

Design and Implementation of a Software Phase-Locked Loop for Single-Phase PV Grid-Connected Inverter

Yong Yao¹, Yu Fang¹, Yahua Ge¹, Mingnan Wang¹, Jiyong Zhang²

¹College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Email: yz_yaoyong@126.com, yzfangyu@126.com

Received: Mar. 29th, 2019; accepted: Apr. 12th, 2019; published: Apr. 19th, 2019

Abstract

Based on the closed-loop structure of traditional three-phase Phase-Locked loop, a software phase-locked loop (PLL) is proposed for single-phase PV grid-connected inverter in this paper. The operation principle of the presented phase-locked loop is analyzed and its mathematical model is deduced. Also, the software implementation method of the phase-locked loop is presented. Then, the influence resulted from the change of amplitude, frequency and phase on the grid voltage is simulated by PSIM software. The results show that the proposed software phase-locked loop can effectively and quickly realize the phase tracking at any time in the cycle, without waiting for the zero-crossing signal of the grid. The software phase-locked loop proposed in this paper is respectively applied to DSP TMS320F28035 and TMS320F2808 which belong to 500 W dual-channel single-phase PV grid-connected micro-inverter and 5 kW single-phase PV grid-connected inverter respectively. The results show that the proposed software phase-locked loop can achieve the voltage phase tracking and frequency locking well, thus verifying the proposed control method for single phase-locked loop.

Keywords

Software Phase-Locked Loop, Mathematical Model, PV Grid-Connected Inverter, DSP

一种单相光伏并网逆变器软件锁相环的设计与实现

尧永¹, 方宇¹, 葛亚华¹, 王明南¹, 张继勇²

¹扬州大学, 信息工程学院, 江苏 扬州

²扬州大学, 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州

摘要

针对单相并网逆变器, 基于传统的三相锁相环的闭环结构, 文章提出了一种软件锁相环的实现方法。首先分析了锁相环的基本原理, 推导了数学模型, 在此基础上给出了该锁相环的软件设计方法。利用PSIM软件对电网电压幅值、频率和相位发生变化以及含高次谐波的影响做了仿真, 结果表明该软件锁相环能有效、快速实现电网周期内任意时刻的锁相, 不需等待电网过零点时刻的检测信号来锁相。分别采用TI公司的DSP TMS320F28035和TMS320F2808编程实现文中所提出软件锁相环的算法, 并分别应用于500 W双通道单相光伏并网微逆变器和5 kW单相光伏并网逆变器中, 结果表明所提出的软件锁相环能很好地实现电网电压相位的跟踪和频率的锁定, 验证了所提出锁相环实现方法的正确性。

关键词

软件锁相环, 数学模型, 并网逆变器, DSP

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着新能源技术的发展, 光伏并网逆变器进入了一个快速增长的阶段, 对于并网电流的进网电流品质、相关标准都给出了严格的规定和限制。其中, 并网逆变器的进网电流频率和相位必须与电网同步, 这是满足并网标准的关键技术。然而, 要保证进网电流能够精确、快速跟踪电网电压的相位和频率, 锁相环(PLL, Phase Locked Loop)必不可少[1] [2] [3] [4] [5]。

软件锁相较传统的硬件锁相, 锁相速度快且不用搭建硬件电路[6], 可为并网逆变器节省成本。目前采用较多的PLL技术一般采用过零检测锁相法, 虽然结构简单容易实现, 但其动态性能不好, 且对过零点电压要求比较高[7], 因此也限制了PLL的速度。文献[8]提到同时调频调相、多周期调节锁相方法, 但这些方法只在电网电压过零点时, 利用数字信号处理器(DSP, Digital Signal Processor)对电网过零点进行捕获, 从而进行相位校正, 不具有实时控制效果, 另外占用了DSP中的3个定时器和2个捕获单元。文中提出一种单相并网逆变器软件PLL控制方法, 在电网电压相位、频率和幅值发生变化时可有效、快速实现周期内任意时刻的锁相, 而不需等待检测电网过零点, 可有效实现并网电流与电网频率相位同步, 程序代码简单, 可移植性高。文中的方法通过PSIM软件仿真并运用在500 W双通道单相并网微逆变器和5 kW单相并网逆变器中, 得到预期效果。

2. 软件PLL原理

2.1. PLL原理

文中借鉴三相PLL的闭环结构, 提出单相软件锁相环架构, 是通过构建两个虚拟的 $\alpha\beta$ 正交信号来

实现, 其中令 $v_\alpha = v_{\text{grid}}$, $v_\beta = 0$, 再经过 Park 变换得到 v_d , v_q [9] [10] [11] [12] [13], 则:

$$\begin{cases} v_d = v_\alpha \cdot \cos \theta + v_\beta \cdot \sin \theta \\ v_q = v_\beta \cdot \cos \theta - v_\alpha \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

θ 表示锁相环得到的相位角, v_{grid} 表示电网电压。

$$\begin{cases} v_d = v_{\text{grid}} \cdot \cos \theta \\ v_q = -v_{\text{grid}} \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

令电网电压 $v_{\text{grid}} = V_{\text{grid}} \cdot \sin \varphi$, 其中 V_{grid} 表示电网电压幅值, φ 表示电网电压相位, 代入(2)式得到:

$$\begin{cases} v_d = V_{\text{grid}} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta \\ v_q = -V_{\text{grid}} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

利用三角函数积化和差公式得到:

$$\begin{cases} v_d = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot [\sin(\varphi - \theta) + \sin(\varphi + \theta)] \\ v_q = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot [\cos(\varphi + \theta) - \cos(\varphi - \theta)] \end{cases} \quad (4)$$

如(4)式, 当锁相成功时, $\theta = \varphi$ 则 $\sin(\varphi - \theta) = 0$, 故若消除上式中的 $\sin(\varphi + \theta)$, 即控制 $\sin(\varphi - \theta) = 0$ 便可实现锁相。为此对 v_q 求偏导得到如下(5)式, 其中 $\omega_{ff} = 2\pi f$ 。

$$\begin{cases} \frac{dv_q}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot [-\sin(\varphi + \theta) + \sin(\varphi - \theta)] \cdot \omega_{ff} \\ \frac{dv_q}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot [-\sin(\varphi + \theta) - \sin(\varphi - \theta)] \cdot \omega'_{ff} \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega'_{ff} = \omega_{ff} + \Delta\omega_{ff} \quad (6)$$

$$\frac{dv_q}{dt} = \frac{dv_q}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \frac{dv_q}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

若系统稳定, 则可近似认为 $\omega'_{ff} = \omega_{ff}$, 整理(7)式得到:

$$\frac{dv_q}{dt} = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot [-\sin(\varphi + \theta)] \cdot (2 \cdot \omega_{ff}) \quad (8)$$

将式(8)代入(4)式, 得到如下所式且令:

$$\omega_{err} = \frac{dv_q}{dt} \cdot \frac{1}{2\omega_{ff}} + v_d = \frac{V_{\text{grid}}}{2} \cdot \sin(\varphi - \theta) \quad (9)$$

如图 1 所示, 将 ω_{err} 作为工频角速度误差送到 PI 调节器的输入端, PI 调节器的输出为 ω_{ff} , 对 ω_{ff} 进行积分运算, 可得到 PLL 的相位角输出量, PI 调节器稳定控制后知 ω_{err} 等于零, 即经锁相环得到了跟电网一致的工频角速度。图 1 中 $\text{mod}(2\pi)$ 表示锁相环以 2π 为一个周期输出相位角 θ 。

2.2. 软件 PLL 的实现方法

从 PLL 控制框图 1 可以看到, PI 调节器的输出 ω_{ff} 需要进行积分运算, 但在实际编程过程中, 实现积分环节十分复杂。因角弧度 $\Delta\omega$ 很小时存在 $\sin(\Delta\omega)$ 与 $\Delta\omega$ 近似相等。因此具体实现时, 可将电网周期

N 等分, 从而得到固定的步进值 $\omega = 2\pi/N$, 在软件中断中叠加固定的弧度 $\omega + \Delta\omega$ 来实现相位角的输出 [14]。如图 2 所示为相位叠加示意图。

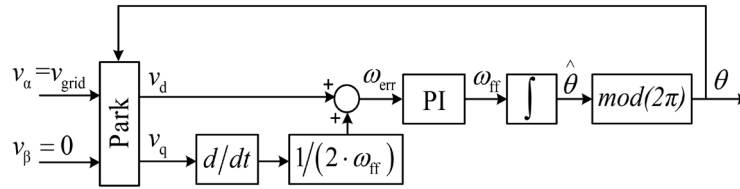


Figure 1. Control block diagram of phase-locked loop
图 1. 锁相环控制框图

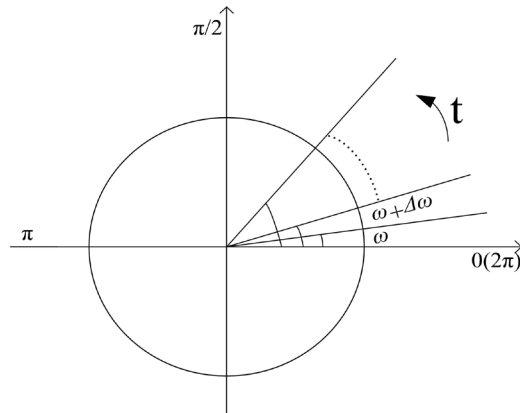


Figure 2. Schematic diagram of phase superposition
图 2. 相位叠加示意图

如图 3 所示为 PLL 程序实现流程框图:

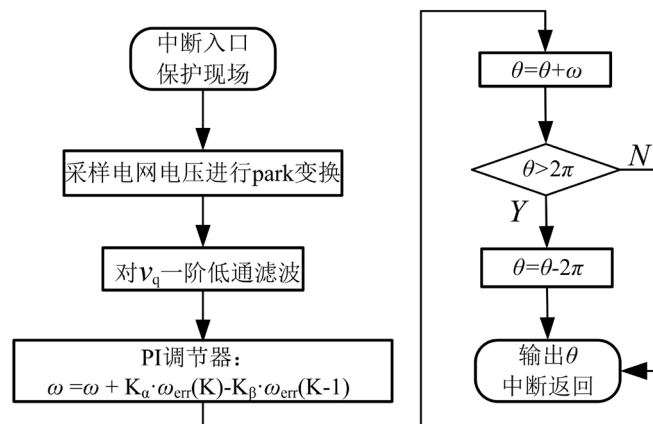


Figure 3. Program flow diagram of PLL
图 3. PLL 程序流程框图

v_q 对时间的微分在程序中是这样实现的: 在 s 域, v_q 对时间的微分可以用 $s \cdot v_q$ 表示, 对于 $s \cdot v_q$ 进行离散化可以得到如下式子:

$$G(z) = \frac{z-1}{Tz} \cdot v_q = \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_s} \cdot z^{-1} \right) v_q = f_s \cdot v_q - f_s \cdot v_q \cdot z^{-1} \quad (10)$$

其中 f_s 为采样频率，进一步可以得到：

$$\frac{1}{2\omega_{ff}} G(z) = \frac{f_s}{2\omega_{ff}} \cdot (v_q - v_q \cdot z^{-1}) \quad (11)$$

得到最终表达式：

$$\frac{f_s}{2\omega_{ff}} (v_q(k) - v_q(k-1)) \quad (12)$$

在此基础上，程序中对其进行了一阶低通滤波：

$$\Delta v_q(k) = 0.4 \cdot \Delta v_q(k-1) + 0.6 \cdot \frac{f_s}{2 \cdot \omega_{ff}} \cdot (v_q(k) - v_q(k-1)) \quad (13)$$

3. PLL 仿真

3.1. 软件 PLL 仿真

为验证上述 PLL 控制方法的有效性，利用 Power Simulation (PSIM) 软件对文中的软件 PLL 方法进行仿真，仿真条件如下：电网幅值 $V_{grid} = 314 \text{ V}$ ，电网频率 $f = 50 \text{ Hz}$ ， $N = 400$ ， $\omega = 2\pi/N = 0.0154 \text{ rad}$ ，采样频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ ，文中提出的算法在仿真模块 MCU 中实现，将模块组合用来实现模拟电网的变化，如图 4 是为锁相环仿真电路图。

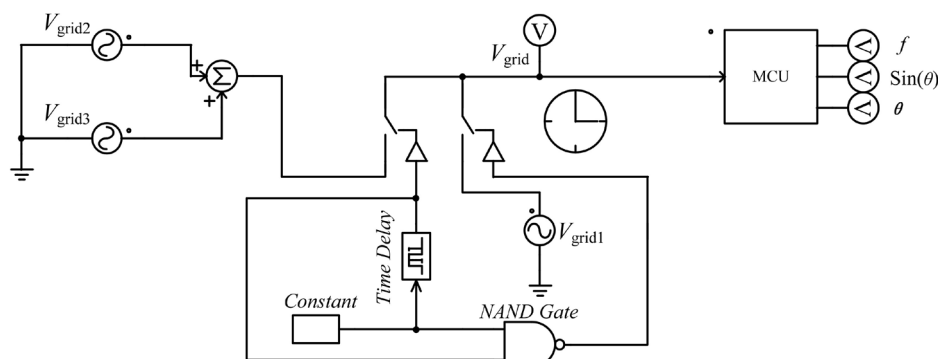


Figure 4. Simulation circuit diagram of the phase-locked loop
图 4. 锁相环仿真电路图

电网幅值突变仿真波形如图 5 所示：在 0.4 s 时，电网从幅值 314 V 突变到 200 V，到 0.6 s 时恢复正常，可以看到 PLL 输出与电网相位一致，实现准确锁相。实际 50 Hz 的电力系统，频率在 49.42~50.42 之间变化。电网频率突变仿真：频率在 0.4 s 时突变为 48 Hz，在 0.6 s 时由 48 Hz 突变为 51 Hz，波形如图 6 所示。

电网相位突变仿真：相位在 0.4 s 时滞后 $\pi/6$ ，在 0.6 s 恢复正常，波形如图 7 所示，锁相环在一个电网周期内成功锁上。电网含高次谐波分量时仿真：在 1 s 时电网电压叠加高次谐波，波形如图 8 所示，锁相环相位输出没有受到影响，一直跟随电网电压相位，说明本软件锁相环还具有滤除高频谐波的作用。

文中提出的软件 PLL 控制方法经 PSIM 仿真验证，能在电网电压幅值，频率，相位突变时，能高效、快速实现锁相，同时本软件锁相环还具有滤除高频谐波的作用，更能保证逆变器并网时的安全性。为了更进一步验证文中提出的 PLL 控制算法在光伏并网逆变器系统里的可移植性，将此算法运用到双通道反激型并网微逆变器和 H6 桥型 5 kW 单相并网逆变器系统中，首先对 PSIM 软件对两种逆变器系统建模仿

真，后通过相应的实验来验证[15][16]。

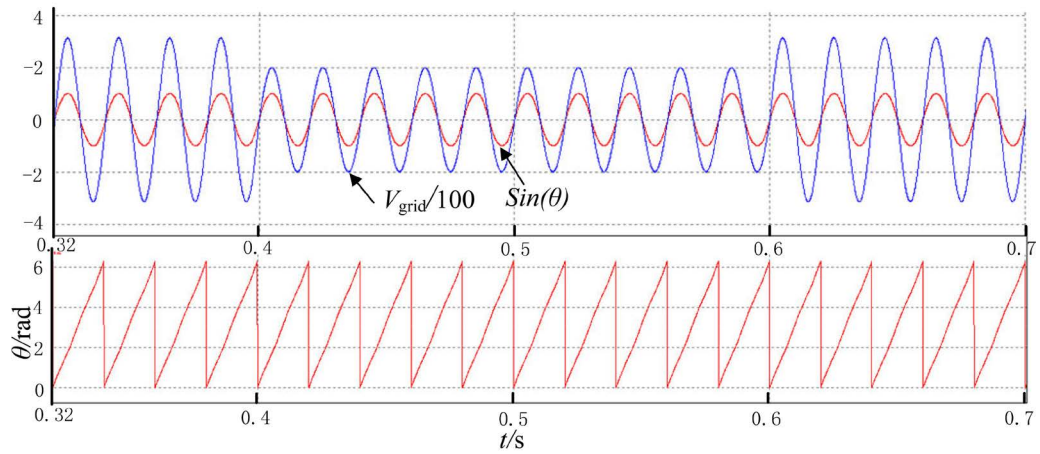


Figure 5. Simulation diagram of voltage mutation
图 5. 电压突变仿真图

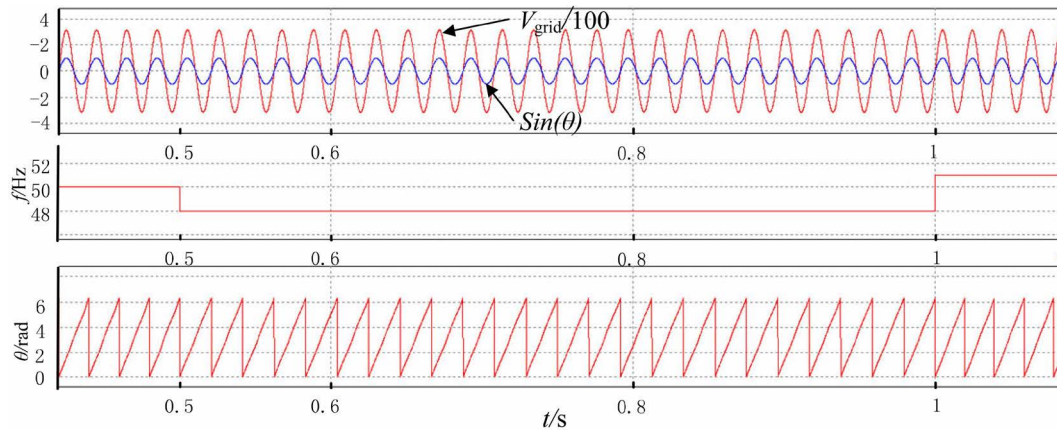


Figure 6. Simulation diagram of frequency mutation
图 6. 频率突变仿真图

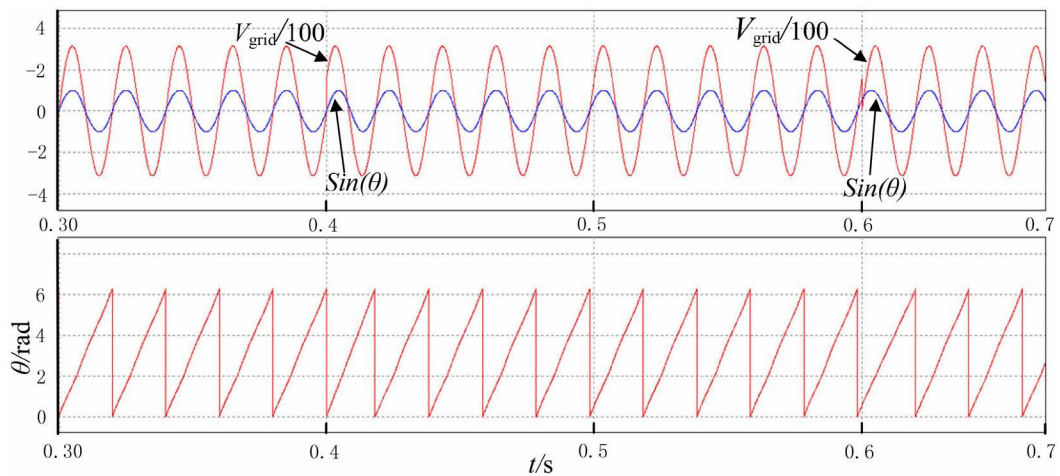


Figure 7. Simulation diagram of phase mutation
图 7. 相位突变仿真图

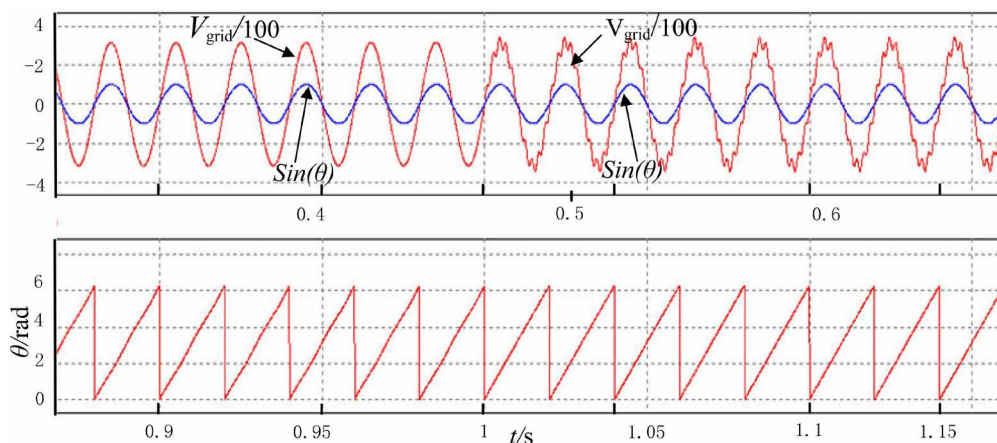


Figure 8. Simulation diagram of phase locking with high order harmonics
图 8. 含高次谐波锁相仿真图

3.2. 双通道微逆变器的仿真实现软件 PLL 算法

微逆变器主电路仿真模型[17] [18]如下图 9 所示，图 10 为微逆变器输出电流和电网电压波形。为了方便显示，电网电压缩小了 200 倍。可以看到输出电流的相位可以很好地跟踪电网电压的相位，证明了文中提出的软件 PLL 算法可行性。

3.3. H6 桥逆变器中的软件 PLL 算法

使用 PSIM 软件搭建 H6 桥型单相并网逆变器系统仿真模型如图 11，仿真模型主要由光伏组件作为直流输入源，H6 桥逆变器模块，电网模块及逆变器控制模块组成。对仿真模型仿真运行，得到系统仿真波形如图 12 所示。可以看到输出电流的相位可以很好地跟踪电网电压的相位，证明了文中提出的软件 PLL 算法可行性。

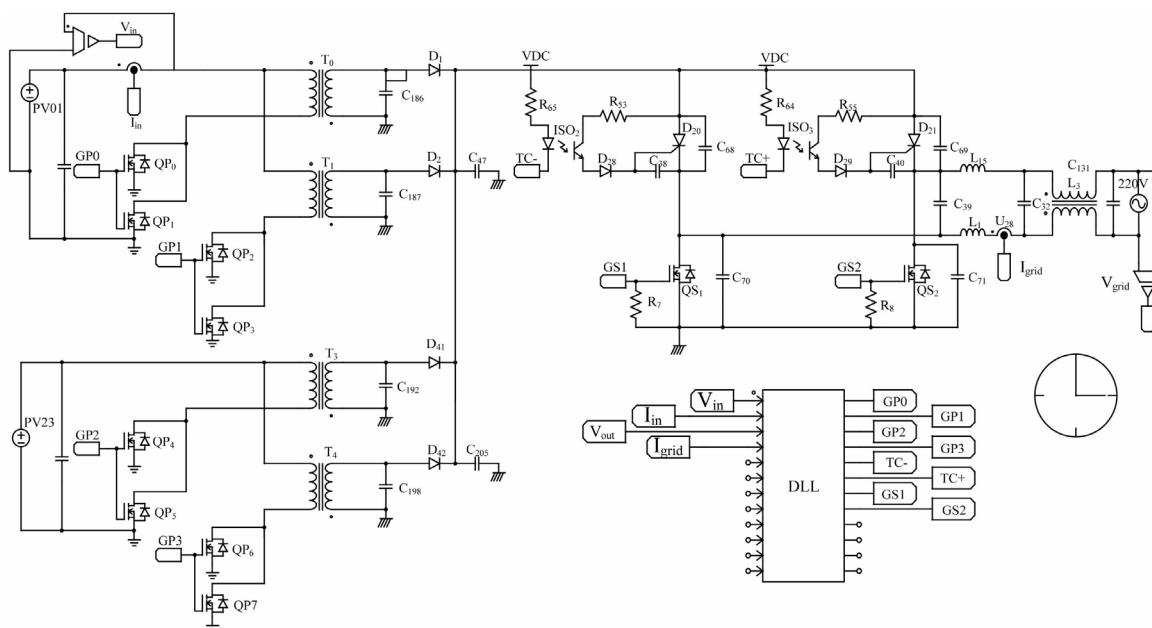


Figure 9. Micro-inverter system simulation model
图 9. 微逆变器系统仿真模型

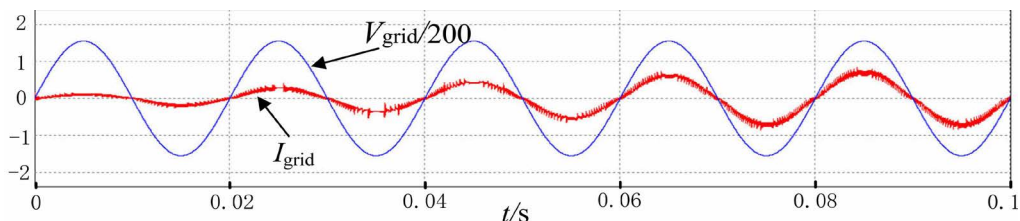


Figure 10. Simulation waveform

图 10. 仿真波形

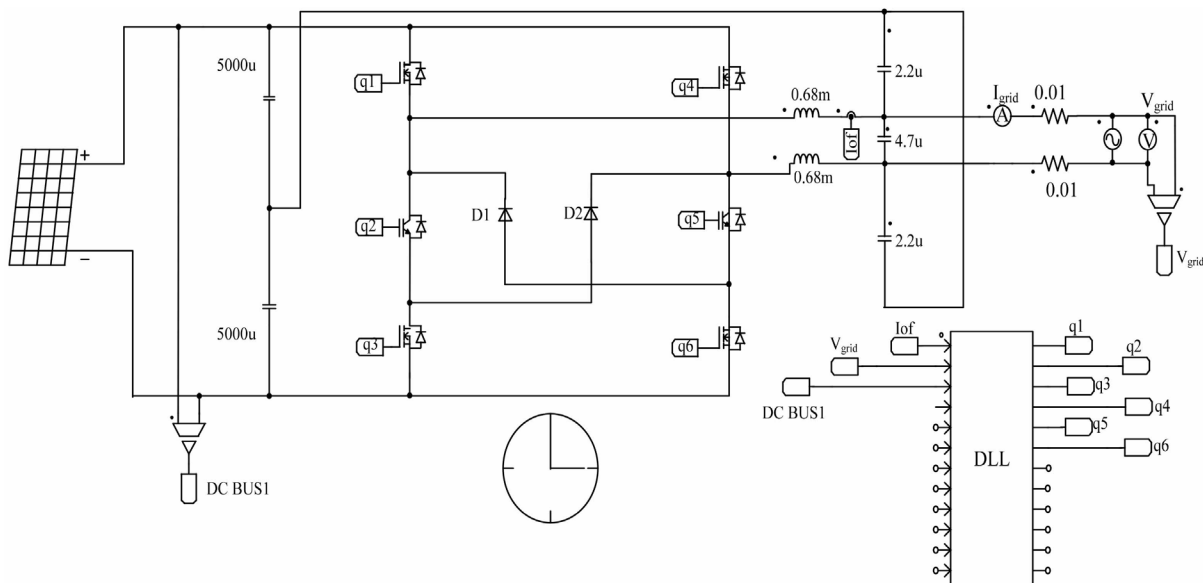


Figure 11. Single-phase grid-connected inverter system simulation model

图 11. 单相并网逆变器系统仿真模型

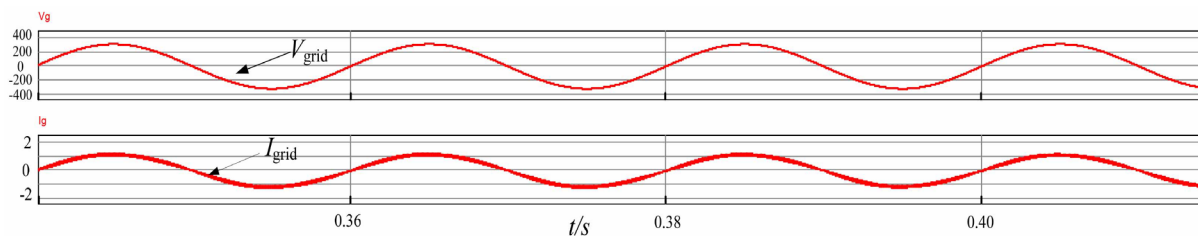


Figure 12. Simulation waveform

图 12. 仿真波形

4. 实验结果与分析

分别在 500 W 双通道微逆变器系统和 5 kW 单相光伏并网逆变器系统中使用文中的软件锁相环方法，前者采用 TMS320F28035 为主控芯片，后者采用 TMS320F2808 为主控芯片。电网频率由 IQ(15)表示，表示的最小精度为 $1/32768 = 3e^{-5}$ 。锁相程序放在 50 μ s 的中断中，每次中断一次加角弧度 $\omega + \Delta\omega$ ， $\omega = 0.0154$ rad。通过配置 DSP 的 CpuTimer0 寄存器，得到想要的采样频率 20 kHz，在中断发生以后，DSP 进行如下步骤：使能 A/D 口对电网电压进行采样，进行 park 变换，通过 PI 控制器、积分部分的运算和输出步进角，然后等待下一次的中断。PI 控制器的参数 k_a ， k_b 由仿真得到。如图 13 所示是利用调压器产生的电网电压测试锁相环控制效果，上位机显示的波形，其中 $\sin(\theta)$ 放大了 100 倍。图 14 是双通道微逆

变器的实验样机，图 15 所示是 500 W 双通道微逆变器系统实际并网工作的波形，图 16 是 5 kW 单相光伏并网逆变器的实验样机，图 17 是实际并网工作的波形图。从两者的并网实验结果波形图可以看到并网电流与电网相位一致，实验结果表明软件锁相环能有效、快速地跟踪电网相位、频率，达到预期的控制效果，同时验证了文中提出的软件 PLL 程序算法的可移植性。

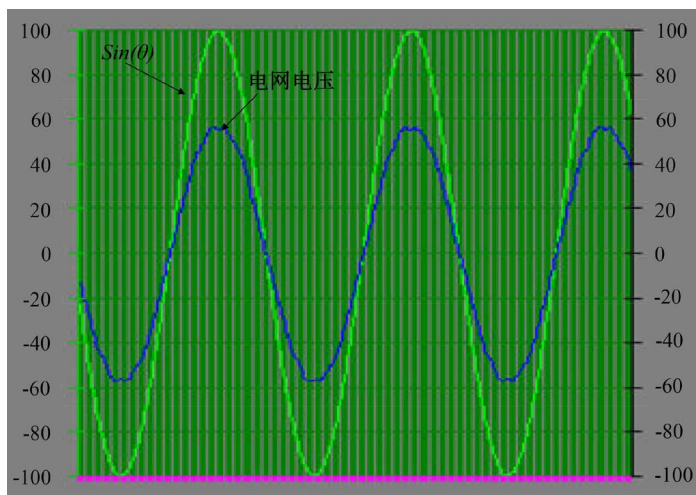


Figure 13. Simulation diagram of phase mutation

图 13. 锁相环锁相波形



Figure 14. Experimental prototype of the dual-channel micro-inverter

图 14. 双通道微逆变器的实验样机

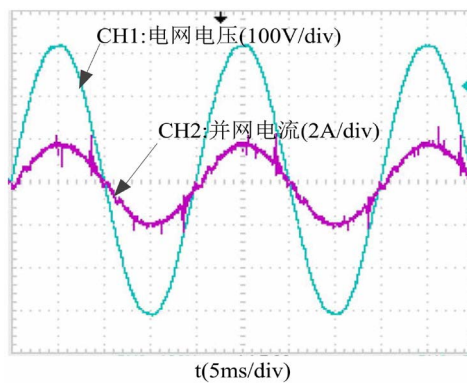


Figure 15. Grid-connected experimental waveforms

图 15. 并网实验波形



Figure 16. Experimental prototype of the single-phase grid-connected inverter
图 16. 5 kW 单相并网逆变器样机

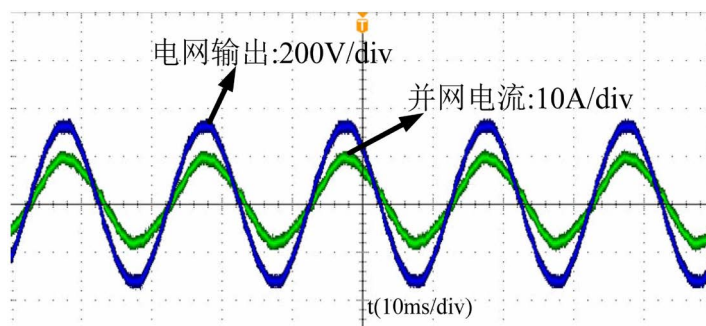


Figure 17. Grid-connected experimental waveforms
图 17. 并网实验波形

针对单相光伏并网逆变器的应用，文中提出一种新型软件锁相环的实现方法，在电网电压幅值、频率发生变化时可有效、快速、高精度实现周期内任意时刻的锁相，而不需等待检测电网过零点，可有效实现并网电流与电网锁相，提高了并网逆变器锁相精度和安全稳定性，省去了硬件电路，从而提高了并网逆变器系统的性价比，同时程序代码简单，可移植性高。在 500 W 双通道光伏微逆变器 and 5 kW 单相光伏并网逆变器上验证了软件锁相环控制方法的正确性和锁相环程序代码的可移植性。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61873346); 江苏省研究生科研与实践创新训练计划项目(SJCX17_0624); 扬州市科技计划项目 - 产业前瞻与共性关键技术 - 共性关键技术研发(YZ2017013); 扬州市科技计划项目 - 市校合作专项资金计划(YZ2018136)。

参考文献

- [1] Zhang, C., Wang, X., Blaabjerg, F., Wang, W. and Liu, C. (2015) The Influence of Phase-Locked Loop on the Stability of Single-Phase Grid-Connected Inverter. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Montreal, QC, 20-24 September 2015, 4737-4744. <https://doi.org/10.1109/ecce.2015.7310329>
- [2] 宋杨呈祥. 应用于并网逆变器的锁相环关键技术[J]. 分布式能源, 2017, 2(3): 33-38.
- [3] 郭子雷, 张海燕, 徐强, 秦臻. 新型锁相环技术及仿真分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 82-86.
- [4] 袁江伟, 吕征宇. 一种新型的单相并网系统锁相环[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 81-82 + 100.

- [5] 侯立健, 朱长青, 陈雅, 严雪飞. 基于二阶广义积分器的单相并网系统锁相技术的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 84-89.
- [6] 赵贵龙, 曹玲玲, 祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 108-112.
- [7] 严双喜, 张建文, 嵇伟, 俞良. 并网系统软件锁相环设计[J]. 电源技术, 2015, 39(10): 2277-2279.
- [8] 刘翔, 张爱玲. 一种基于 TMS320F2812 的软件锁相环实现方法[J]. 电力电子技术, 2010, 44(8): 60-61.
- [9] 唐轶, 谢永强, 王扬, 刘全景, 朱玉振. 基于解耦双同步坐标变换的三相锁相环研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(8): 14-20.
- [10] 何攀, 席自强. 基于 dq 变换的锁相环设计与仿真[J]. 湖北工业大学学报, 2017, 32(5): 93-95.
- [11] Salman, A., Williams, A., Amjad, H., Bhatti, M.K.L. and Saad, M. (20105) Simplified Modeling of a PV Panel by Using PSIM and Its Comparison with Laboratory Test Results. 2015 *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*, Seattle, WA, 8-11 October 2015, 360-364. <https://doi.org/10.1109/ghtc.2015.7343997>
- [12] Sahu, P.K., Shaw, P. and Maity, S. (2016) Modeling and Control of Grid-Connected DC/AC Converters for Single-Phase Micro-Inverter Application. 2015 *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi, India, 31 March 2016, 1-6. <https://doi.org/10.1109/indicon.2015.7443537>
- [13] 李研达. 基于双派克变换的新型三相锁相环技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(3): 253-257.
- [14] 徐亚伟. 并网逆变器中全软件锁相环的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [15] 吴学敏, 吕鑫. 基于 dq-PLL 锁相环相序检测算法仿真研究[J]. 信息通信, 2016(7): 1-3.
- [16] 瞿殿桂, 曹以龙. 基于双 d-q 旋转轴的三相电压锁相环分析及仿真[J]. 上海电力学院学报, 2017, 33(1): 49-54.
- [17] 赵齐齐, 方宇, 张金银, 黎文, 王齐, 谢勇. 双反激型光伏并网微逆变器的建模及控制[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 88-93.
- [18] 张丽. 双通道交错反激型光伏并网微逆变器研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2016.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojcs@hanspub.org