

便携式太阳能发电系统设计

郑玉珍¹, 李武华², 何湘宁²

(1. 浙江科技学院 自动化及电气工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 介绍了便携式太阳能发电系统的组成, 直流变换模块和逆变模块中主电路和控制电路的设计, 给出了电路中各主要器件的具体参数, 并给出实验结果。直流变换主电路采用带高频变压器的推挽电路、全桥整流和滤波电路。控制电路采用专用的脉宽调制集成电路芯片; 逆变电路采用全桥逆变电路和滤波电路。控制电路采用 AVR 单片机, 产生单极性正弦脉宽调制 (SPWM) 的控制信号, 使主电路输出标准的正弦波交流电压。

关键词: 太阳能发电系统; 直流变换电路; 逆变电路; 正弦脉宽调制; AVR 单片机

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2010)03-0186-06

Design of portable photovoltaic generation system

ZHENG Yu-zhen¹, LI Wu-hua², HE Xiang-ning²

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A construction of a portable PV generation system was introduced, along with which were the main circuit topology and the design of control system. Parameters of the key components were designed, and the experimental results were showed. The DC-DC converter employed a push-pull topology with high-frequency transformer, full-bridge rectification circuit and filter circuit, while a specified PWM IC was adopted in the control system. The main circuit of DC-AC inverter consisted of a full-bridge circuit and a LC filter, while an AVR SCM took the role of controlling and producing a unipolar SPWM signal, which enabled the DC-AC inverter output a standard sinusoidal voltage.

Key words: PV generation system; DC-DC converter; DC-AC inverter; SPWM; AVR SCM

为保护人类的生存环境,越来越多的人致力于开发可再生能源特别是太阳能的利用,太阳能发电技术得到广泛的关注^[1]。便携式太阳能发电系统由太阳能电池板提供电能,输出频率为 50 Hz,有效值为 220 V,频率和幅度都稳定的正弦交流电,是一个独立的发电系统,具有高效轻便的特点。该系统对手机、笔记本电脑、照相机等设备在野外的使用提供了便利,也是野外科考设备的重要电源。直流变换和逆变技术是便携

式太阳能发电系统的主要组成部分,国内外现有的产品大多采用逆变电路—工频变压器—滤波电路^[2]来实现电压的变换,输出波形多为方波或阶梯波,体积大,效率低,成本高。本文介绍一种体积小、效率高的直流变换和逆变技术,采用先进的 SPWM 技术,输出与市电具有同频率、有效值为 220 V 的正弦交流电,以满足野外作业时一般电器的使用要求。

1 太阳能发电系统的构成

独立的太阳能发电系统由太阳能电池方阵、充电器、蓄电池、直流变换器、逆变器等部分构成^[3]。太阳能电池方阵是将许多单个的太阳能电池经过串联或并联组合,并进行封装后构成的太阳能电池组件,由半导体材料制成,将太阳能转换成直流形式的电能。该直流电经过电压变换后可以直接供给直流负载使用;对多余的能量经充电器以化学能的形式储存于蓄电池组中,供夜晚或日照不足时使用。将太阳能电池或蓄电池输出的直流电进行电压变换供给负载的工作由直流变换器完成。对于交流电源供电的用电设备,需要将太阳能电池或蓄电池输出的直流电经过逆变器转换成交流电形式供电,逆变器将直流电经过高频升压、SPWM 逆变、滤波等环节,转换成交流 220 V、50 Hz 的市电形式供给电器使用。

本文研究的太阳能发电系统采用输出电压为 12 V 的太阳能电池,经过直流变换和逆变两级结构,输出频率为 50 Hz、电压有效值为 220 V 的正弦交流电,功率等级 150 W,为小功率的便携式太阳能发电系统,适合于各种使用交流电源的设备。由于太阳能电池的输出受许多因素的影响,难以保持稳定,因此在设计直流变换器和逆变器时,需根据太阳能电池的特点来设计电路结构和电路参数。

2 直流变换电路设计

本系统的直流变换电路对太阳能电池输出的直流电进行电压变换和稳压,输出稳定的 310 V 直流电,作为逆变器的输入。由于太阳能电池本身的特性,标称为 12 V 输出的太阳能电池输出电压可以在 9~16 V 的范围内变化。在户外,太阳能电池获得的太阳能量也随着天气阴晴变化或电池板摆放角度变化等因素而随时会产生变化,因此要针对太阳能电池的输出特性设计电路结构和参数。本系统直流变换的主电路采用推挽升压结构,高频变压器的设计要保证输入电压在 9 V 或 16 V 时都能输出有效的电压;控制电路产生的 PWM 控制信号也要有效地将输出电压稳定在 310 V 左右,以保证逆变器能输出有效值为 220 V 的正弦交流电压。

2.1 主电路

2.1.1 电路结构与工作原理

作为便携式太阳能发电系统,太阳能电池是系统的唯一能源,因此本系统直流变换器的主电路采用推挽拓扑结构。由于推挽结构输入电路与输出电路的电气隔离,可以利用变压器多个次级绕组实现多路输出,其中一组次级绕组将电压升至 310 V,供逆变器进行变换后输出正弦交流电压;另一组次级绕组将电压变换至 18 V,然后经过整流稳压后作为辅助电源,供系统中控制电路使用。主电路采用推挽结构具有在一定开关频率下磁芯和线圈损耗小的优点。主电路结构如图 1 所示,图中未包括辅助电源部分。

高频变压器原边 2 个绕组 N_{p1} 和 N_{p2} 分别通过开关管 S_1 和 S_2 连接到直流电源 V_s ,形成回路, S_1 和 S_2 以相同占空比 D 导通工作,相位相差 180° ^[4]。当开关管 S_1 和 S_2 轮流导通时,变压器副边感应出极性交替变化的交流电,经过全桥整流和电容滤波,得到直流输出电压,实现直流电压变换。

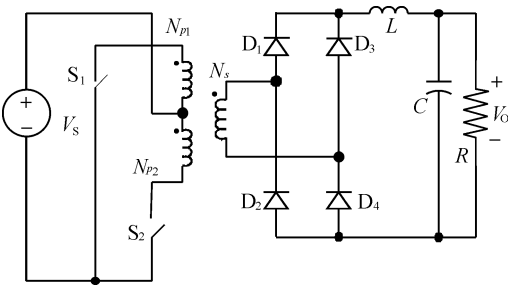


图 1 推挽式直流变换主电路拓扑

Fig.1 Topology of Push-Pull DC-DC converter

2.1.2 参数设计

主电路开关管选择 MOSFET 功率管,考虑到开关管的最大电流为 $I_{\max} = P_o / V_{in}$,开关管截止时承受的最大电压为 $V_{\max} = 2V_{in}$,再考虑适当的电压和电流裕量,本电路中选择 IR 公司的开关管 IRF141,其额定耐压值为 $V_{DS} = 60 \text{ V}$,额定电流 $I_D = 27 \text{ A}$,导通电阻 $R_{DS} = 0.085 \Omega$ 。

整流二极管的选择主要考虑其反向耐压和正向电流,本电路采用全桥整流结构,开关频率为 50 kHz ,因此选用快恢复二极管。当 S_1 导通时, D_2 、 D_3 导通,脉冲电压加在 D_1 和 D_4 上,承受的最大反压为 310 V ;二极管上流过的最大正向电流参照一般教材的计算,本系统选择 HER305。

滤波电容的作用是减小直流母线上的纹波,选择时要考虑其耐压值,本系统中用一个 $1\,000 \text{ UF}/450 \text{ V}$ 的电解电容和一个 $0.1 \text{ UF}/450 \text{ V}$ 的 CBB 电容进行滤波。

高频变压器的设计包括:磁心的选择,功率开关管最大导通时间的选择,初级匝数的选择,最大磁通变化的选择,次级匝数的选择,还要考虑太阳能电池输出电压在 $9 \sim 16 \text{ V}$ 范围内变化。根据系统总输出功率,变压器的设计从磁芯开始。由系统工作频率、最大工作磁密、磁心面积、窗口面积及各绕组电流密度来确定磁芯的有效输出功率。这些参数的选择是互相关联的,选择的原则是尽量减小变压器尺寸和减少温升^[5]。在本系统中,工作频率为 50 kHz ,选择 EI30 铁氧体磁芯,最大磁通 $B_{\max} = 1\,600 \text{ G}$,电流密度为 $D_{\text{cma}} = 500$ 圆密耳每有效安培值,初级线圈采用 120 股 0.1 mm 丝包线绕制,匝数 $N_{p1} = N_{p2} = 7$,次级采用 0.3 mm 丝包线绕制,匝数 $N_s = 182$,变比为 26 ^[6]。

2.2 控制电路

直流变换的控制电路主要作用是提供主电路开关管的 PWM 门极导通控制信号,以及对太阳能电池输出电压进行欠压和过压、电路的过流等现象进行监控和保护。考虑到控制精度和生产成本,在本系统中采用 PWM 专用芯片 UC3525,其内部集成了误差放大器、脉冲宽度调制器、振荡电路和电压参考电路,具有内部软启动、死区控制、低电压保护和输出驱动电路等功能,输出脉冲频率最高可达 400 kHz 。控制电路如图 2 所示。振荡器产生 50 kHz 锯齿波;直流母线电压经采样反馈至误差放大器反相输入端,同相输入端接 2.5 V 比较电压,PWM 控制和驱动信号由 OUTA 和 OUTB 输出;当有欠压、过压和过流时可通过引脚 10 将关断 PWM 输出,而当消除欠压、过压和过流时则重新开放 PWM 输出;死区时间通过引脚 7 电阻调节;软启动通过引脚 8 的电容实现。

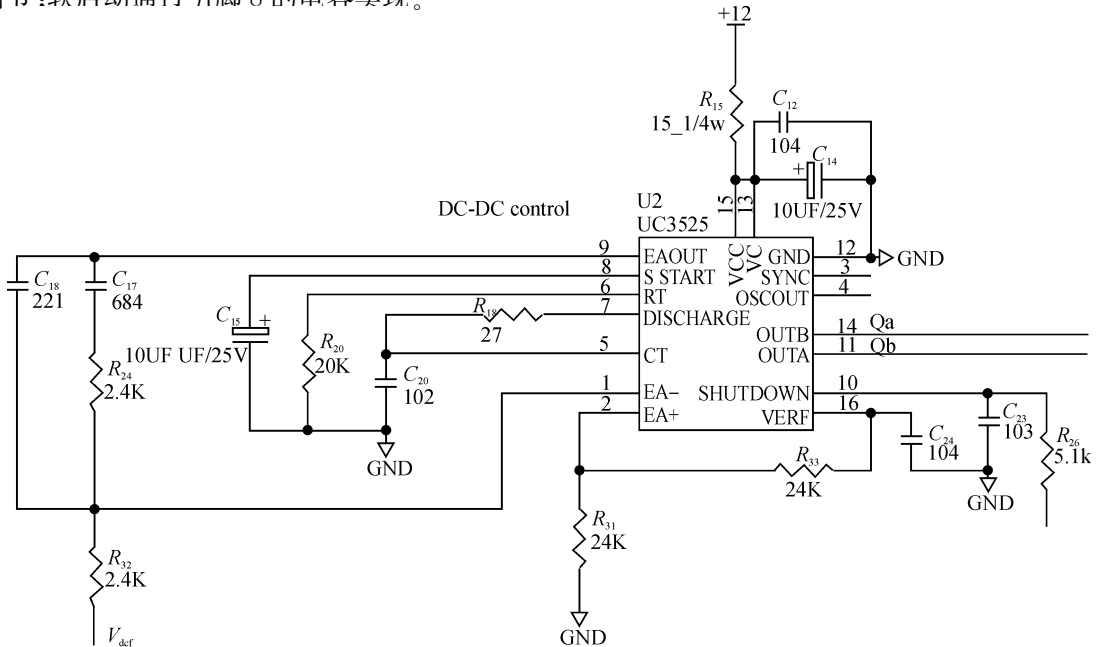


图 2 直流变换控制电路

Fig.2 Scheme of DC-DC controller

3 逆变电路设计

由于一般电器都以交流电作为其电源形式,因此需要将升压后的稳压直流电转换成交流电的形式。为适应野外设备的使用,便携式太阳能发电系统应具备高效轻便的特点,因此逆变器设计采用全桥结构主电路,以 SPWM 控制方式产生正弦交流电,提高系统效率和输出电压波形质量。

3.1 主电路结构与原理

系统主电路拓扑如图 3 所示,为全桥逆变结构,每个开关元件都并联二极管为电感提供续流回路。当开关管 S_1 和 S_3 导通时,在滤波电容 C 上产生上正下负电压;当开关管 S_2 和 S_4 导通时,在 C 上产生下正上负电压。开关管 S_1 和 S_4 的控制信号互补,且必须有死区时间,以防止管子 在开关过程中桥臂上发生短路; S_2 和 S_3 的控制信号类似。当加在 4 个开关管上的控制信号的占空比具有正弦规律时,经过 LC 滤波电路得到的电压就是具有正弦规律的交流电压输出,逆变桥输出电压 U_{ab} 的幅值等于直流电源电压幅值 U_d 。

3.2 控制电路和驱动电路

逆变器的控制电路由单片机构成,采用数字化技术生成 SPWM 控制信号,用来产生纯正的正弦波交流电压输出,减少输出电压中的谐波分量。本系统采用单极性 SPWM 调制方法,即主电路中开关管 S_1 和 S_4 的控制信号采用互补的正弦规律变化的脉冲序列,开关管 S_2 和 S_3 的控制信号采用互补的工频规律变化的脉冲序列。

本系统采用 ATmega48 单片机产生 SPWM 脉冲序列,经过驱动电路加于开关管的门极上,驱动芯片为 IR2103,具有内部死区控制功能,驱动电路如图 4 所示。

3.2.1 单极性 SPWM 调制原理

采用 SPWM 控制方法的主要目的就是减少输出电压波形中的谐波成分,经过低通滤波后得到比较理想的正弦波形。单极性 SPWM 输出的控制信号^[7]如图 5 所示。

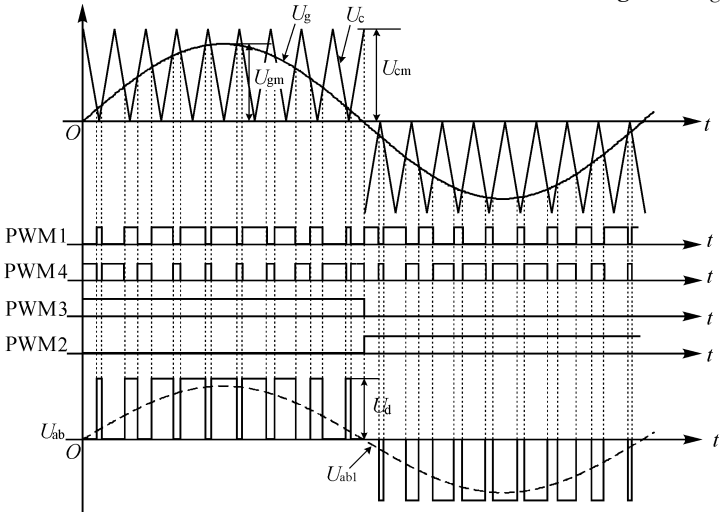


图 5 单极性 SPWM 控制信号
Fig.5 Unipolar SPWM control signal

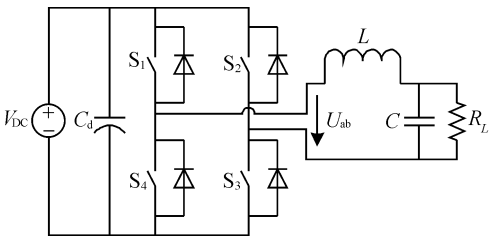


图 3 逆变主电路拓扑
Fig.3 Topology of DC-AC inverter

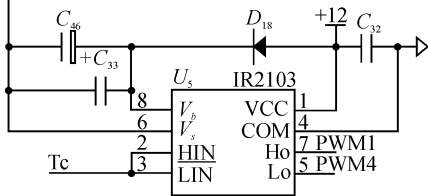


图 4 DC-AC 驱动电路原理图
Fig.4 Diagram of DC-AC driver

三角波 U_c 为高频载波,幅值为 U_{cm} ;调制波 U_g 按正弦规律变化,频率为 50 Hz,幅值为 U_{gm} , $U_{gm} < U_{cm}$ 。PWM1~PWM4 分别是开关管 $S_1 \sim S_4$ 的门极控制信号, U_{ab} 是逆变电路的输出电压, U_{abl} 是 U_{ab} 的基波分量。比较 U_g 和 U_c ,当 $U_g > U_c$ 时, PWM1 输出高电平,当 $U_g < U_c$ 时, PWM1 输出低电平, PWM1 的脉冲频率与高频载波 U_c 的频率相同,当 $U_{gm} < U_{cm}$ 时, PWM1 占空比的计算公式为:

$$D = \frac{U_{gm} \sin \alpha t}{U_{cm}} = m \sin 2\pi f_g t \quad (1)$$

式(1)中: m —调制比; f_g —调制波的频率。PWM4 与 PWM1 波形互补,频率相同; PWM2 和 PWM3 的波形互补,频率相同,且与调制波 U_g 具有相同频率。

3.2.2 单片机产生 SPWM 的设计

ATMega48 是 ATMEL 公司出品的一款高性能低功耗的 8 位 AVR 微处理器,采用先进的 RISC 结构,具有 6 通道的 PWM 和 8 路 10 位 ADC,工作于 20 MHz 时性能高达 20 MIPS^[8],利用其软件可以轻松地完成 SPWM 设计。

系统采用具有 PWM 功能的 8 位定时器/计数器 0 来产生 SPWM 控制信号。定时器 0 有 2 个独立的输出比较单元,计数值从 BOTTOM(0)开始,每个时钟加 1,一直计到 TOP,然后每个时钟减 1,一直到 BOTTOM,这样完成一个周期。8 位的比较器持续地比较寄存器 TCNT0 和输出比较寄存器 OCR0A 的值,一旦 TCNT0 和 OCR0A 的值相等,就给出匹配信号,并在输出比较引脚(OCR0A)上产生低电平信号;当定时器 0 计数值达到 BOTTOM 时,在输出比较引脚上产生高电平信号。

为了提高 PWM 的频率,可以采用快速 PWM 模式,即产生单斜坡工作方式,计数值从 BOTTOM 计到 TOP,立即回到 BOTTOM 重新开始,频率达到普通模式的 2 倍。在输出比较引脚上产生的脉冲占空比计算公式为:

$$D = \frac{OCR0A}{TOP+1} \quad (2)$$

选择 8 MHz 的晶振,定时器 0 的计数值 TOP 设为 255, BOTTOM 设为 0,快速 PWM 模式的脉冲频率为 8 MHz/256=32 kHz,这就是 SPWM 的高频载波 U_c 的频率;根据调制波 U_g 的频率为工频 50 Hz,得到频率比为 640,即每个 U_g 周期中包含 640 个 U_c 周期。设调制比 $m=0.92$,并考虑 SPWM 波形的过零补偿,得到产生 SPWM 脉冲所需要 OCR0A 的取值计算公式^[9]:

第 0~319 个脉冲:

$$OCR0A = 235 \sin \frac{N\pi}{320} \quad (3)$$

第 320~639 个脉冲:

$$OCR0A = 245 - 235 \sin \frac{(N-320)\pi}{320} \quad (4)$$

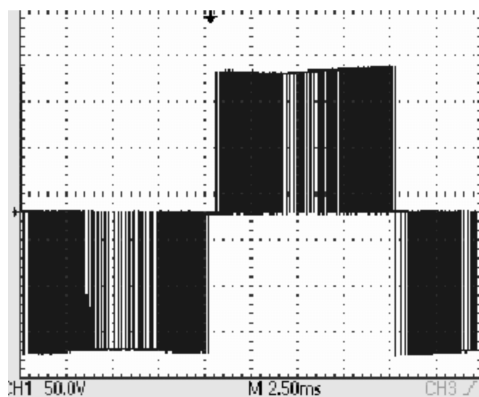
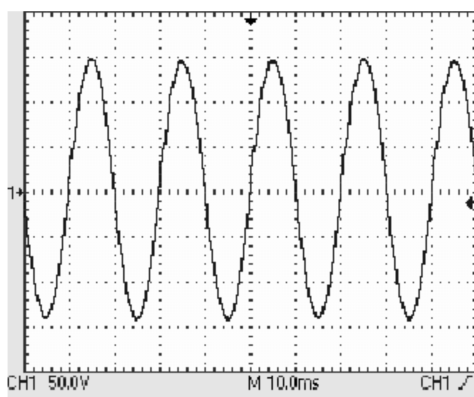
以上产生 SPWM 脉冲所需要的 OCR0A 值通过查表的方式得到,在 OCR0A 的值取零时,要进行修正,否则可能漏掉一个周期的波形。查表时以 N 为序数进行, N 从 0 开始取值,计数累加至 639 后又复位至 0。由于 SPWM 脉冲的频率较高,因此 PWM 中断应尽量减少操作指令,以免影响下一次中断的操作。

逆变电路采用电压前馈控制方式,通过采样直流母线电压,对 SPWM 波进行修正,实现输出电压的调节。对直流母线电压的采样、过压或欠压的判断、SPWM 值的修正都在主程序中完成。

3.2.3 实验结果

逆变电路输出的正弦交流电压波形如图 6 所示。

图 6(a)为逆变电路输出的电压波形,经过滤波电路后得到如图 6(b)所示的正弦波输出。设计滤波电路参数时要考虑充分衰减逆变电路输出的高频分量,而尽量保留其中的工频分量。由于本系统中高频载波与工频调制波的频率比很高,因此逆变器的滤波电路体积和重量都较小,适合便携的特点。

(a) 逆变电路输出电压波形 U_{ah} 

(b) 滤波后电压波形

图6 输出电压波形

Fig.6 Waveform of output voltage

4 结 语

便携式太阳能发电系统采用两级结构,前级直流变换电路采用推挽结构,由专用 PWM 芯片构成控制电路,控制精度高,生产成本低,电池电压和电路过流的监控由硬件实现,性能可靠;后级逆变电路采用全桥逆变结构,由单片机产生 SPWM 控制信号,并根据直流母线电压前馈调整 SPWM,中断程序简捷高效,硬件电路简单。因此,整个系统具有高效轻便的优点,适合野外作业的电气设备使用。

参考文献:

- [1] 雷永泉.新能源材料[M].天津:天津大学出版社,2002.
- [2] 周廷.PWM 光伏逆变电源 DC-DC 电路及最大功率点跟踪技术的研究[D].济南:山东大学控制科学与工程学院,2006.
- [3] 郑诗程.光伏发电系统及其控制的研究[D].合肥:合肥工业大学电气与自动化工程学院,2004.
- [4] RASHID M H.电力电子技术手册[M].陈建业,杨德刚,于歆杰,等译.北京:机械工业出版社,2004.
- [5] PRESSMAN A I.开关电源设计[M].王志强,王凡,任凌,等译.2版.北京:电子工业出版社,2006.
- [6] 范玲莉,邓焰,石健将.基于 LM25037 的车载逆变电源设计[J].电力电子技术,2009(6):61-63.
- [7] 林渭勋.现代电力电子电路[M].2版.杭州:浙江大学出版社,2007.
- [8] AtmelCorporation. 8-bit Microcontroller with 8K Bytes In-System Programmable Flash[EB/OL].(2009-07-09)[2009-10-07].http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf.
- [9] 邓嘉,张辉,马皓.基于 PIC 单片机车载逆变电源逆变器的研究[J].机电工程,2008(6):88-90.