

基于实测磁链特性的开关磁阻电动机仿真研究

张宏达, 宋建成, 曲兵妮, 梁涛

(太原理工大学, 山西太原 030024)

摘要:采用间接法对一台三相 12/8 极开关磁阻电动机静态特性进行测量。根据实测磁链特性, 建立了电动机的非线性数学模型, 设计了开关磁阻电动机调速系统的控制策略和控制算法, 并在 Matlab/Simulink 环境下对系统的动态特性进行仿真。仿真结果与有限元分析结果基本吻合, 反映了电动机的实际工作特性, 为开关磁阻电动机调速系统的进一步分析和研发提供参考。

关键词:开关磁阻电动机; 磁链特性; 测量; 仿真; 非线性

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-7018(2009)06-0009-03

Simulation for Switched Reluctance Motor Based on the Measured Flux Linkage Characteristic

ZHANG Hong-da, SONG Jian-cheng, QU Bing-ni, LIANG Tao

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The static characteristics of a 3-phase 12/8 switched reluctance motor (SRM) were measured with indirect method. Based on the measured flux linkage characteristic, the SRM nonlinear mathematical model was set up in Matlab/Simulink environment, and the control strategy and algorithm of switched reluctance drive (SRD) were developed. The simulation results were in accord with the results of finite-element analysis and reported the work status of SRM, and could also provide references for the further analysis and design of SRD.

Key words: switched reluctance motor; flux linkage characteristic; measure; simulation; nonlinear

0 引言

开关磁阻电动机(以下简称 SRM)具有结构简单、容错性强、工作可靠和效率高等优点, 已经在工业、家用电器、航空航天等许多领域得到了应用。为了获取较大力矩, 电机的导磁磁路通常被设计得较为饱和, 这样就难以建立参数化、解析化数学模型, 无法对其系统性能进行准确预估^[1]。由于磁链特性是电机数学模型的重要组成部分, 因此, 获得磁链特性并建立准确的数学模型是实现系统高性能控制的首要任务。

磁链特性的测量可分为直接法和间接法。文献[2]采用硬件积分器的直接磁链测量法, 这种方法受硬件积分器精度的影响, 测量误差大; 文献[3]采用测量电压和电流的方法间接计算出磁链特性, 但需要一个较大容量的直流电源。文献[4]采用电容放电的方法, 必须使用能够承受反向电压的大电容。文献[5]利用霍尔电压传感器采集电压数据时, 因传感器响应时间较长而存在一定的测量误差。

本文对电容放电电路进行了改进, 用示波器间

接测量了开关磁阻电动机的静态磁链特性和静态转矩特性; 基于实测磁链特性, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了开关磁阻电动机调速系统(以下简称 SRD)仿真模型, 并进行了动态和稳态仿真。

1 SRM 静态特性的测量

1.1 检测原理

将 SRM 的转子固定在某一位置, 即转子的位置角 θ 不变时, 一相绕组的磁链表达式:

$$\psi(t) = \int_0^t [u(t) - Ri(t)] dt + \psi(0) \quad (1)$$

将式(1)离散化, 得:

$$\psi(k) = \sum_{i=1}^N [u(k) - R_s i(k)] T_m + \psi(0) \quad (2)$$

式中: T_m 为采样时间间隔; $\psi(0)$ 为磁链初始值; R_s 为定子电阻; $u(i)$ 为绕组电压; $i(k)$ 为绕组电流。

由于 SRM 内无永磁体, 磁链初始值可近似为零。若已知一相绕组电阻值, 则在 0 到 t 时间内, 对相电压和相电流进行采样, 利用式(2)积分得到磁链值, 从而得出磁链-电流的关系曲线。

由磁共能增量可求得转矩, 即:

$$T = \frac{\partial W_m(i, \theta)}{\partial \theta} \bigg|_{i=\text{const}} = \frac{\partial \int_0^i \psi(i, \theta) di}{\partial \theta} \quad (3)$$

式中: $W_m(i, \theta)$ 为磁共能; $\psi(i, \theta)$ 为磁链特性。

1.2 实验方法与步骤

本实验将充电电容通过相绕组放电,检测相电压和相电流,用数值计算的方法得到磁链特性。被测样机为一台三相 12/8 极开关磁阻电动机。实验设备包括数字示波器、上位机、分度头、夹紧装置、电阻、电容、二极管等。图 1 为检测磁链特性的电路原理图,具体的实验步骤如下:

(1) 首先向被测 SRM 相绕组通入几次短暂的较小的直流电流,确保该相处于对齐位置,然后用分度头将转子定位,该位置也作为测试的起点;

(2) 闭合开关 S1,电容 C 充电至所需的初始电压值;

(3) 断开开关 S1 的同时闭合 S2,电容 C 开始在被测相绕组上放电。与此同时,示波器分别记录电流采样电阻 R_1 和电压采样电阻 R_2 上的电压值,并将记录数据传送到上位机;

(4) 上位机将接收数据进行数字滤波并保存;

(5) 松开夹紧装置,用定位装置将转子移位 2° ,再将其夹紧固定在此新的位置上,重复上述步骤 (2)~(4),获取样机在不同转子位置下相电压和相电流数据组。

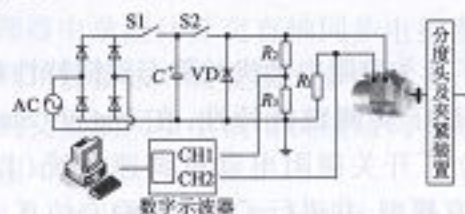


图1 磁链特性检测电路示意图

1.3 实验结果

对上位机保存的相电压和相电流数据组进行数据转换,用式(2)在 Matlab 环境下计算并拟合曲线,得磁链-电流-位置关系曲线,即磁链特性,如图 2 所示。再由式(3)计算出转矩-位置-电流关系曲线,即转矩特性,如图 3 所示。

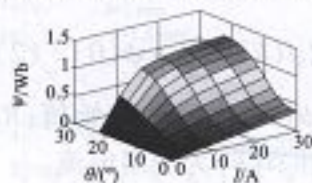


图2 磁链特性

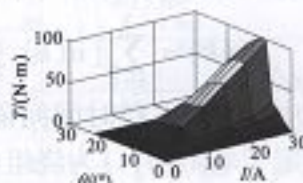


图3 转矩特性

从图 2 中可以看出,当定子凸极与转子槽对齐时,磁链和电流基本呈线性关系;当定子凸极与转子凸极对齐,电流较小时,磁链和电流基本呈线性关系,而电流较大时,磁链高度饱和。

从图 3 中可以看出,当转子位置固定时,相电流越大,则转矩值越大;当相电流一定时,转子凸极的前沿与定子凸极的后沿对齐时,转矩值最大。

2 SRD 调速系统的非线性仿真

为了认识和分析被控对象,验证控制策略与控制算法的合理性和可行性,在 Matlab/Simulink 环境下建立 SRD 系统仿真模型^[6-8]并进行系统仿真。

2.1 SRM 本体建模

SRM 一相绕组的电势平衡方程:

$$U = R_s i + \frac{\partial \psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + i \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

机电联系方程:

$$T = \frac{\partial \int_0^i \psi(\theta, i) di}{\partial \theta} \quad (5)$$

机械运动方程为:

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L \quad (6)$$

式中: T 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; D 为摩擦系数。

Matlab/Simulink 中的 Lookup 模块能够实现两点之间的线性插值。将由实测磁链特性计算出的 $\frac{d\psi}{di}$ 、 $\frac{d\psi}{d\theta}$ 和转矩特性 T 以表格的形式分别导入 Lookup

中,再由式(4)搭建出 SRM 一相绕组的仿真模型。同理搭建其余两相绕组的仿真模型,结合式(6)建立 SRM 非线性仿真模型,一相绕组的仿真结构框图如图 4 所示。

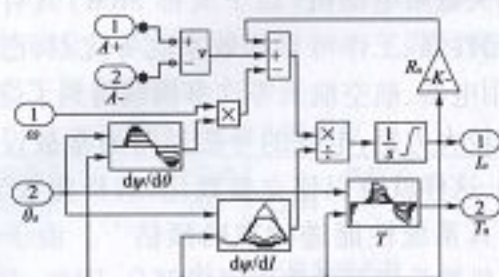


图4 一相绕组仿真模块框图

SRD 系统仿真结构框图采用模块化建模思想搭建,由 SRM 电动机本体模块、功率变换器模块、控制器模块和电源模块四部分组成,如图 5 所示。

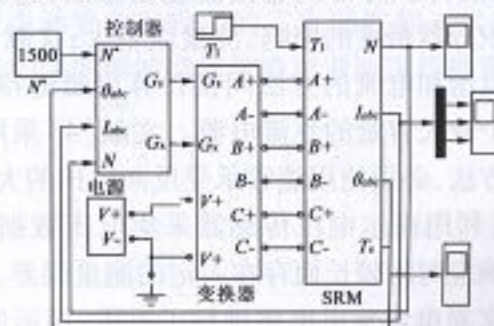


图5 SRD 系统仿真结构框图

2.2 SRM 控制系统建模

本文采用 PI 控制算法实现对开关磁阻电动机调速系统中转速和电流的两个闭环的控制与调节。

图6 为控制器模块框图。

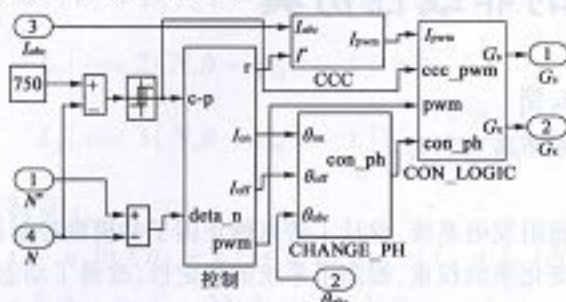


图6 控制器模块框图

图6中,控制模块负责调节开通角、关断角、PWM占空比以及电流斩波控制方式下的给定电流值;CCC模块用来实现低速电流斩波控制;CHANGE_PH模块负责发出换相信号;CON_LOGIC为综合逻辑模块,实现能量非回馈式电流斩波控制,不仅可降低转矩脉动,同时可减少斩波次数,降低开关损耗。

经计算,本样机电流斩波控制方式的最高转速限^[8]为800 r/min,变角度运行方式的最低转速限约为700 r/min。为避免电机在固定切换转速下频繁改变控制方式,以750 r/min为基准,采用50 r/min的速度滞环实现电流斩波控制方式和变角度电压PWM控制方式的切换。

3 仿真结果

本文样机为三相12/8极SRM,额定转速为1500 r/min,定子极弧长为15°,转子极弧长为16°。电流斩波时,给定电流值的上下限分别为19 A和21 A,额定负载为50 N·m。

由于不同的PI参数组合对系统性能影响较大,以给定转速为1500 r/min情况为例,在额定负载情况起动,对转速进行调节,不同PI参数对系统动态性能的影响情况如表1所示。

表1 不同PI参数对系统动态性能的影响

性能指标	$K_p=1$	$K_p=5$	$K_p=15$	$K_p=15$	$K_p=15$
	$K_i=2.3$	$K_i=2.3$	$K_i=2.3$	$K_i=1$	$K_i=5$
超调量	0	0	0.001%	0	2.2%
上升时间/s	0.8	0.5	0.4	∞	0.45
稳态误差	-0.1%	-0.07%	$\pm 0.01\%$	-0.6%	+0.15%

由表1可以看出,当积分系数 K_i 一定,比例系数 K_p 增大时,系统响应速度加快,稳态误差较小;积分系数 K_i 可以消除系统的稳态误差,但 K_i 过大时,速度超调量较大;过小时,系统速度上升时间较长,不能尽快达到稳定状态,稳态误差也较大;当 $K_p=15, K_i=2.3$ 时动态性能指标较好。图7为 $K_p=15, K_i=2.3$,额定负载起动,给定转速为1500 r/min时系统转速响应曲线,0.5 s时对系统突减负载,0.7 s时对系统突加额定负载。由图7可知,转速波动小于2%,系统抗干扰能力较强。

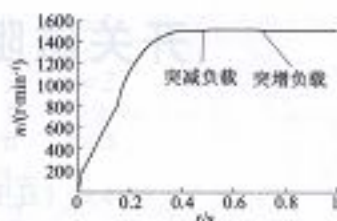


图7 系统转速响应曲线

仿真中,定义转子位置角为 θ ,并以最小电感的起点作为起始位置角。图8是稳态转速为500 r/min、负载为额定负载、开通角 θ_{on} 为7°、关断角 θ_{off} 为29.5°时的转矩和电流波形。

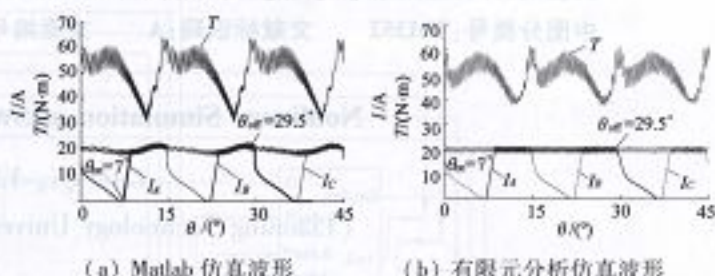


图8 稳态转速为500 r/min时的转矩和电流波形

图9是稳态转速为1500 r/min、负载为额定负载、开通角 θ_{on} 为3°、关断角 θ_{off} 为23°、PWM占空比为83%、 $K_p=15, K_i=2.3$ 时的转矩和电流波形。

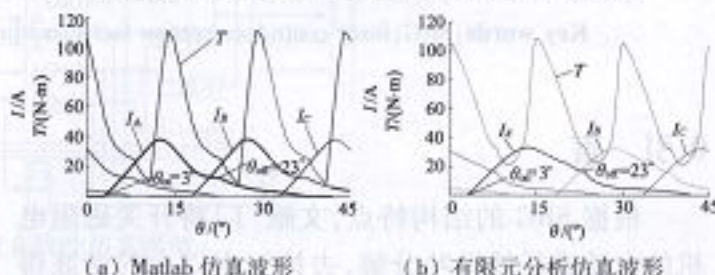


图9 稳态转速为1500 r/min时的转矩和电流波形

4 结 语

本文通过实验测量了开关磁阻电动机在不同转子位置下的磁链特性,并计算出其静态转矩特性;基于磁链特性在Matlab/Simulink环境下建立了SRM非线性模型和控制系统模型,并进行了动态仿真,指出PI参数变化时对动态性能指标的影响,初选了控制系统的PI参数,仿真结果表明系统对参数扰动具有较强的抗干扰性;最后对系统稳态性能进行仿真,仿真结果与有限元分析结果基本吻合,验证了该实测模型的真实性和有效性,为SRD的研发提供一定的理论指导。

参考文献

- [1] Chi H P, Lin R L, Chen J F. Simplified flux-linkage model for switched-reluctance motors[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 2005, 152(3): 577-583.
- [2] Krishnan R, Materu P. Measurement and instrumentation of a switched reluctance motor Industry Applications Society Annual Meeting [C]//1989 Conference Record of IEEE. 1989, 1: 116-121.

(下转第52页)

(上接第11页)

- [3] 曹家勇,周祖德,陈幼平,等.开关磁阻电机特性检测与参数辨识方法研究[J].电工技术学报,2004,19(11):5-30.
- [4] Nikolay Rukhlov, Natan Ben-Hail, Raul Rabinovici. Inductance Measurements in Switched Reluctance Machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(4): 1296-1299.
- [5] 蔡海,许毓群,高超.基于 DSP 开关磁阻电动机特性检测[J].控制与检测,2005,11:22-24.
- [6] Leffay, Huang. A versatile nonlinear switched reluctance motor model

in simulink using realistic and analytical magnetization characteristics [C]//31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005: 1556-1561.

- [7] 周会军,丁文,仇振民.基于磁链分析模型的开关磁阻电动机数字仿真[J].微电机,2005(3):13-17.
- [8] 王宏华.开关磁阻电动机调速控制技术[M].北京:机械工业出版社,2001.

作者简介:张宏达(1983-),男,硕士研究生,从事智能电器技术的研究。