

文章编号: 1674-2869(2016)03-0293-06

基于前馈和PI控制的光伏离网逆变器的研究

王晓敏, 李自成*, 剪浩杰, 刘星雨

武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205

摘要: 针对一般PI控制存在测量干扰的问题, 设计了带有前馈补偿器和电流反馈PI补偿器控制的微型光伏离网逆变器. 利用状态空间平均法建立理想反激转换器的小信号数学模型, 给出了输入与输出之间的传递函数; 设计了带有前馈补偿器和PI控制器的微型光伏离网逆变器控制算法. 为了验证提出的算法, 通过微控制器实时对光伏电池板电压、交流输出电流、交流输出电压进行采样和计算, 生成SPWM波形并驱动开关管来实现DC-DC升压变换和DC-AC变换, 得到较为稳定的正弦输出. 对实验得出的结果进行分析, 充分验证了控制算法的有效性和可行性.

关键词: 微型光伏离网逆变器; 前馈控制; 比例积分控制; 总谐波系数

中图分类号: TM615 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.03.018

Off-Grid Inverter Based on Feed-Forward and Proportional Integral Control

WANG Xiaomin, LI Zicheng*, JIAN Haojie, LIU Xingyu

School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Aimed at the measuring interference in proportional integral (PI) control, the micro off-grid photovoltaic inverter with feed-forward and current feedback PI compensator was designed. The small signal model of ideal flyback converter was constructed by the state-space averaging method to derive the transfer function from the input and output signal. Then the control algorithm of the micro off-grid photovoltaic inverter with feed-forward compensator and PI controller was designed. To verify the proposed algorithm, the real-time photovoltaic (PV) panel voltage, alternating current (AC) output voltage and AC output current were sampled and calculated by the microcontroller to generate the sinusoidal pulse width modulation (SPWM) waveform, which could drive the switch to realize direct current (DC)-DC boost converter and DC-AC converter. Finally, the stable sinusoidal output was obtained. The effectiveness and feasibility of control algorithm was verified by the experiments.

Keywords: micro off-grid photovoltaic inverter; feed-forward control; proportional integral control; total harmonic distortion

1 引言

太阳能作为绿色能源, 具有无污染、无噪音、取之不尽、用之不竭等优点, 越来越受到人们的关注^[1], 其应用也越来越广泛, 其中研究最广泛的即为光伏发电系统. 微型光伏发电系统不同于以往普通的大功率集成型的光伏发电系统, 指每块太

阳能电池板对应一个低功耗逆变器模块的太阳能光伏发电系统^[2]. 微型光伏发电系统按照连接方式可以分为微型光伏离网发电系统和微型光伏并网发电系统^[3].

微型光伏离网发电系统主要由光伏电池板、蓄电池和微型逆变器构成^[4], 是一个独立、闭合的发电系统^[5]. 白天, 光伏电池将太阳能转换为直流

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB776); 武汉工程大学研究生创新基金(CX2014043)

作者简介: 王晓敏, 硕士研究生. E-mail: 136762593@qq.com

*通讯作者: 李自成, 博士, 教授. E-mail: zcli@wit.edu.cn

电,在微型逆变器的控制下,为本地负载进行供电,给蓄电池充电;夜晚,蓄电池储存的能量经过微型逆变器为本地负载供电.其中,微型逆变器将光伏电池板或者蓄电池输出的直流电转换为交流电,是整个微型光伏离网发电系统的关键部件^[6],对提高电力系统的控制能力、改善电力系统的无功损耗与谐波污染,都有着重大的意义^[7].这种系统可用于向移动基站、路灯照明系统以及偏远地区居民供电等^[8].

微型光伏并网发电系统,其不仅能够给本地负载供电,还能够将多余的电能传输到电网^[9].微型光伏并网发电系统与微型光伏离网发电系统的关键不同点在于并网系统需要跟踪电网电压频率和相位.

随着微型光伏离网逆变器控制技术的日渐成熟,不同功率的微型光伏离网逆变器得到了越来越多的应用,也产生了各种不同的控制方式.本文在已有电流反馈补偿器的基础上加入电压前馈补偿器,实现对微型离网逆变器的稳定控制,通过实验验证了所提出算法的有效性.

2 微型离网逆变器控制策略

2.1 理想反激转换器建模

反激式变换器是带有隔离的 Buck-boost 变换器,是高度的非线性系统.图1给出了一个理想反激转换器的电路图.

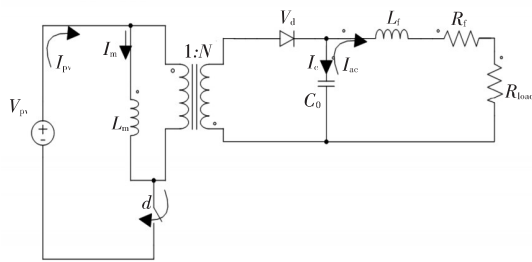


图1 理想反激转换器

Fig. 1 Ideal flyback converter

反激转换器需要对3种状态进行分析,它们分别对应着3个储能元件:

- I_m ——反激电感电流;
- V_{ac} ——反激输出电容电压;
- I_{ac} ——反激输出电流.

式(1)给出了理想反激转换器在一个开关周期的平均基尔霍夫电压定律和电流定律的公式,

其中 d 是占空比, d' 为关断时间,即 $1-d$.

$$\begin{cases} V_{LM} = I_{LM} \frac{d(i_m)}{dt} = d \cdot v_{pv} - d' \cdot \frac{v_{ac}}{N} \\ V_{Lf} = V_{ac} - i_{ac} R_f - v_{load} \\ i_c = C_o \frac{d(v_{ac})}{dt} = d \cdot \frac{-v_{load}}{R_{load}} - d' \cdot \left(\frac{i_m}{N} - \frac{v_{load}}{R_{load}} \right) \\ i_{pv} = d \cdot i_m \\ v_{load} = R_{load} \cdot i_{ac} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中所有量均为一个开关周期的平均值,为了获得系统输出与输入之间的传递函数,需要在选定工作点上对系统进行线性化.

系统的状态向量、输入向量和输出向量分别由式(2)~(4)给出.

$$\mathbf{x} = [i_m \quad i_{ac} \quad v_{ac}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = [d \quad v_{load} \quad v_{pv}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [i_{ac}] \quad (4)$$

对系统的状态向量、输入向量和输出向量进行扰动和线性化,并隔离稳态量和扰动量,可以获得式(5):

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \mathbf{X} + \tilde{\mathbf{x}} = [I_m \quad I_{ac} \quad v_{ac}] + [\tilde{i}_m \quad \tilde{i}_{ac} \quad \tilde{v}_{ac}] \\ \mathbf{u} = \mathbf{U} + \tilde{\mathbf{u}} = [D \quad v_{load} \quad v_{pv}] + [\tilde{d} \quad \tilde{v}_{load} \quad \tilde{v}_{pv}] \\ \mathbf{y} = \mathbf{Y} + \tilde{\mathbf{y}} = [I_{ac}] + [\tilde{i}_{ac}] \end{cases} \quad (5)$$

向量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \mathbf{U} 表示系统的静态工作点,向量 $\tilde{\mathbf{x}}$ 、 $\tilde{\mathbf{y}}$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}$ 是工作点上的扰动.将式(5)代入式(1)中,分离交流量,忽略较小的交流项,可得线性化系统公式为

$$\begin{cases} \tilde{v}_{LM} = L_M \frac{d(\tilde{i}_m)}{dt} = D \cdot \tilde{v}_{pv} - D' \cdot \frac{\tilde{v}_{ac}}{N} + \tilde{d} \left(v_{pv} + \frac{v_{ac}}{N} \right) \\ \tilde{i}_c = C_o \frac{d(\tilde{v}_{ac})}{dt} = \frac{D' \cdot \tilde{i}_m}{N} - \frac{\tilde{v}_{load}}{R_{load}} - \frac{I_m \cdot \tilde{d}}{N} \\ \tilde{v}_{Lf} = L_f \frac{d(\tilde{i}_{ac})}{dt} = \tilde{v}_{ac} - \tilde{i}_{ac} R_f - v_{load} \\ \tilde{i}_{pv} = D \cdot \tilde{i}_m + \tilde{d} I_m \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6),可获得小信号等效的交流电路,如图2所示.

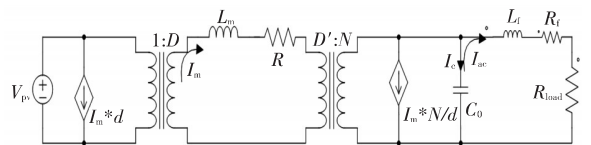


图2 交流小信号模型

Fig. 2 AC small-signal model

根据式(6)和交流小信号模型,得到如式(7)

所示的系统线性化状态公式.

$$\begin{cases} \frac{d(\hat{i}_m)}{dt} = 0 \cdot \hat{i}_m + 0 \cdot \hat{i}_{ac} - \frac{D'}{N \cdot L_M} \hat{v}_{ac} + 0 \cdot \hat{d} + \\ \quad 0 \cdot \hat{v}_{load} + \frac{D}{L_M} \cdot \hat{v}_{pv} \\ \frac{d(\hat{i}_{ac})}{dt} = 0 \cdot \hat{i}_m - \frac{R_f}{L_f} \cdot \hat{i}_{ac} - \frac{1}{L_f} \hat{v}_{ac} + \\ \quad 0 \cdot \hat{d} - \frac{1}{L_f} \cdot \hat{v}_{load} + 0 \cdot \hat{v}_{pv} \\ \frac{d(\hat{v}_{ac})}{dt} = \frac{D'}{NC_0} \cdot \hat{i}_m - \frac{1}{C_0} \cdot \hat{i}_{ac} + 0 \cdot \hat{v}_{ac} - \\ \quad \frac{I_m}{NC_0} \cdot \hat{d} + 0 \cdot \hat{v}_{load} + 0 \cdot \hat{v}_{pv} \end{cases} \quad (7)$$

利用状态空间平均法将式(7)写成状态矩阵

形式:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \hat{i}_m \\ \hat{i}_{ac} \\ \hat{v}_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{D'}{L_m N} \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{1}{L_f} \\ \frac{D'}{NC_0} & -\frac{1}{C_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_m \\ \hat{i}_{ac} \\ \hat{v}_{ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{I_m}{NC_0} \end{bmatrix} \hat{d} + \\ \quad \begin{bmatrix} \frac{D}{L_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{pv} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{load} \\ \dot{X} = [A]X + [B_1]U_1 + [B_2]U_2 + [B_3]U_3 \\ \hat{i}_{ac} = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{i}_m \\ \hat{i}_{ac} \\ \hat{v}_{ac} \end{bmatrix} \\ Y = [C]X \end{cases} \quad (8)$$

因此得到输出电流与控制输入之间的传递函数为

$$G_{id}(s) = \frac{\frac{I_m}{C_0 L_f} s}{s^3 + \frac{R_f}{L_f} s^2 - \frac{L_M + L_f}{C_0 L_M L_f} s - \frac{D^2 R_f}{C_0 L_M L_f N^2}} \quad (9)$$

对式(9)进行分析,该传递函数是一个右半平面零点传递函数,是典型的升降压拓扑.

2.2 离网逆变器控制策略

离网逆变器控制策略的关键在于如何在负载变化时仍旧能够保持输出电压稳定不变. 为了保持逆变器输出电压稳定,本设计使用电流环控制方式,选取PI控制器作为反馈,反馈控制环路框图如图3所示,其传递函数 $G_c(s)$ 为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

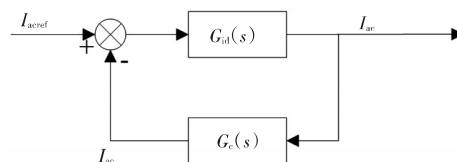


图3 电流环PI控制

Fig. 3 PI control of current loop

在理想状态下,由于前馈补偿器能够完全抑制测量的干扰信号,因此结合了电压前馈和电流反馈的系统能够大幅提高系统的控制性能,效果要好于电流反馈补偿的情况. 根据基本反激变换器的电压转换比公式,可以得到如下前馈补偿器占空比 D 的表达式为

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_i N} \quad (11)$$

因此使用在反馈补偿器的基础上加入前馈补偿器的控制方式,控制结构框图如图4所示. 前馈补偿器在光伏离网逆变器中的作用是提供稳态占空比 $D(t)$,从而使反馈补偿器提供的占空比 $\Delta d(t)$ 仅用于追踪动态参考电流. 最终占空比的表达式为

$$d(t) = D(t) + \Delta d(t) \quad (12)$$

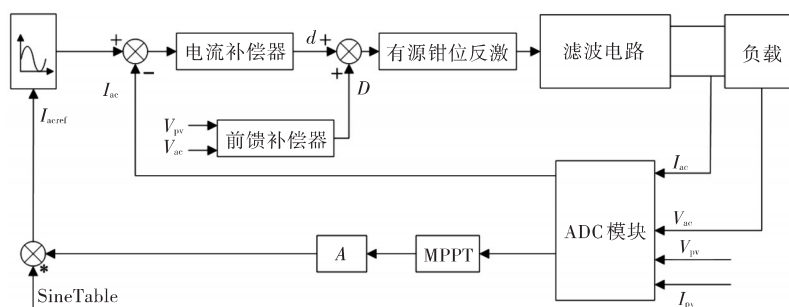


图4 控制结构框图

Fig. 4 Diagram of control block

3 微型离网逆变器软件设计

3.1 控制芯片

在微型光伏离网逆变器设计中,选择了带有隔离型变压器的有源钳位反激式变换器先对光伏电池板输出的直流电进行升压,再通过全桥去折叠电路翻转得到工频交流电.本设计的重中之重在于如何通过控制反激式变换器和全桥去折叠电路中的场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET),因此需要单片机拥有至少两路高速脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)模块;同时,需要对逆变器输出电流、电压和光伏电池板电压进行采样,也要对反激输出的电压采样、温度采样等以完成对系统的保护,因此需要多路模数转换通道和比较器通道用于控制与保护.选取 Microchip 公司的一款高性能低功耗 16 位数字信号控制器 dsPIC33FJ16GS504 作为主控制单元,是因为其高速 PWM 模块最多能支持 4 个 PWM 发生器,能提供 4~8 路互补输出;高速 10 位模数转换拥有 10 位分辨率,最多 12 路输入通道可组成 6 个转换对,满足了本设计对电池板电压、输出电压电流的采样要求,同时通过软件生成正弦脉宽调制波形(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)^[10].

3.2 软件设计

软件的设计采用一个主程序外加若干个子程序的方式,各个子程序分别完成不同的功能.

主程序主要完成单片机各项功能的初始化,如:模数转换(Analog-to-Digital Conversion, ADC)模块初始化、PWM 模块初始化、输入输出端口(Input/Output, I/O)初始化等.在各项初始化完成后使能各个模块,进入 while(1) 循环判断是否进入中断服务函数,主程序的流程图如图 5 所示.

中断服务函数主要完成的任务是每 17.5 μs 采样光伏电池板电压、逆变器输出电流和逆变器输出电压,并通过计算得出下一时刻对应的 SPWM 占空比,触发 PWM 模块驱动 MOSFET 工作.中断服务函数的工作流程图如图 6 所示.

本系统中的电流补偿器采用 PI 控制,采用霍尔效应电流传感器采样逆变器输出电流,传感器的输出信号经过处理之后传送到 dsPIC DSC 的模数转换单元,与给定的基准电流进行比较,得到偏差信号,将偏差信号和给定信号依照 PI 算法进行计算,得到电流反馈补偿器的占空比. PI 控制流程图如图 7 所示.

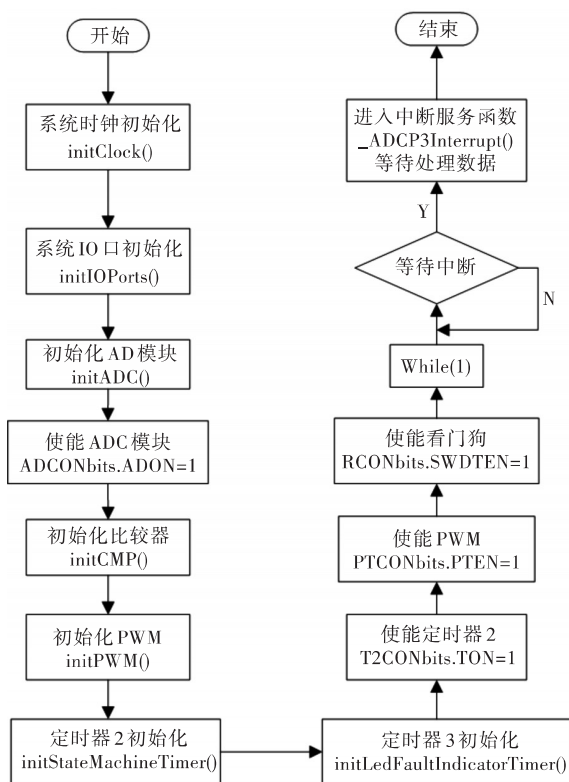


图5 主程序流程图

Fig. 5 Diagram of main program

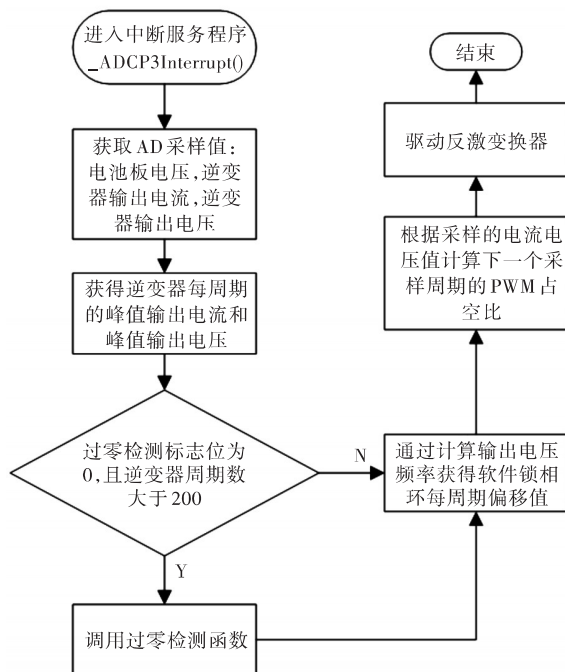


图6 中断服务程序流程图

Fig. 6 Diagram of interrupt service routine

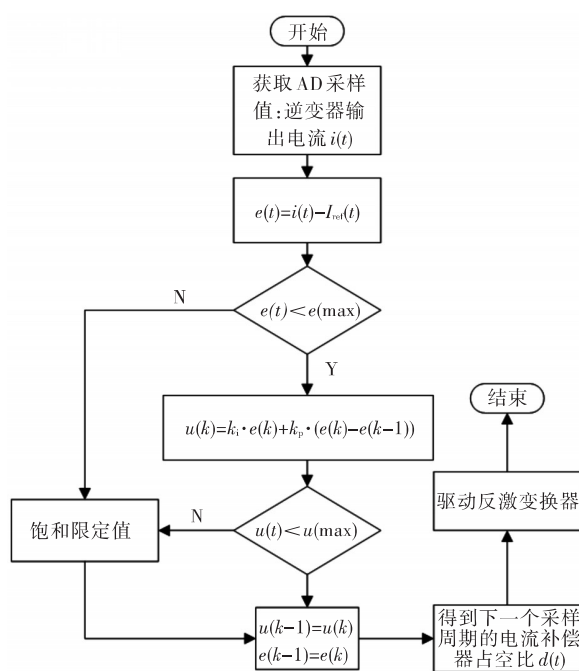


图7 PI控制流程图

Fig. 7 Diagram of PI control

除了电流反馈补偿器,本系统加入了前馈补偿器.首先采样逆变器输出电压和电池板输出电压,信号经过处理之后传送到dsPIC DSC的模数转换单元并获取每个工频周期逆变器输出电压的峰值,计算前馈占空比 D .图8为前馈控制流程图.

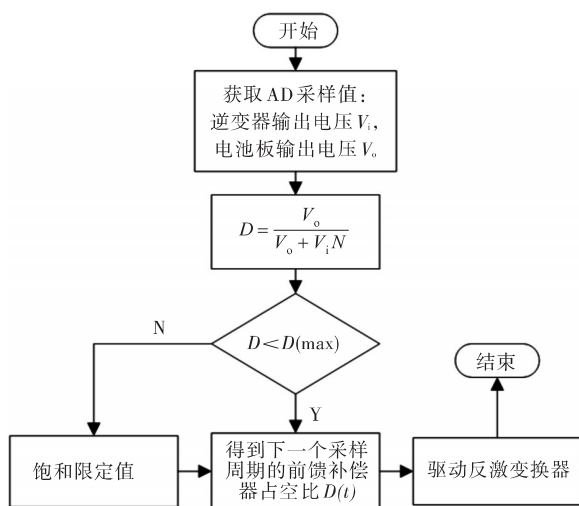


图8 前馈控制流程图

Fig. 8 Diagram of feed-forward control

4 实验部分

4.1 实验平台搭建

实验平台由可编程直流源、微型逆变器、负载和示波器等构成.其中,使用致茂电子公司设计生产的Chroma 62006P-300-8可编程直流源模拟光伏

电池板输出,以滑动变阻器作为负载,同时使用Tektronix公司TPS 2024B型隔离型示波器显示检测电压波形.

4.2 调试及其结果

将滑动变阻器阻值调节到 $300\ \Omega$,可编程直流源调节到 $36\ \text{V}$, $1.5\ \text{A}$ 输出,使用示波器观察实验结果.

反激输出结果和全桥去折叠后输出的波形分别如图9、图10所示.由示波器输出波形可以看出,逆变器输出比较平滑稳定的正弦波形,满足了给交流负载供电的要求.

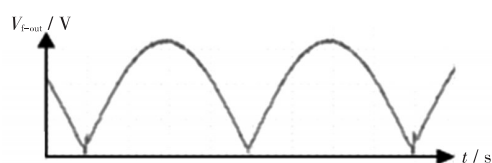


图9 反激输出波形

Fig. 9 Waveform of flyback output

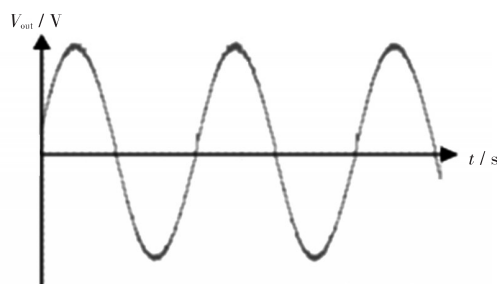


图10 全桥输出波形

Fig. 10 Waveform of full-bridge output

4.3 实验结果分析

将微型离网逆变器输出的波形数据通过RS-232转USB线保存为.csv文件,导入到MATLAB中的FFT Analysis模块中进行总谐波分析,分析结果如图11所示,得到总谐波系数 THD 为 3.29% ,远小于国家标准中规定的 5% .观察图11中的输出波形图,其输出周期稳定在 $0.02\ \text{s}$,输出电压的频率稳定在 $50\ \text{Hz}$.说明加入前馈补偿器后的微型光伏离网逆变器输出电能质量较好,输出电压频率较为稳定,验证了控制算法的有效性和可行性.

离网型微型光伏逆变器软件设计的关键在于如何使用前馈补偿器和电流反馈补偿器控制反激MOSFET的占空比,固定逆变器输出电流的频率.根据逆变器输出电流、电压采样和电池板电压采样进行计算构成了一个带有前馈补偿器和电流PI控制补偿器的占空比,产生波形质量较好的工频正弦波.

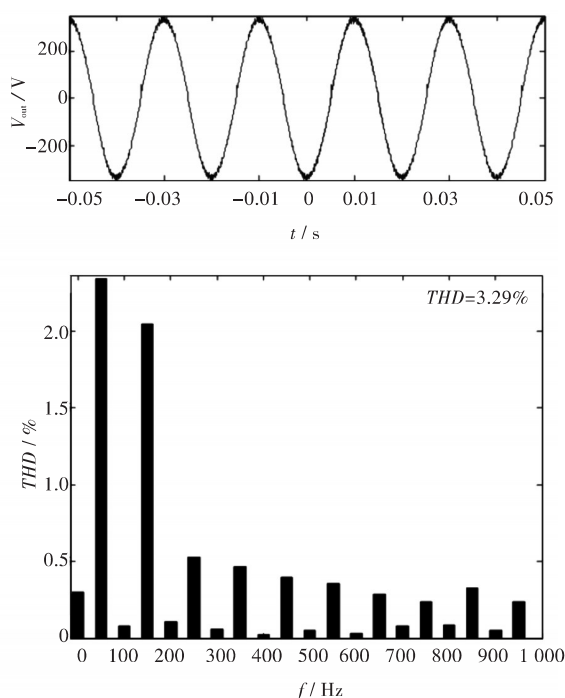


图11 全桥输出波形FFT分析

Fig. 11 FFT analysis of waveform of full-bridge output

5 结 语

以上主要研究了微型光伏并网逆变器的控制策略,对理想反激转换器建立小信号模型,并在电流补偿器PI控制环的基础上加入了前馈补偿器.使用一款以dsPIC33FJ16GS504单片机作为主控制单元,有源钳位反激式变换器为升压变换电路,全桥去折叠电路为逆变电路的微型并网逆变器进行实验.完成其主函数、模数转换中断函数、电流PI补偿器以及前馈补偿器的设计.通过实验,得到了稳定的、总谐波系数低于国家标准要求的工频交流电波形,验证了控制策略和软件设计的可行性.

参考文献:

- [1] 杨帆, 彭宏伟, 胡为兵. DC-DC转换电路在光伏发电MPPT中的应用[J]. 武汉工程大学学报, 2008, 30(3):104-106.
YANG F, PENG H W, HU W B. The application of DC-DC conversion in photovoltaic system maximum power point tracking [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2008, 30(3):104-106.
- [2] 刘伟鹏. 单相光伏并网逆变器控制策略研究[D]. 北京:北方工业大学, 2014.
- [3] 贾宛英, 崔云, 郭亚男. 小型离网光伏发电系统中逆变器的设计与仿真[J]. 科技创新与应用, 2013(35): 16-17.
JIA W Y, CUI Y, GUO Y N. Design and simulation of inverter in small off-grid photovoltaic power generation system [J]. Technology innovation and application, 2013(35):16-17.
- [4] 阎娜, 付柯楠. 光伏实验台上基于STC单片机的离网逆变器设计[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(8): 87-91.
YAN N, FU K N. Design of STC MCU-based off-grid inverter of photovoltaic experiment [J]. Experimental technology and management, 2014, 31(8):87-91.
- [5] 李艳梅. 200W便携式离网型太阳能光伏逆变器设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [6] 王永强, 卢旭锦, 陈国雄. 离网型光伏逆变器的分析设计和思考[J]. 南方职业教育学刊, 2014, 4(5): 100-104.
WANG Y Q, LU X J, CHEN G X. Analysis and design of off-grid photovoltaic inverter [J]. Journal of southern vocational education, 2014, 4(5):100-104.
- [7] 陈恺, 罗晓曙, 廖志贤. 基于STM32的15KW离网型逆变器设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(1): 160-170.
CHEN K, LUO X S, LIAO Z X. Design of 15kw off-grid photovoltaic inverter based on STM32 [J]. Computer measurement and control, 2013, 21(1): 160-170.
- [8] 张枝俊. 基于PVsyst的离网光伏系统仿真研究[J]. 中国科技信息, 2016(5): 39-64.
ZHANG Z J. Simulaton research on off-grid photovoltaic system based on pvsyst[J]. China science and technology information, 2016(5): 39-64.
- [9] 张有狮, 刘洁, 杨海柱, 等. 微网的光伏系统并网运行和离网运行的控制策略[J]. 电子世界, 2012(11): 1-3.
ZHANG Y S, LIU J, YANG H Z, et al. Control strategy of grid connected pv system operation and off-grid connected of micro-grid [J]. Electronic world. 2012(11): 1-3.
- [10] 林旭成, 杨苹. 基于DSP的离网逆变器的研制[J]. 通信电源技术, 2010(5):10-12.
LIN X C, YANG P. Research of the off-grid inverter based on DSP [J]. Telecom power technology, 2010(5):10-12.

本文编辑:陈小平