

DOI: 10.7667/PSPC180240

永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制

方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 王可煜

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 针对永磁同步发电机的非线性、内部参数不确定以及外部扰动等问题, 提出了一种直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪的非线性抗扰控制方法。该方法使用一种非线性光滑函数来设计非线性扩张状态观测器(NLESO)和非线性抗扰控制律。由 NLESO 来实现系统扰动及不确定性的估计, 前馈到控制输入端对扰动进行补偿, 从而有效提高了系统的抗扰能力。分析了 NLESO 的收敛性。仿真结果表明了该控制方法不仅具有响应速度快、控制精度高的特点, 而且无超调无抖振现象, 因而在风力发电系统最大功率跟踪控制领域具有较大应用价值。

关键词: 风力发电; 永磁同步电机; 最大功率跟踪; 非线性扩张状态观测器; 非线性光滑函数; 非线性抗扰控制

Maximum power point tracking with nonlinear disturbance rejection control for DPMSG wind power generation system

FANG Yunyi, ZENG Zhezhaohao, LIU Qing, WANG Keyu

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China)

Abstract: Considering the permanent magnet synchronous generators with nonlinear, uncertain internal parameters and external disturbances, a nonlinear disturbance rejection control method is proposed to achieve Maximum Power Point Tracking (MPPT) of direct-driven permanent magnet synchronous generators wind power generation system. The Nonlinear Extended State Observer (NLESO) and nonlinear disturbance rejection controller are designed based on a nonlinear smoothing function. NLESO is used to estimate the system disturbance and uncertainty and feed forward to the control input to achieve disturbance compensation, which enhances the disturbance rejection ability of the system. And the astringency of NLESO is analyzed. The simulation results show that the control method not only has the characteristics of fast response and high control accuracy, but also has no overshoot and no chattering phenomenon, so it has great application value in the MPPT control of wind power generation system.

This work is supported by Project of the Key Subject of Hunan Education Department (No. 17A006).

Key words: wind power generation; permanent magnet synchronous generators; maximum power point tracking; nonlinear extended state observer; nonlinear smoothing function; nonlinear disturbance rejection control

0 引言

风能作为一种绿色环保的可再生能源, 不断受到世界各国的重视。而风能信号具有随机性、时变性和突变性等特点, 如何提高对风能的利用效率, 研究风电系统的最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制具有重要现实意义^[1-3]。

目前, 在风力发电系统中, 对于额定风速以下的定桨变速阶段最大功率跟踪的具体实现方法主要有两大类^[4]: 一是寻优法, 如爬山搜索法^[5-6], 此方

法虽然不需要知道风力机的特性曲线, 但是其搜索步长选取困难, 而且当风速快速变化时会出现最大功率跟踪失效的现象; 二是最佳风力机特性曲线法, 如最佳叶尖速比法^[7]、最佳功率曲线法和最佳转矩曲线法^[8-9]。最佳叶尖速比法是根据风速控制风力机的转速使风力机稳定运行在最佳叶尖速比下, 但是在实际中风速检测存在较大误差, 导致此法实用性不强; 最佳功率曲线法和最佳转矩曲线法是控制风力机的机械功率或转矩与转速满足最佳功率曲线或最佳转矩曲线的关系, 但是机械功率难以测量, 而且系统存在损耗, 导致此方法存在缺陷。

风力发电系统中采用直驱式永磁同步发电机

基金项目: 湖南省教育厅重点项目资助(17A006)

(Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Generators, DPMSG), 不需要使用齿轮箱增速, 风力机直接驱动发电机工作, 这不仅节约了成本, 而且一定程度上加强了系统的可靠性。但是风力发电系统存在非线性、内部参数摄动、外部扰动等问题, 导致传统的方法难以实现对最大功率点的快速跟踪。针对此问题, 国内外学者在传统方法的基础上引入了一系列的控制方法, 如: 滑模控制^[10-11]、分数阶控制^[12]、自适应控制^[13-15]等, 这些控制方法虽能实现风电系统的最大功率跟踪控制, 并且可以有效提高系统的稳定性和抗扰能力, 但这些控制方法普遍计算量大, 结构及算法复杂, 控制器参数难以整定。并且在实际情况中, 风力发电系统存在参数摄动, 而且系统内外存在多种不确定的因素。

韩京清教授提出的自抗扰控制技术, 不依赖于系统的数学模型, 算法简单, 对于系统存在的所有不确定因素都归结于未知扰动, 并通过扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)进行估计并给予补偿^[16]。如今, 自抗扰控制技术得到蓬勃发展, 已经广泛地应用于电力系统、机械系统等各个领域^[17-20]。文献[20]提出的基于最佳叶尖速比的最大功率自抗扰跟踪控制方法, ESO 及控制律设计都是采用的最简单的线性函数, 算法简单、参数少, 不仅能够实现最大功率的跟踪, 而且具备抗扰能力。但正是由于在 ESO 中采用的是线性函数, 会不可避免地出现微分峰值现象, 观测性能和响应速度都有待提高。ESO 作为自抗扰控制的核心部分, 其观测性能直接影响控制系统的整体性能, 对此, 国内外学者对 ESO 提出了不少的改进方法^[21-22]。文献[21]提出了一种基于广义 ESO 的复合抗扰控制方法, 可以消除已知模型的等效扰动, 但是, 此方法不能在线辨识扰动参数。文献[22]提出了改进型三阶时变参数扩张状态观测器, 此方法能有效地抑制初始微分峰值现象, 并且具备良好的观测精度和响应速度, 但是由于其引入了双曲正切函数, 较于传统的 ESO, 增加了观测器控制参数, 而且时变参数难以整定, 导致其实用性受到了限制。

由此, 针对直驱式永磁同步风力发电系统存在的参数摄动、内外部扰动不确定等问题, 为提高系统的抗扰能力, 引入 ESO 对风电系统中存在的不确定性因素和内外扰动进行了估计并给予补偿; 基于 ESO 和非线性光滑函数设计了非线性抗扰控制器, 以实现转速跟踪的快速响应和无超调; 并且为了提高 ESO 的观测性能, 利用非线性光滑函数构造了非线性扩张状态观测器(Nonlinear Extended State Observer, NLESO)。

1 DPMSG 系统的数学模型

DPMSG 的基本结构如图 1 所示。

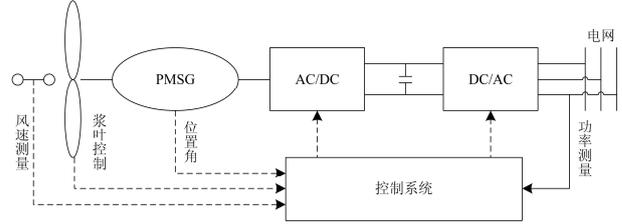


图 1 DPMSG 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of DPMSG

1.1 风力机数学模型

风力机的基本工作原理: 利用风轮捕获风能, 并将其转化为机械能, 且以转矩形式输出到发电机。基于空气动力学原理, 借助风能利用系数 C_p , 风力机的输出功率 P_w 可表示为^[3]

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

式中: ρ 为空气密度(kg/m^3); v 为风速(m/s); R 为叶片的半径(m); λ 为叶尖速比; β 为桨距角(deg)。其中:

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

式中, ω_m 为风机的角速度(rad/s)。

风能利用系数^[5]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{B} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{B}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

式中, $\frac{1}{B} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$ 。

$C_p(\lambda, \beta)$ 曲线如图 2 所示, 当桨距角 β 一定时, $C_p(\lambda, \beta)$ 是关于叶尖速比 λ 的非线性函数, 在不同的风速下, 通过调整转速, 存在一个最优的叶尖速

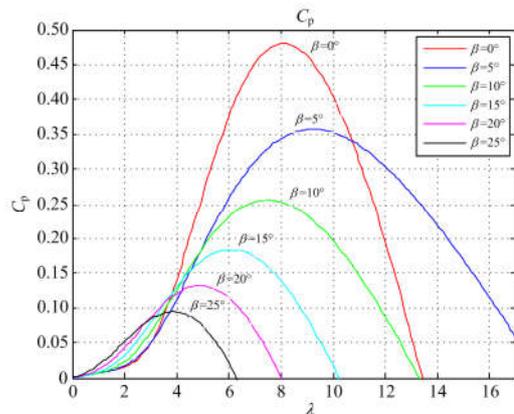


图 2 $C_p(\lambda, \beta)$ 与 λ 的关系曲线图

Fig. 2 Graph of relation between $C_p(\lambda, \beta)$ and λ

比 λ_{opt} , 使得风能利用系数最大, 可获得最大的输出功率, 此过程即为风力发电系统的最大功率跟踪过程, 可见最大功率跟踪的实质是对转速的控制。由图可知, 当 $\beta = 0^\circ$ 时, 风能利用系数最大为 0.48, 此时, 最佳叶尖速比 $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ 。

因为风力机从风中捕获的功率满足:

$$P_w = T_w \omega_m \quad (4)$$

结合式(1)、式(2)、式(4)可知风力机机械输出转矩为

$$T_w = \frac{1}{2\lambda^3} \rho \pi R^5 \omega_m^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

1.2 永磁同步电机数学模型

在 d - q 同步旋转坐标下建立永磁同步发电机数学模型^[4]如式(6)。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + n_p \omega_g i_q + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - n_p \omega_g i_d - \frac{n_p \psi_f}{L} \omega_g + \frac{1}{L} u_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电流分量; L 为发电机的等效电感; u_d 、 u_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电压分量; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁体的磁链; n_p 为发电机转子的极对数; ω_g 为发电机转子的角速度。

对于永磁同步风力发电机, 其永磁体多采用径向表面式分布, 在运行过程中使定子电流的 d 轴分量始终为 0, 则 $L_d = L_q = L$, 永磁同步发电机电磁转矩 T_e 的表达式为

$$T_e = 1.5 n_p \psi_f i_q = K_t i_q \quad (7)$$

直驱式永磁同步风力发电系统中, 发电机转子的角速度与风机角速度一致, 即 $\omega_g = \omega_m$ 。所以风力发电传动系统的动态状态方程为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_w - K_t i_q - B_m \omega_m) \quad (8)$$

式中: J 为传动系统的等效转动惯量; B_m 为转动摩擦系数。

2 非线性光滑函数

由文献[16]可知, 非线性组合幂次函数为

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e / \delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

韩京清教授将其用于非线性 PID 的设计, 更是以此创造性地提出了自抗扰控制技术。但是非线性组合幂次函数是以符号函数为基础, 而且是非光滑

函数, 将其应用于扩张状态观测器和控制器的设计中, 高频抖动现象难以避免^[23]。为此, 本文使用一种非线性光滑函数。

由文献[23]可知, 非线性光滑函数定义为

$$g(x, \delta) = \frac{x}{\delta^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

非线性光滑函数是光滑连续函数, 当 $\delta > 0$ 时该函数具有大误差免疫功能, 不仅具有快速响应特性, 而且突出了“小误差大增益、大误差小增益”的显著工程特性^[24]。

3 基于 NLESO 的非线性抗扰控制器设计

由 1.1 节可知, 最大功率跟踪的实质是对转速的控制, 由式(8)可知, 风力机机械转矩 T_w 实际中在线测量困难, 而且对于摩擦系数存在参数摄动, 将其都看作系统扰动和不确定因素通过 NLESO 进行估计并补偿, 最后基于 NLESO 设计非线性抗扰控制器, 以实现风力机在不同风速情况下的最大功率跟踪。

3.1 非线性扩张状态观测器(NLESO)设计

由式(8)可知

$$\dot{\omega}_m = \frac{T_w}{J} - \frac{K_t}{J} i_q - \frac{B_m}{J} \omega_m \quad (11)$$

$$\text{令 } x_1 = \omega_m, x_2 = \frac{T_w}{J} - \frac{B_m}{J} \omega_m, b = -\frac{K_t}{J}, u = i_q, \quad x_2$$

为扩张状态变量, 并记 $\dot{x}_2 = w$, u 为系统控制输入, y 为控制输出, 则式(11)扩张为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + bu \\ \dot{x}_2 = w \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

以此构造系统式(12)的一个二阶扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}(e_1 + g(e_1, \delta_1)) + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}(e_1 + g(e_1, \delta_2)) \end{cases} \quad (13)$$

式中: β_{01} 、 β_{02} 是观测误差增益参数; δ_1 、 δ_2 是观测误差免疫因子。

3.2 NLESO 收敛性分析

设观测误差为 $e_i = z_i - x_i (i=1,2)$, 由系统(12)和系统(13)可得观测误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01}(e_1 + g(e_1, \delta_1)) \\ \dot{e}_2 = -w - \beta_{02}(e_1 + g(e_1, \delta_2)) \end{cases} \quad (14)$$

当观测误差系统(14)进入稳态时, 方程右端全部收敛于零, 则

$$\begin{cases} e_2 - \beta_{01}(e_1 + g(e_1, \delta_1)) = 0 \\ -w - \beta_{02}(e_1 + g(e_1, \delta_2)) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由误差系统(15)的第2式, $\beta_{02}|e_1 + g(e_1, \delta_2)| = |w|$ 。又因为

$$|e_1 + g(e_1, \delta_2)| = |e_1| \left[1 + \frac{1}{\delta_2^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta_2^2}\right) \right] \geq |e_1|$$

所以误差系统的稳态误差分别为

$$\begin{cases} |e_1| \leq \frac{|w|}{\beta_{02}} \leq \frac{\varepsilon}{\beta_{02}} \\ |e_2| \leq \beta_{01}|e_1| \leq \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

显然, 只要 β_{02} 足够大于 ε , 即 $\beta_{02} \gg \varepsilon$, NLESO 的各个状态观测误差都会足够小, 从而保证 NLESO 是收敛的。其中, $\beta_{01} > 0, \beta_{02} > 0, \delta_1 > 0, \delta_2 > 0$, 只要选择适当的参数 β_{01}, β_{02} , 则系统(13)就能很好地估计原系统(12)状态变量 x_1 的估计 z_1 和被扩张的状态的实时作用量 x_2 的估计 z_2 , 即 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2$ 。

3.3 非线性抗扰控制器设计

跟踪误差为 $e(t) = \omega_{ref} - \omega_m$, ω_{ref} 为期望转速, ω_m 为实际转速, 借鉴传统的 PI 控制思想, 引入非线性光滑函数, 设计非线性抗扰控制律为

$$\begin{cases} e = \omega_{ref} - \omega_m \\ u_0 = k_1(e + g(e, \delta)) \end{cases} \quad (17)$$

基于 NLESO 对于系统扰动和不确定因素进行估计并补偿, 用 z_1 和 z_2 分别近似代替 x_1 和 x_2 , 设计非线性抗扰控制器。非线性抗扰控制结构图如图 3 所示, 非线性抗扰控制器为

$$\begin{cases} e = \omega_{ref} - z_1 \\ u_0 = k_1(e + g(e, \delta)) \\ u = u_0 - z_2/b \end{cases} \quad (18)$$

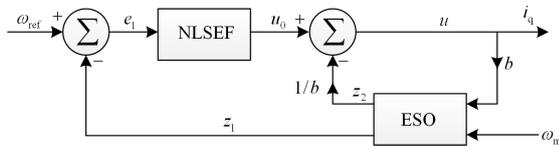


图 3 非线性抗扰控制结构图

Fig. 3 Diagram of nonlinear disturbance rejection control structure

4 仿真分析

为验证本文所提出控制方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 上采用基于 NLESO 的非线性抗扰控制方法, 风力发电系统中的转速跟踪情况。

发电机的主要参数如下: 定子电阻 $R_s = 0.665 \Omega$, 电枢绕组电感 $L = 7.93 \times 10^{-3} \text{ H}$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.783 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $n_p = 2$, 摩擦系数 $B_m = 0.04 \text{ Nm} \cdot \text{s/rad}$ 。

风力机的主要参数如下: 额定功率 $P_N = 5.5 \text{ kW}$, 基本风速: $v = 6 \text{ m/s}$, 叶片半径 $R = 1.2 \text{ m}$, 空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 最大功率利用系数 $C_{p\max} = 0.48$, 最佳叶尖速比为 $\lambda_{opt} = 8.1$ 。控制器参数: $k_1 = 1, \delta = 0.4$ 。

4.1 阵风仿真分析

阵风对风速的突变特性进行了描述, 其数学表达式为^[20]

$$v_g = \begin{cases} 0, & t < t_{g1} \\ \frac{G_{\max}}{2} (1 - \cos(2\pi \cdot \frac{t - t_{g1}}{T_g})), & t_{g1} \leq t \leq t_{g1} + T_g \\ 0, & t > t_{g1} + T_g \end{cases} \quad (19)$$

式中: v_g 为不同时刻的阵风风速; t 为时间; T_g 为阵风周期; t_{g1} 为阵风开始时间; G_{\max} 为阵风最大值。

在基本风和阵风突然作用情况下, 风力发电系统中采用基于 NLESO 的非线性抗扰控制方法转速跟踪曲线和风能利用系数曲线如图 4、图 5 所示。本文中取 $t_{g1} = 2 \text{ s}, T_g = 6 \text{ s}, G_{\max} = 7 \text{ m/s}$ 。

4.2 渐变风仿真分析

渐变风对风速的缓慢变化特性进行了描述, 其数学表达式为^[20]

$$v_r = \begin{cases} 0, & t < t_{r1}, t > t_{r2} + T_r \\ R_{\max} \cdot \frac{t - t_{r1}}{t_{r2} - t_{r1}}, & t_{r1} \leq t \leq t_{r2} \\ R_{\max}, & t_{r2} < t \leq t_{r2} + T_r \end{cases} \quad (20)$$

式中: v_r 为不同时刻渐变风风速; t 为时间; T_r 为渐变风的保持时间; t_{r1} 为渐变风开始时间; t_{r2} 为渐变风终止时间; R_{\max} 为渐变风最大值。

在渐变风作用下, 转速跟踪对比曲线和风能利用系数曲线如图 6、图 7 所示。本文中取 $t_{r1} = 2 \text{ s}, t_{r2} = 5 \text{ s}, T_r = 3 \text{ s}, R_{\max} = 7 \text{ m/s}$ 。

4.3 自然风仿真分析

自然风模型为基本风、阵风、渐变风和随机风四种风速模型的叠加, 由模型可知, 自然风具有很强的突变性和随机性。在自然风作用下, 转速跟踪对比曲线和风能利用系数曲线如图 8、图 9 所示。

转速跟踪仿真结果表明: 与文献[20]中采用的传统 PI 控制方法相比, 不仅实现完全无超调, 而且在风速发生突变时, 调节时间明显更短, 转速跟踪

性能更好。对比文献[20]中采用的自抗扰控制, 在基本风和阵风作用下, 文献[20]的仿真结果的转速跟踪响应时间在 0.2 s 左右, 由图 4 可知, 本文的转速跟踪响应时间低于 0.08 s, 当风速发生突变时, 如在渐变风作用下, 文献[20]中的调节时间在 0.1 s

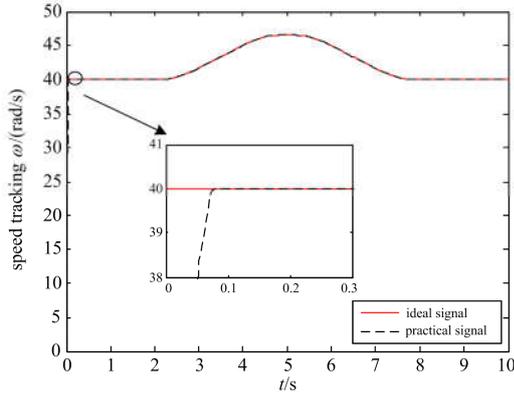


图 4 阵风作用下转速跟踪曲线

Fig. 4 Speed tracking curve under gust wind

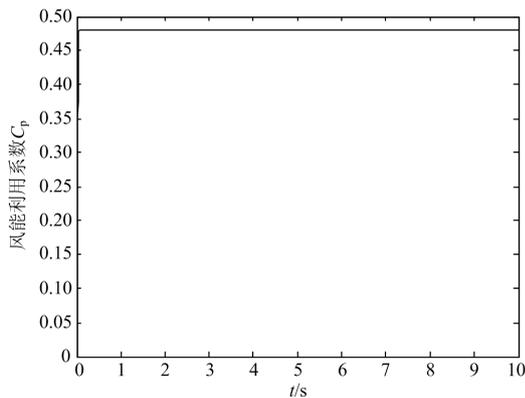


图 5 阵风作用下风能利用系数

Fig. 5 Power coefficient curve under gust wind

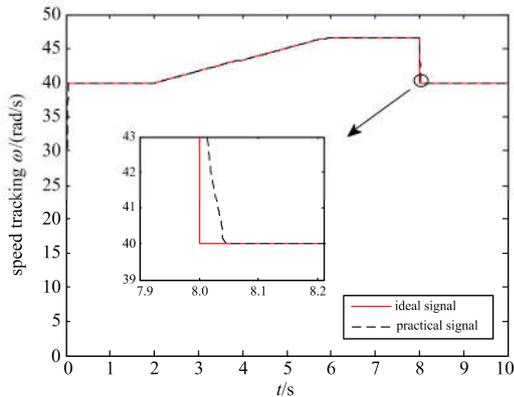


图 6 渐变风作用下转速跟踪曲线

Fig. 6 Speed tracking curve under gradient wind

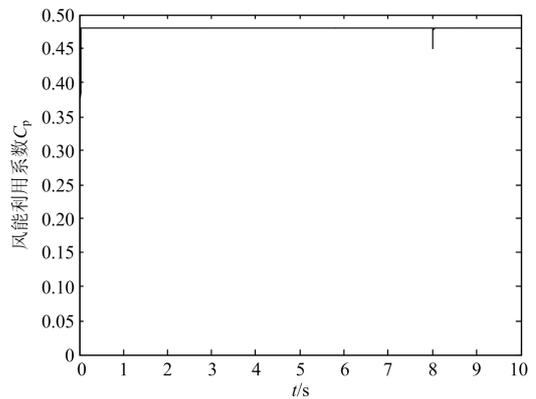


图 7 渐变风作用下风能利用系数

Fig. 7 Power coefficient curve under gradient wind

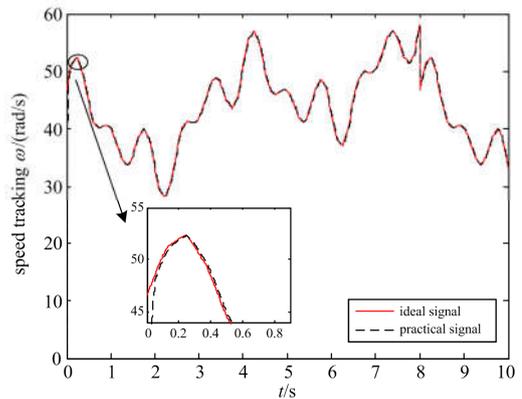


图 8 自然风作用下转速跟踪曲线

Fig. 8 Speed tracking curve under natural wind

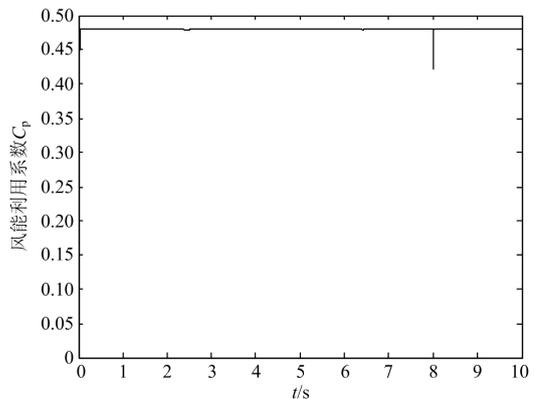


图 9 自然风作用下风能利用系数曲线

Fig. 9 Power coefficient curve under natural wind

左右, 由图 6 可知, 本文的调节时间少于 0.05 s。表明在不同风速作用下, 非线性抗扰控制方法不仅对电机转速跟踪具有更好的效果, 无超调, 响应速度更快, 而且有效提高了系统的抗扰能力。

不同风速作用下风能利用系数仿真结果表明:

由图 5 可知, 在基本风和阵风的作用下, 当风速平稳变化时, 风能利用系数一直保持在最大功率利用系数, 即使风速出现突变, 由图 7、图 9 可知, 在渐变风和自然风的作用下, 控制系统也能使风能利用系数在 0.05 s 内达到最大功率利用系数值。表明非线性抗扰控制方法不但能实现风力发电系统的最大功率跟踪控制, 响应速度快, 而且有效提高了系统的抗扰能力。

5 结论

针对风力发电系统的非线性、内部参数摄动、外部扰动等问题, 以风力发电系统最大功率跟踪为控制目标, 提出了一种基于 NLESO 的非线性抗扰控制方法。使用一种非线性光滑函数设计了 NLESO, 并基于 NLESO 设计了非线性抗扰控制器。仿真结果表明: 将扩张状态观测器应用于风力发电系统的最大功率跟踪控制系统中, 对不确定因素进行估计并主动补偿, 提高了系统的抗扰能力, 特别是在风速突变的情况下, 对比传统的 PI 控制方法, 转速跟踪性能更好, 抗扰能力得到显著提高; 利用非线性光滑函数构造 NLESO, 提高了 NLESO 的观测性能并有效消除了峰值现象; 使用非线性光滑函数并基于 NLESO 设计非线性抗扰控制器, 不仅实现了风力发电系统最大功率跟踪, 使系统具有响应速度快、控制精度高、无超调无抖振的优点, 而且提高了系统的鲁棒性和抗扰能力。

参考文献

- [1] 李培强, 邱时严, 李欣然, 等. 双馈风力发电系统的滑模变结构控制技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 29-35.
LI Peiqiang, QIU Shiyan, LI Xinran, et al. Sliding mode variable structure control technology used in doubly fed induction generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 29-35.
- [2] 邓小文, 潘巧波, 高庆水. 永磁直驱机组叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 35-40.
DENG Xiaowen, PAN Qiaobo, GAO Qingshui. Research on the modeling and simulation of permanent magnet direct-driven wind turbine rotor imbalance fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 35-40.
- [3] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [4] 刘丹, 李强, 冯承超. 小型直驱式永磁同步风力发电机快速最大功率追踪仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 141-145.
LIU Dan, LI Qiang, FENG Chengchao. A simulation study of small direct drive type permanent magnet synchronous generator fast maximum power tracking[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 141-145.
- [5] 刘吉臻, 孟洪民, 胡阳. 采用梯度估计的风力发电系统最优转矩最大功率点追踪效率优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2367-2374.
LIU Jizhen, MENG Hongmin, HU Yang. Efficiency optimization of optimum torque maximum power point tracking based on gradient approximation for wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2367-2374.
- [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.
TIAN Bing, ZHAO Ke, SUN Dongyang, 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.
- [7] 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点跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 66-71.
LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong. 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.
- [8] 朱瑛, 程明, 花为, 等. 考虑损耗转矩的风力发电系统最大风能跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 39-46.
ZHU Ying, CHENG Ming, HUA Wei, et al. Maximum power point tracking control for wind energy conversion systems considering loss torque[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 39-46.
- [9] 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.
- [10] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统 MPPT 自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-65.
MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state

- observer[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(18): 58-65.
- [11] 谭阳, 吴国庆, 茅靖峰, 等. 垂直轴 SRG 风力发电系统 MPPT 动态滑模控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 109-116.
- TAN Yang, WU Guoqing, MAO Jingfeng, et al. Research on dynamic sliding mode control applied in MPPT of SRG for the vertical axis wind power generation system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 109-116.
- [12] 李志民, 孙其振, 孙勇, 等. PMSG 风力发电系统最大风能追踪的分数阶控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(6): 67-72.
- LI Zhimin, SUN Qizhen, SUN Yong, et al. Maximum energy tracking of PMSG wind power generation system by fractional-order control[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(6): 67-72.
- [13] 贺文, 王小立, 王伟, 等. 基于 RTDS 的风力机自适应转速启动控制的仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(22): 152-157.
- HE Wen, WANG Xiaoli, WANG Wei, et al. Simulation research on the adaptive speed start control of the wind turbine based on RTDS[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(22): 152-157.
- [14] KHANNA R, ZHANG Q, STANCHINA W E, et al. Maximum power point tracking using model reference adaptive control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 29(3): 1490-1499.
- [15] JARAMILLO-LOPEZ F, KENNE G, LAMNABHILAGARRIGUE F. A novel online training neural network-based algorithm for wind speed estimation and adaptive control of PMSG wind turbine system for maximum power extraction[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 38-48.
- [16] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23.
- HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.
- [17] 沈鹏, 管霖, 黄振琳, 等. 改善系统暂态稳定性的变速风电机组线性自抗扰控制器[J]. *高电压技术*, 2016, 42(9): 2808-2815.
- SHEN Peng, GUAN Lin, HUANG Zhenlin, et al. Linear active disturbance rejection controller for variable-speed wind turbine to improve system transient stability[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2808-2815.
- [18] BALAJIWALE S, ARYA H, JOSHI A. Study of performance of adrc for longitudinal control of MAV[J]. *IFAC Papers Online*, 2016, 49(1): 585-590.
- [19] 王圣翔, 任超, 马书根. 含有摩擦补偿的全方位移动机器人自抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(10): 1285-1292.
- WANG Shengxiang, REN Chao, MA Shugen. Active disturbance rejection control with friction compensation for an omnidirectional mobile robot[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(10): 1285-1292.
- [20] 李娟, 张克兆, 李生权, 等. 最佳叶尖速比的最大功率自抗扰跟踪控制[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(12): 94-100.
- LI Juan, ZHANG Kezhao, LI Shengquan, et al. Maximum power point tracking control with active disturbance rejection controller based on the best tip speed ratio[J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(12): 94-100.
- [21] ZHANG Yanjun, ZHANG Jun, WANG Lu, et al. Composite disturbance rejection control based on generalized extended state observer[J]. *Isa Transactions*, 2016, 63: 377-386.
- [22] 孙佃升, 章跃进. 一种抑制初始微分峰值现象的改进型三阶时变参数扩张状态观测器[J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(9): 55-62.
- SUN Diansheng, ZHANG Yuejin. Improved third-order time-varying parameters nonlinear ESO restraining the derivative peaking phenomenon[J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(9): 55-62.
- [23] 曾喆昭, 吴亮东, 陈韦名. 基于 ESO 的一类线性时变系统自学习滑模控制方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2101-2105.
- ZENG Zhezhaohao, WU Liangdong, CHEN Weiming. Self-learning sliding mode control method of a class of linear time-varying systems based on ESO[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(11): 2101-2105.
- [24] 曾喆昭, 吴亮东, 杨振源, 等. 非仿射系统的自学习滑模抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(7): 980-987.
- ZENG Zhezhaohao, WU Liangdong, YANG Zhenyuan, et al. Self-learning sliding-mode disturbance rejection control for non-affine systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(7): 980-987.

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-05-01

作者简介:

方云熠(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能控制; E-mail: 746148258@qq.com

曾喆昭(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能计算与智能控制; E-mail: 508984293@qq.com

刘晴(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能控制。E-mail: 410414482@qq.com

(编辑 葛艳娜)