

# 基于BSRM变论域模糊控制研究

王卫东,王宏华,田建

( 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

**摘要:**以12/8极三相双绕组无轴承开关磁阻电机为研究对象,针对转矩脉动及悬浮力脉动等问题,采用一种基于变论域模糊控制优化PI控制器控制参数的控制方法,更有效地降低BSRM系统转矩脉动、悬浮力脉动。在Matlab/Simulink中搭建无轴承开关磁阻电机模型并进行仿真分析。仿真结果表明:与传统PI控制方法相比,变论域模糊PI控制方法能更有效地抑制转矩脉动及悬浮力脉动。

**关键词:**无轴承开关磁阻电机;PI控制;模糊控制;变论域

**中图分类号:**TM352 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0222-05

## Research on Control Strategy of Variable Universe Fuzzy Control Based on BSRM

WANG Weidong, WANG Honghua, TIAN Jian

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Taken the 12/8 three-phase double dual-winding BSRM as the reseach subject and in consideration of torque ripple and suspension force ripple, a fuzzy control algorithm based on variable universe is proposed, which optimizes the parameters of the PI control and better controls torque ripple and suspension force ripple of the BSRM system. With modelled and simulated BSRM in Matlab/Simulink and by comparison with the traditional PI control, the torque ripple and suspension force ripple are reduced by variable universe fuzzy control.

**Keywords:** bearingless switched reluctance motor; PI control; fuzzy controller; variable universe

## 0 引言

无轴承开关磁阻电机(BSRM)是将开关磁阻电机(SRM)与无轴承技术相融合的一种高速、超高速运行的新型电机<sup>[1]</sup>。BSRM在SRM的基础上,利用悬浮绕组产生悬浮力代替机械轴承,并使转子与定子之间避免直接接触。因其具有无摩擦、功耗小、寿命长等优点被广泛应用于高速、超高速、高精度等领域,目前是高速电机研究领域的热点之一<sup>[2-3]</sup>。

控制器是BSRM控制系统的关键部分,因其具有非线性、强耦合等特点,传统PI控制很难获得最优PI参数。文献[4]基于磁悬浮电机采用BP神经网络优化PI参数的方法,虽神经网络处理非线性能力较强,但速度较慢。文献[5]基于磁悬浮电机采用模糊PI控制算法,但并未提及对转矩脉动及悬浮力脉动的影响。

本文在PI控制方法的基础上引入文献[6]变论域思想,变论域模糊控制器即选择合适的伸缩因子,在不改变模糊规则数量前提下,使论域随误差改变而改变,该方法具有设计简单、控制精度高等优点<sup>[7-9]</sup>。目前,伸缩因子设计方法大致分为函数法、模糊推理法,本文采用二者相结合的方法,即量化伸缩因子采用函数法,比例伸缩因子采用模糊推理法。

## 1 BSRM控制系统的简介

### 1.1 双绕组BSRM的悬浮原理

本文控制对象为12/8极双绕组BSRM,下文将以BSRM的A相为例,分析其悬浮及旋转运行的工作原理。

如图1所示,在BSRM定子上,共缠绕两套绕组—主绕组 $N_{ma}$ 与悬浮绕组 $N_{sa}$ 。其中主绕组正向串联,而悬浮绕组分两个方向, $\alpha$ 方向及 $\beta$ 方向,两个方向正对凸极上的悬浮绕组反向串联。根据磁阻最小原理,主绕组对电机转子产生切向磁拉力,形成转矩,同时主绕组产生的偏置磁场与悬浮绕组产生的悬浮磁场叠加后即可产生悬浮力作用于电机转子,进而实现对电机转子径向悬浮控制<sup>[1]</sup>。

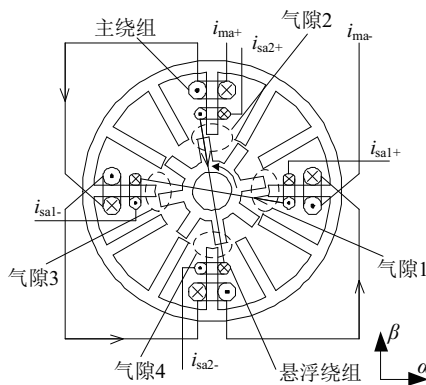


图1 无轴承开关磁阻电机绕组结构图

第一作者简介:王卫东(1994—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为智能技术在无轴承开关磁阻电机中的应用。

### 1.2 BSRM 麦克斯韦应立法解析模型

麦克斯韦应力法即作用在给定体积  $V$  内磁质上的合力和力矩,与作用在包含  $V$  表面的  $S$  面上各张力的合力和力矩恰好相等,即:

$$F = \oint_V f dV = \oint_S T_r dS \quad (1)$$

建立 BSRM 解析模型是研究其控制策略的基础,根据麦克斯韦应力法,在各气隙处,转子各齿极所受切向转矩  $T_{aj}(j = 1,2,3,4)$  和在其局部坐标系上所受磁拉力  $F_{\alpha aj}$ 、

$$K_1 = \begin{cases} \frac{2N_m N_s \mu_0 h}{\eta^2} \left[ \frac{r(\tau_r + \theta)}{l_0^2} - \frac{4r\theta}{l_0(2l_0 - \pi r\theta)} + \frac{\sin(\tau_r/2)(4l_0 - \pi r\theta)}{l_0(2l_0 - \pi r\theta)} \right] & \theta < 0^\circ \\ \frac{2N_m N_s \mu_0 h}{\eta^2} \left[ \frac{r(\tau_r - \theta)}{l_0^2} + \frac{4r\theta}{l_0(2l_0 + \pi r\theta)} + \frac{\sin(\tau_r/2)(4l_0 + \pi r\theta)}{l_0(2l_0 + \pi r\theta)} \right] & \theta \geq 0^\circ \end{cases}$$

$$K_2 = \begin{cases} \frac{2N_m N_s \mu_0 h}{\eta^2} \left[ \frac{r(\theta^2 + \tau_r\theta)}{2l_0^2} - \frac{2r\theta^2}{l_0(2l_0 - \pi r\theta)} + \frac{\cos(\tau_r/2)(-\pi r\theta)}{l_0(2l_0 - \pi r\theta)} \right] & \theta < 0^\circ \\ -\frac{2N_m N_s \mu_0 h}{\eta^2} \left[ \frac{r(\theta^2 - \tau_r\theta)}{2l_0^2} - \frac{2r\theta^2}{l_0(2l_0 + \pi r\theta)} + \frac{\cos(\tau_r/2)(\pi r\theta)}{l_0(2l_0 + \pi r\theta)} \right] & \theta \geq 0^\circ \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N_m$  为主绕组匝数;  $N_s$  为悬浮绕组匝数;  $\mu_0$  为气隙磁导率;  $h$  为转子叠片长度;  $r$  为转子半径;  $\eta$  为气隙边缘系数;  $\theta$  为定转子齿极偏角;  $l_0$  为气隙长度;  $\tau_r$  为转子齿极弧度。

## 2 变论域模糊 PI 控制

### 2.1 变论域原理

传统模糊控制模糊规则一旦设计好则不能改变,故控制精度会有所降低。变论域的思想是随误差变化而实时改变论域大小,即误差大论域变大,误差小论域变小。故伸缩因子的设计尤为重要。

如图2所示,变论域模糊 PI 控制器为基于误差  $e$  与误差变化率  $ec$  的控制器,伸缩因子通过误差与误差变化率而改变,进而实现模糊控制器量化因子、比例因子自调整。

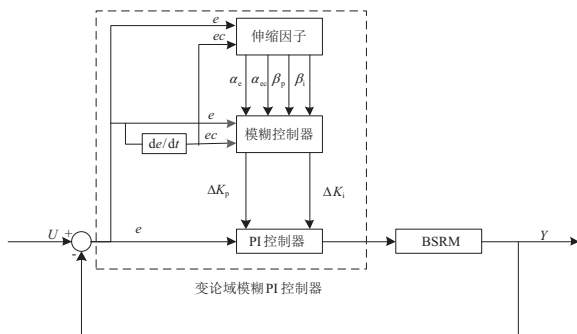


图2 变论域模糊 PI 控制器结构框图

以误差变化  $e$  为例进行讨论,设  $[-E, E]$  为模糊控制器输入误差  $e$  的初始论域,输入设为  $x$ ,由式(5)可把论域  $[-E, E]$  转化为  $[-E', E']$ ,其中  $\alpha(x)$  为伸缩因子,随输入误差变化而变化<sup>[10]</sup>。

$$E' = \alpha(x)E \quad (5)$$

$F_{\beta aj}$  分别如式(2)-式(4)所示<sup>[11]</sup>:

$$T = K_1(2N_m^2 i_m^2 + N_s^2 i_{s1}^2 + N_s^2 i_{s2}^2)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = i_m \begin{bmatrix} K_1 & -K_2 \\ K_2 & K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K_i = \begin{cases} \frac{\mu_0 hr}{\eta^2} \left[ \frac{-\pi r\theta}{l_0(2l_0 - \pi r\theta)} \right] & \theta < 0^\circ \\ -\frac{\mu_0 hr}{\eta^2} \left[ \frac{\pi r\theta}{l_0(2l_0 + \pi r\theta)} \right] & \theta \geq 0^\circ \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 变论域伸缩因子设计

本文输入伸缩因子采用文献[11]中基于指数函数的伸缩因子模型,如式(6)所示。输出伸缩因子采用文献[12]模糊推理形式,实现两级模糊控制器,第一级模糊控制器为PI参数调整控制器,第二级模糊控制器为比例伸缩因子控制器。其中伸缩因子控制器采用两输入、单输出,即误差  $e$ 、误差变化率  $ec$  为输入,比例伸缩因子  $\beta$  为输出。输入论域均为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ ,输入论域范围为  $[-60, 60]$ ,输出论域为  $\{VS, S, M, B, VB\}$ ,输出论域范围为  $[0.07, 0.11]$ ,输入输出隶属度函数以输出  $\beta$  为例,如图3所示。

$$\alpha(x) = 1 - \lambda \exp(-kx^2), \lambda \in (0, 1), k > 0 \quad (6)$$

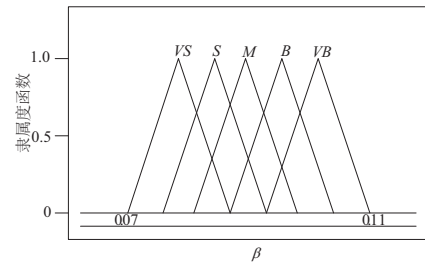


图3 伸缩因子  $\beta$  隶属度函数

模糊规则以第二级模糊控制器输出  $\beta$  为例,如表1所示。

表1  $\beta$  模糊控制规则表

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VB	VB	B	M	B	VB	VB
NM	VB	B	M	S	M	B	VB
NS	B	M	S	VS	S	M	B
Z	M	M	S	VS	S	M	M
PS	B	M	S	VS	S	M	B
PM	VB	B	M	S	M	B	VB
PB	VB	VB	B	M	B	VB	VB

变论域模糊控制磁链可调节 DTC、DFC 的整体控制框图如图 4 所示。磁链可调节实为 PI 调节,在此基础上引入变论域模糊控制,将模糊自适应技术与 PI 控制相结

合,构成变论域模糊磁链自适应控制系统。参考磁链由速度差及速度差的变化率经过变论域模糊 PI 控制器生成,实现磁链在线自整定,提高控制精度。

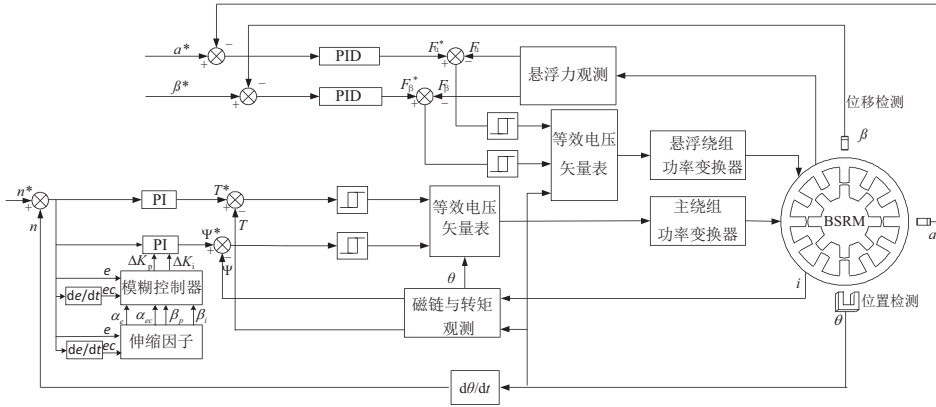


图 4 变论域模糊 PI 控制磁链可调节的 DTC、DFC 控制系统框图

### 3 系统仿真分析

#### 3.1 建立 BSRM 控制系统仿真模型

根据以上分析,搭建基于 BSRM 控制系统的仿真模

型,该系统使用变论域模糊 PI 控制器优化传统 PI 控制器。变论域模糊 PI 控制器部分仿真模型如图 5 所示,电机主要参数如表 2 所示。

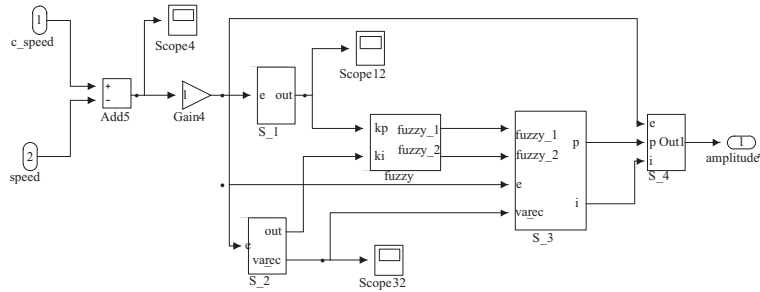


图 5 变论域模糊 PI 控制器部分仿真模型

表 2 12/8 极双绕组 BSRM 样机主要参数

参数/匝	值	参数/mm	值
主绕组匝数 $N_m$	13	转子铁芯外径	120
悬浮绕组匝数 $N_s$	25	气隙长度 $l_0$	0.3

图 5 中 S\_1、S\_2、S\_3 子模块为伸缩因子模块,图 6 为 S\_1 子模块内部模型,主要参数  $\lambda = 0.8, k = 0.005, S_2$  子模块同理。图 7 为 S\_3 子模块内部模型。

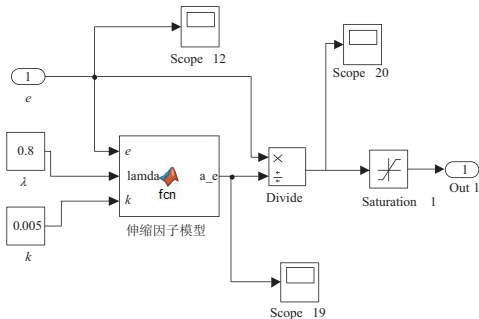


图 6 S\_1 子模块内部模型

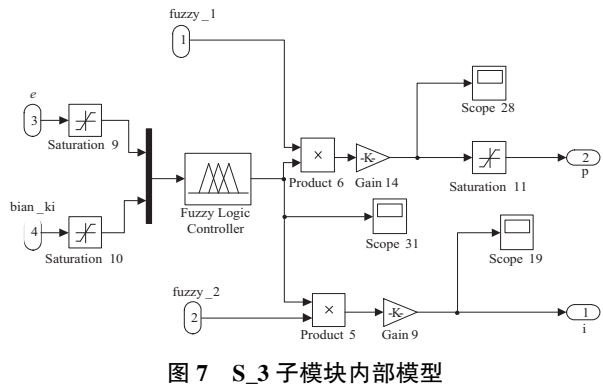


图 7 S\_3 子模块内部模型

#### 3.2 BSRM 控制系统仿真结果分析

设置电机转速为 50 rad/s,变论域模糊 PI 控制方法与传统 PI 控制方法相比,精度更高,转矩脉动及悬浮力脉动更小,主要数据对比如表 3 所示。

表 3 仿真结果对比

方法	稳定时主绕组电流幅值/A	悬浮绕组电流幅值/A	转矩脉动范围/(Nm)	$\alpha$ 方向悬浮力脉动范围/N	$\beta$ 方向悬浮力脉动范围/N	稳定时磁链幅值范围/Wb
PI控制	0~16	-0.4~1.6	-0.1~0.2	-40~40	-20~65	0.09~0.11
变论域模糊控制	0~12	-0.2~1.7	-0.07~0.15	-30~30	0~50	0.06~0.08

由表 3 分析可知变论域模糊 PI 控制方法比 PI 控制方法控制精度有所提高,转矩脉动约降低 28%, $\alpha$  方向悬浮力脉动约降低 25%, $\beta$  方向悬浮力脉动约降低 40%,稳定时主绕组电流约降低 25%,悬浮绕组电流约降低 5%。由此数据分析可知,变论域模糊 PI 控制方法与传统 PI 控制方法相比,转矩脉动与悬浮力脉动有所降低,控制效果有所改进。

仿真结果对比如图 8 至-图 19 所示。

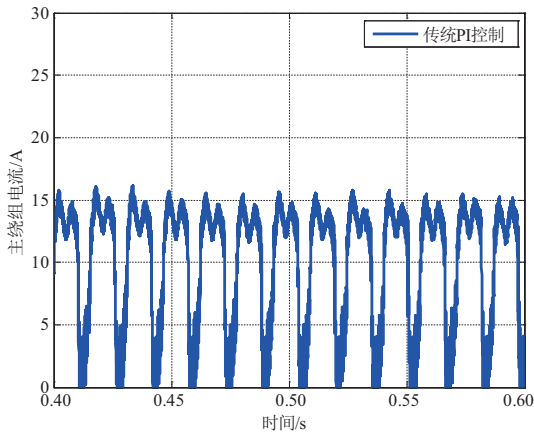


图 8 传统 PI 控制 A 相主绕组电流

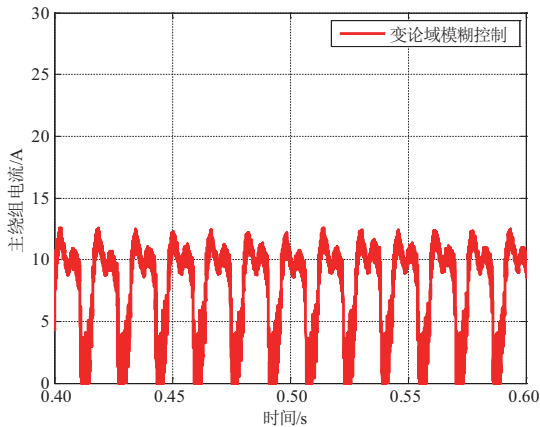


图 9 变论域模糊 PI 控制 A 相主绕组电流

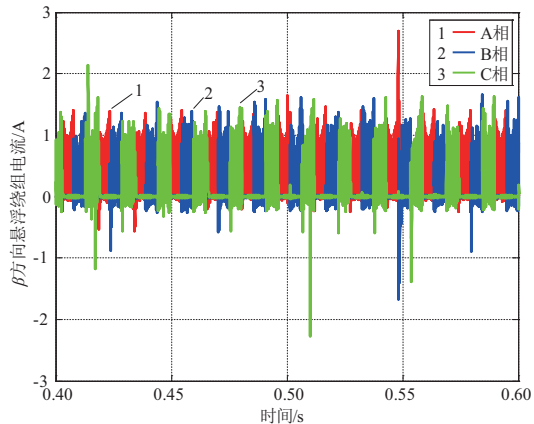


图 10 传统 PI 控制  $\beta$  方向悬浮电流

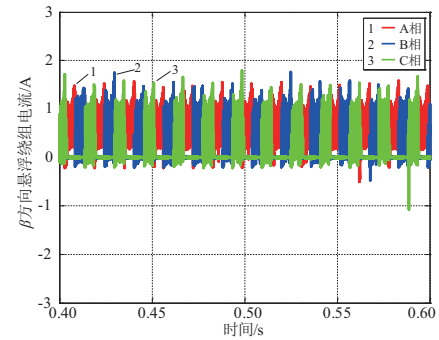


图 11 变论域模糊 PI 控制  $\beta$  方向悬浮电流

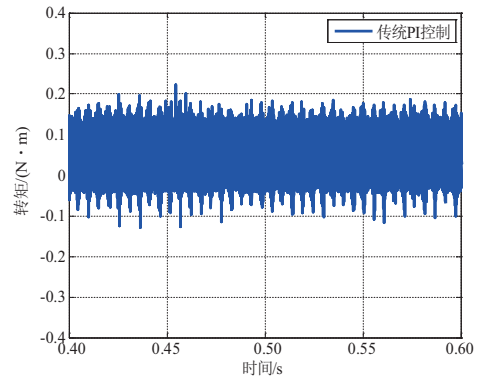


图 12 传统 PI 控制转矩

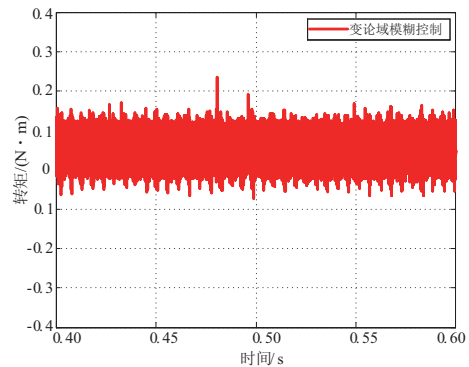


图 13 变论域模糊 PI 控制转矩

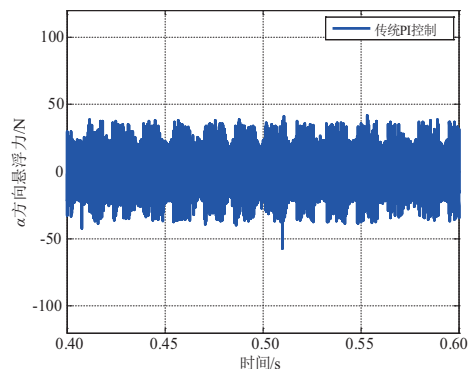


图 14 传统 PI 控制  $\alpha$  方向悬浮力

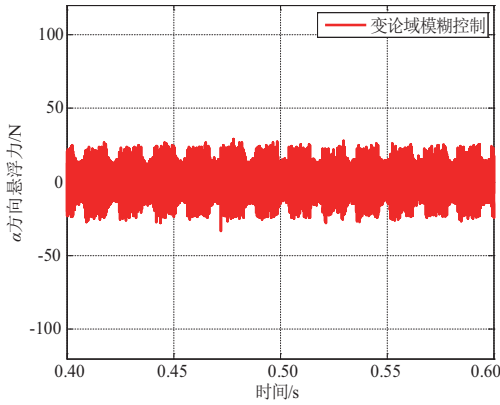


图 15 变论域模糊 PI 控制  $\alpha$  方向悬浮力

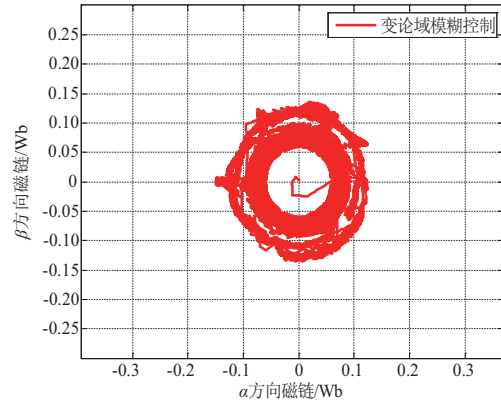


图 19 变论域模糊 PI 控制磁链轨迹图

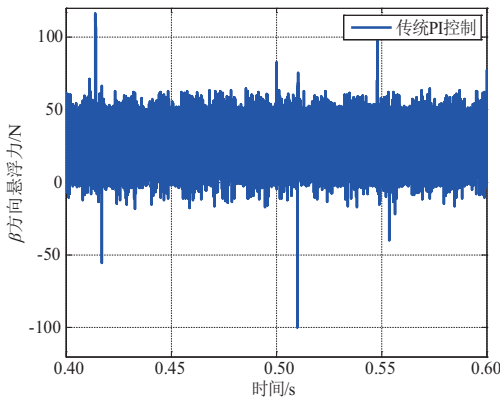


图 16 传统 PI 控制  $\beta$  方向悬浮力

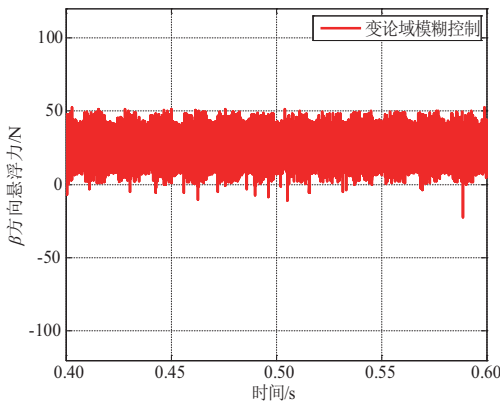


图 17 变论域模糊 PI 控制  $\beta$  方向悬浮力

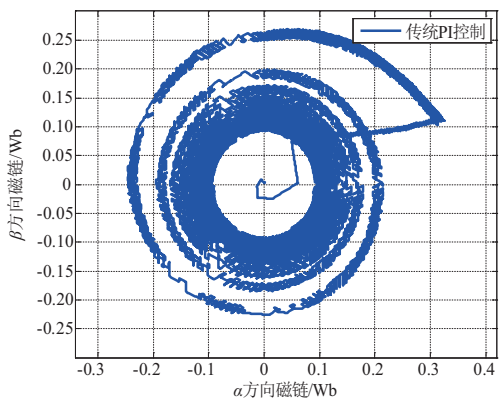


图 18 传统 PI 控制磁链轨迹图

### 4 结语

本文在传统 PI 控制的基础上提出变论域思想,即根据误差及误差变化率调节伸缩因子,进而实时改变输入、输出论域。以 12/8 极 BSRM 为例,针对转矩脉动、悬浮力脉动等问题,基于 Matlab/Simulink 对传统 PI 控制方法与变论域模糊 PI 控制方法的系统模型进行仿真分析,通过对比两种方案的转矩及悬浮力仿真结果可知,基于变论域模糊 PI 控制方法对转矩脉动及悬浮力脉动有所改善,精度有所提高。

#### 参考文献:

- [1] 黄志凡. 无轴承开关磁阻电机直接转矩与直接悬浮力智能控制研究[D]. 南京:河海大学,2018.
- [2] 丁福光. 磁悬浮轴承的变论域模糊 PID 控制与仿真[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会.第37届中国控制会议论文集(B),武汉;2018:1570-1573.
- [3] 陈凌,王宏华,谭超.基于麦克斯韦应力法的双绕组无轴承开关磁阻电机新型数学模型[J]. 电机与控制学报,2017,21(11):9-18.
- [4] 张远,张建生,张燕红.主动磁悬浮轴承的神经网络自适应稳定性控制[J]. 工业控制计算机,2014,27(9):59-61.
- [5] 肖闯进,张建生,钱显毅.基于模糊自适应的主动磁悬浮系统稳定性控制[J]. 南京航空航天大学学报,2013,45(3):390-395.
- [6] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑:技术科学,1999,29(1):3-5.
- [7] GAO M Q, HE S H. Self-adapting fuzzy-PID control of variable universe in the non-linear system [C]//2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Hunan, China: IEEE, 2008:473-478.
- [8] LIU Xiaoyun, LI Liangfeng, CHEN Wufan. A variable universe fuzzy controller algoeith based on fuzzy inference [C] China: Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2007: 453-457.
- [9] 朱镜儒,栗时平,刘桂英,等.光伏发电阵列输出的变论域模糊滞环 MPPT 控制研究[J]. 电力科学与工程,2014,30(1):56-61.
- [10] 曹明,陈新楚.变论域模糊控制器的设计[J]. 机电技术, 2012,35(4):2-4.
- [11] 杨光兴.变论域模糊控制器的研究[D]. 保定:华北电力大学,2009.
- [12] 禹牛云,朱颖合.变论域自适应模糊 PID 控制器的设计与仿真[J]. 中国水运(下半月),2010,10(1):63-65.

收稿日期:2020-08-27