

# 基于无位置传感器 BLDCM 转矩脉动抑制的研究

郑晓婉, 杨胜浩, 曹玲芝

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 针对无刷直流电机(BLDCM)因其本身结构特点和传统调制方式而产生转矩脉动,导致应用场合受到其限制,尤其是无法应用于高精度伺服系统的问题,提出了在无位置传感器的前提下,用PWM-ON-PWM调制方式和BUCK变换器相结合的控制方式消除或者抑制转矩脉动.仿真结果表明,该方法不仅可以完全消除电机运行过程中关断相的续流,从而消除了非换相转矩脉动,而且对换相转矩脉动也有一定的改善.

**关键词:** 无刷直流电机; 转矩脉动抑制; 无位置传感器; PWM-ON-PWM调制; BUCK变换器

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.02.017

## Research for BLDCM torque ripple suppression based on position sensorless

ZHENG Xiao-wan, YANG Sheng-hao, CAO Ling-zhi

(College of Electric Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Brushless DC motor (BLDCM) has the problem of torque ripple due to its structural characteristics and traditional modulation mode, which limits its application range and especially in high precision servo system. A control method that combines the PWM-ON-PWM modulation mode with BUCK converter basis on position sensorless was proposed, to eliminate or suppress the torque ripple. Simulink results showed that the method can not only completely eliminate the freewheel current of silent phase to eliminate the non-commutation torque ripple, but also decrease the commutation torque ripple in the running process of the motor.

**Key words:** brushless DC motor (BLDCM); torque ripple suppression; position sensorless; PWM-ON-PWM modulation; BUCK converter

## 0 引言

无刷直流电机(BLDCM)具有结构简单、噪声小、效率高、功率大等优点,在现代电机调速系统中具有重要的地位,其性能直接决定整个调速系统性能的好坏.但是由于电机绕组电感的存在,电流变换需要一定的时间,这会造成很大的转矩脉动,从

而限制BLDCM在高精度伺服系统的应用,所以抑制转矩脉动成为BLDCM控制技术的研究热点.从电机本体考虑,BLDCM采用电子换相取代机械换相,需要位置传感器获取准确的位置信号.而位置传感器安装出现偏差易引起相电流畸变,或者当电机处在恶劣的工作环境时位置传感器工作异常,均会引起转矩脉动.从控制策略考虑,转矩脉动的产

收稿日期: 2015-01-26

基金项目: 郑州市创新团队项目(131PCXTD594)

作者简介: 郑晓婉(1979—),女,河南省南阳市人,郑州轻工业学院讲师,硕士,主要研究方向为测试计量技术及仪器.

生有两种可能:一是在传统的斩波调制方式下,非换相期间关断相经过二极管续流造成非换相转矩脉动;二是在换相期间,由于开通相电流的上升速率和关断相电流的下降速率不一致而造成换相转矩脉动.文献[1-3]研究了无位置传感器的设计,没有进一步研究转矩脉动的抑制方法.文献[4-5]从抑制换相转矩脉动角度进行了研究分析,忽略了非换相转矩脉动.文献[6]研究了同时抑制非换相转矩脉动和换相转矩脉动,没有考虑位置传感器带来的转矩脉动问题.因此,本文拟基于无位置传感器,采用PWM-ON-PWM型调制方式和BUCK变换器相结合的控制方式对BLDCM转矩脉动的抑制进行研究,并进行仿真验证.

### 1 BLDCM 数学模型

三相方波BLDCM主回路结构如图1所示,主回路采用三相全桥驱动控制方式.理想情况下,非换相期间每一时刻两相处于导通状态,一相处于悬空状态,每60°换相1次.图中A、B、C分别代表电机三相绕组,为了方便分析,作如下假设:1)电机三相绕组采用星型结构,绕组对称且相位在空间上相差120°;2)忽略涡流损耗和磁路饱和;3)不计三相绕组电枢反应;4)电机三相绕组电阻、自感和互感均为常数且相同;5)反电动势为理想梯形波,相电流为理想方波.

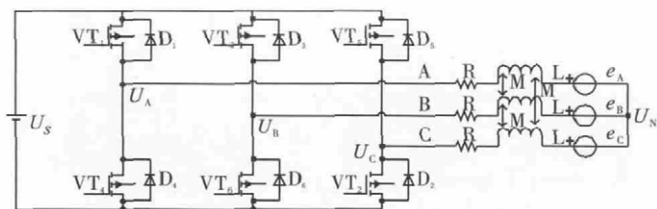


图1 三相方波BLDCM主回路结构图

根据以上假设, BLDCM的端电压方程的矩阵形式可表示为

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_N \\ U_N \\ U_N \end{bmatrix}$$

式中  $U_A, U_B, U_C$  分别为电机三相定子绕组端电压;  $R$  为定子绕组电阻;  $P$  为微分算子;  $L$  为定子绕组等效自感;  $M$  为定子绕组等效互感;  $i_A, i_B, i_C$  为三相定子电流;  $e_A, e_B, e_C$  为三相定子绕组反电动势;  $U_N$

为电机中性点电压.

由于电机三相定子绕组Y形连接,所以三相电流满足

$$i_A + i_B + i_C = 0 \tag{1}$$

由电机理论可知,电磁转矩可以表示为

$$T_e = \frac{p}{\omega} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) \tag{2}$$

式中  $p$  为电机的极对数  $\omega$  为电机的机械角速度.

非换相期间,不考虑关断相续流,任意时刻两相导通,一相电流为零.导通两相绕组上的反电动势幅值相等,方向相反,用  $E_n$  表示;相电流大小相等,方向相反,用  $i_d$  表示,由公式②得

$$T_{e-n} = \frac{p}{\omega} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) = \frac{2p}{\omega} E_n i_d \tag{3}$$

换相期间,假设A相关断,B相开通,C为非换相相.由于换相时间较短,近似认为反电动势幅值不变,当上桥臂换相时  $e_A = e_B = -e_C = E_m$ ,由公式①②得

$$T_{e-m} = \frac{p}{\omega} (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) = -\frac{2p}{\omega} E_m i_C \tag{4}$$

由式③④可以看出,非换相期间和换相期间的电磁转矩均与电流有关,因此只要保证电流恒定,即可消除电磁转矩脉动.

### 2 转矩脉动的产生原因和抑制措施

#### 2.1 位置传感器引起的转矩脉动

BLDCM需要安装位置传感器,若工作异常则会引起转矩脉动.国内外传统的转子位置检测方法有反电动势法、续流二极管法、电感法和状态观测器法等.端电压差过零检测法<sup>[7]</sup>是对传统转子位置检测方法的改进,在不考虑关断相续流的前提下,通过检测端电压差的过零点,延迟90°电角度得到换相信号.采用端电压差过零检测法替代位置传感器来获得换相信号,可以有效避免以上不足.

#### 2.2 非换相转矩脉动

非换相期间,系统进行PWM斩波调制引起关断相绕组通过该相逆变器上桥臂或下桥臂上二极管续流,该电流产生额外的反向电磁转矩,叠加在导通相电流产生的电磁转矩上,造成非换相期间的转矩波动<sup>[9]</sup>.

BLDCM采用两两导通,三相六状态120°导通方式时,有5种常用斩波调制方式:1)ON-PWM型,各管前60°恒通,后60°PWM调制;2)PWM-ON型,各管前60°PWM调制,后60°恒通;3)H-PWM-L-ON型,上桥PWM调制,下桥恒通;4)H-ON-L-PWM型,上桥恒通,下桥PWM调制;5)H-PWM-ON-PWM

型,上桥和下桥同时 PWM 调制.文献[8]对 5 种常用调制方式中电流换相对电机转矩脉动的影响进行分析,得出采用 PWM-ON 型调制方式产生的转矩脉动最小,H-PWM-ON-PWM 型调制方式产生的转矩脉动最大的结论.文献[9]对 5 种常用调制方式对关断相续流的影响进行分析,得出只有采用 H-PWM-ON-PWM 型调制方式时,非换相区间关断相无续流的结论.为了得到一种非换相期间关断相不产生续流并且产生转矩脉动最小的最优调制方式,在分析各相在关断期间不产生续流的条件下,笔者提出了 PWM-ON-PWN 型调制方式.该调制方式在每一个功率管开通的前 30°和最后 30°区间进行斩波调制,中间 60°区间保持恒通.此调制方式的功耗是双极性调制方式的一半,而且能够完全消除非换相期间关断相续流,消除非换相转矩脉动.

### 2.3 换相转矩脉动

研究<sup>[10]</sup>表明,换相时转矩脉动可以达到平均转矩的 50%.换相期间,假设 A 相关断,B 相开通,C 为非换相相.关断相 A 通过下桥臂二极管  $D_4$  续流,开通相 B 正向导通.三相端电压可以表示为

$$U_A = Ri_A + LPi_A + e_A + U_N = 0 \quad (5)$$

$$U_B = Ri_B + LPi_B + e_B + U_N = U_s \quad (6)$$

$$U_C = Ri_C + LPi_C + e_C + U_N = 0 \quad (7)$$

由式⑤⑦得

$$R(i_A - i_C) + LP(i_A - i_C) + 2E_m = 0 \quad (8)$$

由式①⑥⑦得

$$R(i_A + 2i_C) + LP(i_A + 2i_C) - 2E_m = -U_s \quad (9)$$

由式⑧⑨得

$$Ri_C + LPi_C = (4E_m - U_s) / 3 \quad (10)$$

由于电机换相持续时间短,电枢绕组电阻很小,  $|Ri_C| \ll |Pi_C|$ ,所以忽略电枢绕组的影响,并设 C 相电流的初值为换相前后各相电流的稳态值  $I_0$ ,则由式⑩得

$$i_C = -I_0 + \frac{4E_m - U_s}{3L}t \quad (11)$$

对于式④⑪,如果  $4E_m = U_s$ ,电机运行在中速区,则有  $i_C = -I_0$ ,非换相电流无波动,如图 2 所示不同转速换相期间各相电流波形图 a);如果  $4E_m < U_s$ ,电机运行在低速区,则有  $i_C < -I_0$ ,即  $|i_C| > |I_0|$ ,非换相电流增大,如图 2b)所示;如果  $4E_m > U_s$ ,电机运行在高速区,则有  $i_C > -I_0$ ,即  $|i_C| < |I_0|$ ,非换相电流减小,如图 2c)所示.

根据以上分析,要降低换相转矩脉动,就要设法减小换相期间非换相电流波动.对于实际应用中的 BLDCM 较常见的情况是换相转矩脉动减小的情

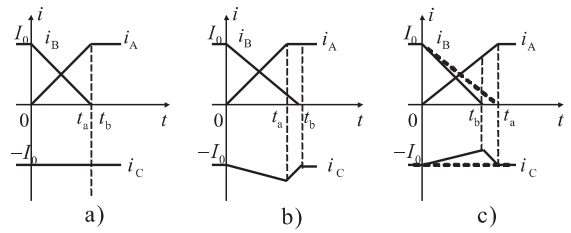


图 2 不同转速换相期间各相电流波形图

况,而换相转矩脉动增大的情况比较少<sup>[9]</sup>.也就是说,换相转矩脉动主要来自电机高速运行期间的脉动.对此可以采用控制措施减缓关断相续流电流的下降速率,或者加快开通相电流的上升速率,使二者速率代数和为零,即可控制非换相电流,如图 2c)虚线部分所示.

### 3 改进的控制方式及分析

为了更好地对转矩脉动进行有效抑制,在使用无位置传感器的前提下,除了采用 PWM-ON-PWN 型调制方式消除非换相转矩脉动外,还结合 BUCK 变换器对非换相电流进行改善.改进 BLDCM 主回路结构图见图 3,BUCK 变换器电路结构图见图 4.

由图 4 可知,当功率管  $VT_7$  导通时,导通时间为  $t_{on}$ ,电感  $L$  储能;当  $VT_7$  关断时,关断时间为  $t_{off}$ ,此时电路通过二极管  $D_1$  续流,电感  $L$  通过  $D_1$  将储存的能量释放给负载  $R_1$ .假设电路正常工作时电感中电流连续,功率管  $VT_7$  和续流二极管  $D_1$  的导通压降为零.用  $T$  表示功率管开关周期, $D$  表示功率管导通占空比,则负载  $R_1$  两端的电压平均值可以表示为

$$U_0 = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}U_s = \frac{t_{on}}{T}U_s = DU_s$$

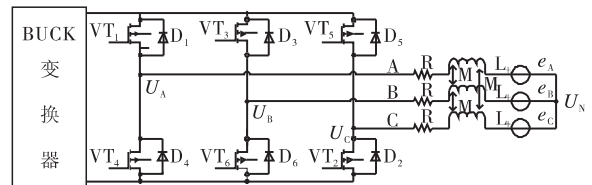


图 3 改进 BLDCM 主回路结构图

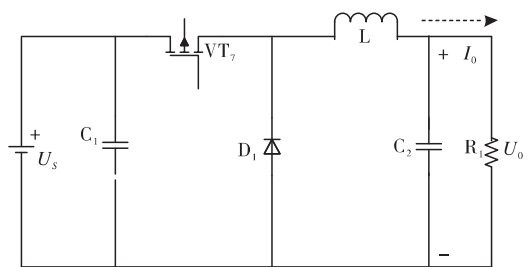


图 4 BUCK 变换器电路结构图

功率管导通期间电感中电流脉动值可以表示为<sup>[10-11]</sup>

$$\Delta i_L = \frac{U_s - U_0}{L}DT = \frac{U_s(1-D)D}{L}T$$

从上式可以看出,当  $U_s$ 、 $T$  和  $D$  的值固定不变,且电感值趋于无穷大时,负载电流脉动趋近于零.利用 BUCK 电路的这一特性,可以在一定程度上改善母线电流和非换相电流.文献[9]验证了直流母线出现负电流时产生的换相转矩脉动要大于无负电流时产生的换相转矩脉动,因此在换相期间若出现直流母线负电流,如果能够将其消除,则必然会改善换相转矩脉动.

综上,采用端电压差过零检测法获取换相信号,以控制电机正确换相;在此基础上,将 PWM-ON-PWN 型调制方式和 BUCK 变换器相结合,共同完成转矩脉动的抑制.该控制方式不仅能够消除位置传感器安装偏差和电机受工作环境影响出现的转矩脉动,而且在完全消除了非换相转矩脉动的同时,换相转矩脉动也会得到很好的改善.

### 4 系统仿真与分析

BLDCM 控制系统采用双闭环控制策略,内环为电流环,外环为转速环,控制系统框图如图 5 所示.

电流环控制相电流,提高系统的动态响应速度;转速环控制实际转速,抑制转速的波动,增强系统的抗负载干扰能力.由于没有位置传感器提供转子位置信号,在电机启动时刻转速较低,反电动势很小或者为零,无法准确获得转子位置信号,因此需要专门的启动模块.当电机转速达到能够正常检测到转子位置信号的时刻,通过逻辑判断模块切换至线端电压差过零检测模块,系统通过间接检测线端电压差的过零点,获得转子位置信号,控制电机完成换相.

根据图 5,在 Matlab/Simulink 中建立仿真模型如图 6 所示.在 BLDCM 控制系统仿真模型中,电机参数设置为:定子电阻  $2.8 \Omega$ ,定子电感  $8.6 \text{ mH}$ ,转子转动惯量  $0.93 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,磁极对数为 4,电机供电电压  $500 \text{ V}$ ,仿真时间  $0.5 \text{ s}$ .在  $0.2 \text{ s}$  时加入  $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$  负载. BUCK 变换器的参数设置为:脉冲发生器周期  $T = 0.02 \text{ ms}$ ,脉冲宽度为  $25\%$ ,电感值  $L = 120 \times 10^{-4} \text{ H}$ ,电容值  $C = 3 \times 10^{-4} \text{ F}$ .

前置 BUCK 变换器逆变器母线电流和无 BUCK 变换器逆变器母线电流随时间变化关系分别如图 7 和图 8 所示.由图 7 和图 8 可以看出,使用 BUCK 变换器之后母线电流无负流,而且脉动很小. PWM-ON 型调制方式、H-PWM-L-PWM 型调制方式、PWM-ON-PWN 型调制方式、PWM-ON-PWM 型调制方式和 BUCK 变换器相结合下的相电流和转矩波形图,分别如图 9—12 所示.

从图 9—11 可以看出, PWM-ON 型调制方式关断相有续流,转矩脉动较小; H-PWM-L-PWM 型调制方式能够完全消除关断相续流,但是转矩脉动比较大.而 PWM-ON-PWM 型调制方式下关断相无续流,相电流和转矩脉动较前两种调制方式有所减小.由图 12 可以看出,仿真期间不仅能够完全消除关断相续流,而且电流和转矩脉动都有了较大的改善.

### 5 结论

本文基于无位置传感器,通过将 PWM-ON-PWM 型调制方式和 BUCK 变换器相结合的控制方式抑制 BLDCM 转矩脉动,并在 Matlab/Simulink 环境下搭建了 BLDCM 控制系统仿真模型进行验证.仿真结果证明,改进的方法不仅可以完全消除电机运行过程中关断相的续流,从而消除了非换相转矩脉动,而且对换相转矩脉动也有一定的改善.

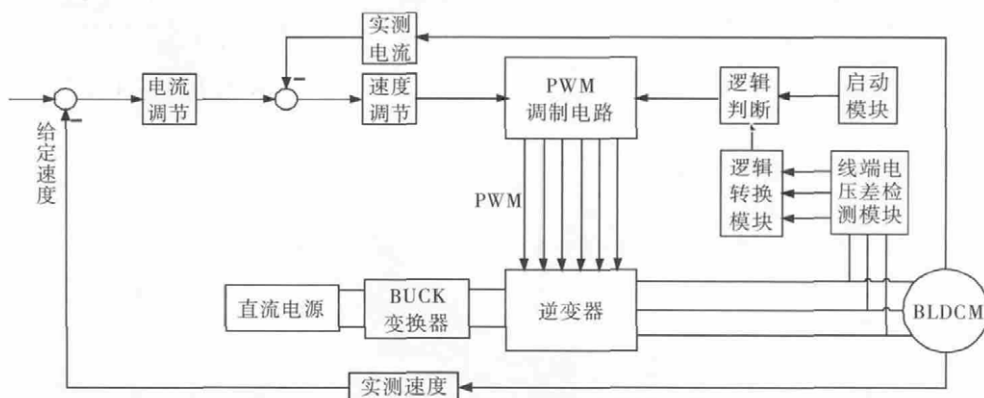


图 5 BLDCM 控制系统框图

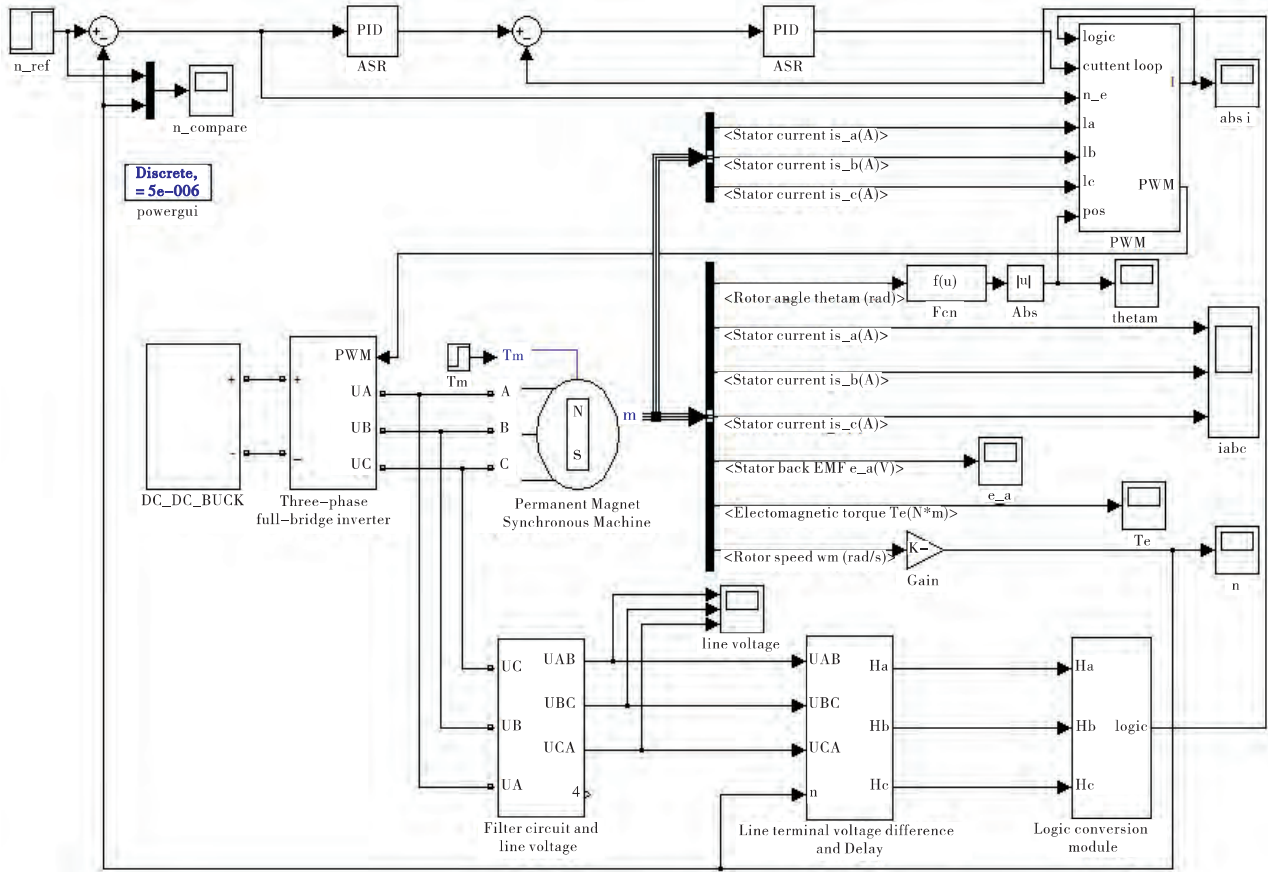


图 6 BLDCM 控制系统仿真图

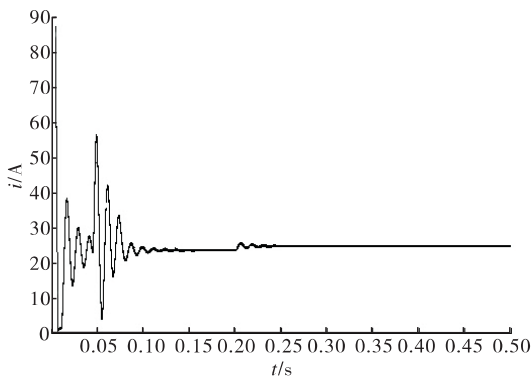


图 7 前置 BUCK 变换器逆变器母线电流

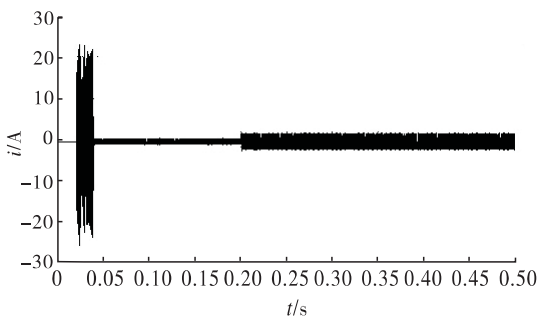


图 8 无 BUCK 变换器逆变器母线电流

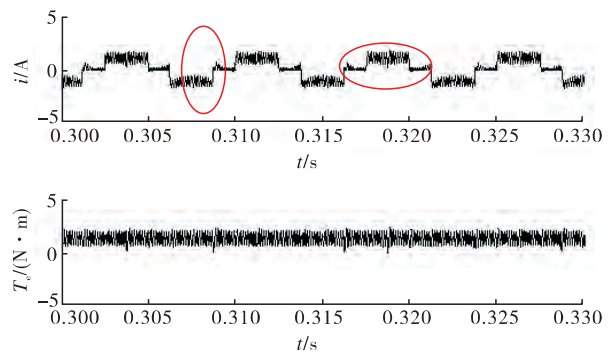


图 9 PWM-ON 型调制方式

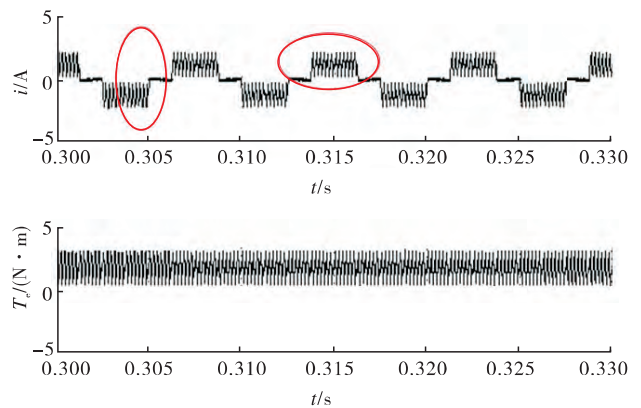


图 10 H-PWM-L-PWM 型调制方式

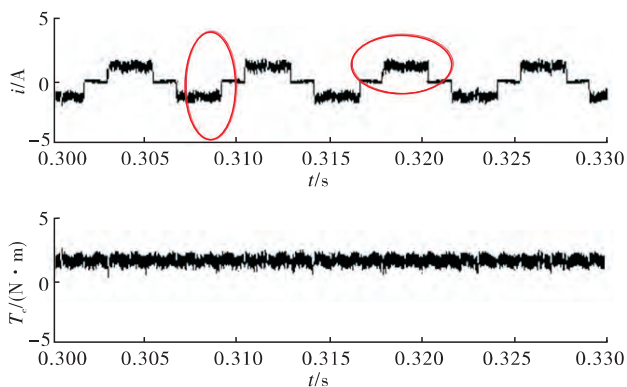


图 11 PWM-ON-PWM 型调制方式

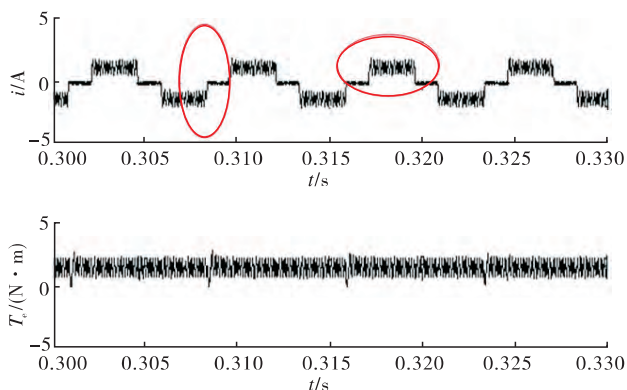


图 12 PWM-ON-PWM 型  
调制方式 + BUCK 变换器

由于电机没有位置传感器,排除了电机受工作环境影响出现的转矩脉动,没有了其和电机之间的众多连线,减小了电机的体积和制造成本.总体来说,改进的方法更容易实现,不仅增强了 BLDCM 的运行性能和可靠性,而且明显减小乃至在一定程度上消

除了其相电流波动和转矩脉动,因而具有一定的应用价值.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李志强,夏长亮,陈炜.基于线反电动势的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2010,25(7):38.
- [3] 焦晓磊,高延丽,盘劲.无刷直流电机无位置传感器控制系统仿真及实验研究[J].电机与控制应用,2013,40(10):36.
- [4] 钟黎萍,张水平,顾启民,等.基于重复控制的 BLDCM 换相转矩波动的抑制[J].电测与仪表,2013,50(7):113.
- [5] 张有全,崔巍,廖憬.无刷直流电机换相转矩脉动抑制新策略[J].维特电机,2013,41(10):12.
- [6] 丛新勇,吕勇键,李子龙.一种同时抑制 BLDCM 两种转矩脉动的方法研究[J].微电机,2013,46(9):68.
- [7] 贺曦,廖勇.基于线电压差值的无位置传感器无刷直流电机转子位置检测[J].微电机,2013,46(3):33.
- [8] 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.
- [9] 韦坤.永磁无刷直流电机电磁转矩脉动抑制技术的研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [10] 叶斌.电力电子应用技术[M].北京:清华大学出版社,2006:242-248.
- [11] 张晓峰,胡庆波,吕征宇.基于 BUCK 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J].电工技术学报,2005(9):72.