

基于 Simplorer 的三相开关磁阻 起动/发电系统建模研究

梁得亮, 丁文, 程竹平

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在分析开关磁阻起动/发电系统(SRS/G)运行机理的基础上,提出了一种基于 Ansoft/Simplorer 的 SRS/G 系统建模方法.该方法利用 Simplorer 的电路元件库搭建 SRS/G 的功率变换器及其外围电路,根据 SRM 小信号分析模型进行比例积分(PI)参数整定和参数优化,电机起动时采用转速外环 PI 调节加内环电流斩波、发电时采用电压外环 PI 调节加内环变开通角的控制策略对 SRS/G 系统进行了仿真分析.仿真结果与样机试验结果的比较验证了模型的正确性.该模型修改容易、直观性强,便于对不同的控制策略进行特性分析,为研究和设计 SRS/G 控制系统提供了一种有效的工具.

关键词: 开关磁阻起动/发电系统;功率变换器;建模;比例积分参数

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1210-04

Modeling for Three-Phase Switched Reluctance Starter/Generator System

Liang Deliang, Ding Wen, Cheng Zhuping

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the principle of switched reluctance starter/generator(SRS/G), a method for modeling SRS/G system is proposed, where the power inverter of SRS/G and its circuit are constructed with circuit components, and PI parameters are adjusted and optimized following the SRM small signal model. The variation parameters speed PI control and the current chop control are used when SRM operates in the starting state, whereas the variation parameters voltage PI control and angel position control are used in case of generator. Simulation and experimental results are compared to demonstrate the validity of the modeling method, which enables clearly to modify and analyze the different control strategies to offer one kind of effective tool for SRS/G control system.

Keywords: switched reluctance starter/generator; power inverter; modeling; PI parameter

开关磁阻电机(SRM)既可作为电动机运行,也可作为发电机运行,理论和实践表明,通过功率变换器和控制器的分时协调配合,SRM可以方便地对电动和发电状态进行切换,将励磁功能和发电功能合二为一.因此,基于开关磁阻电机的起动/发电系统(SRS/G)作为一种新型电源装置,逐渐成为航空航

天、电动汽车等领域的重要研究方向.国内外对 SRS/G 的研究主要是应用于飞机的供电系统^[1].

虽然 SRS/G 是一种具有综合优势且有很大发展潜力的新型电源系统,但是由于 SRM 采用双凸极铁心结构,其相电感和转矩是转子位置角和相电流的非线性函数,从而使 SRS/G 成为一个高度非线性

性的系统.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,要准确地描述 SRS/G 的动态和静态特性,必须在非线性模型的基础上对 SRS/G 进行一体化建模仿真.目前,SRM 建模方法大致分为两类,一类是基于电路的仿真语言实现的系统建模方法,另一类是基于微分方程的仿真或电力电子器件模块实现的建模方法^[2-4].

本文借助于 Ansoft/Simplorer 软件建立用于 SRS/G 系统性能仿真分析的模型,通过仿真与试验结果的比较验证了该模型的正确性,为进行不同控制策略下的 SRS/G 性能分析提供了一种新的思路.

1 SRS/G 运行机理

SRM 的电磁转矩是磁阻转矩,其转向与相绕组的电流方向无关,仅取决于相绕组通电顺序.磁路饱和引起的非线性是 SRM 的一个重要特征,因此电磁转矩必须根据储能或磁共能来计算

$$T(\theta,i) = \partial W'(\theta,i) / \partial \theta \tag{1}$$

式中: θ 为转子位置角; $W'(\theta,i)$ 为磁共能; i 为相绕组电流.可见磁共能 $W'(\theta,i)$ 的变化取决于转子位置角和绕组电流的瞬时值.由于磁路的非线性,式(1)的求解是比较复杂的,难以推导表述为解析形式.在对 SRM 性能作定性分析时,若忽略磁路的非线性,则式(1)可简化为

$$T(\theta,i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \tag{2}$$

式中: L 为任意转子位置角下的相电感.

图 1 为理想线性假设下的相电感、电动和发电状态下的相电流及其转矩随转子位置角的变化曲线,电机每旋转一周,相电感变化的周期数等于转子的极对数,周期长度等于转子极距.

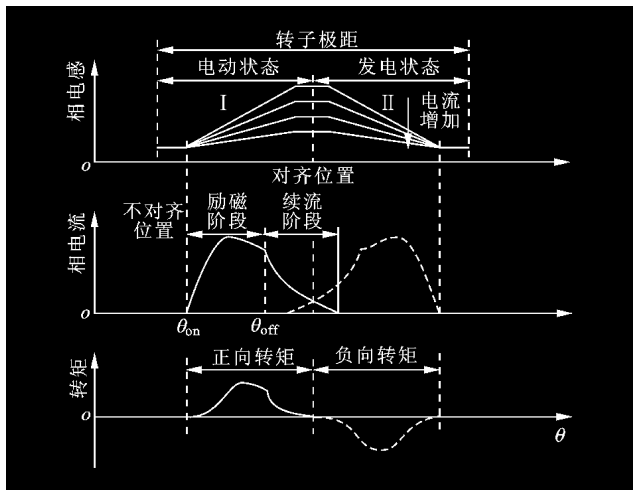


图 1 相电感和相电流及转矩随转子位置的变化曲线

一般地,当相电流处于 $\partial L / \partial \theta > 0$ 时,SRM 产生正转矩,电机吸收电能,称之为励磁阶段;当相电流处于 $\partial L / \partial \theta < 0$ 时,SRM 产生负向转矩,相电流向母线回馈能量,电机工作在制动或发电状态.因此,只要根据转子位置来控制主开关通断角度,以改变相电流的大小和波形,就可以控制电机运行于电动还是发电状态.

SRM 的相电压平衡方程式为

$$U = Ri + \frac{d\Psi(i,\theta)}{dt}; -U = Ri + \frac{d\Psi(i,\theta)}{dt} \tag{3}$$

式中: U 为相绕组电压; R 为相绕组电阻; Ψ 为相绕组磁链.

2 SRS/G 系统建模

根据表 1 中的额定参数及结构参数设计 SRM,并利用 Ansoft/RMxpert 得到相应的电机模型.

表 1 SRM 样机额定数据及结构参数

额定功率/kW	0.55	定子轭高/mm	11
额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	1 500	转子轭高/mm	10
定子外径/mm	120	定子极弧/(°)	30.0
转子外径/mm	59.5	转子极弧/(°)	32.4
气隙/mm	0.25	铁心长度/mm	65

功率变换器系统模型利用 Simplorer 中的电路元器件模块连接即可,其中开关管选用 IGBT,续流二极管直接选取二极管模块,按照系统的连接方式进行连接即可,功率变换器采用不对称半桥结构.

根据以上建立的各个模块,可以组成整个 SRS/G 系统的仿真模型.图 2 为利用 Simplorer 软件建立的 SRS/G 系统仿真模型.电机起动时, S_1 、 S_4 闭合, S_2 、 S_3 断开;电机转速达到发电怠速时,系统转入发电运行, S_1 、 S_4 断开, S_2 、 S_3 闭合.

3 系统控制策略分析

为了使 SRS/G 系统获得良好的性能,需要在整个运行过程中,对电机采用多种不同的控制策略.在电机起动过程中,为了让电机起动之后快速达到系统所需的发电怠速,并能在该转速稳定运转,需要对系统采用转速调节;为了使电机运行在恒转矩范围,并保证功率桥在安全范围之内工作,需要对电流进行相应控制.所以,对于起动状态采用转速外环加电流内环的双闭环控制结构.

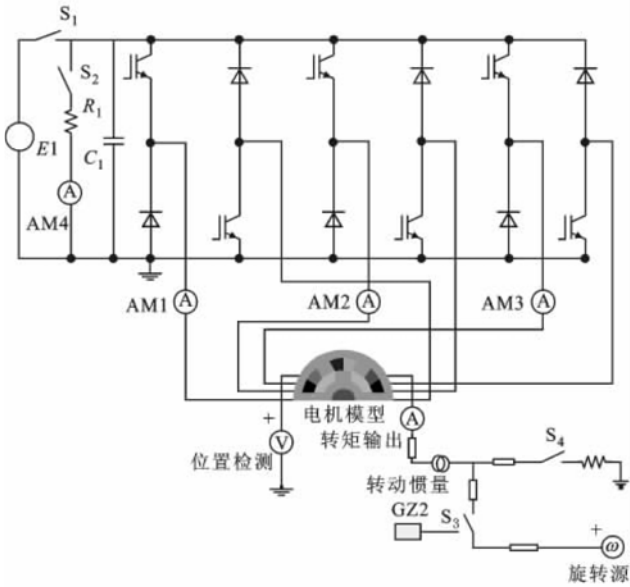


图2 SRS/G系统模型

当SRS/G系统达到要求的转速、成功切换到发电状态之后,为了使电机在正常运转及故障情况下,其输出电压都能稳定于要求的幅值,需要对系统采用电压比例积分(PID)调节。由于针对SRM的所有控制都是在对IGBT进行控制的基础上实现的,所以在电压控制的同时,还必须加上内环电流控制。为了在各运行转速下,使电机达到更高的功率效率,还需要对电机的开通关断角进行优化,来实现角度位置控制(AP)控制。所以,一般对于发电状态采用电压外环加内环变角度的双闭环控制结构。因此,SRS/G无论是处于电动状态还是发电状态,其控制策略都包括外环和内环。

3.1 外环PI控制

3.1.1 SRM小信号模型分析 SRM具有高度的非线性,这就带来了系统整体控制性能分析的困难。可以考虑利用小信号扰动法对非线性的SRM进行局部线性化^[5],这样简化了运算难度,使得线性控制理论可以得到继续应用。

为了得到小信号模型,首先假设在稳态工作点周围,输入参考信号的改变量和负载扰动都很小。在这样的小信号分析中,可认为系统在稳态工作点附近是线性的,系统机械运动方程为

$$\dot{\omega} = -\frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J} \left[\sum_{j=1}^{N_m} T_j - T_L \right] \quad (4)$$

将式(4)在系统稳态工作点附近作泰勒展开,并忽略所有高次项,得到

$$\dot{\omega} = f(i_0) + \frac{\partial f}{\partial i} \bigg|_{i_0} (i - i_0) \quad (5)$$

$$f(i) = -\frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J} \left[\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - T_L \right] \quad (6)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{\partial f}{\partial i} \bigg|_{i_0} (i - i_0) = \frac{1}{J} \frac{dL}{d\theta} i_0 \Delta i \quad (7)$$

式中: i_0 为稳态电流。一般来说,可以假设速度外环带宽至少比电流内环小一个数量级,所以基于设计上的考虑,电流内环可以被看作是理想的,并用一个单位增益传递函数来表示,因此双闭环系统如图3所示。

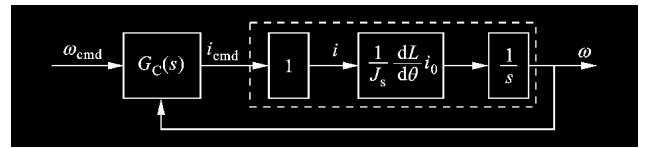


图3 双闭环反馈系统框图

3.1.2 参数整定 小信号模型的建立,为PID参数的公式方法整定提供了可能的途径。由于外环PID控制的传递函数

$$G_C(s) = k_p + k_i/s + k_d s \quad (8)$$

则系统的开环传递函数 $G(s) = G_C(s)G_P(s)$ 为

$$G(s) = \frac{i_0}{J} \frac{dL}{d\theta} \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s^3} \quad (9)$$

该传递函数是设计外环PID控制器所必须的。定义使 $G(s)$ 增益为1的频率为跨越频率,则在跨越频率,为使得闭环反馈系统稳定,由开环传递函数引起的相延迟必定小于 180° 。选取合适的跨越频率 ω_0 、相补角 φ_0 ,式(8)可以写成

$$\left| \frac{i_0}{J} \frac{dL}{d\theta} \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s^3} \right|_{s=j\omega_0} = 1 \quad (10)$$

$$\angle \frac{i_0}{J} \frac{dL}{d\theta} \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s^3} \bigg|_{s=j\omega_0} = -180^\circ + \varphi_0 \quad (11)$$

设定 k_i/k_p 比例,即可以由上两式得到 k_p 、 k_i 、 k_d 各参数。

3.1.3 变参数PI调节 系统能以预期的效果运行往往得益于对各控制参数的选择。 k_p 取值小了容易产生偏移,取值大了则会引起振荡,过高的 k_i 值同样也会引起系统的振荡和不稳定。

针对不同的运行阶段, k_p 、 k_i 的取值也有不同的要求。当参考值改变时,系统需要一个大输入控制量以求达到快速响应。为了产生大输入控制量,要求PI调节器具有大 k_p 、小 k_i 的特性。当系统达到要求值之后,为了防止超调并减小静态误差,此时又要求PI调节器具有小 k_p 、大 k_i 的特性。因此,PI参数可

以用以下的方式表示为位置或转速的误差 e 的函数

$$k_p = k_{p,\min} + \frac{k_{p,\max} - k_{p,\min}}{e_{\max}} e \quad (12)$$

$$k_i = k_{i,\max} - \frac{k_{i,\max} - k_{i,\min}}{e_{\max}} e \quad (13)$$

可以看出, k_p 、 k_i 可以在一定的范围内随系统输入误差 e 的变化作出即时调整,更好地满足系统的动态控制要求。

3.2 内环控制

SRS/G 的可控元件只有主开关管,因此系统控制中所有变量的控制,包括起动状态的转矩、转速及发电状态的电压、功率,都将通过在内环控制中控制电流上下限、主开关管的开关频率或占空比以及开关管的开通关断角来实现。相应地,SRS/G 的内环控制方法有电流斩波控制(CC 控制)、电流 PWM 控制及角度位置控制(AP 控制)。本文选择起动时 CC 控制和发电时 AP 控制的策略。

3.3 起动状态控制模式

当 SRS/G 处于起动状态时,采用外环速度闭环调节加内环 CC 控制。实时转速信号 ω 和给定转速信号 ω_{cmd} 比较,产生偏差信号,经速度环的 PI 调节,其输出作为电流环的输入 I_{cmd} 和相电流信号比较,所得信号经滞环比较器滞环控制,实现斩波控制。

3.4 发电状态控制模式

当 SRS/G 处于发电状态时,采用外环电压闭环调节加内环 AP 控制。电压采样信号 U 和给定电压信号 U_{cmd} 比较,产生偏差信号,经电压环的 PI 调节,其输出作为变角度控制的输入开通角 θ_{on} ,从而控制开关管的开通关断实现 AP 内环控制。

3.5 位置信号检测

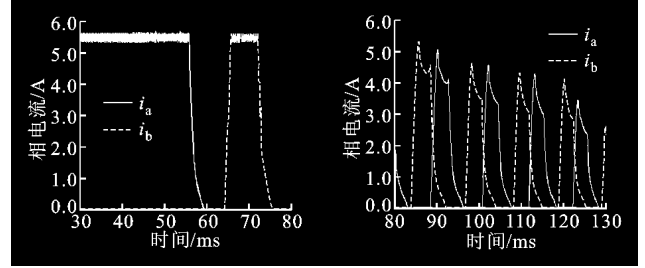
为使电机正常运转,还需要进一步设置电机的换相顺序。模型中使用状态机使电机成功实现换相。在外部设定了系统运行时的各初始值之后,状态机按照给定的开通、关断角,顺序开通及关断各相,从而实现系统的连续正常运转。

4 SRS/G 系统仿真与试验

当系统起动时,采用内环 CC 控制,设置开通角 $\theta_{\text{on}}=0^\circ$,关断角 $\theta_{\text{off}}=30^\circ$,转速给定值 $\omega_{\text{cmd}}=1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,斩波上限 $i_1=5.6\text{ A}$,斩波下限 $i_2=5.4\text{ A}$,起动电压 $U=200\text{ V}$,得到起动时电流波形如图 4 所示。其中图 4a 为斩波作用下两相电流波形,图 4b 为斩波之后这两相起动电流变化趋势波形。

在系统发电时,采用内环变开通角度控制,设置

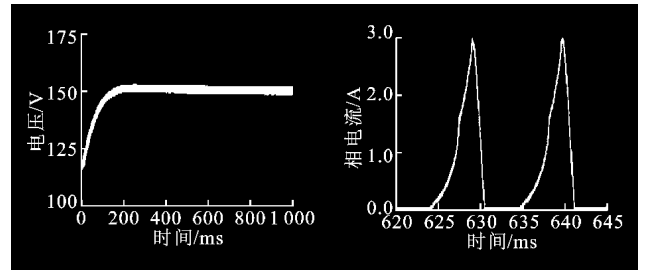
输出电压给定值 $U_{\text{cmd}}=150\text{ V}$,负载电阻 $R_1=132\ \Omega$,转速源运行转速 $\omega=1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,设置 $\theta_{\text{off}}=66^\circ$,电容 C_1 初始电压 $U=120\text{ V}$ 。图 5 为发电状态下的发电电压和电流波形。



(a)斩波波形

(b)起动电流变化趋势

图 4 起动状态仿真电流波形

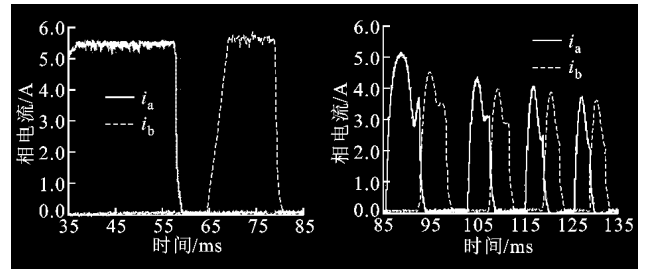


(a)电压波形

(b)电流波形

图 5 发电状态仿真电压电流波形

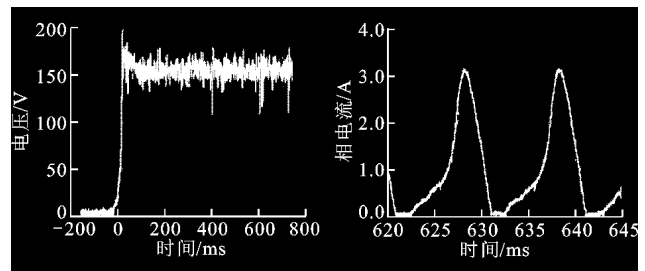
为了验证本文所建 SRS/G 系统模型和仿真方法的正确性,对 SRM 样机进行了试验。图 6 为与图 4 参数相同条件下的起动试验波形,图 7 为与图 5



(a)斩波波形

(b)起动电流变化趋势

图 6 起动状态实测电流波形



(a)实测电压波形

(b)实测电流波形

图 7 发电状态下实测电压电流波形

参数相同条件下的发电试验波形,从图中可以看出,仿真与试验波形吻合很好,从而验证了本文所建模型和所采用控制策略的正确性。

5 结 论

(1)在分析 SRS/G 运行机理的基础上,利用 Simplerer 软件建立了 SRS/G 系统的仿真模型,该模型修改容易、直观性强。

(2)采用 SRM 小信号分析模型对 PI 参数进行整定和优化,在电机起动时采用外环转速 PI 调节加内环电流斩波控制,在电机发电时采用外环电压 PI 调节加内环变开通角控制,对 SRS/G 起动和发电状态进行了仿真分析,通过与实测数据的比较验证了这种建模方法的正确性。

(3)基于 Simplerer 的 SRS/G 系统模型可以很方便地对控制策略进行修改,从而进行不同控制策略的研究。

参考文献:

- [1] 李声晋, 卢刚, 马瑞卿, 等. 开关磁阻组合起动机/发电机设计及试验[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2):10-14.
 - [2] 李声晋, 励庆孚, 卢刚. 开关磁阻发电系统数学建模[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4): 1-6.
 - [3] Soares F, Costa Bran P J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3):989-1009.
 - [4] 刘震, 林辉, 徐敏. 多电飞机开关磁阻发电系统的数字仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 3070-3073.
 - [5] Hossain S A. Modeling and four quadrant control of a sensorless switched reluctance motor driven actuator system[D]. Akron, USA: University of Akron, 2002.
- (编辑 杜秀杰)