

开关磁阻电机的滑模变结构控制

黄 操, 张奕 黄

(北京交通大学 电气学院, 北京 100044)

摘要: 针对开关磁阻电机存在磁场严重的非线性且数学模型不精确等问题, 提出了一种滑模变结构控制方法。它主要是通过切换函数从而不间断地来回切换系统量, 系统总约束在切换面上, 然后系统的状态变量自动地滑到原点。利用滑模变结构控制的快速性和完全自适应性, 设计了滑模变结构控制的开关磁阻电机调速系统, 同时推导出了该方法的数学模型, 最后编程实现并在实验台上调试。实验结果证明, 与常规的控制策略相比, 滑模变结构控制改善了系统的动态性能, 有较强的鲁棒性, 且在无需知道电机精确模型的情况下可有效克服转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机; 滑模; 变结构控制; 鲁棒性

中图分类号: TM 352

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0035-03

0 引言

开关磁阻电机调速系统 SRD(Switched Reluctance motor Drive system)是 20 世纪 80 年代兴起的一种新型调速系统, 它是将电机技术、电力电子技术和控制技术合为一体的新型调速驱动系统。开关磁阻电机 SRM(Switched Reluctance Motor)与传统直流、交流电机相比, 具有结构简单、运行可靠、效率高等优点。但是, 由于开关磁阻电机的双凸极结构, 磁场分布严重非线性。绕组电流的非正弦与磁通密度的高饱和是 SRM 运行的 2 个特点^[1]。这种非线性结构给 SRM 的控制器设计带来难度, 使用经典线性的控制思想设计的控制器, 如比例积分 PI(Proportional - Integral)控制等, 已经不能满足要求了。

收稿日期: 2006-03-13; 修回日期: 2006-06-20

近年来, 滑模变结构控制 VSS(Variable-Structure control with Sliding mode)在电机调速系统中的应用日益普遍。它既可以用于线性系统, 也可以用于非线性系统。滑模变结构的一大优点是其滑动模态对系统所受的干扰及系统参数的非线性具有较好的自适应性和鲁棒性。

将 VSS 应用于 SRD 中, 这种控制方法在动态条件下能避开参数对电机动态性能的影响, 并对外界的干扰不敏感。而且在无需知道电机精确模型的情况下可有效克服转矩脉动。

1 VSS 原理^[1]

变结构控制可以分为 2 类: 一类是不产生滑动模态的控制, 另一类是产生滑动模态的控制。所谓滑动模态就是通过不间断地来回切换控制量, 系统总是

约束在切换面上,然后系统的状态变量自动地滑到原点。目前研究较多的是滑模变结构控制。

以二阶系统为例,图 1 是滑模控制的系统相轨迹图。设系统状态变量 x_1 为给定值与反馈值之间的偏差,而状态变量 x_2 为 x_1 的导数,则图 1 中的原点就是系统状态变量的终点。开关线由这些状态变量构成,它确定了状态到达终点的路径。设开关线为 $S=c_1x_1+c_2x_2$ 。

在系统状态变量从起始点 A 运动碰到开关面 ($S=0$) 之前的 AB 段为线性控制,控制回路的结构维持固定,然后控制回路的结构被自适应地调整变化,使系统状态沿着开关线一直滑动到终点 C,即 BC 段为滑模控制。这种结构的变化通过开关的作用实现,其中与各状态有关的反馈系数自适应地变化。在滑动时系统的状态轨迹由开关面的参数确定,因此对系统控制对象的参数波动变得不敏感。

VSS 所要解决的基本问题如下:

a. 滑动模态的存在性;

b. 满足可达性条件,切换线以外任意状态点都将于有限时间内到达切换线;

c. 滑模运动的稳定性;

d. 系统的动态品质。

2 开关磁阻电机的离散 VSS 设计^[2-7]

VSS 在理论上,主要是针对连续系统模型。因为只有理想的连续 VSS,才可由具有切换逻辑的变结构控制产生等效滑模控制。然而,实际工作中,进行仿真研究与计算机实时控制均为离散系统。所以离散系统变结构控制的研究与设计,就成为变结构控制理论与应用的一个重要组成部分。

2.1 建立系统状态方程

开关磁阻电机的调速系统有速度环和电流环 2 个环,本文只是在速度环采用了变结构控制。

已知系统的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - B\omega - T_L \quad (1)$$

式中 J 为转动惯量; T_{em} 为电磁转矩; B 为黏着系数; T_L 为负载转矩。

作如下假设:

a. 给定转速 ω^* 恒定,即 $d\omega^*/dt=0$;

b. 负载转矩不变,即 $dT_L/dt=0$;

c. 忽略摩擦转矩。

则可写出系统的状态方程为

$$x_1 = \omega^* - \omega, \quad x_2 = \dot{\omega}$$

即

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = \frac{d\omega^*}{dt} - \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{J} \frac{dT_{em}}{dt}$$

由于式中转矩的导数项不能表示为状态变量的

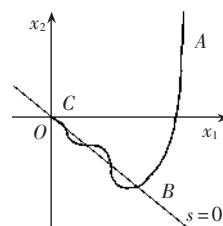


图 1 滑模控制的相轨迹图
Fig.1 The phase locus plot of VSS

线性函数,因此上式组成的系统是非线性系统。

令 $\frac{1}{J} \frac{dT_{em}}{dt} = u$, 可得:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = -u$$

写成 $\dot{X} = AX + Bu$ 的形式,得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

2.2 滑模算法的离散化

设采样周期为 T ,则可求方程(1)的通解为

$$X(kT+T) = \exp[AT]X(kT) + Bu(kT) \int_0^T \exp[Av]dv$$

形如

$$X(k+1) = GX(k) + Hu(k)$$

$$\text{其中}, G = \exp[AT], H = RB, R = \int_0^T \exp[Av]dv.$$

求出上面的矩阵并代入,可得:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) - T^2 u / 2$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) - Tu$$

又由 $u = J \frac{dT_{em}}{dt}$, 则可得:

$$T_{em}(k+1) = T_{em}(k) + JT_u(k)$$

2.3 选取切换函数

设切换函数为

$$S(k) = \lambda x_1(k) + x_2(k) = c^T X(k)$$

$$\text{其中}, c^T = [\lambda \ 1], X(k) = [x_1(k) \ x_2(k)]^T.$$

由广义滑模的存在性和可达性,可得约束条件:

$$S' \cdot S < 0$$

则离散化后需满足:

$$\frac{S(k+1) - S(k)}{T} \cdot S(k) < 0$$

即

$$S(k+1) - S(k) < 0 \quad S(k) > 0$$

$$S(k+1) - S(k) > 0 \quad S(k) < 0$$

若采用指数趋近率则有

$$S(k+1) - S(k) = -\varepsilon T \operatorname{sgn}[S(k)] - q TS(k)$$

其中, $\varepsilon > 0, q > 0, 1 - qT > 0$ 。

只要满足上式条件,滑模运动的存在性和可达性就是满足的。

2.4 选择控制率

$$S(k+1) - S(k) = c^T X(k+1) - c^T X(k)$$

且

$$S(k+1) - S(k) = \begin{cases} -\varepsilon T - q TS(k) & S(k) > 0 \\ \varepsilon T - q TS(k) & S(k) < 0 \end{cases}$$

代入可得:

$$u(k) = \frac{1}{1 + \lambda T/2} \{ \lambda x_2(k) + q S(k) + \varepsilon \operatorname{sgn}[S(k)] \}$$

因此,实际的控制量为

$$T_{em}(k+1) = T_{em}(k) + \frac{JT}{1 + \lambda T/2} u(k)$$

2.5 等效控制及理想滑模运动的稳定性

系统在开关线上的运动称为理想滑模运动。此时有

$$S(k+1) = S(k) = 0$$

则理想滑模运动时的等效控制率为

$$u_{eq}(k) = -(\mathbf{c}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{c}^T \mathbf{G} X(k) = \frac{\lambda}{1 + \lambda T / 2} x_2(k)$$

又因 $x_2(k) = -\lambda x_1(k)$, 得:

$$x_1(k+1) = x_1(k) + T x_2(k) - T^2 u_{eq}(k) / 2 = \frac{2 - \lambda T}{2 + \lambda T} x_1(k)$$

因此, 只要 $0 < \frac{2 - \lambda T}{2 + \lambda T} < 1$, 即 $0 < \lambda T < 2$, 理想滑模运动就是稳定的。

3 离散 VSS 实现

最后就是编写程序实现上面的离散 VSS 的算法。实验用 5 kW 开关磁阻电机驱动系统, 主电路采用不对称半桥形式, 主控芯片为 TI 公司生产的面向电机控制的微控制器 TMS320LF2407, 它将 DSP 的高速运算能力和面向电机的高效控制能力集于一体, 使得实现 SRD 的高精度控制成为可能^[8]。

实验得到的波形如图 2、3 所示。图 2 为负载恒定时的转速、转矩曲线, 图 3 为负载变化时的转速、转矩曲线。由图所示波形可知: 无论负载是恒定还是变化, 转速总能跟随且动态响应也很快。可见系统具有良好的动、静态性能。

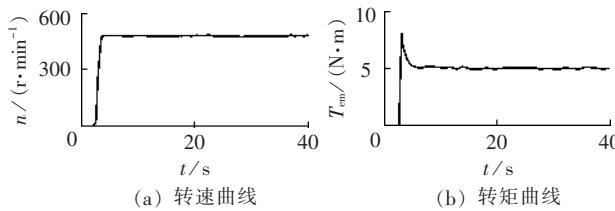


图 2 负载恒定时的转速、转矩曲线

Fig.2 The speed and torque curves with invariable load

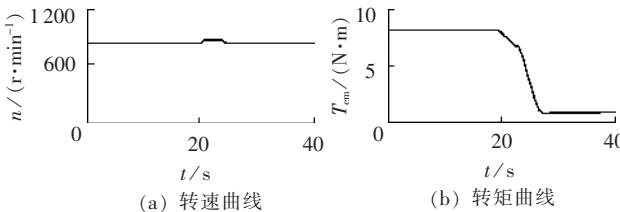


图 3 负载变化时的转速、转矩曲线

Fig.3 The speed and torque curves with variable load

4 结语^[9-10]

通过实验, 可得出如下的结论: 将滑模变结构控制应用于开关磁阻电机中, 可以有效地抑制电机的转矩脉动, 并且当参数变化时仍能有较强的鲁棒性以及较快的动态响应。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 姚琼荟, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- [3] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [4] 韩顺杰, 李慧, 王玉华, 等. 开关磁阻电机滑模变结构控制器的设计[J]. 吉林工学院学报, 2001, 22(1): 49-52.
- [5] HAN Shun-jie, LI Hui, WANG Yu-hua, et al. The design of a variable-structure controller with sliding mode of SRM[J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 2001, 22(1): 49-52.
- [6] 曲荣海, 姚若萍, 刘大庆, 等. 开关磁阻电机滑模变结构控制与仿真[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(4): 11-13.
- [7] QU Rong-hai, YAO Ruo-ping, LIU Da-qing, et al. The variable-structure control with sliding mode of SRM and simulation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1997, 37(4): 11-13.
- [8] 李少远. 模糊滑动模态控制系统的性质分析[J]. 控制理论与控制工程, 2000, 17(1): 14-18.
- [9] LI Shao-yuan. Characteristics analysis of fuzzy sliding mode control systems [J]. Control Theory and Control Engineering, 2000, 17(1): 14-18.
- [10] 李爱华, 朱学忠. 开关磁阻电机连续滑模调速控制与仿真[J]. 微电机, 2005, 38(4): 11-13.
- [11] LI Ai-hua, ZHU Xue-zhong. Continuous sliding-mode control and simulation of a SRM drive[J]. Micromotors, 2005, 38(4): 11-13.
- [12] 刘和平, 严利平, 张学峰. TMS320 LF240X DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [13] KRZYSZTOF R, IQBAL H, MALIK E E. Torque-ripple minimization in switched reluctance machine over a wide speed range [J]. IEEE Trans Ind Appl, 1998, 34(5): 1105-1112.
- [14] BUJA G S, MENIS R, VALLA M I. Variable structure control of a SRM drive [J]. IEEE Trans Industry Electronic, 1993, 40(5): 56-62.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

黄操(1981-), 女, 广西桂林人, 硕士研究生, 主要从事电力电子及电机控制方面研究(E-mail: dqhuangc@master04.bjtu.edu.cn);

张奕黄(1947-), 男, 北京人, 教授, 主要从事电机方面的研究。

Variable-structure control of switched reluctance motor

HUANG Cao, ZHANG Yi-huang

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aimed at the nonlinear magnetic field and the imprecise model of switched reluctance motor, the variable-structure control method with sliding mode is presented. It switches system variables continuously to restrict system in switch surface and force the state variable of system automatically sliding to the origin. A variable-structure control system with sliding mode for SRD (Switched Reluctance motor Drive system) is designed, which makes use of its rapidity and fully self-adaptability. Its math model is deduced and its implementation program is tested. The test result shows that, compared with traditional control strategy, the variable-structure control with sliding mode improves system dynamic performance and robustness, and reduces motor torque ripple effectively without knowing the precise model of motor.

Key words: switched reluctance motor; sliding mode; variable-structure control; robustness