

无位置传感器双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统

孟光伟, 李槐树

(海军工程大学 电气工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 提出了具有 SVPWM 控制和电流调节控制的无位置传感器双绕组无刷直流电机(BLDCM)的起动控制, 其中电流调节控制采用两点式比较器控制。该起动控制方法不但能有效控制起动电流大小, 而且能改善 BLDCM 开环起动性能。在 Matlab/Simulink 环境下, 建立双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统的仿真模型。设计了基于 DSP2407A 的双绕组 BLDCM 控制电路, 并通过软件编程的方式实现了 SVPWM 的开环起动控制。仿真和实验结果一致, 且结果表明了理论分析的正确性。

关键词: 无刷直流电机; 电压空间矢量; 起动控制; 仿真

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)03-0040-06

0 引言

对于靠反电动势进行位置检测的无位置传感器永磁无刷直流电机(BLDCM)的起动而言, 由于静止或低速时很难检测到反电动势信号, 使得电机如何顺利起动成了重要问题。目前一般采用的方法是先他控同步式起动, 使电机加速到反电动势可以被检测到的速度, 然后再利用反电动势检测法切换到自控同步方式^[1-15]。

文献[1-6]采用三段式起动方法, 即首先给任意的两相定子绕组通电一定时间, 转子将被定位在相应的位置上, 然后离线给出频率逐渐增高的换相信号, 电机将被加速, 当电机到达一定转速后切换至自同步运行。文献[7]采用预定位方式起动, 省去了变频升速过程, 但对切换时间要求严格。文献[8-9]分别用硬、软件实现升频升压起动。文献[10]提出了控制相电流与起动曲线相对应的起动方法, 适用于固定负载的场合。文献[11-13]采用他控恒频进行开环起动控制。文献[14-15]描述了短时检测脉冲转子定位起动法, 比较适合于凸极式电机。

综合上述开环起动方法, 无论在一次定位还是在二次定位过程中, 都存在转子的定位振荡问题, 而且电机转速的振荡剧烈程度随着转动惯量和外施电压大小而不同。另外, 由于 BLDCM 的定子磁势在空间上表现为步进式变化, 因此定子磁势与转子 d 轴的夹角是不断变化的, 甚至出现正、负交替, 导致起动过程是一个抖动上升过程, 起动电流波动也很大, 起动过程参数整定困难, 而且一旦负载变化, 需重新调整参数。三段式起动和升频升压起动, 都是通过逐渐调节电压来间接控制电流, 起动电流没有得到直接有效控制, 起动性能差。

为解决起动过程的振荡与抖动问题, 有效限制

起动电流, 改善起动性能, 避免起动过程的不确定性, 本文采用电压空间矢量法, 将逆变器和电机看作一个整体, 通过控制逆变器中功率管的通断, 磁链轨迹向着电压矢量方向移动, 使电机定子磁链矢量动态跟踪给定轨迹, 通过选取合适的电压矢量, 控制定子磁链的幅值沿近似于圆形的轨迹旋转, 保证电机起动过程的平稳和可靠。由于转子是跟踪定子磁链的, 所以通过控制定子磁链旋转的速度, 便可控制电机转速。另一方面, 只要调节电压空间零矢量作用时间, 也即改变了电压空间矢量幅值, 就可对定子电流实现控制, 可有效改善无位置传感器永磁 BLDCM 的开环起动性能。

1 双绕组永磁 BLDCM 主回路

双绕组永磁 BLDCM 主回路如图 1 所示。定子是由 2 套空间上相差 30° 电角度的三相集中绕组构成, 即采用六相双 Y 移 30° 电角度。由于 2 套定子绕组之间存在磁场耦合, 因此在分析计算时, 要考虑 2 套绕组间的互感作用。

2 套定子绕组分别由 2 套独立的逆变器驱动控制, 都能单独与转子组成一台电动机输出电磁转矩, 因此即使一个 Y 出故障, 另一个 Y 仍可维持正常运转

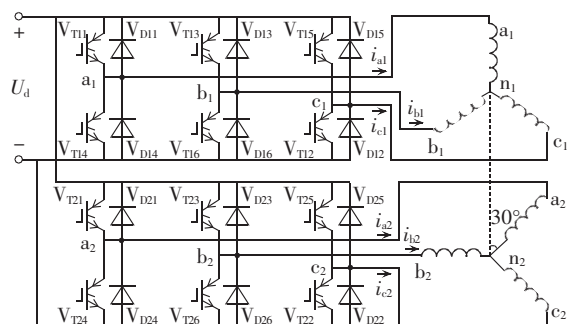


图 1 双绕组 BLDCM 主回路

Fig.1 Main circuit of BLDCM with dual-windings

行,多相电机采用冗余技术提高了系统的可靠性。

由于双绕组 BLDCM 双 Y 结构的第 2 套定子绕组在空间上滞后第 1 套绕组 30° 电角度,由 2 套独立的逆变器供电,当转子每转过 30° 电角度,而不是一般三相 BLDCM 的 60° 电角度,就有一套逆变器的开关管之间要进行一次换流,这样电机旋转一个电角度周期就有 12 个磁状态,因此,双绕组 BLDCM 的每个瞬间有 4 个功率开关器件处于导通状态,一个电角度周期内共有 12 个换相状态。

2 基于 SVPWM 和电流调节控制的双绕组 BLDCM 起动控制

对于双绕组梯形波 BLDCM 的逆变器而言,为减少电磁转矩脉动,提高效率,以及在相电流大小不变时获得最大电磁转矩,2 组绕组均采用三相星形连接,其中每一个三相逆变电路采用二二导通方式,不同于同步电机的三三导通方式,需用六位二进制数来表示一个三相绕组的电压空间矢量,每一位二进制数代表一个功率开关管的开关状态,“1”表示对应功率管导通,“0”表示对应功率管关断。为减少不必要的功率管开关损耗,三三导通时,零矢量有 2 个,分别对应于上桥臂全导通,或下桥臂全导通;而二二导通时,零矢量只有 1 个,即上、下桥臂全关断时。双绕组 BLDCM 电压空间矢量图如图 2 所示。

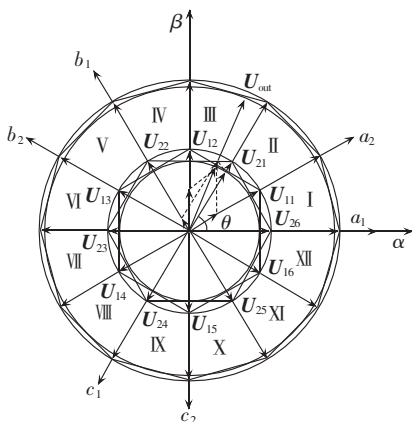


图 2 双绕组 BLDCM 电压空间矢量

Fig.2 Voltage space vectors of BLDCM with dual windings

在 $\alpha\beta$ 坐标系下,取 α 轴与绕组轴线 a_1 重合,由于二二导通时的相电压幅值为 $U_d/2$,每个三相中的 6 个非零基本电压空间矢量($X=1,2,3,4,5,6$)可表示为

$$\begin{cases} U_{1X} = \frac{1}{2} U_d e^{j[\pi/6 + (X-1)\pi/3]} \\ U_{2X} = \frac{1}{2} U_d e^{j[\pi/3 + (X-1)\pi/3]} \end{cases} \quad (1)$$

以各三相的非零基本电压空间矢量为边界,处于每个三相 60° 区域内的电压空间矢量 U_{out} ,可以用相邻的 2 个开关状态矢量和零矢量来合成。在

$\alpha\beta$ 坐标系下, U_{out} 逆时针方向旋转,与 α 轴的夹角为 θ , T_s 为开关周期, t_X, t_{X+1}, t_0 分别为一个开关周期 T_s 内 U_X, U_{X+1}, U_0 的作用时间,根据电压时间等效原则,有

$$\begin{cases} T_s = t_X + t_{X+1} + t_0 \\ U_{out} e^{j\theta} T_s = U_X t_X + U_{X+1} t_{X+1} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)(2),求得 1Y 和 2Y 各扇区中一个开关周期内,相应电压空间矢量作用时间为

$$\begin{cases} t_{1X} = \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right) T_{1s} \\ t_{1(X+1)} = \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \sin\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3} X + \theta\right) T_{1s} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} t_{10} = \left[1 - \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \cos\left(\frac{\pi}{3} X - \theta\right)\right] T_{1s} \\ t_{2X} = \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right) T_{2s} \\ t_{2(X+1)} = \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \sin\left(-\frac{\pi}{3} X + \theta\right) T_{2s} \\ t_{20} = \left[1 - \frac{4\sqrt{3} U_{out}}{3U_d} \cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right)\right] T_{2s} \end{cases} \quad (4)$$

U_d 一定时, t_0 增大,输出电压将减小,一定的 t_X, t_{X+1}, t_0 决定了输出电压具有一定的脉宽和相应的输出电压大小,最大的输出电压对应于 $t_0=0$,由式(3)(4)可知电压空间矢量最大可能输出的相电压幅值 U_{out}^{max} 为

$$\begin{cases} U_{out}^{max} = \frac{\sqrt{3} U_d}{4 \cos\left(\frac{\pi}{3} X - \theta\right)} \\ U_{2out}^{max} = \frac{\sqrt{3} U_d}{4 \cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right)} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知每个三相最大幅值电压空间矢量端点的轨迹为正六边形。当然改变零矢量的作用时间,可实现电压矢量幅值的调整。在二二导通情况下,由图 2 可见正六边形内切圆半径为 $\sqrt{3} U_d/4$,也即电压空间矢量的端点轨迹为圆形的最大电压空间矢量幅值 $U_{out} = \sqrt{3} U_d/4$,分别代入式(3)和式(4),可得此时各电压空间矢量的作用时间为

$$\begin{cases} t_{1X} = \sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right) T_{1s} \\ t_{1(X+1)} = \sin\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3} X + \theta\right) T_{1s} \\ t_{10} = \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{3} X - \theta\right)\right] T_{1s} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} t_{2X} = \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right) T_{2s} \\ t_{2(X+1)} = \sin\left(-\frac{\pi}{3} X + \theta\right) T_{2s} \\ t_{20} = \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{3} X - \theta\right)\right] T_{2s} \end{cases} \quad (7)$$

则双绕组 BLDCM 的合成电压空间矢量端点的

轨迹为圆形,幅值为 $U_{\text{out}} = \sqrt{3} U_d / 2$ 。

转子为表面瓦片式磁钢结构的双绕组永磁 BLDCM,可近似认为磁路完全对称,定子绕组参数不随转子位置变化而变化,即各相定子绕组的自感以

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0 - M_1 & 0 & 0 & M_2 & -M_2 & 0 \\ 0 & L_0 - M_1 & 0 & 0 & M_2 & -M_2 \\ 0 & 0 & L_0 - M_1 & -M_2 & 0 & M_2 \\ M_2 & 0 & -M_2 & L_0 - M_1 & 0 & 0 \\ -M_2 & M_2 & 0 & 0 & L_0 - M_1 & 0 \\ 0 & -M_2 & M_2 & 0 & 0 & L_0 - M_1 \end{bmatrix} n_p \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \\ e_{a2} \\ e_{b2} \\ e_{c2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

电磁转矩为

$$T_{\text{em}} = n_p \frac{e_{a1} i_{a1} + e_{b1} i_{b1} + e_{c1} i_{c1} + e_{a2} i_{a2} + e_{b2} i_{b2} + e_{c2} i_{c2}}{\omega} \quad (9)$$

其中, ω 为转子旋转电角速度, n_p 为电机的极对数。

BLDCM 定子采用集中绕组的方式,以获得良好的梯形波反电动势形状,同时为避免不希望的磁阻转矩造成的转矩脉动,采用定子倾斜一个槽的槽距或转子每极磁钢倾斜一个槽的槽距固定方式,当转子以电角速度 ω 旋转时,定子每相绕组反电动势波与磁通密度分布波形应该一致,为简化分析,可将其近似为梯形波。定子每相绕组的感应电动势幅值^[18]为

$$E_m = \frac{2W\Phi_\delta}{\pi\alpha_i} \omega = k_e \omega \quad (10)$$

其中, k_e 为反电动势系数, W 为绕组每相串联匝数, Φ_δ 为每极磁通量, α_i 为计算极弧系数。

相反电动势的值与转子位置有关,设 β_m 为反电动势平顶宽度,而由式(10)可知,反电动势幅值正比于转子电角速度。在 $[0, 2\pi]$ 区间内,取函数 k_{ea1} 为

$$k_{\text{ea1}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi - \beta_m} \omega t & 0 \leq \omega t < \frac{\pi - \beta_m}{2} \\ 1 & \frac{\pi - \beta_m}{2} \leq \omega t < \frac{\pi + \beta_m}{2} \\ -\frac{2}{\pi - \beta_m} (\omega t - \pi) & \frac{\pi + \beta_m}{2} \leq \omega t < \frac{3\pi - \beta_m}{2} \\ -1 & \frac{3\pi - \beta_m}{2} \leq \omega t < \frac{3\pi + \beta_m}{2} \\ \frac{2}{\pi - \beta_m} (\omega t - 2\pi) & \frac{3\pi + \beta_m}{2} \leq \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

函数 k_{ea1} 可称之为 a_1 相形状函数,则

$$e_{a1} = k_{\text{ea1}} k_e \omega \quad (12)$$

同理可得其他各相形状函数,可得双绕组 BLDCM 的电磁转矩为

$$T_{\text{em}} = n_p k_e (k_{\text{ea1}} i_{a1} + k_{\text{eb1}} i_{b1} + k_{\text{ec1}} i_{c1} + k_{\text{ea2}} i_{a2} + k_{\text{eb2}} i_{b2} + k_{\text{ec2}} i_{c2}) \quad (13)$$

由式(13)可见,起动电磁转矩与形状函数和相电流有关,而与转速无关。而形状函数由电机结构决定,一旦电机制造完成就基本不变,因此改变转矩的大小只能通过调节电流大小以及电流与形状函数间的相位关系来实现。

就开环起动的现有方式而言,二二导通双绕组 12 状态 BLDCM 的定子磁势幅值固定在定子 12 个

及绕组间的互感为常数,与转子位置无关;2 套绕组的电路参数完全相同;不计涡流和磁滞损耗;气隙磁场分布为梯形波。双绕组永磁 BLDCM 的电压平衡方程式^[16-17]为

空间位置上,在空间上是离散的、步进式的,而且,在没有转子位置判别的情况下,并不能保证定子磁势每跃前 30° 电角度,以及转子也同步旋转 30° 电角度,因此,容易导致电磁转矩的波动,甚至出现较大反向转矩。

基于对双绕组 BLDCM 的 SVPWM 控制分析可知,通过设定 BLDCM 起动过程的电压空间矢量,使得定子磁势变化在空间上具有连续性,而且当电压空间矢量的作用时间按式(6)(7)取值时,定子磁链的幅值沿圆形的轨迹旋转,又由于转子是跟踪定子磁链的,因而通过改变电压空间矢量的位置和幅值,便可实现电机的平稳、可靠起动。

双绕组 BLDCM 的机械运动方程式为

$$T_{\text{em}} - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (14)$$

其中, B 为粘滞摩擦系数, T_L 为负载转矩, J 为电机的转动惯量。

在 BLDCM 的开环起动控制中,定子磁势的位置变化,决定了起动速度的快慢和方向。定子磁势空间位置的设定可通过软件编程来实现,在开环升频设定中,只要开环起动电角加速度的设定满足式(15),便可实现电机的起动。

$$\frac{d\omega}{dt} < \frac{T_{\text{em}} - T_L - B\omega}{n_p J} \quad (15)$$

在 BLDCM 的开环起动控制中,电压空间矢量的位置变化,决定了起动速度的快慢和方向,而电压空间矢量幅值的改变,决定着定子电流的大小。在开环起动控制实验中,电压矢量的空间位置设定通过 DSP2407A 中的软件编程来实现,而矢量幅值的调整则由电流调节控制来完成,根据定子电流大小不断插入电压空间零矢量,既限制起动电流幅值过大,又保证电压矢量的幅值满足要求。基于 SVPWM 和电流调节控制的 BLDCM 开环起动控制原理框图见图 3。

电流调节控制,采用两点式比较器,当任一相电流的绝对值增大到最大给定值时,电流调节控制输出零矢量,使得相电流减小;当任一相电流的绝对值减小到最小给定值,或一直小于最小给定值时,电流调节控制的输出即为设定的输入电压空间矢量。电流调节控制完全根据定子电流大小选择零矢量或运动

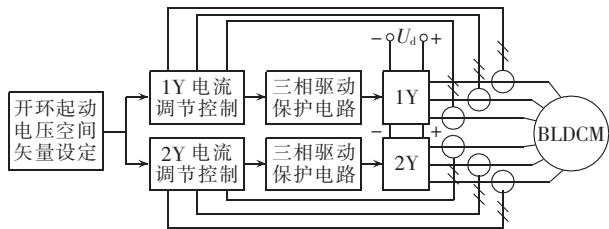


图 3 双绕组 BLDCM 的 SVPWM 起动控制原理框图

Fig.3 Schematic diagram of SVPWM startup control for BLDCM with dual-windings

矢量,既确保了限流目的,同时具有很快的响应速度。另外,为防止由于电流变化速度过快而导致逆变电路中功率管开关频率过高,在电流调节器控制中可设计一个单稳态延时电路,保证限流的同时避免功率管开关速度过快,提高了系统的可靠性。

3 双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统建模

在 Matlab/Simulink 环境下,建立双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统的仿真模型,采用模块化建模,将整个起动控制系统分成各个功能独立的子模块,其中包括:双绕组 BLDCM 本体模块、电流调节模块、逆变模块、起动 SVPWM 模块等。根据双绕组 BLDCM 数学模型,主要从电压平衡方程、电磁转矩方程和机械运动方程等几个方面建立双绕组 BLDCM 本体的仿真模型。仿真模型中,综合运用 Matlab 中的 S-函数以及 Matlab/Simulink/SimPowerSystems 元件库中的电气元件模型,并通过等效变换等方式,根据双绕组 BLDCM 的电压平衡方程式,建立电压平衡方程等效模型;根据双绕组 BLDCM 的电磁转矩表达式确立电磁转矩仿真模型;依据 BLDCM 的机械运动方程式,建立机械运动仿真模型。在电压平衡方程等效模型中,关于反电动势的仿真建模有很多方法,如二维有限元法、傅里叶变换法、正弦波削顶法和分段线性法。为减少仿真计算时间,本文采用了正弦波削顶法,建立双绕组 BLDCM 相绕组梯形波反电动势仿真模型。在仿真模型中 2 个三相绕组的对应相反电动势波形相差 30° 电角度,同时,还给出了可调整霍尔安装位置的霍尔位置信号。

电流调节控制完全根据定子电流大小进行相应控制,运用 Matlab 中的 Relay 仿真模块来实现两点式比较控制,当模块输入电流的绝对值增大到 Relay 最大设定值时,模块输出为 0;当模块输入电流的绝对值减小到 Relay 最小设定值或一直小于 Relay 最小给定值时,模块输出为 1。考虑实际应用中,为防止由于电流变化速度过快,而导致逆变电路中功率管开关频率过高,在电流调节器控制中设计一个单稳态延时电路,本文为了充分模拟实际电路,在电流调节控制模块仿真模型中,也采用了一个单稳态延时模型。电流调节控制模块的输出给 SVPWM 开环起动控制模块,使得电机在 SVPWM 开环起动控制过程中,电

流调节直接参与控制。

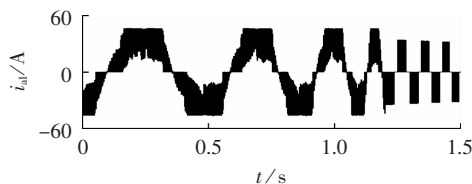
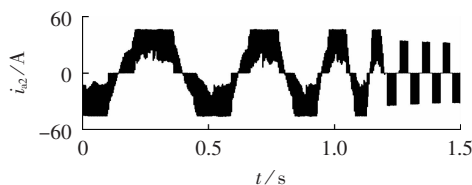
在双绕组 BLDCM 的 SVPWM 开环起动控制仿真模型中,开环起动时间可设定,当开环起动时间结束后就转入自同步阶段。起动阶段 SVPWM 的产生通过编辑 S-函数来实现。

4 仿真与实验结果

本文分别从仿真与实验两方面验证了双绕组 BLDCM 的基于 SVPWM 和电流调节控制的开环起动控制。

实验采用的一台双绕组表面贴磁式 BLDCM 参数为: $P_e=30\text{ kW}$, $n_p=3$,额定输入直流电压 $U_d=220\text{ V}$,额定相电流 $I_e=50\text{ A}$, $n_e=3\text{ 000 r/min}$, $L=0.3\text{ mH}$, $r=0.03\text{ }\Omega$, $J=0.75\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,负载转矩 $T_L=0.01\text{ N}\cdot\text{m}$,PWM 周期 $T_s=0.000\text{ 58 s}$,阻尼系数为 1.2,开环起动设定由频率 2 Hz 开始匀加速上升到 10 Hz 的时间为 1.2 s,采用 SVPWM 和两点式电流调节开环起动控制,其中电流调节最大值 45 A,最小值 35 A,起动过程的 PWM 的有效占空比为 0.69。在 Matlab/Simulink 中建立系统仿真模型。在 $\alpha\beta$ 坐标系下, α 轴与定子轴线 a_1 重合,每次起动时定子磁势变化方向及起始状态不变。实验中用双绕组 BLDCM 同轴拖动一台普通直流电机,用普通直流电机作为测速或负载使用。

基于 SVPWM 和电流调节控制的开环起动过程一旦设定,其每次起动过程的电流变化就几乎不变,图 4、5 分别为 a_1 相、 a_2 相的起动过程电流变化仿真波形。

图 4 a_1 相电流波形Fig.4 Current waveform of phase a_1 图 5 a_2 相电流波形Fig.5 Current waveform of phase a_2

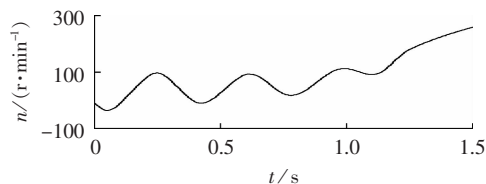
为验证转子在不同初始静止位置时对起动过程影响,将转子 d 轴初始静止位置分别置于 $\alpha\beta$ 坐标系下的 0° 、 90° 、 180° 、 270° 电角度位置时,起动过程转速变化分别如图 6~9 所示,每图中(a)为计算机仿真所得开环起动过程转速变化波形;(b)为开环起动过程用 4 通道示波器记录实验波形图,其中通道 1 为 a_1 相上桥臂 IGBT 控制电压 u_{a1_up} 波形;通道 2 为 a_1 相电流波形,为获取相电流波形,通过电流传感器将

实际电流信号转换为电压信号,而实际电流与转换后电压信号的线性比例关系为 $10\text{ A}:1\text{ V}$;通道 3 为电机相电压 u_m 经过滤波和整形电路后获得的转子位置信号;通道 4 为与转速信号相对应的直流电压信号 u_d ,转速信号是通过测量直流电机的端电压来获得的,实际转速与所测直流电压的线性比例关系为 $6.6\text{ r/min}:1\text{ V}$ 。

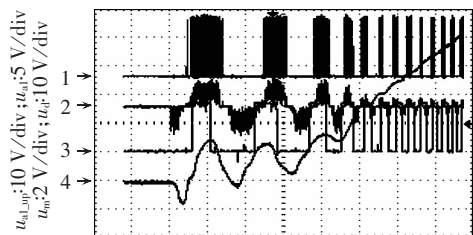
无论是起动电流波形还是起动过程转速变化波形,仿真结果和实验结果都非常一致,验证了无位置传感器双绕组 BLDCM 起动控制系统仿真模型建立的准确性。

仿真和实验都表明,转子在不同初始静止位置时的起动过程转速变化是不一样的,基于 SVPWM 和两点式电流调节控制,不但实现了对起动电流的有效控制,还能保证双绕组 BLDCM 的可靠起动。

基于 SVPWM 和电流调节控制使得 BLDCM 的开环起动性能得到了有效改善,但通过仿真和实验也证实,由于无转子位置信号和转矩反馈,起动过程不



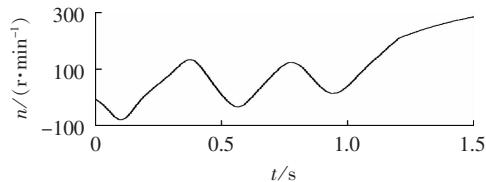
(a) 计算机仿真波形



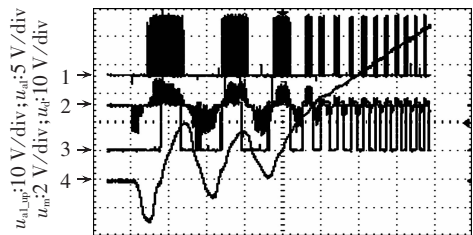
(b) 示波器记录波形

图 6 d 轴初始位置 0° 时的起动转速

Fig.6 Startup speed when d axis initial position is 0°



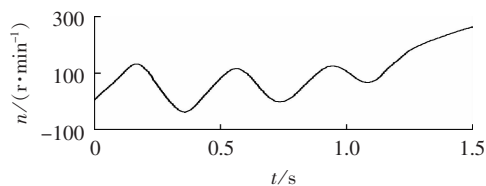
(a) 计算机仿真波形



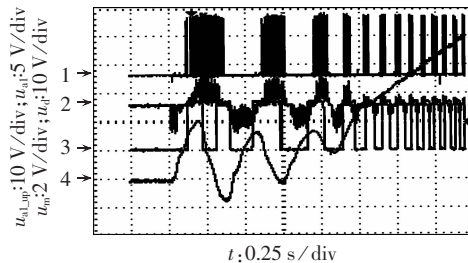
(b) 示波器记录波形

图 7 d 轴初始位置 90° 时的起动转速

Fig.7 Startup speed when d axis initial position is 90°



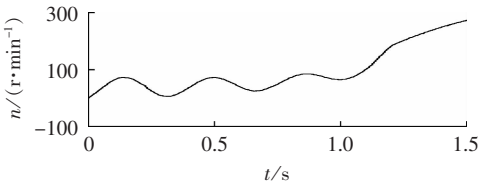
(a) 计算机仿真波形



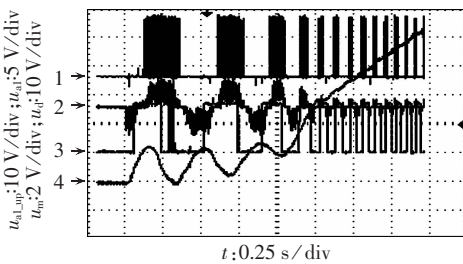
(b) 示波器记录波形

图 8 d 轴初始位置 180° 时的起动转速

Fig.8 Startup speed when d axis initial position is 180°



(a) 计算机仿真波形



(b) 示波器记录波形

图 9 d 轴初始位置 270° 时的起动转速

Fig.9 Startup speed when d axis initial position is 270°

可避免存在电机转速波动。

5 结语

本文提出基于 SVPWM 和电流调节控制的无位置传感器双绕组 BLDCM 的起动控制,该起动控制方法不但能有效控制起动电流的大小,还能改善 BLDCM 开环起动性能。

在 Matlab/Simulink 环境下,建立了双绕组永磁 BLDCM 起动控制系统的仿真模型。设计了基于 DSP2407A 的双绕组 BLDCM 控制电路,并通过软件编程的方式实现了 SVPWM 的开环起动控制。仿真和实验取得了非常好的一致,且结果也表明,SVPWM 和电流调节控制不但实现了对起动电流的有效控制,还能保证无位置传感器双绕组永磁 BLDCM 的可靠起动。另外,通过仿真和实验也证实,由于无转子位置信号和转矩反馈,起动过程不可避免地存在电机转速波动。

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(4): 595-601.
- [2] 沈建新, 吕晓春, 杜军红, 等. 无传感器无刷直流电机三段式启动技术的深入分析[J]. 微特电机, 1998, 26(5): 8-11.
SHEN Jianxin, LÜ Xiaochun, DU Junhong, et al. Detail analysis of 3-step start for SLBLDC motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 1998, 26(5): 8-11.
- [3] 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.
- [4] SHEN J X, TSENG K J. Analysis and compensation of rotor position detection error in sensorless PM brushless DC motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 87-93.
- [5] 孟涛, 方凯. 电动汽车上无传感器 BLDCM 的启动控制[J]. 电力电子技术, 2008, 42(1): 32-34.
MENG Tao, FANG Kai. Investigation on start-up control of sensorless BLDCM for electric vehical[J]. Power Electronics, 2008, 42(1): 32-34.
- [6] 廖承喜, 朱志杰, 翁微. 无刷直流电机三段式自启动关键技术研究[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 61-62, 65.
LIAO Chengxi, ZHU Zhijie, WENG Wei. Study about the key technology of three-step self-start on blushless DC motor[J]. Power Electronics, 2008, 42(5): 61-62, 65.
- [7] 刘明基, 王强, 邹继斌, 等. 电动势换向无刷直流电机的预定位方式启动[J]. 微特电机, 1999, 27(2): 8-10.
LIU Mingji, WANG Qiang, ZOU Jibin, et al. The start method by means of rotor pre-setting for the brushless DC motor of electro-motive force commutation[J]. Small & Special Electrical Machines, 1999, 27(2): 8-10.
- [8] 邹继斌, 张豫, 李宗政, 等. 无位置传感器无刷直流电机驱动电路的研究[J]. 微电机, 1999, 32(2): 16-18, 47.
ZOU Jibin, ZHANG Yu, LI Zongzheng, et al. A driving circuit for sensorless brushless DC motor[J]. Micromotors, 1999, 32(2): 16-18, 47.
- [9] 王冉冉, 刘玉庆. 无位置传感器无刷直流电机起动的比较与研究[J]. 微电机, 2003, 36(1): 29-30, 49.
WANG Ranran, LIU Yuqing. Start development and compare of the sensorless BLDC motor controlled by DSP[J]. Micromotors, 2003, 36(1): 29-30, 49.
- [10] KRISHMAN R, GHOSH R. Starting algorithm and performance of a PM DC brushless motor drive system with no position sensor[C]//Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 20th. Milwaukee, WI, USA: IEEE Publication, 1989: 815-821.
- [11] 冯培悌, 舒振杰, 郑吉. 永磁无刷直流电机的位置传感器控制技术[J]. 机电一体化, 2001(5): 49-51.
FENG Peiti, SHU Zhenjie, ZHENG Ji. Position-sensorless control for permanent-magnet brushless DC motor[J]. Mechatronics, 2001(5): 49-51.
- [12] 郑吉, 王学普. 无刷直流电机控制技术综述[J]. 微特电机, 2002, 30(3): 11-13.
ZHENG Ji, WANG Xuepu. The summary of the control technology of brushless DC motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2002, 30(3): 11-13.
- [13] 卿晓辉, 罗福隆, 李勇, 等. 基于 DSP 的无位置传感器无刷直流电机控制系统的软化策略研究及实现[J]. 防爆电机, 2006, 41(3): 25-28, 49.
QING Xiaohui, LUO Longfu, LI Yong, et al. The research and realization of soften strategy about the controlling system based on DSP of the BLDC motor without the position sensor[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2006, 41(3): 25-28, 49.
- [14] 邓灿, 张森林. 一种新的无刷直流电机启动方法[J]. 微电机, 2002, 35(6): 29-31, 60.
DENG Can, ZHANG Senlin. A new start control strategy for brushless DC motor[J]. Micromotors, 2002, 35(6): 29-31, 60.
- [15] 卢秀和, 杜东礼, 郭志伟, 等. 基于脉冲注入法的无刷直流电动机转子位置检测[J]. 微电机, 2008, 41(5): 24-26.
LU Xiuhé, DU Dongli, GUO Zhiwei, et al. Rotor position detection of brushless DC motor based on pulse injection[J]. Micromotors, 2008, 41(5): 24-26.
- [16] 周元钧. 双绕组无刷直流电动机的数学模型与转矩特性[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 12-16.
ZHOU Yuanjun. Mathematical model and torque characteristics on a brushless DC motor with dual-windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 12-16.
- [17] 董慧芬, 周元钧, 顾福深. 双通道无刷直流电动机控制系统的均衡问题[J]. 电气传动, 2005, 35(10): 35-39.
DONG Huifen, ZHOU Yuanjun, GU Fushen. Equipoise problems of a brushless DC motor system with dual-channels[J]. Electric Drive, 2005, 35(10): 35-39.
- [18] 孙建忠, 白凤仙. 特种电机及其控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 24-25.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:

孟光伟(1971-),男,浙江诸暨人,讲师,博士研究生,研究方向为电力电子与电气传动、电机与控制(E-mail: mengguangwei@yahoo.com.cn);

李槐树(1965-),男,江苏赣榆人,教授,博士研究生导师,主要从事船舶电力推进和特种电机设计研究。

Startup control system of sensorless permanent magnet BLDCM with dual windings

MENG Guangwei, LI Huaishu

(Department of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A startup control strategy with SVPWM and current regulation is proposed for the sensorless permanent magnet BLDCM (BrushLess DC Motor) with dual windings. Two-point comparator is used in its current regulation control. It controls the startup current efficiently and improves the open-loop startup performance of BLDCM. The simulation model of startup control system for permanent magnet BLDCM with dual windings is built with Matlab/Simulink software, the control circuit of BLDCM is designed based on DSP2407A chip, and the open-loop control is programmed for SVPWM. The simulative results are consistent with the experimental results, which show the correctness of the proposed control strategy.

Key words: brushless DC motor; voltage space vector; startup control; simulation