

# 基于定子磁势闭环控制的无刷直流电机 空间矢量无位置传感器起动新方法

马晓涵 邓智泉 王晓琳

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:**针对无位置传感器的永磁无刷直流电机开环起动转矩脉动大、起动成功率低的问题,分析了基于三三导通三相逆变器的电压空间矢量调制(Space vector pulse width modulation, SVPWM)控制,并推导了三相星形连接下的定子合成磁势矢量与电流最大相磁势矢量的关系。在此基础上,提出了一种在前级增加定子磁势调节的起动控制策略并对其进行简化。该起动算法不依赖于电机转子凸极性和初始位置,并有效控制了起动电流大小和抑制了起动转矩脉动,电机开环起动性能比传统的升频起动显著提高。最后通过仿真和实验验证了该起动控制算法的有效性。

**关键词:**无刷直流电机;无位置传感器起动;电压空间矢量调制;定子磁势闭环

**中图分类号:**TM301 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)01-0044-07

## New Sensorless Starting Method of BLDCM Based on SVPWM and Stator Magnetomotive Force Control

Ma Xiaohan, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics &  
Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In open-loop starting process of brushless DC motor (BLDCM) without position sensors, pulsations of torque and speed are large and motor cannot even start successfully. To solve those problems, space vector pulse width modulation (SVPWM) control schema of three-phase inverter employing 180° switch-on mode is analyzed and applied to BLDCM. Moreover, relationship between the composed stator magnetomotive force and current maximum phase's magnetomotive force is derived with windings in Y connection. Hence, a new starting control method combing stator magnetomotive force regulation with SVPWM is proposed. Furthermore, calculation of the composed stator magnetomotive force is simplified. The proposed starting method is independent on saliency or initial position of rotor. It can also effectively suppress ripples of speed and torque, so its starting performance is greatly improved compared with conventional variable-frequency open-loop start. Finally, validity of the presented method is verified by simulation and experiment.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM); sensorless start; space vector pulse width modulation (SVPWM); stator magnetomotive force regulation

永磁无刷直流电机 (Brushless DC motor, BLDCM) 因具有结构简单、无换向火花、调速性能好、运行可靠且无励磁损耗、维护方便、高效节能等一系列优点得到广泛应用。电机的正确运行需要

位置传感器提供转子永磁体的位置信号,而位置传感器的存在会带来许多缺点。如果能够不采用位置传感器,而是通过测量逆变器和电机某些电参量获得位置和速度的信息,将大大减少电机的制造成

本,使电机结构更简单、调试更容易、工作可靠性更高。因此,无位置传感器控制技术对永磁无刷直流电机具有重要的应用前景和实际价值。

通过检测相反电势的过零点信息电机无位置传感器运行的方法由于简单可行,目前得到广泛应用。但是,电机在静止或转速较低时,由于反电势为零或较低,无法通过检测准确的反电势过零点来判定转子的位置,故需采用特殊的起动方法使电机运转到可以稳定获得反电势过零点的速度。过去三十年,学者研究了无刷直流电机的无位置传感器起动,并提出了较为成熟的控制算法,主要有开环起动和带位置估算的闭环起动两类。

日本学者提出了无刷直流电机外同步的开环起动方法<sup>[1]</sup>,即给电机外施一个由低频到高频加速的外同步信号,使电机从静止逐步加速运转,当反电势建立起来后,切换为自同步运行方式。此后,各种类似的开环起动方法相继由学者提出。文献[2~4]采用三段式起动方法,即预定位一外同步加速一切换到自同步运行,其关键技术是建立离线换相时间表,实际应用需进行多次调试来拟合最佳换相时刻曲线。文献[5]通过采样拟合出母线电压和换相时刻之间的 3 次样条插值函数起动,方法比较繁琐且仅适用于固定负载的场合。开环起动方法由于没有位置反馈,因而起动性能较差,起动过程电机抖动较为严重,甚至会导致起动失败。

针对开环起动的弊端,日本汉阳大学学者 G H Jang, J H Park, J H Chang 提出了基于电机定子铁心饱和效应的位置闭环起动方法<sup>[6]</sup>。此后许多学者对电感法起动进行了研究<sup>[7-11]</sup>,该方法相比开环起动有较大的性能提升,但是依赖电机的凸极性和饱和性,且不同电机的电气时间常数不同,因而最佳电流采样时间也需根据实际调整。

相较带位置估算的闭环起动方法,开环起动对电机结构没有特殊要求,具有更广的适用范围。研究改善开环起动性能,使其能尽可能地与闭环起动性能相接近,具有重要的意义。文献[12]以二二导通矢量作为基本矢量,采用空间电压矢量调制(Space vector pulse width modulation, SVPWM)控制逆变器功率管的通断,通过选择合适的电压矢量开通时间,使磁链以圆形轨迹连续移动,保证电机起动过程的稳定和可靠,并结合电流两点式调节器,极大地优化了开环起动性能。然而,采用二二导通矢量作为基本矢量实现比较困难也没有必要,

且电流两点式调节器本身跳变剧烈,超调严重,从而导致电机转矩脉动严重,并没有发挥 SVPWM 方法下连续旋转矢量的优越性。

本文将进一步深入分析 SVPWM 算法在 BLDCM 起动中的问题,提出一种新的简单的定子磁势闭环起动控制策略,并通过仿真和实验验证该算法的正确性和有效性。

## 1 基本原理

### 1.1 基于 SVPWM 的无位置起动

将三相全桥逆变器不同开关状态下相应的端电压代入式(1),则可得到 8 个基本空间电压矢量  $U_r (r=0\sim 7)$ ,它包括 6 个有效空间矢量  $U_1\sim U_6$  和 2 个零矢量  $U_0, U_7$

$$U_r = \frac{2}{3}(u_A + e^{j\frac{2}{3}\pi}u_B + e^{j\frac{4}{3}\pi}u_C) \quad (1)$$

式中: $u_A, u_B, u_C$  分别为三相端电压幅值。

在一个开关周期内,平面上任一空间电压矢量  $U_r$  的作用效果可以由与其相邻的基本矢量和零矢量合成,各矢量的作用时间表达式为

$$\begin{cases} T_x = \frac{\sqrt{3}UT_s}{U_d} \sin(\frac{S_n}{3}\pi - \theta) \\ T_y = \frac{\sqrt{3}UT_s}{U_d} \sin(\theta - \frac{S_n - 1}{3}\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中:扇区号  $S_n=1\sim 6$ ;  $T_x$  和  $T_y$  为相邻两基本矢量作用时间;零矢量作用时间为  $T_0 = T_s - T_x - T_y$ ;  $T_s$  为控制周期。

调节零矢量的作用时间  $T_0$ ,可以调节合成电压矢量的幅值。当  $T_0=0$  时,合成电压矢量幅值最大,其轨迹是边长为  $2/3U_d$  的正六边形。

基于以上关于三相逆变器空间矢量的分析,将其应用到 BLDCM 的无位置开环起动控制,通过离线给定角度连续增加的电压空间矢量将 BLDCM 拖入同步,而电压空间矢量变化的快慢和方向决定了起动速度的快慢和方向。与经典的三段式升频起动方法不同,SVPWM 方法用角度连续增加的磁势矢量取代  $60^\circ$  阶跃变化的矢量,不仅能有效地改善电机起动性能,而且能提高无位置传感器起动的成功率。

### 1.2 定子磁势闭环控制策略

然而,SVPWM 起动是直接离线给出连续旋转的空间电压矢量,本质上属于定子磁势开环的算法,而电机的电磁转矩与定子磁势相关,为确保电机起动更加平稳,提出了在 SVPWM 起动算法前级加定子磁势闭环控制的控制策略。

永磁电机转子磁势可近似认为恒定,由式(3)可知,当定子磁势夹角保持不变时,电磁转矩只与定子磁势成正比。加入定子磁势闭环控制器,能够直接控制电磁转矩,从而减小转矩脉动。结合空间电压矢量调制的方法,在SVPWM前级加入一个针对定子磁势的比例-积分(Proportion integration, PI)控制器,PI输出值与电压矢量幅值成正比,可作为SVPWM模块中电压矢量幅值给定,这样就实现了控制电机定子磁势

$$T_{em} \propto F_s \cdot F_R \cdot \sin\theta \quad (3)$$

式中:  $T_{em}$  为电磁转矩;  $F_s$  为定子合成磁势;  $F_R$  为转子永磁体磁势;  $\theta$  为定转子磁势的夹角。

本文以开关状态  $S_4(100)$  为例分析。此时,  $A$  相电流绝对值最大,取  $A$  相磁势所在位置为  $x$  轴,其垂直方向为  $y$  轴,如图1所示。

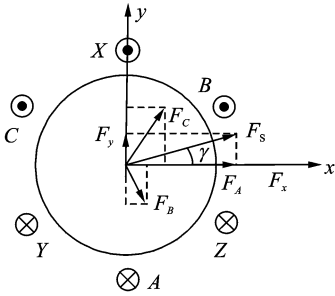


图1 定子磁势示意图

Fig. 1 Magnetomotive force of stator windings

三相定子磁势表达式为

$$\begin{cases} F_A = i_A N_A \\ F_B = i_B N_B \\ F_C = i_C N_C \end{cases} \quad (4)$$

式中绕组匝数  $N_A = N_B = N_C = N$ 。

那么,根据电机绕组的空间  $120^\circ$  对称分布,合成定子三相绕组磁势,并向  $x$  轴和  $y$  轴方向分解,得

$$\begin{cases} F_x = i_A N + i_B N \sin 30^\circ + i_C N \sin 30^\circ \\ F_y = i_C N \cos 30^\circ - i_B N \cos 30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

又电机绕组采用三相星形连接,相电流关系满足

$$i_A = i_B + i_C \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),得到

$$\begin{cases} F_x = \frac{3}{2} i_A N \\ F_y = \frac{\sqrt{3}}{2} (i_C - i_B) N \\ F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \gamma = \arctan \frac{(i_C - i_B)}{\sqrt{3} i_A} \end{cases} \quad (7)$$

由以上推导,若要对定子合成磁势PI闭环调节,从三相采样电流变换到定子合成磁势需要较为复杂繁琐的运算。下面对其进行分析,以简化求解过程。

由于  $|i_C| < |i_A|$  且  $|i_B| < |i_A|$ , 可得到  $-30^\circ < \gamma < 30^\circ$ 。在  $A$  相电流正向最大的时间段内,  $B, C$  相电流反向,变化趋势分别从最大降为0和从0升至最大。在此期间,三相定子合成磁势与  $A$  相定子磁势夹角从  $-30^\circ$  变到  $30^\circ$ ,幅值在与  $\sqrt{3} i_A N \sim 1.5 i_A N$  之间变化。所以,在  $A$  相电流幅值最大区间,可以用1.6倍  $A$  相定子磁势等效代替三相定子合成磁势平均值。以此类推,可以取电流幅值最大的那一相的1.6倍定子磁势作为磁势PI调节模块的磁势反馈,既能使控制算法的简单化,又能实现磁势闭环调节。图2为该算法的起动控制框图。

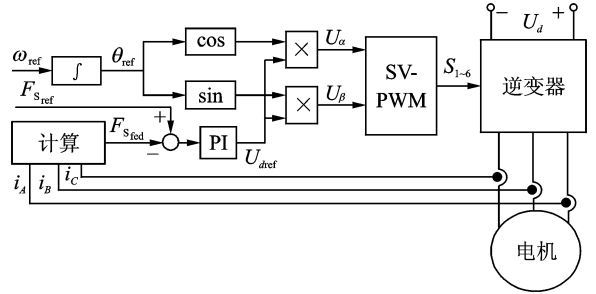


图2 无位置传感器起动控制框图

Fig. 2 Control block diagram of sensorless start

### 1.3 起动参数

电机提供的电磁转矩  $T_{em1} \propto F_s \cdot F_R \cdot \sin\theta$  所示,而电机拖动负载起动过程实际所需的电磁转矩为  $T_{em2} = T_L + J\alpha$ ,两者平均值相等才有定转子磁势同步旋转。转子永磁磁势一定,电机带额定负载且转动惯量恒定的情况下:

(1) 若定子磁势  $F_s$  一定,当外同步角加速度  $\alpha$  较小时,相当于需要的电磁转矩较小,那么定转子磁势平均夹角  $\theta$  稳定在较小值,远离同步电机的临界稳定点  $90^\circ$  夹角位置,可以提高电机起动的成功率。

(2) 若外同步角加速度  $\alpha$  一定,当给定定子磁势  $F_s$  较大,则平均夹角  $\theta$  能稳定在较小值,远离同步电机的临界稳定点  $90^\circ$  夹角位置,可以提高电机起动的成功率。

虽然,  $F_s$  较大或者  $\alpha$  较小可以提高起动的成功率,但是对起动性能也有一定影响。在成功起动的前提下,若两者相差较大,会导致电机的抖动。

综上所述,电机带恒定负载起动时,应该综合

考虑起动成功率与起动性能这两个矛盾的因素,在保证起动成功的基础上,尽可能地减小给定定子磁势  $F_s$  或增大角加速度  $\alpha$ ,以降低电机转速转矩的脉动,提高起动性能。

## 2 仿真分析

### 2.1 样机参数

在 Matlab/Simulink 中搭建实验样机模型,对基于 SVPWM 无位置传感器起动的控制算法进行仿真,采用 PI 调节器对电机定子磁势闭环控制,并将 PI 输出作为 SVPWM 算法中的等效直流母线电压。表 1 为仿真和实验样机参数。

表 1 样机参数

Tab. 1 Parameters of prototype

参数	数值
$U_N/V$	48
$T_N/(N \cdot m)$	0.96
$n_N/(r \cdot \min^{-1})$	4 800
$p$	4
$R_s/\Omega$	0.2
$I_N/A$	10
$k_e/(V \cdot r \cdot \min^{-1})$	0.004 9
$L_s/mH$	0.1
$J/(kg \cdot m^2)$	0.001 6

### 2.2 对比分析

电机以最大电流  $i = 20$  A、带额定负载转矩  $T_L = 0.96$  N·m 起动,外施定子磁势的角加速度为  $\alpha = 150$  rad·s<sup>-2</sup>,转子在 0.33 s 内加速到 480 r/min。当电机定转子初始夹角为  $\theta = 0^\circ$  时,将提出的基于磁势调节的 SVPWM 起动算法与传统的升频起动算法进行仿真对比研究。

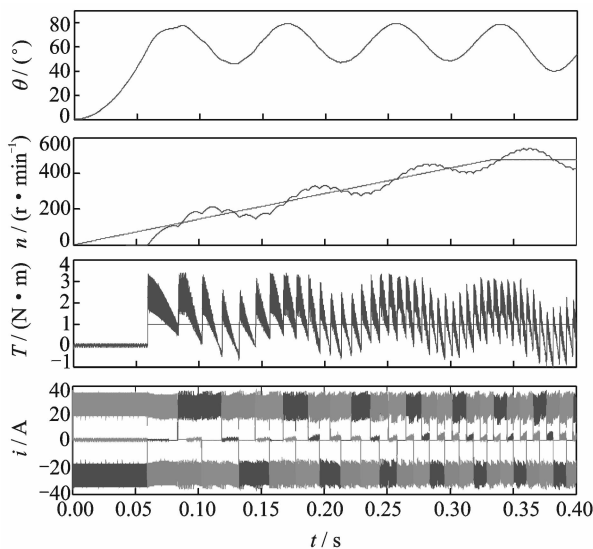
图 3 为传统升频起动和 SVPWM 起动下的仿真波形,表 2 为仿真数据结果对比。仿真结果验证了基于 SVPWM 和定子合成磁势控制的起动算法,使得转速、转矩的脉动大大降低,从而显著提高无位置传感器起动电机的成功率。

表 2 转速、转矩脉动对比

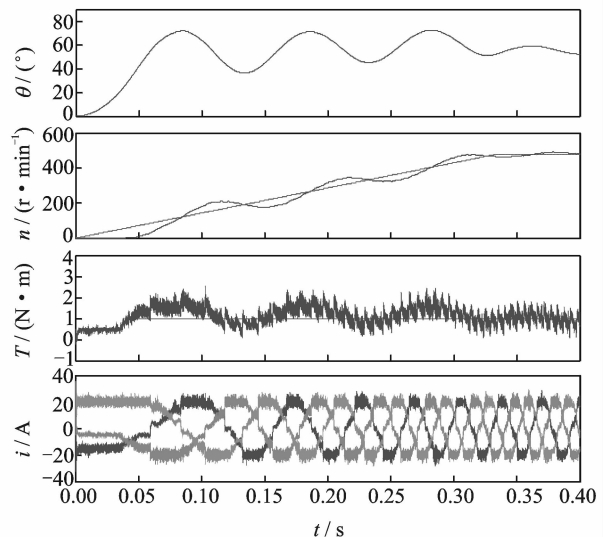
Tab. 2 Pulsations of speed and torque

名称	升频起动	SVPWM 起动
$ \Delta n_{\max} /(r \cdot \min^{-1})$	134	30
$ \Delta T_{\max} /(N \cdot m)$	2.8	1.0

图 4 为电机起动过程  $\alpha\beta$  坐标系下的定子磁链轨迹。可见,采用定子合成磁势闭环和 SVPWM 控制时,电机的磁链轨迹近似为圆形,从而抑制了由于磁链突变带来的转矩脉动。



(a) 传统升频起动



(b) SVPWM 起动

图 3 两种起动模式下定转子磁势夹角、转速、转矩及相电流波形

Fig. 3 Waveforms of angle between stator and rotor, speed, torque and current with two starting methods

### 2.3 参数影响

保持负载转矩  $T_L = 0.96$  N·m, 给定电流  $i_{\max} = 15$  A 不变, 改变外同步给定角加速度  $\alpha = 100$  和  $400$  rad/s<sup>2</sup>, 转子实际角度与给定角度、实际转速与给定转速、电磁转矩与负载转矩波形如图

5 所示。

当电机角加速度给定值  $\alpha$  较大时, 电机所需转矩较大, 则  $\theta$  稳定值接近于  $90^\circ$ , 一旦定转子夹角大于  $90^\circ$ , 电机就运行于不稳定区域, 因而起动容易失败。如图 5(b) 所示, 当定转子夹角超过  $90^\circ$  后,

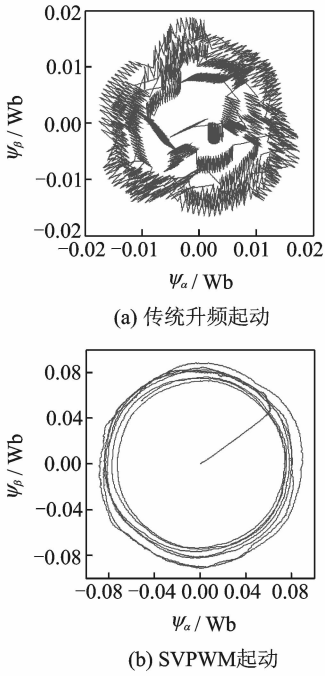


图4 两种起动模式下定子磁链轨迹  
Fig. 4 Stator flux trace with two starting methods

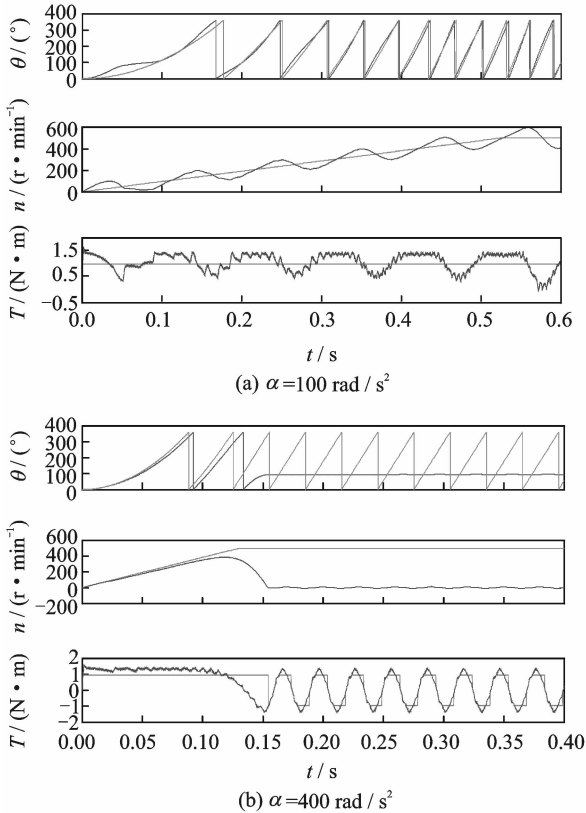


图5 改变角加速度  $\alpha$  的起动波形  
Fig. 5 Starting waveforms with different radial acceleration

机起动性能得到改善。

保持负载转矩  $T_L = 0.96 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 外同步给定角加速度  $\alpha = 200 \text{ rad/s}^2$ , 改变给定电流  $i_{\max} = 13$  和  $20 \text{ A}$ , 图6所示为转子实际角度与给定角度、实际转速与给定转速、电磁转矩与负载转矩波形。

当电机定子磁势给定值  $F_s$  较小时, 电机能提供的最大转矩较小, 则  $\theta$  稳定值接近于  $90^\circ$ , 一旦定子夹角大于  $90^\circ$ , 电机就运行于不稳定区域, 因而起动容易失败。如图6(b)所示, 当定子夹角超过  $90^\circ$  后, 电机迅速减至零速附近抖动。进一步仿真结果显示, 随着给定定子磁势增大, 转矩、转速的脉动相应增大, 电机起动性能得到改变差。

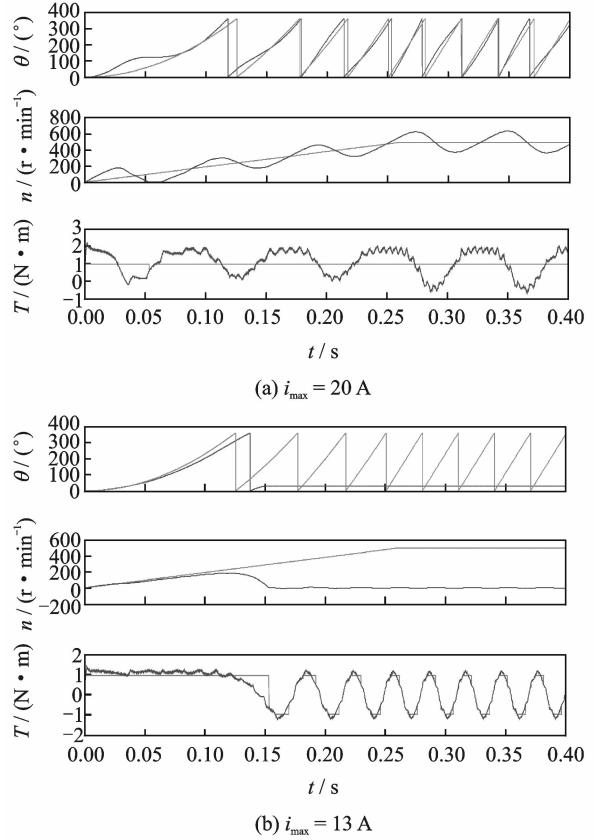


图6 改变定子电流  $i_{\max}$  的起动波形  
Fig. 6 Starting waveforms with different currents

以上仿真结果验证了理论分析的正确性, 电机带恒定负载起动时, 应该综合考虑起动成功率与起动性能这两个矛盾的因素, 在保证起动成功的基础上, 尽可能地减小给定定子磁势  $F_s$  或增大角加速度  $\alpha$ , 以降低电机转速转矩的脉动, 提高起动性能。

### 2.4 任意初始位置起动

起动初始, 当定子磁势初始位置滞后转子位置时, 由式(3)可知, 初始电磁转矩小于零, 电机将反转。图7所示为定子磁势夹角  $\theta = -90^\circ$  起动, 在

电机迅速减至零速附近抖动。进一步仿真结果显示, 随着角加速度增大, 转矩、转速的脉动减小, 电

$t=0.029\text{ s}$  时转子反转速度达到  $-93\text{ r/min}$ 。因而,在某些要求无反转起动的应用场合,可对初始位置辨识,然后再施加超前该转子磁势的电压空间矢量,以确保电机不反转。

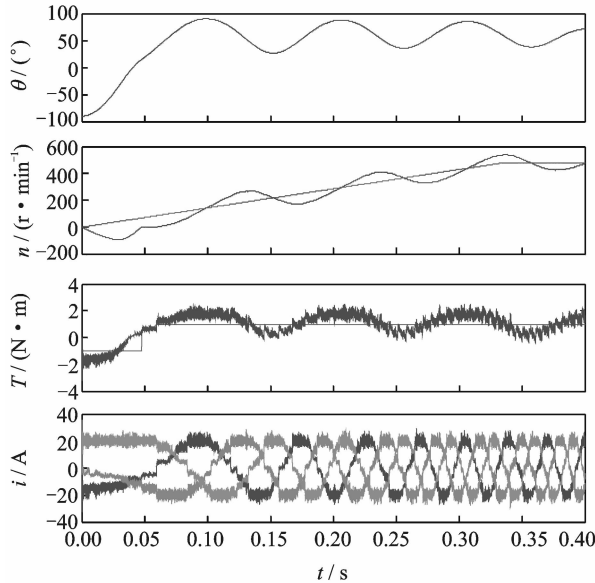


图 7 定转子磁势夹角、转速、转矩及相电流波形

Fig. 7 Waveforms of angle between stator and rotor, speed, torque and current

### 2.5 负载突变

图 8 为起动过程电机负载突变的仿真图,在  $t=0.2\text{ s}$  负载突增  $30\%T_N$  以及  $t=0.25\text{ s}$  负载突降  $30\%T_N$ 。结果说明,一定范围内的负载变化对 SVPWM 起动算法影响不大,定转子磁势夹角可适度自动调节,并达到新的转矩平衡。

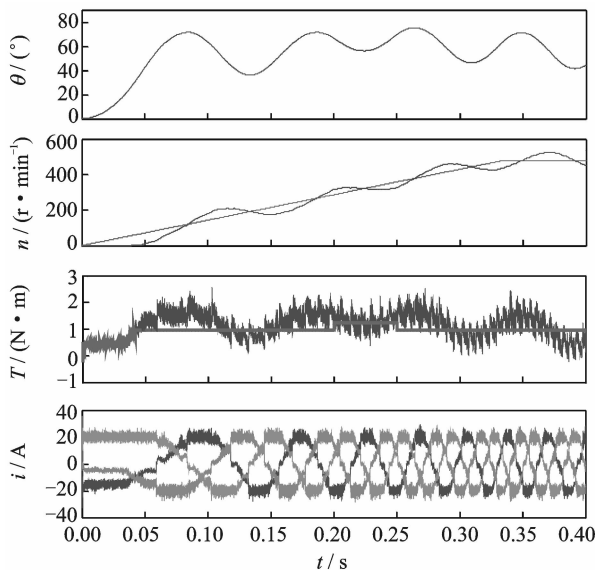


图 8 负载突变响应波形

Fig. 8 Response under abrupt load variation

## 3 实验结果

以 ST 公司的 ARM 芯片 STM32F103VBT6 来实现基于 SVPWM 和定子磁势调节的无位置传感器无刷直流电机的起动算法。系统硬件框图如图 9 所示。

额定电压供电,给定相电流为额定值  $i_{\max} = 10\text{ A}$ ,带额定负载  $T_L = 0.96\text{ N}\cdot\text{m}$  起动,加速至  $n_{\max} = 500\text{ r/min}$ 。图 10(a~c) 为改变角加速度时,依次为电机定子电流  $i_A$ 、转子实际位置  $\theta_1$ 、给定定子磁势位置  $\theta_2$ 、转速  $n$  波形,其转速脉动不超过  $7.1\%$ 。该起动方法对换相时间没有严格的要求,因而是一种对参数不敏感的起动算法。

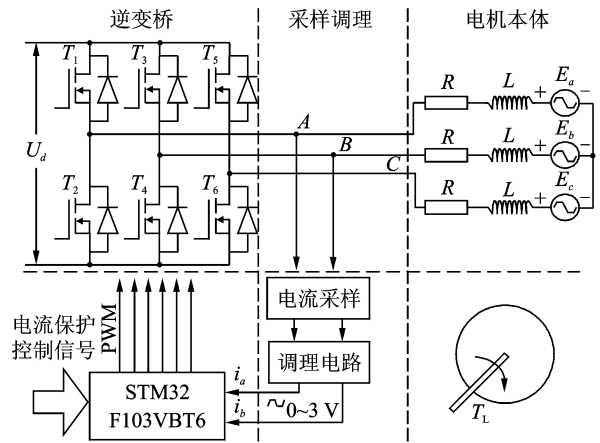
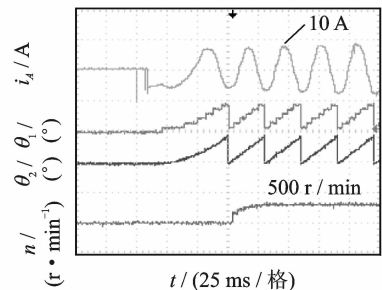
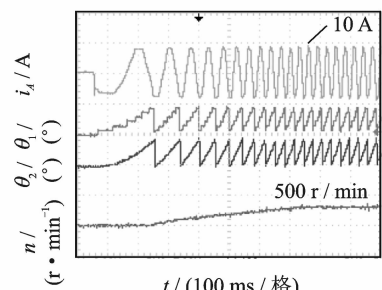


图 9 系统硬件框图

Fig. 9 Hardware block diagram of system



(a)  $t_{\text{加速}}=0.065\text{ s}, \alpha=800\text{ rad/s}^2$



(b)  $t_{\text{加速}}=0.654\text{ s}, \alpha=80\text{ rad/s}^2$

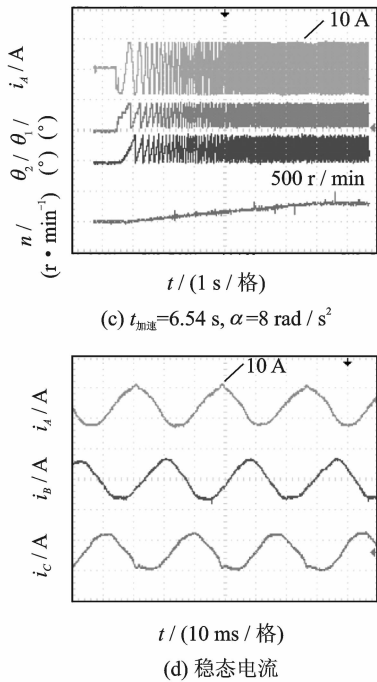


图10 SVPWM 起动实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms with SVPWM start

图10(d)为达到设定的最大起动转速 500 r/min 时,放大的定子三相电流波形。与传统的二二导通工作模式不同,SVPWM 控制方式下,电机三相同时导通,三相电流相位互差  $120^\circ$ ,相电流波形正弦度较好。

## 4 结束语

本文分析了三相全桥逆变器采用三三导通的 SVPWM 经典算法,将该算法应用到 BLDCM 无位置传感器开环起动中,并通过外部给定角加速度恒定的转子升速曲线,拖动电机嵌入同步。

为了抑制电机起动转矩脉动,限制起动电流,在原有的 SVPWM 算法基础上提出了三相定子合成磁势的闭环控制策略,并通过分析得到定子合成磁势矢量近似等于 1.6 倍电流最大相磁势矢量,据此对磁势控制策略进行简化。

在 Matlab/Simulink 中仿真验证该算法的有效性,通过仿真对比,证明了该算法不仅具有传统的开环起动的通用优点,而且比传统的升频起动控制性能显著提高,在开环起动和闭环起动之间找到折中。最后,以一台无刷直流电机为研究对象,验证了该起动算法的有效性。

## 参考文献:

[1] Iizuka K, Uzuhashi H, Kano M, et al. Microcomputer control for sensorless brushless motor [J].

IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 21 (3): 595-601.

- [2] Wei Z W, Liu H T, Zhao X P. Simulation analysis of BLDC motor three step starting [C]//International Conference on Control, Automation and Systems Engineering. Singapore: IEEE, 2011: 1-6.
- [3] Shen J X, Tseng K J. Analyses and compensation of rotor position detection error in sensorless PM brushless DC motor drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 22(12): 57-58.
- [4] 杜晓芸, 林瑞光, 吴建华. 无位置传感器无刷直流电机的控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2002, 6(1): 21-25. Du Xiaoyun, Lin Ruiguang, Wu Jianhua. The control of position-sensorless brushless DC motor [J]. Electric Machines and Control, 2002, 6(1): 21-25.
- [5] 史婷娜, 吴曙光, 方攸同, 等. 无位置传感器永磁无刷直流电机的起动控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 111-116. Shi Tingna, Wu Shuguang, Fang Youtong, et al. Research on sensorless PM brushless DC motor starting control [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (6): 111-116.
- [6] Jang G H, Park J H, Chang J H. Position detection and start-up algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductance variation [J]. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 2002, 149 (2): 137-142.
- [7] Jang J H, Sul S K, Ha J I, et al. Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1031-1038.
- [8] 张智尧, 林明耀, 周谷庆. 无位置传感器无刷直流电动机无反转起动及其平滑切换 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 26-32. Zhang Zhiyao, Lin Mingyao, Zhou Guqing. Anti-reverse rotation startup and smoothly switching of sensorless brushless DC motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 26-32.
- [9] Damodharan P, Sandeep R, Vasudevan K. Simple position sensorless starting method for brushless DC motor [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2 (1): 49-55.
- [10] Zhen A P, Wang J. Compare the starting methods of the position-sensorless BLDC motor [C]//International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. Zhengzhou, China: IEEE, 2010: 175-177.
- [11] Lee W J, Sul S K. A new starting method of BLDC motors without position sensor [J]. IEEE Transaction on Industrial Application, 2006, 42(6): 1532-1538.
- [12] Wu Q, Wei G M, Xiong H, et al. A novel starting control for sensorless three-phase permanent magnet brushless DC motor [C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1081-1087.

