

# 基于变论域模糊 PID 控制的同步发电机励磁研究

揭海宝, 康积涛, 李 平

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**同步发电机励磁系统是一个时变、非线性、强干扰、模型十分复杂的系统,应用传统的控制方法往往难于达到满意的控制效果。变论域自适应模糊控制具有对模型无准确要求、响应快速、精度高、鲁棒性好、适应性强等优点。将变论域自适应模糊控制器应用于同步发电机的励磁调节与控制中,首先详细地论述了控制器的结构设计、伸缩因子的选择方法,然后给出了具体的控制算法;最后给出的仿真结果表明该控制算法在同步发电机励磁控制中切实可行,效果令人满意。

**关键词:**变论域;同步发电机;模糊控制;励磁控制器

**Abstract:** Excitation system of synchronous generator is a typical nonlinear and time-varying system with strong disturbance, high uncertainty and model complexity. It is difficult to achieve a good performance by traditional control methods. Adaptive fuzzy control method based on variable universe has the advantages such as no need for exact models, fast response, high precision and strong robustness. The variable universe adaptive fuzzy controller is applied to the excitation regulation and control of synchronous generator. Firstly, the corresponding structure design and the extension factor selection of the controller are provided in detail, and then the control law is given. Finally, the simulation results prove that the control scheme is reliable and effective.

**Key words:** variable universe; synchronous generator; fuzzy control; excitation control

**中图分类号:** TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)01-0024-04

## 0 引 言

同步发电机是一种典型的“时变、非线性、强干扰、模型复杂”的系统<sup>[1]</sup>,对它的控制问题一直吸引着控制领域的专家、学者的研究,而且也取得了一定的进展和研究成果,但至今也没有一个公认的系统模型,这给那些依赖系统模型进行控制的方法带来了困难。长期以来在同步发电机的励磁控制算法中普遍采用的是 PID 控制,由于系统模型经常发生变化,受外界影响较大,因此常规的 PID 控制在实际运行当中需要经常手动调节参数,这给励磁控制带来了极大的不便,而且控制效果也不甚理想。

为了改善这种状况,许多专家学者先后提出了采用非线性控制、智能控制方法应用于励磁控制系统中,其仿真和实验的控制效果确实有了一定的改善,但是它们大大增加了控制系统的复杂程度;模糊 PID 控制由于结构简单,工业化应用较为广泛,因此可借鉴度高,近年来受到很多学者们的关注。

常规的模糊 PID 控制系统由于量化因子、比例因

子和论域的固定化,在实际的控制过程中不能很好地满足调节范围和控制精度;文献 [2] 中首次提出了变论域的思想,并指出在规则形式不变的情况下,论域随着误差变小而收缩,随着误差的变大而增大,从而提高了控制系统的调节范围和控制精度。变论域模糊 PID 控制器实际上就是一种在线根据误差调整论域的自适应模糊 PID 控制器。基于这种思想,结合同步发电机励磁控制的要求,下面将变论域自适应模糊控制应用于同步发电机励磁控制中。

## 1 变论域模糊 PID 励磁控制器设计

同步发电机的励磁控制主要包含励磁控制器、功率单元、同步发电机、测量单元等,这里以同步发电机的电压调节为例,探讨如何将变论域模糊 PID 控制器应用于该系统。下面首先给出同步发电机励磁控制系统的结构框图,如图 1 所示。

### 1.1 控制器结构设计

利用变论域模糊 PID 控制器的优势,设计基于变论域模糊 PID 控制的电压调节器结构如图 2 所示。

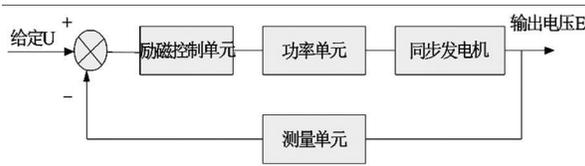


图 1 同步发电机经典电压调节框图

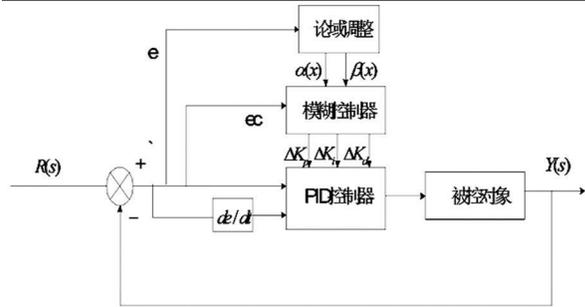


图 2 变论域模糊 PD 励磁控制器框图

为了达到满意的控制精度,定义:  $[-e_0, e_0]$  为输入变量  $e$  的基本论域;  $[-e_c, e_c]$  为输入变量  $e_c$  的基本论域;  $[-k_p, k_p]$  为输出变量  $k_p$  的基本论域;  $[-k_i, k_i]$  为输出变量  $k_i$  的基本论域;  $[-k_d, k_d]$  为输出变量  $k_d$  的基本论域。为简单起见统一为  $X_p = [-E_p, E_p]$ ,  $p=1, 2$  分别为输入变量  $X_p$  ( $p=1, 2$ ) 的基本论域;  $Y_q = [-K_q, K_q]$ ,  $q=1, 2, 3$  分别为输出变量  $Y_q$  ( $q=1, 2, 3$ ) 的基本论域;  $A_i = \{a_{ij} | 1 \leq j \leq m$  (这里  $m$  为 7) 为  $X_p$  上的模糊划分;  $B_i = \{b_j | 1 \leq j \leq m$  为  $Y_q$  上的模糊划分, 则结合模糊推理规则:

如果  $x_i$  是  $a_{1j}$  且  $x_2$  是  $a_{2j}$  那么  $y_1$  就是  $b_{j-1}$ ,  $y_2$  就是  $b_j$ ,  $y_3$  就是  $b_{j+1}$ 。此时有

$$y(x_1, x_2) = F(x_1, x_2) = \sum_{j=1}^7 \prod_{i=1}^2 a_{ij}(x_i) y_j$$

### 1.2 伸缩因子的选择<sup>[3]</sup>

所谓变论域是指论域可以分别随着输入变量和输出变量的变化而自行调整, 即论域  $X_p$  和  $Y_q$  可以分别随着变量  $x_p$  和  $y_q$  的变化而自行调整, 推广记为: 输入变量是基本论域  $X(x) = [-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ , 输出变量是基本论域  $Y(y) = [-\beta(y)K, \beta(y)K]$ , 其中  $\alpha(x)$  与  $\beta(y)$  叫做论域的伸缩因子,  $E$  表示输入变量  $e$  和  $e_c$ ,  $K$  表示输出变量  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$ , 相对于变论域而言, 原来的论域叫做初始论域。一般地, 伸缩因子满足对称性、避零性、单调性、协调性、正规性, 常见的函数有:

$$\alpha(x) = \left[ \frac{|x|}{E} \right]^\tau + \epsilon > 0 \quad \epsilon \text{ 为充分小的正数};$$

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx} \quad \lambda \in (0, 1), k > 0;$$

$$\beta(t) = K_i \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t i(\tau) d\tau + \beta(0) \quad K_i \text{ 为比例常数。}$$

$\alpha(x)$  表示输入变量论域的伸缩因子,  $\beta(x)$  表示

输出变量论域的伸缩因子。

文中对于输入论域的伸缩因子, 选用  $\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx}$  ( $\lambda \in (0, 1)$ ,  $k > 0$ ); 这里取  $\lambda = 0.6$ ,  $k = 0.5$ ;  $x$  表示输入变量  $e$  或  $e_c$ , 亦即  $\alpha(e) = 1 - 0.6 e^{-0.5e^2}$ ,  $\alpha(e_c) = 1 - 0.6 e^{-0.5e_c^2}$ 。

对于输出论域的伸缩因子, 考虑  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  对控制性能的影响, 采用原则: 输出变量  $k_p$  和  $k_i$  的伸缩因子应具有与误差的单调一致性, 而输出变量  $k_d$  的伸缩因子则具有与误差的单调反向性。亦即输出论域的伸缩因子应使得输出变量  $k_p$  和  $k_i$  适当大,  $k_d$  适当小。为此选取输出变量  $k_p$  和  $k_i$  的论域伸缩因子为  $\beta_1 = 2|e|$ ,  $\beta_2 = \frac{1}{|e| + 0.7}$ , 亦即  $\beta_p = 2|e|$ ,  $\beta_d$

$$= 2|e|, \beta_i = \frac{1}{|e| + 0.7}$$

论域的伸缩变化如图 3 所示。

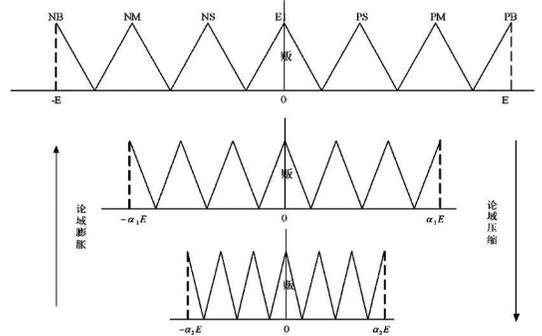


图 3 论域的伸缩变化示意图

## 2 仿真实验

为了检验所设计的变论域模糊 PID 控制器的控制性能及效果, 采用 Matlab 软件对其进行仿真测试; 并对常规 PID 励磁控制器、模糊 PID 励磁控制器以及变论域模糊 PID 励磁控制器进行了仿真对比, 其中控制系统各个部分的参数设置如下。

同步发电机:  $T_{d0} = 6 \text{ s}$ ,  $K_F = 1.0$ ;

电压测量单元:  $T_R = 0.02 \text{ s}$ ,  $K_R = 1.0$ ;

功率单元:  $T_Z = 0.3 \text{ s}$ ,  $K_Z = 1.0$ 。

这里采用粒子群算法对 PID 控制初始参数进行了优化, 经过编程实现得到粒子群优化的 PID 初始参数值为

$$k_p = 199.325, k_i = 10.128, k_d = 29.638$$

### 2.1 参数未变时的仿真对比

采用阶跃信号模拟发电机空载起励磁进行仿真,

这时系统参数如上所设置, 仿真结果如图 4 所示。

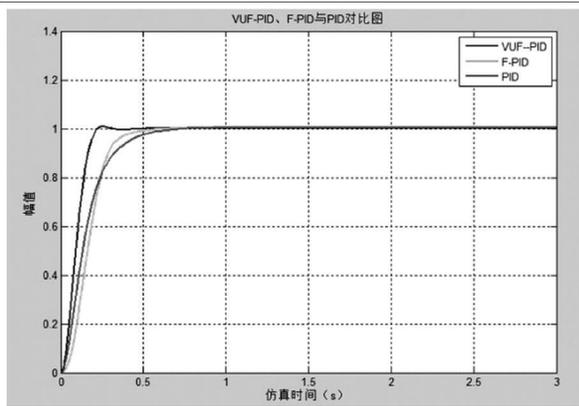


图 4 系统参数未变时励磁控制仿真图

从响应结果粗略看来, 显然可以发现模糊 PID 控制 (F-PID) 以及变论域模糊 PID (VUF-PID) 具有更快的响应速度; 当然, 此时的 PID 控制似乎完全可以满足控制系统的性能要求, 无论是从上升时间、超调量还是稳态误差都控制得较好, 仔细分析其原因, 不难发现主要有两个原因: 一是通过使用了 PSO 优化算法来优化 PID 的控制参数, 所得到的控制参数应该是具有很好控制效果的 PID 参数; 二是被控对象 (励磁系统) 所采用的是简化后的精确的数学模型表述, 也就是说被控对象在仿真过程中丝毫没有发生变化。但是, 这两种情况在实际的工况中是不可能存在的, 实际的工况中被控对象是不可避免的要受外界环境的变化而改变的, 并且外界环境有时还会发生恶劣的变化, 扰动突然增加等等。

## 2.2 参数发生变化时的仿真对比

为了进一步显示变论域模糊 PID 控制器的优势, 模拟实际的运行环境, 不妨假设系统的状态发生了如下改变, 其中  $T_{do}$  由原来的 6 s 变为 12 s  $T_R$  由原来的 0.02 s 变为 0.08 s 这时再来看看它们各自的控制效果, 这个假定的实现只需要在 Simulink 仿真环境下改变同步发电机的传递函数即实现, 改变后的仿真结果如图 5 所示。

将以上所有仿真指标列于表 1, 根据以上仿真指标可以看出: 一方面, 采用模糊控制与 PID 控制相结合, 充分发挥了各自的优势, 即系统响应不但具有很高的稳态精度, 而且具有较快的响应速度和较小的超调量。另一方面, 采用变论域的方法, 由于对模糊控制器本身进行了优化调整, 使得控制效果较模糊 PID 具有更好的快速性, 并且对超调也有较强的抑制能力。

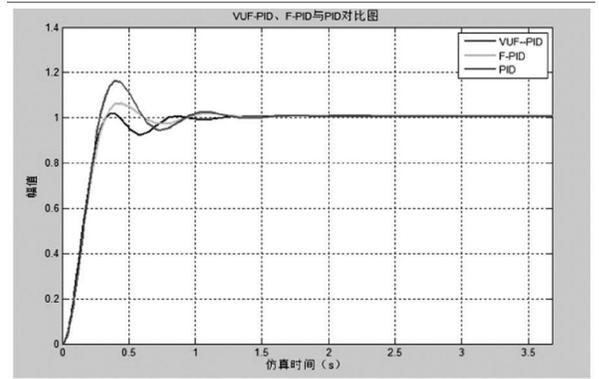


图 5  $T_{do}=12\text{ s}$   $T_R=0.08\text{ s}$  时的励磁控制仿真对比图

表 1 算法间性能指标对照表

性能指标	控制算法		
	常规 PID	模糊 PID (F-PID)	变论域模糊 PID (VUF-PID)
调节时间 $t/s$	1.8	1.6	1.5
超调 $\delta/\%$	18.72	7.43	2.56
静态误差 $e_s/\%$	0.03	0.01	0.008

为了测试变论域模糊 PID 励磁控制器的稳定性, 不妨假设系统参数再次发生变化,  $T_{do}$  由原来的 6 s 变为 25 s  $T_R$  由原来的 0.02 s 变为 0.08 s 这时再来看看它们各自的控制效果, 再次改变后的仿真结果如图 6 所示。

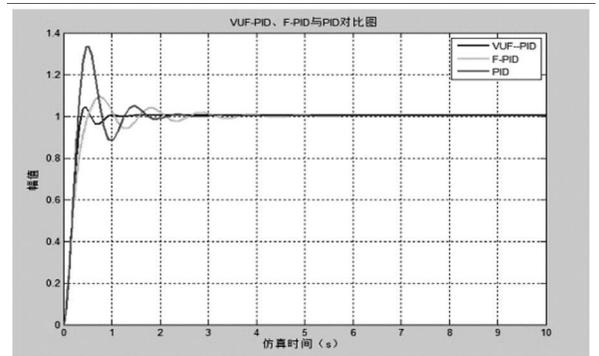


图 6  $T_{do}=12\text{ s}$   $T_R=0.08\text{ s}$  时的励磁控制仿真对比图

结合上图和表 2 所示的各个算法性能指标对照, 从中不难看出, 此时常规 PID 励磁控制器由于超调量远大于 10%, 这是在电力系统中不允许存在的, 因此, 此时的常规 PID 励磁控制器不能达到控制系统要求。相比较而言, 模糊 PID 励磁控制器较常规 PID 励磁控制器具有超调量小、稳定精度高的优点, 但响应速度略慢于常规 PID 励磁控制, 而与此同时, 变论域模糊 PID 励磁控制器不仅具有超调量小, 稳定精度高的优点, 而且响应速度也是三者中最快的, 可以看到, 变论域模糊 PID 励磁控制器在实际运行环境中具有很好的控制效果和更强的鲁棒性。

表 2 算法间性能指标对照表

性能指标	控制算法		
	常规 PID	模糊 PID (F-PID)	变论域模糊 PID (VUF-PID)
调节时间 $t/s$	3.5	4.8	1.8
超调 $\delta/\%$	36.27	9.26	2.87
静态误差 $e_s/\%$	0.04	0.02	0.01

### 3 结 论

变论域模糊自调整 PID 励磁控制器采用模糊推理方法对参数进行在线调整,以满足不同工况对控制参数的不同要求,仿真结果表明,它与经典 PID 励磁控制器和传统的模糊 PID 励磁控制器相比,在改善

系统动态品质及对系统参数发生改变时的鲁棒性<sup>[4]</sup>均优于常规 PID 励磁控制器,在实际应用中有一定的推广价值。

### 参考文献

- [1] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状与走向 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(4): 142-145.
- [2] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器 [J]. 中国科学 (E 辑), 1999, 29(1): 10-20.
- [3] 李洪兴. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制 [J]. 中国科学 (E 辑), 2002, 32(2): 211-223.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

(收稿日期: 2010-10-12)

## 《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力试验研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊,主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿,尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求,本刊对来稿提出以下要求。

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713-1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 6 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组,选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰,少而精,插图下方应有图序和图名。能用文字或表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料,按在正文中出现的先后次序列表于文后,以 [1]、[2]……标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《文后参考文献著录规则, GB/T 7714-2005》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范, CAJ-CD B/T 1-2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为:普通图书 [M];会议论文 [C];报纸文章 [N];期刊文章 [J];学位论文 [D];报告 [R];标准 [S];专利 [P];汇编 [G];档案 [B];古籍 [O];参考工具 [K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政管理部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册 [Z];网上期刊 [J/OL];网上电子公告 [EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件,信箱为“cdscdljs@163.com”。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话,并请自留底稿,本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电 028-87082036 或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿,文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改,如不愿被删改,请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站,稿件一经录用刊登,作者著作权使用费及稿酬已一次付清,如作者不同意收录,请在来稿时提出声明,本刊将作适当处理。

来稿请寄:四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072 电话: (028) 87082036, 87082037 E-mail: cdscdljs@163.com