基于二阶广义积分器的单相并网锁相环的研究

陈艳艳，沈旦立，皇淼淼，许登旭
（安徽理工大学，安徽 淮南 232001）

摘要：准确快速地追踪电网电压是并网逆变器稳定运行的重要保障，故锁相技术在光伏并网系统中十分重要。常规的过零点电网电压检测锁相方法在面对电压缺相时会使锁相不稳定而失效，甚至会损坏逆变器。针对此问题，提出了基于瞬时无功理论的单相锁相技术，并将该方法应用于单相并网系统，实验验证了该方法的有效性。

关键字：单相锁相环；瞬时无功理论；并网逆变器
中图分类号：TN911.8　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-100X(2013)05-0046-02

Research on Single-phase Grid-connected Phase Locked Loop Based on Second Order Generalized Integrator

CHEN Yan-yan, SHEN Dan-li, HUANG Miao-miao, XU Deng-xu
(*Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *China*)

Abstract: Quickly and accurately track the grid voltage is an important guarantee to ensure stable operation of the grid-connected inverter. Therefore, lock-in technique is particularly important in photovoltaic grid-connected systems. Conventional lock-in method has zero grid voltage detection, makes voltage phase-locked failure, even damages the inverter. For this problem, single phase lock-in technique based on instantaneous reactive power theory is proposed and this method is applied into single phase grid-connected systems. Experiments verify the effectiveness of the method.

Keywords: single-phase locked loop; instantaneous reactive power theory; grid-connected inverter

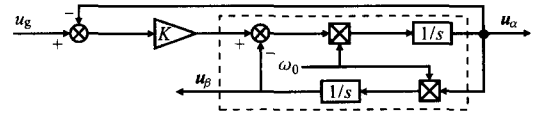
1 引　言

稳定地控制并网逆变器是有效提高能源利用率的重要途径，故锁相技术十分重要。单相并网逆变器常用电网电压过零点检测的锁相方法，该方法简单实用，但其对于电网电压的畸变和扰动十分敏感[1]。为解决该问题，在此提出基于瞬时无功理论的方法，并配合二阶广义积分器，将该方法应用于单相并网系统，使锁相精准，速度快，又具有较好的滤波效果，最后通过实验进行了验证。

2 原理与设计

2.1 正交坐标系产生

常规的软件锁相技术基于 d,q 旋转坐标变换来实现，三相电压向量 $\boldsymbol{u}_{abc}$ 经 Clark 变换，从静止的三相坐标变换为两相正交的静止向量 $\boldsymbol{u}_\alpha,\boldsymbol{u}_\beta$。但在实际单相并网锁相系统中，不存在静止的三维坐标系，无法借助 Clark 变换来实现正交坐标系的产生。因此，这里提出基于欧拉差分的二阶广义积分器来实现正交坐标系的产生。图 1 示出二阶广义积分器的原理图[2]。



u_g 为电网输入电压信号；K 为一个影响系统带宽的常数；ω_0 为电网电压角频率；u_α,u_β 为二阶广义积分器产生的正交分量，u_α 为与电网电压信号同步的向量，u_β 为滞后电网电压信号 90°的向量。

图 1　二阶广义积分器原理图

Fig. 1 Second order generalized integrator schematic diagram

图中，虚线框内谐振环节的传递函数 $G_i=\omega_0 s/(s^2+\omega_0^2)$，可得 u_α,u_β 与 u_g 间闭环传递函数为：

$$\begin{cases} H_\alpha=u_\alpha/u_g=k\omega_0 s/(s^2+k\omega_0 s+\omega_0^2) \\ H_\beta=u_\beta/u_g=k\omega_0^2/(s^2+k\omega_0 s+\omega_0^2) \end{cases} \tag{1}$$

为实现正交分量，需对系统进行离散化[3]。这里采用欧拉差分的方式来实现二阶广义积分器的离散化。前向欧拉差分公式：

$$y(n)=y(n-1)+T_s u(n-1) \tag{2}$$

式中：T_s 为系统采样周期。

对于该方法，通过 $T_s z^{-1}/(1-z^{-1})$ 去近似 $1/s$。

后退欧拉差分公式：

$$y(n)=y(n-1)+T_s u(n) \tag{3}$$

对于该方法，由 $T_s/(1-z^{-1})$ 近似 $1/s$。但由于前向、后退欧拉差分在 50 Hz 频率下，无法精确提供 90°的相位，故两个输出向量并非完全正交。为提高输出的精确性，采用改进欧拉公式（梯形法）：

定稿日期：2012-12-07
作者简介：陈艳艳（1988-），女，河南洛阳人，硕士研究生，研究方向为时间序列预测。

$$y(n)=y(n-1)+T_s[u(n)+u(n-1)]/2 \quad (4)$$

对于该方法，通过 $T_s(1+z^{-1})/[2(1-z^{-1})]$ 去近似 $1/s$，将其代入式(1)得：

$$\begin{cases} H_\alpha(z)=b_0(1-z^{-2})/(a_0+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}) \\ H_\beta(z)=b_1(1+2z^{-1}+z^{-2})/(a_0+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}) \end{cases} \quad (5)$$

式中：$a_0=4+2K\omega_0T_s+\omega_0^2T_s^2$；$a_1=2\omega_0^2T_s^2-8$；$a_2=4-2K\omega_0T_s+\omega_0^2T_s^2$；$b_0=2K\omega_0T_s$；$b_1=K\omega_0^2T_s^2$。

图 2 示出闭环传递函数的波特图及正交坐标系产生。K 的取值与滤波效果有关，这里 $K=1$。u_g 经二阶广义积分器不仅可产生 90°的正交分量，且能起到一定的滤波作用，改善输入效果。由图 2b 可见，u_g 与输出信号经过不到两个工频周期，便可产生 u_α，u_β 两个正交分量。

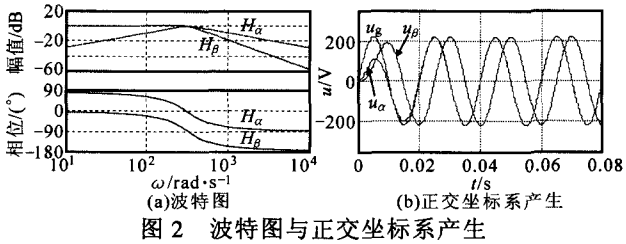
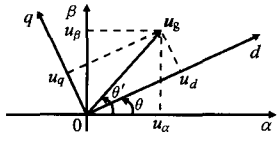


图 2　波特图与正交坐标系产生

Fig. 2 Bode diagrams and orthogonal system generation

2.2　d,q 同步旋转坐标系锁相环工作原理

锁相环是一个能自动跟踪输入电网电压信号相位的控制系统。同步锁相的工作原理：把二阶广义积分器产生的正交分量，送入 d,q 旋转坐标系，进行一次 Park 变换，根据 Park 变换输出的结果，控制 $u_q=0$ 以完成锁相。图 3 示出其原理。



θ'为电网电压信号与 α 轴夹角；$\theta=\omega t$，ω 为 d,q 坐标系的旋转速度。

图 3　旋转坐标系

Fig. 3 Rotating coordinate system

设 $u_\alpha=u_g\cos\theta'$，$u_\beta=u_g\cos(\theta'-\pi/2)$，归一化后得：

$$\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}=\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta' \\ \cos(\theta'-\pi/2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

然后进行一次 Park 变换：

$$\boldsymbol{u}_{dq}=\boldsymbol{T}_{dq}\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}=\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}=\begin{bmatrix} \cos(\theta'-\theta) \\ \sin(\theta'-\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

可通过控制 $u_q=0$ 以完成锁相。相位锁定时，输出相角跟踪输入相角。u_q 与 d 轴同相时，$u_q=0$，锁相同步；d 轴滞后于 u_q 时，$u_q>0$，应增大旋转速度；d 轴超前于 u_q 时，$u_q<0$，应减小旋转速度。故可通过控制 u_q 是否为零以完成两者同相。

2.3　单相锁相环的实现

单相锁相环控制是锁相技术的关键，通过控制可实现即时锁相。这里采用瞬时无功理论[4]的方式实现锁相。图 4 为单相锁相环控制原理框图。

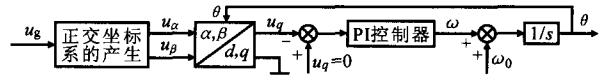


图 4　单相锁相环控制框图

Fig. 4 Single-phase locked loop control block diagram

该算法通过不停地闭环迭代，使输出相位与输入相位引起的电压差为零，从而达到锁相的目的。只需考虑无功分量，将无功分量趋近于零，即可实现 u_q 与 d 轴同相位，实现精准锁相。

3　实　验

实验建立在 3 kW 的光伏并网逆变器平台上，采用电网模拟器进行电网的模拟。主电路参数：直流母线电压 600 V，母线电容 3 000 μF，电感 1 mH，开关器件开关频率 16 kHz，设 $u_g=220\sin(\omega_0t)$。实验波形如图 5 所示，其中 u_g 为并网电压，i_g 为并网电流。可见，基于瞬时无功理论的锁相算法可快速精准地锁相，证明了该方法的有效性。

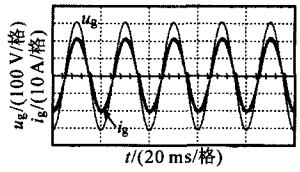


图 5　并网实验波形

Fig. 5 Grid-connected experimental waveforms

4　结　论

基于二阶广义积分器和瞬时无功理论相结合的数字锁相算法，可消除谐波干扰，同时能克服过零点检测对电网电压畸变敏感的缺点，大大提升系统稳定性，且控制算法简单实用，可快速有效实现电网电压的锁相，在工程实践中具有重要意义。

参考文献

[1] 袁江伟，吕征宇.一直新型的单相并网系统锁相环[J].电力电子技术，2011，45(7)：81-82.

[2] 袁江伟.单相并网逆变器及反孤岛控制研究[D].杭州：浙江大学，2011.

[3] 金　曼，苏建徽.光伏并网逆变器中的单相数字锁相环研究[J].电力电子技术，2011，45(6)：6-8.

[4] 陈自强，黄守道，曾智波，等.新型锁相技术在单相系统中的应用研究[J].计算机仿真，2011，28(1)：315-318.