

文章编号:1000-6893(2002)06-0583-04

## 电磁式无刷交流同步发电机的 MATLAB/PSB 建模

顾毅康, 胡育文

(南京航空航天大学 航空电源重点实验室, 江苏 南京 210016)

### MATLAB/PSB MODEL FOR BRUSHLESS ELECTROMAGNETIC SYNCHRONOUS GENERATOR

GU Yi-kang, HU Yu-wen

(Aero-Power Sci-Tech Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**摘要:** 针对电磁式无刷交流同步发电机建模分析的困难,提出一种在 MATLAB 环境中为此类电机构造 PSB 模型的方法,即利用 PSB 中的测量元件模块和受控电源模块沟通电机的数学模型与电路拓扑模型,从而实现了高效率、高质量的“电路—电机—控制”系统的混合仿真。这一建模方法有效地解决了带电力电子装置的复杂电机控制仿真问题,并可方便地推广到各种机电混合系统的建模分析中。

**关键词:** 发电机;建模;无刷励磁;同步电机;混合仿真

**中图分类号:** V242.4 **文献标识码:** A

**Abstract:** A new method to construct MATLAB/PSB model for Brushless Electromagnetic Synchronous Generator (BESG) is proposed, in order to overcome the difficulty in modeling and analysis on this kind of electric machine. The key idea of the proposed method is to make use of voltage/current measurement units and controlled voltage/current sources to exchange information between the mathematic model of the electric machine and the topological model of the circuit. The proposed model is able to implement high efficiency and high performance simulation for “circuit/electric machine/control” mixed systems. This method is an efficient solution for simulation modeling of the complicated electric machine with power electronics devices. It greatly reduces the time and energy consume for the construction of simulation models. In addition, it can be extended for modeling various kinds of mixed systems.

**Key words:** generator; modeling; brushless excitation; synchronous electric machine; mixed model simulation

电磁式无刷交流同步发电机维护简单,可靠性高,可长期连续运行而无需保养,在航空领域作为一次电源得到广泛应用。此类电机结构复杂,涉及到两台同步电机和一套半导体旋转整流器。而同步发电机带感性整流负载运行时,二极管的通断造成了不同的电路模式,其数量可多达 47 种;在工作周期中不同模式的组合又形成 3 种工作方式。用传统的方法进行建模相当困难,这阻碍了对电机特性及控制方法的进一步分析和研究。

国内外学者由此展开了多方面的研究工作<sup>[1~7]</sup>,主要有两个方向:一个是同步发电机带整流负载运行的仿真模型研究;另一个是在各种仿真平台下实现模型的方法研究。

仿真模型研究中较成功的有模式分类法<sup>[1,2]</sup>,根据每一种工作方式,确定模式转换的条件和路径。但分析表明,有些模式转换方向是不

确定的,因而文献[1,2]在仿真中引入了辅助转换路径。但模式分类法成功依赖于对电路系统的深入分析,且不具有通用性,如故障状态下所有的模态都要重新分析<sup>[4]</sup>。

文献[3]针对带有功率电路的同步电机提出了一种通用的仿真方法,它采用二值电阻来模拟开关元件的通断,在不改变电路拓扑的情况下能对功率电路进行仿真。文献[4]也抛开了模态分割的方法,而是采用张量分析法和动态自动判别模式转换法构造无刷励磁的同步电机的模型,解决了需要人为设置模式转换路径的困难,但是这种方法需要自行编程,开发周期长,难度大。

近年来,各种仿真软件发展很快,充分地利用这些软件来实现仿真模型,可以大大地提高仿真效率。仿真软件各有自己的适用领域,当仿真对象同时涉及到电路、电机和控制时,单一软件往往难以实现。因此,在通用仿真平台上高效地实现混合系统仿真,为电机控制、电机运行性能分析提供强有力的工具,其意义重大,是目前仿真研究中的一项新的前沿性工作。

MATLAB 是国际控制界最为流行的软件,但

收稿日期:2001-10-23; 修订日期:2002-04-02

基金项目:航空基础科学重点基金(编号:98Z52061)、台达电力电子科教发展基金(01-02 年度)资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/06/0583/>

它原是为控制系统仿真设计的,不能直接进行电路仿真。文献[5]提出了一种基于开关函数的三相电压型逆变器的仿真方法,并在 MATLAB/SIMULINK 中加以实现。这一方法对每一个电路都要进行转换和编写开关函数,应用不太直观;又由于开关元件较为简化,仿真的细节误差也较大。

1998年, MATLAB 开始提供电气系统模块库 Power System Blockset (以下简称为 PSB),使这一状况有所改善。但是 PSB 模型与 SIMULINK 模型有很大的不同,且它主要针对电力系统设计分析,很多模型并不适用于电气传动及其控制系统的分析。文献[6]介绍了 PSB 的特点和使用方法,对于 PSB 模型与原有的 SIMULINK 模型的区别和自行构造 PSB 模型的方法却少有涉及,文献[7]对此给出了初步的答案。

本文的工作就是要在 MATLAB 软件平台上,构造了无刷同步交流电机的 PSB 模型,高效率、高质量地完成电路—电机—控制的混合仿真,有效地解决带电力电子装置的复杂电机控制仿真问题。

### 1 模型的建立

在 MATLAB 中建立电磁式无刷交流同步发电机的 PSB 模型可分为 3 个步骤: 建立常规的电磁式同步发电机的 SIMULINK 模型; 将其转化为 PSB 模型; 将两级同步发电机的模型与整流器连接起来构成无刷励磁同步发电机的 PSB 模型。

(1)同步发电机的 SIMULINK 模型 在忽略了电机的饱和、磁滞等因素之后,不带阻尼绕组的同步发电机的数学模型可用如下的两组派克方程表示(发电机惯例)。

磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & M_{af} \\ 0 & -L_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_o & 0 \\ -M_{af} & 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

电压方程

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_0 \\ \dot{\psi}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi}_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩可表达为

$$T_e = 1.5 p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

在 MATLAB/SIMULINK 中,以上用状态方程描述数学模型可用如图 1 所示的 SIMULINK 模型来表示,称之为核心模型。

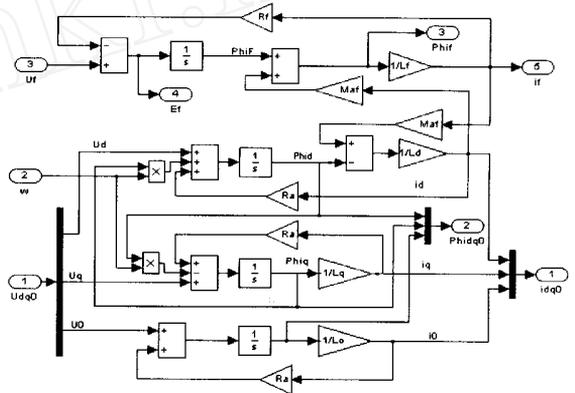


图 1 同步发电机的核心模型

Fig. 1 Kernel SIMULINK model for synchronous generator

同步发电机的 SIMULINK 模型如图 2 所示,其中 CoreDQ0 是上面已经得到的核心模型。加上了 dq 变换和 dq 反变换后,模型的输入变量就变为了  $U_a, U_b, U_c$ , 而输出变量则变为了  $i_a, i_b, i_c, i_f$ 。另外,为了进行派克变换,还加入了转子位置信号 theta。

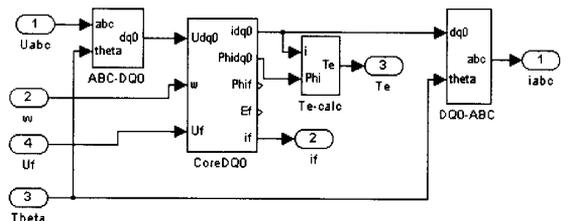


图 2 同步发电机的 SIMULINK 模型

Fig. 2 SIMULINK model for synchronous generator

(2)同步发电机的 PSB 模型 PSB 中的电压/电流检测模块和受控电压源/电流源是沟通 SIMULINK 模型与 PSB 模型的桥梁[7]。通过这些器件模型,就可以把 SIMULINK 信号转化为 PSB 信号,或反之。这使得电机的状态方程模型和电路的拓扑模型能够相互交换信息,从而结合在一个混合模型中。

图 3 是同步发电机的 PSB 模型的内部结构,其中 1,2 号输入端是励磁绕组的接线端,而 1,2,

3 号输出端子是电机电枢绕组的接线端,4 号输出端子是三相绕组的中点,这些都是 PSB 端子,应与 PSB 电路模型相连接。3 号输入端是电机转速的给定,由拖动电机的原动机决定;5,6,7 输出端分别是电机三相电流、电压和转矩的检测端,这几个都是 SIMULINK 信号端,可与 SIMULINK 模型相连接。

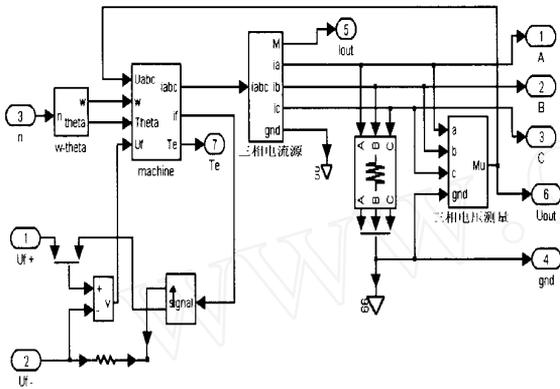


图 3 同步发电机的 PSB 模型

Fig. 3 PSB model for synchronous generator

图 3 中标有 machine 的部分就是图 2 所示的同步发电机 SIMULINK 模型,以它为核心,分别控制励磁和电枢两套绕组。用电压检测模块测得电机电枢的三相输出电压和励磁绕组的输入电压,反馈回电机模型,求得相应的电流后,用受控电流源来驱动输出,从而实现了 SIMULINK 模型和 PSB 模型连接。

(3) 无刷励磁同步发电机的 PSB 模型 图 4 是两级式无刷励磁同步发电机结构示意图。第一级为励磁机,第二级为主发电机(以下称为主发)。应用前面得到的同步发电机 PSB 模型,与 MATLAB 提供的三相整流桥相连,就形成了无刷励磁同步发电机的 PSB 模型,并可对励磁机和主发分别进行参数设置。

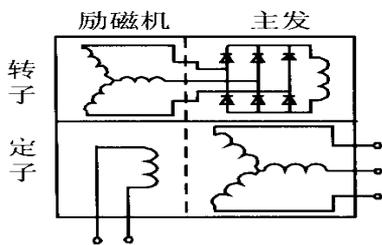


图 4 电磁式无刷交流同步发电机结构示意图

Fig. 4 Structure sketch of brushless electromagnetic synchronous generator

图 5 所示的就是当励磁机在直流励磁条件下,主发带阻性负载的无刷交流电机系统的

MATLAB 模型。在这一模型的输入输出接口中,除转速信号外,其余的信号均为 PSB 信号,它们表示的是模块之间的电气连接关系,既有电压又有电流,而不再是 Simulink 中的单一、单向的信号传递关系。

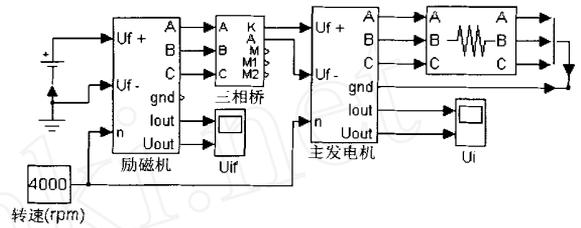


图 5 电磁式无刷交流同步电机的 MATLAB/PSB 模型

Fig. 5 MATLAB/PSB model for brushless electromagnetic synchronous generator

仿真开始后, MATLAB 将调用系统自带的 power2sys 模块来分析整个混合模型中的电路拓扑和状态方程,将其划分为线性和非线性两个部分,再用合适的数值解法来求取数值解。

在此过程中,不用再考虑整流桥的具体模式,而是根据每一个二极管所处的电压电流条件自动决定其开通和关断,免去了人工分析的过程。从建模花费的时间来看,采用传统的方法自行编程建模约需几个月的时间,而采用此方法后可缩短到一周以内,大大提高了仿真建模的效率。

## 2 仿真实例

文献[4]中给出了一个无刷交流同步发电机系统在静止空载状态下,整流桥模态变化的仿真计算实例,本文应用这一算例来验证的 MATLAB/PSB 模型的正确性。电机结构如图 4 所示,仿真中用到的电机参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Table 1 Electric machine parameter for simulation

励磁机电枢绕组	励磁机励磁绕组	主发励磁绕组
$L_d = 0.955\text{mH}$	$L_f = 87\text{mH}$	$L_f = 32.1\text{mH}$
$L_q = 0.618\text{mH}$	$R_f = 3.1$	$R_f = 0.5$
$L_0 = 0.132\text{mH}$	$M_{fd} = 0.96\text{mH}$	
$R_a = 0.955$		

整流器形式为三相桥式不控整流器,当时间为 0 秒时突加励磁电压  $U_f = 3.1\text{V}$ ,转速  $4200\text{r/min}$ 。图 6 是不同的时间段内,各整流管中流过的电流的仿真结果。可以看到,图 6(a)中,从 3ms 开始,1 号与 2 号二极管同时导通,处于导通状态,1,3 同时导通是换相状态,且此时 2 号管仍导通,整流器工作于导通和换相交替的整流工作方

式;而在图6(b)中,始终有3个二极管导通,整流器工作于换相与换相交替的工作方式;在图6(c)中出现1,2,3,6管同时导通的时刻,整流电路处于换相与短路交替出现的工作方式;在图6(d)中,则出现了换相-短路-换相的交替过程。

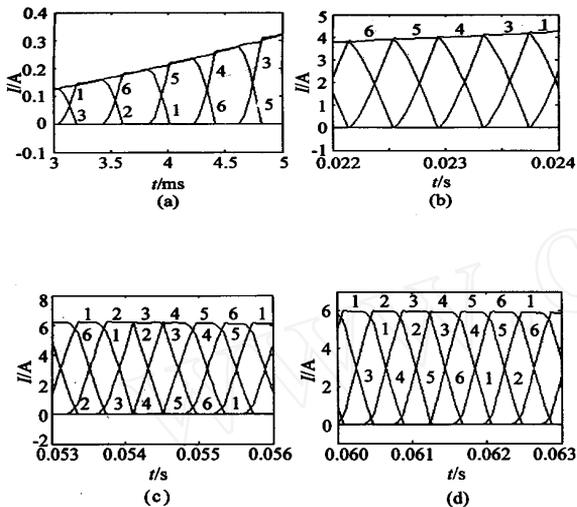


图6 无刷交流同步发电机整流器中的电流仿真波形  
Fig. 6 Simulation results of current in rectifier of BESG

在电机起励的过程中,整流器的各种工作方式都已出现,并可在各模式之间顺畅地转换,以上仿真结果由文献[5]中的实验验证无误。

### 参 考 文 献

- [1] 徐松. 同步发电机——机半导体整流系统的仿真研究[D]. 北京:清华大学,1991.  
(Xu S. Simulation research on synchronous generator —semi-conductor rectifier system [D]. Beijing: Tsinghua University, 1991.)
- [2] 龚春英. 旋转整流器式无刷发电机仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1993.  
(Gong C Y. Digital simulation study of rotating - rectifier brushless generator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1993.)

- [3] Otto Michael D, Otto D V. Computer simulation of electric motor drive systems including the power electronic network [J]. IEEE Trans on IA, 1992, 28(5):1072 - 1079.
- [4] 谢少军. 飞机交直交变频恒频电源系统的数字仿真[D]. 南京:南京航空航天大学,1995.  
(Xie S J. Mathematic simulation of aircraft DC link VSCF electrical power generating systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995.)
- [5] Lee B K, Ehsani M. A simplified functional simulation model for three-phase voltage source inverter using switching function concept [J]. IEEE Trans on IE, 2001, 48(2): 309 - 321.
- [6] 韦榕,许镇琳,王秀芝. 电气传动系统仿真的新工具——MATLAB5.2 电气系统模块库[J]. 电气传动,2000(1): 57 - 59.  
(Wei R, Xu Z L, Wang X Z. A new simulation tool for electric drive system—power system blockset of MATLAB 5.2 [J]. Electric Drive, 2000(1): 57 - 59.)
- [7] 顾毅康,胡育文. 在 MATLAB 中应用 PSB 进行电气传动系统混合仿真[J]. 电气传动自动化, 2001(增刊): 54 - 57.  
(Gu Y K, Hu Y W. Using PSB for mixed system simulation of electric drive in MATLAB [J]. Electric Drive Automation, 2001(sup):54 - 57.)

### 作者简介:



顾毅康(1975 - ) 男,江苏无锡人,南京航空航天大学硕士研究生,主要从事电气传动和数字控制方面研究,Email:jackey-gu-cn@yahoo.com。



胡育文(1944 - ) 男,江西樟树人,南京航空航天大学教授,博士生导师,硕士。1986年赴日本九州大学,1995、2001年赴澳大利亚新南威尔士大学访问。主要从事电机控制与电力电子方面研究,Email:huyuwen@nuaa.edu.cn。

(责任编辑:李铁柏)