

基于SVPWM的高转速永磁同步电机控制系统的研究

刘婷婷, 谭 戡, 吴 刚, 王书茂

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 在分析永磁同步电机(PMSM)的数学模型和磁场定向矢量控制的基础上, 采用空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)算法, 在Matlab/Simulink环境下搭建了永磁同步电机控制系统的速度和电流双闭环仿真模型。并通过实例电机的仿真, 给出了仿真波形, 其仿真结果达到了预期效果, 证明了该模型的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 空间矢量脉宽调制; Matlab; 矢量控制; 仿真

Simulating of high speed PMSM control system based on SVPWM

LIU Ting-ting, TAN Yu, WU Gang, WANG Shu-mao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on analysis of the mathematical model of the permanent-magnet synchronous motor(PMSM) and the principle of field-orientated vector control, this paper presents the basic principle and realizing method of SVPWM, builds the simulation model of the whole system with Matlab/simulink. Two control loops are used, including inner current-loop and the outer speed-loop. By simulating the specific motor, the waveforms are presented, which achieves the expected effect. And the reasonability and validity has been proved.

Key words: PMSM; SVPWM; Matlab; vector control; modeling and simulation

中图分类号: TM341 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0011-04

0 引言

随着永磁材料和控制技术的发展, 永磁同步电机(PMSM)以其高转矩/惯量比、高功率密度、高效率、牢固性和维修性好等优点, 在数控机床、工业机器人等场合都获得了广泛的应用。因此建立永磁同步电机控制系统的仿真模型, 对验证各种控制算法, 优化整个控制系统具有十分重要的意义。本文在分析PMSM数学模型的基础上, 运用模块化的思想, 借助Matlab/Simulink强大的仿真建模能力, 将整个PMSM控制系统分成几个独立的功能模块: PMSM本体模块、逆变模块、坐标变换模块和SVPWM生成模块等。并对这些模块进行有机整合, 即可搭建出PMSM控制系统的仿真模型。通过对实例电机的仿真, 分析了各种仿真波形, 为PMSM控制系统的分析与设计提供了有效的手段。

1 PMSM的数学模型

永磁同步电机在忽略铁心饱和和电机绕组漏

感, 并假设气隙中磁势呈正弦分布, 忽略磁场的高次谐波的情况下, 运用坐标变换原理, 整理可得到PMSM在同步旋转两相坐标系下的数学模型, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_d = 2L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q + r_s i_d \\ U_q = \omega_r \psi_f + \omega_r L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt} + r_s i_q \\ T_c = \frac{3}{2} p_m [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d, U_q, i_d, i_q 为d轴和q轴的电压、电流(V、A); r_s 为定子绕组的电阻(Ω); L_d, L_q 为d轴和q轴的电感(H); ψ_f 为永磁体的主磁链(Wb); ω_r 为转子角频率(rad/s); p_m 为电机极对数。

2 PMSM转子磁场定向控制原理

矢量变换控制的基本思想是通过坐标变换, 把交流电机的定子电流 I_s 分解成磁场电流分量 I_{sd} 和与之垂直的转矩电流分量 I_{sq} 。由PMSM电机的数学模型 $T_c = \frac{3}{2} p K_c i_q$ 可知, 电磁转矩 T_c 和 i_q 呈线性关

系,在调速过程中,只要维持磁场电流分量 I_{sd} 不变而控制转矩电流分量 I_{sq} ,即可获得良好的动态特性。本文采用 $i_d=0$ 的转子磁链定向控制方式,只要准确检测出转子的空间位置(d轴),通过控制逆变器使三相定子的合成电流位于q轴上。那么,只要控制定子电流的幅值就能控制电磁转矩 T_e 。

3 基于 Matlab 的 PMSM 系统仿真

在 Matlab6.5 的 Simulink 环境下,利用 Sim PowerSystem Toolbox2.3 丰富的模块库,搭建了采用 $i_d=0$ 的双闭环系统仿真模型如图 1 所示,电流环和速度环都由 PI 调节器构成。PMSM 控制系统主要包括: PMSM 本体模块、三相电压逆变器模块、坐标变换模块以及 SVPWM 模块。由于 PMSM 模块和逆变器模块搭建较简单。文中主要介绍坐标变换模块以及 SVPWM 模块。

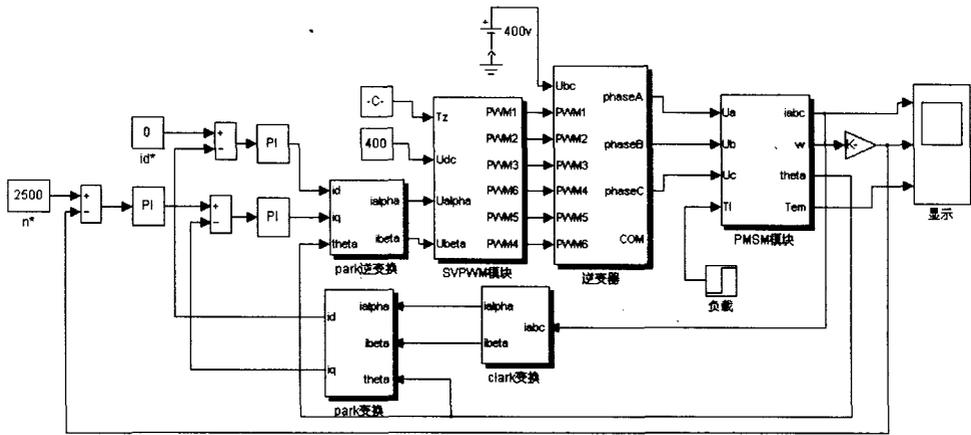


图 1 PMSM 控制系统仿真模型

Fig.1 Simulation block of PMSM control system

3.1 坐标变换模块的 Simulink 实现

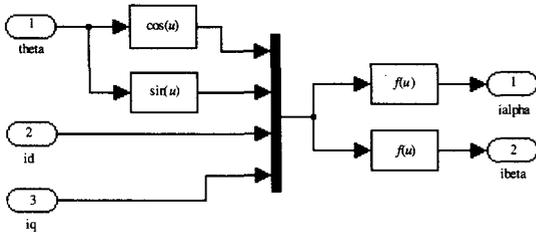


图 2 Park 逆变换仿真模型

Fig.2 Simulation block of Park inverse transformation

坐标变换模块的目的是将同步电机的定子三相电流变换到dq同步旋转坐标系中,与参考输入 i_q^* 相比较,得到的偏差作为电流调节器 (PI) 的输入。矢量控制中用到的坐标变换有 Park 逆变换、Clark 变换、Park 变换。其变换矩阵如下:

$$\text{Park 逆变换: } \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{Clark 变换: } \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Park 变换: } \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

以 Park 逆变换为例,搭建仿真模型如图 2 所示。

3.2 SVPWM 生成模块的 Simulink 实现

空间电压矢量脉宽调制技术 (SVPWM),以三相正弦波电压供电时交流电机的理想磁通轨迹为基准,用逆变器的 8 种开关模式产生的实际磁通去逼近基准磁通圆,使电机获得幅值恒定的圆形磁场(正弦磁通),从而达到较高的控制性能。SVPWM 方法通过 8 个基本空间矢量中两个相邻的有效矢量及零矢量,并根据各自作用时间不同来等效电机所需的空问电压矢量 U_r ,其原理如图 3 所示。

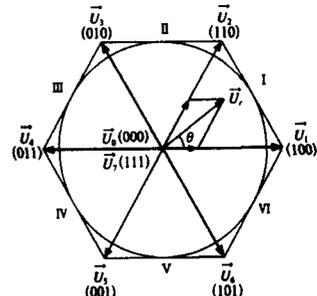


图 3 基本电压空间矢量

Fig.3 Basic voltage space vector

3.2.1 扇区判断

根据图中各扇区 U_r 与 U_α 、 U_β 的关系,判断如下:当 $U_\beta > 0$ 时,令 $A=1$,否则 $A=0$;当 $\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta > 0$ 时,令 $B=1$,否则 $B=0$;当 $-\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta > 0$ 时,令 $C=1$,否则 $C=0$ 。设定三个辅助变量 U_{r1} 、 U_{r2} 、 U_{r3} ,确定当前扇区 $N=A+2B+4C$ 可以由下面的算法获得。

$$\begin{cases} U_{r1} = U_\beta \\ U_{r2} = \sqrt{3}U_\alpha - U_\beta \\ U_{r3} = -\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta \\ N = \text{sign}(U_{r1}) + 2\text{sign}(U_{r2}) + 4\text{sign}(U_{r3}) \end{cases} \quad (5)$$

确定扇区号的仿真模型如图4所示。 N 值与扇区号的对应关系由Look-Up Table模块设定,输入值为[1 2 3 4 5 6],输出值为[2 6 1 4 3 5]。

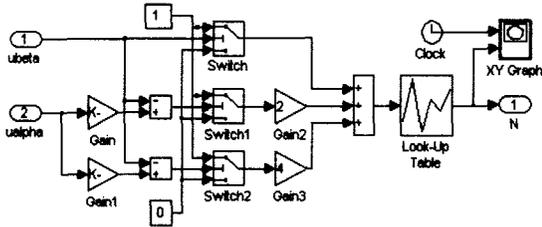


图4 扇区选择仿真模型

Fig.4 Simulation block of sector choice

3.2.2 计算 X、Y、Z 及 T_1 、 T_2

用 T_1 表示当前工作扇区中主矢量工作时间, T_2 是副矢量工作时间,不同的扇区, T_1 、 T_2 的计算时间可归纳如下。

$$\begin{aligned} X &= \frac{2U_\alpha}{\sqrt{2}U_{dc}} t_z \\ Y &= \frac{(\sqrt{3}U_\alpha + U_\beta)}{\sqrt{2}U_{dc}} t_z \\ Z &= \frac{(\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta)}{\sqrt{2}U_{dc}} t_z \end{aligned}$$

表1 T_1 和 T_2 的赋值表

Tab.1 Evaluation of T_1 and T_2

扇区号	I	II	III	IV	V	VI
T_1	-Z	Y	Z	-X	X	-Y
T_2	Y	-X	X	-Z	-Y	Z

当 T_1 、 T_2 两时间之和大于开关周期 t_z 时 $T_1 + T_2 - t_z > 0$,确定新的 T_1 、 T_2 , $T_1 = T_1 t_z / (T_1 + T_2)$;

$T_2 = T_2 t_z / (T_1 + T_2)$ 。对不同的扇区 T_1 、 T_2 按表1取值。其仿真模型如图5所示。

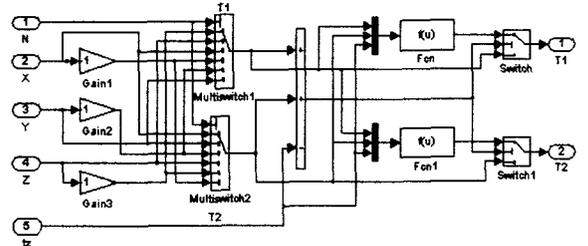


图5 T_1 、 T_2 的仿真模型

Fig.5 Simulation block of T_1 and T_2

3.2.3 确定矢量的切换点 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3}

由

$$\begin{cases} T_a = 0.25(T - T_1 - T_2) \\ T_b = T_a + 0.5T_1 \\ T_c = T_b + 0.5T_2 \end{cases} \quad (6)$$

矢量的切换点 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 的仿真模型如图6所示。

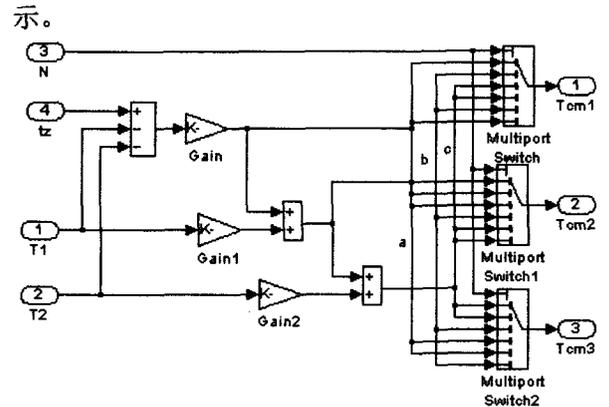


图6 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 的仿真模型

Fig.6 Simulation block of T_{cm1} 、 T_{cm2} and T_{cm3}

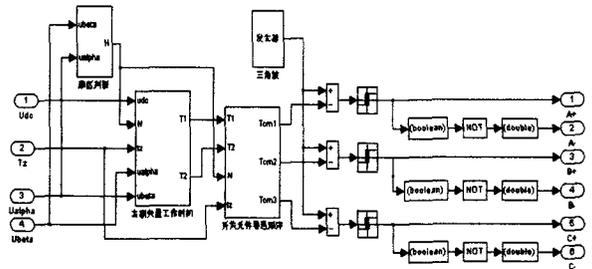


图7 SVPWM 仿真模型

Fig.7 Simulation block of SVPWM

利用 $T_{cm1}, T_{cm2}, T_{cm3}$ 和等腰三角波进行比较, 就可以生成对称空间矢量 PWM 波形, 将 PWM1、PWM3、PWM5 进行与非运算就可以生成 PWM2、PWM4、PWM6。将上述模块连接生成 SVPWM 模型如图 7 所示。

4 仿真结果

对搭建的 PMSM 控制系统模型进行仿真试验。PMSM 电机参数设置如下: $p=4$ 、 $L_d=L_q=0.0085\text{ H}$ 、 $R_s=2.875\ \Omega$ 、 $J=0.0008\text{ kgm}^2$ 、 $\psi_f=0.175\text{ Wb}$, IGBT 的开关频率为 10 kHz 。给定转速 2500 r/min , 电机空载启动, 可以得到转速、转矩和三相电流曲线如图 8 所示。由图 8 有, 转速在 0.04 s 内达到设定值, 转速最大超调量为 3% , 转矩有轻微波动, 三相电流的脉动较小, 系统有较好的抗干扰性。

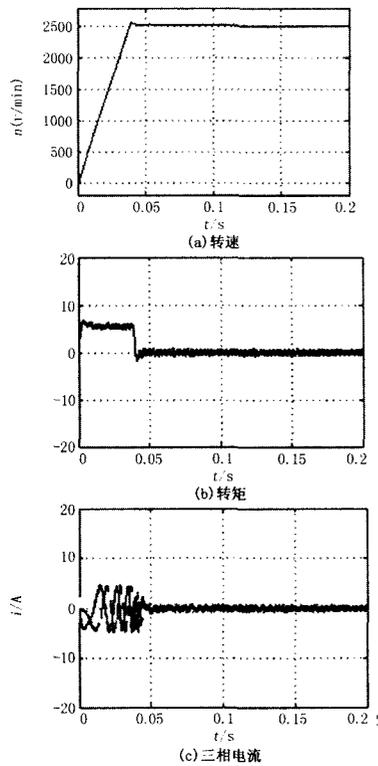


图 8 仿真结果

Fig.8 Simulation waveforms

5 结束语

本文在分析了永磁同步电机转子磁场定向控制的基础上, 利用 Simulink 工具箱建立了 PMSM 控制系统的仿真模型。通过仿真结果可以看出, 系统能平稳运行, 在 2500 r/min 的高转速下仍能具有良好的动、静态特性, 为实际的 PMSM 系统的设计和调试提供了思路。

参考文献

- [1] Irfan Guney, Yukse Toguz, Fusun Serteller. Dynamic Behavior Model of Permanent Magnet Synchronous Motor Fed by PWM Inverter and Fuzzy Logic Controller for Stator Phase Current, Flux and Torque Control of PMSM[A]. In:IEEE Proceeding from Electric Machines and Drives Conference[C]. 2001.479-485.
- [2] Zhan Chang-jiang,Vigna Kumaran Ramachan-daramurthy. Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-Space-Vector PWM Control[J].Trans on Industry Applications, 2001, 37(6): 1885-1863.
- [3] Habetler T G, Profumo F, Pastorelli M , et al . Direct Torque Control of Induction Motor Machines Using Space Vector Modulation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1992, 28: 1045-1053.
- [4] Mizutani R, Takeshita T, Matsui N. Current Model Based Sensorless Drive of Salientpole PMSM at Low Speed and Standstill[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2000, 36 (6): 1598-1603.
- [5] Takahashi I,Noguchi T. A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1986, 22 (5): 821-827.
- [6] 朱焜秋, 孙晓东, 孙玉坤. 无轴承永磁同步电机数控系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(6): 536-540.
ZHU Huang-qi, SUN Xiao-dong, SUN Yu-kun. Design and Realization of Digital Control System for Bearingless Permanent Magnet-type Synchronous Motors[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(6): 536-540.
- [7] 李三东, 薛花, 纪志成. 基于Matlab永磁同步电机控制系统的仿真建模[J]. 江南大学学报, 2004, 3(2):115-120.
LI San-dong, XUE Hua, JI Zhi-cheng. Modeling and Simulation of PMSM Control System Based on Matlab[J]. Journal of Southern Yangtze University (Natural Science Edition), 2004, 3(2):115-120.
- [8] 刘国海, 康梅, 尤德同等. 两电机同步系统的神经网络逆控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 67-70.
LIU Guo-hai, KANG Mei, YOU De-tong. Neural Network Inverse Control of Two-motor Synchronous System[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 67-70.
- [9] 杨平, 马瑞卿, 张云安. 基于 Matlab 的永磁同步电机控制系统建模仿真新方法[J]. 微电机, 2005, 38(5): 38-41.

(下转第 19 页 continued on page 19)

在母线节点电压相角差和幅值差变化两种情况下, 分别对合环后电流幅值的变化情况进行了分析。母线节点电压相角差的变化对电流有幅值计算结果影响相对较大。在辐射型配电网实际运行中, 进行合环操作时, 不可忽视电压相角差对合环电流大小的影响。本文对合环稳态电流进行了计算和研究, 合环电流还包括合环冲击电流分量, 需要另行研究。

参考文献

- [1] 夏翔,熊军,胡列翔. 地区电网的合环潮流分析与控制[J]. 电网技术, 2004, 28(22):58-60.
XIA Xiang, XIONG Jun, HU Lie-xiang. Analysis and Control of Loop Power Flow in Regional Power Network[J]. Power System Technology,2004,28(22):58-60.
- [2] 叶清华, 唐国庆, 王磊. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22):66-69.
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, WANG Lei. Development and Application of the Analysis System for Closed Loop Operation of Distribution Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(22):66-69.
- [3] 强兴华. 地区电网合环操作的潮流近似计算[J]. 江苏电机工程, 2002, 21(5):39-40.
QIANG Xing-hua. Approximate Flow Calculation During Closed Loop Operation in Local Electric Network[J]. Jiangsu Electric Engineering,2002,21(5):39-40.
- [4] 张尧, 王琴, 宋文南,等. 树状网的潮流算法[J].中国电机工程学报, 1998, 18(3):217-220.
ZHANG Rao, WANG Qin, SONG Wen-nan ,et al.A Load Flow Algorithm for Radial Distribution Power Networks[J]. Proceedings of the CSEE,1998,18(3):217-

220.

- [5] 孙宏斌,张伯明,相年德.配电网潮流前推回推法的收敛性研究[J].中国电机工程学报,1999,19(7):26-29.
SUN Hong-bin , ZHANG Bo-ming , XIANG Nian-de.Study on Convergence of Back/forward Sweep Distribution Power Flow[J].Proceedings of the CSEE, 1999,19(7):26-29.
- [6] 索南加乐, 李怀强, 单亚洲, 等. 辐射配网潮流技术在环网中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(12):1272-1275.
SUONAN Jia-le, LI Huai-qiang, SHAN Ya-zhou, et al.Reliable Power Flow Technique for Meshed Distribution Networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(12): 1272-1275.
- [7] 张明,毕鹏翔,刘健,等.辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛性研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6):41-44.
ZHANG Ming, BI Peng-xiang, LIU Jian, et al.Research on Convergence of Branch Current Method Based Power Flow Calculation for Radial Distribution Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):41-44.
- [8] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社, 1999.
- [9] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2008-05-15; 修回日期: 2008-08-26

作者简介:

汲亚飞(1983-), 男, 助理工程师, 研究方向为配电网自动化, 电力系统接地防雷技术和电磁暂态技术; E-mail: jiyafei@gmail.com

赵江河(1957-), 男, 高级工程师, 研究方向为配电网自动化。

(上接第 14 页 continued from page 14)

YANG Ping, MA Rui-qing, ZHANG Yun-an. A Novel Method for Modeling and Simulation of PMSM System Based on Matlab[J]. Micromotors, 2005, 38(5): 38-41.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2009-02-24

作者简介:

刘婷婷(1981-), 女, 博士研究生, 从事车辆智能检测与控制技术研究; E-mail: liutingting817@163.com

谭 彧(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 从事车辆电子控制及智能化技术研究;

吴 刚(1977-), 男, 讲师, 从事机电一体化技术研究。