

基于模型补偿的风力机变桨距线性 自抗扰控制器设计^{*}

张吉宣, 贾建芳, 戴媛媛

(中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 设计了一种变桨距线性自抗扰控制器, 估计和补偿了系统未建模部分和外界干扰, 实现额定风速以上时系统输出功率稳定于额定值; 并采用模型补偿方法对自抗扰控制器进行优化, 减少了参数整定的数目, 提高了系统控制精度。对额定功率为 300 kW 的风电机组分别在阶跃风、阵风以及湍流风作用下进行系统仿真。结果表明, 该方法可以快速调节风速变化引起的输出波动, 使得系统输出稳定且超调量小, 具有很好的稳定性和鲁棒性。

关键词: 风力发电机; 变桨距控制; 线性自抗扰控制器; 模型补偿

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0088-07

Design of Linear Active Disturbance Rejection Controller for Wind Turbine Variable Pitch System Based on Model Compensation^{*}

ZHANG Jixuan, JIA Jianfang, DAI Yuanyuan

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China,
Taiyuan 030051, China)

Abstract: A linear active disturbance rejection controller (LADRC) was designed to estimate the system unmodeled part and compensate the interference, thereby achieve output power stable when wind speed was above rated wind speed. And the model compensation method was used to optimize the LADRC, to reduce the number of parameters that need to be set and improve system control accuracy. The controller was simulated in three different wind conditions in the 300 kW wind turbines. The simulation results showed that it can quickly adjust the output fluctuation caused by wind velocity variation, made the system output stable and had small overshoot in any wind speed stage. Moreover, the system had good stability and robustness.

Key words: wind turbine; variable pitch control; linear active disturbance rejection controller (LADRC); model compensation

0 引言

变桨距控制在风力发电机组中应用广泛, 可有效提高系统的效率和稳定性^[1]。然而, 因风速的随机性和系统的复杂非线性, 传统 PID 控制器难以满足系统动态性能^[2-3]。如何选择变桨距控制策略成为风力发电技术的关键问题之一。文献

[4-5] 的变桨距控制应用了分数阶微积分, 输出稳定但降低了抗干扰能力。文献[6-8]对变桨距系统进行变增益控制, 解决了叶片转矩对桨距角变化的灵敏度非线性问题, 但变增益的参数调试严重依赖于设计者经验, 无规律可循, 存在较大的保守性。滑模控制^[9-10]能够有效提高风力发电机的效率且易于实现, 但抖振问题是该控制方法的

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61573250)

作者简介: 张吉宣(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机的智能控制策略。

贾建芳(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电系统的智能控制、复杂系统建模与优化、PHM 等。

最大缺点,风速的频繁波动使系统无法在较短时间内收敛,影响系统的控制性能。文献[11-13]采用神经网络、模糊控制等智能控制算法,有效减小了系统波动,具有良好好静态特性,而过学习及过拟合是智能控制的不足。

自抗扰控制技术(Auto Disturbance Rejection Controller, ADRC)继承了传统 PID 控制的优点,并能够对系统未建模部分及外界未知干扰做出准确的估计与补偿^[14]。但 ADRC 非线性反馈带来的高增益易于小信号产生抖动,且控制参数较多。为此 Gao 等^[15-16]提出了线性自抗扰控制技术(Linear Active Disturbance Rejection Controller, LADRC),利用线性方式实现自抗扰控制,减少了控制参数。

LADRC 也有一定的局限性,当外部干扰过强时,扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)对系统误差的估计能力将减弱^[17]。为解决该问题,本文充分利用系统的先验信息,通过物理规律及系统辨识获取已知扰动,补偿在 ESO 下^[18]。此方法既可实现模型补偿,又能提高 LADRC 控制效果。另外,利用 fhan 函数无参数控制的优点对跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)和非线性状态误差反馈控制率(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)的控制律进行设计,实现了这两部分的无参数整定。

本文针对风力机的非线性及风能的随机性,提出基于模型补偿的风力机变桨距系统 LADRC 控制。仿真结果表明,基于模型补偿的 LADRC 与传统 LADRC 相比,具有更好的抗干扰能力,发电机系统的输出功率更加平稳,且曲线超调量大大降低,有效地提高了发电机发电质量和电网安全性。

1 变桨距 LADRC 设计

1.1 风力机变桨距系统数学模型

通过研究风力机空气动力学特性,搭建了变桨距控制系统物理模型。该模型主要由 4 部分构成:风轮、传动机构、异步发电机及变桨距机构。

风轮将捕获的风能转化为机械能,经整理后可得其数学模型为

$$\begin{cases} T_r = \frac{P_r}{\omega_r} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_T(\lambda, \beta) \\ \lambda = \frac{\omega_r R}{v} \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_r ——风轮转矩;

P_r ——风轮从风能中获得的功率;

ω_r ——叶轮转速;

ρ ——空气密度;

R ——风轮半径;

v ——有效风速;

$C_T(\lambda, \beta)$ ——推力系数;

β ——叶片桨距角;

λ ——叶尖速比;

$C_p(\lambda, \beta)$ ——功率系数, $C_p(\lambda, \beta) = \lambda \cdot C_T(\lambda, \beta)$ 。

假设传动机构的传动链为刚性连接,忽略异步电机自身的阻力矩,该机构的数学模型为

$$J\dot{\omega}_r = T_r - nT_e \quad (2)$$

其中:

$$J = J_r + n^2 J_g$$

式中: J_r ——风轮质量转动惯量;

n ——齿轮箱增速比;

J_g ——电机质量转动惯量。

异步发电机将风轮得到的机械能转化为电能,在理想情况下,其数学模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} T_e = \frac{pm_1 u_1^2 r_2}{(\omega_g - \omega_1) \left[\left(r_1 - \frac{C_1 r_2 \omega_1}{\omega_g - \omega_1} \right)^2 + (x_1 + C_1 x_2)^2 \right]} \\ P_e = T_e \omega_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_e ——转矩;

p, m_1 ——极对数和相数;

u_1 ——电网额定电压;

r_1, x_1, r_2, x_2 ——定子绕组和转子绕组的电阻和漏抗;

ω_g, ω_1 ——转动角速度和同步转速;

C_1 ——修正系数;

P_e ——输出功率。

变桨执行机构简化后的一阶惯性环节,可由式(4)表示:

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau}(\beta_{\text{ref}} - \beta) \quad (4)$$

式中: τ ——时间常数;

β_{ref} ——参考桨距角。

1.2 LADRC

LADRC 不仅延续了 ADRC 能够估计与补偿系统未建模部分以及外界干扰的特点,而且简化了 ADRC 的结构以及参数整定。LADRC 主要包括线性扩张状态观测器 (Linear Extended State Observer, LESO)、扰动补偿和误差反馈控制率 3 部分。对于某个二阶非线性系统,可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, w(t), t) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

其二阶 LADRC 的控制规律可以表示为^[15]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = \beta_3(y - z_1) \\ u_0 = k_p(v - z_1) - k_d z_2 \\ u = (u_0 - z_3)/b_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(x_1, x_2)$ 、 $w(t)$ ——系统的内部扰动及外部扰动;

y 、 v 、 u ——系统的输出、参考输入以及控制器产生的系统控制量;

b ——常数;

z_1 、 z_2 、 z_3 —— y 、 $\dot{y}$ 和系统总扰动的估计值,

$$z_3 = f(x_1, x_2) + (b - b_0)u;$$

b_0 —— b 的估计值。

在控制器中需要整定的参数为 β_1 、 β_2 、 β_3 、 k_p 、 k_d 和 b_0 。这些参数的整定同控制器带宽及被控对象特征密切相关。

1.3 变桨距 LADRC 设计

假设额定功率下风力机运行的平衡点为 A , 其对应参数分别为 T_{r_0} 、 w_{r_0} 、 β_0 。对式(1)中的 T_r 在 A 点进行泰勒展开,得

$$T_r = T_{r_0} + \alpha \Delta \omega_r + \xi \Delta \beta + \gamma \Delta v + h \quad (7)$$

其中, $\alpha = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \omega_r} \right|_A$; $\xi = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_A$; $\gamma = \left. \frac{\partial T_r}{\partial v} \right|_A$ 。

式中: h ——泰勒展开的高次项。

由式(2)和式(7)得:

$$J \Delta \dot{\omega}_r = \alpha \Delta \omega_r + \xi(\beta - \beta_0) + \gamma \Delta v + h \quad (8)$$

又由桨距角的动态特性可知:

$$\beta - \beta_0 = \Delta \beta = \frac{1}{\tau s + 1} \Delta \beta_r \quad (9)$$

则式(8)可转化为

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{\omega}_r &= \frac{\tau \alpha - J}{J \tau} \Delta \dot{\omega}_r + \\ &\frac{\alpha}{J \tau} \Delta \omega_r + \frac{\xi}{J \tau} \Delta \beta_r + \frac{\tau s + 1}{J \tau} (\gamma \Delta v + h) \end{aligned} \quad (10)$$

$\Delta \beta_r$ 对应的系数随系统运行容易发生改变,很难得到其确定值,故可用估计值 b_0 替代,则系统扰动量 d 可表示为

$$d = \frac{\tau s + 1}{J \tau} \cdot \gamma \Delta v + \left(\frac{\xi}{J \tau} - b_0 \right) \Delta \beta_r \quad (11)$$

则式(10)可转化为

$$\Delta \ddot{\omega}_r = \frac{\tau \alpha - J}{J \tau} \Delta \dot{\omega}_r + \frac{\alpha}{J \tau} \Delta \omega_r + b_0 \Delta \beta_r + d \quad (12)$$

由式(12)的推导过程可知,其全面反映了变桨距系统的物理特性,可以根据式(6)及式(12)设计变桨距 LADRC。在二阶 LADRC 算法中,令 $y = \Delta \omega_r$ 、 $u = \Delta \beta_r$ 、 $v = \Delta \omega_{\text{ref}}$,通过设计整定 LADRC 的控制参数即可实现系统变桨距调节。

2 风力机变桨距模型补偿 LADRC 设计

在二阶 LADRC 中,需要整定的参数 β_1 、 β_2 、 β_3 与 LESO 的带宽 w_0 呈一定的线性关系, k_p 、 k_d 与控制器的带宽 w_c 呈一定的线性关系,即需要整定的参数为 w_0 、 w_c 和 b_0 ^[19]。为简化参数整定,提升 ESO 估计精度,本文提出了基于模型补偿的 LADRC。

2.1 模型补偿 LADRC

2.1.1 TD 设计

对于一个离散系统^[14],TD 可以表示为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h u(k) \quad |u| < r \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$u(k) = \text{fhan}[x_1(k), x_2(k), r, h]$$

式中: $\text{fhan}(x_1, x_2, r, h)$ ——最速控制综合函数;

$x_2(k)$ —— $x_1(k)$ 的导数;

h ——积分步长;

r ——影响系统跟踪的速度。

h 和 r 共同影响着系统的性能。

用 $v_1(k) - v(k)$ 替换式 (13) 中的 $x_1(k)$, 用 h_0 替换函数 fhan 中的 h , 则新的 TD 控制规律为

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu(k) \\ u(k) = \text{fhan}[v_1(k) - v(k), v_2, r, h_0] \end{cases} \quad (14)$$

2.1.2 NLSEF 设计

将式 (5) 描述的二阶非线性系统离散化, 可得:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hb_0u(k) \end{cases} \quad (15)$$

由式 (14) 减去式 (15), 可得:

$$\begin{cases} e_1(k+1) = e_1(k) + he_2(k) \\ e_2(k+1) = e_2(k) + hu_2(k) \end{cases} \quad (16)$$

其中: $e_1(k) = v_1(k) - x_1(k)$, $e_2(k) = v_2(k) - x_2(k)$, $u_2(k) = u_1(k) - b_0u(k)$ 。

为将系统的误差收敛于 0, 令 $u_2(t) = \text{fhan}(e_1, e_2, r, h)$, z_1 为 x_1 估计值, z_2 为 x_2 估计值, 则根据式 (16) 可得:

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ u_2(k) = \text{fhan}(e_1, e_2, r, h) \end{cases} \quad (17)$$

2.1.3 LESO 设计

假设式 (5) 可以由式 (18) 的模型表示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_0(x_1, x_2) + w(t) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (18)$$

由 ESO 的结构和误差分析知, 当控制系统不确定因素的变化范围较小时, 控制器对误差的估计能力较强, 但当系统参数变化快以及外扰较大时, LESO 对系统的总扰动不能准确估计, 因此 LADRC 有一定的局限性。若充分利用系统的先验信息, 通过物理规律及系统辨识获取内部扰动 $f_0(z_1, z_2)$, 并将其补偿在 LESO 的输入项中, 可有效提高 LESO 对被控对象总扰动的逼近能力^[20], 则新的 LESO 的控制律可表征为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + \beta_2(y - z_1) + f_0(z_1, z_2) + b_0u(k) \\ \dot{z}_3 = \beta_3(y - z_1) \end{cases} \quad (19)$$

其中: $z_3 = f_0(x_1, x_2) - f_0(z_1, z_2) + (b - b_0)u$ 。

与式 (6) 中 z_3 对比可知, 新的 LESO 对误差的估计能力和估计精度都有所提高, 系统的控制效果得到提升。

利用 fhan 函数设计自抗扰控制器, 实现了 TD 和 NLSEF 的无参数整定, 有效减少了 ADRC 中参数的个数。将模型中已知干扰补偿给 LESO 和控制量 u , 观测器的负担得以减轻, 有效提高了 LADRC 的控制品质。此时, 线性自抗扰的控制量为

$$u(k) = u_1(k) - u_2(k) - \frac{[z_3 + f_0(z_1, z_2)]}{b_0} \quad (20)$$

基于模型补偿的二阶 LADRC 结构如图 1 所示。

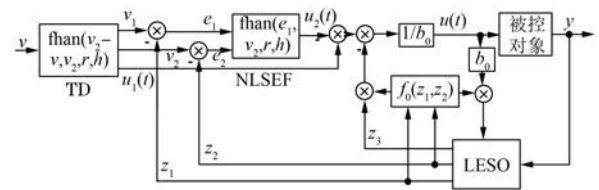


图 1 基于模型补偿的二阶 LADRC 结构图

2.2 变桨距模型补偿 LADRC 设计

根据式 (10), 从控制对象角度分析变桨距系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \Delta\omega_r \\ \dot{x}_2(t) = \Delta\dot{\omega}_r \\ f_0(x_1, x_2) = \frac{\tau\alpha - J}{J\tau}\Delta\dot{\omega}_r + \frac{\alpha}{J\tau}\Delta\omega_r \\ w(t) = \frac{\tau s + 1}{J\tau}(\gamma\Delta v + h) \\ b = \frac{\xi}{J\tau} \\ u(t) = \Delta\beta_r \end{cases} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (10) 可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = f_0(x_1, x_2) + w(t) + bu \end{cases} \quad (22)$$

在形式上, 式 (22) 与式 (5) 相同, 即可采用模型补偿 LADRC 的方法控制变桨距系统。在平衡点 A 处, 利用 maple 工具箱对 T_r 进行泰勒展开, 得到泰勒展开式的系数 α 和 ξ 。基于模型补偿的

变桨距 LADRC 系统结构如图 2 所示。

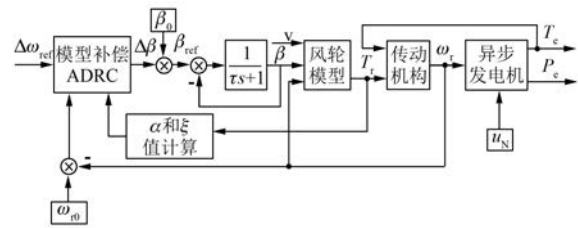


图 2 模型补偿变桨距 LADRC 系统结构图

与传统 LADRC 相比, fhan 函数的使用有效减少了控制系统待整定参数的数目。此外, LESO 对系统的已知干扰进行前馈补偿, 减小了系统的不确定性, 改善了系统控制性能。

3 仿真研究与分析

3.1 系统仿真

本文控制对象选取额定功率 300 kW 的风力发电机, 并对其仿真分析。变桨距系统参数如表 1 所示。

表 1 变桨距系统参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$J_r / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.5×105	r_1 / Ω	0.020 8
		x_1 / H	0.013 2
$J_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	32	r_2 / Ω	0.015 2
		x_2 / H	0.042 5
R / m	15	p	2
$v_e / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11	u_1 / V	220
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.25	n	28.78
τ	0.2	$n_e / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 554

对于风力发电系统, 影响其控制性能的除系统的非线性特性之外, 另外一个至关重要的因素是自然风速的随机性以及波动性。因此, 本文首先在阶跃风作用下对 ADRC、LADRC 以及基于模型补偿的 LADRC 进行对比分析, 以验证 LADRC 在风力机变桨距控制中的有效性。然后在阵风及湍流风作用下分别采用 LADRC 和基于模型补偿的 LADRC 两种控制器进行仿真研究以验证文中提出的模型补偿 LADRC 方法的可行性及高效性。

(1) 阶跃风。对于风力机组, 最严峻风况莫过于阶跃风, 假设基本风速为 12 m/s, 前 3 s 系统

以基本风速运行, 风速在 $t = 3 \text{ s}$ 时突变成 14 m/s。阶跃风风速曲线如图 3 所示。

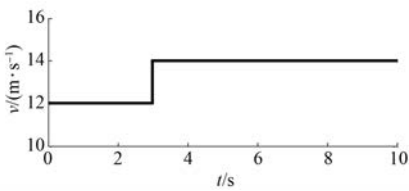


图 3 阶跃风风速曲线

图 4 所示为桨距角在 3 种 ADRC 下的变化曲线。在风速发生突变时, 控制器开始调节叶片的桨距角, LADRC 作用下的叶片桨距角调节曲线的超调量仅为在 ADRC 作用下超调量的 1/4。在基于模型补偿的 LADRC 作用下, 桨距角调节曲线的超调量更小, 并在 3.6 s 时桨距角保持稳定, 此时另两种控制器的响应曲线仍在稳定值附近波动。由此可知, LADRC 弥补了 ADRC 在小信号时易出现抖动的问题, 而模型补偿模块的加入则进一步提高了变桨距系统的响应速度及稳定性。

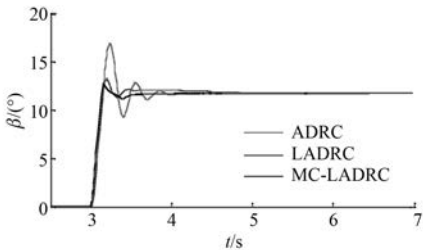


图 4 阶跃风作用下桨距角调节曲线

图 5 所示为风力机输出功率调节曲线。3 条曲线在风速突变时均有较大超调量, 但基于模型补偿的 LADRC 作用下的调节速度远远快于其他两个控制器, 前者输出功率用时 1.3 s 就能迅速稳定在额定值附近, 而 ADRC 与 LADRC 的调节时间分别为 6.5、3.0 s。

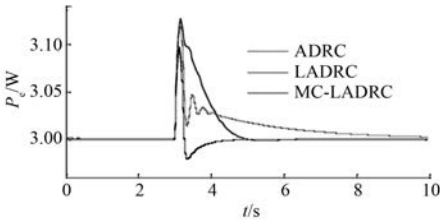


图 5 阶跃风速下输出功率调节曲线

(2) 阵风仿真。阵风风速反映了突变时风速特征, 仿真中风速以正弦规律从基本风速增至最

大风速 15 m/s,再以正弦规律降至基本风速,持续 3 s。图 6 所示为阵风风速曲线。

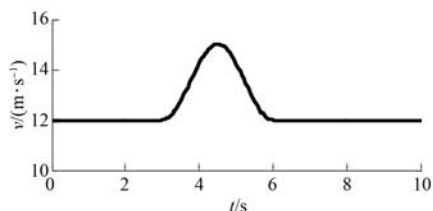


图 6 阵风风速曲线

图 7 所示为叶片桨距角调节曲线。由图 7 可知,桨距角也以正弦规律改变,但当风速发生变化时,基于模型补偿的 LADRC 可立即调节桨距角,响应速度快,系统能更早地趋于稳定。

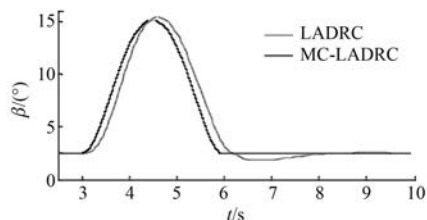


图 7 阵风风况下桨距角调节曲线

图 8 所示为变桨距系统输出功率变化曲线。在基于模型补偿的 LADRC 的作用下,输出功率的响应曲线具有更小的超调量、更快的响应速度、更小的稳态误差。

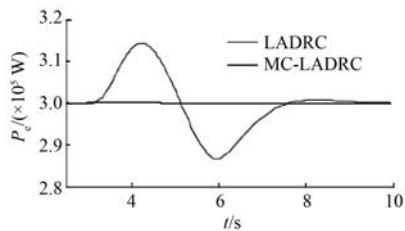


图 8 阵风风况下输出功率变化曲线

(3) “湍流风”仿真。风速随机变化称“风湍流”,湍流模型含有风速、风向变化及循环采样的影响。湍流模型参数分别设置为:平均风速 13 m/s,湍流尺度 300 m,湍流强度 0.14,采样周期 0.25 s,湍流风速持续 100 s,如图 9 所示。

图 10 所示为湍流风下叶片桨距角调节曲线,桨距角随风速的变化而变化。由图 10 可知,两条曲线近乎重合,但基于模型补偿的 LADRC 的响应曲线比 LADRC 的超前,波动幅度也比 LADRC

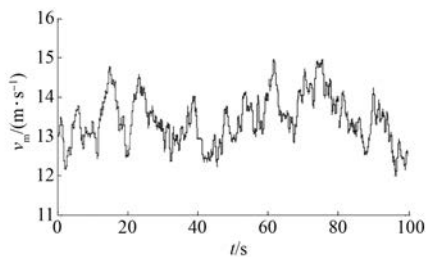


图 9 “湍流风”风速模型

的小,即系统的稳定性更好。

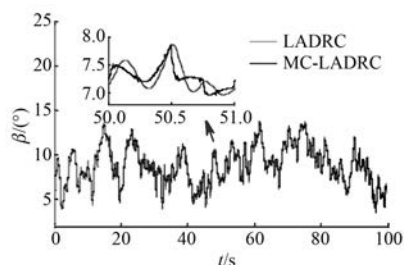


图 10 “湍流风”作用下桨距角变化曲线

图 11 所示为输出功率调节曲线。基于模型补偿的 LADRC 使系统输出功率的稳定性得到大幅度的提高,系统具有很强的抗干扰能力。

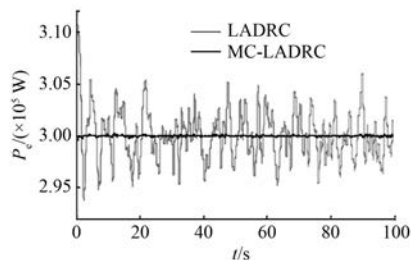


图 11 输出功率调节曲线

3.2 仿真结果分析

在阶跃风作用下,3 种控制器的动态性能指标如表 2 所示。由表 2 并结合 3 种风速作用下的调节曲线可知,基于模型补偿的 LADRC 较传统 LADRC 及 ADRC 超调量更小,稳态误差更低,变桨距系统的输出功率能够更加迅速平稳地趋于额定值。尤其在湍流风作用下,输出功率能够一直维持在额定值附近,且超调量的最大值为 1.1%,远远低于传统 LADRC 的最大超调量 9.3%。对变桨距系统而言,控制系统既要实现对输出功率有效调节以确保电网稳定性和安全性,又要在调节过程限幅控制叶片桨距角的速度和幅度,从叶片桨距角的变化曲线可知,基于模型补偿的 LADRC

调节桨距角的速度更快,波动幅度较小,保证了叶片机械结构的安全性。

表 2 输出响应动态性能特性

控制器	调节时间 t_s/s	上升时间 t_r/s	超调量 $\delta_p/\%$	稳态误差 e_{ss}/W
ADRC	6.5	0.27	5.0	300
LADRC	3.0	0.256	4.6	53
MC-LADRC	1.3	0.067	3.1	4

4 结 语

本文提出基于模型补偿的 LADRC,把对象模型已知的内部干扰补偿于 LESO 部分,从而提高了 LESO 的估计精度。另外,利用 fhan 函数设计控制器的 TD 和 NLSEF 部分的控制律,实现了这两部分的无参数整定。通过 300 kW 风力机系统仿真分析,结果表明,基于模型补偿的 LADRC 抗干扰能力和鲁棒性更好,并且在此控制策略的作用下,发电机系统的输出功率稳定性得到了提高,从而保证了电网的安全性,提高了发电机的电力质量。

【参 考 文 献】

[1] 李传斌,梁俊宇,赵明,等.变桨距风力机在全风速段内的桨距角控制策略仿真研究[J].电机与控制应用,2015,42(3): 56-60.

[2] BIANCHI F D, SANCHEZ-PENA R S, GUADAYOL M. Gain scheduled control based on high fidelity Local wind turbine models[J]. Renewable Energy, 2012, 37(5): 233-240.

[3] ZHANG X, XU D, LIU Y. Intelligent control for large-scale variable speed variable pitch wind turbines[J]. Journal of Control Theory & Applications, 2004, 2(3): 305-311.

[4] GHASEMI S, TABESH A, ASKARI M J. Application of fractional calculus theory to robust controller design for wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(3): 780-787.

[5] 吴卫珍.基于分数阶微积分的风力发电机变桨距控制方法研究[D].南京:南京林业大学,2010.

[6] LIU X, WANG R, ZHANG X, et al. Gain scheduling PD controller for variable pitch wind turbines[C]//Power Electronics and Motion Control Conference IEEE, 2012: 2162-2167.

[7] TAHER S A, FARSHADNIA M, MOZDIANFARD M R. Optimal gain scheduling controller design of a pitch-controlled VS-WECS using DE optimization algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5): 2215-2223.

[8] 李潘,陈林.基于变增益的风力机变桨距控制研究[J].电子设计工程,2013,21(16): 141-143.

[9] 林勇刚,李伟,崔宝玲.基于 SVR 风力机变桨距双模型切换预测控制[J].机械工程学报,2006,42(8): 101-106.

[10] 郭庆鼎,赵麟,郭洪澈.1 MW 变速变矩风力发电机的滑模变结构鲁棒控制[J].沈阳工业大学学报,2005,27(2): 171-174.

[11] JAFARNEJADSANI H, PIEPER J, EHLERS J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using radial-basis function neural network[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2264-2272.

[12] 胡文胜,丁艳军.新型风力发电机组变桨控制算法研究[J].电力电子研究,2013,47(2): 53-54.

[13] 周基祥,张君君,陈俊强,等.模糊自适应 PID 液压变桨距控制[J].机械设计与制造,2010(2): 204-206.

[14] 韩京清.自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

[15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proc of the American Control Conf, New York, 2003: 4989-4996.

[16] ZHAO S, GAO Z Q. An active disturbance rejection based approach to vibration suppression in two-inertia systems[J]. Asian J of Control, 2013, 15(2): 350-362.

[17] ZHENG Q L, DONG L L, LEE D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes[J]. IEEE Trans Control System Technol, 2009, 17(6): 1432-8.

[18] LIU Z G, LI S H. Active disturbance rejection controller based on permanent magnetic synchronous motor model identification and compensation[J]. Proceedings of the Csee, 2008, 28(24): 118-123.

[19] 孙凌燕.自抗扰控制在风电变桨系统中的应用研究[D].保定:河北大学,2015.

[20] LI S, ZHANG K, LI J, et al. On the rejection of internal and external disturbances in a wind energy conversion system with direct-driven PMSG[J]. ISA Transactions, 2016(61): 95-103.

收稿日期: 2017 -11 -27