

基于二阶滑模的永磁同步电机 SVM-DTC

万东灵, 赵朝会, 孙 强
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 针对永磁同步电机空间矢量直接转矩控制中存在的磁链脉动大、转速超调大和转速动态响应速度慢等问题, 提出基于 Super-twisting 二阶滑模控制理论将转速环、磁链环和转矩上的控制器全部换成 Super-twisting 滑模控制器。对所提出的控制理论利用 MATLAB/Simulink 仿真软件进行仿真验证。仿真结果表明所提出的控制理论能够成功抑制转速超调, 实现提高转速、磁链和转矩的动态响应速度、抑制转矩和磁链脉动。

关键词: 永磁同步电机; 空间矢量; 直接转矩控制; Super-twisting; 滑模控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0034-06

SVM-DTC for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Second Order Sliding Mode Control

WAN Dongling, ZHAO Chaohui, SUN Qiang

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To solve the problem of the flux ripple, big speed overshoot and slow dynamic response speed in the space vector direct torque control of permanent magnet synchronous motor, the controller of speed loop was replaced, speed loop and torque loop with Super-twisting slide mode controller based on the theory Super-twisting slide mode. The proposed control theory was simulated and verified by the software of MATLAB/Simulink simulation. The simulation results showed that the proposed control theory could successfully suppress the overshoot of speed, improve the dynamic response speed, flux and torque, and restrain the torque and flux ripple.

Key words: permanent magnet synchronous motor; space vector; direct torque control; super-twisting; sliding mode control

0 引 言

直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 策略利用一个开关表和两个滞环控制器可以实现磁链和电磁转矩解耦。与矢量控制相比, 直接转矩控制策略具有结构简单、动态响应速度快和鲁棒性强等优点, 但是采用 DTC 策略存在开关频率不恒定、转矩脉动大等问题, 容易造成电机噪声大, 降低电机控制的性能^[1-2]。

针对传统直接转矩控制技术所存在的问题, 国内外学者提出了许多改进方法。文献[3]设计了一种占空比调制的 DTC 在低速区极大地抑制

了转矩和磁链的脉动, 改善了 DTC 在低速区的控制性能。文献[4]将传统直接转矩中的 6 个扇区细分成 18 个扇区, 并且和占空比调制相结合, 能够有效抑制转矩的脉动, 改善磁链的运动轨迹。文献[5-8]中将空间矢量脉宽调制 (Space Vector Modulation, SVM) 技术与 DTC 相结合的 SVM-DTC 技术将传统 DTC 中开关表替换成基于空间矢量的脉冲宽度调制器来合成所需要的电压矢量, 大多数情况下采用两个 PI 控制器来产生直、交轴的电压矢量, 然后在恒定的开关频率下进行空间矢量解调, 因此可以极大地降低转矩和磁链的脉动^[9]。但转矩环和磁链环引入的 PI 控制器造成

作者简介: 万东灵 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机驱动与控制。

赵朝会 (1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子及电力传动。

孙 强 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机驱动与控制。

了控制系统抗干扰能力差,鲁棒性不强。

为了解决 PI 控制器控制性能有限和鲁棒性差的问题,提出了滑模变结构控制技术^[10-12]。滑模变结构控制是依据系统当前的控制状态来不断切换控制量以实现快速的动态响应,具有很强的鲁棒性,但存在极大的抖振。为了解决抖振问题,许多论文中提出了在不连续部分使用模糊逻辑的方法或者使用高阶滑模的控制方法^[13-14],其中高阶滑模的控制方法能够达到消除或者抑制抖振的效果,并且能够保持着一阶滑模的控制能力。

Super-twisting 滑模控制是一种二阶滑模控制方法,能够有效地抑制传统滑模控制中的抖振,并且可以保持传统滑模快速的动态响应和鲁棒性强的优点^[15-16]。基于 Super-twisting 算法的滑模控制方案主要在磁链观测、转矩和磁链的控制上^[17-19]。在文献[19]中 Super-twisting 滑模控制理论被应用到永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) SVM-DTC,转矩环和磁链环上的两个 PI 控制器被替换成 Super-twisting 滑模控制器,在一定程度上抑制了转矩和磁链的脉动,并且提高了转矩和磁链的动态响应速度,但由于在转速环依然采用 PI 控制器,造成了转速超调大和动态响应速度慢等问题。本文在文献[19]的基础上将转速环的 PI 控制器替换成 Super-twisting 滑模控制器,并通过理论推导证明这个新的控制系统能够在有限时间内收敛,期望能够抑制转速超调和磁链脉动,提高转速、转矩和磁链的动态响应速度。

1 PMSM 数学模型

PMSM 按定子磁链定向,在 x - y 坐标系下定子磁链矢量和 x 轴重合,此时电压方程如下:

$$u_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$u_{sy} = R_s i_{sy} + \left(\frac{d\delta}{dt} + \omega_r \right) |\psi_s| \quad (2)$$

式中: u_{sx} 、 u_{sy} 、 i_{sx} 、 i_{sy} ——电机定子电压、定子电流在 x - y 坐标下的 x 轴分量和 y 轴分量;

R_s ——定子电阻;

ψ_s ——在 d - q 坐标系下的直轴分量和交轴分量的合成;

δ ——定子磁链和转子磁链的夹角;

ω_r ——转子磁场旋转电角速度。

定子磁链和转子磁链旋转电角速度关系如下:

$$\omega_s = \frac{d\delta}{dt} + \omega_r \quad (3)$$

式中: ω_s ——定子磁链的电角速度。

PMSM 在 x - y 坐标系下的定子磁链方程如下:

$$\psi_{sx} = (L_d \cos^2 \delta + L_q \sin^2 \delta) i_{sx} + [(L_d - L_q) \sin \delta \cos \delta] i_{sy} + \psi_f \cos \delta \quad (4)$$

$$\psi_{sy} = [(L_d - L_q) \sin \delta \cos \delta] i_{sx} + (L_d \cos^2 \delta + L_q \sin^2 \delta) i_{sy} + \psi_f \sin \delta \quad (5)$$

式中: ψ_{sx} 、 ψ_{sy} —— x 、 y 轴坐标系定子磁链;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴坐标系定子电感;

i_{sx} 、 i_{sy} —— x 、 y 轴坐标系定子电流;

ψ_f ——转子磁链。

2 Super-twisting 滑模控制理论

2.1 Super-twisting 滑模控制简介

Super-twisting 滑模控制是一种二阶滑模控制方案,在相平面上的移动轨迹渐近收敛于原点,在滑模面附近控制量收敛到等效控制,从而避免了抖振。由于这种控制方法在相平面上呈现的是螺旋式图案,所以该方法被称作 Super-twisting 滑模控制。文中 Super-twisting 滑模控制理论被引入转速环、转矩环和磁链环。

Super-twisting 滑模控制器的稳定性可以通过以下的思路来证明。通常情况下动态系统如式(6)所示:

$$\frac{dx}{dt} = a(x, t) + b(x, t)u, \quad y = c(x, t) \quad (6)$$

式中: u ——控制输入量;

x ——状态变量;

a 、 b 、 c ——与状态变量 x 相关的未知函数;

y ——与状态变量 x 相关的输出量。

输出量 y 由 Super-twisting 滑模控制器控制,滑模变量 $s = y^* - y$ 。

$$u = -k_p |s|^r \operatorname{sgn}(s) + u_1 \quad (7)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -k_1 \operatorname{sgn}(s) \quad (8)$$

所设计的 Super-twisting 滑模控制器在有限的

时间内收敛且获得稳定的充分必要条件如式(9)所示:

$$k_p > \frac{A_m}{B_m}, \quad k_i \geq \frac{4A_m}{B_m^2} \cdot \frac{B_m(k_p + A_m)}{B_m(k_p - A_m)} \quad (9)$$

式中: A_m —— A 的绝对值的最大值;

B_m —— B 的最大值;

B_m —— B 的最小值;

A, B ——与状态变量 x 相关的函数并且是如式(10)所示输出量 y 关于时间 t 的二阶导数的系数;

k_p, k_i ——控制器的设计参数值,且大于0。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = A(x, t) + B(x, t) \frac{du}{dt} \quad (10)$$

2.2 Super-twisting 滑模控制器收敛证明

依据上述理论求解出转速、磁链和转矩控制器的输出量的二阶导数,并且此导数与对应控制器的控制输入量相关。在电机中,转子动力学方程可以被描述为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + b\omega_r \quad (11)$$

式中: T_e ——电磁转矩;

T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

b ——阻尼系数。

在定子磁链视为常数时,对式(11)中的转子角速度进行二次求导,得:

$$\frac{d^2 \omega_r}{dt} = -\frac{1}{J} \left(\frac{dT_L}{dt} - b \frac{d\omega_r}{dt} \right) + \frac{1}{J} \frac{dT_e}{dt} \quad (12)$$

如式(10)所示,在式(12)中 $A = -\frac{1}{J} \left(\frac{dT_L}{dt} - b \frac{d\omega_r}{dt} \right)$, $B = \frac{1}{J}$, 由于电机转速、负载转矩和转动惯量都是有限值,根据式(9)设计出合理的转速控制器 k_p, k_i 参数值。

令 $\psi_s = \psi_{sx}$, 则定子磁链的导数为

$$\frac{d\psi_s}{dt} = u_{sx} - R_s i_{sx} \quad (13)$$

对式(13)进行求导,得定子磁链的二阶导数:

$$\frac{d^2 \psi_s}{dt^2} = -R_s \frac{di_{sx}}{dt} + \frac{du_{sx}}{dt} \quad (14)$$

在隐极式 PMSM 中, d 轴和 q 轴上的电感 $L_d = L_q$, 由式(4)可推导出式(15):

$$\psi_{sx} = L_d i_{sx} + \psi_f \cos \delta \quad (15)$$

对式(15)关于时间 t 求导并进行整理可得:

$$\frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_d} \frac{d\psi_{sx}}{dt} + \frac{\psi_f \sin \delta}{L_d} \frac{d\delta}{dt} \quad (16)$$

对式(16)关于时间 t 求导并进行整理可得:

$$\frac{d^2 \psi_s}{dt^2} = -\frac{R_s}{L_d} \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \frac{R_s \sin \delta}{L_d} \frac{d\delta}{dt} + \frac{du_{sx}}{dt} \quad (17)$$

结合式(11)可得: $A = -\frac{R_s}{L_d} \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \frac{R_s \sin \delta}{L_d} \frac{d\delta}{dt}$,

$B = 1$, 由 $\omega_s = \frac{d\delta}{dt} + \omega_r \geq \frac{d\delta}{dt}$ 可知: $\frac{d\delta}{dt}$ 为有限值且定子电阻、交直流电感、定子磁链的导数、 $\sin \delta$ 均为有限值,故由式(9)可设计磁链控制器的参数值 k_p, k_i , 使磁链能够在有限的时间内收敛。

PMSM 电磁转矩表达式如式(18)所示:

$$T_e = \frac{3p}{4L_d L_q} [2\psi_f |\psi_s| L_q \sin \delta - (L_d - L_q) \psi_s^2 \sin 2\delta] \quad (18)$$

对式(18)进行求导,可得电磁转矩的一阶导数:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p}{4L_d L_q} [2\psi_f L_q \cos \delta - 2|\psi_s| (L_d - L_q) \cos 2\delta] \frac{d\delta}{dt} \quad (19)$$

在隐极式 PMSM 中, d 轴和 q 轴上的电感 $L_d = L_q$, 故在隐极式 PMSM 中电磁转矩的导数为

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p}{2L_d} |\psi_s| \psi_f \cos \delta \frac{d\delta}{dt} \quad (20)$$

将式(2)代入式(20)可得:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3p\psi_f}{2L_d} \cos \delta (u_{sy} - R_{sy} i_{sy} - \omega_r |\psi_s|) \quad (21)$$

在定子磁链恒定的前提下,对式(21)进行求导得:

$$\frac{d^2 T_e}{dt^2} = \frac{3p\psi_f}{2L_d} \left[-\sin \delta \frac{d\delta}{dt} (u_{sy} - R_{sy} i_{sy} - \omega_r |\psi_s|) - \cos \delta \left(R_{sy} \frac{di_{sy}}{dt} + |\psi_s| \frac{d\omega_r}{dt} \right) \right] + \frac{3p\psi_f \cos \delta}{2L_d} \frac{du_{sy}}{dt} \quad (22)$$

结合式(11)得:

$$A = \frac{3p\psi_f}{2L_d} \left[-\sin \delta \frac{d\delta}{dt} (u_{sy} - R_{sy} i_{sy} - \omega_r |\psi_s|) - \cos \delta \left(R_{sy} \frac{di_{sy}}{dt} + |\psi_s| \frac{d\omega_r}{dt} \right) \right]$$

$$B = \frac{3p\psi_f \cos\delta}{2L_d}$$

A 和 B 中所有的量均为有限值,故 A 和 B 也都是有限值,由式(9)可设计好转矩控制器的 k_p 、 k_i 的参数值,使电磁转矩能够在有限的时间内收敛。

2.3 Super-twisting 滑模控制器设计

基于上面所阐述的控制理论,转速滑模控制器可以设计成如式(23)和式(24)所示:

$$T_e^* = k_p |s_\omega|^r \text{sgn}(s_\omega) + T_e \quad (23)$$

$$\frac{dT_e^*}{dt} = k_i \text{sgn}(s_\omega) \quad (24)$$

式中: s_ω ——转子角速度的滑模面函数, $s_\omega = \omega^* - \omega$ 。

磁链控制器可设计成如式(25)和式(26)所示:

$$u_{sx}^* = k_p |s_\psi|^r \text{sgn}(s_\psi) + u_{sx} \quad (26)$$

$$\frac{du_{sx}^*}{dt} = k_i \text{sgn}(s_\psi) \quad (27)$$

式中: s_ψ ——定子磁链的滑模面函数, $s_\psi = \psi_s^* - \psi_s$ 。

转矩控制器可设计成如式(27)和式(28)所示:

$$u_{sy}^* = k_p |s_T|^r \text{sgn}(s_T) + u_{sy} \quad (28)$$

$$\frac{du_{sy}^*}{dt} = k_i \text{sgn}(s_T) \quad (29)$$

式中: s_T ——电磁转矩的滑模面函数, $s_T = T_e^* - T_e$ 。

上面所设计的3个滑模控制器主要由两个部分组成:第1部分由滑模变量指数函数的比例函数组成,其中可设计的参数有 k_p 和指数 r ,通过设计 k_p 可改变控制量的动态响应速度,指数 r 来改变非线性量, $0 < r < 1$;滑模控制器的第2部分由滑

模变量的积分函数构成,合理设计 k_i 可控制量的稳态精度。依据本文理论所设计的 PMSM Super-twisting 滑模控制如图1所示。

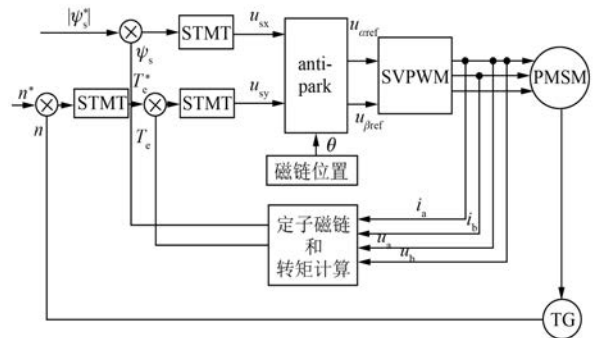


图1 基于 Super-twisting 滑模的 PMSM DTC

3 仿真验证与分析

为了对上述理论进行仿真验证,将 PMSM SVM-DTC 在转速环采用 PI 控制器,磁链环、转矩环采用 Super-twisting 滑模控制器与转速环、磁链环、转矩环采用 Super-twisting 滑模控制器两种控制方案进行对比分析。在仿真中使用的 PMSM 定子电阻为 1.2Ω ,定子电感为 8.5 mH ,转子磁链为 0.175 Wb ,转动惯量为 $0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,极对数为 4。在仿真中额定转速设为 1000 r/min ,定子磁链给定值为 0.18 Wb ,控制周期为 0.0002 s 。

转矩、磁链采用 Super-twisting 控制的转速、转矩、磁链响应波形如图2所示。转速、转矩、磁链采用 Super-twisting 控制的转速、转矩、磁链响应波形如图3所示。由图2(a)可知,转速响应波形存在

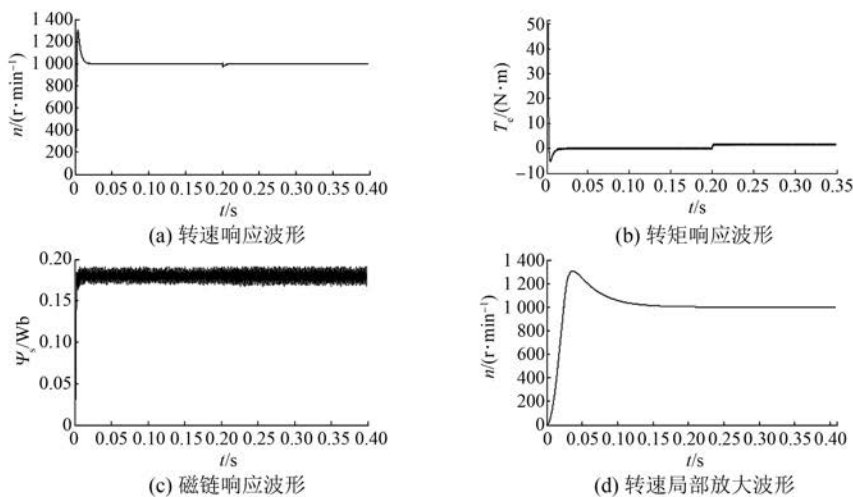


图2 转矩、磁链 Super-twisting 控制的转速、转矩、磁链响应波形

极大的转速超调,将转速响应波形放大得到如图 2(d)所示的转速局部放大波形,可以看出转速响应波形大概在 0.022 s 稳定到转速给定值。从图 3(a)中可知,转速、转矩、磁链 Super-twisting 控制的转速超调得到了明显的抑制,将图 3(a)中的转速波形放大后得到如图 3(d)所示的转速局部放大波形,可以看出转速响应波形大概在 0.014 s 稳定到转速给定值。如图 2(b)所示的转矩、磁链 Super-twisting 控制的转矩响应波形与如图 3(b)

所示的转速、转矩、磁链 Super-twisting 控制的转矩响应波形对比可知,图 2(b)与图 3(b)的转矩脉动几乎相同,而图 2(b)的转矩响应速度明显不如图 3(b)的转矩响应速度。转矩、磁链 Super-twisting 控制的磁链响应波形如图 2(c)所示,与图 3(c)所示的转速、转矩、磁链 Super-twisting 控制的磁链响应波形相比较,可以看出图 2(c)磁链响应速度稍慢,且有着较大的磁链脉动。

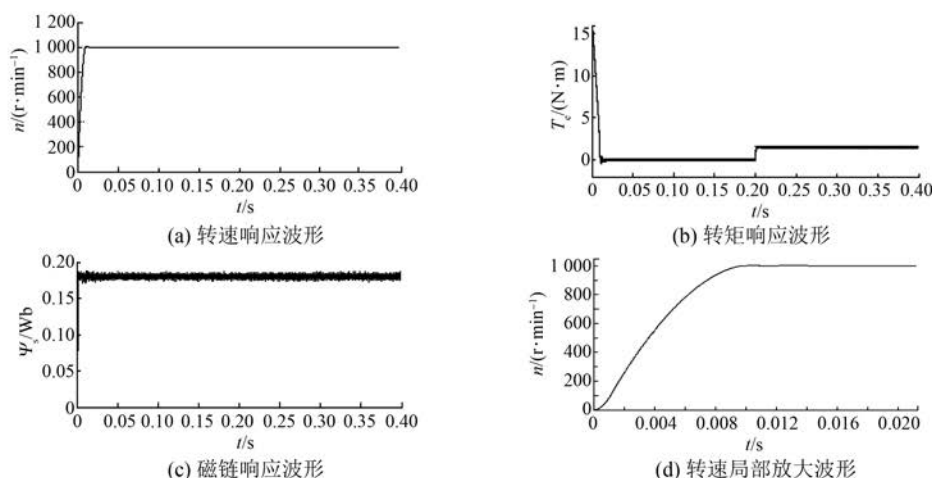


图 3 转速、转矩、磁链 Super-twisting 控制的转速、转矩、磁链响应波形

4 结 语

为了解决 PMSM SVM-DTC 中存在超调频繁、动态响应速度慢等问题,本文将 Super-twisting 滑模控制理论引入转速环、磁链环、转矩环,与只在转矩环和磁链环采用 Super-twisting 滑模控制相比较,并且用 MATLAB/Simulink 得到以下结论。

(1) 转速环、磁链环、转矩环采用 Super-twisting 滑模控制器 PMSM SVM 较之转速环采用 PI 控制器,磁链环、转矩环采用 Super-twisting 滑模控制器的 PMSM SVM 的动态响应速度提高了 0.008 s,并且能够抑制转速超调现象。

(2) 通过理论证明可以通过合理设计转速、磁链、转矩控制器的 k_p 、 k_i ,使转速、磁链、转矩能够在有限的时间内收敛。

(3) 转速环、磁链环、转矩环采用 Super-twisting 滑模控制器,PMSM SVM 有着快速转矩响应速度。

(4) 转速环、磁链环、转矩环采用 Super-

twisting 滑模控制器,PMSM SVM 能够降低磁链脉动,且提高磁链的动态响应速度。

【参考文献】

- [1] CASADEI D, PROFUMO F, TANI A. FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2004, 17(5): 779-787.
- [2] REN Y, ZHU Z Q. Enhancement of steady-state performance in direct-torque-controlled dual three-phase permanent-magnet synchronous machine drives with modified switching table[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2015, 62(6): 3338-3350.
- [3] 杨影,陈鑫,涂小卫,等. 占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 65-71.
- [4] 徐艳平,钟彦儒. 扇区细分和占空比控制相结合的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 102-108.
- [5] TANG L X, ZHONG L M. A novel direct torque control for interior permanent magnet synchronous

- machine drive with low ripple in torque and flux[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2003, 39(6): 1748-1756.
- [6] 孙丹, 贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 112-116.
- [7] 王斌, 王跃, 王兆安. 空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 45-50.
- [8] HABETLER T G, PROFUMO F, PASTORELLI M, et al. Tolbert direct torque control of induction machines using space vector modulation[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1992, 28(5): 1045-1053.
- [9] AMMAR A, BOUREK A, BENAKCHA A. Modified load angle Direct Torque Control for sensorless induction motor using sliding mode flux observer[C]// 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2015: 1-6.
- [10] 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.
- [11] UTKIN V, GULDNER J, SHI J. Sliding mode control in electromechanical systems[J]. Control Engineering Practice, 2000, 12(8): 1417-1418.
- [12] YAN Z, JIN C, UTKIN V I. Sensorless sliding-mode control of induction motors[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2000, 47(6): 1286-1297.
- [13] SAGHAFINIA A, PING H, UDDIN M, et al. Adaptive fuzzy sliding-mode control into chattering-free IM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 692-701.
- [14] LASCU C, BLAABJERG F. Super-twisting sliding mode direct torque control of induction machine drives[C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014: 5116-5122.
- [15] CRISTIAN L, ION B. Super-twisting sliding mode control of torque and flux in permanent magnet synchronous machine drives[C]// 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 3171-3176.
- [16] LEVANT A. Principles of 2-sliding mode design[J]. Automatica, 2007, 43(4): 576-586.
- [17] CRISTIAN L, ION B. Super-twisting sliding mode control of torque and flux in permanent magnet synchronous machine drives[C]// 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 3171-3176.
- [18] 潘月斗, 陈涛, 陈泽平. 感应电机 Super-twisting 算法定子磁链观测器设计[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(5): 60-67.
- [19] DIGENNARO S, RIVERA J, CASTILLO-TOLEDO B. Super-twisting sensorless control of permanent magnet synchronous motors[J]. Decision & Control, 2010, 5(2): 4018-4023.

收稿日期: 2017-11-12

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行,邮发代号4-199。在半个多世纪的岁月中,该杂志为我

国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。