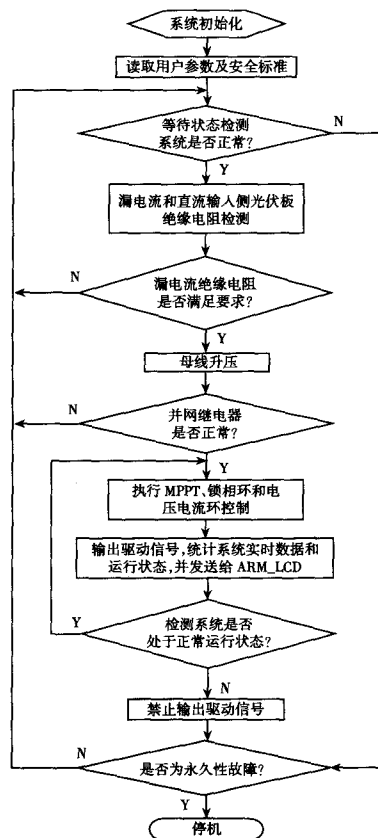


图 8 DSP 程序设计

采样数据、运行状态,并统计系统的实时数据和运行状态,通过 SCIA 发送给 ARM_LCD,用户可通过设备显示屏观察实时数据。当系统出现故障时,DSP 禁止驱动信号输出。若为永久性故障,系统立即停机;否则,重新进入等待状态,判断系统故障是否返回,若返回,则进入正常运行状态。

4.1.2 MPPT

本文的 MPPT 参考文献^[12,13]的算法。MPPT 流程图如图 9 所示,其中标志位 MPPT_Const=1 时,采用恒电压法,通过比较实时光伏板电压 V_{pv} 与 0.8 倍开路电压 V_{open} 的大小,确定参考电压的扰动方向,扰动步长为 V_{step1} ;否则,采用变步长的扰动观察法,通过比较前后两次光伏板输出功率 $P(k-1)$ 、 $P(k)$ 和电压 $V_{pv}(k-1)$ 、 $V_{pv}(k)$ 的大小确定参考电压的扰动方向,当 $P(k)$ 与 $P(k-1)$ 功率之差绝对值大于功率值 $P1$ 时,扰动步长为 V_{step2} ,如果扰动步长不大于 $P1$,扰动步长为 V_{step3} ,其中 $V_{step1} > V_{step2} > V_{step3}$ 。

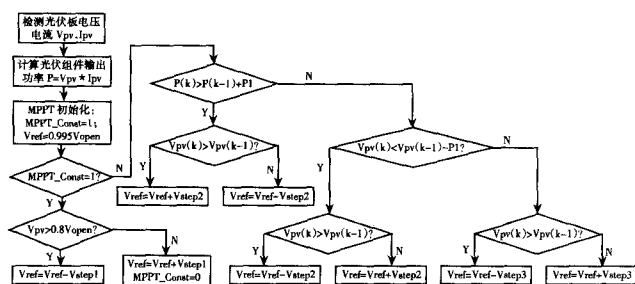


图 9 MPPT 工作流程图

4.1.3 电压电流环控制模块

逆变器要向电网输出交流正弦电流波,需要保持直流母线电压的稳定,同时电流开环控制系统缺乏输出电流对输入参考电流的反馈,难以达到并网电流要求。为此,本文采用电压电流双环控制,图 10 所示为其控制框图。图中 $V_{dc\text{ref}}$ 为逆变器母线参考电压,电压外环通过 MPPT,PI 调节和 Boost 电路控制母线电压 V_{dc} 跟踪参考电压 $V_{dc\text{ref}}$,二者误差经过比例环节得到部分有功参考电流 $i_{d\text{ref}1}$;根据输入输出有功功率守恒、网侧电压平均有效值和比例环节求出有功参考电流 $i_{d\text{ref}2}$,两者之和作为电流内环的有功参考电流 $i_{d\text{ref}}$,无功参考电流

$i_{q\text{ref}}$ 一般为零。逆变器三相并网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 作为逆变器电流内环控制的调制波,经过 Clark 和 Park 变换的 dq 轴分量分别与有功、无功参考电流做差,PI 调节后得到逆变器开关管 dq 轴占空比,经过逆变器电路和电流内环控制,把直流母线电压变换为三相交流开关脉冲量 V_{a0} 、 V_{b0} 、 V_{c0} ,经过 LCL 滤波向电网输出三相并网电流 i_a 、 i_b 、 i_c 。

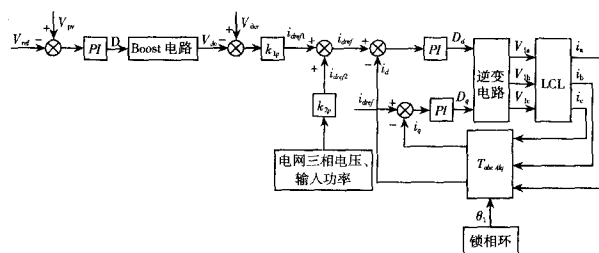


图 10 电压电流环控制框图

4.1.4 锁相环控制模块

锁相环的作用是调节逆变器并网电流的频率和相位,使其和电网电压逐渐进入同步锁定状态,保证并网电流和电压严格同频、同相。锁相控制环节由过零检测电路和软件组成。过零检测硬件电路如图 7 所示,在电网电压过零点处,脉冲信号电平发生跳变,系统检测脉冲信号的上升沿,脉冲信号检测点与电网电压过零点同步。图 11 所示为控制框图,其原理是将实际的电网电压经过 Clark 变换和 Park 变换,得到电网电压的 dq 分量。图中 PI 相当于环路滤波器,前馈系数 W_0 为电网电压的额定频率,可以加快锁定速度; W_1 为锁相环输出的旋转角速度, f_1 为锁相环输出的频率,经过积分环节和取余函数得到当前电压周期的相位信息 θ_1 ,用于闭环控制系统的 Park 变换,积分环节相当于一个压控振荡器。锁相环输出频率 f_1 为电网电压频率,输出相位 θ_1 等于电网电压相位,通过电流内环实现并网电流的频率、相位与电网电压同步。

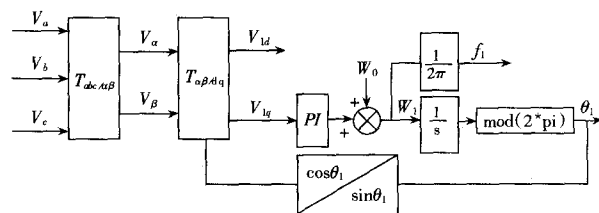


图 11 单同步坐标系软件锁相环控制结构原理图

4.2 ARM_SLAVE 程序设计

ARM_SLAVE 实时采样系统温度, 并将采样信息发送给 DSP, 若系统运行正常, 进入下一次的采样与判断; 否则, 将故障信息发送给 DSP, 同时封锁继电器控制信号和开关管驱动信号, 具体流程图如图 12 所示。

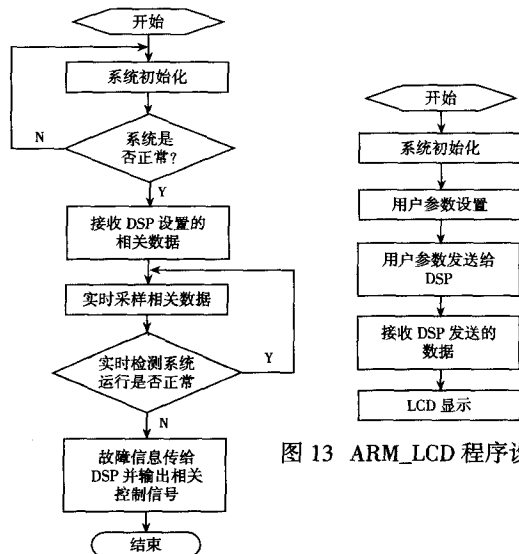


图 13 ARM_LCD 程序设计图

图 12 ARM_SLAVE 程序设计图

4.3 ARM_LCD 程序设计

显示屏在系统上电后进行初始化, 用户可以对系统的运行参数进行设置。当主 DSP 读取到 ARM_LCD 的用户参数时, 通过 SCIA 通信接口向 ARM_LCD 发送实时的电压电流、功率、温度、频率、功率、系统状态等数据, 并在显示屏上显示, 具体程序流程如图 13 所示。

5 实验验证

5.1 实验环境配置

图 14 所示为按照本文设计搭建的实验平台, 图

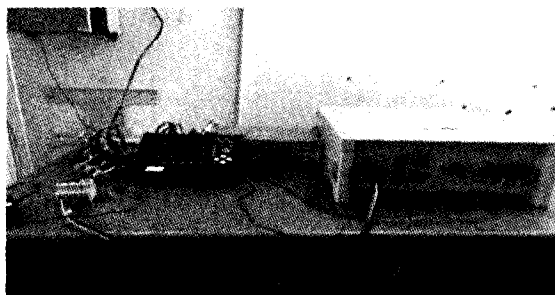


图 14 实验平台整体实物图

15 所示为对应的电气设备接线图。光伏组件的正负端子接入直流汇流箱, 汇流箱输出端接入 10kW 的光伏逆变器输入端, 为方便实验控制 and 安全性, 逆变器交流输出端通过交流断路器接入电网, 电网电压和输出电流波形用日置 3196 测量。



图 15 实验平台电气设备接线图

5.2 实验波形

图 16 所示为逆变器输出相电压波形图, 图 17、图 18 所示分别为电网电压频率为 50Hz 时, 测量到的电网三相电压和逆变器三相并网电流波形, 图 19 所示为 A 相电网电压和逆变器并网电流波形图, 表 1 所示为在不同电网频率下的二者相位误差偏差绝对值, 其值 φ 小于 3.5° , 可认为逆变器并网电流与电网电压同频同相。图 20 为与图 16 相对应的逆变器输出三相电压平均有效值波形图, 图 21 为与图 18 相对应的并网三相电流平均有效值波形图。

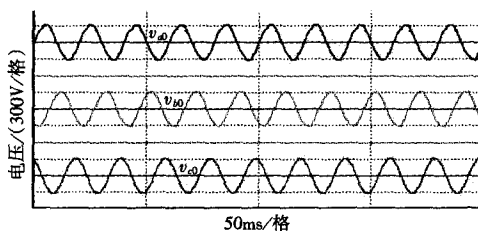


图 16 逆变器输出相电压波形

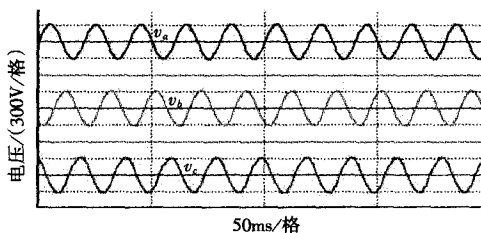


图 17 电网相电压波形图

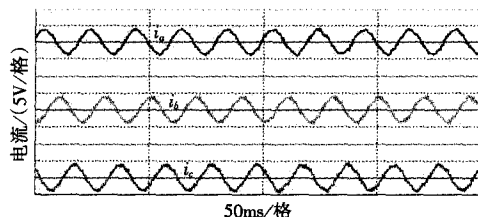


图 18 三相并网电流波形图

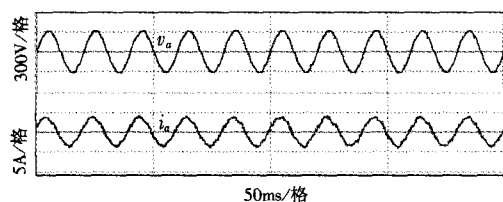


图19 A相电网电压和逆变器并网电流波形图

表1 不同电网频率下的相位差

电网频率 f/Hz	电网电压并网电流相位差 $\varphi/(\circ)$
49.996	3.24
49.997	3.07
49.998	3.15
49.999	2.54
50.000	2.50
50.001	2.87
50.002	2.58
50.003	3.42
50.004	3.28

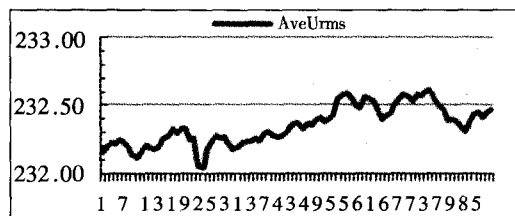


图20 逆变器输出三相电压平均有效值波形

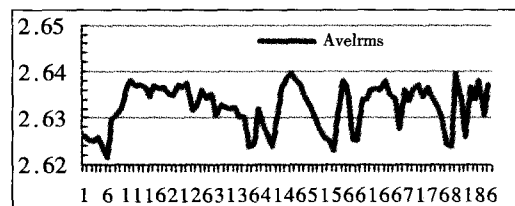


图21 三相并网电流平均有效值波形图

6 结束语

本文设计了基于DSP28335和双ARM的太阳能光伏逆变器控制器,对其主要核心硬件电路的设计进行了介绍,并对DSP、ARM_SLAVE、ARM_LCD各处理功能进行分工,DSP负责系统主要的控制,ARM_SLAVE辅助DSP对系统故障处理和保护控制,ARM_LCD负责人机交互,并对各芯片进行了程序设计。

通过实验可知,本文设计的光伏逆变器可以逆变输出稳定的三相正弦电压波形,输出的并网电流与电网电压同频同相,并且并网电流平均有效值比

较稳定,满足光伏逆变器的并网要求,验证了本文基于“DSP+双ARM”架构设计的太阳能光伏逆变器控制器的可行性。

参考文献:

- [1]丁明,王伟胜,王秀丽,宋云亭,陈得治,孙鸣.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
- [2]章激扬,李达,杨苹,许志荣,周少雄.光伏发电发展趋势分析[J].可再生能源,2014,32(2):127-132.
- [3]Z.Gao,S.Li,X.Zhou and Y.Ma,“An overview of PV system,” 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin,2016:587-592.
- [4]杨燕,袁绍民,张立强,田凯,李艳平.基于光伏系统的显控系统的开发及应用[J].电气传动,2016,46(2):65-67.
- [5]姜安营,王玉华,陈跃,苏娜.基于DSP的光伏逆变器并网控制系统设计[J].电力电子技术,2014,48(10):54-56.
- [6]C.Yanbo,L.Bin,Z.Lihua and W.Hongwei,“Design of three-phase photovoltaic grid-connected inverter based on DSP,” 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong,2011:1-5.
- [7]郑飞,费树岷,周杏鹏.基于DSP和FPGA的光伏并网控制器设计与实现[J].电力自动化设备,2011,31(2):84-89.
- [8]郑飞,张双庆,张军军,李红涛.基于DSP和FPGA的一种新型光伏并网控制方法[J].电力电子技术,2012,46(11):29-31.
- [9]F.Yuan, X. Xu, J. Chen, S. Li, K. Hu and L.Yu,“Photovoltaic generation grid-connected system based on DSP and FPGA control,”2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CE CNet), XianNing, 2011:2413-2416.
- [10]夏鲲,曾彦能,葛越,许颇.户用光伏并网逆变器人机交互系统开发及应用[J].电源技术,2016,40(2):379-381.
- [11]F.Zhang, J. Hui and L.Wu,“Design of single phase photovoltaic grid-connected inverter based on DSP&ARM,” 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai, 2014:1339-1344.
- [12]熊远生,俞立,徐建明.固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用[J].电力自动化设备,2009,29(6):85-88.
- [13]毕玉成,邹轩,沈建强.基于改进型扰动观察法的光伏电池最大功率点追踪算法研究[J].电气技术,2012,11:18-21.

作者简介:

杨清波(1991-),男,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为光伏与储能逆变器及电网电能质量。

收稿日期:2016-09-03