

基于零矢量的 BLDCM DTC 换相转矩脉动抑制方法

郭 勇, 杨建飞, 邱 鑫, 曹 伟

(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 210042)

[摘要] 无刷直流电机直接转矩控制由于反电势非正弦以及两相导通模式, 产生较大的换相转矩脉动. 本文提出一种优化的无刷直流电机直接转矩控制电压矢量选择表, 有效降低了换相转矩脉动幅值. 通过数学推导对新定义的不同零电压矢量在换相过程所产生的换相转矩脉动进行对比分析. 结果显示, 通过上管和下管零矢量的组合使用, 换相转矩脉动可以得到有效抑制. 仿真及实验结果验证了理论分析的正确性.

[关键词] 无刷直流电机, 直接转矩控制, 零电压矢量, 换相转矩脉动

[中图分类号] TM351 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)04-0025-07

Study of Commutation Torque Ripple Reduction of BLDCM DTC Based on Zero Voltage Vectors

Guo Yong, Yang Jianfei, Qiu Xin, Cao Wei

(Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Brushless DC motors have the problem of high torque ripple in direct torque control system because of the non-sinusoidal back EMF and two-phase conduction mode. Aiming at reducing the torque ripple in DTC system of BLDCM, the paper proposes an optimized voltage vector selection table. The commutation torque ripple of the different new zero voltage vectors are analyzed and compared by formula deduction. The result shows the commutation torque ripple is effectively suppressed through the combination between upper and lower zero voltage vectors. The simulation and experiment verifies the theoretical analysis.

Key words: brushless DC motor, direct torque control, zero voltage vectors, commutation torque ripple

无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDCM) 由于其结构简单, 控制方便, 效率高等特点^[1], 在各领域得到广泛的应用. 然而由于其特殊结构导致在控制过程中的转矩脉动较大, 限制了其在各领域的进一步拓展^[2]. 因此, BLDCM 直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 的转矩脉动抑制是 BLDCM 研究的热点问题. DTC 是 BLDCM 控制中备受瞩目的控制方式, 通过直接以转矩作为控制目标, 文献[3]提出通过合理选择六个电压矢量以及零矢量的方案作用在电机上, 可以实现电机的快速控制, 该组电压矢量构成了传统 BLDCM DTC 的矢量体系, 但是由于 BLDCM 反电势以及驱动电流的非正弦特性, 导致转矩脉动较大. 随着研究的深入, 基于现有的 BLDCM 电压矢量选择表的不足, 众多学者提出了各种降低转矩脉动的方案^[4-9]. 文献[10]提出了一种新的零矢量的构造方法, 重新构造了 BLDCM DTC 电压矢量体系, 并通过仿真实验验证其降低转矩脉动的优良特性.

本文基于原有的传统 BLDCM DTC 中的零电压矢量 (zero voltage vectors, ZVVs), 通过重新构造简化 ZVVs, 并通过理论分析, 对采用非 ZVVs 与各种不同零矢量配合情况下产生的换相转矩脉动进行量化分析, 提出一种新的 ZVVs 的选择方式, 并通过仿真和实验验证该新电压矢量表对换相转矩脉动的抑制效果.

收稿日期: 2017-06-16.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (51407095, 51607094, 61601228)、江苏省自然科学基金 (BK20151548, BK20161021).

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

1 无刷直流电机零电压矢量

在电机调速系统中,对零矢量的定义是指电机内部综合电压矢量为零,这就意味着电机导通相的端点短路,与换向器的状态无本质联系.在两相导通 BLDCM DTC 研究初期,一般认为零矢量为逆变器功率管全部关断状态,即 $V_0(0,0,0,0,0,0)$,然而,在实验过程中仍具有较大的转矩脉动.如图 1 所示为电机等效电路图,通过对电子换向电路的分析发现,当施加 V_0 时并没有得到所定义的零矢量,即三相绕组短路,而是通过续流二极管续流,得到了该扇区原导通相的相电压合成矢量的反矢量.

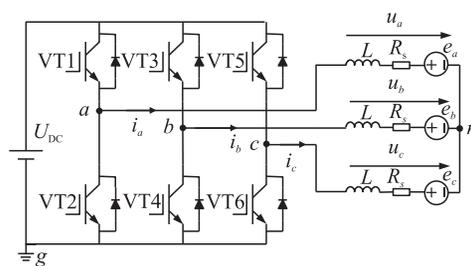


图 1 BLDCM 与逆变器等效电路图
Fig. 1 Equivalent circuit of BLDCM and inverter

针对这种情况,本文根据异步电机,永磁同步电机中利用上管全通或下管全通构造零矢量的方法,提出了 BLDCM 零矢量的产生方法.由于 BLDCM 控制两相导通的特点,发现同一扇区内两相导通方式下均存在两种定义的新零矢量,即上二管零矢量和下二管零矢量,以第六扇区施加 V_1 矢量为例,形成零矢量 $V(1,0,0,0,1,0)$ 、 $V(0,1,0,0,0,1)$,所以使用矢量 V_{xy} 表示新定义的零矢量,其中下标 x 表示逆变器功率管导通状态:7 表示上面的两个功率管导通,其余均关断,0 表示下面的两个功率管导通,其余均关断.下标 y 表示扇区.对各个扇区分析可知,在第 4、5、6 扇区内使用的新定义零矢量与第 1、2、3 扇区的相同,因此统一采用第 1、2、3 扇区内的新定义的零矢量,如表 1 所示.本文把导通相电压合成电压矢量 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 、 V_6 ,这 6 个非零矢量和 6 个新定义的零矢量 V_{01} 、 V_{02} 、 V_{03} 、 V_{71} 、 V_{72} 、 V_{73} 的集合称为两相导通 BLDCM DTC 系统的电压矢量.

表 1 BLDCM DTC 新 ZVVs
Table 1 New ZVVs of DTC for BLDCM

| | | 扇区 | | | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| | | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 |
| 零矢量 1 | $V_{71}(0,0,0,1,0,1)$ | $V_{72}(1,0,1,0,0,0)$ | $V_{73}(1,0,0,0,1,0)$ | $V_{71}(0,0,1,0,1,0)$ | $V_{72}(1,0,1,0,0,0)$ | $V_{73}(1,0,0,0,1,0)$ | |
| 零矢量 2 | $V_{01}(0,0,0,1,0,1)$ | $V_{02}(0,1,0,1,0,0)$ | $V_{03}(0,1,0,0,0,1)$ | $V_{01}(0,0,0,1,0,1)$ | $V_{02}(0,1,0,1,0,0)$ | $V_{03}(0,1,0,0,0,1)$ | |

进一步分析两种零矢量作用时电机等效电路图可知,无论选择哪种零矢量,电流流通过程总是包含了一个主功率开关管和一个续流二极管.因此,第六扇区施加的零矢量可进一步简化为 $V(1,0,0,0,0,0)$ 和 $V(0,0,0,1,0,0)$,以此得出的六个零矢量分别为 $V(1,0,0,0,0,0)$ 、 $V(0,1,0,0,0,0)$ 、 $V(0,0,1,0,0,0)$ 、 $V(0,0,0,1,0,0)$ 、 $V(0,0,0,0,1,0)$ 、 $V(0,0,0,0,0,1)$,与二管零矢量类似,简化过后的零矢量也可以按上下管续流方式分为上一管零矢量与下一管零矢量,利用简化过的零矢量与其他 6 个非 ZVVs 可以分别构成上一管电压矢量选择表与下一管电压矢量选择表,如表 2~3 所示.

表 2 BLDCM DTC 上管 ZVVs 选择表
Table 2 New upper ZVVs of DTC switch table for BLDCM

| | | 扇区 | | | | | |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| | | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 |
| 正矢量 | $V_2(0,0,1,0,0,1)$ | $V_3(0,1,1,0,0,0)$ | $V_4(0,1,0,0,1,0)$ | $V_5(0,0,0,1,1,0)$ | $V_6(1,0,0,1,0,0)$ | $V_1(1,0,0,0,0,1)$ | |
| 上管零矢量 | $V(0,0,1,0,0,0)$ | $V(0,0,1,0,0,0)$ | $V(0,0,0,0,1,0)$ | $V(0,0,0,0,1,0)$ | $V(1,0,0,0,0,0)$ | $V(1,0,0,0,0,0)$ | |

表 3 BLDCM DTC 下管 ZVVs 选择表
Table 3 New lower ZVVs of DTC switch table for BLDCM

| | | 扇区 | | | | | |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| | | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 |
| 正矢量 | $V_2(0,0,1,0,0,1)$ | $V_3(0,1,1,0,0,0)$ | $V_4(0,1,0,0,1,0)$ | $V_5(0,0,0,1,1,0)$ | $V_6(1,0,0,1,0,0)$ | $V_1(1,0,0,0,0,1)$ | |
| 下管零矢量 | $V(0,0,0,0,0,1)$ | $V(0,1,0,0,0,0)$ | $V(0,1,0,0,0,0)$ | $V(0,0,0,1,0,0)$ | $V(0,0,0,1,0,0)$ | $V(0,0,0,0,0,1)$ | |

2 不同零矢量作用下换相转矩脉动分析

由于电机非理想反电势以及电流换流的原因, BLDCM DTC 在换相过程中存在较大的换相转矩脉动. 新定义的零矢量相比全关断电压矢量, 具有减小转矩脉动的效果. 为了获得最小的换相转矩脉动, 下文对于新构造出的众多的零矢量所产生的换相转矩脉动进行定量分析.

在构造新零矢量时已经将零矢量分为上一管零矢量与下一管零矢量两大类, 而在零矢量与非零矢量构成电压矢量选择表时, 又分别存在上下桥臂换相的区别, 因此, 将上一管电压矢量选择表和下一管电压矢量选择表分为上桥臂与下桥臂换相进行分析.

2.1 采用上管零矢量作用

2.1.1 上桥臂换相

在采用上管零矢量与正矢量组合的电压矢量表时, 在扇区 s_2 到 s_3 , s_4 到 s_5 , s_6 到 s_1 的换相时出现上桥臂换相, 以 s_2 到 s_3 为例进行说明, 在换相的后一刻, a 相下桥臂调制导通, 在下桥臂关断时, 电流通过上桥臂的续流二极管导通, b 相电流通过下桥臂的续流二极管导通, c 相上桥臂恒通, 由此得到电压方程为

$$\begin{cases} (1-D)U_{dc} = R_a \cdot i_a + L_M \frac{di_a}{dt} + e_a + U_n, \\ 0 = R_b \cdot i_b + L_M \frac{di_b}{dt} + e_b + U_n, \\ U_{dc} = R_c \cdot i_c + L_M \frac{di_c}{dt} + e_c + U_n. \end{cases} \quad (1)$$

根据 $i_a + i_b + i_c = 0$, $e_a = -E$, $e_b = E$, $e_c = E$, 得出 $U_n = \frac{(2-D)U_d - E}{3}$, 代入式(1)求出非换相相 A 的电流变化率为

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{(1-2D)U_d + 4E}{3L_M}. \quad (2)$$

2.1.2 下桥臂换相

在采用上管零矢量与正矢量组合的电压矢量表时, 在扇区 s_1 到 s_2 , s_3 到 s_4 , s_5 到 s_6 的换相时出现下桥臂换相, 以 s_1 到 s_2 为例进行说明, 在换相后的一刻, a 相下桥臂调制导通, 在下桥臂关断时, b 相上桥臂恒通, c 相通过上桥臂的续流二极管续流, 电压方程为

$$\begin{cases} (1-D)U_{dc} = R_a \cdot i_a + L_M \frac{di_a}{dt} + e_a + U_n, \\ U_{dc} = R_b \cdot i_b + L_M \frac{di_b}{dt} + e_b + U_n, \\ U_{dc} = R_c \cdot i_c + L_M \frac{di_c}{dt} + e_c + U_n. \end{cases} \quad (3)$$

根据 $i_a + i_b + i_c = 0$, $e_a = -E$, $e_b = E$, $e_c = -E$, 得出 $U_n = \frac{(3-D)U_d + E}{3}$, 代入式(3)求出非换相相 B 的电流变化率为

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{DU_d - 4E}{3L_M}. \quad (4)$$

2.2 采用下管零矢量

2.2.1 上桥臂换相时

在采用下管零矢量与正矢量组合的电压矢量表时, 在扇区 s_2 到 s_3 , s_4 到 s_5 , s_6 到 s_1 的换相时出现上桥臂换相, 以 s_2 到 s_3 为例进行说明, 在换相的后一刻, a 相下桥臂恒通, b 作为关断相, 相电流通过下桥臂的续流二极管导通, c 相上桥臂调制导通, 关断时由下桥臂续流二极管导通, 由此得到电压方程为

$$\begin{cases} 0=R_a \cdot i_a+L_M \frac{di_a}{dt}+e_a+U_n, \\ 0=R_b \cdot i_b+L_M \frac{di_b}{dt}+e_b+U_n, \\ DU_{dc}=R_c \cdot i_c+L_M \frac{di_c}{dt}+e_c+U_n. \end{cases} \quad (5)$$

得出 $U_n = \frac{DU_d - E}{3}$, 代入式(5)得出非换相相 A 的电流变化率为

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{-DU_d + 4E}{3L_M}. \quad (6)$$

2.2.2 下桥臂换相时

在采用下管零矢量与正矢量组合的电压矢量表时,在扇区 s_1 到 s_2, s_3 到 s_4, s_5 到 s_6 的换相时出现下桥臂换相,以 s_1 到 s_2 为例进行说明,在换相后的一刻, a 相下桥臂恒通, b 相上桥臂调制导通, c 相通过上桥臂的续流二极管续流,电压方程为

$$\begin{cases} 0=R_a \cdot i_a+L_M \frac{di_a}{dt}+e_a+U_n, \\ DU_{dc}=R_b \cdot i_b+L_M \frac{di_b}{dt}+e_b+U_n, \\ U_{dc}=R_c \cdot i_c+L_M \frac{di_c}{dt}+e_c+U_n. \end{cases} \quad (7)$$

得出 $U_n = \frac{(1+D)U_d + E}{3}$, 代入式(7)得出非换相相 B 的电流变化率为

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{(2D-1)U_d - 4E}{3L_M}. \quad (8)$$

在上桥臂换相过程中,非换相相电流变化率做差,如式(9)所示

$$\frac{-DU_d + 4E}{3L_M} - \frac{(1-2D)U_d + 4E}{3L_M} = \frac{(D-1)U_d}{3L_M} < 0. \quad (9)$$

故下一管零矢量参与作用时,上桥臂换相具有较小的电流脉动,可以减小换相转矩脉动的产生,同理可得上一管零矢量参与作用时,下桥臂换相具有较小的电流脉动,可用于减小换相转矩脉动。

所以在换相过程中,采用上一管零矢量方式下桥臂换相(即扇区 s_1 到 s_2, s_3 到 s_4, s_5 到 s_6)时和下一管零矢量上桥臂换相(扇区 s_2 到 s_3, s_4 到 s_5, s_6 到 s_1)时具有较小的换相转矩脉动值,综合上述换相方式,采用上一管与下一管相结合的矢量选择开关表,如表 4 所示。

表 4 BLDCM DTC 电压矢量选择表
Table 4 DTC switch table for BLDCM

| τ | 扇区 | | | | | |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 |
| 正矢量 | $V_2(0,0,1,0,0,1)$ | $V_3(0,1,1,0,0,0)$ | $V_4(0,1,0,0,1,0)$ | $V_5(0,0,0,1,1,0)$ | $V_6(1,0,0,1,0,0)$ | $V_1(1,0,0,0,0,1)$ |
| 上下管零矢量 | $V(0,0,0,0,0,1)$ | $V(0,0,1,0,0,0)$ | $V(0,1,0,0,0,0)$ | $V(0,0,0,0,1,0)$ | $V(0,0,0,1,0,0)$ | $V(1,0,0,0,0,0)$ |

3 仿真及实验验证

为了验证理论的正确性,分别将下一管 ZVVs 选择表,上一管矢量选择表,上下管矢量选择表用于电机控制系统仿真以及实验。

图 2~3 分别为下一管、上一管零矢量参与控制的仿真波形,如图 2(a)、图 3(a)所示,电机稳态输出转矩转矩脉动值约为 $1.6 \text{ N}\cdot\text{m}$,图 2(b)、图 2(c)及图 3(b)、图 3(c)分别为其换相时刻的转矩脉动波形和三相电流波形,图中可以看出在换相时刻,电机输出转矩出现约为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的波动,同时,三相相电流也出现

约为 1A 尖峰. 图 4 为采用上一管零矢量交替作用的控制结果波形,如图 4(a)所示,电机稳态输出转矩转矩脉动值约为 1.1 N·m,转矩脉动值明显减小. 图 4(b)、图 4(c)为其换相时刻的转矩脉动和三相电流波形局部放大波形,从图中可以看出,电流波动有所削弱,换相转矩脉动的波动明显减小.

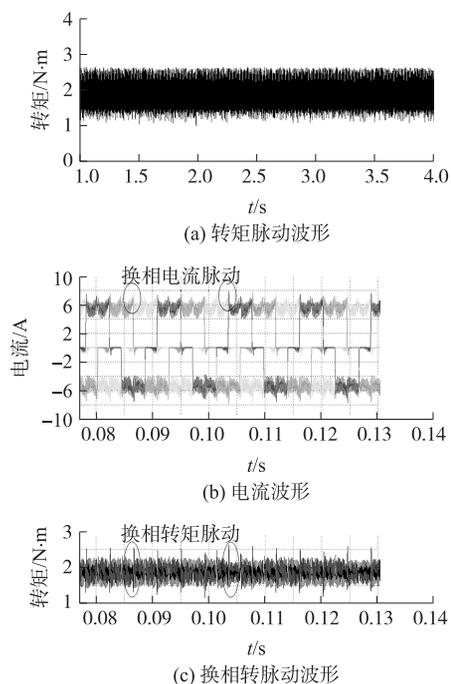


图 2 下管零矢量参与作用仿真波形

Fig. 2 Simulation waveforms under positive and lower zero vectors

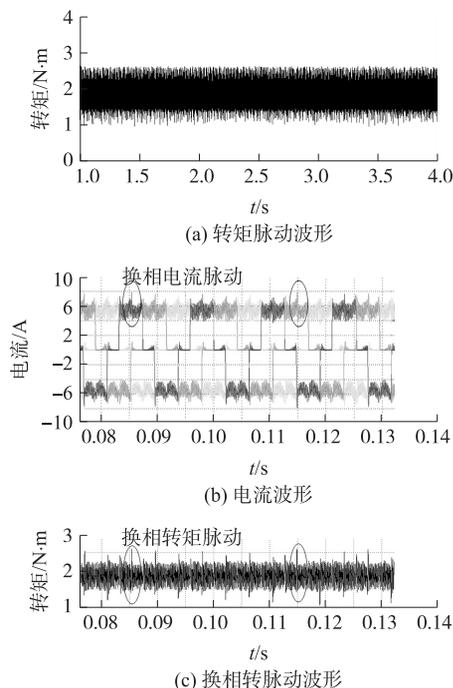


图 3 上管零矢量参与作用仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms under positive and upper zero vectors

图 5~6 分别为下一管、上一管零矢量参与控制的实验波形,如图 5(a)、图 6(a)所示,电机稳态输出转矩转矩脉动值约为 1.1 N·m,图 6(b)为其电流波形,图中可以看出在导通时刻,相电流波动明显. 图 7 为

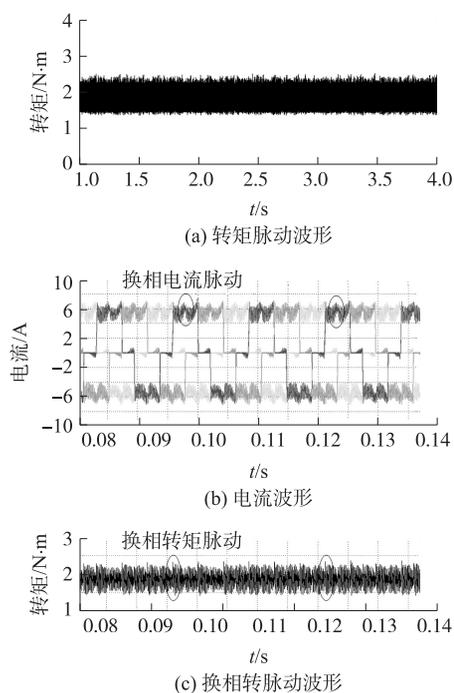


图 4 上下管零矢量参与作用仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms under positive and comprehensive zero vectors

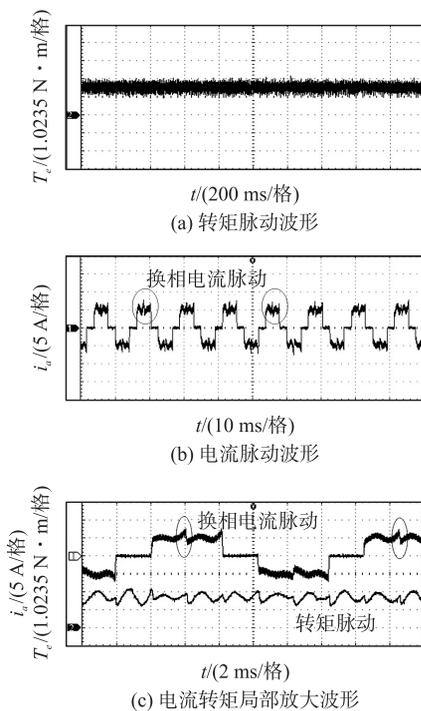


图 5 下管零矢量参与作用实验波形

Fig. 5 Experiment waveforms under positive and lower zero vectors

采用上一管零矢量交替作用的控制实验波形,如图 7(a)所示,电机稳态输出转矩转矩脉动值约为 0.7 N·m,转矩脉动有所减小.图 7(b)为其电流波形.图中可以看出在换相时刻,换相电流与上两种控制效果相比较为平滑.图 5(c)、图 6(c)、图 7(c)为三种控制方式下相电流与转矩的局部放大波形,图 5、图 6 中显示的电流在换相时电流出现了明显的增大的趋势,图 7 的电流变化较为平缓,与前两种方式相比电流脉动减小约 1 A,同时,图 7(c)利用上下管零矢量交替作用产生的转矩脉动小约 0.4 N·m.

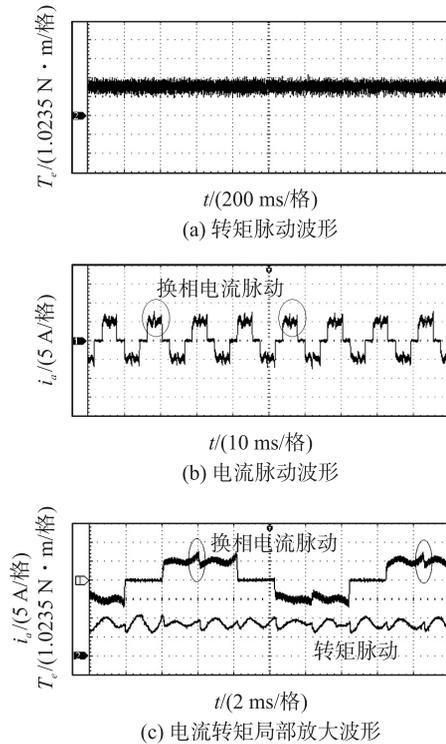


图 6 上管零矢量参与作用实验波形

Fig. 6 Experiment waveforms under positive and upper zero vectors

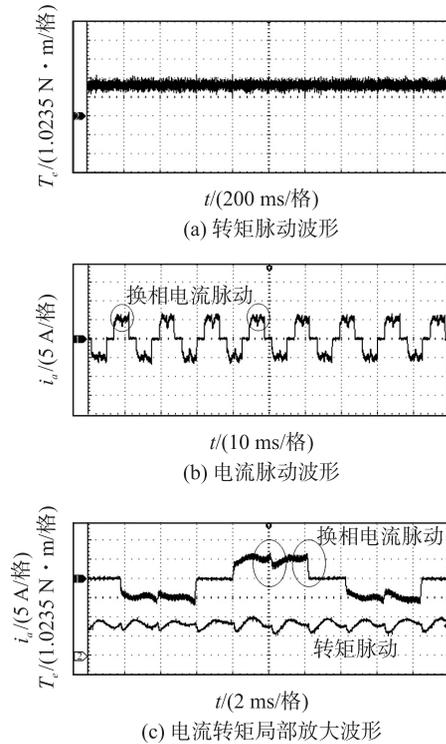


图 7 上下管零矢量参与作用实验波形

Fig. 7 Experiment waveforms under positive and comprehensive zero vectors

4 结语

本文根据 BLDCM DTC 传统电压矢量选择表,提出新的 ZVV_s 构造方法,提出了上一管、下一管共 6 个零矢量,根据电压矢量表的斩控方式定性分析了在各种零矢量下的换相转矩脉动值,提出一种上下管结合的 ZVV_s 选择表,抑制换相转矩脉动.并通过仿真及实验对比该电压矢量表与传统电压矢量选择表,验证了理论分析的准确性,可以有效抑制 DTC 的换相转矩脉动值,有利于 DTC 的进一步研究.

[参考文献] (References)

[1] TAKASHI K, SHIGENOBU N. Brushless motors: advanced theory and modern applications [M]. Tokyo: Sogo Electronics Press, 2003.

[2] 揭贵生, 马伟明, 耿建明, 等. 无刷直流电机的一种新型转矩与效率优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 131-136.
JIE G S, MA W M, GENG J M, et al. A new optimizing control method of torque and efficiency for trapezoidal BLDCM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 131-136. (in Chinese)

[3] 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): 1 012-1 021.

[4] 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)

- [5] 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 C L, LIU J H, YU W, et al. Variable structure control of BLDCM based on extended state observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):139-143. (in Chinese)
- [6] 高瑾,胡育文,黄文新,等. 六边形磁链轨迹的无刷直流电机直接自控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):64-69.
GAO J, HU Y W, HUANG W X, et al. The direct self control of brushless DC motor based on the hexagon locus of stator flux linkage[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15):64-69. (in Chinese)
- [7] 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):2 836-2 844.
- [8] 杨建飞,胡育文. 无刷直流电机无磁链观测直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(12):90-95.
YANG J F, HU Y W. Direct torque control for brushless DC motor without flux linkage observation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12):90-95. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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]