

基于自适应非奇异快速终端滑模的风力发电机 最大功率跟踪控制

孙志辉¹, 郝万君¹, 尚友涛², 曹松青¹, 王 昊¹, 郝诗源³

(1. 苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

2. 吉化集团有限公司包装制品厂, 吉林 吉林 132021;

3. 丹麦科技大学电气工程系, 哥本哈根 灵比 999017)

[摘 要] 针对风力发电机组在低风速区运行时的风能转换效率低、鲁棒性差等问题, 提出一种基于自适应非奇异快速终端滑模的最大功率跟踪控制策略。通过设计非奇异快速终端滑模算法提高风轮转速随风速变化的响应速度, 针对实际风力发电系统中未建模动态和外部噪声干扰问题, 采用自适应算法来估计系统的不确定性, 加强系统的鲁棒性。以5 MW的风电机组为研究对象, 在MATLAB/Simulink平台对控制方案进行仿真。仿真结果表明, 本文提出的控制策略精度高, 鲁棒性强, 能使风力发电机具有更快的转速响应速度和更高的风能转换效率。

[关 键 词] 风力发电; 最大功率跟踪; 终端滑模控制; 风能转换效率; 非奇异; 自适应; 鲁棒性

[中图分类号] TP273 [文献标识码] A [DOI编号] 10.19666/j.rlf.201907161

[引用本文格式] 孙志辉, 郝万君, 尚友涛, 等. 基于自适应非奇异快速终端滑模的风力发电机最大功率跟踪控制[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 48-54. SUN Zhihui, HAO Wanjun, SHANG Youtao, et al. MPPT control of wind turbine based on self-adaptive nonsingular fast terminal sliding mode[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 48-54.

MPPT control of wind turbine based on self-adaptive nonsingular fast terminal sliding mode

SUN Zhihui¹, HAO Wanjun¹, SHANG Youtao², CAO Songqing¹, WANG Hao¹, HAO Shiyuan³

(1. Institute of Electronics and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Jilin Chemical Group Co., Ltd. Packaging Products Factory, Jilin 132021, China;

3. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby 999017, Copenhagen)

Abstract: Aiming at solving the problems of low wind energy conversion efficiency and poor robustness when the wind generating set is operating in low wind speed area, a maximum power tracking control strategy based on self-adaptive nonsingular fast terminal sliding mode is proposed. By designing the non-singular fast terminal sliding mode algorithm, the response speed of the wind wheel rotating speed with the wind speed change is improved. To solve the unmodeled dynamic and external noise interference problems occur in the actual wind power generation system, the self-adaptive algorithm is adopted to estimate the uncertainty of the system, thus to strengthen the robustness of the system. Taking a 5 MW wind turbine unit as the research object, the control scheme is simulated on MATLAB/Simulink platform. The simulation results show that, the proposed control strategy has high accuracy and strong robustness, which can make the wind turbine have faster speed response speed and higher wind energy conversion efficiency.

Key words: wind power generation, maximum power point tracking, terminal sliding mode control, conversion efficiency of wind energy, nonsingular, self-adaptive, robustness

收稿日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477109, 61703296)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51477109, 61703296)

第一作者简介: 孙志辉(1996), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电系统的建模与控制, 1306927749@qq.com。

通信作者简介: 郝万君(1965), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂系统的建模、控制与优化等, hao_wanjuan@163.com。

风力发电机组的最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 控制旨在额定风速下控制风轮转速跟踪最佳转速, 进而捕获更多风能^[1]。在湍流风时风力发电机的动态性能和风能的捕获效率会受到影响, 良好的控制策略有助于改善这一问题。

目前最大功率跟踪常用的控制方法有最佳转矩法、功率曲线法、叶尖速比法等^[2]。最佳转矩法简单易于实现, 并且不需要获取实时风速信息, 所以该方法在工程实际中应用广泛。功率曲线法的抗干扰能力较强, 但该方法忽略了风速的动态特性^[3]。叶尖速比法被广泛用于理论研究, 其主要思想是当风速变化时将风力发电机的叶尖速比维持在最佳值, 从而使风能的捕获率达到最大, 该方法具有很好的准确性和反应速度, 但需要精确测量风速, 这在实际工程中不易实现。由于风力发电系统自身的非线性、多变量、强耦合等特性, 以及自然风速、电网电量需求和系统运行工况的动态变化, 使得常规的控制方法存在风能捕获效率较低、风轮抖振严重等问题, 大大降低了风力发电系统运行的可靠性、安全性和经济性。

滑模控制对模型的误差及外部干扰有较强的鲁棒性, 所以在风力发电系统中得到广泛运用^[4-5]。终端滑模因其响应速度快、在有限时间收敛等特点而被关注。文献[6-7]设计的非奇异快速终端滑模控制方法提高了风力发电机组的风能捕获效率, 该控制策略在风速大范围变化的情况下能够使机组的风能利用系数 C_p 保持在最佳值附近。文献[8]探讨了二阶非线性系统的固定时间终端滑动面设计问题, 提出一种控制输入的重新设计方法, 以保证滑动面达到固定时间的特性。但文献[6-8]假定已知系统不确定性和干扰上界, 而在实际应用中, 系统不确定性结构复杂, 很难得到上限。将多种滑模控制结构与自适应控制相结合的控制策略可以克服与未知界有关的问题, 文献[9]提出了一种自适应全局快速终端滑模控制方法, 用于在未知模型不确定性和外部干扰下对微机电系统振动陀螺仪进行跟踪控制, 但是该控制器未考虑终端滑模的奇异性问题。文献[10]提出一种非奇异快速终端滑模和神经网络相结合的机械臂轨迹跟踪控制方案, 采用径向基函数神经网络 (radial basis function neural network, RBFNN) 逼近系统未知非线性动力学特性。但采用神经网络的方法因计算量过大而无法实现系统快

速性的要求。文献[11]设计了一种自适应终端滑模算法对涡轮的输入扰动和参数不确定性上界进行估计, 但对风速变化的不确定性估计还有待进一步研究。

本文针对风力发电系统在额定风速以下 (低风速区) 对风能的捕获效率较低的问题, 设计了基于自适应非奇异快速终端滑模控制方法, 将终端滑模面的指数扩展到正实数域, 且控制律不存在奇异性, 当系统状态远离平衡状态时, 系统状态的收敛速度得到提高。针对实际系统中的不确定性以及干扰上界未知的情况, 提出一种自适应的参数整定方法来估计未知上限。最后, 利用 MATLAB/Simulink 软件在风电机组模型上进行仿真, 结果表明本文方法对提高风能捕获效率的有效性以及对未知干扰较好的鲁棒性。

1 风力发电系统模型

风力发电系统主要包括空气动力系统、传动系统、发电机系统等。空气动力系统将风能转化为机械能以后, 通过传动系统将能量传送到发电机, 最后发电机系统将机械能转化为电能输出。

由空气动力学可知, 风力发电机捕获风能的功率 P_a 可表示为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, R 为风轮半径, v 为风速, 风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和叶片桨距角 β 的非线性函数。

叶尖速比 λ 定义为

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

式中 ω_r 为风轮旋转角速度。

功率 P_a 和气动转矩 T_a 的关系为

$$P_a = \omega_r T_a \quad (3)$$

所以气动转矩 T_a 为

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_Q(\lambda, \beta) \quad (4)$$

式中 C_Q 为转矩系数。

$$C_Q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (5)$$

传动系统由气动力矩 T_a 驱动的动力学方程为

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - B_r \omega_r \quad (6)$$

式中: J_r 为低速轴的转动惯量; B_r 为低速轴的阻尼系数; T_{ls} 为作用在转子上的断开力矩, 称为低速轴

力矩,可由给出的刚性轴的扭转系数 K_d 和阻尼系数 B_d 来推导。

$$T_{ls} = K_d(\theta_r - \theta_{ls}) + B_d(\omega_r - \omega_{ls}) \quad (7)$$

由高速轴转矩 T_{hs} 驱动的动力学方程为

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_g - B_g \omega_g \quad (8)$$

式中, J_g 为高速轴的转动惯量, T_g 为发电机电磁转矩, B_g 为高速轴阻尼系数。

齿轮箱的传动比定义为

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} \quad (9)$$

假设一个完全刚性的低速轴,单个质量风力发电系统模型转子特性的动力学可表示为:

$$J \dot{\omega}_r = T_a - n_g T_g - B \omega_r + F \quad (10)$$

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

$$B = B_r + n_g^2 B_g$$

式中, F 为参数不确定性和干扰,通常是未知的。

假定 F 是有界的,则可表示为

$$|F| = |\Delta(\omega_r, \dot{\omega}_r) + d| \leq \delta \quad (11)$$

式中 δ 表示不确定性的上界。

假设控制输入不包括加速度信号, δ 可表示为

$$\delta = a_0 + a_1 |\omega_r| + a_2 |\dot{\omega}_r|^2 \quad (12)$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 均为大于 0 的正数。

双馈异步发电机的电磁部分可以通过解耦控制简化为一个一阶线性模型^[7]

$$\dot{T}_g = -\frac{T_g}{\tau_g} + \frac{T_{g,ref}}{\tau_g} \quad (13)$$

式中, τ_g 为转矩系数, $T_{g,ref}$ 为发电机电磁转矩的参考值。

2 控制目标及控制器

风电机组在额定风速以下(低风速区)的控制目标是最大限度地捕获风能。由式(1)可知,要实现风电系统输出功率最大化,需使 $C_p(\lambda, \beta)$ 处于最大值。由于 $C_p(\lambda, \beta)$ 是以 λ 和 β 为变量的函数,在保持桨距角 β 不变的情况下(通常在 0 附近),通过调节发电机转矩 T_g 间接地改变风轮转速 ω_r ,使其更好地跟踪最佳叶尖速比 λ_{opt} 。

给定风轮转速 ω_{ref} 可计算为

$$\omega_r = \omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (14)$$

由此通过设计一个自适应非奇异快速终端滑模控制器(adaptive non-singular fast terminal sliding mode control, ANFTSMC)来控制发电机转矩 T_g ,

使风轮转速 ω_r 更快地跟踪给定风轮转速 ω_{ref} ,整个控制系统结构如图 1 所示。

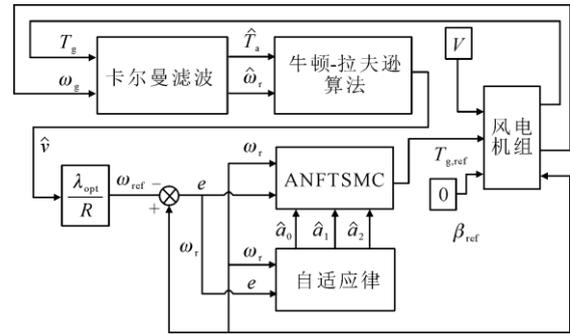


图 1 风电机组控制系统结构

Fig.1 The structure of wind turbine control system

2.1 风速的估计

使用叶尖速比实现最大功率跟踪需要对风速进行估计。当桨距角 β 固定为一个常值时,风速的估计与气动转矩 T_a 和风轮转速 ω_r 有关。本文采样发电机电磁转矩 T_g 和发电机转速 ω_g 数据,通过卡尔曼滤波算法得到其估计值分别为 \hat{T}_a 和 $\hat{\omega}_r$,从而得到计算估计风速 \hat{v} 的方程

$$\hat{T}_a - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\hat{\lambda})}{\hat{\lambda}} \hat{v}^2 = 0 \quad (15)$$

式中 $\hat{\lambda} = \frac{\hat{\omega}_r R}{\hat{v}}$ 。

方程(15)的求解可用牛顿-拉夫逊算法计算,风速的递推公式为:

$$\hat{v}(k+1) = \hat{v}(k) - H_n^{-1} g_n \quad (16)$$

$$H_n = \frac{1}{2} \rho \pi R^4 \hat{\omega}_r \frac{\partial C_p(\hat{\lambda})}{\partial \hat{\lambda}} - \rho \pi R^3 C_p(\hat{\lambda}) \hat{v} \quad (17)$$

$$g_n = \hat{T}_a - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\hat{\lambda})}{\hat{\lambda}} \hat{v}^2$$

2.2 非奇异快速终端滑模控制

非奇异快速终端滑模控制(nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC)解决了常规滑模控制(sliding mode control, SMC)不能在有限时间收敛的缺点,且避免了终端滑模控制(terminal sliding mode control, TSMC)的奇异性问题。相较于非奇异终端滑模控制(nonsingular terminal sliding mode control, NTSMC),NFTSMC 系统可以达到全局快速收敛^[12-13],所以可以很好地实现对风力发电机的控制。

首先定义误差变量 e

$$e = \omega_r - \omega_{ref} \quad (18)$$

在不考虑不确定性和干扰的情况下, 由式(10)得转速误差的状态方程

$$\dot{e} = \frac{T_a}{J} - \frac{n_g}{J} T_g - \frac{B}{J} \omega_r - \dot{\omega}_{ref} \quad (19)$$

定义非奇异快速终端滑模面为

$$s = e + \frac{1}{\alpha} |e|^m \operatorname{sgn}(e) + \frac{1}{\beta} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}} \operatorname{sgn}(\dot{e}) \quad (20)$$

式中, α 、 β 、 m 为正实数, $1 < \frac{p}{q} < 2$, 且 $m > \frac{p}{q}$ 。

使用 NFTSMC 滑模面 (式(20)) 和任何给定初始条件 $e(0) \neq 0$, 系统状态在有限时间内迅速收敛到 $e=0$ 。当系统状态远离平衡状态时, $\frac{1}{\alpha} |e|^m \operatorname{sgn}(e)$ 占 $\frac{1}{\beta} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}} \operatorname{sgn}(\dot{e})$ 的主导地位, 保证了较高的收敛速度。此外, 当系统状态接近平衡状态时, $\frac{1}{\beta} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}} \operatorname{sgn}(\dot{e})$ 保证系统在有限时间内收敛。

将式(19)代入滑动面的导数 \dot{s} 中, 得

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e} + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \ddot{e} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [\ddot{e} + \beta \frac{q}{p} |\dot{e}|^{2-\frac{p}{q}} (1 + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1}) \operatorname{sgn}(\dot{e})] \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \left[\frac{1}{J} (\dot{T}_a - n_g \dot{T}_g - B \dot{\omega}_r - \ddot{\omega}_{ref}) + \right. \\ &\quad \left. \beta \frac{q}{p} |\dot{e}|^{2-\frac{p}{q}} (1 + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1}) \operatorname{sgn}(\dot{e}) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

由于滑动面的导数 $\dot{s}=0$ 是状态轨迹保持在滑动面 $s=0$ 上的必要条件。所以通过 $\dot{s}=0$ 可以推出转矩 T_g 的等效控制律 $T_{g_{eq}}$:

$$\begin{aligned} T_{g_{eq}} &= \frac{J}{n_g} \left(\frac{T_a}{J} - \frac{B}{J} \omega_r - \dot{\omega}_{ref} \right) + \\ &\quad \frac{J}{n_g} \int_0^t \left[\beta \frac{q}{p} |\dot{e}|^{2-\frac{p}{q}} (1 + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1}) \operatorname{sgn}(\dot{e}) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

等效控制律 $T_{g_{eq}}$ 可以使系统在精确知道动态的情况下保持在滑动面上。然而, 这种假设在实际应用中很难满足。为了满足存在不确定性和外部干扰的滑动条件, 给出了切换控制律 $T_{g_{sw}}$ (假设不确定性和未知干扰上界已知):

$$\begin{aligned} T_{g_{sw}} &= \frac{J}{n_g} [-ks - (\delta + \eta) \operatorname{sgn}(s)] \\ &= \frac{J}{n_g} [-ks - (a_0 + a_1 |\omega_r| + a_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) \operatorname{sgn}(s)] \end{aligned} \quad (23)$$

式中: k 为增益, 且 $k > 0$; η 为一个小的正常数。

通过调整切换控制律的参数, 既可以保证滑动模态到达过程的动态品质, 又可减弱控制输入的抖振。所以总的控制律可以表示为

$$\begin{aligned} T_g &= T_{g_{eq}} + T_{g_{sw}} = \frac{J}{n_g} \left(\frac{T_a}{J} - \frac{B}{J} \omega_r - \dot{\omega}_{ref} \right) + \\ &\quad \frac{J}{n_g} \int_0^t \left[\beta \frac{q}{p} |\dot{e}|^{2-\frac{p}{q}} (1 + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1}) \operatorname{sgn}(\dot{e}) \right] + \\ &\quad \frac{J}{n_g} [-ks - (a_0 + a_1 |\omega_r| + a_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) \operatorname{sgn}(s)] \end{aligned} \quad (24)$$

选取李雅普诺夫函数证明系统的稳定性

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (25)$$

式(25)对时间求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} \\ &= s \left(\dot{e} + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \ddot{e} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

将式(21)代入式(26)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [F - ks - (\delta + \eta) \operatorname{sgn}(s)] \\ &\leq \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [|F| |s| - ks^2 - (\delta + \eta) |s|] \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [(|F| - \delta) |s| - ks^2 - \eta |s|] \\ &\leq \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [-ks^2 - \eta |s|] \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论, 系统状态渐近收敛于滑动面 $s(t)=0$ 。为了证明这种收敛是在有限时间内发生的, 式(27)可以写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{dV}{dt} \\ &\leq \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} [-ks^2 - \eta |s|] \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} (-2kV - \sqrt{2\eta} V^{1/2}) \\ &= -\gamma_1 V - \gamma_2 V^{1/2} \end{aligned} \quad (28)$$

式中, $\gamma_1 = 2k \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1}$, $\gamma_2 = \sqrt{2\eta} k \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1}$ 。从而

$$dt \leq \frac{dV}{-\gamma_1 V - \gamma_2 V^{1/2}} \quad (29)$$

假设从初始状态误差 $e(0) \neq 0$ 到 $e=0$ 的到达时间为 t_r , 式(29)两边积分可得

$$t_r \leq \int_0^{t_r} \frac{dV}{-\gamma_1 V - \gamma_2 V^{1/2}} = \frac{2}{\gamma_1} \ln \left(\frac{\gamma_1 V(0)^{1/2} + \gamma_2}{\gamma_2} \right) \quad (30)$$

因此,系统可以在有限时间收敛到0。

当系统状态远离滑动面时,所构造的等效控制律 $T_{g_{eq}}$ 可以保证系统在有限时间内快速收敛,切换控制律 $T_{g_{sw}}$ 可以使系统对未建模的不确定性和外部干扰具有更强的鲁棒性^[14-18]。

当系统不确定性和外部干扰的上界已知时,上述控制律能达到较好的效果。然而,由于不确定性和干扰结构的复杂性,这一假设很难得到满足。为了克服这一问题,提出基于上述控制律的 ANFTSMC,采用自适应律对系统不确定度 F 的上界参数进行估计。

2.3 自适应非奇异快速终端滑模控制

为了估计式(12)的不确定性和未知干扰上界,重新设计式(23)的切换控制律,

$$T_{g_{asw}} = \frac{J}{n_g} \left[-ks - (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 |\omega_r| + \hat{a}_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) \operatorname{sgn}(s) \right] \quad (31)$$

式中 \hat{a}_0 、 \hat{a}_1 、 \hat{a}_2 分别为 a_0 、 a_1 、 a_2 的估计。定义自适应误差为 $\tilde{a}_0 = \hat{a}_0 - a_0$, $\tilde{a}_1 = \hat{a}_1 - a_1$, $\tilde{a}_2 = \hat{a}_2 - a_2$ 。

从而控制律 T_g 为

$$T_g = T_{g_{eq}} + T_{g_{asw}} = \frac{J}{n_g} \left(\frac{T_a}{J} - \frac{B}{J} \omega_r - \dot{\omega}_{ref} \right) + \frac{J}{n_g} \int_0^t \left[\beta \frac{q}{p} |\dot{e}|^{2-\frac{p}{q}} \left(1 + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1} \right) \operatorname{sgn}(\dot{e}) \right] + \frac{J}{n_g} \left[-ks - (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 |\omega_r| + \hat{a}_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) \operatorname{sgn}(s) \right] \quad (32)$$

自适应律设计为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}_0 &= k_0 |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \\ \dot{\hat{a}}_1 &= k_1 |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} |\omega_r| \\ \dot{\hat{a}}_2 &= k_2 |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} |\dot{\omega}_r|^2 \end{aligned} \quad (33)$$

式中, k_0 、 k_1 、 k_2 均大于0。

通过设计式(28)中的自适应律来估计系统不确定性以及未知干扰上界的参数,然后在控制律式(31)中利用自适应律中的估计值来消除不确定性所带来的影响。

选择以下李雅普诺夫函数来证明系统的稳定性:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{\beta q} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{2k_i} \tilde{a}_i^2 \quad (34)$$

式中, $\tilde{a}_i = \hat{a}_i - a_i$ 。

对 V 求导并将式(32)代入式(34),得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\beta q} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{2k_i} \tilde{a}_i \dot{\tilde{a}}_i \\ &= s \left(\dot{e} + \frac{m}{\alpha} |e|^{m-1} + \frac{1}{\beta q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \ddot{e} \right) + \frac{1}{\beta q} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{2k_i} \tilde{a}_i \dot{\tilde{a}}_i \\ &= \frac{1}{\beta q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \left[Fs - ks^2 - (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 |\omega_r| + \hat{a}_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) |s| \right] + \\ &\quad \frac{1}{\beta q} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{2k_i} \tilde{a}_i \dot{\tilde{a}}_i \end{aligned} \quad (35)$$

将式(33)代入式(35),得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{\beta q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \left[Fs - ks^2 - (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 |\omega_r| + \hat{a}_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta) |s| \right] + \\ &\quad \frac{1}{\beta q} \left[(\hat{a}_0 - a_0) |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} + (\hat{a}_1 - a_1) |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} |\omega_r| + \right. \\ &\quad \left. (\hat{a}_2 - a_2) |s| |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} |\dot{\omega}_r|^2 \right] \\ &= \frac{1}{\beta q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} \left[Fs - ks^2 - \left(a_0 + a_1 |\omega_r| + a_2 |\dot{\omega}_r|^2 + \eta \right) |s| \right] \\ &\leq \frac{1}{\beta q} |\dot{e}|^{\frac{p}{q}-1} (-ks^2 - \eta |s|) \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (36)$$

所以系统可以渐进收敛到滑动面 $s=0$ 。

3 试验结果及分析

在 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建风力发电系统模型,所用 5 MW 风力发电机部分参数见表 1。

表 1 风力发电机部分参数
Tab.1 Partial parameters of the wind turbine

变量	数值
空气密度 ρ /(kg m ⁻³)	1.225
风轮半径 R /m	64.5
风轮转动惯量 J_r /(kg m ²)	5.915 7 × 10 ⁷
发电机转动惯量 J_g /(kg m ²)	534.116
齿轮箱变比 n_g	97
最佳叶尖速比 λ_{opt}	9.03

本文设定风速序列的平均风速为 6.5 m/s,湍流强度为 A 类级别,时长为 500 s,利用 2.1 节方法进行风速估计,估计风速曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,估计风速与实际风速相比虽然存在稍许滞后,但估计精度较高。

为了验证所设计控制器,以风速的随机变化作为系统的不确定性,并加入白噪声作为系统的随机干扰。将常规 SMC、NTSMC 以及 ANFTSMC 在风

力发电系统模型进行仿真。ANFTSMC 参数 $p=5$, $q=3$, $m=3$, $\alpha=1$, $\beta=1$, 式(33)的自适应律中取 $k_0=k_1=k_2=0.001$ 。图 3 和表 2 分别为风轮转速曲线和控制性能对比。

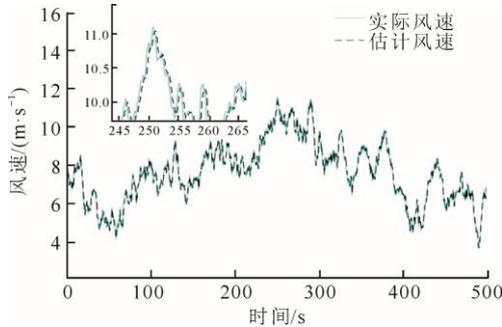


图 2 估计风速曲线
Fig.2 The estimated wind speed curve

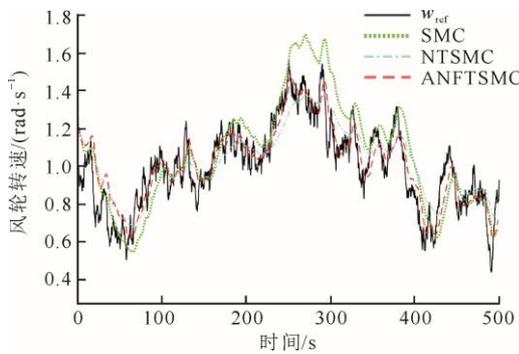


图 3 风轮转速曲线
Fig.3 Change curves of the wind wheel speed

表 2 控制性能对比

Tab.2 The control performance comparison

控制方法	AVG(e)	AVG(P_g)/ $\times 10^6$	AVG(C_p)
SMC	0.064 4	1.777	0.514 7
NTSMC	0.010 2	1.843	0.517 0
ANFTSMC	0.007 1	1.883	0.518 8

从图 3 和表 2 可以看出, ANFTSMC 能更好地跟踪参考曲线, SMC、NTSMC 和 ANFTSMC 的平均跟踪误差 $AVG(e)$ 分别为 0.064 4、0.010 2、0.007 1。因为在切换控制律 T_{gsw} 中采用了式(33)的自适应机制, 使得转矩 T_g 可以随着风轮转速 ω_r 动态调节, 避免了 SMC 和 NTSMC 在存在不确定度和未知干扰上界时控制性能下降的问题, 所以存在时变外部干扰时, 本文提出的 ANFTSMC 转速跟踪效果依旧较好, 表明其转速响应速度更快, 鲁棒性更强。

由于本文设计控制器的核心是通过转矩调节使风轮转速 ω_r 跟踪给定转速 ω_{ref} , 所以当风轮转速能很好地跟踪给定转速时, 风力发电系统的平均风能利用系数 $AVG(C_p)$ 以及平均输出功率 $AVG(P_g)$

都会有一定的提升。图 4 为 3 种控制方式风能利用系数。由图 4 可见: ANFTSMC 方法可以使风能利用系数稳定在最佳值 0.527 4 附近; 当风速快速变化时, 相较于其他 2 种控制方法, ANFTSMC 方法动态响应较快, 所以能更快地回到最佳值附近, 从而间接体现转速响应速度较快。

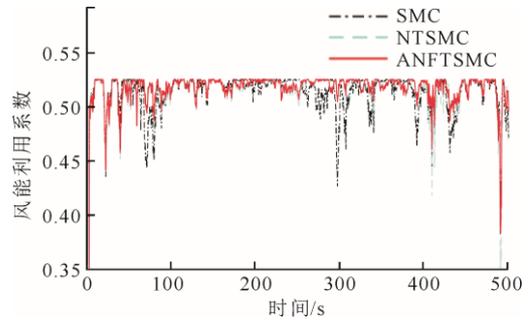


图 4 3 种控制方法风能利用系数
Fig.4 The wind energy utilization coefficients of three control methods

图 5 为发电机输出功率曲线。结合图 5 和表 2 数据分析, ANFTSMC 的平均输出功率比常规 SMC 提高了 5.97%, 比 NTSMC 提高了 2.17%。表明所设计的控制器在输出功率上也有一定的提升。

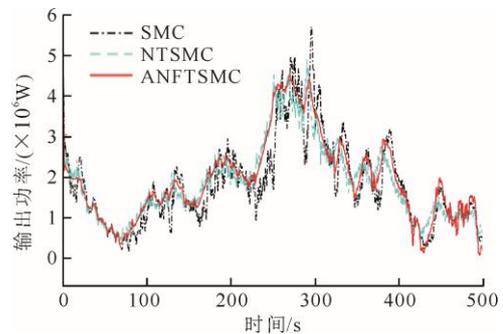


图 5 发电机输出功率曲线
Fig.5 Change curves of output power of the generator

图 6 为发电机转矩曲线。由图 6 可见, ANFTSMC 方法在抑制抖振上也有较好的作用。

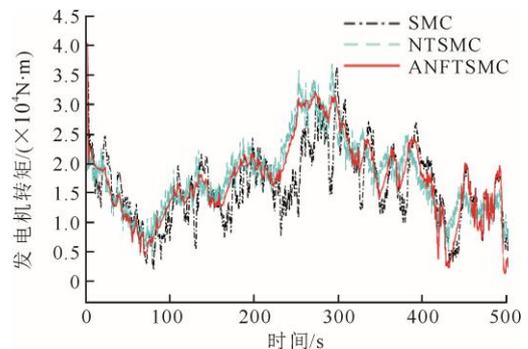


图 6 发电机转矩曲线
Fig.6 Change curves of torque of the generator

4 结 语

本文设计与 NFTSMC 滑模面相结合的自适应技术来处理未知的不确定性和外部干扰上界未知的情况,所设计的 ANFTSMC 具有精度高、鲁棒性强、无奇异性、抖振小、可以在有限时间收敛等优点,使风力发电机具有更快的转速响应速度和更高的风能转换效率,本文提出的 ANFTSMC 方法适合实际应用。

[参 考 文 献]

- [1] LIU J, MENG H, YANG H, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account[J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 101: 738-748.
- [2] BENDIB B, BELMILI H, KRIM F. A survey of the most used MPPT methods: conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 45: 637-648.
- [3] 殷明慧, 蒯狄正, 李群, 等. 风机最大功率点跟踪的失效现象[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(18): 40-47.
YIN Minghui, KUAI Dizheng, LI Qun, et al. A phenomenon of maximum power point tracking invalidity of wind turbines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(18): 40-47.
- [4] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 1-20.
LIU Jinkun. *MATLAB simulation of sliding mode variable structure control: basic theory and design method*[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 1-20.
- [5] M'ERIDA J, AGUILAR L T, D'AVILA J. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization[J]. *Renewable Energy*, 2014, 71: 715-728.
- [6] 李大中, 邬峰. 一种风电机组非奇异快速终端滑模 MPPT 控制方法[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(3): 1109-1117.
LI Dazhong, WU Feng. A MPPT control method of wind turbines with nonsingular and fast terminal sliding mode[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 1109-1117.
- [7] 郑雪梅, 李晓磊, 任毅, 等. 无源高阶终端滑模控制双馈风力发电系统[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(8): 81-86.
ZHENG Xuemei, LI Xiaolei, REN Yi, et al. Passivity and higher-order sliding mode control for doubly-fed induction generator wind power system[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(8): 81-86.
- [8] MARIA L C, ANDREA C. Nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear planar systems with global fixed-time stability guarantees[J]. *Automatica*, 2018, 95: 561-565.
- [9] YAN W, FEI J. Adaptive control of MEMS gyroscope based on global terminal sliding mode controller[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013(6): 1-9.
- [10] 吴爱国, 刘海亭, 董娜. 机械臂神经网络非奇异快速终端滑模控制[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 396-405.
WU Aiguo, LIU Haiting, DONG Na. Nonsingular fast terminal sliding mode control of robotic manipulators based on neural networks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 396-405.
- [11] RAJENDRAN S, JENAD. Adaptive nonsingular terminal sliding mode control for variable speed wind turbine[J]. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2015(6): 937-942.
- [12] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法[J]. *信息与控制*, 2009, 38(1): 1-8.
LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method[J]. *Information and Control*, 2009, 38(1): 1-8.
- [13] 江浩斌, 龚晓庆, 耿国庆, 等. P-ECHPS 自适应非奇异快速终端滑模控制器设计[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 374-381.
JIANG Haobin, GONG Xiaoqing, GENG Guoqing, et al. Design of adaptive nonsingular fast terminal sliding mode controller for P-ECHPS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 374-381.
- [14] 华玉龙, 孙伟, 迟宝山, 等. 非奇异快速终端滑模控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(5): 1119-1125.
HUA Yulong, SUN Wei, CHI Baoshan, et al. Study on nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(5): 1119-1125.
- [15] WANG Y, JIANG S, CHEN B, et al. A new continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode control for cable-driven manipulators[J]. *Advances in Engineering Software*, 2018, 119: 21-29.
- [16] 郑伟, 陈仕彬, 梁福波, 等. 基于 PSO-PSA 的光伏系统最大功率点跟踪技术[J]. *热力发电*, 2018, 47(2): 78-84.
ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum power point tracking technology based on hybrid algorithm of PSO and PSA for photovoltaic systems[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(2): 78-84.
- [17] 肖固城, 唐飞, 廖清芬, 等. 一种可改善失步振荡模式的风电虚拟惯性控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 61-70.
XIAO Gucheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. A virtual inertia control strategy of wind power to improve the out-of-step oscillation modes[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 61-70.
- [18] 于会群, 高扬, 张浩, 等. 变速恒频双馈风电系统风力机转矩模糊 PID 控制[J]. *热力发电*, 2014, 43(5): 49-53.
YU Huiqun, GAO Yang, ZHANG Hao, et al. Fuzzy PID control of variable speed constant frequency wind turbine system[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(5): 49-53.

(责任编辑 杜亚勤)