

最大功率跟踪的光伏并网逆变器研究

杨海柱,金新民

(北京交通大学 电气工程学院 北京 100044)

摘要 光伏并网发电系统是光伏系统发展的趋势. 根据光伏阵列的特性,设计了一套新型的能实现最大功率跟踪的光伏并网逆变器. 逆变器由 DC-DC 和 DC-AC 两个部分组成并通过 Dclink 相连接,控制部分采用基于 DSP(TMS320F240)控制的最大功率跟踪和电流跟踪控制策略,实现了与网压同步的正弦电流输出,逆变器效率为 0.78,功率因数为 0.97,输出电流的基波分量占电流总量的 99.6%.

关键词 太阳能;光伏系统;最大功率;并网逆变器

中图分类号 :TM615 **文献标识码** :B

Research on Grid-Connected Photovoltaic Inverter of Maximum Power Point Tracking

YANG Hai-zhu, JIN Xin-min

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract :The grid-connected photovoltaic system is a trend of photovoltaic system development. According to the character of solar array, we designed a novel grid-connected photovoltaic inverter with the function of Maximum Power Point Tracking. The inverter consists of a DC-DC converter and a DC-AC inverter and the two parts are combined by a Dclink. We adopt the Maximum Power Point Tracking and Current Tracking algorithm via a DSP controller. As a result, the sine-wave outputs current synchronized with Grid Voltage, the efficiency and power factor of the inverter is 0.78 and 0.97 respectively. The foundational component makes up 99.6% of the output current.

Key words solar energy; photovoltaic system; maximum power; grid-connected inverter

太阳能的大规模应用将是 21 世纪人类社会发
展进步的一个重要标志,而光伏并网发电系统是光
伏系统的发展趋势. 光伏并网发电系统的最大优点
就是不用蓄电池中间储能,因而节省了投资,使系统
简化且易于维护. 这类光伏并网发电系统主要应用
于调峰光伏电站和屋顶光伏系统. 目前,美、日、欧盟
等发达国家都推出了相应的屋顶光伏计划,其中日
本提出到 2010 年要累计安装总容量 5 万 MW 家庭
用光伏电站. 作为屋顶光伏系统的核心,并网逆变

器的开发研究越来越受到学术界的关注.

20 世纪 80 年代中期,日本学者 Sakutarō Nonaka 提出了一种电流源型的光伏并网逆变器并取得了较好的性能,但这种逆变器比普通的全桥逆变电路多用了两个 IGBT 管,控制也比较复杂,由于它采用的最大功率跟踪是恒定电压跟踪,因而没有得到很好的发展^[1]. 近年来,随着电力电子及其控制技术的发展,电压型 PWM 斩控技术越趋成熟,电压型光伏并网逆变器更多的被人们采用,其中合肥工业

大学新能源研究所提出了一种电流寻优的光伏并网逆变器设计^[2],提高了系统的动态响应时间,实现了正弦波电流跟踪控制,本文作者在其基础上提出了一种新型的电流型控制方案,采用 DSP 控制并实现了真正的最大功率跟踪。

最大功率控制方法也有一个发展过程,早期的光伏系统采用恒定电压控制方法,这种方法的优点是简单易行,而且基本可以跟踪最大功率点,但随着电力电子及控制技术的发展,这种方法简单性与其造成的能量损失相比已显得很经济,因此一些新的控制方法应运而生,如扰动观测法,导纳微增法^[3]等,本文采用的是导纳微增法。

1 最大功率控制方法

1.1 恒定电压控制 (CTV)

在不同的光照强度下,硅太阳能电池阵列具有图 1 所示的伏安特性曲线,它表明太阳能电池既非恒压源,也非恒流源,而是一种非线性直流电源,太阳

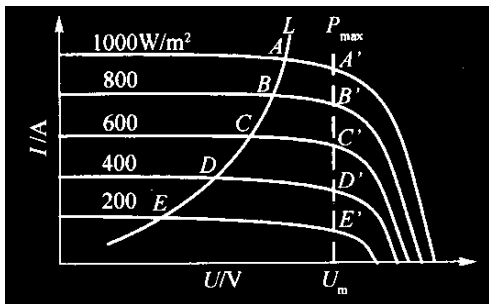


图 1 太阳能电池阵列的伏安特性及工作点

Fig.1 Running point and V-I characteristics of PV array

能电池阵列的伏安特性曲线与负载特性曲线 L 的交点 A, B, C, D, E 即为光伏系统的工作点,如果能将工作点移至光伏阵列伏安曲线的最大功率点 A', B', C', D', E' 上,就可以最大限度地提高光伏阵列的能量利用率。人们发现,当温度保持某一定值时,最大功率点基本在一根垂线的两侧,这样就可以把最大功率点的轨迹近似的看成输出电压恒定的一根垂线,这就是恒定电压控制的理论依据。但是这种跟踪方式忽略了温度对阵列开路电压的影响,对结温影响最大的因素当推环境温度和太阳辐照度。以常规单晶硅太阳能电池而言,当环境温度每升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时,其开路电压下降率约为 $0.35\% \sim 0.45\%$ 。以新疆的某一阵列为例,阵列在环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时开路电压为 363.6 V ,当环境温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时下降至 299 V ,其下降幅度为 17.5% 。这是不容忽视的影响,而这一点采用恒定电压跟踪是无法克服的。

1.2 最大功率控制 (MPPT)

MPPT 的实质是一个自寻优过程。当负载特性与太阳能电池阵列特性的交点在阵列最大功率点相应电压 U_m 之左时,MPPT 的作用是使交点处的电压升高,而当交点在阵列最大功率点相应电压 U_m 之右时,MPPT 的作用是使交点处的电压下降。图 2 说明了这个动态过程。

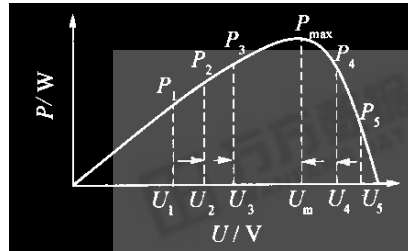


图 2 MPPT 的控制过程

Fig.2 Control course of MPPT

太阳能电池的特性曲线可以分成 3 个工作区^[4]:分别是电流源区、电压源区和最大功率点。MPPT 控制首先要根据采集太阳能电池的工作电压和功率,判断其运行在那个工作区,然后根据不同的工作区采取不同的控制修改指令的方法。当检测工作点在电流源区时就增加设定的 V_{max} 值,当检测工作点在电压源区时就减小设定的 V_{max} 值,然后根据所得的 V_{max} 值生成 PWM 控制脉冲。具体的计算流程图如图 3 所示。其中 V_{old} 和 I_{old} 分别表示太阳能电池的输出电压和电流的第 $k-1$ 次的值, V_{max} 为假定的太阳能电池最大功率点。

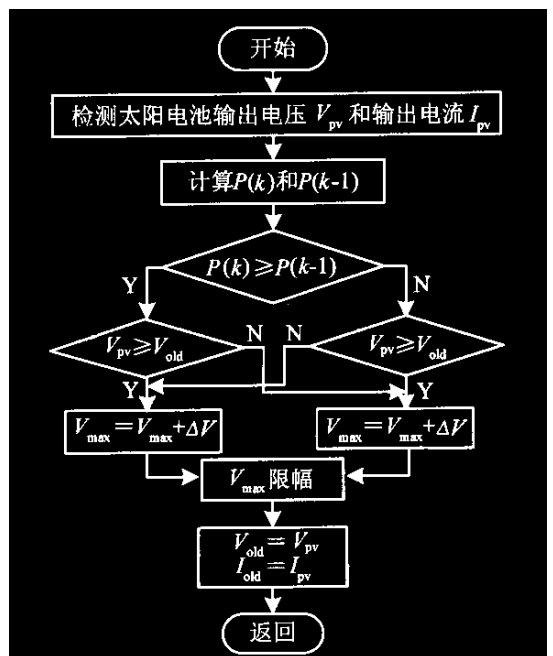


图 3 MPPT 的控制流程图

Fig.3 Control flow chart of MPPT

2 光伏并网系统设计

2.1 光伏并网系统结构图

光伏并网系统的结构框图如图 4 所示. 光伏并网系统主要由两部分组成, 前级的 DC-DC 变换器和后级的 DC-AC 逆变器, 这两部分通过 Dc-link 相连接. Dc-link 的电压为 400 V. 在本系统中, 太阳能电池板输出的额定直流电压为 50~80 V 之间, 通过 DC-DC 变换器将电能转换为 Dc-link 的直流电. DC-DC 变换器采用半桥拓扑结构. DC-AC 逆变器的作用是将 Dc-link 直流电转换成 220 V/50 Hz 正弦交流电. DC-AC 部分采用全桥逆变器, 控制电路的核心芯片是 TMS320F240. 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.

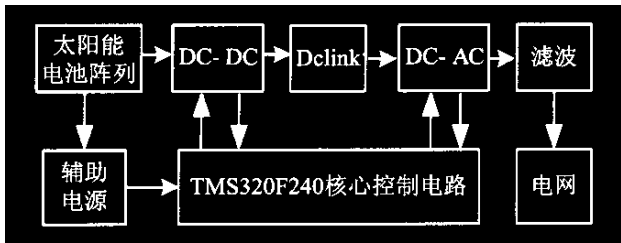


图 4 光伏并网系统结构框图

Fig.4 Structure frame of grid-connected photovoltaic inverters

2.2 电网同步信号检测

实现同步并网的关键是要求输出的正弦交流电与电网电压同频同相. 因此要检测电网电压, 这里检测电网电压的目的只是为对电流实现同步控制. 检测电网电压的过零点作为控制电流的同步信号. 程序中表现为 DSP 控制系统的同步中断源. 我们设计的检测电路由交流滤波器、变压器、带通滤波器和滞环比较器等部分组成. 其中变压器可以实现主电路与检测电路的隔离, 加滞环比较器是为避免由于输入信号在电压过零附近波动而造成检测电压信号多次过零的情况. 另外为防止因干扰而产生误同步, 因此在软件上要加入滤波程序.

2.3 控制流程

图 5 和图 6 分别是 DC/DC 和 DC/AC 部分的控制流程图. 其中 DC-DC 控制部分要完成跟踪最大功率点并监控 Dc-link 的电压. 经过 MPPT 控制得到参考电压和太阳能电池的实际电压相比较后, 其误差经过 PI 调节后, 用于产生 PWM 驱动波形. 其中 Dc-link 检测电压闭环回路只有在 Dc-link 的电压超过其上限电压设定值时才起作用, 目的是防止 Dc-link 的电压过高而损坏主电路的器件. 就是说当 Dc-link 的电压超过其上限电压设定值时, 就要求控制器迅

速减小太阳能电池的输出电流, 从而减小太阳能电池的输出功率, 则 Dc-link 传输的功率下降, 最终使 Dc-link 的电压下降.

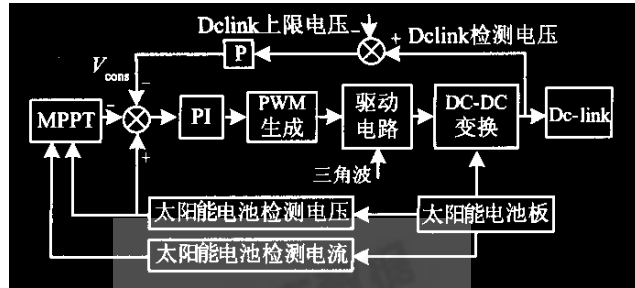


图 5 DC-DC 控制流程图

Fig.5 Flow chart of DC-DC

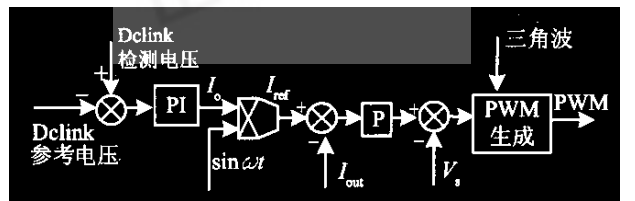


图 6 DC-AC 控制流程图

Fig.6 Flow chart of DC-AC

DC-AC 控制部分主要跟踪 Dc-link 的输出电压. Dc-link 的参考电压与 Dc-link 的检测电压比较后再经过 PI 调节, 将得到的电流指令 I_0 与正弦表值相乘, 就得到交变的输出电流指令 I_{ref} . 再将它与实际采集到的输出电流值比较后, 其误差 ΔI 经过比例环节 P 的调节再与采集到的交流侧电压 V_s 相加. 所得到的波形再与三角波比较, 最后用于产生了四路 PWM 调制信号. 因为正弦表值是根据网压的同步信号产生的, 因此可以使电流信号与网压同步. 通过电压外环和电流内环的电流型 SPWM 控制, 最终可以实现网侧电流正弦化且为单位功率因数输出.

3 实验

根据上述研究, 我们设计了一套额定功率 200 W 的光伏并网逆变器, 并对样机进行了测试. 测试实验系统如图 7 所示.

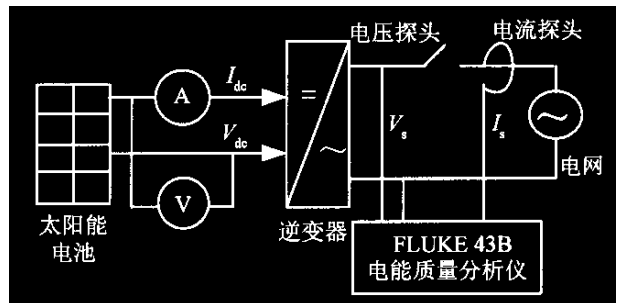


图 7 测试示意图

Fig.7 Sketch map of testing

采用4块50W的多晶硅太阳能电池阵列串连,额定输入功率200W,输入直流电压50~80V,输出交流电压220V,频率50Hz.输入侧分别用安培表和伏特表测量太阳能电池的输入电压和电流,输出侧采用FLUKE 43B电能质量分析仪检测并网逆变器输出交流电压和电流的参数和波形.

测试结果表明,太阳能电池的输出电压基本在62V左右,输出电流为3A,输出功率为186W.图8、9、10分别是输出电压和电流波形图、功率因数分

析图以及输出电流谐波分析图.由测试结果可以看出,逆变器的输出电压为230.9V,输出电流为 $6.23/10=0.623$ A,输出功率为 $1.45\text{ kW}/10=145$ W,所以逆变器的效率为0.78,逆变器的效率包括DC-DC和DC-AC以及辅助电源的总效率.逆变器输出功率因数为0.97,基本保持与网压同频同相,输出电流的基波分量占电流总量的99.6%.因此可以说输出的电能质量是令人满意的.

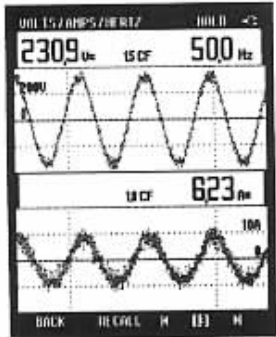


图8 输出电压电流波形

Fig.8 Output voltage and current wave

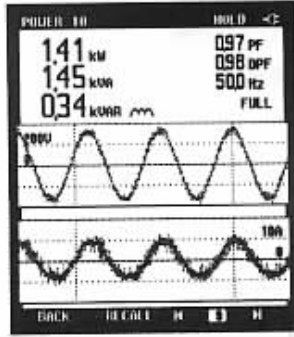


图9 逆变器输出功率及功率因数分析

Fig.9 Analysis of output power and power factor from inverter

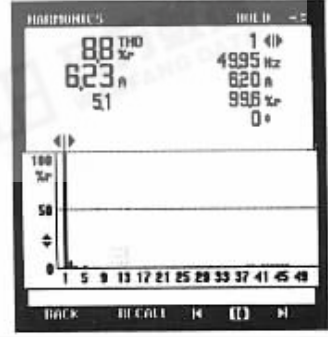


图10 输出电流谐波分析

Fig.10 Harmonic analysis of output current

4 结语

由实验波形可以看出本文给出的光伏并网逆变器具有较好的性能.由于采用TMS320F240为主要的控制芯片,使系统具有较好的动态响应特性.软件上采用了具有最大功率跟踪功能的设计,使太阳能电池阵列真正工作在最大功率点,充分利用了能源.通过实验证明该系统工作稳定,性能良好.

参考文献:

- [1] Sakutarō Nonaka. Interconnection System with Single Phase IGBT PWM CSI Between Photovoltaic Arrays and the Utility Lin[J]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting , 1990 , 2 : 1302 - 1307.
- [2] 余世杰,何慧若,曹仁贤.光伏水泵系统中CVT与MPPT的控制比较[J].太阳能学报,1998,19(4):394-398.

Yu Shi-ji , He Hui-ruo , Cao Ren-xian. A Comparison Between CVT and MPPT Control in Photovoltaic Water Pumping System[J]. Acta Energyiae Solaris Sinica , 1998 , 19(4) : 394 - 398. (in Chinese)

- [3] Patcharaprakiti N. Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System[J]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting , 2002 , 1 : 372 - 377.
- [4] Tae-Yeop Kim. A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Power System under Rapidly Changing Solar Radiation[J]. IEEE International Symposium , 2001 , 2 : 1011 - 1014.
- [5] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].电子工业出版社,1999.
Zhang Zhan-song , Cai Xuan-san. The Pinciple and Design of Switch Power Supply[M]. Beijing : Publishing House of Electronics Industry , 1999. (in Chinese)