

基于坐标变换的单相逆变电源并网控制方法

田悦新¹, 曹海燕¹, 伞国成², 王怀宝²

(1. 石家庄经济学院信息工程学院, 河北 石家庄 050031 2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 传统三相逆变电源并网电流控制通常采用基于同步旋转坐标变换的PI控制实现无静差电流调节。然而, 该方法不能直接应用于单相系统。通过构造虚拟正交分量, 然后通过Park变换实现坐标变换, 将单相交流量转换为直流量, 进而通过PI控制实现无静差并网电流调节。文中分析了其工作原理, 设计了电网电压同步数字锁相方案。最后进行了数字化控制并网实验。实验结果表明, 提出的方法具有电流控制精度高、单位功率因数并网发电等优点, 具有一定的实用价值。

关键词: 并网控制; 单相逆变电源; 坐标变换

Grid-connected control for single-phase inverter based on synchronous frame transformation

TIAN Yue-xin¹, CAO Hai-yan¹, SAN Guo-cheng², WANG Huai-bao²

(1. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Traditional synchronous frame PI control is widely used in grid current control of three-phase inverters to achieve zero steady-state error. However, it can't straightforward be applied to single-phase system. In this paper, imaginary component is built and processed by Park transformation, which changes the AC component into DC component. Therefore, a simple PI control can eliminate the steady-state error of the grid current. Besides, the operation principle is discussed. Synchronous digital phase lock scheme is designed. Experiment with the digital control is performed, and the experimental results indicate that the proposed method has advantages of high-accuracy current control and unity power factor operation, which makes it a useful solution in practical applications.

Key words: grid-connected control; single-phase inverter; frame transformation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0075-03

0 引言

全球能源危机和环境恶化问题推动了新能源的发展, 使得太阳能、燃料电池等清洁能源得到了利用。由于这些能源以直流电压源的形式提供电能, 因此需要DC/AC逆变电源作为并网发电的接口^[1,2]。并网逆变电源一般采用电流控制, 输出与电网电压同频同相的正弦电流, 实现单位功率因数并网发电, 并保证谐波注入含量小于5%^[3]。三相并网逆变电源通常采用同步旋转坐标变换将被控量转换为直流量, 然后经过PI控制消除电流调节静差^[4], 但是该方法无法直接应用于单相系统。重复控制可以消除静差, 也可以直接应用于单相系统, 但其实现较为复杂, 且设计不当容易导致系统不稳定^[5]。为了实现电流调节无静差, 同时满足设计实现简单的原则, 本文采用构造虚拟正交电流分量的方法, 实现了单相并网逆变电源的无静差电流调节。

1 系统原理分析

图1示出单相并网逆变电源拓扑, 其工作原理是: 直流母线电压 U_d 经过开关 $S_1 \sim S_4$ 通断控制电感 L 端电压, 使得电感电流 I (即逆变电源输出电流) 为与电网电压 U 同频同相的正弦波, 实现逆变电源单位功率因数并网运行。

图2示出单相并网逆变电源大信号模型, 其中 $C(s)$ 为电流控制器, K_{PWM} 为逆变电源PWM等效增益, T_s 为电流采样周期。

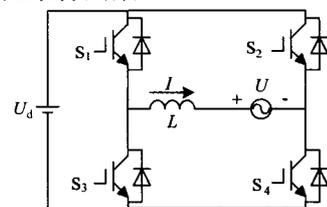


图1 单相并网逆变电源拓扑

Fig.1 Topology of single-phase grid-connected inverter

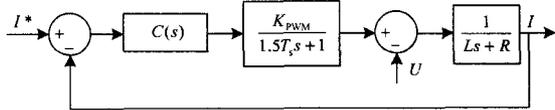


图2 单相并网逆变电源大信号模型

Fig.2 Model of single-phase grid-connected inverter

由图2可得并网逆变电源输出电流 I 可表示为:

$$I(s) = \frac{K_{PWM} C(s)}{M(s)} I^*(s) - \frac{1.5T_s s + 1}{M(s)} U(s) \quad (1)$$

其中: $M(s) = 1.5T_s Ls^2 + (L + 1.5T_s R)s + R + K_{PWM} C(s)$

将 $C(s) = \frac{k_p s + k_i}{s}$ 代入式(1)可得:

$$I(s) = \frac{K_{PWM} k_p s + K_{PWM} k_i}{N(s)} I^*(s) - \frac{1.5T_s s^2 + s}{N(s)} U(s) \quad (2)$$

$$N(s) = 1.5T_s Ls^3 + (L + 1.5T_s R)s^2 + (R + K_{PWM} k_p)s + K_{PWM} k_i$$

当并网电流 I 为直流量时, 式(2)可写为:

$$I(j0) = \frac{K_{PWM} k_i}{K_{PWM} k_i} I^*(j0) - \frac{0}{K_{PWM} k_i} U(j0) = I^*(j0) \quad (3)$$

因此采用 PI 控制即可实现直流电流 I 的无静差调节。为了将交流电流变换成直流量并采用 PI 控制实现无静差电流调节, 本文将基于同步旋转坐标变换的三相并网逆变电源 PI 控制方法应用到单相系统, 本文采用构造虚拟正交电流分量的方法, 对应的模型如图3所示。

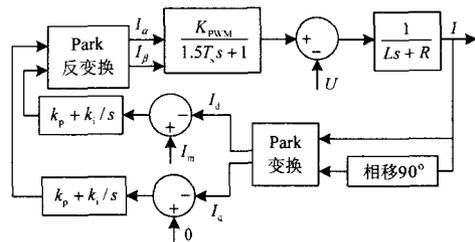


图3 基于坐标变换的单相并网逆变电源模型

Fig.3 Frame transformation model of grid-connected inverter

图3中, 并网逆变电源输出电流相移 90° 后构造出正交电流分量, 然后通过 Park 变换 C 得到直流量 I_d 和 I_q , Park 变换中角度 θ 为电网电压相角, 因此 I_d 对应有功电流, I_q 对应无功电流。为实现单位功率因数并网运行, 设置无功电流参考为 0 即 $I_q = 0$, 同时有功电流参考为电流峰值即 $I_d = I_m$ 。电流误差经过 PI 调节器后再 Park 反变换得到 I_α 和 I_β 。根据式(5)和式(6)可知, 由于 Clark 反变换后有 $I_\alpha = I_a$, 因此没有必要再经过 Clark 变换得到 I_a ,

可将 I_a 作为调制波, 并与载波比较得出开关 S1~S4 驱动信号控制逆变电源单位功率因数并网运行。

$$C = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ -\cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \sin(\theta) \\ -I_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \sin(\theta) \\ I_m \sin(\theta - 120^\circ) \\ I_m \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 仿真研究

图4示出建立的 Matlab6.5 版本/Simulink 仿真模型, 仿真环境设置如下: Type: Fix-step, Solver: Ode3。直流母线使用 400 V 直流电压源, 并网逆变电源使用 Universal Bridge 模块的 IGBT 模型, 电网使用 220 V/50 Hz 交流电压源 $311\sin(314t)$, 调制波和载波比较产生驱动环节使用 PWM Generator 模块, 开关频率 20 kHz, 相移 90° 环节使用 Transport Delay, 逆变电源并网电流参考为 $11\sin(314t)$ 。PI 调节器参数 $k_p=0.5$, $k_i=15$, 仿真结果如图5所示。

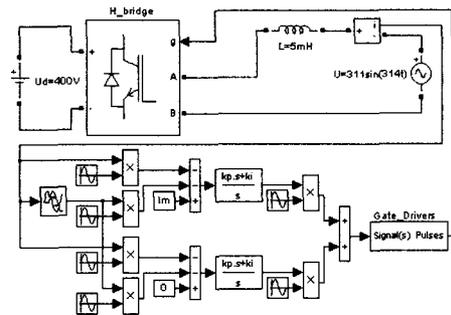
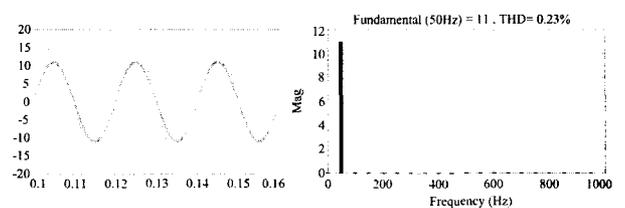


图4 仿真电路图

Fig.4 Simulation diagram



(纵坐标: 电网电压 100 V/格, 并网电流 5 A/格;
横坐标: 时间 10 ms/格)

图5 仿真结果

Fig.5 Simulation results

从图5仿真结果可以看出, 逆变电源输出电流和电网电压同频同相, 实现单位功率因数并网运行。从图5并网电流频谱分析结果可知, 基波电流幅值

为 11 A, 说明实现了无静差并网电流调节。由上述仿真可知, 和其他无静差电流调节控制方法相比, 本文提出的方法简单容易实现, 具有工程应用价值。

3 实验结果

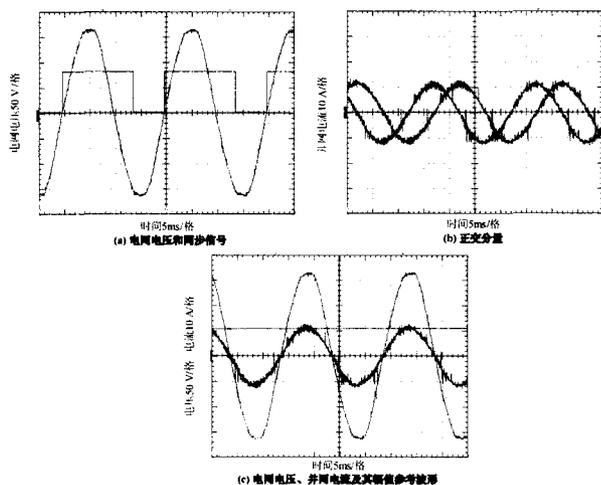


图 6 实验结果

Fig.6 Experimental results

实验参数如下: 直流母线电压 200 V, 交流侧通过 1: 2 变压器接至电网 220 V/50 Hz, 滤波电感 5 mH, 主电路开关频率 10 kHz, 并网电流参考 $11\sin(314t)$, 样机额定功率 850 W, 实验中采用 TMS320LF2407 DSP 实现逆变电源数字化并网控制。首先检测电网电压信息, 通过滞环比较器得到电网电压正向过零同步脉冲信号如图 6 (a) 所示, 然后将该信号送至 DSP 捕获口 CAP2, 待电网电压同步正常后, 使能事件管理器 EVA 的 PWM 比较输出, 逆变电源开始并网运行。每次电网电压正向过零产生的上升沿脉冲将触发捕获中断, 用于复位正弦表和余弦表 (Park 变换时使用) 的指针。由于并网电流参考在同步旋转坐标系下是直流量, 因此不需要查正弦表 (这区别于常规的并网正弦电流参考查表方式)。图 6 (b) 示出并网电流和构造的虚拟正交分量。图 6 (c) 示出电网电压波形、并网电流及其幅值参考的波形, 实验结果和仿真结果一致, 表明逆变电源实现无静差电流调节和单位功率因数

并网运行, 并网电流总谐波畸变率 THD 为 2.73%, 满足 IEEE 标准 $\text{THD} < 5\%$ 的要求。

4 结论

本文通过构造虚拟正交电流分量的方法, 将基于同步旋转坐标变换的三相并网逆变电源 PI 控制方法成功地应用到单相系统, 并通过了 Matlab 仿真验证和实验样机上的验证。结果表明: 和其他无静差电流调节方法相比, 提出的方法简单容易实现, 同时可实现单相逆变电源并网电流无静差控制, 满足向电网输入高功率因数、高质量电能的要求。

参考文献

- [1] Xue Y, Chang L, Kjaer S B, et al. Shimizu. Topologies of Single-phase Inverters for Small Distributed Power Generators: An Overview[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2004, 19(5): 1305-1314.
- [2] Jung S, Bae Y, Choi S, et al. A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(6): 2293-2298.
- [3] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems[S]. IEEE Std. 1547-2003.
- [4] Vladimir Blasko, Vikram Kaura. A New Mathematical Model and Control of a Three-phase AC-DC Voltage Source Converter[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1997, 12(1): 116-123.
- [5] Kazmierkowski M P, Malesani L. Current Control Techniques for Three-phase Voltage-source PWM Converters: A Survey[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 1998, 45(5): 691-703.

收稿日期: 2008-09-24; 修回日期: 2008-11-17

作者简介:

田悦新 (1960-), 男, 副教授, 研究方向为电力电子技术应用。E-mail: beatles888@126.com