

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.014

双线反向并绕结构的四相无刷直流电机

夏灯启

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对一种特殊结构的四相无刷直流电机的续流工作特点以及绕组漏感影响进行研究,分析了这类电机的绕组结构、续流工作方式以及绕组漏感给功率开关管带来的电压冲击,同时建立了该电机的数学模型,并在 MATLAB/Simulink 平台上对整个半桥控制系统进行了仿真,最后对这类电机进行了实验研究。仿真和实验结果均很好地说明了这类电机系统的续流工作特点与绕组漏感给功率开关管带来的电压冲击影响,同时也为这类电机的结构设计和控制电路功率开关管选型提供了理论参考。

关键词:四相无刷直流电机;半桥控制;续流回路;绕组漏感;过冲电压

中图分类号:TM33 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2014)05-0057-07

Four-Phase BLDCM of Double-wires Reverse Structure

XIA Dengqi

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

Abstract: Aiming at analyzing the freewheeling features and influence of leakage inductance of a special structured four phase BLDCM. Firstly explained the novel windings structure, the freewheeling method and power switches voltage impact brought by winding leakage inductance, then established the mathematical model of the motor, uses MATLAB/Simulink software to simulate the whole control system. Finally performed experiment to check the actual features of such kind of motor systems. The simulation and experiment results verify the foregoing analysis and illustrate the special freewheeling method, provide theoretical reference for the design of this kind of novel motors and for the selection of proper power switches.

Key words: four-phase BLDCM; half-bridge control; freewheeling circuit; winding leakage inductance; overshoot voltage

永磁无刷直流电机既具有交流电机结构简单、运行可靠、维护方便的优点,同时又具备直流电机启动转矩大、调速性能好的优势,因而在工业生产的诸多领域有着广泛地应用^[1-2]。目前国内外对永磁无刷直流电机的结构设计和控制系统进行了大量的研究,而这些研究大都是针对三相电机展开的。相比较而言,四相无刷直流电机在电机应用领域较少见,但是该类电机与传统的三相无刷直流电机或永磁同步电机相比,所需的驱动结构可以做得更加简单,成本更低,对反向尖峰电流的抑制能力更好^[3-5]。因此开展四相无刷直流电机的相关研究并积极推动其产业化发展,具有较大的实用价值。

本文针对一种特殊结构的四相无刷直流电机的半桥控制系统进行了研究,分析了这种四相电机的绕组结构和续流工作原理,指出了该类电机绕组漏感给电机控制系统中功率开关管带来的电压冲击影响,同时建立了该电机的电压平衡方程,并在 Simulink 仿真平台上对该四相无刷直流电机半桥系统进行了仿真分析,最后对该类电机进行实验研究。仿真分析和实验结果很好地说明了该类电机的续流工作特点和绕组漏感参数的影响。

1 四相无刷直流电机半桥控制系统

1.1 四相无刷直流电机绕组结构

本文研究的四相永磁无刷直流电机半桥控制系统

收稿日期:2013-12-31;修回日期:2014-01-08

作者简介:夏灯启(1988),男,湖北黄石人,硕士研究生,主要从事电机控制方面的研究。E-mail:xiadq0823@126.com

拓扑结构如图 1 所示,图中 A,B,C,D 是电机的四相绕组, R_1 和 R_2 是采样电阻,其中 A,B 两相共用采样电阻 R_1 ,C,D 两相共用采样电阻 R_2 。取 A 相绕组连接直流电源端为 A_1 ,连接 T_A 功率开关端为 A_2 ,B,C,D 相依次定义。图中 A,B 相绕组采用反向并绕的方式^[6],即 A 相绕组的 A_1 端与 B 相绕组的 B_2 端相连,A 相绕组的 A_2 端与 B 相绕组的 B_1 端相连,C,D 两相绕组也是反向并绕。

根据这种绕组连接方式可知,若 A,B 两相绕组完全耦合(假设没有漏磁),则 A,B 两相会产生大小相等、方向相反的反电势,C,D 两相同理。另外,该电机在进行本体设计和绕组布线时,需保证 A,B 两相的磁路与 C,D 两相的磁路垂直,即基本没有磁路耦合。

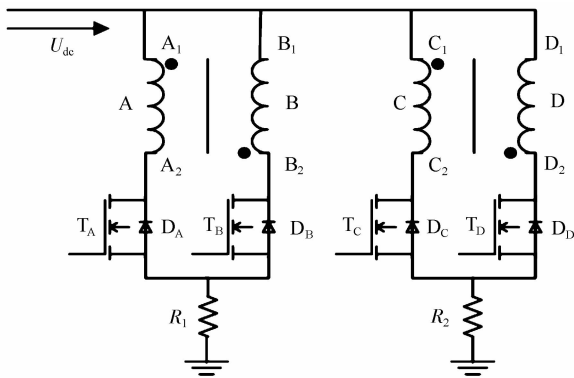


图 1 四相永磁无刷直流电机半桥控制系统拓扑电路
Figure 1 Half-bridge control circuit of four-phase BLDCM system

1.2 四相无刷直流电机续流原理

如图 1 所示,这类结构的电机采用四相半桥驱动方式,每个时刻导通一个功率开关管,如依照 A-B-C-D 的顺序依次给四相绕组供电。之所以能够采用这种控制电路,是由于每相绕组回路上的功率开关管关断时,可以通过相互耦合的另一绕组回路完成续流和能量回馈给电源的过程。

续流过程如下:A 相绕组供电,此时 T_B 管是关断的,在 B 相绕组中会产生与 A 相相反的反电势;当 T_A 关断时,A 相绕组通电结束,随着电流的衰减,该绕组中产生阻碍电流减小的反电势,并在 B 相绕组同名端感应出大小相同、方向相反的反电势,当该反电势大于母线供电电压时,耦合绕组中的能量通过 B 绕组和 D_B 二极管回馈给供电电源,从而达到续流的效果。同理,C 相绕组控制功率开关管 T_C 关断时,通过 D 绕组和 D_D 二极管完成续流。

分析可知:任一相的控制功率开关管关断时,通过

对应的反向并绕耦合绕组和续流二极管完成续流过程。

1.3 绕组漏感对绕组回路功率开关的影响

在实际应用的该类四相电机系统中,反向并绕的两相绕组耦合系数可以做得很高,但并不能实现完全的耦合,因而每相绕组依然存在漏感。而漏感的存在会使得该相绕组通电结束时能量无法完全回馈给供电母线,剩余的能量使得该相的功率开关管关断时漏极和源极之间产生较大的冲击电压。由于绕组互感的影响以及剩余的电磁能的回馈需要,功率开关管关断瞬间该相绕组中依然会产生较小的反向电流。

以 A 相为例进行分析:当 A 相回路功率开关管 T_A 关断时,耦合绕组中绝大部分能量通过 B 绕组和 D_B 二极管回馈给供电母线,如图 2 中的电流 i_1 所示;同时,由于 A 相漏感的存在以及 B 相续流回路电流的迅速变化, T_A 关断瞬间该管的漏极和源极之间会产生较大的过冲电压,该电压会使得 D_A 管导通形成图 2 所示的电流 i_2 ,这个微小的续流电流分量可以将剩余的电磁能回馈给直流母线。

根据以上分析可知,进行这类电机的半桥控制回路设计时,一定要选好合适的功率开关管,保证开关管能够承受切断时产生的冲击电压。由于绕组漏感越大,回路中产生的过冲电压越大,因而该类电机设计的一个关键是要保证反向并绕的 2 个绕组之间的高度耦合性,尽量将绕组漏感降到较低水平。

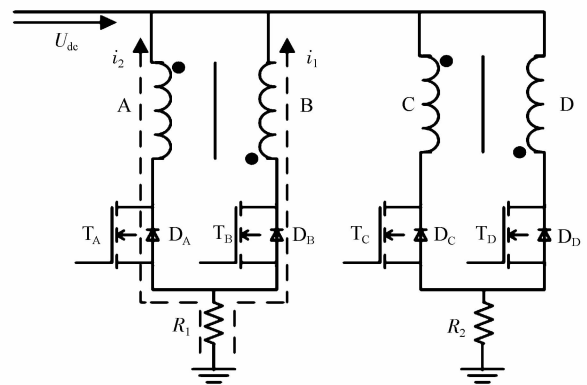


图 2 A 相功率开关管关断瞬间续流回路
Figure 2 Freewheeling circuit of phase A

2 四相无刷直流电机的电压平衡方程

由于四相无刷直流电机和三相无刷直流电机具有很多相似之处,因而完全可以借鉴三相电机的成熟模型来建立四相无刷直流电机的数学模型^[7]。为了便于研究和分析,做出如下假设^[8]:电机四相绕组完全对称,电枢绕组在定子表面均匀分布;气隙磁场为方

波, 定子电流、转子磁场均匀对称分布; 磁路不饱和, 不计涡流和磁滞损耗; 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等的影响; 忽略功率开关管的导通压降。

根据图 1 的电路拓扑结构, 四相无刷直流电机的电压平衡方程如下^[8]

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \mathbf{L}p\mathbf{i} + \mathbf{e} \quad (1)$$

上式中电压矩阵 $\mathbf{u} = [u_A \ u_B \ u_C \ u_D]^T$, 电流矩阵 $\mathbf{i} = [i_A \ i_B \ i_C \ i_D]^T$, 微分算子 $p = d/dt$, 四相绕组旋转感应电动势矩阵 $\mathbf{e} = [e_A \ e_B \ e_C \ e_D]^T$, 而电阻矩阵 \mathbf{R} 和电感矩阵 \mathbf{L} 的具体表达式分别如下式:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} & M_{AD} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} & M_{BD} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C & M_{CD} \\ M_{DA} & M_{DB} & M_{DC} & L_D \end{bmatrix}。 \quad (3)$$

以上 R_A, R_B, R_C 和 R_D 分别是 A, B, C 和 D 四相绕组的电阻, L_A, L_B, L_C 和 L_D 分别是四相绕组的电感, 而 M_{ij} 是 i, j (i, j 是不同绕组) 两绕组间的互感值。

根据电机的磁路结构和建立数学模型时所做的假设可知, A, B 两相绕组与 C, D 两相绕组几乎没有磁路耦合, 即 $M_{ij} = 0$ (i 取 A 或 B, j 取 C 或 D)。取 $R_A = R_B = R_C = R_D = R_0$, 同时取 $L_A = L_B = L_C = L_D = L_0$, 设反向并绕的两相绕组间的互感为 $-M$, 则方程(1)化简可得

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}_0\mathbf{i} + \mathbf{L}_0p\mathbf{i} + \mathbf{e} \quad (4)$$

上式中, 化简后得电阻矩阵和电感矩阵为:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} R_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} L_0 & -M & 0 & 0 \\ -M & L_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_0 & -M \\ 0 & 0 & -M & L_0 \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

3 仿真分析

为了验证以上分析结论和数学模型的正确性, 本文在 MATLAB/Simulink 平台上对该类四相无刷直流电机半桥控制系统进行了仿真实验, 具体分析了该类电机的续流过程以及电机绕组漏感所带来的过冲电压

和反向电流。仿真所用的电机系统参数如下所示:

直流供电电压 $U_{dc} = 12 \text{ V}$, 电枢极对数 $p = 7$, 转动惯量 $J = 0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 定子单相绕组电阻 $R_0 = 0.05 \ \Omega$, 单相绕组自感 $L_0 = 42 \ \mu\text{H}$, 电机反电势系数 $K_e = 0.052 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$, 电机的给定转速为 $1800 \text{ r}/\text{min}$, 四相电机单相绕组漏感的变化范围为 $1 \sim 22 \ \mu\text{H}$, 电机超前角为 10° , 每相导通 90° , 仿真时间设为 1.0 s , 仿真步长为 $20 \ \mu\text{s}$ 。

3.1 仿真模型搭建

本文仿真实验所用的仿真模型如下图 3 所示。

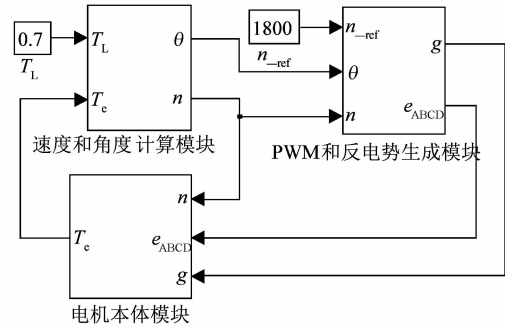


图 3 四相无刷直流电机半桥控制系统仿真模块

Figure 3 Simulation module of four-phase BLDCM half-bridge control system

图 3 中, T_L 表示负载转矩, n_{ref} 表示电机设定转速。转速和角度计算模块输出电机的转速 n 和转子电角度 θ , 具体结构如图 4 所示, 图中变量 J 表示电机的转动惯量。PWM 和反电势生成模块输出电机的四相反电势 e_{ABCD} 和四相绕组功率开关管的门极驱动信号 g , 其中四相反电势 e_{ABCD} 根据样机反电势波形的 FFT 分析而得到, 四相功率开关管门极驱动信号 g 的具体生成模块如下图 5 所示, 图中 k_p 和 k_i 分别表示比例和积分常数。

图 3 中电机本体模块包含四相电机的主体结构 and 电磁转矩生成部分, 其中四相电机的主体结构如图 6 所示。

3.2 仿真结果

基于前文所述的仿真条件和仿真模型, 调节电机四相绕组漏感的大小, 可以通过仿真观测到该类电机的续流工作过程和开关管源、漏极之间电压的变化状况。

1) 保持电机绕组漏感大小为 $2 \ \mu\text{H}$

当给定转速为 $1800 \text{ r}/\text{min}$ 、负载转矩大小为 $0.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 电机启动阶段的 A, B 电流和 A 相功率开关管漏极和源极电压如图 7 所示。

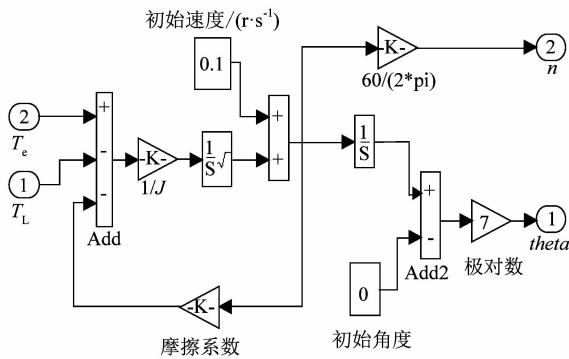


图 4 转速和角度计算模块仿真模型
Figure 4 Simulation module of speed and angle calculation part

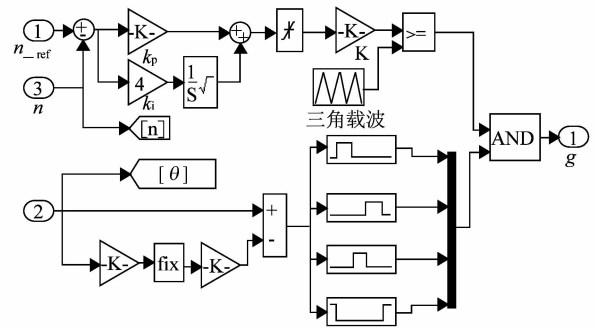


图 5 PWM 和反电势生成模块中四相功率开关管门极驱动信号 g 生成部分仿真模型
Figure 5 Simulation module of drive signals g generating part in PWM and back-EMF generating submodule

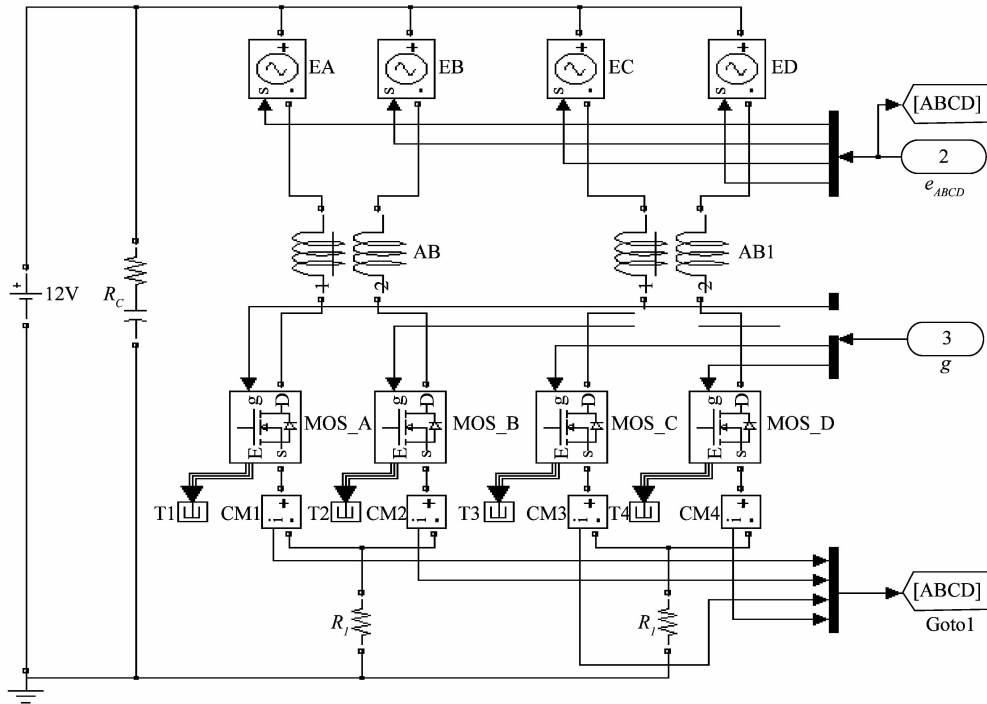


图 6 电机本体模块中电机控制部分模型
Figure 6 Simulation module of BLDCM structure and controlling part

在电机运行区域稳定时,通过局部仿真波形(图 8 所示),可以观察得更为清楚:当 A 相绕组中的功率开关管关断时,B 相绕组回路迅速产生反向的尖峰电流,即耦合绕组的能量通过 B 相绕组和续流二极管 D_B 回馈到供电母线端。

由于绕组漏感的存在以及 B 相电流突变引起的电磁感应,A 相功率开关管关断瞬间,该开关管的源极和漏极之间会产生一个较大的尖峰电压,通常该尖峰电压大于直流母线电压(12 V),因而 A 相中还会产生

较小的反向电流,B 相绕组功率开关管关断时亦然。

2) 电机绕组漏感的影响

本文所分析的四相电机控制系统中,绕组的漏感会造成功率开关管关断时刻产生较大的尖峰电压,而且漏感越大,所产生的尖峰电压越大。

保持四相绕组的自感不变,通过改变绕组漏感大小,便可以观察到绕组漏感与功率开关所受的冲击电压 U_{ds} 之间的关系,仿真结果如表 1 所示。

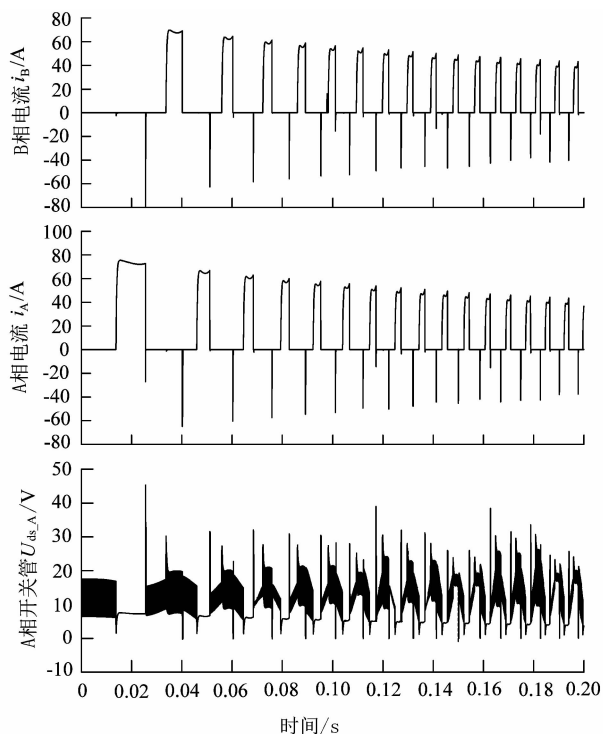


图 7 A,B 两相绕组电流以及 A 相开关管 U_{ds_A} 电压波形

Figure 7 Current of phase A,B and voltage between drain and source of switch-A

表 1 绕组漏感与功率开关管过冲电压的关系

Table 1 Relation between leakage inductance of windings and overshoot voltage of power switches

绕组漏感/ μH	启动阶段 U_{dsmax}/V	稳定阶段 U_{dsmax}/V
22	180	65
12	115	45
10	90	42
8	78	40
6	65	38
4	52	35
2	38	32
1	35	30

从表 1 中数据关系可以看出: 在电机绕组自感不变的情况下, 绕组的漏感越小, 该绕组功率开关在工作过程中所承受的电压冲击就越小。

4 实验结果

为了验证前文分析结论和仿真结果的可靠性, 以一台四相无刷直流电机为平台进行了实验研究, 该电机采用了图 1 所示的绕组结构和控制系统。电机基本参数如下: 母线供电电压为 12 V, 额定功率为 500 W, 额定转速为 2 200 r/min, 反电势系数 $K_e = 0.052 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$, 电枢绕组自感为 42 μH , 电机极对数为 7。实验负载装置如图 9 所示。

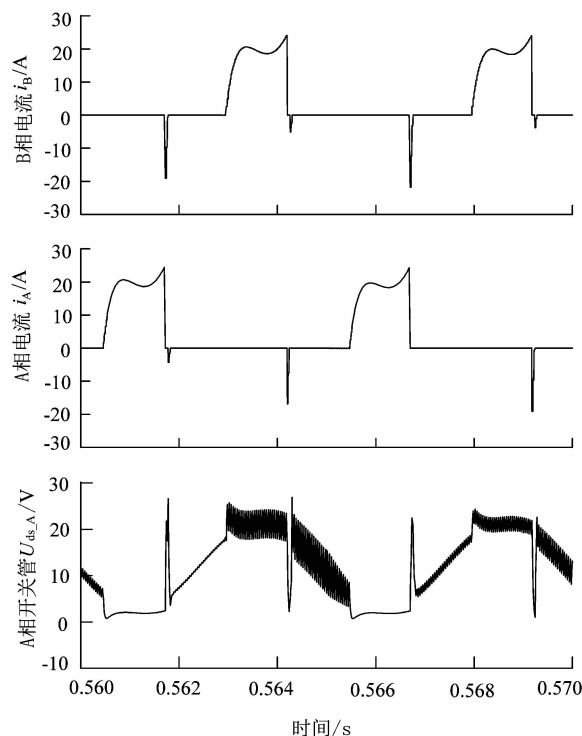


图 8 A,B 两相绕组电流以及 A 相开关管漏极和源极之间电压的局部放大波形

Figure 8 Partially enlarged waveform of current of phase A and B and voltage between drain and source of switch-A



图 9 实验工具和负载装置

Figure 9 Experimental tools and load device

图 9 中, 整套液压油路作为电机的负载, 通过调节液压阀可以改变电机的负载大小, 电机倒扣在储油罐下面。

通过上位机监控软件可以采集电机系统运行过程中的重要物理量的波形和数据。在油路负载为 2 MPa、电机给定转速为 1 800 r/min 时, 电机系统从启动到平稳运行的动态过程如图 10 所示。该图中, U_{avg} 表示 PWM 斩波电压, n 表示电机转速, i_{AB} 表示采样电

阻 R_1 电流正向分量(暂不考虑续流部分)。从图 10 中可以看出,电机刚启动时,由于速度 PID 环饱和失去调节作用,输出占空比很大,斩波电压 U_{avg} 也较大,使得电机加速较快,同时也造成较大的电流尖峰。随后速度 PID 环脱离饱和状态,占空比回落,电机开始平稳加速。

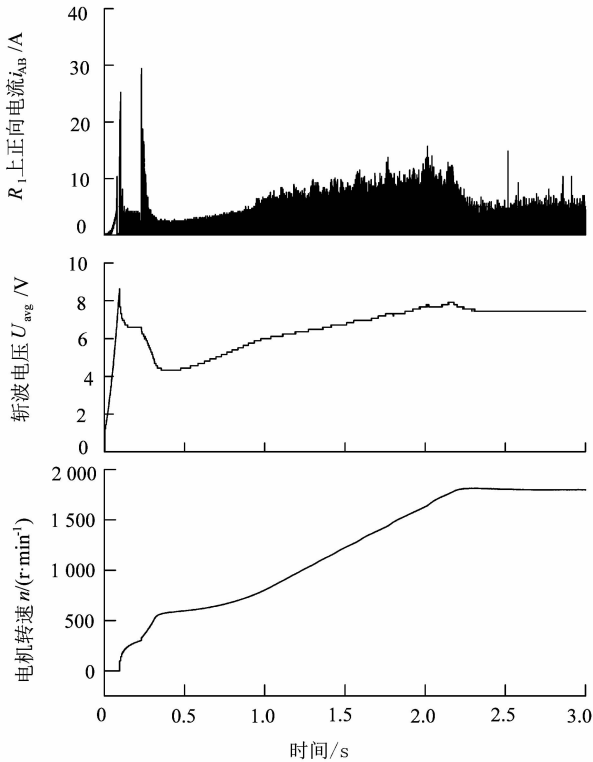


图 10 电机斩波电压、转速和采样电阻 R_1 上正向分量波形

Figure 10 Waveform of chopper voltage, speed of motor and forward current component of R_1

通过示波器观察 R_1 两端的电压波形变化可以分析 A、B 两相的电流变化和续流状况,实验采集到 R_1 两端的电压波形如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,电流正负方向并不连续,当正向电流中断(功率开关管关断)时,迅速产生反向的电流,这个反向电流正是耦合相形成续流回路产生的。

观测电机正常运转过程中某一相绕组的功率开关管的漏极和源极电压值 U_{ds} ,通过示波器测得的波形如图 12 所示。从图中可以看出, U_{ds} 周期性变化,最大值明显大于 12 V 的直流母线电压。这一实验结果和仿真结果均说明了该类电机绕组漏感给该功率开关管带来的电压冲击。

5 结语

四相无刷直流电机与传统的三相无刷直流电机相

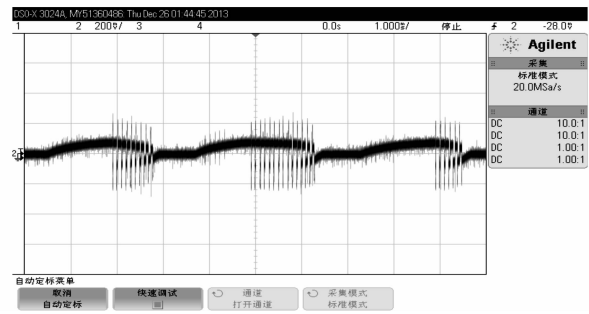


图 11 采样电阻 R_1 两端的电压波形

Figure 11 Voltage waveform across the sampling resistor R_1

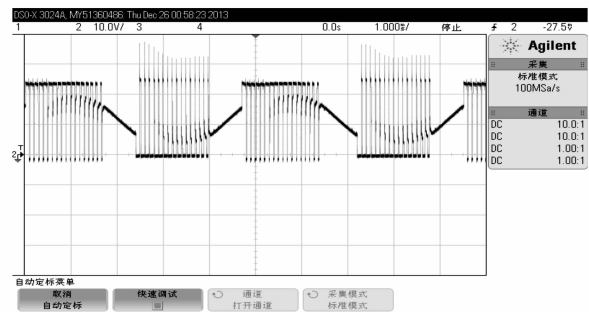


图 12 某一相功率开关管漏极和源极电压 U_{ds} 波形

Figure 12 Voltage waveform between drain and source of the power switch in any phase

比,转矩脉动更小,控制电路结构更为简单,所需功率开关管更少,同时功率开关管工作频率更低,具有较大的实用价值。本文分析了一种新颖结构的四相无刷直流电机的绕组结构和工作原理,说明了该类电机的续流工作原理和绕组漏感给该相功率开关所带来的尖峰电压冲击,指出了这类特殊电机的数学模型,同时在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了四相无刷直流电机的半桥控制系统,进行了仿真研究,最后针对这一类电机系统进行了实验研究。仿真和实验结果很好地验证了本文前部分的理论分析。同时仿真结果也为该类电机的结构设计和功率开关管耐压范围选型提供了有效的理论参考。

参考文献:

- [1] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [2] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [3] 孟楠. 四相永磁无刷直流电动机控制系统研究[D]. 太原:太原理工大学, 2010.

(下转第 67 页)