

文章编号: 1008-1542(2011)02-0133-05

# 多项式方程法在水轮发电机调速器中的应用

韩 宁<sup>1</sup>, 刘建业<sup>1</sup>, 雷亚清<sup>2</sup>, 李银辉<sup>3</sup>, 高 伟<sup>4</sup>

(1. 河北科技大学电气信息学院, 河北石家庄 050018; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西西安 710049; 3. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北保定 071000; 4. 中国海洋局第一海洋研究所海洋生态研究中心, 山东青岛 266061)

**摘 要:** PID 控制、最少拍控制均存在对系统参数敏感的问题, 对于水轮发电机组具有参数时变性和非最小相位特性这样的系统, 上述 2 种控制都难以达到满意的控制效果, 但通过对 PID 控制过程的数据挖掘, 用 MATLAB 中的 regress 函数可得到控制器的线性解析式, 这个多项式方程包含了 PID 控制规律, 但又具有对系统参数不敏感的特点, 应用于水轮发电机组调速系统表现出了很强的鲁棒性。

**关键词:** 水轮发电机; 调速器; 最少拍控制; PID 控制; 多项式方程法

中图分类号: TP29 文献标志码: A

## Application of polynomial equation method to hydro-generating speed governor

HAN Ning<sup>1</sup>, LIU Jian-ye<sup>1</sup>, LEI Ya-qing<sup>2</sup>, LI Yin-hui<sup>3</sup>, GAO Wei<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Information Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. College of Electrical Engineering, Xi'an JiaoTong University, Xi'an Shaanxi 710049, China; 3. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071000, China; 4. Research Center for Marine Ecology, First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao Shandong 266061, China)

**Abstract:** The PID control and the minimum control are both sensitive to system parameters. For a system as the hydro-generating unit with a parameter variability and non-minimum phase, the above-mentioned two kinds of control are difficult to achieve satisfactory control performance. But based on PID control process of data mining, using the regress function in MATLAB can obtain the linear analytical formula of the controller. This polynomial equation contains a PID control law as well as the characteristics of not sensitive to the system parameters, and has shown strong robustness when applied in the speed control system of hydro-generating unit.

**Key words:** hydro-generator; speed governor, the minimum control; PID control; polynomial equation method

水轮机调速系统包括引水系统、水轮机、调速器、发电机及励磁系统等几个部分, 是一个集水力、机械、电气为一体的复杂控制系统<sup>[1]</sup>。其中调速器<sup>[2-4]</sup>的主要作用是以机组转速偏差为依据来调节导叶开度以改变水力矩, 使机组转速恢复并保持在特定转速。但由于压力引水系统的水流惯性、水轮发电机组各个环节的非

收稿日期: 2010-11-18; 责任编辑: 李 穆

基金项目: 海洋公益性行业专项资金资助项目(200805039)

作者简介: 韩 宁(1984), 女, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事变频器方面的研究。

通讯作者: 刘建业教授。E-mail: liujianye9988@sina.com

线性特性、水轮机传递系数随工况而改变的时变特性以及随时发生的电力系统负荷扰动使得水轮机调节系统的控制十分困难。所以,水轮发电机组调速器的设计除满足控制精度要求之外,还必须具有很强的鲁棒性<sup>[5-6]</sup>,以保证机组安全运行及电能质量。

## 1 最少拍控制器

水轮机调节系统的特点在于:一是被控对象本质上是一个非线性和非最小相位系统,调节过程中会出现反调节现象,控制系统不易稳定;二是调节系统的工况受水头和负载特性的影响,其表征控制对象传递函数的参数具有时变的性质,对调节系统的动态特性影响较大。

根据参考文献[6],水轮发电机组调速系统模型见图1。

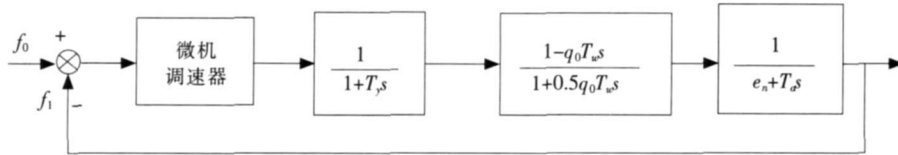


图1 水轮发电机组调速系统模型

Fig. 1 Hydro-generating speed governing control system model

$$G(s) = \frac{1}{1+T_y s} \cdot \frac{1-q_0 T_w s}{1+0.5 q_0 T_w s} \cdot \frac{1}{e_n + T_a s} \quad (1)$$

其中:取水轮发电机组的模型参数为  $T_y = 0.35$  s,  $q_0 T_w = 1.5$  s,  $e_n = 0.25$ ,  $T_a = 8.0$  s。

则

$$G_0(s) = \frac{1}{1+0.35s} \cdot \frac{1-1.5s}{1+0.75s} \cdot \frac{1}{0.25+8s} \quad (2)$$

其广义对象的Z传递函数为

$$G(z) = (1-z^{-1}) \cdot Z\left[\frac{1}{s} G_0(s)\right], \quad (3)$$

其中:

$$Z\left[\frac{1}{s} G_0(s)\right] = \frac{z}{z-1} - 0.05 \frac{z}{z-A} + 0.05 \frac{z}{z-B} - 1.08 \frac{z}{z-C}, \quad (4)$$

$$A = e^{-2.86T}, B = e^{-1.33T}, C = e^{-0.03T},$$

则

$$G(z) = (1-z^{-1}) \cdot Z\left[\frac{1}{s} G_0(s)\right] = \frac{2.08 - Hz^{-1} + Iz^{-2} - Kz^{-3}}{1 - Ez^{-1} + Fz^{-2} - Gz^{-3}}. \quad (5)$$

其中:  $E = A + B + C$ ,  $F = AB + BC + CA$ ,  $G = ABC$ ,  $H = 1.08 + 2.03A + 2.13B + C$ ,  $I = 1.13B + 1.03A + 2.08AB + 1.05BC + 0.95CA$ ,  $K = ABC + 0.05BC - 0.05CA + 1.08AB$ 。

当步距  $T = 0.04$  s 时,有  $A = 0.89$ ,  $B = 0.95$ ,  $C = 1$ ,  $E = 2.84$ ,  $F = 2.69$ ,  $G = 0.85$ ,  $H = 5.9$ ,  $I = 5.59$ ,  $K = 1.77$ 。

代入可得广义对象的Z传递函数为

$$G(z) = \frac{2.08 - Hz^{-1} + Iz^{-2} - Kz^{-3}}{1 - Ez^{-1} + Fz^{-2} - Gz^{-3}} = \frac{2.08 - 3.82z^{-1} + 1.77z^{-2}}{1 - 1.84z^{-1} + 0.85z^{-2}}, \quad (6)$$

按最少拍控制器设计法<sup>[3]</sup>得调速器脉冲传递函数  $D(z)$  为

$$D(z) = \frac{1}{G(z)} \cdot \frac{M(z)}{1-M(z)} = \frac{1-1.84z^{-1}+0.85z^{-2}}{2.08-3.82z^{-1}+1.77z^{-2}} \cdot \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{z^{-1}-1.84z^{-2}+0.85z^{-3}}{2.08-5.9z^{-1}+5.59z^{-2}-1.77z^{-3}}, \quad (7)$$

阶跃扰动下调速器过程输出为

$$U(z) = \frac{M(z)}{G(z)} \cdot W(z) = \frac{1-1.84z^{-1}+0.85z^{-2}}{2.08-3.82z^{-1}+1.77z^{-2}} \cdot \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} =$$

$$\frac{z^{-1} - 1.84z^{-2} + 0.85z^{-3}}{2.08 - 5.9z^{-1} + 5.59z^{-2} - 1.77z^{-3}} = 0.48(z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots) \quad (8)$$

阶跃扰动下系统输出为

$$Y(z) = M(z)W(z) = z^{-1} \frac{1}{1 - z^{-1}} = z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots \quad (9)$$

理论上看起来,该系统是一个稳定的控制系统。但如果实际对象的传递函数发生微小的变化,比如变成下面的式子,则

$$G^*(z) = \frac{2.08 - 3.82z^{-1} + 1.77z^{-2}}{1 - 1.85z^{-1} + 0.85z^{-2}} \quad (10)$$

那么在使用上述最少拍控制器的情况下,闭环传递函数将变为

$$M^*(z) = U(z)G^*(z) = \frac{z^{-1} - 1.84z^{-2} + 0.85z^{-3}}{1 - 2.85z^{-1} + 2.7z^{-1} + 0.85z^{-2}} \quad (11)$$

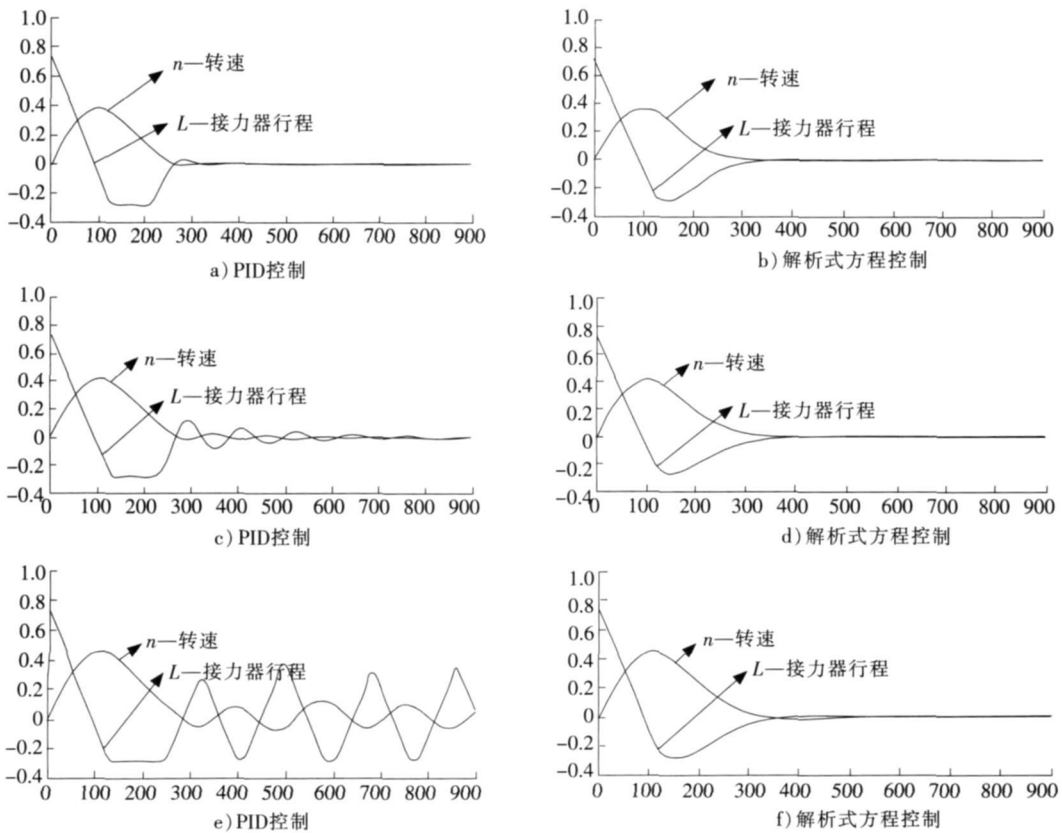
在输入为单位阶跃时

$$Y^*(z) = M^*(z)W(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} \frac{z^{-1} - 1.84z^{-2} + 0.85z^{-3}}{1 - 2.85z^{-1} + 2.7z^{-1} + 0.85z^{-2}} = z^{-1} + 2.01z^{-2} + 3.04z^{-3} + 4.1z^{-4} + \dots \quad (12)$$

输出系列为 0, 1, 2.01, 3.04, 4.1 等,在参数发生微小变化时,闭环系统不再稳定。上述分析说明最少拍控制系统虽然在理论上能保证系统很快稳定,但实际上并不适用于本水轮机调速系统。

## 2 常规 PID 控制器

水轮发电机组调速系统 PID 控制与多项式方程法控制效果比较见图 2。



注:各分图的横坐标为时间,用仿真次数表示;纵坐标为转速或接力器行程,用标么值表示。

图 2 水轮发电机组调速系统 PID 控制与多项式方程法控制效果比较

Fig. 2 Effectiveness comparison between the PID control and polynomial equation

method control both in hydro-generating speed regulation

常规 PID 控制器为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{T_{IS}} + K_D T_{DS} \quad (13)$$

PID 控制器参数  $K_P, K_I, K_D$  的推荐初始参数范围见式(14)<sup>[2]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} 0.33T_a/T_w \leq K_P \leq 0.67T_a/T_w \\ 0.167K_P/T_w \leq K_I \leq 0.33K_P/T_w \\ 0.4T_w K_P \leq K_D \leq 0.6T_w/K_P \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中:  $T_w$  为水轮机及引水管道惯性时间常数;  $T_a$  为发电机转子惯性时间常数。

设  $T_w = 0.5, T_a = 5.0$ 。由公式(14)取 PID 控制器调节参数分别为  $K_P = 4.5, K_I = 2.3, K_D = 1.2$ 。将此 PID 控制器应用于水轮机及引水管道惯性时间常数  $T_w$  分别为 0.5, 0.8 和 1.0 代表的 3 个水轮发电机组调速系统的阶跃扰动过程控制, 仿真结果见图 2 a)、图 2 c)、图 2 e)。

结果表明, 常规 PID 控制器对于特定线性定常系统有理想的控制效果; PID 控制器调节参数对系统参数敏感, 用一组调节参数的 PID 控制器不能满足同一类型但不同系统的控制要求, 严重时甚至产生振荡。

### 3 多项式方程法

#### 3.1 数据源的获取方法

通过对前面 PID 控制系统过程仿真, 可以得到控制全过程的  $E, E_c, u$  的数据。其中  $E, E_c$  分别为 PID 输入偏差和偏差变化率,  $u$  为 PID 控制器输出。根据 3 种工况下响应曲线取 100% 甩负荷时 14 组数据, 取上扰 20%、下扰 20% 时各 11 组数据, 这些数据包含了响应过程中  $E, E_c, u$  的全部范围, 即最大、最小值都包含在内。并且数据主要取自振荡过程, 对于稳定过程只取一两组数, 这样数据组信息就包含了 PID 对于过程变化的控制规律。将这些数值综合, 列成表格如表 1 所示。

表 1 由 PID 控制器得到的关于  $E, E_c, u$  的数据组  
Tab.1  $E, E_c, u$  data group derived from the PID controller

$k$	$E(k)$	$E_c(k)$	$u(k)$	$k$	$E(k)$	$E_c(k)$	$u(k)$	$k$	$E(k)$	$E_c(k)$	$u(k)$
1	-0.0127	-0.1587	0.4562	13	0.0001	-0.0045	-0.0009	25	0.0001	-0.0001	0.0004
2	-0.0516	-0.1649	0.2420	14	-0.0015	0.0010	-0.0045	26	-0.2	0	0.72
3	-0.1166	-0.1580	-0.1270	15	0.2	0	-0.28	27	-0.2103	-0.0333	0.0877
4	-0.1649	-0.1447	-0.28	16	0.2	-0.0026	-0.2043	28	-0.2271	-0.0168	-0.2650
5	-0.3545	-0.0473	-0.28	17	0.1999	0.0043	-0.0622	29	-0.2286	0.0098	-0.28
6	-0.3706	0.0244	-0.28	18	0.2044	-0.0058	0.2720	30	-0.1578	0.0708	-0.28
7	-0.3047	0.0765	-0.28	19	0.1073	-0.0890	0.3914	31	-0.0768	0.0596	-0.2040
8	-0.2124	0.0751	-0.28	20	-0.0177	-0.0129	0.0067	32	-0.0226	0.0317	-0.0955
9	-0.1368	0.0707	-0.2744	21	-0.02	0.0005	-0.0143	33	0.0046	0.0063	-0.0124
10	-0.0823	0.0721	-0.1914	22	-0.0145	0.0067	-0.0272	34	0.0070	0.0006	0.0035
11	-0.0300	0.0548	-0.0616	23	-0.0009	0.0021	-0.0058	35	0.0063	-0.0018	0.0091
12	0.00695	0.0015	0.0263	24	0.0005	0.0005	-0.0009	36	-0.0002	-0.0002	0.0005

#### 3.2 多项式方程法控制器的设计及仿真

在 MATLAB 里面有很多函数可以对已知数据进行拟合, 对于  $z = f(x, y)$  类型的函数进行拟合, 可以进行线性拟合, 即  $z = ax + by + c$ , 或者是进行带平方项的拟合, 即

$z = ax + by + cxy + dx^2 + ey^2 + f$ , 分别对所得数据进行以上拟合, 结果如下。

1) 用 rstool 函数得到的控制器的非线性解析式为

$$u = 0.0279 + 0.0674E - 2.1615E_c - 1.9368E^2 - 9.3118E_c^2 \quad (17)$$

将拟合结果放入系统进行仿真试验, 结果发现调节过程长, 存在较大静差。放弃此拟合结果。

2) 用 regress 函数得到的控制器的线性解析式为

$$u = 0.5089E - 1.3082E_c. \quad (18)$$

regress 函数还能得到各系数的 95% 的置信区间和显著性概率  $P$ 。

$$\begin{aligned} b &= 0.5089 \sim 1.3082, \\ \text{bint} &= [0.0562 \sim 0.9616], [-2.4132 \sim -0.2032], \\ \text{stats} &= 0.0017. \end{aligned} \quad (19)$$

其中:  $b$  即为所得到的拟合系数;  $\text{bint}$  为各系数的 95% 置信区间, 由此可知, 经人为调整后  $E$  的系数仍在该范围内, 因此其可信度是很高的;  $\text{stats}$  的值为显著性概率  $P$ , 显著性概率  $P = 0.0017$ , 小于 0.05, 故拒绝零假设, 认为回归方程中至少有一个自变量的系数不为零, 回归方程有意义<sup>[7]</sup>。

将解析式  $u = 0.5089E - 1.3082E_c$  用差分方程表示为

$$u(k) = 0.5089E(k) - 1.3082E_c(k). \quad (20)$$

将解析式控制器也应用于水轮机及引水管道惯性时间常数  $T_w$  分别为 0.5, 0.8 和 1.0 代表的 3 个水轮发电机组调速系统的阶跃扰动过程控制, 仿真结果见图 2 b)、图 2 d)、图 2 f)。

针对水轮发电机组调速系统的阶跃扰动过程, 对比 PID 控制器和多项式方程控制器调速控制效果, 发现多项式方程控制器对系统参数不敏感, 表现出很强的鲁棒性。多项式方程控制器有类似于 T-S 模糊控制器的解析描述<sup>[8]</sup>, 不同之处在于后者对控制器的输入空间进行了区域划分, 其实质是引入了非线性; 而前者钝化了输入空间不同区域间控制器解析描述函数的差异, 使控制输出更加平滑, 不存在 T-S 模糊控制器在区域切换时的抖动现象。

## 4 结 论

针对水轮发电机组调速系统这样一个特殊应用场合, 分析了最少拍控制和 PID 控制存在的问题和不足。提出了多项式方程法设计控制器, 这种控制器是通过挖掘已知的 PID 控制过程数据, 再经过数值分析和数据处理而获得的。通过水轮发电机组调速系统 PID 控制与多项式方程法控制效果比较, 多项式方程法控制对系统参数不敏感, 表现出很强的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] 郑玉森, 刘建业, 张炳达. 水利发电机组调速系统大扰动仿真[J]. 天津大学学报(Journal of Tianjin University), 1996, 39(2): 287-291.
- [2] 魏守平, 卢本捷. 水轮机调速器的 PID 调节规律[J]. 水力发电学报(Journal of Hydroelectric Engineering), 2003(4): 112-118.
- [3] 吴淑花, 刘振永, 郝建红, 等. 耦合发电机系统的动力学分析及其自适应控制[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2010, 31(3): 214-218.
- [4] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans SMC PB: Cybernetics, 1997(5): 884-889.
- [5] 王 军, 韩建兵, 付占稳, 等. 基于模糊 PID 控制的过程控制实验系统的研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2005, 26(2): 150-152.
- [6] 刘建业, 郑玉森, 张炳达. 水轮机模糊调速器研究[J]. 控制理论与应用(Control Theory & Applications), 1996(2): 47-51.
- [7] 林富华, 沈思源, 林建亚, 等. 模糊 PID 控制技术在水轮机调速系统中的应用[J]. 动力工程(Power Engineering), 1996(2): 51-54.
- [8] 刘朝英, 王惠芳, 宋雪玲, 等. 一种改进的模糊调节神经网络及其应用[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2008, 29(4): 295-298.