

6-3-2020

Direct Torque Control for Brushless DC motor with Optimal Voltage Space Vector

Xianzhong Jian

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Shuangjie Qian

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Direct Torque Control for Brushless DC motor with Optimal Voltage Space Vector

Abstract

Abstract: The current freewheeling phenomenon and its causation of torque ripple were analysed. *With the relationship between rotor and coil position, the traditional selection rules of voltage space vector were modified. To effectively control the freewheeling current, two different voltage space vector under the three-phase conduction model was proposed, making current keep close to the ideal curve and inhibit torque ripple.* For speed adjustment, the Pang-Pang control was carried out after flow stage. The simulation model was carried out under the Simulink environment. The simulation results show that the proposed voltage space vector can effectively adjust the freewheeling current at the whole speed range and control the torque directly so that the percentage of torque ripple can be controlled below 8%.

Keywords

brushless dc motor, the freewheeling current, voltage space vector, simulation modeling

Recommended Citation

Jian Xianzhong, Qian Shuangjie. Direct Torque Control for Brushless DC motor with Optimal Voltage Space Vector[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 902-909.

电压矢量最优的无刷直流电机直接转矩控制

简献忠, 钱双杰

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院电气系, 上海 200093)

摘要: 分析了无刷直流电机换相时关断相电流的续流现象, 指出了其与转矩脉动的关系。根据转子位置和线圈的绕制方向, 修正了传统两相导通模式下电压空间矢量的选取原则。针对续流电流不可控的问题, 提出了三相导通模式下两种不同的电压空间矢量, 对续流电流进行增减控制, 使其下降速率不断趋近于理想曲线, 抑制了转矩脉动。为便于调速, 续流结束后, 切换为传统的电压矢量并进行 Pang-Pang 控制。在 Simulink 环境下进行了仿真建模。仿真结果表明: 不论低速还是高速, 所提出的电压空间矢量控制策略都能有效调整续流电流, 直接控制转矩, 使转矩脉动控制在 8% 以下。

关键词: 无刷直流电机; 电流续流; 电压空间矢量; 仿真建模

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 04-0902-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704027

Direct Torque Control for Brushless DC motor with Optimal Voltage Space Vector

Jian Xianzhong, Qian Shuangjie

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The current freewheeling phenomenon and its causation of torque ripple were analysed. *With the relationship between rotor and coil position, the traditional selection rules of voltage space vector were modified. To effectively control the freewheeling current, two different voltage space vector under the three-phase conduction model was proposed, making current keep close to the ideal curve and inhibit torque ripple.* For speed adjustment, the Pang-Pang control was carried out after flow stage. The simulation model was carried out under the Simulink environment. The simulation results show that the proposed voltage space vector can effectively adjust the freewheeling current at the whole speed range and control the torque directly so that the percentage of torque ripple can be controlled below 8%.

Keywords: brushless dc motor; the freewheeling current; voltage space vector; simulation modeling

引言

无刷直流电机(BLDCM)具有较高的功率密度、简单可靠的结构和优异的调速性能, 在一些对精度、可靠性要求高的领域获得了广泛的应用, 如航空航天、医疗器械、汽车电子、工业自动化等^[1]。

理想情况下, 无刷直流电机相电流为 120° 的方波, 输出恒定不变的转矩, 然而实际控制时, 相电流会发生扭曲失真, 造成输出转矩脉动和噪声干扰, 影响了电机控制精度和 EMC 电磁特性, 限制了其在高精度领域的应用。

相电流失真主要产生于电磁设计和控制环节。前者由不平衡的齿槽、磁阻和非理想反电动势产生。电磁环境的影响可以通过电机优化设计加以减小, 但受生产工艺的限制, 经过精心设计的电机还是不可避免地存在电磁场的不平衡, 且生产成本较



收稿日期: 2015-06-17 修回日期: 2015-08-12;
基金项目: 国家自然科学基金(41075019);
作者简介: 简献忠(1969-), 男, 湖南邵阳, 博士, 教授, 研究方向为新能源、电机控制及嵌入式技术;
钱双杰(1991-), 男, 上海松江, 硕士生, 研究方向为无刷直流电机及其控制。

<http://www.china-simulation.com>

高。后者控制过程主要受功率逆变器和线圈电感的限制, 在换相时相电流会发生续流现象, 造成了转矩抖动。经典文献[2]指出相电流续流导致的转矩脉动可以达到平均转矩的 50%, 是转矩脉动的主要来源, 故国内外相关文献着重研究逆变器相关控制策略, 控制相电流使其均值保持恒定不变, 减小无刷直流电机转矩脉动^[3-9]。

近些年针对无刷直流电机转矩脉动, 着重研究变母线电压和 PWM 调制策略。文献[3-6]在逆变器前加一级 Z 源变换器/SEPIC 变换器, 改变续流时直流母线电压的幅值, 抑制了转矩波动。但依靠电机本体参数计算续流时间, 参数的变化对其影响较大。文献[7-9]对关断相电流和开通相电流分别进行 PWM 调制, 使两换相电流变化速率趋于一致。但通过 PWM 来调整两换相电流需要精确的电流检测单元, 占空比易受负载和转速变化的影响。

直接转矩控制(DTC)通过定子磁链定向和选取逆变器相应的电压矢量, 直接对转矩进行实时控制, 具有较好的实时性。文献[10]将无刷直流电机两相导通三相六状态的运行方式赋予了空间矢量的定义, 并通过转矩滞环比较器选取相应的逆变器电压空间矢量, 使转矩抖动控制在滞环容差之内。文献[11]根据无刷直流电机的特性省去了磁链观测环节, 通过矢量方程分析了不同电压空间矢量下转矩的变换关系, 为无刷直流电机电压空间矢量的选取提供了理论依据。文献[12]通过滑膜观测计算电机转矩, 通过转矩滞环实现了同样的功能。

传统无刷直流电机直接转矩控制通过转矩滞环来抑制转矩脉动, 并没有涉及产生转矩脉动的续流环节。为此, 本文在分析无刷直流电机换相续流的基础上, 提出了通过特定的电压空间矢量来对换相时沿反并联二极管续流的关断相电流进行控制, 抑制了转矩脉动的产生。针对高速低速提出了不同的电压空间矢量, 使之在全速范围内都能抑制转矩脉动的产生, 避免了传统电压空间矢量在低速失效的问题。仿真实验表明: 所提出的直接转矩控制策略能在全速范围内有效抑制电机换相转矩脉动, 且系统结构简单, 易于实现。

1 无刷直流电机换相分析

为获得最大转矩电流比, 无刷直流电机常采用两相导通的运行模式, 运行一周有六种开关状态, 伴随六次换相过程。由于受线圈电感的影响, 换相时关断相电流并不立刻截至为零, 而是沿反并联二极管进行续流, 如图 1 所示。

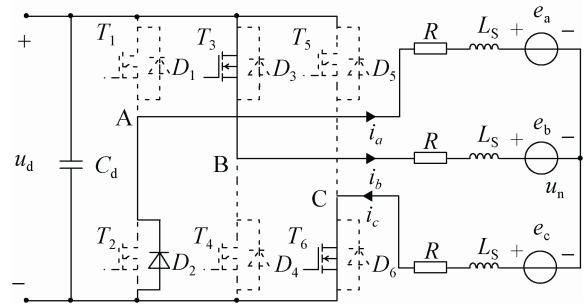


图 1 无刷直流电机换相示意图

Fig. 1 The phase commutation of BLDC Motor

不妨以电机从 AC 相导通切换到 BC 相导通为例, A 相电流关断时, 在相电感和反电动势作用下沿着反并联二极管 D_2 续流。此时, 电机存在三相导通的现象, 其中 A 为关断相, B 为开通相, C 为非换流相, 续流时端电压方程为:

$$\begin{cases} 0 = Ri_a + L_S \frac{di_a}{dt} + e_a + u_n \\ u_d = Ri_b + L_S \frac{di_b}{dt} + e_b + u_n \\ 0 = Ri_c + L_S \frac{di_c}{dt} + e_c + u_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 为直流母线电压; u_n 为定子中心节点电压; e_a, e_b, e_c 为相反电动势, 此种状态下 $e_a = e_b = E_m$, $e_c = -E_m$, 其中 E_m 为反电动势幅值。

现假定电机本体设计优良, 忽略定子电阻和二极管压降, 且认为换相时反电动势保持其幅值 E_m 不变, 有三相电流变换率和电磁转矩方程:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = -\frac{u_d}{3L_S} - \frac{2E_m}{3L_S} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{2u_d}{3L_S} - \frac{2E_m}{3L_S} \\ \frac{di_c}{dt} = -\frac{u_d}{3L_S} + \frac{4E_m}{3L_S} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_c = \frac{E_a i_a + E_b i_b + (-E_c) i_c}{\Omega} = k_T i_c \quad (3)$$

经典文献[2]指出：实际运行时，关断相 A 相电流和开通相 B 相电流变化率并不相等，而是随着电机转速不同有明显的差异，如图 2 所示。

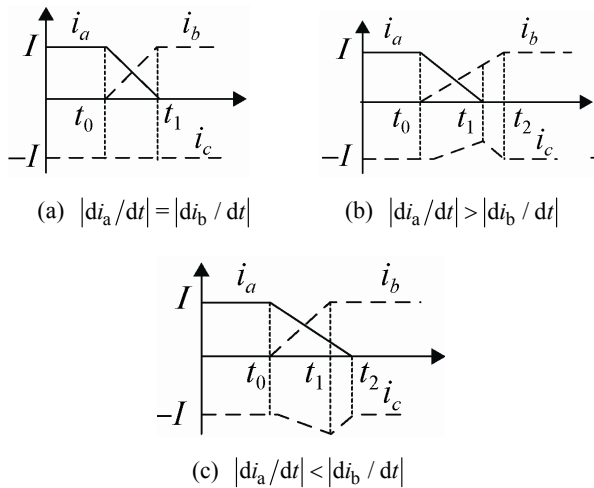


图 2 电流换相过程

Tab. 2 The process of phase commutation

图 2(a)中关断相 A 和开通相 B 有着相同的电流变化率，即 $|di_a/dt| = |di_b/dt|$ 。结合式(2)得 $u_d = 4E_m$ ，可知某一转速下，母线电压刚好能提供反电动势所需的电能。此时 $di_c/dt = 0$ ，由式(3)知没有转矩脉动产生；图 2(b)中，关断相电流变化率 A 大于开通相电流变化率 B，即 $|di_a/dt| > |di_b/dt|$ ，结合式(2)有 $u_d < 4E_m$ 。可知由于高速母线电压不能提供足够的电能使开通相电流快速上升，造成 $di_c/dt < 0$ ，使得转矩有变小的趋势；图 2(c)中，有 $|di_a/dt| < |di_b/dt|$ ，结合式(2)有 $u_d > 4E_m$ ，可见低速时反电动势显得过小，母线电压给开通相 B 提供了过多的电能，使其电流上升速率过快，最终造成 $di_c/dt > 0$ ，因而在低速时转矩有增大的趋势。

与传统电流调制法不同，本文通过选取合适的电压空间矢量，对续流电流进行控制，使关断相和开通相的电流变化率相同，维持非换流相电流保持不变，从转矩的产生环节抑制换相转矩的产生。转矩脉动抑制过后(也即换流期结束后)，切换为传统的电压矢量进行调速控制。

2 传统直接转矩控制策略的修正

无刷直流电机两两导通的运行模式使得稳态时存在某一相断开的情况，传统三位二进制数已不能描述电机的运行状态，故用六位二进制数来分别描述逆变器每个开关管的通断情况，因而电机旋转一周产生的六种运行状态可分别用电压空间矢量 $V_1(100001)$, $V_2(001001)$, $V_3(011000)$, $V_4(010010)$, $V_5(000110)$, $V_6(100100)$ 来表示，同时电压矢量将转子空间划分为六个扇区 I-VI。相关文献^[10,13-15]给出了转子在不同位置选取电压空间矢量的依据，其中转子位置由霍尔信号 H_a, H_b, H_c 给出，如表 1 所示。表 1 中左右两部分分别对应电机正转(逆时针)和反转(顺时针)。

表 1 常见的电压矢量选取表

Tab. 1 The common voltage vector selection table

H_a, H_b, H_c	V_x	H_a, H_b, H_c	V_x
101	V_1	101	V_4
100	V_2	100	V_5
110	V_3	110	V_6
010	V_4	010	V_1
011	V_5	011	V_2
001	V_6	001	V_3

需要指出的是：国内外研究无刷直流电机常采用 Simulink 中现有的 Demo 模型进行仿真验证。但该模型仅给出霍尔信号与反电动势间的对应关系，并没有给出转子位置方向和定子线圈的绕制相序，因而在不同文献霍尔信号和空间矢量有着不同的对应关系。以霍尔信号 101 为例，其对应的电压矢量 V_1 常被认为是使电机正向启动的第一个电压矢量，如表 1 所示。尽管表述有误，但由于仿真采用的都是统一的 Simulink 仿真模型，模型本身并没有出错，因而得到了正确的结果。故有必要从定子线圈的绕制相序出发，明确转子位置的方向和电压空间矢量选取的依据。

无刷直流电机定子侧线圈绕制方向及霍尔元件装配位置如图 3(a)所示。霍尔元件安装位置与竖

直方向呈 30° 夹角, 以使得转子无论在哪个扇区, 其磁场都能反映在霍尔信号的跳变上。同时为使在象平面有一致的空间位置分布, 电压矢量所在静止坐标系 ABC 分别与定子绕组 AX, BY, CZ 的对称中心相重合, 如图 3(b) 所示。

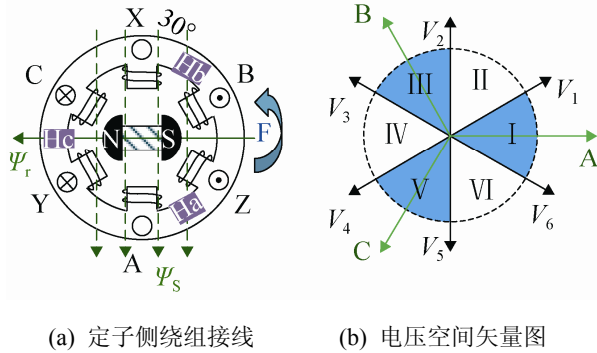


图 3 无刷直流电机空间矢量模型

Fig. 3 The space vector model of BLDC Motor

根据电机统一理论, 有电磁转矩方程:

$$T_e = k_m |\psi_s| |\psi_r| \sin \theta \quad (4)$$

其中定子磁链与电压矢量有如下关系:

$$\psi_s = \int (u_s - Ri_s) dt \quad (5)$$

由式(4)知: 电磁转矩与定子磁链 ψ_s 、转子磁链 ψ_r 及定转子磁链间负载角 θ 有关。对于转子为永磁体的无刷直流电机, 转子磁链 ψ_r 为恒值不变。同时由式(5)知, 若忽略定子电阻, 通过电压矢量 u_s 就可实现对定子磁链 ψ_s 的控制, 且二者同方向, 进而实现了对电磁转矩的控制。

现假定转子起始位置水平, 转子磁链矢量 ψ_r 呈水平向左, 对应扇区为 **IV** 和霍尔信号为 001, 如图 3(a) 所示。由式(4)可知, 当施加竖直向下的定子磁链 ψ_s 时, 无刷直流电机可获最大的电磁转矩。又由于电压矢量和定子磁链同方向, 故此时对应的电压矢量为 V_5 , 如图 3(b) 所示。同时, 结合图 3(a) 所示的绕组方向, 可知产生电压矢量 V_5 的绕组为 C 相和 B 相, 且电流从 C 相流入, 从 B 相流出。依此类推, 可得无刷直流电机两相导通模式下的电压空间矢量选择表及其相应的位置信号, 如表 2 所示。

表 2 电压矢量及其对应的位置信号

Tab. 2 The position of the voltage space vector

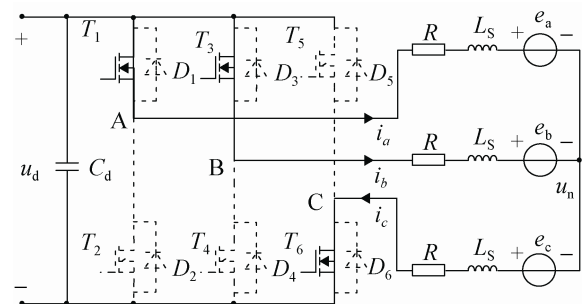
H_a, H_b, H_c	所处扇区	工作相	电压矢量
001	IV ($150^\circ \sim 210^\circ$)	C→B	V_5 (000110)
101	V ($210^\circ \sim 270^\circ$)	A→B	V_6 (100100)
100	VI ($270^\circ \sim 330^\circ$)	A→C	V_1 (100001)
110	I ($330^\circ \sim 30^\circ$)	B→C	V_2 (001001)
010	II ($30^\circ \sim 90^\circ$)	B→A	V_3 (011000)
011	III ($90^\circ \sim 150^\circ$)	C→A	V_4 (010010)

表 2 指出了转子位置的运动规律, 修正了传统文献中电压矢量选取不一致的问题, 理清霍尔信号与转子位置以及线圈绕组间的关系, 实现了与 simulink 电机模型内在参数的统一。同时根据上述规律, 电机在两相导通模式下可获得最大电磁转矩。

3 提出的直接转矩控制策略

传统无刷直流电机直接转矩控制下的电压空间矢量本质上是基于两相导通的运行模式。根据上文分析可知, 电机在这种模式下会发生续流现象, 产生了转矩脉动, 之后依靠转矩滞环将转矩维持在给定值附近, 可见传统直接转矩控制并没有从源头处理转矩脉动产生的问题。

为抑制换相时关断相产生的续流现象, 本文在换相时采用了三相运行模式下的电压矢量, 通过其对关断相和非换流相进行合适的通断控制, 使续流电流的下降速率趋于理想的状态, 抑制了转矩脉动的产生; 换相结束后采用传统的两相导通模式以减小开关损耗。以续流的 A 相电流为例, 所提出的三相运行模式如图 4, 图 5 所示。

图 4 使续流电流增强的电压矢量 V_2 (110)Fig. 4 Freewheeling current boosted by V_2 (110)

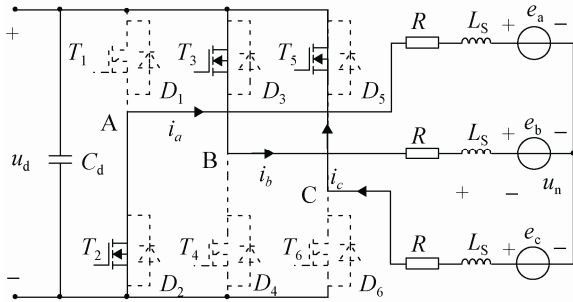
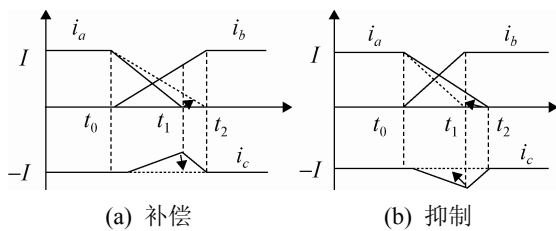


图 5 使续流电流减小的电压矢量 $V_4'(011)$

Fig. 5 Freewheeling current lessened by $V_4'(011)$

如上所述，换相时图 1 中关断相电流 A 沿下桥臂反并联二极管续流，其下降速率不受开关管的控制，随转速的变化而变化。为控制续流电流的下降速率，提出了如图 4, 5 所示的开关电路。图 4 中使原本断开的 A 相重新通电，相电流有上升的趋势，同时非换流相 C 相电流获得了补偿；图 5 中使 A 相电流接地以减小续流电流，同时使非换流相 C 接高电平，抑制非换流相电流增长的趋势，整体效果如图 6 红色虚线所示。



(a) 补偿 (b) 抑制

图 6 关断相续流电流的处理

Fig. 6 The process of the off-phase current

现通过矢量方程描述所提出的两种电压矢量对续流电流的影响，并得出通过合理地切换这两种电压矢量可使关断相电流的下降速率与开通相的电流上升速率相同，从而使非换流相电流保持原值不变，抑制了转矩脉动的生成。

对图 4 所示三相绕组列端电压方程有：

$$\begin{cases} u_A = u_d = R \frac{di_a}{dt} + L_S \frac{di_a}{dt} + e_a + u_n \\ u_B = u_d = R \frac{di_b}{dt} + L_S \frac{di_b}{dt} + e_b + u_n \\ u_C = 0 = R \frac{di_c}{dt} + L_S \frac{di_c}{dt} + e_c + u_n \end{cases} \quad (6)$$

由于电机定子侧绕组为星型联结，故三相电流矢量和为零，即：

$$\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} = 0 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得：此时三相导通模式下定子侧中心节点电压为：

$$u_n = \frac{2}{3}u_d - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \quad (8)$$

将式(8)返带回(6)式，并忽略定子电阻，可分别得到三相电流的变化率：

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_S}(u_d - u_n - e_a) = \frac{u_d}{3L_S} + \frac{e_b + e_c - 2e_a}{3L_S} \quad (9)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_S}(u_d - u_n - e_b) = \frac{u_d}{3L_S} + \frac{e_a + e_c - 2e_b}{3L_S} \quad (10)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_S}(-u_n - e_c) = -\frac{2u_d}{3L_S} + \frac{e_a + e_b - 2e_c}{3L_S} \quad (11)$$

对于图 5 可依据同样的方法列出其端电压方程，并得到其三相电流变换率：

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_S}(-u_n - e_a) = -\frac{2u_d}{3L_S} + \frac{e_b + e_c - 2e_a}{3L_S} \quad (12)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_S}(u_d - u_n - e_b) = \frac{u_d}{3L_S} + \frac{e_a + e_c - 2e_b}{3L_S} \quad (13)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_S}(u_d - u_n - e_c) = \frac{u_d}{3L_S} + \frac{e_a + e_b - 2e_c}{3L_S} \quad (14)$$

分别观察式(9)和式(12)，可知两式分别对关断相电流 A 有增强和减小的趋势。为使关断相电流不断趋近理想的条件，不妨假定在一段采样时间 DT 内执行式(9)以使电流上升，剩余 $(1-D)T$ 时间内执行式(12)以使电流减小，其中 D 为占空比。据此可得到采样时间内三相电流的平均变化率：

$$\left(\frac{di_a}{dt}\right)_{avg} = \frac{u_d(3D-2)}{3L_S} + \frac{e_b + e_c - 2e_a}{3L_S} \quad (15)$$

$$\left(\frac{di_b}{dt}\right)_{avg} = \frac{u_d}{3L_S} + \frac{e_a + e_c - 2e_b}{3L_S} \quad (16)$$

$$\left(\frac{di_c}{dt}\right)_{avg} = \frac{u_d(1-3D)}{3L_S} + \frac{e_a + e_b - 2e_c}{3L_S} \quad (17)$$

为抑制无刷直流电机换相转矩脉动，需使非换流相 C 相电流保持恒值不变，即满足：

$$\left(\frac{di_c}{dt}\right)_{avg} = \left(\frac{di_a}{dt}\right)_{avg} + \left(\frac{di_c}{dt}\right)_{avg} = 0 \quad (18)$$

联立式(15)~(18)可求得两种电压矢量作用时间长短之间的关系 D 为:

$$D = \frac{e_a + e_b - 2e_c}{3u_d} + \frac{1}{3} = \frac{4E_m}{3u_d} + \frac{1}{3} \quad (19)$$

由式(19)可知, 在母线电压一定的情况下, 时间关系 D 只与反电动势的幅值 E_m 有关, 虽然反电动势无法直接获得, 但可通过电机的电压电流参数辨识得到:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_A - u_n \\ u_B - u_n \\ u_C - u_n \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (20)$$

结合式(19)和(20)可知, 只需检测定子端电压和三相电流即可确定所提出的两种电压空间矢量的作用时间, 通过合理的交替运用来控制关断相的续流电流, 使得关断相电流与开通相电流斜率相匹配, 进而使非换流相电流没有畸变, 消除了转矩脉动。根据同样的原理, 在电机的每个换相期间, 都有相应的两个电压空间矢量(均为非零矢量)来对续流的电流进行控制。根据表 2 中所述的工作相, 引入相应的电压空间矢量, 如表 3 所示。

表 3 三相运行模式下的电压矢量选取表

工作相	续流电流	续流期 $V_x(ABC)$	非续流期
C→B	+1/-1	$V_5'(001)/V_1'(100)$	$V_5(000110)$
A→B	+1/-1	$V_6'(101)/V_2'(110)$	$V_6(100100)$
A→C	+1/-1	$V_1'(100)/V_3'(010)$	$V_1(100001)$
B→C	+1/-1	$V_2'(110)/V_4'(011)$	$V_2(001001)$
B→A	+1/-1	$V_3'(101)/V_5'(001)$	$V_3(011000)$
C→A	+1/-1	$V_4'(011)/V_6'(101)$	$V_4(010010)$

需要指出的是, 通过电压电流检测来选择所需的电压空间矢量比传统通过转矩反馈法有较大的优势, 这是因为传统反馈法需要瞬时电磁转矩, 不可避免地引用式(2)来计算转矩大小, 从而引入了续流电流的影响, 计算出的转矩往往带有脉动的分量。而本文的控制方法不需要计算转矩, 采用的电压空间矢量本身就对续流电流进行了控制, 进而直接对转矩进行了控制。

4 仿真实验

根据上述分析在 simulink 中搭建仿真模型: 在电机换相初始时刻, 引入两个三相运行模式下的电压矢量, 分别对续流电流进行增减控制; 当续流结束时(即脉动消除后), 切换到传统两相运行模式下的电压矢量, 同时为便于调速对此进行 Pang-Pang 控制。由于本文所提的方法需要在不同的电压矢量间进行切换, 为此需要明确续流期。以往的文献常采用公式法计算续流时间, 计算出的值易受电机电感电流参数变化的影响。通过观察续流路径可知, 当续流电流还未减小到零时, 施加本文所提出的两个电压矢量, 其端电压不是 0 就是母线电压 u_d , 因而可以通过检测端电压来确定续流期是否结束, 具体的控制逻辑如图 7 所示, 其中霍尔信号用以确定扇区和转子位置。

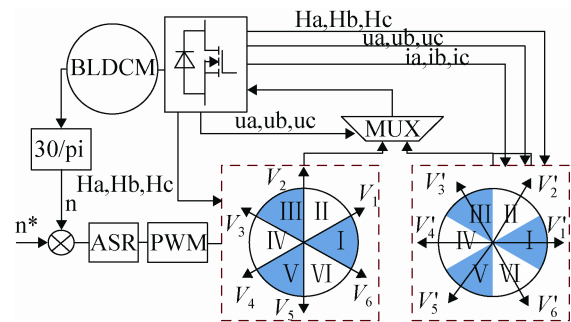


图 7 无刷直流电机控制系统框图

Fig. 7 The block diagram of the BLDC Motor

图 8 为电机带 5N·M 负载在 1 500 rpm 转速下运行的非换流相电流波形图。虚线左面是在传统电压矢量控制下的电流波形图, 可见电流平顶中央处有较明显的内凹点, 其原因正如图 2 中所述的那样, 关断相电流(即续流电流)速率与开通相电流速率不一致造成非换流相电流发生畸变所致, 使非换流相电流均值下降, 造成了平均转矩的降低。虚线右面是在所提出的两种电压矢量交替控制续流电流下的波形图, 这里为获得良好的效果, 采样频率为 20 kHz。从图中可见, 电流平顶中心处较平整, 补偿了之前由续流电流造成的内凹的现象, 同时转

矩维持了恒定。从测量可知，转矩脉动由平均转矩的 39% 下降到 8% 左右，抑制转矩效果明显。

反电动势较小，B 相电流上升较快，需相应加快 A 相电流的下降速率。

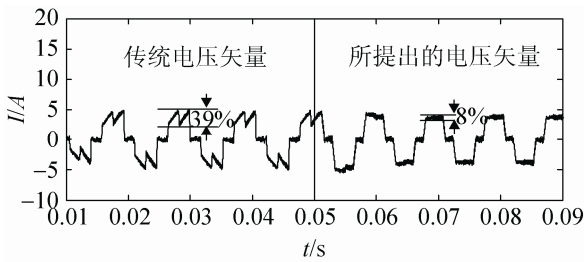
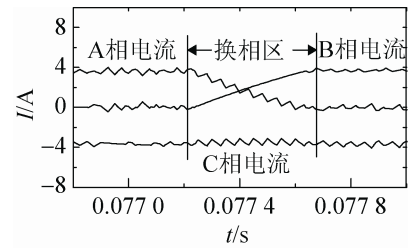
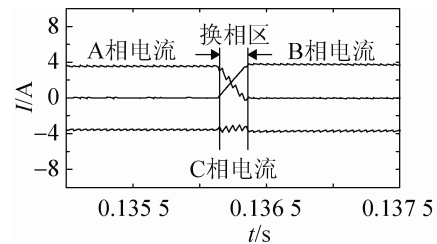


图 8 高速下非换流相电流脉动大小对比
Fig. 8 The ripple contrast of phase current at high speed

图 9 为电机带相同负载在 300 rpm 转速下运行的电流波形。虚线左侧施加传统的电压矢量，由于其未对续流电流进行控制，造成非换流相电流有较大的脉动分量；虚线右侧则在续流期引入了表 3 所示的电压矢量对续流电流进行控制，使得电流平顶处较平整。通过测量可知：使转矩脉动从平均转矩的 34% 减小到 5.5% 左右。值得注意的是：由于低速时换相次数少，续流电流受电压矢量的作用时间较长，因而效果更明显。



(a) 高速



(b) 低速

图 10 换相时三相电流波形图

Fig. 10 Current waveforms at the phase commutation

值得注意的是：不论高速还是低速，只要电机处于相同的换相期，所施加的两种电压矢量是固定不变的，唯一需要改变的是这两种电压矢量的交替时间，时间关系可以根据式(19)加以确定。该方法不需外置的 DC-DC 变换器来改变母线电压幅值，也没有复杂的电机参数辨识，实现容易。

5 结论

本文从电流续流的角度分析了无刷直流电机换相转矩脉动产生的原因，并对传统两相运行模式下电压矢量的选取策略进行了修正，并指出该模式下存在续流电流不受控制的问题。提出了三相导通模式下最优的电压空间矢量，通过微分方程计算了最优电压矢量的作用时间，进而对续流电流进行控制，使之趋于稳定，抑制了转矩脉动。在 MATLAB/Simulink 下进行了仿真实验，仿真表明采用所提出的电压矢量，无论在低速还是高速，都能得到较平整的相电流波形，并从三相电流换相的角度阐述了电压矢量的作用效果。本文所提的电压

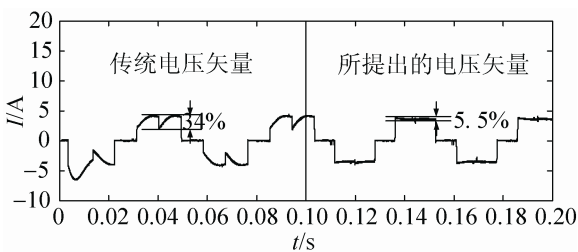


图 9 低速下非换流相电流脉动大小对比
Fig. 9 The ripple contrast of phase current at low speed

现从换相的角度来阐述电机在高速和低速时不同的电流变化波形，如图 10 所示。高速时反电动势较大，在给开通相施加电压时，其电流上升较慢，换相期较长，如图 10(a)中 B 相电流所示。为使关断相电流下降速率与开通相上升速率相平衡，施加了本文所提的两种电压矢量，它使 B 相电流量率保持不变，同时使 A 相电流不断趋近于 B 相电流，最终使非换相 C 相电流没有明显的波动，抑制了转矩脉动。低速时有相似的情况，由于低速

空间矢量原理清晰, 硬件简单, 实现容易, 具有较好的可操作性。

参考文献:

- [1] 夏鲲, 徐鑫悦, 丁晓波, 等. 永磁无刷直流电动机转矩脉动抑制方法研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1417-1423. (Xia Kun, Xu Xinyue, Ding Xiaobo, et al. Overview of Reducing Torque Ripple for brushless DC Motor [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2014, 26(7): 1417-1423.)
- [2] Carlson R, Michel L-M, Fagundes J C. Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 1992, 28(3): 632-638.
- [3] 夏鲲, 杨益华, 杨淑英, 等. 基于 Z 源变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2540-2545. (Xia Kun, Yang Yihua, Yang Shuying, et al. Torque Ripple Reduction of BLDC Motor Drives Based on Z-Source Converter [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2013, 25(11): 2540-2545.)
- [4] Shi Tingna, Guo Yuntao, Song Peng, et al. A New Approach of Minimizing Commutation Torque Ripple for Brushless DC Motor Based on DC-DC Converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2010, 57(10): 3483-3490.
- [5] Zhao Biao, Yu Qingguang, Leng Zhiwei, et al. Switched Z-source Isolated Bidirectional DC-DC Converter and Its Phase-Shifting Shoot-Through Bivariate Coordinated Control Strategy [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2012, 59(12): 4657-4670.
- [6] Xia Changliang, Li Xinmin. Z-source Inverter Based Approach to the Zero-crossing Point Detection of Back EMF for Sensorless Brushless DC Motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2015, 30(3): 1488-1498.
- [7] 李自成, 程善美, 蔡凯, 等. 反电动势过零检测无刷直流电机转子位置新方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 52-57. (Li Zicheng, Chen Shanmei, Cai Kai, et al. A novel scheme of sensing rotor position of BLDCM based on the zero-crossing of back EMF [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2009, 24(7): 52-57.)
- [8] 周美兰, 高肇明, 吴晓刚, 等. 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(07): 15-21. (Zhou Meilan, Gao Zhaoming, Wu Xiaogang, et al. Influence of five kinds of PWM on commutation torque ripples in BLDCM control system [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 15-21.)
- [9] Lu Haifeng, Zhang Lei, Qu Wenlong. A New Torque Control Method for Torque Ripple Minimization of BLDC Motors with Un-ideal Back EMF [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2008, 23(2): 950-958.
- [10] 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): 104-109. (Xia Changliang, Zhang Maohua, Wang Yingfa, et al. The Direct Torque Control for Permanent Magnet Brushless DC Motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 104-109.)
- [11] 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 Jianfei, Hu Yuwen. Direct Torque Control of Brushless DC Motor Without Flux Linkage Observation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 90-95.)
- [12] 安群涛, 孙立志, 刘超, 等. 无刷直流电机的磁链自直接转矩控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 86-92. (An Quntao, Sun Lizhi, Liu Chao, et al. Flux Linkage Self-control Based Direct Torque Control of Brushless DC Motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(12): 86-92.)
- [13] 林海, 严卫生, 杨颖, 等. 无刷直流电机直接转矩控制系统分析 [J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(1): 91-95. (Lin Hai, Yan Weisheng, Yang Ying, et al. System analysis of the Direct Torque Control of Brushless DC Motors [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(1): 91-95.)
- [14] 董乐, 呼明亮, 邱建琪. 永磁无刷直流电机直接转矩控制策略的比较研究 [J]. 轻工机械, 2013, 31(5): 59-63. (Dong Yue, Hu Mingliang, Qiu Jianqi. The Direct Torque Control Strategy Contrast for Permanent Magnet Brushless DC Motors [J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(5): 59-63.)
- [15] 梅亮, 刘景林, 董亮辉, 等. 基于 Simulink 无刷直流电机直接转矩控制研究 [J]. 微电机, 2013, 46(6): 62-66. (Mei Liang, Liu Jinghui, Dong Lianghui, et al. Study of Brushless DC Motors DTC Based on Simulink [J]. MICROMOTORS, 2013, 46(6): 62-66.)