

3 kW 家用单相光伏并网逆变系统设计*

荆红莉 蒋晓雁 赵鹏
(榆林学院 榆林 719000)

摘要: 为了有效利用太阳能,缓解供电压力,本文提出了适用于家用的 3 kW 小功率单相光伏并网发电系统的设计方案;介绍了光伏并网逆变系统的组成;通过理论分析、计算确定了各部分电路主要元器件的参数;采用电流跟踪的控制策略设计了 PI 控制的电压、电流双闭环控制系统;利用 MATLAB 仿真软件对系统进行了建模、仿真。通过仿真实验,验证了该系统能在光照扰动的情况下迅速的跟踪最大功率点,系统并网电流能与电网电压保持同频同相,实现高功率因素的并网要求。

关键词: 并网逆变;LC 滤波器;双闭环控制;仿真

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4034

Design of 3 kW single-phase grid-connect photovoltaic inverter system for household

Jing Hongli Jiang Xiaoyan Zhao Peng
(Yulin University, Yulin 719000, China)

Abstract: In order to effectively utilize solar energy and alleviate the pressure of the power supply, this paper put forward a scheme which suitable for household 3 kW single-phase grid-connected photovoltaic inverter system. The main components parameters of each part of circuits were determined by theory analysis and calculation. And double closed loop control system was designed using the current tracking control strategy. The model of whole system is presented by MATLAB. Simulation experiments proved that this system could rapidly track the maximum power point in the case of light disturbance and the output current of this system could change to follow with power grid voltage. Two parameters keep the same frequency and same the phase. The whole system achieved high power factor to the grid.

Keywords: grid-connected inverter; LC filter; double-loop controller; simulate

1 引言

太阳能发电作为一种全新的电能生产方式,具有清洁环保、资源永不衰竭且维护简单等特点,因而越来越受到广泛关注。美国参议院批准通过的“千万屋顶计划”,日本的“低碳行动计划”,德国的“上网发电”等无不表明世界各国都在优先发展自己的光伏发电技术。我国对大功率光伏发电系统的研究比较少,技术稍显落后。但我国西部光照资源丰富,因此发展户用型小功率光伏并网发电系统对有效利用太阳能,缓解供电压力具有重要的实际意义。而逆变器是实现光伏并网的核心设备之一,其性能的优劣将直接影响并网效果,本课题给出了家用小功率光伏发电系统的设计方案,重点对两级非隔离并网逆变器进行了研

究,通过分析、计算确定了逆变器各部分电路的参数并对逆变器的控制方法进行了设计。

2 家用并网光伏系统组成

户用小功率光伏并网系统,设计为非隔离式两极光伏逆变系统,其硬件结构如图 1 所示。它是一个可实现单相逆变、带储能环节的可并网光伏发电系统。该系统可根据实际需要实现独立和并网工作两种工作模式。白天光照充分的情况下光伏组件发电,通过 DC-DC 变换器实现 MPPT 及直流升压作用,将光伏阵列输出的电能变换为稳定的直流电,并通过单相逆变桥及滤波电路将直流电转化成符合并网标准的交流电。图 1 中控制器及储能装置的主要作用是当光伏系统受外界因素的影响很大时,采用储

收稿日期:2015-09

* 基金项目:陕西省教育厅科研(14JK1865)、榆林学院高层次人才科研启动基金(14GK33)项目

能装置将电能储存起来,这不仅可以使系统更加稳定的运行,而且有利于能量回馈的控制^[1]。

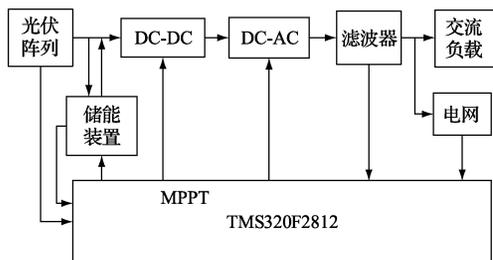


图1 家用光伏并网系统组成

3 光伏并网系统的设计

3.1 光伏阵列设计

系统的光伏阵列是由16块型号为RX-DBG的单晶硅光伏组件组成。其具体参数为:最大输出功率190 W,最佳工作电压36 V,工作电流5.2 A,开路电压44 V,短路电流5.8 A。光伏阵列采用8串2并的拓扑结构,系统最高工作电压288 V,最大工作电流10.4 A,开路电压352 V,短路电流11.6 A。根据允许载流量,可选择光伏专用电缆YJVR22-2×2.5 mm²将光伏组件连接至汇流箱^[2]。

3.2 DC-DC升压电路设计

升压部分采用Boost变换电路,通过对Boost电路的设计完成直流电压的变换及MPPT功能。改变Boost电路主开关的占空比即可改变太阳能电池的输出电压,从而实现MPPT功能。根据Boost电路的参数计算公式以及系统的电流纹波要求可得:

$$L_b \geq \frac{4U_{dc}^2 \cdot T}{27\eta P_{pv}} \quad (1)$$

式中: P_{pv} 为光伏阵列输出功率, η 为电流纹波系数,取值0.2。

3.3 逆变电路的设计

逆变器采用单相全桥结构,其中4个主开关采用相同型号IGBT。并网逆变器输出功率为3 kW,考虑具备1.1倍的过载能力,流过IGBT的最大电流为15 A,则流过开关管的最大峰值电流为21.21 A。如考虑到安全余量、寄生参数的影响,选择功率开关管的耐流值为50 A以上,耐压值应大于800 V。

3.4 LC滤波器的设计

对于大功率的逆变装置,开关频率不高,所以选用LCL型滤波器进行滤波;而针对本设计3 kW的中小功率的逆变器,由于开关频率较高,因此采用LC滤波器以降低滤波器体积的和损耗。

1) 滤波电感的设计

纹波电流 ΔI 一般取峰值电流的0.15~0.2倍,本设计取0.15。设输出电压为 U_o , 开关管开关周期为 T , 占空

比为 D 则:

$$\Delta I = 0.15 \times \frac{\sqrt{2}P}{U_o} \quad (2)$$

根据电感量的计算公式:

$$\Delta I = \frac{(U_{dc} - U_o) \times U_o}{Lf_c U_{dc}} \quad (3)$$

当 $U_o = U_{dc}/2$ 时,纹波电流有最大值 $U_{dc}/4L_{fc}$, 所以取:

$$L \geq \frac{U_{dc}}{4f_c \Delta I_m} \quad (4)$$

设计中,纹波电流 ΔI 取3 A, 开关频率 $f_c = 20$ kHz, $U_{dc} = 550$ V, 由此可得滤波电感 $L = 2.3$ mH, 本设计取5 mH。

2) 滤波电容的设计

滤波电容和滤波电感共同作用,能够滤除输出电压中的高次谐波,保证THD在合理范围内。电感和电容构成的LC低通滤波器,一般设计其谐振频率为基波频率的10~20倍,本设计取15倍,则:

$$c = \frac{1}{L(2\pi f_0 \times 15)^2} = 9 \mu\text{F} \quad (5)$$

4 并网逆变器的控制策略

并网逆变器输出控制模式可以采用电流控制或电压控制。采用电压控制时,并网逆变相当于两个电压源并联,要实现并网电压与电网电压同步,必须采用锁相控制逆变电压的大小和相位,控制复杂且精度低,因此本设计中通过双闭环对并网逆变器输出电流及直流母线进行控制。

4.1 电流环的设计

电流环的目的是控制并网逆变器的输出电流,使其能够与电网电压同频同相,达到并网要求。控制方法是通过将给定的电流幅值信号乘以与电网电压同步的正弦信号作为电流的给定信号,并与逆变器输出电流相比较,其偏差经过PI调节后,与一定频率的三角波进行比较,产生控制逆变器开关的PWM信号。

逆变器输出侧交流电压与电流之间满足:

$$U_{ac} = U_g + L \frac{di_l}{dt} + i_l R \quad (6)$$

由式(16)得:

$$I_L = \frac{U_{ac} - U_g}{SL + R_L} \quad (7)$$

设 $G_1(S) = I_L / (U_{ac} - U_g) = 1 / (SL + R)$; 逆变桥在并网闭环中可以用一个惯性环节 $G_3(S) = K_w / (0.5\tau_s S + 1)$ 来等效^[3], τ_s 为三角载波周期; 由于电流环采用PI调节器, PI调节器的传递函数 $G_2(S) = (K_p^2 S + K_i^2) / S$ 由此可得电流环的控制如图2所示。图中 $G_5(S)$ 是引入的前馈环节, 如果使 $G_5(S) = 1 / G_3(S)$, 即可消除电网对输出电流的影响。

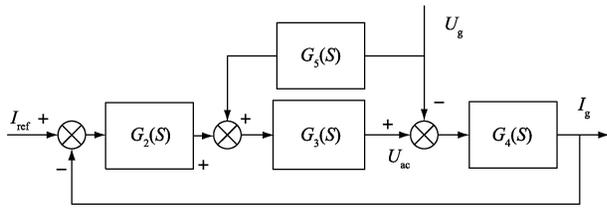


图2 电流环控制

由图可得电网电压与并网电流之间的传递函数为：

$$I_g = \frac{G_4(S)G_5(S)G_3(S) - 1}{1 + G_2(S)G_3(S)G_4(S)} U_g \quad (8)$$

为了消除电网电压对并网电流的干扰,使的 $G_5(S) = 1/G_3(S)$ 。由此可知电流环的开环传递函数为：

$$G_i(s) = \frac{K_{p2}S + 1}{K_{i2}S} \cdot \frac{K_w}{0.5\tau_s S + 1} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{L/R S + 1} \quad (9)$$

通过调节 L 及 R 的大小对消传递函数的零极点,则电流环的开环传函为：

$$G_i(s) = \frac{K_w K_{i2}}{(0.5\tau_s S + 1)S \cdot R} \quad (10)$$

4.2 电压环设计

电压环通过控制并网功率实现直流母线电压的稳定^[4]。直流母线电压与给定值的偏差经PI调节后与电网同相的正弦信号相乘产生电流环的给定信号,电流内环的输出信号,通过数值变换得到流过直流母线侧电容的电流信号。电压外环的控制如图3所示。

$G_1(S)$ 是电压环PI调节器, $G_i(S)$ 电流内环, K 为比例系数,由于电流环速度远大于电压环,因此可将其闭环传递函数化简为一阶系统 $G_i(S) = 1/(\tau_n S + 1)$, 其中 $\tau_n = R/(K_{i2}K_w)$ 。

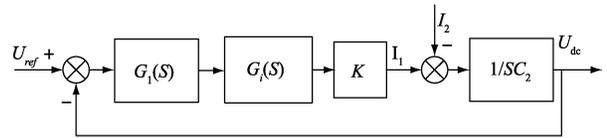


图3 电压外环控制

根据功率平衡：

$$I_{dc} = \frac{U_{ac}}{U_{dc}} I_o = K I_o \quad (11)$$

由此可得电压环开环传递函数为：

$$G_{uo} = \frac{K(K_{p1}S + K_{i1})}{S^2 C_2 (\tau_n S + 1)} \quad (12)$$

5 仿真实验

系统采用MATLAB7.10软件进行了并网逆变器的建模和仿真^[5],其仿真模型如图4所示。仿真参数为:太阳能阵列的开路电压 $U_o = 352$ V,短路电流 $I_s = 11.6$ A,光照强度设定值为 1 000,温度设定为 25℃;电感 $L_b = 3$ mH,电容 $C_1 = 1\ 000$ μ F, $C_2 = 1\ 000$ μ F,电感 $L = 5$ mH,电网电压为 220 V,50 Hz。电流环 $P_2 = 10, I_2 = 600$;电压环 $P_1 = 1.5, I_1 = 0$;仿真时间为 1 s,仿真算法采用ode23tb^[6]。如图5所示为光照强度为 1 000 W/m² 时交流侧输出电流电网电压波形,从图形可见逆变系统输出电流为正弦波^[7],此电流能跟踪电网电压进行变化且与电网电压保持同频同相。如图6所示为光伏电池输出功率,在正常光照照射下,系统在 0.1 s 内就可实现 3 kW 功率输出,且比较稳定^[8]。如图7所示为直流母线输出电压,有波形可以得出在双闭环控制下,直流母线电压较为稳定^[9]。当光照强度变换时,光伏电池输出功率如图8所示,光照变化时,系统能快速跟踪最大功率点,整个过程系统运行非常稳定^[10]。

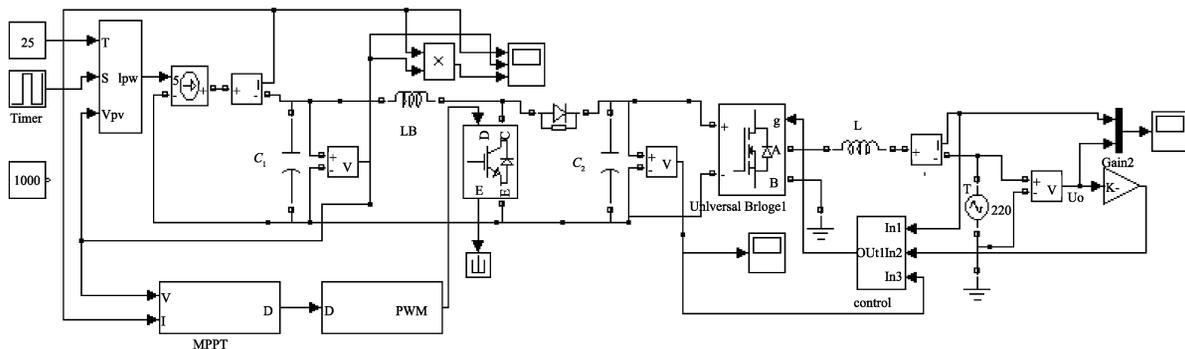


图4 光伏并网系统仿真模型

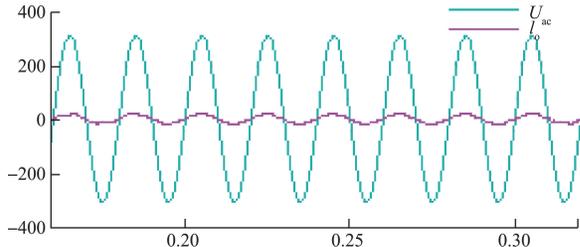


图5 $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 电网电压及并网电流

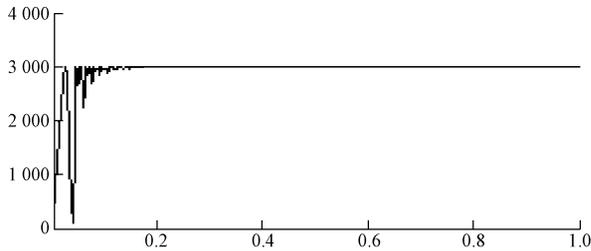


图6 $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 时,光伏组件输出 P_{PV}

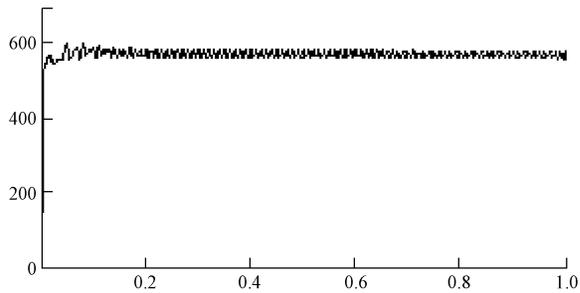


图7 $S=1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 时直流母线输出电压 U_{dc}

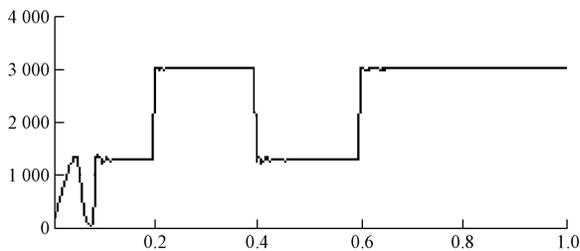


图8 光照变换时最大功率点追踪

6 结 论

本文基于 TMS320F2812 给出了具有较高实用价值的家用两级式光伏发电系统设计方案,通过理论分析、计算确定了系统光伏阵列、升压、逆变、滤波等硬件电路主要

元器件参数;采用电流跟踪双闭环的控制策略,设计了 PI 控制电流内环和电压外环。采用模糊 MPPT 算法在正常光照和扰动光照下分别利用 MATLAB 进行仿真实验。从仿真波形得出,在光照扰动下直流母线侧电压较为稳定,系统能快速跟踪最大功率点;逆变器输出电流能够很好的跟踪电网电压变化,实现了输出电流和电网电压的同频同相,达到高功率因数并网要求。此系统对开发利用屋顶光伏发电具有较大利用价值。

参 考 文 献

- [1] 汪飞.可再生能源并网逆变器的研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [2] 蔡纪鹤,陈熙,戎奕豪.2 kW 光伏并网发电系统设计[J].电器与能效管理技术,2014(9):55-59.
- [3] 程军照,吴夕科,李澍森,等.采用 Boost 的两级式光伏发电并网逆变系统[J].高电压技术,2009,35(8):2048-2052.
- [4] 霍弘宇,陈伟琪.基于双电流环控制的并网逆变器设计[J].电子设计工程,2011,19(13):131-133.
- [5] 邱爱中,邱大为.LCL 滤波光伏并网逆变器控制策略[J].国外电子测量技术,2013,32(11):38-40.
- [6] 董密,罗安.光伏并网发电系统中逆变器设计与控制方法[J].电力系统自动化,2006,10(20):97-102.
- [7] 张兴,李俊,赵为.一种光伏独立逆变器非线性控制方法[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):252-257.
- [8] 党克,郑玉浩,严干贵.电网电压不平衡下光伏并网逆变器的同步技术[J].仪器仪表学报,2015,36(1):87-94.
- [9] 霍弘宇,陈伟琪.基于双电流环控制的并网逆变器设计[J].电子设计工程,2011,9(13):131-137.
- [10] 赵杰,胡学龙.微型光伏并网逆变器的研究[J].电子测量技术,2013,36(7):1-8.
- [11] 陈坚.电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2002.

作 者 简 介

荆红莉,1976 年出生,硕士。主要研究方向为电力电子与拖动。

E-mail:2459878792@qq.com