

开关磁阻发电系统的非线性仿真

高 奇, 杨玉岗

(辽宁工程技术大学, 辽宁葫芦岛 125105)

摘要:采用开关磁阻发电机的非线性电感模型构建开关磁阻发电系统, 设计了带有修正因子的模糊控制器。修正因子随着电压偏差量的变化而变化, 不断改变偏差和偏差变化率的权重, 提高了系统的稳定性, 改善了动态性能。利用这个控制器对开关磁阻发电系统作电流斩波控制。仿真试验表明开关磁阻发电系统能够稳定地发出电压为 220 V 的直流电压。

关键词:开关磁阻发电机; 模糊控制; 修正因子; 非线性电感

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7018(2009)06-0012-03

Nonlinear Simulation of Switched Reluctance Generator

GAO Qi, YANG Yu-gang

(Liaoning Technology University, Huludao 125105, China)

Abstract: The system of switched reluctance generator with the nonlinear inductance model of switched reluctance generator was conceived and the fuzzy controller with the correction factor was designed. The error and its rate were constantly changed with correction factor constant changes. This improved the system stability and dynamic performance. The controller was used to do current chopper control of switched reluctance generator. The simulation showed that SRG power generating system could stably issue the voltage of 220 V (DC).

Key words: SRG; fuzzy control; correction factor; nonlinear inductance

0 引言

根据 SRG 的结构特点, 文献[1]将开关磁阻电机的电感进行傅里叶分解, 去掉三次以上的谐波得到较为精确的 SRG 非线性电感模型。本文以非线性电感模型为基础, 利用 MATLAB 仿真软件建立了开关磁阻发电系统的数学模型。

开关磁阻发电系统是由开关磁阻发电机 SRG、功率变换器与控制器组成的时变非线性系统, 采用传统的控制方法难以达到优良的性能。本文采用公式型模糊控制方法, 通过在线调整修正因子的方法, 可以克服 SRG 变参数、变结构和非线性等因素, 从而可以提高整个控制系统的鲁棒性。

1 开关磁阻发电系统的数学模型

1.1 非线性电感模型

SRG 的电感是有关角度和电流的一个非线性复杂方程式。考虑到实际的应用, 文献[1]中提出实际 SRD 的电感解析表达式为:

$$L(\theta, i) = L_0 + [(L_1 + L_3)[1 - \cos(N\theta - \varphi_0)] + L_2[\cos 2(N\theta - \varphi_0) - 1] +$$

$$L_3[\cos 3(N\theta - \varphi_0) - 1]] \frac{a_1}{a_1 + i}$$

根据文献[2-3]中的方法可得到本文研究的 3 kW、220 V、四相(8/6 极)SRG 的系数为: $L_0 = 0.022$ H, $L_1 = 0.150$ H, $L_2 = 0.025$ H, $L_3 = 0.014$ H, $a_1 = 2.78$ 。

1.2 SRG 的非线性数学模型

忽略铁心损耗及相间互感, 可得 SRG 数学模型^[3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_j}{dt} &= \frac{-Ri_j - \omega i_j \frac{\partial L_j(\theta, i_j)}{\partial \theta} + U_j}{i_j \frac{\partial L_j(\theta, i_j)}{\partial i_j} + L_j(\theta, i_j)} \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J}(T_e - D\omega - T_L) \end{aligned} \right\}$$

式中: $T_e = T_a + T_b + T_c + T_d$

各相非线性电感的表达式为:

$$\begin{aligned} L_j(\theta, i_j) &= L_0 + [(L_1 + L_3)[1 - \cos(N\theta - \varphi_0)] + \\ &L_2[\cos 2(N\theta - \varphi_0) - 1] + \\ &L_3[\cos 3(N\theta - \varphi_0) - 1]] \frac{a_1}{a_1 + i_j} \\ \frac{\partial L_j}{\partial \theta} &= [(L_1 + L_3)N_r \sin(N\theta - \varphi_0) - \\ &2L_2N_r \sin 2(N\theta - \varphi_0) - \\ &3L_3N_r \sin 3(N\theta - \varphi_0)] \frac{a_1}{a_1 + i_j} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L_j}{\partial i} = \left\{ (L_1 + L_3) [1 - \cos(N, \theta - \varphi_{0j})] + L_2 [\cos 2(N, \theta - \varphi_{0j}) - 1] + L_3 [\cos 3(N, \theta - \varphi_{0j}) - 1] \right\} \frac{-a_1}{(a_1 + i_j)^2}$$

式中： $\varphi_{0j} = \begin{cases} 0 & j=1 \\ \frac{\pi}{2} & j=2 \\ \pi & j=3 \\ \frac{3\pi}{2} & j=4 \end{cases}$

非线性转矩：

$$T_j = a_1 [i_j - a_1 \ln(a_1 + i_j) + a_1 \ln a_1] [(L_1 + L_3) N \cdot \sin(N, \theta - \varphi_{0j}) - 2L_2 N \cdot \sin 2(N, \theta - \varphi_{0j}) - 3L_3 N \cdot \sin 3(N, \theta - \varphi_{0j})]$$

1.3 基于 MATLAB 的开关磁阻发电系统仿真模型

根据上述 SRG 非线性数学模型,利用 MATLAB 仿真软件建立开关磁阻发电系统仿真模型,如图 1 所示。

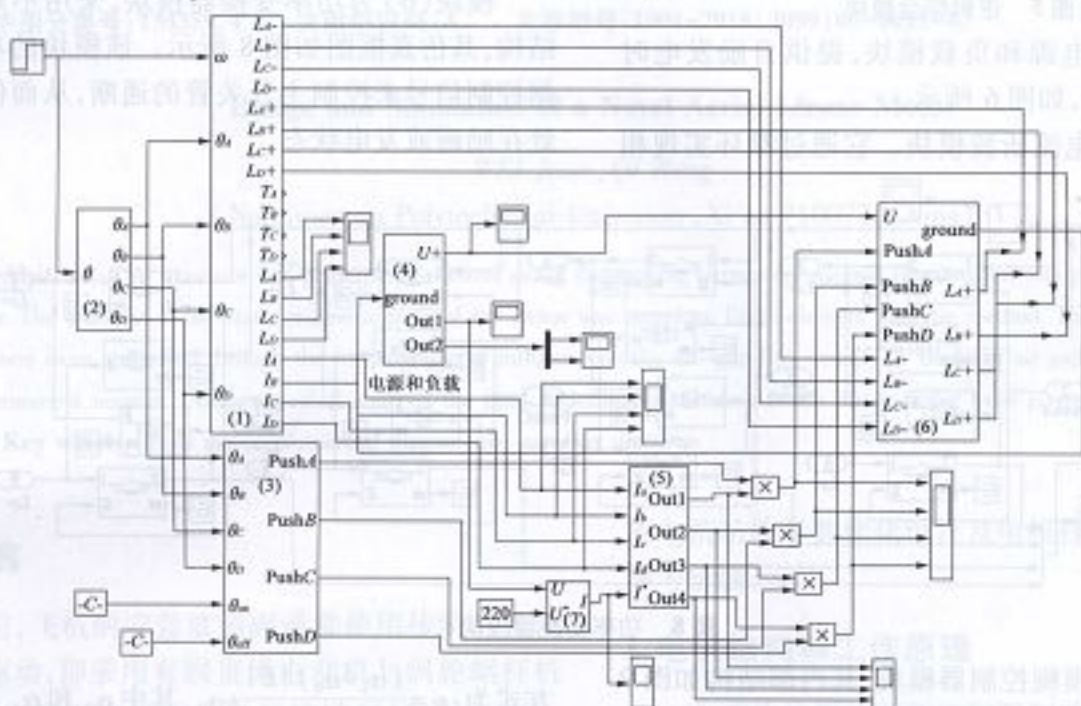


图 1 SRG 发电系统非线性仿真模型

模块(1)为根据 SRG 非线性数学模型所建立的四相电感模型,其子系统如图 2 所示。

相模型如图 3 所示。

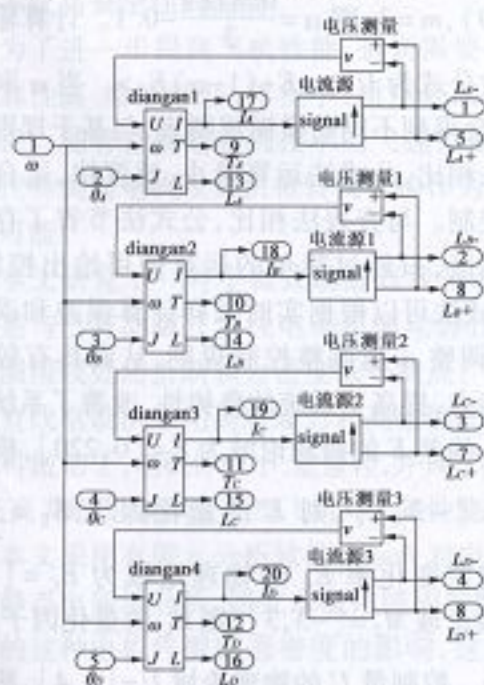


图 2 SRG 的四相电感仿真模型

其中 diangan1 ~ diangan4 四个模块为根据各项非线性电感表达式所建立的非线性电感模型,其—

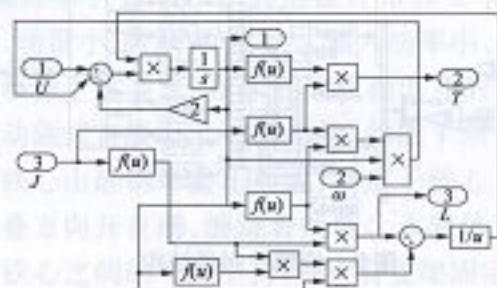


图 3 SRG 一相电感仿真模型

模块(2)为角度转换模块,其作用为产生各相转子的当前位置,如图 4 所示。对于 8/6 结构的开关磁阻发电机,相电感周期为 60°,A、B、C、D 各相相差 15°,所以在模型中采用了 60°求余函数模块。

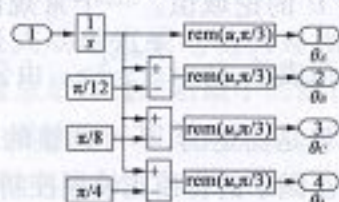


图 4 转子位置角度转换模块仿真框图

模块(3)为逻辑综合模块,如图 5 所示,其作用为根据各相转角位置决定各相脉冲次序。其中的 S

-Function 为用 M 文件表述的 S 函数。

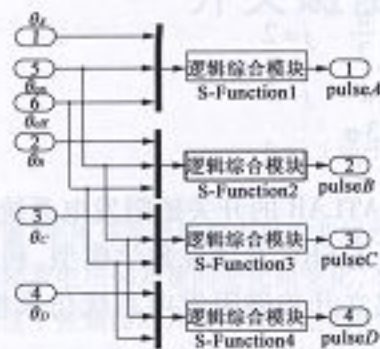


图5 逻辑综合模块

模块(4)为电源和负载模块,提供自动发电时所需的励磁电压,如图6所示。

模块(5)为电流斩波模块。它通过滞环实现相

电流的两态斩波控制,如图7所示。

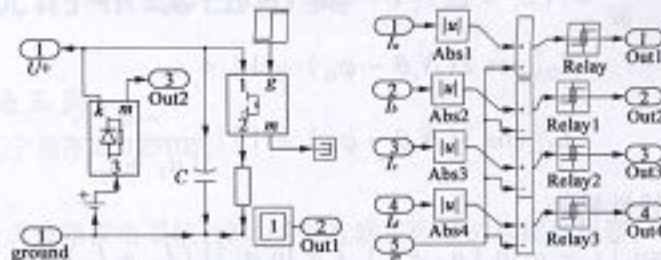


图6 电源与负载
模块仿真框图

图7 电流斩波
模块仿真框图

模块(6)为功率变换器模块,采用不对称半桥结构,其仿真框图如图8所示。该模块的功能为根据控制信号来控制主开关管的通断,从而使发电机处在励磁或发电状态。

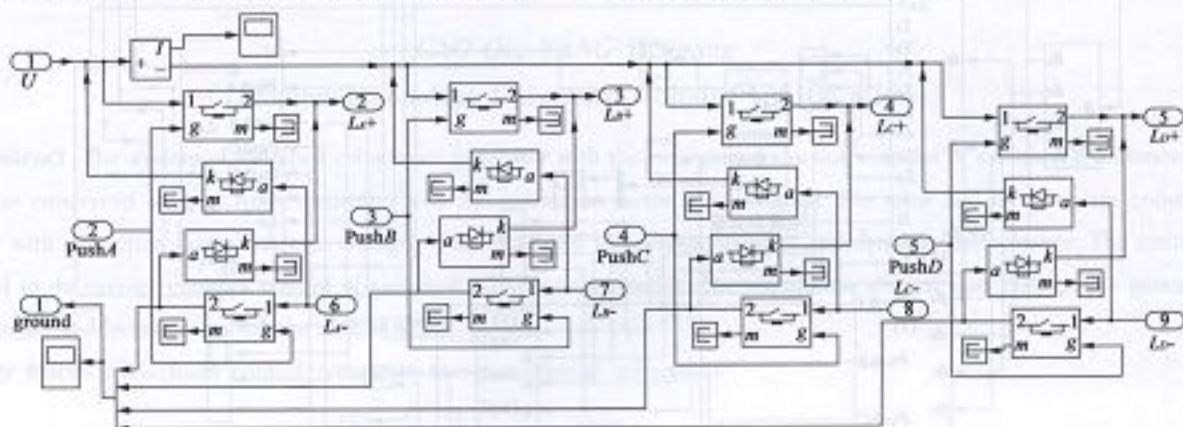


图8 功率变换器模块

模块(7)为模糊控制器模块,其内部结构如图9所示。基本的模糊控制算法主要有三种:基于规则

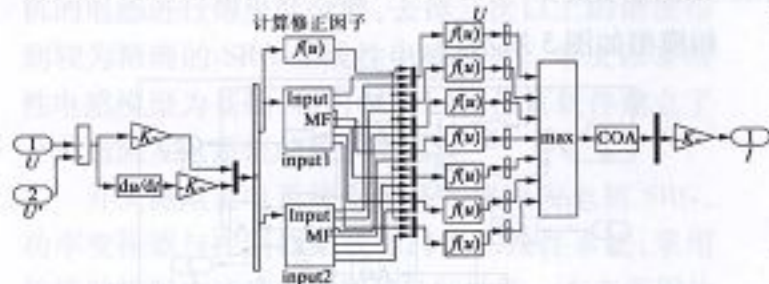


图9 模糊控制器结构

的模糊推理法、查表法和公式法。公式法是根据查表法发展而来的。在使用控制表的模糊控制系统中,控制表本身就是控制规则的一种表示形式,它反映了系统偏差与偏差变化率对输出控制量的作用关系,并可直接根据偏差 E 和偏差变化率 E_c 的论域值得出控制量 U 的论域值。一个常规的控制规则表可由下式近似表示:

$$U = \langle \frac{E + E_c}{2} \rangle$$

由公式可知,常规的控制规则表是固定的,不可调整的。而本文采用的是带有修正因子的自校正模糊控制器。其模糊论域 $E = E_c = U = [-3, 3]$,模糊子集数取为 $2m + 1 = 7$ 个,并用模糊数 $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ 表示。隶属函数采用高斯函数。其加权因子 α 随偏差 E 的变化

方式为: $\alpha = \frac{(\alpha_0 - \alpha_1) |E|}{m} + \alpha_0$, 其中 α_0 和 α_1 为修正因子变化范围 $\alpha \in (0, 1)$, E 为偏差。此规则可以使修正因子 α 与系统误差成线性插入关系。本文取 $\alpha \in (0.1, 0.9)$, $m = 3$, 则 $\alpha = \frac{0.8 |E|}{3} - 0.1$ 。计算输出 U 的模糊数公式为 $U = \langle \alpha E + (1 - \alpha) E_c \rangle$ 。当 α 取不同值时,就会得到不同的模糊规则表,与基于规则的模糊推理法相比,公式法运算量小、速度快,适合于微机实时控制。与查表法相比,公式法节省了存储表格的存储区,只经过简单的运算便可给出控制量。另外,公式法可以根据实时采样计算误差和误差变化,通过调整 α 值调整控制规则,从而具有较强的自适应能力,提高了系统的鲁棒性,改善了系统的动态性能。偏差 E 的物理论域为 $E = [0, 220]$,模糊论域为 $M = [-3, 3]$, 则 E 的量化因子 $K_E = \frac{2m}{220} = 0.027$, 偏差变化率 E_c 的物理论域为 $E_c = [-50, 50]$, 模糊论域 $M_2 = [-3, 3]$, 则 E_c 的量化因子 $K_{E_c} = \frac{3}{50} = 0.06$ 。控制量 U 的物理论域 $U = [2, 4]$, 所以比

例因子 $K_U = \frac{4-2}{3} = 0.67$ 。

(下转第25页)

(上接第14页)

2 仿真结果

仿真中,转速初始值为1500 r/min,在0.3 s时转速变为1400 r/min,可见,此时电压在短暂的波动后立刻恢复到稳态值。开通角 $\theta_{on} = 28^\circ$,关断角 $\theta_{off} = 42.5^\circ$ 。发电电压波形如图10所示。与图11的普通PID控制方法的发电电压相比,控制效果良好。



图10 发电电压波形



图11 PID控制方法的电压新波波形

3 结 语

本文提出了在以开关磁阻发电机的非线性电感模型为基础的开关磁阻发电系统中,采用带有修正因子的模糊控制方法,在误差 E 改变的同时,修正因子也随之改变,不断调整 K 和 K_c 的权重,可获得比固定模糊规则的模糊控制器更好的控制效果。

参考文献

- [1] 杨玉岗,姚若萍,姚安,等.开关磁阻电动机动态性能的研究[J].清华大学学报(自然科学版),1997,37(9):82-85.
- [2] 王平.开关磁阻电动机零性的非线性仿真分析[J].北京印刷学报,2001,9(4):16-29.
- [3] EMiler T J. Optimal Design of Switched Reluctance Motors[J]. IEEE Trans. on IE, 2002, 49, 15-27.
- [4] 王安华.开关型磁阻电动机调速控制技术[M].北京:机械工业出版社,1995.