

基于无差拍预测控制和扰动观测器的 永磁同步电机电流控制*

孙 静¹, 刘旭东²

(1. 山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005;

2. 青岛大学自动化与电气工程学院, 山东 青岛 266071)

摘 要: 永磁同步电机(PMSM)转速或转矩驱动系统都要求具有良好的电流控制性能,因此对电流环的控制至关重要。为了提高电流的动态性能和鲁棒性,基于无差拍预测控制和扰动观测器提出了一种新的PMSM 电流控制方法。利用预测控制动态性能好,易于数字实现等优点,基于无差拍原理设计了预测电流控制器,但该方法对电机模型及参数依赖较大。针对实际应用中由于建模误差及参数变化等产生的扰动,设计了一种简单的扰动观测器,并用于电流环的前馈补偿控制,有效地提高了系统的鲁棒性。基于dSPACE 平台完成了试验验证。试验结果表明:所提出的电流控制方法能实现电流的快速跟踪控制,而且具有较强的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机;电流控制;无差拍预测控制;扰动观测器

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)10-0025-05

Deadbeat Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Disturbance Observer*

SUN Jing¹, LIU Xudong²

(1. School of Information and Electronic Engineering, Shandong Technology and Business University,
Yantai 264005, China;

2. College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The favourable current control was required in speed or torque drive system of permanent magnet synchronous motor, so it's very important for the control of the current loop. In order to improve the transient performance and the robustness, a novel current control method based on deadbeat predictive control and disturbance observer was proposed. By using the good transient response and easy digital realization of predictive control, the current controller was designed based on deadbeat theory, which was greatly dependent on the motor model and the parameters. According to the disturbance caused by the modeling error and parameter variations, a simple disturbance observer was designed, which was used for the feed-forward compensation control. The robustness was enhanced effectively. The experiment was complemented on dSPACE, and the results showed that the proposed current control method had good current tracking and strong robust performance in various conditions.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); current control; deadbeat predictive control; disturbance observer

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61403236,61703222);山东工商学院博士启动基金项目(BS201511)

作者简介: 孙 静(1979—),女,博士研究生,讲师,研究方向为电动汽车驱动系统控制、数据驱动预测控制等。

刘旭东(1987—),男,博士研究生,研究方向为电动汽车驱动系统控制、非线性控制等。

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有效率高、功率密度大、可靠性高等优势, 在电动汽车、风力发电等领域得到了广泛应用^[1]。由于 PMSM 具有多变量、强耦合、非线性等特性, 在转速或转矩驱动系统中, 通常采用按转子磁场定向的矢量控制方案。在转速控制系统中, 采用转速环和电流环级联的控制方式, 外环为转速环, 内环为电流环, 进而分别设计转速和电流控制器; 在转矩控制中, 采用电流单环控制, 通过调节电流, 实现电机的转矩控制。因此, 在 PMSM 驱动系统中, 为了实现高性能的电机控制, 对电流环的控制至关重要。随着现代控制理论的发展, 一些先进的控制方法, 如: 内模控制^[2]、滑模控制^[3]、自抗扰控制^[4]、自适应控制^[5]等, 被应用到 PMSM 电流控制中, 并取得了许多研究成果。

近年来, 随着半导体变流技术和计算机技术的发展, 预测控制作为一种新的控制策略, 已被逐步应用到了交流电机控制中, 并最有可能成为继 PI 控制之后电力电子和交流电机控制领域的替代方案^[6]。预测控制的共同思想是利用系统的输入输出数据, 通过计算预报受控变量的未来值, 并使用一个最优准则来选择控制量。根据控制方法的不同, PMSM 的预测控制可分为滞后控制^[7]、轨迹控制^[8]、无差拍预测控制^[9]、模型预测控制^[10]等。其中, 无差拍预测控制因具有动态性能好, 方法简单, 易于数字实现等优点, 已在 PMSM 电流控制中取得了大量的研究成果。

但是, 无差拍预测控制是一类依赖电机模型的控制方法, 而且该方法不能直接处理系统扰动的影响。当系统存在模型严重失配或参数变化时, 控制精度会显著降低。在 PMSM 驱动系统中, 受电机运行工况和温度等影响, 电机不可避免地存在扰动、参数变化等。为了提高 PMSM 预测电流控制的鲁棒性, 文献[11-12]提出了基于改进无差拍控制的 PMSM 电流预测控制方法; 文献[13]在无差拍预测控制器中, 通过参数辨识方法, 实时估计电机参数, 进而抑制参数变化对电流控制性能的影响, 但该方法易受参数估计精度的影响; 文献[14-15]在 PMSM 基于无差拍预测控

制的基础上, 设计了扰动观测器, 并用于电流环的前馈补偿控制。该方法能消除系统因建模和参数误差等产生的所有扰动, 有效地提高系统鲁棒性。

为此, 本文基于无差拍预测控制和一种简单扰动观测器, 研究了 PMSM 的电流控制方法。该方法可有效结合预测控制动态性能好和扰动观测器鲁棒性强的优点, 并通过仿真和试验证明了该方法的有效性, 且控制器设计简单, 参数容易调节。

1 PMSM 数学模型

按转子磁场定向理论, PMSM 在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - p\omega L_q i_q + f_d \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + p\omega L_d i_d + p\omega \Phi + f_q \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} f_d = \frac{1}{L_d} \left(\Delta R_s i_d - \Delta L_q p\omega i_q + \Delta L_d \frac{di_d}{dt} \right) \\ f_q = \frac{1}{L_q} \left(\Delta R_s i_q + \Delta L_d p\omega i_d + \Delta \Phi p\omega + \Delta L_q \frac{di_q}{dt} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta R_s = R_{st} - R_s; \Delta L_d = L_{dt} - L_d \\ \Delta L_q = L_{qt} - L_q; \Delta \Phi = \Phi_t - \Phi \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_d, L_q —— d, q 同步旋转坐标系下的定子电感;

i_d, i_q, u_d, u_q —— d, q 坐标系下的定子电流和电压;

R_s ——定子电阻;

p ——极对数;

ω ——转子机械角速度;

Φ ——永磁体产生的磁链;

f_d, f_q ——由参数变化引起的扰动量;

$R_{st}, L_{dt}, L_{qt}, \Phi_t$ ——电机在实际运行时的参数值。

2 电流预测控制器设计

本文的控制目标是设计 PMSM 电流控制器, 通过调节定子电压, 实现电流的快速跟踪控制, 同时系统对建模模型和参数变化等扰动具有较强的抑制能力。为此结合无差拍预测控制和一种简单的扰动观

测器控制方法,设计了 PMSM 鲁棒电流控制器。

本文研究的 PMSM 控制系统结构框图如图 1 所示。采用转速和电流级联的控制结构,完成了 PMSM 转速控制系统的设计。其中,转速环采用 PI 控制,电流环采用本文提出的电流控制方法,另外控制器中还包括 PWM 模块、坐标变换等。

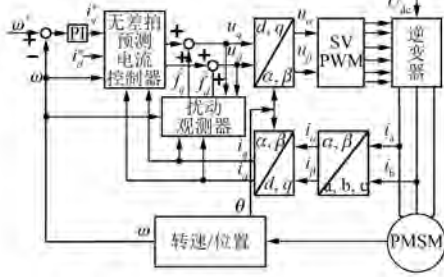


图 1 PMSM 控制系统结构框图

首先,根据 PMSM 模型,令

$$\begin{aligned} u_{d1} &= u_d + p\omega L_q i_q \\ u_{q1} &= u_q - P\omega\Phi - p\omega L_d i_d \end{aligned} \quad (4)$$

进而可得

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + u_{d1} - f_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q + u_{q1} - f_q \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)表示为状态空间模型的形式得

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

取采样时间为 T , 将式(6)离散化得

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T}{L_d} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{R_s T}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d1}(k) \\ u_{q1}(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d(k) \\ f_q(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

定义系统状态变量、输入变量、输出变量和扰动分别为 $x = [x_1 \ x_2]^T = [i_d \ i_q]^T$, $u_1 = [u_{d1} \ u_{q1}]^T$, $y = [y_1 \ y_2]^T = [i_d \ i_q]^T$, $f = [f_d \ f_q]^T$, 则离散化的状态方程可表示为

$$x(k+1) = Ax(k) + B[u_1(k) - f(k)] \quad (8)$$

$$\text{其中: } A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T}{L_d} & 0 \\ 0 & 1 - \frac{R_s T}{L_q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix}。$$

假设系统输出电流在一个采样周期可实现对给定参考电流的无差跟踪,达到无差拍的控制效果,则 $x(k+1) = x^*(k)$, 其中 $x^*(k) = [i_d^* \ i_q^*]^T$ 为当前时刻的电流参考值,进而由式(8)得无差拍预测控制器为

$$u_1(k) = B^{-1}[x^*(k) - Ax(k)] + f(k) \quad (9)$$

由式(4)和式(9)可得 PMSM 的电流控制器,实现电流的跟踪控制,而且控制器中只含有控制参数 T 。但从控制器中看出,扰动量 f_d 和 f_q 包含在控制器中,而 PMSM 不可避免地存在参数变化和模型不确定性,这些都会影响电机的性能。因此,为了设计完整的电机控制器,提高系统的鲁棒性,需得到扰动量 f 的值。

3 扰动观测器设计

为了提高系统的鲁棒性,本文在无差拍预测控制的基础上设计了一种简单的扰动观测器^[3],然后将估计的扰动用于电流环的前馈补偿控制。

首先定义电流跟踪误差:

$$\begin{cases} e_d = i_d^* - i_d \\ e_q = i_q^* - i_q \end{cases} \quad (10)$$

取 $\sigma_d = e_d + c_d \int e_d$, $\sigma_q = e_q + c_q \int e_q$, 根据文献[3],设计一种简单的扰动观测器为

$$\hat{f}_d = \alpha \sigma_d, \hat{f}_q = \beta \sigma_q \quad (11)$$

其中, $\hat{f}_d$ 和 $\hat{f}_q$ 为估计的扰动值, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 为观测器增益,且通过调节 α 和 β , 可调节扰动的估计速度。

将估计的扰动量式(11)代入式(9),即可求得最终的电流控制器。该控制器结合在无差拍预测控制和扰动观测器的优点,能实现电流的快速跟踪控制且对系统扰动等具有较强的鲁棒性。

4 试验结果与分析

为了验证所提 PMSM 电流控制方法的有效性,基于 dSPACE 控制器,在电机转速控制系统试验平台上完成了试验验证。dSPACE 控制系统是由德国 dSPACE 公司设计开发的一块基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发及性能测试的平台。在控制器中,转速环采用 PI 控制,电流环采用本文提出的基于扰动观测器的无差拍预测控制方法。PMSM 参数如下:额定转矩 $2.3 \text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速为 $3\,000 \text{ r/min}$,极对数为 3,定子电阻为 $4.8 \, \Omega$, d 轴定子电感为 $0.019\,5 \text{ H}$, q 轴定子电感为 $0.027\,5 \text{ H}$,永磁体磁通为 0.15 Wb 。

首先,给定电机参考转速为 $1\,000 \text{ r/min}$,负载转矩为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 2 为电机的 dq 轴电流和转速响应曲线。从图 2 中可看出,电机起动后,电流迅速增大,产生较大的起动电流,同时电机开始转动,最后电机稳定运行在参考转速。在此过程中,电机输出电流能快速地跟踪参考电流值,所设计的控制器具有良好的转速和电流跟踪性能。

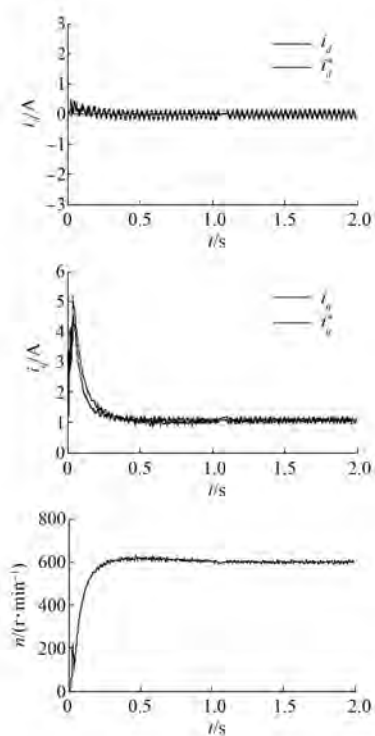


图 2 电机起动时的试验结果

为了验证参考电流变化时的电流跟踪性能,当电机稳定后,电机负载转矩变为 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 3 为对

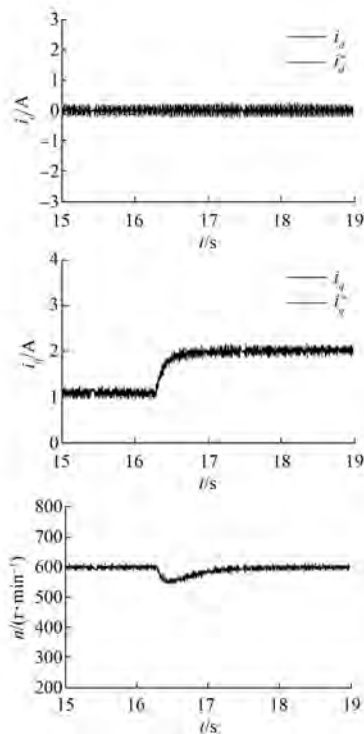


图 3 负载转矩变化时的试验结果

应的电流和转速变化曲线。图 4 为电机给定转速由 600 r/min 变为 $1\,200 \text{ r/min}$ 时的电机响应曲线。从图 3 中看出,电机转速和电流变化后, q 轴参考电流增大,电机输出 q 轴电流能快速的跟随参考电流的变化, d 轴电流有一个小的波动,但很快恢复到零。与此同时,电机仍具有较好的转速控制性能。

为了验证系统存在参数扰动时的鲁棒性,完成了控制器参数和电机实际参数不一致时的电机控制试验。首先,将控制器中定子电阻、电感、转子磁链等参数分别变为额定值的 50%、75%、120%,给定电机转速为 $1\,000 \text{ r/min}$,负载转矩为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$,图 5 为对应的试验结果。从图 5 可看出,当电机参数和控制器参数不一致时,系统仍具有良好的电流控制性能,所设计的控制器能快速适应参数的变化,对电机扰动具有较强的鲁棒性。

5 结 语

本文提出了一种新的 PMSM 电流跟踪控制方法,将无差拍预测控制理论和扰动观测器用于 PMSM 的电流控制,该控制器不仅具有良好的电流控制性能,而且对系统参数变化等扰动具有较强的鲁棒性。最后搭建了 PMSM 转速控制系统试验平

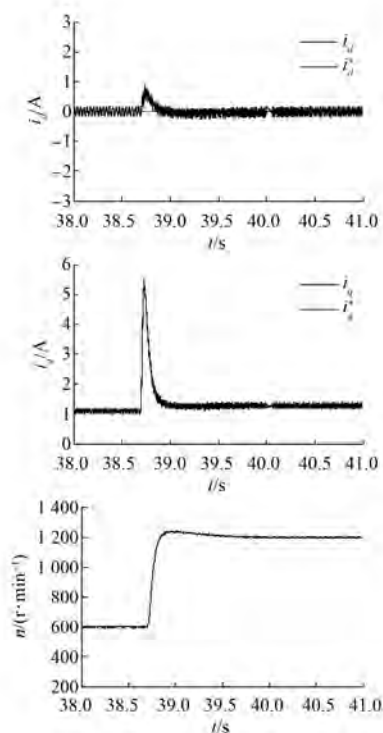


图4 电机参考转速变化时的试验结果

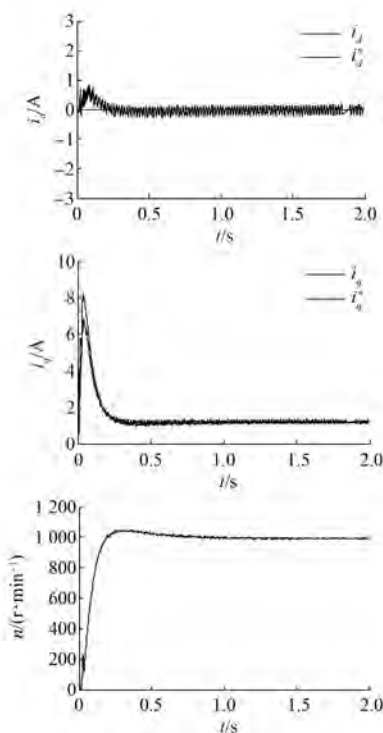


图5 电机参数变化时的试验结果

台,完成了电机起动、负载转矩变化、给定转速变化及系统参数变化时的试验,验证了该方法的有效性。

【参考文献】

- [1] EHASAN I M, GAO Y M, EMADI A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计[M]. 倪光正, 倪培宏, 熊素铭, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于内模的永磁同步电机滑模电流解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 91-99.
- [3] CHANG S H, CHEN P Y, TING Y H, et al. Robust current control-based sliding mode control with simple uncertainties estimation in permanent magnet synchronous Motor drive Systems [J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(6): 441-450.
- [4] LI S H, XIA C J, ZHOU X. Disturbance rejection control method for permanent magnet synchronous motor speed-regulation system [J]. Mechatronics, 2012(22): 706-714.
- [5] KIM K H. Model reference adaptive control-based adaptive current control scheme of a PM synchronous motor with an improved servo performance [J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(1): 8-18.
- [6] RODRIGUEZ G, CORTES P. 功率变换器和电气传动的预测控制[M]. 陈一民, 周京华, 卫三民, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [7] BOLOGNANI S, ZIGLIOTTO M. Full-digital predictive hysteresis current control for switching losses minimisation in PMSM drives [C] // International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2002: 61-67.
- [8] ROESMAN T, SOTER S. Mechanically com-mutated self control of PM-synchronous machines [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 1555-1559.
- [9] TURKER T, BUYUKKELES U, BAKAN A. A robust predictive current controller for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3906-3914.
- [10] ERROUISSI R, OUHROUCHE M, CHEN W H. Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3078-3088.
- [11] 牛里, 杨明, 刘可述. 永磁同步电机电流预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 131-137.

(下转第 35 页)

- 2012, 16(3): 15-21.
- [4] 史敬灼, 张慧敏. 行波超声波电机 Lyapunov 模型参考自适应速度控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 44-50.
- [5] ZHAO Y, QIAO W, WU L. Model reference adaptive system-based speed estimators for sensorless control of interior permanent magnet synchronous machines [C] // Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013: 1-6.
- [6] 邓艳艳, 林旭梅. 永磁同步电机滑模自适应控制[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 337-341.
- [7] JAKUB B, JAKUB K, SLAWOMIR S, et al. Adaptive control of permanent magnet synchronous motor with constrained reference current exploiting backstepping methodology [C] // IEEE Conference on Control Applications (CCA), 2014: 1545-1550.
- [8] 余致廷, 董旺华, 秦亚胜, 等. 基于反步滑模变结构的 PMSM 速度控制[J]. 控制工程, 2016, 23(增刊): 1-5.
- [9] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- [10] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80-85.
- [11] 刘瑛, 程善美. 基于神经网络的新型复合速度控制器的设计[J]. 控制工程, 2005, 12(2): 135-137.
- [12] 余致廷, 卢文斗, 谭琼琼, 等. PMSM 神经网络模型参考自适应的速度控制[J]. 控制工程, 2015, 22(增刊): 29-34.
- [13] LI L, GU Z P, TIAN J F. Neural network-sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor [C] // Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016: 3061-3064.
- [14] 方一鸣, 于晓, 牛犇, 等. 永磁同步电机的自适应模糊终端滑模速度控制[J]. 中南大学学报, 2013, 44(12): 4855-4860.
- [15] KAVEH M, JAFAR M M. A genetic based fuzzy logic controller for direct torque controlled IPMSM drives over wide speed range [C] // 2007 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2007: 847-853.
- [16] 张碧陶, 皮佑国. 基于模糊分数阶滑模控制的永磁同步电机控制[J]. 华南理工大学学报, 2012, 40(3): 126-130.
- [17] 王晓远, 田亮, 冯华. 无刷直流电机直接转矩模糊控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 134-138.
- [18] 丁文, 高琳, 梁得亮, 等. 永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真[J]. 微电机, 2010, 43(12): 66-71.
- [19] BARBARA B, GIANMARIO P. Model-based direct flux vector control of permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 3126-3136.
- [20] 朱军, 程志磊, 汪旭东, 等. 一种永磁同步电机电流直接反馈矢量控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(6): 35-39.
- [21] 郭新华, 温旭辉, 赵峰, 等. 基于电磁转矩反馈补偿的永磁同步电机新型 IP 速度控制器[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 7-13.

收稿日期: 2017-03-06

(上接第 29 页)

- [12] 王宏佳, 徐殿国, 杨明. 永磁同步电机改进无差拍电流预测控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 39-45.
- [13] WANG W, XIAO X, DING Y. An adaptive incremental predictive current control method of PMSM [C] // Proceedings of the Conference on Transportation Electrification Asia-Pacific, IEEE, 2014: 1-6.
- [14] KIM K H, BAIK I C, MOON G W. A current control for a permanent magnet synchronous motor with a simple disturbance estimation scheme [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1999, 7(5): 630-633.
- [15] 易伯瑜, 康龙云, 冯自成, 等. 基于扰动观测器的永磁同步电机预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 37-45.

收稿日期: 2017-03-06