

# 户用光伏逆变器的无功补偿控制策略

洪家尧, 高文根, 徐 东

(安徽工程大学检测技术与节能装置安徽省重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

**摘 要:**针对大量分布于电网末梢的传统户用式光伏逆变器大多不带动态无功补偿的功能,对实现以单位功率因数发电和对负载的动态无功补偿的双重功能户用光伏逆变器的控制策略进行了研究。利用二阶广义积分器来重构两相正交向量后,通过瞬时无功功率理论检测负载电流得到所需的无功电流分量。由功率控制环节得到并网的有功电流分量,将负载上的无功电流分量和功率控制环节得到的有功电流分量进行合成得到电流内环的参考电流。电流内环使用 PI 和重复控制并联的策略,这样可以在保证稳态性能的同时利用 PI 控制增强系统动态性能。仿真结果表明,系统具有双重功能,即在实现户用光伏逆变器以单位功率因数并网发电的同时,能够对负载的动态进行无功补偿。

**关键词:**单相光伏发电;二阶广义积分器;无功补偿;功率调节;重复控制

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

## 引 言

随着政府对于光伏发电领域的重视,光伏逆变器向小型化、户用化发展的方向越来越明显。现在更多的户用光伏逆变器控制的目标是使逆变器能够以单位功率因数输出,从而大幅度地提高并网效率。但现在户用电器以感性负载为多,如果光伏逆变器总是以单位功率因数并网,不考虑户用电器的无功需求,只依靠大电网为电器提供无功,当大量的户用光伏逆变器以这样的方式并网,那么会对大电网的电能质量带来电压波动、电能损耗和电压降低等问题<sup>[1]</sup>。为了解决上述问题,就需要实现以单位功率因数发电和对负载的无功补偿的双重功能。首先要解决的是检测负载电流得到负载所需的无功电流分量,然后与光伏逆变系统前级 MPPT 得到

的最大有功功率并网时电流的有功分量进行合成。

为了实现单相光伏逆变的无功补偿,要能够快速检测出负载需要的无功功率。文献[2-3]将应用在三相中的瞬时无功功率理论借鉴到单相光伏逆变上,把单相系统的电压或者电流延时  $90^\circ$  构造模拟三相的系统。这样就可以把已经在三相系统上成熟的瞬时无功功率理论的原理借鉴到单相光伏逆变上<sup>[4,5]</sup>。文献[6-7]说明了由于通过延时来构造虚拟的三相系统,使得系统的控制数据有滞后的现象,系统的实时性和稳定性受到影响。本文利用二阶广义积分器来重构两相正交向量代替延时  $90^\circ$  构造两相正交向量,减小通常使用移相检测带来的延时问题<sup>[8]</sup>,提出了可以同时实现以单位功率因数发电和对负载的无功补偿的双重功能控制策略。

收稿日期:2017-11-13

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A107)

作者简介:洪家尧(1994-),男,安徽六安人,硕士生,主要从事微电网控制方面的研究,(E-mail)1280001571@qq.com

高文根(1973-),男,安徽无为,副教授,主要从事微电网控制方面的研究,(E-mail)gw69@163.com

### 1 系统的控制原理

户用光伏逆变器带本地负载无功动态补偿的结构框图如图1所示。该系统前部分DC/DC使用Boost电路和后部分DC/AC使用单相全桥拓扑组成。其中包括最大功率跟踪(MPPT)环节、功率控制环节、二阶广义积分器、无功检测、电流内环PI控制+重复控制、SPWM调制等技术实现了该系统单位功率因数并网和无功补偿。根据功率平衡,功率控制部分由改变并网逆变器内环电流参考值的大小和方向来维持直流电压稳定。功率控制环节由设定的或者由前部分DC/DC得到有功和无功功率的参考值输出有功指令电流 $I_{pref}$ 和无功指令电流 $I_{qref}$ 。负载上电流 $I_L$ 通过二阶广义积分器输出 $i_{\alpha}$ 和 $i_{\beta}$ 两相相位相差 $90^\circ$ 的信号,再通过同步旋转d-q变换。转换后得到的无功补偿量 $I_{Lq}$ 含有交流成分,通过低通滤波虑除后得到指令电流 $I_{Lqref}$ 。将上述得到电流的有功指令电流 $I_{pref}$ 和无功补偿 $I_{Lqref}$ 变换到 $\alpha-\beta$ 坐标系,变换得到 $i_{\alpha}$ 即最终电流内环参考值。电流内环采用PI和重复控制并联的方法后即可达到以单位功率因数发电和对负载的动态无功补偿的双重功能。

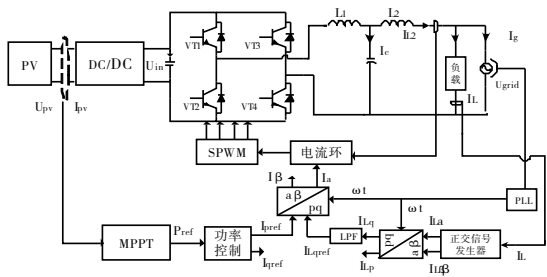


图1 带无功补偿逆变系统结构框图

### 2 无功补偿策略

为了能够实时得到负载需要补偿的无功电流,利用二阶广义积分器构造两项正交向量<sup>[9]</sup>,如图2所示。负载电流 $i_L$ 通过正交信号发生器生成 $i_{\alpha}$ 和 $i_{\beta}$ 两相相位差 $90^\circ$ 的信号。

由图2的逆变器输出电流正交信号发生器的闭环传递函数为:

$$D(s) = \frac{i_{\alpha}}{i_L}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (1)$$

$$Q(s) = \frac{i_{\beta}}{i_L}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (2)$$

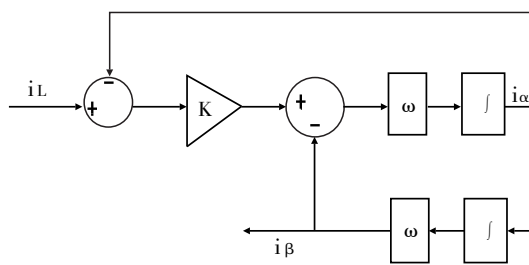


图2 正交信号发生器结构图

公式(1)与公式(2)的伯德图如图3所示。由图3可知, $i_{\alpha}$ 、 $i_{\beta}$ 两相信号正交。其中, $i_{\alpha}$ 与负载电流 $i_L$ 的幅值、频率、相位都相同, $i_{\beta}$ 与负载电流 $i_L$ 的幅值、频率相同,相位上相差 $90^\circ$ ;且与 $k$ 、 $\omega$ 无关。该正交信号发生器除了能够构造两相相位相差 $90^\circ$ 的信号,也能对给定的输入信号实现滤波的功能。在这里谐振角频率 $\omega$ 取值为50 Hz是电网电压基波的频率; $k$ 值的大小除了对滤波有影响也对系统响应速度有影响,综合考虑 $k$ 取值为0.7。假设负载电流信号为:

$$i_L = i_{L\alpha} = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} i_{Ln} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (3)$$

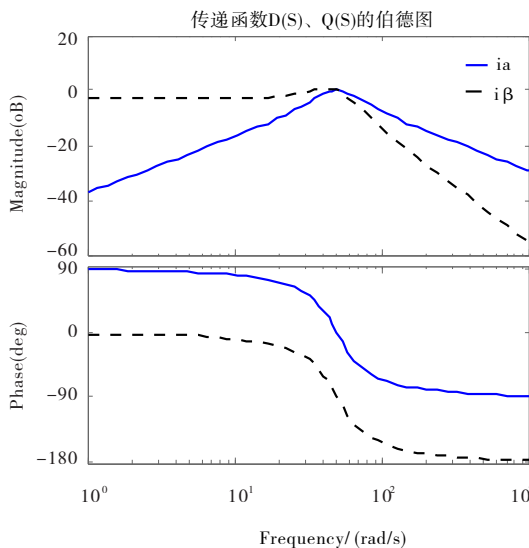


图3 传递函数 D(S)、Q(S)的伯德图

负载上检测到的 $i_L$ 电流通过正交信号发生器变换到 $\alpha-\beta$ 坐标系后再通过d-q变换,可得d-q坐标系的电流分量:

$$\begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta-pq} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega_0 t & -\cos\omega_0 t \\ -\cos\omega_0 t & -\sin\omega_0 t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Lpref} + \tilde{I}_{Lp} \\ I_{Lqref} + \tilde{I}_{Lq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由公式(4)得到负载电流 $i_L$ 在基波频率(这里是

50 Hz)处有功分量和无功分量的幅值分别为  $i_{lp}$  和  $i_{lq}$  [10]。 $i_{lp}$  和  $i_{lq}$  经过低通滤波器滤除交流分量,得到有功和无功电流的参考值  $I_{lpref}$  和  $I_{lqref}$ , 具体值为:

$$\begin{bmatrix} I_{lpref} \\ I_{lqref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}i_{lp}\cos\theta \\ -\sqrt{2}i_{lp}\sin\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3 并网电流的控制

设定光伏逆变器输出的有功功率为  $P_{ref}$  和无功功率为  $Q_{ref}$  [11], 功率控制环由公式(6)与公式(7)分别计算出电流内环参考的有功分量和无功分量 [12]:

$$i_{qref} = -\frac{Q_{ref}}{u_d} \quad (6)$$

$$i_{dref} = \frac{P_{ref}}{u_d} \quad (7)$$

对该系统输出功率的控制就转化为对电流的跟踪。 $u_d$  表示一个常数, 前级 MPPT 控制为功率控制提供参考有功功率为  $P_{ref}$ 。将公式(5)得到的无功电流直流分量  $I_{lqref}$  和公式(7)得到的有功电流分量  $i_{dref}$  通过坐标反变换可得到电流内环的参考值  $I_\alpha$ 。参考电流为:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = C_{pq-\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{dref} \\ I_{lqref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega_0 t - \cos\omega_0 t \\ -\cos\omega_0 t - \sin\omega_0 t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dref} \\ I_{lqref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dref}\sin(\omega t) + \sqrt{2}\sin\theta\cos(\omega t) \\ -i_{dref}\cos(\omega t) + \sqrt{2}\sin\theta\sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 4 电流内环控制

电流内环本文采用 PI + 重复控制的策略 [13-14], 电流环复合控制器框图如图 4 所示。重复控制 [15] 对于并网逆变系统的优点在于有较好的静态性能。周期延迟环节  $Z^{-N}$  会使控制动作延迟一个周期才执行, 即系统在第  $n$  个指令周期发生扰动时, 需要经过一个指令周期的延时, 在第  $n+1$  个周期才会对误差信号进行调节, 由于各种原因导致该系统的误差变大时, 重复控制无法在第  $n$  个周期内及时执行相应调节, 所以在第  $n$  个周期近似于开环控制状态, 因此其动态性能差。PI 控制对误差跟踪的速度快, 能够在误差变化时立即产生调节作用, 可以使系统获得较好的动态特性。为了保证系统的稳定

性补偿环节  $Q(z)$  将误差的纯积分变为准积分而设置的滤波器, 它可以是一阶低通滤波器, 也可以是略小于 1 的常数。这里,  $I_{ref}$  是电流内环跟踪值,  $I_g$  是并网电流,  $G_c(z)$  是补偿器,  $P(z)$  是受控对象。电流内环工作的过程为, 电流给定值  $I_{ref}$  为公式(8)中的  $I_\alpha$  与检测并网电流  $I_g$  的误差, 作为控制器的输入信号。电流内环跟踪值与并网电流相减的差值通过 PI 和重复控制器分别作用后, 把两个结果相加, 然后经 SPWM 调制, 产生 4 路控制单相全桥 4 个 IGBT 的驱动脉冲。系统受到较大扰动的时候, 由于重复控制的动态特性差的特点不能立马起作用, 但是 PI 控制器可以快速对扰动产生相应调节。这时, 系统输出通过 PI 控制器来调节, 经过一个周期后, 重复控制器开始对扰动产生作用, 使跟踪误差快速减小, 直至该系统又达到稳定 [16]。由于当系统稳态时, 误差较小, 此时 PI 控制策略对系统的调节作用较小。该系统主要由重复控制器来调节, 使得稳态输出电流的波形能很好地跟踪参考给定。

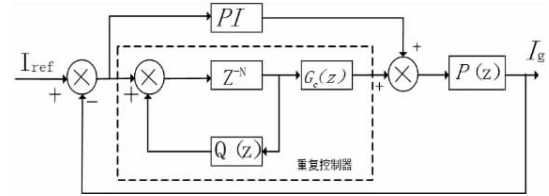


图 4 电流内环控制结构图

### 5 系统仿真验证

通过 Matlab/simulink 把所设计的单相户用光伏逆变器系统进行仿真验证。仿真参数为: 电网电压 220 V/50 Hz, 逆变器最大功率输出  $P_{ref}$  有功功率参考值 3000 W, 负载 1000 W + 1000 Var。0.06 s 前不加负载, 0.06 s 后带有 1000 W + 1000 Var 负载。如图 5 所示。0 ~ 0.06 s 系统没有接入负载, 经过一个周期的调整后, 电感  $IL_2$  输出电流和大电网电压  $U_g$  同相, 结合图 6 可知, 并网电流  $I_g$  与电网电压  $U_g$  保持同相, 即系统这个时候将光伏产生的能量全部馈入电网。同样从图 7 也可以看出, 前 0.06 s 逆变器输出的无功功率始终为零。

0.06 s 时接上感性负载, 经过一个周期的调整后, 由图 5 能够看出逆变器输出电流  $IL_2$  和大电网电压  $U_g$  不同相了, 因为这时逆变器不是单纯的输出有功功率还输出了无功功率, 具体可见图 7。由图 7 可以看出, 逆变器输出有功功率与参考值  $Q_{ref} = 3000$  W 跟踪得较为准确,

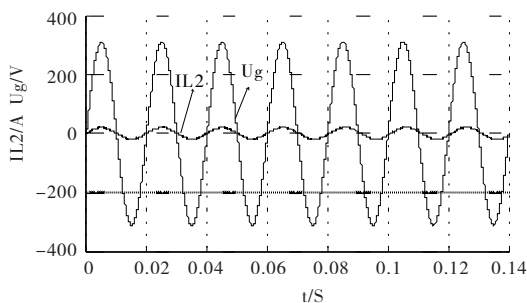
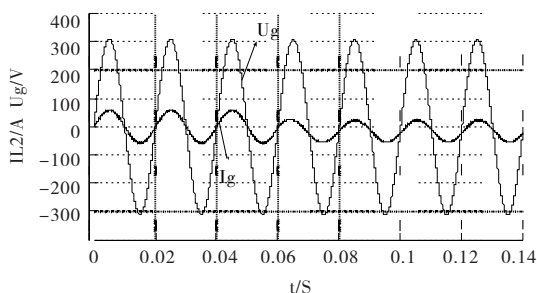
图5 逆变器输出电流 IL2 和电网电压  $U_g$ 

图6 并网电流和电网电压

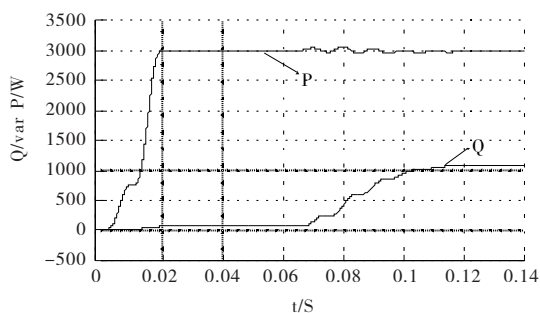


图7 逆变器输出有功及无功功率

基本相等,在接入负载后有些波动,经过一段时间调整后又能很好地跟踪参考值了。0.06 s 后经过一段时间的调整,逆变器输出无功功率为 1080 Var 基本补偿了负载需要的 1000 Var。图 6 中为了方便清楚显示并网电流是实际电流 3 倍,在 0.06 s 接入负载后并网的电流减小,因为接入的负载消耗一部分有功功率所以导致接入负载后并网电流变小,余下的能量馈入大电网,同时实现了对本地负载无功需求的补偿。

图 8 为并网时大电网向负载传输的能量,负号表示光伏逆变器向大电网馈入给能量。在前 0.06 s 不加无功补偿策略,稳定时有功功率  $P \approx -2007$  W,无功功率  $Q \approx 933$  Var。

利用公式(9)计算出  $\cos\varphi \approx 0.91$ 。0.06 s 后加入无功补偿策略,这稳定后  $P \approx -1988$  W、 $Q \approx -110$ ,计算出  $\cos\varphi \approx 0.997$ 。

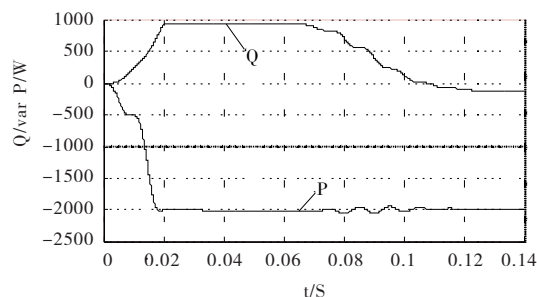


图8 并网有功及无功功率

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (9)$$

其中,  $S$  表示视在功率,  $\cos\varphi$  表示并网功率因数。

由计算结果可以看出实现了单位功率因数并网。由图 9 可以看出并网电流的 THD 为 2.05% 满足并网的要求。由上述仿真结果可以看出随着感性负载的接入,该系统依然能够及时实现无功的补偿同时还能以单位功率因数并网,实现了该控制策略的目标。

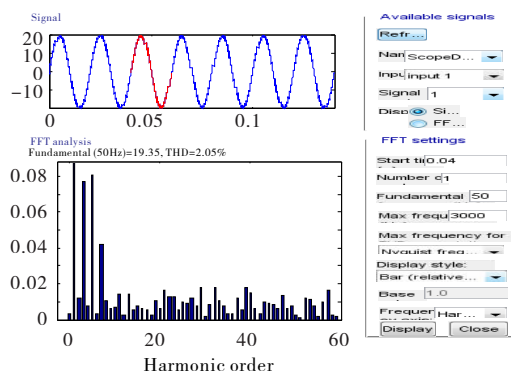


图9 并网电流 THD

## 6 结束语

通过二阶广义积分器构造两项正交向量,将常用于三相系统的瞬时无功功率理论运用到单相系统。仿真表明,系统在实现户用光伏逆变器以单位功率因数并网发电的同时,能够对负载的动态进行无功补偿。

## 参考文献:

- [1] YANG Y, WANG H, BLAABJERG F. Reactive power injection strategies for single-phase photovoltaic systems considering grid requirements [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 4065-4076.
- [2] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 基于瞬时无功功率理论的四相输电谐波电流检测方法 [J]. 中国电机工程学

- 报,2004,24(3):12-17.
- [3] 葛玉敏,李宝英,邢砾云.基于瞬时无功功率理论的单相电路谐波电流检测方法的研究[J].电网技术,2006(s2):225-229.
- [4] 任碧莹,同向前,孙向东,等.单相户用式光伏并网系统无功补偿技术研究[J].电气传动,2013,43(4):53-56.
- [5] 刘斌,粟梅,林小峰,等.非隔离型 H6 桥单相光伏逆变器无功补偿调制及并网电流波形改善控制[J].中国电机工程学报,2016,36(4):1050-1060.
- [6] LUO A, CHEN Y, SHUAI Z, et al. An improved reactive current detection and power control method for single-phase photovoltaic grid-connected DG system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4): 823-831.
- [7] 陈燕东,罗安,谢三军,等.一种无延时的单相光伏并网功率控制方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25):118-125.
- [8] 马聪,高峰,李瑞生,等.新能源并网发电系统低电压穿越与孤岛同步检测的无功功率扰动算法[J].电网技术,2016,40(5):1406-1414.
- [9] 袁梓锋.基于二阶广义积分器的单相光伏并网控制技术的研究[D].广州:广东工业大学,2016.
- [10] 胡月,沈安文,谭海青.单相光伏并网逆变器无功补偿控制策略[J].电气传动,2015,45(4):60-63.
- [11] 肖朝霞,樊世军,杨庆新.基于分层控制策略的光伏-蓄电池系统动态提高并网点功率因数[J].电工技术学报,2016,31(7):107-117.
- [12] 杨文杰.光伏发电并网与微网运行控制仿真研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [13] 赵涛,王吉虎,黄家才,等.基于 PI 和重复控制三相并网逆变器的设计[J].电力电子技术,2015,49(1):20-22.
- [14] 王弋飞,朱静,李侠,等.基于 PI 和重复控制的并网逆变器复合控制方案研究[J].高压电器,2015(7):87-91.
- [15] 杨金辉,戴瑜兴,易龙强,等.基于重复控制原理的正弦逆变控制[J].电力电子技术,2010,44(5):65-66.
- [16] 荣洪凯.基于 DSP 的单相光伏并网逆变器的研究与设计[D].长沙:湖南大学,2015.

## Reactive Power Compensation Control Strategy of Household Photovoltaic Inverter

HONG Jiayao, GAO Wen'gen, XU Dong

(Anhui Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Due to a large number of traditional household photovoltaic inverters distributed in the end of the grid, most of them do not have the function of dynamic reactive compensation. The control strategy of household PV inverter is studied, in order to realize the dual function of grid connection of unit power factor and dynamic reactive compensation of load. Using second order generalized Integrator to reconstruct the quadrature vector of the two phase, the load current is detected by the instantaneous reactive power theory, and the required reactive current component is obtained. From the power control link to the grid active current component, the reactive current component of the above load and the active current component obtained from the power control link are combined to obtain the reference current of the current inner loop. The PI and repetitive control parallel strategy are used in the inner loop, which can ensure the steady-state performance and enhance the dynamic performance of the system by using PI control. The simulation results show that the system can achieve the dual function of dynamic reactive power compensation with the unity power factor of grid connected power generation.

**Key words:** single-phase photovoltaic generation; second-order generalized integrator; reactive compensation; power regulation; repetitive control