

两级式光伏并网逆变器的无差拍控制算法研究

刘胜荣, 杨苹, 肖莹, 刘栋

(华南理工大学电力学院, 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 同步锁相是光伏并网逆变器一项关键的技术, 直接影响到整个并网系统的性能, 而传统的并网锁相技术存在锁相速度或者稳定性上的不足。在无差拍控制算法的基础上, 给出一种无差拍电流控制锁相策略, 并将该控制策略用于两级式单相光伏并网逆变器的控制中。仿真结果表明, 在光照导致光伏电池功率波动或者电网频率变化的情况下, 该控制方法能最大限度地输出能量, 并使逆变器的输出电流准确、快速地跟踪电网电压, 功率因数接近为1。

关键词: 光伏并网; 逆变器; 无差拍控制; 太阳能发电

Algorithm research of deadbeat control for double-stage photovoltaic grid-connected inverter

LIU Sheng-rong, YANG Ping, XIAO Ying, LIU Dong

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Genlock is a key technology of photovoltaic grid-connected inverter, which can impact the entire system performance directly, but traditional genlock technology is lack of speed or stability. On the basis of the deadbeat control algorithm, a deadbeat control genlock strategy is given in this paper, which is used in single-phase and double-stage photovoltaic grid-connected inverter. The simulation results show that when the sunlight leads to power fluctuations or the frequency of power grid changes, the control method can transport the energy of PV cells as much as possible, and the output current can track the power system voltage fastly and accurately, the power factor is closed to 1.

Key words: photovoltaic grid-connected; inverter; deadbeat control; photovoltaic generation

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0026-04

0 引言

近年来, 由于能源需求的增长和煤炭、石油等化石燃料对生态环境的污染, 分布式发电如光伏发电、风力发电等已经成为当前研究的热点^[1-2]。由于分布式发电的输出均为分散的直流电, 需要将其接入到交流电网中才能实现新能源发电的大规模应用, 因此, 并网逆变器成为新能源规模化应用的实施装置。

分布式发电系统并网时, 需要应用锁相技术检测电网电压的相位和频率, 以控制并网逆变器输出与电网电压同频同相的电流(即功率因数为1)^[3]。锁相的过程与锁相速度之间存在矛盾, 既要保证并网逆变器的稳定运行又要保证锁相的快速性^[4-5]。

常用的锁相控制算法有渐次逼近法、最优时间法和有限脉冲响应法, 而这几种算法各有优缺点, 很难同时满足稳定性和快速性^[6]。

无差拍控制算法是一种对电路精确模型进行控制的方法^[7], 通过采样控制量并进行提前一拍预测, 计算出开关器件的占空比控制开关管, 从而使输出的实际波形接近于参考波形。针对并网逆变器锁相的稳定性和快速性矛盾的问题, 本文提出了一种基于两级式并网逆变器的无差拍控制算法, 在保证太阳能光伏电池最大功率输出的同时, 使逆变器输出电流跟随电网电压变化, 功率因数接近为1, 并通过 Matlab/Simulink 的仿真结果验证了该策略的正确性。

1 两级式光伏并网逆变器

两级式光伏发电系统结构如图1所示, 整个系统由太阳能光伏电池、DC/DC 电路、DC/AC 逆变

基金项目: 广东省科技计划项目资助(2005A10505005); 广东省科技计划项目资助(2007B010400080)

电路组成。在本系统中, 第一级应用 Boost 电路完成太阳能光伏阵列的最大功率点跟踪 (MPPT) 控制, 而第二级应用全桥逆变电路完成从直流电到交流电的并网逆变。当直流母线电容 C2 充电完成后至满足并网要求时, 可控开关管 Q6 闭合, 经变压器向电网输送电能。

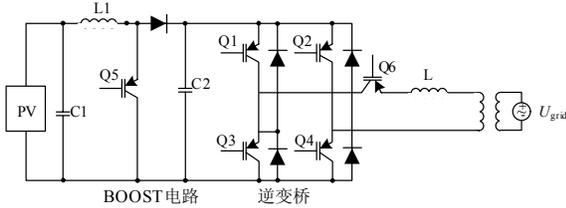


图 1 两级式光伏并网逆变器

Fig.1 Double-stage photovoltaic grid-connected inverter

2 无差拍电流控制算法的设计

无差拍电流控制方法是一种数字化的 PWM 控制方法, 其基本思想是在每一个开关周期开始, 通过采样逆变器输出的电流 I 和预测出下一开关周期开始的电流参考值 I^* , 根据 $I^* - I$ 计算出逆变桥开关管的占空比, 使输出电流精确跟随参考电流的波形。这种方法计算量比较大, 但由于其开关频率固定和动态响应快的优点, 得到了广泛的应用, 适合在高性能数字控制系统中实现。

在两级式光伏并网逆变器中, 采用无差拍电流控制 (此处介绍采用无差拍电流控制的优点)。其工作原理是: 无差拍电流控制是将 DC/DC 电路输出的直流电逆变成为正弦交流电, 经过滤波后输送到电网。H 逆变器的输入端接 DC/DC 电路的输出端并接有大电容, 可等效为电压源, 输出端采用电流源模式以解决电压源模式抗干扰能力弱、对电网发生变化时的响应速度慢等问题^[8]。通过控制逆变桥开关管的通断, 使输出电流与电网电压同频同相。

以下针对两级式光伏并网逆变器进行无差拍电流控制算法的设计。

从图 1 可以得到以电感电流 I_1 为变量的电路方程。

$$U_a = L \frac{dI_1}{dt} + RI_1 + U_{\text{grid}} \quad (1)$$

其中: I_1 为逆变器输出电流; U_a 为逆变器输出电压; U_{grid} 为电网电压; R 为线路的等效阻值。

离散化可得:

$$I_1[k+1] = I_1[k] + \frac{1}{L}(\Delta T[k] \times U_a[k] - \overline{U_{\text{grid}}}[k] - R \times I_1[k]) \quad (2)$$

又因为 R 的阻值很小, 式 (2) 可简化为:

$$I_1[k+1] = I_1[k] + \frac{1}{L}(\Delta T[k] \times U_a[k] - \overline{U_{\text{grid}}}[k]) \quad (3)$$

其中: $I_1[k]$ 为第 k 次采样时刻的电感电流值; $\overline{U_{\text{grid}}}[k]$ 为 U_{grid} 在第 k 次采样周期内的平均值; $\Delta T[k]$ 为在第 k 次采样周期的占空比。

通过式 (3) 可知第 $k+1$ 次采样时刻的电感电流值可由 $I_1[k]$ 、 $U_a[k]$ 、 $\Delta T[k]$ 和 $\overline{U_{\text{grid}}}[k]$ 决定, 于是可求得占空比:

$$\Delta T[k] = \frac{\frac{L}{T_s}(I_1^*[k+1] - I_1[k]) + \overline{U_{\text{grid}}}[k]}{U_a} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 要求取 $\Delta T[k]$, 应先得到 $\overline{U_{\text{grid}}}[k]$ 、 $I_1[k]$ 、 $U_a[k]$ 和 $I_1[k+1]$ 。由于 $I_1[k]$ 和 $U_a[k]$ 根据采样可以得到, 因此对 $\overline{U_{\text{grid}}}[k]$ 和 $I_1[k+1]$ 的求取是算法实现的关键。

假如电网频率发生波动, 电网电压的平均值将无法通过积分公式求取, 但是由于采样周期非常小, 电网电压在采样周期 k 的平均电压可近似等效为电网电压:

$$\overline{U_{\text{grid}}}[k] = \frac{1}{T_s} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} U_{\text{grid}}(t) dt \approx U_{\text{grid}}[k] \quad (5)$$

要使电感电流在 $k+1$ 时刻追上参考电流 $I_1^*[k+1]$, 用参考电流 $I_1^*[k+1]$ 代替 $I_1[k+1]$ 即可。在该控制策略中, 为了使并网电流在电网频率波动的情况下能迅速地跟踪电网电压, 避免传统锁相算法存在的稳定性和快速性相矛盾的问题, 可令:

$$I_1^*[k+1] = k \times U_{\text{grid}}[k+1] \quad (6)$$

由于光伏电池的 I-V 特性可以描述如下:

$$I_{\text{pv}} = I_g - I_{\text{sat}} \left[\exp\left(\frac{q}{AKT} U_{\text{pv}}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

其中: U_{pv} 为光伏电池输出电压; I_g 为光生电流; A 为 p-n 结参数; I_{sat} 为光伏阵列饱和电流; q 为电子电荷量; K 为玻兹曼常数。

参数 I_g 、 A 、 I_{sat} 受到外部温度和光照的影响使得输出 I_{pv} 的不同, 其输出功率变化曲线如图 2 所示。

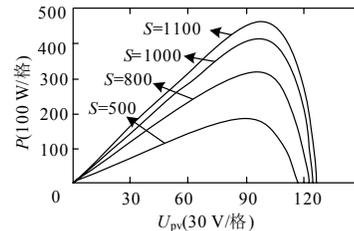


图 2 光照变化时的输出功率曲线

Fig.2 Curves of output power when the sunlight changes

因此，为保持太阳能光伏电池与逆变器输出的能量平衡， k 可用公式 (8) 进行计算：

$$k = \frac{P_{pv}}{U^2} \quad (8)$$

其中： P_{pv} 为太阳能光伏电池发出的功率； U 为电网电压的有效值。

于是，对电网电压 $U_{grid}[k+1]$ 进行准确的预测是实现该控制策略的关键，考虑到 DSP 芯片的运算速度和预测的精度，可采用泰勒公式预测下一个采样周期 T 的计算方法^[9]，可得：

$$U_{grid}[k+1] = \frac{8}{3}U_{grid}[k] - \frac{5}{2}U_{grid}[k-1] + U_{grid}[k-2] - \frac{1}{6}U_{grid}[k-3] \quad (9)$$

根据式 (9)，则可以通过前四个采样周期的采样值预测下一个采样周期的电网电压。把式 (6)、式 (7) 和式 (8) 代入式 (5)，即可求得下一周期的占空比。用该占空比控制逆变器的开关器件的导

通时间，就可以得到 $I^*[k+1]$ 的输出，在电网频率波动的情况下实现光伏并网逆变器功率因数为 1 的无差拍电流控制策略。

3 仿真研究分析

3.1 仿真模型的建立

为了验证上述的无差拍改进控制算法，搭建了基于 Matlab/Simulink 的仿真模型。整个并网系统主要由光伏模块、Boost 电路、逆变桥、可控开关等组成。为验证算法，电网用可调节的交流电压受控源来模拟，系统的最大功率跟踪策略和无差拍控制策略采用 S 函数编写实现，整个系统如图 3 所示。其中，无差拍控制模块在每个开关周期采集光伏模块的电压 U_{pv} 和电流 I_{pv} ，直流母线电压 U_{dc} ，以及电网电压 U_{grid} 和电流 I_1 ，计算出下一周期的 PWM 占空比，然后由 PWM Generator 产生触发脉冲控制开关管，使逆变器输出与电网电压同频同相的电流。

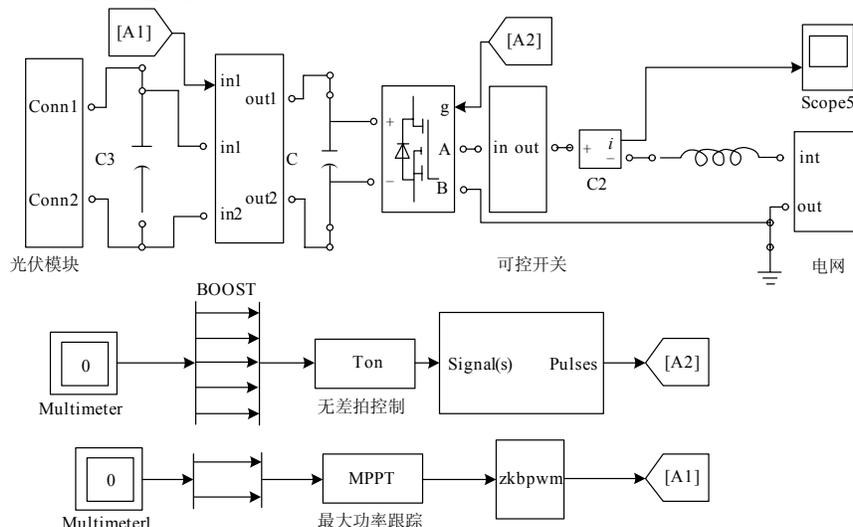


图 3 两级式光伏并网逆变器仿真模型

Fig.3 Simulation model of double-stage photovoltaic grid-connected inverter

3.2 仿真结果与分析

仿真参数设定为：电网原边电压有效值 $U = 22 \text{ V}$ ，电压滤波电感为 $L = 3 \text{ mH}$ ，开关频率 $f_q = 10 \text{ kHz}$ ，仿真算法采用 ode23t，误差为 $1e-6$ 。

在 $[0, 0.168 \text{ s}]$ 时，可控开关管 Q6 断开，逆变器前端的电容处于充电状态；在 $[0.168 \text{ s}, 0.2 \text{ s}]$ 时，可控开关闭合，向电网输出电流，此时电网频率为 50 Hz ；在 $[0.2 \text{ s}, 0.3 \text{ s}]$ 时，电网频率改变为 60 Hz 。图 4 为输出电流跟踪电网电压的仿真波形。可以看出，在电网频率变化的情况下，该控制策略

仍能使并网电流准确、迅速地跟踪电网电压，与其保持同频同相，而不存在传统锁相算法速度和稳定性上的不足。

当光照发生变化时，光伏模块的功率输出也会产生相应的变化，需要控制逆变器的电流输出以维持逆变桥前端直流母线电压的稳定。在 $t=0.25 \text{ s}$ 时，使光照从 1000 W/m^2 增加到 1400 W/m^2 ，此时逆变器输出的并网电流波形如图 5 所示。由图 5 可见，在光照增加的情况下，逆变器的输出电流也随之增大，使其直流母线电压基本保持恒定(如图 6 所示)，

保证前端 DC-DC 电路最大功率跟踪算法的完成。

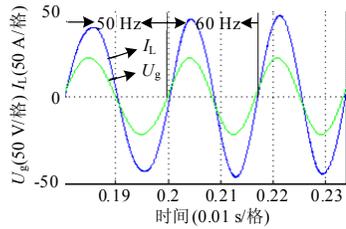


图 4 并网电流跟踪电网电压仿真结果

Fig.4 Simulation result of grid-connected current tracking the power network voltage

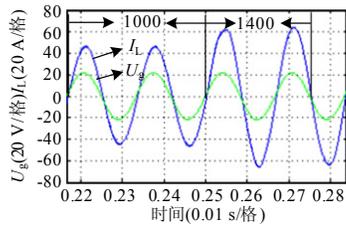


图 5 光照增强时逆变电流输出仿真结果

Fig.5 Simulation result of output current when the sunlight strengthens

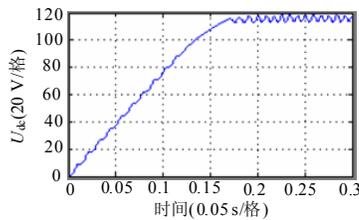


图 6 直流母线电压变化图

Fig.6 Changes of DC bus voltage

4 结论

光伏并网逆变器是光伏发电系统的主要部件,输出的电能质量和效率至关重要。针对并网逆变器的锁相问题,提出了一种基于两级式单相光伏并网逆变器的无差拍控制电流策略。仿真实验结果表明,在电网频率发生变化的情况下,该控制方法可以使并网逆变器的输出电流快速、准确地跟踪电网电压,在无开关损耗的情况下功率因数为 1。在光照发生变化的情况下,该算法也可以使逆变器的输出效率达到最大,并保持前端直流母线电压的稳定,向电网输出高功率因数的电能。

参考文献

- [1] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (12): 53-56.
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. Distributed

Generation and Its Impact on Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (12): 53-56.

- [2] 王建, 李兴源, 邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (24): 90-97.
WANG Jian, LI Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power System Research on Distributed Generation Penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (24): 90-97.
- [3] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (20): 97-99.
DONG Mi, LUO An. Design and Control Strategies of Inverters for a Grid-connected Photovoltaic Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (20): 97-99.
- [4] Fuminori, Masayuki, Masateru, et al. Efficient Digital Techniques for Implementing a Class of Fast Phase-Locked Loops (P-LL'S) [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43 (6): 616-620.
- [5] Guan-Chyun, Hung J C. Phase-Locked Loop Techniques-A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43 (6): 609-615.
- [6] 任海兵. 户用光伏并网系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2006.
REN Hai-bing. Research on Residential Photovoltaic Grid-connected System[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2006.
- [7] 郭卫农, 段善旭, 康勇, 等. 基于 DSP 实现的无差拍控制逆变器[J]. 通信电源技术, 2001(3): 1-4.
GUO Wei-nong, DUAN Shan-xu, KANG Yong, et al. Deadbeat Control Inverter Based on DSP[J]. Telecom Power Technologies, 2001(3): 1-4.
- [8] Hung G K, Chang C C, Chen C L. Analysis and Implementation of a Delay-compensated Deadbeat Current Controller for Solar Inverters[J]. IEEE Proceedings of Circuits, Devices and Systems, 2001, 148 (5): 279-286.
- [9] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 基于 TMS320F240 芯片的光伏并网发电系统的控制方法[J]. 继电器, 2002, 30 (7): 31-33.
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. The Control Way in the Grid-connected PV System Based on the DSP (TMS320F240) [J]. Relay, 2002, 30 (7): 31-33.

收稿日期: 2009-05-19; 修回日期: 2009-07-19

作者简介:

刘胜荣 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子建模与控制研究; E-mail: starlory@163.com

杨 苹 (1967-), 女, 教授, 从事智能控制理论及应用的研究。