

基于 RTW 的单相锁相环控制新方法研究

王晓雷¹, 张立功¹, 高旭东¹, 李艳², 王哲¹

(1. 中原工学院 电信学院, 郑州 450007; 2. 山东省邹城市供电公司, 山东 邹城 273500)

摘要: 给出了一种基于 DSP TMS320F2812 和 MATLAB 实时代码生成工具 (RTW) 的单相整流器锁相环控制系统, 介绍了 MATLAB 实时仿真控制系统的搭建过程和实际系统的硬件结构; 并在此防控一体化控制平台上, 介绍并改进了一种双坐标反馈方法设计锁相环的算法, 首先利用 Matlab/Simulink 工具建立了算法模型, 并给出了其仿真结果, 结果显示功率因数基本为 1; 然后将仿真模型转换成实时代码, 并将代码烧写到 DSP 控制实际系统中给出了实验结果, 实验结果显示相位差为 -2 度左右, 电流稳定在一定值, 与仿真结果吻合, 证明了这种由可视化模型生成代码的方法不仅缩短了开发周期, 而且提高了系统的能观能控性。

关键词: 单相整流器; 锁相环; 双坐标反馈; 实时代码生成; 可视化

Research of New Algorithm of Single—phase Locked Loop Control Based on RTW

Wang Xiaolei¹, Zhang Ligong¹, Gao Xudong¹, Li Yan², Wang Zhe¹

(1. Department of Electric and Information Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Shandong Province Zoucheng City Power Supply Company, Zoucheng 273500, China)

Abstract: Presented a MATLAB—based real—time DSP TMS320F2812 and code generation tool (RTW) single—phase rectifier PLL control systems, introduces the hardware structure of MATLAB real—time simulation and process control systems to build the actual system. This platform integrated control and prevention, introduce and improve the design of a dual phase—locked loop feedback approach coordinate algorithm, first using Matlab / Simulink tools to create an algorithm model, and simulation results are given, the results showed that the power factor is 1; then the simulation models into the real—time code, and the code into the DSP control system gives the actual results, experimental results show that the phase difference of about -2 degrees, the current stable at a certain value, the result consistent with the simulation results proved that this method of visualization model generated by the code not only shorten the development cycle, but also improve the system controllability and observability.

Keywords: single—phase rectifier; locked loop; two—coordinate feedback; real—time code generation; visualization

0 引言

目前, 在电力电子装置中广泛应用的锁相环是采用硬件电路检测电网电压过零点求得相位差信号, 然后用硬件或软件实现锁相。但由于每个周期内电压只有两个过零点, 而且电网电压本身的畸变和检测电路的干扰信号, 使锁相速度受到限制且难以准确检测过零点, 使输出的相位信号产生振荡。

本文分析并改进了双坐标反馈的 SPLL 算法, 本算法通过同步旋转坐标变换的方法得到正交信号, 由于稳态的正交信号均为直流量, 因此, 低通滤波器的带宽可以设得比较大, 算法简单, 实现相对容易。

1 单相整流器锁相环设计

1.1 锁相环基本结构

锁相环路是能够自动跟踪输入信号的频率与相位的一个闭环控制系统。锁相环路能够实现对输入信号的相位进行跟踪, 其主要原因是它本身是一个相位跟踪的负反馈系统, 主要由三部分组成, 分别为鉴相器, 滤波器和压控振荡器^[2]。

鉴相器为一个相位比较装置, 对输入信号的相位角和反馈信号的相位角进行比较。所以图中的 U_m 实际上是输入信号的相位信息, 而此相位信息的获得是锁相环的关键技术, 本文主要研究的也是此相位信息的获得方法即双坐标反馈方法^[3]。

1.2 双坐标反馈方法

SPLL 传统的算法是模仿三相系统基于同步旋转坐标变换的 PLL 算法得到的。此算法运算量较大, 本文对其进行了改进, 对一个单相电网电压 V , 假设其数学表达式为:

$$V = V_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

如果将它作为派克 (Park) 变换的 α 相的输入, Park 变换的 β 相的输入为后续反 Park 变换的 β 轴输出, 将此信号经过 Park 变换得到旋转坐标系下的 dq 分量经过低通滤波器之后作为反 Park 变换的输入, 同时 d 轴分量作为反馈信号与输入信号进行比较, 再经过 PI 控制器后送给压控振荡器输出角度信号, 此角度信号又作为 Park 变换与反 Park 变换的变换角。

具体分析如下:

图 1 是同步旋转坐标变换的原理图, 图中 V_a 为采集到的单相电网电压, 作为 Park 变换的 α 轴的输入, 同时当分析反 Park 变换时 V'_a 是反 Park 变换的 α 输出; V_β 为 Park 变换的 β 轴输入, 同时当分析反 Park 变换时 V'_β 是反 Park 变换的 β 输出; V_d 为 Park 变换 d 轴输出; V_q 为 Park 变换的 q 轴输出; V_d, V_q 经过低

收稿日期:2014-03-18; 修回日期:2014-04-28。

作者简介:王晓雷(1963-),男,河南郑州人,教授,博士,硕士生导师,主要从事电机电器与电力电子技术方向的研究。

通滤波器后得到 V'_d, V'_q ，然后将 V'_d, V'_q 作为反 Park 变换的输入； θ 为同步旋转坐标角等于 ωt ，等于压控振荡器的输出角。

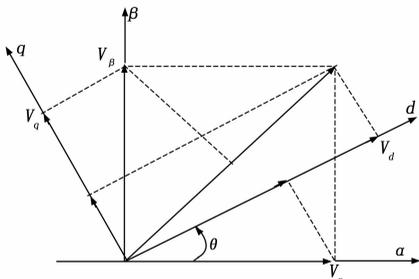


图 1 同步旋转坐标变换原理图

由图 1 分析可得：

$$\begin{cases} V_d = V_a * \cos\theta + V_\beta * \sin\theta \\ V_q = -V_a * \sin\theta + V_\beta * \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

即 Park 变换矩阵如下：

$$T_{\text{Park}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

所以 Park 变换的过程如下：

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = T_{\text{Park}} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \cos(\omega t + \varphi) \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由图 2 分析可得

$$\begin{cases} V'_a = V'_d * \cos\theta - V'_q * \sin\theta \\ V'_\beta = V'_d * \sin\theta + V'_q * \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

即反 Park 变换矩阵如下：

$$T_{\text{反Park}} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

所以反 Park 变换的过程如下：

$$\begin{bmatrix} V'_a \\ V'_\beta \end{bmatrix} = T_{\text{反Park}} * \begin{bmatrix} V'_d \\ V'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_M \cos(\omega t + \varphi) \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

公式 (7) 化简后的结果如公式 (8) 所示

$$\begin{bmatrix} V'_a \\ V'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过以上分析可以看出，当反 Park 变换的输出作为 Park 变换的输入时，系统构成了一个闭环系统：

$$\begin{cases} V'_d = V \sin(\theta - \omega t) \\ V'_q = V \cos(\theta - \omega t) \end{cases} \quad (9)$$

式中， ω 、 θ 分别为输入电压的实际角频率和相位。

由公式 (9) 可以看出当锁相环处于稳定状态时 $\omega t \approx \theta$ ，所以， $V'_d \approx 0$ ；因此，从上面的结果可以看出，只要令 $V'_d = 0$ ，就可以通过鉴相器得到实际电网电压的相位角。基于双坐标反馈方法的锁相环的结构如图 2 所示。

由式 (6) 得

$$V'_d = V \sin(\theta - \omega t) \approx V \Delta\theta \quad (10)$$

需要一阶低通滤波器，其传递函数为 $\frac{1}{\tau s + 1}$ ，PI 调节器

的传递函数为 $\frac{k_p s + k_i}{s}$ ，压控振荡器的数学模型为 $\frac{1}{s}$ ，考虑到系统的动态性能和稳定性，LPF 的截止频率影响到锁相环的响应速度，所以低通滤波器的截止频率 f_c 不能取的很大，本文选取合适的值为 45 Hz，所以 $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$ ，在系统中 τ 是一个相对较小的数，可以做近似处理将其忽略，这样系统是一个典型的二阶系统。

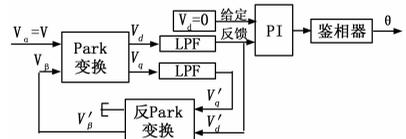


图 2 双坐标反馈方法锁相环的算法结构图

2 实时代码生成技术

目前，随着实时代码自动生成技术的研究，传统的由工程师编写源代码的嵌入式软件开发模式逐渐显示出了劣势，而基于模型的设计自动生成源代码的方式逐渐显示出优势，比如传统的手工编写源代码的方式任务繁重，过程繁杂而且有很多的潜在错误不易被发掘，开发效率低；而实时代码生成技术不仅使这一过程变的简单，减少了系统的开发周期，而且提高了代码的可靠性，增加了系统控制的能观能控性。

当前，针对实时代码自动生成技术的文献还是比较少的，文献 [4-5] 中只是介绍了 MATLAB 实时代码生成的基本流程，并没有真正地介绍一个工程的设计过程，只是针对 MATLAB 进行了简单的介绍；文献 [6] 介绍了一些模型的搭建及代码的生成，但是没有进行代码生成的关键环节进行介绍；文献 [7] 介绍了生成代码的结构，基本没有介绍代码生成的过程。

本文将从仿真模型的搭建开始一步步的介绍整个系统设计的全过程，设计流程图如图 3 所示。

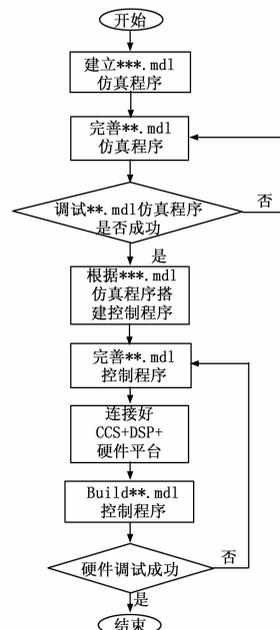


图 3 基于 RTW 的系统设计流程图

3 单相整流器模型搭建

首先根据双坐标反馈锁相环算法搭建锁相环电路, 锁相环的结构搭建结束后, 将其放入单相整流器的仿真模型中, 整体结构如图 4 所示, 图中锁相环即为本文设计的双坐标反馈算法锁相环; 硬件电路结构为单相整流器的典型结构, 交流电压采用 220V 单相交流电压, 隔离变压器采用变比为 220V/24V 的环形变压器, 交流侧电感采用 11.3 mH, 负载电阻为 32 Ω, 直流侧稳压电容为 6 400 μf; 图中单相整流控制器模块包含了整个整流器的控制单元, 采用的是 SPWM 控制技术; C28x PWM 模块用于模拟 DSP2812 内部的 PWM 生成模块; F2812 eZdsp 的功能是配置模型特定的 IDE, 工具链, 硬件板卡和处理器, 本文采用的是 DSP2812; powergui 模块的功能是 MATLAB 对于 SimPowerSystems 的模型环境块。

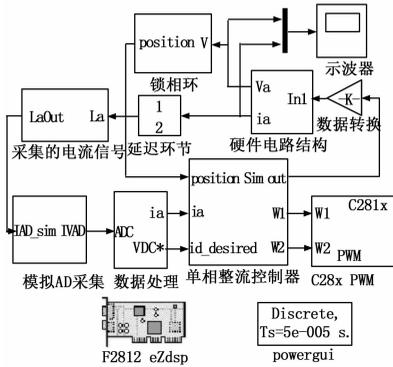


图 4 单相整流器仿真模型

4 仿真和实验结果

针对设计的单相整流器锁相环算法, 本文进行了数字仿真, 并生成了实时代码, 将其写入 DSP2812 中进行了实际硬件的实验验证。

4.1 数字仿真实验

在第 3 节中已经给出了在 MATLAB 中基于 DSP 模块下搭建的仿真模型, 图 5 是单相整流器交流侧电流和电压的相位对比。

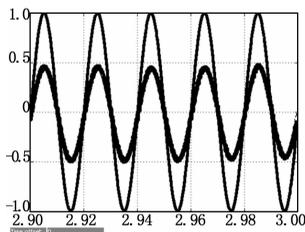


图 5 交流侧电压与电流相位比较

由图 5 可以看出本算法响应快, 锁相效果好, 在仿真环境下完全满足控制要求。

4.2 实际硬件实验

利用搭建好的控制模型生成实时代码。在生成代码的过程中首先要将实际硬件连接好, 并将 DSP2812 板卡与仿真盒 SEED-XDSUSB2.0 系统进行连接, 并将仿真盒与电脑连接, 仿真盒与电脑的连接需要使用 CCS 编译器 (本文使用的是 CCS 3.3)。最后在搭建好控制模型中菜单栏 Tools—Code—

Generation—Build model, 之后 MATLAB 会自动识别并启动 CCS 3.3, 进行代码的生成和编译, 并将代码烧写到 DSP2812 板卡中。实验结果如图 6 所示。

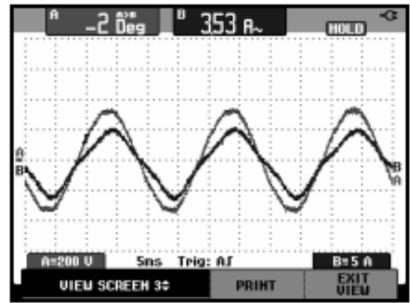


图 6 实验结果

由图 6 可见, 图中 A 通道为电网电压, B 通道为交流侧电流, 相位差为 -2 度, 交流侧电流稳定在 3.52 A, 实际结果跟仿真结果基本一致, 只是控制器的参数需要作适当的修改, 说明本算法是有效的, 是可行的。

5 结论

本文提出的利用 MATLAB 中实时代码生成工具 (RTW) 与 DSP TMS320F2812 的接口工具建立了单相整流器锁相环控制系统, 并验证了改进的一种双坐标反馈方法设计的锁相环算法, 稳态的正交信号均为直流量, 因此, 低通滤波器的带宽可以设得比较大, 算法简单, 实现相对容易。经过仿真和实验验证说明本文改进的算法是有效的, 可行的, 同时仿真和实验两种方法结果吻合。这种由可视化模型生成代码的方法不仅缩短了开发周期, 而且提高了系统的能观能控性, 具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. A New Singlephase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator [A]. Record of IEEE PESC [C]. Jeju, Korea, 2006: 1511-1516.
- [2] 李育宁. 通用并网变换器同步锁相环的研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [3] Salamah A M, Finney S J, Williams B W. Three-phase Phase-lock Loop for Distorted Utilities [J]. IET Electr. PowerAppl., 2007, 1 (6): 937-945.
- [4] 王海泉, 欧阳玲, 廖雷, 等. 基于 RTW 的圆盘位置 PV 控制方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (6): 1541-1543.
- [5] 邱宝梅, 左文英, 王凤娟. 基于 Simulink/RTW 的汽车电子控制系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1086-1088.
- [6] 张卫丰, 余岳辉. 基于 RTW 的 SVPWM DSP 控制系统 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (3): 102-106.
- [7] 齐振恒, 孙中杰, 李涛. RTW 嵌入式代码自动生成机制与代码结构分析 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3): 639-642.
- [8] 陆军, 郭迎清, 王海泉. 基于快速原型化的数控系统实时仿真平台研制 [J]. 计算机测量与控制, 2009, (6): 1096-1101.