

基于 Simulink 的两级式单相光伏逆变器的系统仿真

黄庆丰¹, 杨红培², 翟登辉³

(1. 福建水利电力职业技术学院, 福建 永安 366000; 2. 许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000;
3. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对单相光伏并网系统, 以两级式单相并网逆变器的主电路拓扑结构为核心, 对其建立了数学模型, 并在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建了 5 kW 单相并网逆变器的系统仿真模型。采用基于扰动观测的 MPPT 算法以及基于电网电压前馈的双闭环控制策略, 对其特性进行了深入研究和仿真。并用 Matlab 语言将 MPPT 算法编写了函数, 可以模拟光照变化, 分别针对光照不变和光照变化两种情形进行了仿真分析。结果表明, 其不但保证系统有较好的稳定性和快速的动态响应跟踪特性, 而且能实现了逆变输出电流与电网电压的同频同相以及较低的逆变电流的总谐波畸变率 (THD 小于 1%)。

关键词: 光伏系统; 并网逆变器; Simulink; 双环控制; 前馈; 最大功率点跟踪

System simulation of double-stage single-phase photovoltaic inverter based on Simulink

HUANG Qing-feng¹, YANG Hong-pei², ZHAI Deng-hui³

(1. Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366000, China; 2. Xuchang Electrical Professional College, Xuchang 461000, China; 3. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: For single-phase photovoltaic grid system, taking the circuit topology of double-stage single-phase grid inverter as a core, this paper establishes the mathematical model, and builds the simulation model of 5 kW single-phase grid inverter system in Matlab/Simulink environment. MPPT algorithm based on the observation of the disturbance voltage and double loop control strategy based on feedforward are adopted, whose properties are studied and simulated. With Matlab language, MPPT algorithm is programmed as a function which can simulate the illumination change, and the simulation analysis of illumination invariant and illumination change is respectively carried out. The simulation results show that it not only makes system have better stability and fast dynamic response characteristics, but also realizes the target that the output voltage has the same frequency and phase with inverted current and lower total harmonic distortion rate (THD less than 1%).

Key words: photovoltaic system; grid-connected inverter; Simulink; dual-loop control; feed-forward; maximum power point tracking

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0058-04

0 引言

近年来, 由于太阳能以其无污染、清洁的优势, 已经成为发展的热点, 光伏发电在未来能源系统中占据非常重要的地位, 随着电力电子技术、控制理论的发展, 光伏并网发电系统逐渐成为光伏发电研究热点, 其应用范围越来越大, 是光伏发电的主流发展趋势, 并网逆变器作为与电网接口的电力电子装置, 按照级数可分为单级式和两级式。两级式光伏并网逆变器将 DC/DC 升压环节和 DC/AC 逆变环节独立开来, 由 DC/DC 完成 MPPT 控制, DC/AC 完成逆变控制。这样使得系统的稳定性更加坚固且直流侧 PV 组件配置的电压范围更宽。

以 5 kW 两级式单相光伏并网系统为研究对象,

在 Matlab/Simulink 仿真环境下, 搭建了整个逆变器的系统仿真模型, 模型主要包括 DC/DC 即 MPPT 跟踪模块、基于 PI 调节器的双闭环控制模块。仿真结果验证了两级式逆变器的稳定性以及算法的有效性。

1 两级式逆变器主电路拓扑

图 1 所示的并网逆变器主电路采用两级式的拓扑结构, 使得逆变器的直流侧 MPPT 跟踪范围较宽, 而且使得 MPPT 和逆变独立控制, 与单级式相比, 省去了隔离变压器, 使机器体积小, 因此该拓扑结构的应用非常广泛。

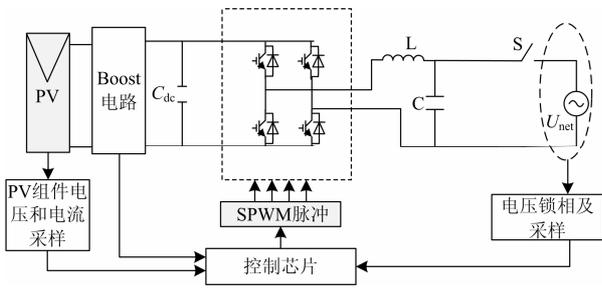


图 1 两级式单相并网逆变器的主电路拓扑
Fig. 1 Main circuit topology of single-phase grid-connected inverter

光伏阵列为逆变桥提供直流侧电压，直流侧电容用于稳定直流侧电压，缓冲前后级的能量变化；逆变桥侧的输出电流经 LC 低通滤波后直接并入电网。 U_0 为逆变桥的输出电压， L 为滤波电感， U_{net} 为电网电压， I_{ac} 为输出电流，它们之间满足以下关系：

$$U_0 = j\omega LI_{ac} + U_{net}$$

假定采用直接电流 I_{ac} 控制，则单位功率因数并网运行时的矢量三角形如图 2 所示。

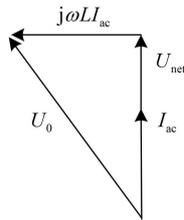


图 2 电压矢量图
Fig. 2 Voltage vector diagram

2 单相并网发电系统的总体控制方案

图3为两级式单相光伏并网逆变器的结构框图，其中 boost 升压电路实现 MPPT 跟踪，采用基于占空比直接扰动调节的 MPPT 算法；后级的 DC/AC 变换器采用电压外环 PI 调节器和电流内环 PI 调节器。

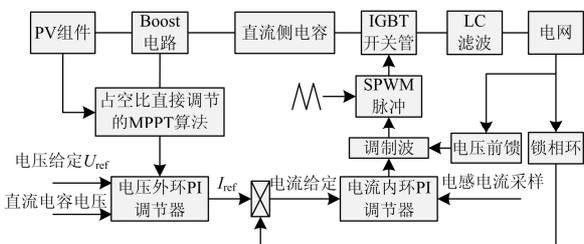


图 3 两级式单相并网逆变器控制框图

Fig. 3 The overall control diagram of double-stage single-phase grid-connected system

AC实现逆变，控制采用电压外环、电流内环的双闭环控制^[1-3]策略。

2.1 最大功率跟踪算法

最大功率点跟踪 (MPPT)，算法本质是实时检测光伏阵列的输出功率，运用一定的跟踪控制算法输出最大功率。目前针对最大功率点跟踪算法的研究，主要有以下几种方法^[4-6]：固定电压法 (CVT)、电导增量法、扰动观测法、人工智能算法等。

恒压法只是在一定环境条件下才能保证最大功率跟踪的准确性，而在环境条件变化时，控制精度太差；电导增量法虽然电压波动比扰动观测法小，但是该算法过于复杂，并且进行 AD 采样及跟踪耗时长，给 CPU 控制器带来负担；扰动观测法算法简洁，程序容易实现，并且结构简单，扰动参数少，唯一不足就是有可能存在最大功率点的振荡，需要寻求一种自适应变步长方法来实现最小波动。

针对扰动观测法相对比较简单，性能好，采用占空比 D 直接调节的扰动观测法来实现 MPPT。其原理是周期性地扰动光伏组件的工作电压值，再比较其扰动前后的功率变化，根据变化情况决定占空比 D 的改变方向，通过不断扰动使阵列输出功率趋于最大，系统工作于动态平衡状态。其中，占空比变化的幅度可以进行改变，即采用变步长方法进行跟踪，从而弥补跟踪振荡大的不足。具体流程图如图 4 所示，变量含义见表 1。

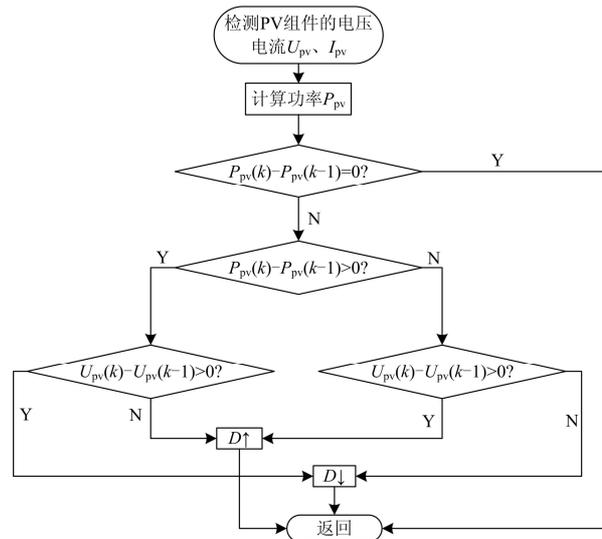


图 4 MPPT 流程图

Fig. 4 Flow chart of MPPT

2.2 双闭环控制策略

直流电压外环中，电压给定常值 V_{dc}^* 与直流电容

侧实际电压 V_{dc} 的差值经外环PI调节器后得到电流指令 I_{ref} ，将 I_{ref} 与由锁相环计算出来的 $\sin\alpha$ 相乘，从而得到正弦参考电流 i_{ref} ，其与逆变电流 I_{ac} 的差值经内环PI调节器后得到的值与电网前馈求和得到最终调制波，最后将该调制波与三角载波进行比较输出SPWM波，从而控制IGBT开关管的导通与关断。

表 1 变量含义
Table 1 Variable meaning

$P_{pv}(k)$	组件当前时刻和上一时刻的功率
$P_{pv}(k-1)$	
$U_{pv}(k)$	组件当前时刻和上一时刻电压
$U_{pv}(k-1)$	
D	占空比

3 系统仿真模型

在 Matlab/Simulink 环境下，搭建整个 5 kW 光伏并网系统的仿真模型。其中 powergui 的采样时间设置为 $5e-6$ s，滤波电感 L 的参数设为 2 mH，开关管频率设置为 10 kHz，采用 Simulink 自带的脉冲模块。整个系统的仿真模型见图 5 所示。

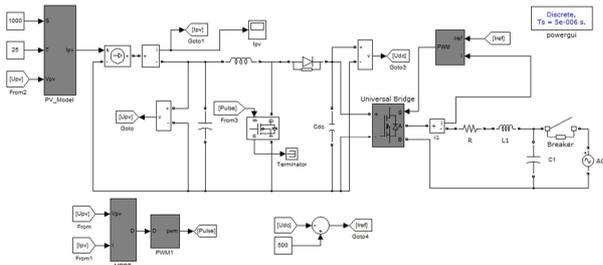


图 5 单相并网发电系统的主电路仿真模型

Fig. 5 Main circuit simulation model of single-phase grid-connected system

图 5 中的 PV 模块是将光伏组件封装的 Subsystem 子系统仿真模型。MPPT 算法用 S-Function 编写，仿真模型如图 6 所示。

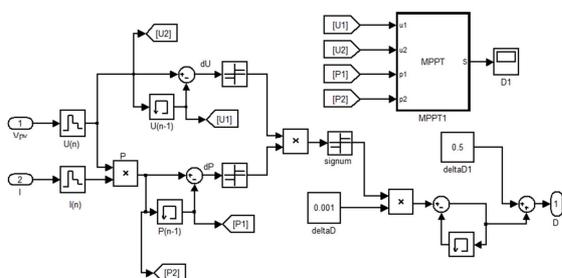


图 6 基于占空比扰动的MPPT算法

Fig. 6 MPPT method based on changed duty

4 仿真结果分析

4.1 光照不变

逆变输出电流和电网电压波形如图 7 所示。

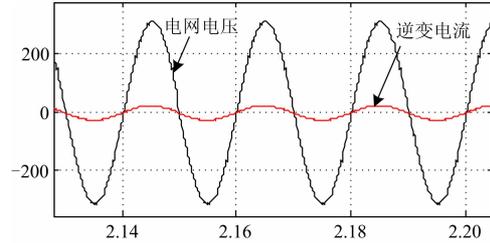


图 7 电网电压和逆变电流

Fig. 7 Waveforms of grid voltage and inverted current

逆变电流的THD分析如图 8 所示。

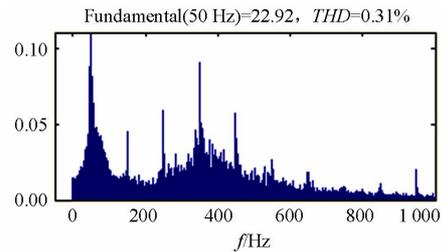


图 8 逆变电流的总谐波畸变率

Fig. 8 THD of inverted current

电压外环的参考电压 V_{dc}^* 与 V_{dc} 波形如图 9 所示。

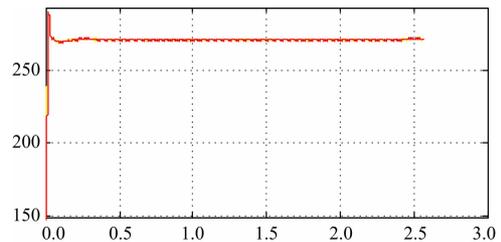


图 9 参考电压 V_{dc}^* 与直流侧电压 V_{dc}

Fig. 9 Voltage V_{dc} and V_{dc}^*

图 9 表明，电压外环 PI 调节使得 V_{dc} 能实时跟踪参考电压 V_{dc}^* ，而且电压很平稳，上下浮动很小。功率因数 $\cos\alpha$ 如图 10 所示。

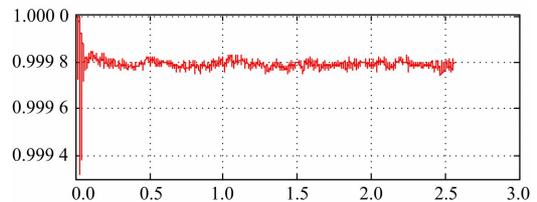


图 10 功率因数

Fig. 10 Waveform of power factor

由图10可知, 功率因数平均在0.99以上, 可以认为是单位功率因数的并网运行。

逆变桥输出电压 U_0 的波形如图11所示。

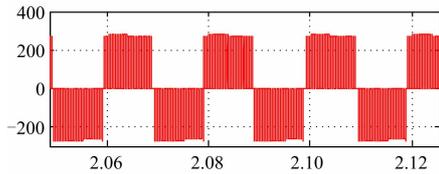


图11 逆变桥输出电压 U_0

Fig. 11 Voltage of inverter bridge

4.2 光照变化

电压外环的参考电压 V_{dc}^* 与 V_{dc} 波形如图12所示。

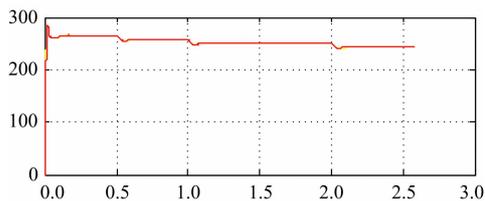


图12 参考电压 V_{dc}^* 与直流侧电压 V_{dc}

Fig. 12 Voltage V_{dc} and V_{dc}^*

图12表明, 电压外环PI的调节使得直流侧电压 V_{dc} 能实时跟踪参考电压 V_{dc}^* , 并且当光照变化时, 电压也跟着变化, 系统的动态响应快并且能及时稳定下来。

在仿真时间为2 s时, 模拟光照变化, 将其由 1000 W/m^2 变为 800 W/m^2 , 逆变电流值有所减小, 波形如图13所示。

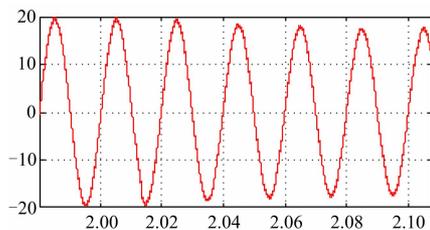


图13 逆变电流

Fig. 13 Waveform of inverted current

图13可以看出, 随着光照变弱, 电流也跟着变小, 进一步表明了系统不但稳定而且动态响应快。

5 结论

通过建立一个两级式的5 kW单相光伏并网逆变器的仿真模型, 两级式拓扑结构的控制算法将MPPT控制和逆变独立开来, 验证了基于占空比 D 直接调节的MPPT的有效性和准确性, 避免了PI

调节器的间接调节, 大大简化了系统的控制; 验证了后续采用电压电流双闭环的逆变控制的可靠性, 并实现了逆变电流与电网电压的单位功率因数并网, 仿真最后验证了系统在光照变化下的动态响应特性。

参考文献

- [1] 姜世公, 王卫, 王盼宝, 等. 基于功率前馈的单相光伏并网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 16-19, 30.
JIANG Shi-gong, WANG Wei, WANG Pan-bao, et al. Power-feedforward-based control strategy of grid-connected single-phase PV system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 16-19, 30.
- [2] 王红艳, 王晓辉, 曹丽璐. 单相400Hz逆变器双环控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 54-57.
WANG Hong-yan, WANG Xiao-hui, CAO Li-lu. Research of a dual-loop control scheme for single-phase 400 Hz inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 54-57.
- [3] 田悦新, 曹海燕, 伞国成, 等. 基于坐标变换的单相逆变电源并网控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 75-77.
TIAN Yue-xin, CAO Hai-yan, SAN Guo-cheng, et al. Grid-connected control for single-phase inverter based on synchronous frame transformation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 75-77.
- [4] 林少华, 许洪华. 基于电网电压前馈的光伏并网逆变器的仿真与实现[J]. 可再生能源, 2008, 26(4): 10-12.
LIN Shao-hua, XU Hong-hua. Simulation and research on the inverter of grid-connected photovoltaic generation system based on feedforward control of grid voltage[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(4): 10-12.
- [5] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
ZHAO Wei. Research on grid-connected photovoltaic system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.
- [6] 苏海滨, 王光政, 王继东. 基于模糊逻辑双环控制的光伏发电系统最大功率跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 215-218.
SU Hai-bin, WANG Guang-zheng, WANG Ji-dong. The maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power system based on fuzzy logic double loop control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 215-218.

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-24

作者简介:

黄庆丰(1962-), 男, 硕士, 副教授, 从事电力系统及其自动化专业教学及研究; E-mail: 33745171@qq.com

杨红培(1978-), 女, 本科, 讲师, 主要研究方向为计算机网络通信。