

文章编号: 0258-0926(2018)03-0090-05; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0090

基于内分泌分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 的核电站 稳压器压力控制

钱 虹, 郑子彬*, 郑 秒

上海电力学院自动化工程学院, 上海, 200090

摘要: 针对系统较为复杂的核电站稳压器, 为了获得令人满意的控制效果, 在生物神经内分泌腺体激素调节的原理和分数阶微积分的理论基础上, 提出了一种包含长环和短环的内分泌分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (EFOPID)。一级控制器为比例控制, 能够依据系统偏差来调整二级控制器的输入, 实现快速、稳定地消除偏差; 二级控制器采用间接算法 (Oustaloup 算法) 实现的分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (FOPID), 能够使系统具有更加优良快速性、高精度性和强抗干扰能力。仿真结果表明: EFOPID 比传统的比例-积分-微分控制器 (PID) 控制具有更加优良的性能指标和抗扰动能力。

关键词: 核电站; 稳压器; 内分泌; 间接算法 (Oustaloup 算法); 内分泌分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (EFOPID)
中图分类号: TL361; TM623 文献标志码: A

Nuclear Power Plant Pressurizer Pressure Control Based on Endocrine Fractional Order PID Controller

Qian Hong, Zheng Zibin*, Zheng Miao

Automatic Engineering of Shanghai University of Electrical Power, Shanghai, 200090, China

Abstract: Based on the principles of biological neuroendocrine gland hormone regulation and the fractional order calculus, and considering that the pressurizer system of nuclear power plant is a very complicated system, an endocrine fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller was designed with long feedback and ultra-short feedback, in order to obtain satisfactory control results. The primary controller is proportional control. According to the system errors, it can adjust the control parameters of the secondary one dynamically and eliminate the control error quickly and stably. The secondary is fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller and an indirect algorithm (Oustaloup algorithm) was used to implement the fractional order controller. The system can be more excellent in velocity, precision and anti-interference ability. Simulation results show that the endocrine fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller is with better performance and strong anti-interference ability than the traditional PID control.

Key words: Nuclear power plant, Pressurizer, Endocrine, Oustaloup algorithm, Ractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller

0 前 言

稳压器是压水堆核电站一回路中的重要设备之一, 其压力控制对核电厂的安全运行至关重要。稳压器在反应堆正常运行时压力要维持在 15.5

MPa 左右, 以确保核电厂的安全运行^[1]。现阶段稳压器的压力控制大多采用传统的比例-积分-微分控制器 (PID) 控制, 由于其自身局限性, 控制效果不是太理想, 抗干扰能力等也较差。而神经

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金 (61503237); 上海市自然科学基金 (15ZR1418300); 上海市电站自动化技术重点实验室 (13DZ2273800)

作者简介: 钱 虹 (1967—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 现主要研究方向为核电站控制与故障诊断

*通讯作者: 郑子彬: E-mail: zzb648789@163.com

内分泌系统的生物智能控制器，即内分泌 PID (EPID) 控制，该算法不需要建立精确的数学模型，而且具有较好的自适应性和稳定性等优点^[2]。针对该算法中 PID 控制的自身缺陷，本文在分数阶理论研究的基础上，提出一种新的复合型内分泌两级控制器——内分泌分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (EFOPID)，解决稳压器压力控制的问题。

1 压力控制系统

在核电厂运行过程中，核功率的变化、负荷的变化和温度变化等都会直接或间接地影响稳压器液位变化，改变稳压器的压力使其偏离正常值，从而触发相应的装置（如：比例加热器、备用加热器和喷雾阀等）动作，以保证反应堆的绝对安全。

稳压器压力控制的原理如图 1 所示，控制通道由比较器、PID 控制器、控制特性函数发生器等组成。比较器将压力变送器传来的实际压力与压力设定值相比较，产生压力偏差 ($P - P_{ref}$)，经过 PID 控制器进行运算，输出信号为补偿压差^[3]。当补偿压差小于 0 时，该信号在通往函数发生器和阈值比较器时，将启动加热器，稳压器底部空间的部分水变成蒸汽，进入到蒸汽空间，从而使蒸汽压力增加，达到稳定值时继电器断开。反之，信号将启动喷淋阀，当冷水通过喷淋阀喷淋时，上部空间的蒸汽在喷淋水表面凝结，从而使蒸汽压力降低，达到稳定值时继电器断开。通过稳压器内部不同装置的调节，使压力始终保持在正常稳定值范围内。

其中，PID 控制器的传递函数 $G(s)$ 为^[4]：

$$G(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] + \frac{K T_d s}{1 + T_d s} \quad (1)$$

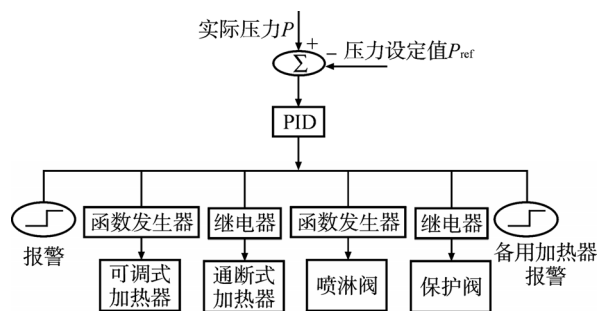


图 1 稳压器压力控制原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of Regulator Pressure Control

式中， K 为比例系数； T_1 为积分时间常数； T_2 为微分时间常数； s 为复数量。

2 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (FOPID)

2.1 分数阶微积分理论

分数阶微积分是指微积分的阶次不是整数，可以是分数甚至复数。它可以看作是传统 PID 控制的推广。常用的分数阶微积分的定义有 3 种。分别是 Grunwal-Letnikov 定义、Riemann-Liouville 定义和 Caputo 定义^[4]等。其中定义连续的分数阶微积分算子为：

$${}_a D_t^{\alpha} = \begin{cases} \frac{d^{\alpha}}{dt^{\alpha}} & \text{Re}(a) > 0 \\ 1 & \text{Re}(a) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha} & \text{Re}(a) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， Re 表示实部； a 表示积分下限； α 表示阶数； t 表示积分上限； τ 表示微分变量； ${}_a D_t^{\alpha}$ 表示微积分算子。

2.2 FOPID 结构

FOPID 是整数阶 PID 控制器的广义表达式，是将整数阶的积分项 λ 和微分项 μ 的阶次扩展到分数领域。其控制器的压力输出可以表达为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{\lambda} e(t) + K_d D^{\mu} e(t) \quad (3)$$

式中， $\lambda > 0$ 为积分阶次； $\mu > 0$ 为微分阶次； $u(t)$ 表示输出； $e(t)$ 为误差量； K_p 为比例系数、 K_i 为积分系数、 K_d 为微分系数。

经拉普拉斯变换可以得到分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的传递函数 $G(s)$ 为：

$$G(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\mu} \quad (4)$$

由式 (4) 可以看出，整数阶 PID ($\lambda=1, \mu=1$)、线性控制器 (PI) ($K_d=0, \lambda=1$)、比例微分控制器 (PD) ($K_i=0, \mu=1$) 都是 FOPID 的积分项 λ 和微分项 μ 取特殊值的情况。所以，FOPID 可以实现 PID 由点到面的控制，通过合理的参数整定，FOPID 能更好地、更精确地提高系统控制效果。其系统结构图如图 2 所示，其中， r 表示输入量， y 表示输出量。

2.3 分数阶微积分算子的近似与改进

实际上，在分数阶微积分的定义下，FOPID 是一个无限维数的滤波器。为了实现分数阶控制，本文采用 Oustaloup 近似算法以及改进算法。其中 Oustaloup 滤波器在一个有限的频率段 (ω_b, ω_h) 内

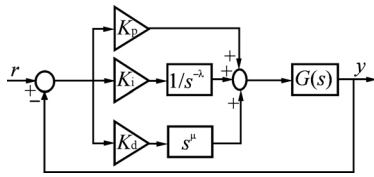


图2 FOPID 结构图

Fig. 2 Structure of Control System of Fractional Order PI^λD^μ

对微积分算子的近似为^[5]：

$$s^a \approx K \prod_{k=-N}^N \frac{s + w'_k}{s + w_k} \quad (5)$$

$$K = w_h^a$$

$$w'_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+0.5(1-a)}{2N+1}}$$

$$w_k = w_b \left(\frac{w_h}{w_b} \right)^{\frac{k+N+0.5(1+a)}{2N+1}}$$

式中， N 为长度。

由于该算法在近似频率两端的近似效果不是很理想，故参考了文献[6]提出的改进算法，该算法是将分数阶算子用分数阶传递函数近似：

$$C(s) = \left(\frac{1 + \frac{sb}{dw_b}}{1 + \frac{sb}{dw_h}} \right)^a \quad (6)$$

式中， $0 < a < 1$ ， $s = jw$ ， $b > 0$ ， $d > 0$ ； j 为虚数算子； w 为频率。

在频率段内 $w_b < w < w_h$ 用 Taylor 级数展开，并取一阶近似，得到如下式子：

$$s^a = \left(\frac{dw_b}{b} \right) \left[\frac{ds^2 + dw_h s}{d(1-a)s^2 + bw_h s + da} \right] C(s) \quad (7)$$

联合式(6)和式(7)可以得到如下近似公式：

$$s^a = \left(\frac{dw_b}{b} \right) \left(\frac{dS^2 + dw_h s}{d(1-a)S^2 + bw_h s + da} \right) \times \prod_{k=-N}^N \frac{1 + \frac{s}{w'_k}}{1 + \frac{s}{w_k}} \quad (8)$$

3 内分泌分数阶 PI^λD^μ 控制器 (EFOPID)

3.1 内分泌系统的激素调节机制

生物体内的下丘脑、垂体和腺体组成了体内内分泌激素调节系统，其调节原理的反馈环节包括长反馈（常规反馈）和超短反馈。下丘脑分泌的促激素（TRH）刺激垂体分泌促甲状腺素（TSH）进而刺激甲状腺分泌甲状腺激素。甲状腺释放的甲状腺激素反过来同时作用于下丘脑和垂体，影响其对应激素的分泌，形成长反馈回路；垂体释放的 TSH 不仅影响甲状腺，而且还影响自身，形成超短反馈^[7]。其工作原理如图 3 所示。

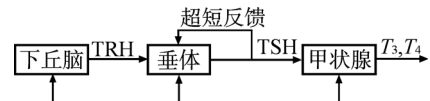


图3 甲状腺激素调节回路

Fig. 3 Thyroid Hormone Regulation Loop

3.2 EFOPID 结构

在内分泌激素调节原理和分数阶微积的理论基础上，提出了双层控制器——EFOPID，其结构如图 4 所示。该控制器最大的优点是能够实现系统的快速跟踪性能。其中，一级控制器用于不断调整二级控制器的输入，实现快速、稳定地消除系统偏差；超短反馈控制器的作用是根据误差大小来补偿，按照激素分泌规律动态补偿控制输出，实现更好的控制性能。与传统串级控制最大的不同是其反馈量输入不同。

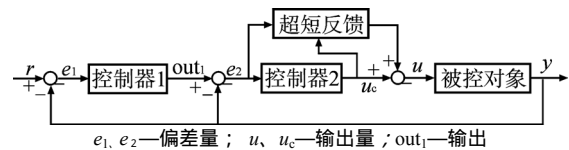


图4 内分泌两级控制器结构

Fig. 4 Structure of Endocrine Two Stage Controller

3.2.1 一级控制器控制规律

一级控制器的控制规律可以根据传统串级控制主控制器的规律进行选择，而本文选择比例控制，目的是实现系统的快速跟踪性，且简单易实现。一级控制器的输出 y_1 是在给定值 r 附近随着偏差 e_1 的改变而不断改变的，当一级控制偏差 $e_1 = 0$ 时，其输出值为给定值 r 。其控制器的输出为：

$$e_1 = r - y \quad (9)$$

$$y_1 = r + k_{p1}e_1 \quad (10)$$

式中, $k_{p1} > 0$ 为一级控制器的比例系数, 在一定范围内, 随着比例系数增大, 系统快速性越显著, 但同时也会带来系统的超调和振荡。在实际情况下, 针对其参数的选择与调整与传统串级控制系统参数选择类似, 首先投入二级控制器使控制曲线略接近振荡状态, 保证二级控制器的迅速反应能力; 然后再投入一级控制器, 调整系数 k_{p1} , 直到控制效果满足要求为止。

3.2.2 二级控制器的控制规律 传统二级控制器为 PID 控制, 但传统 PID 控制的自适应能力有限, 相比于传统 PID 控制, 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制性能将更加优越, 其快速性、抗扰动能力和自适应的能力等将表现得更好, 其原理参考上面 FOPID 介绍。

3.2.3 超短反馈控制规律 超短反馈采用内分泌调节规律, 将控制器 2 (FOPID) 的输出变化率 $\Delta u_c(k)$ 作为超短反馈的输入信号, 根据 Farhy.L.S^[8] 提出的激素腺体分泌激素的通用规律对控制变化量 $\Delta u_c(k)$ 进行短反馈处理, 然后得到非线性反馈的函数:

$$f[\Delta u_c(k)] = bc \left\{ \frac{[\Delta u_c(k)]^n}{1 + [\Delta u_c(k)]^n} \right\} \quad (11)$$

$$b = \begin{cases} +1 & e_2 \geq 0 \\ -1 & e_2 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, c 、 n 为因子系数, 决定了超短反馈补偿的幅度; b 为常系数, 决定了超短反馈补偿的方向, 增强还是抑制。

以分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制的变化率 $\Delta u_c(k)$ 作为激励信号, 最后二级控制器的输出 u 为:

$$u(k) = u_c(k) + f[\Delta u_c(k)] \quad (13)$$

在实际应用时, 控制对象的内部和外部都会存在许多扰动, 控制对象也会不停地变化, 控制系统不容易实现理想的性能指标, 有时虽然实现了, 但也会在一定的范围内不断地波动, 会对系统造成一定的影响。因此, 通过将因子系数 a 进行分段处理^[9] (其中, a' 为分段处理后的 a 值), 减小超短反馈对二级控制器输出造成的影响。 a' 的值如式 (14) 所示:

$$a' = \begin{cases} 0 & e(k) < 0.01r \\ 0.4a & 0.01r < e(k) \leq 0.05r \\ 0.5a & 0.05r < e(k) \leq 0.1r \\ 0.6a & 0.1r < e(k) \leq 0.15r \\ a & 0.15r < e(k) \leq 0.4r \\ 2a & 0.4r < e(k) \leq 0.7r \\ 3a & e(k) > 0.7r \end{cases} \quad (14)$$

4 系统仿真

某核电站稳压器压力控制系统的数学模型^[10]为:

$$G_p = \frac{1.776}{3300s^2 + 450s + 1.34} \quad (15)$$

本文针对压力控制系统分别采用传统 PID 控制、EPID 控制和 EFOPID 控制进行对比分析, 其中 PID 控制采用传统方法整定 $K_p=100$ 、 $K_i=0.101$ 、 $K_d=500$ 。通过对稳压器压力的实际仿真结果可以看出 EFOPID 与 EPID 控制和常规 PID 控制相比, 其超调量减小, 而且调节时间、峰值时间和上升时间等都明显缩短, 稳态误差较小, 控制精度较高, 不仅具有较好的动态响应性能, 还有较强的扰动抑制能力, 能够提高稳压器压力的控制性能。仿真结果和数据如图 5 和表 1 所示:

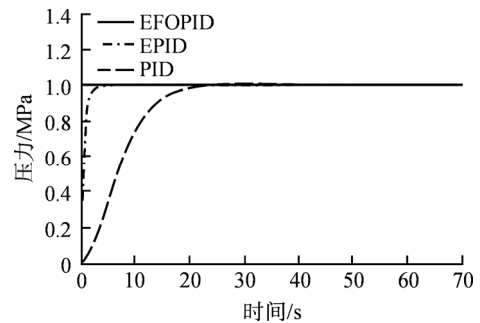


图 5 系统阶跃仿真图

Fig. 5 Simulation of System Step

表 1 控制器的动态性能指标的比较

Table 1 Comparison of Dynamic Performance of Controller

控制器	超调量/%	调节时间/s	峰值时间/s	上升时间/s
PID	0.02	16.48	27.64	11.89
EPID	0.00	2.14	6.05	1.57
EFOPID	0.00	0.01	0.02	0.008

为验证本文设计的控制器的抗干扰能力, 在仿真时间为 50 s 时加入常值 0.1 的阶跃干扰来模

拟核电厂运行过程中的不确定的影响因素, 仿真结果如图 6 所示。在受干扰的情况下, 传统 PID 控制器的超调量较大, 且在 18 s 内才完成调节, 需调节的时间较长; EPID 控制器需要 2.5 s 完成调节; 而 EFOPID 控制器受干扰后对控制器的参数影响最小, 且在 0.02 s 内完成调节, 说明能更快地回到稳态值。所以, EFOPID 受负载的影响较小, 具有较强的抗干扰性。

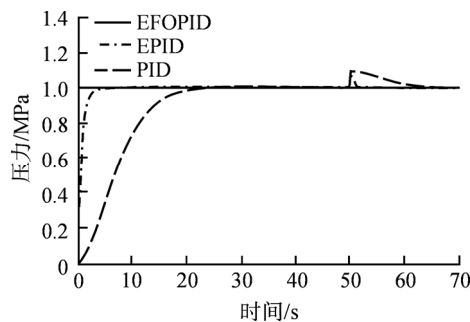


图 6 不同算法下加干扰的阶跃响应

Fig. 6 Step Response for Different Algorithms with Jamming Added

5 结束语

针对核电厂一回路系统重要设备稳压器, 本文提出一种基于生物内分泌激素调节机制的智能控制器—EFOPID 控制器, 该控制器是一个包含长短反馈的双层控制器, 并根据生物激素分泌调节作用分别设计其控制调节规律。同时借助 Simulink 的仿真表明: 该 EFOPID 和传统 PID 控制器在系统快速性、精度和抗干扰能力方面都有

很大的提高, 实现了压水堆核电厂稳压器压力的有效控制。由此说明, EFOPID 同时具备了内分泌控制器较好的自适应性和稳定性和分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的快速性、高精度和强抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 张国铎, 杨旭红, 许行, 等. 压水堆核电站稳压器压力控制系统仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(1):193-195.
- [2] 金耀, 夏毅敏, 康辉梅, 等. 一种内分泌单神经元控制策略及应用[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1108-1111.
- [3] 张建民, 姜晶. 核反应堆控制[M]. 北京: 原子能出版社, 2009, 160-164.
- [4] 车树涛. 分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 蒸汽压力控制系统算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [5] 鲍雪, 王大志, 杨永生. 基于 CAPSO 算法的修正炮弹分数阶控制器设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2556-2561.
- [6] 吴振宇, 赵亮, 冯林. 基于分数阶 PID 控制器的智能车控制[J]. 控制工程, 2011, 18(3): 401-404.
- [7] 黄桓. 六自由度并联机器人内分泌控制策略的研究[D]. 上海: 东华大学硕士论文, 2009.
- [8] Farhy L S. Modeling of oscillations in endocrine with feedback[J]. Methods in Enzymology, 2004, 384: 54-81.
- [9] 张嵩. 基于神经内分泌反馈机制的模糊 PID 串级主汽温度控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学硕士论文, 2012.
- [10] 林静. 基于自抗扰的核电站稳压器控制系统研究[D]. 上海: 上海电力学院硕士论文, 2014.

(责任编辑: 张明军)