

DOI:10.3785/j.issn.1006-754X.2014.06.016

无位置传感器 BLDCM 的软件升频启动策略

万晓凤, 康利平, 郑博嘉

(南昌大学 电气与自动化工程系, 江西 南昌 330031)

摘 要:针对无位置传感器直流无刷电机的反电势过零检测法在电机启动时无法准确获取转子位置以致不能正常启动这一问题,设计了一种基于软件升频换相的新型启动策略.通过分析电机转子的启动机理,得到转子升频换相时刻的超越方程.为规避超越方程求解的复杂性,只解出其中若干值,采用最小二乘曲线拟合法将离散的换相时刻拟合成升频换相时间函数,并在实时控制中在线计算各换相时刻及自同步切换时刻,以便完成转子的准确换相和电机的平滑启动.为验证软件升频启动策略的有效性,在 simulink 中对直流无刷电机空载、轻载、重载三种条件下的启动性能展开研究.结果表明软件升频启动策略在各种负载条件下都能使直流无刷电机正常启动,不会出现堵转、停转等现象.提出的软件升频启动法换相准确、启动性能良好,是无位置传感器直流无刷电机的一种非常可靠的启动策略.

关键词:反电势过零检测法;软件升频启动;最小二乘法;曲线拟合

中图分类号:TP 271.4

文献标志码:A

文章编号:1006-754X(2014)06-0596-07

Rising frequency startup strategy by software for sensorless brushless DC motor

WAN Xiao-feng, KANG Li-ping, ZHENG Bo-jia

(Department of Electrical and Automation Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To address the issue that sensor less BLDCM (brushless dc motor) commutated by using the zero-crossing method back EMF is unable to accurately obtain the rotor position which leads to irregular start after the motor starts, this paper designs a new strategy of startup using software to rise frequency and change phases. By deeply analyzing the mechanism of the motor rotor, this paper got the transcendental equation at the moment of rising frequency and changing phases. In order to avoid the complicated solution of transcendental equation, we just worked out some values of it and used the least squares curve fitting method to fit discrete commutation time for the time function of rising frequency and changing phases. The function could get the all moment of changing phases and switching synchronous, which achieved the accurate commutation of rotor and the smooth start. In order to verify the effectiveness of the strategy rising frequency and changing phases, we did some research about the property of the dc motor under the condition of no-load, fractional loading and overload. It turned out that this strategy could start the dc motor under different conditions without locked rotor and stalling. The suggested strategy of startup using software to rise frequency changes phases accurately and is good in starting performance, so it is a very reliable starting method of the sensor less BLDCM.

Key words: the zero-crossing method back EMF; frequency and changing phases by software; the least squares method; curve fitting method

收稿日期:2014-04-09.

本刊网址·在线期刊:<http://www.journals.zju.edu.cn/gcsjxb>

基金项目:江西省科技厅科技支撑项目(20132BBE50049).

作者简介:万晓凤(1964—),女,江西南昌人,教授,硕士,从事计算机控制与嵌入式智能仪表研究,E-mail:xfwan_jx@163.com.

直流无刷电机 (brushless DC motor, BLDCM) 利用电子换相代替了机械换相,具有控制简单、运行效率高、功率密度大等优点,已广泛应用于汽车、工业工控、自动化和航空航天等领域^[1]。传统的 BLDCM 是通过霍尔传感器来确定转子位置的,但这种外加传感器的方式不仅增加了电机的制造成本,而且安装困难,在电机运行过程中震动易脱落,降低了系统的可靠性。因此无位置传感器 BLDCM 控制技术成为当今研究的热点之一^[2]。BLDCM 的无位置传感器控制方法主要有续流二极管导通检测法、磁链法和反电动势过零检测法等^[3],其中最成熟的方法是反电动势过零检测法。但是现有的反电动势过零检测法是通过阻容分压网络得到悬空相的过零点信号的,当 BLDCM 在静止或低速时反电动势法就无法准确获取转子的过零点信号,不能检测出转子位置,无法完成换相。因此零启动问题成为 BLDCM 无位置传感器控制的一个难点^[4]。

基于无位置传感器 BLDCM 反电动势过零检测法的电机启动策略有很多,其中较成熟的主要有三段式启动法、多脉冲检测法和升频升压启动法等^[5]。三段式启动法中同样的启动参数难以适应不同启动转矩的负载;多脉冲检测法需要不断重复检测铁心电感,转子位置的确定过于复杂;升频升压启动法是依照永磁同步电机的方法对直流无刷电机进行启动,这种方法实用性也不高。鉴于传统启动策略的不足,近年来很多学者也研究出一些新型的启动策略。文献^[6]提出一种基于模糊规则的无刷直流电机启动法,通过模糊规则对换相指令进行在线调整,以避免电机启动过程中的失步现象,但也没有考虑变负载转矩的影响;Behzad Asaei 等^[7]根据直流无刷电机定子铁芯磁饱和时磁轴上的电流变化来估算电机转子位置,较准确地获取到了转子位置,但是要实现这种方法,逆变器的直流环节必须安装电流传感器;文献^[2]提出了一种短脉冲矢量优化定位与电流比较阈值实时检测相结合的闭环加速方法,这样能保证实时跟踪转子当前所在位置,但是需要实时检测直流母线电流,控制流程复杂;文献^[8]提出了基于卡尔曼滤波器的状态观测法,根据定子电流、电压等信号及精确的电机数学模型来计算转子位置,适用转速范围宽,但是对模型参数依赖大,且运算量大,对控制器芯片要求较高;文献^[4]提出了一种软件启动法,通过控制器芯片产生 PWM 波形控制逆变器,使电机在升频升压与恒频恒压切换间完成对电动机的平滑启动,改善了电机的启动效果,但是在电机启动过程中无法使换相信号与转子位置保持同步,易导致换相超前或滞后;文献^[9]设计了一种采用反电动

势积分法的试探性启动方法,通过对电机非导通相反电动势进行积分而获得转子的真实位置,提高了电机启动成功率,但同时也引入了累积误差。可见,这些新的启动策略也都存在着一定的缺陷。研究出一种成本低廉、操作简便、换相准确、启动成功率高且能自动完成与反电动势过零检测法的无缝切换的新型启动策略是今后无位置传感器 BLDCM 启动研究的工作重点。

1 软件升频启动策略的提出

要解决基于反电动势过零检测法的 BLDCM 的启动问题,关键在于解决该电机在静止或低速状态下的准确无刷换相问题。

常见的 BLDCM 启动过程中的无刷换相策略有固定相序法和外同步开环法等^[10]。其中固定相序法是按照固定的时间间隔、固定的导通相序,驱动电机转子转动。由于电机启动过程是一个变加速过程,各次换相的时间间隔会越来越短,若按固定的时间间隔换相会使转子位置与换相信号不同步,若相应换相位置与转子实际位置偏离太多,电机的加速启动就会失败。因此电机的加速启动过程需要合理控制转子的换相频率,尽量使电机的换相接近最佳换相逻辑。外同步开环法是通过外加电路产生一定频率的信号,带动转子转动,以完成转子的升频换相。这种方法虽然能够实时调整转子的换相频率,但是该方法受负载影响比较大,而且需要外加升频电路,提高了系统成本。

通过对比这 2 种传统的换相策略可知,如果能够获知电机启动过程中转子换相频率的变化规律,并将其以软件程序的形式写入控制器中,由控制器在线完成电机的升频换相,这样既能实现电机转子的准确换相,又能规避外加硬件升频电路所带来的额外成本,巧妙地完成了无位置传感器 BLDCM 的启动。这就是本文提出的软件升频启动策略。

2 软件升频启动策略

研究软件升频启动策略之前先对电机的启动机理进行分析,无位置传感器 BLDCM 的主电路拓扑结构如图 1 所示。全控桥式无刷直流电机在任意时刻均有两相绕组导通,另外一相处于悬空状态^[11]。图 1 中功率开关管 Q_1, \dots, Q_6 共有 6 种开关状态,每隔 $1/6$ 周期换相 1 次,每次换相切换 1 个功率开关管,每一个功率开关管导通 120° 的电角度。若设直流无刷电机顺时针旋转开始的导通绕组为 A 相和 C 相,则功率开关管 Q_1 和 Q_4 开通。经过 $1/6$ 周期后,功率开关管 Q_1 关断、 Q_2 导通,此时导通相为

A 相和 B 相,以此类推^[12-13].

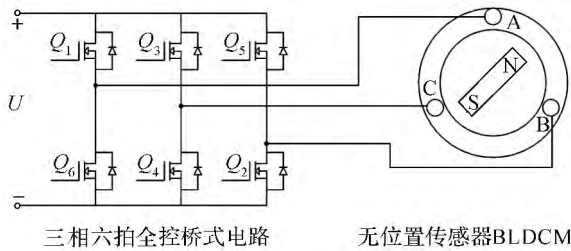


图 1 无位置传感器 BLDCM 的主电路拓扑结构

Fig. 1 The main circuit topology of sensorless BLDCM

BLDCM 启动之前,先确定其转子位置. 软件升频启动法采用移动转子至固定位置的方法来实现转子位置的确定. 具体的做法是:先给 AC 相通电足够长的时间 t_1 ,使其产生一个合成磁场,并在该磁场作用下令转子向合成磁场的轴线方向旋转,直到转子磁极与 AC 相通电产生的合成磁场轴线重合. 转子位置确定好之后设置其换相顺序 AB, CB, CA, BA, BC, AC, 并按照该顺序将功率管轮流导通. 换相顺序确立之后便是确定电机启动过程中不断变化着的转子换相频率. 根据电机的启动机理得到转子换相时间的超越方程,为规避超越方程求解的复杂性,只解出其中若干值,通过最小二乘曲线拟合合法建立转子换相时间函数. 按照转子换相时间函数给定的对应时刻的换相时间即可准确完成电机转子的升频换相. 待电机转速达到一定值时,将电机的启动过程切换至反电动势过零检测法下的自同步加速阶段,这样就完成了软件升频启动,其流程见图 2 所示.

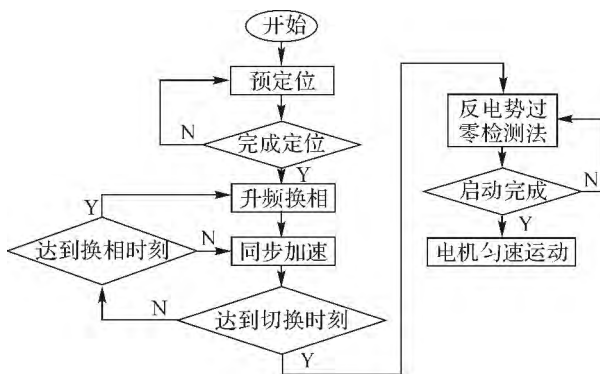


图 2 软件升频启动控制流程

Fig. 2 The control process of frequency-increasing open-loop startup by software

软件升频启动策略实现的难点在于升频换相时刻和自同步切换时刻的确定. 下面基于无位置传感器 BLDCM 的启动机理,详细介绍软件升频启动法中换相时间函数和自同步切换时刻的确定.

2.1 软件升频启动法中换相时间的确定

为便于描述直流无刷电机的启动机理,将转子的圆周运动展成一条直线,如图 3 所示.

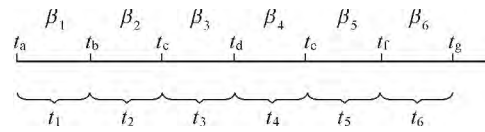


图 3 转子启动过程示意图

Fig. 3 The diagram of rotor startup process

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 分别对应 AB, CB, CA, BA, BC, AC 相通电期间转子转过的角度. 根据直流无刷电机的换相机理可知,各导通相通电期间直流无刷电机转子转过的角度是相等的,即 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6$ ^[14]. t_N 为 β_N 通电期间的持续时间,即第 N 次换相的换相时间. 由于转子是处于变加速运动状态的,转过每一个 β_N 的时间是逐渐减小的,因而 t_N 越来越小,而且随着电机转速的上升减小的幅度越来越大^[15]. 如果知道了电机启动过程中各次换相时间 t_N 的值,就能按照指定的通电相序和已知的换相频率对直流无刷电机进行加速启动. 可见,完成直流无刷电机的软件升频启动关键在于确定电机启动时的换相时间 t_N .

对转子启动过程进行受力分析,转子在磁场中的受力 F 、转动时所需的力矩 M 、转子线圈切割磁力线产生的反电动势 E 及其电流 I 分别如公式(1)至公式(4)所示.

$$F = nBIL, \quad (1)$$

$$M = Fr = nBILr, \quad (2)$$

$$E = nBVL = nB\omega Lr, \quad (3)$$

$$I = \frac{U - E}{R}. \quad (4)$$

联合公式(1)至公式(4)不难得出转子所受力矩 M 为

$$M = \frac{nBLrU}{R} - \frac{(nBLr)^2}{R}\omega. \quad (5)$$

式中 n 为转子线圈匝数, B 为磁场场强, L 为切割磁力线的线圈长度, r 为转子半径, V 为线圈线速度, ω 为转子的角速度, U 是通电两相的外加电压, R 为线圈的等效电阻,其中 n, B, L, r, R, U 为常量. 令 $k_1 = nBLrU/R$, $k_2 = (nBLr)^2/R$, 再根据角动量定理,有

$$M = J\dot{\omega} = k_1 - k_2\omega, \quad (6)$$

式中 J 为转动惯量. 令 $k_4 = k_2/J$, $k_3 = k_1/J$, 得到一个典型的一阶线性非齐次微分方程,解得

$$\omega = \frac{k_3}{k_4} - \frac{k_3}{k_4}e^{-k_4 t}. \quad (7)$$

此时已经得到了直流无刷电机转子角速度 ω 的精

确表达式,接下来继续求取换相时间 t_N . 令 $k_5 = k_3/k_4$, 由于电机转子转过的角度 β 是转子角速度 ω 的积分值,于是可得出下列式子:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \int_0^{t_1} (k_5 - k_5 e^{-k_4 t}) dt, \\ \beta_2 &= \int_{t_1}^{t_2} (k_5 - k_5 e^{-k_4 t}) dt, \\ \beta_3 &= \int_{t_2}^{t_3} (k_5 - k_5 e^{-k_4 t}) dt, \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据直流无刷电机的换相机理,各导通相通电期间转过的角度是相等的. 利用 $\beta_1 = \beta_2$, 就能求得 t_2 与 t_1 间的关系; 利用 $\beta_1 = \beta_3$, 就能求得 t_3 与 t_1 间的关系; 同理可以求出其余各相通电时间 t_N 与 t_1 的关系. 为直观地找出 t_1, t_2, \dots, t_N 之间所存在的数量关系, 根据电机的铭牌说明, 分别给予常量 n, B, L, r, U, R 一个常数值. 由于上述超越方程的求解非常麻烦, 将所有的换相时间 t_N 求出来是不现实的. 这里应用 MATLAB 先求出换相时间 t_N 的前 k 个值, 然后以 t_1 为基准, 换相次数 N 为横轴, 时间 t 为纵轴, 分别描出 t_1, t_2, \dots, t_k 这前 k 个对应点的分布状况. 根据前 k 个换相时间点的分布状况, 不难找出其分布规律, 由此确定一个最佳的曲线拟合函数. 最后采用最小二乘曲线拟合法解出拟合函数的系数, 于是便得到了升频换相时间函数.

为便于表述软件升频启动策略, 这里以爱德利 AM-370L-B 电机为例, 引入电机的上述 6 项参数, 并以 t_1 为基准, 换相次数 N 为横轴, 时间 t 为纵轴, 分别描出 t_1, t_2, \dots, t_{24} 这前 24 个对应的点的分布状况, 如图 4 所示.

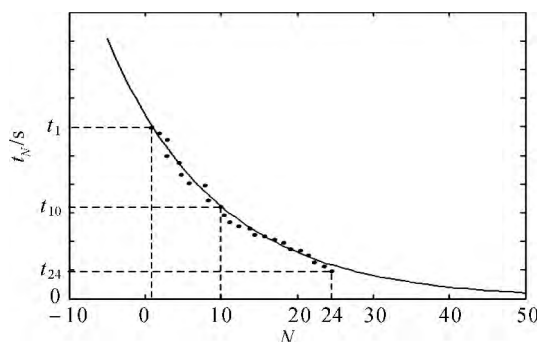


图4 换相时间函数的曲线拟合

Fig. 4 The curve fitting of commutation time function

2.2 换相时间函数的最小二乘法曲线拟合

通过观察对比图 4 中 24 个点的分布情况可知,

t_N 的变化趋势非常接近底数小于 1 的指数函数的数值分布状况. 于是以指数函数为拟合函数采用最小二乘法对上述 24 个离散分布的给定点进行曲线拟合. 设拟合函数为: $t(N) = A^{N-1} B$, 其中 $A (A < 1)$, B 为待定系数. 根据已知点 $(1, t_1)$ 可知, $B = t_1$. 于是曲线拟合函数化为: $t(N) = A^{N-1} t_1$, 只要利用最小二乘法解出系数 A 的值便完成了换相时间函数的曲线拟合.

曲线拟合的最小二乘法的作法是: 对于给定的数据 $(N, t_N) (N=1, 2, \dots, 24)$ 和拟合函数 $t(N) = A^{N-1} t_1$, 使对应的误差 $r_N = t(N) - t_N (N=1, 2, \dots, 24)$ 的平方和最小即可^[16-17]. 从几何意义上讲, 就是寻求与给定点 $(N, t_N) (N=1, 2, \dots, 24)$ 的距离平方和为最小的曲线, 即

$$I = \sum_{N=1}^{24} r_N^2 = \sum_{N=1}^{24} [t(N) - t_N]^2 = \min. \quad (9)$$

于是曲线拟合的问题就转化为求函数 $I = I(A)$ 的极值问题. 根据函数求极值的必要条件便能求出待定系数 A , 最终完成曲线的拟合.

2.3 软件升频启动策略的自同步切换

无位置传感器 BLDCM 启动加速达到一定转速以后, 电机通电两相在未通电相感应产生的反电动势已经足够大, 通过反电动势过零点信号能够准确地完成电机的换相^[18]. 此时就可以从软件升频加速阶段切换到根据反电动势过零检测法换相的自同步加速阶段. 通常是采用估算的方式来选择切换速度, 本文选择切换速度为电机额定转速的 15% ~ 20%^[19-20]. 自同步切换时刻 t 的确定方法如下:

$$\frac{\omega}{2\pi} = \frac{k_5 - k_5 e^{-k_4 t}}{2\pi} \geq 15\% \times n_N, \quad (10)$$

式中: n_N 为直流无刷电机的额定转速, r/s; ω 为电机转子的角速度, rad/s.

完成自同步切换后, BLDCM 的软件升频启动过程结束, 并进入基于反电动势过零检测法的加速阶段, 最终电机稳定在匀速运动的工作状态下.

3 软件升频启动法的仿真实验

3.1 仿真模型的建立

直流无刷电机的软件升频启动法的仿真模型如图 5 所示. 其中爱德利 AM-370L-B 电机参数为: 定子绕组电感 $L=0.008$ H, 定子绕组电阻 $R=2.875$ Ω , 级数 $p=4$, 转动惯量 $J=0.0008$ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 额定转速 $n_N=800$ r/min, 空载转速 $n_0=1000$ r/min, 额定电压 $U=220$ V, 额定电流 $I=2$ A, 额定转矩 $T=2$ N·m.

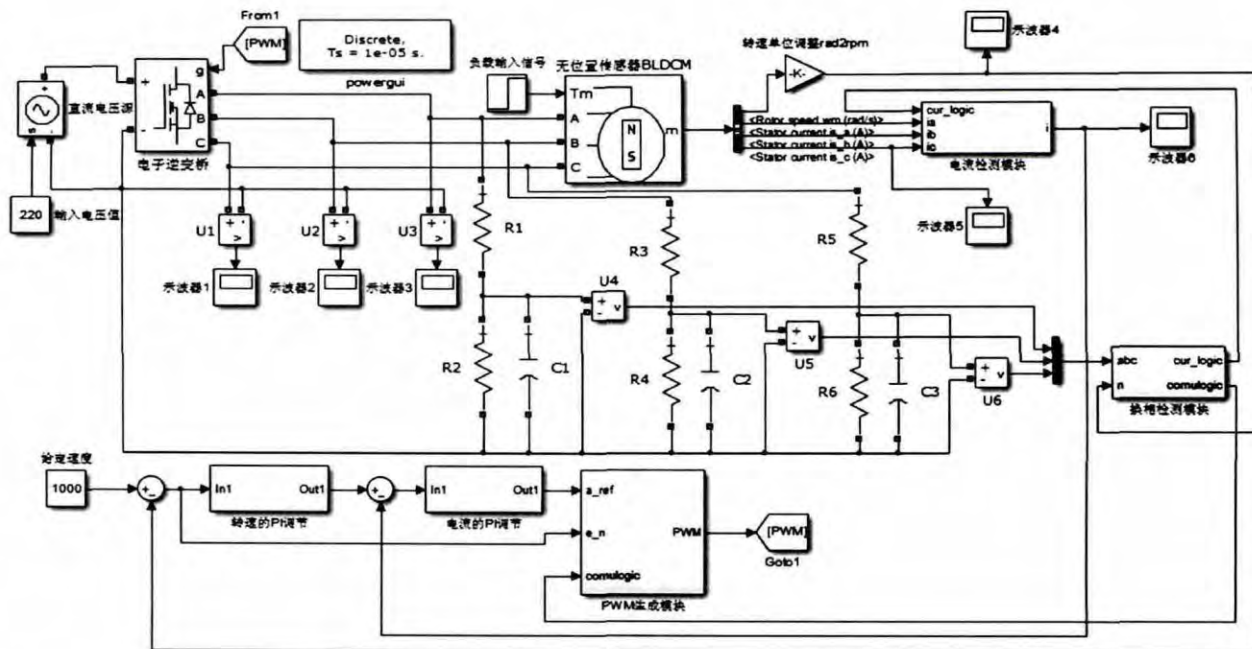


图 5 直流无刷电机启动的仿真模型

Fig. 5 The simulation model of brushless dc motor startup

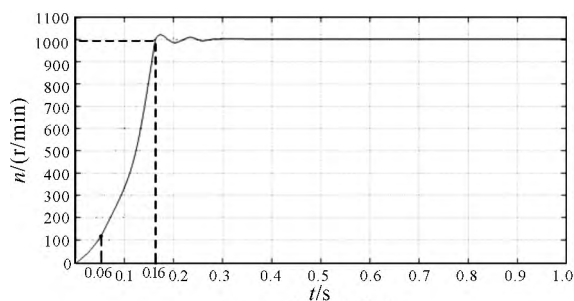
图 5 中直流无刷电机采用软件升频启动法启动,待转速达到一定值后自动切换为反电动势过零检测法实现电机的无刷换相,最终稳定在匀速运动状态.根据软件升频启动法和电机的各相参数可得换相时间函数为 $t(N)=0.03 \times (2/3)^{N-1}$ (为确定电机转子的初始位置,应该给予 t_1 足够长时间,本实验中 $t_1=30 \text{ ms}$).根据公式(10)可计算得由软件升频加速阶段转换到反电动势过零检测法下的自同步加速阶段的切换时刻 $t=0.06 \text{ s}$.

仿真模型建立以后,分别在空载、轻载($T=0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$)、重载($T=2 \text{ N} \cdot \text{m}$)三个条件下启动直流无刷电机,观察电机的启动效果.

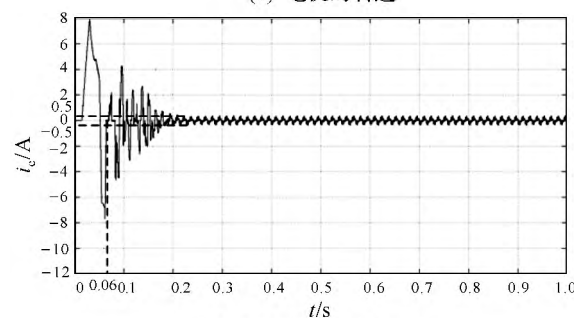
3.2 软件升频启动法的仿真结果分析

在空载条件下,采用软件升频启动法启动无位置传感器 BLDCM,得到电机的转速和 C 相定子相电流的变化情况,如图 6 所示.图 6(a)中, $t=0.06 \text{ s}$ 时电机自动切换到了自同步加速阶段; $t=0.16 \text{ s}$ 时电机完成启动,并稳定输出 1000 r/min 的空载转速.图 6(b)中,电机定子 C 相的启动电流较大,其最终稳定后的工作电流在 $-0.5 \sim +0.5 \text{ A}$ 以内.可见,软件升频启动法在直流无刷电机空载启动中的应用非常成功.电机实现了平滑启动,由软件升频加速阶段到自同步加速阶段的切换流畅自如,电机的启动非常快.

在轻载($T=0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$)条件下,采用软件升频启动法启动无位置传感器 BLDCM,得到电机的转



(a) 电机的转速



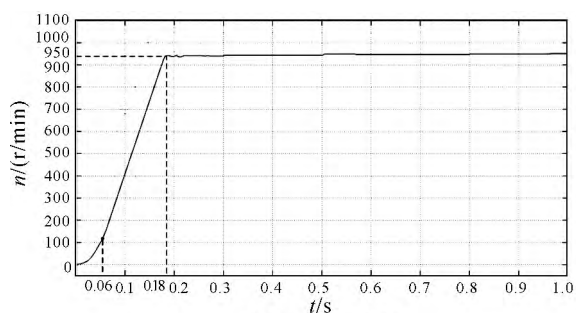
(b) 电机定子侧C相电流

图 6 空载条件下 BLDCM 的启动效果

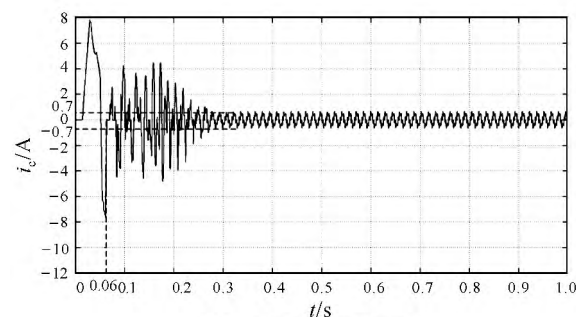
Fig. 6 The startup of BLDCM under no-load

速和 C 相定子相电流的变化情况,如图 7 所示.图 7(a)中, $t=0.06 \text{ s}$ 时电机自动切换到了自同步加速阶段; $t=0.18 \text{ s}$ 时电机完成加速,稳定输出的转速为 950 r/min .图 7(b)中,电机定子 C 相电流在启动阶段的响应快速而平稳,最终稳定在 $-0.7 \sim +0.7 \text{ A}$ 以内.可见,软件升频启动法在直流无刷电机轻载启动中的性能也非常好.电机的启动仍然平稳,由软件升频加速阶段到自同步加速阶段的切换也比较

自然。



(a) 电机的转速



(b) 电机定子侧C相电流

图7 轻载条件下 BLDCM 的启动效果

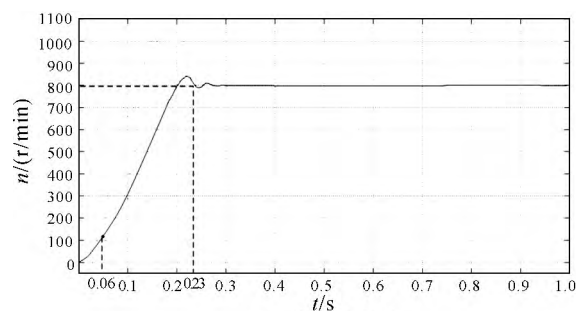
Fig. 7 The startup of BLDCM under light-load

在重载($T=2\text{ N}\cdot\text{m}$)条件下,采用软件升频启动法启动无位置传感器 BLDCM,得到电机的转速和C相定子相电流的变化情况,如图8所示。图8(a)中, $t=0.06\text{ s}$ 时电机也自动地切换到了自同步加速阶段; $t=0.23\text{ s}$ 时电机启动结束,稳定输出800 r/min的额定转速。图8(b)中,电机定子C相电流的响应较快,最终的工作电流为 $-2\sim+2\text{ A}$ 的额定电流。可见,软件升频启动法在直流无刷电机重载启动中的应用也比较好的,虽然启动时间有所加长,但是最终电机也能平稳地完成启动。

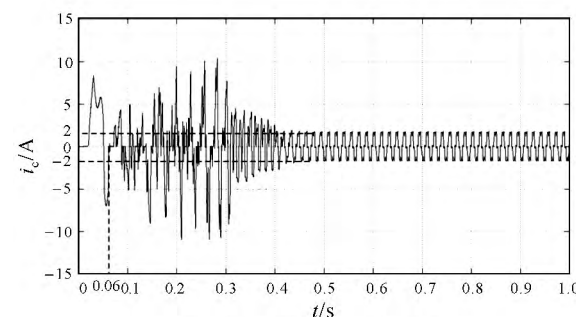
对比图6至图8可知,随着直流无刷电机启动时拖动负载的增大,直流无刷电机的启动越发困难,但是软件升频启动法在各种负载条件下都能使无位置传感器直流无刷电机正常启动,没有出现堵转、停转等现象。可见,软件升频启动策略的启动效果非常好,能够适应不同负载条件下的电机启动要求。

4 结 语

本文通过对无位置传感器 BLDCM 的启动过程进行理论分析,推导出电机启动过程中转子换相时间的内部规律,并采用最小二乘曲线拟合法得到了升频换相时间函数。基于升频换相时间函数,设计出软件升频启动这一新型的 BLDCM 启动策略。该启动策略相较于传统的换相策略而言,不仅不需要外加升频电路,降低了系统成本,而且能使换相信号与



(a) 电机的转速



(b) 电机定子侧C相电流

图8 重载条件下 BLDCM 的启动效果

Fig. 8 The startup of BLDCM under over-load

转子位置迅速同步,准确地完成转子的升频换相和电机的自同步切换。在各种负载下的仿真效果表明,软件升频启动法启动性能良好,可靠性较高,环境变化影响较小,应用前景非常可观。

参考文献:

- [1] 张勇,程小华. 无位置传感器无刷直流电机起动方法研究[J]. 微电机, 2013, 46(11): 88-91.
ZHANG Yong, CHENG Xiao-hua. Research on starting methods for sensorless brushless DC motors[J]. Micro Motors, 2013, 46(11): 88-91.
- [2] 朱俊杰,栗梅,王湘中,等. 无位置传感器无刷直流电机闭环三段式启动策略[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 173-179.
ZHU Jun-jie, SU Mei, WANG Xiang-zhong, et al. Closed-loop 3-step start-up strategy for brushless DC motor without position sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 173-179.
- [3] 李自成,程善美,秦忆. 线反电动势检测无刷直流电机转子位置方法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(12): 96-100.
LI Zi-cheng, CHENG Shan-mei, QIN Yi. Novel rotor position detection method of line back EMF for BLDCM [J]. Electric Machine and Control, 2010, 14(12): 96-100.
- [4] 许鹏,曹建波,曹秉刚. 无位置传感器直流无刷电机软件启动[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(5): 734-738.
XU Peng, CAO Jian-bo, CAO Bin-gang. Software

- starting for brushless DC motor without position sensor[J]. Electric Machine and Control, 2009, 13(5): 734-738.
- [5] 汤长波, 顾敏明, 潘海鹏. 无位置传感器无刷直流电机启动方法研究[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(6): 886-889.
- YANG Chang-bo, GU Min-ming, PAN Hai-peng. Research on sensorless brushless DC motor starting methods[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 28(6): 886-889.
- [6] 王迎发, 夏长亮, 陈炜. 基于模糊规则的无刷直流电机启动策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 98-103.
- WANG Ying-fa, XIA Chang-liang, CHEN Wei. Startup strategy for brushless DC motor based on fuzzy rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 98-103.
- [7] BEHZAD Asaei, ALIREZA Rostami. A novel starting method for BLDC motors without the position sensors[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(2): 337-343.
- [8] 史婷娜, 张倩, 夏长亮, 等. 基于 UKF 算法的无刷直流电机转子位置和速度估计[J]. 天津大学学报, 2008, 41(3): 338-343.
- SHI Ting-na, ZHANG Qian, XIA Chang-liang, et al. Estimates of rotor position and velocity of brushless DC motor with UKF algorithm[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(3): 338-343.
- [9] 王大方, 刘智祺, 金毅, 等. 基于反电动势积分法的无位置传感器直流无刷电机试探性启动研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 178-184.
- WANG Da-fang, LIU Zhi-qi, JIN Yi, et al. Tentative strategy of starting sensorless BLDCM with the method of integrating the back EMF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 178-184.
- [10] DAMODHARAN P, SANDEEP R, VASUDEVAN K. Simple position sensorless startig method for brushless DC motor[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2008, 2(1): 49-55.
- [11] 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(7): 15-21.
- ZHOU Mei-lan, GAO Zhao-ming, WU Xiao-gang, et al. Influence of five kinds of PWM on commutation torque ripples in BLDCM control system[J]. Electric Machine and Control, 2013, 17(7): 15-21.
- [12] 李华峰, 丁庆军, 陈超. 超声电机启动可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 138-145.
- LI Hua-feng, DING Qing-jun, CHEN Chao. Research on startup reliability of ultrasonic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 138-145.
- [13] 陈旭东, 冯攀. 直流电机复合定位控制系统性能分析及系统优化[J]. 工程设计学报, 2012, 19(5): 391-399.
- CHEN Xu-dong, FENG Pan. The performance analysis and system optimization of the composite position control system of DC motor [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2012, 19(5): 391-399.
- [14] DAMODHARAN P, VASUDEVAN K. Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference[J]. IEEE Trans Energy Convers, 2010, 25(3): 661-668.
- [15] KWANG-WOON Lee, DAE-KYONG Kim, BYUNG-TAEK Kim, et al. A novel starting method of the surface permanent-magnet BLDC motors without position sensor for reciprocating compressor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(1): 85-92.
- [16] 刘霞, 王运峰. 基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 55-58.
- LIU Xia, WANG Yun-feng. Research of automatically piecewise polynomial curve-fitting method based on least-square principle[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(3): 55-58.
- [17] 杨伟, 陈家新, 李济顺, 等. 基于投影的二阶段空间圆线拟合算法[J]. 工程设计学报, 2009, 16(2): 117-121.
- YANG Wei, CHEN Jia-xin, LI Ji-shun, et al. Two-step spatial circle fitting method based on projection [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2009, 16(2): 117-121.
- [18] 许鹏, 郭桂芳, 曹军义, 等. 直流无刷电机神经网络直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 192-196.
- XU Peng, GUO Gui-fang, CAO Jun-yi, et al. Neural network control on direct torque control for brushless DC motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 192-196.
- [19] 苏宇, 张涛, 王相阳, 等. 有限转角直流无刷电机的建模与实现[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 257-261.
- SU Yu, ZHANG Tao, WANG Xiang-yang, et al. Modeling and implementation of limited angle brushless DC motor [J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 257-261.
- [20] 谭锦荣, 曾岳南. 无位置传感器无刷直流电机控制系统仿真[J]. 防爆电机, 2008, 48(6): 32-36.
- TAN Jin-rong, ZENG Yue-nan. Simulation of control system for sensorless brushless DC motor [J]. Explosion-proof Electric Machine, 2008, 48(6): 32-36.