

永磁直驱风力发电机非奇异终端滑模控制

马毓敏, 赵南南, 刘金颂*, 白天羽, 杨旭, 崔小伟

(西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西西安 710055)

Permanent Magnet Direct Drive Wind Generator Control Based on Non-Singular Terminal Sliding Mode

MA Yumin, ZHAO Nannan, LIU Jinsong*, BAI Tianyu, YANG Xu, CUI Xiaowei
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve anti-disturbance and control accuracy of permanent magnet direct drive wind generation system, a maximum power tracking control strategy based on non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer is proposed. The torque of the wind turbine is estimated by the disturbance observer, and the feed-forward compensation of the controller is realized. The non-singular fast terminal sliding mode with improved reaching law is adopted to enhance the dynamic performance of the controller, which ensure the limited time convergence of the system and reduce the chattering influence caused by disturbance. Simulation results show that the torque change can be accurately estimated under variable wind speed by the proposed strategy, and speed tracking accuracy and wind energy utilization can be improved during maximum power tracking.

Key words: permanent magnet direct drive wind generation; maximum power tracking; non-singular fast terminal sliding mode; disturbance observer

摘要: 为提高永磁直驱风力发电系统的抗扰能力和控制精度,提出了一种扰动观测器与非奇异快速终端滑模控制相结合的最大功率跟踪控制策略。利用扰动观测器得到风力发电机的转矩变化,对控制器进行前馈补偿;采用非奇异快速终端滑模面提高控制器的动态性能,实现系统快速收敛,减少因扰动引起的抖振。仿真结果表明,所提策略在随机风速的情况下可以准确估计转矩变化,提高最大功率跟踪过程中的转速跟踪精度和风能利用率。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-443)
Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (2019JM-443)

关键词: 永磁直驱风力发电;最大功率跟踪;非奇异快速终端滑模;扰动观测器

0 引言

随着传统能源的短缺、环境污染问题日益严重^[1],风力发电系统凭借其环保、易于维护及成本较低等优点^[2]吸引了众多学者和投资者的关注,如今风能已经成为全球能源不可缺少的一部分,占据全球能源供应的 20%。

目前市场上的主流风机分为双馈异步风力发电机和直驱式永磁同步风力发电机两种。双馈异步风力发电机通常采用增设齿轮箱的方式实现发电机增速;而直驱式永磁同步发电机则可通过增加永磁体极对数以降低发电机的额定转速,从而实现直接驱动。永磁直驱风力发电机凭借其结构简单、转速调节范围大和维护成本低等特点成为风力发电技术的研究热点。

本文研究的重点是直驱式永磁同步发电机组工作于低风速区域时,通过发电机转速调节来跟踪风速以实现最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[3]。MPPT 主要有叶尖速比法^[4]、功率信号反馈法^[5]和爬山搜索法^[6]等方法。然而风速具有波动快、随机性、非线性和强耦合等问题,因此如何克服上述问题,提高系统鲁棒性成为 MPPT 研究的关键问题。常用的转速调节方法有比例积分(Proportional Integral, PI)控制、自适应控制及滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)等,其中 SMC 具有响应速度快、抗扰性强的优点,但存在无法完全收敛、滑模面抖振等问

题^[7-9]。鉴于此,可通过增加观测器来降低滑模控制的切换幅值达到减小抖振的目的,常用的观测器有滑模观测器^[10]、扩张观测器^[11]和扰动观测器(Disturbance Observer, DOB)^[12]等。由于常规滑模面中的微分计算会引入高频噪声,文献[13-14]将状态量的微分改为积分,避免高频噪声的出现,并消除了稳态误差。文献[15]提出了优化的变指数滑模趋近律,提高了控制量在趋近滑模边界时的系统稳定性。文献[16]提出基于扩张状态观测器的终端滑模控制,可以实时估计由随机风速引起的转矩变化,但滑模面中存在奇异项,会在收敛过程中出现奇异问题。文献[17]在永磁同步电动机上采用了非奇异快速终端滑模控制(Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control, NFTSMC),解决了奇异项的问题,确保系统在有限时间能够收敛。然而上述提到的观测器和非奇异终端滑模控制多用于永磁电动机系统^[18],应用于直驱风力发电系统最大功率跟踪的研究还较少。

因此,本文设计了一种基于非奇异快速终端滑模控制的永磁直驱风力发电系统的控制策略。将变化的风力机的机械转矩视为系统外部扰动,利用扰动观测器进行观测,获得转矩扰动的估计值,并进行前馈补偿,以克服扰动影响。转速控制器采用非奇异快速终端滑模面结构,以减少转速跟踪误差,抑制滑模抖振并加快滑模趋近速度。最终提高转速跟踪性能,实现风力发电最大功率跟踪。

1 直驱式永磁风力发电系统模型

1.1 风力机动力学模型

直驱式风力发电系统由风力机、永磁同步发电机、机侧整流器和网侧整流器构成,如图 1 所示。风能通过风力机转换为机械能,再经永磁同步发电机转换为电能,通过整流器进行交-直-交整流后传输至电网。

根据空气动力学原理,风力机组捕获的风能为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \\ \lambda = \frac{\omega_m R}{v} \end{cases} \quad (1)$$

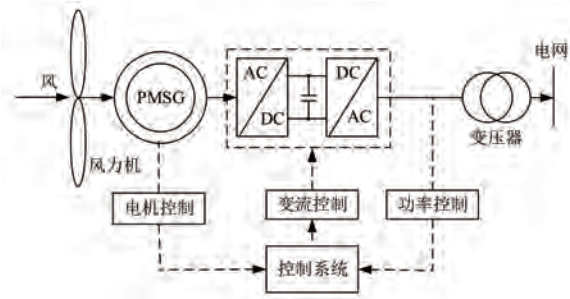


图 1 永磁直驱风力发电系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of permanent magnet direct drive wind generation system

式中: P_m 为风力机组捕获的风能; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; ω_m 为风轮转速。

由式(1)可知,风轮半径 R 为固定值,风速 v 变化时,可通过调整风轮转速 ω_m 以确保叶尖速比 λ 维持在最佳值 λ_{opt} 。

由 Betz 定律可知,风能利用系数可以近似表示为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + \\ 0.0068\lambda \\ \lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

不同的桨距角 β 和叶尖速比 λ 对应不同的 $C_p(\lambda, \beta)$,风能利用系数会随着桨距角 β 的增大而减小,因此在最大功率跟踪过程通常令桨距角 $\beta=0$,通过控制叶尖速比处于 λ_{opt} ,使 $C_p(\lambda, \beta)$ 达到最佳值,实现功率跟踪。

1.2 永磁同步发电机数学模型

d - q 坐标系下永磁同步发电机的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + p_n\omega i_q + \frac{1}{L}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q + p_n\omega i_d + \frac{1}{L}u_q + \frac{1}{L}p_n\omega\psi_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流分量; R_s 为发电机电枢电阻; L 为定子电感; p_n 为转子极对数; u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压分量; ψ_f 为永磁体磁链; ω 为转子转速,由于永磁直驱风力发电系统的风轮与发电机同轴,因此转子转速与风轮转速相同,即 $\omega = \omega_m$ 。

本文采用 $i_d=0$ 的转子磁场定向控制方式,保持 d 轴电流始终为 0, $d-q$ 坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (4)$$

发电机的运动方程为

$$\frac{d\omega_m}{dt} J = T_m - B\omega_m - T_e \quad (5)$$

式中: J 为永磁同步电机的转动惯量; T_m 为负载转矩; B 为摩擦因数; T_e 为电磁转矩。

2 扰动观测器设计

本文采用扰动观测器将外部的转矩变化反馈到系统中,对滑模控制器得到的控制电流进行补偿,可以减少控制器中切换量的幅值^[19-20],从而降低扰动对系统的影响。与其他观测器相比,采用扰动观测器需要确定的参数少,能在降低计算复杂度的同时达到准确观测扰动的目的,设计的扰动观测器为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}}(t) &= M[d(t) - \hat{d}(t)] = \\ M \left[\dot{\omega}_m + Di_q + \frac{B\omega_m}{J} - \hat{d}(t) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: M 为观测器增益; $D = \frac{3p_n\psi_f}{2J}$; $d(t) = T_m/J$; $\hat{d}(t)$ 为 $d(t)$ 的估计值。

为避免直接求微而引起噪声放大,设计中间函数,定义观测器内部状态变量为

$$\zeta = \hat{d}(t) - g(\omega_m) \quad (7)$$

式中: ζ 为观测器内部变量; $g(\omega_m)$ 为待设计的中间函数,扰动观测增益 M 和 $g(\omega_m)$ 的关系为

$$M\dot{\omega}_m = \frac{dg(\omega_m)}{d\omega_m} \quad (8)$$

得到 $g(\omega_m) = M\omega_m$, 由式(6)~式(8)可得:

$$\dot{\zeta} = M \left(Di_q + \frac{B\omega_m}{J} - \zeta - M\omega_m \right) \quad (9)$$

整理得到扰动观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}}(t) = \zeta + M\omega_m \\ \dot{\zeta} = M \left(Di_q + \frac{B\omega_m}{J} - M\omega_m \right) - M\zeta \end{cases} \quad (10)$$

定义扰动观测器的误差为

$$\eta = d(t) - \hat{d}(t) \quad (11)$$

根据式(7)~式(11)得到误差动态方程为

$$\dot{\eta} = \dot{d}(t) - \dot{\hat{d}}(t) = -M\eta \quad (12)$$

由于扰动量的变化通常是缓慢的,认为 $\dot{d}(t) = 0$ 。对式(12)进行变换得到:

$$\dot{\eta} + M\eta = 0 \quad (13)$$

通过调节增益 M 的数值,令观测器误差 η 趋近于 0,使得扰动观测值 $\hat{d}(t)$ 逼近于转矩实际值 $d(t)$,实现对转矩的实时观测。

3 非奇异快速终端滑模控制器设计

3.1 滑模面设计

为减少系统抖振,加快系统收敛速度,本文提出了基于改进趋近律的非奇异快速终端滑模控制。

由式(5)可得:

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J}(T_m - B\omega_m) - Di_q \quad (14)$$

定义电机参考转速为 ω_{ref} ,实际转速为 ω_m ,设系统的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega}_m \end{cases} \quad (15)$$

常规终端滑模控制可以解决系统误差只能渐进收敛的问题,但会出现奇异现象,导致系统状态变量无法收敛至滑模面,为使滑模面在有限时间内快速收敛,设计非奇异快速终端滑模面 s 为

$$s = x_1 + \frac{1}{\alpha_1} |x_1|^r + \frac{1}{\alpha_2} x_2^{p/q} \quad (16)$$

对式(16)求导得:

$$\dot{s} = x_2 + \frac{r}{\alpha_1} |x_1|^{r-1} x_2 + \frac{p}{\alpha_2 q} x_2^{p/q-1} \dot{x}_2 \quad (17)$$

式中: α_1, α_2 为滑模面对状态变量的影响强度,且 $\alpha_1, \alpha_2 > 0$; p, q, r 为滑模面中状态变量的指数项, $r > 1$, 为保证对滑模面求导后不会出现负指数幂次项,避免出现奇异项问题, p, q 为正奇数,且 $1 < p/q < 2$ 。

可以通过增大 $1/\alpha_1$ 和 $1/\alpha_2$ 的取值来加快系统的收敛速度,但过大的系数可能导致系统不稳定或系统振荡。 p, q 和 r 数值增大时,系统的非线性项影响会更加明显,可以提高系统的鲁棒性,但同时也会影响系统的稳定性,可能会造成过大的抖振。因此在设计过程中,需要根据仿真结果不断进行调整进而确定系统参数。

令式(16)为零,可得:

$$x + \frac{1}{\alpha_1} |x|^\tau + \frac{1}{\alpha_2} \frac{dx^{p/q}}{dt} = 0 \quad (18)$$

则非奇异终端滑模控制系统的收敛时间 t_{NFTSMC} 为

$$t_{\text{NFTSMC}} = \int_0^{x_0} 1 / \left(\alpha_2 x + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} |x|^\tau \right)^{\frac{q}{p}} dx < t_{\text{SMC}} = \int_0^{x_0} \frac{1}{cx} dx \quad (19)$$

式中: t_{SMC} 为传统滑模控制的收敛时间; c 为传统滑模面的斜率。

由上述分析可以得到, 相比于 SMC, 本文采用的 NFTSMC 的收敛时间更短, 并且可以通过调整参数控制系统的收敛速度。

传统指数趋近律为 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks$, 本文通过增加 $|x_2|^\beta$ 项, 以提高滑模趋近运动期间的速度, 改进的滑模面趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon |x_2|^\beta \text{sgn}(s) - ks \quad (20)$$

式中: $\varepsilon > 0; k > 0; 0 < \beta < 1$ 。

常规等速滑模趋近律为 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s)$, 系统从初始点到达滑模面运动时的趋近速度由系数 ε 决定, ε 越大趋近速度越快, 但选取较大的系数会造成到达滑模面后的抖振过大。采用文中提出的改进的滑模面趋近律, 系统从初始点到达滑模面

运动时的趋近速度由 k 和 $-\varepsilon |x_2|^\beta$ 共同决定, 此时 k 可以取较大的数值, 同时状态变量 x_2 很大, 有助于提高系统的趋近速度。随后状态变量从滑模面趋近至平衡点, 趋近项 ks 数值接近 0, 此时由切换项 $-\varepsilon |x_2|^\beta$ 决定系统的运动状态, 滑模面上的切换幅值随 x_2 变化。由于 x_2 会随着滑模运动逐渐接近 0, $-\varepsilon |x_2|^\beta$ 会随之迅速减小, 避免产生较大的滑模面抖振。

结合式(16)、式(17)和式(20), 得到非奇异快速终端滑模控制器表达式为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \left\{ \int \left[\varepsilon |x_2|^\beta \text{sgn}(s) + ks - \frac{\alpha_2 q}{p} x_2^{2-p/q} \left(1 + \frac{r}{\alpha_1} |x_1|^{r-1} \right) \right] dt - \frac{B\omega_m}{J} + \frac{T_m}{J} \right\} \quad (21)$$

基于扰动观测器的非奇异快速终端滑模控制的发电机原理图如图 3 所示。滑模控制器的输入为状态变量 x_1 和 x_2 , 扰动观测器的输入为电机转速和实际 q 轴电流, 通过计算得到扰动值 $\hat{d}(t)$, 反馈至式(21)的滑模控制律中得到 q 轴参考电流, 作为电流环输入, 进行进一步控制。结合扰动观测器的滑模控制器可以精准估计由风速变化引起的转矩变化, 在保证系统稳定性和快速性的同时, 提高转速跟踪的精确性。

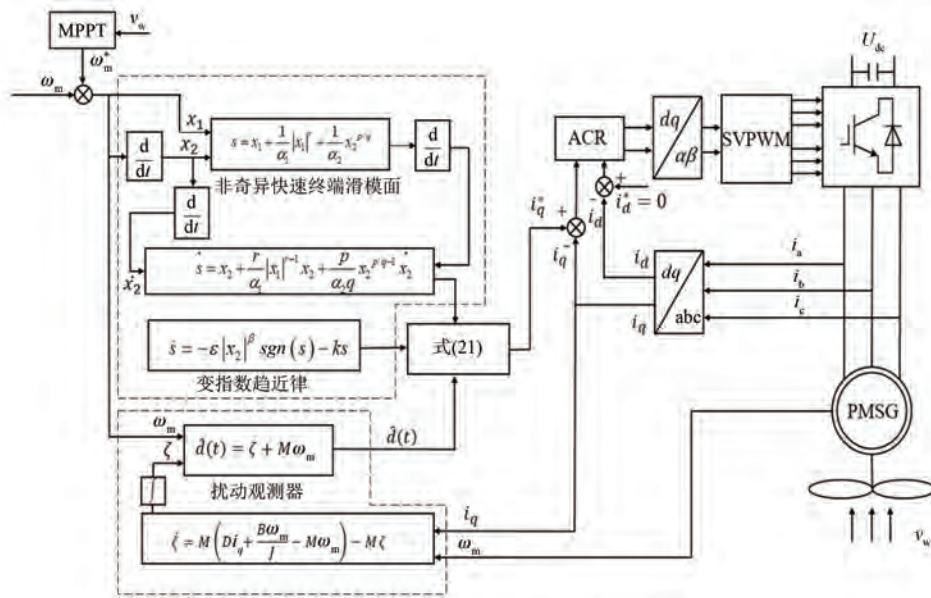


图 2 永磁直驱风力发电机控制原理图

Fig. 2 Control schematic diagram of permanent magnet direct drive wind generator

3.2 滑模控制器稳定性分析

根据李雅普诺夫稳定性理论,构建李雅普诺夫函数为

$$V(t) = \frac{1}{2}s^2 \quad (22)$$

对式(22)求导可得:

$$\dot{V}(t) = ss \quad (23)$$

将式(20)所示的控制律代入到式(17)中,可得:

$$\dot{s} = \frac{P}{\alpha_2 q} x_2^{p/q-1} [-\varepsilon |x_2|^\beta \text{sgn}(s) - ks] \quad (24)$$

因此:

$$s\dot{s} = \frac{P}{\alpha_2 q} x_2^{p/q-1} [-\varepsilon |x_2|^\beta |s| - ks^2] \quad (25)$$

前文已规定 $\varepsilon > 0, k > 0, 0 < \alpha_2 < 1, 1 < p/q < 2$, 则有:

$$\dot{V}(t) = s\dot{s} =$$

$$\frac{P}{\alpha_2 q} x_2^{p/q-1} [-\varepsilon |x_2|^\beta |s| - ks^2] \leq 0 \quad (26)$$

综上所述, $V(t)$ 为正定, $\dot{V}(t)$ 为负定,满足李雅普诺夫稳定性定理,因此该控制器大范围渐近稳定。

4 仿真分析

根据上述的设计在 Matlab/Simulink 中搭建基于扰动观测器的 NFTSMC 风力发电系统模型。在模拟阶跃风和随机风的工况下,通过仿真分析永磁直驱风力发电系统 MPPT 动态跟踪的性能。与传统滑模控制和 PI 控制进行对比,验证所提控制策略的有效性。

仿真参数如下:风力机的最佳叶尖速比 $\lambda_{opt} = 8.1$,风叶半径 $R = 1.5 \text{ m}$ 。为保证公平性,在稳态误差相同的前提下对比三种控制策略下系统的超调量及调节时间。三种控制策略的电流环均采用 PI 控制,并选用相同参数,其参数为:比例系数 $k_p = 150$,积分系数 $k_i = 1500$ 。同时保持系统其余部分的设计以及参数一致,整个控制系统中只改变转速环控制方式。采用“试错”法选择 PI 控制器和 SMC 控制器的转速环参数。PI 控制参数为: $k_p = 2, k_i = 80$;传统 SMC 参数为: $c = 300, \varepsilon = 200$,其中 c 为滑模面中状态变量 x 的系数, ε 为切换函数 $\text{sgn}(s)$ 的系数;NFTSMC+DOB 参数为: $\alpha_1 = 4,$

$\alpha_2 = 1574, p = 7, q = 5, \beta = 0.23, r = 1.13, \varepsilon = 1000000, k = 500, M = 1280$ 。永磁同步风力发电机的参数见表 1。

表 1 永磁同步风力发电机主要参数

Tab.1 Main parameters of permanent magnet synchronous wind generator

参数名称	参数值
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.225
额定功率/kW	5.5
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.00125
极对数 p_n	2
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1500
定子电阻/ Ω	0.14
电感/mH	1
磁链/Wb	0.175

4.1 仿真 1: 阶跃风速

系统在阶跃风作用下的转矩观测曲线如图 3 所示。可见,风速从在 2 s 时从 7 m/s 突增至 9 m/s,在 3.5 s 时从 9 m/s 突降至 8 m/s,扰动观测器均能快速准确跟踪到外界转矩变化。

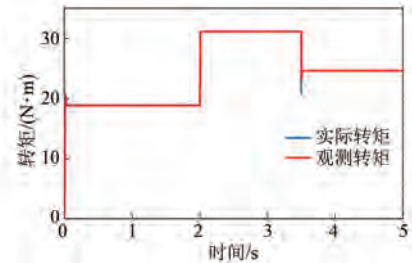


图 3 阶跃风作用下转矩观测曲线

Fig.3 Observation curve of torque under step wind

为验证文中设计的改进趋近律的 NFTSMC 的趋近速度和系统抖振的改进效果,图 4 为未加扰动观测器的 NFTSMC 与未加观测器的 SMC 控制系统中滑模面数值 s 的变化。当系统在阶跃风的作用下,NFTSMC 在 0.01 s 内完成趋近运动到达滑模面,切换幅值保持在 ± 0.6 的范围内,而 SMC 则需要 0.2 s 才能完成趋近运动,并以 ± 10 的幅值在滑模面上来回穿越。由图 4 可知,与常规 SMC 相比,NFTSMC 趋近运动时间较短,其抖振幅值也更小,因此改进的控制策略有效减小了趋近运动的时间和系统抖振。

图 5 和图 6 为阶跃风作用下的响应曲线。可以看出在风速恒定情况状态下,三种控制策略下的风能利用系数基本稳定在 0.48 左右。风速突变时,PI 控制和 SMC 的发电机转速有短暂超调,

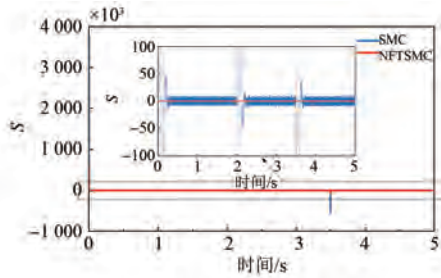


图 4 滑模面变化对比图

Fig. 4 Comparison of sliding mold surface changes

导致风能利用率系数出现波动, 本文采用的 NFTSMC+DOB 控制策略在风速突变时响应快速, 并且超调量很小, 风能利用率很快回升到最大值。

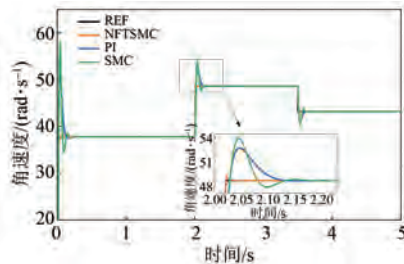


图 5 阶跃风作用下转速跟踪曲线

Fig. 5 Speed tracking curve under step wind

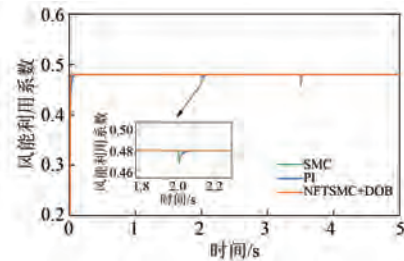


图 6 阶跃风作用下风能利用率曲线

Fig. 6 Wind energy utilization curve under step wind

4.2 仿真 2: 随机风速

图 7 为模拟的随机风速, 最小风速为 6 m/s, 最大风速为 10.6 m/s。图 8 和图 9 为随机风作用下的响应曲线, 可以看出风速变化时 PI 控制和 SMC 的反应较慢, 风能利用系数不断跌落, 而 NFTSMC+DOB 控制可以快速精准地跟踪到最佳转速, 使风能利用系数始终保持在最大值。

不同控制策略下的转速跟踪性能对比如表 2 所示。积分绝对误差 (Integral Absolute Error, IAE)、积分平方误差 (Integrated Square Error, ISE) 和时间加权积分绝对误差 (Integral Time-Weighted Absolute Error, ITAE) 是衡量电机控制系

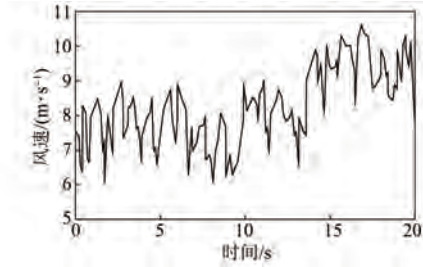


图 7 随机风速

Fig. 7 Random wind speed

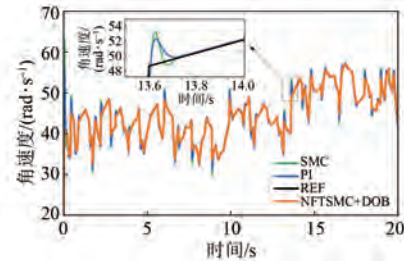


图 8 随机风作用下转速跟踪曲线

Fig. 8 Speed tracking curve under random wind

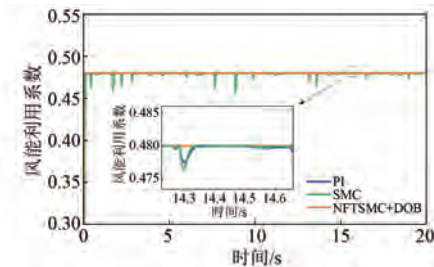


图 9 随机风作用下的风能利用系数曲线

Fig. 9 Wind energy utilization curve under random wind

统的性能指标。ITAE 是 IAE 和 ISE 的综合指标, 将误差绝对值乘以时间作为加权, 反映了系统在整个时间范围内的误差大小和持续时间的综合影响。由表 2 可知 NFTSMC+DOB 控制策略的 ITAE 值最小, 表示该控制系统在误差数值最小的同时误差持续的时间也最少, 因此其动态性能和稳态性能都优于其他两种控制策略。

表 2 随机风速下的转速跟踪性能对比

Tab. 2 Comparison of speed tracking performance at random wind speeds

控制策略	IAE	ISE	ITAE
NFTSMC+DOB	0.503	3.699	0.567
PI	1.976	7.811	3.676
SMC	0.652	5.516	1.033

由表 2 可以看出, PI 控制策略虽然控制简单, 但抗扰性和稳定性较差; SMC 的抗扰性相比

PI 控制较好,但跟踪精度和快速性仍然与 NFTSMC+DOB 控制有差距;NFTSMC+DOB 控制的抖振抑制效果和滑模面收敛速度都要优于 SMC。在阶跃风和随机风的仿真中,本文所提的 NFTSMC+DOB 控制策略需要的调节时间明显短于 PI 控制和 SMC,跟踪超调量较小,且转速跟踪精度最高。因此对于永磁直驱风力发电系统来说,本文所提的 NFTSMC+DOB 控制策略可以使系统的风能利用系数保持最佳,从而提升风力机捕捉的风能,实现最大功率跟踪。

5 结语

本文通过研究风力发电系统最大功率跟踪的原理,在传统滑模控制的基础上进行改进,提出了基于扰动观测器与非奇异快速终端滑模控制相结合的最大功率跟踪控制策略,并通过李雅普诺夫稳定性理论证明了滑模控制器的稳定性。仿真结果表明,所提的改进趋近律的非奇异快速终端滑模控制器可以保证系统快速收敛,并减少因扰动引起的抖振;采用扰动观测器能获得实时的扰动反馈,及时进行电流补偿,降低风速变化带来的影响;与 SMC 和 PI 控制相比,采用 NFTSMC+DOB 控制的风力发电系统具有精度高、抗扰性强及响应速度快的优势,实现了提高风能利用率的目标。

参考文献

- [1] 祝可可,阮琳. 永磁直驱风力发电机自抗扰技术及其无位置传感器控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 266-274.
- ZHU K K, RUAN L. Active disturbance rejection technology for permanent magnet direct drive wind generator and its position sensorless control strategy [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(10): 266-274.
- [2] CHATRI C, OUASSAID M, LABBADI M. Integral-type terminal sliding mode control approach for wind energy conversion system with uncertainties [J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 99: 107775.
- [3] 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 Z H, HAO W J, SHANG Y T, 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.
- [4] 李咸善,徐浩,杜于龙. 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 66-71.
- LI X S, XU H, DU Y L. Maximum power tracking of wind power generation system using the combination of tip speed ratio method and climbing search method [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 66-71.
- [5] 陈家伟,陈杰,龚春英. 变速风力发电机组恒带宽最大功率跟踪控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 32-38.
- CHEN J W, CHEN J, GONG C Y. A constant-bandwidth MPPT strategy for variable-speed WECS [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 32-38.
- [6] 田兵,赵克,孙东阳,等. 改进型变步长最大功率跟踪算法在风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 226-233+250.
- TIAN B, ZHAO K, SUN D Y, et al. Promoted variable step maximum power point tracking algorithm used in the wind energy conversion system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 226-233+250.
- [7] 林立,何洋,周建华,等. 直驱永磁风电机组的新型终端滑模控制设计[J]. 控制工程, 2021, 28(5): 992-998.
- LIN L, HE Y, ZHOU J H, et al. Design of novel terminal sliding mode control for direct-driven permanent magnet synchronous wind generator side [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(5): 992-998.
- [8] MOUSAVI Y, BEVAN G, KUCUKDEMIRAL I B. Sliding mode control of wind energy conversion systems trends and applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 1-28.
- [9] 苏杰,曾喆昭. 基于 ACPI 的风力发电系统 MPPT 控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 119-127.
- SU J, ZENG Z Z. Maximum power point tracking based on auto-coupling PI control for a wind power generation system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 119-127.

- [10] 李迎杰, 刘曙光, 刘旭东. 基于非奇异终端滑模观测器的无刷直流电机无传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 1-7.
LI Y J, LIU S G, LIU X D. Sensorless control of brushless DC motor based on non-singular terminal sliding mode observer [J] Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 1-7.
- [11] 张海洋, 李继方, 熊军华, 等. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机二自由度 PI 控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 40-45.
ZHANG H Y, LI J F, XIONG J H, et al. Control strategy for permanent magnet synchronous motor with 2-DOF PI control based on ESO [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(5): 40-45.
- [12] 杨博, 束洪春, 朱德娜, 等. 基于扰动观测器的永磁同步发电机最大功率跟踪滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 207-219.
YANG B, SHU H C, ZHU D N, et al. Maximum power point tracking of permanent magnetic synchronous generator using per-turbation observer based sliding-mode control [J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(2): 207-219.
- [13] 方云熠, 曾喆昭, 王可煜, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪改进型积分滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 77-83.
FANG Y Y, ZENG Z Z, WANG K Y, et al. MPPT control with improved integral SMC for D-PMSG wind power generation system [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 77-83.
- [14] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431-437.
LI Z, HU G D, CUI J R, et al. Sliding-mode variable structure control with integral action for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 431-437.
- [15] 毛亮亮, 周凯, 王旭东. 永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 106-111.
MAO L L, ZHOU K, WANG X D. Variable exponent reaching law sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(4): 106-111.
- [16] 吴影, 高林. 基于高阶 ESO 的永磁直驱风电系统快速终端滑模控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 35(1): 129-135.
WU Y, GAO L. Fast terminal sliding mode control of permanent magnet direct-drive wind power system based on high-order ESO [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 35(1): 129-135.
- [17] 康尔良, 贺建智, 王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 58-64.
KANG E L, HE J Z, WANG Y C. Design of non-singular fast terminal sliding mode controller for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 58-64.
- [18] 王辉航, 赵朝会, 万东灵, 等. 基于非奇异快速终端滑模的永磁同步电机转速和电流控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 28-33+65.
WANG H H, ZHAO C H, WAN D L, et al. Speed and current control of permanent magnet synchronous motor based on non-singular fast terminal sliding mode [J] Electric Machines & Control Application, 2018, 45(11): 28-33+65.
- [19] 贺建智. 具有扰动补偿的永磁同步电机非奇异终端滑模控制器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
HE J Z. Design of non-singular terminal sliding mode controller for permanent magnet synchronous motor with disturbance compensation [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [20] 刘兴邦, 付朝阳, 刘铮, 等. 基于扰动补偿和非奇异终端滑模器的永磁同步电机矢量控制[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 316-322.
LIU X B, FU Z Y, LIU Z, et al. Vector control of PMSM based on disturbance compensation and nonsingular terminal sliding mode [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 316-322.

收稿日期:2023-09-27

收到修改稿日期:2023-12-21

作者简介:

马毓敏(1999-),女,硕士研究生,研究方向为永磁直驱风力发电机控制,mayumin@xauat.edu.cn;

* 通信作者:刘金颂(1981-),博士,副教授,研究方向为风力发电系统设计、机器人智能化技术与应用,xjdljs@xauat.edu.cn。

Permanent Magnet Direct Drive Wind Generator Control Based on Non-Singular Terminal Sliding Mode

MA Yumin, ZHAO Nannan, LIU Jinsong^{*}, YANG Xu, BAI Tianyu, CUI Xiaowei
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology,
Xi'an 710055, China)

Key words: permanent magnet direct drive wind generation; maximum power tracking; non-singular fast terminal sliding mode; disturbance observer

With the shortage of traditional energy sources and the increasingly serious problem of environmental pollution, the wind power system has attracted the attention of many scholars and investors because of its environmental protection, easy maintenance and low cost.

The mainstream wind turbines on the market today are divided into two types: doubly-fed asynchronous wind turbines and direct-drive permanent magnet synchronous wind turbines. Doubly-fed asynchronous wind power generation system usually adopts the way of adding a gear box to realize the generator speed increase, while the direct-drive permanent magnet synchronous power generation system can be increased by increasing the number of pairs of poles of permanent magnets to reduce the rated speed of the generator, so as to realize the direct drive. Permanent magnet direct-drive wind turbine has become a popular area of research in wind power generation technology due to its simple structure, large speed adjustment range and low maintenance costs.

The focus of this paper is the permanent magnet direct-drive synchronous generator set working in low wind speed region to track the wind speed by generator speed regulation to achieve the maximum power point tracking (MPPT). The traditional MPPT mainly includes control strategies such as leaf

tip speed ratio method, power signal feedback method, and hill climbing search method. However, wind speed has the problems of fast fluctuation, randomness, nonlinearity and strong coupling, and it is difficult to quickly and accurately track the rotational speed change using the traditional strategies, so how to overcome the above problems and improve the system robustness becomes a key issue in the research of MPPT.

In order to improve anti-disturbance and control accuracy of permanent magnet direct drive wind power generation system, a maximum power tracking control strategy based on non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer is proposed. The torque of the wind turbine is estimated by the disturbance observer, and the feed-forward compensation of the controller is realized. The non-singular fast terminal sliding mode with improved reaching law is adopted to enhance the dynamic performance of the controller, which ensures the limited time convergence of the system and reduces the influence of chattering caused by disturbance. The simulation results show that the proposed control strategy can accurately estimate the torque change under variable wind speed, and improve speed tracking accuracy and wind energy utilization during maximum power tracking.