

# 独立光伏系统具有高频环节逆变器研究与设计

方波<sup>1</sup>, 吕延会<sup>2</sup>, 张元敏<sup>1</sup>

(1. 许昌学院电气信息工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004)

**摘要:**以研制独立光伏系统逆变器为背景对具有高频DC/DC中间环节逆变器进行了研究和设计,采用了FB-PS-PWM ZVS技术,引入了新一代软开关控制器UCC3895,提出了互补型脉宽调制(CPWM)的单极性正弦逆变概念,并将SG3525引入SPWM逆变控制中。实验和仿真验证了设计思想和设计方案。

**关键词:**独立光伏系统; 高频环节; 逆变器; FB-PS-PWM; ZVS; CPWM

## Research and design of high frequency link inverter in stand-alone PV system

FANG Bo<sup>1</sup>, Lü Yan-hui<sup>2</sup>, ZHANG Yuan-min<sup>1</sup>

(1.School of Electric & Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000,China;  
2.Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004,China)

**Abstract:** The inverter with high frequency link is studied for the stand-alone PV system. The FB-PS-PWM ZVS technology is adopted, the new type of SMPS controller — UCC3895 is introduced into high frequency DC/DC link, the concept—complementary PWM unipolar sine inverting is put forward, and the controller—SG3525 is used in SPWM control. The design idea and scheme are tested and verified.

**Key words:** stand-alone PV system; high frequency link; inverter; FB-PS-PWM; ZVS; CPWM

中图分类号: TM91 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0061-05

## 0 引言

随着传统能源供应日趋紧张,太阳能光伏发电以其资源可再生、清洁无污染等优点受到了人们的高度重视,逆变器是光伏发电系统中的一个重要组成部分,但是传统逆变器一般采用工频变压器进行匹配和隔离,存在输出波形不理想、体积大、笨重、功率密度小、效率低等缺点。带高频环节逆变技术首先进行一次高频逆变、高频变压器升压隔离、整流滤波的DC/DC变换,然后再进行SPWM二次逆变,因在DC/DC变换中采用的是高频变压器,故重量、体积大为减小<sup>[1]</sup>。本文以中小功率光伏发电为应用背景,对具有直流中间环节的高频环节逆变技术在独立光伏系统中的应用进行了研究,文后给出了实验仿真结果。

## 1 中小功率独立光伏系统对逆变器的性能要求

中小功率(1 kWp左右)独立光伏系统对逆变

器有特殊的技术性能要求<sup>[2-4]</sup>:

- 1) 逆变器输入有较宽的电压适应范围,输出有较高的电压稳定度;
- 2) 逆变器输出为标准正弦波,谐波畸变要小,同时为方便家庭应用,要求逆变器体积小、重量轻;
- 3) 为了最大限度地利用太阳能电池提高系统效率,必须设法提高逆变器的效率;
- 4) 作为独立光伏系统中处理负载功率的核心部件,逆变器应具备较强的抗干扰能力和瞬时过载能力以及各种保护功能。

## 2 具有高频环节逆变器主要技术性能指标

本文所设计光伏逆变器主要性能指标如下:

- 1) 额定容量: 1 kWp;
- 2) 输入DC: 额定电压值48 V,变化范围41~59 V;
- 3) 输出AC: 频率50 Hz,额定电压值220 V,电压稳定度 $\leq 2\%$ ,输出正弦波形畸变率 $< 5\%$ ;
- 4) 效率:  $\geq 90\%$ ;
- 5) 具有输出短路保护、过流保护、过压保护、

欠压保护、过热保护等。

### 3 具有直流中间环节的高频环节逆变器组成原理

具有直流中间环节的高频环节逆变器主要由 DC/DC 变换电路和 DC/AC 电路两大部分组成，其电路结构如图 1 所示， $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$  组成一次全桥逆变电路， $Q_5$ 、 $Q_6$ 、 $Q_7$ 、 $Q_8$  组成二次全桥逆变电路，其工作原理是：低压（48 V）的直流电源经

过一次高频逆变电路变为高频方波，高频变压器 T 进行隔离升压， $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$ 、 $L_2$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  组成高频全桥整流滤波电路，二次逆变电路将高压直流（315 V）逆变成高压 SPWM 波， $L_3$ 、 $C_4$  组成的低通滤波器滤除高次谐波后输出 220 V 工频正弦交流电。虚线框内分别为 DC/DC 变换电路和 DC/AC 电路的控制电路框图。本文中高频变压器变比  $n=1:8$ ，额定工作条件下占空比  $D \approx 82\%$ ，最大占空比  $D_{max} \approx 95\%$ 。

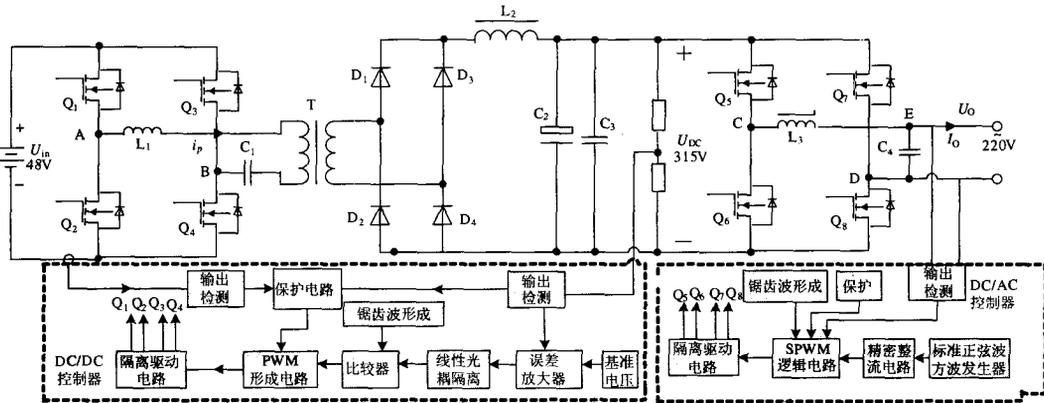


图 1 高频环节逆变器组成原理图

Fig.1 Schematic diagram of high frequency link inverter

### 4 具有直流中间环节的高频环节逆变器电路设计

#### 4.1 DC/DC 升压变换器电路设计<sup>[5-7]</sup>

DC/DC 升压变换器主电路采用全桥拓扑移相软开关工作方式，控制电路如图 2 所示，控制核心采用新一代 FB-PS-PWM ZVS DC/DC 变换器专用控制芯片 UCC3895，线性光耦隔离闭环控制，高频逆变环节开关频率设为  $f_s = 60 \text{ kHz}$ 。

##### 4.1.1 时钟与开关频率设定

控制器时钟由 UCC3895 的 CT(7 脚)外接电容  $C_2$  和 RT(8 脚)外接电阻决定，振荡频  $f_{osc} = 2f_s$ ，则外接定时电阻 RT 由下式确定：

$$R_T = \left( \frac{1}{f_{osc}} - 120 \times 10^{-9} \right) \cdot \frac{48}{5C_2} \quad (1)$$

##### 4.1.2 自适应死区时间设置

自适应死区时间设置功能是 UCC3895 对 UC3875(79)的重要改进，它能够根据主电路工作电流大小的变化实时改变死区时间，从而特别有利于滞后桥臂在不同负载条件下实现开关管的 ZVS。死区时间  $t_d$  与 ADS、CS 以及 DELAB、DELCD 脚有关，取  $R_4 = R_5 = R_d$ ，则：

$$t_d = \frac{25 \times 10^{-12} R_d}{0.75(U_{CS} - U_{ADS}) + 0.5} + 25 \times 10^{-9} \quad (2)$$

式中： $U_{CS}$  为 DC 输入母线电流取样值， $U_{ADS}$  为  $R_6$ 、 $R_7$  对  $U_{CS}$  的分压。

##### 4.1.3 光耦隔离电压反馈设计

电压反馈采用可调分流基准源 TL431 进行误差放大和调节，采用线性光耦 PC817A 进行电气隔离。

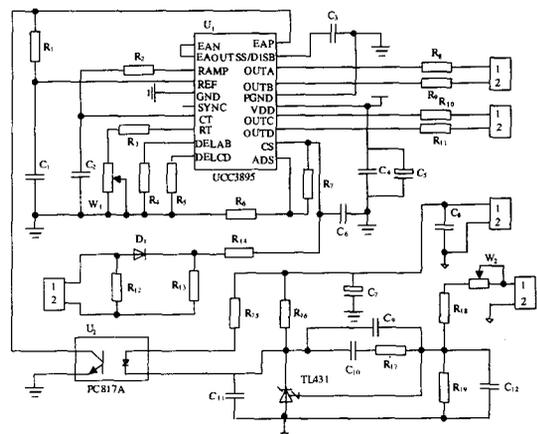


图 2 DC/DC 升压变换器控制电路

Fig.2 Control circuit of DC/DC converter

(1) 静态电路参数设计

根据数据手册, TL431 阴极工作电压  $U_{KA}: 2.5V$  (基准)  $\sim 37V$ , 阴极工作电流  $I_K: 1 \sim 100mA$ , 基准输入电流范围:  $-50\mu A \sim 10mA$ , 输出电压  $U_O$  由下式给出:

$$U_O = 2.5(R_{18} + R_{19} + R_{W2}) / R_{19} \quad (3)$$

PC817A 输入端正向工作电流  $I_F: 1 \sim 50mA$ , 输出端正向工作电流  $I_C: 1 \sim 50mA$ , 电流传输率  $CTR: 80\% \sim 160\%$ , 给定  $I_F$ 、TL431 阴极电流  $I_K$  和  $R_{15}$ , 则:

$$R_{16} = (I_F R_{15} + U_F) / (I_K - I_F) \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{U_O(s)}{U_{KA}(s)} = \frac{1 + R_{17} C_{10} s}{(R_{18} + R_{W2})(C_9 + C_{10})s [1 + R_{17} C_9 C_{10} s / (C_9 + C_{10})]} \quad (6)$$

式中:  $R_{18}$ 、 $R_{W2}$  已由静态设计确定,  $R_{17}$ 、 $C_9$ 、 $C_{10}$  则根据控制环路动态特性确定, 通常有  $C_9 \ll C_{10}$ 。一般补偿网络的设计原则是: 系统有足够的稳定裕度, 无静差, 有较快的响应速度, 对高频干扰特别是由开关过程所引起的开关频率附近的噪声有较强的抑制能力。

4.2 DC/AC 逆变电路设计

相同条件下 SPWM 单极性控制比双极性控制的输出电压的频谱有所改善, 为满足逆变器对输出波形质量的要求, 本文采用单极性控制方式。

4.2.1 单极性控制方案的确定

单极性控制方式一般有 UPWM(普通型单极性)和 HPWM(混合型单极性)两种<sup>[8]</sup>, UPWM 方式适用于阻性负载应用, HPWM 适应于任意性质负载, 但实现起来相对复杂, 本文提出一种新型单极性正弦脉宽调制控制方式——Complementary PWM (CPWM), 即互补型控制方式。根据图 1 中由  $Q_5$ 、 $Q_6$ 、 $Q_7$ 、 $Q_8$  组成的全桥逆变拓扑, CPWM 控制方式的原理如图 3 所示。

UCC3895CT 输出锯齿波电压变化范围为  $U_{CTmin} \sim U_{CTmax}$ , 额定工作时(占空比  $D=D_0$ )  $R_1$  的取值应使光耦输出电压:

$$U_{CE(opto)} = (U_{CTmax} - U_{CTmin}) D_0 + U_{CTmin} \quad (5)$$

(2) 动态电路参数设计

DC/DC 闭环系统的动态性能主要由图 2 中  $R_{17}$ 、 $C_9$ 、 $C_{10}$  等元件决定。在进行动态小信号设计时, TL431 可等效为一个集成运放, 和其外接反馈元件一起构成闭环控制补偿网络。其传递函数为:

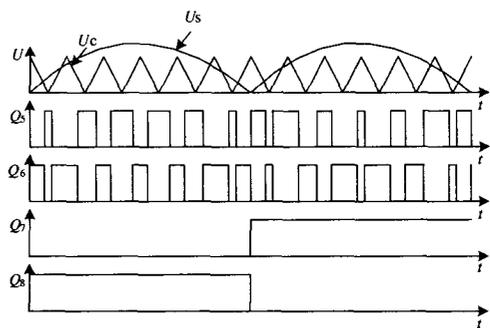


图 3 CPWM 单极性控制方式

Fig.3 CPWM unipolar control mode

CPWM 控制方式中同一桥臂的两个开关管的开通与关断是互补的, 它综合了 UPWM 和 HPWM 二者的优点, 既适应于任意性质负载, 实现起来又较简单, 同时与 HPWM 相比, 其中一个桥臂(低频桥臂)两个开关管的使用寿命大为延长。

4.2.2 基于 SG3525 和 CPWM 控制方式的 DC/AC 逆变电路设计

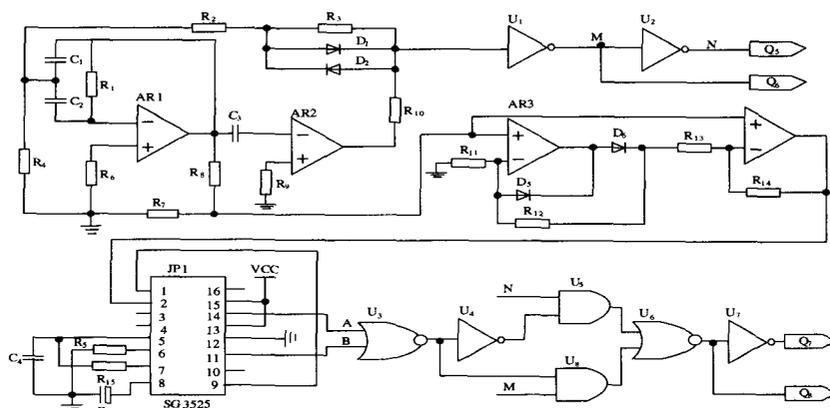


图 4 基于 SG3525 的 CPWM 单极性控制方式实现电路

Fig.4 Circuit of CPWM unipolar control mode based on SG3525

目前专用于单相 SPWM 逆变的控制器件很少,

虽然采用单片机等技术可实现 SPWM 所需的控制

波形,但实现起来相对较复杂,成本较高。本文引入常规 PWM 控制芯片 SG3525,通过外接逻辑电路实现对逆变电路的 CPWM 单极性控制,电路设计如图 4 所示。图中,AR1、AR2 构成正弦波、方波发生器,振荡频率为  $f = 50 \text{ Hz}$ 。AR2 输出的 50 Hz 方波由 U1、U2 倒相输出互补信号 M 和 N,经死区形成和隔离放大作为低频桥臂  $Q_7$ 、 $Q_8$  的驱动信号。AR3、AR4 构成精密整流电路,SG3525 将精密整流输出的单向正弦波与自身产生的锯齿波比较,形成两路 PWM 信号,U3、U4、U5、U6、U7 组成的逻辑电路将其合成 CPWM 控制方式所需的高频桥臂 ( $Q_5$ 、 $Q_6$ ) 的互补驱动信号。SG3525 控制芯片的引入,使得 SPWM 控制电路的设计得到简化,并能方便地实现软启动、闭环控制和各种保护功能。

### 5 具有直流中间环节的高频环节逆变器电路实验与仿真结果

本文对上述设计方案进行了实验和仿真,实验条件为:输入 DC 48 V,输出 AC 220 V,输出有功功率 1000 W,一次逆变频率 55.5 kHz,SPWM 逆变载波频率 9.6 kHz,载波比 192。图 5 (a) 为高频环节逆变器中 FB-PS-PWM DC/DC 变换器主变压器原边电压实验波形,图 5 (b)、(c) 分别为 DC/DC 变换器超前桥臂和滞后桥臂实现 ZVS 的实验波形。

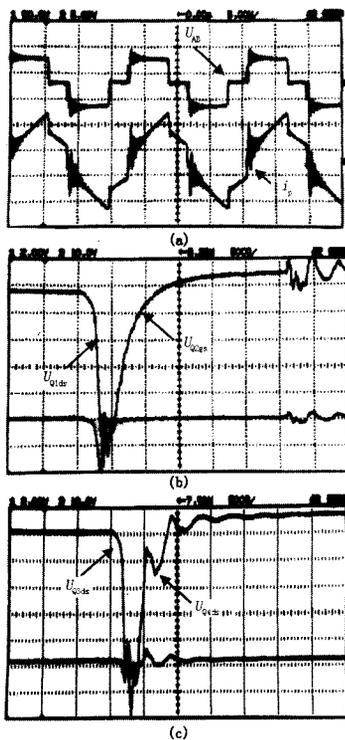


图 5 FB-PS-PWM DC/DC 变换器主要实验波形

Fig.5 Main test waveforms of FB-PS-PWM DC/DC converter

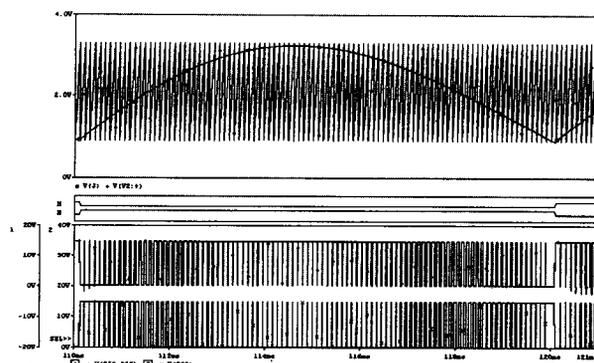


图 6 DC/AC CPWM 控制方式仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of DC/AC CPWM control mode

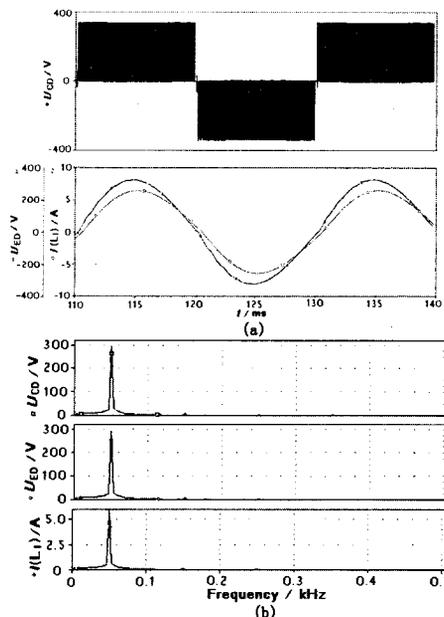


图 7 SPWM 电压波形、逆变器输出正弦电压和电流波形及频谱图

Fig.7 Waveforms and frequency spectrums of SPWM voltage, output voltage and current of inverter

图 6 为 DC/AC 逆变器基于 SG3525 的 CPWM 控制方式 PSpice9.1 仿真实验波形,图中曲线从上到下依次为锯齿载波、调制正弦波、低频 (50 Hz) 桥臂驱动逻辑信号、高频 (9.6 kHz) 桥臂 SPWM 驱动信号波形。图 7(a)、(b) 分别为逆变器输出 SPWM 电压波形、逆变器输出正弦电压波形和电流波形和频谱图。仿真实验结果表明,当负载为阻感负载 ( $R_L = 50 \Omega, L_L = 20 \text{ mH}$ ) 时,负载电流滞后输出电压,但逆变输出电压、电流畸变仍然都很小,逆变器仍能以良好的性能正常工作,波形畸变率分别为 3.63% 和 3.33%。

## 6 结论

本文以研制户用 1 kWp 独立光伏电源系统为背景,综合采用高频软开关技术和 SPWM 技术,对高性能光伏逆变器——具有直流中间环节的高频环节逆变器进行了研究和设计,在设计中采用了移相全桥 PWM 软开关技术,引入了新一代软开关控制器——UCC3895,首次提出了互补型脉宽调制(CPWM)的单极性正弦逆变概念,并将 SG3525 引入 SPWM 逆变控制中,不仅使得逆变器的设计大为简化,而且使逆变器性能卓越、功能完善。实验和仿真表明,上述设计思想是正确的,设计方案是可行的。

### 参考文献

- [1] 刘凤君.现代逆变技术及应用[M].北京:电子工业出版社,2006.  
LIU Feng-jun. Modern Inverting Technology and Its Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2006.
- [2] 王长贵,王斯成.太阳能光伏发电实用技术[M].北京:化学工业出版社,2005.  
WANG Chang-gui,WANG Si-cheng. Applied Techniques of Solar Energy Photovoltaic Generation[M]. Beijing: Publishing House of Chemistry Industry, 2005.
- [3] 沈辉,曾祖勤.太阳能光伏发电技术[M].北京:化学工业出版社,2005.  
SHEN Hui, ZENG Zu-qin. Techniques of Solar Energy Photovoltaic Generation[M]. Beijing: Publishing House of Chemistry Industry, 2005.
- [4] 赵争鸣,刘建政,等.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.  
ZHAO Zheng-ming,LIU Jian-zheng,et al. Solar Power Photovoltaic Generation and Its Applications[M]. Beijing: Science Press,2005.
- [5] BiCMOS Advanced Phase Shift PWM Controller [EB/OL].Unitrode Products from Texas Instruments SLUS157B,1999.
- [6] UCC3895 Phase Shift PWM Controller EVM Kit Setup and Usage[EB/OL]. User Guide of Unitrode Products from Texas Instruments SLUU069A, 2000.
- [7] Erichson R W, Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics (Second Edition)[M]. New York: Kluwer Academic Publisher,2000.
- [8] 胡兴柳,彭小兵,穆新华.SPWM 逆变电源的单极性控制方式实现[J].机电工程,2004,21(1):38-41.  
HU Xing-liu,PENG Xiao-bing,MU Xin-hua. A Unipolar Method is Applied in SPWM Inverter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2004,21(1):38-41.
- [9] 刘胜利.现代高频开关电源实用技术[M].北京:电子工业出版社,2001.  
LIU Sheng-li. Applied Techniques of Modern High Frequency Power Supply[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2001.

收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-03-13

作者简介:

方波(1973-),男,硕士,讲师,研究方向为电力电子与高频开关电源技术; E-mail: fangboxc@126.com

吕延会(1963-),男,副教授,研究方向为电力电子;

张元敏(1963-),男,副教授,研究方向为电力电子。

## “中国电力系统保护与控制学术研讨会”预通知

“中国电力系统保护与控制学术研讨会”预定于 2008 年 10 月 19 日—22 日(19 日报到)在山东烟台隆重召开,敬邀各单位和专家向大会投稿并届时参加。

**会议征文内容:** 超(特)高压交直流输电技术研究与应用;电力系统保护与控制的新理论、新技术;电力系统安全稳定分析与控制;电力系统规划与可靠性技术;电力市场;配电网自动化;厂、站自动化;调度自动化;电力系统通信技术;电气化铁道保护与控制技术;电网广域保护与自愈控制;数字化变电站技术研究;电力设备检测与故障诊断技术;电力电子技术在电力系统的应用;保护与控制设备运行经验与事故分析;保护与控制设备制造技术及电磁兼容;其他。

**会议征文办法:** 论文必须未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过;论文格式参照《继电器》论文格式,图表清晰、规范;论文篇幅在 6000 字以内(含空格,图表);来稿请务必写明:作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件;请用电子邮件投稿并使用回执确认收到投稿。

征文截止日期: 2008 年 8 月 15 日,经专家评审后,由《继电器》杂志社在 8 月 31 日前发论文录用通知,并出版论文集。投稿邮箱: dlbh2008@126.com ; dlbh@dlwg.net

地址: 河南省许昌市许继大道 32 号; 邮编: 461000

联系电话: 0374-3212254 0374-3212234