

模糊自适应整定 PID-FS 在整流电源中的应用

李小英, 匡宇国

(浙江工贸职业技术学院, 浙江 温州 325003)

摘要: 针对整流电源控制系统被控对象的时变性和多样性, 将模糊自适应控制与常规 PID 控制算法相结合, 设计了一种模糊自适应整定 PID 控制器。在控制算法上, 提出了基于模糊自适应整定 PID 控制器, 它很好地解决了传统控制原理中系统控制精度与稳定性之间的矛盾。仿真和实验结果表明, 采用模糊自适应整定 PID 随动系统 (Following System, 简称 FS) 的大功率整流电源控制系统能够适应被控对象在较大范围内的变化, 具有较强的自适应能力, 其控制品质优于常规的 PID 控制器。

关键词: 随动系统; 整流电源; 控制器/模糊自适应控制

中图分类号: TM461 文献标识码: A 文章编号: 1000-100X(2007)02-0063-03

Application of a Following System based on Self-tuning Fuzzy Adaptive
PID Control in Rectifier Power Supply

LI Xiao-ying, KUANG Yu-guo

(Zhejiang College of Industry & Trade Polytechnic, Wenzhou 325003, China)

Abstract: Aiming at diversity and time variation of the controlled object in rectification power supply control system, combining fuzzy adaptive control with common PID control algorithm in this paper, Self-tuning fuzzy adaptive PID controller is designed. In the control method a self-tuning fuzzy adaptive PID controller was used to solve the conflict between stability and control precision. The simulative results show that big-power rectification power supply controller system with self-tuning fuzzy adaptive PID controller is adaptable to the large change of controlled objects and satisfactory adaptive ability, whose control quality is superior to common PID controller.

Keywords: following system; rectification power supply; controller/self-tuning fuzzy controller

1 引言

大功率整流电源主要用作铝镁电解、食盐水电解、金属电镀、石墨化炉和直流电弧炉等设备的直流电源, 其输出功率可达数兆瓦, 输出电流可达数千安。由于大功率整流电源系统的被控对象复杂多样, 所以为了达到稳压稳流的目的, 必须使输出达到足够高的精度, 系统采用闭环负反馈的方式进行控制, 由调节器产生的控制信号来调整晶闸管触发脉冲的延迟角, 以实现电压电流的闭环控制和无差调节^[1]。

大功率整流电源系统的调节对象具有时变性、不确定性和非线性等特点, 通常难以建立精确的数学模型, 而且运行工况的变化对大功率电源系统的动态特性和模型参数都有较大的影响, 因此采用常规 PID 控制方法难以获得理想的控制效果。近年来, 出现了许多参数可自调整的新型 PID 控制器。其中, 模糊自适应整定 PID 控制便是其中应用较为广泛的一种, 尤其是在非线性和时间不确定性的工业生产中。为了提高随动系统快速跟踪和准确定位两个重

要技术指标, 在实现微机化随动系统的基础上引入了带有模糊自适应整定 PID 控制器。仿真和实验结果均表明, 该控制系统既保持了常规串级 PID 控制的优点, 又有自学习智能特性, 具有良好的控制品质和较强的自适应能力。

2 整流电源控制系统

图 1 示出整流电源的控制系统框图。该系统是由微型机、D/A 转换模块、调节器、触发器、晶闸管整流、辨别环节、检测电路、负载、A/D 采样模块构成的一个负反馈型闭环控制回路^[2]。图中的时间-电压设定曲线是按生产工艺要求设定的整流电源控制系统的输入信号, 经整流输出到负载所需的直流电。A/D 模块采样得到的反馈电流或电压, 与设定值比较后, 其偏差送入智能调节器, 并根据模糊自适应整定 PID 控制算法经 D/A 转换, 给出整流电源的控制电压。A/D 的采样时间为 0.001s/次, D/A 的采样时间为 0.002s/次。

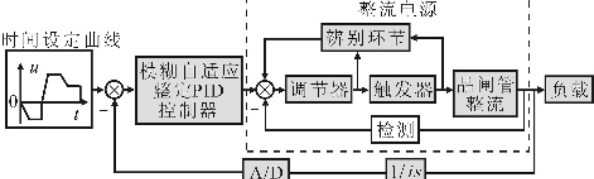


图 1 整流电源的控制系统框图

定稿日期: 2006-06-26
作者简介: 李小英 (1978-), 女, 浙江东阳人, 讲师。研究方向为计算机应用、自动化控制。

整流电源内部有一套快速自动辨识环节，能控制整流晶闸管的触发角，从而实现稳定的输出电流和输出电压。因此任何由外部电网和负载波动等引起的电流变化，均可通过快速调节输出电压而保持电流稳定。

为了有效控制晶闸管可控整流电源这一非线性、不确定性多变量系统，并兼顾快响应过程中的实时控制，以及慢响应过程中的无差调节，针对快过程和慢过程分别设计了调节器，并充分利用模糊自适应整定 PID 的自学习能力和自适应能力来克服负载的波动。

3 模糊自适应整定 PID 控制器设计

3.1 模糊自适应整定 PID 算法

在整流电源控制系统中响应的过渡过程在毫秒级内即可完成，而慢响应过程的过渡时间较长。根据前几个采样周期系统输出的采样值计算响应曲线的斜率，若斜率值大于 45°，则认为是快响应过程，反之则认为是慢响应过程，两者差异显著。如果系统控制对象存在纯滞后时间，则可在软件中做相应的处理，等待系统产生响应值时再做判断。

由图 1，设 PID 的传递函数为：

$$G(s)=K_k(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s)$$
 (1)

写成微分方程形式为：

$$u(t)=K_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt+T_d\frac{de(t)}{dt}]$$
 (2)

式中 e——位置给定值与测量值的偏差量
T_i, T_d——积分作用时间和微分作用时间
K_p——比例作用系数

令采样周期为 T₀, dt=T₀, t=kT₀, 再将微分方程离散化为：

$$u(k)=K_p[e(k)+\frac{T_0}{T_i}\sum_{n=0}^{k-1}e_n+\frac{T_d}{T_0}e(k)-e(k-1)]$$
 (3)

式中 e(k)——第 k 次采样的偏差量
e(k-1)——第 k-1 次采样的偏差量

$$u(k-1)=K_p[e(k-1)+\frac{T_0}{T_i}\sum_{n=0}^{k-2}e_n+\frac{T_d}{T_0}e(k-1)-e(k-2)]$$
 (4)

式中 e(k-2)——第 k-2 次采样的偏差量

将式(3)减去式(4)，有：

$$u(k)-u(k-1)=q_0e(k)+q_1e(k-1)+q_2e(k-2)$$
 (5)

式中 q₀=K_p(1+ $\frac{T_d}{T_0}$) q₁=-K_p(1+2 $\frac{T_d}{T_0}$ - $\frac{T_0}{T_i}$) q₂=K_p $\frac{T_d}{T_0}$

3.2 模糊自适应整定 PID 控制结构

参数自整定模糊控制是由 e、误差变化率 ec 计算出来用以表征系统性能指标的数据。其模糊子集

为 e_{ec}={O, PS, PM, PB}，子集中元素分别代表零、正小、正中、正大。设 e_{ec}和 K_p, K_i, K_d(K_i为积分作用系数, K_d为微分作用系数)均服从正态分布，因此可得出各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型，应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表，查出修正参数代入下式：

$$\begin{cases} K_p=K_p+\{e_{ec}\}_p \\ K_i=K_i+\{e_{ec}\}_i \\ K_d=K_d+\{e_{ec}\}_d \end{cases} \quad (6)$$

在线运行过程中，控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算，总结实际操作，建立合适的模糊规则表，得到针对 K_p, K_i, K_d这 3 个参数分别整定的模糊控制表，将 e_{ec}的变化范围定义为模糊集上的论域。建立 K_p, K_i, K_d模糊规则表后，根据图 2 所示的模糊 PID 结构框图进行 3 个参数的自适应校正。

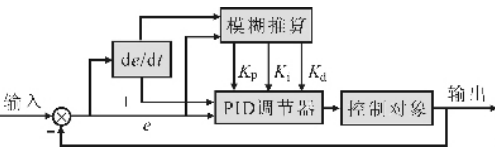


图 2 模糊 PID 的结构框图

4 仿真分析及实用结果

对于整流电源控制系统，其负载种类很多，有的结构和工作过程相当复杂，其内部不止一个状态变量，要准确描述其数学模型，阶次必然很高。图 3a 示出控制器的输入电压 u_{in} 仿真波形。图 3b 示出微分作用系数 K_d 的变化曲线。此处的控制信号是指位于模糊 PID 控制器前端的输入信号，在 0.6s 处加入了 3V 的干扰信号。图 3c、d 示出比例作用系数 K_p 和积分作用系数 K_i 的变化曲线。可见，随输入信号的变化，可随时对 K_p 和 K_i 进行修正，而且当输入信号趋于稳定时，曲线保持平稳，但在 0.6s 处受干扰影响而波动。图 3e、f 示出优化后系统的输入输出结果与经过校正的系统输入输出结果比较。可见，图 3e 受干扰的影响明显。仿真中，该图的采样时间为 0.001s，经过校正的系统标注值为 0.42s。在 0.6s 处加入了 3V 脉冲干扰信号，系统受干扰影响的幅值最大增加 0.21V。改进后的系统标注值为 0.25s，在 0.6s 处加入了 3V 脉冲干扰信号，系统受干扰影响的幅值增加 0.02V。

将该模糊自适应整定 PID-FS 用于某金属电镀设备厂，经生产实践表明，其分辨率为 0.4%，控制精度达到了 1%，实现了稳压稳流的目标，大大提高了控制品质，使该企业的产品达到长期稳定的高质量和高技术水平，增强了市场竞争能力，获得了极好的经济效益。

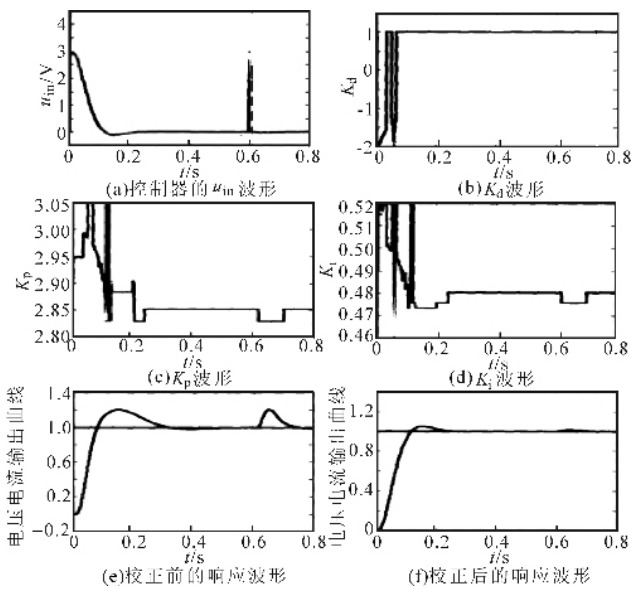


图3 仿真结果

(上接第 28 页)
$$\hat{y}(t) = x(t)\hat{c} - \hat{a}(t) \quad (12)$$

式中 $x(t) = [x(t), \hat{x}(t)]$ $\hat{c} = [\hat{c}_1, \hat{c}_2]$

由方程式 (12) 可得 基于 t 时刻的递推算为 :
应用得出的控制输入 $u(t)$ 观测输出 $\hat{y}(t)$; 用式 (12) 计算 $\hat{y}(t)$, $x(t)$, $\hat{x}(t)$; 用递推最小二乘算法估计 \hat{c} ; 计算新的极值控制器输出 $x(t+1)$ 和 $x(t+1) = \hat{c}_1(2\hat{c}_2)$; $t=t+1$, 返回 1。

4 电磁热铆接系统谐振电流的极值寻优控制

图 3 示出电磁热铆接系统谐振频率自动跟踪控制结构。它采用了电压电流双闭环结构 ,外环为母线电压控制环 ,即输出电压与电压给定值 U_{ref} 进行比较 ,生成电压误差信号 ,经过电压调节器构成电压控制外环 ,控制谐振主电路的母线电压。内环为自校正极值电流控制环 ,即采用极值寻优调节控制算法 ,将加热线圈的瞬时电流有效值作为自校正极值优化器的输入 ,自校正极值优化器的输出控制全桥逆变电路的 PWM 信号频率 ,使系统谐振电流始终保持在最大 ,从而实现谐振频率的跟踪目的。

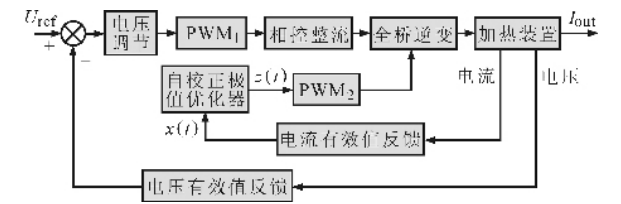


图3 自校正极值寻优控制结构图

通过通信接口对谐振频率的跟踪过程进行监控并绘成曲线图。图 4a 示出系统运行时动态搜索电流极值

5 结 论

仿真结果及实践应用表明 ,将模糊自适应整定 PID 的随动系统用于大功率整流电源中 ,无需建立被控对象的精确数学模型 ,能够适应被控对象较大范围内的变化 ,具有较强的适应能力 ,其控制品质优于常规的 PID 控制器。

参考文献

[1] 李朝晖.可控整流电源通用触发与控制系统研究[D].西安理工大学[硕士论文].2004.
[2] 王顺晃.智能控制系统及其应用[M].北京:机械工业出版社.2005.
[3] 陆 地.大电流硅整流装置温度控制用的 Fuzzy-PID 控制[J].电力电子技术.2004.38(4):69~71.
[4] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社.2004.

点的过程。结果表明 控制算法具有较好的收敛性 ,搜索过程较快。图 4b 示出控制系统的谐振频率 f_r 和谐振电流 i_r 曲线。可见 初始阶段 系统稳定运行在 f_r 20kHz , $i_r=100$ A 当运行到 100s 时 负载发生变化后 f_r 迅速自动跟踪到 30kHz 谐振频率点 ,且 i_r 保持在极大值。

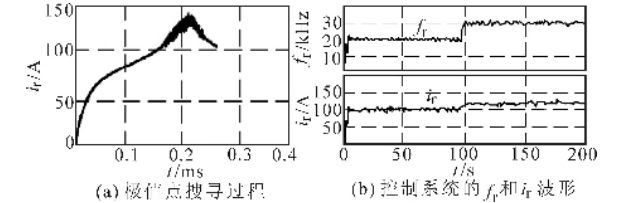


图4 极值点的搜寻过程及控制系统的 f_r 和 i_r 波形

5 结束语

针对飞机电磁热铆接系统中频率跟踪的关键问题 ,提出了基于自校正极值控制的谐振频率自动跟踪方法。样机运行结果表明 ,采用该优化控制方法能有效地对飞机电磁热铆接系统的外部扰动和负载变化实现自动谐振频率跟踪 ,并保持稳定运行。此外 ,还具有电路简单 ,抗干扰能力强 ,可靠性高等突出优点 ,它为其它电磁感应加热谐振频率的跟踪提供了一种新的解决方法。

参考文献

[1] 曹增强.铆接技术发展状况[J].航空维修与工程.2000 , (6):26~30.
[2] 王永初.最佳控制系统设计基础[M].北京:科学出版社 , 1980.
[3] 李国强.动态寻优极值调节在加热炉燃烧控制中的应用[J].现代电子技术.1998 (11):113~117.
[4] 李国强 ,金铁锋.用最小二乘法动态预估极值调节对象的最优工作点[J].现代电子技术.2001 (7):42~47.