

文章编号:0253-9993(2011)01-0172-05

参数在线估算的永磁同步电机最大转矩电流比控制

黄 鹏¹,苗长云¹,黄 雷²,李鸿强¹

(1. 天津工业大学 电气工程与自动化学院,天津 300160;2. 中国汽车技术研究中心,天津 300162)

摘 要:在矢量控制坐标变换的基础上,针对内置式永磁同步电动机(IPMSM) d 、 q 轴电感不相等的特性,对内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制方法进行了研究。用极值原理推导出在输出转矩一定时所需要的最小 d 、 q 轴电流应满足的关系式。在系统容量相同的情况下,相对于 $i_d=0$ 控制显著提高系统的低速转矩及动态性能。在此基础上,进一步考虑到电感饱和效应,对电机关键参数 L_d 、 L_q 进行了在线自适应估算,给出了适于工程应用的近似算法并应用于工程实践。最后对 $i_d=0$ 控制、最大转矩电流比控制进行了试验对比,结果表明:该方法可有效提高系统的转矩输出能力,具有很好的工程应用性。

关键词:内置式永磁同步电机;最大转矩电流比控制;参数自适应估算;饱和效应

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A

Maximum-torque-per-ampere control of permanent magnet synchronous motors with online parameter estimation

HUANG Peng¹, MIAO Chang-yun¹, HUANG Lei², LI Hong-qiang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300162, China)

Abstract: According to the characteristics that d 、 q -axis inductances are not equal in interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM), introduced a maximum-torque-per-ampere (MTPA) control scheme, which can get a larger torque output under certain current condition. A relationship about the minimum d 、 q -axis currents required under certain torque output was derived by the maximum principle. In same capacity, relative to $i_d=0$ control, this method could significantly improve the low-speed torque and dynamic performance of the system. Moreover, the inductance saturation effect was considered, the parameters L_d and L_q of the motor were online adaptive estimated, and an approximate algorithm for engineering applications was presented and applied to engineering practice. Finally, experimental results verify the effectiveness and engineering practicability of the proposed approach.

Key words: IPMSM; maximum-torque-per-ampere control; online adaptive parameter estimation; saturation effect

内置式永磁同步电机(IPMSM)由于磁路气隙小,电枢反应强,适于高速运行^[1-5],并且其结构简单、鲁棒性高、造价低^[6-10],因此在煤矿领域得到较广泛的应用,被应用于牵引采煤机、绞车、输送机、电机车等场合。煤矿输送机对电机的起动转矩有较高要求,其最大转矩受电机本体及功率模块最大电流的限制。为了进一步提高系统的动态性能,本文在矢量控

制坐标变换的基础上,针对内置式永磁同步电动机 d 、 q 轴电感不相等的特性,对最大转矩电流比控制方法进行了研究^[11-15],即在相同的电流下可输出更大转矩的控制方法,从而在系统容量相同的情况下相对于 $i_d=0$ 控制可显著提高系统的低速转矩及动态性能。在最大转矩电流比控制的基础上,给出了适于工程应用的近似算法并应用于工程实践。考虑到电感

饱和效应^[16],对电机关键参数 L_d 、 L_q 进行在线自适应估算^[17]。最后对 $i_d=0$ 控制、最大转矩电流比控制进行了试验对比。

1 永磁同步电机的数学模型

旋转坐标系下 IPMSM 的 d - q 轴电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的电压、电流; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感; R 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为转子电角速度; p 为微分算子。

IPMSM 的电磁转矩可表示为

$$T = \frac{3}{2}n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (2)$$

式中, n_p 为极对数。

电机可以采用 $i_d=0$ 的控制策略,但这种控制方法忽略了磁阻转矩的作用,只适用于表面式永磁电动机 (SPM),因为这种电动机是隐极式的 ($L_d=L_q$),磁阻转矩不明显。但对 IPMSM ($L_d \neq L_q$) 并非最优控制,对具有凸极的 IPMSM 为了提高转矩密度应采用最大转矩/电流比控制^[18-22]。由式(2)可以看出,IPMSM 电磁转矩由两部分组成:第 1 部分为永磁转矩,它由交轴电枢反应产生;第 2 部分为凸极结构产生的磁阻转矩。IPMSM 的矩角特性如图 1 所示。

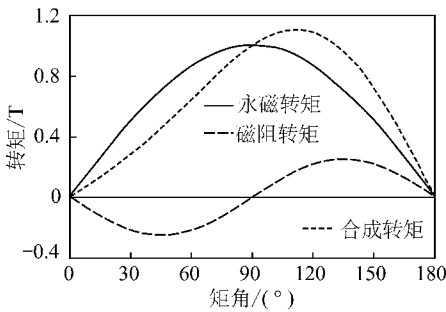


图 1 IPMSM 矩角特性

Fig. 1 Torque-angle characteristics of IPMSM

2 最大转矩电流比 (MTPA) 控制

采用 MTPA 控制方法,使得 IPMSM 在输出相同的电磁转矩下电机定子电流最小,问题等效于 $T = \frac{3}{2}n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$ 时,式(3)的极值问题。

$$\min_{i_s} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3)$$

做辅助函数

$$F = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} + \lambda \left\{ T - \frac{3}{2}n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \right\} \quad (4)$$

式中, i_s 为定子电流值; λ 为拉格朗日乘子。

将式(4)分别对 i_d 、 i_q 及 λ 求偏导数并令其为 0, 得

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial i_d} = \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} - \frac{3}{2}\lambda n_p(L_d - L_q)i_q = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial i_q} = \frac{i_q}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} - \frac{3}{2}\lambda n_p[\psi_f + (L_d - L_q)i_d] = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = T - \frac{3}{2}n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

求解式(5), 得

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2} \quad (6)$$

$$i_q = \left\{ \left(\frac{8T\psi_f}{3n_p} \right)^2 - 4[\psi_f^2 - 4(L_d - L_q)^2] \times \left[\left(\frac{4T}{3n_p} \right)^2 - \psi_f^2 \right] \right\}^{1/2} / \left\{ 2[\psi_f^2 - 4(L_d - L_q)^2] \right\} + \frac{8T\psi_f}{3n_p} \frac{1}{2[\psi_f^2 - 4(L_d - L_q)^2]} \quad (7)$$

此时,永磁同步电机电流环限制内的 MTPA 运行轨迹如图 2 中 OA 所示。

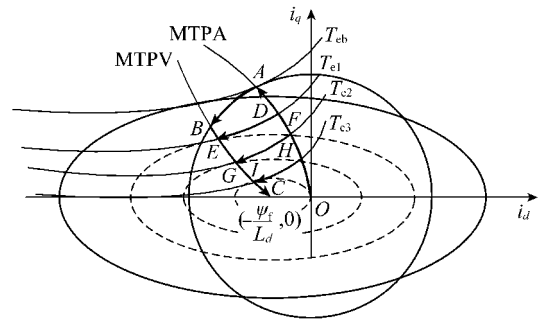


图 2 IPMSM 运行中电流电压轨迹

Fig. 2 The current-voltage trajectory of IPMSM

当参考转矩给定后,可以求出 MTPA 运行时的参考电流。由式(6)、(7)可知,求解 $i_d=f(T)$ 的关系式非常困难。将式(6)等号右边在 0 附近进行 Taylor 展开,得

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_d - L_q)} - \frac{\psi_f}{2(L_d - L_q)} \times \left[1 + \frac{2(L_d - L_q)^2}{\psi_f^2} i_q^2 + o\left(\frac{4(L_d - L_q)^2}{\psi_f^2} i_q^2 \right) \right] \quad (8)$$

式中, $o\left(\frac{4(L_d - L_q)^2}{\psi_f^2} i_q^2 \right)$ 为 $\frac{4(L_d - L_q)^2}{\psi_f^2} i_q^2$ 的高阶无穷小项。

忽略式(8)中的高阶无穷小项,式(8)可简化为

$$i_d = \frac{L_d - L_q}{\psi_f} i_q^2 \quad (9)$$

式(7)中 i_q 的表达式中只有电机参数及转矩给定,在实际系统实现中可通过 Matlab 计算 i_q 与 T ,并进行曲线拟合或存成表格。

3 电机电感参数的在线自适应估算

由于内置式永磁电机参数随运行状态易发生变化,即电机参数的不确定性将影响电机的控制性能,特别是运行在磁路饱和时,电感参数随电机饱和及交叉耦合更加明显,已有的解析方程式在实际使用中受到很大限制。

图 3 为某永磁同步电机参数 L_d, L_q 随 i_q 变化的试验曲线。

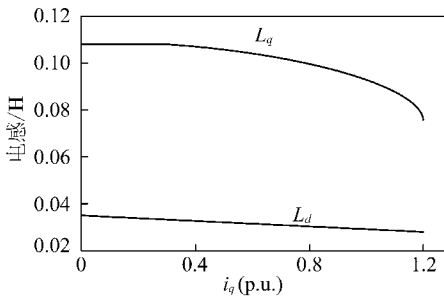


图 3 一台永磁同步电机参数 L_d, L_q 随 i_q 的变化曲线

Fig. 3 The change curves of L_d, L_q with i_q

忽略式(1)中的微分项,得到

$$u_q - Ri_q - \omega_e \psi_f = \omega_e \hat{L}_d i_d \quad (10)$$

$$Ri_d - u_d = \omega_e \hat{L}_q i_q \quad (11)$$

考虑到在电感参数变化一般发生在高频情况下,电阻上的压降相对较小,故在实际中忽略了电阻参数变化的影响。

图 4 为基于式(10)、(11)考虑饱和效应及交叉耦合效应的 IPM 参数在线自适应估算模型。由于电机变频控制采用了高频的 PWM,故采用了低通滤波器将高频载波信号进行滤除。模型中采用了 L_d 及 L_q 的前馈量对实测量进行叠加,可保证在起动瞬态的参数估算算法的有效性。

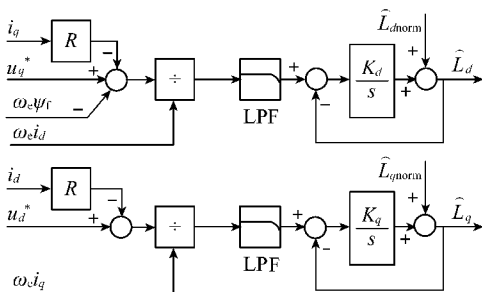


图 4 IPM 参数的在线自适应估算

Fig. 4 Online adaptive parameter estimation of IPM

$\hat{L}_{d\text{norm}}, \hat{L}_{q\text{norm}}$ 分别为 L_d, L_q 给定的初值

4 控制系统结构

图 5 为采用了 MTPA 的 IPMSM 矢量控制系统。电机参数中 q 轴电感应按式(10)得到。转矩给定 T^* 经过式(7)的查表运算得到 q 轴电流给定 i_q^* ,经式(9)运算得到 d 轴电流给定 i_d^* 。 d, q 轴电流的反馈值与给定值的偏差经过 PI 调节后经过 park 反变换得到 α, β 轴参考电压分量 u_α, u_β ,再经 SVPWM 调制输出产生 6 路 PWM 波驱动信号。

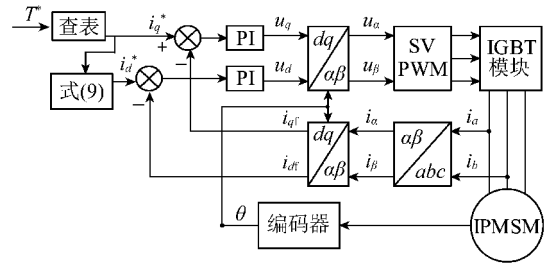


图 5 采用 MTPA 的控制系统结构

Fig. 5 Structures of vector control system with MTPA

5 实验及结果分析

系统以一台额定功率为 18 kW,峰值功率为 35 kW 的内置式永磁同步电动机为实验对象。实验平台的硬件主要包括电机、测功机及操作台、电机控制器等。考虑驱动系统对实时性的要求,系统软件采用汇编语言编写,功能上实现了电机的全速范围控制。

图 6 为试验用电机估算电感参数实测曲线,可见采用在线自适应参数估计可实时测得不同电流及饱和程度下电机的电感参数,为 MTPA 控制中提供关键参数。

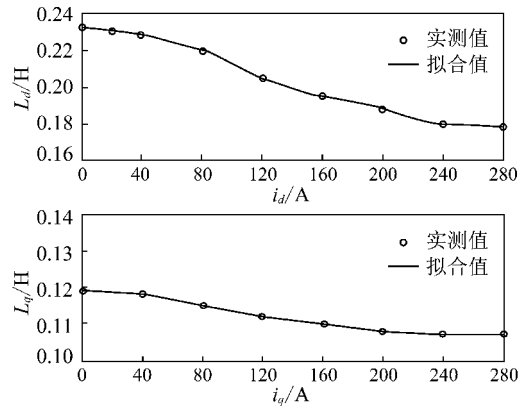


图 6 试验用电机估算电感参数实测曲线

Fig. 6 Measured curves for estimated inductance of the test motor

图 7 为电机在 1 000 r/min 下采用 MTPA 控制的最大电流波形,可见采用了 MTPA 控制,电机电流正

弦度较好,控制器能输出的最大电流有效值为 235 A 左右。

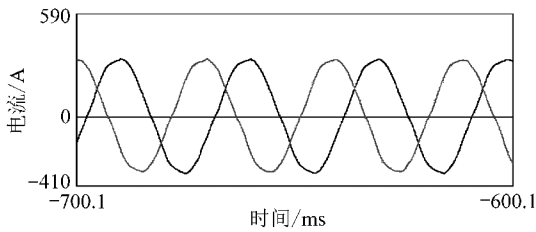


图7 采用 MTPA 控制的最大电流波形

Fig. 7 Maximum current waveform with MTPA control

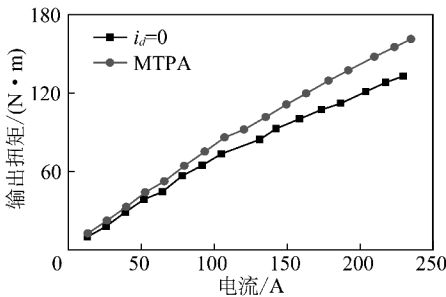


图8 采用 $i_d=0$ 控制与 MTPA 控制的电流-转矩特性对比

Fig. 8 Current-torque characteristic comparison with $i_d=0$ control and MTPA control

图8为采用 $i_d=0$ 控制及 MTPA 控制的电流-转矩特性对比曲线,可见采用 $i_d=0$ 控制算法,其电流输出最大时,转矩输出为 $131.5 \text{ N} \cdot \text{m}$;采用 MTPA 后,相同的最大电流下输出转矩为 $161.2 \text{ N} \cdot \text{m}$,转矩输出能力增加了 22.6%。

图9为采用 MTPA 控制与 $i_d=0$ 控制方式系统恒定负载从零速至 6000 r/min 起动的性能对比波形。

图9(a)为系统转速相应曲线,可见从 $0 \sim 6000 \text{ r/min}$,采用 MTPA 相应时间比采用 $i_d=0$ 控制短约 0.3 s 。图9(b)为此过程中采用 MTPA 控制与 $i_d=0$ 控制时 i_d 的波形,可见采用 MTPA 控制时,对应升速过程中 i_d 有效值约为 20 A 。图9(c)为电机相电流有效值,可见采用 MTPA 控制时,其相电流有效值比采用 $i_d=0$ 控制低,约低 10 A 。电机控制器设置为转速控制模式,测功机设置为转矩控制模式,初始负载为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。采用的控制策略为:在升速过程中,控制器中转速环输出为转矩给定,采用 MTPA 控制时最大转矩输出为 $160 \text{ N} \cdot \text{m}$,采用 $i_d=0$ 控制最大转矩为 $130 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。达到设定转速后,转速环输出稳定为平衡负载扭矩及摩擦扭矩的扭矩输出。

6 结 论

(1)提出并实现了一种永磁同步电动机最大转矩电流比的控制方案,在系统容量有限的情况下,大

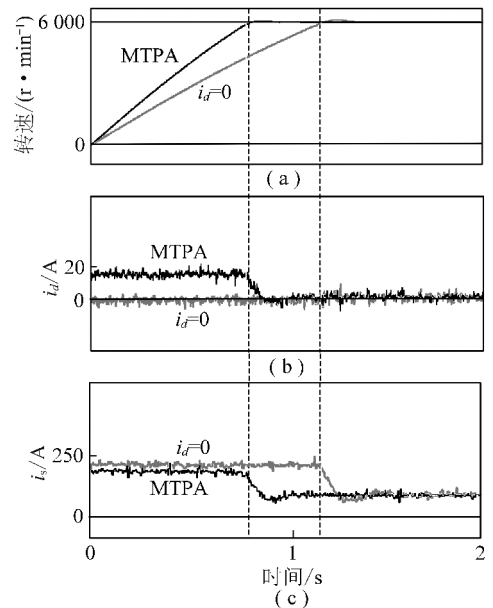


图9 MTPA 控制与 $i_d=0$ 控制方式系统恒定负载起动的性能对比

Fig. 9 Response comparison with command speed at constant load between MTPA and $i_d=0$ control

大提高了系统的转矩输出能力,该算法在相同的定子电流条件下,电机输出更大的电磁转矩。

(2)对于不同电机,其 d 、 q 轴电感不同,饱和程度也不同,需对不同电机进行单独分析并得到 i_d 、 i_q 的给定。

(3)为得到更好的转矩精度,应进一步考虑绕组及永磁体温度对输出转矩的影响。

参考文献:

- [1] Alfio Consoli, Giuseppe Scarcella, Giacomo Scelba, et al. Steady-state and transient operation of IPMSMs under maximum-torque-per-ampere control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 121-129.
- [2] 张细政, 王耀南. 永磁同步电机鲁棒自适应反步控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 572-576.
Zhang Xizheng, Wang Yaonan. Adaptive backstepping based robust speed control of permanent magnet synchronous motor servo drive [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 572-576.
- [3] Casey B Butt, Ashrafal Hoque M, Azizur Rahman M. Simplified fuzzy-logic-based MTPA speed control of IPMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40: 1529-1535.
- [4] 司纪凯, 汪旭东, 袁世鹰, 等. 永磁直线同步电机非线性模型的建立及稳态特性分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 343-348.
Si Jikai, Wang Xudong, Yuan Shiyong, et al. Non-linear model establishment and steady state characteristics analysis of permanent magnet linear synchronous motor [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 343-348.
- [5] 王福忠, 袁世鹰, 荆鹏辉. 垂直运行永磁直线同步电机的失步预防策略研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 696-700.

- Wang Fuzhong, Yuan Shiyang, Jing Penghui. The out-of-step preventing strategy of permanent magnet linear synchronous motor moving for vertical movement [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35 (4): 696-700.
- [6] 彭继慎, 王 强, 刘栋良, 等. 永磁同步电动机的速度自适应反推控制[J]. *煤炭学报*, 2006, 31 (4): 540-544.
- Peng Jishen, Wang Qiang, Liu Dongliang, et al. The auto-adapted backstepping control of the speed of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31 (4): 540-544.
- [7] Dianov Anton, Kim Young-Kwan, Lee Sang-Joon, et al. Robust self-tuning MTPA algorithm for IPMSM drives [A]. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics IECON 2008 [C]. 2008: 1 355-1 360.
- [8] Gilbert Foo, Rahman M F. Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57 (4): 1 270-1 278.
- [9] Mohamed Y A R I, Lee T K. Adaptive self-tuning MTPA vector controller for IPMSM drive system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21 (3): 636-644.
- [10] Fazeli S M, Ping H W, Zarchi H A. Robust maximum torque per ampere (MTPA) control of interior permanent magnet synchronous motor drives using adaptive input-output feedback linearization approach [A]. 2009 International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS) [C]. 2009: 1-6.
- [11] 李长红, 陈明俊, 吴小役. PMSM 调速系统中最大转矩电流比控制方法的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25 (11): 169-174.
- Li Changhong, Chen Mingjun, Wu Xiaoyi. Study of a maximum ratio of torque to current control method for PMSM [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25 (11): 169-174.
- [12] 张 波. 永磁同步电动机矢量控制和最大转矩控制 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1996, 24 (1): 35-39.
- Zhang Bo. Maximum torque control and vector control of a permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1996, 24 (1): 35-39.
- [13] Bolognani S, Sgarbossa L, Zordan M. Self-tuning of MTPA current vector generation scheme in IPM synchronous motor drives [A]. *Power Electronics and Applications* [C]. 2007: 1-10.
- [14] Kiltbau A, Pacas J M. Parameter-measurement and control of the synchronous reluctance machine including cross saturation [A]. *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting* [C]. 2001: 2 302-2 309.
- [15] 郎宝华, 毕雪芹, 刘卫国. MTPA 控制的直接转矩控制系统研究 [J]. *西安工业大学学报*, 2010, 30 (1): 75-78.
- Lang Baohua, Bi Xueqin, Liu Weiguang. Study of direct torque control system of MTPA control [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2010, 30 (1): 75-78.
- [16] Mademlis C, Agelidis V G. On considering magnetic saturation with maximum torque to current control in interior permanent magnet synchronous motor drives [J]. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2001, 16 (3): 246-252.
- [17] Hyunbae Kim, Jason Hartwig, Robert D Lorenz. Using on-line parameter estimation to improve efficiency of IPM machine drives [A]. *Proc. of the IEEE PESC Conference* [C]. Queensland, Australia, 2002: 23-27.
- [18] Kwang-Woon Lee, Sang Bin Lee. MTPA operating point tracking control scheme for vector controlled PMSM drives [A]. *International Symposium on Power Electronics Electrical Drives, Automation and Motion* [C]. SPEEDAM 2010, 2010: 24-28.
- [19] Casey Butt, Hoque M A, Rahman M A. Simplified fuzzy logic based MTPA speed control of IPMSM drive [A]. *Industry Applications Conference 2003* [C]. IAS, 2003: 499-506.
- [20] Soltani J, Pahlavaninezhad M. Adaptive backstepping based controller design for interior type PMSM using maximum torque per ampere strategy [A]. *Power Electronics and Drives Systems, PEDS 2005* [C]. 2005: 596-601.
- [21] Selim Hossain, Jahangir Hossain. Performance analysis of a novel fuzzy logic and MTPA based speed control for IPMSM drive with variable d - and q -axis inductances [A]. *International Conference on Computer and Information Technology (ICIT 2009)* [C]. 2009: 361-366.
- [22] 裘 君, 赵光宙, 齐冬莲. 基于反馈耗散方法的永磁同步电机最大转矩/电流控制 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34 (9): 1 285-1 290.
- Qiu Jun, Zhao Guangzhou, Qi Donglian. Permanent magnet synchronous motor maximum torque per ampere control based on feedback dissipative realization [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34 (9): 1 285-1 290.