

水轮机模糊滑模控制器设计方法

李柯洁¹, 李启升², 张博雅¹, 钱殿伟¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要:针对水轮机调速系统,提出了一种基于模糊逻辑的滑模调速器设计方法。根据系统状态到滑模超平面的距离与切换控制增益之间的先验知识,设计了模糊推理系统用于实时调节控制器的增益,有效地减小了滑模控制器的抖振问题。仿真结果验证了这种控制方法的可行性和鲁棒性。

关键词:滑模控制;调速系统;水轮发电机组

中图分类号:TV734.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)S2-0049-03

近年来,国内外的专家学者针对水电厂流速控制系统线性模型提出了许多线性控制方法。Arnautovic^[1]提出了一种水电涡轮机控制器的次优控制策略;Jiang^[2]针对水轮机调速系统提出了一种鲁棒最优控制策略。但由于上述方法控制律的设计需要在一个特定的操作点上,很难改善其暂态稳态性能并对变化信号做出快速响应。另外,针对水轮机调速系统也有许多非线性控制方法。

滑模控制^[3]作为一种非线性反馈控制技术,具有良好的鲁棒性,是水力发电调速问题很好的解决方案。本文在滑模控制理论基础上,针对水电单元系统提出了一种模糊滑模控制方法。水轮机滑模调速系统设计需要解决2个问题:一是何为预定义的滑模面,二是如何减少滑模控制的抖振问题。

1 水力发电厂的数学模型

图1为1个在孤立网络上运行的水轮机调速器系统,该系统主要由3个部分组成:伺服机构、水轮机和闸门、发电机和网络。

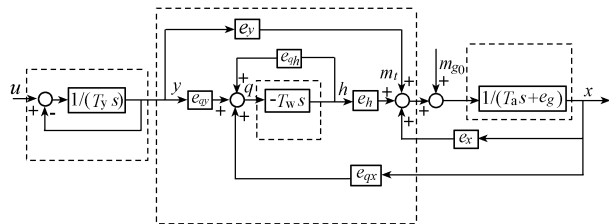


图1 水轮机调速系统

如图1所示,该系统包括控制输入值 u 、水压力

偏差 h 、流量偏差 q 、涡轮转速偏差 x 、导叶接力器行程偏差 y 、水轮机转矩偏差 m_t 、负载转矩 m_{g0} 、导叶接力器响应时间 T_y 、水流惯性时间 T_w 、发电机组机械时间 T_a 、负载自我调节因子 e_g 、拉普拉斯算子 s 。其余的水轮机调速系统时变转移参数定义如下:

$$e_x = \frac{\partial m_t}{\partial x} \quad e_y = \frac{\partial m_t}{\partial y} \quad e_h = \frac{\partial m_t}{\partial h}$$
$$e_{qx} = \frac{\partial q}{\partial x} \quad e_{qy} = \frac{\partial q}{\partial y} \quad e_{qh} = \frac{\partial q}{\partial h}$$

1.1 伺服机构

控制输入值和导叶接力器行程偏差的关系式为

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

1.2 水轮机和闸门

1.2.1 压力

若闸门较短或中等长度,考虑水锤效应,水和管道应看作是**不可压缩的

$$\frac{L(h)}{L(q)} = -T_w s$$

1.2.2 涡轮

在一个特定的运行点附近,水轮机的数学模型可表示为

$$m_t = e_x x + e_y y + e_h h$$
$$q = e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h$$

2 发电机和电网

考虑发电机组需要带动一个独立的负载,因此其动态过程就需考虑负载的特性:

$$\frac{L(x)}{L(m_l - m_{g0})} = \frac{1}{T_a s + e_g}$$

从状态空间出发,以上调速系统看作是 1 个三阶系统,其系统状态变量:导叶接力器行程偏差 $x_3 = x_y$, 涡轮转矩偏差 $x_2 = m_l$, 水轮机调速器偏差 $x_1 = x_o$ 。在状态反馈控制中,定义

$$x_4 = \int_0^\infty x_1 dt$$

综上所述,带有附加状态的水轮机调速系统的状态空间表达式为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{F}d(t) \quad y = \mathbf{C}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$$

$$\mathbf{B} = \left(0, -\frac{e_{qy}e_h - e_{qh}e_y}{T_y e_{qh}}, \frac{1}{T_y}, 0 \right)^T$$

$$\mathbf{C} = (1, 0, 0, 0)$$

$$\mathbf{F} = \left(\frac{1}{T_a}, 0, 0, 0 \right) d(t) = m_{g0}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{e_g - e_x}{T_a} & \frac{1}{T_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{e_{qh}T_w} & \frac{e_{qh}e_h - e_{qh}e_y}{T_y e_{qh}} + \frac{e_y}{e_{qh}T_w} & \frac{e_{qy}e_h - e_{qh}e_y}{T_y e_{qh}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_y} & -\frac{1}{T_y} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3 模糊滑模变结构控制器设计

3.1 滑模控制器设计

一般,滑模控制律分两部分:切换控制律 u_{sw} 和等效控制律 $u_{eq}^{[3]}$ 。控制律

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (2)$$

定义滑动平面

$$S = \mathbf{C}^T \mathbf{x} = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4$$

系统达到切换平面后有

$$\dot{S} = \mathbf{C}^T \dot{\mathbf{x}} = 0 \quad (3)$$

将式(1)代入式(3),得

$$u_{eq} = -(\mathbf{C}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (4)$$

为保证系统稳定性,定义 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} S^2 \quad (5)$$

对式(5)进行求导并分别将式(3)、式(1)和式(2)代入得

$$\frac{dV}{dt} = S \dot{S} = S[\mathbf{C}^T \dot{\mathbf{x}}] = S[\mathbf{C}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t))] =$$

$$S\{\mathbf{C}^T [\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}(u_{eq} + u_{sw}) + \mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)]\}$$

$$= S[\mathbf{C}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}u)_{eq} + \mathbf{C}^T \mathbf{B}u_{sw} + \mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)] =$$

$$S[\mathbf{C}^T \mathbf{B}u_{sw} + \mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)] \quad (6)$$

令 $\mathbf{C}^T \mathbf{B}u_{sw} = -kS - \eta \text{sgn}(S)$
式中: k, η 为常数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,则

$$u_{sw} = -(\mathbf{C}^T \mathbf{B})^{-1} [kS + \eta \text{sgn}(S)] \quad (7)$$

因此总的控制量为

$$u = u_{eq} + u_{sw} = -(\mathbf{C}^T \mathbf{B})^{-1} [\mathbf{C}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + kS + \eta \text{sgn}(S)] \quad (8)$$

将式(7)代入式(6),有

$$\frac{dV}{dt} = S[-kS - \eta \text{sgn}(S) + \mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)] \leq -kS^2 - \eta |S| +$$

$$|S| |\mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)| \leq -kS^2 - [\eta - |\mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)|] |S| \quad (9)$$

通过定义 $D_M = \sup |\mathbf{C}^T \mathbf{F}d(t)|$, 可知存在 $\frac{dV}{dt} \leq -kS^2 - (\eta - D_M) |S| < 0$, 若 $\eta > 0$, 则控制系统渐进稳定。

3.2 模糊推理系统设计

融合有关滑模控制的先验知识,如果系统状态与滑模平面相距较远,就需要一个较大增益值 k 。根据滑模平面的可达性条件,选择滑动面 S 与其一阶导数的乘积 $\dot{S}$ 作为输入变量, k 以及 Δk 作为输出变量。则这个模糊推理系统的 If-Then 规则库设计如下:

若 $\dot{S}S$ 是 PB, 则 Δk 是 PB; 若 $\dot{S}S$ 是 PM, 则 Δk 是 PM; 若 $\dot{S}S$ 是 ZO, 则 Δk 是 ZO; 若 $\dot{S}S$ 是 NM, 则 Δk 是 NM; 若 $\dot{S}S$ 是 NB, 则 Δk 是 NB。NB, NM, ZO, PM, PB 分别表示负方向的大、中、零以及正方向的中和大。图 2 为以 $\dot{S}S$ 为输入、 Δk 为输出的输出平面图。经过模糊逻辑调整后 k 的最终值为 $k = k_0 + 2\Delta k$, 其中 k_0 为常数。由图 3 可知, Δk 的区间为 $[-0.6, 0.6]$, 因此在 $dV/dt \leq 0$ 的条件下得 $k_0 \geq 1.2$ 。

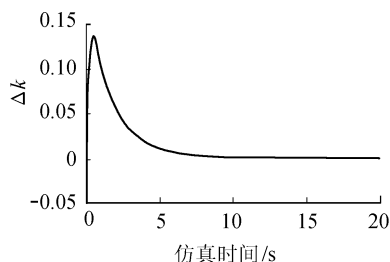


图2 增益增量的输出

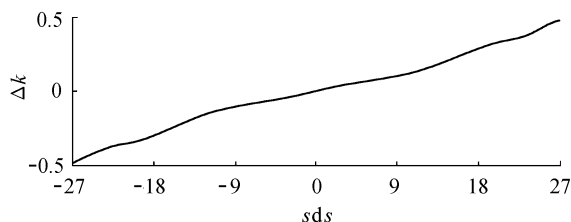


图3 模糊推理系统的输出

4 仿真结果

水力发电厂采用的水轮机调速系统为单机带孤立系统的运行模式,它的参数分别为 $T_w = 1.10$, $T_a = 6.65$, $T_y = 0.5$, 其余的时变转移系数如表 1 所示。

表 1 水轮机调速转移参数

工况	e_x	e_y	e_h	e_{qx}	e_{qy}	e_{qh}	e_g
1	-0.30	0.74	1.46	0	0.79	0.49	0.2
2	-0.26	1.92	0.92	0	1.06	0.35	0.2

利用工况 1 的参数,可得由遗传算法搜索到的滑动平面的参数为

$C = (530.8584, 35.3340, 63.0596, 200.6197)^T$

在此过程中,为加快参数的搜索速度,可将增益和系数分别定义为 $k=1.2, \eta=0.2$ 。图 4 和图 5 为在 10% 的负载扰动下的仿真结果。由图 5 可以看出,由于采用了模糊推理系统,有效减小了抖振现象。为了验证该系统的鲁棒性,将工况 2 的参数代

入,同时滑模平面参数仍使用 c ,这个系统状态同样是在 10% 负载扰动下,得到结果如图 6 所示。

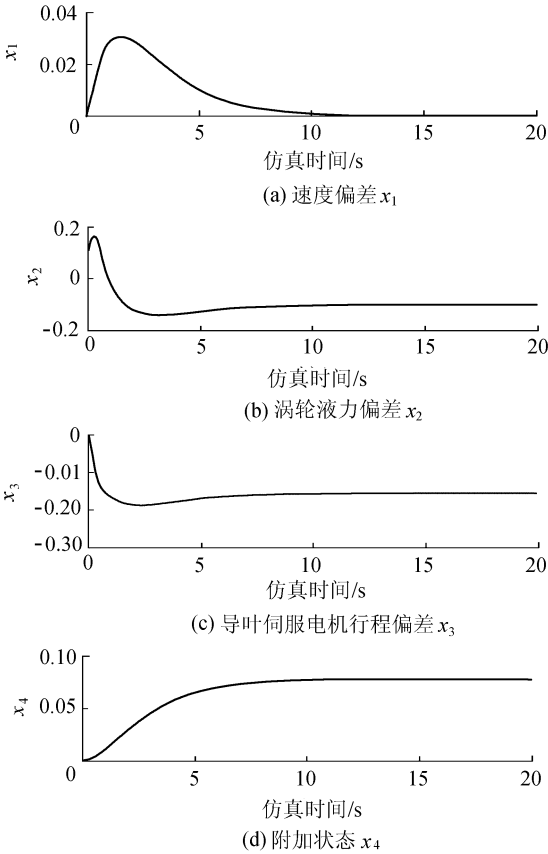


图 6 工况 2 下 10% 负荷扰动时系统的状态输出

5 结 论

本文针对水轮机调速系统,提出了一种基于遗传算法的滑模调速器设计方法。通过采用遗传算法寻找滑模平面的参数,设计了一个模糊推理系统用于调节控制器的增益,从而有效地减小滑模控制器的抖振问题。仿真结果验证了该方法的鲁棒性和可行性。

参考文献:

[1] ARNAUTOVIC D B. Suboptimal design of hydroturbine governors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(4): 438-444.

[2] JIANG J. Design of an optimal robust governor for hydraulic turbine-generating units[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(1): 188-194.

[3] UTKIN V I. Sliding Modes in Control and Optimization [M]. New York: Springer-Verlag, 1992.

[4] IEEE COMMITTEE REPORT. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 167-178.

(收稿日期:2012-07-25 编辑:胡新宇)

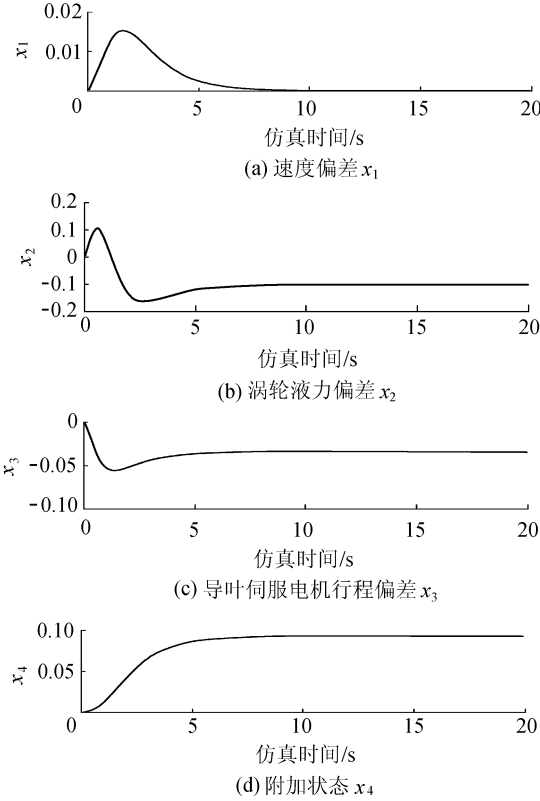


图 4 工况 1 下 10% 负荷扰动时系统的状态输出

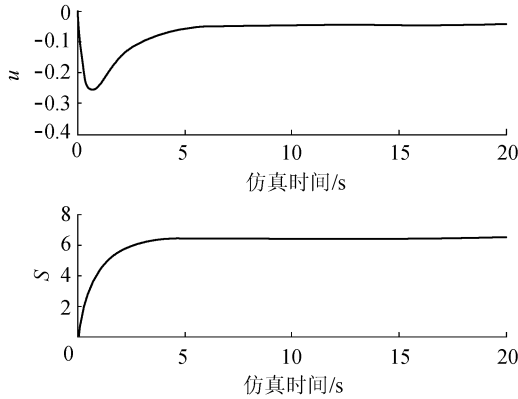


图 5 控制量和滑模平面的输出