【环境与能源 / Environment and Energy】

基于 HOSMO 的风电机组自适应超扭曲滑模控制

王 昊¹, 郝万君¹, 郝诗源², 曹松青¹, 孙志辉¹

1) 苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏苏州 215009; 2) 丹麦科技大学电气工程系, 丹麦哥本哈根 999017

摘 要: 为提高风力发电系统在风速随机变化、未知扰动输入的运行环境下的最大功率跟踪控制性能, 提出一种基于高阶滑模观测器 (high order sliding mode observer, HOSMO) 的自适应超扭曲滑模控制策略. 为增强风机系统的动态跟踪性能, 设计超扭曲滑模控制器. 为验证并提高该方法的控制性能, 对超扭曲滑模控制器中的未知参数和系统的不确定性设计自适应控制律, 更好地抑制了超扭曲控制器的抖振, 增强了对模型参数和外部扰动不确定性的鲁棒性. 同时针对风机系统动态模型中部分状态变量难以准确测量的问题, 设计了 HOSMO 对其实时估计, 该方法对高频噪声有很好的抑制作用. 将提出的控制方法与一阶滑模控制以及传统比例积分控制进行对比分析, 证明了所提策略的正确性和可行性.

关键词: 风力发电机组; 最大功率点跟踪; 自适应; 超扭曲滑模; 高阶滑模观测器; 鲁棒性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.05507

HOSMO based adaptive super twist sliding-mode control for wind turbine

WANG Hao¹, HAO Wanjun¹, HAO Shiyuan²,
CAO Songqing¹, and SUN Zhihui¹

1) School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215009, Jiangsu Province, P. R. China

2) Department of Electrical Engineering, Danish University of Science and Technology, Copenhagen 999017, Denmark

Abstract: In order to improve the maximum power tracking control performance of wind power system in the operating environment of wind speed random change and unknown disturbance input, we propose an adaptive super twist sliding mode control strategy based on high order sliding mode observer (HOSMO). Aiming at enhancing the dynamic tracking performance of the fan system, we design a super twist sliding mode controller. In order to improve the performance of the method, an adaptive control law is designed for the unknown parameters and system uncertainties in the super twist sliding mode controller, which can better suppress the chattering of the super twist controller and enhance the robustness to the model parameters and external disturbance uncertainties. At the same time, aiming at the problem which is difficult to measure some state variables accurately in the dynamic model of the fan system, we design a high-order sliding mode observer to estimate the real-time state variables, which has a good effect on suppressing the high-frequency noise. The correctness and feasibility of the proposed strategy are proved by comparing the proposed control method with the first-order sliding mode control and the traditional proportional integral control.

Received: 2019-10-29; **Accepted:** 2020-01-13

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51477109, 61703296); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX19_2016)

Corresponding author: Professor HAO Wanjun. E-mail: hao_wanjun@163.com

Citation: WANG Hao, HAO Wanjun, HAO Shiyuan, et al. HOSMO based adaptive super twist sliding-mode control for wind turbine [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(5): 507-513. (in Chinese)

Key words: wind turbine; maximum power point tracking; adaptive; super twist sliding mode; high order sliding mode observer (HOSMO); robustness

在风电机组的低风速区, 风机的主要控制目标是获得最大的风能利用效率, 即最大功率跟踪控制. 随着大型风力发电系统的不断发展, 其系统具有更复杂的特性, 并产生各种不确定扰动的问题. 这使得经典的最大功率跟踪控制方法难以实现最大功率跟踪控制, 进而无法很好地实现最大风能捕获, 造成了风能的浪费. 为了解决这些问题, 许多学者针对强耦合、强非线性的复杂风机系统设计了各种各样的非线性控制方法^[1-2]. 文献[3]将积分滑模控制用于低风速区实现最大风能捕获, 以消除稳态误差, 提高鲁棒性, 但未讨论滑模控制固有的抖动性. 文献[4]提出了一种二阶滑模观测器与电机系统中电流模型相结合的方法, 利用滑模观测器设计转速控制的自适应律, 得到了理想的转速控制效果, 但是该方法针对系统状态难以获取的复杂非线性系统有一定的应用局限性. 文献[5]提出用二阶滑模控制、直接转矩控制和模糊逻辑控制相结合的方法去解决抖振问题. 然而, 由于系统的强非线性使得该控制策略很难保证系统有较强的鲁棒性, 无法很好地解决外界干扰和参数扰动的问题. 文献[6]提出了模糊调谐比例积分 (proportional-integral, PI) 的直接转矩控制策略. 这种技术的主要难点是确定输入增益, 而输入增益决定了控制性能的好坏. 文献[7]为了使电磁转矩和定子无功功率不受电网电压扰动的影响采用了滑模控制方法, 提高了系统对参数变化的鲁棒性, 加快了动态响应速度. 在文献[8]中, 使用超扭曲滑模控制策略来避免出现不稳定的抖振问题, 采用了尽可能低的增益常数, 但这会大大增加系统的响应时间.

滑模控制策略具有强鲁棒性、抗干扰能力强和对扰动不敏感等特点. 但其主要问题是由于控制的不连续而产生的抖振问题. 为了改进现有的转矩控制器, 减少无功功率和有功功率的抖振现象, 针对上述问题本研究设计了基于高阶滑模观测器 (high order sliding mode observer, HOSMO) 的自适应超扭曲滑模控制策略. 超扭曲滑模控制器有效提高了系统的跟踪性能, 利用所设计的自适应律增强了系统对未知参数和外界扰动的鲁棒性. 高阶滑模观测器对系统状态进行估计, 进而减小由于系统高频离散控制带来的高频噪音信号, 改善了系统的鲁棒性和抗干扰性. 从阶跃突变风速仿真和连续渐变风速仿

真结果可以看出, 设计的 HOSMO 能够很好地估计系统状态, 自适应超扭曲滑模控制可有效消除系统抖振, 在存在外界扰动时能很好地实现系统的最大功率跟踪控制.

1 风力发电机组模型

1.1 空气动力系统模型

风轮机捕获的有效风功率 P_r 为

$$P_r = 0.5\pi R^2 V^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (1)$$

其中, R 是风轮转子半径; V 为随机风速; $C_p(\beta, \lambda)$ 为风机功率转换效率; β 为桨距角; 叶尖速比 λ 为

$$\lambda = (\omega_r R) / V \quad (2)$$

风轮转子的机械转矩 T_a 为

$$T_a = 0.5\pi\rho R^3 \frac{C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} V^2 \quad (3)$$

其中, ω_r 为风轮转子转速; ρ 是空气密度; 风能利用系数 C_p 可按式(4)^[9]计算,

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \lambda^i \quad (4)$$

其中, α_i 为近似系数, $i = 1, 2, \dots, n$. 通常 $n = 5$ 时可取得较高精度, $\alpha_0 = 0.1667$, $\alpha_1 = -0.2558$, $\alpha_2 = 0.115$, $\alpha_3 = -1.617 \times 10^{-2}$, $\alpha_4 = 9.5 \times 10^{-4}$, $\alpha_5 = -2.05 \times 10^{-5}$.

1.2 传动系统模型

传动系统模型由高速轴、低速轴和齿轮箱组成. 在忽略系统刚性轴的扭转系数和阻尼系数后, 可简化为一个单质量块模型, 其数学模型^[10]为

$$J\dot{\omega}_r = T_a - N_g T_g \quad (5)$$

其中, $J = J_r + N_g^2 J_g$, J_r 和 J_g 分别为低速轴和高速轴的转动惯量; N_g 为齿轮箱的传动比; T_g 为发电机转矩.

1.3 风力发电机模型

本研究采用双馈异步发电机, 为简便起见, 可将其电磁部分简化为一个一阶线性模型^[10],

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{1}{\tau_g} T_g + \frac{1}{\tau_g} T_{g,ref} \quad (6)$$

其中, τ_g 为转矩系数; $T_{g,ref}$ 为发电机转矩给定值.

2 控制器的设计

2.1 系统控制目标

最大功率跟踪控制是在低风速段捕获最大风能的方法, 可根据风速的变化、风轮的机械特性和叶尖速比的最优值确定. 当桨距角取一些特定值时, 就可绘出风能利用系数 C_p 作为 λ 的函数, 如图 1. 由式(1)可知, 在风速一定时, 风机捕获的 P_r 取决于 C_p . 根据式(2)和图 1 可知, 在低风速区只需调节转子转速, 使其跟踪最佳转子转速, 即可得最佳叶尖速比 λ_{opt} , 获得最大风能利用系数 $C_{p,max}$. 由图 1 可知, 当 $\beta = 0^\circ$, $\lambda = \lambda_{opt} = 8.13$ 时, C_p 取得最大值^[11].

图 1 风力机 C_p - λ 曲线

Fig. 1 (Color online) Wind turbine C_p - λ curve

2.2 一阶滑模控制器与比例积分控制器

传统的一阶滑模控制方法最能显示滑模控制方法的优势, 主要表现在控制上的不连续性、强鲁棒性和对参数不敏感等. 同时, 也能表现出滑模控制特有的抖动问题. 因为一阶滑模控制器和比例积分控制设计方法相对简单, 所以这里直接给出一阶滑模控制器形式和比例积分控制器形式, 方便后续的对比分析实验.

首先, 选取角速度跟踪误差 e 为

$$e = \omega_r - \omega_{ref} \quad (7)$$

其中, ω_{ref} 为参考角速度. 则 PI 控制器形式为

$$T_{g,ref} = K_p e + K_i \int_0^t (e) d\tau \quad (8)$$

一阶滑模控制器形式为

$$T_{g,ref} = \frac{1}{N_g} T_a - \frac{J}{N_g} \dot{\omega}_{ref} + \frac{J}{N_g} k |e|^\alpha \text{sgn}(e) \quad (9)$$

其中, α 为一阶滑模控制器参数, $\alpha = 1$; k 为指数趋

近律参数.

2.3 自适应超扭曲滑模控制器的设计

2.3.1 滑模面的定义

根据上述控制目标可知, 风电机组低风速的控制目标是 ω_r 实时跟踪参考角速度 ω_{ref} . 令风轮转子转动角度跟踪误差 $x_1 = \theta_r - \theta_{ref}$, 风轮转子角速度跟踪误差 $x_2 = e = \omega_r - \omega_{ref}$. 则由式(5)可知系统模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = A(x_2 + \omega_{ref})^2 + Bu - \dot{\omega} + F \end{cases} \quad (10)$$

其中, $A = \frac{1}{2J} \rho \pi R^5 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3}$; $B = -\frac{N_g}{J}$; F 为总的确定性和外界干扰; u 为控制率.

假设参数不确定部分及外加干扰变化缓慢, 取 $\dot{F} = 0$. 为了使风轮角速度实时跟踪参考角速度, 使系统状态中的 x_1 和 x_2 在有限时间内收敛到 0. 所以定义滑模面为

$$s(t) = cx_1 + x_2 \quad (11)$$

其中, c 为滑模面的待设计参数, 满足 $c > 0$.

2.3.2 控制器设计

超扭曲滑模控制策略是高阶滑模控制的一种, 不仅能保证趋近滑模面的可达性, 还考虑了高阶导数的稳定性, 所以能有效地抑制抖动.

滑动面的第 1 阶导数 $\dot{s}(t)$ 为

$$\dot{s}(t) = \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (12)$$

显然, 令 $\dot{s}(t) = 0$ 可求出风机系统的等效控制策略 u_{eq} . 为进一步消除抖振并满足滑模到达滑模面的快速性, 在 u_{eq} 等效控制策略中加入指数趋近律以满足上述要求^[12], 即

$$\dot{s}(t) = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks \quad (13)$$

在设计指数趋近律参数 ε 和 k 时, 收敛速度取决于 k . 指数项 $-ks$ 能保证当 s 较大时, 系统状态能以较大的速度趋近于滑动模态. 增加等速趋近项 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s)$ 的目的是: 当 s 接近于 0 时, 趋近速度是 ε 而不是 0, 可以保证有限时间到达. 因此在指数趋近律中, 为了保证快速趋近的同时削弱抖振, 应在增大 k 的同时减小 ε , 因为较大的 ε 值会导致较大的抖振.

联合式(10)、(12)和(13)可得出风电系统的等效控制 u_{eq} ,

$$u_{eq} = \frac{c}{B} x_2 - \frac{A}{B} (x_2 + \omega_{ref}) + \frac{1}{B} \dot{\omega}_{ref} - \frac{1}{B} \varepsilon \text{sgn}(s) - \frac{1}{B} ks \quad (14)$$

切换控制 u_{sw} 由连续状态函数和带有积分器的不连续输入 $u_1(t)$ 组成,

$$u_{sw} = -L|s|^{\frac{1}{2}}\text{sgn}(s) + u_1(t) \quad (15)$$

$$\dot{u}_1(t) = -W\text{sgn}(s) + \dot{F} \quad (16)$$

其中, L 和 W 是相应的控制增益, 使得系统在有限时间内收敛, 具有良好的鲁棒性. 因为标准的超扭曲滑模的增益很容易受边界干扰的影响, 很难补偿系统的不确定性, 因此, 引入了自适应, 允许自动确定增益.

2.3.3 自适应律设计

针对式(15)和式(16)超扭曲控制中的参数 L 和 W , 设计自适应律为

$$\begin{cases} \dot{L} = \begin{cases} \chi\text{sgn}(|s| - \sigma), & L > L_m \\ L_m, & L \leq L_m \end{cases} \\ W = 2\eta L \end{cases} \quad (17)$$

其中, χ 、 σ 、 η 和 L_m 均为任意的正常数. 参数 χ 设计为自适应的调整速度, 通过引入一个较小的参数 σ 与滑模面 $|s|$ 做差的形式, 设计一个很小的邻域. 其中, 参数 σ 的选择是根据滑模面的绝对值 $|s|$ 的平均值选择的, 保证二者之差在一个较小的邻域内. 当 $|s| \leq \sigma$ 时, 此时系统的滑模面到达该领域内, 即 L 和 W 开始慢慢减少, 使系统最终到达滑模面. 参数 L_m 用来确保增益始终是正值. 但在外界扰动和边界干扰时, 系统状态会离开此邻域 (当 $|s| > \sigma$ 时), 此时的 L 和 W 又会慢慢增大, 从而使超扭曲控制强度变大, 系统的状态会重新返回原邻域进而到达滑模面并最终稳定. 所以本研究设计的自适应超扭曲滑模控制策略对外界扰动和边界干扰具有较强的鲁棒性. 文献[13]证明了该自适应律的有限时间收敛性和稳定性. 保证了加入自适应后的系统将是稳定的, 在有界扰动情况下, 可保证在有限时间内使滑动面 $s = 0$, $\dot{s} = 0$, 且在理想情况下不受不确定性和外部干扰的影响.

3 高阶滑模观测器的设计

在系统控制器的设计中, 不仅用到了状态变量 x_2 , 还涉及到其导数的形式. 从 2.3 节可知, 滑模面的导数以及控制律中都含有 x_2 导数的信息, 对 x_2 导数测量会有高频噪声产生. 直接引入该信号会在系统中产生高频抖动. 为了避免这个问题, 设计 HOSMO 为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + a_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + u + a_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 = a_3 \end{cases} \quad (18)$$

其中, a_1 、 a_2 和 a_3 为修正项; x_1 、 x_2 和 x_3 为高阶滑模观测器的状态变量; $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 和 $\hat{x}_3$ 为高阶滑模观测器的状态变量估计值. 定义误差变量 $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ 、 $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$; 修正项 $a_1 = k_1|e_1|^{\frac{2}{3}}\text{sgn}(e_1)$ 、 $a_2 = k_2|e_1|^{\frac{1}{3}}\text{sgn}(e_1)$ 、 $a_3 = k_3\text{sgn}(e_1)$. 其中, k_1 、 k_2 、 k_3 为正常数. 因此, 动态误差方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1|e_1|^{\frac{2}{3}}\text{sgn}(e_1) + e_2 \\ \dot{e}_2 = -k_2|e_1|^{\frac{1}{3}}\text{sgn}(e_1) - \hat{x}_3 + \rho_1 \\ \dot{\hat{x}}_3 = -k_3\text{sgn}(e_1) \end{cases} \quad (19)$$

然后, 定义新变量 $e_3 = -x_3 + \rho_1$. 假设扰动 ρ_1 满足 Lipschitz 条件且 $|\dot{\rho}_1| < \Delta_1$, Δ_1 为 Lipschitz 常数. 则式(19)可变为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -k_1|e_1|^{\frac{2}{3}}\text{sgn}(e_1) + e_2 \\ \dot{e}_2 = -k_2|e_1|^{\frac{1}{3}}\text{sgn}(e_1) + e_3 \\ \dot{e}_3 = k_3\text{sgn}(e_1) + \dot{\rho}_1 \end{cases} \quad (20)$$

文献[14]中已证明式(20)的方程是稳定的, 可得出结论, 通过选择合适的增益 k_1 、 k_2 、 k_3 、 e_1 、 e_2 和 e_3 , 会在 $t > T$ 内收敛到 0, T 为最长收敛时间. 在融合误差后, 可发现在有限时间 $t > T$ 时, 有 $x_1 = \hat{x}_1$ 、 $x_2 = \hat{x}_2$ 和 $\hat{x}_3 = \rho_1$. 基于式(20)的估计信息设计 HOSMO, 考虑滑动面式(11)并对其进行求导, 可得

$$\begin{cases} \dot{\hat{s}} = c\hat{x}_1 + \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{s}} = c\hat{x}_2 + u + k_2|e_1|^{\frac{1}{3}}\text{sgn}(e_1) + \int_0^t k_3\text{sgn}(e_1)d\tau \end{cases} \quad (21)$$

其中, τ 为 0 ~ t 时间内的取值, 满足 $0 \leq \tau \leq t$.

这样就可以用 HOSMO 观测的状态变量 $\hat{x}_2$ 取代 x_2 , 从而避免了系统高频噪声的引入.

综上, 具有 HOSMO 的超扭曲滑模控制器可为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{s} - c\hat{x}_1 \\ \dot{\hat{s}} = c\hat{x}_2 + k_2|e_1|^{\frac{1}{3}}\text{sgn}(e_1) + u + \int_0^t k_3\text{sgn}(e_1)d\tau \end{cases} \quad (22)$$

采用基于 HOSMO 的自适应超扭曲滑模控制, 大大提高了滑动面的收敛精度. 使状态变量更接近平衡点. 由式(10)、式(12)、式(14)一式(19)和式(22)可得最大功率跟踪控制系统结构如图 2.

4 仿真及结果分析

为验证所提控制策略对风电机组的最大功率跟踪控制性能, 本研究以美国国家可再生能源实验室

图2 风机控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of wind turbine control system

(National Renewable Energy Laboratory, NREL) 开发的功率为 5 MW 的风电机组为研究对象, 具体参数为: $N_g = 97$; $J_r = 59\,157 \times 10^7 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $J_g = 534.116 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 风轮直径 $D = 129 \text{ m}$; 空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$; 发电机转矩系数 $\tau_g = 0.1$.

自适应超扭曲滑模控制器参数 $c = 0.2$ 、 $\chi = 200$ 、 $\sigma = 0.02$ 、 $\eta = 1$ 、 $L_m = 0.01$. 比例积分控制器的参数 $K_p = 80\,000$ 、 $K_i = 700$. 一阶滑模控制器参

数 $\alpha = 0.1$. 设计的指数趋近律参数为: $k = 0.6$ 、 $\varepsilon = 0.1$. HOSMO 的参数 $k_1 = 12\,000$ 、 $k_2 = -20\,460$ 、 $k_3 = 13\,000$.

为证明所提控制策略的合理性和可行性, 采取阶跃突变风速仿真和模拟自然随机风速仿真 2 种方案, 验证 PI、一阶滑模和自适应超扭曲滑模 3 种控制策略的控制性能.

4.1 阶跃突变风速仿真

阶跃突变风速为 $v = 4\delta(t) + 4\delta(t - 200)$. 图 3 为阶跃突变风速下, C_p 、 λ 和 ω_r 的响应曲线.

从图 3 (a) 和 (b) 中可见, 3 种控制策略都能得到较好的 C_p 和 λ , 满足系统基本要求. 从图 3 (c) 可见, 3 种方法均能使风轮转子转速快速地跟踪风力机的最优转速, 但在 $t = 200 \text{ s}$ 风速突变到 8 m/s 时, PI 控制以及一阶滑模控制有较大的超调, 而自适应超扭曲滑模控制没有超调, 只是上升时间相对较长, 对于风电机组转速的改变就有相对多的时间, 所以减少了所受机械应力, 使风电机组运行更加安全.

图3 阶跃突变风速下的响应曲线

Fig. 3 (Color online) Response curve of step mutation wind speed

4.2 连续渐变风速仿真

为使仿真更接近实际, 选择如图 4 的自然随机风速进行仿真, 时间设定为 400 s , 风速设定为 $3.58 \sim 11.12 \text{ m/s}$. 图 5 为随机风速下, C_p 、 λ 和 ω_r .

图4 连续风速曲线

Fig. 4 (Color online) Continuous wind speed curve

的仿真实验图.

由图 5 可知, 当风速为 $3.58 \sim 11.12 \text{ m/s}$ 时, 3 种方法均能得到较好的 C_p 和 λ . 其中, 从图 5 (b) 可计算出超扭曲滑模、比例积分和一阶滑模的平均 λ 分别为 8.325 、 8.789 和 8.452 , 所以在风速随机变换时, 超扭曲滑模控制能使系统很好地维持在最佳 λ 值 (8.13 左右). 为更好地对比 3 种控制策略的性能, 分别计算其跟踪误差绝对值的平均值 $\text{AVG}(|e|)$ 、基功率利用系数平均值 $\text{AVG}(C_p)$ 以及转矩的标准差 $\text{STD}(T_g)$. 如表 1.

从表 1 可见, 无论是 $\text{AVG}(|e|)$ 还是 $\text{AVG}(C_p)$ 都比其他两种控制策略好. 从表 1 可知, 3 种控制策略的 $\text{AVG}(|e|)$ 分别为 $0.068\,49$ 、 $0.097\,85$ 和 $0.079\,64$ (由图 5 (d) 计算可得), 因此, 所提控制

图 5 连续风速下风机仿真曲线

Fig. 5 (Color online) Simulation curve under continuous wind speed

策略能实现很好误差跟踪效果. 3 种控制策略的功率系数如图 5 (a), 超扭曲滑模、比例积分、一阶滑模的 $\text{AVG}(C_p)$ 分别为 5.535 9、0.518 4 和 0.533 8, 可知, 超扭曲滑模控制策略平均功率系数比使用积分时提高了 3.38%, 比使用一阶滑模时提高了 2.31%. 图 5 (c) 为发电机转矩曲线, 由表 1

可知, 超扭曲滑模控制相对于一阶滑模控制使得发电机的 $\text{STD}(T_g)$ 减小了 15.21%, 说明了所提方法能很好地消除常规滑模控制方法的抖振.

表 1 三种方法的控制性能对比

Table 1 Comparison of control performance of the three methods

控制策略	$\text{AVG}(e)$	$\text{AVG}(C_p)$	$\text{STD}(T_g) \times 10^{-3}$
超扭曲滑模	0.068 49	0.535 9	5.423 5
PI	0.097 52	0.518 4	7.047 2
一阶滑模	0.079 64	0.523 8	6.396 2

HOSMO 估计的状态变量效果如图 6. 由图 6 (a) 可知, 设计的 HOSMO 能实时观测估计出状态变量 x_2 的值, 其误差稳定在 ± 0.1 , 表明了观测器有较高的观测精度. 进而实现自适应超扭曲滑模控制的精确计算. 从图 6 (b) 可见, 具有 HOSMO 的自适应超扭曲滑模面 s 具有很小的抖振性. 能更好的达到控制要求.

图 6 高阶滑模观测器估计效果图

Fig. 6 (Color online) Estimation effect diagram of high order sliding mode observer

结 语

为提高大惯量风力发电机组的能量转换效率,

抑制发电机转矩抖振,同时考虑风电机组不确定性和外界干扰.设计了基于高阶滑模观测器的自适应超扭曲滑模控制策略.从仿真结果可以看出,所提控制策略解决了系统部分状态变量难以获取的问题,且避免了直接测量引入高频噪声的问题,利用自适应超扭曲算法消除了系统的抖振.增强了系统对不确定参数以及外界扰动的鲁棒性.研究发现,在降低驱动链条瞬态负载的情况下,所提方法在适应风速随机变化、最优功率捕获、抑制转矩抖振和减少风力机载荷等方面优于常规的控制方法.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477109, 61703296); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX19_2016)

作者简介: 王 昊(1994—),苏州科技大学硕士研究生.研究方向:智能控制算法,风力发电系统建模与控制,新能源发电. E-mail: 1947636045@qq.com

引 文: 王 昊,郝万君,郝诗源,等.基于 HOSMO 的风电机组自适应超扭曲滑模控制[J].深圳大学学报理工版,2020,37(5):507-513.

参考文献 / References:

- [1] 陈载宇,殷明慧,蔡晨晓,等.一种实现风力机 MPPT 控制的加速最优转矩法[J].自动化学报,2015,41(12):2047-2057.
CHEN Zaiyu, YIN Minghui, CAI Chenxiao, et al. An accelerated optimal torque control of wind turbines for maximum power point tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(12): 2047-2057. (in Chinese)
- [2] 茅靖峰,李孔伟,吴博文,等.基于非线性干扰观测器的风电机组自适应反演滑模控制[J].可再生能源,2018,36(10):1547-1553.
MAO Jingfeng, LI Kongwei, WU Bowen, et al. Wind turbine adaptive inversion sliding mode control based on nonlinear disturbance observer [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1547-1553. (in Chinese)
- [3] SARAVANAKUMAR R, JENA D. Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 421-429.
- [4] 徐 静,杨淑英,郭磊磊,等.基于二阶滑模观测器的感应电机转子磁链观测[J].电工电能新技术,2016,35(12):32-37.
XU Jing, YANG Shuying, GUO Leilei, et al. Second-order sliding mode observer for rotor flux of induction machine [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(12): 32-37. (in Chinese)
- [5] BOUDJEMA Z, TALEB R, YAHDOUN A. A new DTC scheme using second order sliding mode and fuzzy logic of a DFIG for wind turbine system [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2016, 7(8): 49-56.
- [6] ROCHA-OSORIO C M, SOLIS-CHAVES J S, CASELLA I R, et al. GPRS/EGPRS standards applied to DTC of a DFIG using fuzzy: PI controllers [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 93: 365-373.
- [7] MARTINEZ M I, TAPIA G, SUSPERREGUI A, et al. Sliding-mode control for DFIG rotor and grid-side converters under unbalanced and harmonically distorted grid voltage [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 328-339.
- [8] TRIA F Z, SRAIRI K, BENCHOUIA M T, et al. An integral sliding mode controller with super-twisting algorithm for direct power control of wind generator based on a doubly fed induction generator [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2017, 8(4): 762-769.
- [9] KONG Xiaobing, MA Lele, LIU Xiangjie, et al. Wind turbine control using nonlinear economic model predictive control over all operating regions [J]. Energies, 2020, 13(1): 184.
- [10] KIM K H, TAN L V, LEE D C, et al. Maximum output power tracking control in variable-speed wind turbine systems considering rotor inertial power [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3207-3217.
- [11] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
YE Hangye. Control technology of wind turbine [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 刘金琨. 滑模变结构控制 matlab 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
LIU Jinkun. Sliding mode variable structure control matlab simulation: basic theory and design method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [13] SHATESSEL Y, TALEB M, PLESTAN F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: methodology and application [J]. Automatica, 2012, 48(5): 759-769.
- [14] ANGULO M T, MORENO J A, FRIDMAN L. Robust exact uniformly convergent arbitrary order differentiator [J]. Automatica, 2013, 49(8): 2489-2495.

【中文责编:晨 兮;英文责编:新 谷】

<http://journal.szu.edu.cn>