

6-2-2020

## Modeling and Control Method of Photovoltaic Micro-Inverter

Weiliang Liu

*1. State key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;;*

Chunlai Li

*2. Key Laboratory of Grid-Connected Photovoltaic Technology of Qinghai Province, Xining 810008, China;*

Changliang Liu

*1. State key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;;*

Yinsong Wang

*1. State key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China;;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Modeling and Control Method of Photovoltaic Micro-Inverter

### Abstract

**Abstract:** Photovoltaic micro-inverter can solve the poor reliability and low efficiency problem of centralized inverter, therefore it has a good application prospect. *Small signal analysis model was established for the photovoltaic micro-inverter with flyback topology structure. Considering function of reverse current prevention being required when it was applied to the low voltage distribution network, control methods were designed respectively for load current tracking mode and maximum power point tracking mode, and the controller parameters were optimized using genetic algorithm.* Experimental and simulation results show that the micro-inverter can steadily work in two different modes, and reduce the harmonic content of output current.

### Keywords

photovoltaic power generation, reverse current prevention, micro-inverter, maximum power point tracking (MPPT)

### Authors

Weiliang Liu, Chunlai Li, Changliang Liu, Yinsong Wang, Yongjun Lin, Liangyu Ma, and Wenying Chen

### Recommended Citation

*Liu Weiliang, Li Chunlai, Liu Changliang, Wang Yinsong, Lin Yongjun, Ma Liangyu, Chen Wenying.* Modeling and Control Method of Photovoltaic Micro-Inverter[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 690-697.

## 光伏发电微型逆变器建模与控制方法研究

刘卫亮<sup>1</sup>, 李春来<sup>2</sup>, 刘长良<sup>1</sup>, 王印松<sup>1</sup>, 林永君<sup>1</sup>, 马良玉<sup>1</sup>, 陈文颖<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 保定 071003; 2. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 西宁 810008)

**摘要:** 光伏发电微型逆变器能够解决集中式逆变器可靠性差、效率低的问题, 有着良好的应用前景。针对一种采取反激式拓扑结构的光伏发电微型逆变器, 建立了其小信号分析模型。考虑到将其应用于低压配电网时需具备防逆流功能, 分别设计了最大功率跟踪模式与负载电流跟踪模式下的控制方法, 并利用遗传算法进行了控制器参数优化。仿真与试验表明, 所提出的控制方法可使微型逆变器稳定地工作于最大功率跟踪模式与负载电流跟踪模式, 并能够降低输出电流的谐波含量。

**关键词:** 光伏发电; 防逆流; 微型逆变器; 最大功率跟踪

中图分类号: TM85 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 03-0690-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703030

## Modeling and Control Method of Photovoltaic Micro-Inverter

Liu Weiliang<sup>1</sup>, Li Chunlai<sup>2</sup>, Liu Changliang<sup>1</sup>, Wang Yinsong<sup>1</sup>, Lin Yongjun<sup>1</sup>, Ma Liangyu<sup>1</sup>, Chen Wenyong<sup>1</sup>

(1. State key laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Baoding 071003, China

2. Key Laboratory of Grid-Connected Photovoltaic Technology of Qinghai Province, Xining 810008, China )

**Abstract:** Photovoltaic micro-inverter can solve the poor reliability and low efficiency problem of centralized inverter, therefore it has a good application prospect. *Small signal analysis model was established for the photovoltaic micro-inverter with flyback topology structure. Considering function of reverse current prevention being required when it was applied to the low voltage distribution network, control methods were designed respectively for load current tracking mode and maximum power point tracking mode, and the controller parameters were optimized using genetic algorithm.* Experimental and simulation results show that the micro-inverter can steadily work in two different modes, and reduce the harmonic content of output current.

**Keywords:** photovoltaic power generation; reverse current prevention; micro-inverter; maximum power point tracking (MPPT)

## 引言

随着世界能源需求的快速增长和化石能源的逐渐减少, 基于各种新型能源的分布式发电越来越受到重视。光伏发电作为清洁的新型能源, 在配电

网中得到了日益广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。为了得到较高的功率等级, 通常将若干光伏电池组件进行串、并联, 然后通过一个较大容量的逆变器实现功率输出。由于各个光伏电池组件之间存在特性差异, 难以保证它们均工作于最大功率点, 从而造成功率损失。另外, 当逆变器出现故障时, 将影响所有光伏电池组件的功率输出。

因此, 近年来学者们提出了适合于单个光伏电池组件的微型逆变器的概念, 由于它可以保证每个组件均工作于最大功率点, 因此可有效地提高发电



收稿日期: 2015-05-29 修回日期: 2015-08-24;  
基金项目: 华北电力大学中央高校科研业务费项目(2015ZD17), 国家电网公司科技项目(2014-Z-Y34A);  
作者简介: 刘卫亮(1983-), 男, 河北衡水, 博士生, 讲师, 研究方向为新能源与微电网技术; 李春来(1980-), 男, 辽宁朝阳, 硕士, 高工, 研究方向为新能源技术。

效率, 成为未来光伏并网发电的发展趋势之一。关于微型逆变器的公开研究文献还比较少, 文献[4]对光伏微型逆变器进行了综述, 说明了微型逆变器的设计要求。文献[5-7]对光伏微型逆变器中的功率解耦技术进行了研究。文献[8]则对两级式微型逆变器控制策略进行了仿真研究。

本文针对一种基于反激式拓扑结构的光伏发电微型逆变器, 研究了其小信号分析模型。考虑到将其应用于低压配电网时需具备防逆流功能, 分别给出了最大功率跟踪模式与负载电流跟踪模式下的控制方法, 并利用遗传算法进行了控制器参数优化, 最终通过仿真和试验对所提控制方法的性能进行了验证。

## 1 微型逆变器结构与工作模式

本文研究的微型逆变器主要由反激变换器、工频逆变桥与 EMI 滤波器组成, 如图 1 所示。反激变换器的作用是实现升压变换以及电气隔离, 将光伏组件输出的直流电流转换为半波正弦电流; 工频逆变桥的作用是将前级输出的半波正弦电流翻转为全波正弦电流, 并将电流馈送至负载前级的 EMI 滤波器。

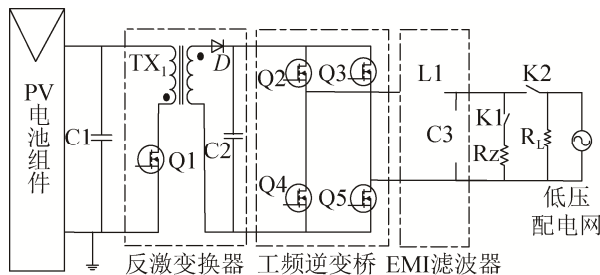


图 1 光伏发电微型逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of photovoltaic micro-inverter

由于反激变换器只允许能量单向流动, 空载时不能进行输出电压调节, 在 EMI 滤波器后设置了辅助负载  $R_z$ , 用于并网前的逆变器输出电压控制。

微型逆变器工作阶段分为并网前与并网后。并网前, 微型逆变器工作于电压跟踪模式, 即闭合

K1, 调节逆变器输出电压与电网电压的幅值、频率、相位一致, 然后闭合 K2 完成并网。并网后, 断开 K1, 为了保证不对低压配电网输出功率, 需实现防逆流功能, 微型逆变器转为负载电流跟踪模式, 即输出电流设定值跟踪本地负载电流(多个微型逆变器并联运行时则均分本地负载电流)。当光伏电池组件输出功率充足时, 控制逆变器输出电流跟踪本地负载电流; 当光伏电池组件输出功率不足时, 微型逆变器工作于最大功率跟踪模式, 本地负载所需功率缺额由配电网补充。

## 2 微型逆变器模型

作为微型逆变器的核心部分, 反激变换器可以看做为 Buck-Boost 变换器的隔离模式, 本质上属于高度非线性系统<sup>[9-10]</sup>。为了便于分析, 将电网电压  $V_{grid}$  等效为正弦半波, 则微型逆变器等效电路如图 2 所示。

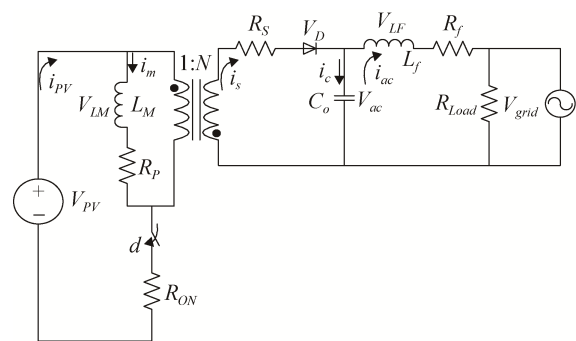


图 2 微型逆变器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of micro-inverter

可见, 电路中具有电感  $L_M$ 、电容  $C_o$ 、电感  $L_f$  3 个储能元件, 所以该系统为三阶系统。取电感  $L_M$  的电流  $i_m$ 、电容  $C_o$  的电压  $V_{ac}$ 、电感  $L_f$  的电流  $i_{ac}$  做为状态变量, 则在一个开关周期内, 根据基尔霍夫电压、电流定律, 可得到一个周期的平均电压、电流方程如下

$$V_{LM} = L_M \frac{d(i_m)}{d(t)} = d \cdot V_{pv} - d \cdot i_m (R_{ON} + R_p) - d' \left( \frac{V_{ac} + i_s \cdot R_s}{N} \right) \quad (1)$$

$$i_s = \frac{i_m}{N} \cdot d' \quad (2)$$

$$V_{LF} = L_f \cdot \frac{d(i_{ac})}{d(t)} = V_{ac} - i_{ac} \cdot R_f - V_{grid} \quad (3)$$

$$i_c = C_o \cdot \frac{d(V_{ac})}{d(t)} = i_s - i_{ac} \quad (4)$$

$$V_{grid} = R_{load} \cdot i_{ac} \quad (5)$$

$$i_{pv} = d \cdot i_m \quad (6)$$

其中： $d$  为 PWM 占空比， $d'=1-d$ ； $N$  为反激变换器变比； $R_{on}$  为反激变换器中原边开关管的通态电阻； $R_p$ ,  $R_s$  分别为反激变换器的原边电阻和副边电阻。设  $X, U, Y$  分别是系统的稳态工作点， $\tilde{x}, \tilde{u}, \tilde{y}$  是稳态工作点处的扰动量，则有

$$x = X + \tilde{x} = [I_m \ I_{ac} \ V_{ac}] + [\tilde{i}_m \ \tilde{i}_{ac} \ \tilde{V}_{ac}] \quad (7)$$

$$u = U + \tilde{u} = [D \ V_{grid} \ V_{pv}] + [\tilde{d} \ \tilde{V}_{grid} \ \tilde{V}_{pv}] \quad (8)$$

$$y = Y + \tilde{y} = [I_{ac}] + [\tilde{i}_{ac}] \quad (9)$$

将式(7)~(9)带入式(1)~(6)，即进行小信号线性化，可得到系统的状态方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_m \\ \dot{\tilde{i}}_{ac} \\ \dot{\tilde{V}}_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_m} & 0 & -\frac{D'}{L_m \cdot N} \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{I}{L_f} \\ \frac{D'}{N \cdot C_o} & -\frac{I}{C_o} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_m \\ \tilde{i}_{ac} \\ \tilde{V}_{ac} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k}{L_m} \\ 0 \\ -\frac{I_m}{N \cdot C_o} \end{bmatrix} [\tilde{d}] + \begin{bmatrix} \frac{D}{L_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\tilde{V}_{pv}] + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{I}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} [\tilde{V}_{grid}] \quad (10)$$

$$\tilde{i}_{ac} = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \tilde{i}_m \\ \tilde{i}_{ac} \\ \tilde{V}_{ac} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中： $D'=1-D$ ；

$$k = V_{pv} - I_m(R_{ON} + R_p) + \frac{V_{ac} + I_s \cdot R_s}{N} ;$$

$$R = D(R_{ON} + R_p) + \frac{D' R_s}{N} .$$

则逆变器输出电流  $i_{ac}$  和 PWM 占空比  $d$  之间的传递函数为：

$$G(s) = \frac{\frac{kD' - I_m R}{L_m N L_f C_o} s - \frac{I_m}{L_m C_o N} s}{s^3 + (\frac{R}{L_m} + \frac{R_f}{L_f}) s^2 + (\frac{R R_f}{L_m L_f} + \frac{I}{L_f C_o} + \frac{D'^2}{N^2 L_m C_o}) s + (\frac{R}{L_m L_f C_o} + \frac{R_f D'^2}{N^2 L_m C_o})} \rightarrow \quad (12)$$

### 3 微型逆变器控制方法

#### 3.1 逆变器并网前控制方法

逆变器并网前，需要控制逆变器输出电压  $V_o$  跟踪单相电网电压  $V_{grid}$  的幅值、相位和频率。此时，对于图 2，可认为  $R_{load}=R_z$ 。由于  $R_z$  阻值较大，逆变器输出电流  $i_{ac}$  的峰值较小，采用电压瞬时值反馈的单闭环控制方法，并引入前馈以补偿提高系统的稳定性，如图 3 所示。

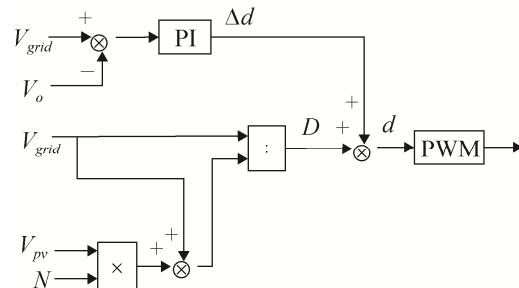


图 3 电压控制框图  
Fig. 3 Control block diagram of voltage

其中前馈调节量  $D$  (即工作稳态值)的计算依据反激变换器的输入电压  $V_{pv}$  与输出电压  $V_{ac}$  的关系

$$V_{ac} = \frac{N \cdot D}{1 - D} V_{pv} \quad (13)$$

$$\text{得 } D = \frac{V_{ac}}{V_{ac} + N \cdot V_{pv}} \quad (14)$$

由于  $R_f, L_f$  较小， $V_{ac} \approx V_{grid}$ ，则有

$$D = \frac{V_{grid}}{V_{grid} + N \cdot V_{pv}} \quad (15)$$

可知，由于  $V_{pv}$  变化范围较小， $D$  的变化主要随着  $V_{grid}$  的相位变化。

### 3.2 逆变器并网后控制方法

逆变器并网后, 当光伏电池组件输出功率充足时, 应控制逆变器的输出电流  $i_{ac}$  跟踪本地负载电流  $i_L$ ; 当光伏电池组件输出功率不足时, 应控制逆变器工作于最大功率跟踪方式, 利用扰动观察法 (P&O) 得出逆变器输出电流幅值设定  $I_{ref}$ 。考虑到光伏电池 P-V 曲线在 MPP 左右斜率的不对称性, 在 MPP 右侧区域内, 采用较小的输出电流扰动步长  $\Delta I$  以保证跟踪精度, 在 MPP 左侧区域内, 采用较大的输出电流扰动步长  $K \cdot \Delta I$  来提高跟踪速度 ( $K > 1$ ), 以减少光伏电池在低功率输出区的运行时间。

根据光伏电池组件的特性, 当其最大功率输出能力大于本地负载需求时, 若限制其功率输出等于负载所需功率, 则输出电压  $V_{pv}$  将上升并稳定至 P-V 曲线的右侧; 当环境发生变化使得其最大功率输出能力小于本地负载需求时, 由于光伏电池的并联电容 C1 较小, 保持其功率输出等于负载所需功率将引起输出电压  $V_{pv}$  下降。因此, 可通过将  $V_{pv}$  的大小与阈值  $V_{min}$  进行比较来判断光伏出力是否充足, 从而决定逆变器的输出电流设定值。与电压控制模式相似, 对逆变器输出电流的  $i_{ac}$  的控制采用瞬时值反馈结合前馈补偿的调节方式, 如图 4 所示。

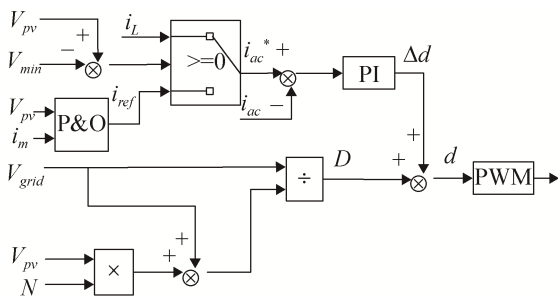


图 4 电流控制框图

Fig. 4 Control block diagram of current

## 4 控制器参数优化

由式(12)可知,  $G(s)$  随着稳态工作点  $I_m$ 、 $D$  以及  $V_{ac}$  的不同而变化。进一步分析, 由于  $D$  主要由  $V_{grid}$  相位决定, 而  $I_{ac}$  又与  $V_{grid}$  同相位, 可认为  $D$  近似由  $I_{ac}$  的相位决定。而依据反激变换器的原理, 近似有:

$$I_m = \frac{I_{ac} \cdot N}{1 - D} \quad (16)$$

即  $I_m$  也由  $I_{ac}$  与  $D$  决定。因此, 可认为  $G(s)$  主要随着  $I_{ac}$  的幅值与相位不同而变化。并网运行过程中, 对于线性负载, 电流  $i_L$  为正弦波, 幅值变化范围很大, 在四分之一周期内将从零变化至峰值。由于逆变器输出电流  $i_{ac}$  需要跟踪负载电流  $i_L$ , 所以其工作点  $I_{ac}$  的变化范围也比较大, 必须考虑对 PI 控制器参数进行优化, 使其对  $I_{ac}$  的变化具有鲁棒性。设光伏电池的额定输出功率为  $P$ , 电网电压有效值为  $V_{grm}$ ,  $I_{ac}$  的有效值为  $I_{rms}$ , 额定功率输出时的有效值为  $I_{acmax}$ , 则有

$$I_{acmax} = \frac{P}{V_{grm}} \quad (17)$$

本文取  $I_{rms}$  分别为  $\{\frac{1}{3}I_{acmax}, \frac{2}{3}I_{acmax}, I_{acmax}\}$ ,

相位  $\theta$  分别为  $\{30^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$  时共 9 个不同的稳态工作点进行 PI 控制器参数的寻优。设对于第  $i$  个稳态工作点,  $e_i(t)$  为  $G(s)$  的阶跃响应的绝对误差 ( $i=1, \dots, 9$ ), 选取绝对误差的一阶矩型 (ITAE) 的积分作为性能评价指标, 则目标函数为:

$$J = -\sum_{i=1}^9 \int_0^{\infty} t |e_i(t)| dt \quad (18)$$

遗传算法 (GA) 是一种模拟生物进化机制的随机化搜索方法, 具有并行计算、全局收敛等特点<sup>[11-12]</sup>。本文利用遗传算法对 PI 控制器参数进行优化, 具体实现步骤如下:

#### 1) 编码

本文采用二进制码表示。PI 控制器包括  $K_p$ ,  $K_i$  两个参数, 每个参数采用 10 位无符号二进制码表示, 则每个基因编码长度为 20。

#### 2) 初始群体的产生

首先, 根据经验估计出  $K_p$ ,  $K_i$  的取值范围。然后, 在此范围内按照均匀分布生成初始种群, 以保证遗传算法能够在整个可行参数解范围内进行搜索。

#### 3) 计算个体适应度值

适应度函数即优化问题的目标函数, 依据式 (18) 对群体中的个体进行适应度计算, 以评价个体

的性能。

4) 进行遗传操作。进行选择、交叉和变异操作，产生新的种群。

5) 计算新种群的适应度，如步骤3)。若满足终止条件，则表示找到最佳参数，否则，回到步骤4)，重新进行新的遗传操作过程，直至满足终止条件。

本文所研究的微型逆变器主要参数为： $L_m=55 \mu\text{H}$ ,  $R_p=28 \text{ m}\Omega$ ,  $R_{on}=15 \text{ m}\Omega$ ,  $R_s=1 \Omega$ ,  $C_o=0.017 \mu\text{F}$ ,  $L_f=600 \mu\text{H}$ ,  $R_f=0.61 \Omega$ 。利用 Matlab 的遗传算法工具箱 GA 进行 PI 控制器参数的优化， $K_p$  取值范围为  $[0, 1]$ ,  $K_i$  取值范围为  $[0, 5000]$ ，群体规模为 20，选择操作利用轮盘赌模型，设置交叉概率为 0.85，变异概率为 0.01，寻优结果为  $K_p=0.0122$ ,  $K_i=860$ 。

## 5 仿真

依据实验室已有的光伏电池组件，利用 Matlab 的 SimElectronics 元件库建立系统的仿真模型。其中，光伏电池组件参数为：额定功率  $P=235 \text{ W}$ ，开路电压  $V_{oc}=37 \text{ V}$ ，短路电流  $I_{sc}=8.54 \text{ A}$ ，最大功率点电压  $V_{mpp}=29.5 \text{ V}$ ，最大功率点电流  $I_{mpp}=7.97 \text{ A}$ 。

### 5.1 并网前

并网前，需要控制逆变器输出电压  $V_o$  跟踪电网电压  $V_{grid}$ ，仿真结果如图 5 所示，可见逆变器输出电压  $V_o$  的幅值、相位和频率都与配电网  $V_{grid}$  电压一致，从而可以避免并网时对配电网的冲击。

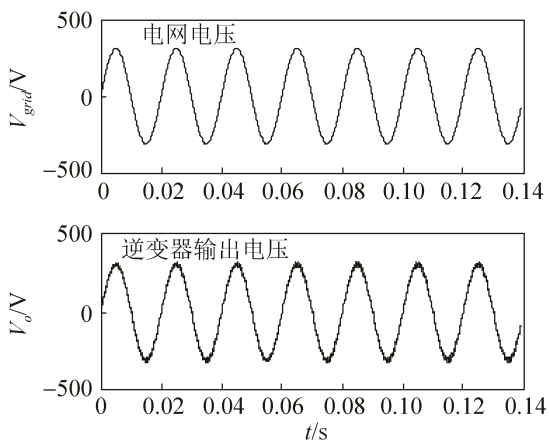
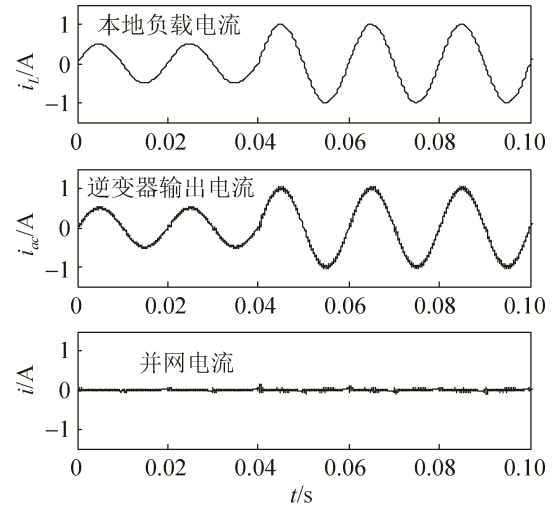


图5 并网前系统运行仿真曲线

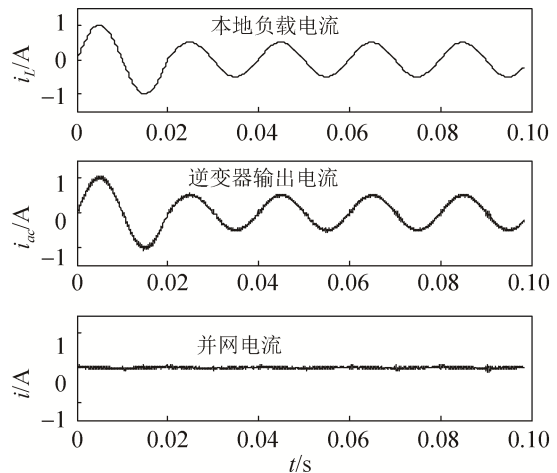
Fig. 5 Simulation running curves before connect to grid

### 5.2 负载电流跟踪模式

分别进行负载电流突升 100%与突降 50%仿真，如图 6 所示。可见，逆变器输出电流  $i_{ac}$  能够很好的跟踪负载电流  $i_L$ ，此时向配电网注入的电流  $i$  基本为 0，从而降低了对配电网的影响。



(a) 负载电流突升 100%



(b) 负载电流突降 50%

图6 负载电流突变时的系统运行仿真曲线

Fig. 6 Simulation running curves when load changes

为了对比 PI 控制器参数优化前后的控制效果，在不同功率水平下对逆变器输出电流进行了总谐波畸变率 THD 的计算，如表 1 所示。其中，优化前的 PI 控制器参数选取原则为，当微型逆变器以额定功率输出时，对式(12)进行伯德图分析和校正，得出控制器参数  $K_p=0.036$ ,  $K_i=1200$ 。可知，

在额定功率工况下, 两者逆变器输出电流 THD 较为接近, 而在其它工况下, 优化后 PI 参数的逆变器输出电流 THD 明显低于优化前, 说明经过优化后的 PI 参数具有更强的自适应能力。

表 1 逆变器输出电流的 THD  
Tab. 1 THD of inverter output current

工况	功率水平 (相对额定容量)	PI 参数	
		优化前	优化后
1	25	7.75	4.16
2	50	5.63	3.42
3	75	4.80	3.94
4	100	4.05	4.12

### 5.3 最大功率跟踪模式

设置扰动观察法中的参数  $n=2$ , 逆变器输出电压扰动步长  $\Delta I=0.01$  A,  $K=2$ 。初始时刻, 即  $t=0$  s 时设定光照强度为  $600$  W/m<sup>2</sup>,  $t=0.04$  s 时, 令光照强度突变为  $800$  W/m<sup>2</sup>, 跟踪过程如图 7 所示。每个扰动周期为  $0.04$  s, 经过 18 次扰动之后, 在  $t=0.80$  s 时开始进入稳态过程, 即在最大功率点左右振荡。

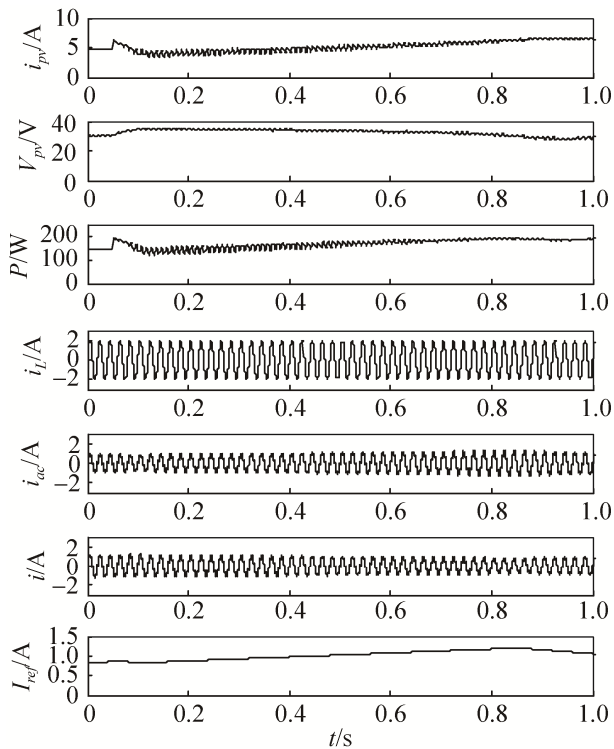


图 7 最大功率跟踪仿真过程  
Fig. 7 Simulation process of MPPT

## 6 试验

为了进一步验证系统控制方法的有效性, 按照仿真的系统参数, 制作了  $300$  W 微型逆变器样机进行试验。其中主控制芯片采用 dsPIC33 系列单片机, 反激变压器原、副边匝比  $1:6$ , 原边开关管 Q1 为 IRF3710, 开关频率为  $120$  kHz, 副边二极管为 C2D05120E, 全桥逆变部分开关管 Q2-Q5 选用 IPB60R190C6,  $C1=12\ 000$   $\mu$ F,  $C2=0.1$   $\mu$ F,  $C3=0.47$   $\mu$ F,  $L1=600$   $\mu$ H。光伏电池选用英利公司的  $235$  W 多晶硅组件, 相关参数与仿真模型中的光伏电池完全一致。

### 6.1 并网前

并网前, 闭合 K1, 使微型逆变器工作于电压跟踪模式, 利用示波器所记录的逆变器输出电压曲线和电网电压曲线如图 8 所示, 可见逆变器输出电压  $V_o$  的幅值、相位和频率都能够与配电网电压  $V_{grid}$  较好的保持一致, 满足并网条件, 闭合 K2 则可完成并网。

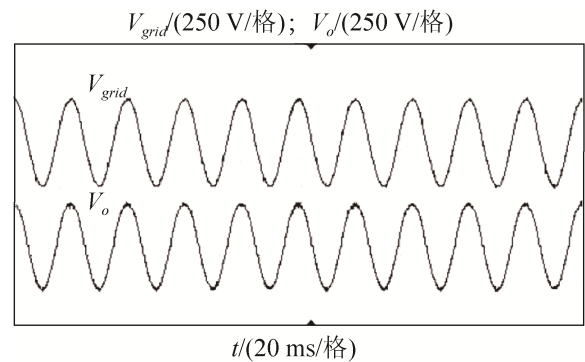


图 8 并网前系统运行曲线  
Fig. 8 Running curves before connect to grid

### 6.2 负载电流跟踪模式

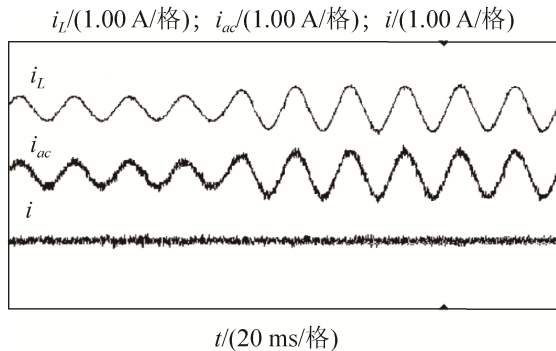
并网后, 分别进行负载突升  $100\%$  与突降  $50\%$  试验, PI 控制器参数的设定与仿真模型中一致, 如图 9 所示。可见, 两种负载突变情况下逆变器输出电流  $i_{ac}$  都能够快速的跟踪负载电流  $i_L$ , 并且稳态时向配电网注入的电流  $i$  很小, 说明利用遗传算法优化后的 PI 控制器参数具有较好的



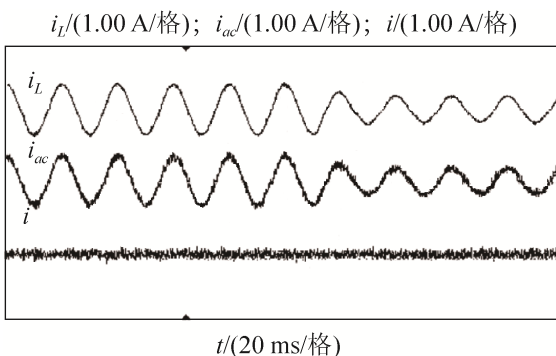
鲁棒性。同时，仿真模型中的 PI 控制器参数适用于微型逆变器试验样机，这也说明利用小信号分析方法获得的微型逆变器模型具有较高的精度。

### 6.3 最大功率跟踪模式

最大功率跟踪试验采用与仿真部分相同的参数，即  $n=2$ ， $\Delta I=0.01$  A， $K=2$ ，并利用反激变换器原边电感电流  $i_m$  的平均值代替光伏电池输出电流  $i_{pv}$  平均值。试验曲线如图 10 所示。初始时刻  $t=0$  s 时，未进行最大功率跟踪，此时光伏电池输出电压  $V_{pv}$  为 32.6 V，逆变器输出电流  $i_{ac}$  有效值为 0.35 A。当  $t=0.2$  s 时，开始进行最大功率跟踪，每个扰动周期为 0.04 s，经过 25 次扰动之后，在  $t=1.2$  s 时进入稳态，此时光伏电池输出电压  $V_{pv}$  约为 30.2 V，逆变器输出电流  $i_{ac}$  有效值设定在 0.57 A 左右波动，负载所需功率缺额由配电网补充。



(a) 负载电流突升 100%



(b) 负载电流突降 50%

图 9 负载电流突变时的系统运行试验曲线

Fig. 9 Running curves when load changes

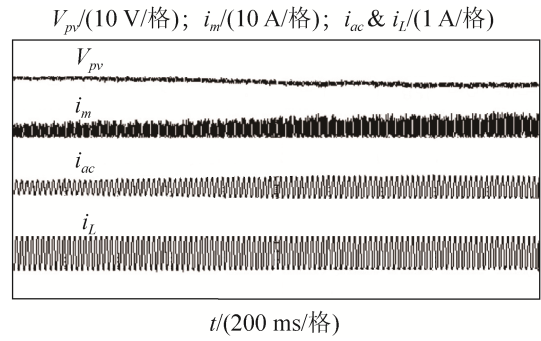


图 10 最大功率跟踪试验过程

Fig. 10 Experiment process of MPPT

## 7 结论

光伏发电微型逆变器作为一种新型的并网装置，有着良好的发展前景。本文针对反激式微型逆变器拓扑结构，重点研究了其数学模型及控制方法。仿真与试验表明，该逆变器可以稳定地工作于最大功率跟踪模式与负载电流跟踪模式，并降低输出电流的谐波含量。本文的下一步工作是考虑光伏微型逆变器功能的进一步扩展，如参与低压配电网的电压调节、谐波补偿等。

### 参考文献:

- [1] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. (Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.)
- [2] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247. (Chen Quan, Li Lingdong, Wang Qunjing, et al. Simulation Model of Photovoltaic Generation Grid-Connected System and Its Impacts on Voltage Stability in Distribution Grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.)
- [3] Hill C A, Such M C, Chen D M, et al. Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2012, 3(2): 850-857.
- [4] 高文祥, 王明渝, 王立健, 等. 光伏微型逆变器研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 147-155. (Gao Wenxiang, Wang Mingyu, Wang Lijian, et al. Review of research on photovoltaic micro-inverter [J].

- Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 147-155.)
- [5] 李朵, 蒋晨, 陈敏, 等. 光伏并网微型逆变器中功率解耦技术概述 [J]. 电源学报, 2012 (2): 57-61, 71. (Li Duo, Jiang Chen, Chen Min, et al. Hysteresis Grid Current Control Method for Active Power Filter with Self-adaptive Switching Frequency [J]. Journal of Power Supply, 2012 (2): 57-61, 71.)
- [6] 胡海兵, 黄宵驳, 王万宝, 等. 具有功率解耦功能的三端口反激式单级光伏微型逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 47-54, 185. (Hu Haibing, Huang Xiaobo, Wang Wanbao, et al. A PV Micro-inverter Based on Three-port Flyback With Power Decoupling Function [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 47-54, 185.)
- [7] Haibing Hu, Harb S, Kutkut N, et al. Power decoupling techniques for micro-inverters in PV systems-a review [C]// 2010 IEEE Conference on Energy Conversion Congress. USA: IEEE, 2010: 3235-3240.
- [8] 牟龙华, 黄舒予, 周伟. 小功率微型逆变器的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 58-64. (Mu Longhua, Huang Shuyu, Zhou Wei, et al. Research on low-power micro-inverter [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 58-64.
- [9] Meshram S, Agnihotri G, Gupta S. The steady state analysis of Z-Source Inverter based Solar Power Generation System [C]// 2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics. USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [10] Microchip Technology Inc. Grid-Connected Solar Micro inverter Reference Design [EB/OL]. (2012)[2015-05-29] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01444A.pdf>
- [11] Neath M J, Swain A, Madawala U, et al. An optimal PID controller for a bidirectional inductive power transfer system using Multi-objective Genetic Algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 29(3): 1523-1531.
- [12] Rani M R, Selamat H, Zamzuri H, et al. PID controller optimization for a rotational inverted pendulum using genetic algorithm [C]// 2011 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Kuala Lumpur. Malaysia, USA: IEEE, 2011: 1-6.

(上接第 689 页)

- [3] 顾忠茂. 我国先进核燃料循环技术发展战略的一些思考 [J]. 核科学与放射化学, 2006, 28(1): 1-10. (Gu Zhongmao. Some Strategic Considerations on the Development of Advance Nuclear Fuel Cycle Technologies in China [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2006, 28(1): 1-10.)
- [4] 吴英, 吴军, 穆强, 等. 2050 年前我国压水堆核燃料循环模式研究 [J]. 核科学与工程, 2012, 32(4): 371-378. (Wu Ying, Wu Jun, Mu Qiang, et al. Study of Nuclear Fuel Cycle Mode of PWR in China before 2050 [J]. Nuclear Science and Engineering, 2012, 32(4): 371-378.)
- [5] IAEA. PRIS of IAEA, [EB/OL]. (2016-10-02) [2017-10-04]. <https://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>.
- [6] Phil Sharp, Chair, John Ahearne, et al. Cochran et al. The Future of Nuclear Power [M]. USA: MIT, 2003: 118-120.
- [7] 徐景明. 核燃料循环课程教材 [D]. 北京: 清华大学, 2012: 26-28. (Xu Jingming. Nuclear Fuel Cycle Courses [D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2012: 26-28.)
- [8] Xu Zhiwen. Design Strategies for Optimizing High Burnup Fuel in Pressurized Water Reactors [D]. USA: MIT, 2003.