

# 永磁伺服电机模糊 PID 自整定 SVPWM 控制研究<sup>\*</sup>

马立新 范洪成 黄阳龙

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘要:** 针对永磁同步电机自身的非线性、强耦合性以及时变性特点,以及传统 PID 控制策略不能跟随系统参数的变化而自动做出整定等问题。通过对模糊理论分析,本文提出了一种简单实用的永磁同步电机控制策略,即模糊 PID 自整定 SVPWM 控制方式。采取 SVPWM 的方式产生三相电流驱动电机,通过模糊逻辑语句建立了模糊控制规则,并实现与 PID 控制参数相结合,实现实时改变电机控制参数功能,并利用 MATLAB 工具建立了模糊 PID 自整定 SVPWM 闭环矢量控制系统仿真模型。仿真结果表明:系统转速实现无超调,响应速度和扰动恢复时间与传统 PID 控制方式相比缩短了一半。该方法提高了永磁交流伺服系统的控制精度,具有良好的动静态性能,在工程应用上提供了一种简单、易实现的控制方法。

**关键词:** 永磁同步电机;模糊 PID 自整定控制;无超调

**中图分类号:** TM921.47 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Fuzzy PID self-tuning SVPWM control research of PMSM

Ma Lixin Fan Hongcheng Huang Yanglong

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Aiming at the nonlinear, strong coupling and time-varying characteristics of permanent magnet synchronous motor and the traditional PID control strategy can't follow the change of system parameters and automatically make the corresponding setting. Through the analysis of fuzzy control, this paper puts forward a simple and practical control strategy of permanent magnet synchronous motor, namely fuzzy PID self-tuning SVPWM control. Adopt the method of SVPWM produce three phase current drive motor, the fuzzy control rule was established based on fuzzy logic statements, and combined with PID control parameters, real-time change motor control parameters of the function, and using Matlab tools to establish the fuzzy self-tuning PID SVPWM closed-loop vector control system simulation model. The simulation results show that the system speed to realize no overshoot, response speed and disturbance recovery time shortened by half compared with the traditional PID control method. The method to improve the control precision of the permanent magnet ac servo system, has a good dynamic and static performance, on the engineering application provides a simple and easy to realize the control method.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; fuzzy PID self-tuning control; no overshoot

### 1 引言

近年来,随着电力电子技术、永磁材料以及控制技术的飞速发展,永磁交流伺服系统<sup>[1]</sup>在国内外市场受到越来越高的重视,因永磁同步电机(PMSM)是一种高效节能环保型电机,大量的工业生产都以 PMSM 作为驱动电机,如数控机床、车床、机器人等。因此,对 PMSM 的响应速度、控制精度、稳态性能和抗干扰能力要求越来越严格。

传统的 PID 控制<sup>[2-3]</sup>,控制参数不能跟随系统参数的变化而自动做出相应的整定,因此,必然导致系统的控制精度、稳态性能和抗干扰能力无法达到最佳状态。

针对这一情况,本文提出了一种模糊 PID 自整定 SVPWM 控制策略,模糊控制策略<sup>[4-5]</sup>是利用模糊集合论,把人们在日常生活中积累的经验和控制规则融入到控制策略中,根据系统参数的变化实时地改变 PID 中的控制参数,能够获得较好的控制效果。

收稿日期:2015-11

<sup>\*</sup> 基金项目:上海市张江国家自主创新重点项目(201310-PI-B2-008)资助

## 2 永磁同步电机数学模型

为了实现永磁同步电机数学模型解耦,以两级贴面式永磁同步电机空间矢量为例,常用的坐标系及其关系如图1所示:

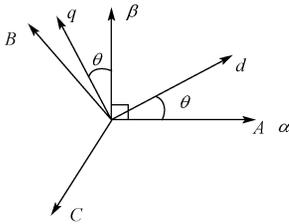


图1 永磁同步电机空间电压矢量原理

其电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & \omega \\ \omega & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩方程为:

$$T_e = 3p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)/2 = 3q(\Psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d)/2 \quad (3)$$

式中: $D=d/dt$ 为微分算子; $r_s$ 为定子电阻; $L_d$ 、 $L_q$ 分别为d轴和q轴电感; $U_d$ 、 $U_q$ 分别为d轴和q轴电压; $\omega$ 为转子角速度; $i_d$ 、 $i_q$ 分别为d轴和q轴电流; $\Psi_m$ 为永磁体磁通; $\Psi_d$ 、 $\Psi_q$ 分别为d轴和q轴磁通; $\Psi_f$ 为转子磁链。

## 3 模糊PID自整定控制器设计

### 3.1 模糊控制模块

因模糊控制模块以误差 $e$ 和误差变化率 $e_c$ 作为输入变量,以 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$ 作为输出量,模糊集及论语如下:

模糊集均为: $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

论语均为: $\{-6, 6\}$

其中, NB为负大, NM为负中, NS负小, ZO为零, PS为正小, PM为正中, PB为正大。

以 $\Delta k_p$ 为例,其模糊控制规则如表1所示:

表1  $\Delta k_p$  模糊控制规则表

$e_c$ $e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

## 3.2 模糊PID自整定控制

传统的PID控制策略是根据已经建立好的系统数学模型来确定控制参数,其控制参数不能跟随系统参数的变化而自动做出相应的整定<sup>[6-7]</sup>,在传统的PID控制策略上进行一定的改进,通过对模糊控制进行分析,根据模糊逻辑和模糊推理,根据系统参数的变化实时改变其控制参数,充分发挥模糊控制的鲁棒性<sup>[8-10]</sup>,从而获得很好的控制效果。

模糊PID自整定控制器是以误差 $e$ 和误差变化率 $e_c$ 作为输入变量,以 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$ 作为输出量,在系统运行过程中,对PID控制器中的比例、积分、微分3个参数进行实时调整,从而获得良好的动静态性能,其结构如图2所示。

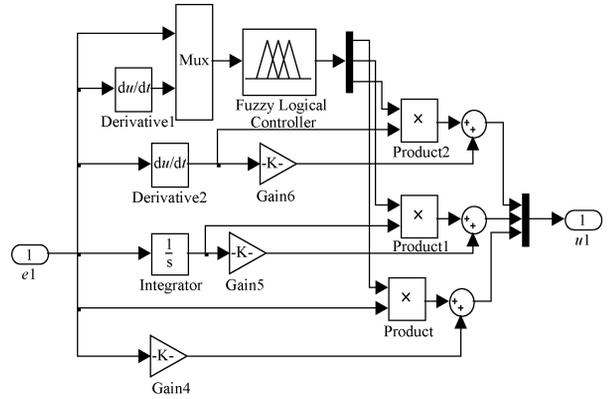


图2 模糊PID自适应控制结构

## 4 空间矢量调制原理

空间电压矢量法(SVPWM)<sup>[11-12]</sup>最终目标是产生幅值恒定的圆形磁场,以电机通入的三相对称正弦电压产生圆形磁链为基准,通过逆变器产生有效矢量来近似达到基准圆,产生三相正弦电流来驱动电机。SVPWM方法通过8个基本空间电压矢量中两个相邻的有效矢量及零矢量,并根据作用时间来等效电机所需的空间电压矢量。其原理如图3所示。

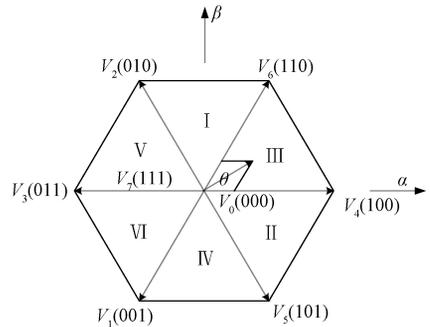


图3 基本电压矢量

## 5 仿真实验

### 5.1 仿真电机参数

本次仿真中,永磁同步电机参数为:电枢电阻 $R_s =$



- 客车控制策略研究[J]. 客车技术与研究, 2015(1): 7-9.
- [6] 张朝阳,冯晓云,许峻峰. 永磁同步电机弱磁运行控制策略研究[J]. 电气传动, 2014,44(5):40-45.
- [7] 彭咏龙,黄潇潇,李亚斌. 基于SVPWM的高功率因数三相混合开关型整流电路研究[J]. 电力科学与工程, 2013,29(6):23-29.
- [8] 朱秦岭,彭常户,李建峰,等. 基于模糊控制的永磁同步电机控制方法研究[J]. 机电一体化, 2011,17(10): 45-48.
- [9] 王宝忠,王维,王波. 基于模糊PI自整定的SVPWM伺服系统的仿真研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(7):18-22.
- [10] 张小莉,张波,刘品宽. 无刷直流电机自适应模糊控制系统建模与仿真[J]. 机电一体化, 2011,17(4): 27-32.
- [11] 陈玲,纪萍,朱虹. 基于脉冲阻塞原理的多功能交变频系统的PWM研究[J]. 华北电力大学学报, 2014,41(6):39-45.
- [12] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013,32(12):25-30.
- [13] 王善华,杨龙,王保升. 基于SVPWM的永磁直线同步电机直接推力控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6):93-96.
- [14] 丁硕,崔总泽,巫庆辉,等. 基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(6):81-85.
- [15] 张露锋,司纪凯,张新良,等. 表面-内置式永磁转子同步电机的永磁体优化[J]. 微特电机, 2015,43(7): 10-13.

### 作者简介

马立新,1960年出生,教授,主要从事电力系统稳定性与优化运行、电力电子与电力传动、电气系统故障诊断与模式识别的研究。

E-mail:malx-ai@sina.com

## 是德科技推出新款 PXI Express SMU 高速源/测量单元

是德科技 PXIe 产品线的新成员将加速射频功率放大器的生产测试

2016年6月13日,北京——是德科技公司(NYSE: KEYS)近日推出其第一款 PXI Express 源/测量单元 M9111A,该产品可用于对下一代功率放大器和支持移动电话和无线连通性制式的前端模块进行设计验证和生产测试。

高速 M9111A 可改变电压,稳定并准确测量微安级电流,所有操作均在 1 ms 内完成。这款 PXIe SMU 的速度比是德科技此前的独立 SMU 快 20 倍,尺寸却更小。

功率放大器会带来快速脉冲电流,但 M9111A 具有业界无与伦比的瞬态性能,足以应对这一挑战。M9111A SMU 能够显著抑制由于脉冲载荷所造成的电压陡降,并能迅速恢复到程序设定的电压值。

在极端、动态负载条件下,传统 SMU 会变得不稳定。但 M9111A 拥有业界领先的输出稳定性,完全无需担忧电源会对测量造成影响。无扰操作保证了被测器件在输出

和测量范围变化时的安全性,即使出现高电容也无需担忧。输出电压和电流保持稳定状态,因此被测器件不会损坏。

单插槽、两象限的 PXIe SMU 模块提供最大 18 W 功率,支持 13 V,  $\pm 1$  A 或 6 V,  $\pm 3$  A 模式。从功能上看, M9111A 不但可以作为电压源和电流源,还可作为电流计和电压计。M9111A 的测量功能包括:

- 1) 具有快速稳定时间,可测量电压的高速变化
- 2) 被测器件脉冲电流陡变时,实现快速恢复,减少电压下降
- 3) 快速、准确地执行泄漏电流等低电流测量
- 4) M9111A 是 Keysight 公司射频功率放大器和前端模块参考解决方案的一部分,该参考解决方案可以快速、全面地表征功率放大器器件等下一代功率放大器模块,可完成 S 参数、解调、功率、邻道功率和谐波失真等测量。