

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.015

基于矢量控制的 BLDCM 新型滑模控制器

陈 辉, 黄巧亮*

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要:针对反电动势为正弦波的直流无刷电机控制效率问题,研究了其控制方式,采用了矢量控制方法代替传统的方波控制,以提高电机运行效率,设计了一种新的指数趋近律积分型滑模控制器(sliding mode control, SMC),提高了直流无刷电机控制系统的抗干扰性及速度跟踪性。在滑模控制中引入新的趋近律可有效地抑制抖振问题,提高了滑模面的趋近速度,同时使得系统的超调得到显著的降低。采用了边界层可变的正弦饱和函数替代开关函数进一步削弱抖振,并对其进行了理论分析。最后根据所设计的控制方式通过 Simulink 进行了仿真验证。研究表明,所设计的速度控制器较传统的滑模控制器及积分型滑模控制器具有更好的抑制抖振和速度跟踪性能。

关键词:无刷直流电机;矢量控制;积分滑模控制;正弦型饱和函数

中图分类号:TH39;TM341

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0629-04

New sliding mode controller for BLDCM based on vector control technology

CHEN Hui, HUANG Qiao-liang

(School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the control efficiency of the sine wave brushless DC motor, the control mode was studied, and the vector control method was used to replace the traditional square wave drive to improve the efficiency of the motor. A new type of integral sliding mode controller with exponential approach law was designed to improve the anti jamming and the speed tracking of brushless DC motor control system. The chattering problem can be restrained effectively and the sliding mode reaching speed can be improved by the new reaching law, at the same time, the overshoot of the system was significantly reduced. The switching function was replaced by a sinusoidal saturation function with variable boundary layer, which was used to weaken the chattering, and the theoretical analysis was carried out. Finally, the design of the control method was proved by the Simulink simulation. The research results indicate that the design of the speed controller is better than the traditional sliding mode controller and integral sliding mode controller in suppressing chattering and speed tracking performance.

Key words: BLDCM; vector control; integral sliding mode control; sine type saturation function

0 引 言

无刷直流电机具有结构简单、效率高、调速范围广、运行可靠等优点,现已广泛应用在各类驱动控制系统中^[1]。在低成本、中小功率 BLDCM 设计中,常采用短距分数槽绕组,其反电动势波形较为接近正弦波而不是传统的梯形波。故对其采用方波驱动不能获得较高运行效率,同时也增加了控制系统的噪声^[2-3]。因此,本研

究采用矢量控制方法对其实现正弦波驱动控制。

BLDCM 是一个多变量、非线性、变参数的复杂控制对象,随着负载的变化及温度升高等因素导致系统参数发生变化而难以建立精确的数学模型,最终影响整个系统控制性能。传统的 PI 控制器很难达到系统所需的控制性能,因此各种智能控制被用于无刷直流电机的控制,并取得了一定的成果^[4-5]。

滑模控制是一种不连续控制策略。在滑模面的设

收稿日期:2016-09-28

作者简介:陈辉(1988-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事电机驱动控制方面的研究. E-mail:18252580393@163.com

通信联系人:黄巧亮,男,副教授,硕士生导师. E-mail:33700331@qq.com

计中,加入积分项可有效避免对速度误差的微分量而引入的高频扰动,同时引入了指数趋近律可有效地减弱滑模的抖振,而采用边界层可变的正弦型饱和函数替代传统的开关函数可使滑模抖振基本得到消除^[6-7]。

本研究在原有 BLDCM 调速系统特点的基础上,设计一种新的指数趋近律积分型滑模控制器。

1 无刷直流电机数学模型

假定无刷直流电机定子三相完全对称,三相绕组反电动势为正弦波,电机气隙磁导均匀,磁路不饱和,不计涡流损耗,控制系统采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,转矩的大小仅与定子电流幅值成正比,实现 BLDCM 的解耦控制,因此直流无刷电机控制模型有^[8]:

$$\dot{i} = -\frac{K_e}{L}w - \frac{R}{L}i + \frac{U}{L} \quad (1)$$

$$\dot{w} = -\frac{f}{J}w + \frac{K_T}{J}i - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

BLDCM 的电磁转矩方程为:

$$T_e = K_T i \quad (3)$$

机械运动方程为:

$$T_e - T_L - f = J \frac{dw}{dt} \quad (4)$$

式中: U, R, L, i —定子电压、电阻、电感、电流; K_e —反电动势常数; w —机械角速度; J —转子的转动惯量; f —阻尼系数; T_e, T_L —电磁转矩和负载转矩; K_T —扭矩常数。

定义状态变量: $x = w^* - w$,其中 w^* 为参考转速,且令输出控制量 $u = i$,则:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\dot{w} = \frac{f}{J}w - \frac{K_T}{J}i + \frac{T_L}{J} \\ &= \frac{f}{J}(w^* - x) - \frac{K_T}{J}i + \frac{T_L}{J} \\ &= -\frac{f}{J}x - \frac{K_T}{J}u + \frac{T_L}{J} + \frac{f}{J}w^* \end{aligned} \quad (5)$$

令: $A = -\frac{f}{J}, B = \frac{K_T}{J}, D = \frac{T_L}{J} + \frac{f}{J}w^*$,则式(5)可简化为:

$$\dot{x} = Ax - Bu + D \quad (6)$$

2 积分滑模控制器设计

2.1 积分滑模控制器设计

滑模控制器设计主要由切换函数 $S(x)$ 和滑动模态控制律 $u^+(x)$ 两部分组成^[9]。

由式(2)可知,无刷直流电机调速模型为一阶微

分方程,为使系统滑动模态渐进稳定且具有较好的鲁棒性,故在设计切换函数时引入参考速度与实际速度偏差的积分项。具有积分项的切换函数为:

$$S(x) = c \int_0^t x(\tau) d\tau + x \quad (7)$$

式中: $c > 0$, c 值越大,系统速度响应时间越快,但 c 值过大会影响滑模的抖振。

为使系统状态能够在有限时间到达且保持在滑模面上,本研究的滑模控制律选用函数切换控制的变结构控制方案,即:

$$u = u_{eq} + u_d \quad (8)$$

式中: u_{eq} —滑模等效控制部分。

即在外无干扰与满足在 $\dot{S} = 0$ 时所需控制条件,则由 $\dot{S} = 0$ 和式(6)可得:

$$u_{eq} = \frac{(A + c)}{B}x \quad (9)$$

式中: u_d —滑模切换控制部分。

外加干扰等因素存在使系统状态偏离滑动模态,因此加入切换控制部分实现对外加干扰等因素的鲁棒控制,切换过程即趋近运动的过程。而采用趋近律的方法可使得趋近运动更加平滑,减弱滑模抖振,故本研究采用指数趋近律^[10-11]:

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sign}(S) - kS \quad k > 0, \varepsilon > 0 \quad (10)$$

式中: $-\varepsilon \text{sign}(S)$ —等速趋近项, $-kS$ —指数趋近项。

选择合适的系数 ε, k 使运动点在距切换面较远时速度较大,距切换面较近时速度较小,接近切换面时可有效地减弱滑模抖振。但由于开关函数的不连续性,运动点最后并不能趋近于原点,依然存在一定的抖振问题。为此,本研究采用边界层可变的正弦饱和函数代替开关函数,从而消除抖振问题。其中正弦饱和函数公式如下:

$$\text{sat}(S, \sigma) = \begin{cases} \text{sign}(S) |S| > \sigma \\ \sin(\lambda S) |S| \leq \sigma \end{cases} \quad \lambda = \frac{\pi}{2\sigma} \quad (11)$$

式中: σ —边界层厚度。

其厚度与抑制抖振的效果成正比,但若其取值过大,会使得开关函数作用区域减小,将影响滑模控制器的响应速度,降低系统对外部扰动和参数变化的鲁棒性。由此在 σ 邻域内变成一种连续控制,使得抖振现象得到更好的抑制。故可得:

$$\dot{S} = -\varepsilon \text{sat}(S, \sigma) - kS \quad k > 0, \varepsilon > 0 \quad (12)$$

则可得系统滑模控制律为:

$$u = u_{eq} + u_d = \frac{(A + c)}{B} \cdot x - \varepsilon \cdot \text{sat}(S, \sigma) - kS \quad (13)$$

由图可以看出,采用传统滑模控制时有 2.5% 左右的速度超调,达到稳定运行时间较长,在带载启动时有明显的抖振,并且在正常运行时会出现较大的波动。采用指数型积分滑模控制时仅有 1% 的速度超调,达到稳定运行时间较短,运行时会有少许的抖振问题存在。而采用正弦饱和函数指数型积分滑模控制可以明显看出基本无速度超调,并且在极短的时间内达到稳定运行,抖振问题也降到了最低。

3 种控制方式在恒定负载 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 情况下,由起始速度 300 rad/s 在 0.01 s 时增加到 320 rad/s 的转速响应波形对比如图 4 所示。

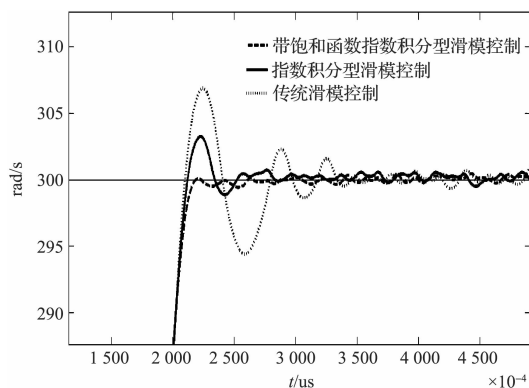


图 4 恒负载变速仿真波形

采用传统滑模控制时,当速度增加到 320 rad/s 时,速度超调 1.5% 左右,恢复时间也较长,并且速度抖动较大。采用指数型积分滑模控制时,其在变速时有 1% 左右速度超调,速度跟随性相对改善较明显。而采用的正弦饱和函数指数型积分滑模控制时,可基本实现无超调,且速度跟随达到较理想的效果。

通过以上的仿真比较可知,采用正弦饱和函数指数型积分滑模控制方式的无刷直流电机控制系统具有良好的动态性能,在速度阶跃响应时恢复时间较短,基本无抖振现象,速度跟踪效果也较为理想,体现了其速度跟随性能好的特点。

4 结束语

笔者研究了带正弦饱和函数指数型积分滑模控制方法,并以反电动势为正弦波的无刷直流电机矢量控制系统为背景进行了应用研究。笔者设计了带正弦饱和函数指数型积分滑模速度控制器,有效地抑制了传

统滑模变结构控制中的抖振问题。采用的指数型趋近律提高了滑模面的趋近速度。

笔者设计和实现了无刷直流电机的矢量控制,采用转速与电流双闭环控制结构,其中电流环采用传统 PI 控制,速度环引入了一种新的指数趋近律积分型滑模控制方式。经过仿真表明,其转速控制系统能够快速启动,有较高的抗干扰能力,快速精确地跟随给定速度,并使传统滑模控制的抖振问题得到有效的抑制。

参考文献 (References):

- [1] BORA T C, COELHO L D S, LEBENSZTAJN L. Bat-inspired optimization approach for the brushless DC wheel motor problem[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(2): 947-950.
- [2] 吴 勇,王友仁,王 强,等. 基于 STM32 的无刷直流电机正弦波驱动控制系统设计[J]. *微电机*, 2015(9): 39-42.
- [3] 韦啟宣. 基于 DSP 的无刷直流电机方波驱动与正弦波驱动研究[D]. 广州:华南理工大学电气工程学院, 2012.
- [4] EL-SAYED H S, EL-KHOULY F M, KHATER M M, et al. Fuzzy logic based speed control of a permanent magnet brushless DC motor drive[C]// *International Conference on Electrical Engineering*, New York: IEEE, 2007.
- [5] WANG H P, LIU Y T. Integrated design of speed-sensorless and adaptive speed controller for a brushless DC motor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(2): 518-523.
- [6] 陆皓泉,林鹤云,冯 奕,等. 永磁同步电机无传感器控制的软开关滑模观测器[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(2): 106-113.
- [7] 李雪恺,陈 勇,张鑫彬,等. 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(9): 73-77.
- [8] 黄 勤,周海燕,凌 睿. 二阶滑模控制在直流无刷电机转速调节中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(6): 243-245.
- [9] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [10] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1990.
- [11] 刘红俐,张 鹏,朱其新,等. 基于新型趋近律的积分模糊滑模控制及其在 PMSM 控制中的应用[J]. *航天控制*, 2014, 32(6): 81-87.
- [12] 陈志梅. 滑模变结构控制理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

陈 辉,黄巧亮. 基于矢量控制的 BLDCM 新型滑模控制器[J]. *机电工程*, 2017, 34(6): 629-632.

CHEN Hui, HUANG Qiao-liang. New sliding mode controller for BLDCM based on vector control technology[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6): 629-632.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>