

基于双 H 桥变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法^{*}

李 东^{1,2}, 冯金磊¹, 孔全存¹, 刘桂礼^{1,2}, 赵双琦¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

2. 北京信息科技大学 现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 针对无刷直流电机(BLDCM)的换相转矩脉动问题,提出了一种基于双 H 桥变换器的 BLDCM 转矩脉动抑制方法。通过双 H 桥变换器电路产生补偿或抵消电流,减小非换相相电流的波动,从而达到抑制 BLDCM 转矩脉动的目的。在 MATLAB/Simulink 下构建了 BLDCM 转矩脉动仿真模型并进行对比仿真,与传统 PID 控制方法相比,该方法非换相相电流波动在高、低速下分别降低了约 70% 和 40%,平衡后的转矩波动降低了约 80%。结果表明:所提方法对于 BLDCM 在高稳定性和高精度要求领域中的应用具有重要价值。

关键词: 无刷直流电机; 转矩脉动; 抑制方法; 非换相相电流; 双 H 桥变换器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0030-08

A Method to Inhibit Torque Ripple of Brushless DC Motor Based on Double H-Bridge Converter^{*}

LI Dong^{1,2}, FENG Jinlei¹, KONG Quancun¹, LIU Guili^{1,2}, ZHAO Shuangqi¹

(1. School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. Modern Measurement and Control Technology of Ministry of Education Key Laboratory, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the problem of commutation torque ripple in brushless DC motor (BLDCM), a method to inhibit torque ripple of BLDCM based on double H-bridge converter was proposed. Through the compensating or reducing current generated by the double H-bridge converter circuit, the fluctuation of the non-commutation phase current could be reduced so as to inhibit the torque ripple of the BLDCM. The simulation model of BLDCM was constructed in MATLAB/Simulink and was conducted comparative experiment, compared with the traditional PID control method, the new method's current ripple of non-commutation phase decreased about 70% at high speed and 40% at low speed, respectively. Meanwhile, the balanced torque ripple decreased about 80%. The results showed that the new method has some practical value.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); torque ripple; inhibiting method; non-commutation phase current; double H-bridge converter

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51675054);北京市自然科学基金项目(3172013);北京市教委科技发展计划面上项目(KM201711232005);北京市重点实验室(机电系统测控)开放项目(5221735107)

作者简介: 李 东(1959—),男,硕士,教授,硕导,研究方向为电子测量技术。

冯金磊(1993—),男,硕士研究生,研究方向为光电检测技术。

孔全存(1976—),男,高级实验师,硕导,博士,研究方向为精密测量技术及微细特种电加工等。

0 引言

无刷直流电机 (Brushless DC Motor, BLDCM) 由于响应速度快、运行效率高和使用成本低等特点,被广泛应用于航空、电动汽车和家电等领域^[1];但其存在转矩脉动,在高稳定、高精度要求的应用场合存在限制。由于制造工艺的不断进步,换相转矩脉动已成为整个电机脉动的主要来源^[2],如何进一步抑制换相转矩脉动是有效提高电机动态性能的关键技术之一。

中外学者对此进行了持续研究。目前换相转矩脉动抑制方法主要有控制电压法和控制电流法等。控制电压法是通过控制直流母线电压等于 4 倍的反电动势,抑制其转矩脉动,主要有基于 Buck^[3]、准 Z 源^[4-5] 和 Cuk^[6] 等的变换器抑制法。基于变换器的控制电压法通过开关管、储能元件(L、C)等在非换相期间,对储能元件充电;在换相期间,利用储能元件放电来补偿母线电压,使其等于 4 倍的反电动势,以保持非换相相电流不变,从而实现 BLDCM 转矩脉动的抑制。但控制电压法在抑制过程中只考虑了对母线电压的正向补偿,并未考虑相电流较大时对电压或电流的泄放问题,难以实现大转速变化范围内的脉动抑制。控制电流法是抑制 BLDCM 换相转矩脉动的另一有效途径,其通过控制其中一相或几相电流来实现对 BLDCM 转矩脉动的抑制,主要有重叠换相法^[7]、电流滞环法^[8] 和电流预测法^[9-10] 等。文献[7]采用开关管延迟关断或提前导通的电流重叠方式,补偿换相期间的电流跌落,但该方法对重叠区间大小较敏感,区间较大会造成过补偿,区间较小会造成补偿不足,应用灵活性受限。文献[8]通过滞环比较器跟踪非换相相电流参考值,进而有效减少转矩脉动;但由于其响应时间的限制,高速时可能会造成转矩脉动加剧。文献[9-10]通过控制非换相相电流在换相期间保持恒定,在高、低速下对开通、关断相进行 PWM 电流预测补偿,实现对转矩脉动的抑制;但其预测算法较复杂、实时性要求较高。

上述分析可知,控制电压法无法完成较大相电流的消减,从而难以实现全转速变化范围内的脉动抑制;控制电流法对转矩脉动抑制具有更加直接有效的优势,但现有控制电流法仍存在重叠

区间不易确定、高速脉动加剧、算法复杂、控制灵活性不够等缺点。为解决上述问题,本文通过对转矩脉动过程的分析,提出并设计一种基于双 H 桥变换器的 BLDCM 转矩脉动抑制方法。采用双 H 桥变换器可在换相区简单快速地对非换相相电流跌落和上升进行有效补偿和抵消,从而保持非换相相电流恒定,达到全转速变化范围内的脉动抑制。之后在 MATLAB/Simulink 下搭建仿真模型,并开展对比仿真,验证该方法的可行性。

1 BLDCM 转矩脉动分析

1.1 工作原理和数学模型

BLDCM 组成部分主要包括电机本体、位置传感器、电机逆变器 3 部分。当电机三相中导通任意两相时,定子上的绕组产生磁场,转子在定子产生的磁场作用下发生相对运动^[11]。BLDCM 以工作在 120°的导通方式两相导通最为常见,在任一时刻有且只有两相开关管导通,每 60°换相 1 次,1 个周期内换相 6 次^[12]。理想状态下 BLDCM 三相电流波形如图 1 所示。

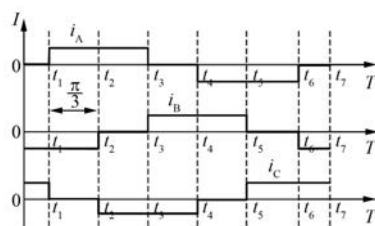


图 1 理想状态下 BLDCM 三相电流波形图

在不考虑摩擦和空气阻力,且假定绕组分布均匀且完全对称的情况下,BLDCM 三相定子绕组电压的表达式^[13]为

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_N \\ U_N \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C ——各相定子端电压;

R ——电枢绕组电阻;

i_A 、 i_B 、 i_C ——各相电流;

p ——微分算子;

L ——绕组有效电感(每相自感和互感的差值);

e_A, e_B, e_C ——各相反电动势;

U_N ——中性点相对于直流母线地的电压。

转矩表达式^[14]为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{\omega} = \frac{2ei}{\omega} \quad (2)$$

式中: T ——电机转矩;

P ——电机功率;

ω ——机械角速度。

1.2 换相转矩脉动分析

BLDCM 在工作时的转矩脉动主要包括:齿槽转矩脉动、电磁转矩脉动、传导转矩脉动和换相转矩脉动等^[15],其中,前3项转矩脉动较小,而换相转矩脉动较大,所占比例约为平均转矩的50%^[16],因此,抑制换相转矩脉动成为抑制 BLDCM 转矩脉动的关键。

由于电机绕组的存在,在换相期间,开通相和关断相电流不能立刻开通和关断,会以一定速率上升和下降,形成了梯形波。当电机转速不同,开通相电流上升和关断相电流下降速率大小不一致,会引起非换相相电流的波动,从而产生换相转矩脉动^[17]。以从 A/C 相导通向 B/C 相导通换相过程为例,由式(1)可得 A 相、C 相之间的线电压 U_{AC} 和 B 相、C 相之间的线电压 U_{BC} :

$$U_{AC} = U_A - U_C = R \times (i_A - i_C) + L \left(\frac{di_A}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) + 2E = 0 \quad (3)$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = R \times (i_B - i_C) + L \left(\frac{di_B}{dt} - \frac{di_C}{dt} \right) + 2E = U_d \quad (4)$$

电机在运行中,由于三相电流始终保持 $i_A + i_B + i_C = 0$ ^[18],则由式(3)、式(4)可得非换相相 C 的相电流导数公式:

$$\frac{di_C}{dt} = \frac{4E - U_d}{3L} \quad (5)$$

由式(2)和式(5)分析可知,抑制转矩脉动关键是控制非换相相电流保持不变,则此时通过式(5)可得:

$$U_d = 4E \quad (6)$$

结合上述分析,当直流母线电压 $U_d = 4E$ 时,非换相相电流保持不变,此时不会产生换相转矩

脉动。

BLDCM 在不同的转速区间,对应不同的非换相相电流波形。当电机运行在高速区间时,即 $U_d < 4E$ 时,关断相电流 i_A 的关断时间提前于开通相电流 i_B 的开通时间,导致 C 相产生向上的波动,换相转矩变小,此时在换相期间 $[t_0, t_T]$ 三相电流波形如图 2(a) 所示;当电机运行在低速区间时,即 $U_d > 4E$ 时,关断相电流 i_A 的关断时间滞后于开通相电流 i_B 的开通时间,导致 C 相产生向下的波动,换相转矩变大,此时在换相期间 $[t_0, t_T]$ 三相电流波形如图 2(b) 所示;当电机运行在中速时 $U_d = 4E$,关断相电流 i_A 的关断时间等于开通相电流 i_B 的开通时间, C 相不产生波动,换相转矩不变,此时在换相期间 $[t_0, t_T]$ 三相电流波形如图 2(c) 所示。

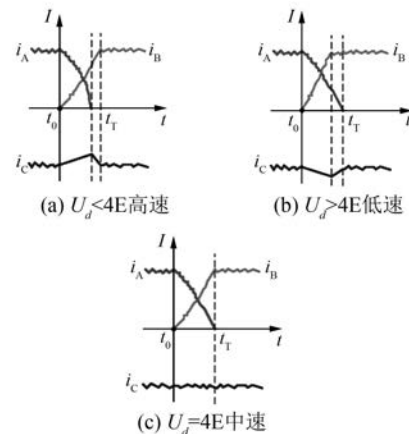


图2 换相期间三相电流波形图

为保持非换相相电流在换相期间不变,本文提出基于双 H 桥变换器的转矩脉动抑制方法,采用双 H 桥在高速下对电流跌落进行补偿,在低速下对电流上升进行抵消,实现非换相相电流不变,以实现抑制 BLDCM 的转矩脉动。

2 基于双 H 桥变换器的新型转矩脉动抑制方法

2.1 双 H 桥变换器的拓扑结构

在分析 BLDCM 转矩脉动的前提下,提出并设计了一种双 H 桥变换器电路。通过非换相相电流的补偿和抵消,抑制非换相相电流的波动,从而有效抑制 BLDCM 的转矩脉动。双 H 桥变换器拓扑结构如图 3 所示。

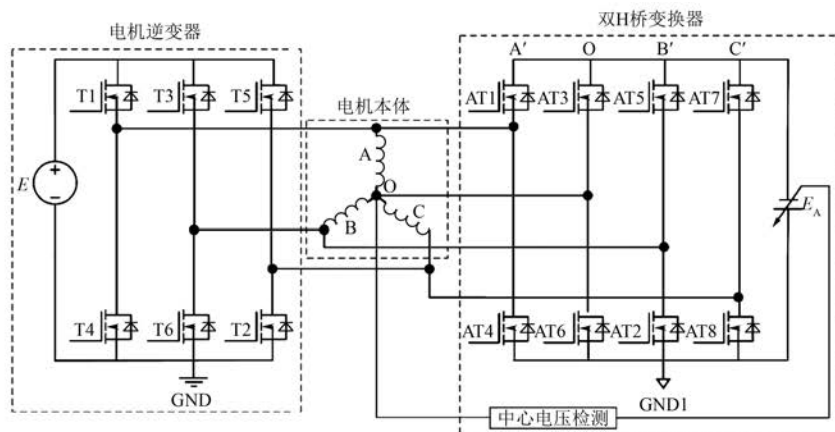


图3 双H桥变换器拓扑结构

基于双H桥变换器的BLDCM拓扑结构由电机逆变器、电机本体和双H桥变换器3部分组成,其中双H桥变换器是由开关管、可调电源、接地端GND1(与电机逆变器中的接地端GND不共地)和中心电压检测模块构成。双H桥变换器主要包括4个桥,分别为A'桥、O桥、B'桥和C'桥,其中A'桥由AT1和AT4构成,O桥由AT3和AT6构成,B'桥由AT5和AT2构成,C'桥由AT7和AT8构成。双H桥变换器在只导通非换相相对应的开关管和O相对应的开关管时,可产生相应的补偿或抵消电流,使非换相相电流在换相期间保持不变,进而有效抑制转矩脉动。

2.2 新抑制方法实现过程

就C相为非换相相而言,A相关断,电流为 i_A ;B相开通,电流为 i_B ;C相未加抑制时的电流记为 i_C 。将双H桥变换器施加到非换相相的补偿或抵消电流记为 i_0 ,在换相期间C相产生的最大电流波动记为 Δi_C ,其中,字母只表示电流的大小,方向用+、-表示(流入线圈为正,流出线圈为负)。为使非换相相电流在换相期间保持不变,令补偿或抵消电流 i_0 在数值上等于 Δi_C ,方向上与 Δi_C 相反,即 $i_0 = -\Delta i_C$ 。将 i_0 施加到非换相相上,与C相电流 i_C 相结合得到抑制后的电流 i_c ,即 $i_c = i_0 + i_C$,非换相相电流 i_c 保持不变。

当电机运行在高速下,换相期间 $[t_0, t_T]$ 关断相关断时间提前于开通相导通时间,导致非换相相电流的数值减小,产生了凹陷的电流波动,如图4所示。

此时,导通开关管AT6和AT7,使O桥下桥

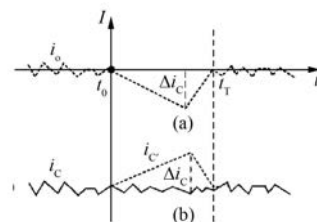


图4 高速下C相为非换相相电流状态图

臂和C'桥上桥臂导通形成回路,同时A'桥、B'桥以及O桥上桥臂、C'桥下桥臂不导通,如图5所示。

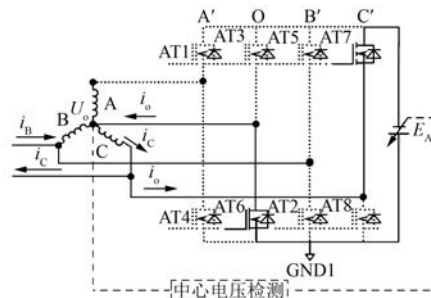


图5 高速下导通状态图

为保持非换相相电流不变,需向非换相相施加补偿电流 i_0 来增大非换相相电流,补偿电流 i_0 如图4(a)所示,使得 $i_c = i_C + i_0 = i_C - \Delta i_C$, i_c 保持不变。与此同时,由于增大电流不需要保持O点电压和 E_A 电压相等,不起动电压检测模块。补偿后 i_c 波形如图4(b)所示,在换相期间 $[t_0, t_T]$,电流 i_c 与电流 i_C 的波动相比明显被减小,有效抑制了BLDCM的转矩脉动。当B、C相为非换相相时,同理不赘述。

当电机运行在低速下,换相期间 $[t_0, t_T]$ 关断相关断时间滞后于开通相导通时间,导致非换相相电流的数值增大,产生了凸起的电流波动,如图6所示。此时,导通开关管AT6和AT7,使O桥下桥臂和C'桥上桥臂导通形成反向回路,同时A'桥、B'桥以及O桥上桥臂、C'桥下桥臂不导通,如图7所示。

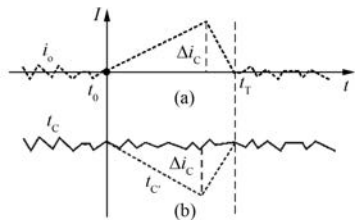


图6 低速下C相为非换相相电流状态图

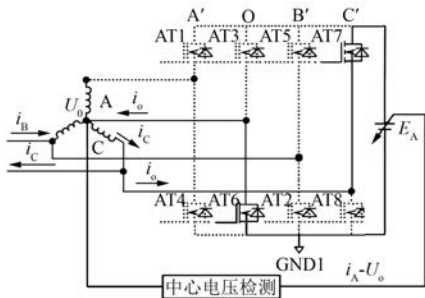


图7 低速下导通状态图

为保持非换相相电流不变,需向非换相相施加抵消电流 i_0 来减小非换相相电流,抵消电流 i_0 如图6(a)所示,使得 $i_c = i_{c'} + i_0 = i_{c'} + \Delta i_c$, i_c 保持不变。与此同时,由于减小电流需保持O点电压和 E_A 电压相等,起动电压检测模块。若O点电压高于 E_A 的电压,则需升高可变电源 E_A 的电压,以保持与O点电压相等;若O点电压低于 E_A 的电压,则需降低可变电源 E_A 的电压,以保持与O点电压相等。补偿后 i_c 波形如图6(b)所示,在换相期间 $[t_0, t_T]$,电流 i_c 与电流 $i_{c'}$ 的波动相比明显被减小,有效抑制了BLDCM的转矩脉动。当B、C相为非换相相时,道理亦然。

3 仿真结果及分析

在MATLAB/Simulink下搭建BLDCM控制系统,其中包括无补偿、传统PID控制和基于双H桥变换器抑制的3种控制系统。通过对3种系统

电流波形和转矩波形进行对比,验证基于双H桥变换器抑制BLDCM转矩脉动的应用可行性。

BLDCM控制系统主要包括以下几个部分:转速控制模块、逆变器模块、电机本体模块、霍尔传感器模块、双H桥变换器抑制模块。将上述模块在MATLAB/Simulink下进行组合,搭建了3种BLDCM控制系统仿真模型:无补偿方法的系统仿真模型如图8(a)所示,加入PID控制的系统仿真模型如图8(b)所示,基于双H桥变换器抑制的系统仿真模型如图8(c)所示。仿真用BLDCM参数如表1所示。

表1 BLDCM电机参数

参数名称	参数值
定子相电阻/ Ω	12
定子相电感/H	0.01
转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	3.6
极对数	4
积分调节系数 K_i	16.61
比例调节系数 K_p	0.013

首先,观察BLDCM在工作时三相电流的波形,高、低速下无补偿方法的三相电流波形如图9(a)、图9(b)所示。加入PID控制后,高、低速下三相电流波形如图9(c)、图9(d)所示。再加入双H桥变换器抑制后,三相电流波形如图9(e)所示。

从图9中可见,当电机运行在高速下,非换相相电流在换相期间数值减小,引起电流凹陷。电机运行在低速下,非换相相电流在换相期间数值增大,引起电流凸起。无补偿方法的非换相相电流波动在换相期间的波动明显,在高速下波动大小约为0.86 A,如图9(a)所示;在低速下波动大小约为0.33 A,如图9(b)所示。在加入PID控制后,非换相相电流在换相期间的波动有较为明显的减小,在高速下波动大小约为0.67 A,如图9(c)所示;在低速下波动大小约为0.28 A,如图9(d)所示。再加入双H桥变换器抑制后,换相期间的非换相相电流波动在高、低速下都得到明显的抑制,波动大小约为0.17 A,如图9(e)所示。由仿真结果可知,该方法比高、低速下无补偿方法时的非换相相电流波动分别降低了约80.2%和48.4%;该方法也比高、低速下加入PID控制后的非换相相电流波动分别降

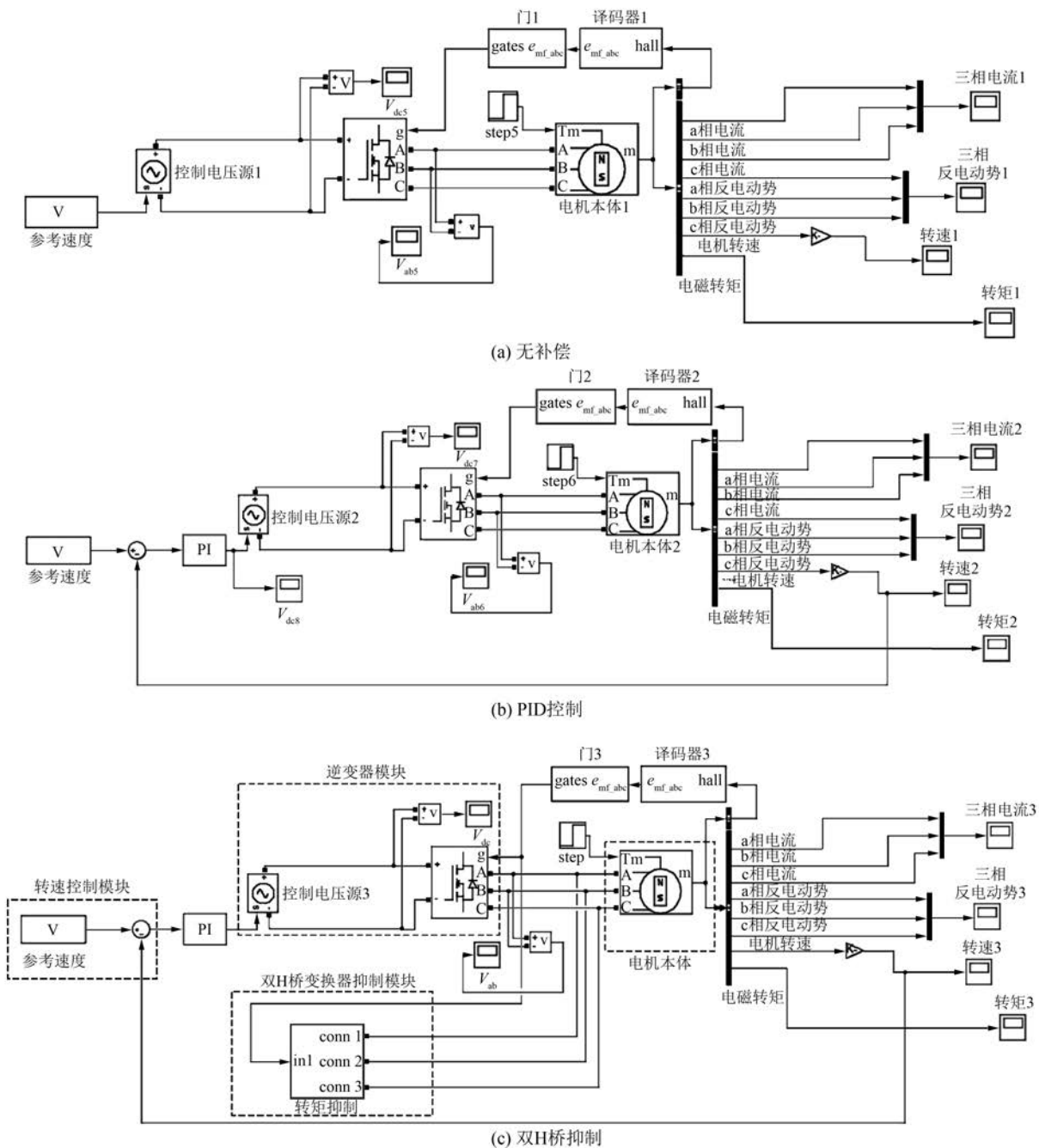


图 8 系统仿真图

低了约 74.6% 和 39.2%。

与此同时,观察并记录转矩波形的变化,转矩波形如图 10(a) 所示。为方便对比,3 种方法在各时刻的转矩波动对比如表 2 所示。

从图 10 和表 2 中,分别记录 3 种控制方法在起动(0 点)时的转矩波动,如图 10(b) 所示;平衡位置附近(t_1 点)的转矩波动,如图 10(c) 所示;平

衡后(t_n 点)的转矩波动,如图 10(d) 所示。在起动时,无补偿方法的转矩波动约为 $4.7 \text{ N}\cdot\text{m}$,加入 PID 控制后的转矩波动约为 $0.6 \text{ N}\cdot\text{m}$,再加入双 H 桥变换器抑制后的转矩波动约为 $0.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在平衡位置附近,无补偿方法的转矩波动约为 $2.9 \text{ N}\cdot\text{m}$,加入 PID 控制后的转矩波动约为 $1.75 \text{ N}\cdot\text{m}$,再加入双 H 桥变换器抑制后的转矩波

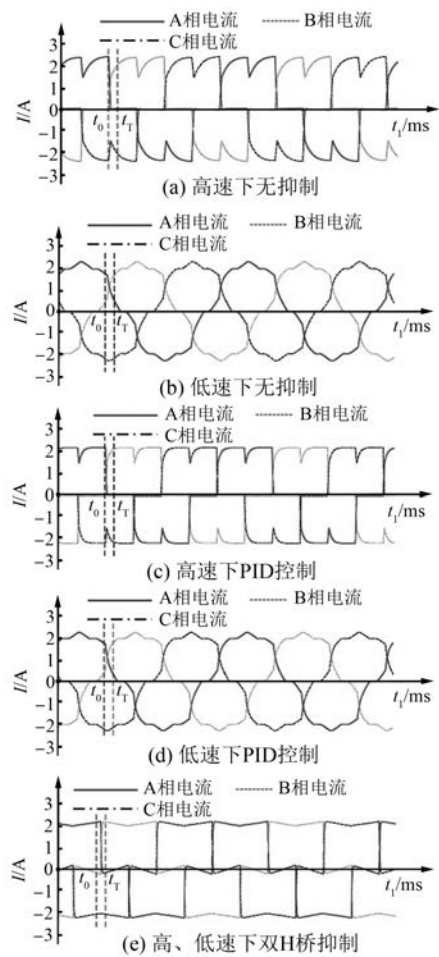


图9 高、低速下3种控制方法的电流波形图对比

表2 3种方法在各时刻的转矩波动对比

时刻	无补偿 方法的 转矩波动 $T_{NC}/$ (N·m)	PID控制 的转矩 波动 $T_{PID}/$ (N·m)	双H桥 变换器 抑制的 转矩波动 $T_{HH}/$ (N·m)	提升比 ($T_{NC}-$ $T_{HH})/$ T_{NC}	提升比 ($T_{PID}-$ $T_{HH})/$ T_{PID}
t_0	4.7	0.6	0.1	97.9%	83.3%
t_1	2.9	1.75	1.2	58.6%	31.4%
t_2	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_3	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_4	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_5	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_6	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_7	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_8	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_9	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
t_{10}	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
t_n	1.1	1	0.2	81.8%	80.0%

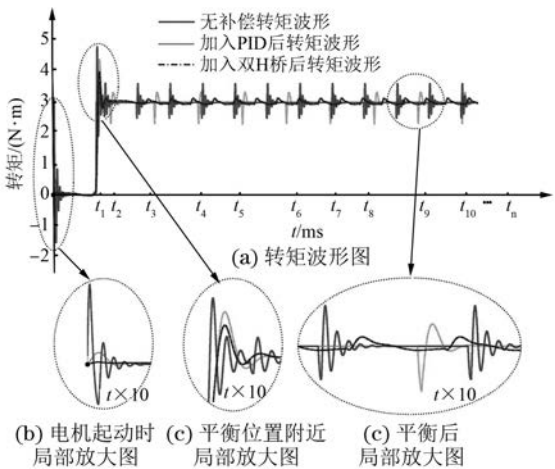


图10 3种控制方法的转矩波形图对比

动约为 1.2 N·m。在平衡后,无补偿方法的转矩波动约为 1.1 N·m,加入 PID 控制后的转矩波动约为 1.0 N·m,再加入双 H 桥变换器抑制后的转矩波动约为 0.2 N·m。由结果可得,在起动时,基于双 H 桥变换器抑制方法的转矩波动比无补偿方法和 PID 控制时的转矩波动分别降低了约 97.9% 和 83.3%;在平衡位置附近,基于双 H 桥变换器抑制方法的转矩波动比无补偿方法和 PID 控制时的转矩波动分别降低了约 58.6% 和 31.4%;在平衡后,基于双 H 桥变换器抑制方法的转矩波动比无补偿方法和 PID 控制时的转矩波动分别降低了约 81.8% 和 80.0%。综上所述,在加入双 H 桥变换器抑制方法后,较无补偿方法和加入 PID 控制的转矩波动在各位置都有了明显的减小。由此验证了所提出的方法的可行性。

4 结 语

针对 BLDCM 在换相期间存在的转矩脉动问题,本文提出了一种基于双 H 桥变换器的 BLDCM 转矩脉动抑制方法。该方法通过双 H 桥变换器电路产生的补偿或抵消电流,减小非换相相电流的波动,从而达到抑制 BLDCM 转矩脉动的目的。由对比仿真可得,该方法的非换相相电流波动在换相期间有了明显的减小,比高、低速下无补偿方法时的非换相相电流波动分别降低了约 80.2% 和 48.4%;该方法也比高、低速下加入 PID 控制后的非换相相电流波动分别降低了约 74.6% 和 39.2%。同时,该方法平衡后的转矩波动大小比无补偿方

法降低约 81.8%, 比 PID 控制方法降低约 80.0%。由此验证了该方法具有一定的实用价值。

【参考文献】

- [1] WON C H, SONG J H, CHOY I. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor [C] // Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2002: 985-990.
- [2] KRISHNAN R. 永磁无刷电机及其驱动技术 [M]. 柴凤, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] 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, 20(9): 72-76.
- [4] ANVARI B, AFJEI E, SIDATAN A. Design and simulation of Z-source inverter for brushless DC motor drive [J]. Specialty Journal of Electronic and Computer Sciences, 2015, 1(1): 30-34.
- [5] 姚绪梁, 江晓明, 张燕. 无刷直流电机抑制转矩脉动的方法研究 [J]. 电气传动, 2016, 46(2): 7-10.
- [6] RAO A P C, OBULESH Y P, BABU C S. Power factor correction in two leg inverter fed BLDC drive using cuk Dc-Dc converter [J]. International Journal of Power Electronics & Drive Systems, 2015, 6(2): 196-204.
- [7] GOKHALE K P, MUELLER D L. Method and apparatus for minimizing torque ripple in a DC brushless motor using phase current overlap: US, US5672944[P]. 1997.
- [8] 杨进, 杨向宇. 一种减小无刷直流电机纹波转矩的新方法 [J]. 微电机, 2005, 38(1): 9-11.
- [9] PARK J H, KWAK Y, AHN J W, et al. A novel predicted current control scheme of BLDCMs for commutation torque ripple reduction [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2016: 1429-1433.
- [10] 王晓远, 傅涛, 王晓光. 基于电流预测控制的无刷直流电动机换相转矩脉动抑制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 22-29.
- [11] TAHA M, THABET A M, MAHGOUB O A. Brushless DC motor drive with minimum torque ripple [C] // Eighteenth International Middle East Power Systems Conference, 2016: 888-893.
- [12] PARK S J, HAN W P, MAN H L, et al. A new approach for minimum-torque-ripple maximum-efficiency control of BLDC motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 47(1): 109-114.
- [13] 蔡东升. 无刷直流伺服电机辨识和转矩脉动抑制的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [14] XIA K, LU J, BI C, et al. Dynamic commutation torque-ripple reduction for brushless DC motor based on quasi-Z-source net [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 819-826.
- [15] 徐衡, 周云山. 电动车无刷直流电机转矩脉动抑制 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 195-199.
- [16] 王星, 宋楠楠, 刘洋. 基于模型预测的无刷直流电机转矩脉动抑制 [J]. 微电机, 2017, 50(4): 26-31.
- [17] POTNURU D, CHANDRA K P B, ARASARATNAM I, et al. Derivative-free square-root cubature Kalman filter for non-linear brushless DC motors [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(5): 419-429.
- [18] 韦鲲, 林平, 张仲超. 无刷直流电机换相转矩脉动的电流预测控制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(1): 171-175.

收稿日期: 2018 -01 -05

【主要栏目】

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

追踪行业最新动态