

一种抑制无刷直流电机转矩脉动的调制方法

王少鹏, 张安堂, 王君力

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对无刷直流电机存在较严重的转矩脉动问题, 提出在换相区采用三相绕组共同调制方法来减小换相转矩脉动; 在导通区, 采用滞环比较原理实现对电机转矩、磁链的跟踪控制, 从而消除非换相转矩脉动。在电机转矩与输入能量之间建立联系, 按照单周期控制思想, 使系统能够准确控制输入能量, 进而准确控制电机转矩。仿真和实验结果表明, 相比于传统的控制方法, 采用转矩脉动抑制方法, 在换相区和导通区内的电流和电磁转矩波形都更平稳。并且当电机转速变化时, 采用传统控制方法得到的电流和电磁转矩会产生波动; 而采用脉动抑制方法时, 电机转速变化对绕组电流的影响不大, 电机能够相对稳定地输出电磁转矩, 验证了文中理论分析的正确性和有效性。

关键词 无刷直流电机; 转矩脉动; 单周期控制; 三相共同调制; 直接转矩控制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.013

中图分类号 TM351 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)03-0073-06

A Modulation Method to Decrease Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors

WANG Shaopeng, ZHANG Antang, WANG Junli

(Air and Missile Defense College, Air force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problem that serious torque ripples exist in brushless DC motors (BLDCM), this paper proposes a three-phase cooperative modulation to eliminate the commutation torque ripple. During non-commutation, the paper proposes a direct torque control to eliminate torque ripple by adopting hysteresis comparison to follow-up control torque and flux linkage of BLDCM. The paper establishes a relationship between motors torque and input power. The method based on one cycle control enables the system to control input power accurately, even more control torque of BLDCM correctly. The simulated and experimental results show that the method of torque ripple suppression of current and electromagnetic torque waveform is smooth for a motor in speed changes compared with the traditional control method whose current and electromagnetic torque can produce fluctuations. When the torque ripple suppression method is used, the influence of motor speed changes on the influence of winding current is small. Motor electromagnetic torque can relatively stably output. The validity and corrective of the theoretical analysis are verified.

Key words: brushless DC motor; torque ripple; one cycle control; three-phase cooperative modulation; direct torque control

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61573374)

作者简介: 王少鹏(1992—), 男, 山西太原人, 硕士生, 主要从事电力电子与电力传动研究. E-mail: 13259463273@163.com

引用格式: 王少鹏, 张安堂, 王君力. 一种抑制无刷直流电机转矩脉动的调制方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(3): 73-78. WANG Shaopeng, ZHANG Antang, WANG Junli. A Modulation Method to Decrease Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motor [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(3): 73-78.

无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)作为一种机电一体化新型产品,具有效率高、控制简单、结构稳定、功率密度大等优点,在工业控制、航空航天等领域都得到了广泛的应用^[1-5]。当电机工作在两两导通方式时会产生转矩脉动问题,包括导通区转矩脉动和换相区转矩脉动,这一直以来都是制约其应用发展的重要因素。该问题主要是电机本体设计特点及其换相控制策略造成的,因此优化电机结构设计和控制方法以抑制电机转矩脉动成为众多学者研究的热点^[6-20]。

以往对无刷直流电机转矩脉动的研究多集中于抑制换相转矩脉动,事实上导通区的转矩脉动也不容忽视。本文同时考虑了电机的换相区转矩脉动和导通区转矩脉动,基于单周期控制的思想,通过间接能量法观测电机转矩,并对其实现准确控制。文中提出的控制方法实施简单,通用性强,对软件做调整即可,不需要变动硬件电路结构,理论上可以抑制无刷直流电机的转矩脉动。

1 无刷直流电机转矩脉动分析及抑制

1.1 无刷直流电机转矩脉动分析

图1为无刷直流电机等效电路图,根据图中标识,可得无刷直流电机的瞬时转矩表达式为:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (1)$$

式中: T_e 为电磁转矩; ω 为电机转子角速度。以 $ab \rightarrow ac$ 换相过程为例,在 ab 两相绕组导通区内,有 $i_a = -i_b = i$, $e_a = -e_b = e$, $i_c = 0$,代入式(1)得:

$$T_e = 2ei / \omega \quad (2)$$

式中的反电势 e 和绕组电流 i 在电机运行过程不能保持稳定,因此会带来一定的转矩脉动。

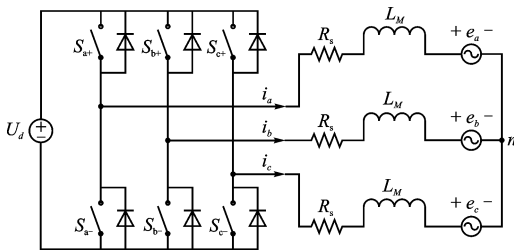


图1 无刷直流电机等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of BLDCM

在无刷直流电机换相区,由于换相时间短,近似认为反电势未发生变化,令 $e_a = -e_b = -e_c = E$,将 $i_a + i_b + i_c = 0$ 代入式(1)整理得:

$$T_e = 2Ei_a / \omega \quad (3)$$

由于电机自身绕组相电感的作用,关断相电流 i_b 与导通相电流 i_c 不能突变,并且关断相电流下降

斜率与开通相电流上升斜率不一定相等,导致非换相相电流 i_a 产生波动,使电机在换相区出现电磁转矩脉动。

1.2 无刷直流电机换相区转矩脉动抑制

在换相区,采用的PWM调制策略见图2,同时对三相绕组的开关管用不同的占空比进行调制。

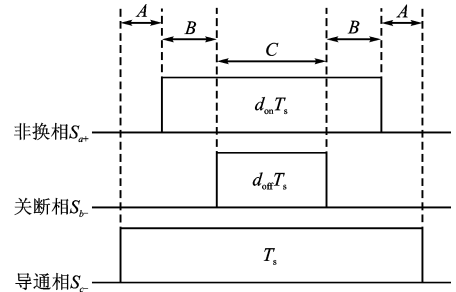


图2 一个周期内三相调制的实现

Fig. 2 Implementation of three-phase cooperative modulation within one cycle

图2中三相开关管占空比各不相同,且有 $d_{on} > d_{off}$,按照各功能区内开关管的导通关断情况,分别对电机工作在功能区A、B、C时的绕组电流进行分析。根据基尔霍夫定律可得:

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = D_A \begin{bmatrix} i'_{aA} \\ i'_{bA} \\ i'_{cA} \end{bmatrix} + D_B \begin{bmatrix} i'_{aB} \\ i'_{bB} \\ i'_{cB} \end{bmatrix} + D_C \begin{bmatrix} i'_{aC} \\ i'_{bC} \\ i'_{cC} \end{bmatrix} = \frac{U_d}{3L_M} \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 \\ -1 & -2 & 2 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{on} \\ d_{off} \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{1}{3L_M} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: i'_a 表示绕组电流 i_a 在一个PWM调制周期内的平均变化率, i'_{aA} 表示绕组电流 i_a 在功能区A内的变化率, $D_A = 1 - d_{on}$, $D_B = d_{on} - d_{off}$, $D_C = d_{off}$ 。分别表示功能区A、B、C的占空比。为抑制换相转矩脉动,令式(4)中 $i'_b = -i'_c$,可以得到:

$$2d_{on} + d_{off} = \frac{1 + (2e_a - e_b - e_c)}{U_d} \quad (5)$$

将 $e_a = -e_b = -e_c = E = \frac{d \cdot U_d}{2}$ 代入式(5),进一步得到:

$$2d_{on} + d_{off} = 1 + 2d \quad (6)$$

式中: d 为稳态工作时调制母线电压 U_d 的PWM占空比。

在换相区,按照式(7)对三相开关管 S_{a+} 、 S_{b-} 、 S_{c-} 进行调制,可以使导通相上升电流 i_c 与关断相下降电流 i_b 的变化情况一致,从而减小换相转矩脉动,其他换相过程与 $ab \rightarrow ac$ 的换相过程类似。因此,采用三相绕组配合调制的方法,理论上能够消除电机的换相转矩脉动。

1.3 无刷直流电机导通区转矩脉动抑制

如图3所示,电机正常工作在两两导通方式,按开关管导通与关断状态可以划分电压空间矢量为6个非零矢量、2个零矢量。根据三相逆变电路每隔60电角度切换一次工作状态,非零电压空间矢量可以构成一个放射式的正六边形,将360电角度分成6个扇区,磁链轨迹为圆形。

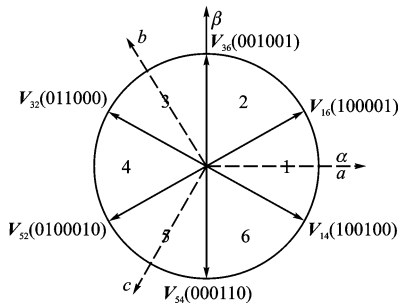


图3 电压空间矢量扇区图

Fig. 3 Voltage space vector diagram sector

图3给出了 α, β 两相静止坐标与三相坐标 a, b, c 之间的矢量关系,根据坐标变换公式可得:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{N_3}{N_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

按坐标变换前后功率考虑,将匝数比 $N_3/N_2 = \sqrt{2/3}$ 以及 $u_a + u_b + u_c = 0$ 代入式(8)得:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} & 0 \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} \quad (8)$$

电机的定子磁链是由电压空间矢量作用而成的,因此其移动方向、快慢由电压空间矢量的方向、幅值直接决定,调节电压空间矢量可以间接调节电磁转矩,控制电机旋转。电机在两相静止坐标系下的电压方程为:

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + p\psi_{s\alpha} \\ u_\beta = R_s i_\beta + p\psi_{s\beta} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ 分别表示静止坐标系下的定子磁链, p 表示微分算子。整理可进一步得:

$$\begin{cases} \psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \\ \theta = \arctan \frac{\psi_{s\alpha}}{\psi_{s\beta}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ψ_s 为定子磁链; θ 为定子磁链与 α 轴的夹角。

如图4所示,由 $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \theta$ 可以判断定子磁链 ψ_s 所在扇区,给定磁链容差范围 $\Delta\psi_s$,图中两实线表示磁链最值,虚线表示参考磁链值 ψ_s^* 。

当定子磁链不在磁链容差范围内时,可以通过电压空间矢量 $V_{16}(100001)$ 增大定子磁链、 $V_{32}(011000)$ 减小定子磁链、 $V_{36}(010001)$ 改变磁链方

向,从而实现对定子磁链的调节。

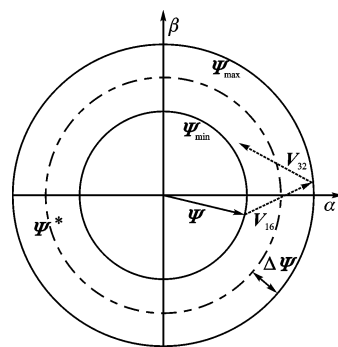


图4 定子磁链调节图

Fig. 4 Control of stator flux

由于电机的定子磁链与电机转矩直接相关,因此,调节磁链满足使用要求,相当于控制转矩满足要求。电机的电磁转矩见式(11):

$$T_e = k_T \psi_s \psi_r \sin\delta \quad (11)$$

式中: k_T 表示电磁转矩系数; ψ_r 表示转子磁链, δ 表示定、转子磁通角。无刷直流电机转子磁链由永磁体产生,电机在稳定运行过程中其值近似不变,故实现电机转矩控制最有效的方法是调节定子磁链,通过非零电压矢量和零电压矢量的共同作用使转矩满足实际需求。

分别采用滞环比较的方法实现对电机转矩以及磁链的控制。其中,转矩控制选用二值迟滞比较器,即当参考转矩与实际转矩偏差小于 $-\Delta T$ 时,比较器输出为0,表示转矩减小;当转矩偏差大于 ΔT 时,比较器输出为1,表示转矩增加。磁链选用三值迟滞比较器,即当参考磁链与实际磁链偏差小于 $-\Delta\psi$ 时,比较器输出为-1,表示磁链减小;当参考磁链与实际磁链偏差大于 $\Delta\psi$ 时,比较输出为1,表示磁链增加;当磁链偏差在给定磁链容差范围 $\Delta\psi_s$ 内时,比较器输出为0,磁链保持不变。

表1为导通区电压空间矢量开关管状态。

表1 导通区开关管状态查询表

Tab. 1 Lookup table of switching devices states in the non-commutation phase

转矩	磁链	各扇区电压空间矢量开关状态					
$\Delta\tilde{T}$	$\Delta\tilde{\psi}$	1	2	3	4	5	6
1	1	V_{16}	V_{36}	V_{32}	V_{52}	V_{54}	V_{14}
	0	V_{36}	V_{32}	V_{52}	V_{54}	V_{14}	V_{16}
	-1	V_{32}	V_{52}	V_{54}	V_{14}	V_{16}	V_{36}
0	1	V_{16}	V_{36}	V_{32}	V_{52}	V_{54}	V_{14}
	0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	-1	V_{32}	V_{52}	V_{54}	V_{14}	V_{16}	V_{36}

令 $\Delta\tilde{T}, \Delta\tilde{\psi}$ 表示转矩、磁链滞环比较器的输出。电机工作时通过查询表1,进行转矩与磁链的调整。

2 无刷直流电机单周期控制转矩脉动的实现

如图5所示,单周期控制转矩脉动过程如下:电机运行过程中,根据其反馈的霍尔信号(转子位置信号以及电流信号等),经过控制策略选择模块判断电机当下处于导通区或是换相区,不同工作区选用不同的转矩脉动抑制方法。时钟模块发出信号触发RS触发器,利用所选择的控制方法,通过驱动模块驱动逆变电路开关管,使能量输入电机调速系统中。系统中利用可复位的积分器,对单周期内输入系统的能量与参考值相比较,利用单周期控制思想使输入能量达到参考值。如此,RS触发器输出反向,积分信号清零,进入下一个周期。

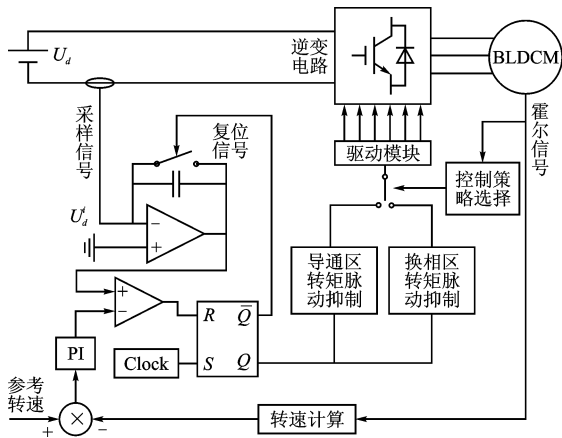


图5 BLDCM单周期控制转矩脉动系统

Fig. 5 One cycle control torque ripple system of BLDCM

在电机输入能量与转矩之间建立联系,使对单周期内输入系统的能量控制能够反映为对电机的转矩控制,对输入能量的准确控制,相当于对电机转矩的实时调节。系统中与输入能量比较的参考值是由外环转速PI调节得到,并且输入能量与转矩之间的关系可以通过此PI环节增益补偿。本文所提的控制方法算法简单,控制周期短,在DC/DC变换器领域已经得到验证并被广泛应用,实时性好,可以抑制转矩脉动^[20]。

3 仿真与实验验证

3.1 仿真实验

为验证本文提出理论的正确性,基于Matlab软件下的Simulink仿真工具,搭建了无刷直流电机的仿真模型,对无刷直流电机控制系统进行了仿真研究。仿真模型参数设置如下:定子相绕组自感与互感之差 $L_M=2\text{ mH}$,转动惯量 $J=0.004\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,阻尼系数 $B=0.0002\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$,负载转矩 $T_L=1$

$\text{N}\cdot\text{m}$,极对数 $p=4$,直流母线电压为 $U_d=380\text{ V}$ 。

图6、7表示在不同转速条件下,采用传统PI控制和本文提出的转矩脉动抑制方法绕组相电流波形,仿真时间0.5s,在0.2s时突加外界负载。

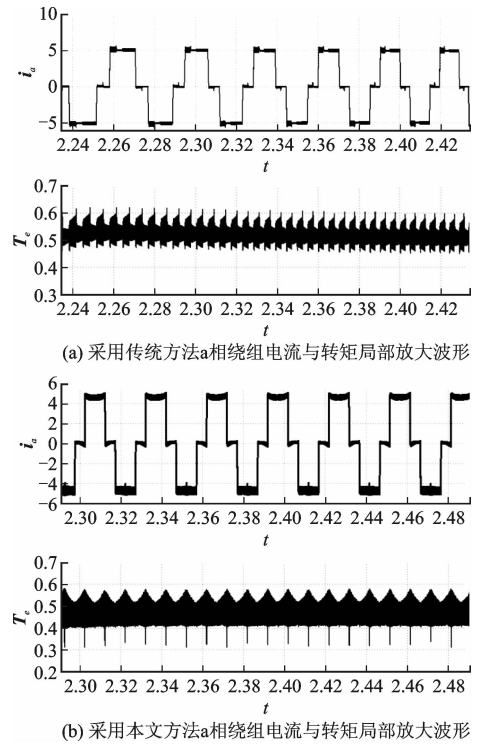


图6 $n=500\text{ r}/\text{min}$ 时电流与电磁转矩波形

Fig. 6 Current and electromagnetic torque waveform when $n=500\text{ r}/\text{min}$

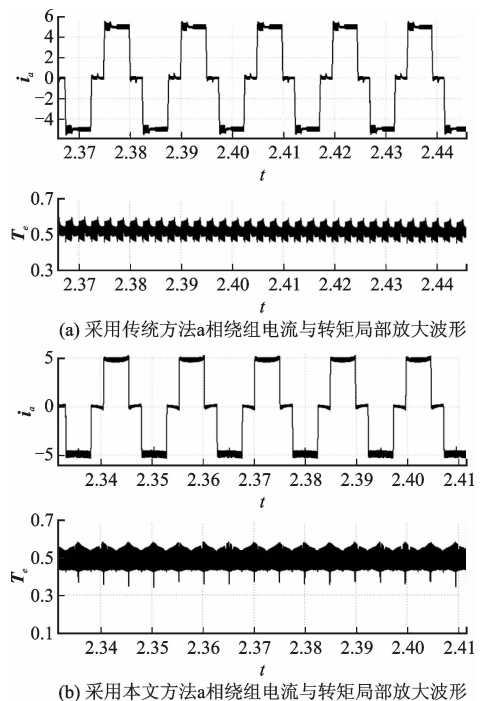


图7 $n=1000\text{ r}/\text{min}$ 时电流与电磁转矩波形

Fig. 7 Current and electromagnetic torque waveform when $n=1000\text{ r}/\text{min}$

通过对比图 6、7 中电流和转矩波形能够明显看出,不论是在换相区还是导通区,采用传统控制方法的电流脉动更剧烈,而采用本文提出方法的电流脉动几乎被抑制,即较好地抑制了电机转矩脉动。并且,转速变化对传统控制方法影响较大,而采用脉动抑制方法则能在不同的转速条件下相对稳定的输出电磁转矩。

3.2 实验验证

为对文中所提出的理论进行验证,以 DSP2812 为控制器构建了一个实验平台,见图 8,导轨上依次固定着无刷直流电机、磁粉制动器,其中磁粉制动器用于模拟外界负载,能够输出 $0\sim 1.0\text{ N}\cdot\text{m}$ 连续可调的转矩。积分器、比较器利用模拟器件搭建,相关参数设计参考仿真模型。

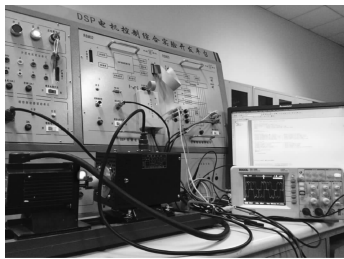


图 8 电机控制实验平台

Fig. 8 Motor control experimental platform

根据上文分析,采样绕组电流变化波形即可分析电机转矩脉动情况,但限于示波器采集通道的数量,实验中只对两相绕组电流采样分析,示波器窗口每格为 2.5 A ,见图 9、10。

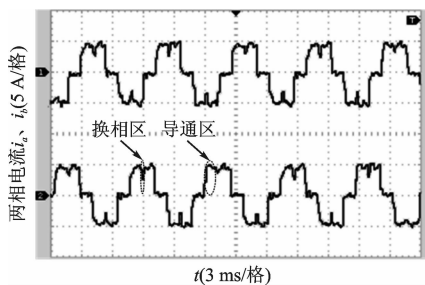


图 9 $n=1500\text{ r/min}$ 时采用传统方法电流波形

Fig. 9 Current waveforms with traditional method when $n=1500\text{ r/min}$

图 9 为电机转速 $n=1500\text{ r/min}$ 时,采用传统控制方法时获得的电流波形,通道 1、2 分别表示两相绕组电流。通过观察可以发现:无论在换相区还是在导通区,绕组电流都存在明显波动,意味着电机存在电磁转矩脉动。

图 10(a)~(c)分别为电机转速 $n=500\text{ r/min}$ 、 1000 r/min 、 1500 r/min 时采用本文提出的控制方法所获得的电流波形,通道 1、2 分别表示两相绕组电流。通过观察可以发现:在电机运行的整个过程

中,绕组电流一直比较平稳,基本不存在波动,表明采用本文设计的控制方法,可以有效减小电机在导通区以及换相区出现的转矩脉动,并且电机转速变化对转矩脉动抑制效果基本没有影响。实验结果与仿真结果一致,验证了单周期转矩脉动抑制方法的可靠性。

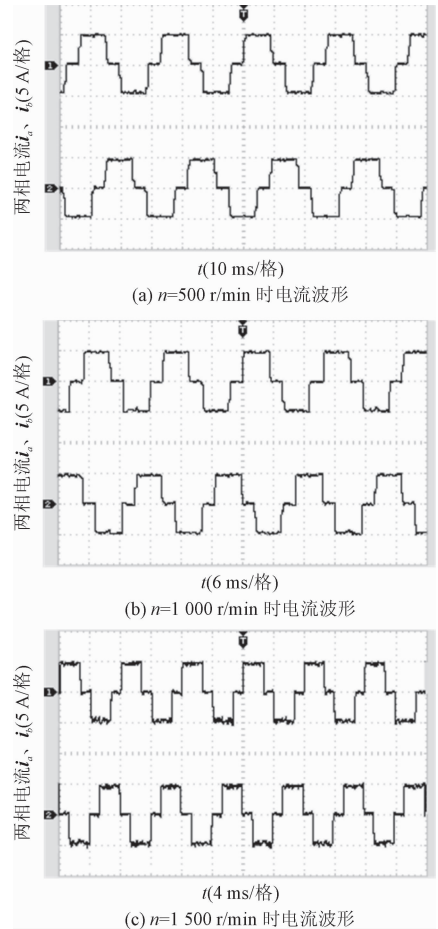


图 10 不同转速时采用脉动抑制方法两相电流波形

Fig. 10 Two phase current waveforms with ripple minimization method when speed is different

4 结语

本文对无刷直流电机的转矩脉动问题进行了分析,并提出在导通区采用基于电压空间矢量的直接转矩控制方法,在换相区采用三相绕组共同调制的方法,通过电机反馈的霍尔及电流信号判断工作区段、选择相应的控制策略,达到了减小电机转矩脉动的目的。文中建立了电机输入能量与转矩之间的联系,引入了单周期控制的思想,通过间接控制输入能量的大小,实现了对转矩的实时准确控制,抑制了电机转矩脉动仿真实验结果验证了文中理论分析的正确性,对实际产品的设计应用具有一定的参考价值。

参考文献(References):

- [1] NAM K Y, LEE W T, LEE C M, et al. Reducing torque ripple of brushless DC motor by varying input voltage [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1307-1310.
- [2] ZHANG X F, LU Z Y. A New BLDC Moto Drives Method Based on Buck Converter for Torque Ripple Reduction [C] // Proceedings of the 5th Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai, China, 2006: 1-4.
- [3] LEE K W, KIM D K, KIM T D, et al. Commutation Torque Ripple Reduction in a Position Sensorless Brushless DC Motor Drive [C] // Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany, 2004: 1419-1423.
- [4] LUO Y, LI H, SHEN M Y. Speed Control of BLDCM for Industrial Sewing Machine Based on dSPACE [C] // Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang, China, 2006: 2127-2132.
- [5] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25-34.
XIA C L, FANG H W. Permanent-Magnet Brushless DC Motor and Its Control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 25-34. (in Chinese)
- [6] LEE Hyung Woo, KIM Tae Hyung, MEHRDAD Ehsani. Practical Control for Improving Power Density and Efficiency of the BLDC Generator [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 192-199.
- [7] 陈基锋, 张晓峰. 基于能量单元法的无刷直流电机导通区转矩脉动 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 36-41.
CHEN J F, ZHANG X F. Conduction Torque Ripple in BLDCM Based on Energy Unit Method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 36-41. (in Chinese)
- [8] 孙冠群, 蔡慧. 无刷直流电动机转矩脉动抑制 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(11): 51-58.
SUN G Q, CAI H. Torque ripple reduction in brushless DC motor [J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(11): 51-58. (in Chinese)
- [9] CARLSON R, LAJOIE M M, FAGUNDES J C. Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3): 632-638.
- [10] 李珍国, 周生海. 无刷直流电动机双闭环调速系统的转矩脉动抑制研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 156-163.
LI Z G, ZHOU H S. The Research on the Brushless DC Motor Double-loop Speed Control System for Torque Ripple Reduction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 156-163. (in Chinese)
- [11] SONG J H, ICK C. Commutation Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motor Drives Using a Single DC Current Sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 312-319.
- [12] 周美兰, 高肇明. 五种 PWM 方式对直流无刷电机系统换相转矩脉动的影响 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 15-21.
ZHOU M L, GAO Z M. Influence of Five Kinds of PWM on Commutation Torque Ripples in BLDCM Control System [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 15-21. (in Chinese)
- [13] 陈基锋, 张晓峰. 基于统一式的无刷直流电动机换相转矩脉动抑制新策略 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 51-56.
CHEN J F, ZHANG X F. A Novel Strategy to Suppress Commutation Torque Ripple in Brushless DC Motor Based on Unitive Formula [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 51-56. (in Chinese)
- [14] 王大方, 卜德明. 一种减小无刷直流电机换相转矩脉动的调制方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 160-166.
WANG D F, BU D M. A Modulation Method to Decrease Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 160-166. (in Chinese)
- [15] 杨龙, 朱俊杰. 无位置传感器 BLDCM 换相转矩脉动抑制的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1285-1292.
YANG L, ZHU J J. Study on Commutation Torque Ripple Suppression in BLDCM Without Position [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1285-1292. (in Chinese)
- [16] LIU Y, ZHU Z Q, DAVID Howe. Direct Torque Control of Brushless DC Drives with Reduced Torque Ripple [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 599-608.
- [17] LIU Y, ZHU Z Q, DAVID Howe. Commutation-Torque-Ripple Minimization in Direct-Torque-Controlled PM Brushless DC Drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 1012-1021.
- [18] 李珍国, 章松发. 考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 139-146.
LI Z G, ZHANG S F. Direct Torque Control of Brushless DC Motor Considering Torque Ripple Minimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 139-146. (in Chinese)
- [19] BOUKAIS B, ZEROUG H. Magnet Segmentation for Commutation Torque Ripple Reduction in a Brushless DC Motor Drive [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(11): 3909-3919.
- [20] 王智, 方炜. 数字控制的单周期 PFC 整流器的设计与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3423-3431.
WANG Z, FANG W. Design and Analysis of Digitally Controlled High Power Factor Rectifiers Based on One-cycle Control [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3423-3431. (in Chinese)