

## 智能模糊 PID 控制在水轮发电机组中的应用

王淑青<sup>1</sup>, 张子蓬<sup>2</sup>, 刘 辉<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学电气与电子学院, 湖北省武汉市 430068)

(2. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北省武汉市 430074)

**摘要:** 针对水轮发电机组常规 PID 控制不能根据系统的动态过程自动调整控制参数的缺点, 提出一种改进的智能自适应模糊 PID 控制系统, 模糊控制器隶属函数和推理规则采用遗传算法优化, 模糊推理输出在线修改 PID 参数, 并探讨了如何整定 PID 参数以达到最优控制效果。仿真实验表明这是一种有效的控制策略, 尤其是启停机过程及负载扰动过程比传统 PID 控制具有更好的鲁棒性和稳定性。

**关键词:** 模糊推理; PID 控制; 水轮发电机; 遗传算法

**中图分类号:** TV734.4; TM312

## 0 引言

水轮机调节系统的被控对象是一个高度非线性、时变不确定、具有死区和非最小相位特性的高阶系统, 这就使得水轮机调节系统控制策略的研究比较复杂。这方面研究很多<sup>[1~3]</sup>, 如 PID 调节、微分先行 PID 调节、模糊 PID(FPID)调节、基于神经网络、遗传算法等控制。一些先进的控制策略由于复杂、技术不够成熟, 仍处在研究试用阶段。由于 PID 控制结构简单, 具有一定的鲁棒性, 系统响应过程和 PID 关系比较清晰, 因此, 目前普遍采用 PID 控制策略。随着电厂自动化水平的提高, 现有的 PID 控制很难满足控制要求。

本文根据水轮机调节系统的特点, 研究了模糊控制与现有 PID 控制结合, 构成 FPID 来完成控制任务, 模糊参数和规则由遗传算法确定, 并探讨了如何整定 PID 参数才能达到最优控制效果。

## 1 水轮机组模型的建立

根据文献[4], 水轮机调节对象包括液压伺服机构、水轮机及其引水系统和发电机等部分, 本文考虑控制对象为混流式水轮机, 图 1 为系统框图。

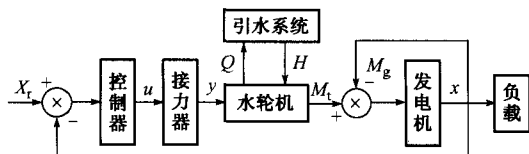


图 1 水轮机调节系统结构

接力器部分以一阶惯性环节表示:

$$y = \frac{1}{1 + T_y s} u \quad (1)$$

式中:  $y$  为接力器行程;  $T_y$  为接力器缓冲时间常数;  $u$  为控制器输出量。

水轮机运行特性随运行工况变化而改变, 建立精确数学模型几乎是不可能的。在动态过程研究中, 我们所关注的水轮机特性, 就是水轮机力矩和流量随接力器行程、导叶开度、工作水头、机组转速变化的特性。这是一个多输入多输出系统。对混流式水轮机而言, 其力矩  $M_t$  和流量  $Q$  是水轮机调节机构的开度  $\alpha$ 、水头  $H$  和转速  $n$  的函数:

$$M_t = M_t(\alpha, H, n) \quad (2)$$

$$Q = Q(\alpha, H, n) \quad (3)$$

为简化分析起见, 当水轮机工况点在某一稳定工况点附近和小范围内变化时, 可以采用近似线性化的方法表示, 对混流式水轮机, 有

$$m_t = \frac{\partial m_t}{\partial y} y + \frac{\partial m_t}{\partial x} x + \frac{\partial m_t}{\partial h} h = e_y y + e_x x + e_h h \quad (4)$$

$$q = \frac{\partial q}{\partial y} y + \frac{\partial q}{\partial x} x + \frac{\partial q}{\partial h} h = e_{qy} y + e_{qx} x + e_{qh} h \quad (5)$$

引水系统具有非最小相位特点, 可近似用弹性水击模型表示:

$$\frac{h}{q} = T_w \frac{s}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2} \quad (6)$$

发电机组运动方程简化为一阶惯性环节, 表示为:

$$x = \frac{1}{T_a s + e_n} (m_t + m_g) \quad (7)$$

式(4)~式(7)中: 各参数用标么值表示;  $h$  为水头;  $q$  为流量;  $T_w$  为水流惯性时间常数;  $T_r$  为引水系统管

道反射时间;  $T_a$  为机组惯性时间常数;  $e_n$  为负荷调节系数;  $e_y, e_x, e_h, e_{\omega}, e_{\alpha}, e_{\phi}$  分别为传递系数, 随工况变化而变化。

可将式(1)、式(2)、式(4)、式(6)、式(7)合并为状态方程:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu + FM_g \\ Y = CX \\ X = [x, h, h_2, y]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $A, B, F, C$  为系数矩阵;  $h_2$  为引入的辅助变量。

水轮机系统特性复杂, 不同工况传递系数不同, 我们根据水轮机调节系统的特点, 研究一种实用的基于模糊控制调整 PID 参数, 模糊参数和规则由遗传算法确定。

## 2 基于遗传算法的 FPID 控制器设计

### 2.1 模糊控制系统结构

模糊逻辑控制器(FLC)是 FPID 控制系统的核心。一般, FLC 的设计方法是先根据经验确定它的各个参数和控制规则, 然后在实际系统中进行调整<sup>[5]</sup>。FPID 控制有很多形式<sup>[2,3,6]</sup>, 如模糊控制与 PID 并联形式、模糊与 PI 并联形式、模糊与 I 并联形式、模糊控制与 PID 串联。通过对以上几种形式仿真实验, 得出模糊输出控制 PID 参数效果较好, 因此我们采用模糊输出调节 PID 的 3 个参数, 使 PID 控制自适应系统变化。图 2 为自适应 FPID 控制器的系统结构。

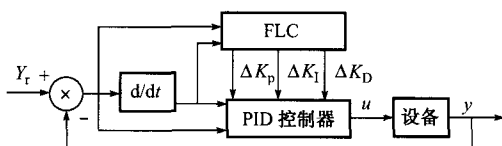


图 2 参数自适应 FPID 控制系统结构

模糊推理系统以误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为输入, 采用模糊推理方法对 PID 参数  $K_p, K_i, K_d$  进行在线整定, 以满足不同控制的误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  对控制参数的需求, 使被控制对象具有良好的动态、静态性能。这里采用模糊  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  输出在线调整 PID 控制 3 个参数。

### 2.2 变量隶属度函数的确定

将误差  $e$ 、误差的变化率  $e_c$  和模糊判决输出值  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  量化, 分别分为 7 个档次, 变化范围定义为模糊集上的论域为  $[-1, 1]$ , 其模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\}$ , 表示{“负大”, “负中”, “负小”, “零”, “正小”, “正中”, “正大”}。经反复实验, 三角形隶属函数灵敏度较高, 较适用此系统, 故采用三角形隶属函数。

### 2.3 建立模糊控制规则表

模糊规则表设计较复杂, 一般根据专家知识和操作人员经验, 抽象成一系列不精确的条件语句, 形成模糊控制表, 这里采用 Mamdani 模糊推理法<sup>[5]</sup>, 节点采用重心法进行反模糊化, 求出精确的输出量。

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等特性来考虑, 针对不同的  $e$  和  $e_c$  调整  $K_p, K_i, K_d$ 。其原则是: 当  $|e|$  较大时, 为使系统具有较好的跟踪性能, 应取较大的  $K_p$  与较小的  $K_d$ , 同时为避免系统相应出现较大的超调, 应对积分作用加以限制, 通常取  $K_i$  适中甚至为 0; 当  $|e|$  和  $|e_c|$  中等大小时, 为使系统具有较小的超调,  $K_p$  应取小些,  $K_d$  的取值对系统影响较大, 应取得小一些,  $K_i$  取适中; 当  $|e|$  较小时, 为使系统具有较好的稳定性能,  $K_p$  与  $K_i$  应取得大些, 同时为避免系统在设定值出现振荡, 并考虑系统抗干扰性能, 当  $|e_c|$  较大时  $K_d$  可取得小些;  $|e_c|$  较小时  $K_d$  可取大一些。

设计时, 采用遗传算法对模糊控制器进行优化, 主要优化对象是 FLC 的模糊量化因子、隶属函数和规则集。其中, 量化因子有 5 个, 前件有 2 个参数  $K_e, K_{e_c}$ , 后件有 3 个参数  $K_{\Delta K_p}, K_{\Delta K_i}, K_{\Delta K_d}$ , 隶属函数模糊子集如采用 7 级, 共 49 条规则, 每个模糊集用 3 个参数表示, 共 483 个参数。遗传算法采用二进制编码, 如每个参数用 8 个二进制位表示, 则每个个体总长为 3 864 位, 探索空间相当大, 学习效率低。我们在设计中做了些调整, 学习速率大大提高。

设计时将专家经验与遗传算法结合, 决定模糊控制器的量化因子、隶属函数、模糊推理规则。采用分阶段优化的方法, 遗传学习的前期主要优化控制器结构, 后期主要是参数的微调。具体做法是: 先根据已有的专家知识设计模糊控制规则集和量化因子, 优化隶属函数; 再根据优化隶属函数优化规则集; 在前两步基础上优化量化因子、隶属函数参数。

经遗传算法优化, 隶属函数采用三角形;  $e$  隶属函数分布向中心移  $\sigma = 0.1221$ ,  $e_c$  隶属函数分布向两边偏移  $\sigma = 0.0807$ ; 优化  $K_e = 4.1112$ ,  $K_{e_c} = 2.0451$ ,  $K_{\Delta K_p} = 0.2141$ ,  $K_{\Delta K_i} = 0.1235$ ,  $K_{\Delta K_d} = 0.2834$ ; 优化出  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  参数变化规律表。

将模糊规则输出与后件量化因子相乘得  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ , 在线调整 PID 的 3 个参数, 以达到智能自适应控制的目的。

## 3 仿真实验研究

根据以上分析, 将水轮发电机组控制系统在 MATLAB 6.5 软件下进行仿真, 以 2.5 Hz 的频率扰动和 30% 负荷扰动为例进行仿真研究。所仿真的某电站机组在  $T_y = 0.02$ ,  $T_w = 2.27$ ,  $T_r = 0.15$ ,  $T_a = 5.06$  时, 部分具体数据见表 1。

表 1 典型工况下的水轮机模型参数

| 工况 | $\alpha$ | $e_x$  | $e_y$ | $e_h$ | $e_{qr}$ | $e_{qv}$ | $e_{\phi}$ |
|----|----------|--------|-------|-------|----------|----------|------------|
| 1  | 21       | -0.761 | 1.191 | 0.835 | -0.163   | 0.93     | 0.359      |
| 2  | 31       | -1.22  | 0.656 | 1.431 | -0.075   | 0.674    | 0.446      |

根据所建模型进行各种工况下的仿真实验,得到仿真输出曲线如图 3、图 4 所示。

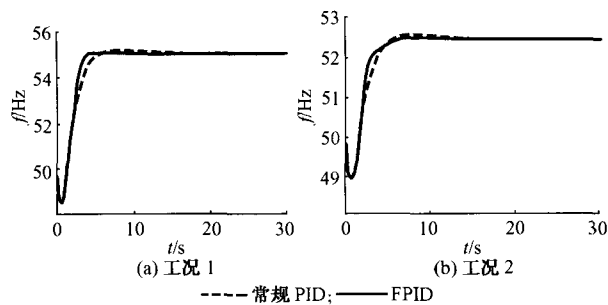


图 3 频率 5% 扰动控制效果

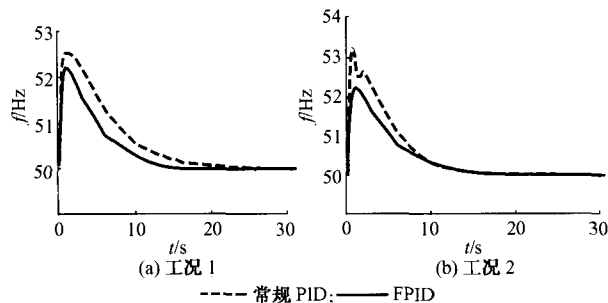


图 4 甩 30% 负荷控制效果

表 2 为 2 种工况下,频率扰动和负荷扰动时,FPID 和最优 PID 控制响应指标,调节时间是指频率误差达到 0.5% 时的时间。

表 2 最优 PID 控制与 PID 控制仿真结果比较

| 工况    | 调节时间/s |       | 超调量/(%) |       |
|-------|--------|-------|---------|-------|
|       | 最优 PID | FPID  | 最优 PID  | FPID  |
| 扰动 1  | 9.28   | 4.12  | 0.208   | 0.079 |
| 扰动 2  | 13.80  | 5.23  | 0.342   | 0.101 |
| 甩负荷 1 | 18.90  | 13.10 | 3.930   | 4.920 |
| 甩负荷 2 | 14.30  | 13.50 | 6.400   | 5.300 |

从表 2 可看出,频率扰动或负载扰动时,智能 FPID 控制策略的动态鲁棒性优于最优 PID 控制,

调节时间明显缩短。

## 4 结语

鉴于水轮机调节对象的复杂性,提出了新型水轮发电机组智能 FPID 控制系统,该系统发挥了模糊控制和 PID 两者的优势,模糊控制推理过程模仿人的思维过程,形成专家知识,在线修改 PID 参数,在处理非线性变参数控制问题时有较强鲁棒性。

使用遗传算法优化隶属函数和模糊规则具有一定的优越性,从实时性来看,遗传算法耗时长,采用离线计算。从仿真结果可以看出,智能 FPID 控制与常规 PID 控制相比,调节更为平稳,调节速度更快。当系统的工况参数发生变化或扰动时,系统的动态品质劣化程度较小,说明智能 FPID 控制系统提高了控制系统的适应能力和鲁棒性,改善了系统的动态、静态品质。

## 参考文献

- [1] YE Lu-qing, WEI Shou-ping. Microprocessor-based Adaptive Governor with Variable PID Parameters for a Hydroelectric Generating Unit. In: Proceedings of Symposium on Mini and Microcomputers and Their Applications. Bari (Italy): 1984.
- [2] 梁宏柱. 参数自适应模糊 PID 控制器及其在水电机组调速器中的应用. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(6): 26—29.
- [3] 张志学. 水轮机调速系统的 PID 参数模糊整定. 水电自动化与大坝监测, 2002, 26(1): 34—36.
- [4] 沈祖诒. 水轮机调节系统分析. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [5] 汤兵勇. 模糊控制理论与应用技术. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] REZNIK L, GHANAYEM O, BOURMISTROV A. PID Plus Fuzzy Controller Structures as a Design Base for Industrial Applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(4): 419—430.

王淑青(1969—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为智能检测与控制、系统分析与集成。E-mail: wangqing9711@163.com

## Intelligent Fuzzy PID Control System for Water-turbine Generator Set

WANG Shu-qing<sup>1</sup>, ZHANG Zi-peng<sup>2</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to overcome the shortcoming of the conventional hydraulic turbine PID governor, a new self-tuning fuzzy PID control method is proposed. The output of fuzzy reasoning can adjust PID parameters in the process of control. The way of adjusting PID parameters to obtain the optimal control effectiveness is discussed. Simulation results show that it is better than the traditional PID control strategy, and has good dynamic character and stability.

**Key words:** fuzzy reasoning; PID control; water-turbine generator set; genetic algorithm