

永磁无刷直流电机直接转矩控制

夏长亮, 张茂华, 王迎发, 刘丹

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

The Direct Torque Control for Permanent Magnet Brushless DC Motors

XIA Chang-liang, ZHANG Mao-hua, WANG Ying-fa, LIU Dan

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: Permanent magnet brushless DC motors (BLDCM) have been more and more widely used in industry applications because of their advantages such as higher ratio of power to volume, lower noise and easier maintenance compared to permanent magnet DC servo motors. However, torque ripple generated in commutation period is the main drawback of BLDCM, which make the application of BLDCM in the high accuracy system impossible. The direct torque control (DTC) can control the torque instantly. This method observes the fluxlink and torque of the motor in the stator coordinate, and compares the observed values with the set values to obtain the error. And then the control signal is obtained by inputting the error to the controller. Finally, with this control signal and the state of fluxlink, the corresponding voltage space vector is selected, so that the torque can be controlled directly. In this paper, DTC is used to control the BLDCM, in the purpose of reducing the torque ripple. Simulation and experiment results show that the DTC method can minimize the torque ripple of BLDCM effectively and gain rapid dynamic response.

KEY WORDS: permanent brushless DC motor; torque ripple; direct torque control

摘要: 永磁无刷直流电机以其效率高、噪音低、易维护等优点在工业控制的各个领域得到了越来越广泛的应用。但是, 永磁无刷直流电机存在较大的转矩波动, 这就限制了它在高精度系统中的应用。直接转矩控制具有瞬时转矩控制的特点。它直接在定子坐标系下观测电机的磁链、转矩, 并将此观测值和给定值进行比较, 差值经滞环控制器得到相应的控制信号, 再综合当前的磁链状态来选择相应的电压空间矢量, 实现对电机转矩的直接控制。该文尝试将直接转矩控制方法用于永磁无刷直流电机的控制, 以期达到抑制转矩波动的目的。仿真及实验结果表明, 该文提出的方法能够较好地

抑制永磁无刷直流电机的转矩波动, 并且具有很高的动态响应速度。

关键词: 永磁无刷直流电机; 转矩波动; 直接转矩控制

0 引言

永磁无刷直流电机(permanent magnet brushless DC motors, BLDCM)由于结构简单、出力大、调速性能良好, 在工业领域中得到了日益广泛的应用^[1-3]。由于齿槽转矩和非理想的方波输入等多方面原因使得永磁无刷直流电机的转矩波动比较明显, 这大大地限制了其在精度较高的伺服系统中的应用。针对这一问题, 国内外许多学者进行了大量的研究。文献[4]利用 $d-q-0$ 参考坐标变换原理对电机进行控制, 使电机达到转矩波动最小、效率最大; 文献[5]对相电流和反电势进行傅立叶级数分解, 再对谐波转矩做相应的补偿, 该方案控制精度较高; 文献[6]利用神经网络对电机换向时的系统模型进行在线辨识, 通过控制电机换向过程中换向电流上升和下降时间, 补偿由换向引起的回路电流幅值变化, 达到抑制转矩波动的目的。

直接转矩控制(direct torque control, DTC)采用定子磁场定向和空间矢量的概念, 通过检测定子电压、电流, 直接在定子坐标系下观测电机的磁链、转矩, 并将此观测值和给定值进行比较, 差值经滞环控制器得到相应的控制信号, 再综合当前的磁链状态来选择相应的电压空间矢量, 实现对电机转矩的直接控制^[7]。它从功能上可以划分为 2 部分: 第 1 为定子磁链的观测和控制部分, 作用是选择适当的电压空间矢量, 以在定子中产生六边形磁链; 第 2 为转矩观测和控制部分, 作用是实现转矩的瞬时控制。近年, DTC 在同步电机特别是永磁同步电机中的应用国内外已有文献报道^[8-11]。但是, 将 DTC

基金项目: 天津市科技攻关计划重大项目(05ZHGCX00100); 天津市应用基础研究重点项目(043802011)。

用于永磁无刷直流电机的研究还不多。

由于永磁无刷直流电机具有位置传感器，且其电动连续运行时由位置传感器给出的电压空间矢量恰好能够在电机定子上产生六边形的磁链，所以将 DTC 用于永磁无刷直流电机时，一方面可以略去其磁链观测部分，以简化控制系统的结构，另一方面利用其转矩控制的高动态性，将电机的转矩波动限制在规定的范围内。永磁无刷直流电机电动运行时的定子磁链波形如图 1 所示。其中，横轴为定子 α - β 坐标系的 α 轴，纵轴为 β 轴。

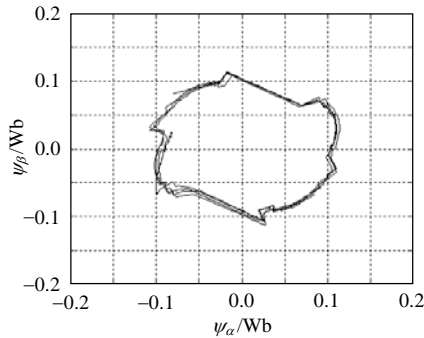


图 1 永磁无刷直流电机定子磁链图
Fig. 1 Stator flux-linkage for BLDCM

DTC 用于控制永磁无刷直流电机时有 3 点需要特别注意。第一，电压空间矢量的表示方法不同^[12](异步电机运行时需要逆变桥的每个桥臂都有 1 个功率管导通，因此其电压空间矢量用三位二进制数表示。异步电机一般采用两两通电方式，其电压空间矢量用六位二进制数表示)；第二，零电压空间矢量的个数不同(异步电机有两个零电压矢量，1 个对应于上桥臂全导通，另 1 个对应于下桥臂全导通。永磁无刷直流电机只有 1 个零电压矢量，对应于上下桥臂全关断)；第三，转矩计算方法不同(异步电机与永磁无刷直流电机结构上的差异导致了它们转矩计算方法的不同)。

1 永磁无刷直流电机的数学模型

永磁无刷直流电机由永磁同步电机本体、逻辑驱动电路及位置传感器组成。以三相桥式 Y 接电机为例，电机的状态方程为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： u_A 、 u_B 、 u_C 为三相定子相电压； e_A 、 e_B 、 e_C

为三相定子反电势； i_A 、 i_B 、 i_C 为三相定子电流； L 为定子自感； M 为定子间互感。

电磁转矩的表达式为

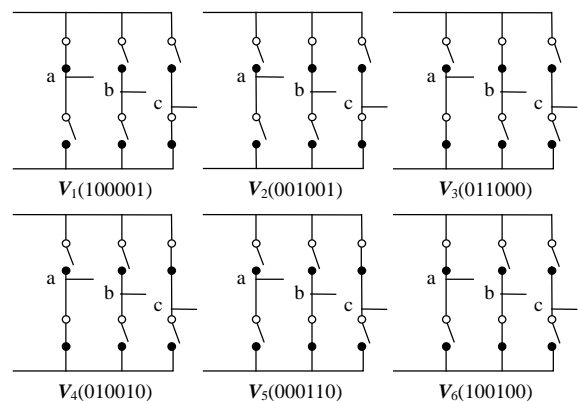
$$T_e = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) / \Omega \quad (2)$$

式中 Ω 为转子的机械角速度。

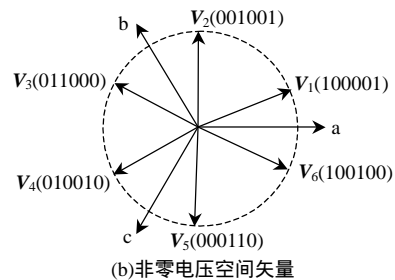
由式(2)可以看出，要保持转矩恒定，在转速一定时， $e_A i_A$ 、 $e_B i_B$ 、 $e_C i_C$ 之和必须恒定。假定电机气隙磁场分布为理想的梯形波，反电势与磁感应强度分布一致，则要保持转矩恒定，必须使电枢电流为理想方波且与反电势同相位。因此，很多文献都把定子电流作为控制对象，运用各种控制策略，以产生方波定子电流^[13-14]。

2 永磁无刷直流电机的电压空间矢量及其选择

永磁无刷直流电机一般采用两两通电方式，即每一瞬间有 2 个功率管导通，每隔 1/6 周期(60°电角度)换向一次，每次换向 1 个功率管，每一功率管导通 120°电角度。因此，本文用六位二进制数来表示其电压空间矢量，每一位二进制数代表 1 个功率管的开关状态，0 表示功率管关断，1 表示功率管导通。由于各功率管都关断时，电机定子端电压为零，所以这里用 $V(000000)$ 来表示零电压空间矢量。各功率管的开关状态与非零电压空间矢量的对应关系如图 2 所示。图 2(a)中的理想开关代表功率管，



(a)不同功率管状态下的电压空间矢量



(b)非零电压空间矢量

图 2 永磁无刷直流电机非零电压空间矢量图
Fig. 2 Non-zero voltage space vectors for BLDCM

闭合表示功率管导通,打开表示功率管关断。图2(b)中 a、b、c 为定子三相坐标系。

永磁无刷直流电机一般使用霍尔元件作为其位置传感器。电机根据霍尔元件的 3 个输出信号 HA、HB、HC 的不同逻辑组合选择相应的电压空间矢量,以实现连续电动运行。表1和表2给出了电机电动运行时各霍尔信号与电压空间矢量的对应关系。其中,表1为逆时针旋转时的对应关系,表2为顺时针旋转时的对应关系。

表1 电压空间矢量选择表(逆时针旋转)

Tab.1 Selection table of voltage space vectors (anti-clockwise)

HA	HB	HC	电压空间矢量
1	0	1	V ₁ (100001)
1	0	0	V ₂ (001001)
1	1	0	V ₃ (011000)
0	1	0	V ₄ (010010)
0	1	1	V ₅ (000110)
0	0	1	V ₆ (100100)

表2 电压空间矢量选择表(顺时针旋转)

Tab.2 Selection table of voltage space vectors (clockwise)

HA	HB	HC	电压空间矢量
1	0	1	V ₄ (010010)
1	0	0	V ₅ (000110)
1	1	0	V ₆ (100100)
0	1	0	V ₁ (100001)
0	1	1	V ₂ (001001)
0	0	1	V ₃ (011000)

如前所述,永磁无刷直流电机按照不同的位置信号给出相应的电压空间矢量即可在定子中产生六边形磁链。因此,本文将DTC用于永磁无刷直流电机时,直接使用位置信号来选择电压空间矢量,从而略掉了磁链观测部分,简化了控制系统的结构。

3 永磁无刷直流电机的转矩观测

为了运用DTC,需要对电机的电磁转矩进行观测。本文用式(2)来计算转矩。

对于实际的控制系统,电机的反电势一般无法直接测得,可检测量有定子对地端电压、定子电流、中性点电压(对于有中性点引出线的电机可直接测量,对于无中性点引出线的电机,可通过在定子端并联三相Y形对称负载来模拟中性点)、电机转速。设 U_X 为定子对地端电压, U_N 为中性点电压,则有

$$U_X = u_X + U_N \quad (X \text{ 为 } A, B, C) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)并整理可得

$$\begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A - U_N \\ U_B - U_N \\ U_C - U_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)右端均为可直接检测量或已知量。将式(2)与式(4)联立即可求得电磁转矩。

4 永磁无刷直流电机的DTC控制

4.1 转矩控制

由电机统一理论知,电机的电磁转矩可表示为

$$T_e = k_m |\psi_s| |\psi_r| \sin \theta \quad (5)$$

式中: k_m 为转矩系数; $|\psi_s|$ 为定子磁链空间矢量幅值; $|\psi_r|$ 为转子磁链空间矢量幅值; θ 为定转子磁链之间的夹角,即磁通角。

根据式(5),转矩的大小与定子磁链幅值、转子磁链幅值和磁通角 θ 成正比。对永磁无刷直流电机而言,在实际运行中,转子磁链幅值由永磁体产生,其大小近似恒定。因此,要控制电机的转矩,只能通过控制定子磁链,进而改变磁通角 θ 的大小来实现。在DTC中,其基本的控制方法就是通过电压空间矢量来控制定子磁链的旋转速度,控制定子磁链走走停停,以改变定子磁链的平均旋转速度,从而改变磁通角 θ 的大小,达到控制电机转矩的目的。

按照DTC理论,为了实现电机转矩控制的高动态性,需要对转矩进行闭环控制。本文采用转矩两点式调节器来实现,如图3所示。

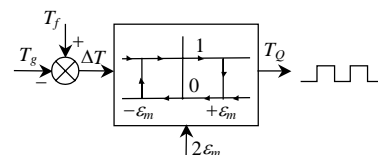


图3 转矩两点式调节器

Fig.3 Torque point-to-point regulator

图中,调节器的输入量是转矩给定值 T_g 和转矩反馈值 T_f 的信号差 ΔT ,输出量是转矩开关信号 T_Q 。调节器的容差是 $\pm \epsilon_m$,采用离散的两点式调节方式。它对转矩的调节过程见图4(忽略电机的损耗)。

在时刻 t_1 , $\Delta T \leq -\epsilon_m$, T_Q 变为“1”态。在 $T_Q=1$ 作用下,电机接通非零电压空间矢量(这一电压空间矢量由位置信号给出),使定子磁链向前旋转, θ 角增大, T_f 上升, ΔT 增大。磁链作为对应电压的积分,其增量 $\Delta \psi_s$ 是按恒定的斜率上升的。到时刻 t_2 , ΔT 上升到容差的上限 $+\epsilon_m$, 即 $\Delta T \geq +\epsilon_m$, T_Q 变为“0”态。在 $T_Q=0$ 的作用下,零电压空间矢量加到电机上,定子磁链静止不动, θ 角减小, T_f 下降, ΔT 减

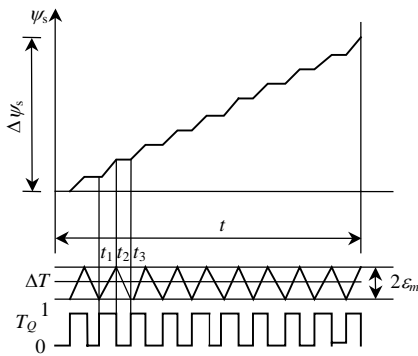


图 4 转矩两点式调节器的调节过程

Fig. 4 Regulation of torque point-to-point regulator

小。这个期间的 $\Delta\psi_s$ 保持水平不变，没有增长。再到时刻 t_3 ，又重复时刻 t_1 的过程。由此可见，通过合理选择 ϵ_m ，转矩调节器能够把转矩波动限制在规定的容差范围内，达到转矩波动抑制的目的。

4.2 控制系统结构框图

永磁无刷直流电机的 DTC 控制系统结构框图如图 5 所示。

图 5 中， n_g 为转速给定， n 为电机的输出转速， T_g 为给定转矩， T_f 为电机的输出转矩。饱和非线性单元的作用是：当 PI 调节器的输出超过最大给定转矩 T_{max} 时， $T_g=T_{max}$ ；当 PI 调节器的输出小于零时， $T_g=0$ ；当 PI 调节器的输出在 T_{max} 与 0 之间时， T_g 等于调节器的输出。

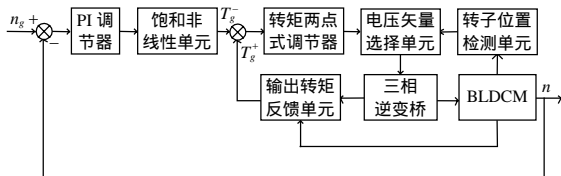


图 5 永磁无刷直流电机 DTC 控制系统结构框图

Fig. 5 Block diagram for DTC of BLDCM

5 仿真及实验结果

5.1 仿真结果

为验证上述方法的可行性，在 Matlab 上，对系统进行了建模与仿真。

电机模型参数为：额定电压 $U_N=36\text{ V}$ ，额定转速 $n_N=3\ 600\text{ r/min}$ ，额定转矩 $T_N=0.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图 6 为 $n_g=3\ 600\text{ r/min}$ ，负载转矩 $T_l=0.32\text{ N}\cdot\text{m}$ ，无控制算法时的转矩仿真波形图。

图 7 为 $n_g=3\ 600\text{ r/min}$ ，最大给定转矩 $T_{max}=0.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ，调节器的容差 $\Delta T=0.005\text{ N}\cdot\text{m}$ ，负载转矩 $T_l=0.32\text{ N}\cdot\text{m}$ ，采用 DTC 的转矩仿真波形图。

图 8 为 $n_g=3\ 600\text{ r/min}$ ，最大给定转矩 $T_{max}=0.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $\Delta T=0.005\text{ N}\cdot\text{m}$ ，负载转矩由 $0.32\text{ N}\cdot\text{m}$ 突变

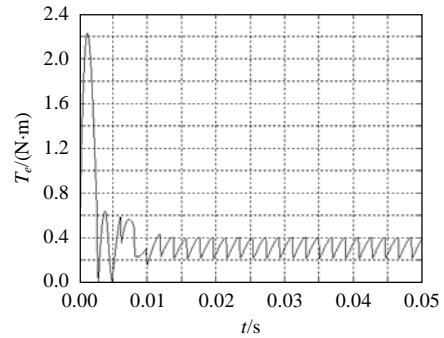


图 6 无控制算法时的转矩仿真波形图

Fig. 6 Simulation result of torque without control algorithm

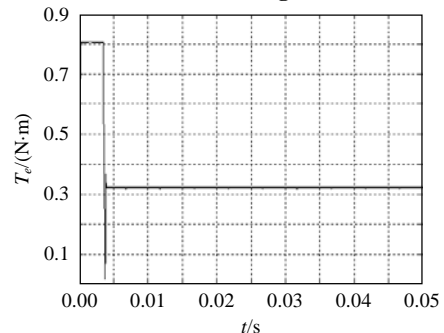


图 7 负载转矩恒定时的 DTC 转矩仿真波形图

Fig. 7 Simulation result of torque with constant load

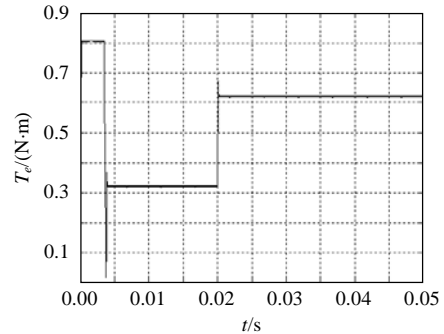


图 8 负载转矩突变时的 DTC 转矩仿真波形图

Fig. 8 Simulation result of torque with step load

为 $0.62\text{ N}\cdot\text{m}$ ，采用 DTC 的转矩仿真波形图。

5.2 实验结果

本文以 TI 公司的 MSP430F149 单片机做为控制芯片对样机进行控制，其硬件控制框图如图 9 所

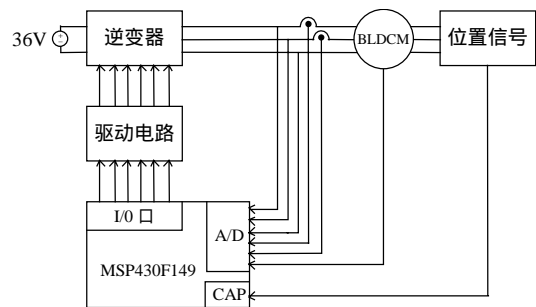


图 9 永磁无刷直流电机 DTC 硬件控制框图

Fig. 9 Hardware control framework for DTC of BLDCM

示,所有控制算法均由软件实现。

实验样机参数为:极对数 $p=4$, 定子相电阻 $R_s=0.66 \Omega$, 有效电感 $L-M=0.14 \text{ mH}$, 电势常数 $k_e=0.067 \text{ V/(rad/s)}$, 额定电压 $U_N=36 \text{ V}$, 额定转速 $n_N=3600 \text{ r/min}$, 额定转矩 $T_N=0.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图 10 为 $n_g=3600 \text{ r/min}$, 负载转矩 $T_l=0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 无控制算法时的转矩实验波形图。

图 11 为 $n_g=3600 \text{ r/min}$, 最大给定转矩 $T_{\max}=0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩调节器的容差 $\Delta T=0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$, 负载转矩 $T_l=0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 采用 DTC 的转矩实验波形图。

图 12 为 $n_g=3600 \text{ r/min}$, 最大给定转矩 $T_{\max}=0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩调节器的容差 $\Delta T=0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$, 负载转矩由 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 突变为 $0.4 \text{ N}\cdot\text{m}$, 采用 DTC 的转矩实验波形图。

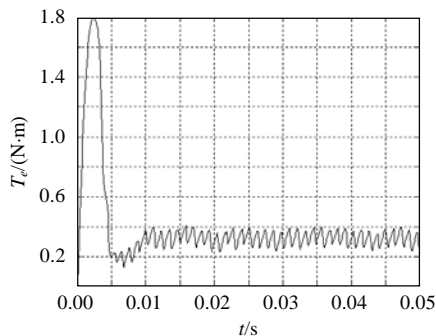


图 10 无控制算法时的转矩实验波形图
Fig. 10 Experiment result of torque without control algorithm

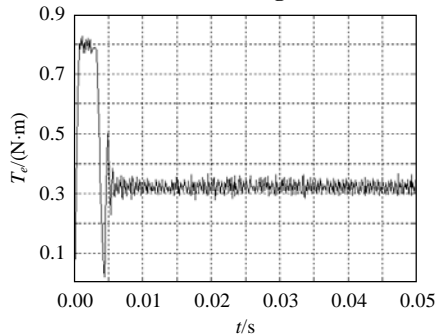


图 11 负载转矩恒定时的 DTC 转矩实验波形图
Fig. 11 Experiment result of torque with constant load

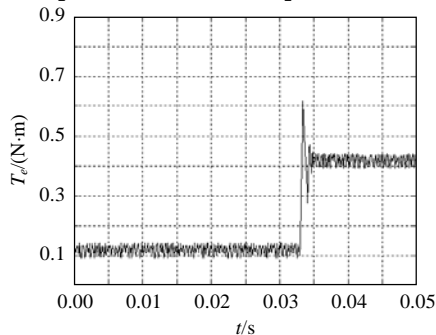


图 12 负载转矩突变时的 DTC 转矩实验波形图
Fig. 12 Experiment result of torque with step load

由图 6~8 的仿真结果和图 10~12 的实验结果表明,该方法能够使电机以最大给定转矩起动,达到稳态后能够较好地抑制电机的转矩波动,并且当负载转矩突变时,电机具有非常快的响应速度。

6 结论

永磁无刷直流电机的特殊性,使得在对其进行 DTC 控制时,可以略掉磁链观测部分以简化控制系统的结构。同时由于 DTC 对转矩的控制具有高动态性,只要合理选择转矩两点式调节器的容差,便可将永磁无刷直流电机的转矩波动抑制在规定的范围内。仿真和实验结果表明,本文提出的方法简单有效且具有较高的精度。

参考文献

- [1] 夏长亮, 李正军, 杨荣, 等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82-86.
Xia Changliang, Li Zhengjun, Yang Rong, et al. Control system of brushless DC motor based on active-disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 82-86(in Chinese).
- [2] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133.
Xia Changliang, Guo Peijian, Shi Tingna, et al. Control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 129-133(in Chinese).
- [3] 夏长亮, 刘均华, 俞卫, 等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 139-143.
Xia Changliang, Liu Junhua, Yu Wei, et al. Variable structure control of BLDCM based on extended state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 139-143(in Chinese).
- [4] Park S J, Park H W, Lee M H, et al. A new approach for minimum torque ripple maximum efficiency control of BLDC motor [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2000, 47(4): 109-113.
- [5] Kim Y, Kook Y, Ko Y. A new technique of reducing torque ripples for BLDCM drives [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(5): 735-739.
- [6] 夏长亮, 文德, 王娟. 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换向转矩波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 54-58.
Xia Changliang, Wen De, Wang Juan. A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on ANN [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 54-58(in Chinese).
- [7] 徐祖华, 黄智伟, 盛义发. 永磁同步电机直接转矩控制理论基础与仿真研究[J]. 微特电机, 2003, 31(5): 6-8.
Xu Zuhua, Huang Zhiwei, Sheng Yifa. Principle and simulation study on direct torque control in permanent magnet synchronous motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2003, 31(5): 6-8(in Chinese).
- [8] 冯江华, 许峻峰. 永磁同步电机直接转矩控制系统转矩调节新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 151-157.
Feng Jianghua, Xu Junfeng. A new torque adjustment method of

- permanent magnet synchronous machines direct torque control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 151-157(in Chinese).
- [9] 周立求, 辜承林. 直接转矩控制用于同步电机的特点综述和仿真分析[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(1): 59-63.
Zhou Liqiu, Gu Chenglin. The study of direct torque control of synchronous machine[J]. Electric Machines and Control, 2005, 9(1): 59-63(in Chinese).
- [10] 袁登科, 陶生桂, 王志鹏, 等. 直接转矩控制(DTC)技术概述[J]. 变频器世界, 2004, (12): 7-10.
Yuan Dengke, Tao Shenggui, Wang Zhipeng, et al. Methodologies for direct torque control (DTC) technique[J]. The World of Converter, 2004, (12): 7-10(in Chinese).
- [11] 邓启文, 尹力明, 余龙华, 等. 直接转矩控制的发展与展望[J]. 微特电机, 2002, 30(1): 36-38.
Deng Qiwen, Yin Liming, She Longhua, et al. The development and prospect of direct torque control[J]. Small & Special Electrical Machines, 2002, 30(1): 36-38(in Chinese).
- [12] Liu Y, Zhu Z Q, Howe D. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 41(2): 599-608.
- [13] Kim Tae-Sung, Ahn Sung-Chan, Hyun Dong-Seok. A new current control algorithm for torque ripple reduction of BLDC motors [C]. The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Denver, CO, USA, 2001.
- [14] 夏长亮, 王娟, 史婷娜, 等. 基于自适应径向基函数神经网络的无刷直流电机直接电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 123-127.
Xia Changliang, Wang Juan, Shi Tingna, et al. Direct control of currents based on adaptive RBF neural network for brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 123-127(in Chinese).

收稿日期: 2007-01-13。

作者简介:

夏长亮(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机系统及其控制, clxai@tju.edu.cn;

张茂华(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无刷直流电机及其控制。

(责任编辑 丁玉瑜)