

基于新型滑模算法的永磁同步电机 转速控制研究*

朱 笋, 洪荣晶, 李盛寅

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800)

摘 要: 针对永磁同步电机调速系统中 PI 控制器无法满足高精度控制要求的问题, 提出了一种基于新型趋近律的滑模变结构控制方法。该趋近律在指数趋近律和幂次趋近律的基础上, 加入了系统状态变量, 有效地抑制滑模控制器在滑动阶段的抖振; 等速趋近项与滑模面切换函数关联, 保证其在 $s=0$ 附近有效地稳定趋近, 削弱抖振; 指数趋近项与系统状态变量 x_1 关联, 提高趋近速度。采用李雅普诺夫函数对其进行稳定性分析。经过与 PI 速度控制器以及传统的滑模控制器进行仿真比较, 分析了空载起动、突加负载和变速运动 3 种情况下的控制效果, 结果表明: 采用新型滑模控制器可实现快速稳定趋近, 并具有稳定性高、抗负载扰动能力强的优点。

关键词: 永磁同步电机; 滑模变结构控制; 速度控制; 新型趋近律

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)05-0058-06

Research on Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on New Sliding Mode Algorithm*

ZHU Sun, HONG Rongjing, LI Shengyin

(College of Mechanical and Poner Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: In the speed control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM), PI controller could not meet the requirements of high precision control. A sliding mode variable structure control method based on a new reaching law is proposed. The new reaching law combined the advantages of exponential reaching law and power reaching law, and with the addition of system state variables, it could effectively suppress the chattering of sliding mode controller in the sliding stage. The constant velocity approaching term was related to the sliding surface switching function, which ensured the effective and steady approaching of the reaching law near $s=0$ and weakened chattering; the exponential approaching term was associated with the system state variable x_1 to increase the approaching speed. The stability of the proposed method was proved by using the Lyapunov stability theory. The speed controller based on the new sliding mode algorithm was compared with the PI speed controller and the traditional sliding mode controller by simulation. The simulation results under the no-load start, sudden load and variable motion conditions showed that the system using this controller could achieve rapid response, high stability and strong resistance to load disturbance.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode variable structure control; speed control; reaching law

0 引 言

永磁同步电机 (PMSM) 具有结构紧凑、运行

可靠、损耗小、效率高等优点, 广泛应用于航天、军事、医疗、智能制造等高要求运用领域^[1-3]。由于 PMSM 是一个多变量、强耦合、非线性和变参数的

* 基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目 (BA2017099)

作者简介: 朱 笋 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

洪荣晶 (1963—), 男, 博士生导师, 研究方向为机械电子工程和高端智能装备。

李盛寅 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机器人控制。

复杂被控对象,传统 PID 控制难以满足其高性能的控制要求^[4],国内外专家学者相继在交流伺服系统控制中引入了变结构控制、非线性控制、自适应控制等现代控制理论^[5-8]。其中,滑模控制(SMC)成为研究热点。

文献[9]将传统指数趋近律的指数项系数和等速项系数关联,同时引入系统状态变量,既满足趋近律在远离切换面时大而在切换面附近时小的要求,又能减少系统参数的数量,增强系统实用性。缺点是趋近速度和稳定性还有待提高,只能应用于精度要求不高的场合。文献[10]将等速趋近项和状态变量关联,减少了系统的抖振。在此基础上,文献[11]提出一种改进型指数趋近律的 PMSM 滑模控制方法,将等速趋近项的系数与状态变量关联,当运行轨迹离切换面较远时,趋近速度较大;且能保证趋近速度的变化是连续的,可以较好地抑制抖振。文献[12]提出双幂次滑模趋近律策略,与传统幂次趋近律相比,提高了远离切换面时收敛速度。文献[13]利用模糊规则实时调节指数趋近律参数。文献[14]改进的指数趋近律算法,根据运动状态自适应调整趋近律。文献[15]将幂次趋近律和等速趋近律结合,减小了变速延迟。文献[16]在幂次趋近律的基础上,加入指数项以及系统状态变量,其中,指数项具有较快的收敛速度,可以解决幂次趋近律在远离滑模面时趋近速度慢的问题,系统状态变量可抑制由于引入指数项带来的抖振。

本文在分析文献[15-16]的基础上,提出了一种新型趋近律。控制器的等速趋近项与滑模面切换函数相关,在滑动阶段其趋近律不为零,保证系统状态能在有限时间内收敛;指数趋近项与系统状态量关联,解决原有趋近律在远离滑模面时趋近速度慢的问题;加入幂次趋近项,能有效抑制指数趋近项带来的抖振问题。采用该新型趋近律,结合全局切换平面设计了控制器,改善了 PMSM 系统的动静态特性。

1 PMSM 数学模型

PMSM 电磁关系复杂,绕组和永磁体之间相互影响,同时还存在磁路饱和等非线性因素,因此,难以建立 PMSM 的精确数学模型。为了简化分析过程,作出如下假设^[17]:

(1) 转子永磁体在气隙磁场中以正弦波形式分布。

(2) 铁心的涡流和磁滞损耗可忽略不计。

(3) 定子铁心的饱和忽略不计,电感参数不变,且认为磁路线性。

(4) 忽略转子的阻尼绕组。

针对表贴式 PMSM ($L_d = L_q = L$),采用 $i_d = 0$ 控制策略, d - q 坐标系下 PMSM 电压方程简化为^[18]:

$$u_q = Ri_d + L \frac{di_q}{dt} - p_n \psi_f \omega_m \quad (1)$$

PMSM 电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q = K_t i_q \quad (2)$$

PMSM 运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q ——定子直轴和交轴上的分量电压和分量电流;

L 、 R ——定子电感和电阻;

p_n ——电机的极对数;

ψ_f ——永磁体的磁链;

ω_e 、 ω_m ——机械角速度,电角速度, $\omega_m = \omega_e / p_n$;

K_t ——转矩系数, $K_t = 3/2 p_n \psi_f$;

T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

B ——摩擦因数。

定义系统转速误差变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_{ref} ——电机的参考转速;

ω_m ——实际转速。

定义 $u = i_q$, $D = (3p_n \psi_f) / 2$, 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (5)$$

2 滑模变结构控制设计

满足以下 3 个条件的控制称为滑模变结构控制^[19-20]:

(1) 滑动模态存在,即式 $\dot{s} \leq 0$ 成立。

(2) 满足到达条件,即切换面 $s = 0$ 以外的相

轨迹将于有限时间内到达切换面。

(3) 切换面是滑动模态区,且滑模运动渐近稳定,动态品质良好。

2.1 传统指数趋近律

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \lambda s \quad (6)$$

其中: $-\lambda s$ 为指数趋近项,其趋近速度随着运动点逼近滑模面逐渐减小到零,而逼近切换面的过程是渐进的,如果仅有指数趋近项,不能保证切换面以外的点的相轨迹在有限时间内到达,切换面上也就不存在滑动模态,所以增加一个等速趋近项 $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 使 s 接近于零时,其趋近速度是 ε 而不是零,可以保证运动点在有限时间内到达切换面。

指数趋近律改善了其动态品质,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。增大 ε 和 λ 使趋近运动速度加快,反之则趋近速度降低,但是过大的 ε 和 λ 将导致系统的抖振程度增加。

2.2 新型趋近律设计

为了提高系统的动态品质,采用改进的趋近律设计滑模控制器。新型趋近律如下:

$$\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \eta e^{|s|} \operatorname{sgn}(s) - q |x_1|^\beta s, \quad k, q, \eta, \beta > 0, 0 < \alpha < 1 \quad (7)$$

与传统滑模趋近律 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - \lambda s$ 相比,当状态变量 x_1 较大时,系统远离滑模面, $\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \eta e^{|s|} \operatorname{sgn}(s) - q |x_1|^\beta s$ 主导趋近律;当状态变量 x_1 较小时,系统趋近滑模面, $\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \eta e^{|s|} \operatorname{sgn}(s)$ 主导趋近律。该趋近律可根据运动状态自主调整参数。 $-\eta e^{|s|} \operatorname{sgn}(s)$ 项在远离切换面时,加速系统收敛,当靠近切换面时,减小调整力度,防止过调,减少趋近状态的时间,保证系统更快速地趋于稳定,削弱系统抖振。同时,在 $s = 0$ 附近时, $-\eta e^{|s|} \operatorname{sgn}(s)$ 趋近律不为零,且值较小,既能保证趋于零时的有效收敛,又能降低抖振。

将继电特性连续化,用连续函数 $\operatorname{th}(s)$ 代替滑动模态中的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$,以减小切换抖振。

$$\operatorname{th}(s) = \frac{s}{|s| + \xi} \quad (8)$$

其中: ξ 为极小的正数,可取 $\xi = 0.001$ 。

式(7)可变换为

$$\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{th}(s) - \eta e^{|s|} \operatorname{th}(s) - q |x_1|^\beta s, \quad k, q, \eta, \beta > 0, 0 < \alpha < 1 \quad (9)$$

2.3 理论验证

为了证明系统的稳定性,定义李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (10)$$

对式(10)求导,并将控制器函数代入,可得:

$$\dot{V} = s \dot{s} = -k s |s|^\alpha \operatorname{th}(s) - \eta s e^{|s|} \operatorname{th}(s) - q |x_1|^\beta s^2 \leq 0 \quad (11)$$

式(11)满足 $\dot{s} \leq 0$,能保证系统到达滑模面。

2.4 趋近律仿真验证

为了说明所提新型趋近律的优越性,在相同参数值的条件下,对传统指数趋近律和新型趋近律的性能进行仿真分析,仿真结果如图1和图2所示。

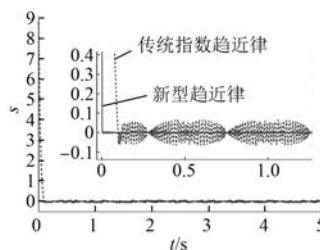


图1 趋近所需时间

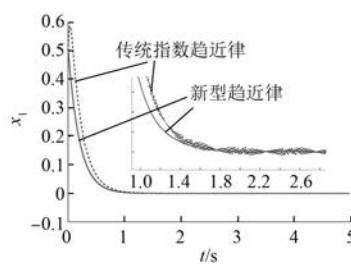


图2 系统状态收敛过程

从图1和图2可以看出,系统的状态变量从初始值到达平衡点的过程中,相比传统指数趋近律,新型趋近律控制下的抖振现象得到了有效抑制,趋近时间减少。图3所示为滑模运动的相轨迹,新型趋近律的滑动模态运动更平稳。

2.5 滑模切换平面的选择

滑模切换平面代表了系统的理想动态特性,影响滑动模态的渐近稳定性。为了使系统稳定到达,减小计算量,设计全局滑模面:

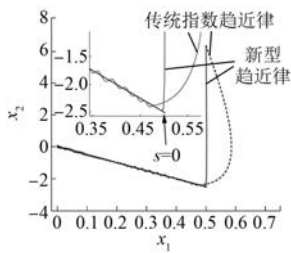


图3 滑模运动的相轨迹

$$s = c_1x_1 + c_2x_2 + e^{-pt} \tag{12}$$

计算控制器的表达式如下：

$$u = \frac{1}{c_2D} [c_1x_2 - pe^{-pt} + k |s|^{\alpha} \text{th}(s) + \eta e^{|s|} \text{th}(s) + q |x_1|^{\beta} s] \tag{13}$$

从而可得 q 轴的参考电流为

$$i_q = \frac{1}{c_2D} \int_0^t [c_1x_2 - pe^{-pt} + k |s|^{\alpha} \text{th}(s) + \eta e^{|s|} \text{th}(s) + q |x_1|^{\beta} s] d\tau \tag{14}$$

3 仿真验证

为了验证新型滑模控制器的控制效果,采用 $i_d=0$ 和空间矢量脉宽调制(SVPWM)相结合的矢量控制。PMSM 调速系统的系统框架如图 4 所示。

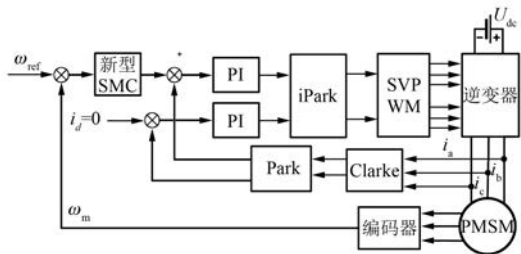


图4 PMSM 调速系统的系统框架

电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数	
参数名称	参数值
极对数 p_n	4
定子电感 L/mH	8.5
定子电阻 R/Ω	2.875
磁链 Ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
摩擦因数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

设置仿真参数,其中 PWM 开关频率设置为 $f_{\text{pwm}}=10\text{ kHz}$,采样周期设置为 $T_s=10\text{ }\mu\text{s}$,相对误差设置为 0.000 1,仿真时间设置为 0.25 s。参考转速 $N_{\text{ref}}=1\text{ }000\text{ r/min}$ 。考虑空载起动、突加负载和变速指令 3 种情况,将新型 SMC 与 PI 控制器以及式(15)所示传统 SMC 比较。

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + \varepsilon \text{sgn}(s) + \lambda s] \tag{15}$$

其中: $c=35$; $\varepsilon=20$; $\lambda=30$ 。

所设计的滑模控制参数如表 2 所示。

表 2 所设计的滑模控制器参数	
参数名称	参数值
c_1	35
c_2	55
p	50
k	20
η	10
q	30
α	0.5
β	2

空载起动时,初始时刻负载转矩 $T_L=0\text{ N}\cdot\text{m}$,在 $t=0.15\text{ s}$ 时,突加负载转矩 $T_L=10\text{ N}\cdot\text{m}$ 。转速仿真结果如图 5 所示。

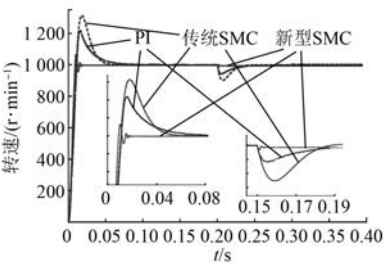


图5 转速图

从图 5 可以看出,系统在刚起动时,为达到给定转速,新型 SMC 比 PI 控制和传统 SMC 所用时间更短,且超调量更小。当突加负载时,新型 SMC、PI 和传统 SMC 控制下的系统转速响应输出在短时间内存在波动,但是新型 SMC 控制下的系统调节速度更快,鲁棒性较好。

图 6 所示为电机空载起动时输出转矩图。图 7 所示为 0.15 s 时突加 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载转矩的转矩变化图。

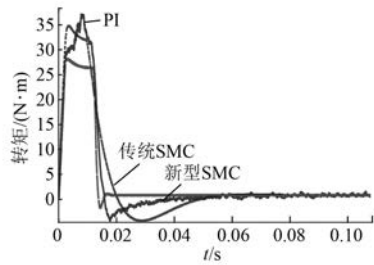


图6 空载起动转矩图

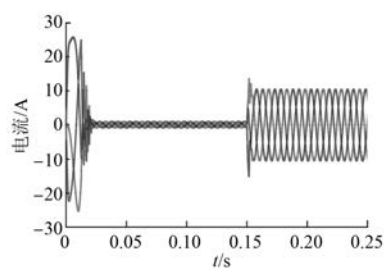


图10 新型 SMC 控制下的电流响应

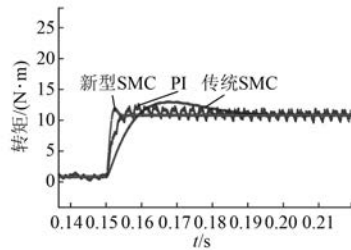


图7 突加负载转矩图

从图6和图7可以看出,突加负载时,新型 SMC 比 PI 和传统 SMC 控制器下的转矩波动小,稳定输出所用时间明显减少,转矩响应动态品质更优。

图8、图9和图10所示分别为 PI 控制、传统 SMC 控制和新型 SMC 控制下的电流响应图。

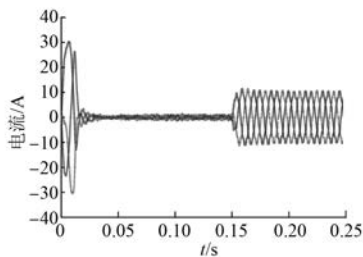


图8 PI 控制下的电流响应

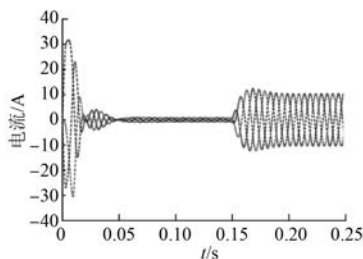


图9 传统 SMC 控制下的电流响应

从图8、图9和图10可以看出,与 PI 控制和传统 SMC 控制相比,在新型 SMC 控制下,系统三

相电流波形响应更平滑。

图11所示为变速指令下的速度响应图,在0.1 s时将转速输入从500 r/min变为1 000 r/min。

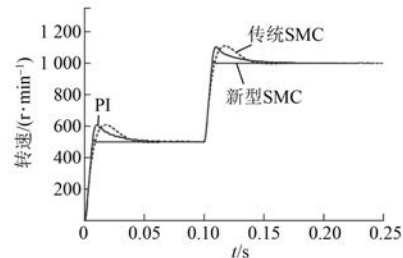


图11 变速指令下 PI、传统 SMC 与新型 SMC 的速度响应

从图11可以看出,当转速指令发生变化时,PI 和传统 SMC 控制下的系统转速响应输出存在较大波动,新型 SMC 控制下的系统转速响应波动小,且调节速度快,速度的跟踪效果较好。

4 结 语

本文提出了基于新型滑模算法的 PMSM 控制策略。在幂次趋近律和指数趋近律基础上,增加了状态变量,使得滑模趋近效果和状态变量相关,保证系统快速趋于稳定。同时增加了与切换面函数相关的变速趋近律,使其在 $s=0$ 附近有较小的趋近速度,保证有效到达切换面,且减小抖振。通过仿真分析了空载起动、突加载荷和变速运行3种情况下的控制结果,验证了新型 SMC 能够削弱系统抖振,提高收敛速度。

【参考文献】

[1] 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.

- [2] LIN W J, LIU D L, WU Q X, et al. On sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [C] // The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 2014.
- [3] JIN X, WANG A, WANG D, et al. Sliding mode control of servo motor based on novel reaching law [C] // 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018: 5653.
- [4] 张晓光, 赵克, 孙力. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111.
- [5] PAPONPEN K, KONGHIRUN M. An improved sliding mode observer for speed sensorless vector control drive of PMSM [C] // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics & Motion Control Conference, 2006.
- [6] CHOI H H, VU N, JUNG J W. Digital implementation of an adaptive speed regulator for a PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 26(1): 3.
- [7] 左月飞, 符慧, 刘闯, 等. 考虑转速滤波的永磁同步电动机转速伺服系统改进型自抗扰控制器 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 137.
- [8] ERROUSSI R, OUNROUCHE M, CHEN W H, et al. Robust nonlinear predictive controller for permanent-magnet synchronous motors with an optimized cost function [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2849.
- [9] 秦超, 高峰阳, 庄圣贤, 等. 基于一种指数趋近律的 PMSM 滑模变结构控制 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 306.
- [10] 童克文, 张兴, 张煜, 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.
- [11] 焦山旺, 施火泉, 汤一林. 基于改进型指数趋近率的 PMSM 滑模控制 [J]. 江南大学学报 (自然科学版), 2014, 13(4): 421.
- [12] 张博, 齐蓉. 基于双幂次滑模趋近律方法的 PMLSM 精密位置控制 [J]. 微电机, 2016, 49(12): 46.
- [13] 王贵德. 永磁同步电机调速系统的模糊趋近律滑膜控制 [J]. 电气技术, 2015(3): 10.
- [14] 杨立秋, 袁雷. 基于趋近律方法的永磁同步电机滑模速度控制器设计 [J]. 船电技术, 2016, 36(1): 74.
- [15] 李玲瑞, 许鸣珠, 高旭东. 基于新型混合趋近律的 PMSM 滑模变结构控制 [J]. 微特电机, 2017, 45(1): 67.
- [16] 戴鹏, 徐楠, 谢后晴, 等. 永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 33.
- [17] 吴祥瑞, 高键. 永磁同步电机滑膜变结构 MATLAB 仿真 [J]. 电子设计工程, 2017, 25(11): 111.
- [18] 陈振, 耿洁, 刘向东. 基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 56.
- [19] 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: 36.
- [20] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 23.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 35 页)

- [4] HSIEH M F, CHANG Y H, DORRELL D G. Design and analysis of brushless doubly fed reluctance machine for renewable energy applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 8204705.
- [5] CARLSON R, VOLTOLINI H, RUNCOS F, et al. Performance analysis with power factor compensation of a 75 kW brushless doubly fed induction generator prototype [C] // 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007: 1502.
- [6] 张凤阁, 王秀平, 贾广隆, 等. 无刷双馈电机复合转子结构参数的优化设计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 77.
- [7] ORAEE A, ABDI E, ABDI S, et al. Effects of rotor winding structure on the BDFM equivalent circuit parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1660.
- [8] GORGINPOUR H, JANDAGHI B, ORAEE H. A novel rotor configuration for brushless doubly-fed induction generators [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(2): 106.
- [9] 邓先明, 方荣惠, 王抗, 等. 等距笼型转子无刷双馈电机的有限元分析 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 507.

收稿日期: 2018-12-22