

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.012

对转式永磁无刷直流电机无位置检测控制策略研究

项康利, 马钧华

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:研究对转式永磁无刷直流电机基于反电势过零点的无位置传感器控制策略,通过理论推导和实验验证该策略能够运用于对转式永磁无刷直流电机。针对静止状态下启动困难问题,基于 d 轴正向增磁、反向去磁导致铁芯饱和程度不同而产生电感差异及 q 轴到 d 轴之间电感差异的原理,提出了一种通过施加6个短时电压脉冲即可判断磁极转子初始位置的检测方法,以及施加2个短时导通相电压脉冲获得换相时刻的启动加速方法,并进行实验验证。结果表明:基于电感差异原理提出的磁极转子初始位置检测和启动方法能够有效解决启动困难问题,扩大了对转式永磁无刷直流电机的运用范围,提高对转式永磁无刷直流电机无位置检测控制性能。

关键词:对转式永磁无刷直流电机;无位置检测;初始位置检测;电感差异

中图分类号:TM35 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2016)03-0052-06

Research on Sensorless Control of Contra-Rotating Permanent Magnet BLDC Motor

XIANG Kangli, MA Junhua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The position sensorless control based on back EMFs of contra-rotating Permanent Magnet BLDC motor was discussed and verified by the theoretical derivation and experiments. A method with six pulses was proposed to detect the pole rotor position at standstill, another method for start-up with two pulses was presented based on the difference of inductance. Finally, the experiments verified that the initial position estimation method and start-up method could implement the contra-rotating PMBLDC motor switching to position sensorless control mode based on back-EMFs.

Key words: contra-rotating PMBLDC (Permanent Magnet Brushless Direct Current); sensorless detection; starting detection; difference of inductance

普通永磁无刷直流电机主要由转子、定子以及机座构成,对转式永磁无刷直流电机由旋转的定子(电枢转子)和转子(磁极转子)以及静止的机座构成,电枢转子通过3个滑环与逆变器三相电输出端连接。对转式永磁无刷直流电机2个转子根据作用力和反作用力作相反方向对转运动,由于流体中存在陀螺效应^[1],利用对转特性在2个转轴端连接螺旋桨,既能在流体中维持平衡又提高推进效率^[2],因此对转式永磁无刷直流电机在水下对推系统中得到广泛运用。在风力发电领域也可利用对转特性提高对风能的利用率^[3]。在2轮或4轮驱动的新能源电动汽车领域中可

使用1台对转式电机代替2台传统电机驱动,从而减轻质量、减小体积及降低成本^[4-6]。本文简要介绍了对转式永磁无刷直流电机的有位置检测控制方法,重点研究了对转式永磁无刷直流电机基于反电势过零点的无位置检测控制策略,并对电机初始位置检测和加速困难问题提出解决方案。

1 对转式永磁无刷直流电机的有位置检测

对转式永磁无刷直流电机电枢转子和磁极转子相对旋转,给霍尔元器件的安装和设计带来很大难度,常用的霍尔安装方案有2种^[7]:一种是参考普通永磁无刷直流电机在电枢转子上安装3个霍尔元器件并通过

收稿日期:2015-12-18;修回日期:2016-02-10

作者简介:项康利(1990),女,安徽黄山人,硕士研究生,主要研究方向为电机驱动。E-mail:Xiangkangli@163.com

滑环供电和引出霍尔信号;另一种是在电机静止部分分别安装电枢转子和磁极转子各 1 套霍尔元件,以 3 对极对转式电机为例,其每套霍尔元件和其产生信号如图 1 所示。

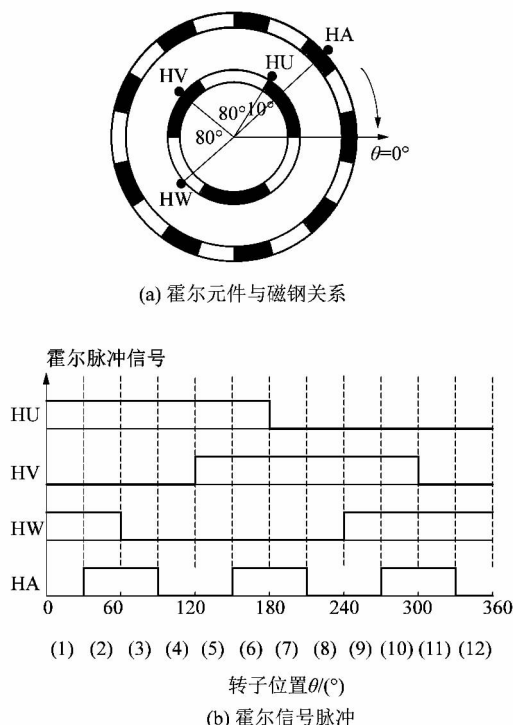


图 1 霍尔元件位置及霍尔信号示意图

Figure 1 Diagram of hall sensors design

每 1 套霍尔传感器有内外 2 个磁钢,磁钢位置固定,与转子共同旋转。内环磁钢及对应的霍尔传感器 HU、HV、HW 的安装与普通永磁无刷直流电机相同,外环磁钢极数是内环磁钢的 3 倍,对应霍尔传感器 HA 产生的霍尔信号是 HU、HV、HW 三倍频。从图 1 (b)可知,霍尔信号将每 1 套转子相对电机静止部分的位置信息分成 12 个角度,即为 30° 的扇区;2 套转子霍尔信号相同,则共有 144 种位置信息,即磁极转子相对电枢转子的位置。

由以上分析可知对转式永磁无刷直流电机霍尔传感器有结构复杂、安装困难、位置信息状态多、易受干扰的特点,且损坏后难以修复,增加了使用成本。因此对于对转式永磁无刷直流电机无位置检测控制策略的研究具有重要意义。

2 反电势过零点无位置检测控制策略

本文研究的对转式永磁无刷直流电机反电势为梯形波、电枢绕组 Y 型连接,采用三相六拍、两两导通的控制方式,上桥臂斩波。对转式永磁无刷直流电机与普通的永磁无刷直流电机电磁关系相同,差别在于机

械运动方程,因此可得电压方程:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + u_n, \\ u_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + u_n, \\ u_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + u_n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: R 为电枢转子每相电阻; L 为电枢转子每相电感; u_a, u_b, u_c 为三相相电压; i_a, i_b, i_c 为三相相电流; e_a, e_b, e_c 为每相反电势; u_n 为中性点电压。对转式永磁无刷直流电机的反电势梯形波和普通永磁无刷直流电机相同,反电势大小与电机 2 个转子的相对转速成正比,可近似认为梯形波是正弦波削顶形成,因此反电势可近似表达为:

$$\left. \begin{aligned} e_a &= \Psi_f (\omega_w + \omega_n) \cos \theta \cdot \text{sat}(k), \\ e_b &= \Psi_f (\omega_w + \omega_n) \cos (\theta - \frac{2}{3}\pi) \cdot \text{sat}(k), \\ e_c &= \Psi_f (\omega_w + \omega_n) \cos (\theta + \frac{2}{3}\pi) \cdot \text{sat}(k). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Ψ_f 为转子磁链,为恒定值; ω_w 为电枢转子电角速度; ω_n 为磁极转子电角速度; $\text{sat}(k)$ 为饱和函数,饱和和最大值为 1,取 1 时反电势为正弦波。

假设其反电势为完全对称梯形波,根据以上分析得到对转式永磁无刷直流电机相反电势和相电流波形图如图 2 所示。从图中可知三相电流每隔 60° 电角度换相一次,换相时刻为非导通相反电势过零点时刻再延时 30° 电角度,因此可通过反电势过零点来估算换相时刻^[8-9]。该方法的重点是对反电势的提取,本文中使用端电压法提取反电势^[10],如图 3 所示通过 $R_1 \sim R_6$ 对逆变器三相输出端电压分压提取。

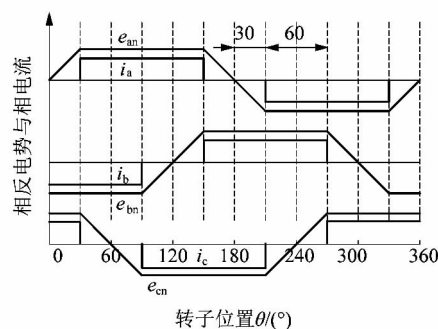


图 2 相反电势和相电流波形图

Figure 2 Waveforms of back-EMFs and phase currents

假设 C 相为非导通相,则 $i_a = -i_b, i_c = 0$,将式(1)中 3 个式子相加,得:

$$u_a + u_b + u_c = e_a + e_b + e_c + 3u_n. \quad (3)$$

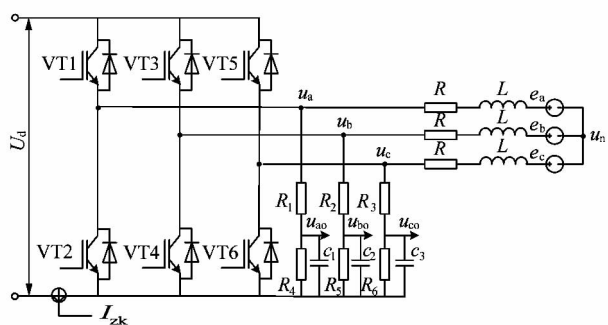


图3 电机与逆变器电路以及端电压检测示意图

Figure 3 Inverter circuit and voltage detect diagram

当C相反电势过零点时,因为是梯形波反电势,由 $e_a = -e_b$,可得:

$$\left. \begin{aligned} u_c &= e_c + u_n, \\ u_a + u_b + u_c &= e_c + 3u_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

进一步整理可得:

$$2e_c = 2u_c - (u_a + u_b). \quad (5)$$

同理在A相为非导通相和B相为非导通相可得:

$$\left. \begin{aligned} 2e_a &= 2u_a - (u_b + u_c), \\ 2e_b &= 2u_b - (u_a + u_c) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

因此可通过对端电压 u_a, u_b, u_c 的采样检测来获得非导通相过零点信息,从而得到磁极转子位置。

3 初始位置检测和加速与切换

3.1 初始位置检测

当电机处于静止状态或者低速运行时,电机的反电势为零或太小,无法检测,因此需要初始位置检测和特殊的启动方法,使电机加速到一定转速再切换至反电势过零点的无位置检测控制。电枢转子铁芯由于磁饱和, $+d$ 轴方向上有增磁作用,铁芯饱和程度高,线圈电感小; $-d$ 轴方向上由于去磁作用铁芯饱和程度

小,线圈电感大^[11]。此外由于饱和凸极效应, q 轴电感大于 d 轴电感^[12],因此在不同角度线圈中施加电压脉冲,其对应电流不同;且施加脉冲时间越长饱和效应越明显,但是施加脉冲时长不会使得电机转子位置发生明显变化。图4所示为在 $+d$ 轴不同角度施加4次不同时长电压脉冲检测到的母线电流响应,验证了电枢转子线圈电感与转子位置的关系。

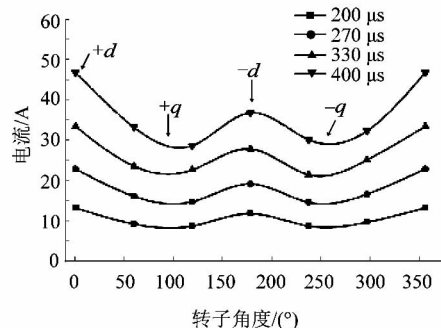


图4 不同脉冲电压下母线电流响应与转子位置关系

Figure 4 Measured dc-link current of different rotor position

根据以上差异,可按照一定顺序施加6个短时电压脉冲,检测电流响应,得到磁极转子相对电枢转子初始位置。如图5所示,假设当前磁极转子位置如图5(a)所示。第1步分别施加 V_1 和 V_4 ,由于 $+d$ 轴增磁作用,靠近 $+d$ 上的电流变化率大,可得到 $I_1 > I_4$,确定转子N极在图中阴影部分(图5(a));同理第2步施加 V_3 和 V_6 ,得到 $I_6 > I_3$ 确定转子N极所在阴影区域(图5(b)),第3步施加 V_5 和 V_2 得到 $I_2 > I_5$,确定转子N极所在的 60° 区域内(图5(c)),在母线上检测的电流响应如图5(d)所示。

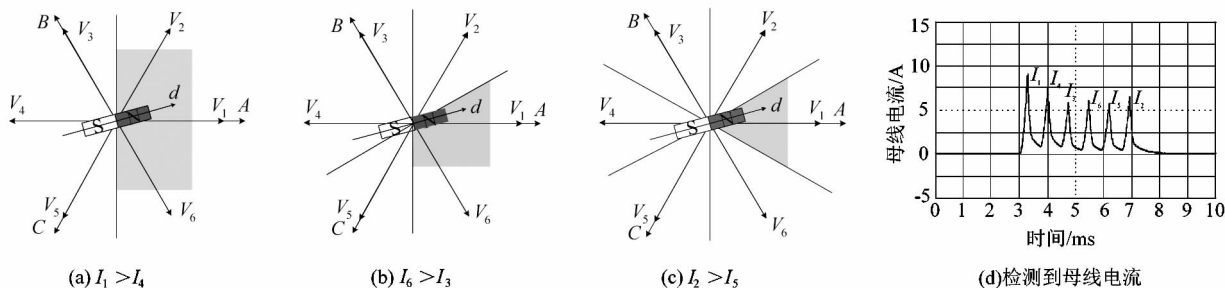


图5 转子位置检测过程

Figure 5 Rotor position estimation process

3.2 加速与切换

利用 $+d$ 轴方向上增磁和 $-d$ 方向上去磁作用在对转式永磁无刷电机静止状态下获得了其初始位置,接下

来需要对电机进行加速,以便能够检测到足够大的反电势,再切换至反电势过零点的无位置检测控制策略,该对转式永磁无刷直流电机在电机转速为 200 r/min 下即

可切换至无位置检测控制方式。加速阶段利用 q 轴至 d 轴的电感差异,从图 4 可分析得到 q 轴方向上电枢绕组电感最大;从 q 轴到 d 轴方向上电感逐渐减小;对于相同的电压脉冲,越靠近 q 轴则电流变化越小。

图 6 解释了加速过程的换相原理。假设电机磁极转子初始位置落在图 6(a) 所示区域,则根据平均最大转矩给电机电枢绕组施加虚线所示 q' 磁势,此时施加 V_2 和 V_3 脉冲信号得到电流响应满足 $I_2 < I_3$;当电机磁极转子向 q' 方向旋转至图 6(b) 位置,则施加 V_2 和 V_3 电压脉冲得到近似 $I_2 = I_3$;当电机磁极转子继续旋转

至图 6(c) 所示位置则施加 V_2 和 V_3 电压脉冲信号得到 $I_2 > I_3$ 。利用以上关系来实现加速过程换相,并设定电流阈值 I_{thres} ,在图 6(c) 中电流响应满足 $(I_2 - I_3) > I_{thres}$ 则进行换相,将施加的电枢转子磁势 q' 旋转 60° ,结果如图 6(d) 所示。同理当电机磁极转子旋转至图 6(d) 位置则重复前面过程,定时施加电压脉冲 V_3 和 V_4 并比较 $(I_3 - I_4) > I_{thres}$ 是否成立,进而进一步换相,而 I_{thres} 的值可通过测试获得较合适的值。该方法不依赖于电机的转速,而是利用电机 q 轴和 d 轴之间的电感差异。

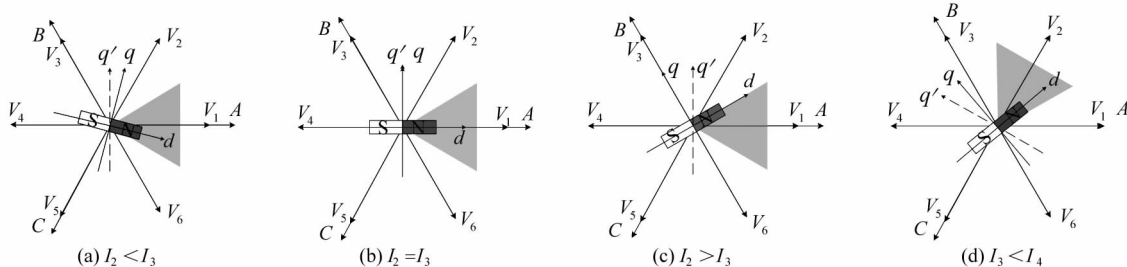


图 6 换相示意过程

Figure 6 Rotor position estimation for communication

4 实验结果与讨论

通过以上的理论分析搭建了对转式永磁无刷直流电机驱动系统实验平台,图 7 为实验系统框图。电机的初始位置检测和加速过程的程序流程图如图 8 所示。

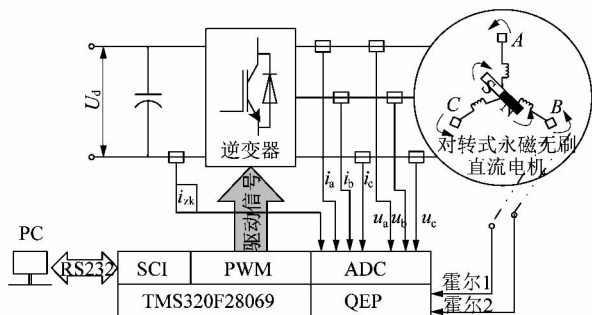
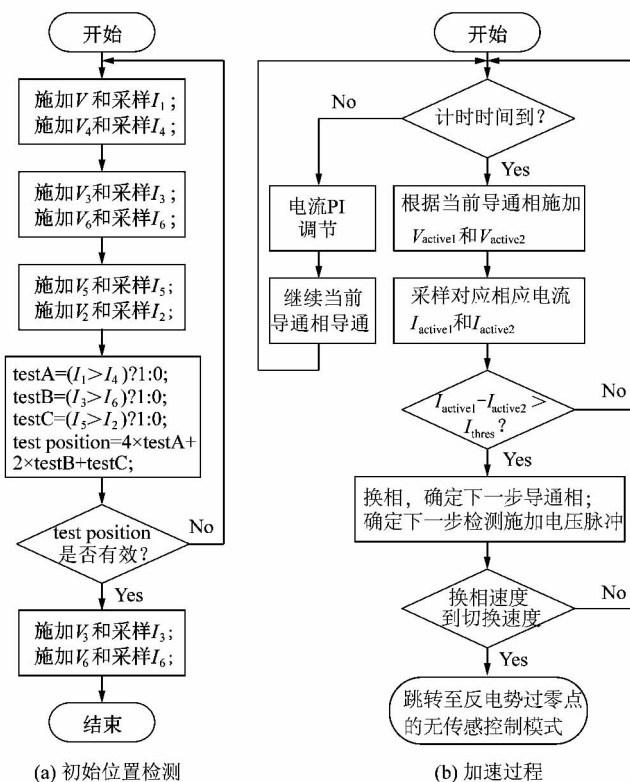


图 7 对转式永磁无刷直流电机实验系统框图

Figure 7 Experimental system configuration

图 9 为初始位置检测和加速启动过程实验波形,图 9(a) 中矩形 1 区域为初始位置检测施加的 6 个短时脉冲在直流母线和 U 相中电流响应,局部放大后如图 9(b) 所示,矩形区域 2 为启动加速过程,换相过程在加速,换相速度达到切换速度后切换至反电势过零点模式,此时检测信号不再输出,换相信号由反电势过零点检测得出,局部放大波形如图 9(c) 所示。在图 9(c) 中,换相由于电流采样的误差存在,会出现比最佳



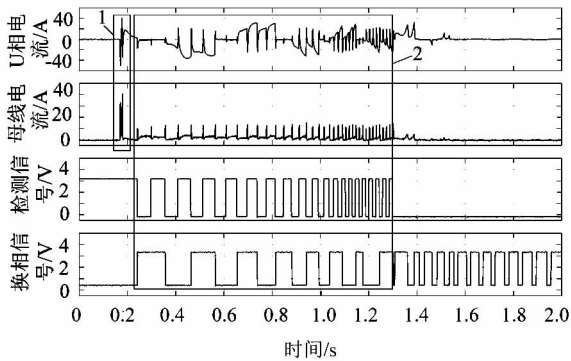
(a) 初始位置检测

(b) 加速过程

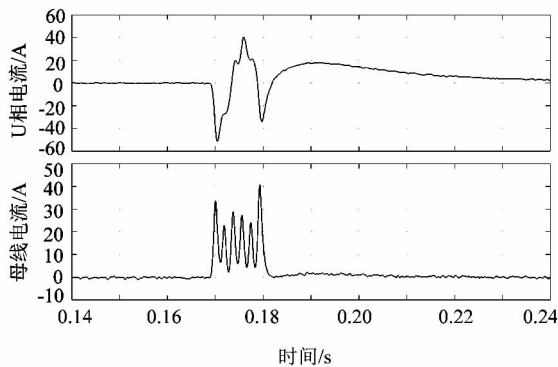
图 8 初始位置检测和加速过程流程图

Figure 8 Flow chart of whole estimation process

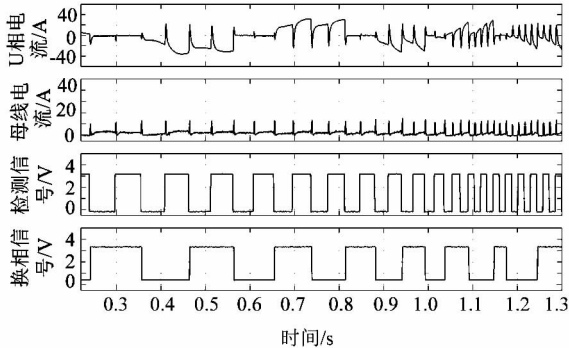
换相点早换相或者迟换相现象,从而换相速度并不是均匀加快,而是呈现总体加快的趋势。



(a) 启动到切换反电势过零点过程实验波形



(b) 图(a)中矩形1放大波形



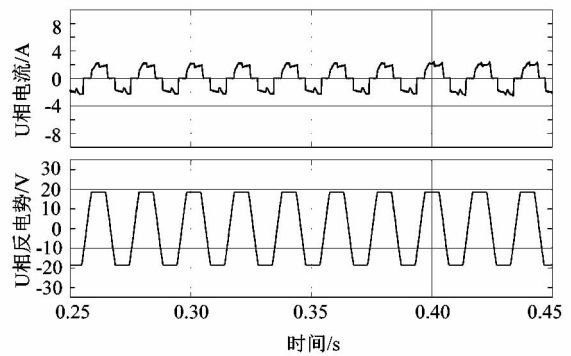
(c) 图(a)中矩形2放大波形

图9 启动过程实验结果图

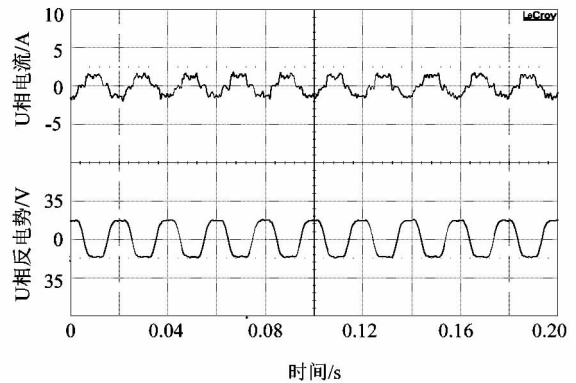
Figure 9 Experiment results of start-up process

图10为对转式永磁无刷直流电机运转在1000 r/min下基于反电势过零点仿真实验波形、霍尔有位置检测和反电势过零点无位置检测控制实验结果的对比,图10(b)和图10(c)中反电势和相电流波形经过阻容滤波电路在示波器中显示,实验结果证明仿真与实验结果相吻合,有位置和无位置控制效果相近。

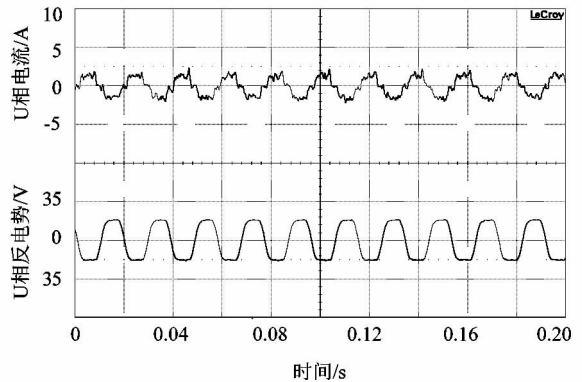
通过以上实验验证,反电势过零点方法能够移植到对转式永磁无刷直流电机当中,并且本文提出的基于电感差异的初始位置检测和启动方法能够有效解决对转式电机静止启动困难问题,该方法依赖于电机自身参数和电流采样电路的精度。



(a) 基于反电势过零点仿真实验波形



(b) 基于霍尔有位置检测控制实验波形



(c) 基于反电势过零点无位置控制实验波形

图10 反电势过零点实验结果图

Figure 10 Experiment results of back-EMFs strategy

5 结语

对转式永磁无刷直流电机霍尔安装困难、结构复杂、易受干扰,成本较高,本文研究了对转式永磁无刷直流电机基于反电势过零点的无位置检测控制,并解决了初始位置检测和启动困难问题。通过实验验证该初始位置检测、启动加速方法以及反电势过零点无位置传感器算法能够实现对转式永磁无刷直流电机的控制。给对转式永磁无刷直流电机的研究和无位置检测控制策略提供了一定的理论和实验基础。

(下转第64页)