

永磁直驱风机变桨系统史密斯自抗扰控制器

田黄田, 谢源, 施铃丽, 刘浩

(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 自抗扰控制器(ADRC)因具备较强的鲁棒性及抗干扰能力,已成功应用于风力发电机变桨距系统中,但仍存在一定的延迟,为此,提出了一种Smith预估器与自抗扰控制器结合的变桨距控制方案,依靠Smith预估器所具备的预估补偿优势,使得自抗扰控制器提前动作。并仿真验证了该设计的可行性。与传统自抗扰控制器相比,与Smith预估器结合后的自抗扰控制器能较好地满足风力发电机变桨距控制要求,有效维持了风力发电机组输出功率的稳定性。

关键词: 风力发电;变桨控制;Smith预估器;自抗扰控制器(ADRC);永磁同步发电机

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19342

Smith Active Disturbance Rejection Controller for Variable Pitch System of Permanent Magnet Direct-drive Wind Turbine

TIAN Huangtian, XIE Yuan, SHI Lingli, LIU Hao

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Due to its strong robustness and anti-interference ability, the ADRC is successfully applied in the variable pitch system of wind power generator, but there is still some delay. To this end, a variable pitch control scheme based on ADRC with Smith predictor was proposed. Based on the predictive compensation advantage of the Smith predictor, the ADRC moved ahead of time. The simulation results verify the feasibility of Smith-ADRC. Compared with the traditional ADRC controller, the Smith-ADRC can satisfy the requirements of variable pitch control of wind turbines and maintain the stability of the wind turbine output power.

Key words: wind power generation; pitch control; Smith predictor; active disturbance rejection controller (ADRC); permanent magnet synchronous generator

在环境问题日益突出的今天,风能作为一种环保新能源,获得了世界的关注,与此同时风力发电技术也日渐成熟起来^[1]。

变桨距技术是风力发电中的关键技术之一,合理有效的变桨距控制器可有效提高风力发电机组的效率和性能。目前风机变桨领域中传统PID控制器仍占主导地位,其针对精确的线性系统控制效果显著,但风电机组是一个大惯性、强耦合的非线性系统,风速的波动会导致风电机组的功率产生变化而无法稳定于额定功率处。针对传统PID控制在扰动过大时控制效果不理想的问题,模糊控制、神经网络控制、滑模控制及自适应控制等控制方法相继引入,但控制效果均具有

各自的局限性^[2-11]。

自抗扰控制是一种新型非线性控制方法,不依赖于被控系统精确的模型,且动态性能良好、抗扰动能力强,已成功应用于风电变桨领域^[12]。

为进一步提高自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)的性能,设计了Smith自抗扰控制器的变桨控制方法,利用Smith预估器使ADRC提前动作,缓解被控对象的延迟问题,加速系统响应。并将此方法应用于2 MW永磁同步发电机组,仿真验证该设计有着良好的动态性能及响应速度,可以有效解决大延迟以及大惯性的相关控制需求,整体的性能相对于传统自抗扰控制存在着显著的优化,提高了ADRC的

基金项目: 国家自然科学基金项目(61374136);国家自然科学基金项目(11304200);上海市科学技术委员会科研项目(17DZ1201200)

作者简介: 田黄田(1987—),男,硕士,Email:334141503@qq.com

适用性和可实现性。

1 风力发电机组建模

风力发电机组是将风能转换为电能的装置。而风力发电机组所能吸收的风能与空气动力学密切相关,本文依据叶素理论研究风力发电系统的电气特性,简化的空气动力模型如下:

$$\begin{cases} T_{\text{aero}} = \frac{\rho \pi R^3 v_w^2 C_p(\lambda, \theta)}{2\lambda} \\ C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) \cdot e^{-12.5/\lambda_i} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_w} \quad \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}$$

式中: T_{aero} 为风机转矩; ρ 为空气密度; $C_p(\lambda, \theta)$ 为功率系数; λ 为叶尖速比; ω 为风机转速; R 为风轮半径; v_w 为风速; θ 为叶片桨距角。

当实际风速高于额定风速时,控制系统将进行变桨调节,并动态地调节风力发电机的电磁转矩,尽量使风机的转速以及系统的功率稳定在额定值附近。本文的主要研究目标是为了改善变桨控制器的动态抗扰能力,所以将电磁转矩设定为固定值。其动态方程为

$$J\dot{\omega} = T_{\text{aero}} - T_{\text{gen}} \quad (2)$$

式中: T_{gen} 为发电机电磁转矩; J 为风机转动惯量。

目前的风力发电机组变桨系统主要通过变桨电机来实现,可以将其执行机构等效成如下的一阶的惯性环节:

$$\theta = \frac{1}{\tau s + 1} \theta_r \quad (3)$$

式中: θ_r 为桨距角的设定值; τ 为变桨执行机构的时间常数。

2 变桨距自抗扰控制器设计

2.1 自抗扰控制器的结构及组成

ADRC是来源于PID控制器的一种新型非线性控制器,是一种基于状态观测及扰动补偿的新型控制方法。

ADRC的3个重要组成部分及其作用分别为:跟踪微分器(tracking differentiator, TD)利用广义的微分理论提取相关的微分信号,并安排合理的过渡过程;扩张状态观测器(extended state observer, ESO)用于进行估计内外部扰动并予以补偿;非线性反馈控制律(non-linear state error feedback, NLSEF)的作用是部署非线性系统,并

提供被控系统对应的控制信号。

自抗扰控制的实现是通过其非线性前馈补偿功能来实现动态被控系统的线性化反馈,从而增强了其降低内外部扰动影响的性能。

假设有非线性不确定对象:

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu \quad (4)$$

式中: $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为未知函数; x 为测量输入; $w(t)$ 为未知扰动; b 为控制系数; u 为控制输入。ADRC的结构如图1所示。

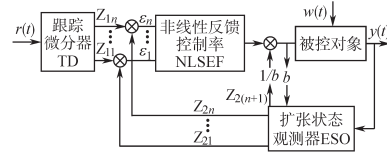


图1 二阶自抗扰控制器结构图

Fig.1 Structure diagram of second order ADRC

ADRC并不依赖于被控对象的精确数学模型以及外部扰动的形式,如何整定出合适的参数,将会直接影响自抗扰控制器的鲁棒性和动态适应性。其简化方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = -R_1 \text{sat}[z_{11} - v(t) + z_{12} \cdot |z_{12}| / (2R_1), \delta] \\ \epsilon_0 = z_{21} - x \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{01} \text{fal}(\epsilon_0, \alpha_1, \delta) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{02} \text{fal}(\epsilon_0, \alpha_2, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{03} \text{fal}(\epsilon_0, \alpha_3, \delta) \\ \epsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ \epsilon_2 = z_{12} - z_{22} \\ u_0 = \beta_{11} \text{fal}(\epsilon_1, \alpha_{01}, \delta) + \beta_{12} \text{fal}(\epsilon_2, \alpha_{02}, \delta) \\ u = u_0 - z_{23} / b_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_1, \alpha_0, \beta_{01}, \alpha_1, \beta_{02}, \alpha_2, \beta_{03}, \alpha_3, \beta_1, \alpha_{01}, \beta_2, \alpha_{02}, \delta$ 均为自抗扰控制器的参数; b_0 为控制输入的系数。

本文将非线性函数取为

$$\text{sat}(A, \delta) = \begin{cases} \text{sgn}(A) & |A| > \delta \\ A/\delta & |A| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{fal}(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \text{sgn}(\epsilon) & |\epsilon| > \delta \\ \epsilon/\delta^{1-\alpha} & |\epsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

2.2 变桨距自抗扰控制器的设计

为设计风力机变桨自抗扰控制器,现从风力发电系统恒功率运行状态中随机选取1个平衡点 A , 则其相应的参数分别为 $T_{\text{aero}-0}, w_0, \beta_0$, 将 A 作为参考点对式(1)进行泰勒展开:

$$T_{\text{aero}} = T_{\text{aero}-0} + \alpha \cdot \Delta\omega \zeta + \Delta\beta + \gamma \cdot \Delta v_w + h \quad (8)$$

其中

$$\alpha = \partial T_{\text{aero}} / \partial \omega|_A$$

$$\zeta = \partial T_{\text{aero}} / \partial \beta|_A \quad \gamma = \partial T_{\text{aero}} / \partial v_w|_A$$

式中: h 为展开式中的高次项;

由式(2)和式(8)得:

$$J\Delta\dot{\omega} = \alpha\Delta\omega + \zeta(\beta - \beta_0) + \gamma\Delta v_w + h \quad (9)$$

计及变桨距执行机构动态特性,有:

$$\beta - \beta_0 = \beta_r \frac{1}{\tau s + 1} - \beta_0 = \frac{1}{\tau s + 1} \Delta\beta_r \quad (10)$$

因此,式(9)可转化为

$$\Delta\ddot{\omega} = \frac{\tau\alpha - J}{J\tau} \Delta\dot{\omega} + \frac{\alpha}{J\tau} \Delta\omega + \frac{\zeta}{J\tau} \Delta\beta_r + \frac{\tau s + 1}{J\tau} (\gamma\Delta v_w + h) \quad (11)$$

其中 $\Delta\beta_r = \beta_r - \beta_0$

式中: $\Delta\beta_r$ 为桨距角偏移给定值。

式(11)中与 $\Delta\beta_r$ 相对应的系数 $b = \frac{\zeta}{J\tau}$ 会随着风力机变桨系统的工况连续发生变化,很难得出其确定值,鉴于此,本文将取其估计值 b_0 ,并且将误差归到系统扰动。据式(1), b_0 取为

$$b_0 = \frac{1}{J\tau} \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \Big|_A \quad (12)$$

系统的扰动分量 d 表示为

$$d = \frac{\tau s + 1}{J\tau} (\gamma\Delta v_w + h) + (b - b_0) \Delta\beta_r \quad (13)$$

则式(11)可化简为

$$\Delta\ddot{\omega} = \frac{\tau\alpha - J}{J\tau} \Delta\dot{\omega} + \frac{\alpha}{J\tau} \Delta\omega + b_0 \Delta\beta_r + d \quad (14)$$

式(14)描述的变桨系统模型包含电气连接、能量转换和执行机构,可以准确地体现变桨系统的动态控制性能。所以,依据此设计的自抗扰控制器能很好地进行风力机变桨控制。现采用 Δw 为测量输入来创建对应的扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{01} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_1, \delta) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{02} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_2, \delta) + b_0 \cdot \Delta\beta_r \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{03} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_3, \delta) \end{cases} \quad (15)$$

式中: z_{21}, z_{22} 为变桨系统的状态变量; z_{23} 为变桨系统的扰动。

鉴于 ADRC 可以补偿变桨系统建模中各种问题带来的影响,故本文中对参考点 A 的随机选取并不会影响所设计的控制器实际控制效果。

ADRC 的控制目的是为了改善变桨控制效果、抑制风速的波动,因此给定的输入 Δw_{ref} 和 $\Delta \dot{w}_{ref}$ 都可以忽略。通过转速的反馈来算出状态误差,从而得出非线性控制率的控制量,如下式:

$$\Delta\beta_r = \beta_1 \text{fal}(-z_{21}, \alpha_{01}, \delta) + \beta_2 \text{fal}(-z_{22}, \alpha_{02}, \delta) - z_{23}/b_0 \quad (16)$$

3 史密斯自抗扰控制

Smith 预估器与自抗扰控制相结合,有效地

利用 Smith 预估器针对高延迟以及大惯性所具备的补偿功能,同时依托自抗扰控制技术在抗干扰方面的显著优势,来填补 Smith 预估器在扰动敏感方面的不足,优势互补,构建一个有效的变桨控制方案。

3.1 史密斯预估补偿原理

Smith 预估器由纯延迟及一阶惯性环节而构成,基本的原理为预估相关对象在扰动环境中的动态特性,随后进一步形成符合需求的 Smith 模型来实现有效的补偿,以此来促使其中的提前活动,有效控制相关的超调量,实现更为理想的响应速度,进一步处理其中的延迟问题^[13]。

一般而言,时滞系统控制结构如图2所示。

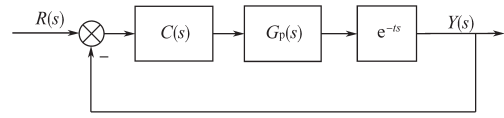


图2 时滞系统结构图

Fig.2 Structure diagram of time-delay system

图2中, $G(s)$ 为系统传递函数, $G(s) = G_p(s)e^{-ts}$, $G_p(s)$ 为 $G(s)$ 中不包含纯时滞特性部分的传递函数; $C(s)$ 为系统的前向控制器。Smith 预估器的原理便是在控制器 $C(s)$ 两端并联一个补偿环节,用来补偿控制对象的时滞部分。预估器的传递函数一般记作 $C_m(s)(1 - e^{-t_m s})$ 。其结构图如图3所示。

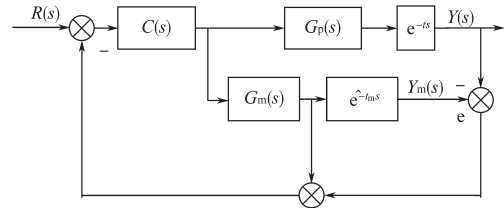


图3 史密斯预估器结构图

Fig.3 Structure diagram of Smith predictor

图3中, $G_p(s)$ 为控制器传递函数; t 为控制对象时滞因子; $C_m(s)$ 为预估模型非时滞部分传递函数; t_m 为预估模型时滞因子,通常情况下, $G_p(s) \neq C_m(s)$, $\tau \neq t_m$ 。与此同时, $C(s)$ 为前向控制器; $R(s)$ 为系统的输入; $Y(s)$ 为系统的输出; $Y_m(s)$ 为系统的预估输出,系统的预估补偿器可以记作 $D(s)$,其传递函数为^[14]

$$D(s) = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_m(s)(1 - e^{-t_m s})} \quad (17)$$

由图3可知系统的闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_m(s)e^{-ts}}{1+C(s)G_m(s)+G_p(s)C(s)e^{-ts}-C(s)G_m(s)e^{-ts}} \quad (18)$$

从而,由式(18)可以得到模型失配情况下闭环系统的特征方程:

$$1+C(s)G_m(s)+G_p(s)C(s)e^{-ts}-C(s)G_m(s)e^{-ts}=0 \quad (19)$$

通常情况下,认为Smith预估器控制对象和预估模型相互匹配,即 $G_p(s)=C_m(s)$, $t=t_m$ 时:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_p(s)C(s)e^{-ts}}{1+G_p(s)C(s)} \quad (20)$$

3.2 史密斯自抗扰控制(Smith-ADRC)

在相关的模型实现理想匹配效果的情况下,Smith预估器具备着较为理想的性能指标,但是因为该算法有着相对敏感的特征,需要以良好的匹配作为基础,而其在实践之中难以实现,所以在模型失配的情况下,其性能相对较差,很难满足操作中的各项需要。针对该问题,提出了具备良好抗干扰表现的Smith-ADRC方案,可以将相关的失配问题纳入到扰动的范畴中来开展高效的估计以及提供补偿,进而填补其在扰动敏感方面的不足,达成更为理想的控制目标。

Smith-ADRC有效开发Smith架构的各项优势,进而更好地预估延迟所构成的影响,参考设计的模型来提供补偿,随后将优化之后的信号传输至ESO内,依靠ESO内外扰动来开展配套的估计操作,进一步设计相关的NLSEF补偿延迟以及扰动的整体效应,以此来实现理想的控制效应。所以,Smith-ADRC的具体结构参考图4,其中, v 为给定的风速输入; $Y(s)$ 为系统输出; $G_p(s)$ 为被控对象传递函数; $C_m(s)$ 为Smith模型的一阶惯性环节, t 为延迟时间。

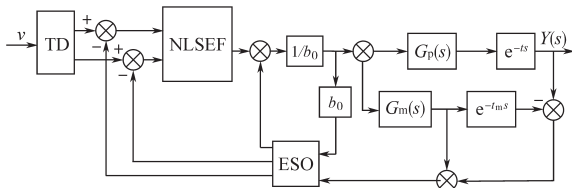


图4 Smith-ADRC结构图

Fig.4 Structure diagram of Smith-ADRC

4 仿真分析

Smith-ADRC控制器传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1}e^{-ts} \quad (21)$$

式中: K 为放大系数; T 为惯性环节时间常数; t 为延迟环节滞后时间,取 $K=1$, $T=10$, $t=0.5$ 。前向控制器 $C(s)$ 为ADRC控制器,其扩张状态观测器及非线性反馈控制率参数($\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \delta, \beta_1, \beta_2, \alpha$)调整为(30.8, 820.1, 207.9, 0.5, -10.6, -8.4, 0.5)。

利用Matlab/Simulink仿真出风力发电机组的模型,其中永磁同步风电机组参数为:风轮直径90 m,桨叶数3,风轮转动惯量411 185 kg·m²,电机转动惯量18 905.7 kg·m²,额定功率2 000 kW,电子电阻 $6.7e^{-3} \Omega$, d, q 轴电感2.7 mH,定子额定电压660 V,电机极对数30,额定轴转矩940,额定转速17.5 r/min,最大转速29 r/min,额定风速11 m/s,切入风速3 m/s,切出风速25 m/s,空气密度1.25 kg/m³。

通过搭建的永磁同步风力发电机的数学模型,对比传统ADRC控制与Smith-ADRC控制方法,验证Smith-ADRC控制方法的可行性和可靠性。采用实际的风速如图5所示。

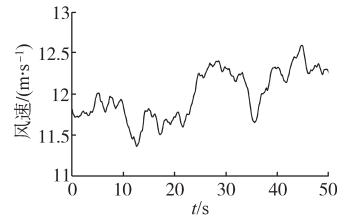


图5 风速波形图

Fig.5 Waveform of wind speed

将图5所示的模拟50 s的风速代入到风力发电机组的模型中进行系统仿真,可得到图6。

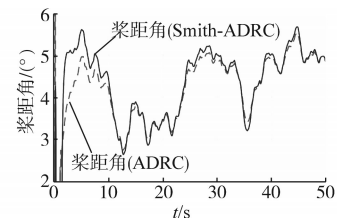


图6 ADRC控制与Smith-ADRC桨距角对比图

Fig.6 Pitch angle response of ADRC and Smith-ADRC

图6显示了50 s内ADRC控制与Smith-ADRC控制输出的桨距角对比图。可以看出,Smith-ADRC控制器的响应速度比ADRC控制器更快,虽然差别不是很大,但是风轮吸收的功率是与风速的3次方成正比的,所以高风速下桨距角的细微差异对整改风力发电系统有较大的影响。同时得到的功率响应情况如图7所示。图7显示了

ADRC控制器与Smith-ADRC控制器作用下的风力发电机组输出功率的对比图。可以明显看出,Smith-ADRC控制器输出功率相对于传统ADRC控制器而言,功率响应更加迅速,控制速度和精度更好。

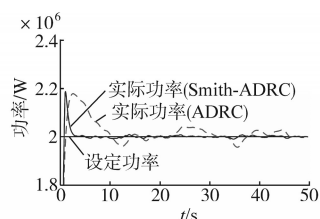


图7 ADRC控制与Smith-ADRC功率响应对比
Fig.7 Power response of ADRC and Smith-ADRC

5 结论

本文对风电变桨距系统及自抗扰控制技术进行了详细介绍,设计了风电变桨距自抗扰控制器,针对自抗扰控制的响应具有一定延迟的问题,利用Smith预估器对其进行预估补偿,进一步改进了自抗扰控制器。

通过仿真实验,在随机风的情况下验证了设计的Smith-ADRC能较好地进行变桨控制,提高了ADRC的响应速度和精度,为ADRC的广泛应用提供了保障。

参考文献

- [1] 罗承先. 世界风力发电现状与前景预测[J]. 中外能源, 2012, 17(3): 24-31.
- [2] Hua Geng, Geng Yang. Linear and Nonlinear Schemes Ap-

- plied to Pitch Control of Wind Turbines [J]. Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal, 2014(10): 1-9.
- [3] 李春兰, 曹成帅, 汪泽, 等. 减小风剪、塔影和湍流效应的独立变桨控制研究[J]. 科学技术与工程, 2016(16): 64-69.
- [4] Liu Xinlong, Wang Rui, Zhang Xueguang, *et al.* Gain Scheduling PD Controller for Variable Pitch Wind Turbines [C]// Processing of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2012.
- [5] 廖茜, 邱晓燕, 江润洲, 等. 风电机组变桨距系统的反推滑模控制[J]. 电气传动, 2015, 45(2): 45-49.
- [6] 闫学勤, 王维庆, 王海云. 改进型PRP-BP-PID算法在风力机变桨距控制中的应用[J]. 电气传动, 2015, 45(8): 47-51.
- [7] 胡文胜, 丁艳军. 新型风力发电机组变桨距控制算法研究[J]. 电力电子研究, 2013, 47(2): 53-54.
- [8] 秦生升, 胡国文, 顾春雷, 等. 风力发电系统的恒功率非线性H ∞ 鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 617-622.
- [9] 金鹏飞, 谢源. 风速前馈与变论域模糊结合的变桨距控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 128-133.
- [10] 赵正黎. 兆瓦级永磁直驱风力发电机组变桨距控制策略研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [11] 罗佳宝. 基于模糊PID算法的风电机组变桨距控制器设计[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [12] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91-95.
- [13] Tan K K, Chua K Y, Zhao S, *et al.* Repetitive Control Approach Towards Automatic Tuning of Smith Predictor Controllers[J]. ISA Transactions, 2009, 48(1): 16-23.
- [14] Julio E N, Pedro G, Antonio G. Robust Stability Analysis of Filtered Smith Predictor for Time-varying Delay[J]. Journal of Process Control, 2011, 34(1): 294-306.

收稿日期: 2018-07-16

修改稿日期: 2018-08-21