

文章编号:1000-582X(2011)02-044-08

变压及变压变频电源仿真模块的设计

苏玉刚,刘耀中,夏晨阳

(重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要:基于 Matlab/Simulink 平台,研究了直流变压电源、交流变压电源和交流变压变频电源仿真模块的设计方法。该方法使用受控电压源与自定义非线性的变压及变压变频信号源相结合实现。对直流变压电源信号和交流变压电源信号使用 Simulink 中已有模块搭建,对交流变压变频电源信号提出了一种将参数存储于矩阵中的 S 函数描述方法,并将变压及变压变频信号模型封装为仿真模块,嵌入到 Matlab/Simulink 平台中,对 Simulink 的仿真模块库进行了拓展,并通过仿真验证了设计方法的可行性。设计的变压及变压变频电源仿真模块库可为分析电力电子系统的动态行为和性能提供很大的便利,设计思想同样适用于 Pspice 和 Saber 等其他电路仿真软件的拓展。

关键词:变压电源;仿真模型;S-函数;封装模块

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

Design of simulation blocks for variable voltage or variable frequency power source

SU Yu-gang, LIU Yao-zhong, XIA Chen-yang

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Based on Matlab/Simulink platform, a method of designing the variable DC voltage power source, variable AC voltage power source and variable AC voltage and variable frequency power source block is proposed. The functions of variable voltage or variable frequency power sources are realized by combining controlled voltage source with self-defined piecewise linear function. Variable DC voltage power source and AC voltage power source are built by using the existing models in Simulink. The S-Function description, which signal parameters are arranged in the matrix, was presented in variable AC voltage and variable frequency power source block. These blocks are first encapsulated as Simulink blocks, then embedded into Matlab/Simulink platform to extend the Simulink warehouse. The simulation has demonstrated the feasibility of our method. The novel designed variable voltage or variable frequency power source block can introduce great convenience for analyzing dynamic behavior and performance of power electronic system. The designing idea has universal use to extend the warehouse of the other simulation software of circuits.

Key words: variable voltage power source; simulation modeling; s-function; encapsulation

收稿日期:2010-09-20

基金项目:教育部高等学校博士学科点科研基金(20090191110021)

作者简介:苏玉刚(1962-),男,重庆大学教授,主要从事电力电子与智能控制技术,无线电能传输技术方向研究,
(Tel)13996216298;(E-mail)yugangsu@gmail.com。

随着计算机科学的快速发展,系统的建模与仿真技术取得了巨大的进步,已经成为系统设计与优化过程中的关键环节之一^[1]。有效的建模与仿真分析在产品开发中可以起到缩短开发周期,降低产品成本等其他技术无法比拟的重要作用,在各行各业中有着广泛的应用,并且出现了众多综合的或者专业的 CAD 软件。在电力电子系统的建模与仿真方面,目前出现了 Pspice、Saber、Matlab 等一系列常用仿真软件,这些软件为常规电力电子电路的分析和辅助设计提供了极大的便利,但在一些特殊应用上,仍存在一定的不足^[2]。

在对电力电子系统的动态行为和系统性能进行分析时,常常需要 1 个电压连续可调或者电压和频率同时连续可调的供电电源。比如在笔者参与的科研项目中,感应耦合电能传输装置的研究,需要研究能量发射系统在电压或频率连续变化情况下,能量发射系统和能量拾取系统的性能和动态行为^[3-5];数码发电机逆变电源的研制过程中,需要研究电力电子变换器在电压及频率均连续变化的输入交流电源下的动态响应特性^[6];矿下电源设备的研发过程中,由于矿下供电电源的复杂多样,需要电源设备能适应很宽范围的交流输入电压^[7]。在对这些系统进行仿真分析研究时,前面提到的几种仿真软件均没有提供所需要的变压及变压变频电源的仿真模块。

目前研究电力电子系统在变压或变频状态下的动态行为过程中常用的方法是在同 1 个仿真图中给出某个范围内几个典型工作点的仿真结果^[8-10]。但是这种方法不能很好地说明电压或频率连续变化的情况下电路的动态行为,使得仿真分析的结果存在一定的局限性。因此,设计出电压可连续变化或者电压和频率同时连续变化的电源仿真模块是很必要的。

针对如何建立变压及变压变频电源的仿真模型展开研究。在研究传统使用 Matlab/Simulink 中已有模块搭建直流变压信号和交流变压信号的基础上,提出了一种将参数存储于矩阵中的交流变压变频信号的 S-函数描述方法,并封装为仿真模块,嵌入到 Matlab/Simlink 平台中,对 Simulink 的库文件进行了很好的补充和完善。介绍的设计思想,同样适用于其他电路仿真软件的拓展。

1 变压及变压变频电源模型的建立

1.1 变压及变压变频电源模型的实现方法

在对复杂非线性模型的分析过程中,分段拟合是一种常用的简化模型的分析方法。研究的变压及

变压变频电源模型是电压连续可调或电压和频率同时连续可调的复杂非线性模型,在整个电路中存在 1 个或多个特殊的调节点或者突变点,针对这种模型特点,以电路中存在 1 个调节点为例,使用分段拟合的方法将模型化简分析,电路中存在多个调节点的设计方法与之相同。

运行于 Matlab/Simulink 环境下的电力系统工具箱 SimPowerSystems 包含各种常用的电力系统模块,能够以直观易用的图形方式对电气系统进行模型描述。但电力系统工具箱提供的电源模块是理想线性直流电源模块和理想正弦交流电源模块,而使用 Simulink 构建的变压及变压变频信号模块组成的是非线性信号流程,流进流出模块的信号没有特定的物理意义,通过将变压或变压变频的非线性信号输入给受控电压源的控制端口“S”,即可在电力系统和电力电子仿真及模拟电路中用作变压及变压变频电源^[11]。据此方法设计的变压及变压变频电源模型如图 1 所示。

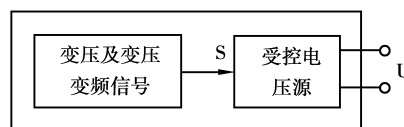


图 1 变压及变压变频电源模型的实现原理框图

在 Simulink 中有 2 种方法可以构建仿真模型,1 种方法是使用 Simulink 中已有的模块搭建,第二种方法是使用 Simulink 提供的 S-函数功能编程。运用方法一对直流变压电源模型和交流变压电源模型进行设计,运用方法二对交流变压变频电源模型的设计。其中,方法二是研究的重点。

1.2 直流变压电源模型的建立

直流变压电源变化规律繁多^[12-13],以线性可调直流电源为例介绍直流变压电源模型的设计方法。线性可调直流稳压电源可实现在一定电压范围内的线性调节,输出电压最终达到稳定。在建立直流变压电源模型时,需要设置如下几项电路参数

- 1) 初始电压值 a ;
- 2) 目标时间的电压值 b ;
- 3) 目标时间 T , 电压值达到目标参数 b 的时间, 之后保持电压值不变。

其中, a 、 b 、 T 须设置为正值。设 t_s 为仿真时长, 则直流变压电源模型可用分段函数式(1)表示

$$u(t) = \begin{cases} a + \frac{b-a}{T}t, & 0 \leq t \leq T; \\ b, & T < t \leq t_s. \end{cases} \quad (1)$$

在 T 时刻以前的电压信号为由 a 变化到 b 的斜

坡信号,既可线性增加,也可线性减小。在 T 时刻以后电压值将稳定在 b 。

1.3 交流变压电源模型的建立

交流变压电源模型可实现一定电压范围内电压幅值的线性调节,目标时间达到稳压并保持^[14]。建立交流变压电源模型时,需要设置如下几项电路参数

- 1) 初始电压幅值 a ;
- 2) 目标时间的电压幅值 b ;
- 3) 电压的频率 f ;
- 4) 相位 α ;
- 5) 目标时间 T , 电压幅值达到目标参数 b 的时间, 之后保持电压幅值不变。

其中, a, b, T 须设置为正值。假定在目标时间 T 到达之前, 电压值是线性变化的, 电压值的变化步长与系统的仿真步长相等, 那么电压值的变化率为 $(b-a)/T$ 。设 t_s 为仿真时长, 则交流变压电源模型可用分段函数式(2)表示

$$u(t) = \begin{cases} \left(a + \frac{b-a}{T}t\right) \sin(2\pi ft + \alpha), & 0 \leq t \leq T; \\ b \sin 2\pi ft, & T < t \leq t_s. \end{cases} \quad (2)$$

在 T 时刻以前的电压信号为幅值由 a 变化到 b 的正弦信号, 电压幅值既可线性增加, 也可线性减小, 在 T 时刻以后稳定在 b 。

1.4 交流变压变频电源模型的建立

若使用 Simulink 中已有的模块搭建交流变压变频电源的仿真模型, 系统模型就是 1 个包含多段的分段函数, 模型结构将会很复杂, 时间切换点也难于使用模块精确的计算和表达, 不能有效的实现频率可调的功能, 这时就需要借助 S-函数的自定义功能。

交流变压变频电源模型的电压频率是实时变化的^[15-17]。模型中分段函数每一段的起始时刻是由电压频率确定的, 与电压频率变化紧密相连, 使用通用的循环调用的编程方法可以实现分段函数的功能, 但是每次循环都要占用 1 个时间步长, 造成仿真速度显著下降。根据始末状态的电路参数和电压幅值、频率的变化规律计算得到分段函数每一段的参数数据, 并存储在矩阵中, 通过调用矩阵元素来表示分段函数, 这样精确的表达了频率的变化规律, 有效的提高了仿真速度。

在建立交流变压变频电源模型时, 需要设置如下几项电路参数

- 1) 初始电压幅值 a ;

2) 目标时间的电压幅值 b ;

3) 初始电压频率 f_1 ;

4) 每正弦周期频率的递增步长 f_d ;

5) 目标时间的电压频率 f_m ;

6) 相位 α ;

7) 目标时间 T , 电压幅值达到目标参数 b 的时间, 之后保持输出电压幅值和频率不变。

其中, a, b, T, f_1 和 f_m 须设置为正值。可以通过设置 f_d 的正负控制频率的变化趋势。由于模拟的电压幅值和频率是实时变化的, 为简化仿真模型, 作如下假定

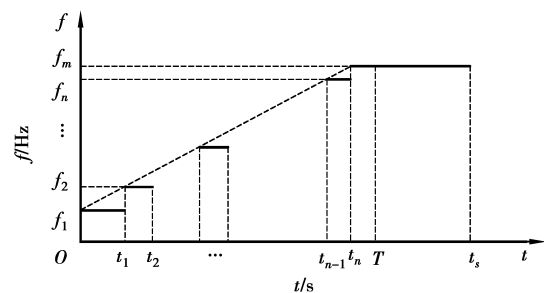
1) 设 i 为仿真运行波形的周期数, f_i 为第 i 个周期的频率, t_i 为第 i 个周期结束的仿真时刻, t_s 为仿真时长, 其中 $i \in N^*$;

2) 假定电压幅值的变化规律与上述交流变压电源模型的幅值变化规律相同;

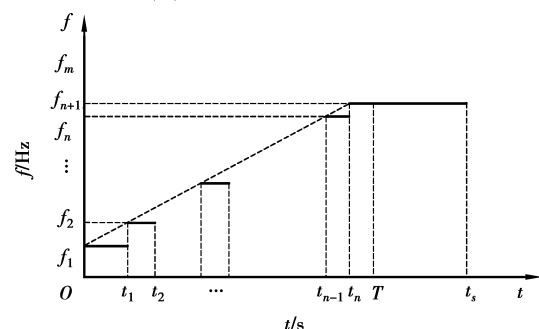
3) 假定以每一个电源正弦周期 2π 为单位改变一次频率, 即电压频率是以初始频率 f_1 , 公差 f_d 的等差数列规律变化;

4) 若在仿真运行到时刻 t_n ($n \in N^*$) 且 $t_n < T$, 输出电压信号的频率就已经达到终止值 f_m , 那么以后的电压信号始终保持频率 f_m 输出, 称这种输出状态为状态 1; 若仿真运行到目标时间 T 时达到频率 f_{n+1} 且 $f_{n+1} < f_m$, 输出电压信号将在目标时间 T 以后均以频率 f_{n+1} 运行, 称这种输出状态为状态 2。

2 种状态下频率的变化规律如图 2 所示。



(a) 状态1下频率的变化规律



(b) 状态2下频率的变化规律

图 2 状态 1、2 下的频率变化规律

当状态 1 发生时,交流变压变频电源模型可用分段函数(3)表示

$$u(t) = \begin{cases} \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_1 t + \alpha), & 0 \leq t < t_1; \\ \vdots & \vdots \\ \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_n (t - t_{n-1}) + \alpha), & t_{n-1} \leq t < t_n; \\ \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_m (t - t_n) + \alpha), & t_n \leq t < t_{n+1}; \\ \vdots & \vdots \\ \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_m (t - t_k) + \alpha), & t_k \leq t < T; \\ b \sin(2\pi f_m (t - T) + \alpha), & T \leq t \leq t_s. \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f_n = (n-1)f_d + f_1, n, k \in N^*, n < k$ 。

当状态 2 发生时,交流变压变频电源模型可用分段函数式(4)表示

$$u(t) = \begin{cases} \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_1 t + \alpha), & 0 \leq t \leq t_1; \\ \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_2 (t - t_1) + \alpha), & t_1 < t \leq t_2; \\ \vdots & \vdots \\ \left(a + \frac{(b-a)t}{T}\right) \sin(2\pi f_{n+1} (t - t_n) + \alpha), & t_n < t \leq T; \\ b \sin(2\pi f_{n+1} (t - T) + \alpha'), & T < t \leq t_s. \end{cases} \quad (4)$$

其中, $f_n = (n-1)f_d + f_1, n \in N^*$ 。

当电路参数 f_1, f_d, f_m 和 T 确定以后,通过数值计算将周期数 i 及第 i 个周期的电压频率 f_i 、结束时刻 t_i 分别以列向量存储到矩阵 \mathbf{A} 中。

状态 1 下的矩阵 \mathbf{A} 可用式(5)表达

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & t_1 \\ 2 & f_2 & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n & f_n & t_n \\ n+1 & f_m & t_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & \frac{1}{f_1} \\ 2 & f_1 + f_d & t_1 + \frac{1}{f_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n & f_1 + (n-1)f_d & t_{n-1} + \frac{1}{f_n} \\ n+1 & f_m & t_n + \frac{1}{f_m} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} n+2 & f_m & t_{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k & f_m & t_k \\ k+1 & f_m & T \\ k+2 & f_m & t_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n+2 & f_m & t_n + \frac{2}{f_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k & f_m & t_n + \frac{k-n}{f_m} \\ k+1 & f_m & T \\ k+2 & f_m & t_n + \frac{k+1-n}{f_m} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} k+3 & f_m & t_{k+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h & f_m & t_h \\ h+1 & f_m & t_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k+3 & f_m & t_n + \frac{k+2-n}{f_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h & f_m & t_n + \frac{h-n}{f_m} \\ h+1 & f_m & t_s \end{bmatrix},$$

其中 $n < k < h$ 。

Matlab 命令窗口显示第一个频率为 f_m 的波形运行结束的时间 $t_s = t_{n+1}$, 频率从 f_1 运行到的 f_m 周期数 $N_0 = n+1$, T 时刻以前保持在频率 f_m 的波形周期数 $N_1 = h+1-n$ 。

状态 2 的矩阵 \mathbf{A} 可用式(6)表示

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & t_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n & f_n & t_n \\ n+1 & f_{n+1} & T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & \frac{1}{f_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n & f_1 + (n-1)f_d & t_{n-1} + \dots + \frac{1}{f_n} \\ n+1 & f_{n+1} & T \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将第 $n+1$ 个正弦周期的完整正弦波平均划分为 4 段, 电路的 5 个端点存储在矩阵 \mathbf{B} 中。矩阵 \mathbf{B} 可用式(7)来表示

$$B = \begin{bmatrix} A(n,3) & T_{n_0} \\ \frac{A(n+1,3) + 3A(n,3)}{4} & T_{n_{\frac{1}{4}}} \\ \frac{A(n+1,3) + A(n,3)}{2} & T_{n_{\frac{1}{2}}} \\ \frac{3A(n+1,3) + A(n,3)}{4} & T_{n_{\frac{3}{4}}} \\ A(n+1,3) & T_{n_1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

电路的最后一个切换点在 T 时刻,是正弦波的第 $n+1$ 个周期。根据式(7)中的时间点在第 $n+1$ 个正弦波中所处的不同位置进行相应的切换, α' 可用式(8)来表示

$$\alpha' = \begin{cases} \alpha_1, & B(1,1) \leq t \leq B(2,1); \\ \pi - \alpha_1, & B(2,1) < t \leq B(4,1); \\ 2\pi + \alpha_1, & B(4,1) < t \leq B(5,1), \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\alpha_1 = \arcsin \{ \sin [2\pi A(n,1)(T - A(n,2))] \}$ 。

Matlab 命令窗口显示最终达到的频率值 $f_{m1} = f_{n+1}$, 运行到此时的周期数 $N_2 = n+1$ 。

为了防止仿真中参数设置错误而导致系统运行出现死循环,设置了自动排错功能。若 f_1, f_d, f_m 3 个参数在数学逻辑上设置有误,仿真按 $u=0$ 输出,同时 Matlab 命令窗口显示出错信息。若 3 个参数设置正确,根据 $A(k,3)$ 计算频率增加到 f_m 时的仿真时刻 t_k 。若 $t_k < T$,按照状态 1 输出电压信号,反之按照状态 2 输出电压信号。

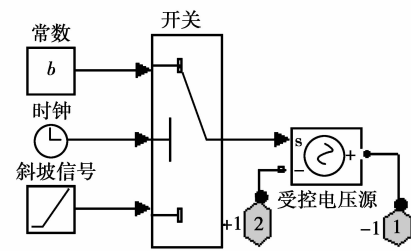
分段函数电路参数的计算方法为:查找当前仿真时刻 t 在矩阵 $A(:,3)$ 中的位置确定当前的仿真周期数 i ,即分段函数的段数 i 。频率 f_i 由矩阵 $A(i,2)$ 确定,第 i 段的运行时刻区间为 $[A(i-1,3), A(i,3)]$ 。这样就使用矩阵实现了复杂实时变化的变压变频输出信号模型的表达。

2 变压及变压变频电源模型的封装与测试

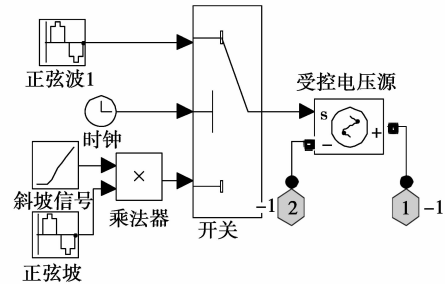
2.1 变压及变压变频电源模型封装与模块库的创建

使用 Simulink 中已有模块搭建的直流变压电源模型和交流变压电源模型分别如图 3(a)和图 3(b)所示。使用 S-函数建立交流变压变频电源模型如图 3(c)所示,S-函数的流程图如图 3(d)所示。

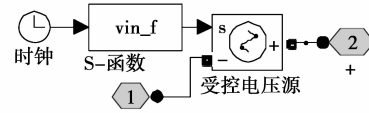
其中,使用 Simulink 中已有模块搭建的直流变压电源模型和交流变压电源模型使用 Switch 开关模块控制分段函数的选择,使用 Clock 时钟模块输出当前仿真时刻 t 到开关模块进行判断。



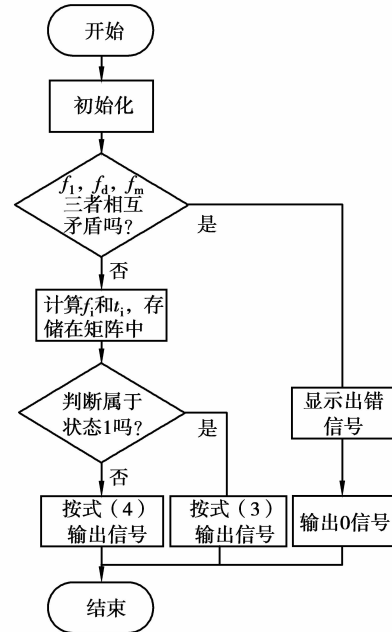
(a) 直流变压电源的仿真模型



(b) 交流变压电源的仿真模型



(c) 交流变压变频电源的仿真模型



(d) S-函数的流程图

图 3 变压及变压变频电源模型的仿真模型和 S-函数流程图

图 3(a)-(b)中,若 $t \in [0, T]$,由下面的通路 2 计算输出;若 $t \in [T, t_s]$,由上面的通路 1 计算整个系统的输出。其中通路 1 实现稳压输出,通路 2 实现直流电压值或者交流电压幅值线性变化的电压信号。使用 S-函数的交流变压变频电源模型通过编程实现交流变压变频信号的输出。

上述变压及变压变频电源模型可以作为子系统

应用在仿真电路中,但是在进行 Simulink 仿真时会遇到 2 个问题:一是模型参数较多且彼此相互关联,当需改变电压的变化范围时,必须依次计算和修改不同模块的参数。二是子系统在仿真过程中必须时刻对模型中每个模块进行计算,而不论这些模块对系统是否有影响,造成了计算资源的浪费,影响仿真运行速度。

在这种情况下,利用 Simulink 提供的封装模块的功能,将参数的传递过程封装在模型内部。一旦模块的设计和封装完成并经过正确的测试,在使用时只需要考虑模块的输入输出关系,而无需了解模块内部的实现。

为使所设计的变压及变压变频电源模块具有通用性,能够在仿真过程中被 Simulink 中的 Multimeter 数字万用表模块测量使用,需将受控电压源模块中的 Measurements 一项选择为 Voltage。将上述变压及变压变频电源模型分别进行封装,设置好封装属性;分别将直流变压电源模型、交流变压电源模型和交流变压变频电源模型封装后的模块依次命名为 Variable DC Voltage Source, Variable AC Voltage Source 和 VVVF Source (variable AC voltage and variable frequency source)。其中,参数对话框中的每一项分别对应着前面所要求输入的电路参数。

将封装后的变压及变压变频电源模块添加到用户自定义的库文件 user definition 中,并将其嵌入到 Matlab/Simulink 平台中,显示在 Library Browser Library 窗口下,方便用户进行模块的选择和使用。添加后的自定义变压及变压变频电源模块库如图 4 所示。

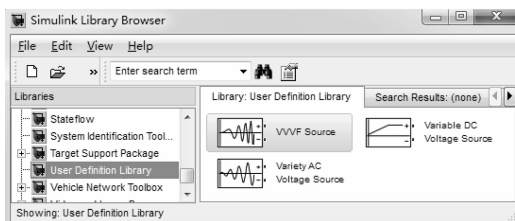


图 4 变压及变压变频电源模块库的效果图

2.2 变压及变压变频电源模块的仿真测试

依次将直流变压电源模块、交流变压电源模块和交流变压变频电源模块应用在如图 5 所示的测试电路中,双击模块图标,依次按照据表 1-3 设置电路参数。仿真结果分别如图 6(a)-(d)所示。

在设置交流变压变频电源模块的参数 f_d 时,若取值过大,仿真曲线将会呈现阶梯状。故而在取值

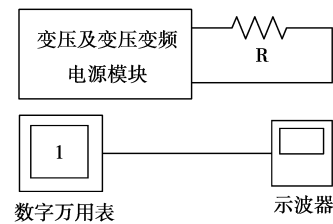
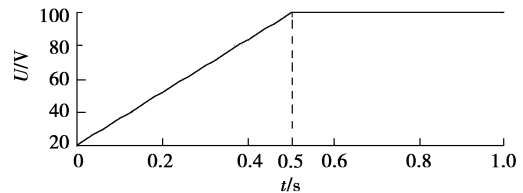
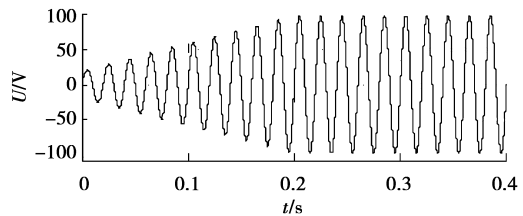


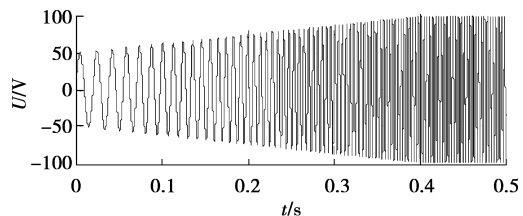
图 5 变压及变压变频电源模型的测试电路图



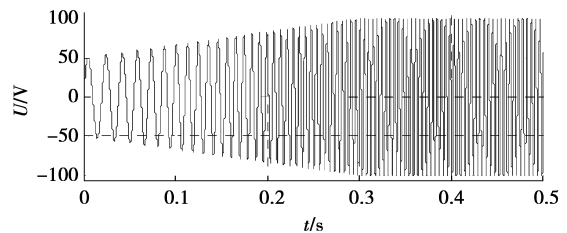
(a) 直流变压电源模型的仿真结果



(b) 交流变压电源模型的仿真结果



(c) 交流变压变频电源模型的仿真结果1



(d) 交流变压变频电源模型的仿真结果2

图 6 变压及变压变频电源模型的仿真结果

时,应取较小的数值使其仿真曲线接近线性。此处为得到一个较为明显的仿真结果,将 f_d 设置为 5 Hz。

表 1 直流变压电源模块参数取值表

a/V	b/V	T/s	t_s/s
20	100	0.5	1

表 2 交流变压电源模块参数取值表

a/V	b/V	f/Hz	α/rad	T/s	t_s/s
20	100	50	0	0.2	0.4

表 3 交流变压变频电源模块参数取值表

序号	a/V	b/V	f_1/Hz	f_d/Hz	f_m/Hz	α/rad	T/s	t_s/s
1	50	100	50	5	300	0	0.4	0.5
2	50	100	50	5	300	0	0.3	0.5
3	50	100	50	-10	300	0	0.3	0.5

图 6(a)-(b)分别为直流变压电源模型和交流变压电源模型应用在图 5 的测试电路中的仿真结果,电压幅值在目标时间 T 之前线性变化,之后保持不变。仿真结果分别与表 1 和表 2 中参数设置一致,能够输出理想的变压信号。

用这种使用 Simulink 中已有的模块搭建系统的方法可以将复杂模型简化,传递参数准确,便于仿真模型的研究、修改和调试。

图 6(c)为交流变压变频电源模块按表 3 中 NO1 确定参数时的仿真结果,Matlab 命令窗口显示的仿真结果为:

属于状态 1:第一个频率为 f_m 的波形运行结束的时间 $T_z=0.3702$ s,频率从 f_1 运行到的 f_m 周期数 $N_0=51$, T 时刻以前保持在频率 f_m 的波形周期数 $N_1=9$ 。

图 6(d)为交流变压变频电源模块按表 3 中 NO.2 确定参数时的仿真结果,Matlab 命令窗口显示的仿真结果为:

属于状态 2:最终达到的频率值 $f_{m1}=215$ Hz,运行到此时的周期数 $N_2=34$ 。

交流变压变频电源模块按表 3 中 NO3 确定参数时,频率初始值 f_1 小于目标时间的频率值 f_m ,但所设置的频率步长 f_d 为负数,这在数学逻辑上有错误,根据模块的自动纠错功能,电源输出 0 信号同时在 Matlab 命令窗口显示报错信息

Error: Frequency Step is negative, but Terminated Frequency is less than Initial Frequency.

由图 6(c)-(d)等可以看出,交流变压变频电源模块在测试电路得到的仿真结果分别与其参数设置完全对应,在切换点处实现了较为平滑的理想切换,验证了模型的正确性,达到了系统的设计要求。

使用 Simulink 提供的 S-函数功能编程可以方便地制作出任意复杂的信号源模块,非常适合对由数学方程描述的复杂系统进行建模,仿真模型稳定、结果准确,这种设计方法构建出来的模块通用性

较强。

3 结 论

将受控电压源与自定义非线性的变压及变压变频信号源相结合来实现变压及变压变频电源仿真模型的功能。对交流变压变频电源信号提出了一种将参数存储于矩阵中的 S-函数描述方法,对直流变压电源信号和交流变压电源信号使用 Simulink 中已有模块搭建。然后将变压及变压变频电源的仿真模型封装后嵌入到 Matlab/Simulink 平台中,对常用仿真软件进行了拓展。笔者将设计后的变压及变压变频电源模块应用到感应耦合电能传输系统、数码发电机的电力电子系统、宽压自适应开关电源等电力电子系统的动态行为分析和系统性能分析中,实践证明了其准确性和通用性均已经达到了预期效果,为笔者的研究工作提供了很大的便利。所提出的拓展方法同样适合于 Pspice 和 Saber 等其他电路仿真软件的拓展。

参考文献:

- [1] 熊光楞,范文慧. 21 世纪制造业的建模与仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2004,16(9): 1884-1886.
XIONG GUANG-LENG, FAN WEN-HUI. Modeling and simulation of manufacturing in the 21st century[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9):1884-1886.
- [2] 桑德勒. 开关电源仿真-PSpice 和 SPICE3 应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.
- [3] 苏玉刚,唐春森,孙跃,等. 非接触供电系统多负载自适应技术[J]. 电工技术学报, 2009(1):153-157.
SU YU-GANG, TANG CHUN-SEN, SUN YUE, et al. Load adaptive technology of contactless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009(1):153-157.
- [4] 孙跃,王智慧,苏玉刚,等. 电流型 CPT 系统传输功率调节方法[J]. 重庆大学学报, 2009,32(12): 1386-1391.
SUN YUE, WANG ZHI-HUI, SU YU-GANG, et al. Power transfer regulation mode for current fed CPT system[J]. Journal of Chongqing University, 2009,32(12): 1386-1391.
- [5] 孙跃,陈国东,戴欣,等. 非接触电能传输系统恒流控制策略[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2008,31(7): 766-769.
SUN YUE, CHEN GUO-DONG, DAI XIN, et al. A constant current control method for contactless power transmission systems[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(7): 766-769.
- [6] 李欧迅. 数码发电机整流电源的稳压控制技术[D]. 重庆:重庆大学自动化学院, 2009.
- [7] 付军. 宽压自适应开关电源的研制[D]. 重庆:重庆大

学自动化学院,2009.

- [8] KRISMER F, LAR J W. Accurate power loss model derivation of a high-current dual active bridge converter for an automotive application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 881-891.
- [9] PENA J DE LA, RIVAS M, HUERTAS A, et al. Wide input range module for rectified ac power distribution demonstrator for telecommunication system [C/OL]//Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, March 10-14, 2002 [2002-08-07]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=989397.
- [10] ALOU P, GARCIA O, COBOS J A, et al. Flyback with active clamp a suitable topology for low power and very wide input voltage range applications[C/OL]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, March 10-14, 2002[2002-08-07]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=989254.
- [11] 勤格勒图,刘文理. Matlab 电力系统模块中非线性电源的实现方法[J]. 黑龙江电力,2009,31(1): 20-23.
- QIN GE-LE-TU, LIU WEN-LI. Implementing method of non-linear power source in electric power system block with Matlab[J]. Heilongjiang Electric Power, 2009,31(1): 20-23.
- [12] GU Y, CHEN H, LU Z, et al. A family of asymmetrical dual switch forward DC-DC converters[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition; APEC, March 6-10, 2005. [S. L.]: Pam Wagner, 2005, 3: 1556-1560.
- [13] LEE J P, MIN B, YOO D, et al. A new topology for PV DC/DC converter with high efficiency under wide load range[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg. Piscataway, NJ, USA:IEEE,2005: 1-6.
- [14] PETERSEN L, ANDERSEN M A E. Efficient wide range converters (EWiRaC): A new family of high efficient AC-DC converters [C]//Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 19-23, 2006. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2006: 247-253.
- [15] ROSADO S, MA X, FRANCIS G, et al. Model-based digital generator control unit for a variable frequency synchronous generator with brushless exciter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 42-52.
- [16] PARK S, YU J, LEE S, et al. Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2009, San Jose, CA. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2009: 417-421.
- [17] MILIVOJEVIC N, STAMENKOVIC I, KRISHNAMURTHY M, et al. A digital control strategy for brushless DC generators[C]//2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Febember 21-25, 2010, Palm Springs, CA. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2010: 1957-1962.

(编辑 侯 湘)

(上接第 31 页)

- [8] SKALLI H, DAS S K, LENZINI L, et al. Traffic and interference aware channel assignment for multi-radio wireless mesh networks[C]//Proceedings of IEEE of the 13th annual ACM International conference on mobile computing and networking, September 9-14, Montreal, Quebec. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2007:15-26.
- [9] CHO S, KIM C. Interference-aware multi-channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, E91-B(5):1436-1445.
- [10] RAD A H M, WONG V W S. Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks[C/OL]//proceedings of IEEE international conference on computer communications, anchorage, AK, May 6-12, 2007[2007-05-29]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4215755&tag=1.
- [11] JENSEN T R, TOFT B. Graph coloring problems[M]. New York: Wiley Interscience, 1995:50-95.
- [12] ALAZEMI H M K, DAS A, VIJAYKUMAR R, et al. Fixed channel assignment algorithm for multi-radio multi-channel MESH networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(6):811-828.
- [13] BARRETT C L, ISTRATE G, KUMAR V S A, et al. Strong edge coloring for channel assignment in wireless radio networks[C/OL]//Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, Pisa, March 13-17, 2006 [2006-03-27]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1598948.
- [14] PROSKUROWSKI, SYSLO M M. Efficient vertex and edge coloring of outerplanar graphs[J]. SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods, 1986, 7(1): 131-136.
- [15] ALLEN S M. Frequency assignment problems: subgraph generation for lower bounds[R]. Division of Mathematics and Computing, University of Glamorgan, 1998.

(编辑 侯 湘)