

开关磁阻电机直接转矩滑模变结构控制*

王勉华, 邢 幸

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 开关磁阻电机非线性、强耦合的特点, 使传统的控制方法已很难达到满意效果。基于此, 介绍了一种三段式分段线性切换线的滑模变结构控制法。该方法与常规的滑模变结构控制法不同, 采用的三段式切换线使电机从一开始便运行在滑模线上, 确保了系统滑动模态的能达型。该方法主要特点是控制简单, 易于实现。仿真结果表明其能够对给定转速快速、稳定地跟踪, 具有良好的适应性和鲁棒性。

关键词: 开关磁阻电机; 滑模变结构控制; 分段线性切换线

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0035-05

Sliding Mode Variable Structure Controller for Direct Torque Control Drive System of Switched Reluctance Motor*

WANG Mianhua, XING Xing

(Electrical and Control Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Because of the nonlinear and strong coupling characteristics of switched reluctance motor (SRM), the traditional control method was difficult to achieve satisfactory results. A sliding mode variable structure control method for the three stage linear switching line was introduced. This method was different from the conventional variable structure control. It could make the motor run on the sliding mode from the beginning, and ensures that the system sliding mode could be reached. Its main characteristic was simple and easy to implement. The simulation results showed that the method could quickly and stably track the given speed. It had good adaptability and robustness.

Key words: switched reluctance motor (SRM); sliding mode variable structure control; piecewise linear switching line

0 引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor, SRM) 是一种简单的双凸极结构电机, 其运动是由定、转子间气隙磁阻的变化产生的。SRM 具有诸多优点, 适用在恶劣环境和高速场合下运行, 转速范围从几转到几万转, 且具有起动转矩和转矩惯量比大等优点。但是, 尽管 SRM 的电磁原理和结构都相当简单, 但在电机控制方面, 传统的线性控制方法 (如 PID 控制) 很难达到满意的效果, 噪声大、低速性能差、调速范围窄等问题应运而生。所

以, 智能控制的方法对电机这种系统而言是有一定优势的, 例如模糊控制、神经网络控制、RBF 控制等。他们均有其各自的优点, 通过算法设置, 也都能获得不错的效果。本文从调节器实现的难易角度出发考虑, 选择了滑模变结构控制方法。

滑模变结构控制 (Variable Structure Control, VSC) 是一类特殊的非线性控制, 表现为控制的不连续性, 即系统“结构”在控制过程中会根据系统的当前状态不断变化, 迫使系统按照设定的滑模线 (切换线) 运动至原点。其中滑动模态与控制对象的参数及外界施加的干扰输入无关, 能够克服系统

* 基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目 (2013JK1002)

作者简介: 王勉华 (1953—), 男, 硕士研究生, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

邢 幸 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为控制工程。

的不确定性,所以对电机这种系统而言,在大范围运行条件下,VSC 方法能够满足预先设计的调速稳定性、动态响应快速性的要求,实现简单,无需系统在线辨识,具有较强的适应性和鲁棒性。

1 SRM 调速系统

本文的 SRM 调速系统设计为一个三闭环系统,如图 1 所示。系统内环由转矩环和磁链环构

成,外环为速度环。该系统的速度调节器采用滑模变结构控制方法,输入为速度误差,输出为电机转动所需的参考转矩 T^* ,内环把转矩和磁链的变化要求通过开关表和功率变换器反映到 SRM 各绕组相通断上,目的是要把转矩和磁链幅值都限制在一定范围内,以此来减少转矩脉动。这种控制方法最终控制的是加在 SRM 各相绕组上的电压,控制更为直接。

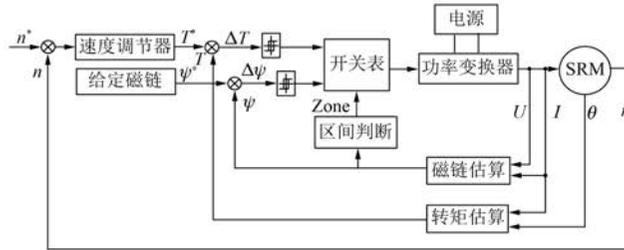


图 1 SRM 调速系统结构图

2 滑模变结构速度调节器设计

2.1 机械方程

按照力学定律可列出电机转子机械运动方程,即转矩运动方程式:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + K_w \omega + T_L \quad (1)$$

式中: J ——系统转动惯量;

K_w ——摩擦因数;

T_L ——负载转矩;

电机角速度:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

将式(1)转换成关于转速 n 的速度方程式:

$$T_e = J \frac{\pi}{30} \dot{n} + K_w \frac{\pi}{30} n + T_L \quad (2)$$

2.2 VSC 基本思想

VSC 是指带有滑动模态的变结构控制,其属于变结构控制系统的一种控制策略。VSC 的基本思想如下:当系统的运动点在有限时间内穿越状态空间中的切换线时,系统的控制结构随之发生变化,从而使系统在状态空间的运动轨迹沿着设定的切换线运行,最终到达原点。其中,滑动模态的参数选择将会影响系统在切换线上的运动性能。

图 2 为滑模变结构控制的基本原理图。设系统变量为 x ,则切换线表达式为

$$s = cx + \dot{x} \quad (3)$$

滑模变结构的控制量表达式为

$$U(x) = \begin{cases} U^+(x, t) & s(x, t) > 0 \\ U^-(x, t) & s(x, t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

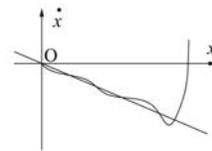


图 2 VSC 基本原理图

2.3 分段线性切换线的 VSC

众所周知,SRM 具有高阶、强耦合的非线性特点,很难得到其精确的数学模型,且在不同控制方式下电机参数变化较大。故本文考虑,速度调节器采用 VSC 方法,但常规的 VSC 仅含一条开关线(切换线),需要通过大量计算,选取合适的参数保证滑动模态的存在性、可达性。由式(2)可知,SRM 的转速是关于转矩的一阶微分方程,无法构成期望的二阶状态方程。此时,若要构成图 1 所示的控制系统,VSC 似乎无计可施。基于此,本文提出一种崭新的三段式分段线性切换线的滑模控制法。顾名思义,此种方法设计了三条切换线,其覆盖了系统运行的整个区域,故而也更加确保了系统的存在性、可达性。因此,与常规的 VSC 不同,根据“黑箱原理”,三段式分段线性切换线的滑模控制法可无需建立 SRM 的状态方程,只需根

据系统输入,调整规律,得到满意的输出即可。

为了使理论分析与实际系统变量均具有几何和物理意义,并便于系统的分析和综合,本文分别选取转速误差和其一阶导数为状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = n_g - n \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\frac{dn}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

为使系统在整个动态过程中都具有强的鲁棒性,应使动态过程全部处于滑模状态,所以选择的切换线必须覆盖整个系统动态响应区域。为减少复杂性,便于实现而同时具有良好的系统性能,本文选择图 3 所示的三段式分段线性切换线。

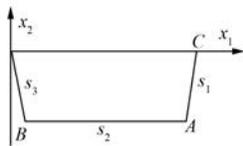


图 3 相平面切换线

根据图 3 可得各段切换线方程为

$$\begin{cases} s_1 = x_2 - C_1 x_1 + C_1 n_g = 0 \\ s_2 = x_2 + a_m = 0 \\ s_3 = x_2 + C_2 x_1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

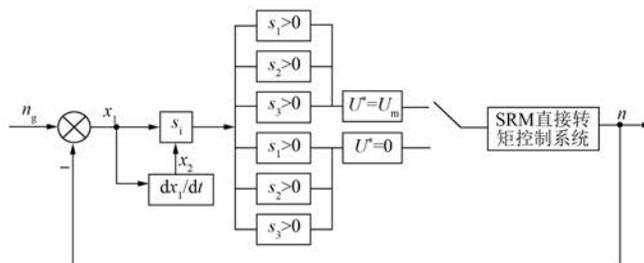


图 4 三段式 VSC 系统结构图

3 仿真结果及分析

根据上述 SRM 及其控制理论,使用 MATLAB 软件对 60 kW 四相 8/6 极结构的 SRM 进行仿真,给定磁链为 0.475 Wb,给定转速 $n_g = 1000$ r/min,滑模变结构控制器中 A、B 两点的横坐标分别取 998、3。图 5 为搭建的分段线性切换线的滑模变结构控制器模型。控制量最大取 300 N·m, a_m 为 5×10^4 时磁链轨迹仿真结果如图 6 所示,系统运行的相平面仿真如图 7 所示。

由图 6 可以看出,采用直接转矩控制的方法,

式中: C_1 、 C_2 ——第一段和第三段切换线的斜率值;

a_m ——加速度;

n_g ——给定转速。

A、B、C 三点的坐标分别为 $(n_g - \frac{a_m}{c_1}, -a_m)$ 、 $(\frac{a_m}{c_2}, -a_m)$ 、 $(n_g, 0)$ 。采用此种切换线的特点是可使系统从一开始就运行在滑模线上,通过选取合适的 C_1 、 C_2 和 a_m 能够使系统在尽可能短的时间内达到给定转速。

在 VSC 方法中,控制率一般可以采用常值切换控制、函数切换控制、比例切换控制等。为降低控制实现的复杂性,本文采用单边极值控制方式,可表示为

$$U^* = \begin{cases} U_m & s_i > 0 \\ 0 & s_i < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

由式(7)可得 VSC 系统的结构如图 4 所示。此时的变结构控制,当 $s_i > 0$ 时 $U^* = U_m$, 当 $s_i < 0$ 时 $U^* = 0$,可以看出控制量在两个值之间切换,控制结构十分简单。

磁链轨迹是一个圆形,达到了保持定子磁链幅值基本恒定的目标,并且磁链的幅值变化被限定在滞环宽度内,控制效果好。由图 7 可以看出系统的实际相平面运行轨迹与理论设计的切换线一致,其中振荡处还需克服,但运行结果充分表明了滑模变结构控制系统设计的正确性。

在系统运行中,由于给定参数不同,运行结果也有所差异。其中,在转速上升阶段,可通过调节 a_m 的取值,获得不同的速度响应曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知, a_m 的取值与速度响应时间息息相关,在合理的范围内, a_m 值越大响应时间越短,

就速度运行曲线而言,可根据实际情况与自身期望值,对 a_m 进行设定,从而得到满意输出。但 a_m

的取值过大,超调和振荡会随之产生。上述 a_m 的取值均在合理范围内。

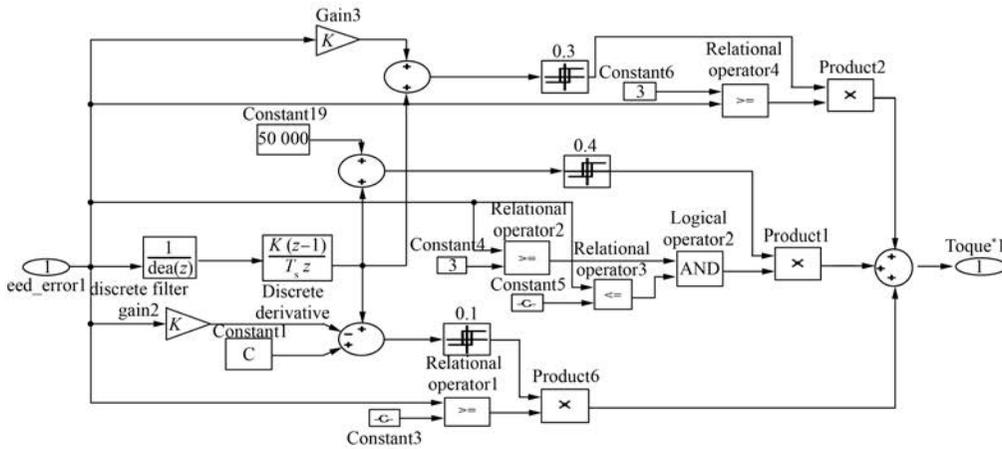


图5 滑模变结构控制器模型

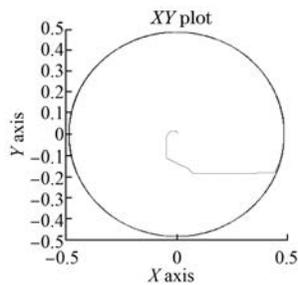


图6 直接转矩磁链轨迹仿真图

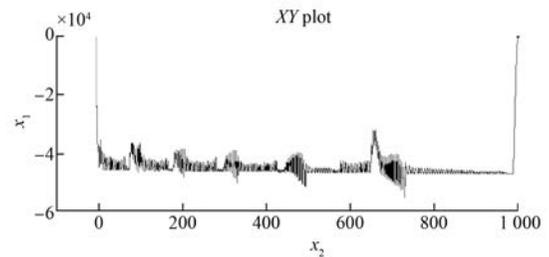


图7 相平面运行仿真图

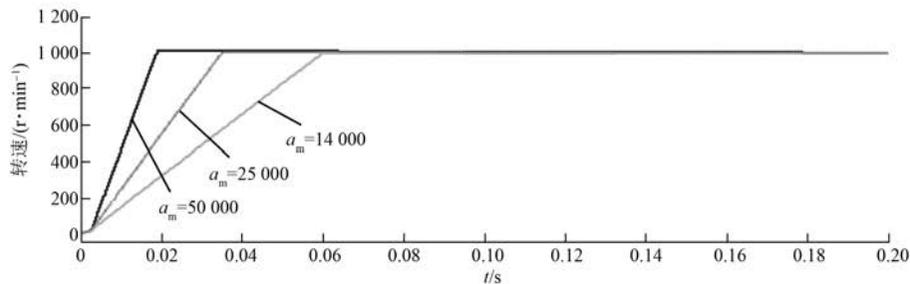


图8 不同加速度下的速度响应曲线

图9 则将讨论控制量 U_m 与系统抗干扰能力的关系。为了便于比较,还采用了传统的PI控制

法,其中 $K_p=0.21, K_i=3$ 。值得一提的是,在采用滑模变结构控制法中,当系统运行到 0.2 s 时,加

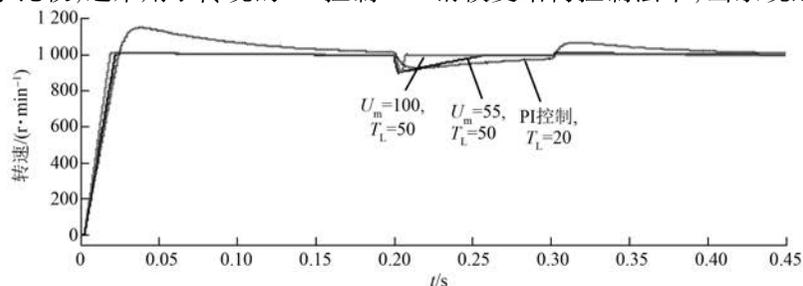


图9 不同控制量下的速度响应曲线

入负载 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$, 0.3 s 时卸掉此负载, 而在 PI 控制中, $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载已使速度曲线严重畸形, 所以在 PI 控制中, 0.2 s 时加入的负载仅为 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

由图 9 可知, 采用滑模变结构控制法, 加入 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载, 系统能够迅速做出调整, 自行恢复, 电机转速能一直稳定在 1000 r/min , 稳态无静差。控制量 $U_m = 100$ 时的响应时间与 $U_m = 55$ 时的响应时间相差不大, 但是抗干扰能力差别较大, 很明显 U_m 值越大, 抗干扰能力越好, 但 U_m 最大不可超过 SRM 的最大转矩。与传统 PI 控制相比, 滑模控制有明显的优势, 无论是在动态响应阶段还是在稳态阶段, VSC 均可通过参数调节获得良好的性能, 同时还可克服响应时间与超调之间的矛盾。

从上述仿真结果分析可知, 本文所设计的三段式 VSC 方法在系统快速性、稳定性、准确性方面均优于传统 PI 控制, 综合各方面考虑, $a_m = 5 \times 10^4$ 、 $U_m = 100$ 较合适。

4 结 语

SRM 调速系统是个高阶非线性系统, 采用常规控制策略很难达到良好的控制目标, 基于此, 直接转矩 VSC 恰好是个不错的选择。其变结构特性使得控制更加灵活, 尤其对非线性系统的控制具有良好的控制效果。三段式的切换线结合“黑箱原理”不仅能够简化控制算法, 还可优化电机的各项性能指标。由此得出结论, 本文采用的 SRM 直接转矩 VSC 方法不仅可以实现磁链基本不变的目的, 相较于传统的 PI 控制, VSC 还有明

显的优势: 控制简便, 易于实现, 调节速度快, 稳定性好, 对外界噪声干扰和参数摄动具有良好的鲁棒性, 是一种理想的 SRM 控制方法。

【参 考 文 献】

- [1] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 邓君. 滑模变结构控制在开关磁阻电机调速系统中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [3] 李爱华. 滑模变结构控制在开关磁阻电机调速系统中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [4] 张卓. SRM 滑模变结构直接转矩控制系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- [5] 牛龙涛. 基于滑模变结构的开关磁阻电机转矩波动抑制[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [6] 张怡. 开关磁阻电机的准滑模变结构控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- [7] 刘畅. 基于滑模变结构的同步电机 SVM 直接转矩控制的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [8] QU S C, WANG Y J, ZHU Q N. A discrete sliding variable structure control with dynamic disturbance compensator [C] // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004: 821-824.
- [9] 王勉华, 梁媛媛, 宋景哲, 等. 直接转矩控制在开关磁阻电机中的应用与研究[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(2): 25-28.
- [10] 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, 1997, 37(4): 11-13.

收稿日期: 2016-09-19

[读者群]

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员, 全国各大高等院校师生, 企业经营、管理、营销、采购人员, 各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等, 遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高, 无论是交流前沿技术、实践经验, 还是传递行业信息, 开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告