

## 光伏并网发电系统几个关键问题的研究

李冬辉, 王鹤雄, 朱晓丹, 李征

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 通过分析太阳能电池的 I-V 特性, 对比各种最大功率点跟踪方法的优缺点, 采用了改进扰动观察法结合 BOOST 升压电路来对电池板进行最大功率点跟踪的方案。分析对比并网电流的各种控制方式, 确定采用滞环比较方式对并网电流进行控制。为了使并网电流稳定可靠地向电网送电, 采用双闭环控制策略对并网逆变器进行控制。分析了基于正反馈的主动移频式孤岛检测方法 (AFDPF) 的参数优化方案, 为 AFDPF 检测盲区的分析提供参考依据。在 Matlab 仿真环境下, 利用 SimPowerSystems 功能模块, 对太阳能电池的数学模型, 最大功率点跟踪控制策略和并网控制策略分别建立了仿真模型, 仿真结果证明了该方案和控制策略的正确性。

**关键词:** 太阳能; 光伏并网; 最大功率点跟踪; 双闭环控制; 孤岛效应

### Research on several critical problems of photovoltaic grid-connected generation system

LI Dong-hui, WANG He-xiong, ZHU Xiao-dan, LI Zheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Through analyzing the I-V character of the solar battery, and comparing the methods of MPPT, improved P & Q and BOOST circuit are applied. By comparing the control manners of the current connected to the grid, the hysteresis control is adopted. For the stabilization of the grid-connected photovoltaic system, the double close loop control is introduced into the control of the inverter. The methods of the islanding detection are introduced, the scheme of parameters optimization based on the method of active frequency drift with positive feedback (AFDPF) is analyzed, which can be taken as a good guideline in the analysis of the non detection zone (NDZ) of AFDPF. Simulation model due to the solar battery mathematical model, MPPT strategy and grid-connected strategy are built on the platform of MATLAB by using the modules of the SimPowerSystems. The simulation results confirm the correctness of the schemes and control strategies.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.60874077).

**Key words:** solar energy; grid-connected photovoltaic; MPPT; double-loop control; islanding effect

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0208-07

## 0 引言

能源短缺和环境污染是人类面临的重大问题, 研究开发可再生能源发电系统具有重大意义。开发和利用太阳能发电系统已受到越来越多的重视。通过光伏并网发电系统将太阳能转换为电能, 并将电能输送到电网上, 是太阳能利用的主要形式。

目前我国的光伏发电系统的设计主要采用双极型模式。如图 1 示, 双级式发电系统包括 DC/DC 和 DC/AC 两个环节, DC/DC 环节的是实现最

大功率点跟踪和升压, DC/AC 的目的是将太阳能电池输出的直流电变换成交流电, 且与电网电压同频同相, 功率因数近似为 1, 向电网输送有功功率。双级式发电系统的前后两个环节具有独立的控制手段和目标, 两部分可以分开设计, 控制环节比较容易设计和实现。

光伏发电系统仍有许多技术问题有待解决。首先, 采用更为可靠和高效的最大功率电跟踪控制策略, 使电池板更加高效地将太阳能转换为电能。其次, 随着光伏技术的发展, 当多台并网系统一起工作时, 可能会出现许多问题。因而要求并网控制策略必须越来越先进, 并网逆变器的效率也要越来越高。第三, 孤岛效应的防止, 使用简单的指令电流

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60874077); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (2006056054)

扰动的方案可能难以奏效, 需要有更可靠、稳定的检测方法。这三个技术问题是光伏发电系统中的关键所在。

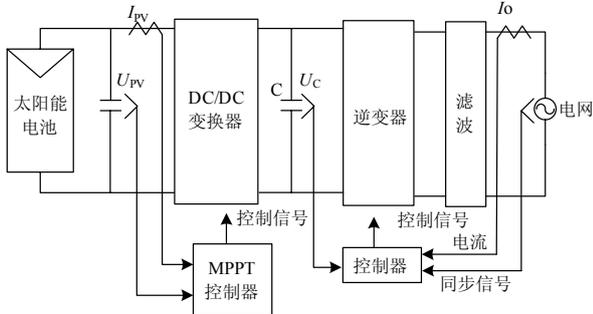


图1 双极式太阳能并网发电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of a double-state grid-connected photovoltaic system

### 1 最大功率点跟踪

#### 1.1 太阳能电池特性

从太阳能电池的 I-V 特性曲线可以看出太阳能电池是一个非线性直流电源, 而且受光照强度和温度的影响。如图 2 示, 太阳能电池在任何时刻都存在一个最大功率输出的工作点, 而且随着光照强度和温度的变化而变化。为了能让太阳能电池充分发挥它的光电转换能力, 就需要实时控制太阳能电池的工作点以获得最大功率输出。

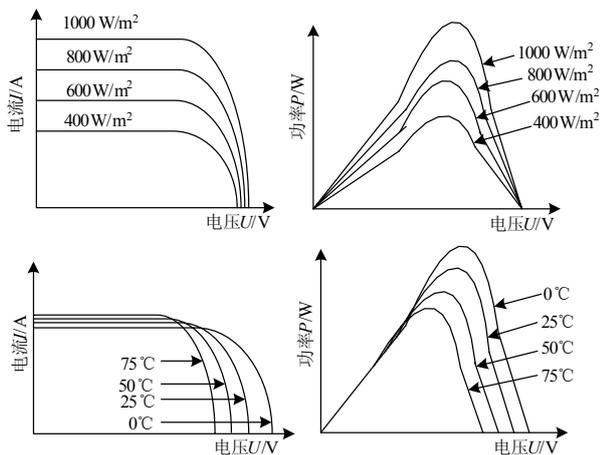


图2 在不同光照强度和环境温度下的特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of PV module as light intensity and temperature change

#### 1.2 最大功率点的控制

目前常用的最大功率点跟踪方法主要包括恒电压跟踪法、间歇扫描法、电导增量法、扰动观察法和改进扰动观察法等<sup>[1-3]</sup>。针对扰动观察法容易产生

“误判”现象, 因此对其进行了改进, 即改进扰动观察法。该方法增加了与下一时刻的功率水平进行比较的环节, 有利于提高最大功率跟踪的效率。图 3 为改进扰动观察法流程图。

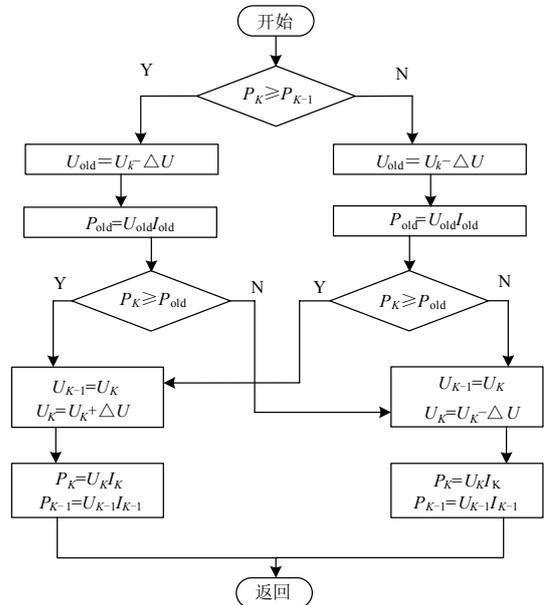


图3 改进扰动观察法流程图

Fig.3 Flow chart of the improved P&Q

#### 1.3 最大功率点跟踪的控制

在常规的线性系统电气设备中, 为使负载获得最大功率, 通常要进行恰当的负载匹配, 使负载电阻等于供电系统的内阻, 此时负载上就可以获得最大功率。但是, 在太阳能电池供电系统中, 太阳能电池的内阻不仅受日照强度的影响, 而且受环境温度及负载的影响, 因而处在不断变化中, 从而不可能用上述简单的方法获得最大输出功率。目前所用的方法是在太阳能电池阵列和负载之间增加一个 DC/DC 变换器, 通过改变 DC/DC 变换器中功率开关管的占空比, 来调整、控制太阳能电池阵列工作在最大功率点, 从而实现最大功率点跟踪控制。

本文采用 BOOST 升压电路结合改进扰动观察法来对太阳能电池板进行最大功率点跟踪。

如图 4 所示, 将检测到的太阳能电池的输出电压  $U_{PV}$  和输出电流  $I_{PV}$  信号输入到 MPPT 算法模块, 相乘得出太阳能电池输出的功率, 然后运用所采用的改进扰动观察法, 经过算法运算, 输出一个调制信号, 该调制信号与恒定频率的三角波信号相比较, 产生控制 BOOST 电路中功率开关器件的开关信号, 通过不断调节功率开关器件的占空比来达到太阳能电池最大功率点跟踪的目的。

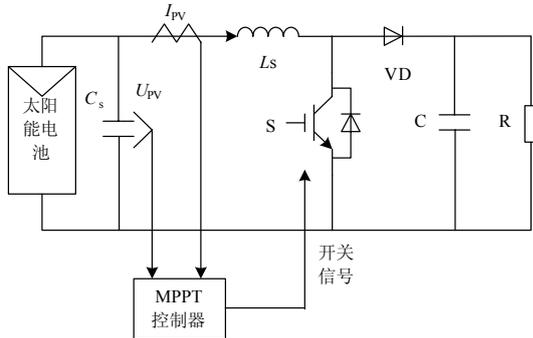


图 4 利用升压电路进行最大功率点跟踪的原理图

Fig.4 Schematic diagram of MPPT with the BOOST circuit

## 2 并网控制策略

### 2.1 逆变器拓扑和控制方式

并网逆变器采用电压型全桥逆变器，控制方式一般采用输出电流控制，控制逆变器的输出电流以跟踪市电电压，即可达到并联运行的目的。本文采用电流控制方式为滞环比较方式，虽然滞环比较方式频率不固定，但它具有自动峰值限制能力，电流跟踪精度高、动态响应快、不依赖负载参数和无条件稳定等优点<sup>[4-5]</sup>。

滞环控制原理是将给定电流与反馈电流的误差与一个确定滞环阈值 H 做比较，以确定两对开关管的开关逻辑，如图 5 所示。在输出电流正半周，当误差超过滞环的上阈值，开关管 S2 和 S3 导通，S1 和 S4 关断， $U_{AB}=-E$ ，电感电流减小；当误差低于滞环的下阈值，开关管 S1 和 S4 导通，S2 和 S3 关断， $U_{AB}=E$ ，电感电流增大。

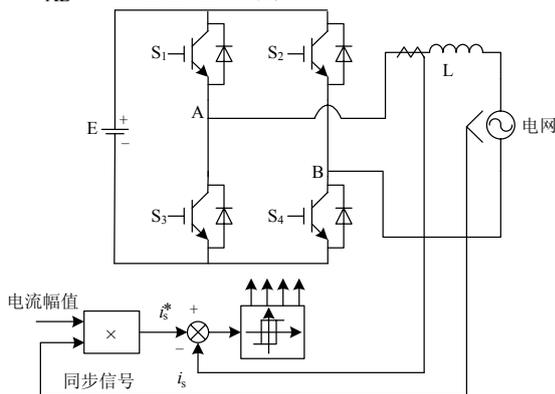


图 5 采用滞环控制方式的并网逆变原理图

Fig.5 Schematic diagram of inversion with the hysteresis control

### 2.2 并网控制策略

光伏并网系统采用双闭环控制策略进行并网控制<sup>[6]</sup>。双闭环的外环为电压环，目的是为了控制并网

逆变器直流输入端电压即电容电压稳定；内环为电流环，目的是为了控制并网逆变器的输出电流与电网电压同频同相，输送到电网的功率因数近似为 1。

将实际检测到的电容电压与给定的电容电压相比较，差值经过调节器，得到电流环的给定并网电流的幅值，当实际的电容电压超过给定值时，给定并网电流的幅值会增大，电容电压会下降；当实际的电容电压小于给定值时，给定并网电流的幅值会减小，电容电压则会增加，由此来实现电容电压稳定。给定并网电流幅值与经过锁相环节得到的电网电压的频率和相角同步信号相结合，得到并网电流的给定信号，此给定电流再与实际检测到的并网电流相比较，差值经过滞环比较环节，得到全桥逆变器的功率器件的开关信号，控制功率器件开通和关断，使并网电流在指定的环宽以内变化。

为了使并网电流谐波含量减少，则应减小环宽，由公式  $f = \frac{1}{T} = \frac{E^2 - u_s^2}{2HLE}$  可知，电流内环滞环

PWM 开关频率会升高，此时电流内环可由一个小惯性环节替代，即： $W_i(s) = \frac{1}{T_i s + 1}$

$T_i$  为电流内环等效时间常数，此处取值为 0.06 ms。

为了使电容电压能保持稳定，使电压环有良好的抗扰性能，按照典型 II 型系统对电压环进行整定，增加 PI 调节器，其传函： $K_p + \frac{K_i}{s}$

电压环开环传递函数为：

$$W_{ov}(s) = \frac{K_p s + K_i}{C s^2 (T_i s + 1)}$$

引入中频宽  $h$ ，根据工程设计方法中计算典型 II 型系统参数的公式，综合典型 II 型系统的性能， $h$  一般取 5，可得：

$$\frac{K_p}{K_i} = 5T_i$$

$$\frac{K_i}{C} = \frac{6}{50T_i^2}$$

## 3 孤岛检测方法及其参数优化

### 3.1 主动频率偏移法

光伏并网发电系统的孤岛效应对维修人员和电网设备构成了极大的危害，所以，光伏并网发电系统中必须加入反孤岛策略来抑制孤岛效应的发生。主动频率偏移法对孤岛检出率高，又无须在系统中添加任何硬件，但其检测性能受算法参数的影响很大，如果参数设置较小，虽然对电网的扰动小，但孤岛状况有被漏检的可能；如果参数设置较大，孤

岛检测出的可能性较大, 但是又会恶化电能质量, 甚至可能引起电压闪变和系统不稳定<sup>[7-9]</sup>。因此, 针对 AFD 算法的特点, 在其基础上提出了基于线性正反馈的频率偏移法 (active frequency drift with positive feedback, AFDPF), 对于线性 AFDPF, 其控制策略为:

$$c_f = c_{f_0} + k\Delta f \quad (1)$$

其中:  $c_f$  为截断系数;  $c_{f_0}$  为固定初始扰动;  $\Delta f = f - f_0$  为公共点频率与电网频率之差;  $k$  为反馈增益<sup>[10-11]</sup>。

### 3.2 主动式孤岛检测方法的参数优化

电网失压后, 如果不将逆变器和电网断开, 公共点的频率会发生波动, 直到新的平衡产生。稳态频率应使负载相角满足如下关系:

$$\arctan[R(1/\omega L - \omega C)] = \omega t_z / 2 = \pi c_f / 2 \quad (2)$$

其中,  $t_z$  为电流过零点超前 (或滞后) 电压过零点的时间间隔。

当负载的谐振角频率为电网角频率时, 品质因数为:

$$Q_{f_0} = \omega_0 RC = R / \omega_0 L \quad (3)$$

式中,  $\omega_0$  是电网角频率, 且  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{CL}$ 。

$$\text{谐振电容 } C_0 = 1/\omega_0^2 L \quad (4)$$

$$\text{负载电容与谐振电容之比为: } C_{\text{nom}} = C/C_0 \quad (5)$$

则负载电容与谐振电容之间的关系:

$$C = C_{\text{nom}} C_0 = (1 + \Delta C) C_0 \quad (6)$$

光伏系统与电网连接点处的角频率为:

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega$$

将 (3) ~ (6) 代入 (2) 式可得:

$$C_{\text{nom}} = \frac{\tan\left(\frac{\pi c_{f_0}}{2} + \frac{\pi k \Delta f}{2}\right)}{Q_{f_0}} - \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} + 1 \quad (7)$$

公共点频率与电网频率之差  $\Delta f$  的范围为  $-0.7 \sim 0.5$  Hz, 可假设固定初始扰动  $c_{f_0} = 0.02$ 。

要使检测无盲区, 则电容边界值应满足:

$$C_{\text{nom}}^+ - C_{\text{nom}}^- < 0 \quad (8)$$

由此可推导出:

$$k > 8Q_{f_0} / \omega_0 \quad (9)$$

将  $f_0 = 50$  Hz 代入可得:  $k > 0.0637$

由此可见, 要想使检测盲区最小, 反馈增益取

值最少应为 0.0637。

以上从理论上推导出特定负载下, AFDPF 检测无盲区的反馈增益值的取值范围, 为 AFDPF 孤岛检测方法的参数优化提供了参考依据。

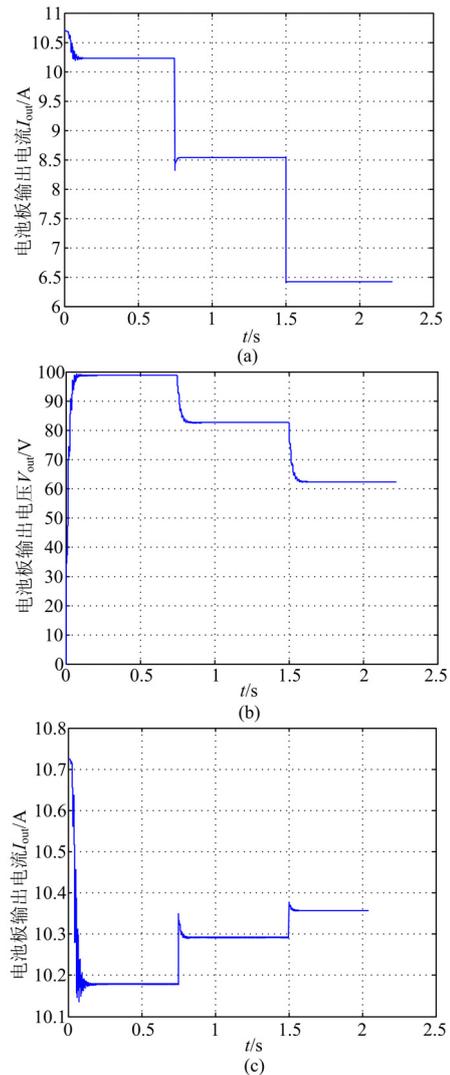
## 4 仿真验证

本文在 Matlab 仿真环境下, 分别建立了太阳能电池板、最大功率点跟踪和并网控制策略的仿真模型, 并对其进行了仿真。

### 4.1 太阳能电池板模型的仿真

根据太阳能电池的数学模型, 利用 Simulink 中的模块建立了光伏电池的仿真模型。

在环境温度和光照强度变化时, 电池板输出波形如图 6 所示。图 6 (a), 6 (b) 为光照强度降低时电池板输出电流和电压波形; 图 6 (c), 6 (d) 环境温度升高时电池板输出电流和电压波形。



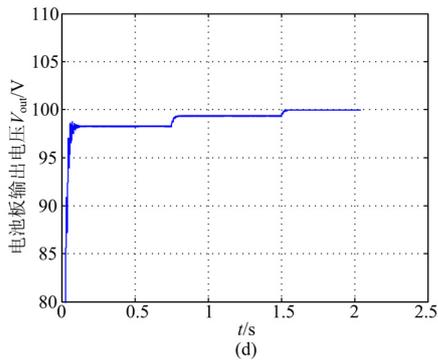


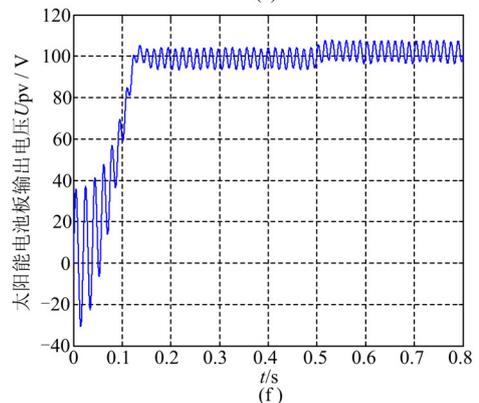
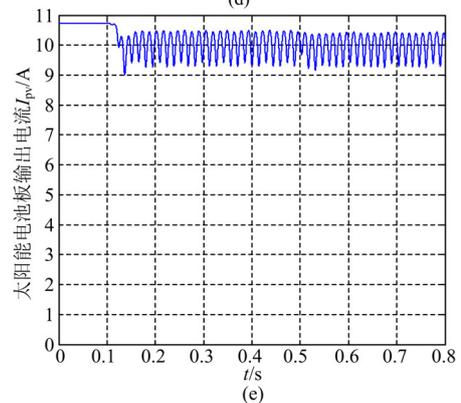
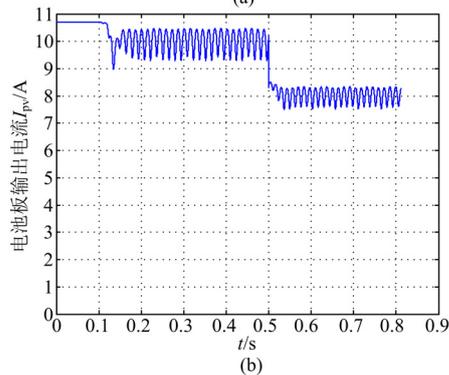
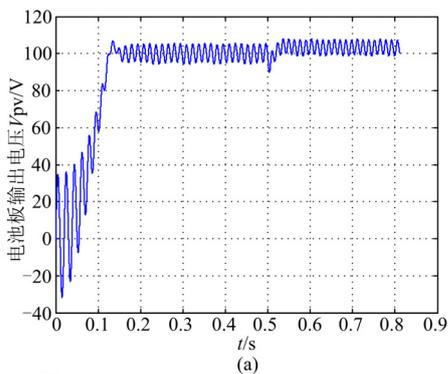
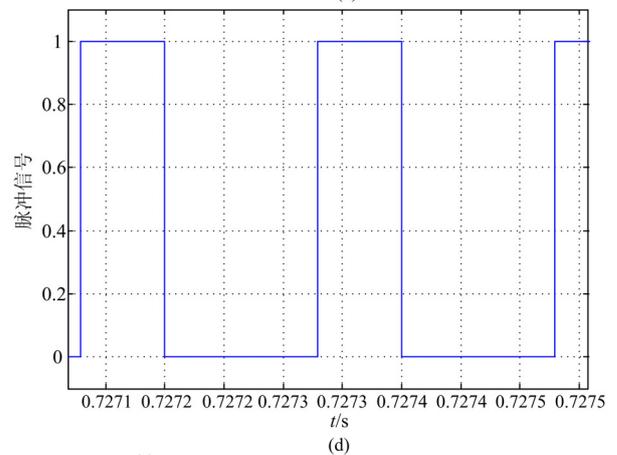
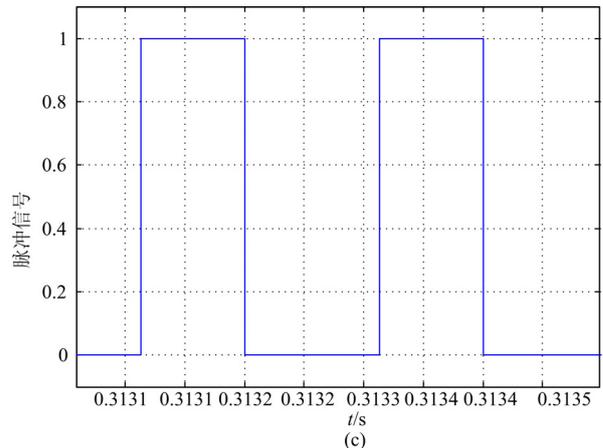
图 6 太阳能电池板仿真波形

Fig.6 Simulation waveforms of the solar panel

从仿真波形可以看出，此模型可以很好地模拟太阳能电池板的各特性。

#### 4.2 最大功率点跟踪的仿真

结合 MPPT 控制策略，搭建了仿真模型，如图 7 所示，图 7 (a)，7 (b) 为光照强度降低时，最大功率点电压和电流的波形，图 7 (c)，7 (d) 为相应的脉冲信号。可以看出，不同光照强度时，为了跟踪最大功率点，MPPT 控制器输出的脉冲控制信号的占空比不同。可以很好地验证前面对太阳能电池进行最大功率点跟踪的理论分析。7 (e)，7 (f) 为环境温度降低时，最大功率点电压和电流的波形，7 (g)，7 (h) 为光照强度和环境温度变化时，太阳能电池输出的功率变化波形。



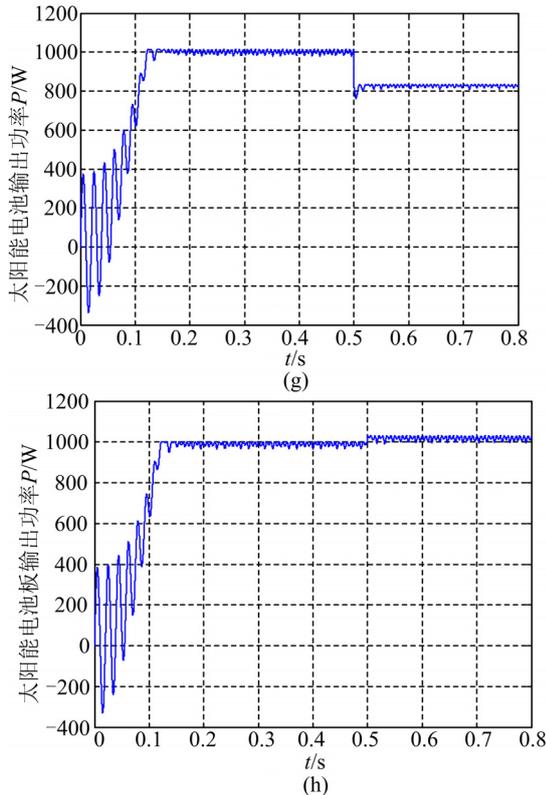


图 7 最大功率点跟踪仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of the MPPT

### 4.3 并网控制策略的仿真

根据并网控制采用的双闭环控制策略, 利用 SimPowerSystems 工具库中的模块搭建了并网控制器仿真模型。滤波电感  $L=10\text{ mH}$ , 电容  $C=2\ 200\ \mu\text{F}$ , 电容电压的给定值为  $350\text{ V}$ , 为了防止同一桥臂上两个开关器件同时导通, 滞环比较器的上下限分别设置为  $0.1, -0.09$  和  $0.09, -0.1$ 。

从图 8, 9 的仿真波形可以看出, 电容电压稳定在给定电压值处, 并网电流和电网电压同频同相, 验证了并网控制策略的理论分析。

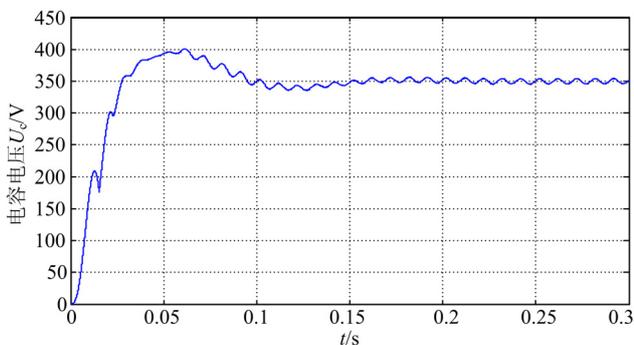


图 8 电容电压波形

Fig.8 Voltage waveform of the capacitance

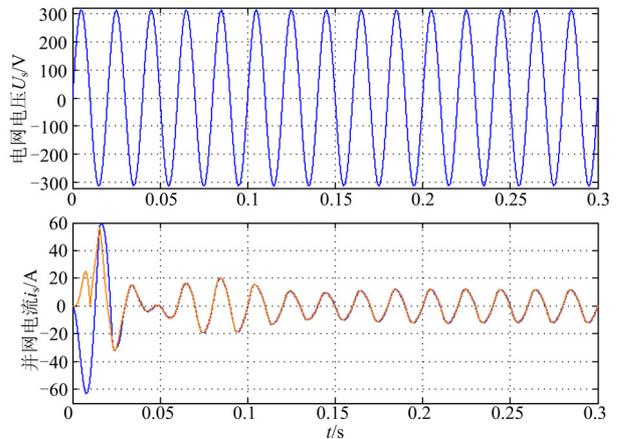


图 9 电容电压电网电压和并网电流波形

Fig.9 Waveforms of the voltage of the grid and the current

## 5 结束语

文章首先采用了双级式能量变换结构, 接着分析了太阳能电池的特性, 采用了改进扰动观察法结合 BOOST 升压电路进行最大功率点跟踪的方案。采用双闭环控制策略对并网逆变器进行控制, 然后分析了基于正反馈的主动移频式孤岛检测方法 (AFDPF) 的参数优化方案。最后在 Matlab 仿真环境下建立了仿真模型, 并进行了仿真, 仿真结果证明了本文的方案和控制策略的正确性。

## 参考文献

- [1] 吴理博, 赵争鸣, 刘建政, 等. 单级式光伏并网逆变系统中的最大功率点跟踪算法稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (6): 73-77.  
WU Li-bo, ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. Research on the stability of MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (6): 73-77.
- [2] 崔岩, 蔡炳煌, 李大勇, 等. 太阳能光伏系统 MPPT 控制算法的对比研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27 (6): 535-539.  
CUI Yan, CAI Bing-huang, LI Da-yong, et al. Comparative studies on the MPPT control algorithms of solar energy photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 27 (6): 535-539.
- [3] Jung Youngseok, So Junghun, Yu Gwonjong. Improved perturbation and observation method (IP&O) of MPPT control for photovoltaic power systems[C]. //Photovoltaic Specialists Conference. 2005.
- [4] 顾和荣, 杨子龙, 邬伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (9): 108-112.

- GU He-rong, YANG Zi-long, WU Wei-yang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (9) : 108-112.
- [5] 戴训江, 晁勤. 光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4) : 25-30.
- DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Research of adaptive current hysteresis band track control for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (4) : 25-30.
- [6] 许颇, 张崇巍, 张兴. 三相光伏并网逆变器控制及其反孤岛效应[J]. 合肥工业大学学报, 2006, 29 (9) : 1139-1143.
- XU Po, ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Research on the whole control schemes and anti-islanding protection for the three-phase grid-connected photovoltaic inverter[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2006, 29 (9) : 1139-1143.
- [7] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3) : 810-816.
- [8] LIU Fu-rong, KANG Yong. Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method[C]. //Applied Power Electronics Conference. 2007 : 1379-1384.
- [9] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (2) : 290-296.
- [10] 刘芙蓉, 康勇. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 95-99.
- LIU Fu-rong, KANG Yong. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 95-99.
- [11] 郑诗程, 丁明, 苏建徽, 等. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12) : 3085-3088.
- ZHENG Shi-cheng, DING Ming, SU Jian-hui. Simulation and experiment research of photovoltaic generation system and its islanding[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (12) : 3085-3088.

---

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

李冬辉(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事计算机控制、电力电子应用、楼宇自动化等方面的研究; E-mail: lidonghui@tju.edu.cn

王鹤雄(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、光伏发电系统、楼宇自动化等方面的研究;

朱晓丹(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、电力电子应用方面的研究。

---

(上接第 201 页 continued from page 201)

- [15] 谭东. 广东省峰谷电价实施及大工业用户响应研究[J]. 湖北电力, 2003, 27 (5) : 55-57.
- TAN Dong. The implementation of peak and valley time price for electricity in Guangdong and the research of large industrial consumer response[J]. Hubei Electric Power, 2003, 27 (5) : 55-57.
- [16] 杨大雄, 陈雁. 上海市峰谷分时电价特性及效益分析[J]. 华东电力, 2005, 33 (11) : 20-23.
- YANG Da-xiong, CHEN Yan. Characteristics of

time-of-use electricity price of Shanghai and benefits achieved[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (11) : 20-23.

---

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

程瑜(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为销售电价理论及方法, 电力经济分析;

翟娜娜(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力经济分析. E-mail: beibeina10@163.com

---

(上接第 207 页 continued from page 207)

- [11] Nicholas W M, William W P, Juan J S. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine-generators [EB/OL]. (2003-10-27) [2010-3-15].  
http://www.easthavenwindfarm.com/filing/high/modeling.pdf.

黄崇鑫(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统控制; E-mail: huangchongxin@gmail.com

张凯锋(1977-), 男, 副研究员, 研究方向为电力系统控制;

戴先中(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性控制、电力系统控制。

---

收稿日期: 2010-04-09

作者简介: