

对转永磁无刷直流电机建模与仿真

荣 军¹, 丁跃浇¹, 张 敏¹, 李一鸣², 陈 曦¹

(1. 湖南理工学院 信息与通信工程学院, 湖南 岳阳 414006; 2. 湖南理工学院 计算机学院, 湖南 岳阳 414006)

摘 要: 通过对三相绕组星型连接全控桥式电路的分析, 介绍了对转永磁无刷直流电机的工作原理; 据永磁无刷直流电机的内部数学模型建立了对转永磁无刷直流电机的数学模型, 且在 Matlab/Simulink 对对转电机本体模块、换相模块和逆变器模块等系统进行了建模和仿真, 结果表明理论分析和实验结果完全符合。

关键词: 对转; 永磁无刷直流电机; 数学模型; 仿真

中图分类号: TM33

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)05-0033-04

Modeling and Simulation of Counter Rotating Permanent Magnet BLDCM

Rong Jun¹, Ding Yuejiao¹, Zhang Min¹, Li Yiming², Chen Xi¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang Hunan 414006, China;
2. School of Computer, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang Hunan 414006, China)

Abstract: Through an analysis of a three-phase winding, star-connected full-controlled bridge circuit, introduces the working principle of the counter rotating permanent magnet BLDCM. According to the internal mathematical model of permanent magnet brushless DC motor, establishes the mathematical model of the counter rotating permanent magnet BLDCM, and gives the modeling and simulation of the motor body module, commutation module and inverter module by Matlab / Simulink. The simulation results show that the theoretical analysis and experimental results are in full compliance.

Keywords: counter rotating; permanent magnet brushless DC motor; mathematical model; simulation

无人水下航行器被称作海军的“力量倍增器”, 有着广泛而重要的军事用途。目前无人水下航行器应用的推进系统主要为对转螺旋桨推进系统 (contra rotating propeller, 简称 CRP)。然而传统水下航行器动力装置采用的是独立对转螺旋桨推进系统, 其存在如下缺点: 水下航行器在航行时产生航迹, 容易暴露自己的位置, 另外航深受到较大的限制, 传动效率较低, 噪声较大。本文采用对转电机带动对转螺旋桨的推进系统, 去掉了机械传动装置, 使推进系统的传动效率得到提升, 噪声减小, 缩小了体积, 节约了空间, 且提高了推进系数, 还可实现无级变速, 节约能量, 增加航行器的航程。因而用对转电机带动对转螺旋桨是无人水下航行器一个较好的推进方案。故研究大功率对

转永磁无刷直流电机的控制技术对促进无人水下航行器推进系统的发展有着重要的现实意义和应用价值。

1 数学模型介绍

1.1 工作原理

对转永磁无刷直流电机的工作原理可由图 1 和图 2 来说明。图 1 为电机三相绕组星型连接的三相全控桥式逆变电路, 图中 $V_1 \sim V_6$ 为 6 只功率开关管, 起绕组的开关换相作用, $D_1 \sim D_6$ 分别为 6 只功率开关管的续流二极管。当每一时刻有 2 个功率开关管导通、2 相绕组通电时, 就称为两两导通方式或两相导通方式。下面分析两相导通方式下对转永磁无刷直流电机的工作

收稿日期: 2010-07-04

通信作者: 荣 军 (1978-), 男, 湖南岳阳人, 湖南理工学院讲师, 硕士, 主要从事电源及控制技术研究,

E-mail: rj1219@163.com

原理，为方便起见，以定子为参照系进行分析^[1]。

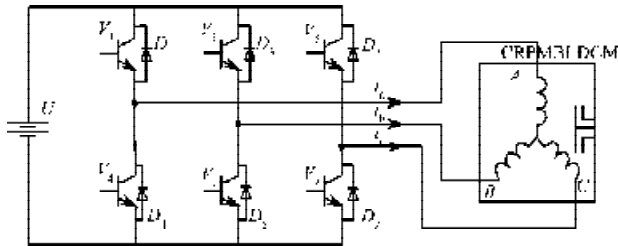


图1 三相绕组星型连接全控桥式电路图

Fig. 1 Three-phase winding, star-connected full-controlled bridge circuit

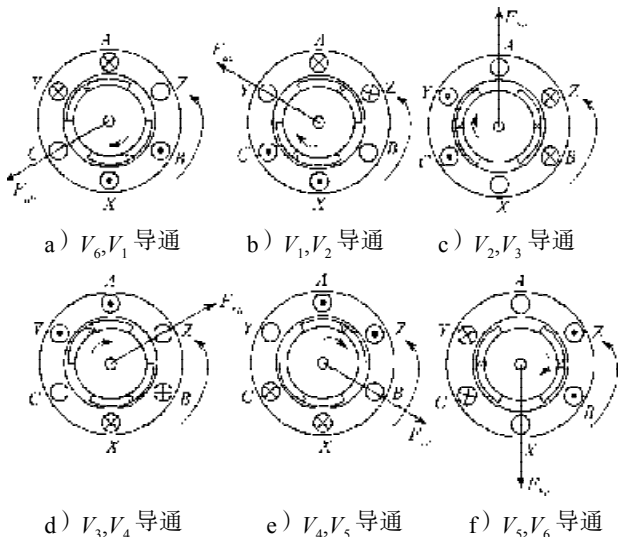


图2 对转永磁无刷直流电机工作原理图

Fig. 2 The working principle of counter rotating permanent magnet BLDCM

当转子永磁体位于图2中a)图所示位置时，位置传感器输出转子相对于定子的位置信号，经过控制电路逻辑变换后驱动逆变器，使功率开关管 V_6 和 V_1 导通，从而使A相和B相绕组通电，电流由A相绕组流入，由B相绕组流出，A、B两相绕组在空间产生的合成磁势如图2中a)图的 F_{ab} 所示。此时定子电枢产生的磁场和转子磁场相互作用拖动转子顺时针方向转动，根据作用力与反作用力的原理，转子同时也拖动定子逆时针方向转动。当转子相对于定子转过600电角度，到达图2中b)图所示位置时，位置传感器再次输出定子的位置信号，经控制电路逻辑变换后使开关管 V_6 截止， V_2 导通， V_1 不变，仍导通，此时功率开关管 V_1, V_2 同时导通，对应电枢A相和C相绕组通电，电流由A相绕组流入，由C相绕组流出，电枢绕组在空间的合成磁势如图2中b)图的 F_{ac} 所示。此时转子继续沿顺时针方向转动，而定子则继续沿逆时针方向转动。依次类推，当转子继续沿顺时针方向相对于定子每转过600电角度时，依次触发： $V_2, V_3 \rightarrow V_3, V_4 \rightarrow V_4,$

$V_5 \rightarrow V_5, V_6 \rightarrow V_6, V_1 \rightarrow V_1, V_2$ ，因此功率开关管在1个电周期内的导通逻辑为： $V_6, V_1 \rightarrow V_1, V_2 \rightarrow V_2, V_3 \rightarrow V_3, V_4 \rightarrow V_4, V_5 \rightarrow V_5, V_6$ ，其三三相绕组与各开关管导通顺序的关系见图3。

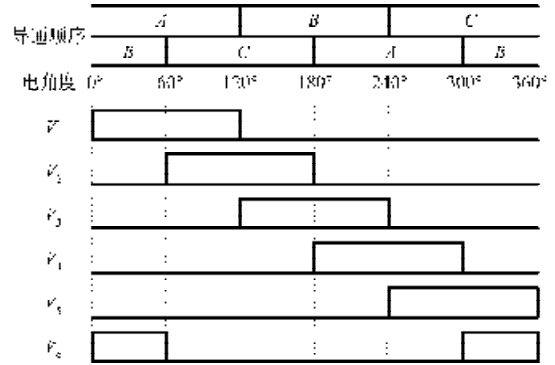


图3 两相导通时绕组和开关管导通顺序

Fig. 3 Turn-on sequence of the windings and switches at two-phase conducting

图4为对转永磁无刷直流电机工作在理想状态下时，定子三相绕组电流和反电动势的波形图。

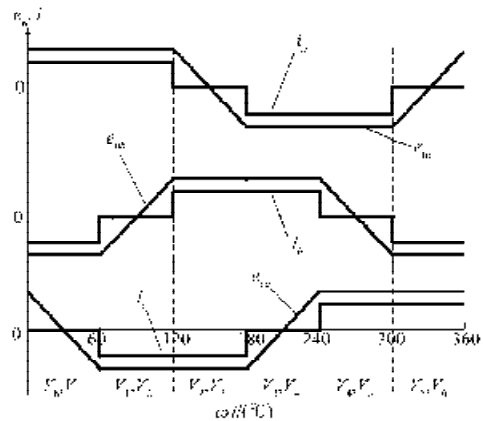


图4 定子三相绕组电流和反电动势理想波形

Fig. 4 The ideal waveform of the stators three-phase winding current and back EMF

1.2 数学模型的建立

对转永磁无刷直流电机内部数学模型可在普通永磁无刷直流电机内部数学模型的基础上建立。为便于分析，先作如下假设^[2-3]：

- 1) 电机磁路不饱和，不计涡流损耗和磁滞损耗；
- 2) 忽略齿槽、换相过程及电枢反应等的影响；
- 3) 电机三相绕组完全对称，反电动势为梯形波分布，转子磁场也对称，对应电路中的各状态完全一致。

则对转永磁无刷直流电机定子三相绕组的电压平衡方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \\ u_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{1a} \\ e_{1b} \\ e_{1c} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{na}, u_{nb}, u_{nc} 为定子 3 相绕组的相电压, 单位 V;
 i_a, i_b, i_c 为定子 3 相绕组的相电流, 单位 A;
 e_{na}, e_{nb}, e_{nc} 为定子 3 相绕组相反电动势, 单位 V;
 R 为定子 3 相绕组的相电阻, 单位 Ω ;
 L 为每相绕组的自感, 单位 H;
 M 为每两相绕组间的互感, 单位 H;
 P 是微分算子, 即 $P=d/dt$ 。

当电机三相绕组星型连接且没有中线时, 则根据基尔霍夫定理可得:

$$i_a + i_b + i_c = 0, \tag{2}$$

进而有

$$Mi_b + Mi_c = -Mi_a, \tag{3}$$

将式 (2) 和式 (3) 代入式 (1), 得到对转永磁无刷直流电动机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{ua} \\ u_{ub} \\ u_{uc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L & M \\ 0 & 0 & L & M \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ua} \\ e_{ub} \\ e_{uc} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

由此可得电机等效电路如图 5 所示。

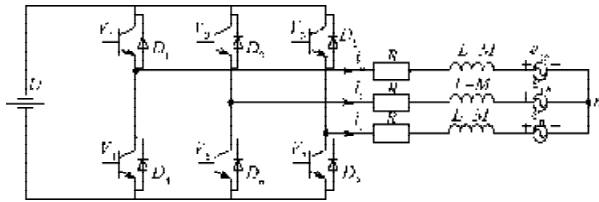


图 5 对转永磁无刷直流电机的等效电路图

Fig. 5 The equivalent circuit of counter rotating permanent magnet BLDCM

2 Matlab 仿真及结果分析

2.1 仿真参数设置

电机参数为: 定子绕组相电阻 $R=0.0077 \Omega$; 相电感 $L=0.95 \text{ mH}$; 相反电动势 $C_e=2.28 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$; 定子和转子的转动惯量 $J_s=J_r=1.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 定子和转子轴上的摩擦系数 $\mu_s=\mu_r=2.41 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$; 电机的电极对数 $N=4$; 电机额定电流为 156 A ; 额定电压为 220 V ; 转速为 350 r/min 。

2.2 仿真试验与结果分析

整个对转永磁无刷直流电机在 Matlab/Simulink 下的仿真系统电路见图 6。由图 6 可见, 仿真系统由电机本体、换相模块和逆变器模块 3 个部分组成, 电源电压为 220 V 直流, 定子和转子所加负载分别为各自转速的平方, 这是由于对转永磁无刷直流电机后面带的是对转螺旋桨, 而对转螺旋桨所产生的转矩与转速平方成正比, 因此将转速平方作为负载转矩加到电机的定

子和转子上。图 6 中换相模块的工作原理是: 由电机位置传感器检测出电机转子相对于定子的位置信号, 对逆变器三相桥臂实行换相控制, 从而对电机三相绕组进行换流。换相模块可通过 Simulink 中的 S-function 函数来实现。S-function 函数是一种动态仿真函数, 可通过编程实现对系统的动态仿真^[4-5]。

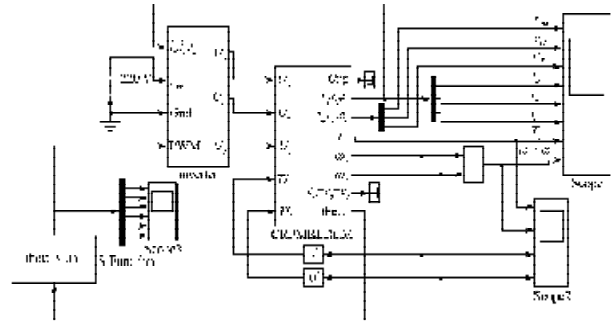
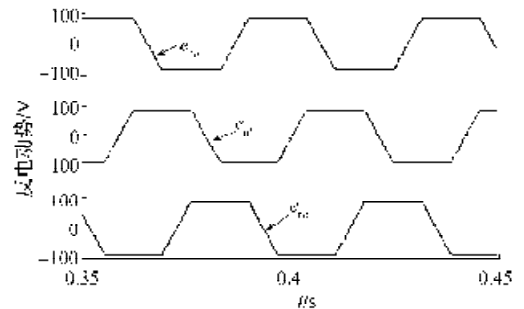


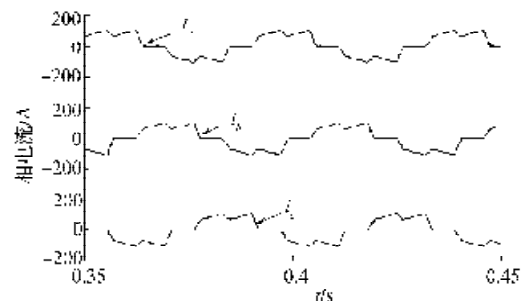
图 6 对转永磁无刷直流电机仿真系统

Fig. 6 The simulation system of counter rotating permanent magnet BLDCM

图 7 为仿真所得三相反电动势和电流波形的放大图。与图 4 比较可看出, 图 7 中的三相反电动势波形与理想的梯形波反电动势波形相同; 但三相电流波形却与图 4 中的理想方波电流波形有差别, 而是具有豁口的方波电流, 这是由于其他两相绕组换相对本相绕组造成了影响。



a) 反电动势



b) 相电流

图 7 仿真波形

Fig. 7 The simulation waveform

图 8 为换相模块输出到逆变器 6 个功率开关管的栅极触发信号。从图 8 中可看出, 触发信号的顺序依

次为 $V_4, V_1 \rightarrow V_1, V_6 \rightarrow V_6, V_3 \rightarrow V_3, V_2 \rightarrow V_2, V_5 \rightarrow V_5, V_4$, 与前文分析结果完全一致, 且每个功率开关管在 1 个电周期内导通 $1/3$ 周期, 即 120° 电角度, 说明位置传感器的换相模块工作正确。

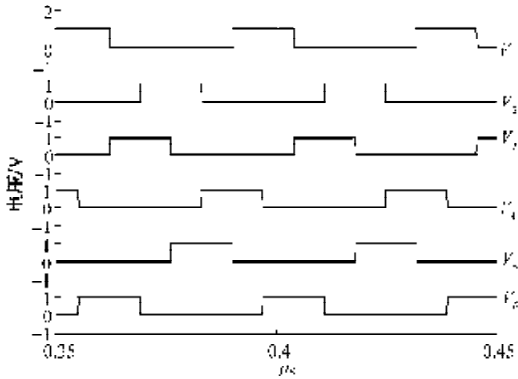
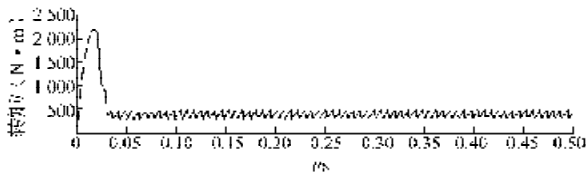


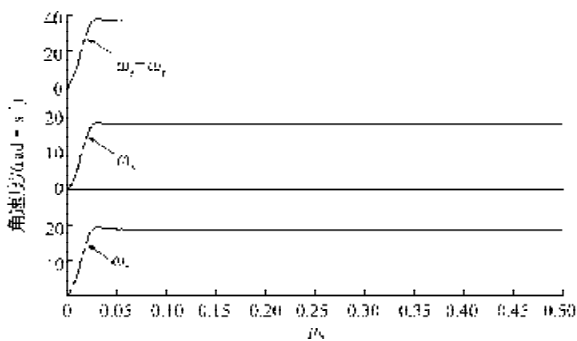
图 8 换相触发信号

Fig. 8 The commutation triggered signals

图 9 是电磁转矩、转子相对于定子的角速度、定子和转子沿各自正方向的角速度波形图, 仿真输出结果与理论分析相一致。



a) 电磁转矩



b) 角速度

图 9 仿真曲线

Fig. 9 The simulation curve

综合以上分析, 对转永磁无刷直流电机系统的仿真结果与理论分析结果是相同的, 验证了对转电机本体模块、换相模块和逆变器模块设计的正确性。

3 结语

本文根据对转永磁无刷直流电机的工作原理, 建立了其数学模型, 并在 Matlab/Simulink 下进行了对转永磁无刷直流电机数学建模以及仿真, 仿真结果与理论分析相符合, 证明了其分析方法的正确。为无人水下航行器推进系统的研发和设计提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 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, 2006.
Zhang Chen. Brushless DC Motor Theory and Application [M]. 2nd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [2] 张式勤, 邱建琪, 储俊杰, 等. 双转式永磁无刷直流电动机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 176-181.
Zhang Shiqin, Qiu Jianqi, Chu Junjie, et al. Double Transgenic Permanent Magnet Brushless DC Motor Modeling and Simulation[J]. CSEE, 2004, 24 (12): 176-181.
- [3] 李宏, 徐德民, 焦振宏, 等. 采用 PMLBDC 的 AUV 对转螺旋桨推进系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3085-3090.
Li Hong, Xu Demin, Jiao Zhenhong, et al. Modeling and Simulation of CRP Driving System Using Counter-Rotating Rotors PM BLDC Motor[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (13): 3085-3090.
- [4] Kim Tae-Hyung, Ehsani Mehrdad. Sensorless Control of the BLDC Motors from Near-Zero to High Speed[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1635-1645.
- [5] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Hong Naigang. MATLAB Simulation on Power Electronics and Electric Drive Control System[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.

(责任编辑: 李玉珍)