

3 kW 光伏并网逆变器硬件设计

梁雪峰, 曾国宏, 姜久春
(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 基于光伏并网逆变器的基本原理和控制策略, 提出了 3 kW 单相光伏并网逆变器的硬件设计方案。详细介绍了主电路参数设计和控制电路设计方法。样机实验结果表明, 该硬件系统很好地满足了逆变器的设计要求。

关键词: 太阳能; 发电; 逆变器 / 光伏; 并网

中图分类号: TM46; TM615

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)08-0028-02

Design of Hardware System for 3 kW Single-phase Photovoltaic Grid-connected Inverter

LIANG Xue-feng, ZENG Guo-hong, JIANG Jiu-chun

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper presents the design of hardware system for the 3 kW single-phase photovoltaic grid-connected inverter based on the basic principle and control of the inverter. The control system and parameter design are introduced.

Experiments prove that the hardware system can be well applied in photovoltaic grid-connected inverter system.

Keywords: solar energy; power generation; inverter / photovoltaic; grid-connected

1 引言

在世界电能需求不断增长的今天, 光伏发电技术日益受到重视。光伏发电系统主要有独立运行模式和并网发电模式两种。后者与前者相比, 省掉了体积大, 价格高, 不易维护的蓄电池, 具有造价低, 输出电能稳定的优点, 因而市场前景更为广阔。作为并网发电系统中的重要环节, 光伏并网逆变器实现了光伏阵列最大功率点跟踪, 并通过控制算法将电能送入电网, 使逆变器向电网传送的功率与光伏阵列所发出的最大功率相平衡。

逆变器的控制需要性能良好的硬件来支撑, 为此提出了一种 3 kW 单相光伏并网逆变器的硬件设计方案, 采用该方案的并网逆变器具有工作稳定, 频率高, 体积小, 谐波含量小等特点, 从而为中小功率并网逆变器的设计提供了一种参考方案。

2 太阳能并网逆变器系统组成

图 1 所示的 3 kW 单相光伏并网逆变器系统由功率主电路、控制器、驱动电路、检测电路等组成。其中, 功率主电路采用 DC/DC、DC/AC 两级结构, 控制环节以 DSP 为控制核心, 一方面控制 DC/DC 环节, 以实现光伏电池的最大功率点跟踪, 另一方面控制 DC/AC 环节, 以使直流母线电压稳定, 并将电能转化为 220 V/50 Hz 正弦交流电。系统保证并网逆变器输出的正弦电流与电网的相电压同频同相。

逆变器并网时, 要求其输出电流与电网电压同频同相。忽略电网侧滤波电感 L_2 和线路的等效电

阻, 逆变器输出侧电压矢量图如图 2 所示。

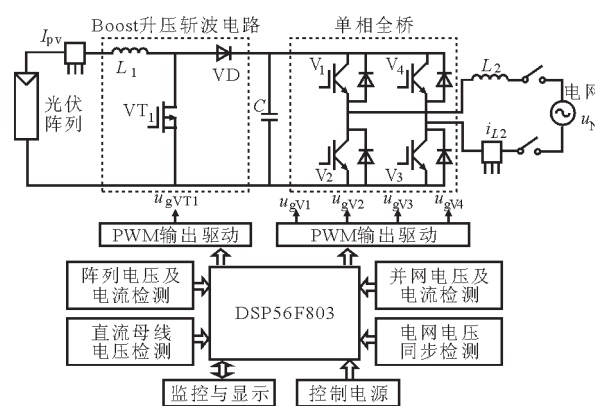
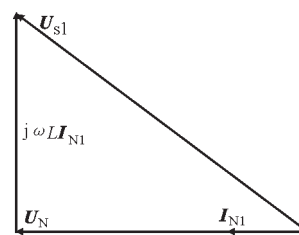


图 1 并网逆变器系统结构



U_{s1} 为输出电压的基波分量

I_{N1} 为输出电流的基波分量, U_N 为电网电压矢量

图 2 逆变器并网矢量图

3 主电路参数设计

该并网逆变器的输入电压范围为 125~600 V, 最大输入电流为 15 A, 额定功率为 3 kW。主电路 DC/DC 部分选用的开关频率为 20 kHz, DC/AC 部分选用的开关频率为 16 kHz。以下分别讨论开关管的选型, 直流母线支撑电容 C、电网侧滤波电感 L_2 和升压电感 L_1 的设计方法。

3.1 开关管选择

光伏阵列的输入电压范围为 125~600 V。系统

定稿日期: 2008-05-12

作者简介: 梁雪峰(1983-), 女, 广西人, 硕士研究生。研究方向为电力电子与电力传动。

DC/DC 部分采用 Boost 电路,DC/AC 部分采用单相全桥逆变电路。Boost 电路的开关管选用带反并联二极管的 MOSFET 管,且双管并联,同步驱动,可以实现均流。在太阳能电池板反接情况下,反并联二极管可以提供通路,不至于损坏开关管。MOSFET 选用 IXFH30N60P,其耐压为 600 V,额定电流为 30 A,导通电阻为 0.16 Ω ,反向恢复时间 t_{rr} 250 ns。选择 TO-247 封装的 APT40GP90B2D1 型 IGBT 作为单相全桥的开关管,其耐压为 900 V,额定电流为 50 A。

3.2 直流母线支撑电容设计

在稳态时,馈入电网的交流电为 100 Hz 的脉动正弦波,即在正半周输出一次功率,负半周又输出一次功率。为了将光伏阵列发出的平稳的直流功率变换为并网发电所需要的交流波动功率,两者之间需要一个大容量电容或电感,作为储能装置。设计中采用电容作为中间储能装置。电容计算方法^[1]为:

$$\begin{cases} \Delta u_c = \frac{1}{C} \int \frac{\Delta P}{U_{link}} dt = \frac{UI}{2\omega U_{link} C} \sin(2\omega t) \\ C = \frac{P_{av}}{\omega U_{link} \Delta u_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中 Δu_c 为直流支撑电容波动电压值; ΔP 为功率波动值; P_{av} 为输出平均功率; ω 为角频率,表示电容上电压的波动; U_{link} 为直流母线电压。

设计电压在 $\pm 0\%$ 内波动,计算可得 $C=1200 \mu F$ 。在实际设计过程中,选择三组电容并联,每组由两个 $1000 \mu F/300V$ 的电解电容串联,总容量为 $1200 \mu F$ 。

3.3 电网侧滤波电感 L_2 设计

滤波电感值可直接影响纹波电流 Δi 的大小。根据电流纹波要求,设 L_2 端电压为 $u_{L2}(t)$,当输出电压接近峰值,即 u_{L2} 等于电网电压峰值 U_{Nmax} 时,输出电流纹波最大,有:

$$L_2 = \frac{U_{Nmax} T (U_d - U_{Nmax})}{\Delta i U_d} \quad (2)$$

式中 T 为开关管的开关周期; D 为占空比。

设电流纹波系数为 r_i ,要保证实际电流纹波 $\Delta i = r_i I_{Nmax}$,则滤波电感应满足:

$$L_2 = \frac{U_{Nmax} T (U_d - U_{Nmax})}{r_i I_{Nmax} U_d} \quad (3)$$

根据并网矢量关系,则关系式为:

$$U_N^2 + (\omega L_2 i_N)^2 = U_s^2 \quad (4)$$

设 α 为调制比,且 $\alpha < 1$,即有:

$$U_s = \alpha U_d \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得:

$$L_2 = \sqrt{U_d^2 - U_N^2} / (\omega i_N) \quad (6)$$

综合式(3)和式(6)可得滤波电感取值范围为:

$$\frac{U_{Nmax} T (U_d - U_{Nmax})}{r_i I_{Nmax} U_d} \leq L_2 \leq \frac{\sqrt{U_d^2 - U_N^2}}{\omega i_N} \quad (7)$$

文中设计 $U_{Nmax}=311V$, $I_{Nmax}=22A$,开关频率 $f_s=$

$16kHz$, $T=62.5 \mu s$,设 $r_i=0.15$,计算得 $1.3mH \leq L_2 \leq 71mH$,在实际设计过程中,由于电感的体积、成本等因素的影响,一般只需考虑 L_2 值稍大于下限值即可,最终选取 $L_2=1.5mH$ 。

3.4 升压电感 L_1 设计

对变换器而言,当电源电压下降时,为了使输出电压稳定,控制线路总是尽量增大占空比 D ,使电压增益变大以维持输出电压恒定。但在考虑变换器的寄生电阻时,则 D 值有一个限定,当 D 超过该值时,输出电压不仅不增加,反而会减小,在实际应用中升压变换器的最大占空比 D_{max} 都在 0.88 以内。同时 L_1 的选择还要满足纹波的要求,计算公式为:

$$\begin{cases} D_{max} = \frac{U_{link} - U_{pv}}{U_{link}} < 0.88 \\ L_1 = \frac{U_{pv} D_{max}}{f \Delta i} \end{cases} \quad (8)$$

式中 U_{pv} 为光伏阵列输出电压; f 为开关频率。

根据输入电压范围 $125\sim 600V$, $f=20kHz$,计算得 $L_1=1.5mH$,实际设计中取 $L_1=1.5mH$ 。

4 控制电路设计

光伏并网控制主要涉及功率点控制和输出波形控制两个闭环控制环节^[2]。根据光伏阵列的输出特性,一般采取最大功率点跟踪(MPPT)技术,以实时调整光伏电池的工作点,使之始终工作在最大功率点附近。这里,输出波形控制方式采用了单周数字控制算法^[3]。控制电路框图如图3所示。

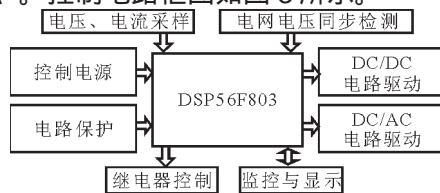


图3 控制电路框图

为了保证逆变器正常工作,需要设计诸如输入侧的接地、漏电流检测、开关管过流等保护电路。

4.1 控制核心芯片选择

控制电路板将 DSP 强大的运算能力与 CPLD 的逻辑运算功能相结合,综合使用 DSP 和 CPLD 作为控制核心,开发了丰富灵活的外围电路。DSP 芯片采用了哈佛结构的 DSP56F803^[4],CPLD 采用型号为 XC95144XL 的高性能低电压可编程逻辑器件。

DSP56F803 的地址线 A6 模式设置为通用输入输出,作为 XC95144XL 的复位控制。当开关管短路或电路过压时,CPLD 自动封锁 6 路 PWM 输出信号,同时触发 DSP 外中断,直到 DSP 发出解锁命令时将驱动芯片 IR2113 的 SD 端口电平拉低,允许输出驱动信号,实现了可靠保护,CPLD 通过低位数据线 D0-D7、低位地址线 A0-A3 和数据选择信号,扩展了 DSP 数据总线。

(下转第 78 页)

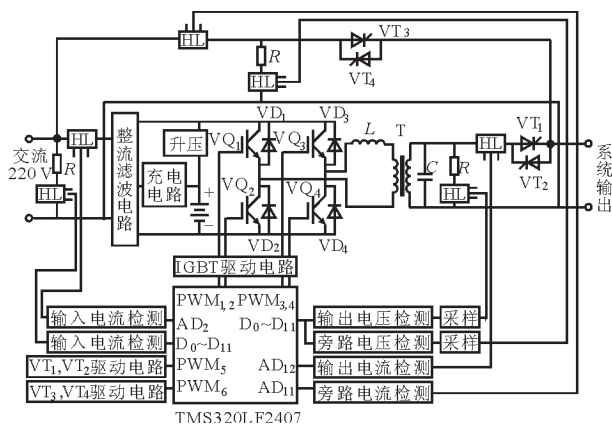


图 4 在线式 UPS 实验系统简化原理图

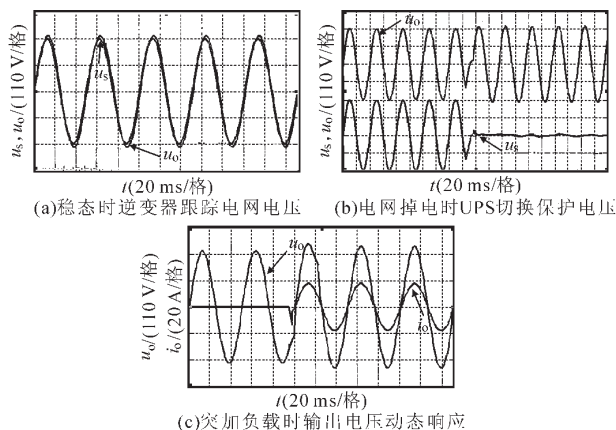


图 5 实验波形

(上接第 29 页)

4.2 驱动电路设计

图 4 示出基于 IR2113 芯片的驱动电路。将 IGBT 接成桥臂的形式，要求上桥臂的 IGBT 驱动电路不能与下桥臂的 IGBT 驱动电路共地。

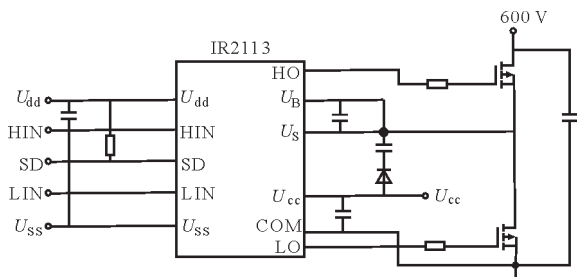


图 4 IR2113 驱动电路

升压电路和单相逆变器均采用 IR2113 作为驱动芯片^[9]。图中 LO 和 HO 分别为低压侧通道和高压侧通道的输出端，SD 为关闭功能引脚。当 SD 端输入为逻辑高电平信号且持续时间大于 500 ns 时，IR2113 将同时关闭 LIN 和 HIN 两路输入信号。

5 实验结果及结论

根据上述分析，设计了样机并进行了实验。图 5 和图 6 示出 DSP 输出的全桥逆变驱动信号和逆变器并网波形。由图 5a 可见，同一桥臂驱动信号互补导通，全桥对管驱动信号一致，开关频率 16 kHz。

响应波形，可见 u_o 波动小，恢复时间小于 40 ms。

采用上述控制方案后， u_o 与 u_s 保持精确同步； u_o 的总谐波畸变率小于 3%，单次谐波畸变率小于 2%；突加负载时输出电压波动不大于 $\pm 10\%$ （额定值），频率波动不大于 $\pm 0.1\%$ （额定值），恢复时间小于 0.1 s；电网供电切换到 UPS 的供电的时间小于 20 ms，满足各项性能指标要求。

5 结论

设计的数字化在线式 UPS 系统以 DSP 作为主控芯片，采用嵌入式重复控制和比例控制相结合的控制方案，其结构紧凑，可靠性高，成本低，调试方便，体现了数字控制的优势。该系统具有很强的跟踪市电及对负载不间断供电的能力。

参考文献

- [1] 高军, 黎辉, 杨旭, 等. UPS 逆变器数字化控制技术[J]. 电工技术杂志, 2001 (12): 6-9.
- [2] 黄婷, 杨富文. UPS 系统的控制技术研究[J]. 福建电脑, 2003, (9): 27-29.
- [3] 李鹏. 在线式 UPS 原理与使用[J]. 西部广播电视, 2001 (10): 35-37.
- [4] Kai Zhang, Yong Kang, Jian Chen. Direct Repetitive Control of SPWM Inverter for UPS Purpose[C]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18 (3): 784-791.

图 5b 中，逆变器输出电流 $i_N(t)$ 与电网电压 $u_N(t)$ 同频同相，实现了能量回馈电网。实验结果表明，硬件设计符合逆变器并网要求，是光伏并网逆变器硬件设计的一种可行方案。

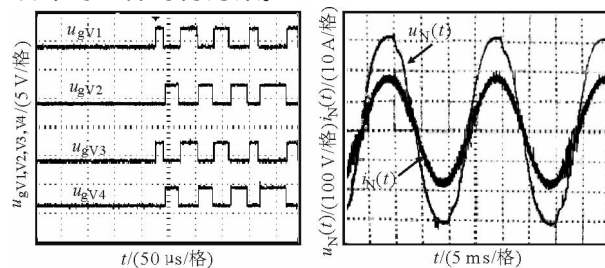


图 5 实验波形

参考文献

- [1] 陈兴峰, 曹志峰, 焦在强, 等. 基于 DSP 的 20 kW 单相并网光伏逆变器[J]. 电气应用, 2005, 24 (8): 53-55.
- [2] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 胡荣强, 姜久春, 王健强, 等. 单周数字控制光伏并网逆变器设计[J]. 电力电子技术, 2008, 42 (1): 30-31.
- [4] 邵贝贝, 龚光华, 刘永毅, 等. Motorla DSP 型 16 位单片机原理与实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 张维, 刘开绪. 基于 IR2113 的静电高压直流电源电路设计[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2006, 22 (2): 61-64.