

一种新型零矢量的二三导通无刷直流电机 直接转矩控制系统研究

徐会风, 苏少平, 杜庆诚
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了解决无刷直流电机转矩脉动幅值大的问题,提出一种新型零矢量的二三导通无刷直流电机直接转矩控制方法。该方法利用二相、三相交替导通的驱动方式,使用直接转矩控制方法,形成12个扇区,并定义了一种新型零矢量,改进了空间电压矢量选择表,降低了转矩脉动幅值。MATLAB仿真结果表明:当电机空载且以额定转速2 000 r/min运行时,相比于传统零矢量,新型零矢量能使转矩脉动幅值降低约40.94%;当电机负载为4.3 N·m且以500 r/min低速运转时,相比于传统零矢量,新型零矢量能使转矩脉动幅值降低约47.40%;当电机负载为4.3 N·m且以额定转速2 000 r/min高速运行时,新型零矢量使转矩脉动幅值降低约32.32%。不论电机运行于空载还是负载,低速还是高速,新型零矢量均能起到降低转矩脉动幅值的作用。该方法有效降低了电机的运行噪声,使电机运转更加平稳。新型零矢量可以应用于无刷直流电机的各种导通方式,对无刷直流电机应用于高性能场合具有重要意义。

关键词: 新型零矢量;二三导通;直接转矩控制;无刷直流电机;转矩脉动

中图分类号: TM36+1;TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202004011 **文章编号:** 0253-987X(2020)04-0085-08



OSID 码

A Novel Direct Torque Control System with New Zero Vector for Two-Three Conduction Brushless DC Motors

XU Huifeng, SU Shaoping, DU Qingcheng

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A direct torque control method with a new zero vector for two-three conduction brushless DC motors is proposed to solve the problem of large torque ripple amplitude in brushless DC motors. The method uses an alternate conduction driving mode of two-phase and three-phase and a direct torque control method to form 12 sectors, and defines a new type of zero vector to improve the space voltage vector selection table and to reduce torque pulsation amplitude. MATLAB simulation results and a comparison with the system using traditional zero vector show that the proposed system using the new zero vector reduces the torque ripple amplitude by about 40.94% when the motor is running without load at a rated speed of 2 000 r/min; when the motor is running with a 4.3 N·m load at a low speed of 500 r/min, the proposed method reduces the torque ripple amplitude by about 47.40%; and when the motor is running with a 4.3 N·m load at a rated high speed of 2 000 r/min, the proposed method reduces the torque ripple amplitude by about 32.32%. Whether the motor is running with or without a load and at a low speed or a high speed, the proposed method reduces the torque ripple amplitude.

This method also effectively reduces the running noise of a motor and makes the motor run more smoothly. The new zero vector can be applied to various conduction modes of brushless DC motors, and has great significance for applications of brushless DC motors in high-performance applications.

Keywords: new zero vector; two-three conduction; direct torque control; brushless DC motor; torque ripple

近年来,随着电力电子技术的快速发展,无刷直流电机得到了突飞猛进的发展^[1]。由于无刷直流电机具有结构简单、启动转矩大、效率高、维护方便等优点^[2],且只需配合相应的电力电子器件便可达到良好的性能要求,目前在汽车工业、航空工业、人工智能等领域应用越来越广泛,将无刷直流电机应用在高性能场所的需求越来越大^[3]。

为了获得较大的启动转矩,无刷直流电机常采用二二导通^[4-6]的驱动方式,但是这种驱动方式因为电流换相时会引起非换相相电流的畸变,导致转矩脉动幅值增大,且该导通方式满足不了高性能高精度的要求,因此只能应用于精度要求不高的场合。而三三导通的驱动方式^[7-8],虽然没有非换相相电流畸变引起的转矩脉动幅值增大的问题,但是在该驱动方式下,电机导通角增大很多,电机理想空载的平均电流也不断增加,且增加的倍数远大于电机阻尼系数的增加量,从而使电机的效率下降,电机的扭力降低,所以该方法并不常用。综合以上因素,本文采用二三导通^[9-12]的方式结合直接转矩控制(DTC)方法驱动无刷直流电机运转(因为直接转矩控制其结构相对比较简单,且以电磁转矩为直接控制目标,更易获得快速的转矩响应和良好的控制性能^[13-17]),并定义了一种新型零矢量来改进空间电压矢量选择表。仿真结果表明:该控制方法下,转矩脉动幅值大大降低,证明了该方法的有效性。

1 二三导通无刷直流电机 DTC

1.1 无刷直流电机数学模型及换相原理

图 1 为三相星形全桥联接无刷直流电机的等效原理图。

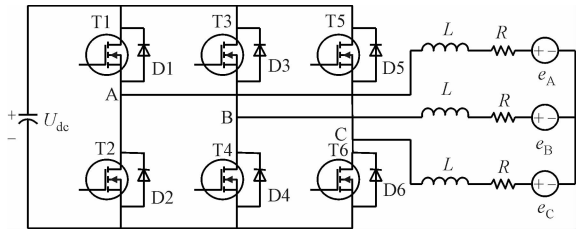


图 1 三相星形全桥联接无刷直流电机的等效原理图

假设三相绕组对称,T1~T6 为功率开关管,则其电压方程为

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

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 分别为定子绕组 A、B、C 相电压; i_A 、 i_B 、 i_C 分别为定子绕组 A、B、C 相电流; e_A 、 e_B 、 e_C 分别为定子绕组 A、B、C 相反电动势; L 、 R 、 M 分别为电机的每相绕组自感、电阻和相间互感。

电机的电磁转矩方程为

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

式中: ω_m 为电机转子的机械角速度。

电机转子轴上的转矩平衡方程^[18]为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T - T_L \quad (3)$$

式中: B 为阻尼系数; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩。

电机的换相原理是:位置传感器检测转子的位置,并发出位置信号给控制系统,控制系统根据转子的位置对逆变器 T1~T6 的开关进行控制,形成旋转磁场,带动电机旋转^[19]。三相星形全桥联接无刷直流电机有 3 种导通方式,见表 1。

表 1 三相星形全桥联接无刷直流电机导通方式

导通方式	状态数	状态角/(°)	导通电角度/(°)	通电相数
二二导通	6	60	120	2
三三导通	6	60	180	3
二三导通	12	30	150	2,3

二三导通方式就是任何瞬间都有 3 个开关元件导通,然后变为 2 个开关元件导通,再变回 3 个开关元件导通,就这样两相与三相交替导通。其开关器件可按以下顺序导通:T1、T4、T6;T1、T6;T1、T6、T3;T6、T3;T6、T3、T2;T3、T2;T3、T2、T5;T2、T5;T2、T5、T4;T5、T4;T5、T4、T1;T4、T1;……

1.2 无刷直流电机 DTC 扇区划分

无刷直流电机二三导通方式下,其非零空间电压矢量有 6 个, $V_1(100001)$ 、 $V_2(001001)$ 、 $V_3(011000)$ 、 $V_4(010010)$ 、 $V_5(000110)$ 、 $V_6(100100)$ 。它们在空间中形成 6 个扇区,按图 2 所示方式分布。

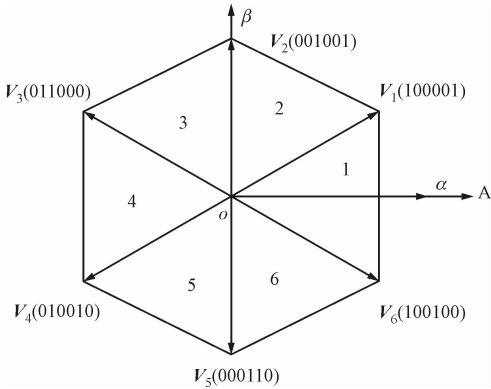


图 2 二三导通下 6 个扇区非零空间电压矢量的分布

同理,三三导通下,其非零空间电压矢量也有 6 个,分别为: $V_1(100101)$ 、 $V_2(101001)$ 、 $V_3(011001)$ 、 $V_4(011010)$ 、 $V_5(010110)$ 、 $V_6(100110)$ 。它们在空间中也形成 6 个扇区,见图 3。

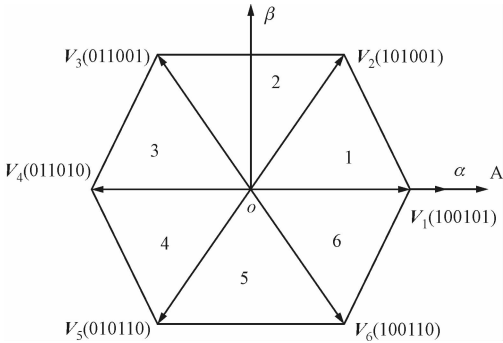


图 3 三三导通下 6 个扇区非零空间电压矢量的分布

二三导通方式是二三导通和三三导通交替,因此采用二三导通的无刷直流电机直接转矩控制有 12 个非零空间电压矢量, $V_1(100101)$ 、 $V_2(100001)$ 、 $V_3(101001)$ 、 $V_4(001001)$ 、 $V_5(011001)$ 、 $V_6(011000)$ 、 $V_7(011010)$ 、 $V_8(010010)$ 、 $V_9(010110)$ 、 $V_{10}(000110)$ 、 $V_{11}(100110)$ 、 $V_{12}(100100)$ 。它们在空间中形成 12 个扇区,见图 4。

2 空间电压矢量

目前,大多数学者把 $V_0(000000)$ 作为无刷直流电机的零电压矢量,但是根据异步电机和永磁同步电机 DTC 中零矢量均使得空间电压矢量幅值为 0,且三相绕组发生短路的特点来看^[20],无刷直流电机 DTC 的零矢量 $V_0(000000)$ 并不能满足这些要求。

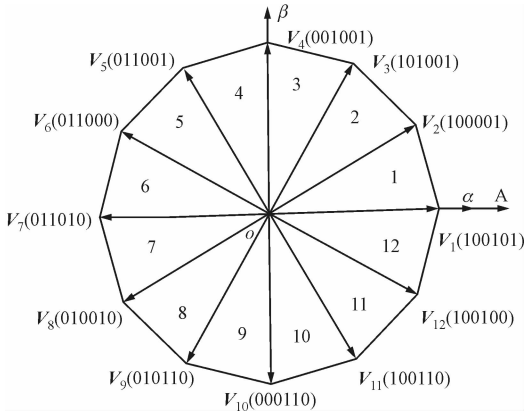


图 4 二三导通下 12 个扇区非零空间电压矢量的分布

本文将针对这一问题作出解答,并给出一种新型零矢量。

2.1 公共反空间电压矢量 V_0

以二三导通方式无刷直流电机 T1、T4、T6 导通为例,其对应的空间电压矢量为 $V_1(100101)$,此时电流从 A 相流入,从 B 相和 C 相流出,见图 5。

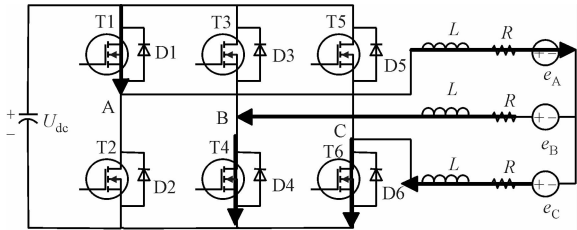


图 5 施加空间电压矢量 $V_1(100101)$ 时的电流流向

当施加 $V_0(000000)$ 时,由于电感的作用,电流并不会马上变为 0,而是通过续流二极管 D2、D3 和 D5 继续流通一段时间,此时相当于 T3、T5 和 T2 导通,如图 6 所示,对应的空间电压矢量是 $V_7(011010)$ 。由于 V_1 和 V_7 在空间分布中正好是相反的,故称 V_0 为公共反空间电压矢量。

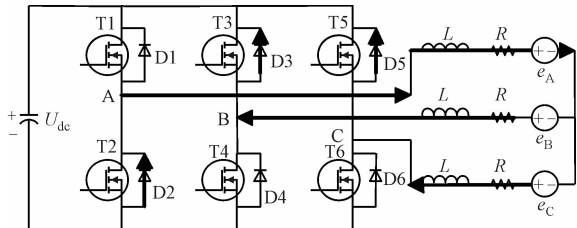


图 6 施加空间电压矢量 $V_0(000000)$ 时的电流流向

同理,其他导通方式也是如此。从上面的分析可以看出, V_0 并没有满足让空间电压矢量为 0,并使电机绕组短路的要求,因此 V_0 并不是真正的零矢量,而是公共的反空间电压矢量。

2.2 新型零矢量

同样以二三导通方式无刷直流电机 T1、T4、T6 导通为例进行分析,电流流向如图 5 所示。当空间电压矢量 $V_1(100101)$ 作用结束后,施加 $V_{01}(000101)$ 矢量。因为电感电流不会马上变为 0,所以二极管 D2 导通续流,其电流流向如图 7 所示,此时 A、B、C 三相端电压共同连接到电源电压的负极,使空间电压矢量的幅值为 0,并且绕组短路,可见 $V_{01}(000101)$

表 2 传统零矢量二三导通下 12 个扇区空间电压矢量选择表

τ	不同扇区空间电压矢量											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3
0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0

注: τ 为转矩滞环的输出。

表 3 新型零矢量二三导通下 12 个扇区空间电压矢量选择表

τ	不同扇区空间电压矢量											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_1	V_2	V_3
0	V_{02}	V_{03}	V_{04}	V_{04}	V_{04}	V_{05}	V_{06}	V_{06}	V_{06}	V_{01}	V_{02}	V_{02}

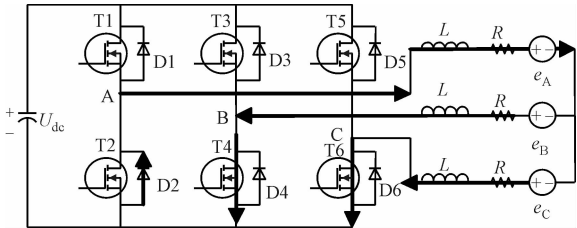


图 7 施加新型零矢量 $V_{01}(000101)$ 时的电流流向

3 MATLAB/Simulink 仿真

3.1 无刷直流电机 DTC 模型

无刷直流电机的直接转矩控制系统采用转速转矩双闭环控制系统,通过位置传感器获得转子的位置 θ ,经过转速检测模块得到电机的转速 n ,利用转子位置和转速经反电势计算模块得到反电势 e_A 、 e_B 、 e_C ,由三相电流检测模块可以得到电机的三相电流 i_A 、 i_B 、 i_C ,然后根据公式(2)得到电机的电磁转矩 T_e 。给定转速 n^* 与转速 n 的误差经过转速调节器得到给定转矩 T_e^* , T_e^* 与 T_e 共同输送到转矩调节器。由转矩调节器的输出 τ 与转子位置 θ 共同决定最优的空间电压矢量。其控制系统的原理框图如图 8 所示。

按图 8 所示的原理框图,利用 Simulink 工具箱实现此原理图的各项功能,得到图 9 所示仿真模型。

是 $V_1(100101)$ 的真正零矢量。

同理, $V_{02}(000001)$ 是 $V_2(100001)$ 、 $V_3(101001)$ 、 $V_4(001001)$ 的零矢量; $V_{03}(010001)$ 是 $V_5(011001)$ 的零矢量; $V_{04}(010000)$ 是 $V_6(011000)$ 、 $V_7(011010)$ 、 $V_8(010010)$ 的零矢量; $V_{05}(010100)$ 是 $V_9(010110)$ 的零矢量; $V_{06}(000100)$ 是 $V_{10}(000110)$ 、 $V_{11}(100110)$ 、 $V_{12}(100100)$ 的零矢量。按以上零矢量和扇区分布,可以得到表 2 和表 3 所示空间电压矢量选择表。

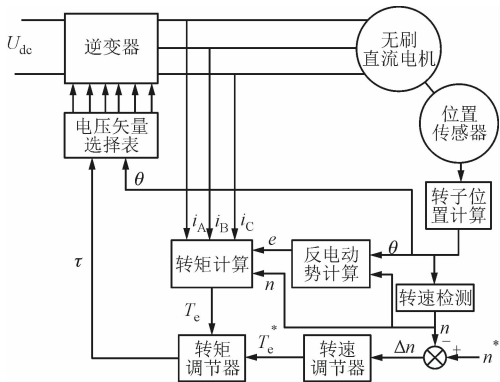
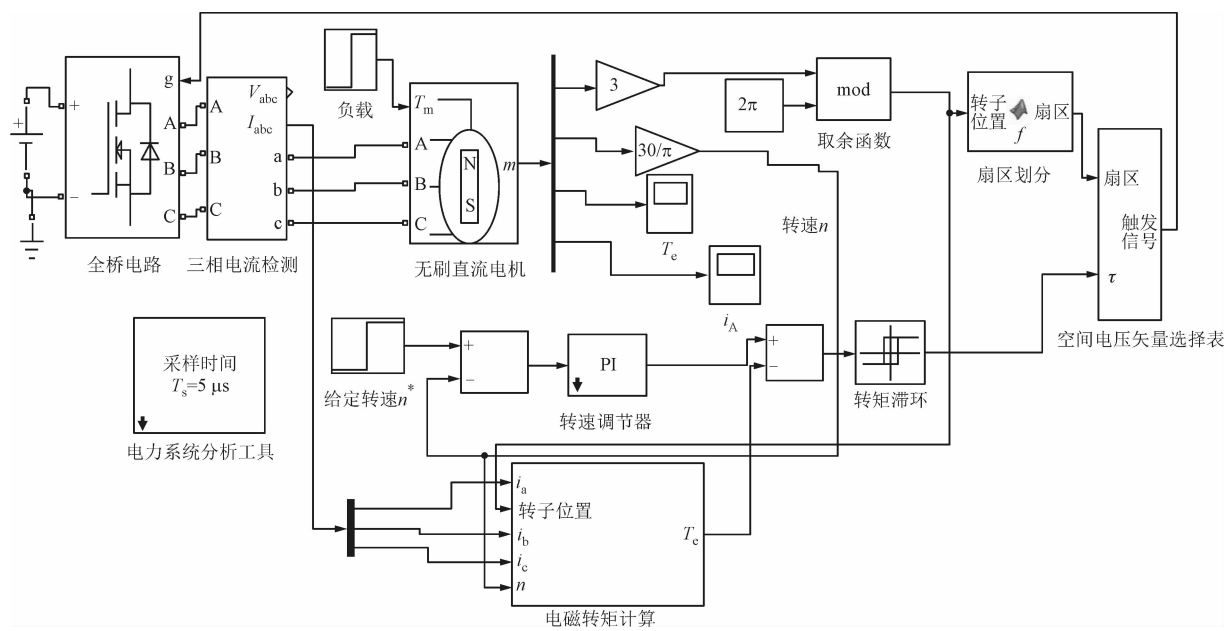


图 8 无刷直流电机直接转矩控制系统原理框图

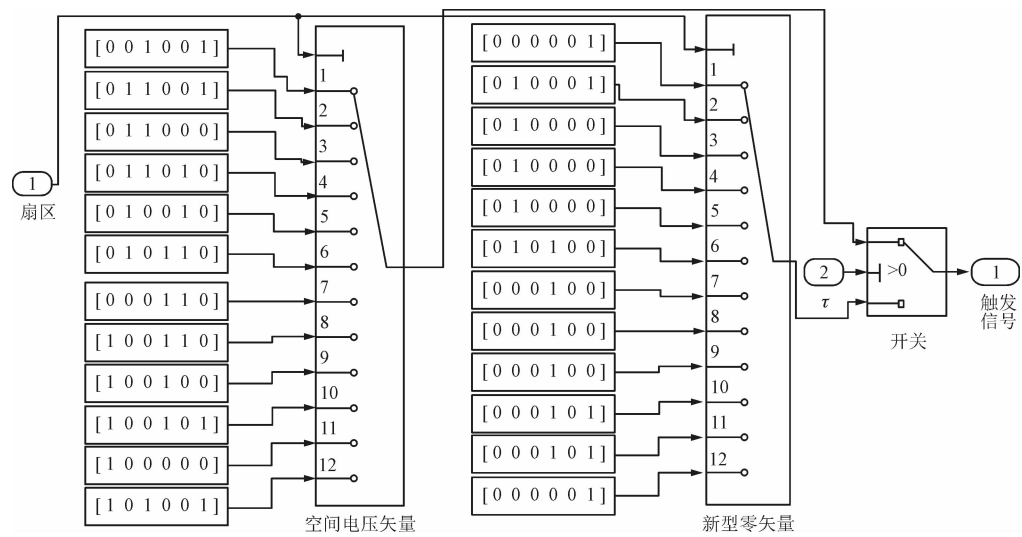
3.2 仿真结果

根据表 2、表 3 所示空间电压矢量选择表进行仿真。仿真所用无刷直流电机参数为:额定转速 2 000 r/min,额定电压 180 V,额定电流 5.31 A,额定功率 900 W,额定转矩 4.3 N·m,定子电阻 0.173 Ω ,电感 8.5 mH,转动惯量 0.83×10^{-3} kg·m²,极对数 3。

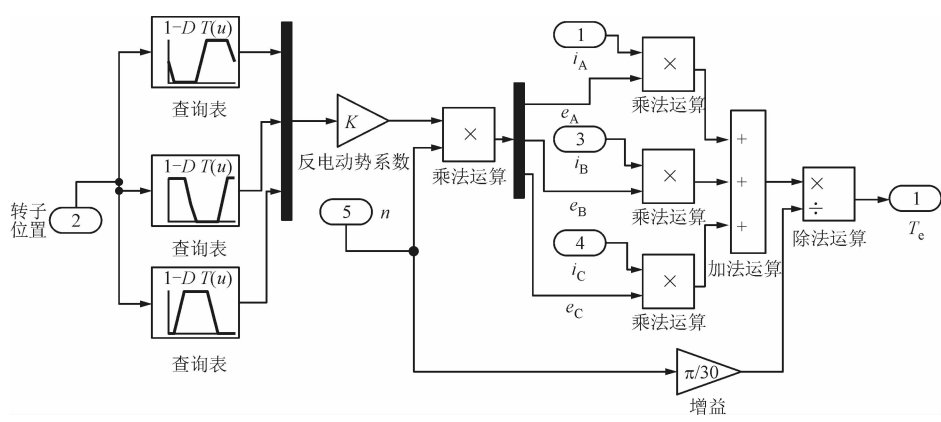
从图 10 的波形图可以看出,当反电势 e_A 由正变为负时,相电流 i_A 仍然为正值,在延迟一段时间后才变为负值,此时 e_A 和 i_A 的乘积为负值,同理 B 相和 C 相的反电势和相电流也是如此。根据式(2)可知,反电势由正变负时,相电流延迟一段时



(a) 本文仿真模型全图



(b) 空间电压矢量选择表



(c) 电磁转矩计算模块

图 9 新型零矢量二三导通无刷直流电机 DTC 仿真模型

间才从正值变为负值,使得反电动势与相电流的乘积为负值。因为电磁转矩和 A、B、C 三相反电动势与相电流的乘积加和有关,所以转矩脉动幅值减小,这也是新型零矢量能抑制转矩脉动的原因。

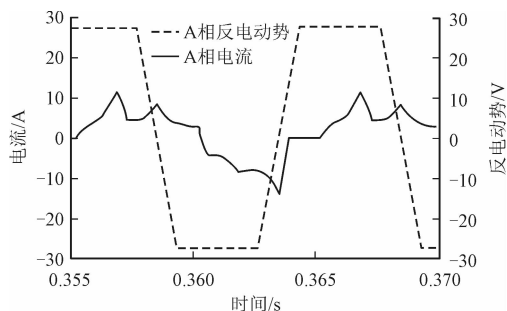


图 10 新型零矢量二三导通方式无刷直流电机 DTC A 相反电动势及 A 相电流波形

从图 11 可知,当电机运行于额定状态时,新型零矢量相比于传统零矢量在转速方面并没有什么改变。虽然新型零矢量对转速的改变不大,但是它对转矩脉动幅值却能起到很好的抑制作用。本文从以下几个方面做比较。

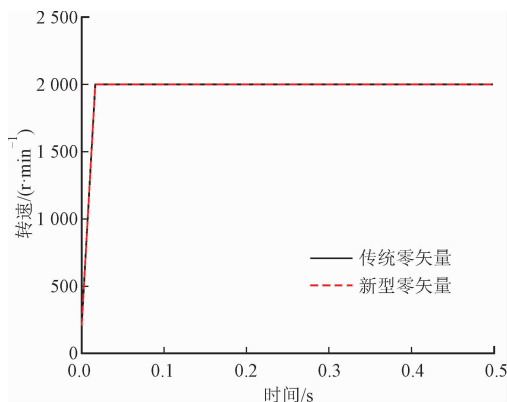
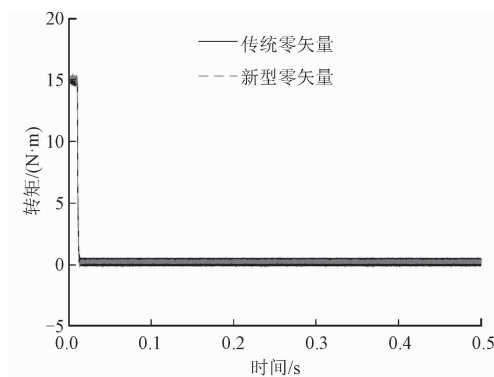


图 11 额定状态下新型零矢量和传统零矢量的转速对比

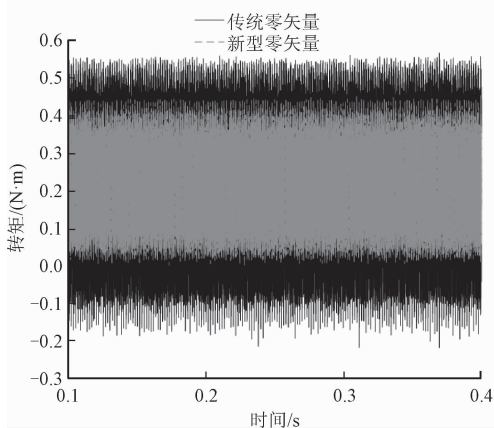
(1)当电机空载且以 2 000 r/min 旋转时,传统零矢量 12 个扇区转矩平均值为 $0.2096 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $[-0.2228, 0.5837] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动,新型零矢量 12 个扇区转矩平均值也为 $0.2096 \text{ N} \cdot \text{m}$,它在 $[-0.0163, 0.4602] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动,见图 12。

(2)电机负载 $4.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以 500 r/min 旋转时,传统零矢量 12 个扇区转矩平均值 $4.3520 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $[3.8760, 4.8190] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动,新型零矢量 12 个扇区转矩平均值也为 $4.352 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $[4.1190, 4.6150] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动,见图 13。

(3)电机带 $4.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载以 2 000 r/min 旋转时,其电磁转矩如图 14 所示。传统零矢量 12 个扇区



(a) 转矩波形仿真全图

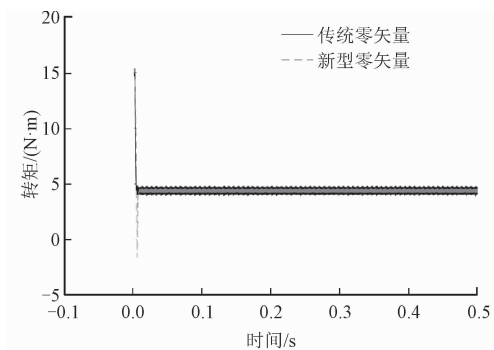


(b) 转矩波形放大图

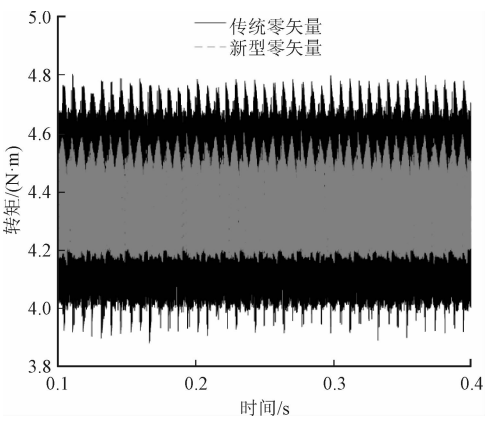
图 12 新型零矢量和传统零矢量 12 个扇区 DTC 转矩波形对比(空载,转速 2 000 r/min)

转矩平均值为 $4.5090 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $[4.0520, 4.9060] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动,新型零矢量 12 个扇区转矩平均值也为 $4.509 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $[4.2280, 4.8060] \text{ N} \cdot \text{m}$ 内脉动。

从表 4 可以看出,当电机空载且以额定转速 2 000 r/min 运行时,相比于传统零矢量,新型零矢量能使转矩脉动幅值降低约 40.94%;当电机负载 $4.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 且以 500 r/min 低速运转时,相比于传统零矢量,新型零矢量能使转矩脉动幅值降低约

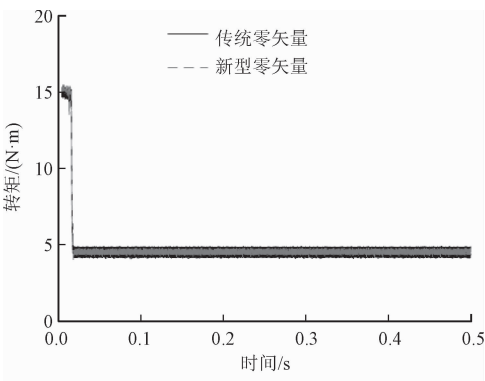


(a) 转矩波形仿真全图

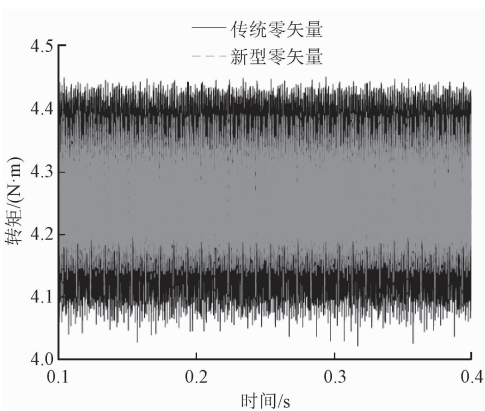


(b)转矩波形放大图

图 13 新型零矢量和传统零矢量 12 个扇区 DTC 转矩波形对比(负载 4.3 N·m,转速 500 r/min)



(a)转矩波形仿真全图



(b)转矩波形放大图

图 14 新型零矢量和传统零矢量 12 个扇区 DTC 转矩波形对比(负载 4.3 N·m,转速 2 000 r/min)

47.40%;当电机负载 4.3 N·m 以额定转速 2 000 r/min 高速运行时,相比于传统零矢量,新型零矢量使转矩脉动幅值降低了约 32.32%。可见,不论电机运行是空载还是负载,低速还是高速,新型零矢量均能起到降低转矩脉动幅值的作用。

表 4 不同仿真条件下转矩脉动幅值统计

零矢量 类型	转矩脉动幅值		
	$T_L=0\text{ N}\cdot\text{m}$	$T_L=4.3\text{ N}\cdot\text{m}$	$T_L=4.3\text{ N}\cdot\text{m}$
	$n=2\,000\text{ r/min}$	$n=500\text{ r/min}$	$n=2\,000\text{ r/min}$
传统	0.403 3	0.471 5	0.427 0
新型	0.238 2	0.248 0	0.289 0

注:因为转矩在平均值附近上下脉动,所以取波峰和波谷到平均值的均值为转矩脉动幅值。

4 结 论

在分析无刷直流电机传统导通方式转矩脉动幅值大的原因后,采用二三导通方式,并利用直接转矩控制方法将空间电压矢量划分为 12 个扇区,定义了一种新型零矢量,优化了扇区和空间电压矢量选择表。仿真结果表明,新型零矢量相对于传统零矢量不仅能使电机的转矩脉动幅值大大降低,而且新型零矢量可以应用于无刷直流电机的各种导通方式,对无刷直流电机应用于高性能高精度场合具有重要意义。

参考文献:

[1] 刘丹. 基于虚拟仪器的无刷直流电机检测系统研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2010: 1-2.

[2] 龙波, 曹秉刚, 周好斌, 等. 微型电动车用永磁无刷电机转矩脉动控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 576-579.

LONG Bo, CAO Binggang, ZHOU Haobin, et al. Research on torque ripple control of brushless DC motor for mini-battery electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(5): 576-579.

[3] 刘健. 两相导通无刷直流电机直接转矩控制系统零矢量研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2016: 2-3.

[4] CUI Chengjun, LIU Gang, WANG Kun, et al. Sensorless drive for high-speed brushless DC motor based on the virtual neutral voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3275-3285.

[5] 付朝阳, 李聪, 常国勇. 基于分时换相优化策略的无刷直流电机直接转矩控制 [J]. 微电机, 2018, 7: 29-33.

FU Chaoyang, LI Cong, CHANG Guoyong. Direct torque control of brushless dc motor based on time-sharing commutation optimization strategy [J]. Micro-motors, 2018, 7: 29-33.

[6] 唐忠文. 基于扩展卡尔曼滤波的无刷直流电机无位置传感器控制系统研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018: 3-10.

- [7] 高瑾. 无刷直流电动机直接转矩控制的一体化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 39-48.
- [8] 张广. 高频链驱动的无刷直流电机驱动研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017: 15-26.
- [9] 徐东泽. 直流无刷电机直接转矩控制算法优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016: 34-35.
- [10] 周衍, 张兴华. 一种简易的无刷直流电动机直接转矩控制 [J]. 微特电机, 2014, 42(7): 54-57, 60.
ZHOU Yan, ZHANG Xinghua. A simple direct torque control of brushless DC motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(7): 54-57, 60.
- [11] 姜卫东. 混合动力汽车用无刷直流电机动态性能及控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 45-52.
- [12] 孙承波. 空调永磁同步压缩机控制系统研究 [D]. 上海: 上海大学, 2008: 75-81.
- [13] CHONG L N, RAHMAN M F, HU Y W, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-535.
- [14] LIU Yong, ZHU Z Q, HOWE D. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(2): 599-608.
- [15] 夏长亮, 张茂华, 王迎发, 等. 永磁无刷直流电机直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 101-109.
XIA Changliang, ZHANG Maohua, WANG Yingfa, et al. Permanent magnet brushless DC motor direct torque control [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 101-109.
- [16] OZTURK S B, TOLİYAT H A. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2011, 16(2): 351-360.
- [17] 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, 2006: 132-163.
- [18] 周贝贝, 苏少平, 徐会风, 等. 基于幂次趋近律滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制系统研究 [J]. 微电机, 2019, 52(5): 27-32.
ZHOU Beibei, SU Shaoping, XU Huifeng, et al. Research on sensorless control system of brushless DC motor based on power reaching law sliding mode observer [J]. Micromotors, 2019, 52(5): 27-32.
- [19] 曹建波, 曹秉刚, 王斌, 等. 电动车用无刷直流电机无位置传感器控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 4(5): 597-601.
CAO Jianbo, CAO Binggang, WANG Bin, et al. Research on position sensorless control of brushless DC motor for electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(5): 597-601.
- [20] 贾洪平, 贺益康. 永磁同步电机直接转矩控制中零矢量的作用研究 [J]. 电气传动, 2006, 4: 13-16, 29.
JIA Hongping, HE Yikang. Study on the effect of zero vector in direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Drive, 2006, 4: 13-16, 29.

[本刊相关文献链接]

- 程祎, 杜钦君, 张铭, 等. 三次谐波抑制的五相永磁电机容错控制策略及仿真分析. 2020, 54(2): 95-102, 136. [doi: 10.7652/xjtuxb202002012]
- 程勇, 毕训训, 张怡龙, 等. 结合随机空间矢量脉宽调制的静止无功发生器双序控制策略. 2019, 53(12): 120-130. [doi: 10.7652/xjtuxb201912016]
- 左曙光, 刘明田, 胡胜龙. 考虑铁芯磁饱和的开关磁阻电机电感及转矩解析建模. 2019, 53(7): 118-125, 143. [doi: 10.7652/xjtuxb201907017]
- 张岩岩, 耿海鹏, 周健, 等. 永磁同步电机转子偏心磁场解析计算. 2019, 53(2): 96-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201902013]
- 杨明磊, 邓兆祥, 张河山, 等. 电动汽车永磁轮毂电机磁场非线性解析计算方法. 2019, 53(2): 104-112. [doi: 10.7652/xjtuxb201902014]
- 谢颖, 张晓明, 华邦杰, 等. 并列式混合励磁复合电机的设计及其磁场调节特性. 2019, 53(2): 113-120. [doi: 10.7652/xjtuxb201902015]
- 马世伦, 张学义, 耿慧慧, 等. 电动汽车新型永磁同步电机的非均匀气隙建模及性能分析. 2019, 53(1): 70-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201901009]
- 刘洋, 左曙光, 邓文哲. 含辅助槽轴向永磁电机的电磁力波分析及抑制. 2019, 53(1): 77-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201901010]
- 左曙光, 张耀丹, 钟鸿敏, 等. 爪极发电机转子结构对电磁力谐波和振动噪声的影响分析. 2018, 52(3): 111-118. [doi: 10.7652/xjtuxb201803015]
- 杨金歌, 邓兆祥, 周忆, 等. 车用永磁轮毂电机解析建模与齿槽转矩削弱. 2018, 52(1): 84-91. [doi: 10.7652/xjtuxb201801013]
- 顾万里, 胡云峰, 张森, 等. 有刷直流电机自适应滑模控制器设计与实验. 2017, 51(9): 112-117. [doi: 10.7652/xjtuxb201709016]
- 左曙光, 张耀丹, 阎礁, 等. 考虑定子各向异性的永磁同步电机振动噪声优化. 2017, 51(5): 60-68. [doi: 10.7652/xjtuxb201705010]

(编辑 亢列梅)