

无刷直流电机高精度换相控制

尤钱亮, 陆佳琪

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对无刷直流电机(BLDCM)换相期间不导通相续流而产生端电压脉冲的问题,依据反电动势(EMF)过零法原理,分析了端电压脉冲产生的原因及对反电动势过零检测精度的影响,提出了一种利用软件算法避开端电压脉冲从而实现无位置传感器 BLDCM 高精度换相的控制方法。首先,利用条件语句及程序运行时间差避开端电压脉冲;为了在重载情况下提高所设计程序运行时间差的容错率,提出一种减小换相续流时间的方法;最后,搭建了无传感器 BLDCM 试验平台对上述方法进行试验验证。试验结果证明了所提方法在不同占空比和负载下的有效性和准确性。

关键词: 无刷直流电机; 端电压脉冲; 反电动势过零; 换相续流

中图分类号: TM 33:TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0046-05

High Precision Commutation Control of Brushless DC Motor

YOU Qianliang, LU Jiaqi

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the problem of terminal voltage pulse caused by non-conducting phase continuum during commutation of brushless DC motor, based on the principle of back electromotive force (EMF) zero-crossing, the causes of terminal voltage pulse and its influence on the detection accuracy of back-EMF zero-crossing were analyzed. A control strategy for high precision commutation of sensorless brushless DC motor by avoiding terminal voltage pulse using software algorithm was proposed. The conditional statement and program run time difference were used to avoid the terminal voltage pulse. At the same time, in order to improve the fault tolerance rate of run time difference of the designed program under heavy load, a strategy to reduce commutation continuum time was proposed. Finally, a sensorless brushless DC motor experimental platform was built to verify the above strategy. The experimental results showed the effectiveness and accuracy of the proposed strategy under different duty cycles and loads.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); terminal voltage pulse; back electromotive force (EMF) zero-crossing; commutation continuum

0 引言

无刷直流电机(BLDCM)具有结构简单、运行效率高和调速性能好等优点,在工业领域得到了广泛的应用。但是位置传感器的安装,增加了电机的体积和成本,以及信号线的数量,使电机的可靠性降低。因此,近年来 BLDCM 无位置传感器控制和换相方法成为研究热点之一。

文献[1]为了消除非导通相的电流续流过程,提出了一种脉宽调制(PWM)方法,即 PWM-ON-PWM 调制方法。文献[2]为了实现 BLDCM 无位置传感器控制,提出了一种改进型的线反电动势滑模观测器。文献[3]针对电流续流影响端电压的机理加以分析,建立了电流续流产生相位超前的数学模型,并给出了位置检测信号相位超前的补偿算法。文献[4]提出了一种基于 Z 源逆

作者简介:尤钱亮(1995—),硕士研究生,研究方向为电机驱动控制。

陆佳琪(1995—),硕士研究生,研究方向为电机驱动控制。

变器的无位置传感器 BLDCM 的反电动势过零检测方法。文献[5]研究了一种与电机转速无关的固定相位滞后的开关电容低通滤波器,并基于该滤波器提出了一种新型的无位置传感器 BLDCM 转子位置检测方法。文献[6]提出了一种利用线电压来实时计算反电动势的 BLDCM 转子位置辨识方法。文献[7]提出基于全局快速终端滑模观测器的无位置传感器控制方法,并将混合滑模面引入到观测器中,以减少常规滑模观测器的相位滞后问题。文献[8]给出了低速时 H_PWM-L_ON 方式的一种改进的换相转矩脉动补偿方法,并在此基础提出了改进的电压滞环 PWM 方法。文献[9]提出了一种基于假中性点基波电压的检测方法。文献[10]在对非导通相端电压进行定区间检测以及对换相时的续流噪声采取适当的延时操作来避开干扰。文献[11]提出了一种基于虚拟中性点的 BLDCM 无位置换相误差闭环校正方法。文献[12-15]提出了一种抑制 BLDCM 换相转矩脉动的方法。文献[16]提出 ON-PWM-PWM 重叠换相方法来抑制换相转矩脉动。文献[17]提出了一种基于 dq 坐标系下的任意反电动势波形 BLDCM $i_d=0$ 的矢量控制方法,根据所求 q 轴电流进行跟踪控制来消除转矩脉动。

针对换相续流问题,上述文献多采用滤波方式。但是,若滤波不彻底则会有噪声,若深度滤波则会有严重的相位延迟。为此,上述文献各自提出了解决相位延迟的方法来找到精准的换相点,但均相对复杂,无法适用于实际工况。针对 BLDCM 换相期间由于不导通相续流而产生端电压脉冲的问题,本文提出了一种利用软件算法避开端电压脉冲从而实现无位置传感器 BLDCM 高精度换相的控制方法。从软件层面着手,利用条件语句及程序运行时间差避开端电压脉冲。同时,为了在重载情况下提高所设计程序运行时间差的容错率,提出了一种减小换相续流时间的方法。试验结果证明了所提方法在不同占空比和负载下的有效性和准确性。

1 反电动势过零检测原理

无位置传感器 BLDCM 常见的导通方式有两两导通和三三导通。本文采用两两导通,上管 PWM 斩波、下管恒通的控制方式。BLDCM 拓扑

结构如图 1 所示。

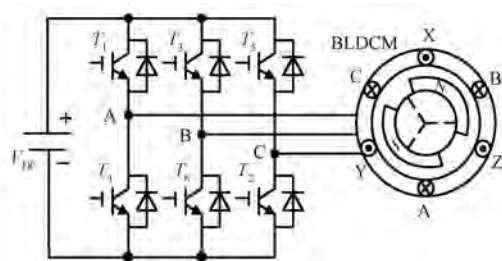


图 1 BLDCM 拓扑结构

反电动势过零检测电路如图 2 所示。图 2 中 ABC 分别接电机的三相线,经过一个分压网络后分别为 E_A 、 E_B 、 E_C ,再由控制芯片采集三相电压, U_N 为估测的变形后的中点电压。只要在 AB 通电期间开通 E_C 与 U_N 的比较;AC 通电期间开通 E_B 与 U_N 的比较;BC 通电期间开通 E_A 与 U_N 的比较就可以检测出各相的过零事件。理想反电动势波形如图 3 所示。

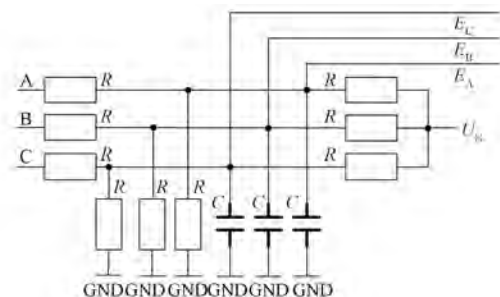


图 2 反电动势过零检测电路

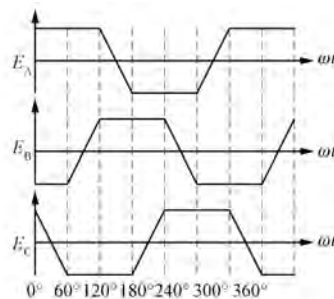


图 3 理想反电动势波形

2 端电压脉冲及解决方法

2.1 端电压脉冲

以 AB 到 AC 的换相过程为例,换相期间,B 相电流突然减小,线圈的自身电感在续流期间生

成一个电动势,且方向与原来相反,并叠加在中点之上,如图4所示。图4(a)中B端电位高于中点电位,并且B线圈的感生电动势是导体切割磁力线产生的;而图4(b)中的续流电动势是B线圈自身的电感产生的,大小高于切割磁力线的感生电动势。

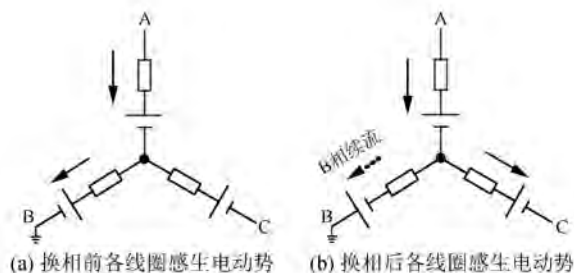


图4 从AB到AC换相过程中各线圈的感生电动势

当B线圈能量耗尽后,切割磁力线的行为再次成为主导B相感生电动势的主要因素,因此B端电位此时又会低于中点电位。这就是所谓的“端电压脉冲”。分析可知,三相感生电动势实际波形如图5所示。

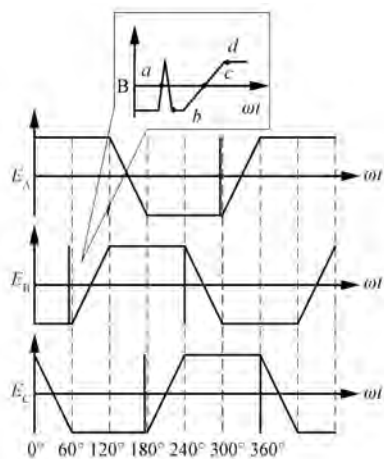


图5 三相感生电动势实际波形

2.2 换相操作

在程序中做出如下规定:

当 U_N 电压高于 U_X (X 取a、b、c)电压时设置变量 $SENSE_H=1$,否则设置变量 $SENSE_H=0$ 。

AC导通期间,在a点检测到B相的过零事件触发中断。由于B相的续流会产生端电压脉冲,第一次的过零事件是假的,第二次是真的,第一次进中断后先判断 $SENSE_H$ 是否等于1。由

于单片机需要做保存堆栈指针等操作(即程序运行时间差),此时B相已经在b点了, $U_N > U_b$,所以 $SENSE_H=1$,仍然保持AC相导通, $SENSE_H=1$,所以退出中断。第二次在c点检测到B相的过零事件触发中断,因为单片机需要做保存堆栈指针等操作,此时B相已经在d点了, U_N 电压低于 U_b ,所以 $SENSE_H=0$,则执行换相操作后退出中断。控制流程图如图6所示。

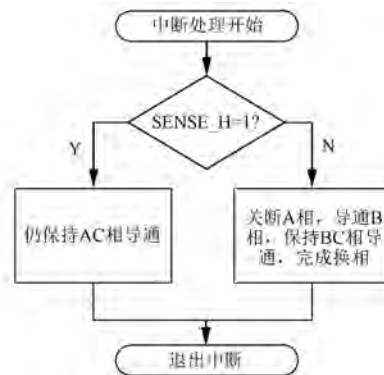


图6 控制流程图

同理以上操作可用于其余两相。

2.3 减小换相续流时间的方法

当负载过大,电机换相续流时间过长时,端电压脉冲变宽,如图7所示。图7中, t_1 和 t_2 相等,均等于程序运行时间差,一般情况下,程序运行时间差约为几十微秒,而端电压脉冲持续时间在纳秒级别。轻载情况下,从终端开始到程序运行时间差结束,端电压脉冲已经过去;而重载情况下,为了避免发生图7(b)中程序运行后,停留在端电压脉冲的高电位上的情况,提出缩小电机续流时间的方法。

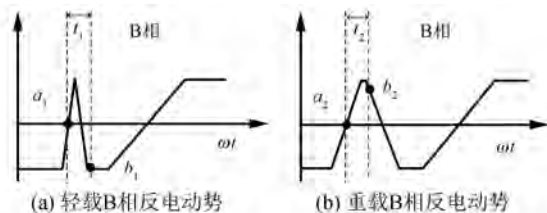


图7 B相反电动势端电压脉冲放大图

仍以AB到AC的换相过程为例,换相时刻等效电路图如图8所示。

图8中, D 为斩波占空比。由图8了解得相电流为

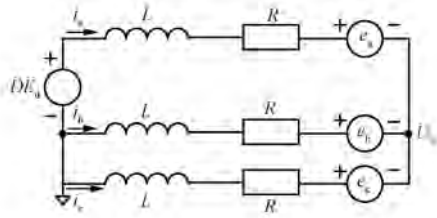


图8 换相时刻等效电路图

$$i_a(t) = \frac{2}{3L}(DE_d - k_e\omega_m)t \quad (1)$$

$$i_b(t) = -I_0 + \frac{1}{3L}(4k_e\omega_m + 3RI_0 - DE_d)t \quad (2)$$

$$i_c(t) = I_0 - \frac{1}{3L}(2k_e\omega_m + 3RI_0 + DE_d)t \quad (3)$$

式中: I_0 ——电流峰值;

$k_e\omega_m$ ——反电动势峰值。

在AB到AC换相时刻,强制关断a相上管,则a相电流 i_a 通过下管反并联二极管续流,c相按原来方式进行导通。处理后,换相时刻把直流母线电压 E_d 反向加在 U_b 、 U_c 两端,加快储存在b相电感 L_b 上释放的能量,从而缩短b相续流时间。换相时刻强制关断上管等效电路图如图9所示。

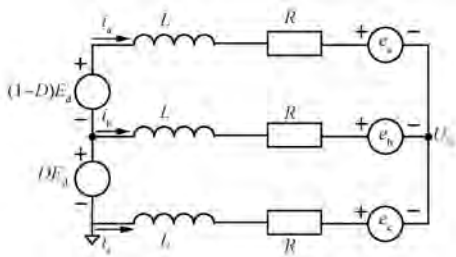


图9 换相时刻强制关断上管等效电路图

由图9解得相电流:

$$i_a(t) = \frac{2}{3L}(DE_d - \frac{1}{2}E_d - k_e\omega_m)t \quad (4)$$

$$i_b(t) = -I_0 + \frac{1}{3L}(4k_e\omega_m + 3RI_0 + 2E_d - DE_d)t \quad (5)$$

$$i_c(t) = I_0 - \frac{1}{3L}[2k_e\omega_m + 3RI_0 + (D+1)E_d]t \quad (6)$$

换相时刻增大上管PWM斩波占空比,使 $D=1$,代入式(4)、式(5)和式(6)得:

$$i_a(t) = \frac{2}{3L}\left(\frac{1}{2}E_d - k_e\omega_m\right)t \quad (7)$$

$$i_b(t) = -I_0 + \frac{1}{3L}(4k_e\omega_m + 3RI_0 + E_d)t \quad (8)$$

$$i_c(t) = I_0 - \frac{1}{3L}(2k_e\omega_m + 3RI_0 + 2E_d)t \quad (9)$$

比较式(8)和式(2)可以看出,式(8)中变量 t 的系数大于式(2)中 t 的系数,则式(8)中b相电流从 I_0 减小到零的时间小于式(2)的时间。因此,上管换相时刻强制关断上管,可以有效缩短换相续流时间,以确保所设计的换相方法精确。以AB到AC的换相为例,换相时强制关断a相上管的时间在程序中设为10 ns。其余换相点作同类设置。

3 结果与分析

在无刷直流电机调速平台上,对本文提出的无位置传感器无刷直流电机高精度换相方法进行了试验验证。

试验用BLDCM参数如表1所示。

表1 试验用BLDCM参数

参数名称	参数值
额定功率/W	48
额定电压/V	24
额定电流/A	2
额定转矩/(N·m)	0.3
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
极对数	4

为了证明所设计的缩短换相续流时间方法的实用性,在额定负载下,分别在30%、50%和100%占空比3种情况下采集B相端电压,如图10~图12所示。从图10~图12可以看出明显的端电压脉冲,还可以看出端电压脉冲时间缩短。由此,验证了本文所设计的缩短换相续流时间方法的实用性。

为了验证本文所设计的控制方法的准确性,将试验对象改成同等参数的有位置传感器BLDCM,同时利用高精度换相方法进行换相控制,通过位置传感器得出实际转子位置,通过的换相方法得到估算转子位置,设定转速为600 r/min,如图13所示。从图13可以看出估算

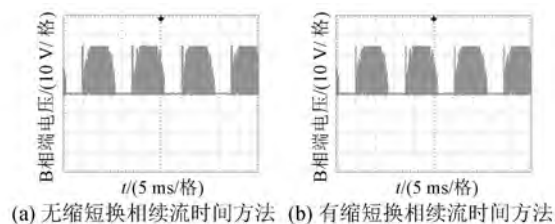


图 10 30% 占空比下 B 相端电压

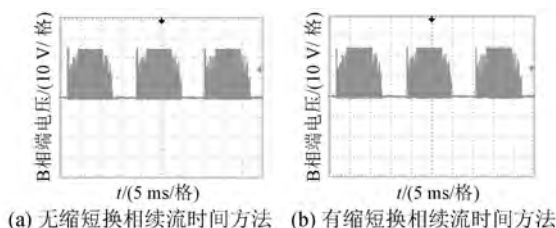


图 11 50% 占空比下 B 相端电压

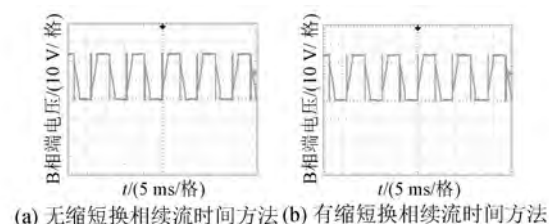


图 12 100% 占空比下 B 相端电压

的转子位置与实际位置误差非常小,证明本文所设计的高精度换相方法的精度好。

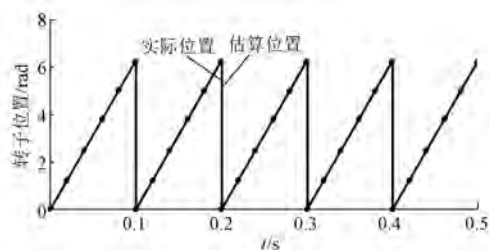


图 13 转子位置

4 结 语

为了解决 BLDCM 换相期间由于不导通相续流而产生端电压脉冲的问题,本文提出了一种利用软件算法避开端电压脉冲从而实现无位置传感器 BLDCM 高精度换相的控制方法。结合试验验证与分析,得出如下结论:

(1) 试验中实际转子位置与估算转子位置的

对比证实了本文所设计的 BLDCM 高精度换相方法的有效性。

(2) 在额定负载下不同占空比的试验中,有无缩短换相续流时间方法的 B 相端电压对比结果验证了本文提出的缩短换相续流时间方法的实用性。

【参考文献】

- [1] 韦鲲,胡长生,张仲超.一种新的消除无刷直流电机非导通相续流的 PWM 调制方式[J].中国电机工程学报,2005,25(7): 104.
- [2] 史婷娜,肖竹欣,肖有文,等.基于改进型滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2015,35(8): 2043.
- [3] 杨明,刘杰,徐殿国.重载条件下无刷直流电机无位置传感器驱动换相续流影响的分析及其补偿[J].中国电机工程学报,2013,33(30): 106.
- [4] 李新旻,夏长亮,陈炜,等.Z 源逆变器驱动无位置传感器无刷直流电机反电势过零点检测方法[J].中国电机工程学报,2017,37(17): 5153.
- [5] 邹继斌,江善林,张洪亮.一种新型的无位置传感器无刷直流电机转子位置检测方法[J].电工技术学报,2009,24(4): 48.
- [6] 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.
- [7] 王晓远,傅涛.基于全局快速终端滑模观测器的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2017,32(11): 164.
- [8] 揭贵生,马伟明.考虑换相时无刷直流电机脉宽调制方法研究[J].电工技术学报,2005,20(9): 66.
- [9] 王大方,祝雅琦,金毅,等.一种新颖的无刷直流电机位置检测方法[J].电工技术学报,2013,28(2): 139.
- [10] 王大方,于知杉,金毅,等.无位置传感器无刷直流电机无硬件滤波转子位置检测方法[J].电工技术学报,2017,32(19): 71.
- [11] 李红,金浩,李海涛,等.一种基于电机虚拟中性点的无刷直流电机无位置换相误差闭环校正方法[J].电工技术学报,2017,32(1): 175.
- [12] WANG Y, ZHANG X, YUAN X, et al. Position-sensorless hybrid sliding-mode control of electric vehicles with brushless DC motor [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 421.

(下转第 57 页)

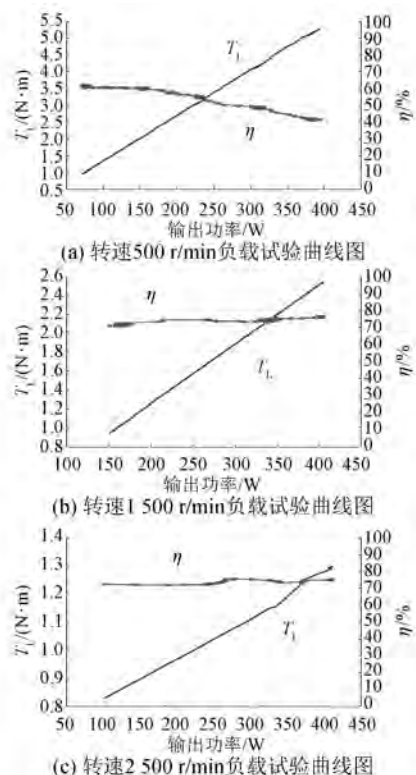


图 12 不同转速下的负载试验曲线图

结合的变角度斩波控制方式对转速进行调节,并通过模块化设计方法实现软件编程。基于 STM32F103RBT6 芯片搭建控制系统进行试验验证,在不同转速条件下测试样机的运行效率等参数,验证了样机系统良好的负载特性。通过实际钻孔试验证明了电机的钻孔性能符合设计要求,并且转速平稳、振动噪声低,可以替代感应电机进行直驱应用。

【参考文献】

- [1] 徐进.电动工具用三相开关磁阻电机及其驱动控制系统的研究[D].济南:山东大学,2018.
- [2] 朱金宝,高建平,刘丽坤.电动工具用高速开关磁阻电机设计与性能分析[J].新型工业化,2016,6(5): 55.
- [3] 闫朝阳,张微,顾和荣,等.双向开关高频变换型三相异步电机软起动器[J].电力电子技术,2009,43(12): 52.
- [4] 郑宁.新型开关磁阻电机及其在电动工具上的应用[J].电动工具,2011(6): 9.
- [5] 张磊,林明耀,李鑫.新型轴向磁场磁通切换型永磁电机外围漏磁有限元处理方法[J].微特电机,2010,38(1): 9.
- [6] 朱曰莹,赵桂范,杨娜.电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化[J].电工技术学报,2014,29(11): 88.
- [7] 成亚萍.智能台钻的智能控制[J].湘潭大学自然科学学报,1997,19(4): 87.
- [8] 李明辉,徐少辉.电动车用开关磁阻电机驱动系统[J].电机与控制应用,2016,43(2): 49.
- [9] 臧平宇,张广明,梅磊.轴向磁通开关磁阻电机的电流斩波控制研究[J].电源技术,2016,40(4): 889.
- [10] 江小军.开关磁阻电机调速系统研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [11] 冯一鹏.开关磁阻电机双闭环控制系统设计[J].化学工程与装备,2008(6): 47.
- [12] 石小波.电动车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究及实现[D].长沙:湖南大学,2008.

收稿日期: 2019-06-05

(上接第 50 页)

- [13] TSOTOLIDIS S, SAFACAS A N. Deployment of an adaptable sensorless commutation technique on BLDC motor drives exploiting zero sequence voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 877.
- [14] PARK J, HWANG S, KIM J. Sensorless control of brushless DC motors with torque constant estimation for home appliances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 677.
- [15] CUI C, LIU G, WANG K, et al. Sensorless drive for

high-speed brushless DC motor based on the virtual neutral voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3275.

- [16] 杨成顺,葛乐,杜九江.计及等效电阻的无刷直流电机换相转矩脉动的分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2016,44(23): 115.
- [17] 夏加宽,韩行一,王成元.非理想反电动势的无刷直流电机的转矩脉动抑制策略研究[J].电气技术,2009(9): 14.

收稿日期: 2019-07-04