

## 负荷频率控制系统的线性自抗扰控制

谭文<sup>†</sup>, 周宏, 傅彩芬

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 本文研究负荷频率控制系统的线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection, LADRC)方法. 考虑负荷频率控制系统的模型及结构, 本文首先通过一仿真例子分析了二阶和三阶LADRC在单区域电力系统的控制性能, 指出二阶LADRC在负荷频率控制中的限制. 随后本文针对负荷频率控制中存在的发电速率约束(generation rate constraint, GRC)这一实际问题, 提出一种anti-GRC补偿方案. 该方案将汽轮机理论输出与实际输出误差作为扰动输入, 利用扩张状态观测器进行估计, 从而使LADRC能够快速补偿该误差, 达到抗积分饱和的作用. 最后, 本文将LADRC设计方法推广到具有再热汽轮机和水轮机系统以及多区域电力系统. 仿真表明LADRC是一种独立于模型的普适性控制结构, 所需整定参数少, 能够取得比PID控制更好的抗干扰性能, 可以应用到负荷频率控制系统中.

**关键词:** 线性自抗扰控制; 负荷频率控制; 电力系统; PID控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Linear active disturbance rejection control for load frequency control of power systems

TAN Wen<sup>†</sup>, ZHOU Hong, FU Cai-fen

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

**Abstract:** We apply the linear active disturbance rejection approach (LADRC) to the load-frequency control (LFC) of power systems. Considering the model and the structure of the controlled system, we analyze a second order and a third order LADRCs for a single-area power system with non-reheated turbine; and reveal the limitations of the 2nd-order LADRC. To deal with the generation rate constraint (GRC) of the system, we propose an anti-GRC scheme for LADRC, where the error between the computed output and the real output of the turbine is fed back to the extended state observer for fast compensation of the windup. Finally, the LADRC is extended to power systems with reheated and hydro-turbines, and multi-area power systems. It is found that LADRC is a model-free control method with only two tuning parameters. Thus, it is very practical in industrial control. Simulation examples show that LADRC can reduce the load disturbance very well and is readily applicable to the load-frequency control system.

**Key words:** active disturbance rejection control; load frequency control; power systems; PID control

### 1 引言(Introduction)

频率稳定是电力系统电能质量的一个重要指标. 负荷的任意突然变化都有可能系统间联络线交换功率的偏差及系统频率的波动. 因此, 为保证电能质量, 需要一个负荷频率控制(load frequency control, LFC)系统, 该系统的目的是将系统频率维持在标称值并且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>.

常规LFC仅使用积分控制. 熟知较大的积分增益会恶化系统性能, 导致较大系统振荡, 甚至不稳定. 因此积分增益的设置必须在系统理想的暂态恢复响应和较小的超调之间进行折中. 目前文献中报道了许多

整定LFC积分增益的方法<sup>[2]</sup>.

随着现代电力系统的规模和复杂程度逐渐增大, 系统振荡更有可能在系统中扩大而导致停电, 因此先进控制算法在LFC中得到广泛研究, 包括最优控制<sup>[3-4]</sup>、变结构控制<sup>[5]</sup>、自适应控制<sup>[6]</sup>, 以及鲁棒控制<sup>[7-9]</sup>等. 先进控制方法确实可以提高系统性能, 但是这些方法或者需要系统全部状态信息, 或者需要有效的在线辨识, 在实际中难以实现.

同时, 不少文献提出通过扩展常规PI控制的方法来达到有效抑制电力系统频率振荡的方法. 负荷频率控制中采用PID控制的困难之处在于电力系统模型是高阶欠阻尼的, 而现有大多数PID整定方法都侧重于

过阻尼过程, 因此在LFC中直接采用现有PID方法整定不合适. 为此, 文献[10–11]提出一种基于两自由度内模控制的PID整定方法, 该方法只需整定2个参数, 并且可以取得较好的振荡抑制效果.

文献[12]将线性自抗扰控制(LADRC)方法应用到负荷频率控制问题. 该方法通过一个扩张观测器估计系统的扰动, 从而达到更快抑制扰动的目的, 而且该方案只需调节2个参数, 因此可以很容易为现场工程师掌握. 本文将在文献[12]的基础上进一步分析LADRC方法在负荷频率控制中的应用, 重点在于解决如下两个问题:

- 1) 负荷频率控制中如何选取适当的LADRC阶数以及相应的参数?
- 2) 当系统存在发电速率约束(GRC)时, 如何避免控制器饱和?

研究表明: LADRC能取得较好的振荡抑制性能, 而且参数整定简单, 能够应用于负荷频率控制系统.

## 2 负荷频率控制系统模型(System model for LFC)

考虑图1所示的单区域负荷频率控制系统(在某个操作点附近线性化模型)<sup>[13]</sup>.

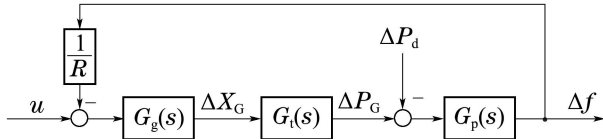


图 1 单区域电力系统

Fig. 1 Single-area power system

图中  $\frac{1}{R}$  为机组下降特性, 而

- 1)  $G_g(s)$  为调节阀动态:  $G_g(s) = \frac{1}{T_G s + 1}$ ;
- 2)  $G_t(s)$  为汽轮机动态:  $G_t(s) = \frac{1}{T_T s + 1}$ ;
- 3)  $G_p(s)$  为负荷及电机动态:  $G_p(s) = \frac{K_P}{T_P s + 1}$ .

因此, 系统开环传递函数可表示如下:

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

其中:

$$G(s) = \frac{G_p(s)G_t(s)G_g(s)}{1 + G_p(s)G_t(s)G_g(s)/R},$$

$$G_d(s) = \frac{G_p(s)}{1 + G_p(s)G_t(s)G_g(s)/R}.$$

可以看到, 负荷频率控制问题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.

## 3 线性自抗扰控制(LADRC)

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)由中科院韩京清教授提出<sup>[14]</sup>, 其思想是采用一个扩张状态观测器(ESO)来估计系统的扰动, 然后使用简单控制进行抑制. 该思想类似于反馈线性化, 但是在结构上更简单且适应于各种非线性系统. 非线性ADRC需要调节多个参数, 因此在实际应用中受到限制. 为了克服这个困难, 文献[15]考虑了ADRC的“线性”版本. 线性自抗扰控制最终只需调节2个参数, 从而大大简化了ADRC的整定过程, 并且可以利用经典控制方法分析闭环系统的稳定性及频率响应, 使得其在工业中应用得到可能.

### 3.1 结构(Structure of LADRC)

考虑如下线性系统:

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_d(s)D(s), \quad (2)$$

其中:

$$G(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0},$$

$$G_d(s) = \frac{c_h s^h + \dots + c_1 s + c_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0},$$

或者写成微分方程形式

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) =$$

$$b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_1 \dot{u}(t) + b_0 u(t) +$$

$$c_h d^{(h)}(t) + \dots + c_1 \dot{d}(t) + c_0 d(t), \quad (3)$$

其中:  $y(t)$ ,  $u(t)$  和  $d(t)$  分别是系统输出、输入和扰动;  $Y(s)$ ,  $U(s)$  和  $D(s)$  为其 Laplace 变换.  $G(s)$  和  $G_d(s)$  分别是被控对象和外部扰动的传递函数.

自抗扰控制不需要知道被控对象和扰动的完全模型, 只需知道对象相对阶  $r := n - m$  以及增益  $b := b_m/a_n$ . 也就是说, 被控系统假设具有如下模型:

$$y^{(r)}(t) = bu(t) + f(y(t), u(t), d(t)), \quad (4)$$

其中  $f(y, u, d)$  是系统未知动态以及外部扰动的组合, 在ADRC设计中假设为未知的, 称为广义扰动.

ADRC方法基本思想是利用一个扩张状态观测器来估计未知的广义扰动. 令

$$z_1 = y, z_2 = \dot{y}, \dots, z_r = y^{(r-1)},$$

$$z_{r+1} = f(y, u, d). \quad (5)$$

设  $f(y, u, d)$  可微分且  $f(y, u, d) = h(t)$ . 则系统模型(4)可写成

$$\begin{cases} \dot{z} = A_o z + B_o u + E_o h, \\ y = C_o z, \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$z = [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_r \ z_{r+1}]^T,$$

$$\begin{cases} A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{(r+1) \times (r+1)}, \\ B_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b \\ 0 \end{bmatrix}_{(r+1) \times 1}, E_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(r+1) \times 1}, \\ C_o = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]_{1 \times (r+1)}. \end{cases} \quad (7)$$

对该系统设计全阶Luenberger观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = A_o \hat{z} + B_o u + L_o (y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C_o \hat{z}, \end{cases} \quad (8)$$

其中 $L_o$ 为观测器增益:

$$L_o = [\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_r \ \beta_{r+1}]^T. \quad (9)$$

当 $A_o - L_o C_o$ 渐近稳定时,  $\hat{z}_1(t), \dots, \hat{z}_r(t)$ 趋近于输出 $y(t)$ 及其各阶导数(直至 $r$ 阶), 并且 $\hat{z}_{r+1}(t)$ 趋近于广义扰动 $f(y, u, d)$ . 这意味着可以利用这个扰动估计进行控制, 从而使其得到更快地抑制.

取如下控制率:

$$u(t) = \frac{-\hat{z}_{r+1}(t) + u_o(t)}{b}, \quad (10)$$

其中 $u_o(t)$ 待定. 此时被控系统(4)变为

$$y^{(r)}(t) = f(y, u, d) - \hat{z}_{r+1}(t) + u_o(t). \quad (11)$$

当ESO设计适当时, 即有 $\hat{z}_{r+1} \approx f(y, u, d)$ , 从而系统变成一个 $r$ 重积分系统

$$y^{(r)}(t) \approx u_o(t). \quad (12)$$

该系统可以采用如下状态反馈控制率控制:

$$u_o(t) = -k_1 y(t) - k_2 \dot{y}(t) - \cdots - k_r y^{(r-1)}(t), \quad (13)$$

因为 $\hat{z}_1(t), \dots, \hat{z}_r(t)$ 趋近 $y(t), \dots, y^{(r-1)}(t)$ , 因此最终控制率可以逼近为

$$u(t) = -\frac{k_1 \hat{z}_1(t) + \cdots + k_r \hat{z}_r(t) + \hat{z}_{r+1}(t)}{b} = -K_o \hat{z}, \quad (14)$$

其中

$$K_o = [k_1 \ k_2 \ \cdots \ k_r \ 1]/b. \quad (15)$$

### 3.2 参数整定(Parameter tuning for LADRC)

可以看到, 一个线性自抗扰控制需要设计两组参数: ESO观测器增益 $L_o$ 以及 $r$ 重积分系统的状态反馈

控制增益 $K_o$ . 为方便, 文献[15]提出将这两组增益的整定转化为两个参数的整定: 即控制器带宽 $\omega_c$ 及观测器带宽 $\omega_o$ .

考虑ESO,  $A_o - L_o C_o$ 的特征方程为

$$|sI - (A_o - L_o C_o)| = s^{r+1} + \beta_1 s^r + \cdots + \beta_{r+1}. \quad (16)$$

为简便, 假设所有观测器极点配置在 $-\omega_o$ , 即

$$s^{r+1} + \beta_1 s^r + \cdots + \beta_{r+1} = (s + \omega_o)^{r+1}, \quad (17)$$

从而

$$\beta_i = \binom{r+1}{i} \omega_o^i, \quad i = 1, \dots, r+1, \quad (18)$$

其中 $\binom{r+1}{i}$ 为组合系数. 于是观测器增益只需调节单个参数 $\omega_o$ .

当广义扰动 $f(y, u, d)$ 可以准确估计时, 原系统变成一个多重积分模型, 且当 $\hat{z}_i (i = 1, \dots, r)$ 也近似对象输出及其导数时, 状态反馈闭环特征方程为

$$|sI - (A_o - B_o K_o)| = s(s^r + k_r s^{r-1} + \cdots + k_2 s + k_1). \quad (19)$$

可以看到该控制在原点处存在一个零点因此该控制总是包含积分控制从而可以消除稳态误差. 类似地, 为简便可以将所有控制器极点(除原点外)配置在 $-\omega_c$ , 即

$$s^r + k_r s^{r-1} + \cdots + k_2 s + k_1 = (s + \omega_c)^r, \quad (20)$$

于是

$$k_i = \binom{r}{i-1} \omega_c^{r-i+1}, \quad i = 1, \dots, r, \quad (21)$$

从而反馈控制率增益只需调节单个参数 $\omega_c$ .

### 3.3 小结(Summary)

线性自抗扰控制器具有如下状态空间实现:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = A_o \hat{z} + B_o u + L_o (y - C_o \hat{z}) = \\ (A_o - B_o K_o - L_o C_o) \hat{z} + L_o y, \\ u = -K_o \hat{z}, \end{cases} \quad (22)$$

或者传递函数形式

$$u(s) = -K_o (sI - A_o + B_o K_o + L_o C_o)^{-1} L_o y(s). \quad (23)$$

可以看到LADRC是一种独立于被控对象模型的普适性控制结构. 除了需要知道对象的相对阶 $r$ 及相应增益 $b$ , 无需知道模型的具体结构和参数. 这与PID控制很相似, 具有独立于模型的固定控制结构. 特别地, LADRC只需整定2个参数, 因此很容易为控制工程师理解. 该结构本身自带积分行为, 因此设计中无需再额外加入积分器.

### 4 负荷频率控制系统的线性自抗扰控制 (LADRC for LFC)

根据负荷频率控制系统模型(1), 可以求得LFC系统的开环传递函数, 然后采用上节所述方法进行线性自抗扰控制设计. 针对负荷频率控制系统, 存在两个重要问题, 以下分别进行讨论.

#### 4.1 线性自抗扰控制的阶数(Order of LADRC)

设计LADRC的首要步骤是确定其阶数. 对于具有非再热汽轮机的机组, 其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_P}{(T_P s + 1)(T_T s + 1)(T_G s + 1) + K_P/R}, \quad (24)$$

其相对阶为3, 因此可以采用三阶LADRC进行控制, 并且简化后的多重积分对象增益为

$$b = \frac{K_P}{T_P T_T T_G}. \quad (25)$$

注意到负荷频率控制系统可以近似为二阶模型<sup>[10]</sup>

$$G_r(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-\tau s}. \quad (26)$$

因此一个问题是负荷频率控制系统能否采用更低价的LADRC来控制? 以下将用一个典型单区域电力系统来说明二阶自抗扰控制在负荷频率控制中的限制.

**例 1** 考虑具有如下模型参数的电力系统:

$$K_P = 120, T_P = 20, T_T = 0.3, T_G = 0.08, R = 2.4, \quad (27)$$

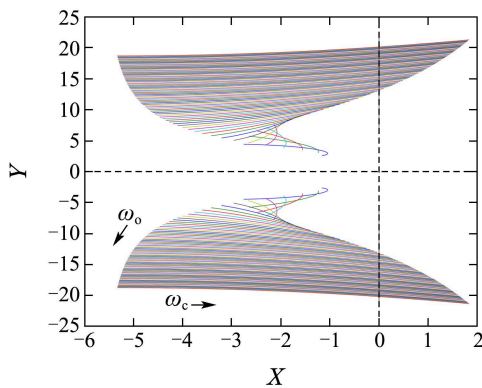
易得开环传递函数为

$$G(s) = \frac{250}{s^3 + 15.88s^2 + 42.46s + 106.3}, \quad (28)$$

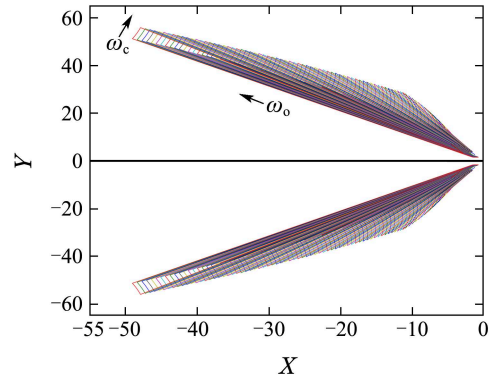
而其二阶近似模型为<sup>[10]</sup>

$$G_r(s) = \frac{18.824}{s^2 + 2.64s + 8} e^{-0.0757s}. \quad (29)$$

对该系统分别设计三阶及二阶线性自抗扰控制器. 由于相对应的重积分模型增益可由以上2个模型得到, 从而只需选择控制带宽 $\omega_c$ 与观测器带宽 $\omega_o$ . 图2显示的是 $\omega_c$ 从0.1变化到10,  $\omega_o$ 从1变化到80时在二阶和三阶LADRC作用下负荷频率控制系统主导极点变化趋势.



(a) 二阶LADRC



(b) 三阶LADRC

图 2  $\omega_c$ 和 $\omega_o$ 变化时负荷频率控制系统主导极点变化趋势  
Fig. 2 Dominant poles of the LADRC controlled system as  $\omega_c$  and  $\omega_o$  vary

从图2可以观测到:

- 1) 对二阶LADRC, 当 $\omega_c$ 和 $\omega_o$ 增加到某个界时, 负荷频率控制系统闭环主导极点实部变正(系统不稳定).
- 2) 对三阶LADRC, 不论 $\omega_c$ 和 $\omega_o$ 如何变化, 负荷频率控制系统闭环主导极点实部都为负(系统总是稳定).
- 3) 不论二阶还是三阶LADRC, 闭环系统主导极点都只覆盖s平面部分区域, 也就是说闭环极点不能任意配置, 因此LADRC对于负荷频率控制系统来说可能存在性能限制.

显然, 由于负荷频率控制系统模型的特性, 用三阶LADRC进行控制比二阶LADRC更合适, 而且整定也更容易.

经综合考虑, 二阶LADRC参数选取为

$$b = 18.824, \omega_c = 2, \omega_o = 20, \quad (30)$$

而三阶LADRC参数选取为

$$b = 250, \omega_c = 4, \omega_o = 30. \quad (31)$$

这两个控制器的Bode图如图3所示, 可以看到2个控制器具有近似的积分增益.

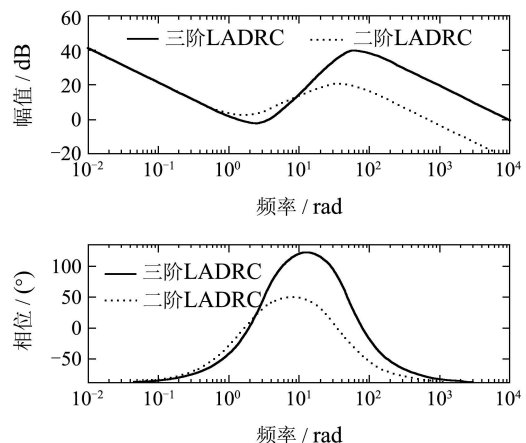


图 3 LADRC的Bode图

Fig. 3 Bode plots of LADRCs

为验证以上两个LADRC的性能,假设在 $t = 1$ 时加入阶跃扰动 $\Delta P_d = 0.01$ ,闭环系统响应如图4所示.图中点折线显示的是<sup>[10]</sup>设计的PID控制器响应.可以看到,LADRC可以取得比PID控制更好的控制效果,而三阶LADRC性能最好.

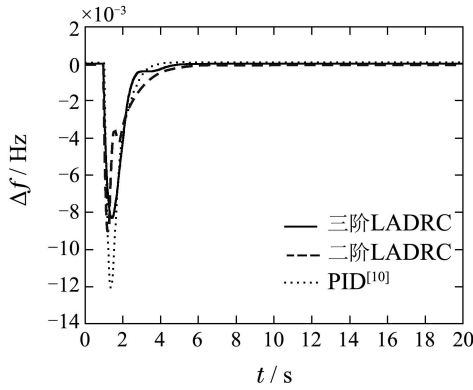


图4 负荷频率控制系统响应  
Fig. 4 Responses of the power system

为验证LADRC的鲁棒性,假设系统参数变化如下:

$$\begin{cases} 1/T_T \in [2.564, 4.762], 1/T_G \in [9.615, 17.857], \\ 1/T_P \in [0.033, 0.1], K_P/T_P \in [4, 12], \\ 1/RT_G \in [3.081, 10.639], \end{cases} \quad (32)$$

采用文献[16]提出的结构奇异值法对LADRC进行鲁棒性分析,得到闭环系统在上述参数范围变化的结构奇异值如图5所示.可以看到,三阶LADRC对应的最大结构奇异值小于1,因此可以保证该控制器在上述参数变化范围内的鲁棒性,而二阶LADRC对应的最大结构奇异值大于1,从而不能保证闭环在指定参数变化范围内的鲁棒稳定性.图6是LADRC在参数变化上、下届时的响应,可以验证上述鲁棒分析的结果.

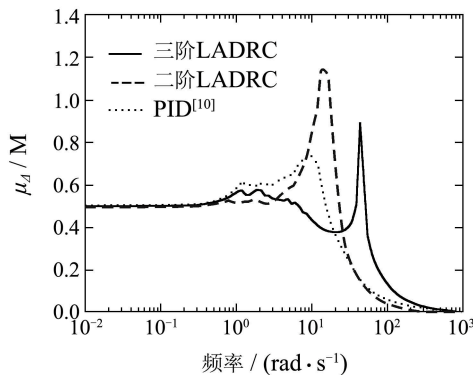
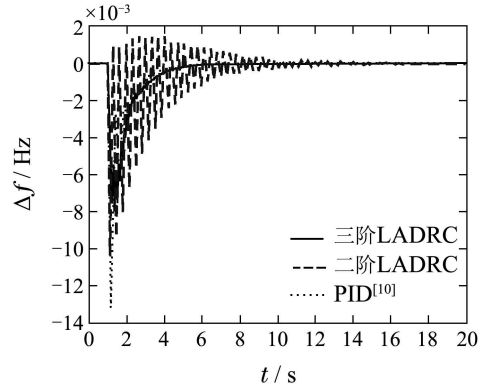
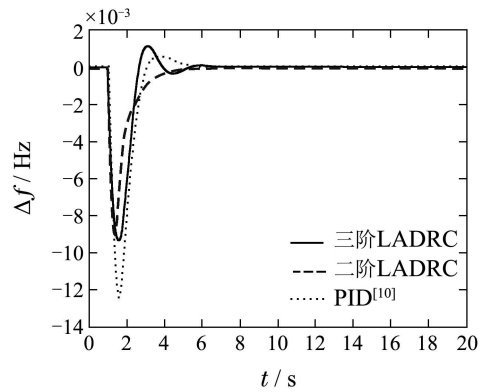


图5 参数变化结构奇异值分析  
Fig. 5 Structured singular value plots for parameter variations



(a) 上界



(b) 下界

图6 参数变化时负荷频率控制系统响应  
Fig. 6 Responses of the power system under parametric variations

从上面的仿真及分析可以看到,由于负荷频率控制系统本身结构特性,采用三阶LADRC比二阶LADRC能取得更好的标称及鲁棒性能,而且参数更易整定.为了提高二阶LADRC的鲁棒性能,可以增加参数 $b$ ,具体可参见文献[17].

#### 4.2 发电速率约束(Generation rate constraint)

发电机组实际发电速率存在限制,称为发电速率约束(GRC).发电速率约束会影响负荷频率控制系统性能,甚至导致不稳定.例如,对例1系统,当发电速率约束为 $0.0017 \text{ MW/s}$ 时,LADRC控制下的系统变得不稳定.自抗扰控制在设计中没有考虑该速率约束,因此在设计后需要采取补偿措施,以避免控制器饱和.

本文提出anti-GRC策略,如图7所示.

该方案将汽轮机实际输出和理论输出误差作为外部扰动,加入ESO中进行估计,从而使线性自抗扰控制能够快速补偿该误差,达到抗积分饱和的作用.该补偿措施包含一个可调参数 $k_c$ ,该参数越大,补偿措施越强,但是易陷入不稳定,因此该参数需要手调以获得较好补偿性能.

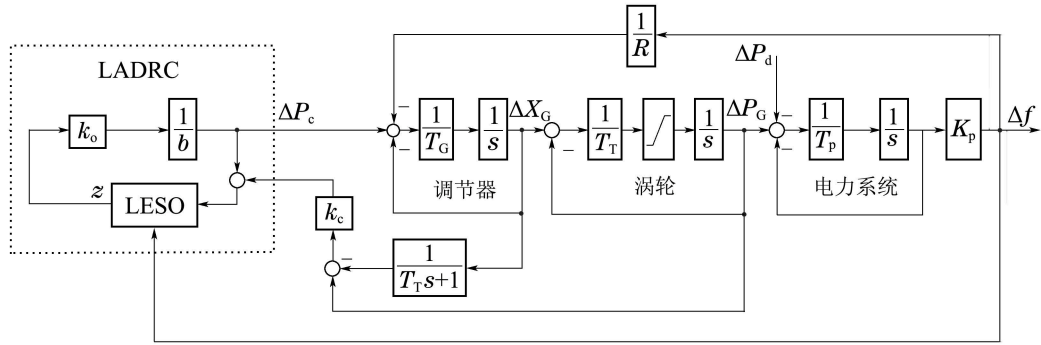


图 7 线性自抗扰控制器的anti-GRC策略

Fig. 7 Anti-GRC scheme for LADRC

考虑例 1 系统, 当GRC为0.0017时, 取 $k_c = 1$ , 在三阶LADRC控制下系统的响应如图8所示. 与PID控制的anti-GRC相比(折线), 可以看到三阶LADRC补偿措施更有效.

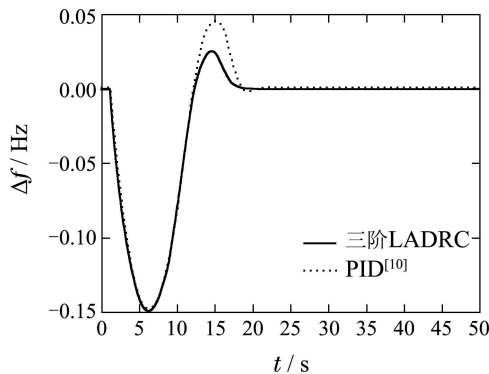


图 8 具有发电速率约束的负荷频率控制系统响应  
Fig. 8 Response of power system with GRC

### 5 推广 (Extensions)

上节讨论的电力系统具有非再热汽轮机, 对于具有再热汽轮机和水轮机的电力系统, 同样可以设计LADRC, 并且方法可以推广到多区域互联电力系统.

#### 5.1 再热汽轮机(Reheated turbine)

与非再热汽轮机不同, 再热汽轮机动态为

$$G_t(s) = \frac{cT_r s + 1}{(T_r s + 1)(T_T s + 1)}$$

因此对于具有再热汽轮机的系统, 其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_P}{(T_P s + 1)(T_T s + 1)(T_G s + 1) \frac{T_r s + 1}{cT_r s + 1} + K_P/R}, \quad (33)$$

其相对阶为3, 简化后的多重积分对象增益为

$$b = \frac{K_{PC}}{T_P T_T T_G}, \quad (34)$$

因此可以采用三阶LADRC进行控制.

#### 5.2 水轮机(Hydro turbine)

水轮机动态为

$$G_t(s) = \frac{cT_r s + 1}{T_r s + 1} \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s},$$

因此对于具有水轮机的系统, 其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K_P}{(T_P s + 1)(T_G s + 1) \frac{T_r s + 1}{cT_r s + 1} \frac{T_w/2s + 1}{-T_w s + 1} + K_P/R}. \quad (35)$$

该系统是非最小相位系统, 较难控制. 根据文献[18]的建议, 此时LADRC可以采用两种方案: 一是保留高频增益, 采用二阶LADRC进行控制; 一是保留低频增益, 采用三阶或4阶LADRC进行控制. 不论采用哪种结构, 增益 $b$ 都需成倍地增大. 但是到底 $b$ 增大多少, 目前没有较好的方法, 还需要进一步研究.

#### 5.3 多区域电力系统(Multi-area power systems)

LADRC可以很容易推广到多区域电力系统. 对于多区域电力系统, 负荷频率控制不仅需要保证每个区域的频率回到其标称值, 而且还要保证区域间的联络线交换功率回到计划值. 为此, 多区域电力系统负荷频率控制采用一个复合变量——区域控制误差(area control error, ACE)作为反馈来满足上述两个控制目标. 对于区域 $\#i$ , 区域控制误差定义为

$$ACE_i = \Delta P_{tiei} + B_i \Delta f_i, \quad (36)$$

其中 $B_i$ 为频率偏差系数. 区域 $\#i$ 的反馈控制形式为

$$u_i = -K_i(s) ACE_i. \quad (37)$$

文献[10-11]针对多区域电力系统的负荷频率控制提出了一种分散控制方法. 该方法先忽略联络线交换功率, 即假设 $\Delta P_{tiei} = 0 (i = 1, \dots, n)$ , 然后分别对每个区域设计负荷频率控制器, 最后采用文献[19-20]所提方法进行稳定分析. 每个区域的局部



反馈控制为

$$u_i = -K_i(s)B_i\Delta f_i. \quad (38)$$

因此多区域电力系统设计局部负荷频率控制器时只需要将每个区域的对象乘以该区域的频率偏差系数 $B_i$ ,也就是说设计自抗扰控制时只需将单区域系统参数 $b$ 乘以 $B_i$ 即可.

**例2** 考虑图9所示的4区域电力系统<sup>[11]</sup>.

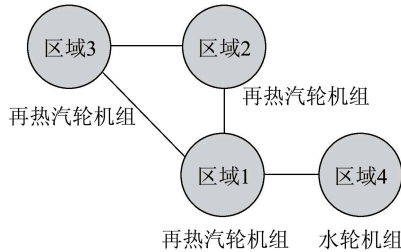


图9 4区域电力系统

Fig. 9 Simplified diagram of a four-area power system

该系统区域1, 2, 3为具有再热汽轮机的相同电力系统. 参数如下:

$$\begin{cases} T_{Gi} = 0.2, T_{Ti} = 0.3, T_{Pi} = 20, K_{Pi} = 120, \\ R_i = 2.4, T_{ri} = 20, c_i = 0.333, \end{cases} \quad (39)$$

$i = 1, 2, 3$ . 区域4为具有水轮机的电力系统, 参数为

$$\begin{cases} T_{G4} = 48.7, T_{P4} = 80, K_{P4} = 13, T_{w4} = 1, \\ R_4 = 2.4, T_{r4} = 10, c_4 = 0.0513. \end{cases} \quad (40)$$

联络线同步系数为

$$T_{12} = T_{13} = T_{14} = T_{23} = 0.444. \quad (41)$$

频率偏差系数 $B_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 都为0.425.

对于区域1, 2, 3, 根据以上讨论, 可以选取三阶LADRC进行控制, 参数选取为

$$b = \frac{K_{Pi}c_i}{T_{Pi}T_{Ti}T_{Gi}} = 14.15, \omega_c = 2, \omega_o = 20.$$

而对区域4, 局域系统模型为

$$P = \frac{-0.00551s^2 - 0.005231s + 0.01074}{s^4 + 2.197s^3 + 0.4008s^2 + 0.01768s + 0.01085}, \quad (42)$$

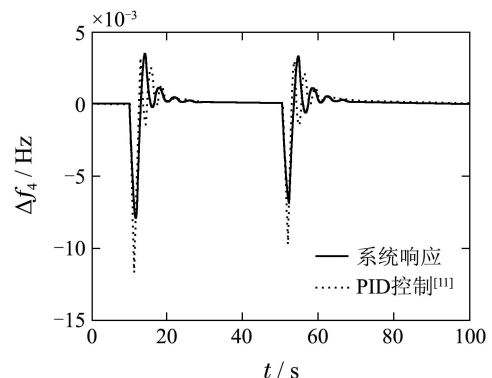
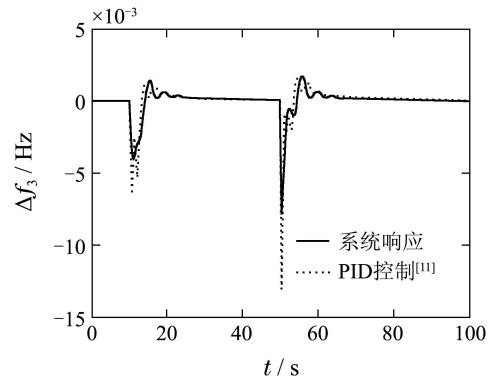
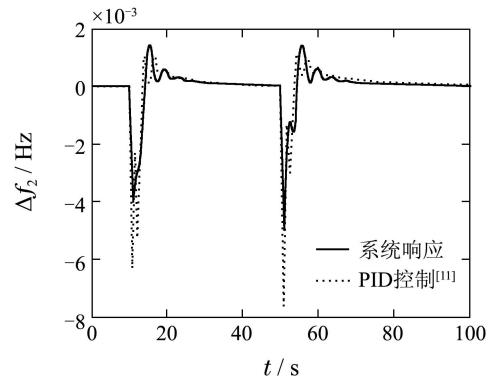
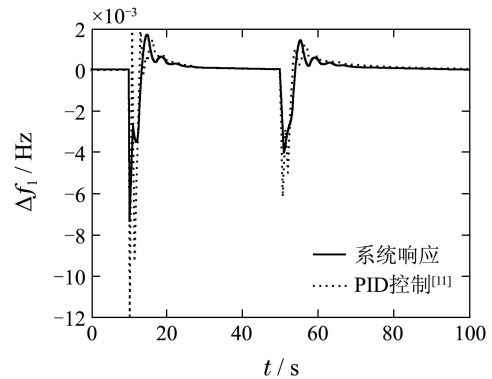
具有两个弱阻尼不稳定极点 $0.0294 \pm 0.143j$ . 为简便, 采用二阶LADRC进行控制, 参数选取为

$$b = 100, \omega_c = 1, \omega_o = 10.$$

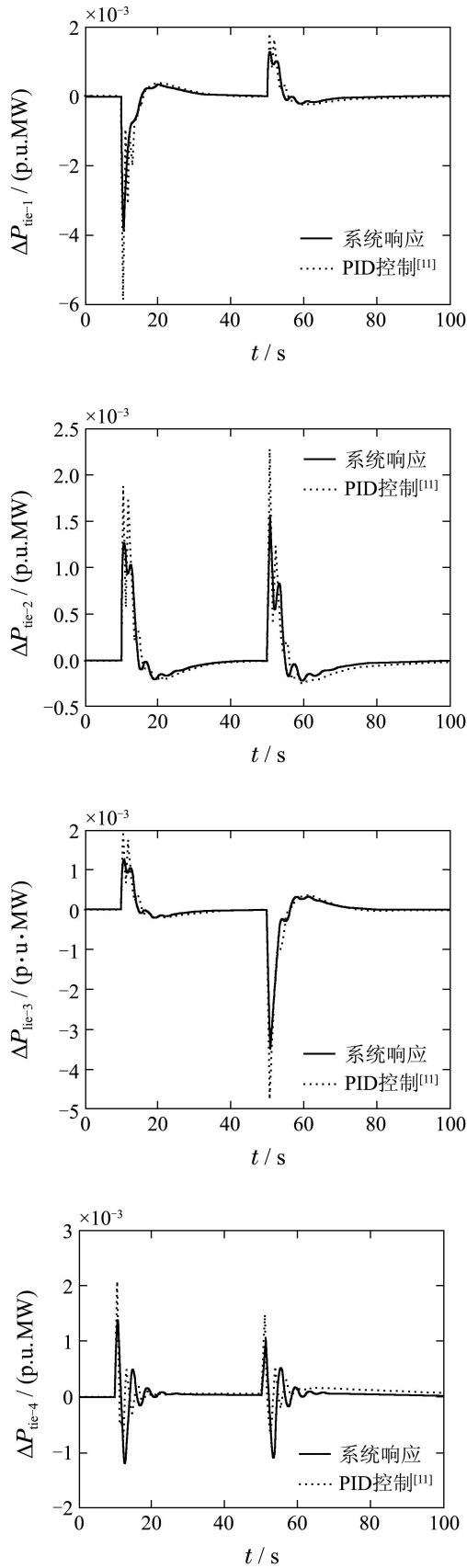
注意到此时参数 $b$ 已经人为地增大以达到闭环稳定.

为验证所设计的自抗扰控制的性能, 假设区域1在 $t = 0$ 时加入阶跃扰动 $\Delta P_{d1} = 0.01$ , 区域3在 $t = 100$ 时加入阶跃扰动 $\Delta P_{d3} = 0.01$ . 系统响应如

图10实线所示. 与文献[11]设计的PID控制(折线)相比, LADRC具有更好的抗干扰性能. 事实上, 用文献[19]所提的方法可以验证系统的最小阻尼比为0.2103, 而PID控制所得到的系统最小阻尼比为0.0947, 显然线性自抗扰控制能获得更好的阻尼.



(a) 频率偏差



(b) 联络线交换功率偏差

图 10 四区域电力系统响应

Fig. 10 Responses of the four-area power system

## 6 结论(Conclusion)

本文研究了负荷频率控制系统的线性自抗扰控制方法. 首先分析了二阶和三阶LADRC在单区域电力系统的控制性能, 指出二阶LADRC在负荷频率控制中存在的限制. 随后本文针对负荷频率控制中存在的发电速率约束这一实际问题, 提出一种 anti-GRC 补偿方案. 最后, 本文将LADRC设计方法推广到再热汽轮机和水轮机系统以及多区域电力系统. 仿真表明LADRC是一种独立于模型的普适性控制结构, 所需整定参数少, 能够取得比PID控制更好的抗干扰性能. 由于LADRC在控制非最小相位系统时存在一些限制, 因此对于具有水轮机的电力系统, 其线性自抗扰控制的设计还需进一步研究.

## 参考文献(References):

- [1] TAN W. Load frequency control: problems and solutions [C] // *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*. Yantai: IEEE, 2011: 6281 – 6286.
- [2] SAADAT H. *Power System Analysis* [M]. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [3] FOSHA C E, ELGERD O I. The megawatt-frequency control problem: a new approach via optimal control theory [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1970, 89(4): 563 – 567.
- [4] CALOVIC M. Linear regulator design for a load and frequency control theory [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1972, 91(6): 2271 – 2285.
- [5] CHAN W C, HSU Y Y. Automatic generation control of interconnected power systems using variable-structure controller [J]. *IEE Proceedings, Part C*, 1981, 128(2): 269 – 279.
- [6] PAN C T, LIAW C M. An adaptive controller for power system load-frequency control [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1989, 4(1): 122 – 128.
- [7] WANG Y, ZHOU R, WEN C. Robust load-frequency controller design for power systems [J]. *IEE Proceedings, Part C*, 1993, 140(1): 11 – 16.
- [8] WANG Z Q, SZNAIER M. Robust control design for load frequency control using  $\mu$ -synthesis [C] // *Southcon/94, Conference Record*. Piscataway: IEEE, 1994: 186 – 190.
- [9] RAY G, PRASAD A N, PRASAD G D. A new approach to the design of robust load-frequency controller for large scale power systems [J]. *Electric Power Systems Research*, 1999, 51(1): 13 – 22.
- [10] TAN W. Tuning of PID load frequency controller for power systems [J]. *Energy Conversion & Management*, 2009, 50(6): 1465 – 1472.
- [11] TAN W. Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 341 – 350.
- [12] DONG L, ZHANG Y, GAO Z. A robust decentralized load frequency controller for interconnected power systems [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(3): 410 – 419.



- [13] KUNDUR P. *Power System Stability and Control* [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制及其应用 [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] GAO Z. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Piscataway: IEEE, 2006: 2399 – 2405.
- [16] TAN W, XU Z. Robust analysis and design of load frequency controller for power systems [J]. *Electric Power Systems Research*, 2009, 79(5): 846 – 853.
- [17] FANG J X, TAN W, FU C F. Analysis and tuning of linear active disturbance rejection controller for load frequency control of power systems [C] // *Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference*. Xi'an: IEEE, 2013: 5560 – 5565.
- [18] ZHAO S, GAO Z. Active disturbance rejection control for non-minimum phase systems [C] // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Beijing: IEEE, 2010: 6060 – 6070.
- [19] TAN W. Decentralized load frequency controller analysis and tuning for multi-area power systems [J]. *Energy Conversion & Management*, 2011, 52(5): 2015 – 2023.
- [20] TAN W, ZHOU H. Robust analysis of decentralized load frequency control for multi-area power systems [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 43(1): 995 – 1005.

#### 作者简介:

谭文 (1969–), 男, 教授, 主要研究方向是鲁棒控制及其在工业过程、电力系统方面的应用, E-mail: wtan@ncepu.edu.cn;

周宏 (1975–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为过程控制, E-mail: zhou.hong@ncepu.edu.cn;

傅彩芬 (1979–), 女, 工程师, 目前研究方向为发电过程控制, E-mail: fcf@ncepu.edu.cn.