

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.022

发电系统协调控制中非线性离散法的研究*

江 霓¹, 马立新^{2*}

(1. 上海理工大学 电工电子技术实验中心, 上海 200093; 2. 上海理工大学 电气工程系, 上海 200093)

摘要:针对锅炉中主蒸汽温度控制系统中具有的非线性、参数时变性和系统大滞后等问题,对非线性系统数学模型的建立、目标值—电力负荷需求信号的跟踪控制、外界干扰的消除等方面进行了研究,对发电系统响应负荷变化的实时跟踪控制策略进行了归纳,在目前普遍采用的锅炉汽轮机协调控制方式的基础上,运用非线性离散控制方法对锅炉主蒸汽温度进行了建模,提出了一种基于非线性离散控制方法的锅炉主蒸汽温度控制系统。并在 Matlab 10.0.1 中进行了实例仿真,通过仿真实例验证了所提控制方式的正确性和可行性。研究结果表明,采用非线性离散控制法的锅炉主蒸汽温度控制系统在目标值跟踪、抗干扰以及减少延时带来的误差等方面较传统方法具有显著的优势,对发电设备的控制系统具有重要的指导意义。

关键词:火力发电系统;锅炉主蒸汽温度控制;非线性离散控制器;负荷跟踪

中图分类号:TM611.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0403-06

Nonlinear discrete method for power system coordination control

JIANG Ni¹, MA Li-xin²

(1. Electrical and Electronic Technology Experiment Center, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problems of nonlinearity, time varying and lagging with the main steam temperature control system of boiler, the establishment of the mathematical model for nonlinear system, the tracking control of target-power load demand signal, elimination of interference and so on were studied, and real-time tracking control of power system response load change strategy was carried on the induction, and now on the basis of boiler turbine coordinated control which widely used in the current way. Nonlinear discrete control method was used to modeling for boiler main steam temperature, so a control method of boiler main steam temperature control system based on nonlinear discrete was put forward. The results indicate that the boiler main steam temperature control system which has used nonlinear discrete control method has significant advantages than the traditional methods in the target tracking, anti-disturbance and reduction in errors caused by delay, has an important guiding significance for the control system of power generation equipment.

Key words: thermal power system; the main steam temperature control; nonlinear discrete controller; load tracking

0 引 言

随着火力发电厂锅炉机组越来越向着高参数、大容量的方向发展,对热工自动控制系统的控制品质的要求也越来越高。目前,在火力发电厂的自动控制系统中,

无论是燃烧过程自动控制系统、汽包水位自动控制系统,还是主蒸汽温度自动控制系统等,主要都是采用各种类型的常规 PID 控制策略^[1]。传统的 PID 经典控制方法具有结构典型、参数整定方便、能够实现无差调节、鲁棒性较强的特点,而得到了广泛应用。也就是说 PID

收稿日期:2014-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(F050304);国家科技部政府间科技合作资助项目(2009014);上海市高等学校高地建设资助项目(未提供)

作者简介:江 霓(1989-),女,汉族,上海人,助教,工学硕士,主要从事智能电网中火发电设备的智能化控制,非线性离散控制算法,模糊 PID 算法,电力负荷需求与预测方法以及电工电子实验等方面的研究。E-mail:nijshanghai@163.com

通信联系人:马立新,男,工学博士,教授。E-mail:malx_aili@sina.com

控制在火力发电系统的控制中仍占着主导地位。

主蒸汽温度是火力发电系统生产过程中一个非常重要的监测和控制参数,该参数过高或过低都会影响到机组的安全性和经济性。但其控制过程中存在着非线性、大滞后性、参数时变性、强耦合等特点,并且常常受到外部扰动的影响^[2]。而非线性 PID 控制法虽然能够使上述问题得以改善,但对于锅炉这个大延时、复杂的大系统而言,实际数学模型往往复杂得多,这时即使是非线性 PID 控制器也达不到十分理想的控制效果^[3]。

本研究建立锅炉主蒸汽温度控制系统的数学模型,并设计一个非线性离散控制器,这种控制器不仅跟踪性能好,而且抗干扰能力强^[4]。

1 主蒸汽温度控制存在的问题

主蒸汽温度的控制成为火力发电系统生产过程控制中的一个控制难点,主要是因为以下几点原因:

(1) 主蒸汽温度是一个迟延现象比较严重的对象,机组容量越大,迟延现象就越严重。

(2) 主蒸汽温度容易受到多种因素的影响,也就是常说的外部干扰,如负荷的变化、主蒸汽压力的变化、燃料量的变化等。

(3) 主蒸汽温度被控对象工艺流程复杂,不同的机组主蒸汽温度特性完全不同,很难得到对象与干扰之间准确的数学模型。

因此,本研究以直流锅炉的水冷壁出口蒸汽温度控制系统为研究对象,在锅炉协调控制方式的基础上,设计了非线性离散控制器,旨在解决以上 3 个问题,从而达到更好的控制效果。

2 发电系统的协调控制方式

2.1 BGT 主控制

对于现代火力发电厂来说,锅炉、汽轮机和发电机是其三大核心设备,协调控制的核心部分称为(boiler, turbine, generator, BGT)主控制^[5]。锅炉汽轮机协调控制方式是结合了汽轮机跟踪控制与锅炉跟踪控制的优点而设计出的方案。

在锅炉汽轮机协调控制中,当发电机负荷需求发生变化时,笔者采用前馈调节汽轮机调节阀开度到与发电机负荷变化需求相符的位置,然后维持这个开度等待锅炉输入的主蒸汽压力恢复。主蒸汽压力达到规定值时,发电机输出与发电机负荷变化需求相一致。由此可达到发电机负荷高变化率与稳定控制的目的,进而可以达到供求平衡。

2.2 直流锅炉的协调控制

直流锅炉的协调控制过程主要为:将发电量指令信号 MWD 作为比例预先控制,对其加上主蒸汽压力修正信号,组成锅炉输入指令信号(boiler input demand, BID)。作为协调控制中的给水系统是把锅炉指令信号本身作为比例动作控制信号,且和锅炉输入加速信号加在一起作为给水流量指令信号(feed water demand, FWD)。燃烧控制系统是把锅炉输入指令信号的函数作为预先比例控制信号,将锅炉输入加速信号的值进行加法运算,然后加上主蒸汽温度修正信号作为燃烧量指令信号(fuel flow demand, FFD)。

锅炉汽轮机协调控制方式的优点是既不完全依赖于积累在锅炉中的能量,也不完全依靠 MWD 调节锅炉输入燃料的量。因此,该方式能在保证控制结果准确的同时保持稳定而又快速的控制^[6]。

3 非线性 PID 在锅炉主蒸汽温度控制中的应用

笔者研究的锅炉主蒸汽温度控制对象设为二阶函数 $G_0 = 20/s^2 + 20s + 10$,直接在线性 PID 控制器中串联非线性函数构成非线性控制器。系统仿真曲线如图 1 所示,表示了系统输出量与时间的关系。

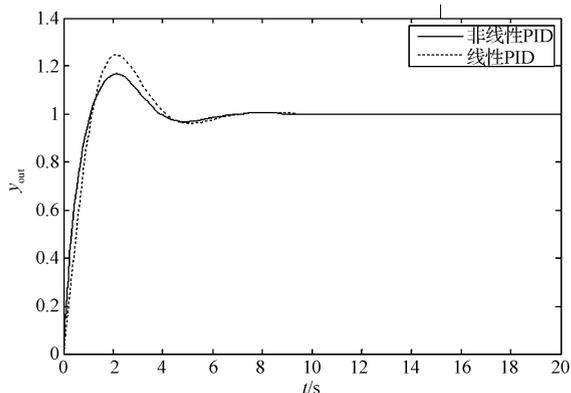


图 1 以上两种算法的仿真图像比较

从控制系统仿真曲线图对比可以看出:①构造的非线性 PID 控制器比线性 PID 控制器有更快的响应速度,更小的超调量,更短的调节时间;②系统中对象参数发生改变时,会明显影响系统响应^[7]。但也存在一些问题,如:图 2 的控制结构中并未加入延时因子,而对于锅炉这个大延时、复杂的大系统而言,延迟系统是必不可少的研究重点,且非线性 PID 控制在系统动态性能上并没有特别明显的改进,其调节时间基本相同,超调量差别不大,因此本研究引入了非线性离散控制方法。

4 非线性离散控制器的数学模型

4.1 锅炉主蒸汽温度控制系统的研究方法

通常把带有不确定参数、不确定动力学(系统扰动)及外干扰的非线性系统称为不确定非线性控制系统^[8]。近十年来对这种系统的研究受到学者的广泛重视。变结构控制以及 G. Leitman 开始的研究^[9]均属此列。此外还出现了一些全新的研究方法。如:

(1)学习控制。对于特别复杂的系统,以精确模型为基础的方法往往无能为力。利用逐次更新控制律的学习方法,建立实际控制律,是一种新的有前途的方向^[10-11]。

(2)循环控制(repetitive control)。循环控制主要应用于有重复性的周期过程的系统,如负载是周期的;任务是周期的(机械加工系统的加工过程)等。利用其周期性设计控制律,使其在下一个周期里得到更新^[12]。循环控制与学习控制是相关的。

(3)神经网络控制。这种控制原理很适于不确定、复杂系统,它具有自适应、自学习、自组织的特点。近年来得到了广大研究工作者重视,研究成果非常多^[13]。

4.2 设备模型的建立

本研究将主蒸汽温度作为非线性离散控制的研究对象,根据循环控制方法,用采样周期 T 对离散的系统进行模型化^[14]。如下所示:

$$A(z^{-1}) \cdot y(k) = z^{-d_1} \cdot B_1 \cdot (z^{-1}) \cdot u_1(k) + z^{-d_2} \cdot B_2 \cdot (z^{-1}) \cdot u_2(k) + z^{-d_w} \cdot C \cdot (z^{-1}) \cdot w(k) \quad (1)$$

式中: $k-kT$ 时刻表示常数。并且因为 z^{-1} 是延迟因子,有 $z^{-1} \cdot y(k) = y(k-1)$,其中: $y(k)$ —设备的输出(蒸汽温度差值); $u_1(k)$ —给设备的控制输入; $u_2(k)$ —附加于设备的(已知量的)外界干扰(再循环气体流量); $w(k)$ —MWD—负荷需求信号, $w(k)$ —对于这些由于已知外界干扰而产生变动的设备参数的非线性补偿,或者是用于预先补偿控制信号间的相互干扰及控制量的变动而设定的量^[15]。

4.3 目标值的跟踪

目标值的跟踪是非线性离散控制法的重要成果之一,它是针对锅炉控制系统的大延时特性,在机炉协调控制系统里根据 MWD,建立追踪控制对象的控制量(系统的输出) y_M 与目标值 $r(k)$ 的函数,当目标值恒为零时($r(k) = 0$),以脉冲型外界干扰的任意初始变

化量使控制误差值归零。控制的目的是为了使系统的输出渐进地满足 $y_M(k)$,从而合成控制输入 $u_1(k)$ 。

负荷跟踪的原理:

$$A_M(z^{-1})y_M(k) = z^{-d_m}B_M(z^{-1})r(k) \quad (2)$$

式中: $r(k)$ —有界的标准输入; $A_M(z^{-1})$ —渐进稳定多项式。从跟踪控制的目的来看,合成控制的输入 $u_1(k)$ 是为了使系统的输出渐进地满足公式(2)的 $y_M(k)$ 。

对系统的数学模型还需进行调整,引入 $r(k) = 0$ 的稳定多项式 $D(z^{-1})$,系统的输出为:

$$D(z^{-1})y(k+d_1) = 0, y(0) \neq 0 \quad (3)$$

其中:

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_nz^{-n} \quad (4)$$

为了满足式(4)而合成 $u_1(k)$ 。

假设设备模型的输出误差是:

$$e(k) = y(k) - y_k(k) \quad (5)$$

那么之前所述的跟踪与调整的控制目的如果能够满足以下公式:

$$D(z^{-1})e(k+d_1) = 0, k \geq 0 \quad (6)$$

则能够实现控制目的。对控制信号 $u_1(k)$ 进行计算。

设备的参量 $a_1, \dots, a_{n_a}, b_{10}, \dots, b_{20}, \dots, b_{2nb_2}, c_0, \dots, c_{n_c}$ 是作为已知参量来决定所需调节器的结构。

笔者应用多项式 $D(z^{-1})$,算出多项式 $R(z^{-1})$ 、 $S(z^{-1})$,从而模型跟踪系统得以实现。

$$D(z^{-1}) = A(z^{-1})R(z^{-1}) + z^{-d_1}s(z^{-1}) \quad (7)$$

由此可知,目标值的负荷跟踪就可以实现了。除了负荷跟踪,在实际系统中,外界干扰也是必须考虑的因素。

4.4 干扰对策

众所周知,锅炉蒸汽温度的参量很大程度上取决于负荷的变化。非线性离散系统原本是把时不变系统作为对象来进行讨论,但若让系统的负荷以一定比例变化,此时研究对象就成了时变系统,特别在负荷变化比例很大的情况下,由于参量的估算值不能够跟踪实际参量而得到,其控制性能就会变坏。实际实验中外界干扰不可避免,系统延迟问题和不确定性广泛存在于工业过程控制中,而由于锅炉系统的大延时特性,使得负荷变化幅度有时会很大,这样就形成了主蒸汽温度系统的外界干扰^[16]。

非线性离散控制法对外界干扰的控制具有良好的控制效果,本研究采用的是迭代最小二乘法识别误差信号从而消除干扰。

式(7)的两边乘上 $y(k)$,如果运用式(1)的关系,

则可以得到以下的式子:

$$D(z^{-1})y(k) = A(z^{-1})R(z^{-1})y(k) + z^{-d_1}s(z^{-1})y(k) = R^r(z^{-1})u_1(k - d_1) + R^n(z^{-1})u_2(k - d_2) + S(z^{-1})y(k - d_1) + R^m(z^{-1})w(k - d_w) = \theta^T \zeta(k - d_1) \quad (8)$$

因为式(1)的参量的数为 $(na + nb_1 + nb_2 + nc + 3)$,在 $(d_1 > 1)$ 的情况下,式(8)是式(1)的非最小实现。

根据干扰对策中的控制目的,将式(8)代入式(6),则可得如下形式:

$$D(z^{-1})e(k + d_1) = b_{10} \cdot u_1(k) + \theta_0^T \cdot \zeta_0(k) - D(z^{-1})y_M(k + d_1) = 0 \quad (9)$$

对于非线性不确定系统里的估算,本研究使用了迭代最小二乘法^[17]。识别模型如下式所示:

$$D(z^{-1})\hat{y}(k) = \hat{\theta}^T(k) \cdot \zeta(k - d_1) \quad (10)$$

式中: $\hat{y}(k)$, $\hat{\theta}^T(k)$ —式(8)中 $y(k)$ 、 θ 的估算值。

已知误差识别信号为 $e^*(k)$ 。

$$e^*(k) = D(z^{-1})[y(k) - \hat{y}(k)] = [\theta - \hat{\theta}(k)]^T \zeta(k - d_1) \quad (11)$$

由 $e^*(k)$ 得出如下的参量调整法则:

$$e^*(k) = \frac{D(z^{-1})y_M(k) - \hat{\theta}^T(k-1) \cdot \zeta(k - d_1)}{1 + \theta^T(k - d_1)\Gamma(k - 1) \cdot \zeta(k - d_1)} \quad (12)$$

式中: $0 < \lambda_1(k) \leq 1, 0 \leq \lambda_2(k) \leq 2, \Gamma(0) > 0$ 。

通过在系统中添加控制信号, $y_M(k) = y(k)$,即能让系统的输出值 $y(k)$ 与目标值 $y_M(k)$ 变为一致,从而可以消除干扰^[18]。

5 非线性模型的建立

5.1 基于实际设备数据的非线性模型的建立

非线性离散控制器是基于分别独立地处理非线性静态和线性动态而进行控制对象的特性解析和控制器的设计。模型如图2所示,其由一个非线性静态函数 F 和两个线性动态函数 $G_f(s)$ 、 $G_r(s)$ 组成^[19]。

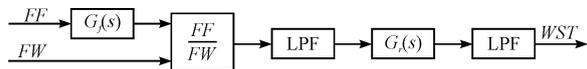


图2 水冷壁非线性离散模型框图

该模型中:将燃料流量 FF 指令到达锅炉的延迟线性动态函数设为 $G_f(s)$ 。

把在水冷壁内由燃烧产生的热能通过锅炉管进行热交换的动态函数设为 $G_r(s)$ ^[20]。

FR/FW 被称为水燃比 R ,就是给水流量和燃料流量的比值。LPF(低通滤波器)是除去高频分量的二次巴特沃兹(Butter worth)滤波器,截止频率为0.005 Hz。

线性动态函数 $G_f(s)$ 、 $G_r(s)$ 的表达式如下式:

$$G_f(s) = \frac{1}{1 + \tau_f \cdot s} \quad (13)$$

$$G_r(s) = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s} \quad (14)$$

式中: τ_f, τ_r —时间常数。

并且由给水流量 FW 、燃料流量 FF 求解的水燃比 R 和水冷壁出口蒸汽温度的稳定状态的数据导出非线性静态。它们根据 MWD ,水燃比 R 以及水冷壁出口蒸汽温度 WST 的数据如下式所示:

$$WST = F(R, MWD) \quad (15)$$

用在非线性静态时取得的数据是155 MW、250 MW、300 MW以及500 MW的稳定负荷,中间值用直线内插法。

本研究依据实际数据推导出 R 与 WST 的关系式:

$$R = -0.00122WST + 0.57 \quad (16)$$

线性动态的时间常数是把线性离散模型的输出作为 WST_m ,水冷壁出口温度的实际数据为设 WST 时,通过求式(17)的方均误差性能来评价函数的最小值的时间常数。

$$e^*(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (WST - WST_m)^2 \quad (17)$$

式中: N —数据的个数。利用 τ_f 的数据,可以将线性动态函数的表达式带入模型中进行仿真。但这只是非线性离散控制器数学模型的一部分,还需要对函数进行静、动态的补偿控制。

5.2 非线性系统的控制

基于实际数据,本研究由非线性离散模型组建了非线性控制器。

水冷壁蒸汽温度非线性离散控制器如图3所示。其由图2的非线性离散模型和镜像目标而构成,对非线性动态、线性静态分别进行独立地补偿。

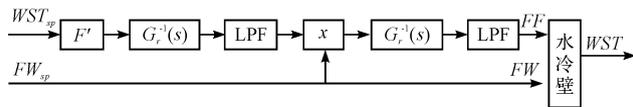


图3 水冷壁蒸汽温度非线性离散控制器

非线性静态函数 F 的补偿,取式(16)的非线性静态的逆函数 F' ,由水冷壁出口蒸汽温度 WST 和发电需求量 MWD 推导出的水燃比 R 如下式所示:

$$WST = F'(R, MWD) \quad (18)$$

线性动态函数 $G_f(s)$ 、 $G_r(s)$ 利用一次延迟动态式(19,20)的逆动态进行补偿。

$$(G_f)^{-1}(s) = 1 + \tau_f s \quad (19)$$

$$(G_r)^{-1}(s) = 1 + \tau_r s \quad (20)$$

在组建控制器时,从 WST_m 到 WST 的传递函数

变为 1, 这样的输出是很理想的。由此, 非线性离散控制模型就搭建完成, 可以在 Matlab 上对其进行仿真。

6 非线性离散控制的仿真结果

6.1 实验仿真结果

本研究将给水流量、燃料流量的实际数据输入给模型, 然后将得到的数据与实际数据进行比较。水燃比 R 的仿真图像如图 4 所示。

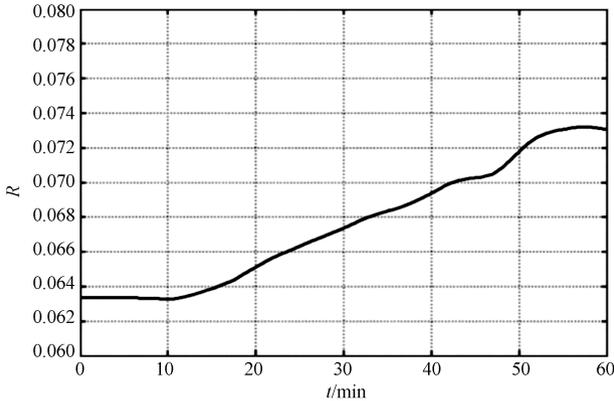


图 4 非线性离散模型的验证结果——水燃比 R 的波形

根据给水流量和燃料流量的实际数据而得出的水燃比及水冷壁出口流体温度的模型输出与实际数据的比较如图 5 所示。

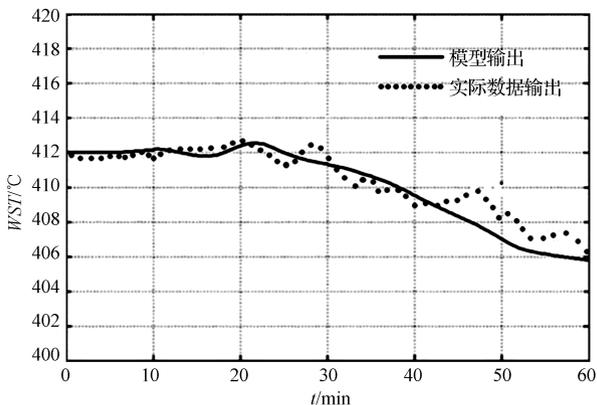


图 5 非线性离散模型的验证结果

6.2 实验结果分析

由上述讨论可见, 非线性离散模型的组成为两部分, 实际进行仿真时应将这两部分合成一个整体进行研究, 另外可由实际数据求出 R 与 WST 的关系式, 这点也非常重要。水燃比 R 的图像与实际测量结果很大程度上接近, 模型输出 WST 与实际数据输出也基本吻合, 可知本研究设计的非线性离散控制器模型在实际运用中具有可行性与理论上的正确性。

7 结束语

针对火力发电系统中主蒸汽温度的大延时、非线性和时变性, 本研究分析了其被控对象动态特性和现场实际情况的基础上, 在锅炉汽轮机协调控制系统中设计了非线性离散控制器。笔者使其可以对锅炉主蒸汽温度被控对象进行目标值的跟踪并且能够消除外界的不确定性和系统延时造成的干扰, 这样就很好地解决了锅炉主蒸汽温度控制系统的大延时和外部扰动问题。同时, 笔者通过运用不确定非线性控制系统中的循环控制法对其进行数学模型的建立。

本研究的实验及仿真结果证明, 火力发电系统中主蒸汽温度的非线性离散控制方法具有算法简单、超调小、收敛快、抗干扰能力强和鲁棒性强等优点, 可将其应用于智能电网的实际火力发电设备中, 以此来改善供求平衡, 提高电能质量, 保证电力系统安全经济地运行。鉴于非线性离散控制法的优越性, 还可将其运用于火电厂锅炉汽包水位的控制系统中。另外, 该算法的研究也尚存在不足, 例如: 非线性离散模型的推导和讨论过程比较复杂和繁琐以及在实时控制方面还有很大提高空间, 因此今后的研究方向可以是将负荷跟踪与负荷预测方法相结合, 以此对锅炉主蒸汽温度控制系统进行更加智能和精确地控制。

参考文献 (References):

- [1] 冯晓露. 智能控制在电厂主蒸汽温度控制系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学热能工程系, 2006.
- [2] 钟华昌, 崔利. 蒸汽锅炉控制系统的研究[J]. 吉林农业, 2011(10): 218.
- [3] 郭振凯, 顾文锦, 王海玲. 基于离散非线性 PID 控制的十字梁试验系统研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1322-1324.
- [4] (日) 松村司郎, 平山开一郎. 发电设备中的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012, 3(9): 2-31.
- [5] 于恩清. 浅谈发电厂集控的汽水系统与锅炉控制[J]. 科技创新与应用, 2013(5): 150.
- [6] 朱海鹏, 孙永峰. 谈直流锅炉特点及动态特性浅析[J]. 农村实用科技信息, 2013(12): 62.
- [7] 雷文彬. 一种非线性 PID 控制算法的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2010, 29(4): 268-271.
- [8] 高为炳, 程勉, 夏小华. 非线性控制系统的发展[J]. 自动化学报, 1991, 17(5): 1-12.
- [9] LIU Yong, GAO Wei-bing. A new control method and its robustness for a class of nonlinear system[J]. Theory Appl, 1988(58): 117-133.
- [10] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering

- operation of robots by learning[J]. **Robous Systems**, 1985 (1):123-140.
- [11] ATKESON C G, MCLUTYRE J. Robot trajectory learning through practice[J]. **IEEE, Robotics and Automation**, 1986,3(1):1737-1742.
- [12] HARA S. A new type servo system for periodic exogenous signals [J]. **IEEE, Repetive Control System**, 1988 (33):659-668.
- [13] 刘 瑞. 模糊神经网络在火电厂锅炉主蒸汽温度控制系统中的应用[D]. 西安:长安大学电子与控制工程学院, 2013.
- [14] 李晓东. 非线性离散系统的一种实时建模方法[J]. **系统与数学**, 2013,23(1):58-64.
- [15] 董 娜, 吴爱国, 陈增强. 改进的非线性离散系统自适应控制驱动控制[J]. **控制理论与应用**, 2013, 30(10): 1309-1314.
- [16] 杨贤辉. 非线性离散系统的干扰抵消和干扰抑制的研究 [D]. 南京:东南大学控制理论与控制工程学院, 2007.
- [17] 阳 丹, 王湘江. 迟滞非线性系统辨识与补偿控制研究 [J]. **机电工程**, 2014,31(1):57-61.
- [18] (日)松村司郎. 適応制御の実用化に関する研究[J]. 中部電力株式会社研究資料, 1993,11(91):63-71.
- [19] NAKAMURA M, YOSHIKAI T, GOTO S, et al. Nonlinear separation modeling and control of a boiler system by Use of actual data of a thermal power plant[J]. **Electrical Engineering in Japan**, 2003,144(4):26-34.
- [20] WANG Wei, LI Han-Xiong, ZHANG Jing-tao. Intelligence-based hybrid control for power plant boiler [J]. **IEEE, Transaction on, control systems Technology**, 2002,29(3):280-287.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

江 霓, 马立新. 发电系统协调控制中非线性离散法的研究[J]. **机电工程**, 2015,32(3):403-408.

JIANG Ni, MA Lix-in. Nonlinear discrete method for power system coordination control[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015,32(3):403-408.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 402 页)

参考文献 (References):

- [1] 中国风能协会. 2013 年中国风电装机容量统计 [EB/OL]. [2014-2-28]. <http://www.cwea.org.cn/>.
- [2] 徐海亮, 章 玮, 陈建生, 等. 电网电压不平衡且谐波畸变时双馈风电机组转矩波动抑制[J]. **电力系统自动化**, 2013,37(7):12-17.
- [3] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制[J]. **中国电机工程学报**, 2010,30(9):97-104.
- [4] HU J, HE Y, XU L, et al. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009,56(2):439-459.
- [5] ZHOU Peng, HE Yi-kang, SUN Dan. Improved direct power control of a DFIG-based wind turbine during network unbalance[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2009,24(11):2465-2474.
- [6] HU J, NIAN H, XU H, et al. Dynamic modeling and improved control of DFIG under distorted grid voltage conditions [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2011,26(1):163-175.
- [7] XU H, HU J, HE Y. Operation of wind turbine driven DFIG systems under distorted grid voltage conditions-analysis and experimental validations [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2012,27(5):2354-2366.
- [8] HU J, XU H, HE Y. Coordinated control of DFIG's RSC and GSC under generalized unbalanced and distorted grid voltage conditions [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013,60(7):2808-2819.
- [9] 年 珩, 宋亦鹏. 谐波电网下基于矢量比例积分电流调节器的双馈异步发电机运行控制技术[J]. **中国电机工程学报**, 2013,33(6):101-111.
- [10] HWANG J G, LEHN P W. A single-input space vector for control of AC-DC converters under generalized unbalanced operating conditions [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010,25(8):2068-2081.

[编辑:洪炜娜]