

基于非奇异快速终端模糊滑模控制器的 SPMSM 无速度传感器控制*

朱昱豪, 于永进

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 传统 PI 速度控制和传统滑模控制(SMC)导致表贴式永磁同步电机(SPMSM)运行时速度调节差,在负载发生改变和转速突变时不能很好地控制,系统抖振较大。为了解决此问题,提出一种新型非奇异快速终端(NSFT)滑模面与模糊控制相结合的方法,设计速度控制器以实现 SPMSM 的无速度传感器控制。用连续函数 $v(s)$ 代替趋近律中的开关函数,有效抑制抖振;设计模糊控制规则和模糊参数自适应律,对趋近律中的参数进行自适应调整;设计 Lyapunov 函数证明新型 SMC 的稳定性。MATLAB 仿真结果表明,所设计的新型 NSFT 模糊滑模速度控制器(NSFT-Fuzzy-SMC)在系统状态发生改变时,调节速度更快,效果更好,系统的鲁棒性更强,稳定运行时抖振更小,比传统 SMC 具有更好的控制性能和抗干扰能力。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 非奇异快速终端滑模; 连续函数; 模糊控制; 参数自适应; 无传感器控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)10-0017-07

doi: 10.12177/emca.2020.113

SPMSM Speed Sensorless Control Based on Non-Singular Fast Terminal Fuzzy Sliding Mode Controller*

ZHU Yuhao, YU Yongjin

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Traditional PI speed control and traditional sliding mode control (SMC) lead to poor speed regulation during the surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) operation. When the load changes and the speed changes suddenly, traditional controllers cannot well control the system and the chattering is large. To solve these problems, a new non-singular fast terminal (NSFT) sliding mode surface combined with fuzzy control is proposed to design the speed controller, which can realize SPMSM speed sensorless control. Using the continuous function $v(s)$ to replace the switching function in the approaching law can effectively suppress chattering. The newly designed fuzzy control rules and fuzzy parameter adaptation law can adaptively adjust the parameters in the approaching law. Meanwhile, a Lyapunov function is designed to prove the stability of the new SMC controller. The simulation results of MATLAB show that the designed NSFT-fuzzy-SMC controller has faster adjustment speed and better adjustment effect when the system state changes, the system is more robust, and the chattering is smaller during stable operation. Compared with the general SMC, it has better control performance and anti-disturbance ability.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); non-singular fast terminal (NSFT) sliding mode; continuous function; fuzzy control; parameter adaptation; sensorless control

收稿日期: 2020-07-03; 收到修改稿日期: 2020-07-31

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61803233)

作者简介: 朱昱豪(1996—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制。

于永进(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统运行与控制。(通信作者)

0 引言

为了实现高性能表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 的控制, 需要对电机转速进行精确测量。传统方法是利用安装在电机转轴上的高精度机械式传感器进行测量, 不仅占用空间、增加系统体积和成本, 而且机械式传感器易受外界环境影响, 对温度、磁场等因素较敏感, 会导致测量精度和系统稳定性下降。

无传感器控制是通过检测相关电信号, 采用相应算法对电机转子位置和转速进行精确估计, 从而省去机械式传感器的安装。对于中高速运行下的电机, 滑模控制 (SMC) 对外部扰动和系统参数变化不敏感, 响应速度快, 已逐渐成为高性能 SPMSM 无速度传感器控制的主流方法^[1-3]。

文献[4]设计了一种负载转矩观测器来对负载扰动进行实时观测, 同时将观测的负载转矩作为独立的补偿量进行补偿, 提高了系统的精度, 但传统滑模面的使用使系统收敛速度较慢, 同时 sat 函数的使用会导致系统控制时间延长。文献[5]根据 α - β 坐标系下的电机方程构造位置观测器, 需要同时对 α 、 β 轴反电动势进行观测, 且利用反正切得到转子位置角需要进行相应角度补偿。文献[6]通过设计电流鲁棒无源控制器和模糊滑模软切换控制器, 提高了系统的精度, 有效削弱滑模抖振。文献[7]设计 PI 模糊控制器, 但需要对 k_p 、 k_i 同时进行模糊控制规则的设计, 且需要同时对 α 、 β 轴电流和电压进行控制, 增加了系统的复杂程度。文献[8]考虑六相永磁同步电机 (PMSM) 在运行中存在的参数变化和负载扰动问题, 设计相应带扰动的滑模控制器, 但控制律中使用开关函数 $\text{sgn}(s)$ 会导致信号存在高频分量, 加大抖振。文献[9]提出在控制系统速度环中用双曲正弦函数代替开关函数来设计趋近律, 同时构造变截止低通滤波器 (LPF) 和修正反电动势观测器两级结构来抑制高频分量, 调节性能较好, 但增加了系统复杂程度, 使系统稳定性减弱。文献[10]通过设计负载自适应扰动观测器, 对参数变化和负载扰动进行有效跟踪, 控制效果较好。文献[11]根据电机 d - q 坐标系下的数学模型, 构造含积分项的控制器, 但滑模面收敛速度较慢, 且趋近律中开关函数的使用会造成抖振。文献[12]

根据模糊控制原理, 设计滑模参数自适应规则, 增强了系统的抗干扰能力, 但采用传统积分滑模面, 导致收敛速度较慢, 且电机稳定运行后电磁转矩抖振较大。

本文在传统积分 SMC 的基础上进行改进, 设计了一种新型非奇异快速终端 (NSFT) 滑模面与模糊控制相结合的速度控制器, 用连续函数 $v(s)$ 代替 $\text{sgn}(s)$, 减弱抖振, 同时系统收敛速度更快; 设计状态变量的隶属度函数、模糊控制规则和模糊参数自适应律, 增强系统的鲁棒性和运行状态变化后的调节能力。仿真结果表明, 所设计的新型 NSFT 滑模速度控制器 (NSFT-Fuzzy-SMC) 在系统负载突变和转速突变时, 能够较好地调节, 更好地满足高性能 SPMSM 的无速度传感器控制需求。

1 SPMSM 数学模型

假设 SPMSM ($L_d = L_q = L_s$) 为理想模型, 忽略铁心饱和且不计涡流与磁滞损耗, 在 d - q 同步旋转坐标系上, SPMSM 的状态方程为

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & p\omega_m & 0 \\ -p\omega_m & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{p\psi_f}{L_s} \\ 0 & \frac{3p}{2J}\psi_f & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L_s} \\ \frac{u_q}{L_s} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: p 为微分算子; i_d 、 i_q 、 u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电流和电压; ω_m 为机械角速度; p 为极对数; L_s 为定子电感; ψ_f 为永磁磁链; J 为转动惯量; B 为摩擦系数; T_L 为负载转矩。

对 SPMSM 的矢量控制采取 $i_d = 0$ 的控制策略时, 式(1)可简化为

$$p \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{p\psi_f}{L_s} \\ \frac{3p}{2J}\psi_f & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L_s} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 传统 SMC 及滑模面设计

系统状态误差变量定义如下:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_m^* - \omega_m \\ x_2 = \int_0^t x_1 d\tau \end{cases} \quad (3)$$

式中： ω_m^* 为电机的给定机械角速度。

将式(2)中的 ω_m 分量代入式(3)中并对 x_1 、 x_2 求导,得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = -\frac{1}{J}\left(\frac{3p}{2}\psi_f i_q - B\omega_m - T_L\right) \\ \dot{x}_2 = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

传统滑模面函数设计如下:

$$s = x_1 + cx_2 \quad (5)$$

对式(5)求导,得:

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + c\dot{x}_2 = -\frac{1}{J}\left(\frac{3p}{2}\psi_f i_q - B\omega_m - T_L\right) + cx_1 \quad (6)$$

其中: $c>0$ 。

为了保证三相 SPMSM 无速度传感器控制系统具有良好的动态性能和稳定性,传统方法采用的是含有开关函数的趋近律,控制器设计为

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi_f} \left[\frac{B}{J}\omega_m + \frac{T_L}{J} + cx_1 + ks + \eta \text{sgn}(s) \right] \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + c\dot{x}_2 = -ks - \eta \text{sgn}(s) \quad (8)$$

选取 Lyapunov 函数为

$$V = 0.5 s^2 \quad (9)$$

对 V 求导并将式(8)代入,得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -ks^2 - \eta |s| \leq 0 \quad (10)$$

式(10)满足 Lyapunov 稳定性定理,说明系统能够达到稳定,即设计的速度控制器能够满足系统在有限时间内收敛到稳定状态的要求。

3 模糊控制原理及规则

模糊逻辑控制又称模糊控制,其控制策略是采用不确定性语言(大、中、小)和模糊条件设计,对于相对较复杂的系统,能够实现高性能的控制。对于全系统 SPMSM 无速度传感器控制而言,其模型建立相对较复杂,同时需要较大的切换增益,不仅会造成抖振,同时会使系统运行时间增加、系统稳定性变差。模糊逻辑的设计不依靠被控制对象的模型,同时能够比较容易地将控制者的经验通过模糊规则融入控制器中,通过设计变量隶属度函数和模糊控制规则,实现高水平的控制器^[13]。在 SMC 中,趋近律参数的选择对其动态性能影响较大,通过引入模

糊控制,对趋近律的参数进行模糊化处理,采用模糊规则,对函数切换增益进行有效估计,可以极大地减弱抖振。

通过设计模糊规则,对趋近律部分的参数进行实时修正,模糊控制设计为二维,选取系统状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_m^* - \omega_m \\ \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (11)$$

x_1, \dot{x}_1 作为模糊控制的 2 个输入变量,取趋近律参数 η 作为输出变量,将控制变量模糊处理。2 个输入变量的隶属度函数设为 Gsusmf 类型,论域分别为 $[-15, 15]$ 、 $[-20, 20]$,函数图如图 1、图 2 所示。输出变量 η 的隶属度函数设为 Trapmf 类型,论域为 $[0, 15]$,函数图如图 3 所示。

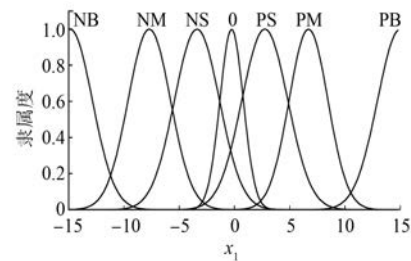


图 1 系统状态变量 x_1 隶属度函数

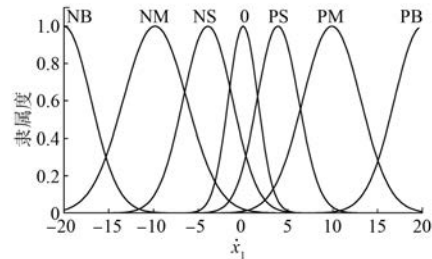


图 2 系统状态变量 \dot{x}_1 隶属度函数

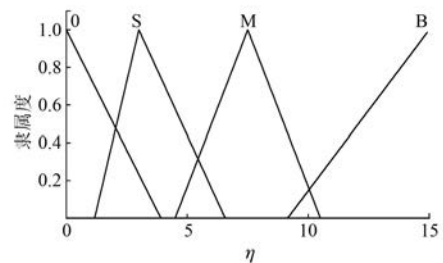


图 3 输出变量 η 隶属度函数

根据经验和仿真调试设计模糊控制规则如

表 1 所示。

表 1 η 模糊控制规则

$x_1 \backslash \dot{x}_1$	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	B	M	S	S	S	M	B
NM	M	M	S	S	S	M	M
NS	M	M	S	S	S	M	M
0	S	M	S	0	S	M	S
PS	M	M	S	S	S	M	M
PM	M	M	S	S	S	M	M
PB	B	M	S	S	S	M	B

其中, B 表示“大”, M 表示“中”, S 表示“小”, NB 表示负“大”, NM 表示负“中”, NS 表示负“小”, PB 表示正“大”, PM 表示正“中”, PS 表示正“小”。

同时,设计滑模参数自适应规则如下:

$$M = P\eta \quad (12)$$

式中: P 为自适应系数, $0 < P < 1$ 。

图 4 为模糊控制规则 3D-Surface 图。从图 4 可以看出,当系统状态变量 x_1, \dot{x}_1 较大时,系统距滑模面相对较远,此时 η 取值较大,系统可以较快的速度趋近滑模面;当系统状态变量 x_1, \dot{x}_1 较小时, η 取值较小,此时状态变量可以相对缓慢地到达滑模面,从而削弱系统抖振。

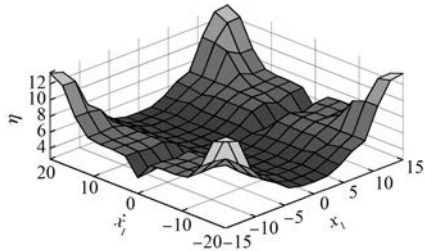


图 4 模糊控制 3D-Surface 图

基于模糊控制,设计趋近律函数如下:

$$f = -\eta \text{sgn}(s) |s|^M - ks \quad (13)$$

将趋近律函数代入控制器中,得:

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi_f} \left[\frac{B}{J} \omega_m + \frac{T_L}{J} + cx_1 + \eta \text{sgn}(s) |s|^M + ks \right] \quad (14)$$

其中: $M > 0$ 。通过调整 M 的值进行模糊控制。当系统状态变量距滑模面较远时,能够以较大的速度趋近滑模面;当系统状态趋近于滑动模态时,能够在保证较小增益的同时降低系统抖振。

4 新型 NSFT-Fuzzy-SMC 设计

由式(7)可以看出,控制器中趋近律部分使用了符号函数。由于符号函数的不连续性,导致观测到的信号中存在高频切换分量,在实际控制过程中会产生明显的抖振,从而降低系统观测精度,因此需要对抖振进一步抑制。可以采用具有连续特性的继电器函数或饱和函数 $\text{sat}(s)$ 来代替,但 $\text{sat}(s)$ 的使用会导致控制时间延长,且有可能对系统造成冲击,导致系统稳定性下降。因此,采用连续函数 $v(s) = s/|s| + \psi$ 代替开关函数 $\text{sgn}(s)$;同时,为了进一步提高观测精度,使状态误差能够更快地到达滑模面,设计了一种新型 NSFT 滑模面。滑模面选取如下:

$$s = x_1 + \alpha x_2 + \frac{1}{\beta} x_2^z \quad (15)$$

式中: x 为状态误差变量; $\alpha > 0; \beta > 0; 1 < z < 2$ 。

定义系统状态误差:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_m^* - \omega_m \\ x_2 = \int_0^t x_1 d\tau \end{cases} \quad (16)$$

对式(15)求得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{x}_1 + \alpha \dot{x}_2 + \frac{z}{\beta} x_2^{z-1} \dot{x}_2 = \\ &= \frac{B}{J} \omega_m + \frac{T_L}{J} - \frac{3p\psi_f}{2J} i_q + \alpha x_1 + \frac{z}{\beta} x_2^{z-1} x_1 \end{aligned} \quad (17)$$

用连续函数 $v(s) = s/|s| + \psi$ 代替传统符号函数 $\text{sgn}(s)$,得控制器如下:

$$i_q = \frac{2J}{3p\psi_f} \left(\frac{B}{J} \omega_m + \frac{T_L}{J} + \alpha x_1 + \frac{z}{\beta} x_2^{z-1} x_1 + \eta \frac{s}{|s| + \psi} + ks \right) \quad (18)$$

式中: k, η 均为常数且均大于 0; ψ 为很小的正常数。

连续函数 $v(s)$ 如图 5 所示。

将式(18)代入 \dot{s} 中,得:

$$\dot{s} = -ks - \eta \frac{s}{|s| + \psi} \quad (19)$$

根据第二法(亦称为直接法),选取 Lyapunov 函数为^[14-15]

$$V = 0.5 s^2 \quad (20)$$

则:

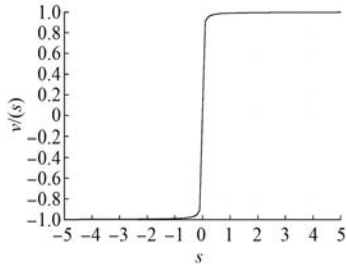


图5 连续函数 $v(s)$

$$\dot{V} = s\dot{s} \tag{21}$$

将式(19)代入式(21),得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left[\left(-ks - \eta \frac{s}{|s| + \psi} \right) \right] = -ks^2 - \eta \frac{s^2}{|s| + \psi} \leq 0 \tag{22}$$

即式(20)满足 Lyapunov 稳定性定理,说明系统能够在有限时间内收敛到稳定状态。在设计控制律下,新型 NSFT 滑模面能够在一定时间内收敛到零,从而转速误差最终能够收敛到零,即电机实际转速能够跟随参考转速,同时由于趋近律中连续函数 $v(s) = s/|s| + \psi$ 的使用,避免了抖振现象,且收敛速度更快,系统更加稳定。

考虑模糊控制,取模糊控制器中趋近律参数 η 作为输出变量,重新设计趋近律如下:

$$f' = -\eta \frac{s}{|s| + \psi} |s|^M - ks |s|^N \tag{23}$$

其中: $M > 0; N > 0$ 。

设计模糊控制参数自适应规则如下:

$$\begin{cases} M = 0.3\eta \\ N = 2\eta \end{cases} \tag{24}$$

将 f' 代入 i_q 中,可得改进后的控制器如下:

$$i'_q = \frac{2J}{3p\psi_f} \left(\frac{B}{J}\omega_m + \frac{T_L}{J} + \alpha x_1 + \frac{z}{\beta} x_2^{z-1} x_1 + \eta \frac{s}{|s| + \psi} |s|^M + ks |s|^N \right) \tag{25}$$

对于控制器中的机械角速度项,可通过测量电机三相电压和电流,变换后求取电机反电动势,

根据 $p\omega_m = \frac{\sqrt{E_\alpha^2 + E_\beta^2}}{\psi_f}$ 获取电机机械角速度信息,

再将角速度信号输入速度控制器中,从而实现电机的无速度传感器控制。在系统对精度要求不高的情况下,扩展反电动势与机械角速度之间的转化能够满足系统稳定控制。模糊控制和连续函数共同作用,既能够准确地选择切换增益,又很好地抑制了抖振现象。同时,基于新型 NSFT-Fuzzy SMC 的使用,系统收敛速度更快。

在 MATLAB/Simulink 中构建全系统下新型 NSFT-Fuzzy-SMC 的 SPMSM 无传感器控制系统,如图 6 所示。

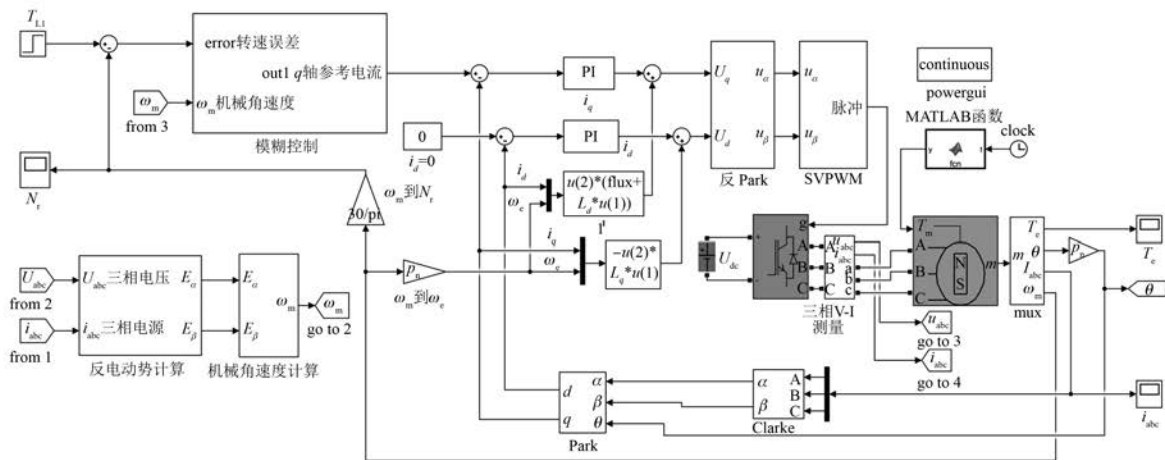


图6 新型 NSFT-Fuzzy-SMC 的 SPMSM 无传感器控制系统

5 仿真验证与结果对比

为了分析所设计的新 NSFT-Fuzzy-SMC 的

控制性能,在 MATLAB 中进行仿真验证,按照图 6 进行 SPMSM 无速度传感器控制系统的搭建,采用 $i_d = 0$ 的控制策略,并与 $s = x_1 + cx_2$ 滑模面下的

SMC 进行对比。采用 ode45 算法, 仿真时间 0.5 s, 电机空载起动, 参考转速为 1 000 r/min, 负载按照式 (26) 变化, 0.35 s 时转速突变为 1 200 r/min, 各参数设置分别如表 2~表 4 所示, 仿真结果如图 7、图 8 所示。

$$T_L = \begin{cases} e^{10t} - 1, & t \in [0, 0.15] \\ 7.5, & t \in (0.15, 0.25) \\ -25t + 12.75 & t \in [0.25, 0.35) \\ 4, & t \in [0.35, 0.5] \end{cases} \quad (26)$$

表 2 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	2.875
d 轴电感 L_d/mH	8.5
q 轴电感 L_q/mH	8.5
永磁磁链 ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3×10^{-3}
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	8×10^{-5}
极对数 p	4

表 3 逆变器与 SVPWM 参数

参数名称	参数值
逆变器直流测电压 U_{dc}/V	311
SVPWM 电压 U/V	311
开关频率 f/kHz	10

表 4 Fuzzy-SMC 及其他参数

参数名称	参数值
z	57/55
α	0.05
β	2/7
k	10
ψ	0.01

图 7 为所设计的 NSFT-Fuzzy-SMC 系统和滑模面 $s = x_1 + cx_2$ 下的 Fuzzy-SMC 系统的转速变化波形图。对比图 7(a) 和图 7(b) 可知, 电机起动阶段, 在 NSFT-Fuzzy-SMC 控制下, 电机转速达到稳定的时间 (0.024 s) 比 $s = x_1 + cx_2$ 滑模面下的 Fuzzy-SMC 更短 (0.035 s); 在 0.15 s 突加负载和 0.25 s 突减负载的情况下, NSFT-Fuzzy-SMC 虽有 0.01 s 的超调时间, 但与 $s = x_1 + cx_2$ 滑模面下的 Fuzzy-SMC 相比, 在负载发生突变后, 转速跟踪更

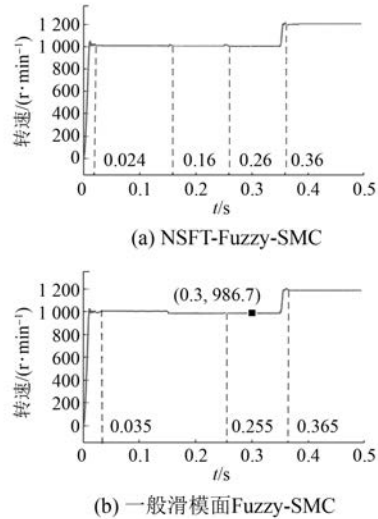


图 7 2 种滑模面下转速变化对比波形图

加精确, 调节后运行速度稳定在 1 000 r/min, 且基本无抖振, $s = x_1 + cx_2$ 滑模面下的 Fuzzy-SMC 在负载突变后, 系统转速 (约 987 r/min) 不能很好地恢复到参考转速, 有较大的误差; 在 0.35 s 转速突变时, NSFT-Fuzzy-SMC 转速调节时间更短 (0.01 s), 电机转速能够更快、更精确地上升至 1 200 r/min, 稳定运行且基本无抖振, 具有优良的速度跟踪能力和抗干扰性能。

图 8 为本文设计的 NSFT-Fuzzy-SMC 系统电磁转矩变化波形图和滑模面 $s = x_1 + cx_2$ 下的 Fuzzy-SMC 系统电磁转矩变化波形图。通过对比可以看出, 本文设计的 NSFT-Fuzzy-SMC 性能更好, 在系统运行状态发生改变时, 能够更快地恢复到稳

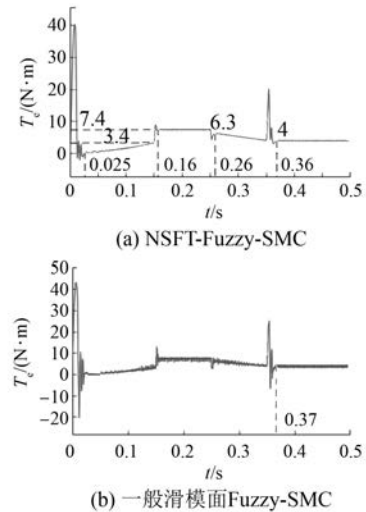


图 8 2 种滑模面下电磁转矩变化对比波形图

定状态,同时超调量相对较小,稳定运行时基本无抖振,其优良的转矩性能可以在电机负载发生变化时保障系统拥有较好的适应能力。

6 结 语

本文在传统积分滑模面的基础上,设计了一种 NSFT 滑模面与模糊控制结合的速度控制器,利用 Lyapunov 稳定性判据证明所设计控制器的稳定性,最后在 MATLAB 中构建系统模型进行仿真。研究表明:(1) NSFT 滑模面下,系统收敛速度更快;(2) 模糊控制规则和参数自适应律的设计,增强了系统的鲁棒性和运行状态改变后的调节能力;(3) 用连续函数 $v(s)$ 代替开关函数,有效地减小了系统稳定运行时的误差和抖振,增强了系统的稳定性。

【参 考 文 献】

- [1] 刘计龙,肖飞,沈洋,等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2017,32(16): 76.
- [2] 潘森林,高瑾. 永磁同步电机无速度传感器控制技术综述[J]. 微电机,2018,51(3): 62.
- [3] 李浩源,张兴,杨淑英,等. 基于高频信号注入的永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2018,33(12): 2653.
- [4] 李政,胡广大,崔家瑞,等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(3): 431.
- [5] 华志广,窦满峰,赵冬冬,等. 基于改进型滑模观测器的 PMSM 无位置传感器控制[J]. 西北工业大学学报,2018,36(4): 754.
- [6] 张懿,韦汉培,魏海峰,等. 永磁同步电机自适应模糊滑模鲁棒无源控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(9): 101.
- [7] 谢振球,谭兮,张阳,等. 基于滑模观测器的永磁同步电机自整定调速系统[J]. 湖南工业大学学报,2019,33(5): 25.
- [8] 李永恒,刘陵顺,闫红广. 基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究[J]. 电机与控制应用,2018,45(12): 1.
- [9] 赵峰,罗雯,高锋阳,等. 基于模糊滑模控制器和两级滤波观测器的永磁同步电机无位置传感器混合控制[J]. 控制理论与应用,2020,37(8): 1865.
- [10] 姜鹏,宋立业. 基于模糊扰动观测器的 PMSM 积分滑模控制研究[J]. 计算机应用与软件,2020,37(1): 93.
- [11] 许轲. 永磁同步电机模糊滑模调速系统设计与优化[J]. 机械设计与制造,2020,49(5): 42.
- [12] 柯希彪,袁训锋,郭琳. 基于模糊积分滑模控制器的永磁同步电机控制[J]. 计算机技术与发展,2020,30(6): 197.
- [13] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社,2015.
- [14] 黄家才,施昕昕,李宏胜,等. 永磁同步电机调速系统的分数阶积分滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(6): 1736.
- [15] 柯希彪,郭琳,袁训锋,等. 基于模糊控制的永磁同步电机滑模观测器控制[J]. 自动化与仪表,2020,35(5): 34.

◎广告◎

无锡市明通动力工业有限公司

诚聘英才:

1、电机设计工程师,任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 5 年及以上

2、生产、质量管理工程师各 1 名,任职要求:工业电机或机械制造行业生产、质量管理岗位 3 年以上

联系电话:0510-83320680

地址:无锡惠山经济开发区洛社配套区群胜路 7 号(邮编:214187)

企业网站

