

Simulink 在电路分析中应用

王 群^{1,2}, 耿云玲³

(1. 长沙航空职业技术学院 电气电子信息系, 湖南 长沙 410124;

2. 国防科技大学 继续教育学院, 湖南 长沙 410073;

3. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 简要介绍了 Matlab 语言中 Simulink 工具箱的特点和用途, 说明了其与电路分析和计算有关的 Simulink、SimPowerSystems 和 Extra Simulink 等库集。以电路课程中直流稳态电路、暂态电路和正弦稳态电路中的具体电路为例, 探讨了如何利用 Simulink 建立电路模型、进而分析和计算电路的方法, 其中包括对直流电阻电路求取电流, 对含电压控制电流源(VCCS)的电阻电路求取电压、电流和独立电流源功率等, 对一阶电感电路求取电感电流和电压源电流, 对正弦稳态电路求取支路电流、电容电压和电源产生的复功率等, 并总结出了一些使用技巧和具体方法。所得仿真结果与理论分析一致, 为 Simulink 应用于电路课程的计算机辅助分析提供了参考。

关键词: 电路分析; 仿真; 电力系统模块集; 模型

中图分类号: TM 133

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)04-0071-04

电子教案和教学多媒体课件已逐渐被引进日常教学, 一些专门的电路仿真和设计软件以及通用的工程设计和数学计算软件也成为电路等课程中的重要教学环节^[1-4]。通用的工程设计和数学计算软件 Matlab^[2-3] 利用其强大的数值计算和图形可视化功能、友好的交互式集成环境以及简便易学的便签式编程方式, 既能通过计算机编程方法对人工建立的电路方程计算求解, 也可直接建立电路方程并同时进行分析计算^[4], 特别是利用其提供的 Simulink 工具箱, 不必编程就能对电路建模、分析和计算。

1 Simulink 及其相关模块集

Simulink 是基于 Matlab 语言环境下的结合了框图界面和交互仿真功能的动态系统建模、仿真和综合分析的集成软件包, 是 Matlab 软件的扩展^[5-7]。它包含了许多可视化的系统功能模块, 用户只需要知道它们的输入、输出及模块的功能, 将其连接就可以构成所需要的系统模型(以.mdl 文件进行存取), 进而进行仿真与分析。

Simulink 处理的系统包括: 线性、非线性系统; 离散、连续及混合系统; 单任务、多任务离散事件系统。它能使用户将精力从编程转向模型的建立, 为用户省去了许多代码编写工作; 用户不必一步步地从最低层开始编写程序, 在 Simulink 提供的图形用户界面 GUI 上, 只要对所需系统模块进行鼠标的简单拖拉操作, 就可构造出复杂的仿真和分析模型^[5-7]。Simulink 中的模块外表以方块图形式呈现, 且采用分层结构。它要比 Matlab 的传统命令行方法编程要亲切得多; 把繁琐的细节都屏蔽了, 留给用户的是一

个友好的环境, 让用户以轻松、有效的方式完成自己感兴趣的工作。从建模角度而言, Simulink 既适于自上而下(top-down)的设计流程(概念、功能、系统、子系统、直至器件), 又适于自下而上(bottom-up)逆向设计。从分析研究角度而言, Simulink 模型不仅能让用户知道具体环节的动态细节, 而且能让用户清晰地了解各器件、各子系统、各系统间的信息交换, 掌握各部分之间的交互影响。在 Simulink 环境中, 用户可以在仿真进程中改变感兴趣的参数, 实时地观察系统行为的变化, 并能将分析计算结果保存在 Matlab 的工作空间中, 借助 Matlab 语言所具有的众多分析功能、可视化优势和工具箱工具操作数据。

以 Matlab 6.5 为例, 在电路辅助分析和辅助教学中, 主要用到 3 个 Simulink 工具箱模块库集。

a. Simulink 库集: 提供输入信号的包括阶跃信号的子库 Sources(源信号), 显示数据和波形的包括示波器和数值显示器的子库 Sinks(接收器), 进行一些数学分析的包括加减和增益运算的子库 Math Operations(数学运算), 用于连续系统的包括积分和微分运算的子库 Continuous(连续模块), 变换信号流向的包括信号分解、混合及选择的子库 Signal Routing(信号线路)。

b. SimPowerSystems 库集: 能提供输入电源的包括直流电压源和交流源的子库 Electrical Sources(电源), 搭建电路模型用的包括 RLC 串联支路和并联支路的元器件的子库 Elements(元器件), 测量电路中支路或元件电压和电流以及阻抗的子库 Measurements(测量), 能进行 Fourier 分析和测量电路有功和无功功率的子库集 Extra Library(附加或扩展库), 显示电路中支路或元件电压和电流、以及电路状态变量的模块 powergui(功率图形用户界面)。

c. Extra Simulink 库集:是扩展 Simulink 库的子库集,包含有能提供带有初始状态传递函数和状态变量分析的子库 Additional linear,进行频谱分析的子库 Additional Sinks 等。

2 应用实例

电路分析计算的一个重要目的,就是根据电路的拓扑结构和元件数值求出电路变量——支路/元件的电压和电流、电阻/阻抗和功率等^[8-10]。下面结合具体电路,说明用 Simulink 如何建立电路模型、分析和计算电路变量以及做出变量随时间变化的图形。

2.1 直流稳态电路

2.1.1 直流电阻电路

图 1 所示直流电阻电路,已知 $R_1=6\ \Omega$, $R_2=4\ \Omega$, $R_3=3\ \Omega$, $u_{s1}=42\text{ V}$, $u_{s2}=-10\text{ V}$ 。试求电流 i_1 和 i_2 。

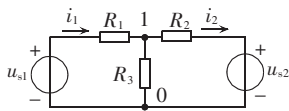


图 1 直流电阻电路
Fig.1 DC resistance circuit

首先,进入 Simulink 集成环境窗口,点击 Create a new mode 创建一个新文件,命名为 example1。然后,按以下方法和步骤,依次在有关模块库集中选中与图 1 电路中元件相对应的模块,并拖入 example1 窗口中,以便为组成 Simulink 电路模型作准备。

a. 双击 Electrical Sources 中的模块 DC Current Source,进入模块参数设置窗口,将 Amplitude(幅值)设为 42 V,确定后点击旁边的符号标注 DC Current Source,把它改写为 u_{s1} 。通过复制的方法得到 u_{s2} 后,将 Amplitude 设为 -10 V。

b. 双击 Elements 中的模块 Series RLC Branch (串联 RLC 支路),进入模块参数设置窗口,将 Resistance(电阻)设为 $1\ \Omega$, Inductance(电感)设为 0, Capacitance(电容)设为 inf(无穷大),确定后其图形符号就自动变为电阻符号。将其符号标注 Series RLC Branch 改写为 R_1 ,再把 R_1 复制 2 次,分别得到了 R_2 和 R_3 ,按已知条件设置它们的值。再用右键点击 R_3 ,把光标放到下拉菜单中的 Format 上,选中 Rotate Block(旋转),把它旋转 90° 。

c. 要得出电路中 i_1 或 i_2 ,还应拖入 Measurements 中的模块 Current Measurement,同时将其符号标注改为 i_1 ,并复制得到 i_2 。

得到与图 1 电路中有关的模块后,可建立对应的 Simulink 电路模型。根据图 1 的电路拓扑结构,按照 Simulink 的连线规则形成的 Simulink 模型见图 2。

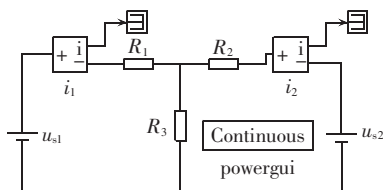


图 2 对应图 1 的 Simulink 模型
Fig.2 Simulink model of fig.1

此时,先进入菜单 Simulation/simulation parameters(仿真/仿真参数)设置仿真参数,主要是从 Simulation time 和 Solver options(求解算法选项)中确定仿真开始和结束时间以及仿真时的算法。在默认情况下,仿真算法为 Variable-step(变步长)的基于显式的 Runge-Kutta 公式的 ode 45,特殊情况如对刚性(Stiff)问题则要选择其他相应算法,如基于数字微分方程式 ode15s 或基于二阶 Rosenbrock 公式的 ode 23s 等。当然,也可选用 Fixed-step(定步长)及其对应算法。

为计算电路的未知量,从 SimPowerSystems 中拖入模块 powergui(电力图形用户界面)。用它可计算并显示所测量的电压和电流数值,方法是双击它后,点击 Steady-State Voltages and Currents(稳态电压和电流),开始计算并同时弹出 Powergui Steady-State Tool Model 窗口,默认选项为 Measurements,显示了计算结果: $i_1=6\text{ A}$, $i_2=4\text{ A}$,这与人工计算相同。如果选择 Sources,还能同时显示出电源电压 u_{s1} 和 u_{s2} 的值。选项 States 是用来计算并显示动态电路中的状态变量。图 2 中,连接在 Current Measurement 输出端 i_1 和 i_2 上的是 Simulink/Sinks 中的模块 Terminator(终端器),作用是终止输出信号,防止在 Matlab 命令窗口中出现端子未连接的警告。

2.1.2 含 VCCS 的电阻电路

如图 3 所示电路,已知 $R_1=1\ \Omega$, $R_2=2\ \Omega$, $R_3=3\ \Omega$, $R_4=4\ \Omega$, $i_s=1\text{ A}$, 电压控制电流源 VCCS 的控制系数 $g=2\text{ S}$ 。试写出电路的结点方程,并求出电压 u 和电流 i_3 以及独立电流源 i_s 发出的功率 P_s 。

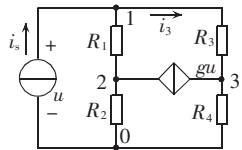


图 3 含 VCCS 的电阻电路
Fig.3 Resistance circuit with VCCS

依次在有关模块库集中选中与图 2 电路中元件相对应的模块,并拖入 example2 文件窗口中。建立电路 Simulink 模型的方法和步骤与上基本相同,只是要注意 3 个问题。

a. SimPowerSystems 中没有直接提供直流电流源模块,需要用 Electrical Sources 中的模块 AC Current Source(交流电流源)替代。双击进入其模块参数设置窗口,在将参数 Peak amplitude 设为 1 A、参数 Frequency 设为 0 Hz 的同时,需将参数 Phase 设置为 90° ,确定后它就变为一个直流电流源。点击旁边的符号标注 AC Current Source,把它改写为 i_s 。

b. SimPowerSystems 中未直接提供电路中的 4 种基本受控源模型,因此需要自己构造 VCCS。拖入 Electrical Sources 中的模块 Controlled Current Source(受控电流源),双击进入模块参数设置窗口,不选 Initialize,确定后退出。把它的符号标注改写为 gu 。为了形成 VCCS 的控制电导 g ,还需要拖入 Math Operations 中的模块 Gain,双击进入其模块

参数设置窗口,将 Gain 设为 2,确定后退出,并将符号标注改为 g 。为了取出控制电压 u ,还要拖入 Measurements 中的 Voltage Measurement(电压测量),并将其符号标注改为 u 。

c. 要得到 P_s ,还要在 Math Operations 拖入模块 Product(乘法)。拖入 Sinks 中的模块 Display 以便能显示出 u 和 i_3 以及 P_s 的值。

在得到了与图 3 电路中有关的模块后,就可建立对应的 Simulink 模型。根据图的电路拓扑结构,按照 Simulink 的连线规则形成的电路 Simulink 模型如图 4 所示。进入菜单 Simulation/simulation parameters (仿真/仿真参数)设置仿真参数和仿真时的算法。然后,进入菜单 Simulation/Start 或点击工具栏中的黑色箭头 Start simulation,则仿真计算开始。结果在图中的对应显示器显示: $u=1.5\text{ V}$, $i_3=1.5\text{ A}$, $P_s=1.5\text{ W}$ 。这与人工计算得出的结果相同。图中模块 Product 还能用 SimPowerSystems/Extra Library/Measurements 中模块 Active & Reactive Power(有功与无功功率)替代,而模块 Display 则可用 Simulink/Sinks 中模块 Scope(示波器)替代。

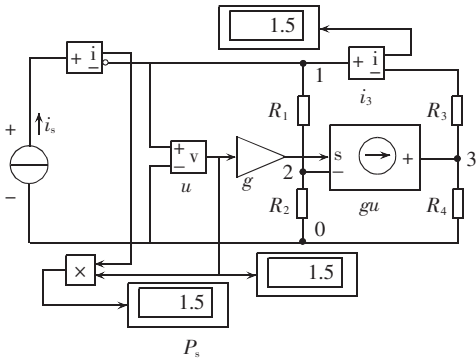


图 4 对应图 3 的 Simulink 模型
Fig.4 Simulink model of fig.3

2.2 暂态电路

图 5 所示电路是一个一阶电动态电路。假设在 $t=0$ 时开关闭合,求 $t>0$ 时电感电流 i_L 和电压源 u_s 的电流 i_s 。已知 $R_1=6\ \Omega$, $R_2=3\ \Omega$, $R_3=2\ \Omega$, $L=1\text{ H}$, $u_s=8\text{ V}$ 。

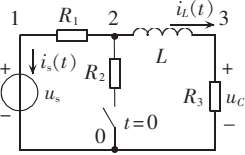


图 5 一阶电感电路
Fig.5 First-order inductance circuit

依次在有关模块库集中选中与图 5 电路中元件相对应的模块,并拖入 example 3 文件窗口中。建立电路 Simulink 模型的方法和步骤与上面基本相同,只是要设法构成一个在 $t=0$ 时闭合的开关模块。为此,需从 SimPowerSystems/Elements 中拖入一个模块 Breaker(开关),双击进入模块参数设置,把 Breaker resistance R_m (开通电阻)设为 1×10^{-6} ,Initial state(初始状态)设为 0,Snubber resistance R_s (吸收电阻)设为 inf,Snubber capacitance C_s (吸收电容)设为 0,并选择 External control of switching time(外部开关时间控制),就能通过 Simulink/Sources 中的模块 Step

对 Breaker 进行控制,使其在 $t=0$ 时闭合。直流电压源 u_s 用 SimPowerSystems/Electrical Sources 中的 DC Voltage Source;也可用 AC Voltage Source,但应将参数 Phase 设为 90° ,Frequency 设为 0。对应图 5 的 Simulink 模型如图 6 所示。电路的仿真结果如图 7 所示,其中的 i_s 和 i_L 的波形由模块 Scope 显示,结果与理论分析相同。

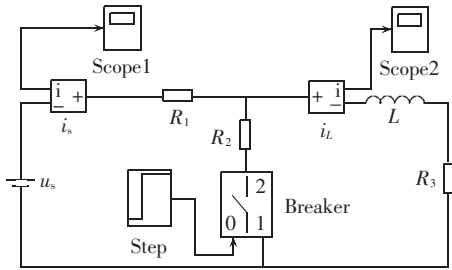


图 6 对应图 5 的 Simulink 模型 1
Fig.6 Simulink model 1 of fig.5

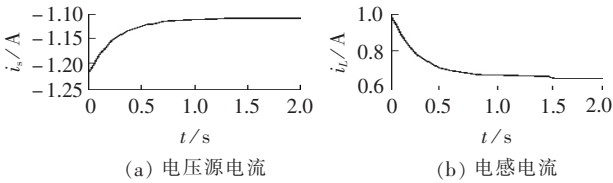


图 7 仿真结果
Fig.7 Simulation results

也可将模块 Breaker 参数设置中的 External control of switching time 取消,此时出现一个 Switching time 参数,将它设置为 0 即可。也可不用模块 Scope 显示波形,而拖入 SimPowerSystems/Measurements 中的模块 Multimeter(多用表),但不能把与求解量有关的元件的参数 Measurements 选为 None;这里选为 Branch current(支路电流)。双击打开 Multimeter,从 Available Measurements 窗口中把流过 R_1 的电流 $I_b:R_1$ 和流过 L 的电流 $I_b:L$ 选中,并点击 >> 添加到 Selected Measurements 窗口中。由于 Simulink 默认流过 DC Voltage Source 的电流是从其正极流出,这与要求的电流 i_s 流向相反,所以需在右边窗口选中 $I_b:R_1$ 并点击 $+/-$,给它加一个负号。为了能显示出波形,还应选中 Plot selected measurements,从而在仿真结束后能自动弹出图形窗口显示出 i_s 和 i_L 的波形,并可根据需要设置坐标轴参数。对应的 Simulink 模型如图 8 所示,其中模块 Display 显示的是 i_s 和 i_L 的稳态值;仿真结束时其显示窗中有一个向下的箭头,表示还有显示窗在下面,只要展开就能显现出另外 i_L 的值。

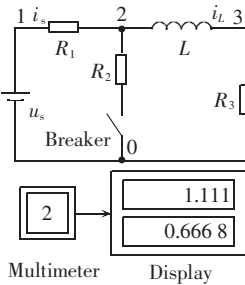


图 8 对应图 5 的 Simulink 模型 2
Fig.8 Simulink model 2 of fig.5

2.3 正弦稳态电路

如图 9 所示电路,已知

$R_1=10\ \Omega, R_2=1\ \text{k}\Omega, L=0.5\ \text{H}$,
 $C=10\ \mu\text{F}, u_s=100\ \text{V}, \omega=$
 $314\ \text{rad/s}$ 。求支路电流 i
 和电容电压 u_c 以及电源电
 压 u_s 产生的复功率 S 。

依次在有关模块库
 集中选中与图 9 电路中
 元件相对应的模块,并拖
 入 example 4 文件窗口中。

由于该电路是一个正弦稳态电路,所以最好在计算出所求电压和电流的有效值或振幅值和初相角的同时,显示出它们的波形,为此需要应用模块 powergui 和 Scope。如果要计算复功率 S ,还需用到模块 Active & Reactive Power。它计算出有功功率 P 和无功功率 Q 后,再由 Signal Routing 中的模块 Demux(向量分解)把得到的 P 和 Q 分别送到 Math Operations 中的模块 Real-Imag to Complex(实部和虚部组合为复数),把它们组合后一起最后在模块 Display 显示。按照前面的方法和步骤,得出的电路 Simulink 模型如图 10 所示,仿真结果如图 11 所示。

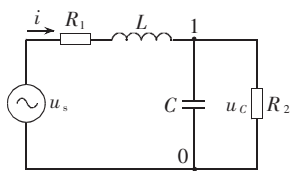


图 9 正弦稳态电路
 Fig.9 Sinusoidal steady
 -state circuit

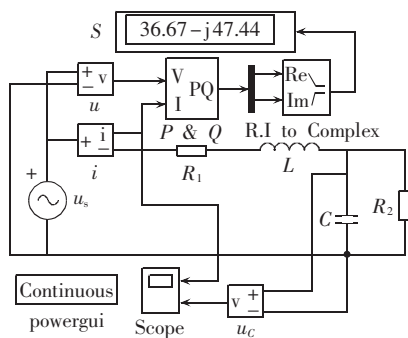


图 10 对应图 9 的 Simulink 模型

Fig.10 Simulink model of fig.9

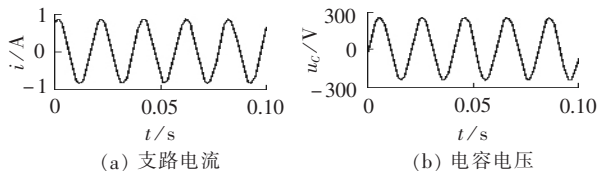


图 11 仿真结果

Fig.11 Simulation results

从已知条件知, u_s 频率为 $50\ \text{Hz}$, 周期为 $0.02\ \text{s}$, 因此在 Simulation Parameters 中将 Start time 设为 0, Stop time 设为 $0.1\ \text{s}$ (5 个周期)。为提高计算精度, 选 Fixed-step 和基于四阶 Runge-Kutta 公式的 ode4 算法, 并将 Fixed step size 设为 1×10^{-4} 。双击 powergui 后, 点击 Steady-State Voltages and Currents, 在 Units 中选 RMS values (有效值), 在 Format 中选 112.3 (best of), 就会在 Powergui Steady-State Tool Model 窗口以及 Display 中显示出计算结果: i 的有效值为 $0.5996\ \text{A}$, 初相为 52.29° , u_c 的有效值为 $181.9\ \text{V}$, 初相为 -20.05° , 而 $S=36.67-j47.44\ \text{V}\cdot\text{A}$,

这与人工计算相同。波形由 Scope 给出; 在 Parameters 的 Number of axes 中选 2, 就能在示波器中分别显示 2 个图形。

3 结语

文中只讨论了如何利用 Matlab 语言中的工具箱 Simulink 分析和计算直流稳态电路、暂态电路和正弦稳态电路, 没有涉及三相电路、谐振电路和非正弦稳态电路等, 但建立电路 Simulink 模型的方法和过程以及一些技巧都基本相同, 只是所用一些模块可能不同而已。实例研究说明, 在电路课程中采用 Simulink 对电路辅助分析和计算, 整个过程方便、简单、快捷和灵活, 且形象、直观、交互性好, 能促进对电路基本概念、原理、定律/定理、方法的理解, 满足教学需要, 有利于开展电路的计算机辅助分析 (CAA) 和计算机辅助教学 (CAI)。需要指出的是, Simulink 不是专门用于电路仿真的软件, 用它进行电路原理的分析和计算, 是对 Matlab 编写程序方式的扩展和补充, 不能替代 Matlab 编程方式。实际应用时, 应该注意选用适当的模块和设置模块参数, 以便能建立对应电路的 Simulink 模型, 进而进行有效的仿真或计算。

参考文献:

- [1] FLOYD T L. Principle of electric circuits[M]. Columbus: Merrill Publishing Company, 1989.
- [2] LUTOVAC M D, TOSIC D V, EVANS B L. Filter design for signal processing using Matlab and mathematica[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [3] MITRA S K. Digital signal processing—a computer-based approach [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [4] 赵录怀, 杨育霞, 张震. 电路与系统分析——Matlab 使用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [5] 范映乐, 杨胜天, 李铁. Matlab 仿真应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [6] The Math Works. Matlab signal processing toolbox[M]. Natick: Reading MA, 1997.
- [7] The Math Works. Matlab 6.0 with Simulink 4.0[M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [8] MADHU S. Linear circuit analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc, 1988.
- [9] JENSEN R W. Network analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc, 1984.
- [10] BALABANIAN N. Electrical network theory[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王 群(1960-), 男, 山东乳山人, 教授, 博士, 主要研究方向为电工技术、电网电能质量分析和测量、电源技术及其应用、军事高技术及其应用 (E-mail: qun_w@126.com);

耿云玲(1962-), 女, 河北定兴人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电工技术、小波技术、电网电能质量分析。