

文章编号: 1001-0920(2008)06-0705-04

基于逆动力学模糊规则的单元机组协调控制

陈红, 邓良才, 王广军
(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044)

摘要: 通过单元火电机组动态特性分析, 获得了一种简单的机组负荷对象逆动力学模型结构. 建立了单元机组逆动力学过程模糊规则 (IDFR) 模型, 并利用递推最小二乘辨识方法对机组逆动力学过程模糊规则进行在线修正. 将 IDFR 直接作为控制规则, 提出了一种基于 IDFR 的机组负荷控制方法, 构造了单元机组负荷对象协调控制系统. 通过仿真实验考察了所提出的控制系统的有效性和适应性.

关键词: 火电机组; 逆动力学; 协调控制

中图分类号: TM621.6

文献标识码: A

Coordinated control based on inverse dynamic fuzzy rules for power unit

CHEN Hong, DENG Liang-cai, WANG Guang-jun

(School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Correspondent: CHEN Hong, E-mail: chenh@cqu.edu.cn)

Abstract: A simple model structure of inverse dynamics of power unit is constructed through analyzing the dynamic characteristics of the power unit. The inverse dynamic fuzzy rules (IDFR) model of power unit is built and inverse dynamic fuzzy rules are modified on-line by recursive least-square identification algorithm. A control method for power unit is presented based on IDFR and a coordinated control system is constructed by using IDFR as control rules. The simulation results show the effectiveness and adaptability of the control system.

Key words: Power unit; Inverse dynamic; Coordinated control

1 引言

单元火电机组是典型的具有多输入多输出 (MIMO) 的非线性时变系统, 各变量之间存在严重的耦合, 其准确模型难以建立, 以 PID 控制为基础的常规协调控制难以获得理想的控制效果. 人们针对单元机组协调控制系统已经提出了多种设计方法. 文献[1]通过解耦控制、模糊推理及模糊自校正等技术的有机集成, 提出了机组协调控制系统的一种设计方法, 并获得了成功应用. 模糊控制和多模型控制为改善机组协调控制性能提供了很好的研究思路^[2-5]. 多模型控制在若干工作点建立多个固定模型并设计相应的控制器, 根据系统工况变化选择相应的控制输出. 为提高控制性能, 通常需要较多的固定模型, 导致控制系统的计算量和复杂性显著增加. 模糊控制器的设计不依靠对象精确数学模型, 与传统的 PID 控制相比具有较为明显的优势. 由于模糊

控制规则主要基于专家经验构造, 如何设计与控制对象特性相匹配的控制规则以及根据对象特性对模糊控制规则进行自动调整, 仍然是需要解决的问题^[6]. 对于 MIMO 系统, 上述问题无疑将更加突出. 文献[7]研究了一类 SISO 热工对象逆动力学辨识问题, 通过对象逆动力学过程模糊辨识, 能够在线获得对象的控制规则. 对于 MIMO 系统, 其逆动力学问题更加复杂, 需要进一步研究.

本文通过对单元机组动态过程的分析, 提出了一种结构简单的机组负荷对象逆动力学模型及其模糊辨识方法, 并以在线获得的逆动力学模糊规则 (IDFR) 作为控制规则, 构造了一种基于 IDFR 的机组协调控制系统.

2 机组负荷对象逆动力学模型结构

2.1 逆动力学模型及其可实现性

系统逆动力学问题的核心内容在于, 由已知或

收稿日期: 2007-04-16; 修回日期: 2007-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50476041).

作者简介: 陈红 (1970—), 女, 贵州丹寨人, 讲师, 博士, 从事热力系统仿真与控制等研究; 王广军 (1963—), 男, 黑龙江双城人, 教授, 博士生导师, 从事热力系统仿真与控制等研究.

所期望的系统输出过程反演系统的输入过程。

对于机组负荷对象,记 y_1 和 y_2 分别为机组发电功率和主蒸汽压力的相对变化, u_1 和 u_2 分别为汽轮机调门指令和锅炉燃烧率指令的变化。

动态系统的输出 $y_j(t)$ 是 t 时刻前系统输入的累积效应。假定系统在当前时刻的输出 $y_j(t)$ 的变化分别对不同历史时刻的输入 $u_1(t-t_{1j})$ 和 $u_2(t-t_{2j})$ 最为敏感,则称 t_{ij} 为关于 u_i 与 y_j 间的最大相关延迟时间,称 $u_1(t-t_{1j})$ 和 $u_2(t-t_{2j})$ 为 $y_j(t)$ 的主导输入参数。

若已知机组各输出的最大相关延迟时间 t_{ij} ,则系统输出可由其主导输入参数近似表达,即

$$y_1(t) = f_1[u_1(t-t_{11}), u_2(t-t_{21})], \quad (1)$$

$$y_2(t) = f_2[u_1(t-t_{12}), u_2(t-t_{22})]. \quad (2)$$

理论上,可直接由式(1)和(2)构造系统逆动力学反演关系。分别以 $t = t + t_{11}$ 和 $t = t + t_{22}$ 代入式(1)和(2),则存在以下2个映射关系 f_3 和 f_4 :

$$u_1(t) = f_3[y_1(t+t_{11}), u_2(t-t_{21}+t_{11})], \quad (3)$$

$$u_2(t) = f_4[y_2(t+t_{22}), u_1(t-t_{12}+t_{22})]. \quad (4)$$

只有当 $t_{11} < t_{21}$ 且 $t_{12} < t_{22}$ 时,上述反演关系才是可以实现的;否则,意味着反演过程中需利用系统的未来输入信息,这显然是不现实的。因此,为确定机组逆动力学模型结构,必须认真考虑各通道最大相关延迟时间的相互关系。

2.2 单元机组逆动力学模型结构

首先考察由 u_1 到系统输出的2个通道的动态过程。汽轮机调节阀开度变化后,机组发电功率几乎会立即接近于成比例变化;由于系统具有强烈的热惯性,当主汽压力出现波动之后,系统将通过改变蓄热对压力变化进行补偿。因此有

$$\begin{cases} t_{11} < 0, \\ t_{12} > t_{11}. \end{cases} \quad (5)$$

当燃料量 u_2 发生变化后,机组发电功率和主蒸汽压力的变化具有十分明显的延迟,且该延迟明显大于由 u_1 到系统输出的动态延迟。故

$$\begin{cases} t_{21} < t_{22}, \\ t_{22} > t_{12}. \end{cases} \quad (6)$$

这样,式(3)可近似表达为

$$u_1(t) = f_3[y_1(t), u_2(t-t_{21})]. \quad (7)$$

由式(5)和(6)易知,根据式(7)进行 $u_1(t)$ 的反演过程具有可实现性。

由于 $t_{22} > t_{12}$,由式(4)反演 $u_2(t)$ 是不可实现的。令 $t = t + t_{12}$,代入式(2),则有以下映射表达:

$$u_1(t) = f_5[y_2(t+t_{12}), u_2(t+t_{12}-t_{22})]. \quad (8)$$

令式(7)和(8)相等,有

$$f_3[y_1(t), u_2(t-t_{21})] =$$

$$f_5[y_2(t+t_{12}), u_2(t+t_{12}-t_{22})].$$

取变量替换 $t = t - t_{12} + t_{22}$,并考虑式(5)和(6),则有如下反演映射关系 f_6 :

$$u_2(t) = f_6[y_1(t+t_{22}-t_{12}), y_2(t+t_{22}), u_2(t-t_{12})]. \quad (9)$$

显然,式(9)所示的逆动力学模型具有可实现性。

3 机组逆动力学模型的模糊在线辨识

式(7)和(9)确定了单元机组逆动力学过程模型的基本结构。本文借鉴文献[7]给出的基于模糊规则和递推最小二乘法的非线性系统建模方法,实现机组负荷对象逆动力学模型的在线辨识。在建模过程中,首先根据对象动态过程相关分析,由运行历史数据确定对象的最大相关延迟时间 t_{ij} [8]。这里以 $u_2(t)$ 为例简单说明。

由式(9),逆动力学模型的输入向量

$$v = [y_1(t+t_{22}-t_{12}), y_2(t+t_{22}), u_2(t-t_{12})].$$

逆动力学模型第 k 条模糊规则

$$\text{if } v \in (c_i, r_i),$$

$$\text{then } u_i = \sum_{k=1}^n z_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

逆动力学模糊推理如下:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i u_i / \sum_{i=1}^n w_i, \quad w_i > 0; \quad (11a)$$

$$u = w_k u_k + w_h u_h, \quad w_i = 0. \quad (11b)$$

上述过程可理解为,若向量 v 落在以 c_i 为球心, r_i 为半径的广义球内,则启用第 i 条规则确定系统输入重心 u_i 。其中的 i 为待辨识的参数向量, $z = [1, v^T J^T]$ 。推理过程的权系数 w_i 按下式计算

$$w_i = \begin{cases} 1 - \|v - c_i\| / r_i, & \|v - c_i\| \leq r_i; \\ 0, & \|v - c_i\| > r_i. \end{cases} \quad (12)$$

u_k 和 u_h 分别为与 v 最近的2个输入区域对应的输出重心; w_k 和 w_h 分别为相应的权系数,按下式计算:

$$w_k = \frac{d_h}{d_h + d_k}, \quad w_h = \frac{d_k}{d_h + d_k}.$$

其中

$$d_k = \|v - c_k\| = \min_{i=1, 2, \dots, n} \|v - c_i\|,$$

$$d_h = \|v - c_h\| = \min_{i=1, 2, \dots, n, i \neq k} \|v - c_i\|.$$

在模糊模型辨识中,需对模型的前后件的结构和参数进行辨识,即确定各局部输入区域 (c_i, r_i) 及动态参数向量 i 。

这里采用熵的概念对输入空间进行初始聚类,基于竞争学习在线修正局部输入中心及区域半径的大小[7];固定已获得的参数 (c_i, r_i) ,利用递推最小二

乘法在线刷新各模糊规则参数 i 。

4 基于 IDFR 的机组协调控制

基于模糊规则的系统逆动力学模型本身就是一类具有模糊性的控制规则。这里将 IDFR 直接作为控制规则,设计了一种机组协调控制系统(见图 1),通过 IDFR 在线辨识对控制规则自动调整,保证控制规则与负荷对象运动规律的高度匹配。

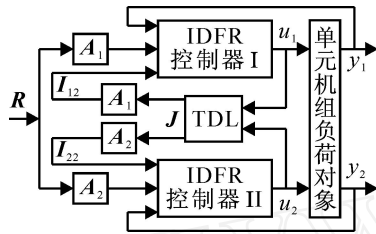


图 1 基于 IDFR 的控制系统

图 1 中: TDL (Tapped Delay Line) 是抽头延迟线,作用是通过对数据进行储存和延迟等操作,将数据转化为所需的形式; $J = [u_2(t - t_{21}) \quad u_2(t - t_{12})]$, $R = [r_1 \quad r_2]^T$; $A_1 = [1 \quad 0]^T$; $A_2 = [0 \quad 1]^T$ 。

由式(8)和(9)可见,机组负荷对象逆动力学模型的输入向量中包含 2 部分基本信息。第 1 部分为 $y_1(t)$, $y_1(t + t_{22} - t_{12})$ 和 $y_2(t + t_{22})$,由于 $t_{22} > t_{12}$,该部分实际上是系统输出的当前值及期望值信息;第 2 部分为系统输入的历史信息 $u_2(t - t_{21})$ 和 $u_2(t - t_{12})$ 。在确定系统控制规律时,根据各通道惯性的不同,采用了不同的模糊规则输入向量。在确定 u_1 控制规律时,不仅考虑了 y_1 的当前状态,还计入了 u_2 的历史输入对 y_1 的影响;在确定 u_2 控制规律时,同时考虑了 y_1 和 y_2 在不同时刻的期望值信息。上述控制规律在一定程度上保证了系统控制过程的协调性。

此外,在控制系统中,还利用下列系统输出参考轨迹设计方案,进一步保证控制过程的协调。

$$y_1(t - t_{12} + t_{22}) = y_1(t) + (1 - \alpha) r_1, \quad (13)$$

$$y_2(t + t_{12}) = (1 - \beta) y_2(t) + r_2. \quad (14)$$

式中: r_1 和 r_2 分别为被控制量 y_1 和 y_2 的给定值,协调因子 $\alpha, \beta \in (0, 1)$ 。通过改变 α, β 可调整系统 2 个输出变化过程的协调程度。 α 愈小,系统对负荷变化的跟踪能力愈强,对汽压波动的抑制能力愈差。在极限情况下,如取 $\alpha = 0$,则系统对负荷变化具有最大跟踪能力,但对主汽压力的波动将不再具有抑制能力。

上述控制过程的基本步骤可概括为:

- 1) 利用离线数据确定 t_{ij} ,按式(7)和(9)选择逆动力学模型输入向量,形成输入向量的样本集 X ;
- 2) 对 X 进行模糊划分和模糊辨识,获得初始逆动力学模糊规则,将该模糊规则作为初始控制规则;

3) 在线获得当前时刻输入向量,对已有的输入向量样本集 X 进行刷新(在 X 中加入最新样本,淘汰最早的一个样本);

4) 对 X 重新进行模糊划分,在线获得控制对象逆动力学模糊规则,并将该模糊规则作为控制规则,对原控制规则进行刷新。

5 控制系统仿真试验

以文献[9]中给出的单元机组负荷对象(模型)为基础,通过仿真实验考察前述基于 IDFR 的协调控制(简记为 IDFRC)系统的有效性。为了说明所设计的控制系统的自适应能力,还考察了当对象特性发生明显变化时(由模型变为模型^[10])的控制效果。作为比较,文中给出了当采用常规的以锅炉跟随为基础的协调控制(BFC)和以汽机跟随为基础的协调控制(TFC)时的控制结果。常规协调控制系统 PID 控制器参数按模型整定。

在仿真过程中,取每个 IDFR 控制器的模糊规则数为 3,对象逆动力学初始模糊规则由模型产生的部分样本离线辨识获得,取协调因子 $\alpha = 0.1$ 。

模型

$$W_{11}(s) = \frac{68.81s}{(1 + 12s)(1 + 82s)},$$

$$W_{12}(s) = -2.194 \left(\frac{0.064}{1 + 3s} + \frac{0.936}{1 + 124s} \right),$$

$$W_{21}(s) = 1/(1 + 83s)^2,$$

$$W_{22}(s) = 2.194/(1 + 80s)^2.$$

模型

$$W_{11}(s) = \frac{68.81s}{(1 + 20s)(1 + 150s)},$$

$$W_{12}(s) = -2.194 \left(\frac{0.064}{1 + 10s} + \frac{0.936}{1 + 200s} \right),$$

$$W_{21}(s) = 1/(1 + 150s)^2,$$

$$W_{22}(s) = 2.194/(1 + 150s)^2.$$

令机组负荷指令信号 r_1 阶跃增加 10%,主汽压力给定值 r_2 保持不变。在 3 种控制方式下对于不同对象的控制结果如图 2 ~ 图 5 所示。

由仿真结果可见,基于 IDFR 的单元机组负协调控制系统具有较好的控制效果。当对象特性发生

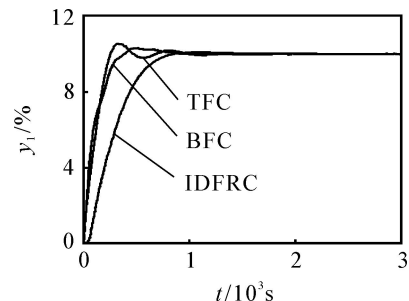


图 2 机组功率响应过程(模型)

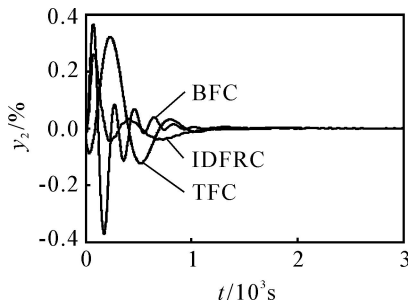


图3 主汽压力响应过程(模型)

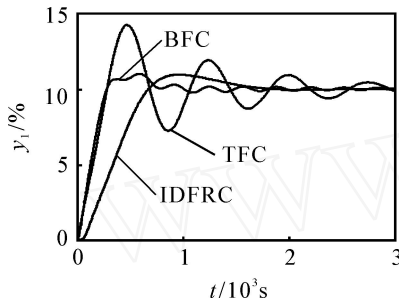


图4 机组功率响应过程(模型)

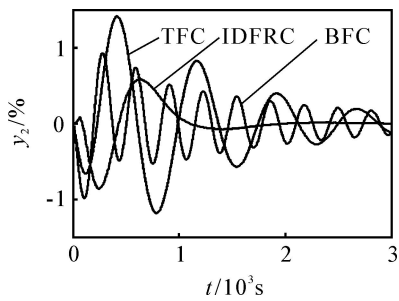


图5 主汽压力响应过程(模型)

明显变化时,控制系统仍具有较为理想的调节品质.

6 结论

基于模糊规则的系统逆动力学过程模型本身就是一类具有模糊性的控制规则. 本文将 IDFR 直接作为控制规则,设计了一种机组协调控制系统,通过 IDFR 在线辨识对控制规则自动调整,保证了控制规则与负荷对象运动规律的匹配.

参考文献(References)

- [1] 柴天佑,刘红波,张晶涛,等. 基于模糊推理和自适应控制的协调控制系统设计新方法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 14-18.
(Chai T Y, Liu H B, Zhang J T, et al. Novel design method for the coordinated control system based on fuzzy reasoning and adaptive control and its application [J]. Proc of the CSEE, 2000, 20(4): 14-18.)
- [2] Garduno-Ramirez R, Lee K Y. Wide range operation of a power unit via feedforward fuzzy control thermal power plants[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2000, 15(4): 421-426.

- [3] 王庆利,王丹,井元伟. 基于模糊解耦的火电机组负荷控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 435-439.
(Wang Q L, Wang D, Jing Y W. Load control based on fuzzy decoupling for fossil-fired electric single generating units [J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 435-439.)
- [4] 栾秀春,李士勇,张宇. 单元机组的 T-S 模糊协调控制系统及其 LMI 分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 91-95.
(Luan X C, Li S Y, Zhang Y. T-S fuzzy coordinated control system for power unit and its analysis using LMI [J]. Proc of the CSEE, 2005, 25(19): 91-95.)
- [5] 陈彦桥,郑亚锋,刘吉臻,等. 基于动态解耦的模糊多模型协调控制系统应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 166-170.
(Chen Y Q, Zheng Y F, Liu J Z, et al. The application study for coordinated control system of fuzzy multi-model based on dynamic decoupling [J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(12): 166-170.)
- [6] 胡包钢,应浩. 模糊 PID 控制技术回顾及其面临的若干重要问题[J]. 自动化学报, 2001, 27(4): 568-583.
(Hu B G, Ying H. Review of fuzzy PID control techniques and some important Issues [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(1): 568-583.)
- [7] 王广军,邓良才,陈红,等. 锅炉汽温对象逆动力学过程模糊辨识[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(20): 76-80.
(Wang G J, Deng L C, Chen H, et al. The fuzzy identification on inverse dynamic process of steam temperature object of boiler [J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(20): 76-80.)
- [8] 李刚. 热力系统逆动力学模糊规则模型及其应用[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
(Li G. Study and application of fuzzy rules models for inverse dynamic process of thermodynamic system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.)
- [9] 沈炯,金林,陈来九. 火电单元机组负荷最优预见控制系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 14-17.
(Shen J, Jin L, Chen L J. Simulating study on load preview control system of a thermal power unit [J]. Proc of the CSEE, 1999, 19(3): 14-17.)
- [10] Han Pu, Yu Ping, Wang Guoyu, et al. Predictive functional control in thermal power unit load systems [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 47-52.