

# 基于模糊PID的永磁同步电机调速系统

廖雄志, 文定都, 湛 政, 韩召成, 任于涵

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对传统PI控制在永磁同步电机调速系统中存在适应性、鲁棒性差的问题, 提出模糊自适应PID控制。将传统的PID与模糊控制结合, 构造了模糊PID与空间矢量脉宽调制(SVPWM)的永磁同步电机的矢量控制系统。仿真结果表明, 该系统不仅具有良好的静态、动态性能, 而且还具有良好的适应性与鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步电机; 调速; 模糊PID; SVPWM

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)02-0026-05

## A Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID

LIAO Xiongzhi, WEN Dingdou, ZHAN Zheng, HAN Zhaocheng, REN Yuhan

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the poor adaptability and robustness exhibited by traditional PI control in the permanent magnet synchronous motor speed control system, a proposal of the fuzzy adaptive PID control has thus been made. The vector control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) with fuzzy PID and space vector pulse width modulation (SVPWM) can be constructed by combining the traditional PID with the fuzzy control. The simulation results show that the new system is characterized with not only an improved static and dynamic performance, as well as with a good adaptability and robustness.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); speed control; fuzzy PID; space vector pulse width modulation (SVPWM)

### 1 研究背景

永磁同步伺服电机是工业机器人以及数控机床中的重要驱动部件, 其主要优点是体积小、适应性强, 效率高<sup>[1-2]</sup>。电子元件的发展以及现代控制技术的突飞猛进, 使得永磁同步伺服电机在工业控制中占据了较为重要的地位<sup>[3]</sup>。日益更新的电子元件以及先进的控制技术, 要求永磁同步伺服电机的性能处于一直提高的状态, 不断地达到新的台阶, 而控制方法是提高

永磁同步伺服电机性能的主导因素<sup>[4-5]</sup>。因此, 研究与设计永磁同步伺服电机的控制器具有十分重要的现实意义。

建立被控对象的数学模型是设计交流伺服系统速度调节器的重要依据, 而永磁同步电机多变量、非线性、强耦合等比较突出的特点加大了建立永磁同步电机数学模型的难度, 甚至不可能建立精确的数学模型。此外, 永磁同步电机的性能会受到现场

收稿日期: 2017-09-23

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(16C0476, 17C0475)

作者简介: 廖雄志(1990-), 男, 湖北咸宁人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: 389190715@qq.com

运行环境的影响<sup>[6-7]</sup>。因此,在对控制精度要求较高的场合,常规的PI控制器无法实现现场环境所需要的性能要求。模糊PID控制器集成了模糊控制理论、模糊控制规则以及常规PID控制的优点,它是一种非线性的控制方法,对非线性系统具有良好的适应性,其最大的特点是不依赖被控对象精确的数学模型,能够在线整定PID的参数。

由于常规的PI控制器在实际应用中存在着适应性、鲁棒性差等问题<sup>[8-9]</sup>,本文提出一种能够在线整定PID参数的模糊控制策略,在这种控制策略的基础上,设计一款能够在线修改参数的模糊PID控制器,而且该模糊PID控制器能应用于永磁同步电机调速系统的速度控制环中。仿真的结果表明,相对于常规PI控制器,模糊PID控制器真正地实现了调节器的“稳”“准”“快”,即它达到了稳定运行状态下的时间更短,超调量更小,静态与动态特性更好,具有很好的适应性与鲁棒性。

## 2 永磁同步电机数学模型的建立

### 2.1 数学模型建立的前提条件

由于永磁同步电机在启动的过程中会出现极大的电磁感应现象,所以非线性、多变量、强耦合是永磁同步电机比较突出的特点。为了更方便地进行研究,在建立永磁同步电机的数学模型时,需要做如下假设<sup>[10]</sup>:

- 1) 温度变化对绕组的影响忽略不计;
- 2) 不考虑空间谐波的影响,三相绕组在空间的相位仍然是120电角度;
- 3) 不考虑磁路的饱和现象,各绕组的自感与互感为常数。

### 2.2 两相旋转坐标系下的数学模型

两相旋转坐标系下定子磁链方程表示如下:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f, \quad (1)$$

$$\psi_q = L_q i_q. \quad (2)$$

式(1)~(2)中:  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$  轴与  $q$  轴电感;

$\psi_d$ 、 $\psi_q$  分别为  $d$  轴与  $q$  轴磁链;

$\psi_f$  为转子磁链;

$i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$  轴与  $q$  轴电流。

两相旋转坐标系下定子电压方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $d$  轴与  $q$  轴的电压;

$R_s$  为定子电阻;

$\omega_r$  为转子电角速度。

两相旋转坐标系下电磁转矩方程可表示为

$$T_e = 1.5 [n_p \psi_f i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (4)$$

式中  $T_e$ 、 $n_p$  分别为电磁转矩与极对数。

由于  $\psi_f$  的幅值是不变的,所以永磁同步电机的电磁转矩只与定子  $d$  轴电流  $i_d$ 、 $q$  轴电流  $i_q$  有关。如果是隐极永磁同步电机的情况,则  $L_d = L_q$ ,此时电磁转矩只与  $i_q$  有关,所以调速性能可以与直流电机相媲美。

运动方程可表示为

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{B}{n_p} \omega_r, \quad (5)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩;

$J$  为转动惯量;

$B$  为黏滞摩擦系数。

## 3 控制器的设计

### 3.1 模糊PID控制的基本原理

从整体上看,模糊PID控制器的核心部分主要是知识的储备、推理和在线修改。首先,采用模糊数学的方法及其基本理论,把控制规则的操作以及所需要的条件用模糊集合表示出来,并且还要把这些用模糊集合表示出来的模糊控制规则、有关的信息作为基本知识储存在计算机的知识库里;然后在实际运行中,计算机以控制系统的响应为依据,进行模糊推理;最后根据推理的结果,在线修改PID的参数。所以,课题组所设计的模糊PID控制器,充分依靠模糊控制规则以及专家的经验,把偏差  $e$ 、偏差的变化率  $ec$  作为2个输入,把PID的3个参数作为输出,根据2个输入的情况在线修改3个输出的参数。这种在线修改的策略大大提高了被控对象的静态特性,从而使控制器具有较好的适应性。模糊PID自适应控制系统的结构框图如图1所示。

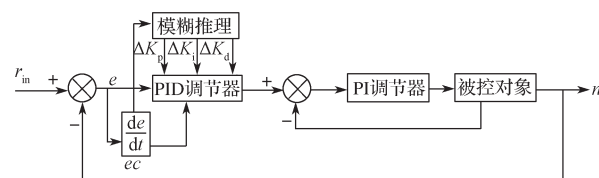


图1 模糊PID自适应控制系统结构图

Fig. 1 A structure diagram of Fuzzy PID adaptive control system

### 3.2 模糊PID控制的规则

模糊PID控制是常规PID控制以及模糊控制的综合,它既有模糊控制的推理性强、在线修改的优点,又有常规PID响应快的优点,是一种十分先进的控

制方法。本文所设计的控制器中,转速环使用模糊PID控制,可实现PID 3参数的自整定。模糊控制器是整个模糊PID控制的核心部分,而那些从实际经验中提取的有效实用的模糊控制规则又是模糊控制器的核心部分。所以,研究系统的性能、需求以及各个参数之间的匹配关系,从而确定所要选择的模糊控制表是必不可少的。

模糊PID控制器隶属函数,采用三角形函数和S形函数的组合来描述,采用的控制规则如表1~3所示。

表1  $\Delta K_p$  的模糊规则

Table 1 Fuzzy rules of  $\Delta K_p$

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

表2  $\Delta K_i$  的模糊规则

Table 2 Fuzzy rules of  $\Delta K_i$

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

表3  $\Delta K_d$  的模糊规则

Table 3 Fuzzy rules of  $\Delta K_d$

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

课题组采用7个语言模糊集来表示输入变量 $e$ 、 $ec$ 和输出变量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ,它们是NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。

### 3.3 模糊PID控制的过程

使用Mamdani模糊推理机制和常用的centroid反模糊化方法得到模糊控制器的自适应校正量 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ,这样可以得到如下控制器的比例、积分和微分系数的调节公式:

$$K_p = K_p(0) + \Delta K_p, \quad (6)$$

$$K_i = K_i(0) + \Delta K_i, \quad (7)$$

$$K_d = K_d(0) + \Delta K_d. \quad (8)$$

式(6)~(8)中, $K_p(0)$ 、 $K_i(0)$ 、 $K_d(0)$ 分别为其初始值。

## 4 系统仿真

### 4.1 交流调速系统的仿真模型

图2所示为永磁同步电机的闭环PI矢量控制系统仿真模型,图3所示为永磁同步电机的闭环模糊PID矢量控制系统仿真模型。

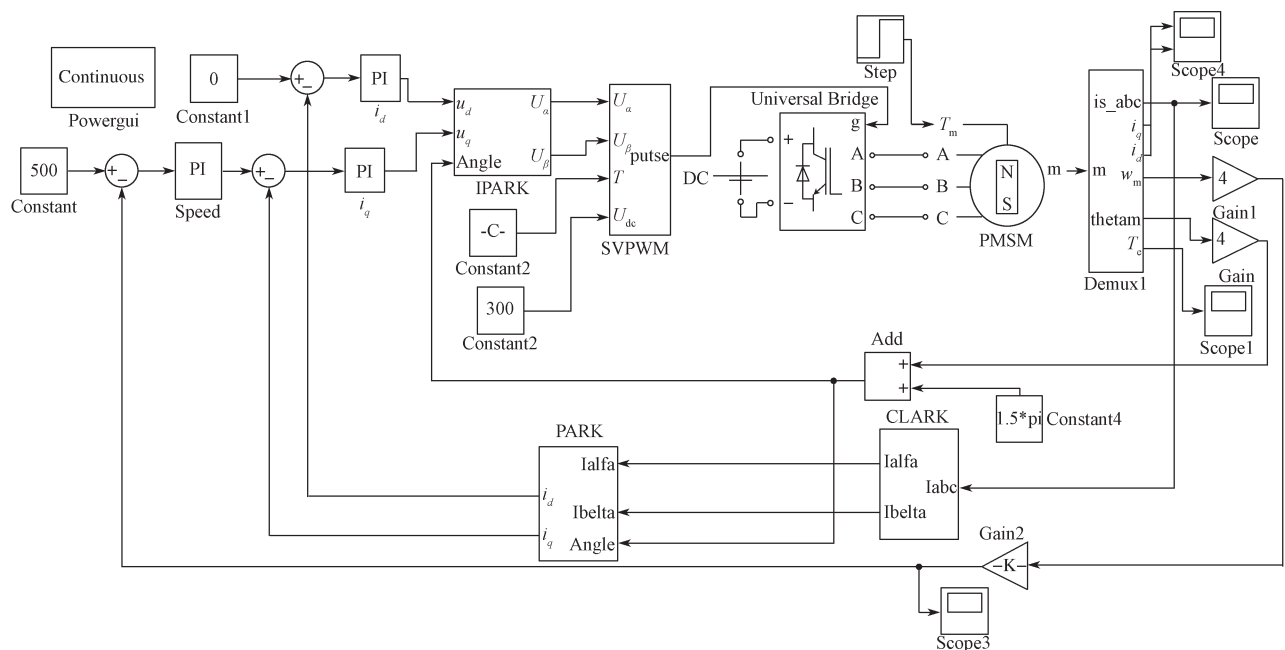


图2 永磁同步电机闭环PI矢量控制系统仿真模型

Fig. 2 A simulation model of closed-loop PI vector control system for permanent magnet synchronous motors

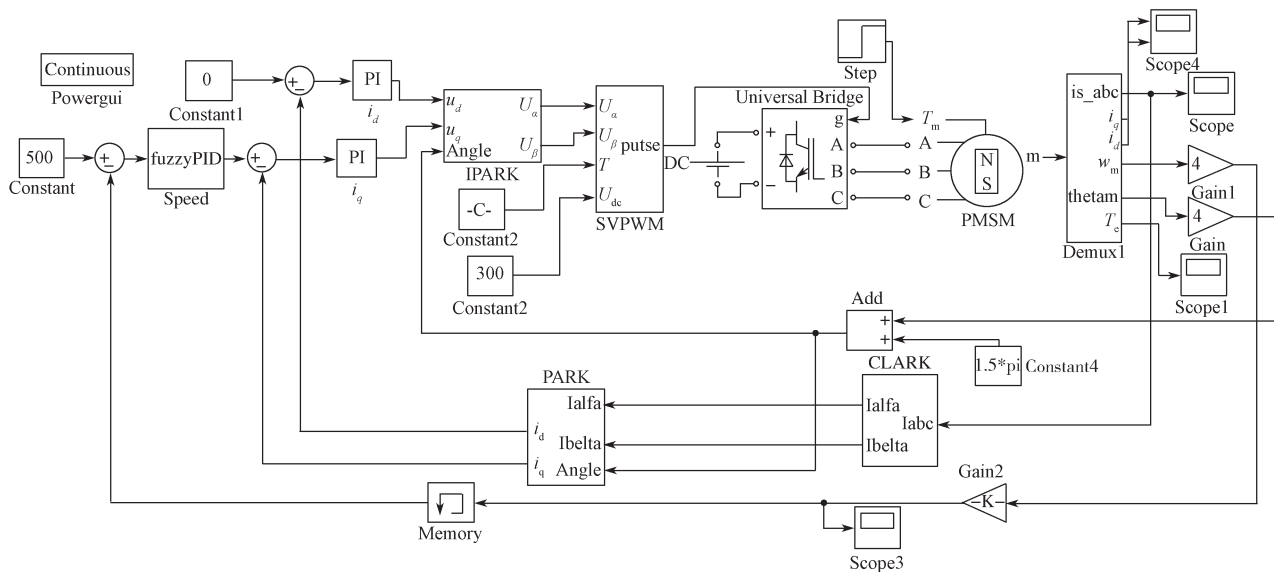


图3 永磁同步电机闭环模糊PID矢量控制系统仿真模型

Fig. 3 A simulation model of closed-loop fuzzy PID vector control system for permanent magnet synchronous motors

从整体上看,这两种控制方式下的控制系统都是以电流内环、转速外环组成,而且都是采用  $i_d=0$  控制,这种控制使得电磁转矩  $T_e$  与  $q$  轴电流  $i_q$  成线性关系,从而调速性能就可以与直流电机的调速性能相媲美。其中图 2 的转速环用常规 PI 控制,图 3 的转速环用模糊 PID 控制。

本仿真中电机参数设定为:  $R_s=2.86\ \Omega$ , 转子磁链  $\psi_r=0.175\ \text{Wb}$ , 摩擦系数  $B=0$ , 转动惯量  $J=0.001\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $d$ 、 $q$  轴的电感分别为  $L_d=L_q=0.0065\ \text{H}$ ,  $n_p=4$ 。

## 4.2 仿真结果分析

在调速系统的 2 个方案中, 给定的转速都是 500 r/min, 在负载测试时都在 0.05 s 的瞬间加上 3 N·m 的负载, 仿真时间为 0.1 s。

### 1) PI 控制下的仿真结果

图4为PI控制下空载时转速随时间的变化曲线。由图可知,在启动瞬间,转速最大,达到610 r/min,达到稳定的时间差不多为0.02 s。

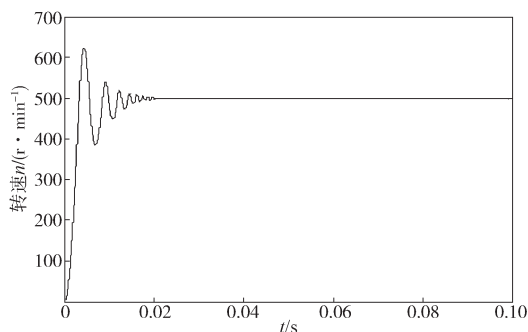


图4 PI控制下空载时转速随时间的变化曲线

Fig. 4 No-load speed with time changes under PI control

图 5 所示为 PI 控制下负载时转速随时间的变化曲线。由图可知, 在 0.05 s 时加上 3 N·m 的负载, 在

0.065 s 时转速重新达到了稳定状态。

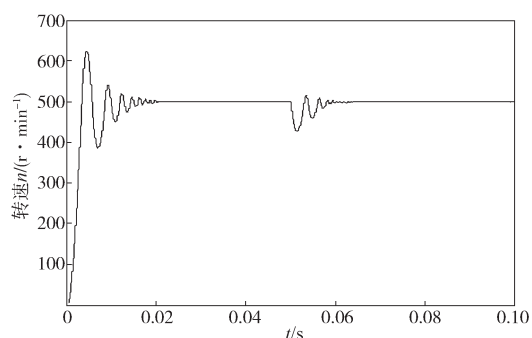


图 5 PI 控制下负载时转速随时间的变化曲线

Fig. 5 Load speed with time changes under PI control

### 2) 模糊 PID 控制下的仿真结果

图 6 为模糊 PID 控制下空载时转速随时间的变化曲线。由图可知, 在启动瞬间, 转速最大约为 580 r/min, 达到稳定的时间为 0.01 s。

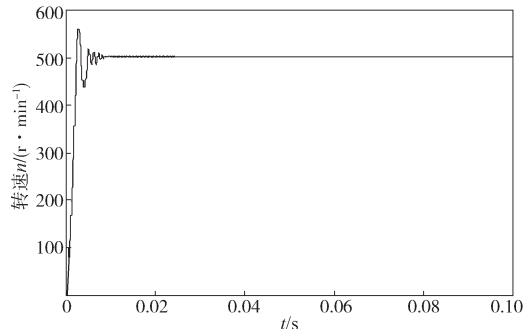


图 6 模糊 PID 控制下空载时转速随时间的变化曲线

Fig. 6 No-load speed changes with time under

fuzzy PID control

图 7 为模糊 PID 控制下负载时转速随时间的变化曲线。由图可知, 在 0.05 s 时加上 3 N·m 的负载, 在 0.054 s 左右重新达到了稳定状态。



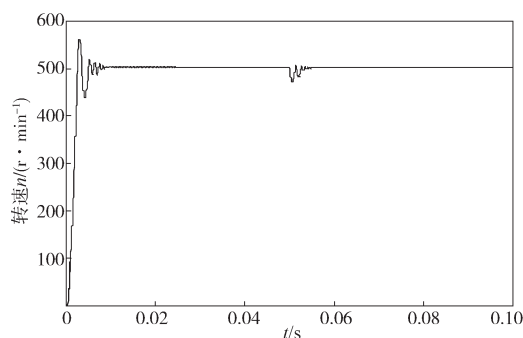


图7 模糊PID控制下负载时转速随时间的变化曲线

Fig. 7 Load speed with time changes under fuzzy PID control

### 3) 两种仿真结果对比分析

由上面两个调速方案的仿真结果可知,在空载运行时,给定同样的转速,常规PI控制的调速系统最大转速达到610 r/min,达到稳定的时间为0.02 s,而模糊PID控制的调速系统最大的转速才580 r/min,达到稳定状态的时间才0.01 s;在0.05 s时加3 N·m的负载后,常规PI控制的调速系统在动态变化过程中,最低速度为430 r/min,重新达到稳定时需要的时间为0.015 s;而模糊PID控制的调速系统在动态变化过程中,最低速度为470 r/min,重新达到稳定时需要的时间为0.004 s。所以,相对于常规的PI控制,模糊PID控制器的超调量更小,达到稳定的时间更短,静态与动态性能更好,适应性与鲁棒性也更好。

## 5 结语

在传统PID控制的基础上,应用模糊理论与控制规则设计了一种模糊PID控制器,并应用在永磁同步电机的调速系统中。仿真结果表明,所设计的模糊PID控制器,不仅有良好的适应性与鲁棒性,还有良好的静态与动态特性,而且不依赖于永磁同步电机精确的数学模型,为提高永磁同步电机的性能提供了依据与途径,同时为研究交流调速系统提供了方向。

### 参考文献:

- [1] 张宏宇, 闫 镔, 陆利忠. 永磁同步电动机控制策略及应用研究综述[J]. 微电机, 2008, 41(4): 96-100.  
ZHANG Hongyu, YAN Bin, LU Lizhong. Control Strategy and Application of Review of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Micromotor, 2008, 41(4): 96-100.
- [2] 刘 军, 俞金寿. 永磁同步电机控制策略[J]. 上海电机学院学报, 2007, 10(3): 180-185.  
LIU Jun, YU Jinshou. Control Schemes of the Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2007, 10(3): 180-185.
- [3] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 19-40.  
SHU Zhibing. AC Servo Motion Control System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 19-40.
- [4] 孙书诚, 郎 朗, 陈孟元. 模糊自适应PID控制器在交流伺服控制系统中的研究[J]. 长春工程学院学报, 2012, 13(2): 39-42.  
SUN Shucheng, LANG Lang, CHEN Mengyuan. The Research of Fuzzy Self Adaptive PID Controller in AC Servo Control System[J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2012, 13(2): 39-42.
- [5] 葛兴来, 冯晓云. 变频调速电压同步 SVPWM 波生成方法仿真分析[J]. 电气传动, 2008, 38(9): 61-64.  
GE Xinglai, FENG Xiaoyun. Simulation Analysis of Methods Forming Voltage Synchronous SVPWM Wave in VVVF System[J]. Electric Drive, 2008, 38(9): 61-64.
- [6] 秦灿华, 刘连根, 曹 洋, 等. MW 级永磁同步电机无速度传感器矢量控制研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(1): 9-11.  
QIN Canhua, LIU Liangen, CAO Yang, et al. Research on Sensorless Vector Control of MW Turbine Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(1): 9-11.
- [7] 丁文双, 胡育文, 鲁文其, 等. 永磁同步电机模糊PID参数自整定[J]. 微特电机, 2011, 39(5): 13-17.  
DING Wenshuang, HU Yuwen, LU Wenqi, et al. Fuzzy PID Parameter Self-Tuning Control for PMSM Servo System[J]. Small & Special Electrical Machines, 2011, 39(5): 13-17.
- [8] 赵正黎, 于惠钧, 张发明, 等. 基于模糊PID控制的直流电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 38-43.  
ZHAO Zhengli, YU Huijun, ZHANG Faming, et al. DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Control[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 38-43.
- [9] 杨书生, 钟宜生. 永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 84-90.  
YANG Shusheng, ZHONG Yisheng. Robust Controller Design for PMSM Speed Servo Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 84-90.
- [10] LI Shihua, GU Hao. Fuzzy Adaptive Internal Model Control Schemes for PMSM Speed-Regulation System[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(4): 767-779.

(责任编辑: 申 剑)