

# 基于零矢量的无刷直流电机直接转矩控制 转矩脉动抑制方法研究

曹 伟<sup>1,2,3</sup>, 胡敏强<sup>2</sup>, 杨建飞<sup>1,2,3</sup>, 邱 鑫<sup>1,2,3</sup>, 郭 勇<sup>1,2,3</sup>

(1. 南京师范大学常州创新发展研究院, 江苏 常州 213022)

(2. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210042)

(3. 南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 分析了无刷直流电机直接转矩控制系统在不同零电压矢量作用下电机电流、转矩变化规律, 根据转矩控制要求, 提出了适用于无刷直流电机直接转矩控制系统的零矢量和占空比相结合的转矩控制方法, 实现对转矩脉动的有效抑制。仿真结果验证了理论分析的正确性和所提方法的可行性。

[关键词] 无刷直流电机, 直接转矩控制, 零电压矢量, 占空比控制, 转矩脉动

[中图分类号] TM351 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)02-0001-08

## Research on Torque Ripple Reduction in Direct Torque Control of Brushless DC Motor Based on Zero Voltage Vector

Cao Wei<sup>1,2,3</sup>, Hu Minqiang<sup>2</sup>, Yang Jianfei<sup>1,2,3</sup>, Qiu Xin<sup>1,2,3</sup>, Guo Yong<sup>1,2,3</sup>

(1. Changzhou Institute of Innovation and Development, Nanjing Normal University, Changzhou 213022, China)

(2. School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(3. Jiangsu Key Laboratory 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, the law of current and torque of brushless DC motor (BLDCM) under different zero voltage vector are analyzed. According to the requirements of torque control, a direct torque control (DTC) method of zero voltage vector combined with duty cycle control is proposed. The torque ripple is effectively suppressed. The simulation results verify the correctness of the theoretical analysis and the feasibility of the proposed method.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM), direct torque control (DTC), zero voltage vector, duty cycle control, torque ripple

无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDCM) 由于结构简单、功率密度大、效率高、调速性能好等优点, 在工业、交通等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。BLDCM 直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 以电磁转矩为直接控制目标, 这种方法不依赖于电机参数、转矩动态响应快, 因此具有较高的研究价值<sup>[2-7]</sup>。在 BLDCM DTC 系统中, 由于在一个控制周期内只发一个电压矢量导致电机的转矩脉动比较大, 而在引入零电压矢量后则能显著降低转矩脉动, 因此, 如何定义合适的零电压矢量就成为需要解决的一个关键问题<sup>[8-10]</sup>。文献[8]首次提出将 DTC 系统中逆变器开关管全关断, 对应的电压矢量为零矢量。但对于两相导通 BLDCM 而言, 全关断电压矢量的作用相当于反矢量, 仍然会带来较大的转矩脉动。文献[9]提出了适用于两相导通 BLDCM 的零矢量, 很多学者在此后的研究中也采用这种零矢量的定义方法, 但是文献[9]中没有具体分析不同零矢量对电流和转矩产生的影响。文献[10]对不同零矢量作用下的 DTC 系统进行分析研究, 提出了新的零电压矢量。文献[11]采用占空比控制来降低转矩脉动, 取得了一定的效果, 但是占空比的计算方法是基于理想的运行状况, 没有考虑现实中反电势并非是理想的梯形波等因素。

收稿日期: 2018-03-06。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51407095)、江苏省自然科学基金(BK20151548)、江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016001-01)、江苏省“六大人才高峰”项目(GDZB-043)、校“青蓝工程”项目、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18\_1223)。

通讯联系人: 杨建飞, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 电机控制、三维打印。E-mail: yjfsmile@njnu.edu.cn

本文对不同零电压矢量作用下 BLDCM 的转矩变化进行分析,得到对减小转矩脉动效果最好的零矢量组合方式. 针对传统 DTC 系统中一个控制周期只发一个电压矢量的问题,提出了将该新零矢量与占空比控制相结合的 DTC 系统,以实现对转矩脉动的进一步抑制. 通过仿真验证新的零矢量的正确性以及所提 DTC 系统降低转矩脉动的有效性.

## 1 BLDCM DTC 系统

### 1.1 纯转矩环 DTC 方法

BLDCM 与电压型逆变器等效电路图如图 1 所示. 其中,  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为三相定子相电压.  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为定子三相相电流.  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为定子三相相反电势.  $R$ 、 $L$  为定子每相电阻与等效电感.  $U_{dc}$  为直流母线电压, VT 为开关管.

由于 BLDCM 的气隙磁场、反电势以及稳态电流均为非正弦波,因此常用电机的相变量来建立其模型,其电压方程如下

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

电磁转矩方程如下

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \Omega_r. \quad (2)$$

式中,  $\Omega_r$  为转子机械角速度,  $T_e$  为电机转矩.

在纯转矩环 DTC 系统中,控制系统根据电机转子位置所处的扇区同时结合转矩控制要求,选择合适的电压矢量作用于电机,以实现对转矩的直接控制. 由于电机运行过程中同一时刻仅有两相导通,结合图 1 可以得到导通相相电压合成矢量分布,如图 2 所示.

图 2 中  $\alpha\beta$  坐标系被 6 个运动电压矢量均匀分成 I 到 VI 6 个扇区,每个扇区占  $60^\circ$  电角度. 以  $V_1$  矢量为例,其从左至右的二进制数值分别表示图 1 中对应的 VT<sub>1</sub>—VT<sub>6</sub> 开关管的状态,“1”表示导通,“0”表示关断.

### 1.2 BLDCM 电压矢量选择

在电机调速系统中,零矢量是指使电机内部综合电压矢量为零的矢量. 对于两相导通的 BLDCM 而言,由于其存在关断相,零矢量的定义要显著区别于传统的三相导通电机. 本文借鉴了文献[12]中提出的基于导通相的零矢量定义方法,即要控制电机两导通相的端点短路. 以图 3(a)所示的导通情况为例,此时导通的开关管是 VT<sub>1</sub> 和 VT<sub>4</sub>. 在此条件下使 A、B 两相端点短路的方式有两种:导通相通过上桥臂开关管 VT<sub>1</sub>、VT<sub>3</sub> 或者通过下桥臂开关管 VT<sub>2</sub>、VT<sub>4</sub> 导通短路,对应的零电压矢量分别为 (1, 0, 1, 0, 0, 0) 和 (0, 1, 0, 1, 0, 0). 相应的等效电路分别如图 3(b) 和图 3(c) 所示.

当选择其他电压矢量作用时,可依此确定相应的零电压矢量. 将所选择的电压矢量和与之相对应的零电压矢量整理如表 1 所示.

表 1 BLDCM DTC 的零电压矢量  
Table 1 Zero voltage vector of DTC for BLDCM

电压矢量	$V_2(1,0,0,1,0,0)$	$V_3(1,0,0,0,0,1)$	$V_4(0,0,1,0,0,1)$	$V_5(0,1,1,0,0,0)$	$V_6(0,1,0,0,1,0)$	$V_1(0,0,0,1,1,0)$
零矢量 1	$V_{71}(1,0,1,0,0,0)$	$V_{72}(1,0,0,0,1,0)$	$V_{73}(0,0,1,0,1,0)$	$V_{71}(1,0,1,0,0,0)$	$V_{72}(1,0,0,0,1,0)$	$V_{73}(0,0,1,0,1,0)$
零矢量 2	$V_{01}(0,1,0,1,0,0)$	$V_{02}(0,1,0,0,0,1)$	$V_{03}(0,0,0,1,0,1)$	$V_{01}(0,1,0,1,0,0)$	$V_{02}(0,1,0,0,0,1)$	$V_{03}(0,0,0,1,0,1)$

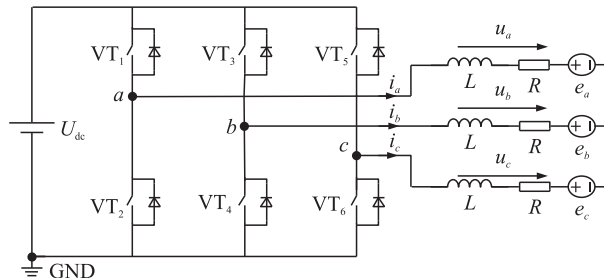


图 1 BLDCM 与逆变器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of BLDCM and inverter

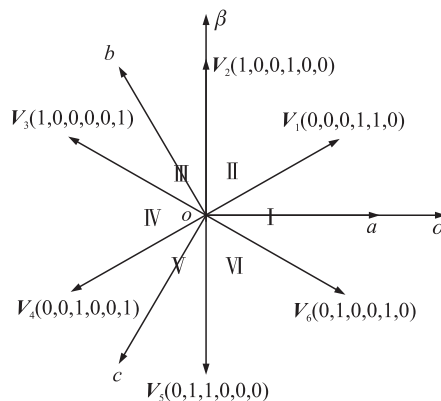


图 2 BLDCM 空间电压矢量

Fig. 2 Space voltage vector of BLDCM

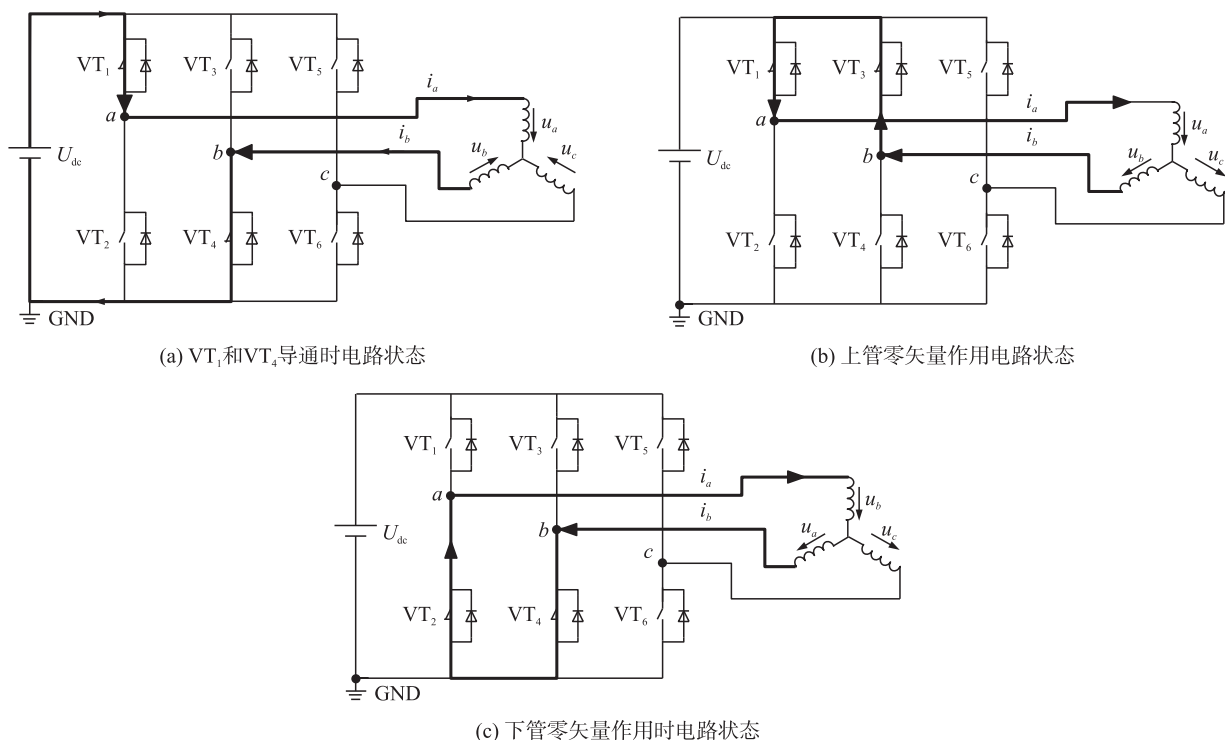


图3 不同导通状态下的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram in different conduction state

从表1可知,适用于两相导通 BLDCM DTC 系统的零矢量共有6个,用变量  $V_{xy}$  表示,下标  $x$  表示开关管导通情况,7表示上桥臂两个开关管开通,下桥臂两个开关管关断所对应的零矢量,0表示上桥臂两个开关管关断,下桥臂两个开关管开通所对应的零矢量. 下标  $y$  表示对应的扇区,由于IV、V、VI扇区和I、II、III扇区的零矢量一样,因此共用I、II、III扇区的零矢量. 本文将6个非零电压矢量  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_5$ 、 $V_6$  和6个零矢量  $V_{71}$ 、 $V_{72}$ 、 $V_{73}$ 、 $V_{01}$ 、 $V_{02}$ 、 $V_{03}$  定义为两相导通 BLDCM DTC 系统中的电压矢量集合. 在传统两相导通 BLDCM DTC 单环系统中,根据表1选择合适的一组电压矢量和零矢量,比较两组零矢量的作用效果.

考虑到在每次电压矢量作用的导通时刻有两个零矢量可选择,无论是上二管零矢量作用还是下二管零矢量作用导通都能使电磁转矩减小,根据表1可制得上二管零矢量作用时的电压矢量表,如表2所示. 同理,当进行正/下二管零矢量作用的仿真时,将表1中零矢量2代入表2中  $\tau=0$  处.

考虑到关断相反电势的存在会使关断相发生续流二极管导通的现象,使转矩受到影响. 以图3(a)所示的导通情况为例,此时可选零矢量为(1,0,1,0,0,0)和(0,1,0,1,0,0),当选择上二管零矢量(1,0,1,0,0,0)作用时,如果关断相反电势  $e_c > 0$ ,则与  $VT_5$  管并联的续流二极管导通,有负向电流流过,转矩受到影响. 选择下二管零矢量(0,1,0,1,0,0)作用时,  $e_c < 0$ ,与  $VT_5$  管并联的续流二极管关断,关断相没有电流流过. 结合反电势的变化,得到如表3所示的12扇区零矢量与运动电压矢量选择表.

表2 BLDCM DTC 上二管零矢量作用电压矢量表

Table 2 Upper zero voltage vector of DTC switch table for BLDCM

$\tau$	扇区					
	1	2	3	4	5	6
1	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
0	$V_{71}$	$V_{72}$	$V_{73}$	$V_{71}$	$V_{72}$	$V_{73}$

注:  $\tau$  为转矩控制标志,1表示增加转矩,0表示减小转矩.

表3 BLDCM 最优空间电压矢量选择表

Table 3 Optimal voltage space vector selection table for BLDCM

$\tau$	扇区											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	$V_{01}$	$V_{71}$	$V_{71}$	$V_{02}$	$V_{02}$	$V_{72}$	$V_{72}$	$V_{03}$	$V_{03}$	$V_{73}$	$V_{73}$	$V_{01}$
1	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$	$V_1$

注:  $\tau$  为转矩控制标志,1表示增加转矩,0表示减小转矩.

### 1.3 零矢量结合占空比控制方式下的 DTC 技术

为了解决一个控制周期发送一个电压矢量所造成的单个控制周期内转矩不可控的问题,本文提出了零矢量结合占空比调制的 DTC 技术,将传统的一个控制周期发一个电压矢量,变为在一个控制周期内按一定的占空比发送运动电压矢量和零矢量,结构框图如图4所示.





量作用,关断相都会在换相时刻产生电流脉动,从而对转矩造成影响.从图5中的 $a$ 区域中可知,导通相为 $b$ 和 $c$ ,电流由 $c$ 相流入 $b$ 相流出,此时选择的电压矢量是 $V_1$ ,电磁转矩增大,而减小转矩选用零矢量 $V_{73}$ ,由于反电势在电压矢量 $V_1/V_{73}$ 作用的整个导通区间存在 $e_a > 0$ 的时刻,所以导致与 $VT_1$ 管并联的续流二极管导通,产生电流脉动,导致有较大的转矩脉动.

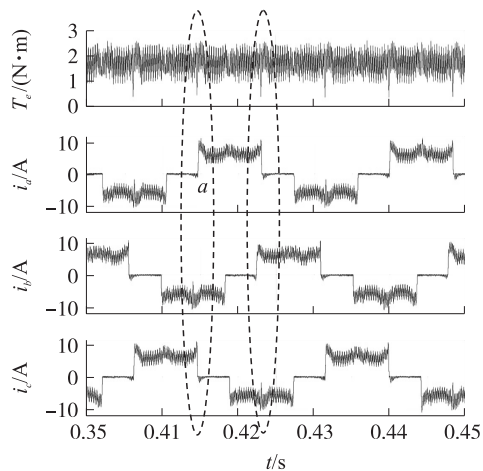


图5 正/上二管零矢量作用的转矩和电流波形图

Fig. 5 Torque and current waveforms under positive and upper zero voltage vector

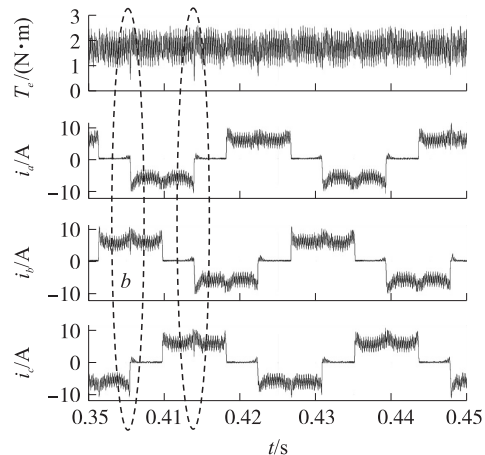


图6 正/下二管零矢量作用的转矩和电流波形图

Fig. 6 Torque and current waveforms under positive and lower zero voltage vector

同理,从图6中 $b$ 区域可知,此时 $b$ 与 $c$ 相导通, $a$ 相关断,选择的电压矢量是 $V_4$ ,转矩增大.当 $\tau = 0$ 时,选择零矢量 $V_{03}$ 减小电磁转矩,根据端电压方程可知,此时中性点电压为0.当关断相反电势出现 $e_a < 0$ 时,与 $VT_2$ 管反向并联的二极管导通,有电流流过,使得 $a$ 与 $c$ 相两端电压变为零,电磁转矩也因为续流二极管的导通产生了较大的脉动.

为了进一步验证正/12扇区零矢量的正确性,在同样的仿真条件下对正/12扇区零矢量作用后的电流和转矩进行分析,对比与正/上二管、下二管零矢量作用的效果.

从图5、图7可知,正/12扇区零矢量作用时转矩脉动明显的比正/上二管零矢量作用时更小,而关断相电流在换相时刻发生的续流现象也明显的改善了.说明正/12扇区零矢量解决了电机在运行时候二极管发生续流的现象,从而使得电磁转矩的脉动更小.从图5中 $a$ 区域可知,此刻导通相为 $b$ 相和 $c$ 相,电流由 $c$ 相流入 $b$ 相流出,当关断相发生换相的时刻转矩并没有发生较大的脉动.

对比图5和图7中 $a$ 区域,以导通相为 $b$ 和 $c$ ,电流由 $c$ 相流入 $b$ 相流出为例,在图5中,关断相 $a$ 相电流产生续流,且电流脉动比非换相时刻较大.相反,图7中 $c$ 区域关断相电流在换相时刻的电流脉动明显的不见了,从而验证了正/12扇区零矢量作用阻断了续流电流通过二极管.而图中电磁转矩的变化情况也具有类似的现象,图5中转矩脉动在关断相电流发生续流的时刻其波形幅值比非换相时刻大,而图7中 $c$ 区域转矩脉动显然不存在这种情况.因此,关断相在换相时刻有较大转矩脉动幅值就是来源于续流二极管的导通,导致有电流流过,从而造成对转矩的影响.

同理,从图6和图7中 $d$ 区域可知,此时导通相是 $b$ 和 $c$ ,电流从 $b$ 相流入 $c$ 相流出,从图7中可以看到关断相电流在导通的时刻有较大的电流脉动,而图7中 $d$ 区域却不存在电流脉动的现象,说明了正/下二管零矢量作用时续流二极管导通的现象在正/12扇区零矢量中得到解决.从两图中的转矩脉动幅值波形也可以再次证明理论分析的正确性.

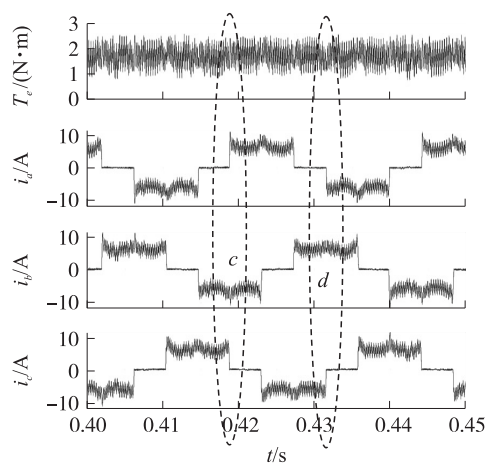


图7 正/12扇区零矢量作用的转矩和电流波形图

Fig. 7 Torque and current waveforms under positive and 12 sectors zero voltage vector

## 2.2 零矢量结合占空比控制方式下的 DTC 系统

在所提的 DTC 系统中正矢量和零矢量不再是作用于整个控制周期,而是在单个控制周期内,根据占空比的值分配正矢量和零矢量的作用时间. 上文已经验证了正/12 扇区零矢量开关表对转矩脉动的减小作用,本节选择表 3 的开关表,其他仿真条件与传统方式下一致.

如图 8 所示为所提 DTC 方式下的电流波形. 从波形可以看出在导通阶段,图 8 中电流的波动约为 4.1 A,电流的最大值约为 8.6 A,最小值约为 4.5 A. 如图 9 所示为正/12 扇区零矢量作用下传统 DTC 方式得到的电流波形图. 图 9 中电流波动约为 8.6 A,电流的最大值约为 11.2 A,电流的最小值约为 2.6 A. 通过分析可以得出,电流的变化率明显降低,转矩脉动能够得到有效抑制.

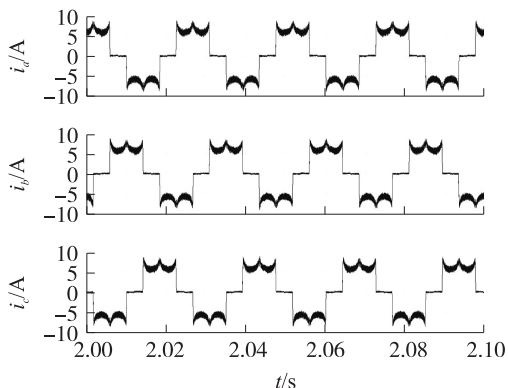


图 8 所提 DTC 方式下的电流波形图

Fig. 8 The current waveform under the mentioned mode

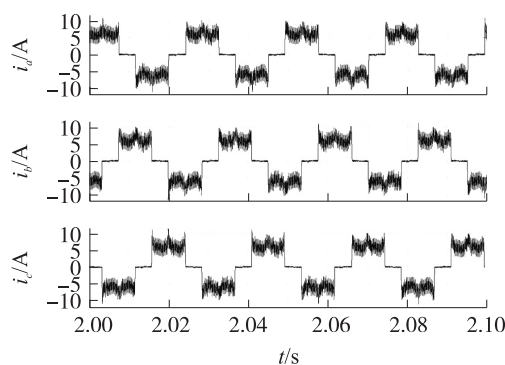
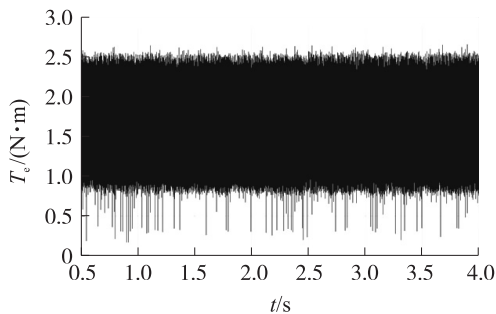


图 9 正/12 扇区零矢量作用下传统 DTC 方式得到的电流波形图

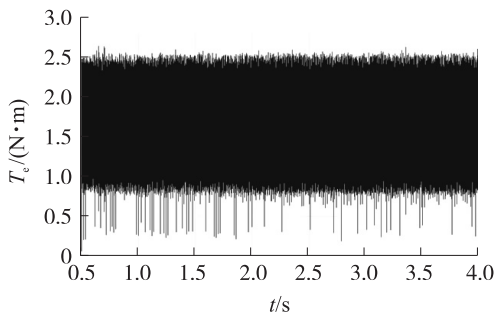
Fig. 9 Current waveforms under positive and twelve sectors zero voltage vector in traditional DTC

## 2.3 不同控制方法下转矩对比

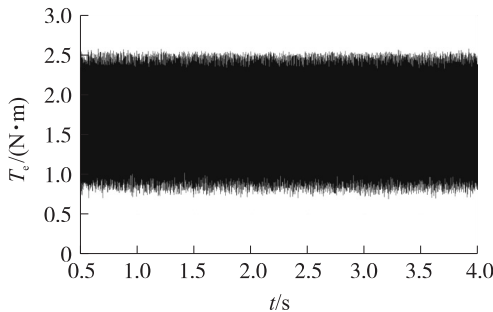
进一步分析传统 DTC 方式下 3 种不同零矢量作用时的转矩脉动的波形,从而证明对转矩造成的影响,转矩波形如图 10 所示.



(a) 正/上二管零矢量作用转矩波形



(b) 正/下二管零矢量作用转矩波形



(c) 正/12扇区零矢量作用转矩波形

图 10 传统 DTC 下不同零矢量作用时的转矩波形

Fig. 10 Torque waveform under different zero voltage vector in traditional DTC

图 10 中,图 10(a)的转矩脉动为  $2.48 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,图 10(b)的转矩脉动为  $2.46 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,而图 10(c)的转矩脉动稳定在  $1.88 \text{ N}\cdot\text{m}$  左右,相比较于图 10(a)和 10(b),图 10(c)的转矩脉动更小,说明采用改进后的正/12 扇区零矢量的控制方法可以避免关断相续流二极管导通,从而减小转矩脉动。

零矢量结合占空比控制的 DTC 下得到的转矩波形如图 11 所示,转矩脉动约为  $0.68 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,比图 10(c)传统 DTC 得到的  $1.88 \text{ N}\cdot\text{m}$  的转矩脉动明显减小。仿真结果表明经过所提 DTC 方法可以有效降低转矩脉动。

### 3 结语

针对 BLDCM DTC 转矩脉动较大的问题,本文重新定义了 DTC 的开关矢量选择表,分析得到了 12 扇区零矢量能减小甚至消除关断相续流二极管导通引起的转矩脉动。同时结合了占空比调制的方法,提出了零矢量结合占空比控制的 DTC 方法,进一步实现对转矩脉动的抑制。仿真结果验证了理论分析的正确性以及 12 扇区零矢量结合占空比控制的 DTC 方法对转矩脉动的有效抑制,有助于对 BLDCM DTC 系统的进一步研究完善。

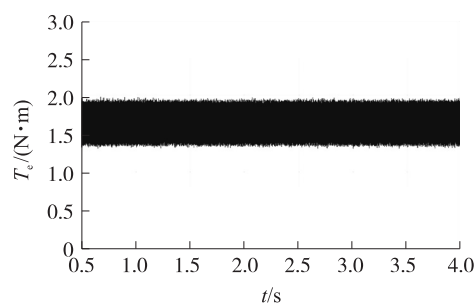


图 11 零矢量结合占空比控制的 DTC 方式下的转矩波形图  
Fig. 11 Torque waveform under zero voltage vector combined with duty cycle control of the DTC

### [参考文献] (References)

- [1] KENJO T, NAGAMORI S. Brushless motors: advanced theory and modern applications [M]. Tokyo: Sogo Electronics Press, 2003.
- [2] 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 drives and controls[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(3): 25-34. (in Chinese)
- [3] GAO J, HU Y W. Direct self-control for BLDC motor drives based on three-dimensional coordinate system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, 57(8): 2836-2844.
- [4] 安群涛,孙立志,刘超,等. 无刷直流电机的磁链自控直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 86-92.  
AN Q T, SUN L Z, LIU C, et al. Flux linkage self-control based direct torque control of brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 86-92. (in Chinese)
- [5] 夏鲲,朱琳玲,曾彦能,等. 基于准 Z 源网络的永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 971-978.  
XIA K, ZHU L L, ZENG Y N, et al. Researches on the method of suppressing commutation torque ripple for brushless DC motors based on a quasi-Z-source net[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 971-978. (in Chinese)
- [6] 王大方,卜德明,朱成,等. 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, ZHU C, et al. 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)
- [7] 姜卫东,廖玉茗,王培侠,等. 减小无刷直流电机换相转矩波动和换相时间的协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2120-2131.  
JIANG W D, LIAO Y M, WANG P X, et al. A corperative control method to reduce commutation torque ripple and commutation time for brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2120-2131. (in Chinese)
- [8] LIU Y, ZHU Z Q, HOWE D. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple[J]. IEEE transaction on industry applications, 2005, 41(2): 599-608.
- [9] LIU Y, ZHU Z Q, HOWE D. Commutation-torque-ripple minimization in direct-torque-controlled PM brushless DC drives[J]. IEEE transactions on industry applications, 2007, 43(4): 1012-1021.
- [10] 杨建飞,胡育文,刘建,等. 无刷直流电动机直接转矩控制零矢量分析研究[J]. 微特电机, 2015, 43(10): 5-8, 11.

- YANG J F, HU Y W, LIU J, et al. Study on zero voltage vector in direct torque control of brushless DC motor[J]. Small and special electrical machines, 2015, 43(10): 5-8, 11. (in Chinese)
- [11] 李珍国, 章松发, 周生海, 等. 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, ZHOU S H, et al. Direct torque control of brushless DC motor considering torque ripple minimization[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29(1): 139-146. (in Chinese)
- [12] 胡育文, 高瑾, 杨建飞, 等. 永磁同步电动机直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- HU Y W, GAO J, YANG J F, et al. Direct torque control system for permanent magnet synchronous motor[M]. Beijing: China Mechine Press, 2015. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]