

基于 MATLAB 的开关磁阻发电机系统的非线性建模与仿真

严加根,刘 闯,严 利,刘迪吉

(南京航空航天大学自动化学院,江苏 南京 210016)

摘要 在分析 SRG 数学模型的基础上,用 MATLAB/SIMULINK 软件建立了 SRG 系统的非线性仿真模型.该模型中的电机绕组模块、功率变换器模块、转子位置角度转换模块和电压控制模块都是通过 SIMULINK 中的某些模块搭建起来的,修改容易且直观性强.该模型稍加改变也可作为开关磁阻电动机驱动系统的仿真模型.仿真和实验对比结果表明,仿真结果能真实地反映 SRG 系统的实际工作状况.

关键词 开关磁阻发电机 建模 仿真;MATLAB/SIMULINK

中图分类号 TM301.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)01-0100-04

开关磁阻发电机(SRG)系统是一种在可靠性、容错性和高速性等方面具有综合优势且有很大发展潜力的新型电源系统^[1-3].但该系统为一非线性系统,用简单的线性模型或准线性模型去描述其动态和静态特性会存在较大误差^[4].要准确地描述 SRG 的动态和静态特性,必须在非线性数学模型的基础上对 SRG 系统进行一体化仿真.磁化曲线簇是分析开关磁阻电机各种性能的基础.文献[5-7]采用线性磁化曲线簇模型对开关磁阻电机进行了仿真,但得到的仅是开关磁阻电机的近似解.文献[8]利用 MATLAB/SIMULINK 中的某些模块和 M 文件建立了开关磁阻电机的非线性磁化曲线簇模型,但该模型仿真速度较慢.本文在分析 SRG 数学模型的基础上,用 MATLAB/SIMULINK 软件建立了 SRG 系统的非线性仿真模型.该模型不但仿真速度较快,而且修改容易、直观性强.

1 开关磁阻发电机系统的数学模型

SRG 可采用他励和自励 2 种工作模式.本文以自励模式为例来建立 SRG 的数学模型.自励模式的主电路采用不对称半桥形式.为简化起见,假设:(a)主开关管和续流二极管开通,无过渡过程关断,管子压降为零;(b)电机各相对称,相间互感忽略不计;(c)发电过程中电机转速保持恒定.

当主开关管导通时,电源经过主开关对绕组供电,电机吸收能量,这时 SRG 第 k 相绕组电压平衡方程式为

$$U_s = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \tag{1}$$

当主开关管关断时,电流循续流二极管向电容回馈,即进入发电状态,此时的电压平衡方程式为

$$-U_s = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \tag{2}$$

式中: U_s ——电机直流供电电压; R_k, i_k ——第 k 相绕组电阻和绕组电流; ψ_k ——第 k 相绕组磁链.

根据电磁场基本理论,电机转子的电磁转矩伴随磁场的存在而存在,并且可以表达为

$$T_{em} = - \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta} \right|_{\psi=c} \tag{3}$$

式中: W_{mag} ——磁能; θ ——转子位置角度; T_{em} ——电磁转矩; C ——常数.

因此,在每个周期工作过程中,始终存在电能、磁能和机械能之间的转换.

2 基于 MATLAB 的开关磁阻发电机仿真模型

本文以三相 12/8 结构 SRG 为例建立仿真模型,其中主电路采用不对称半桥结构.该仿真系统采用双闭环控制方案,即电流环由电流滞环调节器构成,电压环由 PI 调节器构成.图 1 为 SRG 非线性建模整体控制图.其中封装模块 (1) ~ (4) 分别为 SRG 的功率变换器模块、SRG 三相绕组模块、角度驱动转换模块和电流滞环控制模块.

2.1 功率变换器模块

功率变换器采用不对称半桥结构,所建立的仿真模块如图 2 所示.由于电机三相完全对称,故以其中的一个桥臂(A 相桥臂)为例来说明模块的构成. La+ 和 La- 分别接 A 组绕组的两端,PulseA 是主开关管 S1 和 S4 的逻辑控制信号,VD1 和 VD4 为续流二极管.该模块的功能就是搭建出不对称半桥结构的功率变换器,根据控制信号来控制主开关管的通断,从而使电机处于励磁状态或发电状态.

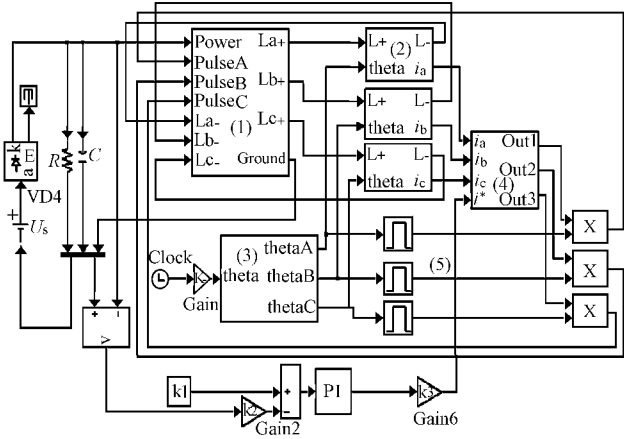


图 1 SRG 系统仿真框图

Fig.1 Block diagram for simulation of SRG system

2.2 开关磁阻发电机绕组模块

发电机绕组模型是整个模型的核心部分.本文利用方程 (1),(2)并结合 SRG 有限元仿真结果来建立该模型.如图 3 所示,由电路方程 (1),(2)可以导出

$$\frac{d\psi_k}{dt} = \pm U_s - i_k R_k \tag{4}$$

由于电机三相绕组对称,仍然以 A 相为例来说明.图 3 等效于 SRG 的 A 相绕组非线性 MATLAB 数学模型.其中绕组两端 La+,La- 分别接上下两个开关管,theta 接电机的位置信号.建立该绕组模型的关键是解算 $\pm U_s - i_a R_a$ 和瞬时电流值.其中 i_a 为 A 相绕组电流, R_a 为 A 相绕组电阻.由图 3 受控源模块(signal)特性可知,通过电压表可测出受控源两端的电压值(即 $\pm U_s - i_a R_a$).根据已知电机参数就可利用有限元场仿真计算出固定角度和固定电流所对应的磁链值,并可在 MATLAB 中形成一个关于角度、电流的磁链二维数组.对该数组用三次样条插值就可得到固定角度和固定磁链所对应的电流值.图 4 是由磁特性函数 $\psi_a(i, \theta)$ 反演的电流特性函数 $i_a(\psi, \theta)$ 的三维图形.运用二维查表(Look-up Table (Z-D))模块建立二维数组.二维数组以电机位置信号 theta 作为行输入向量,以磁链作为列输入向量,以电流作为输出向量.由于该绕组模型是根据方程 (4) 建立起来的,因而建模过程中不要求磁链对电流和角度的偏导,从而简化了建模过程.这也是采用 MATLAB 建模的优点之一.

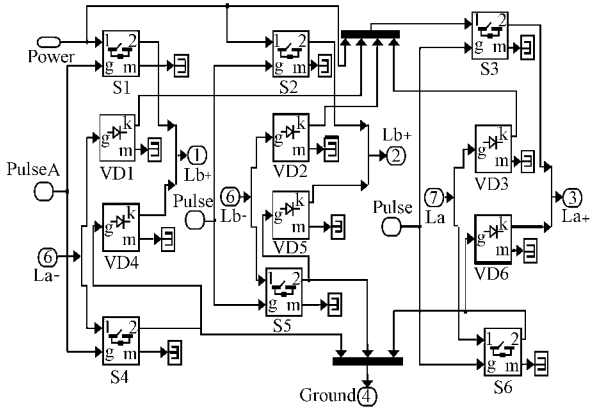


图 2 功率变换器模块仿真框图

Fig.2 Module of power converter of SRG

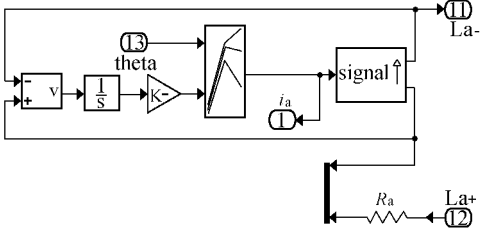


图 3 一相绕组模块仿真框图

Fig.3 Module of one-phase windings

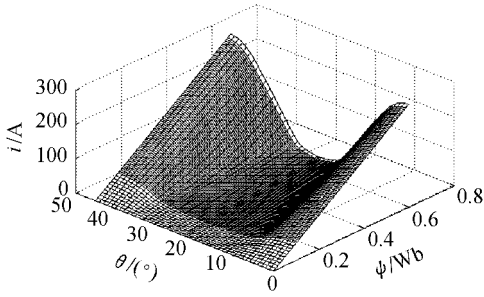


图 4 电流函数的三维曲线

Fig.4 Three-dimensional curve of current function

2.3 转子位置角度转换模块

转子位置角度转换模块用来产生各相的转子当前位置.如图 5 所示,以 12/8 结构开关磁阻电机为例,相电感周期为 45° ,A,B,C 三相各相差 15° 导通,所以在模型中采用了 45° 求余函数模块,即图中 $\text{rem}(u, 45)$ 模块.而模块(5)采用的是一维查表,该模块的功能是使用模块参数中定义的线性数值将输入映射到输出,从而确定仿真过程中的导通角和关断角.

2.4 电流滞环控制模块

模块(4)是电流滞环控制环节,它通过滞环实现相电流的两态斩波控制.当某相主开关管导通时,相电流从零开始上升,当相电流超过参考电流且偏差大于滞环比较器的环宽时,主开关管关断;当相电流低于参考电流且偏差大于滞环比较器的环宽时,主开关管重新导通.图 6 的 3 个输出信号与模块(5)的 3 个输出信号分别作为 3 个与门的输入,与门的输出作为三相驱动信号,即 2 个输出信号同时为高电平时主开关管导通.

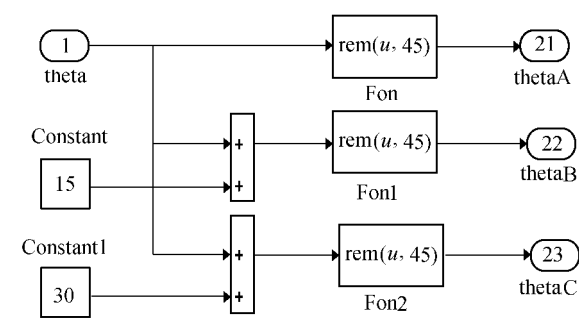


图 5 转子位置角度转换模块仿真框图

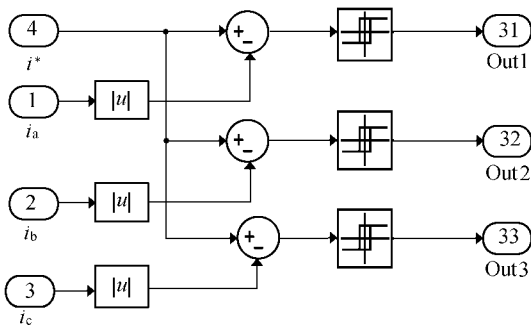


图 6 电流斩波模块仿真框图

Fig.5 Module of rotor position and angle conversion

Fig.6 Module of current chopping

由图 1 可以看出,系统中除有以上主要的几个模块之外,还有一个电压控制模块.为了与实验进行类比,PI 控制模块选择了离散的 PI 控制模块,并以折算后的参考电压与实际电压的差值作为输入量,输出量为三相电流的参考幅值.

3 仿真与实验结果

用上述非线性模型对 SRG 系统进行仿真.仿真所采用的定子齿极数为 12,转子齿极数为 8,定子相绕组电阻为 0.27Ω ,励磁电压为 200 V,开通角为 12° ,关断角为 35° ,负载电阻为 114Ω ,电机转速为 2965 r/min.实验平台是以 DSPTMS320LF2407A 芯片为控制核心搭建起来的,实验所采用的基本参数与仿真所采用的基本参数一致.由于仿真所得到的磁化曲线簇参数与实际电机参数之间有一定的偏差,并且插值也会产生误差,因此仿真与实验结果之间会有所差别.图 7 为实验样机的仿真和实验电流波形,电流传感器的比例系数为 10:1,电流波形及电流的幅值基本相同.从图 8 电容电压建立的波形可以看出,经过 0.2 s 左右的时间后,发电电压稳定在 270 V 上,电压纹波也比较小,电机具有良好的发电动态特性.从仿真和实验结果的对比中可以看出,采用本文非线性仿真模型,仿真结果能真实反映 SRG 系统实际工作状态.

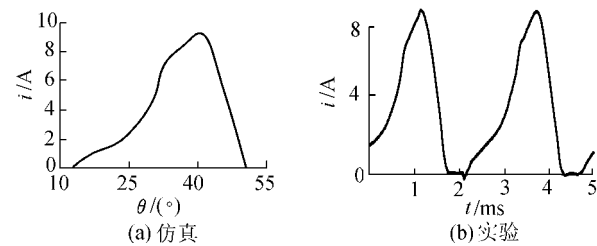


图 7 发电机的相电流仿真和实验波形

Fig.7 Simulated and test phase current graphs of generator

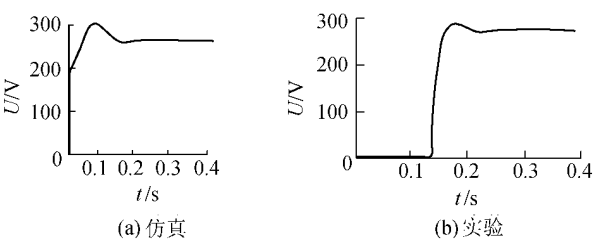


图 8 发电状态下仿真和实验的建压波形

Fig.8 Simulated and test voltage building graphs of SRG in power generating state

4 结 语

本文在分析 SRG 数学模型的基础上,用 MATLAB/SIMULINK 软件建立了 SRG 系统的非线性仿真模型.该模型中的电机绕组模块、功率变换器模块、转子位置角度转换模块和电压控制模块都是通过 SIMULINK 中的某些模块搭建起来的,修改容易且直观性强.在有限元场计算的基础上,通过对磁化曲线簇数据的预处理,反演出电流关于磁链和角度的函数,再利用二维查表模块实时地计算瞬时电流值,就可避免求磁链对电流和角度的偏导数的过程,从而可简化系统模型,缩短仿真时间.本文模型为 SRG 结构设计、控制参数优化等提供了一种有效手段.另外,本文模型稍加改变也可作为开关磁阻电动机驱动系统的仿真模型.

参考文献：

[1] 刘迪吉,曲民兴,朱学忠,等. 开关磁阻发电机[J]. 南京航空航天大学学报,2003,35(2) :109-115.
[2] WU Tao,ZHU Xue-zhong,LIU Di-ji. Research of Reinforced excitation scheme for the switched reluctance generator[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2002,15(4) :234-238.
[3] 朱学忠,刘闯,刘迪吉. 开关磁阻电机发电运行的角度位置控制[J]. 南京航空航天大学学报,2001,33(1) :64-67.
[4] 刘迪吉,张焕春,傅丰礼,等. 开关磁阻调速电动机[M]. 北京 机械工业出版社,1994 :56-72.
[5] CHRISTOPHE R,MORCOS M M. A simple model for switched reluctance motors[J]. IEEE Power Engineering Review,2000,20(Issue 10) :49-52.
[6] STIEBLER M,LIU Ke. An analysis model of switched reluctance machines[J]. IEEE Transactions On Energy Conversion,1999,14(4) :1100-1105.
[7] OSAMU I,TSUKASA K,KENJI N,et al. Dynamic simulation model of switched reluctance generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003,39(5) :3253-3255.
[8] SOARES F,BRANCO C P J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on matlab/simulink environment[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System,2001,37(3) :989-1009.

Nonlinear modeling and simulation of switched reluctance generator system based on MATLAB

YAN Jia-gen, LIU Chuang, YAN Li, LIU Di-ji

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Based on an analysis of the mathematical model of the Switched Reluctance Generator (SRG), a nonlinear simulation model of SRG was established in MATLAB/SIMULINK environment. In this model, the module of motor windings, the module of power converter, the module of rotor position and angle conversion, and the module of voltage controlling were built by SIMULINK. The model is clear in function and easy to be modified, and it can be used as the simulation model of Switched Reluctance Motor (SRM) by a little modification. Contrasted with the experimental result, the simulation result can reflect the real operation states of SRG.

Key words switched reluctance generator ; modeling ; simulation ; MATLAB/SIMULINK