

# 光伏发电逆变并网系统复合控制策略<sup>\*</sup>

孟军<sup>1,2†</sup>, 徐先勇<sup>2</sup>, 方璐<sup>3</sup>, 贺西<sup>3</sup>, 汪沅<sup>3</sup>

(1. 中南大学 商学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007;  
3. 湖南大学 现代工程训练中心, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**研究了一种适用于兼顾无功补偿的微网光伏并网逆变系统,提出一种单相光伏逆变器的复合控制方法.根据单相光伏逆变器的功率平衡原理,推导出光伏逆变器的直流侧二次纹波电压的大小,由此进行校正补偿消除逆变器输出的三次谐波电流.光伏单相并网逆变器的前馈基波调制信号可由其稳态数学模型得出,从而进行输出电流快速前馈控制,然后利用无差拍控制器来实现输出电流的闭环控制,从而形成了前馈+反馈的复合控制方法,可以实现单相逆变器输出电流的快速、无差跟踪.实验和仿真结果表明了本文所提出的复合控制方法能够提高光伏并网逆变器的工作性能,并改善微网的电能质量.

**关键词:**微网;复合控制;有功功率控制;无功功率控制;光伏发电

**中图分类号:**TK514

**文献标志码:**A

## Hybrid Control Strategy of Photovoltaic Generation Inverter Grid-connected Operating System

MENG Jun<sup>1,2†</sup>, XU Xianyong<sup>2</sup>, FANG Lu<sup>3</sup>, HE Xi<sup>3</sup>, WANG Feng<sup>3</sup>

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China;

3. Modern Engineering Training Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A kind of micro-grid photovoltaic inverter system considering the reactive power compensation was studied, and a compound control method for photovoltaic inverter was proposed. According to the power balance principle of single-phase photovoltaic inverter, the value of dc-side second-ripple voltage was deduced. Thus, it can modify and eliminate the output third harmonic current of photovoltaic inverter. Based on the steady-state mathematical model of single-phase inverter, the feed forward fundamental modulation signal of the inverter can be calculated, and then the output current closed-loop control can be realized by using deadbeat controller. As a result, the feed forward-feedback compound control method was formed, which can achieve fast and zero-error tracking of output current. The experiment and simulation results show that the proposed compound control method can effectively improve the dynamic performance of single-phase and perfect the power quality of distribution grid.

**Key words:** micro grid; hybrid control strategy; active power control; reactive power control; photovoltaic generation

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507057), National Natural Science Foundation of China(51507057)

作者简介:孟军(1973-),男,湖南长沙人,中南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: 5xxy@163.com

随着全球能源发展战略的变化,开发和利用绿色能源已经成为世界各国关注的焦点.太阳能作为一种可持续发展的绿色能源,其开发和利用已经引起世界各国和研究机构的高度重视,能源专家和工程技术人员对其开发利用进行了大量研究.建立光伏分布式发电系统,有助于为用户提供丰富的绿色能源<sup>[1-2]</sup>.同时也是实现我国节能减排和治理环境污染以及解决化石能源短缺的重要举措<sup>[3-5]</sup>.

由光伏发电系统的原理和构成可知,光伏电池输出为直流电,必须通过逆变器转换为交流电才能并网和向负荷供电<sup>[6]</sup>.光伏并网逆变器的控制策略主要是为了提高光伏并网逆变器输出电压信号的稳态和暂态性能<sup>[7-9]</sup>.在以光伏发电为主要微源的微网及含微网配电系统中,存在大量的感性负荷和非线性负载,其产生的大量无功功率会导致系统功率因数偏低,并使电压偏低以及线路损耗加大<sup>[10-11]</sup>.非线性负载还会产生各种频次的谐波,造成微网系统的谐波污染、引发微网谐振,对微网的安全稳定运行造成影响.根据现有的文献来看,目前普遍使用的光伏发电系统没有无功补偿的功能,以保证其最大输出有功功率.非线性负载所引起的无功问题一般采取装设专用的固定无功补偿装置或者静止无功发生器等装置进行动态无功补偿,这增加了系统的成本,同时新增的无功补偿装置也会带来新的电能质量和系统稳定运行方面的问题<sup>[12]</sup>.

本文针对微网中现有技术的不足和存在的问题,提出一种兼顾无功补偿的微网光伏并网逆变系统,该系统主要由光伏阵列电池、单相逆变器、输出

滤波器组成,可以实现微网有功和无功动态输出、稳定系统电压.在阐述该逆变系统工作原理的基础上,提出了一种单相光伏逆变器的复合控制方法.该复合控制方法主要由基于逆变器数学模型的前馈控制和基于无差拍控制的反馈控制组成.仿真结果表明复合控制系统能有效提高单相逆变器的工作性能,改善微网的电能质量.

## 1 系统结构

微网光伏逆变并网系统结构如图1所示,包括光伏阵列电池、Boost变换器<sup>[13]</sup>、单相全桥逆变器、输出滤波器 $L$ .光伏阵列电池的输出通过Boost变换器升压,输出连接单相电压型逆变器的直流侧电容;单相电压型逆变器将直流电通过PWM逆变器转换成单相交流电,再经由输出滤波器并联接入电网.图1中 $S_1$ 为功率管; $C_1$ 为光伏阵列电池输出电容; $C$ 为单相全桥逆变器直流侧电容; $L_s$ 为输电线路电感.光伏阵列电池输出电压信号为 $u_{pv}$ ;电流信号为 $I_{pv}$ ;  $u_s, u_{dc}, i_c, i_s, i_L$ 分别为电网电压、逆变器直流侧电压、逆变器输出电流、电网电流和负载电流.由于微网中一般存在压缩机、电动机和日光灯等感性负载,会产生一定量的无功功率,降低微网的功率因数,影响微网的电能质量.为此,本文提出了一种兼顾无功补偿的光伏并网逆变器,该逆变器在向电网输出有功功率的同时,还能够向邻近的感性负荷输送一定的无功功率,从而改善微网的电能质量.

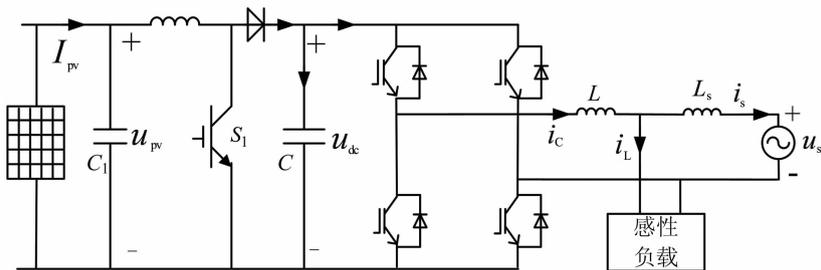


图1 微网单相光伏并网逆变系统结构图

Fig.1 Structure of Grid-Connected photovoltaic generation inverter

## 2 功率平衡及直流侧电压纹波分析

下面考察电网侧单相逆变电路对直流侧电容电压的影响.设电网电压 $u_s$ 的表达式为:

$$u_s = U \sin \omega t \quad (1)$$

其中, $U$ 为电网电压幅值, $\omega$ 为基波角频率.假设单相光伏逆变器通过闭环控制技术,可以实现交流电流的闭环跟踪,向电网输出额定的有功电流,同时向电网输出一定的无功电流来补偿负载产生的感性无功.设输出单相电流为:

$$i_c = I_p \sin \omega t + I_q \cos \omega t = I \sin (\omega t + \varphi) \quad (2)$$



变 Boost 电路开关周期的占空比  $t_{\text{off}}/T$ . 在其高压测电压由后级逆变器的维持下, 改变占空比即改变了 Boost 电路低压侧光伏板的输出电压, 以实现 MPPT.

### 2) 逆变器双闭环控制部分

图 2 中逆变器双闭环控制部分以逆变器直流侧参考电压  $u_{\text{dc}}^*$  与检测的直流侧电压  $u_{\text{dc}}$  构成电压外环闭环控制部分.  $u_{\text{dc}}^*$  与  $u_{\text{dc}}$  相减, 然后减去式(9)所得出的二次电压纹波分量, 其差值经过式(11)变换后得出电流内环闭环控制部分的指令信号  $i_f^*$ . 电流内环控制部分以光伏逆变器的输出电流  $i_c$  作为反馈量.

### 3) 逆变器基波前馈控制部分

图 2 中无差拍控制器的输出信号  $\Delta V_f$  与式(15)计算得出的前馈基波调制信号  $V_f$  相加构成逆变器基波前馈控制部分.

上述图 2 中的 MPPT 控制部分为较成熟控制, 本文就不再详细阐述. 图 2 中的逆变器双闭环控制部分和逆变器基波前馈控制部分详细推导, 见下文.

根据交直流侧功率平衡的原理, 直流侧电压外环存在二次纹波脉动<sup>[15-16]</sup>, 如果引入闭环控制系统中会使逆变器输出三次谐波电压和电流. 三次谐波信号的产生机理如下:

电压外环的跟踪误差经过控制器调节后, 乘以电压同步信号, 即得到电流内环的指令信号. 假设电压外环为 P 控制, 其增益为  $K$ , 由于电压外环存在二次纹波, 则由纹波电压而产生的指令电流为:

$$K \times \Delta u \times \sin \omega t = K\delta \sin(2\omega t + \varphi) \times \sin \omega t = K\delta [\cos(\omega t + \varphi) - \cos(3\omega t + \varphi)]/2 \quad (10)$$

由此可见, 二次纹波电压会产生额外的三次谐波电流和基波电流指令, 其幅值为  $K\delta/2$ . 为此本文针对直流侧电压外环控制, 提出了二次纹波电压的滤除方法, 消除纹波干扰, 实现直流侧电压正常控制. 首先将直流侧参考电压  $u_{\text{dc}}^*$  与检测的直流侧电压  $u_{\text{dc}}$  相减, 可以得到直流侧电压的直流分量的跟踪误差, 经过 PI 控制器的调节处理后减去二次纹波分量, 最后得到直流侧电压的调节指令  $I_{\text{dc}}$ .

根据调节指令  $I_{\text{dc}}$ 、有功功率  $P_d$  和补偿无功功率  $Q_c$ , 可以计算出光伏逆变器的基波指令信号  $i_f^*$ :

$$i_f^* = (I_{\text{dc}} + \frac{2P_d}{U}) \sin \omega t + \frac{2Q_c}{U} \cos \omega t \quad (11)$$

其中  $U$  为电网电压幅值,  $\omega t$  由系统锁相环获得. 无功功率  $Q_c$  可以通过检测负载电流  $i_L$  由单相瞬时  $i_p-i_q$  算法求得.  $I_{\text{dc}}$  由电压的闭环 PI 控制输出, 可以维持逆变器的直流侧电压稳定, 弥补功率器件损

耗导致的电压下降. 通过实时检测光伏并网逆变器输出的有功功率和无功功率, 可以快速计算出期望输出的基波电流大小, 从而实现对基波电流的快速响应.

然后将光伏逆变器的基波指令信号  $i_f^*$  与光伏逆变器的输出电流  $i_c$  相减, 得到电流的跟踪误差信号  $\epsilon_i$ , 然后经过无差拍控制器的处理, 得到基波跟踪误差调制信号  $\Delta V_f$ . 这样通过无差拍控制器的闭环控制<sup>[17-18]</sup>, 输出基波电流跟踪误差的微调信号, 实现对基波电流的动态无差跟踪. 无差拍控制公式如下:

$$u_r = \left[ u_s - \frac{L}{T_s} \cdot (i_f^* - i_c) \right] / u_{\text{dc}} \quad (12)$$

其中  $u_r$  为调制波,  $T_s$  为控制周期,  $u_s$  为网侧电压. 忽略单相光伏逆变器的功率损耗, 则有单相光伏逆变器稳定运行时的输出基波电压为:

$$u_n = u_s - L \frac{di_c}{dt} = u_s - u_L \quad (13)$$

则可以求得逆变器稳定运行时的基波调制信号:

$$m = u_n / u_{\text{dc}} = (u_s - u_L) / u_{\text{dc}} \quad (14)$$

式(14)可作为光伏逆变器 PWM 调制时的前馈指令信号, 从而迅速跟踪指令信号的变化, 实现功率的快速跟踪. 根据有功功率  $P_d$ 、补偿无功功率  $Q_c$  和电网电压, 计算出前馈基波调制信号为:

$$V_f = \frac{1}{u_{\text{dc}}} \left[ U \sin \omega t - \omega L \frac{2P_d}{U} \sin(\omega t + \pi/2) - \omega L \frac{2Q_c}{U} \cos(\omega t + \pi/2) \right] \quad (15)$$

其中  $\omega, L$  分别为基波角频率和输出滤波电感值. 通过式(15)可以快速控制逆变器输出期望的电压电流信号, 实现对基波指令电流的快速响应. 将单相光伏逆变器的基波跟踪误差调制信号  $\Delta V_f$  和前馈基波调制信号相加  $V_f$ , 得到单相光伏逆变器的基波调制信号  $V_f^*$ .

将光伏逆变器的基波调制信号送入 PWM 调制单元, 输出得到逆变器的开关驱动信号, 驱动逆变器使之输出期望的电压电流. 这样控制系统形成了前馈控制+反馈控制的复合控制方法, 有效结合了前馈控制的快速响应速度和反馈的闭环跟踪特性, 实现了对输出功率的快速、无差跟踪, 大大提高了光伏逆变器的性能.

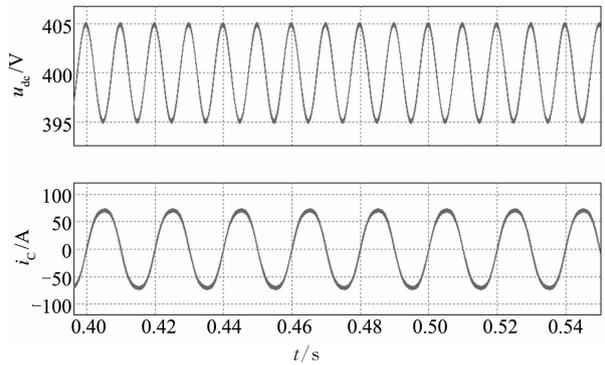
## 4 仿真实验

利用 PSIM6.0 模拟光伏发电系统, 对本文所提出的适用于微网的光伏发电逆变并网逆变系统及其

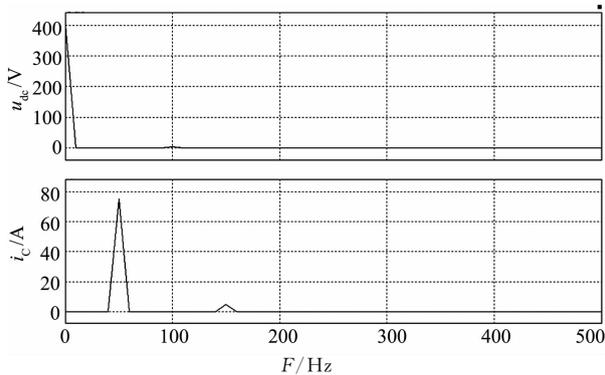
控制算法进行了仿真研究. 仿真原理图如图 1 所示, 光伏阵列电池使用其数学模型进行模拟, 整个系统仿真参数如下: 系统配单相电网侧电压为 220 V; 频率为 50 Hz; 阻感负载参数中电感为 15 mH, 电阻为 5 Ω; 输电线路电感为 0.02 mH; 直流侧电容为 5 000 μF; 输出滤波电感为 2.25 mH; 单相光伏逆变器的额定容量为 20 kVA.

1) 直流侧电压纹波校正效果

当系统不投入感性负载, 仅光伏逆变器进行有功功率输出到电网, 有功功率为 12 kW. 从图 3 中可以看到, 由于交流侧的二次功率脉动会使直流侧电压产生二次纹波电压. 当纹波不校正时, 由此产生额外的三次谐波电流指令, 从而使单相逆变器输出电流中含有三次谐波电流. 由于电压外环的增益为 2, 所以检测到纹波电压幅值约为 4.68 V 和三次谐波电流幅值约为 4.68 A, 二者大小基本相等.



(a) 直流侧电压和输出电流波形



(b) 直流侧电压和输出电流的频谱图

图 3 直流侧二次纹波不校正时的波形图

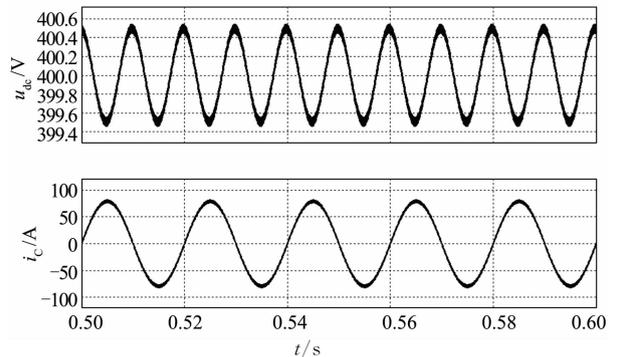
Fig. 3 Waveforms without calibration for dc-link ripple

从图 4 中可以看到, 当电压外环采取二次纹波校正时, 由于电压外环输出不含二次纹波, 从而使逆变器输出电流中不含有三次谐波电流, 输出电流为基波正弦波, 有效改善了光伏逆变器的输出品质.

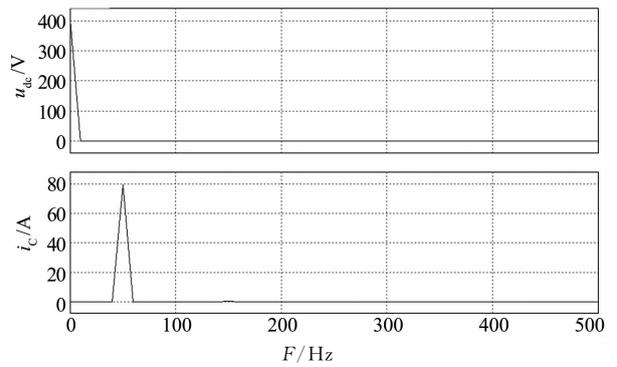
2) 输出电流的动态跟踪效果

图 5(a) 为负载电流波形, 在 0.3 s 投入感性负载, 负载功率为 7 kVA, 功率因数 0.46, 来验证复合

控制方法的优越性. 图 5(b) 与图 5(c) 中的  $i_c$  为逆变器输出电流波形,  $i_s$  为网侧电流波形, 从图中可以看出, 投入感性负载后, 逆变器输出电流不仅包含了光伏发电系统的有功成分, 而且补偿了负载的无功. 图 5(b) 由于只采用了电流闭环反馈控制, 其需要一个动态调节时间, 约为一个电网周期. 当采用本文所提的复合控制方法时, 结果如图 5(c) 所示, 由于通过基于单相逆变器的稳态数学模型, 可以计算出系统的前馈调制波信号, 进行功率的快速控制, 使输出电流快速跟踪指令电流, 同时通过无差拍反馈闭环控制, 实现对指令电流的稳态无差跟踪. 可以看出逆变器输出电流的跟踪性能大大提高, 逆变器提供一部分有功电流给负载供电, 电网有功电流减小了, 同时逆变器补偿了负载产生的无功电流, 电网的电能质量得到了有效改善.



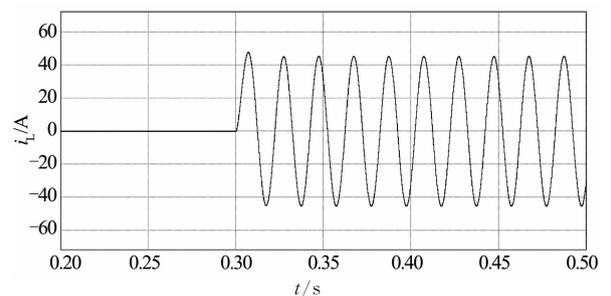
(a) 直流侧电压和输出电流波形



(b) 直流侧电压和输出电流的频谱图

图 4 直流侧二次纹波校正时的波形图

Fig. 4 Waveforms with calibration for dc-link ripple



(a) 负载电流动态波形

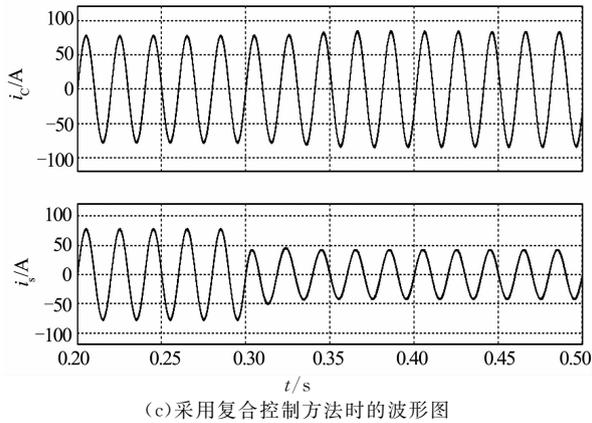
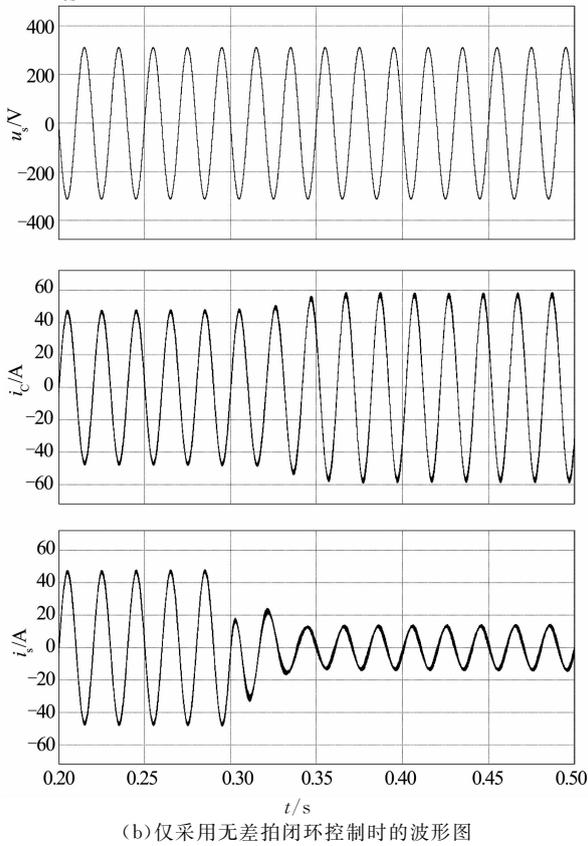


图 5 采用两种不同控制方法时的波形图  
Fig. 5 Waveforms when using two different control methods

### 5 实验验证

为了进一步验证理论分析和所提控制方法的可行性,在实验室研制了 5 kVA 的 220 V 电压等级的单相逆变器样机,负载为 RL 串联负载,容量为 2.2 kVA,功率因数为 0.8. 图 6 为部分 5 kVA 单相光伏逆变器系统样机图,其中图 6(a)为太阳能电池阵列,图 6(b)为单相光伏逆变系统控制版图.

图 7(a)表示未投入光伏逆变器时的电网电压和电流波形,电压电流波形不同步,存在一定量的无

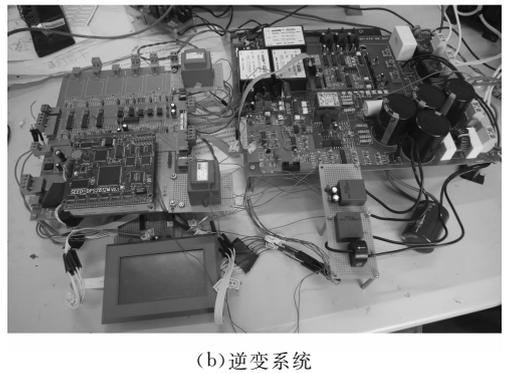


图 6 5 kVA 单相光伏逆变器系统样机图  
Fig. 6 Local equipment of 5 kVA Grid-Connected photovoltaic generation

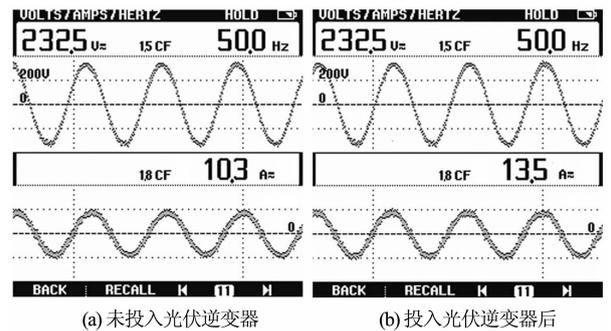


图 7 投入光伏逆变器前后的波形图  
Fig. 7 Waveforms before and after switching on inverter

功功率,同时负载功率完全由电网提供,功率因数为 0.8;图 7(b)表示投入光伏逆变器时的电网电压电流波形,在投入光伏逆变器后,逆变器通过检测负载无功功率,进行无功动态补偿,同时负载的有功功率可以全部由光伏逆变器提供,补偿之后光伏逆变器剩余的有功功率传输给电网,稳定后系统电网电流为 13.5 A,功率因数为 0.99.

实验结果很好地验证了本文所提结构和控制方法的可行性,单相光伏逆变器在发电逆变给电网提供有功能量的同时,也可以补偿临近感性负载的无功功率,提高微网的电能质量.

## 6 结 论

针对微网单相光伏逆变器现有技术的不足和存在的问题,本文提出一种适用于微网的光伏发电逆变器的复合控制方法,并对其相关工作原理和控制策略进行了深入的研究,得出以下结论:

1)针对逆变器的直流侧电压控制,提出了一种直流侧电压纹波的校正补偿方法,能有效改善逆变器的输出品质。

2)根据逆变器的稳态数学模型,一种前馈+反馈的复合控制方法,有效提高了单相光伏逆变器的动态跟踪性能。

3)仿真及实验结果表明本文研究内容的正确性,同时本文提出的控制方法也可以推广应用到其它类似系统中。

## 参考文献

- [1] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004,24(7):31-32.  
DING Ming, WANG Min. Distributed generation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 31-32. (In Chinese)
- [2] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008,32(7):98-103.  
WANG Chengshan, XIAO Chaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103. (In Chinese)
- [3] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003,27(12): 71-75.  
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75. (In Chinese)
- [4] 刘杨华,吴政球,林舜江. 孤岛运行的微电网三相不平衡潮流计算方法研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009,36(7):36-40.  
LIU Yanghua, WU Zhengqiu, LIN Shunjiang. Research on unbalanced three-phase power flow calculation method in islanding micro grid[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(7): 36-40. (In Chinese)
- [5] 马尚行,戴永军,何金伟. 光伏逆变器的并网控制技术[J]. 电源技术, 2011,35(6):688-690.  
MA Shangxing, DAI Yongjun, HE Jinwei. Study on grid-connected control technology of PV inverter[J]. Power Supply Technology, 2011, 35(6): 688-690. (In Chinese)
- [6] 周林,张林强,廖波. 单相光伏逆变器控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2012,36(9):25-29.  
ZHOU Lin, ZHANG Linqiang, LIAO Bo. Research on control strategy of single-phase photovoltaic inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 36(9): 25-29. (In Chinese)
- [7] 刘鸿鹏,朱航,吴辉,等. 新型光伏并网逆变器电压型控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015,35(21):5560-5568.  
LIU Hongpeng, ZHU Hang, WU Hui, et al. A novel voltage-controlled method for the grid-connected photovoltaic inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5560-5568. (In Chinese)
- [8] HE Guofeng, XU Dehong, CHEN Min. A novel control strategy of suppressing DC current injection to the grid for single-phase PV inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1266-1274.
- [9] 黄浩,徐永海,杨琳,等. 不对称电压条件下光伏逆变器的控制策略[J]. 电网技术, 2014,38(5):1277-1282.  
HUANG Hao, XU Yonghai, YANG Lin, et al. A control strategy of photovoltaic inverter under unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1277-1282. (In Chinese)
- [10] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(29):5073-5079.  
LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079. (In Chinese)
- [11] 李小叶,李永丽,张玮亚,等. 基于多功能并网逆变器的电能质量控制策略[J]. 电网技术, 2015,39(2):556-562.  
LI Xiaoye, LI Yongli, ZHANG Weiya, et al. A power quality control strategy based on multi-functional grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 556-562. (In Chinese)
- [12] 李晓刚,程勇,崔然. 高压无功补偿及谐波抑制装置设计[J]. 电力自动化设备, 2007,27(11):101-103.  
LI Xiaogang, CHENG Yong, CUI Ran. Design of HV reactive compensation and harmonic suppression equipment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 101-103. (In Chinese)
- [13] 刘树林,刘健,杨银玲,等. Boost 变换器的能量传输模式及输出纹波电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(5):119-124.  
LIU Shulin, LIU Jian, YANG Yinlin, et al. Energy transmission modes and output ripple voltage of boost converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 119-124. (In Chinese)
- [14] 吴大中,王晓伟. 一种光伏 MPPT 模糊控制算法研究[J]. 太阳能学报, 2011,32(6):808-812.  
WU Dazhong, WANG Xiaowei. A photovoltaic MPPT fuzzy controlling algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(6): 808-812. (In Chinese)
- [15] LUO An, MA Fujun, WU Chuanping, et al. A dual-loop control strategy of railway static power regulator under V/V electric traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 2079-209.
- [16] 马伏军,罗安,欧阳红林,等. 电磁搅拌用两相正交逆变电源的控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2336-2345.  
MA Fujun, LUO An, OUYANG Honglin, et al. A two-phase orthogonal power supply control method for electromagnetic stirring [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2336-2345. (In Chinese)
- [17] 周贤正. 适用于低压微网的多微源协调控制策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学电气与信息工程学院, 2012:25-54.  
ZHOU Xianzheng. Research of applying to low voltage microgrid multiple micro-source coordinated control strategy[D]. Changsha: College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, 2012: 25-54. (In Chinese)
- [18] 郭松林,沈显庆,付家才. 单相三电平并网逆变器的改进无差拍电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(12):22-27.  
GUO Songlin, SHEN Xianqing, FU Jiakai. Improved deadbeat current control of single-phase three-level grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 22-27. (In Chinese)