

单相光伏并网逆变器仿真实验研究

吴 威

(扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 介绍了光伏并网发电系统的两级式拓扑结构, 针对传统双闭环控制策略, 在光伏电池输入功率发生骤变时, 响应滞后, 系统稳定性较差的缺点, 采用带有输入功率前馈的双闭环控制策略, 并对其进行详细地分析。最后, 在上述分析的基础上, 分别搭建了光伏并网系统的仿真模型以及硬件实验平台。仿真和实验结果表明, 当输入功率发生突变时, BOOST 电路能够较好地实现 MPPT, 并网电流能够快速达到新的稳定, 同时降低了直流母线电压在该过程中的波动, 具有优越的动态性能, 满足系统并网运行要求。

关键词: 光伏并网; 双闭环控制; 功率前馈; 系统仿真; 实验平台

Research on the simulation and experiment of Single-phase PV inverter

WU Wei

(Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 225000 China)

Abstract: On the base of two-stage single-phase PV grid-connected topology, one control strategy of double-closed loop with input power feed-forward is used and analyzed because the control strategy with voltage feed-forward is in short of slow response and low stability when the PV input power changes suddenly. After the above analysis, a simulation model of PV grid-system and experimental platform are set up. By the result of simulation and experiment, it is confirmed that BOOST circuit can achieve the MPPT with fast response and slight oscillation, the control strategy with input power feed-forward has excellent dynamic response in the respects of output current and DC-BUS voltage. Which is satisfied with the operational requirements.

Keywords: PV grid-connected; Double-closed loop; power feed-forward; system simulation; Experimental platform

0 引言

当今社会, 不可再生能源的日益紧缺以及环境污染的日益加剧, 使得太阳能等可再生能源的利用受到了学术界和企业界人士的强烈关注。光伏发电技术也因此得到了快速的发展^[1]。

光伏阵列是系统中的关键部件, 其 I-V 特性是辐照强度, 环境温度和光伏模块参数的非线性函数, 要实现系统的仿真, 首先要建立光伏电池的数学模型, 来模拟系统的输入电源。同时, 正是由于光伏电池的非线性, 只有在某一电压下才能输出最大功率, 因此为了充分利用光伏电池的能量, 必须在光伏发电系统中使用最大功率点跟踪技术 (MPPT)。目前常用的方法有开路电压法, 扰动观测法, 电导增量法, 间歇扫描法, 模糊控制法, 最优梯度法, 人工神经网络控制法等等, 未来这方面技术发展的主要空间在于: 1) 数学模型的优化与智能方法的应用;

2) 多种 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 方法的集成。本文采用较为常用的扰动观测法实现 MPPT。该方法虽然存在仿真精度与速度之间的矛盾, 但是其算法简单, 易于实现, 在实际应用中得到了广泛的推广。光伏并网发电系统的核心是并网逆变器, 其拓扑结构的设计和控制策略的选取直接影响整个系统的性能和并网电流的质量。采用单相全桥结构, 在双闭环控制的基础上, 引入功率前馈控制, 消除输入功率扰动对系统稳定性的影响, 实现并网电流与电网电压同频同相以及直流母线电压稳定。

1 光伏并网逆变器

1.1 逆变器拓扑结构

并网逆变器主要完成两个任务: 1) 实现光伏电池的最大功率点跟踪; 2) 向电网输送与电网电压同频同相的正弦电流。图 1 为两级式单相光伏并网逆

变器拓扑结构。其包括 BOOST 电路和单相全桥电路。前级主要实现将电池端电压上升到并网所要求的电压，并能对光伏电池进行最大功率点跟踪；后级主要实现并网电流与电网电压的同频同相控制以及直流母线电压的稳定。

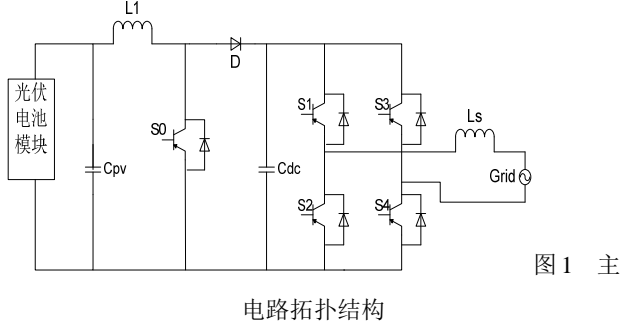


Fig.1 The topology of main circuit

正是由于前后两级的控制目标互相分开，使得控制策略实现了解耦控制^[2]。

1.2 逆变器控制策略

1.2.1 电流内环控制

电流内环控制结构如图 2 所示，图中已引入电网电压前馈控制。由于逆变器开关频率为 10KHz，远高于电网频率，为了便于分析，可忽略其对系统的影响，将 PWM 逆变单元看作一个增益环节 K_{PWM} 。

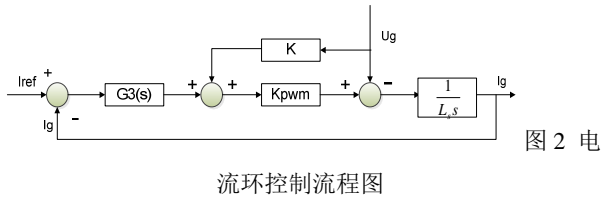


Fig.2 The control structure of current inner loop

对图中的电网电压 U_g 进行单独分析，提出其数学关系式，如式 (1) 所示。

$$U_g \cdot K \cdot K_{PWM} - U_g = 0 \quad (1)$$

因此，要消除 U_g 的影响，应取 $K=I/K_{PWM}$ 。则电流内环控制的闭环传递函数如式 (2) 所示。

$$G_{I_{close}}(s) = \frac{I_g(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{K_{PWM} \cdot K_{P3}}{L}\right) \cdot s + \frac{K_{PWM} \cdot K_{I3}}{L}}{s^2 + \left(\frac{K_{PWM} \cdot K_{P3}}{L}\right) \cdot s + \frac{K_{PWM} \cdot K_{I3}}{L}} \quad (2)$$

这样，通过引入电网电压前馈，在理论上消除了电网波动对系统的影响^[3,4]。

1.2.2 引入功率前馈的电流内环控制

引入功率前馈控制^[5]，就是在参考电流中加入

能反映光伏电池输出功率的信号。当光伏电池输出功率发生变化时，参考电流也随即改变，加快了并网电流的响应速度，同时也减小了直流母线电压在该过渡过程中的波动。其控制结构如图 3 所示。

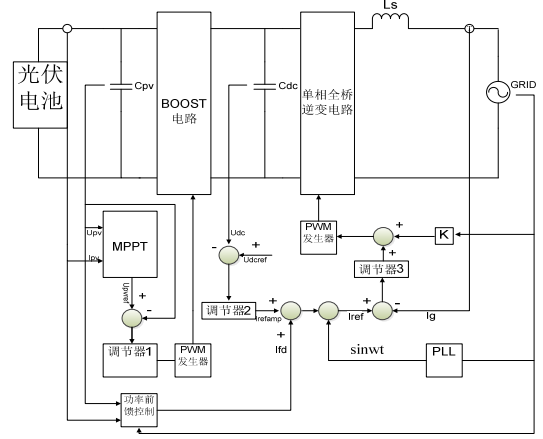


图 3 引入功率前馈的主控制图

Fig.3 The control structure with input power feed-forward

由图 3 可知，分别采样光伏输出电压、电流以及电网电压，根据式 (3) 计算得到附加的电流参考值 I_{fd} 。式中， U 为电网电压有效值。

$$I_{fd} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{pv}}{U_{grms}} \quad (3)$$

则新的电流总参考值为：

$$I_{ref} = (I_{refamp} + I_{fd}) \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

式中， I_{refamp} 为电压外环调节所得到的参考值。

由于功率前馈控制的引入，缓解了直流母线电压外环的调节压力，输入功率的变化情况直接反映到逆变器侧，因此，母线电压波形也得到了较为显著的优化。

1.2.3 MPPT 控制

光伏阵列的最大功率点跟踪方法的研究一直是该领域内的热点。目前，使用较为广泛的是开路电压法，扰动观测法，电导增量法等。其中，开路电压法实现简单，但是极易造成电池能量的浪费，而电导增量法控制精确，能够快速实现最大功率点跟踪，但是对硬件提出了更高的要求，使用最多的扰动观测法虽然存在跟踪精度与速度之间的矛盾，但是其算法简单，易于实现，适合实际应用中的推广。其原理为：给一个电压输出扰动信号 Δu ，然后观察输出功率的变化 ΔP ，如果 ΔP 为正，则表

示扰动方向正确,下一步继续同方向扰动;如果 ΔP 为负,则表示扰动方向错误,下一步执行反方向的扰动,如此寻找到最大功率点。同时,通过对步长的合理选择,使跟踪精度与速度达到平衡。

2 系统仿真与实验分析

2.1 系统仿真模型

根据文献[4]中光伏阵列的数学模型,在 Matlab 平台上搭建了其仿真模型,如图 4 所示。

同时基于上面的分析,将各个模块组合搭建了光伏并网全系统的仿真模型,如图 5 所示。

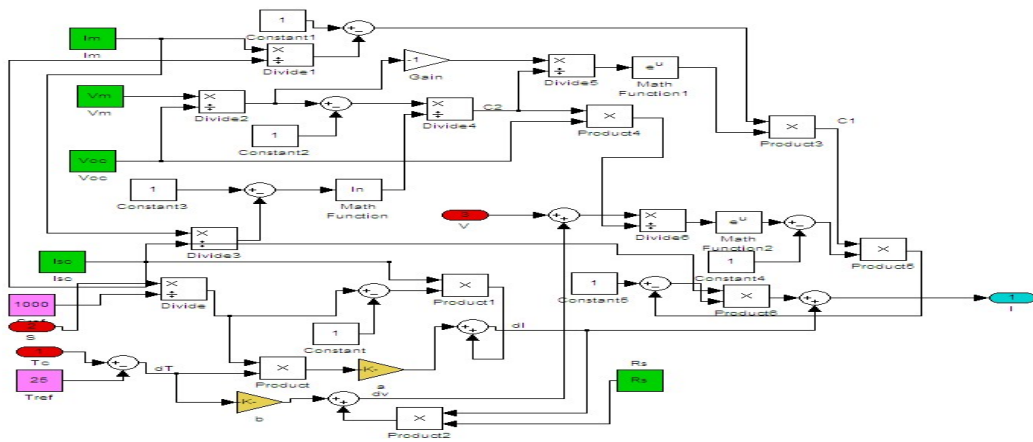


图 4 光伏电池模型

Fig.4 The model of PV battery

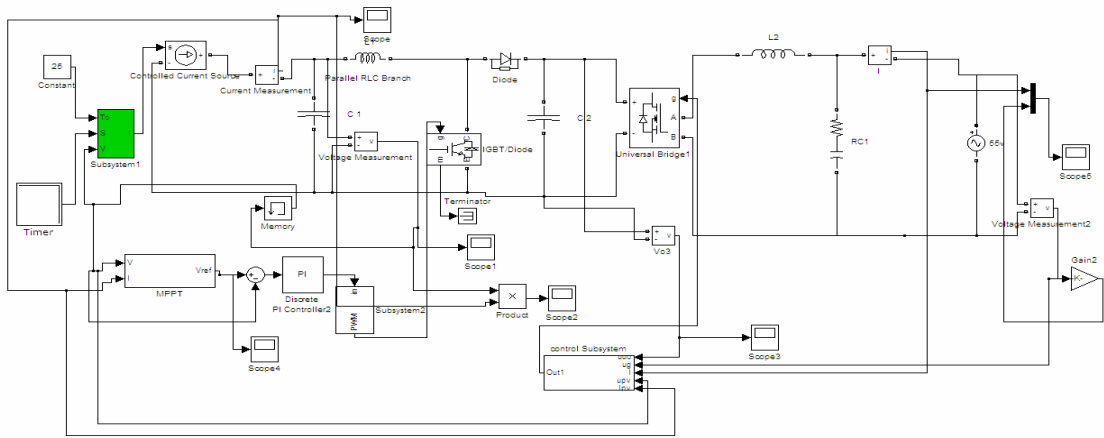


图 5 全系统仿真模型

Fig.5 The model of PV grid-connected system

仿真参数: 直流母线电压给定值为 100V; 电网电压峰值为 55V, 频率为 50HZ; 光伏电池部分参数: 短路电流 I_{sc} 为 5.2A; 开路电压 U_{oc} 为 44.2V; 最大功率点电流 I_m 为 4.85A; 最大功率点电压 U_m 为 36.2V。

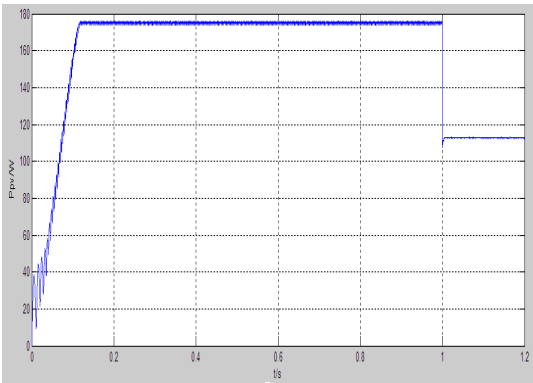


图 6 光伏电池输出功率波形

Fig.6 The waveform of PV power

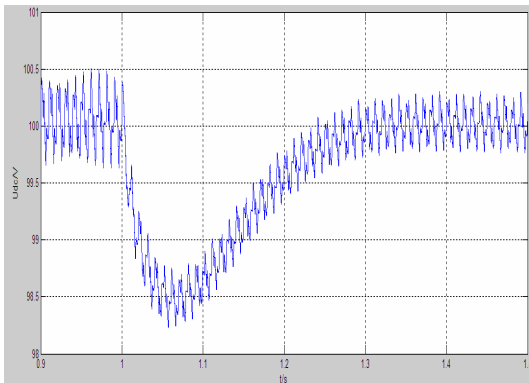


图 7 功率前馈控制直流母线电压

Fig.7 The waveform of the DC bus voltage with input power feed-forward

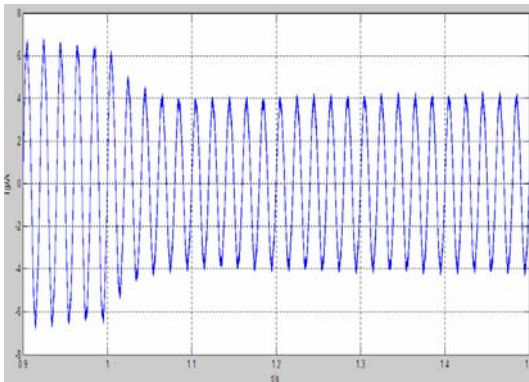


图 8 功率前馈控制并网电流波形

Fig.8 The waveform of output current with input power feed-forward

2.2 仿真结果分析

光伏阵列起始工作在参考条件下,在 1s 时刻辐射强度由 1000 W/m^2 降到 600 W/m^2 。各仿真波形如图 6-8 所示。图 6 为光伏电池输出功率波形,从波形图中看到,前级 MPPT 控制策略能够在保持微小震荡幅度的前提下,在 0.12s 时刻,实现光伏电池的最大功率点运行,并且当辐射强度发生突变时,仍然能够实现快速跟踪。图 7 为直流母线电压波形,在 1s 时刻,直流母线电压最低仅下探到 98.25V,并很快在 1.32s 基本实现新的平衡,误差在 $\pm 0.25 \text{ V}$ 以内。可见,母线电压在整个过程中非常稳定。图 8 为并网电流波形,由图可知,并网电流在输入功率突变后 0.36s 即趋于新稳定。仿真结果表明,功率前馈的双闭环控制具有稳定的直流母线电压,以及优越的电流动态响应。

2.3 实验结果分析

基于两级式拓扑结构,搭建了硬件实验平台,对引入功率前馈的双闭环控制策略进行了验证性实验,前级 BOOST 电路将输入电压升到 50V,电网

电压设为 45V (峰值),其实验波形如图 9 所示。

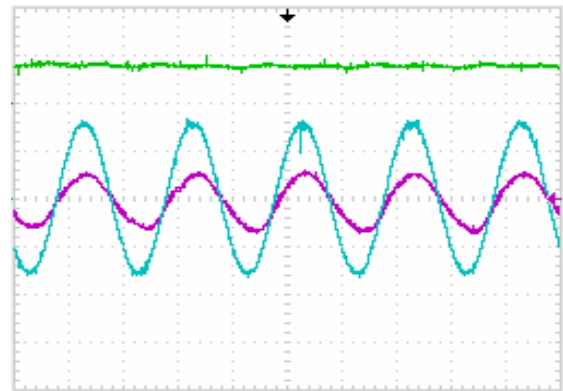


图 9 并网实验波形

Fig.9 The waveforms of experiment

图中绿色曲线代表直流母线电压波形,蓝色曲线代表电网电压波形,紫色曲线代表并网电流波形。由图可见,直流母线电压基本维持在设定值 50V,并网电流基本实现了与电网电压的同频同相运行。

3 结论

并网逆变器主要完成两个任务:1)实现光伏电池的最大功率点跟踪;2)向电网输送与电网电压同频同相的正弦电流。通过建立光伏阵列的通用仿真模型,结合扰动观测法实现 MPPT,并在双闭环控制中引入功率前馈控制,分别搭建了单相光伏并网系统仿真模型与实验平台。仿真与实验结果显示,扰动观测法能够较好的实现 MPPT 功能,带有功率前馈的双闭环控制策略能够更快地响应光伏输入功率的变化,减少并网电流的调节时间,保持直流母线电压稳定在较高的水准,具有更优越的动态性能。

参考文献:

- [1] 王飞,余世杰,苏建徽,等.太阳能光伏并网发电系统的研究[J].电工技术学报,2005,20(5):72-74.
WANG Fei, YU Shijie, SU Jianghui, etc. Research on Photovoltaic Grid-Connected Power System[J]. Journal of Electrical Engineering Technology,2005,20(5):72-74.
- [2] 吕文坤.2kW 单相光伏并网发电系统的设计[D]:[硕士学位论文].湖南:湖南大学,2011.
LV WenKun. Design of 2kW Single-phase Grid-connected PV Generation System[D]. Hunan:Hunan University,2011.
- [3] Ruifeng Yan, Tapan Kumar Saha. Development of Simplified Models for a Single Phase Grid Connected Photovoltaic System[J]. IEEE Trans. On Power

Engineering Conference,2010:1-6.

- [4] 张彦,赵义术,余蜜,等.光伏并网逆变器电流控制技术研究[J].电力电子技术,2009,43(5):29-31.

ZHANG Yan, ZHAO Yi-shu, YU Mi,etal. Research on Current Control of Photovoltaic Grid-connected Inverter[J]. Power Electronics,2009,43(5):29-31.

- [5] Zhiqiang Jiang, Jinglao Tan, Yonghua Cheng. Fast Controller Based on Active-power-feed-forward for PFC Converter Applied to UPS[J].IEEE Trans. On Applied Power Electronics Conference and Exposition,2005:537-540,Vol.1.

作者简介:

吴威(1987-),男,江苏扬州人,硕士研究生,中级工,扬州供电公司变电检修室 变电检修班员工。

联系方式: 电话: 18762307099;

邮箱: wuwei871101@163.com或 ygshixp@js.sgcc.com.cn

通信地址: 江苏省扬州市文昌西路 275 号 扬州供电公司

邮编: 225000