

1-2-2019

Dynamic Suppression Method for Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors

Kun Xia

Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Tan Yuan

Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Bin Dong

Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Lu Jing

Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamic Suppression Method for Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors

Abstract

Abstract: *A dynamic suppression method for commutation torque ripple by employing a quasi-Z-source network was proposed, which reduced the torque ripple dynamically during the speed adjustment process in brushless DC motors (BLDCM). The phase resistance was taken into consideration and the mathematics model for the system was established. To suppress the commutation torque ripples timely and effectively, U_{up} and t_{up} needed to be adjusted dynamically through the quasi-Z-source network while the speed and load changed.* A simulation model to dynamically suppress the commutation torque ripple in BLDCM based on quasi-Z-source network was established by MATLAB/Simulink, and the feasibility was validated by experiments.

Keywords

Brushless DC motor, commutation torque ripple, quasi-Z-source network, dynamic suppression

Recommended Citation

Xia Kun, Tan Yuan, Dong Bin, Lu Jing. Dynamic Suppression Method for Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 543-550.

一种动态抑制无刷直流电机换相转矩脉动方法

夏鲲, 谭媛, 董斌, 卢晶

(上海理工大学电气工程系, 上海 200093)

摘要: 提出了一种基于准 Z 源网络的动态抑制换相转矩脉动的方法, 可以在无刷直流电机(BLDCM)转速调整过程中动态抑制转矩脉动。考虑电机绕组相电阻, 建立了系统的数学模型, 通过前置的准 Z 源网络, 当电机转速及负载发生改变时, 实时在线计算并调节换相电压 U_{up} 和换相时间 t_{up} 以达到动态抑制转矩脉动的效果。在 MATLAB/Simulink 环境下完成了基于准 Z 源网络的动态抑制无刷直流电机换相转矩脉动仿真模型, 通过实验平台验证了该方法的可行性。

关键词: 无刷直流电机; 换相转矩脉动; 准 Z 源网络; 动态抑制

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 02-0543-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802022

Dynamic Suppression Method for Commutation Torque Ripple of Brushless DC Motors

Xia Kun, Tan Yuan, Dong Bin, Lu Jing

(Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A dynamic suppression method for commutation torque ripple by employing a quasi-Z-source network was proposed, which reduced the torque ripple dynamically during the speed adjustment process in brushless DC motors (BLDCM). The phase resistance was taken into consideration and the mathematics model for the system was established. To suppress the commutation torque ripples timely and effectively, U_{up} and t_{up} needed to be adjusted dynamically through the quasi-Z-source network while the speed and load changed. A simulation model to dynamically suppress the commutation torque ripple in BLDCM based on quasi-Z-source network was established by MATLAB/Simulink, and the feasibility was validated by experiments.

Keywords: Brushless DC motor; commutation torque ripple; quasi-Z-source network; dynamic suppression

引言

无刷直流电机由于其输出转矩大、控制性能良好以及可靠性高等特点, 在家用及工业领域中都得到了广泛的应用。但在方波驱动无刷直流电机中, 由于换相时电流急剧变化引起较大的换相转矩

脉动, 限制了其在更高精度领域的应用^[1-2]。

Carlson 指出, 当关断相电流下降的速率与开通相电流上升的速率一致时, 非换相相电流保持平稳, 从而换相转矩脉动最小^[3]。近年来, 通过抑制换相期间电流脉动来抑制换相转矩脉动的方法得到了广泛的关注。一些学者提出了采用 PWM 调制及转矩闭环控制等方法来抑制换相转矩脉动^[4-13]。文献[14]分析了 BLDCM 高速和低速运行期间转矩脉动产生的原因, 通过在低速期间实时调节占空比, 高速区加入死区电流控制, 从而保持开通相电



收稿日期: 2015-12-25 修回日期: 2016-03-28;
基金项目: 国家自然科学基金(51207091, E070303);
作者简介: 夏鲲(1980-), 男, 上海, 博士, 副教授, 研究方向为电机及其控制、新能源技术应用等; 谭媛(1991-), 女, 湖南, 硕士生, 研究方向为电力电子与电力传动。

<http://www.china-simulation.com>

流上升速率与关断相电流下降速率一致。文献[15]采用 PWM 调制技术将换相时间分成三段,通过控制最佳的时段长度实现转矩脉动抑制。文献[16]提出通过实时检测非理想反电动势波形,计算并控制相电流,从而抑制换相转矩脉动。文献[17]建立了非换相相电流预测模型,确定下周期的开关占空比,选择有限状态中最优导通状态来保持非换相相电流的恒定。

还有一些学者提出了新的 BLDCM 控制驱动拓扑。文献[18]提出通过改变换相期间的直流母线输入电压来抑制换相转矩脉动。文献[19]采用 BUCK 电路来抑制在低速换相时的转矩脉动。文献[20]提出一种更适合解决电机在高速工作状态下的换相转矩脉动的电路拓扑,通过在逆变器的输入端增加罗式变换器(superlift Luo converter)来产生期望的直流输入电压。文献[21]中直流母线电压通过 SEPIC 变换器来调节,以抑制换相转矩脉动。文献[22]采用 SEPIC 三电平中点钳位逆变器调节直流母线电压来抑制换相转矩脉动。

BLDCM 转速改变时,换相转矩脉动大小随之改变。一般文献均讨论电机恒速稳态运行时,如何采用新方法抑制换相转矩脉动,鲜有提及在转速调整的过程中,如何动态抑制变化的换相转矩脉动的问题。文献[23]较为全面的分析了 BLDCM 现有的转矩脉动抑制方法。文献[24]提出了采用准 Z 源网络调节直流母线电压以抑制换相转矩脉动的方法,完成了理论分析和仿真实验。文献[25]针对基于准 Z 源网络抑制换相转矩脉动的方法设计了实验平台,完成了仿真和实物实验的对比。文献[26]对准 Z 源变换器拓扑进行了优化,实现软开关技术,从而提高变换效率,降低开关器件应力。本文在前期研究的基础上,针对动态抑制 BLDCM 换相转矩脉动的问题,提出了基于准 Z 源网络动态抑制 BLDCM 换相转矩脉动的方法。详细给出了换相期间期望的换相电压 U_{up} 和换相时间 t_{up} 的计算方法。当负载或转速改变时,需要相应地动态调节 U_{up} 和 t_{up} 值,以便在电机正常工作的转速范围内及时有

效地抑制换相转矩脉动。仿真和实验结果验证了该动态调节方法的有效性。

1 换相转矩脉动产生的原因

在忽略材料和机械加工缺陷的情况下,无刷直流电机的齿槽转矩脉动及谐波转矩脉动一般较小,但由于换相转矩脉动却可能达到平均转矩的 50% 左右。因此,如何改善无刷直流电机换相转矩脉动,成为减小电机整体转矩脉动的关键问题^[23]。

无刷直流电机绕组可视为感性负载,在换相时刻,开通相电流以一定速率上升,关断相电流以一定速率下降,如开通相电流上升的速率和关断相电流下降的速率不相等,据三相电流和为零,则非换相相电流会出现波动,因此产生了电机的换相转矩脉动。在[23]中,以 A/C 相导通向 B/C 相导通换相过程为例,分析了电机在不同速度区间换相时可能出现的 3 种三相电流变化情形。若直流母线电压 U_{dc} 与反电动势 E_m 的大小关系为:① $U_{dc} > 4E_m$ 时,换相转矩过大。② $U_{dc} < 4E_m$ 时,换相转矩过小。③ $U_{dc} = 4E_m$ 时,换相转矩保持不变。

Carlson 在经典文献[3]中,得出如下结论:在理想 120° 反电动势波形、非常小的电流迟滞及换相反电动势恒定这些条件下,换相转矩脉动大小与电流大小无关,与电机转速有关。因此直流母线电压要满足 $U_{dc} = 4E_m$ 的条件,才能很好地抑制电机换相转矩脉动。但这种分析只考虑了绕组电感,忽略了绕组电阻的影响,因而仅适合大电感,时间常数大,转速高,换相周期短的 BLDCM 控制情况。然而实际情况往往更为复杂, U_{dc} 为更复杂的非线性表达式,应根据转速变化动态调整,从而使电机在正常工作的转速范围内都能获得相对平稳的转矩输出。

2 换相转矩脉动动态抑制方法

本文采用的基于准 Z 源网络的 BLDCM 控制驱动电路中,通过在传统的三相逆变器驱动电路前置准 Z 源网络和开关选择电路完成换相期间对母

线电压的调整,使得关断相电流下降的速率和开通相电流上升的速率趋于一致,从而减小非换相相电流 di/dt 的变化,抑制换相转矩脉动^[25]。

当 BLDCM 转速变化时,电机控制器根据霍尔器件信号推算出转速 n 、反电动势 E 和换相起始时刻 t_0 ; 在下一个换相点到来之前精确计算出期望的换相电压 U_{up} , 通过调节准 Z 源网络开关管 Q 的占空比,以达到该换相电压值;同时预测出换相时间 t_{up} 来控制换相期间三相逆变器的开关状态,从而实现动态抑制换相转矩脉动。

因此需建立准确的数学模型,实时计算并在线调整换相期间的 U_{up} 和 t_{up} ,达到在转速调控范围内及时有效地动态抑制换相转矩脉动的效果。

定义电机绕组的电磁常数为 $\tau = L/R$, $x = T/\tau = 10/(pn\tau)$, 其中 R 、 L 分别为定子绕组的电阻和电感, T 为三相逆变器开关周期, n 为转速, p 为电机极对数。可以得到 BLDCM 三相电压等效电路公式

$$\begin{cases} u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (1)$$

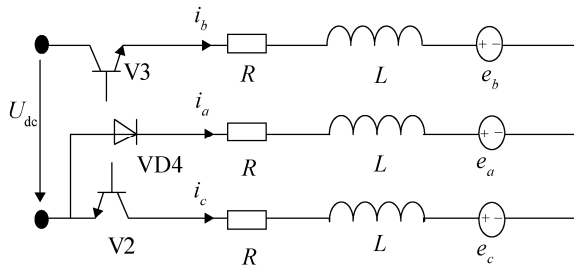


图 1 A/C 相导通向 B/C 相导通等效电路图
Fig. 1 Equivalent circuit diagram of B/C phase guided by A/C phase

如图 1 所示,当电机从 A/C 相导通向 B/C 相导通换相时,计算三相绕组的反电动势可得

$$\begin{cases} e_a = E - \frac{2E}{T}t \\ e_b = -e_c = E \end{cases} \quad (2)$$

列平衡方程可得

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{d}{dt}i_a + e_a - Ri_c - L \frac{d}{dt}i_c - e_c = 0 \\ Ri_b + L \frac{d}{dt}i_b + e_b - Ri_c - L \frac{d}{dt}i_c - e_c = U_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} + \frac{i_a}{\tau} = \frac{-2E - U_{dc} + \frac{4E}{T}t}{3R\tau} \\ \frac{di_b}{dt} + \frac{i_b}{\tau} = \frac{-2E + 2U_{dc} - \frac{2E}{T}t}{3R\tau} \\ \frac{di_c}{dt} + \frac{i_c}{\tau} = \frac{4E - U_{dc} - \frac{2E}{T}t}{3R\tau} \end{cases} \quad (4)$$

在换相起始时刻,有 $i_a(0) = -i_c(0) = I_0$, $i_b(0) = 0$, 从而

$$\begin{aligned} i_a(0) = I_0 - \left(\frac{3RI_0 + U_{dc} + 2R}{3R} \right) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \\ \frac{4\tau E}{3RT} \left[\frac{t}{\tau} - (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: I_0 为稳态相电流。当 a 相电流在时刻 t_1 降为 0 时,可得

$$\begin{aligned} i_a(t_1) = I_0 - \left(\frac{3RI_0 + U_{dc} + 2R}{3R} \right) (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) + \\ \frac{4\tau E}{3RT} \left[\frac{t_1}{\tau} - (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) \right] = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

当 $t_1/\tau \rightarrow 0$ 时, $t_1/\tau - (1 - e^{-t_1/\tau}) \approx 0$, 上式的第二部分可以忽略不计,因此

$$i_a(t_1) = I_0 - \left(\frac{3RI_0 + U_{dc} + 2R}{3R} \right) (1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}) = 0 \quad (7)$$

解上式,有

$$\frac{t_1}{T} = \frac{1}{x} \ln \left(1 + \frac{3RI_0}{U_{dc} + 2E} \right) \quad (8)$$

类似地,可得三相电流的近似表达式为

$$\begin{cases} i_a = -\frac{U_{dc} + 2E}{3R} + \frac{3RI_0 + U_{dc} + 2E}{3R} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ i_b = \frac{2U_{dc} - 2E}{3R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ i_c = \frac{4E - U_{dc}}{3R} - \frac{3RI_0 + 4E - U_{dc}}{3R} e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases} \quad (9)$$

为了抑制换相转矩脉动, 需要满足 A 相电流的下降速率等于 B 相电流的上升速率, 因此有

$$i_b(t_1) = -i_c(t_1) = \frac{(2U_{dc} - 2E)I_0}{3RI_0 + U_{dc} + 2E} \quad (10)$$

联立上述(4)、(7)、(9)和(10)式, 可得理想的换相电压 U_{up} 表达式为

$$U_{up} = 3RI_0 + 4E - \frac{2Et}{Te \frac{Rt}{L}} \quad (11)$$

换相时间为

$$t_{up} = t_1 = \frac{1}{x} \ln \left(1 + \frac{3RI_0}{U_{dc} + 2E} \right) T \quad (12)$$

3 系统仿真与实验

3.1 仿真结果及分析

为了验证所提出的动态抑制换相转矩脉动电路拓扑的有效性, 在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真建模, 如图 2 所示。子模块 Decoder 和 commutation change 中完成了主要控制算法。表 1 所示为仿真及实验系统参数。其中无刷直流电机采

用转速控制方式, 反电动势波形为理想的 120° 梯形波。

无刷直流电机转速在 500 rpm 至 1 000 rpm 范围内变化时, 采用传统方波驱动控制方法和准 Z 源升压动态抑制转矩脉动方法相应的三相电流波形如图 3 所示。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameter

参数	数值
额定电压 U/V	24
额定功率 P/W	60
额定转速 n/rpm	1000
额定转矩 $T/N \cdot m$	0.6
极对数 p	2
绕组电阻 R/Ω	2.5
绕组电感 L/mH	6.4
准 Z 源网络电容 $C_1/\mu F$	470
准 Z 源网络电感 L_1/mH	0.2
MOS 管 PWM 频率/kHz	20

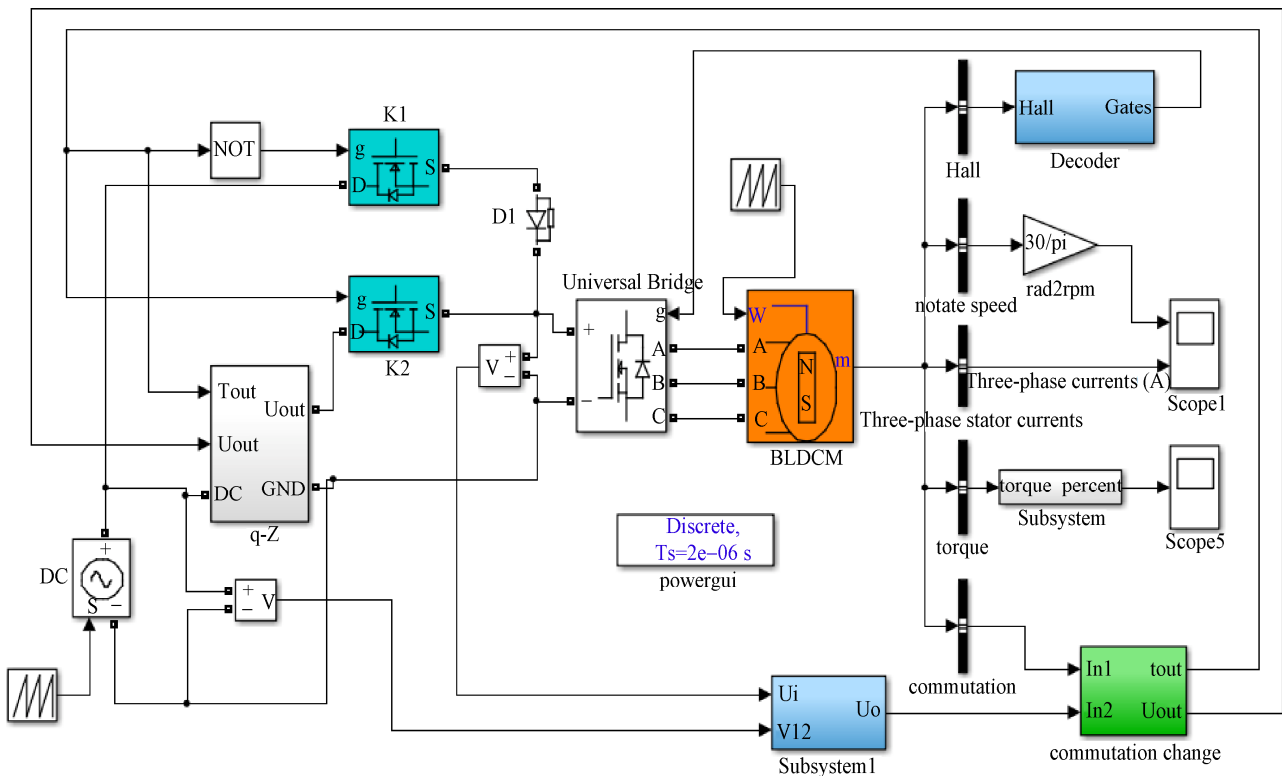


图 2 系统仿真模型

Fig. 2 System simulation model

<http://www.china-simulation.com>

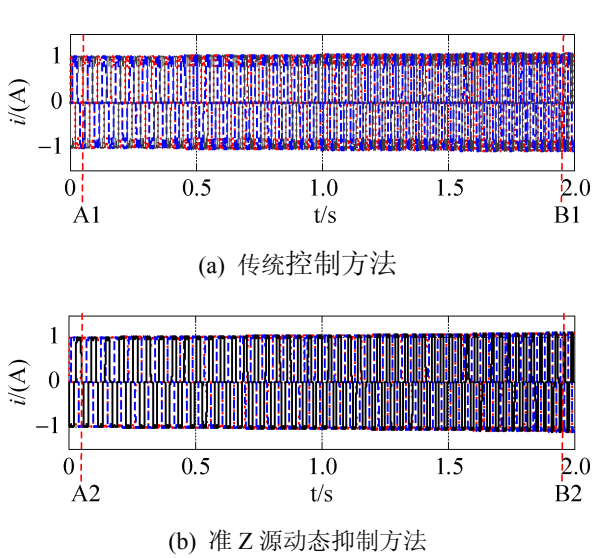


图 3 无刷直流电机三相电流波形
Fig. 3 Three phase current waveform of Brushless DC motor

图 4(a)和(b)分别为图 3(a)中点 A1 和 B1 时刻的放大波形, 图 4(c)和(d)为图 3(b)中 A2 和 B2 时刻的放大波形。其中实线、虚线和点划线分别表示非换相相电流、关断相电流和开通相电流。图 5(a)和(b)分别为采用传统控制方法和准 Z 源动态抑制转矩脉动方法时的转矩脉动占平均输出转矩的百分比。

从图 4(a)和(b)中可以看出, 当采用传统控制方法时, 在换相期间, 关断相电流的下降速率与开通相电流的上升速率不一致, 造成了非换相相电流下降。图 4(a)和(b)中换相转矩脉动是由相电流波形的底部凹陷引起, 相电流波形顶部越平稳则转矩脉动越小。从图 5(a)中可以算出此时转矩脉动最大值约为 25%。

图 4(c)和(d)中, 通过控制换相期间的直流母线电压, 使得关断相电流下降的速度与开通相电流上升的速度几乎一致, 保持非换相相电流基本恒定。由图 4(c)和(d)可以看出, 非换相相电流平稳, 接近理想换相波形, 减小了电机的换相转矩脉动。从图 5(b)中可以算出, 此时换相转矩脉动最大值约为 6%。可见, 在电机转速动态变化的过程中, 转矩脉动抑制效果明显。

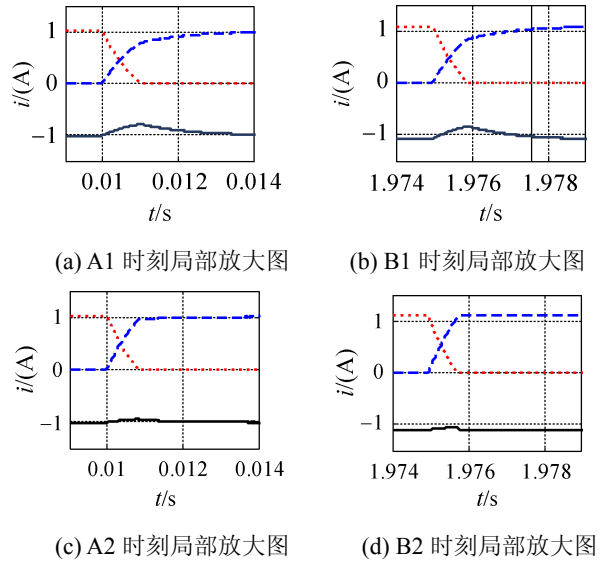


图 4 A1, A2, B1 及 B2 时刻局部放大图
Fig. 4 Local large map of A1, A2, B1 and B2

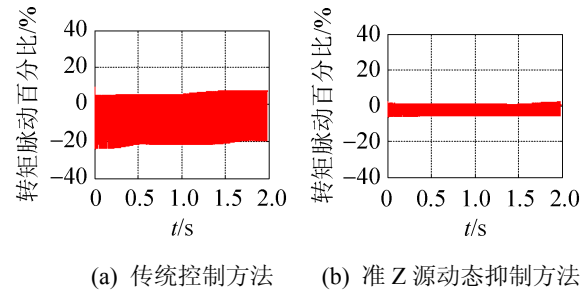


图 5 输出转矩脉动
Fig. 5 Output torque ripple

3.2 实验结果及分析

系统实验平台如图 6 所示, 包括数字示波器、电流钳、控制驱动板、直流电源、无刷直流电机、转矩传感器等。

在同一负载、同一电压变化范围的实验条件下, 分别采用传统控制方法和准 Z 源动态控制方法, 无刷直流电机对应的母线电压和三相电流波形如图 7 和图 8 所示。

对比图 7 和图 8, 可以看出, 采用本文提出的转矩脉动动态抑制方法后, 在换相时刻, 直流母线切换至准 Z 源输出电压, 在换相结束后, 三相逆变器切回至电源电压, 非换相相电流保持平稳, 相应的转矩脉动更小。

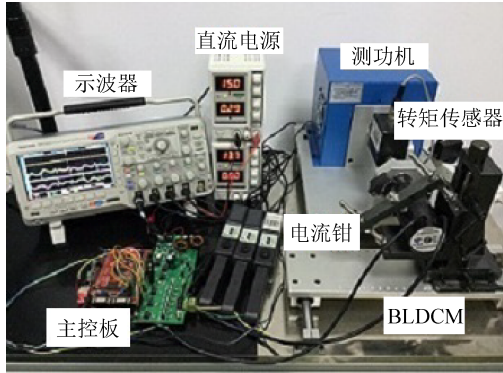
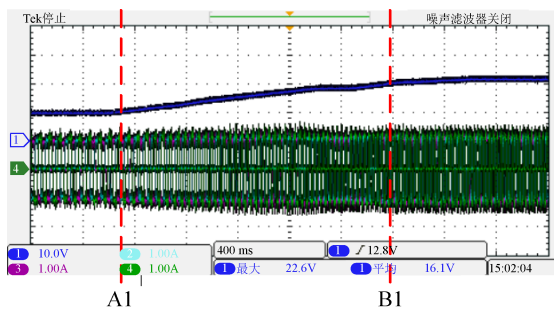
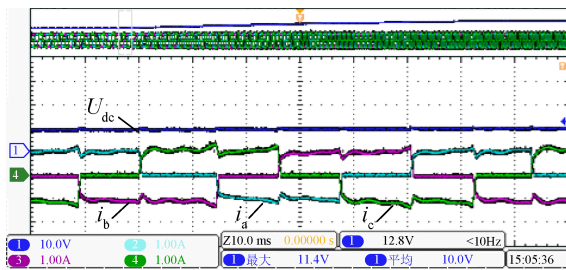


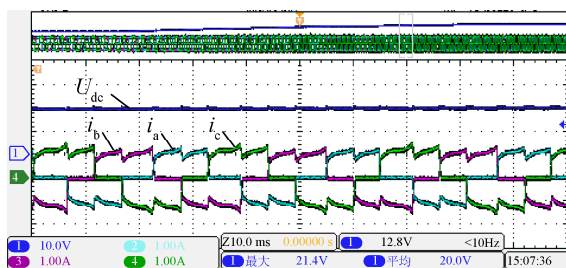
图6 动态抑制无刷直流电机换相转矩脉动实验平台
Fig. 6 Dynamic suppression test platform for commutation torque ripple of Brushless DC motor



(a) 无刷直流电机直流母线电压与三相电流波形



(b) A1 点时刻放大图

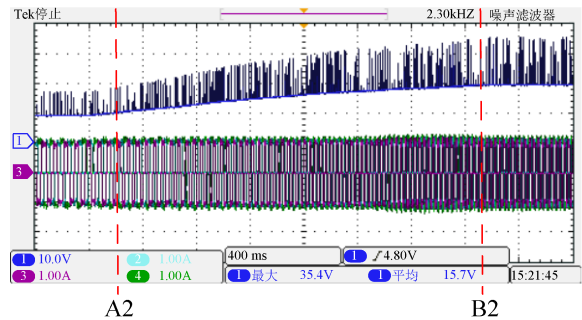


(c) B1 点时刻放大图

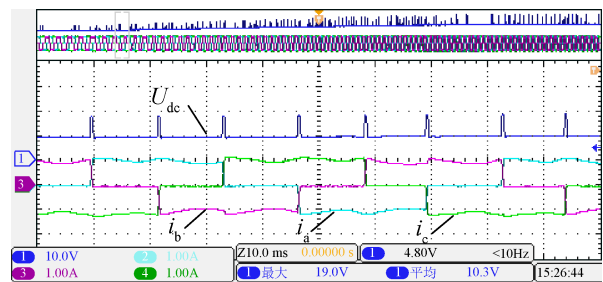
图7 传统控制方法下, 无刷直流电机直流母线电压与三相电流波形

Fig. 7 DC bus voltage and three-phase current waveform of Brushless DC motor under traditional control method

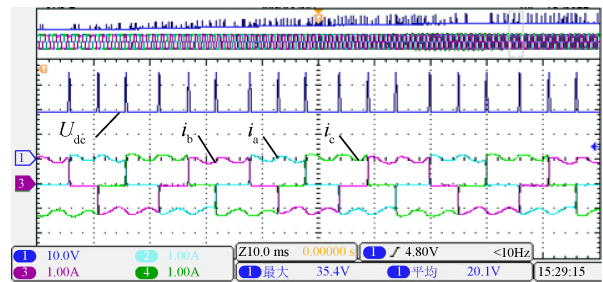
由图 7(b)和图 8(b)可计算出无刷直流电机在 A1 和 A2 时刻处转速约为 400rpm, 对应的转矩脉动占平均输出转矩的百分比如图 9(a)和(b)所示。可以看出, 在采用传统控制方法下, 无刷直流电机的换相转矩脉动最大值约为 34%, 采用准 Z 源动态抑制换相转矩脉动的方法后, 转矩脉动最大值减少至 13%左右。



(a) 无刷直流电机直流母线电压与三相电流波形



(b) A2 点时刻放大图



(c) B2 点时刻放大图

图8 动态抑制方法下, 无刷直流电机直流母线电压与三相电流波形

Fig. 8 DC bus voltage and three-phase current waveform of Brushless DC motor under the dynamic suppression method

由图 7(c)和图 8(c)可计算出无刷直流电机在 B1 和 B2 时刻处转速约为 950 rpm, 对应的转矩脉动占平均输出转矩的百分比如图 9(c)和(d)所示。可

以看出, 在采用传统控制方法下, 无刷直流电机的换相转矩脉动最大值约为 41%, 采用准 Z 源动态抑制换相转矩脉动的方法后, 转矩脉动最大值减少至 15%左右。

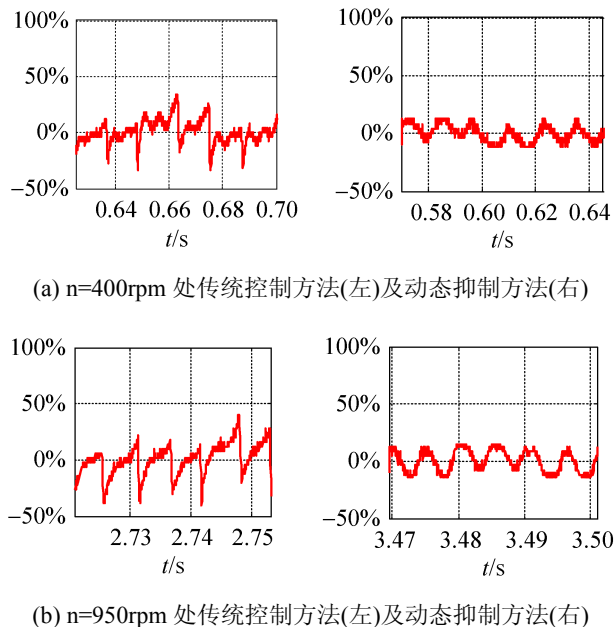


图 9 转矩脉动波形

Fig. 9 Torque ripple waveform

以上实验结果可以看出, 本文提出的动态抑制无刷直流电机换相转矩脉动方案, 能根据电机转速和负载的变化, 实时调整换相时间和换相电压值, 在电机转速变化的过程中, 系统响应迅速, 对换相转矩脉动抑制效果明显。

4 结论

本文在考虑电机绕组相电阻的基础上, 针对无刷直流电机换相时产生的转矩脉动, 设计了一种动态抑制换相转矩脉动的电路拓扑及其控制方法。建立了电机换相时的数学模型, 当电机转速及负载发生改变时, 实时在线计算并调节换相电压 U_{up} 和换相时间 t_{up} , 通过准 Z 源升压网络和开关选择电路进行切换, 从而实现动态抑制换相转矩脉动。仿真和实验结果表明, 本文提出的动态控制策略在电机工作转速变化范围内系统响应迅速, 能有效地抑制无刷直流电机换相转矩脉动。

参考文献:

- [1] Singh B, Singh S. Single-phase power factor controller topologies for permanent magnet brushless DC motor drives[J]. IET Power Electronics (S1755-4535), 2010, 3(2): 147-175.
- [2] Thomas M Jahns, Wen L Soong. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives—a review[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics (S0278-0046), 1996, 43(2): 321-330.
- [3] Carlson R, Michel L M, Fagundes J C. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 1992, 28(3): 632-638.
- [4] 张相军, 陈伯时. 无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方式对换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 87-91.
Zhang Xiangjun, Chen Boshi. The Different Influences of Four PWM Modes on Commutation Torque Ripples in Brushless DC Motor Control System [J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2): 87-91.
- [5] 张仲超, 韦鲲. 应用于永磁无刷直流电机的脉冲宽度调制方法: 中国, 2003101229096[P]. 2003-12-26.
- [6] Chuang H S, Yu-Lung Ke, Chuang Y C. Analysis of commutation torque ripple using different PWM modes in BLDC motors[C]//2009 IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference Record, Calgary, Canada, 2009: 1-6.
- [7] Meng Guangwei, Xiong Hao, Li Huaishu. Commutation torque ripple reduction in BLDC motor using PWM_ON_PWM mode[C]// 2009 ICEMS International Conference on Electrical Machines and Systems, Tokyo, Japan, 2009: 1-6.
- [8] Lin Yongkai, Lai Yenshin. Pulsewidth modulation technique for BLDCM drives to reduce commutation torque ripple without calculation of commutation time[J]. IEEE Trans on Industry Applications (S0093-9994), 2011, 47(4): 1786-1793.
- [9] 夏长亮, 文德, 王娟. 基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 54-58.
Xia Changliang, Wen De, Wang Juan. A New Approach of Minimizing Commutation Torque Ripple for Brushless DC Motor based on Adaptive Ann[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 54-58.
- [10] 夏长亮, 李志强, 王明超, 等. 基于 RBF 神经网络在线辨识的永磁无刷直流电机单神经元 PID 模型参考自适应控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 65-69.

- Xia Changliang, Li Zhiqiang, Wang Mingchao, et al. Single Neuron PID Model Reference Adaptive Control for PM Brushless DC Motors Based on RBF Neural Network On-Line Identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 65-69.
- [11] 夏长亮, 俞卫, 李志强. 永磁无刷直流电机转矩波动的自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 137-142.
- Xia Changliang, Yu Wei, Li Zhiqiang. Torque Ripple Reduction of PM Brushless DC Motors Based on Auto-disturbances-rejection Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 137-142.
- [12] Xu Feipeng, Li Tiecai, Tang Pinghua. A low cost drive strategy for BLDC Motor with low torque ripples[C]// IEEE 3rd International Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2008: 2499-2502.
- [13] Liu Yong, Zhu Z Q, David Howe. Commutation-Torque-Ripple minimization in Direct-Torque-Controlled PM brushless DC drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics (S0278-0046), 2007, 43(4): 1012-1021.
- [14] Won Chang-hee, Song Joong-Ho, Choy Ick. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor[J]. IEEE Trans on Power Electronics (S0885-8993), 2004, 19(2): 312-319.
- [15] Shi Jian, Li Tiecai. New method to eliminate commutation torque ripple of brushless DC motor with minimum commutation time[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics (S0278-0046), 2013, 60(6): 2139-2146.
- [16] Fang Jiancheng, Li Haitao, Bangcheng Han. Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF[J]. IEEE Trans on Power Electronics (S0885-8993), 2012, 27(11): 4630-4637.
- [17] Xia Changliang, Wang Yingfa, Tingna Shi. Implementation of finite-state model predictive control for commutation torque ripple minimization of permanent-magnet brushless DC motor[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics (S0278-0046), 2013, 60(3): 896-905.
- [18] Nam K Y, Lee W T, Lee C M, et al. Reducing torque ripple of brushless DC motor by varying input voltage[J]. IEEE Trans on Magnetics (S0018-9464), 2006, 42(4): 1307-1310.
- [19] Zhang Xiaofeng, Lu Zhengyu. A new BLDC motor drives method based on BUCK converter for torque ripple reduction[C]// 2006 IEEE 5th International Conference on Power Electronics and Motion Control, Shanghai, China, 2006: 1-4.
- [20] Chen Wei, Xia Changliang, Mei Xue. A torque ripple suppression circuit for brushless DC motors based on power DC/DC converters[C]// IEEE 3rd International Conference on Industrial Electronics and Applications, Singapore, 2008: 1453-1457.
- [21] Shi Tingna, Guo Yuntao, Song Peng, et al. A new approach of minimizing commutation torque ripple for brushless DC motor based on DC-DC converter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics (S0278-0046), 2010, 57(10): 3483-3490.
- [22] Viswanathan V, Jeevanathan S. Approach for torque ripple reduction for brushless DC motor based on three-level neutral-point-clamped inverter with DC-DC converter[J]. IET Power Electronics (S1755-4535), 2015, 8(1): 47-55.
- [23] 夏鲲, 徐鑫悦, 丁晓波, 等. 永磁无刷直流电动机转矩脉动抑制方法研究综述[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1417-1423.
- Xia Kun, Xu Xinyue, Ding Xiaobo, et al. Overview of Reducing Torque Ripple for Brushless DC Motor[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1417-1423.
- [24] 夏鲲, 杨益华, 杨淑英, 等. 基于Z源变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2540-2545.
- Xia Kun, Yang Yihua, Yang Shuying, et al. Torque Ripple Reduction of BLDC Motor Drives Based on Z-Source Converter[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2540-2545.
- [25] 夏鲲, 朱琳玲, 曾彦能, 等. 基于准Z源网络的永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 971-978.
- Xia Kun, Zhu Linling, Zeng Yanneng, et al. Researches on the Method of Suppressing Commutation Torque Ripple for Brushless DC Motors Based on a Quasi-Z-Source Net[J]. Proceedings of CSEE, 2015, 35(4): 971-978.
- [26] 夏鲲, 曾彦能, 葛越, 等. 准Z源升压变换器的软开关技术仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(3): 656-661.
- Xia Kun, Zeng Yanneng, Ge Yue, et al. Simulation Study of Soft Switching Technology for Quasi-Z-Source Boost Converter[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(3): 656-661.