

# 并网逆变器双电流环控制算法的代码自动生成

王跃龙,王 武,蔡逢煌

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108)

**摘要:**采用 LCL 方式滤波的单相光伏并网逆变器,有利于抑制高频开关谐波电流进入电网,滤波效果明显优于单电感滤波方式。但 LCL 滤波器是无阻尼的三阶系统,容易发生谐振现象。文中采用有源阻尼方案,即在并网电流和电容电流闭环的方法增加系统阻尼。对电流双闭环控制方案进行系统建模和稳定性分析,并用 Matlab/Simulink 软件进行仿真验证,验证成功后搭建以 TMS320F2808DSP 为主芯片的代码模型,再进行 IQ 数据转换和采样电路后的仿真验证,然后利用 RTW 功能自动生成控制算法代码。实验结果表明,该方案可有效地避免进网电流谐振和实现进网电流的高功率因素,大大缩短算法的开发周期。

**关键词:**LCL 滤波器;并网逆变器;DSP;Matlab/Simulink;RTW

**中图分类号:**TP39

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2013)09-0143-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2013.09.036

## Automatic Code-generation of Double-loop Current Control Algorithm of Grid-connected Inverter

WANG Yue-long, WANG Wu, CAI Feng-huang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Adopting a LCL filter based single-phase photovoltaic grid-connected inverter has the characteristics of high frequency attenuation, and the filtering effect is better than single inductor. However, LCL filter is a three order system without damping and easy resonance. Based on the active damping scheme, that is, double-loop control strategy with grid current feedback and capacitor current feedback is proposed for increasing the damping of system. System modeling and stability analysis is presented, and the system is carried on simulation with the Matlab/simulink software. After successfully doing it, code model should be set up with the DSP of TMS320F2808. Meanwhile, it should convert the data, add the sampling circuit, and automatic generates code of the control algorithm based on RTW to verify it. The simulation and experiment results prove that the resonance of grid current is avoided, and high in-grid power factor is achieved and it shortens the developing time.

**Key words:** LCL filter; grid-connected inverter; DSP; Matlab/Simulink; RTW

## 0 引言

在计算机的应用中,传统的嵌入式系统设计和代码实现是相互独立的,导致开发周期长,成本高,已经无法满足快速高效的当今市场需求。文中基于 TMS320F2808DSP 的单相桥式逆变器控制算法的开发,利用 Matlab/RTW 工具集把 Simulink 仿真模型自动转换成嵌入式 C 代码并自动生成编译下载到 DSP 中,从而实现系统设计和代码实现的集成统一,可大大缩短开发周期,降低开发成本<sup>[1]</sup>。RTW 是 Matlab 图形建模仿真环境 Simulink 的一个重要补充功能模块,

是基于 Simulink 的代码补充功能模块<sup>[2]</sup>。其中,RTW 嵌入式代码生成器可优化所生成代码的速度、内存使用和简洁性,非常适合于嵌入式系统<sup>[3]</sup>。

光伏发电、风能发电等可再生能源发电系统中,并网逆变器起着至关重要的作用,也是研究热点之一<sup>[4-5]</sup>。为了逆变器能够输出较高质量的电流波形,则需在逆变器和电网之间连接谐波滤波器。在滤波效果相同的情况下,较传统的 L 型和 LC 型滤波器,LCL 型滤波器显然需更小的电感容量,减小了滤波器的体积和成本,这一关键优点使其在并网逆变器系统中具

收稿日期:2012-12-01

修回日期:2013-03-03

网络出版时间:2013-05-09

基金项目:福建省自然科学基金项目(2012J01257)

作者简介:王跃龙(1986-),男,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为电力电子的控制策略;王 武,博士,教授,研究方向为鲁棒控制与滤波;蔡逢煌,博士,副教授,研究方向为电力电子的控制策略。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130509.1058.029.html>

有很好的应用前景<sup>[6-7]</sup>。LCL 滤波器对高频分量呈高阻抗,对高频谐波电流可起到很大的衰减作用<sup>[8]</sup>。也有文献采用了 LC 滤波的方式<sup>[9-11]</sup>。由于 LCL 滤波器在谐振频率处呈显零阻抗,所以在设计 LCL 型滤波器的并网逆变器控制系统时,必须要解决谐振问题。文中提出采用电容电流和并网电流双闭环的控制策略,同时采用电网电压前馈控制,然后采用 TI2808DSP 作为主芯片自动生成算法代码。

1 电流双闭环控制策略

文中研究的单相全桥并网逆变器电路图,如图 1 所示。

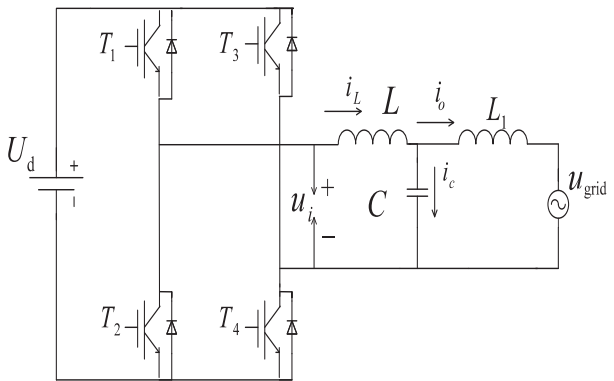


图 1 单相全桥并网逆变器电路图

文中提出采用电容电流和并网电流双闭环的控制策略,用电容电流内环以增加系统阻尼,以有效抑制谐振发生,用并网电流外环控制以实现对并网电流的直接控制,可保证满足要求的高的并网电流功率因素,同时采用电网电压的前馈控制,这样可大大减小电网电压变化对入网电流的干扰。

一般情况下,当开关频率远高于输出滤波器的截止频率时,逆变桥可等效为比例环节  $K_{pwm}$ 。这里,电容电流内环采用比例环节  $K$  调节,以增大阻尼消除 LCL 输出滤波器的振荡属性,增强系统的稳定性。并网电流外环则采用 PI 控制器。系统的结构框图如图 2 所示。

由图 2 可以得到并网电流  $i_o$  与 PI 控制器输出  $I(s)$  的传递函数,即电容电流内环的传递函数为:

$$\frac{i_o(s)}{I(s)} = \frac{KK_{pwm}L_1Cs}{LL_1Cs^2 + KK_{pwm}L_1Cs + L + L_1}$$

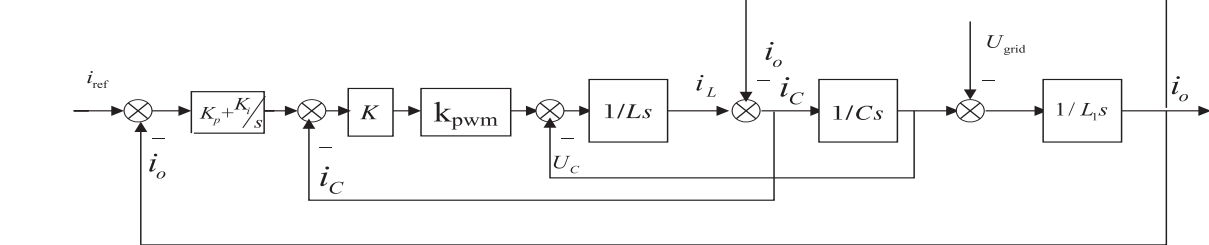


图 2 控制系统的结构图

由此,得出入网电流的开环传递函数特征方程阻尼系数为:

$$\xi = \frac{KK_{pwm}}{2} \sqrt{\frac{L_1C}{L(L + L_1)}}$$

在工程应用中,一般取  $\xi = 0.707$ 。而 PI 控制器的参数选取,可详细参考文献[12]。另外在前馈调节中,设定电网电压前馈函数为  $g(s) = 1/K_{pwm}$ 。

2 Matlab 仿真及算法代码生成

2.1 Simulink 仿真

为了验证理论分析的正确性,在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建模型进行仿真。仿真系统的参数设置如上介绍进行计算,最终参数设置为:

$U_d = 400 \text{ V}, P_{rated} = 3 \text{ kW}, U_g = 220 \text{ V}$ , 纹波系数  $k = 15\%$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}, f_0 = 50 \text{ Hz}$   
 $L = 3.5 \text{ mH}, L_1 = 0.3 \text{ mH}, C = 8 \text{ }\mu\text{F}, K_{pwm} = 400$ ,  
 $K = 0.264, K_i = 1250, K_p = 0.33$

搭建仿真模型如图 3 所示。

在该双闭环控制算法的仿真下,得出:空载时,THD 为 2.31%;半载时,THD 为 0.10%;满载时,THD 为 0.11%。显然都满足并网要求。此时开始搭建自动生成代码模型。在搭建时,需对模型进行离散化,并且需对电容电流和并网电流进行采样,便需搭建仿真采样电路。文中采用 TI 公司的 2808DSP 定点芯片,该芯片具有 100 MHz 的高速处理能力,32 位定点处理单元,最高有 16 路的 PWM 输出,12 位的 ADC 转换器,特别适用于逆变器控制中。为了提高精度,在该芯片中运行的数据要进行 IQ 数据处理。现搭建最接近生成代码模型的仿真模型,以检验采样电路和数据变换后的正确性。图 4 所示为仿真模型。

在满载,半载时进行仿真,得到的并网电流 THD 分别是 1.08% 和 2.29%,可见此时仿真效果依然可行,采样电路和数据变换后依然正确,满足要求。

2.2 搭建代码模型

在前面仿真分析可行的情况下,现可搭建最终代码模型图,如图 5 所示。

其中,主芯片为 TI2808DSP,ADC 采样模块输出采样值经过用户自定义函数变换后,即输出值减 2048,

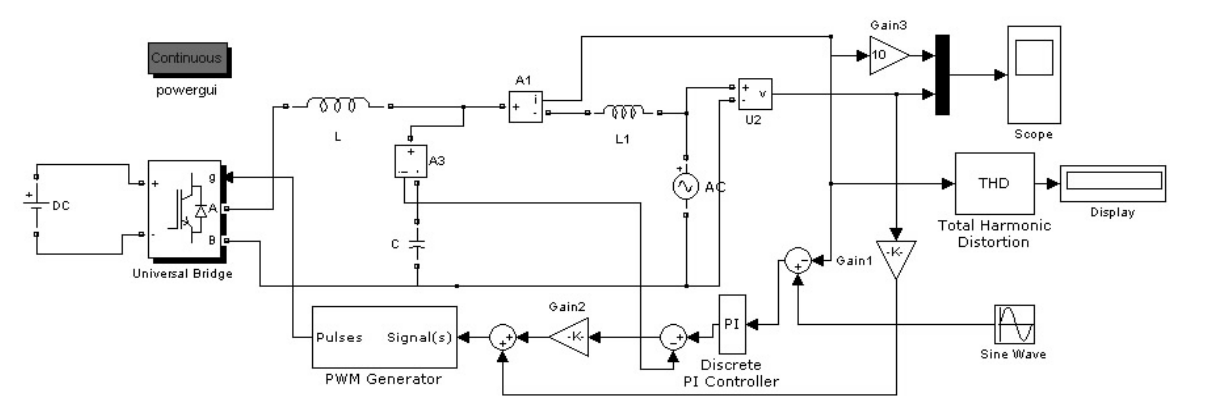


图3 逆变器仿真模型图

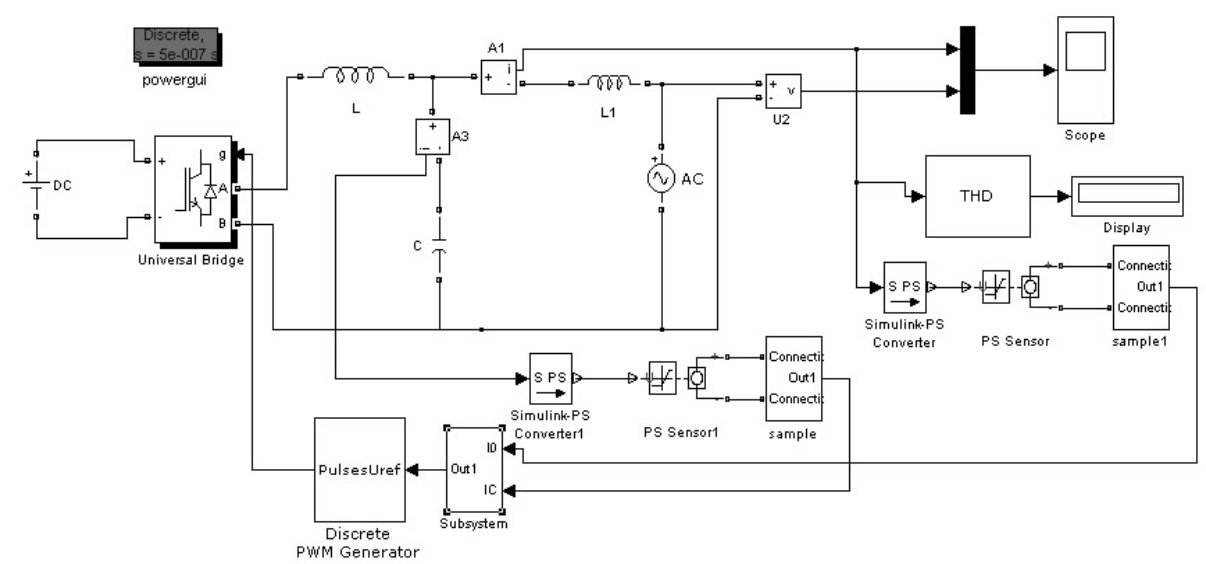


图4 添加采样电路和IQ数据变换后的算法仿真图

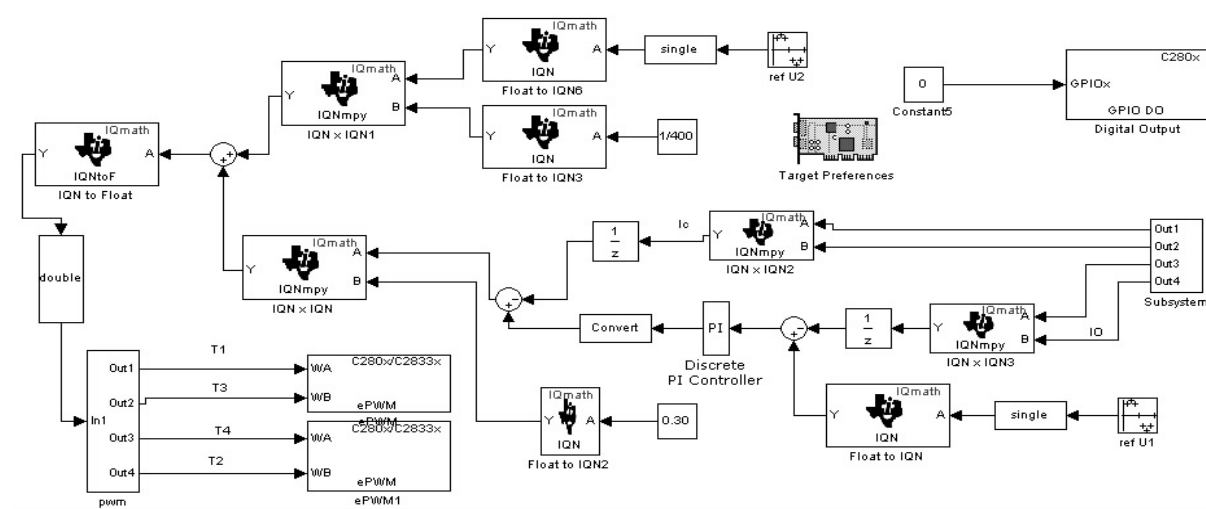


图5 算法代码生成模型图

则得到与采样电流值所对应的采样值。采用单级倍频SPWM控制,ePWM模块内部三角波是由内部定时计数器产生,设载波频率为 $f_c$ ,计数时钟频率为 $f_{cpu}$ ,定时计数器计数周期 $P$ 为: $P=f_{cpu}/f_c>0$ 。对于ePWM模块,由于 $f_c=16\text{ kHz}$ ,计数时钟频率 $f_{cpu}$ 取 $50\text{ MHz}$ ,则 $P=3\ 125$ ,比较寄存器选择外接,选择系统时钟周期单位模式,当计数器为零时,比较寄存器重载,运行ePWM1和ePWM2,模块计数模式为上下计数。对于第一个PWM输出,ePWM1的计数值等于比较器时,输出清0;小于比较值时,值为1,其他同理。同时,设置死

区时间为  $1\ \mu\text{s}$ , 即死区周期值为 50, 最后点击模型编译, 即可生成代码。

### 3 结束语

通过 3 kW 逆变器的设计和仿真验证, 双电流闭环控制算法在并网逆变器的应用中, 可以显著提高系统的稳定性, 有效地抑制谐振, 系统 also 具有良好的动态性能。在 Matlab/Simulink 仿真中, 利用 RTW 功能, 搭建最终代码模型, 自动生成代码, 不需要熟练掌握 DSP 复杂的寄存器, 不需要在手工编程上花费过多的时间和精力。实践表明, 采用代码自动生成技术准确度高, 开发周期短, 成本低。

### 参考文献:

- [1] 李真芳, 苏涛, 黄小宇, 等. DSP 程序开发—Matlab 调试及直接目标代码生成[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [2] 王先泽, 刘志勤, 陈怀民, 等. 基于 RTW ERT/VxWorks 的实时仿真方法实现[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(2): 208–211.
- [3] 乔海泉, 梁加红, 王奇霞. 基于 RTLinux 的 Matlab 实时仿真[J]. 计算机仿真, 2002, 19(6): 115–118.
- [4] 赵仁德, 赵强, 李芳, 等. LCL 滤波的并网变换器中阻

尼电阻影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 112–116.

- [5] 杨勇, 阮毅, 任志斌, 等. 直驱式风力发电系统中的并网逆变器[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 157–161.
- [6] 黄宇淇, 姜新建, 邱阿瑞. LCL 滤波器在三相 PWM 整流器中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 110–113.
- [7] 李芬, 邹旭东, 吴振兴, 等. 采用 LCL 滤波器并网的交流电子负载[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2522–2527.
- [8] Lindgren M, Svensson J. Control of a voltage-source converter connected to the grid through an LCL-filter; application to active filtering[C]//Proc. of IEEE PESC. Fukuoda, Japan: [s. n.], 1998.
- [9] Tirumala R, Mohan N, Henze C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility – interactive and stand-alone modes[C]//Proc. of IEEE APEC. Dallas, USA: [s. n.], 2002.
- [10] 梁超辉, 刘邦银, 段善旭. 基于滤波电容电流补偿的并网逆变器控制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(8): 13–15.
- [11] Liu F, Zhou Y, Duan S, et al. Parameter design of a two current-loop controller used in a grid-connected inverter system with LCL filter[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2009, 56(11): 4483–4491.
- [12] 徐志英. 并网逆变器电流控制技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

(上接第 142 页)

- national Conference on Computer Communications. Shanghai: [s. n.], 2011: 326–330.
- [5] Castelluccia C, Mykletun E, Tsudik G. Efficient aggregation of encrypted data in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services. San Diego: [s. n.], 2005: 109–117.
- [6] He W B, Liu X, Nguyen H, et al. PDA: privacy-preserving data aggregation in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage: [s. n.], 2007: 2045–2053.
- [7] 杨庚, 王安琪, 陈正宇, 等. 一种低能耗的数据融合隐私保护算法[J]. 计算机学报, 2011, 34(5): 792–800.
- [8] Bista R, Kim D, Chang J. A New Private Data Aggregation Scheme for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 2010 IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology. Bradford: [s. n.], 2010: 273–280.
- [9] Emiliano D C. A Secure and Privacy-Protecting Aggregation Scheme for Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Espoo: [s. n.], 2007: 1–5.
- [10] Feng T M, Wang C, Zhang W S, et al. Confidentiality Protec-

tion for Distributed Sensor Data Aggregation[C]//Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications. Phoenix: [s. n.], 2008: 56–60.

- [11] Groat M, He W B, Forrest S. K-Indistinguishable Privacy-preserving Data Aggregation in Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai: [s. n.], 2011: 2024–2032.
- [12] Wang C, Wang G L, Zhang W S, et al. Reconciling Privacy Preservation and Intrusion Detection in Sensory Data Aggregation[C]//Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Shanghai: [s. n.], 2011: 336–340.
- [13] Madden S, Franklin M J, Hellerstein J M. TAG: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. New York: [s. n.], 2002: 131–146.
- [14] Levis P, Lee N, Welsh M, et al. TOSSIM: accurate and scalable simulation of entire TinyOS applications[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles: [s. n.], 2003: 126–137.

# 并网逆变器双电流环控制算法的代码自动生成

作者：[王跃龙](#)，[王武](#)，[蔡逢煌](#)，[WANG Yue-long](#)，[WANG Wu](#)，[CAI Feng-huang](#)

作者单位：[福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州, 350108](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：

Computer Technology and Development

ISTIC

年，卷(期)：

2013(9)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201309036.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201309036.aspx)