

## 基于 MATLAB/Simulink 的正弦稳态电路建模与仿真\*

丁 硕 张 放 巫庆辉

(渤海大学工学院 锦州 121013)

**摘 要:** 为了对于正弦稳态电路进行直观准确地分析,采用 M 语言和 Simulink 工具箱分别对一个典型正弦稳态电路建立了仿真模型,详细说明了电路系统的数学模型和电路系统仿真模型的建立过程,并在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真实现。仿真结果表明:用 M 语言和 Simulink 工具箱构建电路系统的仿真模型方法简单,2 种方法的仿真结果相同且与理论分析一致,均适合于中小规模的电路系统的仿真模型建立,但在对于较大规模的电路系统进行建模和仿真时,采用 Simulink 工具箱更具优势。

**关键词:** 正弦电路;稳态分析;建模;仿真;MATLAB; Simulink

**中图分类号:** TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Modeling and simulation of sinusoidal steady-state circuit based on MATLAB/Simulink

Ding Shuo Zhang Fang Wu Qinghui

(College of Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China)

**Abstract:** To accurately analyze the sinusoidal steady-state circuit, a simulation model of a typical sinusoidal steady-state circuit is established by using M language and Simulink toolbox in this paper. The establishment processes of a circuit system's mathematical model and simulation model are described and simulated in the environment of MATLAB/Simulink. The simulation results show that it is simple to establish a simulation model of a circuit system using M language and Simulink toolbox. The simulation results are the same and they correspond with the theoretical analysis. The two methods are applicable in the establishment of simulation models of middle and small scale circuit systems, but Simulink toolbox is more effective in the modeling and simulation of large scale circuit systems.

**Keywords:** sinusoidal circuit; steady-state analysis; modeling; simulation; MATLAB; Simulink

### 1 引 言

正弦稳态电路的分析计算是电路理论中较难理解的内容,尤其对于较为复杂电路系统分析时,需要建立较多的电路方程,手工求解过程过于烦琐,容易出错。用 MATLAB 语言求解电路方程的程序简洁,同时 Simulink 工具箱为用户提供了用方框图进行建模的图形接口,与传统的仿真软件用微分方程和差分方程进行建模相比更直观、方便、灵活<sup>[1-4]</sup>。文献[5]和文献[6]主要论述了如何在 MATLAB 环境下对正弦稳态电路进行建模,但未涉及含有受控源的电路建模,而文献[7]论述了含有受控源的正弦稳态电路建模,但未涉及正弦量的相量图如何绘制。以含有受控源的正弦稳态电路为例,利用 MATLAB 语言编程和 Simulink 工具箱对典型的正弦稳态电路进行建模、

仿真分析和计算。

### 2 基于 M 语言的正弦稳态电路建模与仿真

如图 1 所示电路, $u_s = 14.4\sin(314t + 60^\circ)V$ ,如  $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega, L = 0.01H, C = 0.01F$ 。试求各结点电压和网孔电流值并作出各变量的相量图和时域波形图。

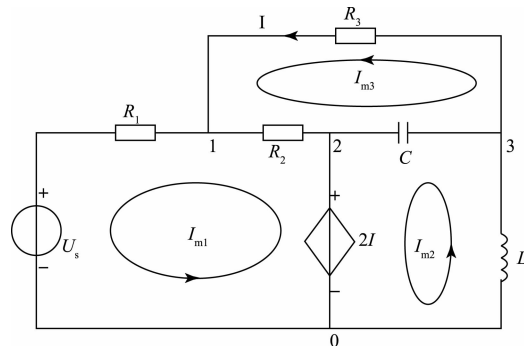


图 1 正弦稳态电路实例

收稿日期:2015-01

\* 基金项目:国家自然科学基金(61401044)资助项目

## 2.1 正弦稳态电路的数学模型

### 2.1.1 结点电压法求解结点电压

假设图1中结点1、2、3的结点电压相量分别为  $\dot{U}_{10}$ 、 $\dot{U}_{20}$ 、 $\dot{U}_{30}$ ；电源的电压相量为  $\dot{U}_S$ ； $Y_{11}$ 、 $Y_{22}$ 、 $Y_{33}$  为结点1、2、3的自导纳； $Y_{12}$ 、 $Y_{13}$ 、 $Y_{31}$ 、 $Y_{32}$  为不同结点之间的互导纳，建立结点电压方程如式(1)所示：

$$\begin{cases} Y_{11} \cdot \dot{U}_{10} + Y_{12} \cdot \dot{U}_{20} + Y_{13} \cdot \dot{U}_{30} = \dot{U}_S \\ \dot{U}_{20} = 2\dot{I} \\ Y_{31} \cdot \dot{U}_{10} + Y_{32} \cdot \dot{U}_{20} + Y_{33} \cdot \dot{U}_{30} = 0 \\ Y_{31} \cdot (\dot{U}_{30} - \dot{U}_{10}) = \dot{I} \end{cases} \quad (1)$$

代入自导纳和互导纳将式(1)最终整理为式(2)。于是，可得图1所示正弦稳态电路的各结点电压的数学模型如式(2)所示：

$$\begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 \\ 2 & 1 & -2 \\ -1 & -3.14 \cdot j & (1 + 3.14 \cdot j + \frac{1}{3.14 \cdot j}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{10} \\ \dot{U}_{20} \\ \dot{U}_{30} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

### 2.1.2 网孔电流法求解网孔电流

假设图1中结点1、2、3的网孔电流相量分别为  $\dot{I}_{m1}$ 、 $\dot{I}_{m2}$ 、 $\dot{I}_{m3}$ ； $Z_{11}$ 、 $Z_{22}$ 、 $Z_{33}$  为结点1、2、3的自阻抗； $Z_{12}$ 、 $Z_{13}$ 、 $Z_{21}$ 、 $Z_{23}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{32}$  为相邻网孔之间的互阻抗，建立网孔电流方程如式(3)所示：

$$\begin{cases} Z_{11} \cdot \dot{I}_{m1} + Z_{12} \cdot \dot{I}_{m2} + Z_{13} \cdot \dot{I}_{m3} = 2\dot{I} - \dot{U}_S \\ Z_{21} \cdot \dot{I}_{m1} + Z_{22} \cdot \dot{I}_{m2} + Z_{23} \cdot \dot{I}_{m3} = -2\dot{I} \\ Z_{31} \cdot \dot{I}_{m1} + Z_{32} \cdot \dot{I}_{m2} + Z_{33} \cdot \dot{I}_{m3} = 0 \\ \dot{I}_{m3} = \dot{I} \end{cases} \quad (3)$$

代入自导纳和互导纳将式(3)整理为式(4)：

$$\begin{cases} (R_1 + R_2) \cdot \dot{I}_{m1} - (2 + R_2) \cdot \dot{I}_{m3} = -\dot{U}_S \\ (j\omega L + \frac{1}{j\omega C}) \cdot \dot{I}_{m2} + (2 - \frac{1}{j\omega C}) \cdot \dot{I}_{m3} = 0 \\ -R_2 \cdot \dot{I}_{m1} - \frac{1}{j\omega C} \cdot \dot{I}_{m2} + (R_2 + R_3 + \frac{1}{j\omega C}) \cdot \dot{I}_{m3} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

代入数据，可得图1所示正弦稳态电路的网孔电流的数学模型如式(5)所示：

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 & -3 \\ 0 & (1 + 3.14 \cdot j + \frac{1}{3.14 \cdot j}) & (2 - \frac{1}{3.14 \cdot j}) \\ -1 & -\frac{1}{3.14 \cdot j} & (2 + \frac{1}{3.14 \cdot j}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{m1} \\ \dot{I}_{m2} \\ \dot{I}_{m3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\dot{U}_S \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

## 2.2 用 M 语言编程实现电路的分析和计算

### 2.2.1 求解结点电压程序代码

```
US=10*cos(pi/3)+10*j*sin(pi/3);
A=[3,-1,-1;2,1,-2;-1,-(3.14*j),
(1+3.14*j+1/(3.14*j))];% 结点导纳矩阵
B=[US;0;0];% 电流相量矩阵
U=A\B;% 结点电压相量矩阵
U1=U(1);
U2=U(2);
U3=U(3);
t=0:1e-4:0.05;
u1=sqrt(2)*abs(U1)*sin(314*t+angle(U1));
u2=sqrt(2)*abs(U2)*sin(314*t+angle(U2));
u3=sqrt(2)*abs(U3)*sin(314*t+angle(U3));
us=sqrt(2)*abs(US)*sin(314*t+angle(US));
plot(t,us,t,u1,t,u2,t,u3);% 绘制瞬时电压波形
运行程序，得到各结点电压相量：
U1=8.8415 -11.1578i
U2=8.4553 -20.6505i
U3=13.0691 -21.4831i
```

### 2.2.2 求解网孔电程序代码

```
US=10*cos(pi/3)+10*j*sin(pi/3);
A=[2,0,-3;0,3.14*j+1/(3.14*j),2-1/(3.14*j);
-1,-1/(3.14*j),2+1/(3.14*j)];% 网孔阻抗矩阵
B=[-US;0;0];% 网孔电压相量矩阵
I=A\B;% 网孔电流相量矩阵
compass(I)
Im1=I(1);
Im2=I(2);
Im3=I(3);
t=0:1e-4:0.05;
im1=sqrt(2)*abs(Im1)*sin(314*t+angle(Im1));
im2=sqrt(2)*abs(Im2)*sin(314*t+angle(Im2));
im3=sqrt(2)*abs(Im3)*sin(314*t+angle(Im3));
plot(t,im1,t,im2,t,im3);% 绘制瞬时网孔电流波形
运行程序，得到各网孔电流相量：
Im1=3.8415 -19.8180i
Im2=6.8417 + 4.1621i
Im3=4.2277 -10.3253i
```

## 2.3 相量图与波形图的绘制

在 2.2.1 的程序代码中，加入如下语句绘制各结点瞬时电压波形如图 2 所示。

```
plot(t,us,t,u1,t,u2,t,u3);
```

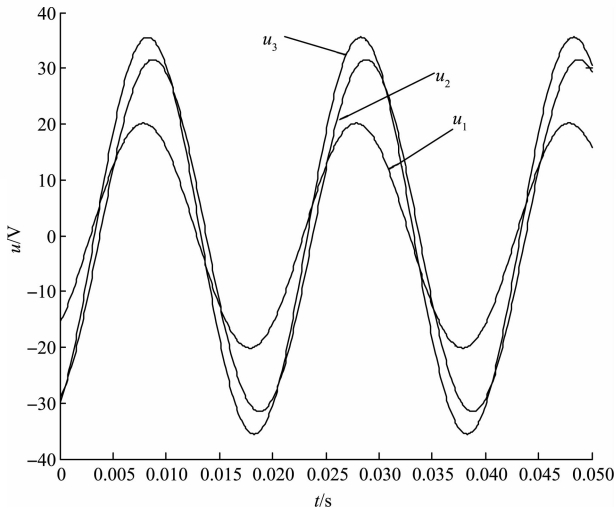


图2 M语言建模仿真得到的结点电压波形

在计算各结点电压相量表达式之后添加语句: compass(U);即可绘制结点电压相量  $\dot{U}_{10}$ 、 $\dot{U}_{20}$ 、 $\dot{U}_{30}$  的相量图如图3所示。仿真实验中,角频率  $\omega=314 \text{ rad/s}$ ,则工频  $f=50 \text{ Hz}$ ,周期  $T=0.02 \text{ s}$ ,仿真时间设为  $0.05 \text{ s}$ ,即两个半周期。所以,仿真结果显示了两个半周期的波形。由图2可以看出,结点1、2、3的电压瞬时值中, $u_3$  峰值最大、 $u_2$  居中、 $u_1$  最小,这与图3所示的结点电压相量图是一致的,因为峰值等于对应相量模值的 $\sqrt{2}$ 倍;由图3可以看出, $u_1$  初相最小、 $u_3$  初相居中、 $u_2$  初相最大,这说明  $u_1$  的相位超前于  $u_3$  和  $u_2$ , $u_3$  相位最为落后。

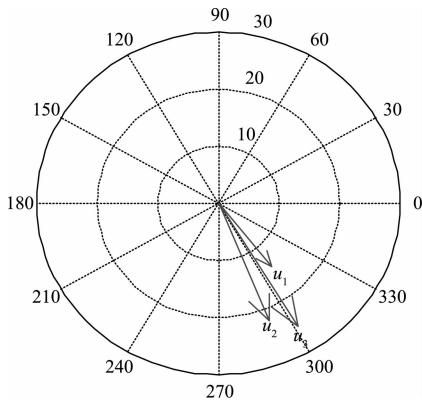


图3 结点电压相量

在2.2.2的程序代码中,加入如下语句绘制各网孔电流波形图如图4所示。

plot(t,im1,t,im2,t,im3);

在计算各网孔电流相量表达式之后添加语句: compass(I);即可绘制网孔电流相量  $\dot{I}_{m1}$ 、 $\dot{I}_{m2}$ 、 $\dot{I}_{m3}$  的相量图如图5所示。仿真时间设为  $0.05 \text{ s}$ ,即2个半周期。所以,仿真结果显示了2个半周期的波形。由图4可以看出,3个网孔电流瞬时值中, $i_{m1}$  峰值最大、 $i_{m3}$  居中、 $i_{m2}$  最小,这与

图5所示的网孔电流相量图是一致的,因为峰值等于对应相量模值的 $\sqrt{2}$ 倍;由图5可以看出3个网孔电流的相位关系, $i_{m2}$  初相为正值、 $i_{m1}$  和  $i_{m3}$  的初相为负值,且  $i_{m3}$  的初相小于  $i_{m1}$ ,这说明  $i_{m2}$  的相位超前于  $i_{m3}$  和  $i_{m1}$ , $i_{m1}$  相位最为落后。

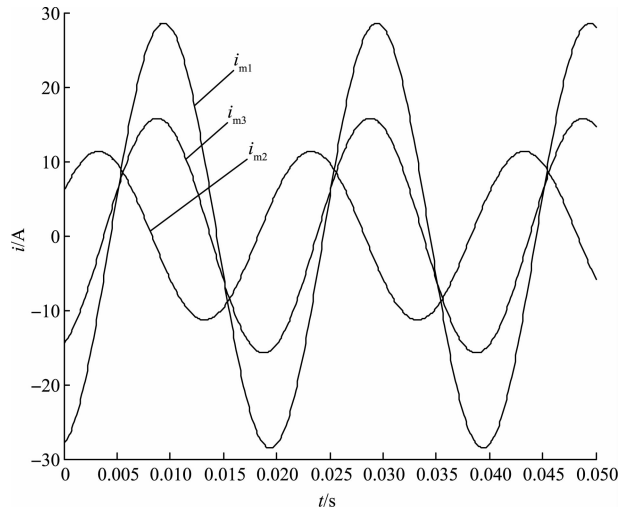


图4 M语言建模仿真得到的网孔电流波形

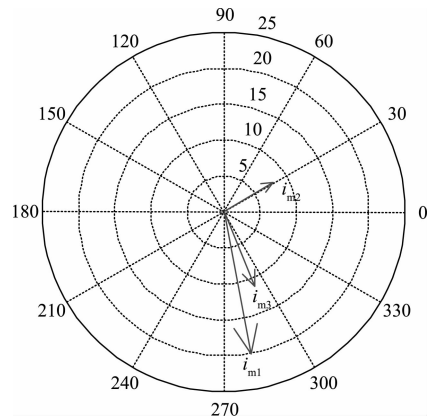


图5 网孔电流相量

### 3 基于 Simulink 的正弦稳态电路建模与仿真

#### 3.1 基于 Simulink 的正弦稳态电路建模

Simulink 是 MATLAB 的一个重要组件,在 Simulink 环境下,用户无需编程,只需要通过简单的鼠标点击操作,即可方便地把数学模型转化为软件模型,完成动态系统建模与仿真<sup>[8-9]</sup>。Simulink 工具箱中所提供的专门用于电力系统分析模块 SimPowerSystems 中包括大量电力系统元器件模型,在 Simulink 环境下直接调用元器件,并合理设置元器件参数,通过连线建立与图1相对应的电路系统仿真模型,完成正弦稳态电路建模<sup>[10-11]</sup>。建立的 Simulink 正弦稳态电路仿真模型如图6所示。

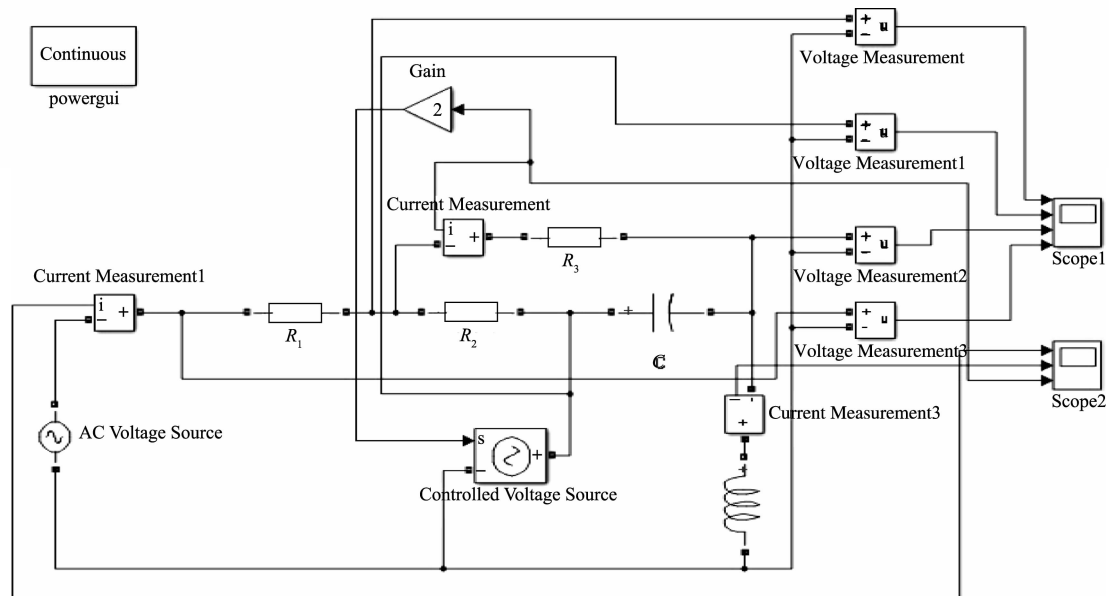


图6 Simulink 正弦稳态电路仿真模型

### 3.2 基于 Simulink 的正弦稳态电路仿真分析

3个结点的瞬时电压波形由示波器 Scope1 给出,为了更好地比较结点的瞬时电压值与电源瞬时电压值,故在图6的仿真模型中将电压源的瞬时电压波形一并在 Scope1 中进行显示观察,在 Parameters 的 Number of axes 中选4,就能在示波器中分别显示4路波形。3个网孔电流的瞬时电流波形由示波器 Scope2 给出,在 Parameters 的 Number of axes 中选3,就能在示波器中分别显示3路波形。为提高计算精度,选 Variable-step 和基于 Dormand-Prince 算法的 ode45 解算器,仿真时间和示波器的时间范围均设为 0~0.05s,启动仿真,观察仿真结果。Scope1 窗口显示的  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  和  $u_s$  瞬时电压波形如图7所示,这与图2显示的结果完全一致,即与上一节中利用 M 语言建模仿真结果吻合。Scope2 窗口显示的  $i_{m1}$ 、 $i_{m2}$ 、 $i_{m3}$  瞬时电流波形如图8所示,这与图4显示的结果完全一致,即与上一节中利用 M 语言建模仿真结果吻合。

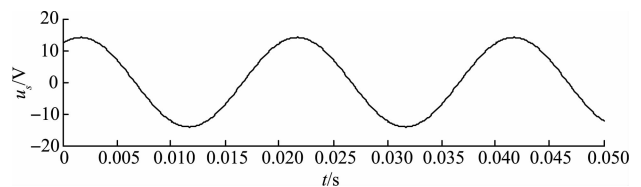
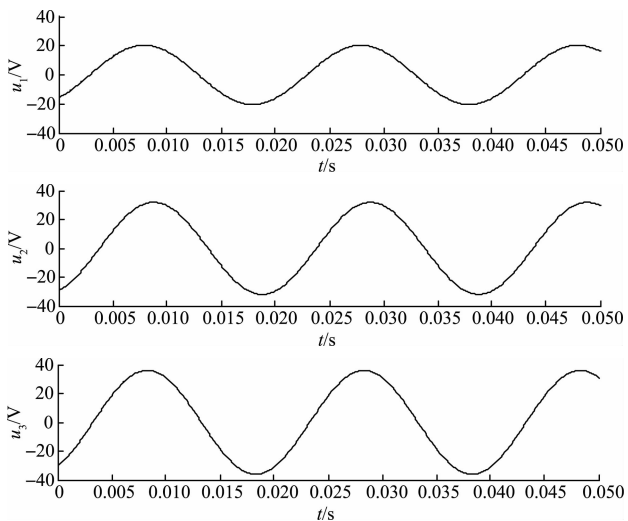


图7 Simulink 仿真得到的结点电压波形

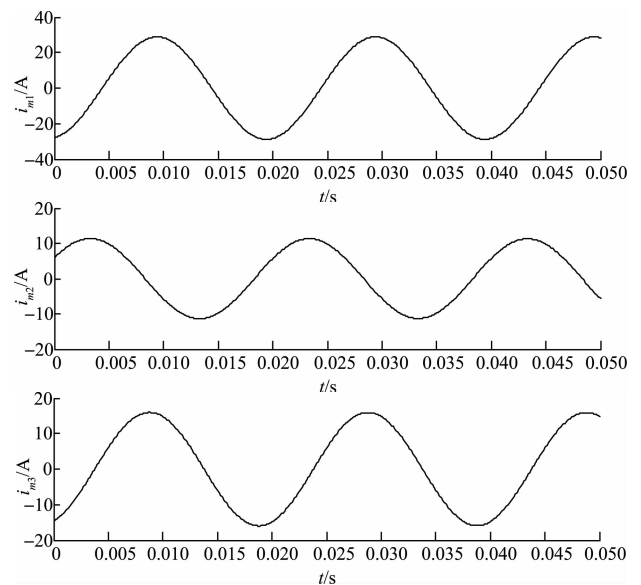


图8 Simulink 仿真得到的网孔电流波形

### 3.3 基于 Powergui 的正弦稳态电路仿真分析

Powergui 是分析电力系统模型的图形化用户接口。双击图6左上角的 Powergui 模块即可显示该正弦稳态电路系统稳定状态时各元件的电流、电压以及相位关系,设置系统的仿真时间 0~0.05 s,点击 Steady-State Voltages and Currents,在 Units 中选 Peak values(峰值),在 Display 中选 States、Measurements、Sources,在 Format 中选

112.3(best of),则各变量的数值就会在如图9所示的 Powergui Steady-State Tool Model 窗口显示,从图9中窗

口显示的结果来看,与M语言和Simulink建模仿真结论完全一致,且与理论计算相同。

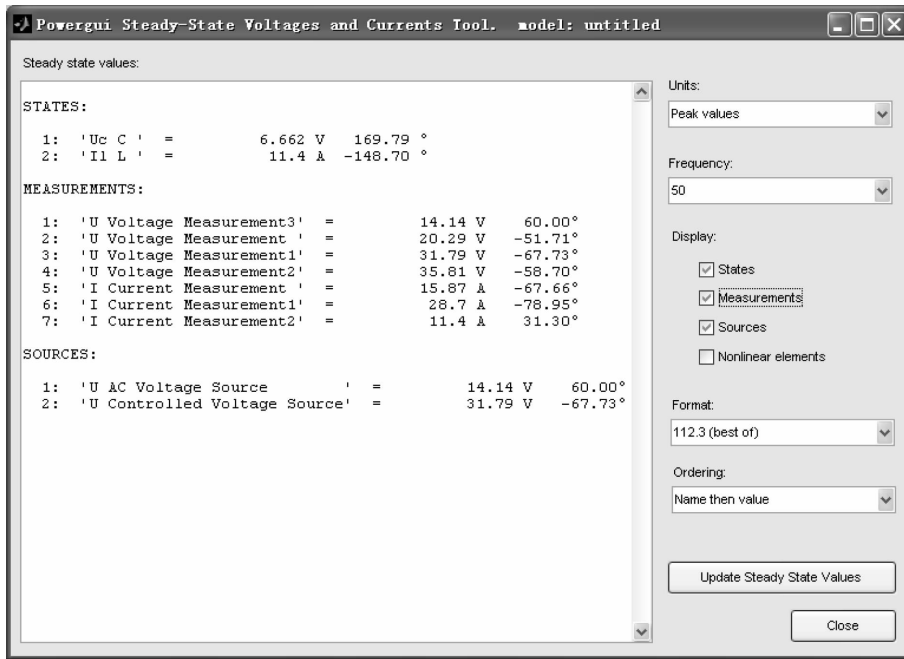


图9 Powergui求得的各变量的稳态值

#### 4 结 论

用M语言和Simulink工具箱对一个典型正弦稳态电路进行建模和仿真分析,2种方法的仿真结果一致且与理论计算值完全吻合。实例研究表明:利用M语言进行电路建模仿真的程序简洁,可读性强,计算结果准确,但需要良好的理论基础,尤其对于更为复杂的电路系统建模时势必会增加程序的复杂程度,这会使编程者的工作量大为增加。相比之下,在不失准确性的前提下,用Simulink工具箱进行电路的建模和仿真更为直观、简单,而且仿真时可以随时改变参数值,并用测量仪表和示波器随时观察各个电参数的数值、相位和仿真波形,使得仿真具有良好的实时性、直观性和交互性。

#### 参 考 文 献

- [1] 高兴泉,王立国.基于SIMULINK/SIMSCAPE的计算机控制系统仿真实验平台[J].实验技术与管理,2013,30(9):88-92.
- [2] 王荔芳,周晓华,陶燕林.Simulink在RLC串联的动态电路分析中的应用[J].现代电子技术,2010,33(24):37-39.
- [3] 罗辞勇,肖发福,唐书窗.电压模式Buck变换器混沌建模与控制研究[J].计算机仿真,2014,31(9):151-155.
- [4] 彭燕.基于SIMULINK的变频器仿真研究[J].科学

技术与工程,2013,13(32):96-97.

- [5] 贺为婷,肖博潇.正弦稳态电路的MATLAB/Simulink仿真分析[J].电子设计工程,2011,19(7):32-34,38.
- [6] 杜海莲,王占锋,刘波粒,等.MATLAB在电路分析实验教学中的应用[J].江苏技术师范学院学报,2011,17(10):89-94.
- [7] 王群,耿云玲.Simulink在电路分析中应用[J].电力自动化设备,2007,27(4):71-74.
- [8] 丁硕,崔总泽,巫庆辉,等.基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J].国外电子测量技术,2014,33(6):81-85.
- [9] 李存龙,陈伟民,章鹏,等.正弦调制型微波测距系统的不确定度分析[J].仪器仪表学报,2014,35(1):23-29.
- [10] TIAN G Y,ZHOU X Y,ADEWALE I D.Pulsed electromagnetic non-destructive evaluation and applications[J].Instrumentation,2014,1(1):15-28.
- [11] 陈新,张桂香.电磁感应无线充电的联合仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(4):434-440.

#### 作 者 简 介

丁硕,1979年出生,硕士,副教授,主要研究方向为电工技术、神经网络理论及应用。  
E-mail:dingshuo2004@sina.com