

永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制

张晓光, 赵克, 孙力, 安群涛

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on a Novel Exponential Reaching Law

ZHANG Xiaoguang, ZHAO Ke, SUN Li, AN Quntao

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: To improve dynamic quality of permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed servo system, a novel exponent reaching law was proposed. Different from the conventional exponential reaching law, the reaching speed of novel reaching law was associated with the changes of the system state; the novel exponential reaching law can overcome the disadvantage of traditional reaching law, suppress the chattering and improve the reaching speed. The novel reaching law was applied to the PMSM speed servo system; a novel speed controller was designed to replace the traditional PI regulator. Simulation and experimental results show that the novel speed controller can improve steady, dynamic performances and robustness characteristics of speed servo system.

KEY WORDS: novel exponent reaching law; sliding mode control (SMC); PI control; permanent magnet synchronous motor (PMSM); chattering

摘要: 为了提高永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)调速系统的动态品质,提出了一种新型指数趋近律,与常规指数趋近律不同,该趋近律将趋近速度与系统状态量的变化相关联,克服了常规指数趋近律的缺点,有效抑制了滑模的固有抖振问题,并增大了趋近速度。将该趋近律应用于永磁同步电动机调速系统,设计了基于新型指数趋近律的滑模变结构速度控制器,以取代传统PI调节器。仿真和实验结果表明,该速度控制器能够有效地提高系统的静态、动态特性与鲁棒性。

关键词: 新型指数趋近律;滑模变结构控制;PI控制;永磁同步电动机;抖振

0 引言

永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单、效率高、功率密度高等优点,应用场合广泛。目前,交流伺服系统的控制普遍采用传统的PID控制,该控制器具有算法简单、可靠性高及调整方便等优点;然而,永磁同步电动机是一个多变量、强耦合、非线性、变参数的复杂对象,采用常规PID控制虽然在一定范围内能满足控制要求,但在系统参数发生变化或受到外界不确定因素的影响时,并不能满足高性能控制的要求^[1-3]。为了解决常规PID控制带来的问题,国内外学者做了大量研究,一些现代控制理论成果被成功应用于交流伺服系统中^[4-6],其中滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)成为研究热点^[7-9],已有学者将SMC应用于PMSM控制系统中,并取得了较好的效果。文献[10]将滑模变结构控制应用于内嵌式永磁同步电机直接转矩控制系统中,有效抑制了转矩与磁链的脉动,同时增加了控制系统的快速性与鲁棒性。文献[11]在矢量控制的PMSM调速系统中,将转速环与电流环结合在一起设计了SMC控制器,研究表明系统鲁棒性和快速性得到显著提高,但电流环与转速环综合设计调试参数选取比较困难,不易实现。文献[12]采用指数趋近律滑模变结构控制器作为永磁同步电动机调速系统的转速调节器,并设计了变参数SMC方法,给出了控制器的设计过程,该方法提高了系统的鲁棒性。文献[13]将SMC应用于PMSM无位置传感器调速系统,减小了速度观测误差,提高了速度观测器精度。文献[14]采用一体化设计思想,设计了位置与速度综合控制器,解决了变结构位置伺服系

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(E200625)。

Project Supported by Nature Science Foundation of Heilongjiang Province (E200625).

统中的速度控制问题。文献[15]针对 PMSM 调速系统采用 2 阶 SMC 控制, 理论分析与仿真结果表明, 系统对于外界干扰具有较强的鲁棒性, 同时抖振现象得到了抑制, 但 2 阶 SMC 控制使得系统实现变得复杂, 很难达到理想的控制效果。

为了提高永磁同步电动机调速系统的动态品质, 在分析常规指数趋近律滑模变结构控制基础上, 提出了一种新型指数趋近律。该趋近律引入系统状态量的幂函数, 使趋近速度与系统状态变化相关联, 解决了常规指数趋近律切换带为带状, 系统状态趋近于原点的一个抖振的问题(理想状态为趋近于原点), 有效抑制了滑模的固有抖振问题, 提高了趋近速度。同时, 采用该新型指数趋近律设计了速度控制器, 并将其应用于 PMSM 滑模变结构调速系统中, 取代了传统的 PI 调节器。仿真和实验结果表明, 该控制器能较好地提高系统的鲁棒性和快速性, 改善了系统的动静态特性。

1 新型指数趋近律

1.1 常规指数趋近律

滑模变结构控制系统的运动包括趋近运动和滑模运动两部分。趋近运动是系统在连续控制下的正常运动阶段, 它在状态空间中的运动轨迹全部位于切换面以外, 或者有限穿越切换面; 滑模运动是系统在切换面附近且沿切换面向稳定点运动的阶段。

我国高为炳院士于上世纪提出了指数趋近律的概念^[16-17], 并设计了指数趋近律, 如式(1)所示:

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (1)$$

式中: s 为滑模面; $-ks$ 为指数趋近项, 趋近速度从一较大值逐渐减小到 0。对于单纯的指数趋近, 运动点逼近切换面是一个渐进的过程, 不能保证在有限时间内到达, 切换面上也就不存在滑动模态, 所以增加一个等速趋近项 $-\varepsilon \operatorname{sgn}(\varepsilon)$, 使 s 接近于 0 时, 趋近速度是 ε 而不是 0, 可以保证在有限时间内到达。

指数趋近律规定了滑模控制过程中系统在正常运动阶段的状态轨迹, 改善了其动态品质; 但指数趋近律的切换带为带状, 系统在切换带中向原点运动时, 最后不能趋近于原点, 而是趋近于原点的一个抖振, 这可能激发系统未建模的高频成分。

1.2 新型指数趋近律

本文在常规指数趋近律的基础上, 提出了一种新型指数趋近律:

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s) - k |X|^b s \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |X| = 0, \quad a \geq 0, b \geq 0, \varepsilon > 0, k > 0 \end{cases} \quad (2)$$

如式(2)所示, 新型指数趋近律引入系统状态量 $|X|$ 的幂函数, 使系统在趋近滑模切换面的运动阶段, 趋近速度与系统状态量的变化相关联。当系统状态变量运行轨迹离滑模面较远时, $|X|$ 相对较大, 此时按照变速 $-\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s)$ 和变指数 $-k |X|^b s$ 两种速率趋向滑模面, 增大了趋近速度。当接近滑模面时, 变速项起到主要作用, 指数项趋近速率趋近于 0, 而滑模控制律的作用让状态变量 X 进入滑模面并向原点运动, 此过程使 $-\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s)$ 项不断减小, 最终稳定于原点, 抖振现象得到抑制, 解决了常规指数趋近律自身缺点。

当参数 a 、 b 取值不同时, 趋近方式也不相同, 如式(3)所示, 该趋近律满足广义滑模条件。

$$\frac{ds}{dt} = \begin{cases} -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, & a = 0, b = 0 \\ -\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s) - ks, & a \neq 0, b = 0 \\ -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - k |X|^b s, & a = 0, b \neq 0 \\ -\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s) - k |X|^b s, & a \neq 0, b \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

以式(4)所示的典型系统为例验证所提新型指数趋近律的优越性:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (4)$$

取系统滑模面为

$$s = Cx \quad (5)$$

则 $\frac{ds}{dt} = C \frac{dx}{dt}$ 为趋近律, 将其代入状态方程式(4), 得到控制函数:

$$u = (CB)^{-1}(-CAx + \frac{ds}{dt}) \quad (6)$$

式中 $x = [x_1 \quad x_2]^T$, x_1 与 x_2 为系统状态变量。取 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -4200 \end{bmatrix}$, $C = [15 \quad 1]$, $x(0) = \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \end{bmatrix}$, $\varepsilon = 5$, $k = 10$ 。

当 $a = b = 0$ 时, 新型指数趋近律与常规指数趋近律相同(参见式(1))。取 $a = b = 0$, $X = x_1$, 对常规指数趋近律的性能进行仿真分析, 仿真结果如图 1 所示, 由图 1 可见, 控制器输出抖振现象明显。

当 $a \neq 0$, $b = 0$ 时, 新型指数趋近律为 $ds/dt = -\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s) - ks$, 使得参数 ε 与系统状态相结合, 形成变速指数趋近律。当系统状态变量运行轨迹离滑模面较远时, 按照变速速率 $-\varepsilon |X|^a \operatorname{sgn}(s)$ 和指数

项 $-ks$ 趋向滑模面，当接近滑模面时，变速项起主要作用，指数项趋近于 0。取 $a=3, b=0, X=x_1$ ，对上述系统进行仿真，仿真结果如图 2 所示。

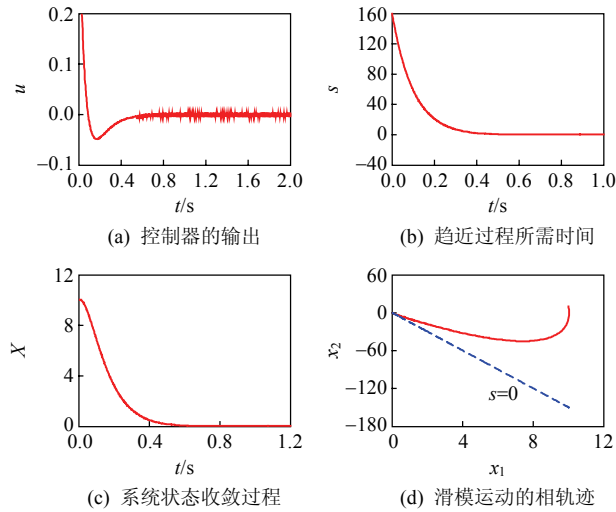


图 1 $a=b=0$ 时新型指数趋近律性能

Fig. 1 Response of the novel exponential reaching law at $a=b=0$

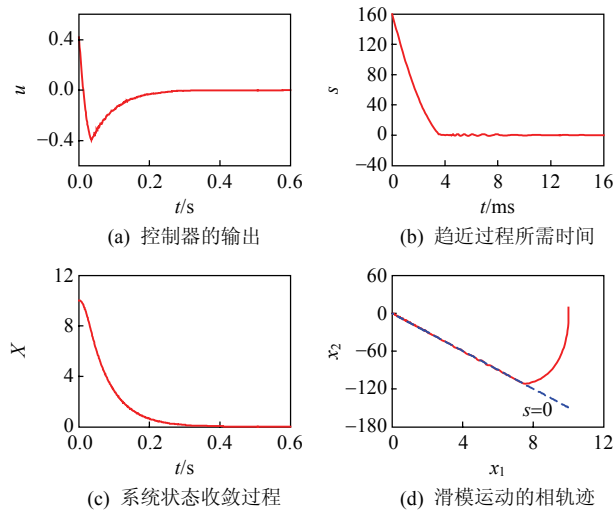


图 2 $a=3, b=0$ 时新型指数趋近律性能

Fig. 2 Response of the novel exponential reaching law at $a=3, b=0$

当 $a=0, b \neq 0$ 时，新型指数趋近律为 $ds/dt = -\varepsilon \text{sgn}(s) - k|X|^b s$ ，使得参数 k 与系统状态相结合，形成变指数趋近律。当系统状态变量运行轨迹离滑模面较远时，按照等速 $-\varepsilon \text{sgn}(s)$ 和变指数 $-k|X|^b s$ 两种速率趋向滑模面；当接近滑模面时，等速项起到主要作用，指数项趋近速率趋近于 0，采用该指数趋近律时，等速项参数 ε 不应取值过大，否则会导致趋近滑模面时速度过大而增大系统的抖振，增加控制器的负担。取 $a=0, b=3, X=x_1$ ，对上述系统进行仿真，仿真结果如图 3 所示。

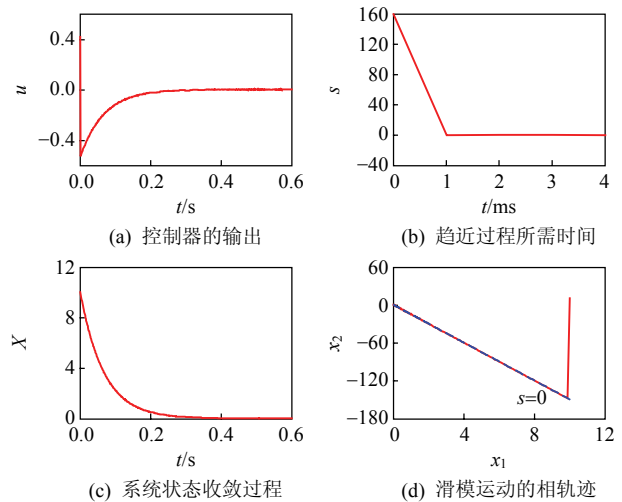


图 3 $a=0, b=3$ 时新型指数趋近律性能

Fig. 3 Response of the novel exponential reaching law at $a=0, b=3$

当 $a \neq 0, b \neq 0$ 时，新型指数趋近律为 $ds/dt = -\varepsilon|X|^a \text{sgn}(s) - k|X|^b s$ 。当系统状态变量运行轨迹离滑模面较远时，按照变速 $-\varepsilon|X|^a \text{sgn}(s)$ 和变指数 $-k|X|^b s$ 两种速率趋向滑模面，提高了趋近速度；当接近滑模面时，变速项起主要作用，指数项趋近于 0。取 $a=3, b=3, X=x_1$ ，仿真结果如图 4 所示。

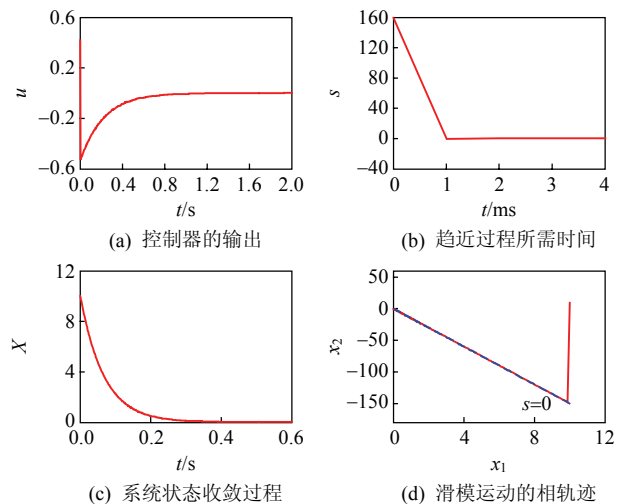


图 4 $a=3, b=3$ 时新型指数趋近律性能

Fig. 4 Response of the novel exponential reaching law at $a=3, b=3$

由图 1—4 可知，与常规指数趋近律相比，采用新型指数趋近律后，控制器输出的抖振得到很好的抑制，趋近滑模面所需时间明显减少，提高了趋近速度。

从以上分析可知， a, b 参数取不同值可以推导出 4 种不同的趋近律，而对于每种趋近律，其趋近滑模面的方式也各不相同，其中当 $a=b=0$ 时，新型指数趋近律与常规指数趋近律相同，而其他 3 种

趋近律在趋近速度与抖振抑制方面都优于常规指数趋近律。

2 永磁同步电动机的数学模型

为了简化分析,在建立永磁同步电动机数学模型时,作如下处理:1)假设转子永磁磁场在气隙空间分布为正弦波,定子电枢绕组中的感应电动势也为正弦波;2)忽略定子铁心饱和,认为磁路为线性,电感参数不变;3)不计铁心涡流与磁滞损耗;4)转子上无阻尼绕组。采用 $i_d=0$ 的 PMSM 转子磁场定向控制,电压方程如下

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_a + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

PMSM 转矩方程为

$$T_c = \frac{3}{2} p \psi_a i_q \quad (8)$$

PMSM 运动方程为

$$T_c - T_L = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴的电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴的电感; R 为定子电阻; p 为极对数; ω 为转子电角速度; J 为转动惯量; T_c 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; ψ_a 为永磁体与定子交链磁链。

3 控制器的设计

调速系统采用图 5 所示的控制方案。设计滑模控制器的输入为转速误差,输出为电流值。

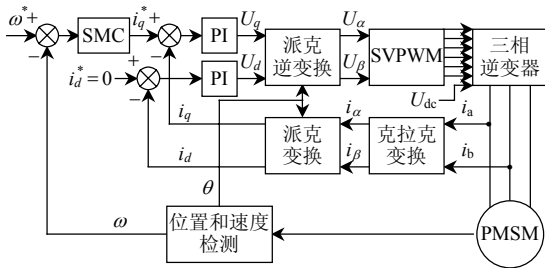


图 5 调速系统框图

Fig. 5 Structure of speed control system

取 PMSM 系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \frac{dx_1}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω^* 为转速给定; ω 为实际转速。

由式(8)—(10)得

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} = -\frac{p}{J} \left(\frac{3}{2} p \psi_a i_q - T_L \right) \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{d^2\omega}{dt^2} = -\frac{3p^2}{2J} \psi_a \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

令 $D = \frac{3p^2}{2J} \psi_a$ 、 $U = \frac{di_q}{dt}$, 可得系统状态空间:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} U \quad (12)$$

取系统滑模面为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (13)$$

式中 c 为滑模面参数, $c > 0$ 。对 s 求偏导有

$$\frac{ds}{dt} = c \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} = cx_2 - D \frac{di_q}{dt} \quad (14)$$

为了提高系统正常运动段的动态品质,利用式(2)所示的新型指数趋近律来设计控制器, a 、 b 一般取小于等于 4 的正整数,本文取 $a=2$, $b=2$; 而对于系统状态变量的选择上,为了避免将状态变量 x_2 中的微分干扰引入趋近律中,选择 $X=x_1$, 结合式(14)得

$$i_q = \frac{1}{D} \int (cx_2 + \varepsilon |x_1|^2 \operatorname{sgn}(s) + k |x_1|^2 s) dt \quad (15)$$

由式(15)可以看出,在滑模面以外的运动过程中,系统运动点以变速和变指数 2 种趋近律趋向滑模面;当接近滑模面时,系统进入切换带,此时穿越滑模面的速率与转速误差的平方 ($|x_1|^2$) 成比例,因此幅度将越来越小,在理想情况下会稳定于原点,误差变为 0,则使 $\operatorname{sgn}(s)$ 项为 0,从而控制器得到优化。

4 仿真与实验验证

建立了 Simulink 系统仿真模型,并以 TMS320F2812 为控制芯片搭建了实物系统。电机具体参数如下: $R=2.46 \Omega$; $L_d=L_q=6.35 \text{ mH}$; $\psi_a=0.175 \text{ Wb}$; $J=1.02 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 粘滞摩擦系数 $B=1 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$; 极对数 p 为 4; 额定转速为 3000 r/min,逆变器开关频率为 10 kHz。

图 6 为系统起动和突卸负载时的动态响应仿真结果。系统起动时两种控制策略下转速对比曲线如图 6(a)、(b)所示,系统在 0.06 s 时负载转矩从 5 N·m 突降至 0 时两种控制策略下的转速、三相电流和转矩响应曲线如图 6(c)—(h)所示。

图 7 为系统起动和突卸负载时的动态响应实验

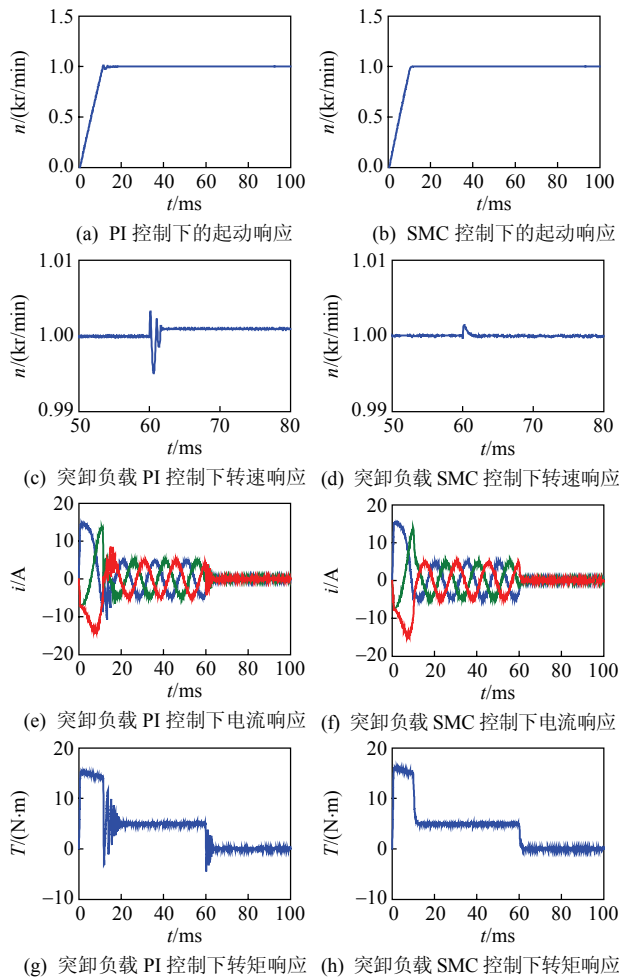


图 6 系统启动与突卸负载时动态响应仿真结果

Fig. 6 Simulation results of system dynamic response to unloading and system start

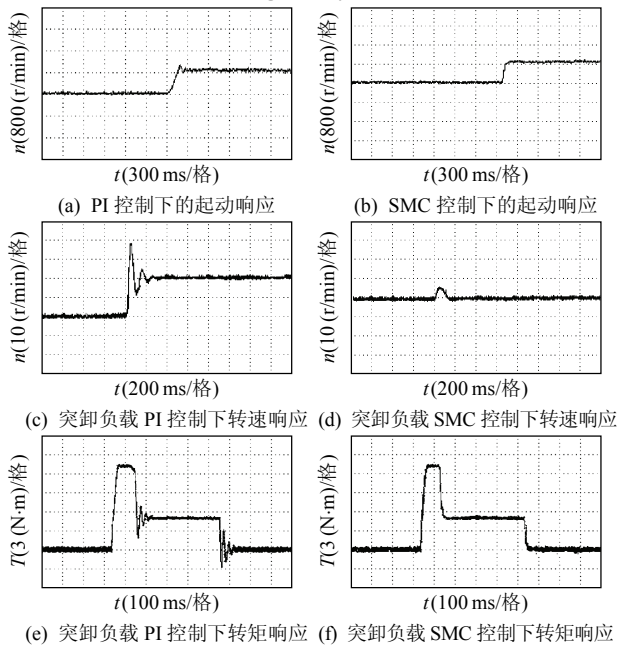


图 7 系统启动与突卸负载时动态响应实验结果

Fig. 7 System dynamic response experimental results when torque varying and system starting

结果，给定转速 800 r/min 时，系统启动过程中两种控制策略下转速对比如图 7(a)、(b)所示，系统稳态运行后突卸负载情况下的转速响应如图 7(c)、(d)所示，系统启动并进入稳态运行后突卸负载时的转矩响应如图 7(e)、(f)所示。

由图 6—7 可见，采用 PI 控制时，系统转速、转矩有明显的波动，当施加外界扰动时，恢复到原有转速需要一定的调节时间，且存在稳态误差；而采用新型指数趋近律滑模控制器控制时，系统转速、转矩具有较好的动态性能，抗外界扰动能力强，鲁棒性好。

图 8 为常规指数趋近律与新型指数趋近律两种控制策略对比实验波形，其中图 8(a)为常规指数趋近律控制策略下转速从 500 升至 1200 r/min 的速度响应波形，图 8(b)为常规指数趋近律控制策略下突卸负载情况下电流响应波形；图 8(c)、(d)分别为 $a=1$ 、 $b=0$ 时新型指数趋近律控制策略下转速响应与突卸负载电流响应波形；图 8(e)、(f)分别为 $a=b=2$ 时新型指数趋近律控制策略下转速响应与突卸负载电流响应波形。由图 8 可以看出，在基于新型指数趋近律的滑模速度控制器控制下，转速动态性能、抗外界扰动能力与鲁棒性方面均明显优于常规指数趋近律。

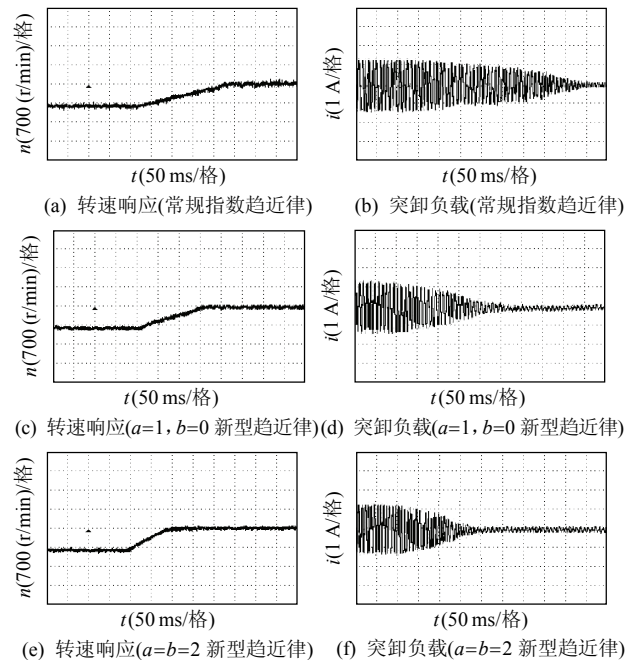


图 8 转速响应与突卸负载电流波形

Fig. 8 Waveforms of sudden unload and speed response

5 结论

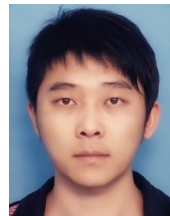
1) 为提高永磁同步电机调速系统的动态品质，

在分析常规指数趋近率滑模变结构控制的基础上,提出一种新型指数趋近律,该趋近率可以有效抑制滑模固有的抖振现象,并提高趋近速度。

2) 采用该趋近律设计的滑模变结构速度控制器控制性能优于常规指数趋近律控制器和 PI 调节器,该方法为提高 PMSM 调速系统的动态品质提供了一种有效途径。

参考文献

- [1] 孙强,程明,周鹏,等. 新型双凸极永磁电机调速系统的变参数 PI 控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 117-122.
Sun Qiang, Cheng Ming, Zhou E, et al. Variable PI control of a novel doubly salient permanent magnet motor drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 117-122(in Chinese).
- [2] 张细政,王耀南,杨民生. 永磁同步电机无位置传感器双滑模鲁棒控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(6): 696-700.
Zhang Xizheng, Wang Yaonan, Yang Minsheng. Doubly-sliding-mode based sensorless robust control of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(6): 696-700(in Chinese).
- [3] 田艳丰,郭庆鼎. 永磁直线同步电动机的滑模- H_∞ 鲁棒跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 1-5.
Tian Yanfeng, Guo Qingding. Sliding mode- H_∞ robustness tracking control for PM linear synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 1-5(in Chinese).
- [4] 李鸿儒,顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.
Li Hongru, Gu Shusheng. Neural-network-based adaptive observer of position and speed of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 32-35(in Chinese).
- [5] 张昌凡,王耀南,何静. 永磁同步伺服电机的变结构智能控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 13-17.
Zhang Changfan, Wang Yaonan, He Jing. Variable structure intelligent control for PM synchronous servo motor drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 13-17(in Chinese).
- [6] 刘贤兴,卜言柱,胡育文,等. 基于精确线性化解耦的永磁同步电机空间矢量调制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 56-59.
Liu Xianxing, Bu Yanzhu, Hu Yuwen, et al. Space vector modulation system for PMSM based on precision linearization decoupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 56-59(in Chinese).
- [7] 张希,陈宗祥,潘俊民,等. 永磁直线同步电机的固定边界层滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 116-121.
Zhang Xi, Chen Zongxiang, Pan Junmin, et al. Fixed boundary layer sliding mode control of PM linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 116-121(in Chinese).
- [8] 贾洪平,贺益康. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 1-6.
Jia Hongping, He Yikang. Variable structure sliding mode control for PMSM DTC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 1-6(in Chinese).
- [9] 葛宝明,郑琼林,蒋静坪,等. 基于离散时间趋近率控制与内模控制的永磁同步电动机传动系统[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 106-111.
Ge Baoming, Zheng Qionglin, Jiang Jingping, et al. PM synchronous motor drive based on discrete-time reaching law and internal-model controls[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 106-111(in English).
- [10] Xu Z, Rahman M F. Direct torque and flux control of an IPM synchronous motor using variable structure control approach[C]//The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society. Pusan, Korea: IEEE, 2004: 2733-2738.
- [11] Baik I C, Kim K H, Youn M J. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(1): 47-54.
- [12] 汪海波,周波,方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(9): 71-77.
Wang haibo, Zhou Bo, Fang Sichen. A PMSM sliding mode control system based on exponential reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(9): 71-77(in Chinese).
- [13] Kang K L, Kim J M, Hwang K B, et al. Sensorless control of PMSM in high speed range with iterative sliding mode observer[C]//Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim, California, USA: IEEE, 2004: 1111-1116.
- [14] 方斯琛,周波. 滑模控制的永磁同步电机伺服系统一体化设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 96-101.
Fang Sichen, Zhou Bo. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 96-101(in Chinese).
- [15] Laghrouche S, Plestan F, Glumineau A, et al. Robust second order sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor [C]//Proceedings of the American Control Conference. Denver, USA: American Automatic Control Council, 2003: 4071- 4076.
- [16] 童克文,张兴,张昱,等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 102-106.
Tong Kewen, Zhang Xing, Zhang Yu, et al. Sliding mode variable structure control of permanent magnet synchronous based on a novel reaching law[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 102-106(in Chinese).
- [17] 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: 28-30.
Gao Weibing. Variable structure control theory[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 28-30(in Chinese).



张晓光

收稿日期: 2011-02-06。

作者简介:

张晓光(1985),男,博士研究生,研究方向为电机控制、电磁兼容,15045863034@163.com;

赵克(1973),男,博士,讲师,研究方向为电机控制、风力发电;

孙力(1960),男,教授,博士生导师,研究方向为一体化电机驱动控制与电磁兼容;

安群涛(1984),男,博士研究生,研究方向为电机驱动控制系统及其可靠性。

(责任编辑 李婧妍)