

基于 SIMPLORER 的电源电路仿真

李傲梅, 傅 鹏

(中国科学院等离子体物理研究所二室, 合肥 230031)



摘 要: 基于 ANSOFT 公司的仿真软件 SIMPLORER, 提出一种电源仿真方法。即通过 SIMPLORER 与 C 语言的接口, 以三相电压型 SPWM 变流器的建模为例, 介绍了用 C 语言进行模型仿真的基本步骤、模型矩阵方程的创建以及针对给出的模型矩阵方程实现 SIMPLORER 仿真。该方法与其他仿真软件相比较, 可以利用 C++ 的强大语言功能以及全面的图形函数库, 进行用户自定义模型的仿真。

关键词: SIMPLORER; C++; 仿真; 模型; 变流器; 矩阵方程

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 04-0745-04

Power Circuit Emulation Based on SIMPLORER

LI Ao-mei, FU Peng

(Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to meet the demand of emulation, an interface was presented in the SIMPLORER, a simulation software belonging to the ANSOFT corporation. To take the model of three-phase voltage type SPWM converter as an example, the basic step and the foundation of the matrix equation for the model with SIMPLORER to realize model simulation was carried on. Moreover, the method to simulate with C++ was introduced. Compared with other simulation method, the interface allows to program arbitrary nonlinear algebraic and ordinary differential equations to be solved by the SIMPLORER simulator.

Key words: SIMPLORER; C++; emulation; model; converter; matrix equation

引 言

SIMPLORER 是由 ANSOFT 公司推出的具有强大的多领域复杂系统仿真软件包, 包含机电元件、电子线路、控制算法在内的系统仿真和多种仿真算法, 可对机电驱动系统和电力电子系统进行仿真分析。SIMPLORER 不像常规仿真软件只局限于某一技术领域问题, 例如电路或控制器, 它提供的是一个多工程领域的一体化仿真解决方案。该解决方案将多个精密设计、不同技术领域的仿真器集成于一体, 包括电子线路、框图、高性能电机模型和数字及离散系统仿真等, 完全消除了其他仿真工具中不可避免的在不同物理领域之间进行复杂数学转换的繁琐过程, 不同工程领域问题可以直接选择最适宜的建模语言进行建模和仿真。另外由于该软件提供了 C/C++ 编程接口提供了方便的用户自定义模型功能, 所以 SIMPLORER 越来越受到重视。

电源的计算机仿真和系统的仿真一样必须建立仿真程序, 而仿真程序离不开仿真方法。仿真程序分为通用仿真程序和专用仿真程序。通用仿真程序在电路(或系统)录入、仿真分析、波形处理等许多方面功能齐备, 使用方便, 但可能存在仿真速度慢和缺乏某些专门的器件模型等缺陷。由于 C 语言具有灵活、高效、可移植性好等诸多优点, 已成为软件开发中最常用的计算机编程语言, 利用 C 语言提供的功能全

面的图形函数库, 可以方便的实现波形模拟。也由于 SIMPLORER 软件给出的 C/C++ 编程接口具有方便的用户自定义模型功能, 所以本文介绍的为用 C++ 实现电源电路仿真的一种方法。

用 C 语言来进行模型仿真设计, 应按图 1 所示的 3 个基本步骤实施^[1]:

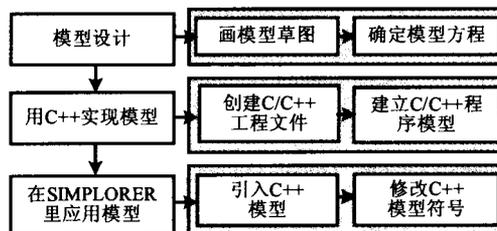


图 1 用 C 建模的一般步骤

上图说明用 C 模型进行仿真设计的过程为:

- (1) 定义所要实现的 C 模型草图
- (2) 确定模型方程
- (3) 创建 C/C++ 工程文件
- (4) 用 C/C++ 代码对模型进行编程
- (5) 创建动态的连接库 (*.dll 模型文件)
- (6) 在 SIMPLORER 里引入 C 模型
- (7) 修改 C 模型符号
- (8) 用用户设计的 C 模型来实现仿真

下面以三相电压型变流器系统的建模分析为例, 对建模的过程以及分析方法进行研究。由于三相电压型 SPWM 变流器的电路模型为时变、非线性的高阶模型, 建立数学模型是

收稿日期: 2005-12-02 修回日期: 2006-02-14

基金项目: 国家“九五”大科学工程项目(1998)1303)

作者简介: 李傲梅(1972-), 女, 安徽五河人, 博士生, 研究方向为自动化技术; 傅鹏(1962-), 男, 湖北英山人, 研究员, 博导。

分析和设计三相电压型SPWM变流器电路的基础。本文从功率平衡和矢量图的角度出发,首先得到了三相电压型变流器系统静态数学模型。在该模型的基础上给出了基于SIMPLORER仿真软件的C++建模的一般方法,完成软件设计。

1 三相电压型 SPWM 变流器模型建立

三相电压型 SPWM 变流器的拓扑结构^[2]如图 2 所示:

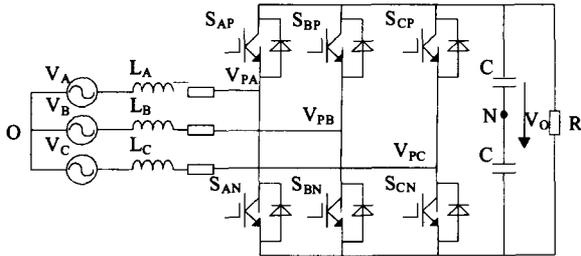


图 2 三相电压型 SPWM 变流器的拓扑结构

此即为所要实现的 C 模型草图。下面是针对这一模型的模型方程的推导过程。

设 $L_a=L_b=L_c=L$, $R_a=R_b=R_c=r$ 。

设电网电压为:

$$\begin{cases} V_a = V_m \cos \omega t \\ V_b = V_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_c = V_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_m 为电网相电压幅值, ω 电网角频率

则整流器输入电流基波为:

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega t - \varphi) \\ i_b = I_m \cos(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) \\ i_c = I_m \cos(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_m 为每相输入电流幅值, φ 为电流滞后电压的角度

由图 1 可得电路方程:

$$\begin{cases} Li_a = -ri_a - V_{PA} + V_a \\ Li_b = -ri_b - V_{PB} + V_b \\ Li_c = -ri_c - V_{PC} + V_c \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} V_{PA} = S_a V_o + V_{NO} \\ V_{PB} = S_b V_o + V_{NO} \\ V_{PC} = S_c V_o + V_{NO} \end{cases} \quad (4)$$

其中 V_{PA} , V_{PB} , V_{PC} — 整流器各相输入端对电源中性点 O 的电压; V_{NO} — 整流器输出负极性端 N 对电源中性点 O 的电压; V_o — 输出电压, 其值与电容电压相等; L — 输入侧等效电感; r — 输入侧等效电阻。

由于电源的对称性, 由式(4)可得:

$$V_{NO} = -\frac{S_a + S_b + S_c}{3} V_o \quad (5)$$

又由负载电流方程有:

$$CV_o = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - V_o / R \quad (6)$$

如果忽略与开关频率相关的高次谐波, 只考虑开关函数在一个周期的平均值, 即用占空比 d_a , d_b , d_c 代替 S_a , S_b , S_c , 则由式(3)~(6)可得 abc 坐标系下三相电压型 PWM 整流器的低频模型如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{v}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L}(d_a - \frac{d_a+d_b+d_c}{3}) \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & \frac{1}{L}(d_b - \frac{d_a+d_b+d_c}{3}) \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} & \frac{1}{L}(d_c - \frac{d_a+d_b+d_c}{3}) \\ \frac{d_a}{C} & \frac{d_b}{C} & \frac{d_c}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ v_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

在变换器的 PWM 调制中, 设三相调制波为:

$$\begin{cases} m_a = M_o \cos(\omega t - \delta) \\ m_b = M_o \cos(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ m_c = M_o \cos(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \end{cases} \quad (8)$$

式中 δ 为 V_i 与 V_{pi} 之间的夹角(其中 $i=a, b, c$), $0 \leq M_o \leq 1$ 根据占空比与调制波的关系^[3]有:

$$d_i = \frac{m_i}{2} + \frac{1}{2} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得:

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{v}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 & \frac{m_a}{2L} \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & \frac{m_b}{2L} \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} & \frac{m_c}{2L} \\ \frac{d_a}{C} & \frac{d_b}{C} & \frac{d_c}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ v_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可见, 三相电压型 PWM 整流器在三相静止坐标系下的低频模型为一个线性时变的解耦系统。三相整流器输入端电压与调制电压、输出电压之间还存在如下关系^[4]:

$$\begin{cases} V_{PA} = \frac{m_a}{2} V_o \\ V_{PB} = \frac{m_b}{2} V_o \\ V_{PC} = \frac{m_c}{2} V_o \end{cases} \quad (11)$$

式(11)代入式(3)可得整流器的交流侧低频方程为:

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} - \frac{V_o}{2} \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可见, 在三相电源稳定及主电路参数恒定时, 整流器三相输入电流受调制比 m_a 、 m_b 、 m_c 的控制。三相电压型 SPWM 变流器的实质是采用一定的控制策略来调节 m_a 、 m_b 、 m_c , 以使输入电流波形跟踪输入电压波形。

2 应用 C++ 软件建立仿真模型^[5]

为确保可以用 SIMPLORER 建立仿真, 在所要建立的模型源文件的头文件中必须遵循如下原则。

首先在所编辑的程序段中必须包含特定的头文件, 这么做的目的是为模型和仿真之间的数据交换建立标准的数据类型。如:

```
#include "SIMPLORERafx.h"
#include "SIM2000User.h"
#include "COMplex.h"
```

在这些数据类型中最重要类型为 C++ 工程类型——CmodUser, 该基本模型工程类型这是用来存储所有的模型信息的, 诸如: 引脚、参数、输出、方程等信息。

其次是为模型定义一个名称。方式如下:

```
#include STRG-MODELNAME"ThPhConverter"
```

第三步就是定义准备函数。在这一步, 准备函数和这个模型的基本输入、输出端必须被定义, 这里还应包含所有的电路中的相交点和某些输入或输出的开放节点, 不同的节点的功能定义经由专业方法由 CModUser 对象提供。对于前面分析的三相电压型 SPWM 变流器模型, 在程序中需要如下的准备函数:

```
FCTDECL PRREP-FCN ( CmodUser *pMod)
{
// Parameters (conservative nodes)
// Parameters (non-conservative nodes)
// Parameter Units
// Parameter Info
//Outputs
//Output Units
//Output Info
}
```

第四步就是要为仿真模型定义初始值、模型参数、有效值、关断条件, 这类函数和前面的准备函数一起称为 PISVC 函数。PISVC 函数与 SIMPLORER 仿真间的关系如图 3 所示。

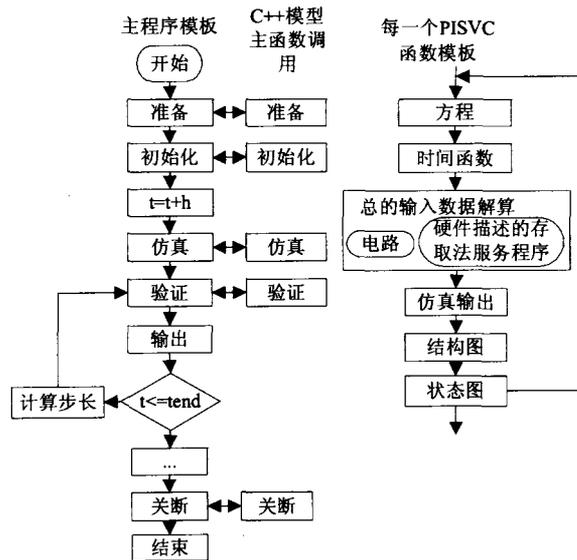


图 3 PISVC 函数与 SIMPLORER 仿真的流程关系图

第五步为采用 RegisterUserModel 登记模型的登记号以及登记模型的类型。格式如下:

```
FCTDECL RegisterUserModel (long lindex, CUModDecl *pUModDecl)
```

综上所述, 采用如上方法对三相电压型 SPWM 变流器模型进行仿真时, 当电路参数设置如下: 电源相电压幅值为 57V, $f=50\text{Hz}$, $L=5\text{mH}$, $r=0.1\Omega$, $C=500\mu\text{F}$, 可得到如下的输出电压波形。图 4、5 对应于分别改变 δ 、 R 时的输出电压波形图。

$R=20\Omega$, $m=0.8$ 时, $\delta=10^\circ$ 时仿真的波形结果如图 4 所示:

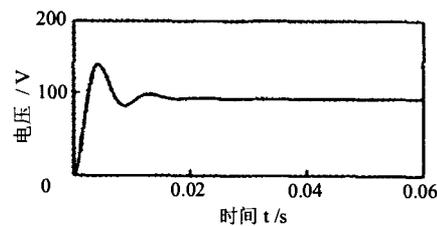


图 4 $R=20\Omega$, $m=0.8$ 时, $\delta=10^\circ$ 时输出波形

$R=15\Omega$, $m=0.8$ 时, $\delta=20^\circ$ 时仿真的波形结果如图 5 所示:

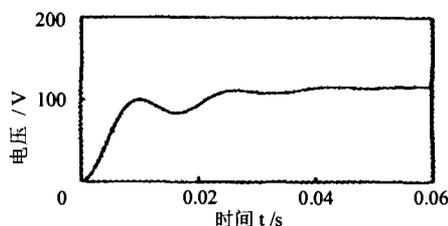


图 5 $R=15\Omega$, $m=0.8$ 时, $\delta=20^\circ$ 时输出波形

由图4、图5的输出电压波形图可以看出,用仿真软件 SIMPLORER对三相电压型变流器电路进行仿真,由于使用的是软件开发中最常用的计算机编程语言——C语言,所以方法相对简单,且结果与文献^[2]中采用SIMULINK建立的仿真模型结果相一致,由此说明采用此种方法建立仿真模型的可行性。

3 结论

本文提出了一种针对电力电子电路中变流器进行仿真分析的方法,该方法和其他软件的电源仿真相比,由于SIMPLORER软件提供了和C++语言的仿真设计接口即C-interface,这样便可以利用C++语言的强大语言功能以及全面的图形函数库,对给出模型的矩阵方程进行C++编程模拟。本文构造的三相电压型SPWM变流器的仿真模型以及编程都很简单,易于使用,仿真系统采用模块化设计,很容易进行扩展和模块封装,在实践中可以有效地指导研究者寻求

(上接第712页)

(2) 离线仿真时直流母线电压的峰谷值与转鼓实验的数据基本对应,但峰值大于转鼓实验的对应值,说明蓄电池充电时内阻特性表现出较大不同。

(3) DC/DC输出电流的动态跟随速度在较大电流时要快于小电流情况,原因是燃料电池冷热态时特性不同。

(4) 主要部件电流满足DC/DC跟随电机电流低频成分,蓄电池跟随电机电流高频成分且吸收电机回馈能量的关系;实验前后稳态母线电压值不变说明蓄电池实验前后的总能量基本保持不变,证明所设计的动力控制算法满足既定的控制目标。

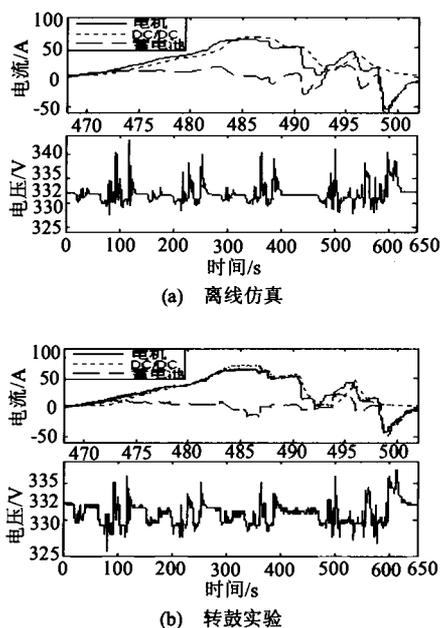


图5 一次J1015循环工况的各部件电流和母线电压变化历程

较好的电力电子仿真方法,具有实用价值。这样当给出了各种常用的电力电子器件的数学模型后,就可以按照自己设定的模型参数对电力电子线路进行灵活的计算机仿真。

参考文献:

- [1] Ansoft corporation. Simplorer V 6.0 User manual [Z]. Ansoft corporation, 2002.
- [2] 李建林, 王立乔, 熊宇, 等. 三相电压型变流器系统静态数学模型 [J]. 电工技术学报, 2004, 19 (7): 11-15.
- [3] Grech A W, Boys J T, Gates G F. 3-phase voltage sourced reversible rectifier [J]. IEE Proceeding, Pt. B (S0143-7038), 1988, 135(6): 362-370.
- [4] Diego R-veas, Juan W Dixon. A novel load current control method for a leading power factor voltage source PWM rectifier [J]. IEEE Trans on PE (S0885-8993), 1994, 9(2): 153-159.
- [5] 徐金梧, 杨德斌, 徐科. Turbo C 实用大全 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

4 结论

(1) 建立了燃料电池轿车动力系统的动态数学模型,为后续动力控制算法的设计提供了基础。

(2) 基于所建立的数学模型设计了实用的燃料电池汽车动力系统状态反馈控制算法,离线仿真和实车转鼓实验证明所设计的动力控制算法满足既定的控制目标,从而说明所建立的动力系统动态数学模型满足控制算法设计的需要。

参考文献:

- [1] Rahman Z, Ehsani M, K L Bulter. An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EV and HEV Propulsion Systems [R]. SAE, 2000.
- [2] Gao Y, Ehsani M. Systematic Design of Fuel Cell Powered Hybrid Vehicle Drive Train [C]// IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2001.
- [3] Lee Jaegul, Kim Chunho, M Zolot. Dynamic State Battery Modeling of Energy and Power as the State Variable for EV Application [R]. SAE, 1997.
- [4] 魏学哲. 燃料电池轿车锂离子动力蓄电池管理系统研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [5] 杨承志. 系统辨识与自适应控制 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003
- [6] 钟再敏, 魏学哲, 孙泽昌. 燃料电池汽车动力总成控制策略 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, (6): 758-761.
- [7] 何衍庆. 控制系统分析、设计和应用—Matlab 的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.