

6-3-2020

## Analysis and Design of LFC System with Governor Dead-band via Generalized Active Disturbance Rejection Control

Shuaibing Chang

*School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

Tan Wen

*School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

Zhiyong Zeng

*School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Analysis and Design of LFC System with Governor Dead-band via Generalized Active Disturbance Rejection Control

## Abstract

**Abstract:** *To eliminate the effect of the governor dead-band nonlinearities and guarantee the system stability, for load frequency control (LFC) of power systems with governor dead-band nonlinearity, the active disturbance rejection control (ADRC) was adopted, and the effectiveness of the control method was verified through the describing function method. A linearized method of dead-band was proposed, and the generalized active disturbance rejection control (GADRC) was adopted. Further, an error compensation scheme was proposed to eliminate the dead-band nonlinearities effectively. Simulation results show that the proposed error compensation scheme can eliminate the dead-band nonlinearity effectively and guarantee the control performance of the system. The describing function method can be proposed to obtain the range of the compensation coefficient.*

## Keywords

governor dead-band nonlinearity, load frequency control, describing function method, generalized active disturbance rejection control, error compensation scheme

## Recommended Citation

Chang Shuaibing, Tan Wen, Zeng Zhiyong. Analysis and Design of LFC System with Governor Dead-band via Generalized Active Disturbance Rejection Control[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 818-825.

## 具有调速器死区的 LFC 系统的广义自抗扰控制

常帅兵, 谭文, 曾智勇

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 为了消除调速器死区非线性对系统的影响和保证系统稳定, 针对存在调速器死区的负荷频率控制(load frequency control, LFC)系统, 采用了自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法, 并通过描述函数法验证控制方法的有效性。提出死区线性化方法, 并采用了广义自抗扰控制(generalized active disturbance rejection control, GADRC)方法。为能有效地消除死区非线性, 提出了一种误差补偿策略。仿真结果显示, 提出的误差补偿策略能有效地消除死区非线性, 保证了系统的控制性能。提出通过描述函数法获得补偿系数的取值范围也是可行。

**关键词:** 调速器死区非线性; 负荷频率控制; 描述函数法; 广义自抗扰控制; 误差补偿策略

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 04-0818-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704015

### Analysis and Design of LFC System with Governor Dead-band via Generalized Active Disturbance Rejection Control

Chang Shuaibing, Tan Wen, Zeng Zhiyong

(School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To eliminate the effect of the governor dead-band nonlinearities and guarantee the system stability, for load frequency control (LFC) of power systems with governor dead-band nonlinearity, the active disturbance rejection control (ADRC) was adopted, and the effectiveness of the control method was verified through the describing function method. A linearized method of dead-band was proposed, and the generalized active disturbance rejection control (GADRC) was adopted. Further, an error compensation scheme was proposed to eliminate the dead-band nonlinearities effectively. Simulation results show that the proposed error compensation scheme can eliminate the dead-band nonlinearity effectively and guarantee the control performance of the system. The describing function method can be proposed to obtain the range of the compensation coefficient.

**Keywords:** governor dead-band nonlinearity; load frequency control; describing function method; generalized active disturbance rejection control; error compensation scheme

## 引言

随着我国电力市场的飞速发展, 现代电网区域

间的互联程度也日益增强, 目前电网已经成为由多个控制区域组成的多区域互联电力系统。而对于互联的电力系统, 负荷的任意变化都有可能使系统间联络线的交换功率出现偏差和系统频率发生波动, 甚至可能导致系统出现不稳定。并且由于现代电力系统规模和复杂性的不断增加, 由系统振荡引起的广域停电的风险也在增加。所以, 为了解决问题和



收稿日期: 2016-07-26 修回日期: 2016-09-06;  
基金项目: 国家自然科学基金(61573138), 中央高校科研业务费专项资金(2015XS61);  
作者简介: 常帅兵(1987-), 男, 河南许昌, 博士生, 研究方向为自抗扰控制。

<http://www.china-simulation.com>

保证电能质量,就必须有一个负荷频率控制系统(load frequency control, LFC),设计这个系统的目的就是使系统频率维持在标称值并尽可能使控制区域之间的未计划的联络线交换功率最小<sup>[1]</sup>。

目前已有的文献中提出了多种控制方法用于解决 LFC 问题。如协调控制方式(coordinated control mode)、滑模控制(sliding mode control, SMC)方法、2-自由度(two-degree-of-freedom, TDF)内模控制(internal model control, IMC)的 PID (proportional integral derivative)整定方法<sup>[2-4]</sup>。文献[5]也对 LFC 系统的鲁棒性进行了理论分析和研究。但是,这些文献忽略了系统存在死区非线性的情况,提出的控制属于线性控制范畴。在系统存在死区非线性时,不能提供理想的控制性能。所以,一个能在系统存在死区非线性的情况下,依旧提供良好性能的控制策略就很重要。本文是在考虑系统存在调速器死区的基础上,设计合适的控制器,保证系统的控制性能。

在实际工业控制中,由于调速器死区的影响,系统的控制性能受到恶化,甚至出现不稳定。因此,近年来,一些文献针对 LFC 系统存在调速器死区的情况进行了研究。如差分进化算法(differential evolution algorithm, DEA)、万有引力搜索算法(gravitational search algorithm, GSA)、模式搜索法(pattern search, PS)、布谷鸟搜索优化算法(cuckoo search optimization algorithm, CSOA)、增益调度 PI(proportional-integral)控制方法、模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC)方法、稳定性方程方法、模型预测控制算法(model predictive control, MPC)和最优 2 型模糊控制器设计方法<sup>[6-13]</sup>。这些文献针对 LFC 系统存在调速器死区非线性的情况,提出了多种控制方法用于保证系统的控制性能。不过,其所设计的控制器结构相对复杂,计算量大,工业应用困难。

由于自抗扰控制<sup>[14]</sup>(active disturbance rejection control, ADRC)相对于其他控制来说,结构更简单且适用于各种非线性系统。该控制器只需整定两个

参数,便于整定,计算简单,能够容易地应用到工业中。文献[15]提出了广义自抗扰控制(generalized active disturbance rejection control, GADRC)方法,它不仅具有 ADRC 的特点,还可以充分利用对象模型的已知信息进行设计。所以,本文首先采用 ADRC 方法分析具有调速器死区的 LFC 系统,通过描述函数法验证该方法能否消除死区的影响。接着,提出死区线性化方法,并采用了 GADRC 方法。然后,为很好地消除死区对系统的影响,本文提出了一种误差补偿策略。并且提出通过描述函数法验证该策略的有效性,和确定补偿策略中静态补偿系数的取值范围,为该系数的选取提供了参考。

## 1 控制模型及分析

### 1.1 具有调速器死区的 LFC 系统模型

本文考虑如图 1 所示的具有调速器死区的单区域系统模型。其中,  $\Delta P_d$  表示负荷扰动,  $K_p$  是发电机增益,  $T_p$ 、 $T_T$  和  $T_G$  分别是发电机时间常数、汽轮机时间常数和调速器时间常数,  $\Delta f(t)$  是频率偏差,  $\Delta P_G(t)$  表示汽轮机输出变化,  $\Delta X_G(t)$  表示调速器气门位置变化。

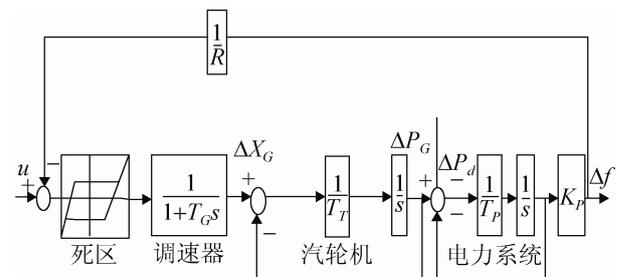


图 1 具有调速器死区的单区域电力系统  
Fig. 1 Single-area power system with governor dead-band

显而易见,该电力系统包括 3 个部分:

- 1) 调节阀动态:  $G_g(s) = \frac{1}{T_G s + 1}$
- 2) 汽轮机动态:  $G_t(s) = \frac{1}{T_T s + 1}$
- 3) 电力系统动态:  $G_p(s) = \frac{K_p}{T_p s + 1}$

这个系统模型可以表示成

$$\Delta f = G(s)u + G_d(s)\Delta P_d \quad (1)$$

$$\text{其中: } G(s) = \frac{G_p G_t G_g}{1 + \frac{G_p G_t G_g}{R}}, G_d(s) = \frac{G_p}{1 + \frac{G_p G_t G_g}{R}} \quad (2)$$

$R$  为机组下降特性。因此, LFC 问题就是一个扰动抑制问题: 采用反馈  $u = -K(s)\Delta f$  镇定对象  $G(s)$  并且使得  $\Delta P_d$  对频率变化  $\Delta f$  的影响最小。然而, 由于调速器死区非线性的存在, 使系统性能受到恶化, 增加了控制器的复杂性和控制难度。所以, 本文所设计的控制器必须能很好地消除死区非线性对系统的影响, 并且要结构简单, 计算方便, 便于应用。

### 1.2 自抗扰控制理论

假设被控系统有如下模型:

$$y^{(n)}(t) = bu(t) + f(y(t), u(t), d(t)) \quad (3)$$

其中:  $n$  是 ADRC 的阶数;  $b$  是串联积分模型的增益;  $f(y, u, d)$  是系统未知动态和外部扰动的组合。在 ADRC 设计里假设是未知的, 称为广义扰动。

在 ADRC 框架中, 其中心思想是通过一个扩张状态观测器(extended state observer, ESO)来估计未知的广义扰动  $f(y, u, d)$ 。令

$$z_1 = y, z_2 = \dot{y}, \dots, z_n = y^{(n-1)}, z_{n+1} = f(y, u, d) \quad (4)$$

假设  $f(y, u, d)$  可微分且  $\dot{f}(y, u, d) = h(t)$ , 则系统模型(3)可写成

$$\begin{cases} \dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}u + \tilde{E}h \\ y = \tilde{C}z \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b \\ 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1}, \tilde{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times 1}$$

$$\tilde{C} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times (n+1)}, z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n \ z_{n+1}]^T$$

ADRC 是一个新型控制结构与新型设计理念的结合。在设计中, 广义扰动是假定存在的, 而实际扰动是未知的。就像 PID 控制器, 它虽有一些缺陷, 但是, 在工业控制中仍有很大的潜在应用价值。而且, ADRC 是一种独立于被控对象模型的普

适性控制结构, 只需要知道对象的相对阶  $n$  及相应增益  $b$ 。特别地, ADRC 可只需整定 2 个参数<sup>[16]</sup>(控制器带宽  $w_c$  和观测器带宽  $w_o$ )。因此, 很容易为控制工程师所理解。

出于实际原因, 在 ADRC 中的模型假定是一个串联积分模型(3), 假若知道控制对象模型的一些信息, 是否能够将这些信息用到 ADRC 中, 从而提高控制性能? 为此, 一个可利用控制对象模型的已知信息进行设计的 GADRC 方法被提出。

考虑一个具有如下状态空间实现的常规单输入单输出系统:

$$P(s) = \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

系统的状态维数假设为  $n$ , 系统受到广义扰动  $f$  影响的表现形式如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_d f \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

对于这样一个系统, 依据 ADRC 的思想, 可以定义如下的扩展控制对象:

$$\begin{cases} \dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}u + \tilde{E}h \\ y = \tilde{C}z \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$z = \begin{bmatrix} x \\ f \end{bmatrix}, h = \dot{f}, \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & B_d \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\tilde{C} = [C \ 0], \tilde{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

显然, 若

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (10)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1}, C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times n}$$

那么, 扩展控制对象可以简化为如 ADRC 中的(5)或(3)。

对于扩展控制对象(8), 类似于 ADRC, 一个全阶 Luenberger 状态观测器被设计:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \tilde{A}\hat{z} + \tilde{B}u + \tilde{L}(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \tilde{C}\hat{z} \end{cases} \quad (11)$$

在 ADRC 中, 观测器增益  $\tilde{L}$ :

$$\tilde{L} = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \cdots \quad \beta_n \quad \beta_{n+1}]^T \quad (12)$$

在 GADRC, 也可以如此选择若  $\tilde{A} - \tilde{L}\tilde{C}$  的所有特征值配置在  $-w_o$ 。

若  $\tilde{L}$  恰当地设计, 那么, 所有状态  $z = [x \quad f]^T$  可由 ESO 估计。在 ADRC 中, 广义扰动  $f$  被作为一个状态反馈, 目的是可以快速地被抑制。

采用一个设计恰当的 ESO, 所期望的状态反馈控制律如下:

$$u = \hat{r} - \tilde{K}\hat{z} \approx \hat{r} - \bar{K}x - k_o f \quad (13)$$

这里,  $\hat{r}$  是由跟踪微分器(tracking differentiator, TD)决定的扩展参考信号, 且控制器增益  $\tilde{K}$  定义为:

$$\tilde{K} = [k_n \quad \cdots \quad k_1 \quad k_0] = [\bar{K} \quad k_0] \quad (14)$$

其中,  $\bar{K} = [k_n \quad \cdots \quad k_1]$ 。

将这个控制律带入(7), 则闭环系统变成:

$$\begin{cases} \dot{x} \approx Ax + B(\hat{r} - \bar{K}x - k_o f) + B_d f = \\ (A - B\bar{K})x + B\hat{r} + (B_d - Bk_o)f \\ y = Cx \end{cases} \quad (15)$$

若想减弱广义扰动, 必须满足如下匹配条件:

$$B_d = Bk_o \quad (16)$$

这个条件相当于说广义扰动  $f$  与控制输入  $u$  是相匹配的。在匹配条件下, 最终的闭环系统为:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A - B\bar{K})x + B\hat{r} \\ y = Cx \end{cases} \quad (17)$$

这是参考信号  $r$  到对象输出  $y$  的期望响应, 完全有控制器增益  $\bar{K}$  决定。而  $\bar{K}$  由已知线性对象的状态数据  $(A, B, C)$  获得。

考虑扩展参考  $\hat{r}$ , 假设它和原始的参考信号  $r$  相关, 则具有如下动态:

$$\hat{r}(s) = F_r(s)r(s) \quad (18)$$

那么所期望的闭环系统(17)变成

$$y(s) = C(sI - A + B\bar{K})^{-1}BF_r(s)r(s) = T_{yr}(s)F_r(s)r(s) \quad (19)$$

因此, 最佳的扩展参考信号  $\hat{r}$  应该满足:  $T_{yr}(s)F_r(s) = 1$ 。它是一个用于提高 GADRC 的跟踪性能的选点滤波器。而跟踪没有抵消的一个充分条件是:

$$F_r(0) = \frac{1}{T_{yr}(0)} = \frac{1}{-C(A - B\bar{K})^{-1}B} \quad (20)$$

若选点滤波器没有外加动态, 为简便, 可以令  $\hat{r} = F_r(0)r$ 。

简要地说, 对于一个常规的线性系统(6), GADRC 具有如下的状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = (\tilde{A} - \tilde{L}\tilde{C})\hat{z}(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{L}y(t) \\ u(t) = \hat{r}(t) - \tilde{K}\hat{z}(t) \end{cases} \quad (21)$$

注意到, 广义扰动  $f$  是取决于模型不确定性和外部扰动的累积扰动。在 ADRC 的设计中, 它是不需要知道的, 却能够被 ESO 估计。为简便, 在 GADRC 的设计中, 可以假设  $B_d = B$ 。因此,  $k_0$  总是等于 1。GADRC 是一种可以利用控制对象已知信息进行设计的控制器合成方法, 是非常便捷的。而且, GADRC 可应用到非最小相位过程, 而采用 ADRC 进行控制是较为困难的。

## 2 调速器死区的影响

在实际系统中, 调速器死区总是存在的, 它会恶化系统的控制性能, 甚至出现不稳定。在本文, 采用描述函数法, 对具有调速器死区的 LFC 系统进行稳定性分析, 判断所采用控制方法的有效性。描述函数法分析分为以下 3 个步骤:

- 1) 获得非线性元件的描述函数  $N(X)$ , 并绘出负倒描述函数  $-1/N(X)$  的曲线;
- 2) 求传递函数  $G(jq)$ ;
- 3) 绘出传递函数  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线, 然后应用奈奎斯特稳定判据进行分析。

具有死区非线性特性的描述函数  $N(X)$  如下, 其中死区非线性的死区宽度和线性输出特性的斜率分别为 0.000 5 和 1:

$$N(X) = \frac{k}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \left( 1 - \frac{2\Delta}{X} \right) + 2 \left( 1 - \frac{2\Delta}{X} \right) \sqrt{\frac{\Delta}{X} - \left( \frac{\Delta}{X} \right)^2} \right] - j \left[ \frac{4\Delta}{X} - \left( \frac{2\Delta}{X} \right)^2 \right] \frac{1}{\pi}, X \geq \Delta \quad (22)$$

对于图 1 所示单区域负荷频率控制系统, 定义:

$$g_1 = G_C, g_2 = \frac{1}{T_G s + 1}, g_3 = \frac{1}{T_T s + 1}, g_4 = \frac{K_P}{T_P s + 1}, g_5 = \frac{1}{R} \quad (23)$$

其中,  $G_C$  是控制器的传递函数。然后通过信号流图和梅逊公式可以获得传递函数  $G(jq)$ :

$$G(jq) = \frac{g_2 g_3 g_4 g_5 + g_1 g_2 g_3 g_4}{1 - g_1} \quad (24)$$

所以, 我们就可以通过 MATLAB 将  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N(X)$  的曲线绘制在同一个坐标系中。若  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线不包围  $-1/N(X)$  的曲线, 则该系统稳定; 若  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线包围  $-1/N(X)$  的曲线, 则该系统不稳定。若  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线与  $-1/N(X)$  的曲线相交, 则系统输出将出现自激振荡, 即有极限环。

为了验证调速器死区对 LFC 系统的影响, 考虑有如下参数的单区域电力系统<sup>[4]</sup>:

$$K_P = 120, T_P = 20, T_T = 0.3, \quad (25)$$

$$T_G = 0.08, R = 2.4$$

采用常规 ADRC 进行控制, 其参数选取如下:

$$w_o = 35, w_c = 5, b_0 = 250 \quad (26)$$

通过描述函数法分析 LFC 系统的稳定性, 绘制  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N(X)$  的曲线, 其结果如图 2 所示。可以看到,  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线包围  $-1/N(X)$  的曲线, 系统不稳定。并且有两个交点, 所以存在两个极限环。然后, 在死区取值为 0.000 5 时, 加入阶跃信号  $\Delta P_d = 0.01$  ( $t = 20s$ ), 系统的响应曲线如图 3 所示。其中, 黑色点线表示系统不存在调速器死区的情况, 黑色实线表示系统存在调速器死区的情况。可以看到, 由于调速器死区的存在, 系统的控制性能受到恶化, 变得不稳定。

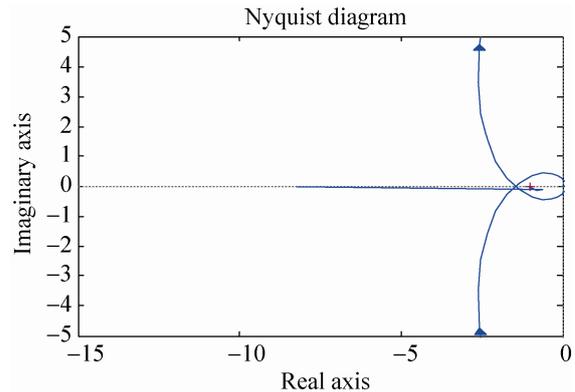


图 2  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N(X)$  的曲线  
Fig. 2 The nyquist curve of  $G(jq)$  and the curve of  $-1/N(X)$

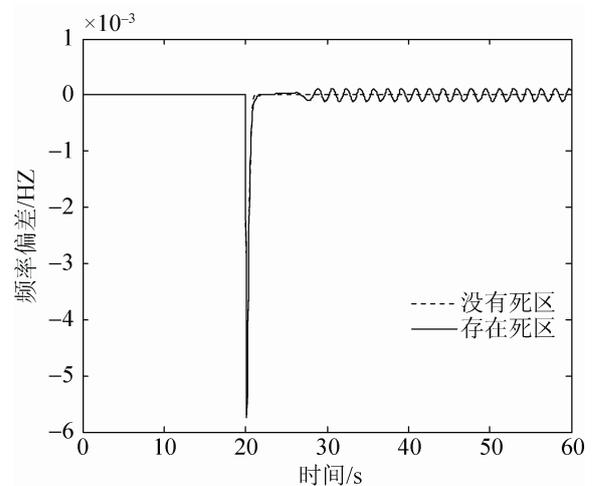


图 3 在常规 ADRC 下的电力系统阶跃响应  
Fig. 3 The responses of power system under conventional ADRC

### 3 调速器死区的线性化方法

可以看到, 由于调速器死区的存在, 系统不稳定, 因此, 设计时不能忽视调速器死区的影响。

为了考虑调速器死区的影响, 根据文献[17], 可将调速器死区非线性近似成如下传递函数形式:

$$G_m = \frac{0.8 - \frac{0.2}{\pi} s}{1 + T_m s} \quad (27)$$

考虑第 2 节所示的单区域系统, 可以获得系统的传递函数:

$$G_1(s) = \frac{-15.92s + 200}{s^3 + 15.88s^2 - 23s + 85.42} \quad (28)$$

该系统是不稳定非最小相位系统, 采用常规 ADRC 较难控制<sup>[18]</sup>。因此, 采用 3 阶 GADRC 进

行控制, 那么扩展控制对象的 ESO 设计为

$$A_{e1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -85.42 & 23 & -15.88 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{e1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 200 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$C_{e1} = [1 \quad -0.0796 \quad 0 \quad 0]$$

则观测器增益  $L_{o1}$  和控制器增益  $K_{o1}$  分别为

$$L_{o1} = [968.2 \quad 1173.2 \quad 437.6 \quad 3536.4]^T \quad (w_{o1} = 29) \quad (30)$$

$$K_{o1} = [0.216 \quad 3.3555 \quad 0.6707 \quad 1] \quad (w_{c1} = 3)$$

采用描述函数法分析系统的稳定性, 绘制  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N(X)$  的曲线, 其结果如图 4 所示。可以看到,  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线包围  $-1/N(X)$  的曲线, 系统不稳定。且存在两个交点, 即有两个极限环。然后, 在死区取值为 0.000 5 时, 加入阶跃信号  $\Delta P_d = 0.01$  ( $t = 20s$ ), 系统的响应曲线如图 5 所示。其中, 黑色点线表示系统不存在调速器死区的情况, 黑色点划线表示调速器死区的线性近似的情况, 黑色实线表示系统存在调速器死区的情况。可以看到, 由于调速器死区的影响, 系统依旧不稳定。上述结果表明, 尽管 GADRC 能处理调速器死区的线性近似, 但是还不能消除死区的本质非线性特性, 需要从本质上对死区的非线性进行补偿。

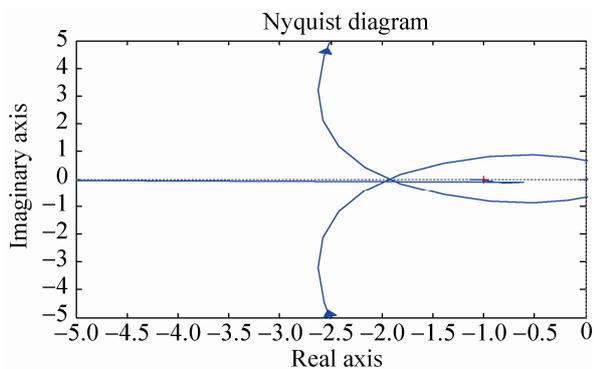


图 4  $G(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N(X)$  的曲线  
Fig. 4 The nyquist curve of  $G(jq)$  and the curve of  $-1/N(X)$

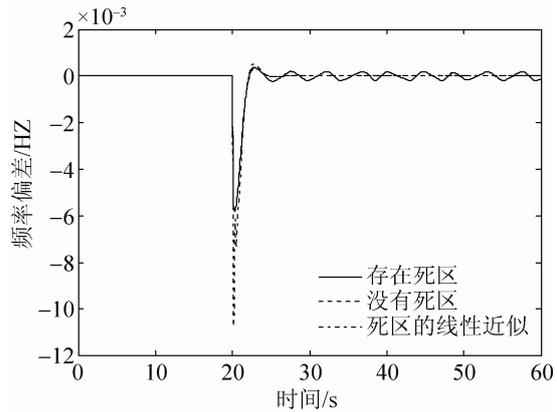


图 5 在 GADRC 下的电力系统阶跃响应  
Fig. 5 The responses of power system under GADRC

### 4 误差补偿策略

由于调速器死区的影响, GADRC 不能提供理想的控制效果。所以, 本文在 GADRC 的基础上, 提出了一种误差补偿策略, 进而提高其的控制性能, 该补偿策略如图 6 所示。其思想是将调速器的实际输出与理论输出的误差反馈回 ESO, 通过 ESO 进行估计, 使 GADRC 达到消除调速器死区非线性的目的, 使系统的控制性能快速地恢复和改善。另外, 该策略有一个可手动调节的静态补偿系数  $k$ 。

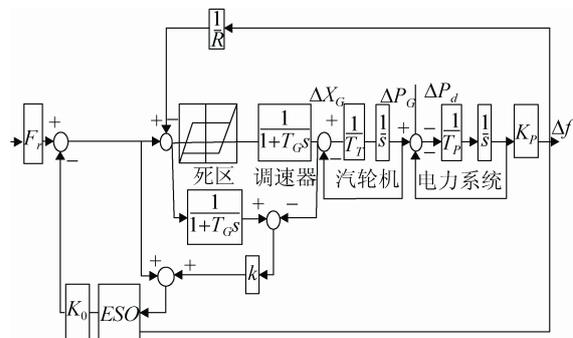


图 6 具有调速器死区的 LFC 系统的误差补偿策略  
Fig. 6 Error compensation scheme for the LFC system with governor dead-band

同样地, 在本文, 采用描述函数法分析如图 6 所示的 LFC 系统的稳定性, 其步骤同上。

对于图 6 所示单区域负荷频率控制系统, 定义:

$$\tilde{g}_1 = G_{GAL}, \tilde{g}_2 = \frac{1}{T_G s + 1}, \tilde{g}_3 = \frac{1}{T_T s + 1},$$

$$\tilde{g}_4 = \frac{K_P}{T_P s + 1}, \tilde{g}_5 = \frac{1}{R}, \tilde{g}_6 = k \quad (31)$$

其中,  $\tilde{G}_{GAI}$  是 GADRC 的传递函数; 然后通过信号流图和梅逊公式获得传递函数  $G_1(jq)$ :

$$G_1(jq) = \frac{\tilde{g}_2\tilde{g}_3\tilde{g}_4\tilde{g}_5 + \tilde{g}_1\tilde{g}_2\tilde{g}_3\tilde{g}_4 + \tilde{g}_1\tilde{g}_2\tilde{g}_6}{1 - \tilde{g}_1 - \tilde{g}_1\tilde{g}_2\tilde{g}_6} \quad (32)$$

因此, 我们就可以通过 MATLAB 将  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N_1(X)$  的曲线绘制在同一个坐标系中。若  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线不包围  $-1/N_1(X)$  的曲线, 则其系统稳定; 反之, 若  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线包围  $-1/N_1(X)$  的曲线, 则系统不稳定。若  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线与  $-1/N_1(X)$  的曲线相交, 则系统输出将出现自激振荡, 即存在极限环。

考虑第 2 节所示的单区域系统, 并采用具有公式(29)和公式(30)形式的 3 阶 GADRC 进行控制, 补偿系数取为  $k=1.8$ 。首先, 采用描述函数法分析系统的稳定性, 绘制  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N_1(X)$  的曲线, 其结果如图 7 所示。可以看到,  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线不包围  $-1/N_1(X)$  的曲线, 系统是稳定的。然后, 在死区取值为 0.0005 时, 加入阶跃信号  $\Delta P_d = 0.01$  ( $t=20s$ ), 系统的响应曲线见图 8。实线表示系统存在调速器死区的情况, 点线表示系统采用了误差补偿策略后的情况。可以看到, 在采用误差补偿策略后, 消除了死区的影响, 系统的控制性能得到了很好地改善和恢复。上述结果表明, 提出的补偿策略能有效地消除死区本质非线性, 避免极限环的出现, 保证了系统的稳定。

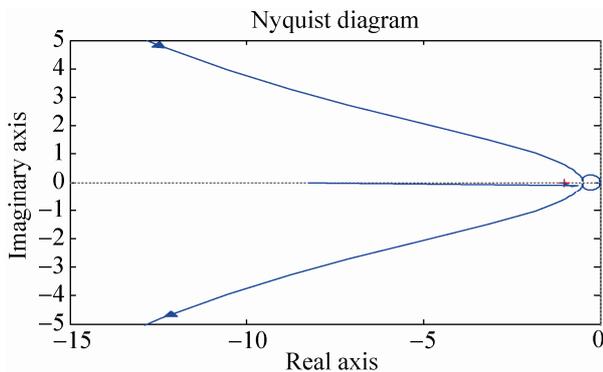


图 7  $-1/N_1(X)$  的曲线和  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线( $k=1.8$ )  
Fig. 7 The curve of  $-1/N_1(X)$  and the nyquist curve of  $G_1(jq)$  ( $k=1.8$ )

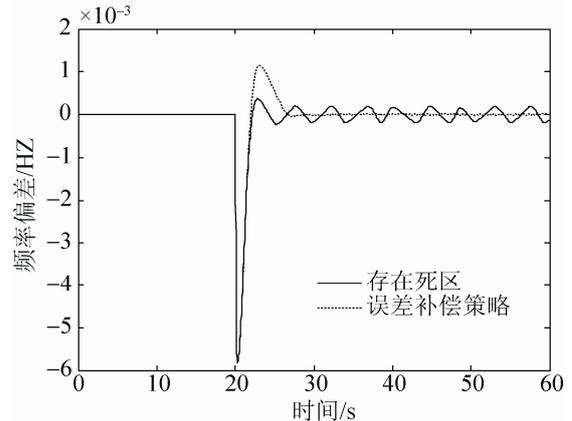


图 8 电力系统阶跃响应( $k=1.8$ )  
Fig. 8 The responses of power system ( $k=1.8$ )

然后, 通过描述函数法分析该系统的稳定性, 进而获取补偿系数的取值范围, 为该系数的选取提供了参考。要使系统稳定, 则需满足  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线不包围  $-1/N_1(X)$  的曲线, 得到  $k$  的取值范围  $1.4 < k < 2.7$ 。在  $k=1.4$  时,  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线包围  $-1/N_1(X)$  的曲线, 系统不稳定。在  $k=2.7$  时,  $G_1(jq)$  的奈奎斯特曲线和  $-1/N_1(X)$  的曲线相交, 存在一个极限环。然后, 我们通过调节补偿系数  $k$ , 来确认其的取值范围。在  $k$  取值为 1.4 或 2.7 时, 系统不稳定。因此, 采用描述函数法获取补偿系数的取值范围是可行的。

## 5 结论

为消除调速器死区对 LFC 系统的影响, 本文采用了 ADRC 方法和 GADRC 方法, 并用描述函数法进行验证。然后, 在 GADRC 的基础上, 提出了一种误差补偿策略, 同时也提出采用描述函数法进行验证和获取该补偿策略中静态补偿系数的取值范围。仿真结果证实, 常规 ADRC 不能消除死区, 存在极限环, 系统不稳定。尽管 GADRC 能处理调速器死区的线性近似, 但是还不能消除死区的本质非线性特性, 存在极限环, 系统依旧不稳定。然而, 提出的误差补偿策略能有效地消除极限环, 很好地恢复和改善系统的控制性能。并且提出通过描述函数法获取补偿系数的取值范围, 进而为该系数的选取提供参考也是可行。

## 参考文献:

- [1] Tan W. Load frequency control: problems and solutions [C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, Yantai, China, July 22-24, 2011. USA: IEEE, 2011: 6281-6286.
- [2] 张谦, 周林, 周维维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 74-80. (Zhang Qian, Zhou Lin, Zhou Luowei, et al. Load frequency control considering charging and discharging static frequency characteristics of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80).
- [3] 米阳, 吴晓, 楚瀛, 等. 基于滑模控制的单域电力系统负荷频率控制 [J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1881-1889. (Mi Yang, Wu Xiao, Chu Ying, et al. Load frequency control for one area power systems based on sliding mode control [J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1881-1889).
- [4] Tan W. Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC [J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950) 2010, 25(1): 341-350.
- [5] Tan W, Xu Z. Robust analysis and design of load frequency controller for power systems [J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796) 2009 (79): 846-853.
- [6] Sahu R K, Panda S, Rout U K. DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity [J]. Electrical Power and Energy Systems (S0142-0615), 2013 (49): 19-33.
- [7] Sahu R K, Panda S, Padhan S. A novel hybrid gravitational search and pattern search algorithm for load frequency control of nonlinear power system [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2015 (29): 310-327.
- [8] Kumar S R, Ganapathy S. Cuckoo search optimization algorithm based load frequency control of interconnected power systems with GDB nonlinearity and SMES units [J]. International Journal of Engineering Inventions (S2278-7461), 2013 (2): 23-28.
- [9] Gozde H, Taplamacioglu M C. Automatic generation control application with craziness based particle swarm optimization in a thermal power system [J]. Electrical Power Energy Systems (S0142-0615), 2011 (33): 8-16.
- [10] Jang L O. A dead zone compensator of a DC motor system using fuzzy logic control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews (S1094-6977), 2001, 31(1): 42-48.
- [11] Tsay T S. Load-frequency control of interconnected power system with governor backlash nonlinearities [J]. Electrical Power and Energy Systems (S0142-0615), 2011 (33): 1542-1549.
- [12] 杨罡, 刘明光, 屈志坚. 基于 MPC 算法的电力系统负荷频率控制 [J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(2): 105-110. (Yang Gang, Liu Mingguang, Qu Zhijian. Load frequency control of power systems based on MPC algorithm [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(2): 105-110).
- [13] Baydokhty M E, Zare A, Balochian S. Performance of optimal hierarchical type 2 fuzzy controller for load-frequency system with production rate limitation and governor dead band [J]. Alexandria Engineering Journal (S1110-0168), 2016 (55): 379-397.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23. (Han J. Active disturbance rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23).
- [15] Zhou R, Tan W. A generalized active disturbance rejection control approach for linear systems [C]// Proceedings of the 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). USA: IEEE, 2015: 248-255.
- [16] Gao Z. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [C]// Proceedings of American Control Conference, Minneapolis, MN, USA. USA: IEEE, 2006: 2399-2405.
- [17] Pothiya S, Ngamroo I. Optimal fuzzy logic-based PID controller for load frequency control including superconducting magnetic energy storage units [J]. Energy Convers Manage (S0196-8904), 2008 (49): 2833-2838.
- [18] Zhao S, Gao Z. Active disturbance rejection control for non-minimum phase systems [C]// Proceedings of the 29th Chinese Control Conference (CCC). USA: IEEE, 2010: 6066-6070.