

基于 SVPWM 控制的无刷直流电机的建模与仿真

张 杰

(天津港信息技术发展有限公司,天津 300450)

摘要:针对传统无刷直流电机(BLDCM)控制系统方波驱动转矩脉冲大等缺点,采用了基于电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制方法的正弦波驱动永磁无刷直流电机控制系统,建立了两级三相无刷直流电机的数学模型,利用 Matlab/Simulink 中的电力系统仿真工具箱 SimPowerSystems 建立了 SVPWM 控制下的无刷直流电机转速、电流双闭环控制系统的仿真模型。仿真结果表明,电压空间矢量控制下的无刷直流电机控制系统具有较好的静、动态特性,同时该仿真结果也验证了 SVPWM 控制无刷直流电机的有效性和仿真模型的正确性。

关键词:空间矢量脉宽调制;无刷直流电机;建模;SimPowerSystems

中图分类号:TH39;TM33

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1106-03

Model and simulation of brushless DC motor based on SVPWM control

ZHANG Jie

(Tianjin Port Information Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Aiming at the square wave drive torque pulses of traditional brushless DC motor(BLDCM) control system is high, the mathematical model of the two-phase brushless DC motor was established based on space vector pulse width modulation(SVPWM) control method of the sine wave drive permanent magnet brushless DC motor control system. Simulation models of speed of brushless DC motor under SVPWM control and control system of current double closed-loop were built by the simulation platform of Matlab/Simulink. The results indicate that brushless DC motor control system has good static and dynamic characteristics under the control of the voltage space vector, and the reasonability and validity of the simulation model are verified.

Key words: space vector pulse width modulation(SVPWM); brushless DC motor(BLDCM); modeling; SimPowerSystems

0 引 言

近些年来,随着永磁材料、计算机技术、智能控制技术以及电子电力技术尤其是功率开关元件技术得到了飞速的发展,为当今永磁无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)的研究和制造奠定了重要的基础。BLDCM 以体积小、维护方便、控制精度高等优点,在数控机床、机器人、伺服控制等领域得到了广泛的应用。传统无刷直流电机控制系统大部分采用方波脉宽调制(PWM)驱动控制^[1],其结构简单、容易实现,但是 PWM 经过逆变后相电压、电流均为近似于正弦波的方波,造成无刷直流电机转矩脉动较大;而正弦波驱动永磁无刷直流电机^[2],采用 SVPWM 控制经过逆变后的

相电压、相电流更趋近于正弦波,能很好地克服其缺点^[3],但结构复杂,计算量较大。

本研究基于 Matlab/Simulink 中的电力系统仿真工具箱 SimPowerSystems 建立基于 SVPWM 控制的速度、电流双闭环无刷直流电机控制系统仿真模型,采用经典 PI 控制算法,通过仿真分析验证采用 SVPWM 控制无刷直流电机的有效性和仿真模型的正确性、有效性,并与传统 PWM 控制系统的电流波形进行对比。

1 无刷直流电机的数学模型

以两极三相无刷直流电机为例,直接利用电动机的相变量来建立数学模型^[4-7],电机定子绕组为星形连接集中整距绕组,转子采用隐极内转子结构,3 个霍尔

元件在空间相隔 120° 对称放置。

在此结构基础上,为了简化分析,本研究作如下假设:

(1) 忽略电机铁芯饱和,不计涡流损耗和磁滞损耗;

(2) 不计电枢反应,气隙磁场分布近似认为是平顶宽度为 120° 点角度的梯形波;

(3) 忽略齿槽效应,电枢导体连续均匀分布于电枢表面;

(4) 驱动系统逆变电路的功率管和续流二极管均具有理想的开关特性;

(5) 永磁体不起阻尼作用。

则无刷直流电机定子三相绕组的电压平衡方程为:

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: U_A, U_B, U_C —三相定子绕组电压; i_A, i_B, i_C —三相定子绕组电流; R_A, R_B, R_C —三相定子绕组电阻; $L = L_A = L_B = L_C$ —三相定子绕组自感; $M = L_{AB} = L_{BA} = L_{AC} = L_{CA} = L_{BC} = L_{CB}$ —三相定子绕组互感; e_A, e_B, e_C —三相定子绕组反电动势。

电机转矩方程为:

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

式中: T_e —电磁转矩, ω —转子机械角速度。

电机运动方程:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega}{dt} + B_v \omega \quad (3)$$

式中: T_L —负载转矩, J —转子转动惯量, B_v —粘滞摩擦系数。

2 电压空间矢量(SVPWM)控制

所谓电压空间矢量是按照电压所加绕组的空间位置来定义的^[8]。三相定子相电压加在三相绕组上,可以定义3个电压空间矢量,其方向始终在各相轴线上,而大小随时间按正弦规律作脉动式变化,时间相位互差 120° 。可以证明三相电压空间矢量相加合成空间矢量是一个旋转的空间矢量。三相 PWM 逆变器供电的原理图如图1所示, S_a, S_b, S_c 分别表示 A、B、C 三相6个开关晶体管的开关量, S_a, S_b, S_c 各为1时则表示相应的上桥臂导通,各为0时则表示相应的下桥臂导通。因此,整个三相逆变器共有8种开关状态。这8种开关状态所对应的三相输出电压变换到 $\alpha-\beta$ 坐标系中的电压空间矢量如图2所示,逆变器若按照顺时针每隔 60° 电角度切换一次开关状态,一个周期切换6次,同

一相上、下桥臂相互导通 180° 。霍尔传感器相互 120° 正好提供6个转子位置信号,在每旋转 60° 电角度霍尔信号总有一相翻转,所以只需在位置信号翻转时刻切换电压空间矢量,就能实现其导通模式自控运行^[9]。

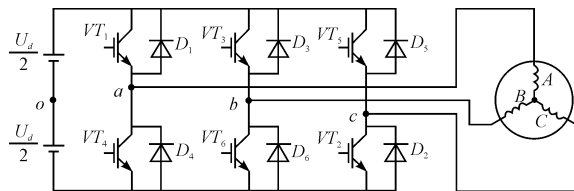


图1 三相 PWM 逆变器原理图

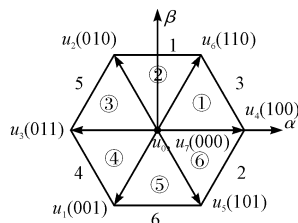


图2 三相输出电压变换的电压空间矢量

3 无刷直流电机的仿真模型

无刷直流电机仿真系统采用速度外环和电流内环双闭环控制,利用经典 PI 控制算法,采用 SVPWM 控制的无刷直流电机原理框图如图3所示。

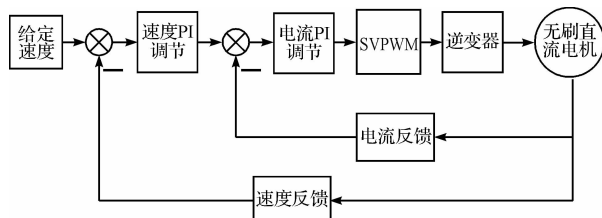


图3 无刷直流电机原理框图

由于本研究采用电压空间矢量控制无刷直流电机,在电流闭环中,通过无刷直流电机得到各相相电流,利用电机系统分析的坐标转换公式^[10],使三相电流转换为系统旋转坐标电流,以得到反馈电流。三相静止坐标为三相定子绕组 A、B、C 相互互差 120° ,当三相绕组同时通以正弦电流时,就产生一个旋转的磁场,为电机自然坐标系;为简化分析,又定义一个两相静止坐标系 $\alpha-\beta$ 坐标系, α 轴与 A 轴重合, β 轴逆时针超前 α 轴 120° ,该轴系与定子固连; $d-q$ 坐标轴系与转子固连为两相旋转坐标系, d 轴与转子磁极轴线重合, q 轴逆时针超前 d 轴 90° 。

由坐标转换公式可得到:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: i_{α}, i_{β} — $\alpha-\beta$ 坐标分量; i_A, i_B, i_C —A、B、C 坐标电流; i_d, i_q —d-q 坐标分量; θ —转子轴线与定子 A 相绕组轴线夹角。

据式(4)和如图 3 所示的无刷直流电机原理框图,可建立系统的仿真模型如图 4 所示。整个仿真系

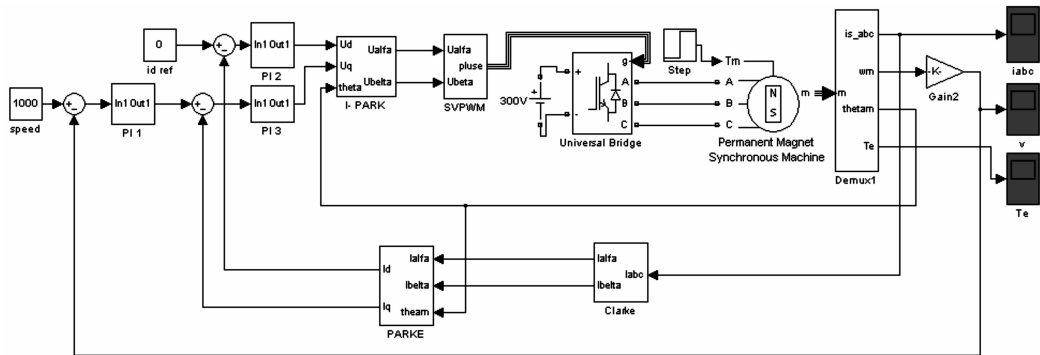


图 4 无刷直流电机控制系统的仿真模型

4 仿真结果

为了验证所设计仿真系统的可靠性,仿真分析选取电机极对数 $P=4$, $R=2.875\ \Omega$, $L_d=L_q=0.005\ 25\ \text{H}$, $J=6.329e-4\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, $B_v=0.182\ 7\ \text{Wb}$,电源 $DC=300\ \text{V}$,给定转数 $n=1\ 000\ \text{r/min}$ 。仿真时间设定为 $0.3\ \text{s}$,空载启动,在 $0.1\ \text{s}$ 时加负载转矩 $T_L=3\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。运行仿真模型后,得到的仿真结果如图 5 所示。

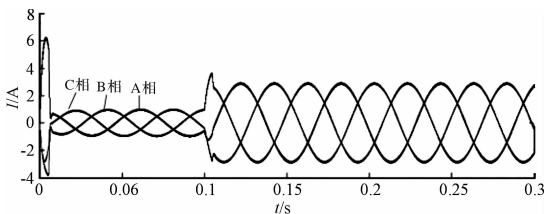


图 5 电机定子三相电流波形

在同样电机参数和仿真参数设置下,本研究采用 PWM 控制和 SVPWM 控制无刷直流电机控制系统,所得到的 A 相相电流如图 6 所示。由图 6 可知,采用 SVPWM 控制的相电流更趋近正弦波^[11]。

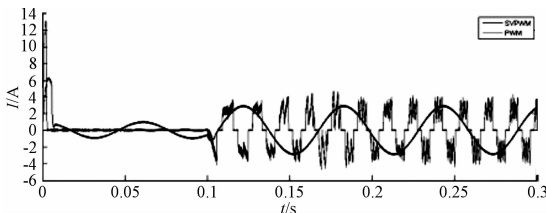


图 6 无刷直流电机 A 相相电流波形

5 结束语

本研究建立了无刷直流电机的数学模型,基于 Matlab/Simulink 建立了 SVPWM 控制下的无刷直流电机控制系统仿真模型,并采用了经典的速度、电流双闭环 PI 控制算法进行仿真,由仿真波形可以看出,系统

统中电机转子位置由 θ 确定。本研究通过 SVPWM 控制原理和控制算法建立系统逆变模块。无刷直流电机本体采用 imPowerSystems 中的电机模块—Permanent Magnet Synchronous Machine,其反电动势选用正弦波形。逆变器选择通用逆变桥、MOSFET 器件。

响应速度快,能很快达到稳态,在启动阶段电流大、转矩峰值大。系统在 $t=0.1\ \text{s}$ 时加负载,转速发生突降,但又很快恢复到平衡状态,三相定子电流波形也为较理想的正弦波。仿真结果表明,电压空间矢量控制下的无刷直流电机控制系统具有较好的静、动态特性。

参考文献 (References):

- [1] 武权立,黄洪全. PWM 控制下的永磁无刷直流电机仿真研究[J]. 电气开关,2010(5):39-41.
- [2] 马瑞卿,邓钧君. 基于 Hall 位置传感器的 BLDCM 正弦波驱动性能研究[J]. 微电机,2011,44(7):59-61.
- [3] 王淑红. 基于 SVPWM 的三相无刷直流电机控制策略[J]. 自动化博览,2008(10):66-68.
- [4] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [5] 周艳青,黄常抒. 基于 Matlab 无刷直流电机控制系统的新型建模仿真[J]. 防爆电机,2008,43(6):27-31.
- [6] 殷云华,郑 宾,郑浩鑫. 一种基于 Matlab 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(2):293-298.
- [7] 丁 鹏,姚平喜. 基于 Matlab 的无刷直流电机 Fuzzy-PID 控制研究及其建模[J]. 机电工程技术,2012,41(2):10-13.
- [8] 邱建琪. 永磁无刷直流电机转矩脉动抑制的 SVPWM 控制[J]. 中小型电机,2003,30(2):27-28.
- [9] HU Bo-yang. 180-Degree Commutation System of Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive based on Speed and Current Control[C]//2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Zhe-jiang: [s. n.], 2009:723-726.
- [10] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [11] 邱建琪. 永磁无刷直流电机转矩脉动抑制的 SVPWM 控制[J]. 中小型电机,2003,30(2):27-28.

[编辑:洪炜娜]