

基于 RTW 的单相半桥逆变器 SPWM 控制算法实现

Realization of the SPWM Algorithm for Single-phase Half-bridge Inverter Based on RTW

杨贵恒¹, 文武松¹, 张颖超¹, 王璐², 强生泽¹

1. 重庆通信学院电力工程系 (重庆, 400035);

2. 重庆第二师范学院数学与信息工程系 (重庆, 400067)

Yang Guiheng¹, Wen Wusong¹, Zhang Yingchao¹, Wang Lu², Qiang Shengze¹

1. Department of Electrical Engineering, Chongqing Communication Institute (Chongqing, 400035, China)

2. Department of Mathematics and Information Engineering, Chongqing University of Education (Chongqing, 400067, China)

摘要: 本文以单相半桥逆变器 SPWM 控制算法的实现为例, 提出了一种基于 Matlab/Simulink 及实时代码生成工具 (Real-time Workshop/RTW) 的电力电子与电力传动控制系统软件设计方法。介绍了仿真和目标代码模型生成的流程和关键问题, 并通过仿真与实验证明: 该方法实现了仿真与实验的无缝集成, 摒弃了繁琐的传统手工代码编写过程, 降低了开发成本, 自动化程度高, 可大大提高科研或产品开发的效率。

关键词: 实时代码生成工具 SPWM 算法 单相半桥逆变器 Matlab/Simulink 数字信号处理器

Abstract: With the example of the realization of the SPWM algorithm for single-phase half-bridge Inverter, a convenient simulation and experimental method of the control strategy for power electronics and electric drives system based on Matlab/Simulink and real-time workshop (RTW) is proposed. The flow and key points for the establishment of the model are detailedly introduced. Experiment results show that, with the proposed design method, experiments are integrated with simulations through the same model, which leads to higher efficiency of research, design, and development for the new products.

Key words: Real-time workshop (RTW), SPWM Algorithm, Single-phase half-bridge inverter, Matlab/Simulink, Digital signal processor (DSP)

[中图分类号] TM464 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 04-0021-05

0 引言

在电力电子与电力传动领域, 基于数字信号处理器 (DSP) 的控制系统设计常采用如下步骤实现: 在确定方案后通常先通过一定的仿真软件 (Simulink、Psim——Power Simulation 等) 建模仿真, 验证和完善控制策略; 而后, 再根据仿真模型在相应的硬件平台上进行软件设计、调试及改进控制软件。这种开发模式有以下几个缺点: ①设计者既要掌握控制算法的软件实现, 又要对 DSP 的内部资源模块的工作原理和编程规范了如指掌, 手工编写代码过程比较繁琐; ②若需要进行

系统升级, 则需做大量繁复的工作, 耗时耗力; ③人工编写代码的正确性和合理性难以完全保证, 使实验装置或产品的可靠性降低; ④实验过程中, 不便于对新算法、新思路进行快速验证; ⑤仿真和实验没有实现无缝集成, 难以完成仿真到实验的平滑过渡。针对这一问题, 目前 MathWorks 公司的 Matlab/Simulink 软件提供了功能齐全的嵌入式系统目标模块 Embedded Target for TI C2000 DSP。利用该模块, 与 TI 公司 DSP 芯片的开发工具 Code Composer Studio (CCS) 联动, 可直接完成 Simulink 图形化模型的搭建和完善、控制算法的验

证、直至准确高效的 TI C2000 系列 DSP 的代码生成。显而易见，自动生成的代码来自标准库，与传统手工编写方式相比，其规范性和可靠性都有保证，效率高^[1]。

本文以单相半桥逆变器的 SPWM 控制算法设计为例，对控制系统的仿真、目标代码模型生成的流程和关键问题进行了研究。

1 主电路拓扑和 SPWM 算法原理

单相半桥逆变电路拓扑，如图 1 所示。当上管导通时，逆变桥输出电压为 U_d ；当下管导通时，逆变桥输出电压为 $-U_d$ 。

根据冲量(面积)相等原理，可采用正弦脉宽调制 (SPWM) 波形来代替正弦交流信号，如图 2 所示。若控制半桥逆变器输出脉宽按正弦规律变化的 SPWM 波形电压，再经过 LC 滤波器将高频信号滤掉后，即可得到标准的正弦交流电压。这种控制方式称为双极性 SPWM 调制。

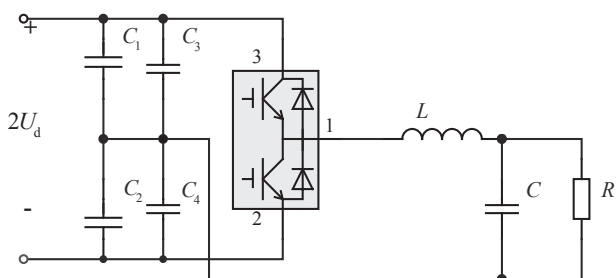


图 1 单相半桥逆变电路拓扑

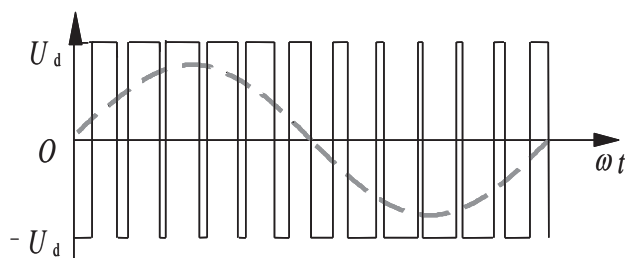


图 2 正弦交流电压等效波形 -SPWM

采用 DSP 输出两路互补的 SPWM 脉冲，分别作为半桥逆变器上、下桥臂功率开关管的驱动信号（上桥臂驱动信号形状如图 2 所示，只是脉冲幅值不一样）。根据半桥逆变器的工作原理可知，逆变桥输出电压波形即为如图 2 所示的 SPWM 波形。因此，关键问题是如何计算驱动脉冲的宽度。

通常采用规则采样法进行计算，采样原理如图 3 所示。逆变器输出的电压为： $U_r = U_m \sin(\omega_r t)$ ，这里称为调制波；载波（即图中三角波）幅值为： $U_{cm} = U_d$ ，周期为 T_c 。由图中三角形相似规律可得：

$$\frac{1 + m \sin \omega_r t_D}{\delta/2} = \frac{2}{T_c/2} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{T_c}{2} (1 + m \sin \omega_r t_D) \quad (2)$$

$$\delta' = \frac{1}{2} (T_c - \delta) = \frac{T_c}{4} (1 - m \sin \omega_r t_D) \quad (3)$$

其中： $m = \frac{U_{rm}}{U_{cm}} = \frac{U_{rm}}{U_d}$ ， $0 \leq m \leq 1$ ，称为调制比。

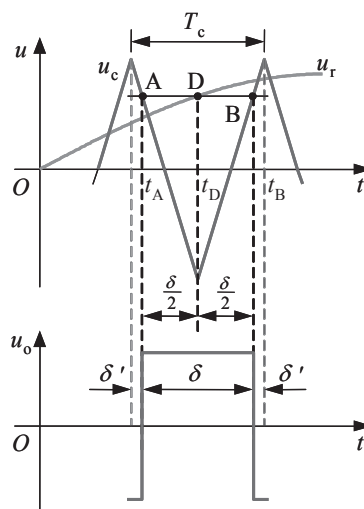


图 3 SPWM 规则采样法

因此，以 T_c 作为功率管的开关周期，通过 DSP 输出如图 3 所示的脉冲信号驱动功率管工作即可。每个开关周期的脉冲宽度为 δ ，仅与调制比、角频率 ω_r 和时刻 t_D 有关。若将逆变器输出的正弦交流电压作为给定值（假定角频率 ω_r 一定），检测逆变器的实时输出电压、电流值，构成闭环控制系统，闭环控制系统输出调制比，再根据式 (2) 计算出 δ ，使 DSP 输出相应的脉冲信号驱动功率管工作，则可实现整个逆变过程。

2 基于 Simulink/RTW 的控制系统软件设计

2.1 Simulink/RTW 简介

Simulink/RTW 是 Matlab 提供给 Simulink 用户的一个功能强大的实时代码生成工具，较新版本 Matlab 的 RTW 支持多种以单片机和 DSP 为核心的目标开发环境，其中由 MathWorks 和 TI 公司共同开发的 Embedded Target for the TI TMS320C2000 工具包，提供了 TMS320C2000 系列 DSP 的各种外设功能模块和常用算法模块；此外，Matlab Link for CCS Development Tools 工具包，实现了 Matlab 和 DSP 集成开发环境 Code Composer Studio (CCS) 及目标 DSP 的实时连接。利用这些工具，不仅可以完成基于 Simulink 的控制算法的模型搭建、仿真验证以及修改完善，而且还可以利用 RTW 和 CCS 工具将模型自动生成相应 DSP 的 C 代码并编译、下载到目标 DSP 中直接运行^[2]。

2.2 设计流程

在确定好设计方案和控制算法后，利用 Simulink/RTW 完成单相半桥逆变器 SPWM 控制算法仿真和软件设计的流程如下。

(1) 在 Simulink 中利用各种模块或函数搭建系统模型，对控制策略进行仿真验证，设计控制器参数，并对控制策略做出可能需要的改进完善等，直至仿真结果达到设计目标。该步实现方法与传统的控制算法的软件仿真验证类似。

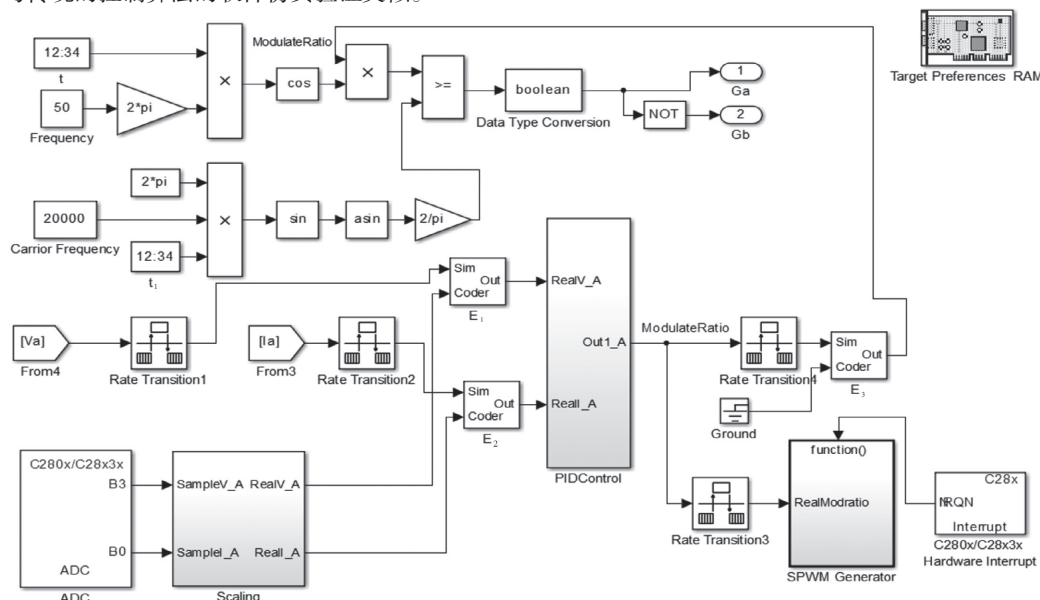


图 4 系统模型

(2) 根据控制策略要求和相应的硬件环境，添加和配置相应 DSP 外设模块到模型。

如图 4 所示，对于本文所针对的控制对象和采用的控制策略，需要添加 Target Preferences RAM、ADC、PWM、Interrupt 等模块，并要根据控制参数设置各个模块和目标 DSP 参数，包括采样时间、ADC 模块通道及转换方式选择，以及 PWM 频率、死区时间、中断类型等。本例中，ADC 模块使用了两路通道，分别采集逆变器输出电压和电感电流；开启了 PWM 中断系统（Hardware Interrupt 模块），在中断服务程序模块“SPWM Generator”中有 PWM 产生模块。

(3) 添加仿真和代码生成信号通道选择模块 (Environment Controller)。该模块有两个输入：其一是仿真模式下控制策略中输入输出信号的通道，输入图形化仿真模型的电压、电流、转速等传感器信号；其二是适用于直接生成代码模式下控制策略中输入输出信号的通道，连接目标 DSP 的 ADC、PWM 等模块。该模块是控制策略仿真和实时代码生成一体化的接口，在仿真模式下，控制策略模块和主电路模型中的测量或驱动等模块连接；在生成代码模式下，控制策略的输入信号来自于 ADC 等模块，输出则连接到 PWM 产生模块等。

如图 4 所示， V_a 和 I_a 为从主电路（图 1）中采样到的逆变器输出电压和电感 L 的电流值，“PID Control”模块为用户自己搭建的 PID 闭环控制系统，通过将测量到的 V_a 与给定值（固定）进行比较计算，输出调制比“ModulateRatio”，再根据第 1 节介绍的 SPWM 控制算法，由调制比“ModulateRatio”构建调制信号，将调制信号和载波信号进行比较，从而得到两路互补脉冲信号“ G_a ”和“ G_b ”分别驱动主电路中的上管和下管。

(4) 在直接生成代码模式通道中，根据具体硬件电路完善相关计算控制部分。如图 4 所示，对 ADC 模块的输出要加入参数标定环节“Scaling”，用于将 ADC 模块采样到的数字量转换成实际电压、电流值；在 PWM 中断服务程序中，根据“PIDControl”模块计算出的调制比“ModulateRatio”和式 (2)、式 (3) 计算出脉冲宽度 δ 和 δ' ，并根据 DSP 中 PWM 模块的工作原理，转换成相应的计数值填入 PWM 模块中，使其输出对应的脉冲信号。

(5) 再次，进行仿真验证，确保仿真模型的正确性，此后，直接连接目标板并生成代码调试。根据调试和运行结果进行可能需要的硬件或仿真模型的修改，直至达到设计目标^[3]。

从上面的设计流程中可以看出，虽然采用了仿真和代码生成两种模式，但系统的控制算法是共用的（图 4 中“PIDControl”模块）。仿真通道实现了对控制算法的快速验证，而代码生成通道实现了目标代码的自动生成。

2.3 关键问题

为保证仿真和实验结果的一致性，提高自动生成代码的效率，在利用 Simulink/RTW 仿真和生成代码的过程中，有以下几点需要注意。

(1) 采样频率设置

不同模块采样频率需要根据实际情况合理设置；此外，控制系统内环和外环的不同执行频率、实际程序运行过程中的采样延迟、保持器相移、通信延迟等仿真过程中不存在的问题，这都是在搭建模型过程中需要考虑的。对于采样频率不同的模块，加入“Rate Transition”模块进行连接。

(2) 仿真步长设置

对于仿真通道，由于设计到主电路的仿真，若仿真步长过小，则与实际运行情况相差较大；而对于代码生成通道，模型的仿真步长决定了自动生成代码的核心程序执行周期，仿真步长过小可能会导致实际运行时 CPU 过载。因此，需要正确判断实际程序运行时间，根据该时间合理设置仿真步长。

(3) 控制系统应采用离散数字系统设计，便于硬件实现^[4]。

3 仿真与实验结果

按照上述方法，对单相半桥逆变器 SPWM 控制算法进行了仿真和实验。假设逆变器输出电压为： $U_0 = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$ ，其中： $U=220V$ ， $\omega=2\pi \cdot 50\text{rad/s}$ ，开关频率（即载波频率）为： $f_c=20\text{kHz}$ 。系统硬件平台采用 16 位浮点型 DSP TMS320F28335 作为控制器，工作频率 150MHz。对系统进行了 1000W(阻性负载)突加载和突减载仿真和实验，结果如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

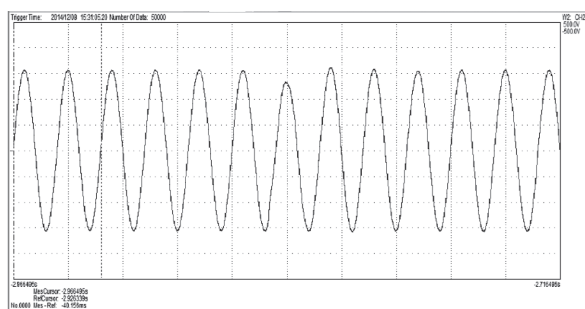


图 5 空载到突加 1kW 阻性负载实验波形

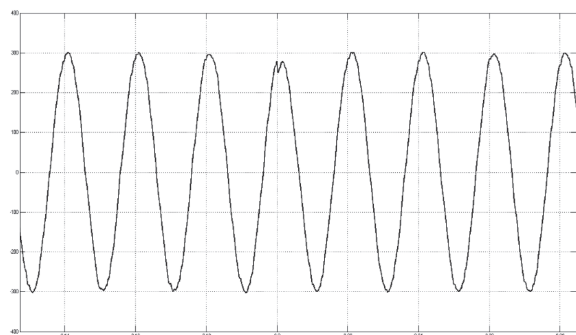


图 6 空载到突加 1kW 阻性负载仿真波形

从上述仿真和实验结果的对比可以看出，该系统的仿真结果与实验结果基本一致。显而易见，按照本文所提出的方法，

能够方便地实现从仿真到实验的直接过渡。

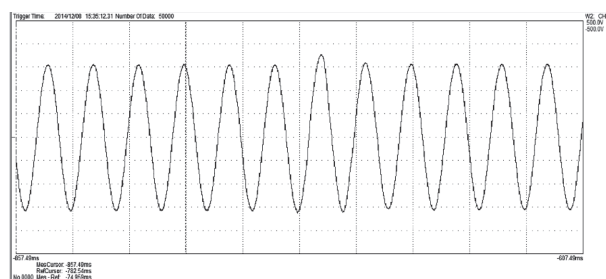


图 7 突减 1kW 阻性负载到空载实验波形

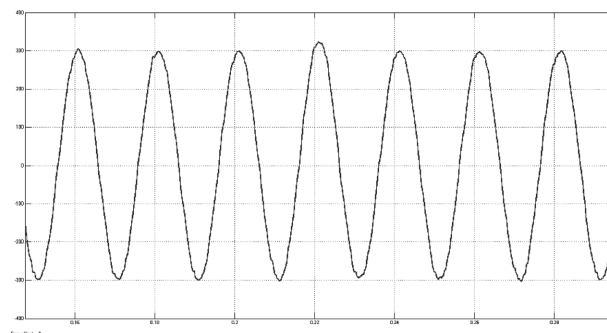


图 8 突减 1kW 阻性负载到空载仿真波形

4 结束语

本文针对电力电子与传动控制系统提出了基于 Matlab/Simulink 的仿真和实验设计方法。首先，在 Simulink 下搭建控制系统仿真模型，通过仿真验证控制算法；再根据目标 DSP 型号添加相应的 DSP 模型，并设置控制参数，然后通过 Matlab 的 RTW 调用 DSP 集成开发环境 CCS，直接将模型转化为相应 DSP 的 C 源代码，并下载到目标 DSP 中；之后，在相应的硬件平台支持下即可完成相关实验。仿真和实验结果表明：该方法避免了手工编写代码的繁杂过程，实现了仿真和实验的无缝连接，在提高效率的同时降低了代码编写的错误率^[5]。

参考文献

- [1] 刘杰. 基于模型的设计及其嵌入式实现 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [2] 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.
- [3] 孔繁峨, 陈宗基. 基于 RTW 和 VxWorks 的飞行控制系统实时仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2455-2457.
- [4] 胡文华, 韦宝泉. 基于 Matlab/RTW 的单相桥式逆变器 SPWM 目标代码自动生成研究 [J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(4): 87-90.

(下转第 32 页)