

# 光伏并网逆变器中的单相数字锁相环研究

金 曼, 苏建徽

(合肥工业大学能源研究所, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**在光伏并网系统中,准确并快速地检测到电网电压的频率、相位和幅值是必不可少的环节。传统数字锁相环检测电网电压的过零点从而实现锁相,但该方法抗干扰能力差。基于二阶通用积分器的单相锁相环较传统的数字锁相环具有不受电网频率变化影响、抗干扰能力强的优点,但该算法在离散化实现时会引入二次谐波而导致锁相准确度降低。这里在基于二阶通用积分器的单相锁相环方法上进行改进,利用陷波器滤除二次谐波,该方法适用于工程应用,同时提出了一种新的陷波器数字实现方法。最后进行了实验验证,结果表明该方法不受电网频率变化的影响,能迅速准确地锁相并消除了二次谐波污染。

**关键词:**锁相环; 单相; 光伏并网; 逆变器

中图分类号:TN911.8

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2011)06-0006-03

## The Research of Single-phase PLL in the Photovoltaic Grid-connected Inverter System

JIN Man, SU Jian-hui

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Accurate and rapid detection of frequency, phase and amplitude of the grid voltage is essential in the grid-connected system. Traditional digital PLL obtains the frequency and phase by detecting the zero-crossing point, but this method is very sensitive to noise. Comparing to traditional digital PLL, single-phase PLL based on second-order generalized integrator has the advantages that the results are not affected by the frequency changes and insensitive to noise. However, the realization of the algorithm will draw into second harmonic pollution which reduces the accuracy of the phase-lock. The single-phase PLL based on second-order generalized integrator method is improved by using the notch filter to filtered second harmonic, this method is suitable for engineering applications, and meanwhile a new digital realization method of notch filter is proposed. The experiments are taken and proposed. The results show that the proposed method is not affected by the grid frequency changes, the phase and frequency information can be obtained quickly and accurately, and does not produce second harmonic pollution.

**Keywords:** phase-locked loop; single-phase; photovoltaic grid-connected; inverter

## 1 引言

光伏并网逆变系统中,电网电压的频率、相位和幅值是并网运行的关键信息。传统的数字锁相环通过检测电网电压过零点从而实现锁相,该方法简单易实现,但缺点是抗干扰能力差。当电网电压波动时会出现多个过零点导致相位检测失败。单相逆变器较三相逆变器而言,电网电压所包含的信息更少,因而数字锁相更加困难。大多数单相逆变器锁相环实现方法主要基于虚拟坐标变换的方法,首先要虚拟出一个与原电压相差 90°的相量形成一个正交的坐标系,因而此类方法关键在于如何产生两个正交的电压相量。

定稿日期: 2010-12-15

作者简介: 金 曼(1987-), 女, 安徽合肥人, 硕士, 研究方向为光伏并网逆变器及其控制。

产生正交电压相量的方法有很多<sup>[1-5]</sup>, 最易于实现的是使用基于电网电压基波频率的延时方法, 但也存在一些不足。这里在二阶通用积分器方法的基础上进行改进, 通过添加陷波器消除了二次谐波。最后给出了实验验证, 结果表明改进后的方法解决了二次谐波问题, 实现了快速准确的锁相, 而且适用于工程应用。

## 2 基于二阶通用积分器的锁相环

图 1a 示出基于虚拟坐标变换的数字锁相环的通用模型。图 1b 示出基于二阶通用积分器的 PLL 方法中正交相量的产生模块, 由输入信号  $u_i$  得到两个相差 90°的电压相量  $u_\alpha, u_\beta$ , 其中  $u_\alpha$  与  $u_i$  的基波幅值、相位相同。其传递函数为:

$$\frac{u_\alpha(s)}{u_i(s)} = \frac{K\omega s}{s^2 + K\omega s + \omega^2}, \quad \frac{u_\beta(s)}{u_i(s)} = \frac{K\omega^2}{s^2 + K\omega s + \omega^2} \quad (1)$$

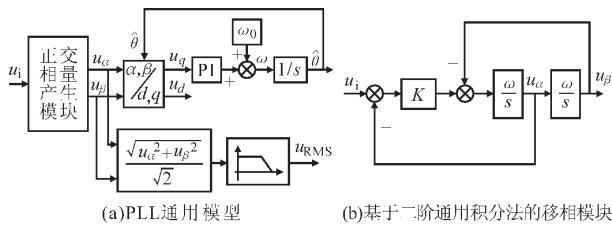


图 1 通用模型与移相模块

由式(1)知该方法基于二阶通用积分器,除具有移相作用还兼有滤波器特性,故无需额外添加低通滤波器来滤除基波中的谐波干扰。

离散化实现方法包括梯形法、欧拉法、二阶积分法和三阶积分法,比较后可知三阶积分法效果最好但不易实现,最终选择了最易实现的欧拉法,它也是最常用的离散积分器的实现方法,下面重点介绍用欧拉法实现的基于二阶通用积分器的单相逆变器数字锁相环。欧拉法分前向差分法和后向差分法,公式分别为:

$$\begin{cases} y(n)=y(n-1)+T_s u(n-1) \\ y(n)=y(n-1)+T_s u(n) \end{cases} \quad (2)$$

图 1b 所示的模块中第 1 个积分环节使用前向差分法,第 2 个积分环节使用后向差分法,根据欧拉法得图 1b 移相模块的离散域传递函数为:

$$\begin{cases} \frac{u_\alpha(z)}{u_i(z)} = \frac{K\omega T_s(z-1)z}{z^2 + (K\omega T_s + \omega^2 T_s^2 - 2)z + 1 - K\omega T_s} \\ \frac{u_\beta(z)}{u_i(z)} = \frac{K\omega^2 T_s^2 z}{z^2 + (K\omega T_s + \omega^2 T_s^2 - 2)z + 1 - K\omega T_s} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)用 Matlab 做离散域波特图,当取不同采样频率时,波特图中的相频曲线如图 2 所示。

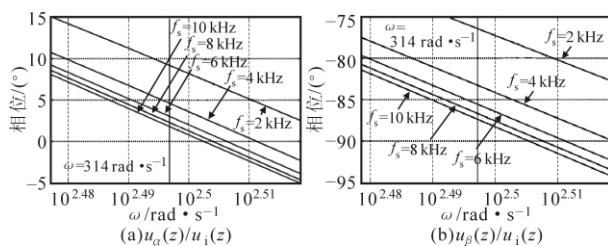


图 2 不同采样频率下移相模块输入输出相频曲线

可见,随着  $f_s$  的增加,  $u_\alpha$  与  $u_i$  越来越接近同相位,  $u_\beta$  与  $u_i$  相位差越来越接近  $90^\circ$ ,但都存在偏差量。因而可知由欧拉法实现的移相模块并不能实现理想的  $90^\circ$  相位移,而会有一个偏差量。

### 3 二次谐波产生分析

为便于分析非理想相位移带来的问题,先假设: $u_\alpha$  与  $u_\beta$  夹角为  $\theta=90^\circ+\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  很小,则可令:

$$\begin{cases} u_\alpha=u_m \cos\theta \\ u_\beta=u_m \cos[\theta-(90^\circ+\Delta\theta)] = u_m \sin(\theta+\Delta\theta) \end{cases} \quad (4)$$

图 1a 中  $\alpha, \beta/d, q$  变换公式为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} \\ -\sin\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\hat{\theta}$  为锁相环锁得的相角。

为便于研究,假设  $\hat{\theta}$  等于实际的相角  $\theta$ ,则通过坐标变换可得:

$$\begin{aligned} u_d &= u_\alpha \cos\theta + u_\beta \sin\theta = u_m \cos^2\theta + u_m \sin(\theta+\Delta\theta) \sin\theta = \\ &= u_m \cos^2\theta + u_m \sin^2\theta \cos\Delta\theta + u_m \cos\theta \sin\theta \sin\Delta\theta \end{aligned} \quad (6)$$

因  $\Delta\theta$  很小,故  $\cos\Delta\theta \approx 1$ ,  $\sin\Delta\theta \approx \Delta\theta$ ,可得:

$$u_d \approx u_m + \frac{u_m \Delta\theta}{2} \sin 2\theta \quad (7)$$

同理可得  $u_q \approx (u_m \Delta\theta/2) \cos 2\theta$ ,可见经过  $\alpha, \beta/d, q$  变换后的结果除直流量外还包含了二次的误差量。由图 1a 知,该误差量经过 PI 调节器会以二次谐波的形式出现在锁相环所获得的电网角频率  $\omega$  中,使  $\hat{\theta}$  与  $\theta$  出现偏差。

### 4 基于欧拉法的改进方法

由前述分析可知,基于欧拉法的锁相环获得的角频率中混入了二次谐波,影响了相角的获取精度,从而影响了系统性能。使用高阶的积分器算法实现移相模块,消除了移相偏差,但实现过程较复杂、运算量较大,不适宜在工程中应用。这里提出了基于欧拉法的改进方法,使用陷波器滤去  $d, q$  变换结果中的二次谐波,从而消除移相偏差对锁相所得的角频率和相角的影响,计算量小易于实现。由于移相偏差出现在锁相环的反馈通道里,因而无法通过闭环抑制,为了消除此偏差量,必须阻断该偏差量在闭环中的传播。这里采用陷波器滤除  $q$  轴变换结果中的二次谐波量,其实现框图如图 3 所示。

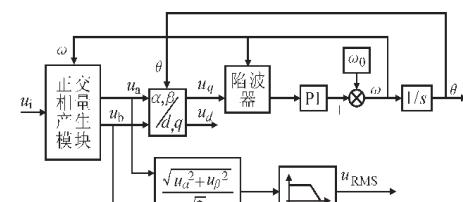


图 3 改进方法的实现框图

为滤除二次谐波,这里提出一种新的陷波器数字实现方法,如图 4 所示。

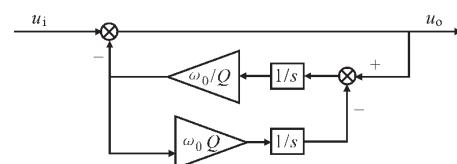


图 4 陷波器数字实现框图

其传递函数为:

$$G_{\text{notch\_filter}}(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0/Qs + \omega_0^2} \quad (8)$$

图 4 中积分环节采用欧拉法实现, 其离散域传递函数为:

$$G_{\text{notch\_filter}}(z) = \frac{z^2 - 2z + \omega_0^2 T_s^2 z + 1}{z^2 - 2z + \omega_0^2 T_s^2 z + \omega_0 T_s / Q z + 1 - \omega_0 T_s / Q} \quad (9)$$

图 5 示出陷波器波特图, 图中陷波器陷波频率  $\omega_0$  设定为二次谐波频率。由图可见, 在陷波频率处幅值有很大的衰减, 而在其他频率处的信号基本无影响。故可在滤除二次谐波的同时不影响锁相环闭环系统带宽。

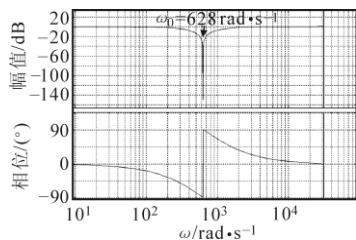


图 5 陷波器波特图

## 5 实验

为验证所提出的改进方法的正确性, 在以 TMS320F28335 型 DSP 为芯片的平台进行了实验验证, 采样频率为 5 kHz, 由图 6 所示移相模块输入输出波形可知, 移相模块输出与理想输出之间有明显的相位差。

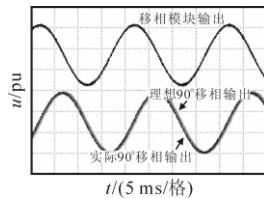


图 6 移相模块输入输出模型

图 7a 示出未改进前的锁相环输出结果, 可见输出角频率中有二次谐波, 经验证其幅值与采样频率成反比。图 7b 示出采用所提出的改进算法后的锁相环输出结果, 可见锁相环输出中的二次谐波被完全消除。

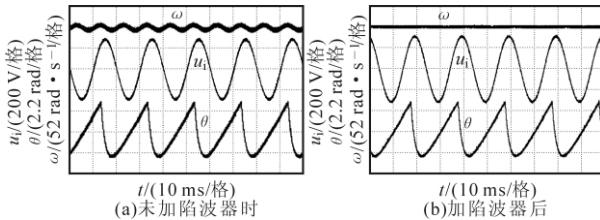


图 7 采样频率为 5 kHz 时, 加入陷波器前、后锁相结果

图 8 示出非理想电网输入情况下的锁相结果, 可见所提出的改进锁相环算法不但能应对电网的谐波干扰, 而且可以在电网频率波动和幅值跌落情况下快速准确地锁相, 获得电网的频率、幅值和相位信息。

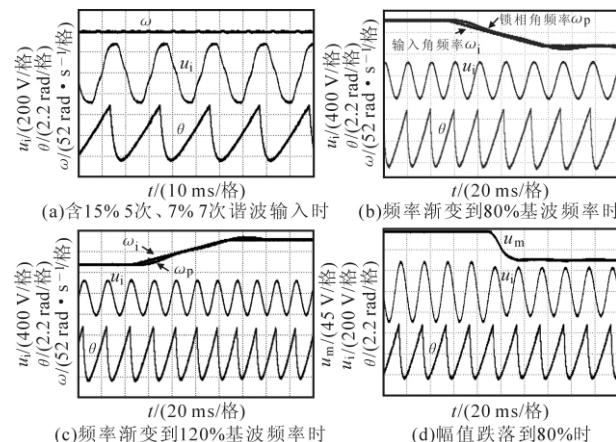


图 8 不同情况下锁相结果

## 6 结论

此处在二阶通用积分器单相锁相环基础上进行了改进, 消除了传统算法中锁相输出频率中混有二次谐波的问题, 并通过实验验证了所提算法的正确性和实用性。实验结果表明, 这里提出的改进锁相环算法不但消除了输出频率中的二次谐波问题, 且能够很好地应对各种非理想电网输入, 具有较快的动态响应速度, 适合工程应用。

## 参考文献

- [1] M Saitou, N Matusi, T Shimizu. A Control Strategy of Single-phase Active Filter Using a Novel  $d$ - $q$  Transformation [A]. IEEE Industry Applications Conference [C]. 2003: 1222–1227.
- [2] S M Silva, B M Lopes, B J C Filho, et al. Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single Phase Grid-connected Systems [A]. IEEE IAS Annu. Meeting [C]. 2004: 2259–2263.
- [3] Mihai Ciobotaru, Remu Teodorescu, Frede Blaabjerg. A New Single-phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator [A]. Power Electronics Specialists Conference [C]. 2006: 1–6.
- [4] Mingzhi Gao, Baohong Li, Min Chen, et al. Analysis and Implementation of a PLL Structure for Single-phase Grid-connected Inverter System [A]. Power Electronics and Motion Control Conference [C]. 2009: 716–719.
- [5] J W Choi, Y K Kim, H G Kim. Digital PLL Control for Single-phase Photovoltaic System [J]. Electric Power Applications, IEE Proceeding, 2006, 153(1): 40–46.