

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.020

永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真

张钊, 陈涛, 周勇

(中国兵器工业第五八研究所军品部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对将自适应、模糊、神经网络等控制理论引入永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)控制系统中设计太过复杂, 难以达到较理想控制效果的问题, 在 Matlab/Simulink 环境下, 基于矢量控制策略对 PMSM 控制系统进行建模仿真。分析 PMSM 数学模型和空间电压矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)控制原理, 建立基于 SVPWM 的 PMSM 控制系统仿真模型。仿真结果表明: 该系统运行平稳, 具有较好的静态和动态性能, 符合理论分析, 能为实际系统的设计与分析提供理论依据, 对工程实践中系统的调试具有一定的指导意义。

关键词: 永磁同步电机; 仿真; SVPWM

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Simulation and Modeling of Servo Control System of Permanent Magnet Synchronous Machine

Zhang Zhao, Chen Tao, Zhou Yong

(Department of Military Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the complication of introducing the control theory such as adaptive, fuzzy, neural networks, etc to the permanent magnet synchronous machine (PMSM) control system, and the required control expectation can hardly be fulfilled, the vector control system of PMSM is simulated in Matlab/Simulink. Based on the analysis of PMSM model and the control theory of space vector pulse width modulation (SVPWM), the simulation model of vector control system of PMSM is designed. The simulation result shows that the system runs stably, and gains good performance of static and dynamic response, complies with the theory analysis, provides the theoretical foundation of the design and analysis of real system, it can also be taken as reference for the system debugging.

Keywords: PMSM; simulation; SVPWM

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)由于具有运行效率高、运行性能好、转动惯量小、转矩波动小等优点, 目前已广泛应用于高性能伺服系统。自适应、模糊、神经网络等控制理论已被引入 PMSM 控制系统中, 但这些控制器设计太过复杂, 工程实践中仍采用常规频域校正方法, PI 控制器参数设计往往采用试凑法, 较为繁琐, 难以达到较理想的控制效果^[1]。笔者在 Matlab/Simulink 环境下, 基于矢量控制策略对 PMSM 控制系统进行了建模仿真, 为实际系统的分析与设计提供了理论依据。

1 PMSM 数学模型

在假定磁路不饱和, 忽略电机绕组漏感, 且假定气隙中磁势呈正弦分布, 并忽略磁场的高次谐波的情况下, 经坐标变换, 可得到 PMSM 在 $d-q$ 旋转坐标系下的数学方程^[1-2], 如下式:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p_n \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p_n \omega L_d i_d + p_n \omega \psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - B\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: (u_d, u_q) 为 d 轴与 q 轴的电压(V); (i_d, i_q) 为 d 、 q 轴的电流(A); (L_d, L_q) 为 d 、 q 轴电感(H), 且 $L_d = L_q$; R 为定子绕组电阻(Ω); ψ_f 为转子磁链(Wb); p_n 为电机极对数; ω 为电机转速; T_e 为电机输出转矩; T_l 为负载转矩; J 为转子转动惯量; B 为粘滞摩擦系数。

2 PMSM 控制系统

笔者采用 PMSM 的转子磁链定向控制, 即 $i_d = 0$ 的控制技术, 此时转矩 T_e 与电流 i_q 成线性关系, 只

收稿日期: 2013-11-08; 修回日期: 2014-01-17

作者简介: 张钊(1987—), 男, 陕西人, 从事高精度跟踪伺服控制技术研究。

需对 i_q 进行控制即可控制转矩输出, PMSM 本体模型可简化为直流电机模型。控制系统中速度环与电流环控制器均为常规 PI 控制器^[1-2], 根据工程设计法实现。

PMSM 调速控制系统框图如图 1 所示。

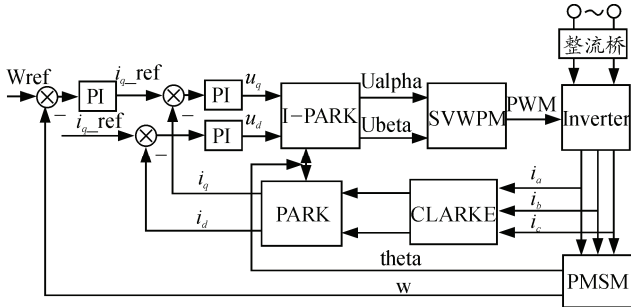


图 1 PMSM 调速控制系统框图

实际控制中, 电机驱动电流及所检测电流并非 (i_d, i_q) , 而为三相电流 (i_a, i_b, i_c) , 因此需根据电机转子的位置实现坐标变换 (Park, Clarke 坐标变换)。 (i_d, i_q) 和 d, q 轴参考电流比较后, 经电流调节器生成 d, q 轴控制电压 (u_d, u_q) , 再经 SVPWM 模块生成 PWM 脉冲, 逆变模块根据该脉冲输出三相电压控制 PMSM 运行。

2.1 坐标变换

矢量控制中用到的坐标变换有 Park 与 Clarke 变换。Park 变换将两相静止坐标系 (α, β) 向两相旋转坐标系 (d, q) 转换, 其数学表述为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Park 反变换 I-Park 数学表述为

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (3)$$

Clarke 变换将三相平面坐标系 (a, b, c) 向两相静止坐标系 (α, β) 转换, 其数学表述为

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 SVPWM 算法^[1-5]

SVPWM 以三相正弦波电压时交流电机的理想磁通轨迹为基准, 通过逆变器不同开关模式产生的磁通逼近基准磁通圆, 使电机获得幅值恒定正弦磁通, 达到较高的控制性能。SVPWM 通过空间矢量中相邻的有效矢量及零矢量作用时间, 来等效电

机所需的电压空间矢量 U_{ref} 。电压控制矢量原理如图 2。

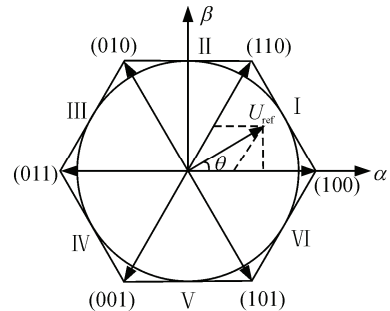


图 2 电压空间矢量

2.2.1 扇区选择

根据图中 U_{ref} 与 (U_α, U_β) 的关系, 通过下述方法判断矢量所在扇区。

设临时变量 (A, B, C) , 当前扇区 $N=A+2B+4C$, 有如下关系:

- 1) 若 $U_\beta > 0$, $A=1$; 否则 $A=0$;
- 2) 若 $\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta > 0$, $B=1$; 否则 $B=0$;
- 3) 若 $-\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta > 0$, $C=1$; 否则 $C=0$ 。

图 2 中所示扇区号与 N 值对应关系如表 1。

表 1 扇区号与 N 值对应关系

扇区号	I	II	III	IV	V	VI
N	3	1	5	4	6	2

2.2.2 电压矢量作用时间

将电机控制电压矢量 U_{ref} 分解至相邻有效电压矢量上, 可计算相应电压矢量作用时间, 且其具有式 (5) 3 种表述

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{2}U_\beta}{U_{dc}} T_s \\ Y = \frac{\sqrt{3}U_\alpha + U_\beta}{\sqrt{2}U_{dc}} T_s \\ Z = \frac{-\sqrt{3}U_\alpha + U_\beta}{\sqrt{2}U_{dc}} T_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_s 为 PWM 调制周期; U_{dc} 为逆变器直流电源电压。 N 值与相应矢量作用时间 (T_1, T_2) 关系如表 2。

表 2 N 值与矢量作用时间关系

N	T_1	T_2	N	T_1	T_2
1	Z	Y	4	-X	Z
2	Y	-X	5	X	-Y
3	-Z	X	6	-Y	-Z

矢量作用时间 T_1, T_2 之和应小于调制周期 T_s 。作饱和判断: 若 $T_1+T_2 > T_s$, 则

$$\begin{cases} T_1 = T_1 \times T_s / (T_1 + T_2) \\ T_2 = T_2 \times T_s / (T_1 + T_2) \end{cases} \quad (6)$$

2.2.3 开关作用时间

$$\text{令 } T_a = \frac{T_s - T_1 - T_2}{4}, \quad T_b = T_a + \frac{T_1}{2}, \quad T_c = T_b + \frac{T_2}{2}, \quad N$$

值与开关作用时间 ($T_{\text{cmp1}}, T_{\text{cmp2}}, T_{\text{cmp3}}$) 关系如表 3。

2.2.4 PWM 输出

将 ($T_{\text{cmp1}}, T_{\text{cmp2}}, T_{\text{cmp3}}$) 与周期为 T_s , 幅值为 $T_s/2$

的等腰三角波进行比较, 即可生成相应的 PWM 波, 用以驱动逆变器模块。

表 3 N 值与开关作用时间关系

N	T_{cmp1}	T_{cmp2}	T_{cmp3}	N	T_{cmp1}	T_{cmp2}	T_{cmp3}
1	T_b	T_a	T_c	4	T_c	T_b	T_a
2	T_a	T_c	T_b	5	T_c	T_a	T_b
3	T_a	T_b	T_c	6	T_b	T_c	T_a

通过对上述各模块进行封装, SVPWM 整体模型如图 3。

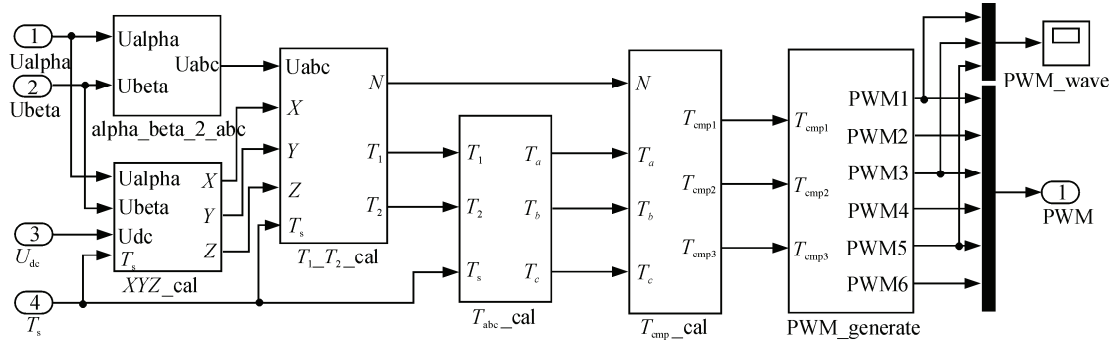


图 3 SVPWM 模型

2.3 逆变器与电机

Matlab/Simulink/SimPowerSystems 中, 提供了 PMSM 本体模型、逆变器模型以及电机测量模块, 电机测量模块可方便地检测出电机的各电流、电压

物理量, 可用于系统反馈^[6]。

2.4 闭环控制系统模型

PMSM 闭环控制系统整体模型如图 4。电流环、速度环均采用常规 PI 控制器。

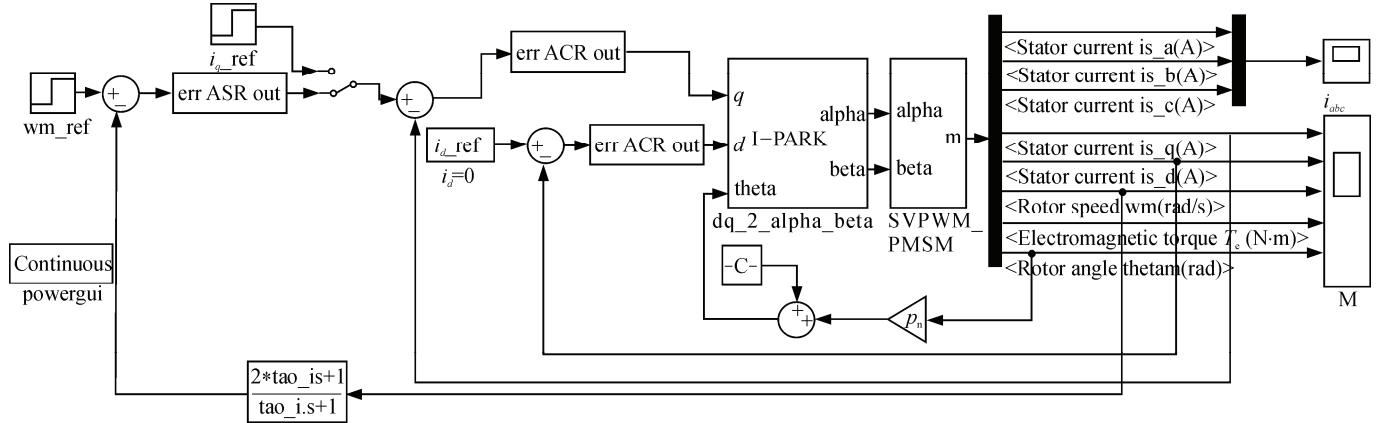


图 4 PMSM 闭环调速控制系统

图中, 测量模块输出转角为机械角度, 而在坐标变换采用的是电角度, 因此需将所测量的机械角度乘以电机的极对数得到电角度^[1-2]; 电机为感性负载, 电流滞后电压 90°, 应对测量角度减去 90°。

3 仿真分析

通过对电机模型及矢量控制原理的分析, 建立了基于 SVPWM 的 PMSM 控制系统仿真模型。仿真参数如下。

1) 电机参数: 额定功率 $P=0.8 \text{ kW}$, 额定转速

$n=3000 \text{ r/min}$, 额定转矩 $M=2.6 \text{ N}\cdot\text{m}$, 额定电流 $I=2.0 \text{ A}$, 极对数 $p_n=4$, 转动惯量 $J=2.9 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 转矩系数 $K_t=1.375 \text{ N}\cdot\text{m/A}$, 反电势系数 $K_e=90.0 \text{ V/1000 r/min}$, 定子绕组电阻 $R=4.67 \Omega$, 电感 $L_d=L_q=35.0 \text{ mH}$ 。

2) 控制器参数。

① 电流环 d 轴 PI 参数: $K_p=116.7853$, $K_i=15571$; 电流环 q 轴 PI 参数与 d 轴参数相同;

② 速度环 PI 参数: $K_p=0.4220$, $K_i=281.3332$; 速度环微分负反馈系数 $\tau=0.00042$ 。

设定仿真时间 $T=0.02$ s, 负载 $T_1=1.375$ N·m, 给定速度 $\omega_{ref}=10$ rad/s, 仿真结果如图 5。

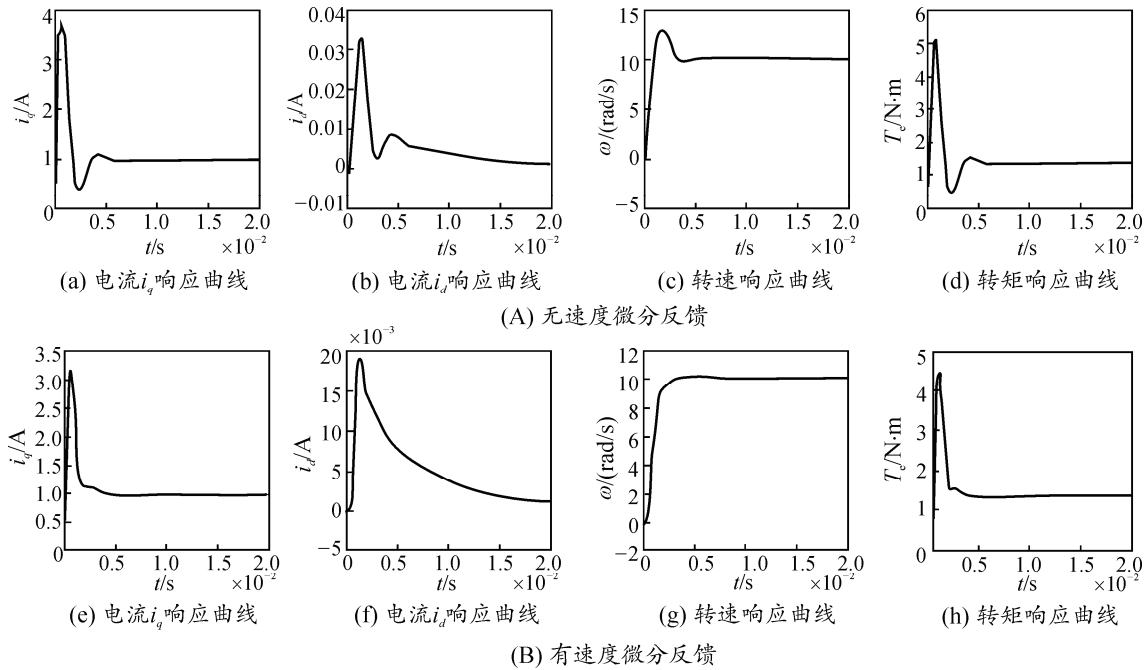


图 5 电机响应曲线

由图 5 仿真结果可看出, 系统在带载情况下启动, 响应速度较快, 稳态时转速稳定。在无速度微分负反馈作用下, 电机转速具有较大的振荡与超调; 通过在速度环反馈回路上施加小时间常数的微分作用, 可有效降低系统超调量, 电机运行更加平稳^[2]。

在速度回路微分反馈作用情况下, 0.01 s 时负载转矩由 1.375 N·m 降至 0.5 N·m, 电机速度与转矩曲线如图 6。

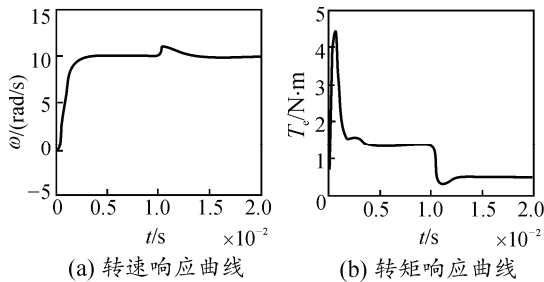


图 6 负载变化情况下电机响应

4 结束语

笔者在分析 PMSM 数学模型与 SVPWM 控制原

理的基础上, 构建了 PMSM 的矢量控制系统模型。仿真结果表明: 该系统可平稳运行, 具有较好的静态与动态性能, 仿真结果符合理论分析。该模型为 PMSM 控制系统的快速与精确设计打下了理论基础, 对工程实践中控制系统的调试具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 林伟杰. 永磁同步电机伺服系统控制策略的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
- [2] 陈荣. 永磁同步电机伺服系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [3] 安群涛, 李波. 采用 SVPWM 的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. 微电机, 2006, 39(9): 38-41.
- [4] 徐旭明, 王友仁, 王岭, 等. 基于简化的 SVPWM 的 PMSM 磁场定向控制系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 55-59.
- [5] 龚云飞, 富历新. 基于 Matlab 的永磁同步电机矢量控制系统仿真研究[J]. 微电机 2007, 40(2): 33-36.
- [6] 林海, 李宏. 永磁同步电机矢量控制系统仿真与建模研究[J]. 微电机 2006, 39(8): 43-45.