

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180878

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

方云熠, 曾喆昭, 王可煜, 刘 晴

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 针对永磁直驱风力发电系统的内部参数摄动和外部扰动等问题, 基于非线性扩张状态观测器(NLESO)提出了一种实现最大功率跟踪的改进型积分滑模控制方法。该方法使用非线性光滑函数设计了NLESO, 对系统的内外扰动等不确定因素进行估计和主动补偿, 提高了转速的跟踪能力。引入非线性光滑函数设计了滑模趋近律, 消除了传统滑模控制中的高频抖振现象, 并基于Lyapunov原理对滑模控制器进行了稳定性分析。仿真结果表明, 与传统PI控制相比, 该方法不仅响应速度快, 无超调无抖振, 而且具备良好的抗扰能力, 风速突变情况下仍能快速实现最大功率跟踪, 在风力发电系统最大功率跟踪控制领域具有较大的应用前景。

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

MPPT control with improved integral SMC for D-PMSG wind power generation system

FANG Yunyi, ZENG Zhezha, WANG Keyu, LIU Qing

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

Abstract: Considering the internal parameter perturbation and external disturbances of Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Generator (D-PMSG) wind power system, an improved integral Sliding Mode Control (SMC) method based on the Nonlinear Extended State Observer (NLESO) is proposed to achieve Maximum Power Point Tracking (MPPT). NLESO is designed by nonlinear smoothing function, and the disturbances and uncertainty are estimated and compensated by NLESO, which improves the tracking ability of the speed. The sliding mode approach rate is designed by nonlinear smooth function which eliminates the high frequency buffeting phenomenon in the traditional SMC, and the stability of the SMC is analyzed based on the Lyapunov principle. The simulation results show that compared with the traditional PI control, the proposed method not only has fast response speed, no overshoot and no chattering, but also has good disturbance rejection ability and can achieve MPPT rapidly in the case of wind speed mutation, so it has great application prospects in the field of MPPT control of wind power system.

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

Key words: wind power generation; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; nonlinear extended state observer; nonlinear smoothing function; sliding mode control

0 引言

风力发电作为近年来发展最迅速的新能源发电形式, 受到世界各国越来越广泛的重视。而风力发电系统存在内部参数摄动, 外部扰动等问题, 并且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, 研究风力发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^[1-2]。

目前风力发电系统的主流是具备变速变桨技术的双馈感应风力系统和永磁同步风力发电系统。其中, 永磁同步风力发电系统采用直驱式永磁同步发电机, 无需使用齿轮箱, 风力机直接驱动发电机工作, 这不仅可以节约维护成本, 而且有效加强系统的运行可靠性^[3]。但是无论是双馈感应风力发电系统, 还是永磁同步风力发电系统都存在内部参数摄动、外部干扰不确定等问题, 而对于额定风速以下为实现最大功率跟踪采用的传统策略, 如爬山

基金项目: 湖南省教育厅重点项目资助(17A006)

法^[4-5]、叶尖速比法^[6]和最优转矩控制法^[7-8]，都难以实现对最大功率点的快速跟踪和高精度控制。针对此问题，国内外学者在原有的传统策略基础上引入了一系列的控制方法，如：PI 控制^[9]、自抗扰控制^[10-11]、滑模控制^[12-13]等，其中传统的 PI 控制实际上是忽略了系统内部参数变化和外部随机干扰的情况，且响应速度慢，难以避免超调的情况。

自抗扰控制技术，不依赖于系统的数学模型，把系统存在的所有不确定因素都归结于系统的总扰动，并通过扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)给予估计和补偿^[14]，被广泛应用于电力系统、机械系统等各种领域^[15-17]。文献[10]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，算法简单，能实现最大功率跟踪，而且具备一定的抗扰能力。但是由于采用的是线性 ESO，峰值现象不可避免，降低观测品质，从而影响整个系统的控制性能。滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)因其具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏等优点，被广泛应用于电机控制、机器人控制、伺服系统等领域^[18-19]。然而该方法最大的缺点是控制过程中会出现高频抖振现象。文献[12]滑模控制器中的趋近律采用幂指数设计，在滑模函数中引入控制输入量的一阶积分项，能够实现全风况的功率控制，较之传统的 PID 控制，控制精度和鲁棒性都得到了提高。然而对于抑制抖振，文献中采用的是对控制律中的符号函数进行平滑处理，虽能有效抑制抖振，但不可避免地影响控制精度。

鉴于此，针对直驱式永磁同步风力发电系统存在的电机参数摄动、内外部扰动等问题，引入 ESO 对风电系统存在的不确定性因素和内外部扰动给予估计并进行主动补偿，提高了系统的转速跟踪能力；为了提高 ESO 的观测品质和避免峰值现象，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)；针对滑模控制中普遍存在的高频抖振现象，引入非线性光滑函数设计了趋近律，从根本上消除了抖振现象；滑模函数采用积分型滑模面结构，以减少系统在转速跟踪过程中的稳态误差；仿真结果表明基于 NLESO 和非线性光滑函数设计的积分滑模控制方法，不仅实现了转速跟踪的快速响应，而且无超调无抖振。

1 永磁同步风力发电系统数学模型

1.1 风力机数学模型

基于空气动力学原理，根据贝兹理论，风力机的机械功率 P_w 和机械转矩 T_w 可表示为^[20]

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \\ T_w = P_w / \omega_r = \frac{1}{2 \lambda^3} \rho \pi R^5 C_p(\lambda, \beta) \omega_r^2 \\ \lambda = R \omega_r / v \\ C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_1}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

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)； ω_r 为风轮的转速(rad/s)； $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数。

$C_p(\lambda, \beta)$ 曲线如图 1 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，当风力机处于最佳叶尖速比 λ_{opt} 上运行时，风能利用系数达到最大值，此时获得最大输出功率，此过程即为风力发电系统的最大功率跟踪过程。由图 1 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 $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ 。

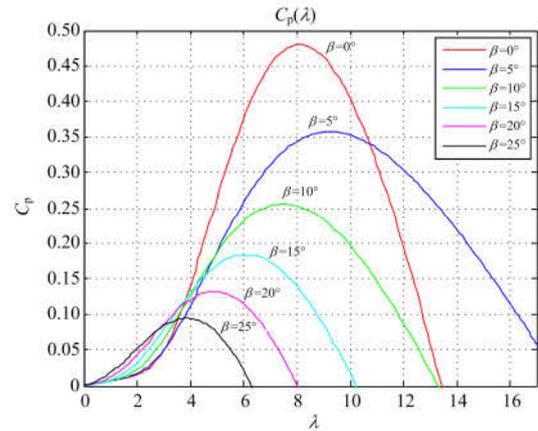


图 1 $C_p(\lambda, \beta)$ 与 λ 的关系曲线图

Fig. 1 Graph of relation between $C_p(\lambda, \beta)$ and λ

1.2 永磁同步电机数学模型

在 $d-q$ 同步旋转坐标下，永磁同步电机数学模型为^[3]

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + n_p \omega_g i_q + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - n_p \omega_g i_d - \frac{n_p \psi_f}{L} \omega_g + \frac{1}{L} u_q \end{cases} \quad (2)$$

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 为发电机转子的转速。

对于永磁同步电机, 在运行过程中使定子电流的 d 轴分量始终为 0, 并采用表贴式永磁同步电机, 则 $L_d = L_q = L$, 所以其电磁转矩 T_g 的表达式为

$$T_g = 1.5n_p\psi_f i_q \quad (3)$$

1.3 传动轴数学模型

直驱式永磁同步风力发电系统中, 发电机转子转速与风轮转速一致, 即 $\omega_g = \omega_r$ 。所以风力发电系统传动轴系统的动态状态方程为

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{J}(T_w - 1.5n_p\psi_f i_q - B_m \omega_g) \quad (4)$$

式中: J 为发电机组的等效转动惯量; B_m 为传动摩擦系数。

2 非线性光滑函数

由文献[14]可知, 非线性组合幂次函数为

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$$

由文献[22]可知, 一种非线性光滑函数为

$$g(x, \delta) = \frac{x}{\delta^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta^2}\right) \quad (6)$$

由式(5)可知 fal 函数是以符号函数为基础, 是非光滑函数, 将其应用于 ESO 和滑模控制器的设计中, 高频抖振现象难以避免^[21]。由式(6)可知 g 函数是光滑连续函数, 而且突出了“小误差大增益、大误差小增益”的显著工程特性^[22]。所以, 本文使用非线性光滑函数, 两种函数曲线图如图 2 所示。

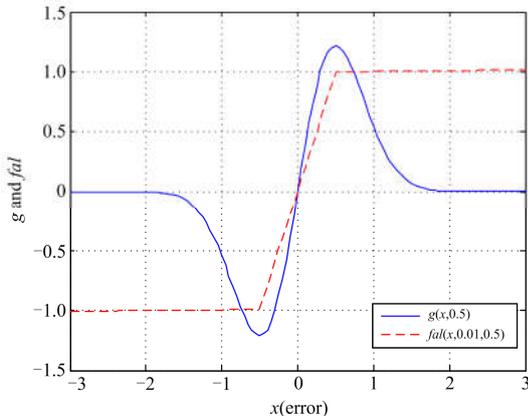


图 2 $fal(x, \alpha, \delta)$ 和 $g(x, \delta)$ 曲线图

Fig. 2 Graph of $fal(x, \alpha, \delta)$ and $g(x, \delta)$

3 基于 NLESO 的积分滑模控制器设计

由 1.1 节可知, 最大功率跟踪的实质是对转速的控制, 基于 NLESO, 对于不确定因素进行估计及

主动补偿, 结合滑模控制, 设计改进型积分滑模控制器, 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(4)可知

$$\dot{\omega}_g = \frac{T_w}{J} - \frac{1.5n_p\psi_f}{J} i_q - \frac{B_m}{J} \omega_g \quad (7)$$

$$\text{令 } x_1 = \omega_g, x_2 = \frac{T_w}{J} - \frac{B_m}{J} \omega_g, b = -\frac{1.5n_p\psi_f}{J}, u = i_q,$$

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(7)扩张为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + bu \\ \dot{x}_2 = w \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

以此构造系统式(8)的一个二阶扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}(e_1 + g(e_1, \delta_1)) + bu \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02}(e_1 + g(e_1, \delta_2)) \end{cases} \quad (9)$$

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。只要选择适当的参数 β_{01}, β_{02} , 则系统(9)就能很好地估计原系统(8)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 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2$ 。

3.2 改进型积分滑模控制器设计

改进型积分滑模控制器结构图如图 3 所示, 跟踪误差为 $e(t) = \omega_{\text{ref}} - \omega_g$, ω_{ref} 为发电机转子期望转速, ω_g 为发电机转子实际转速, 由式(8)可知

$$\dot{e}(t) = -\dot{\omega}_g = -\dot{x}_1 = -x_2 - bu \quad (10)$$

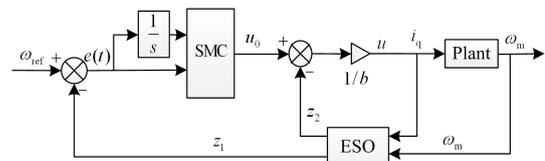


图 3 积分滑模控制器结构图

Fig. 3 Integral SMC structure diagram

引入积分滑模, 设计滑模函数为

$$s = c_0 \int_{-\infty}^t e(t) dt + e(t) \quad (11)$$

则

$$\dot{s} = c_0 e(t) + \dot{e}(t) = c_0(\omega_{\text{ref}} - x_1) - x_2 - bu \quad (12)$$

设滑模趋近律为

$$\dot{s} = -c_1 s - c_2 g(s, \delta_3) \quad (13)$$

由式(12)和式(13), 可得滑模控制律为

$$u = \frac{c_0(\omega_{\text{ref}} - x_1) - x_2 + c_1 s + c_2 g(s, \delta_3)}{b} \quad (14)$$

式中: $c_0 > 0; c_1 > 0; c_2 > 0; \delta_3 > 0$ 。

结合扩张状态观测器, 用 z_1 和 z_2 分别近似代替 x_1 和 x_2 , 则式(14)所示的滑模控制律可改写为

$$u = \frac{c_0(\omega_{\text{ref}} - z_1) - z_2 + c_1 s + c_2 g(s, \delta_3)}{b} \quad (15)$$

3.3 滑模控制器稳定性分析

设 Lyapunov 函数为

$$V(s) = 0.5s^2 \quad (16)$$

则有

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (17)$$

将式(15)代入式(12), 得

$$\dot{s} = c_0(z_1 - x_1) + z_2 - x_2 - c_1 s - c_2 g(s, \delta_3) \quad (18)$$

因此有

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} = & \\ & c_0 s(z_1 - x_1) + s(z_2 - x_2) - \\ & c_1 s^2 - c_2 s g(s, \delta_3) \end{aligned} \quad (19)$$

设 $|z_1 - x_1| \leq d_1$, $|z_2 - x_2| \leq d_2$, 而且由式(6)可知

$$s g(s, \delta_3) = \frac{s^2}{\delta_3^2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\delta_3^2}\right) = |s| |g(s, \delta_3)|。$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} \leq & \\ & s [c_0 d_1 + d_2 - c_1 s - c_2 g(s, \delta_3)] \leq \\ & [c_0 d_1 + d_2 - c_1 |s| - c_2 |g(s, \delta_3)|] |s| \end{aligned} \quad (20)$$

由式(23)可知, 当 $s \neq 0$ 时, 只要满足不等式:

$$c_1 |s| + c_2 |g(s, \delta_3)| \geq c_0 d_1 + d_2 \quad (21)$$

则 $\dot{V} = s\dot{s} \leq 0$, 当 $s = 0$ 时, 显然 $\dot{V} = s\dot{s} = 0$, 综上所述有 $\dot{V} = s\dot{s} \leq 0$, 所以 Lyapunov 函数 $V(s)$ 为正定, $\dot{V}(s)$ 为负定, 满足 Lyapunov 函数稳定性定理, 所以此滑模控制系统大范围渐进稳定。

4 仿真分析

为验证本文所提出控制方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 上分别采用基于 NLESO 的 PI 控制和 SMC 控制方法, 针对渐变风和电网电压跌落情况下, 风力发电系统中发电机转子的转速跟踪情况。永磁同步风力发电系统控制结构示意图如图 4 所示。

发电机的主要参数如下: 定子电阻 $R_s = 2.875 \Omega$, 电枢绕组电感 $L = 8.5 \times 10^{-3} \text{ H}$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 3 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $n_p = 4$, 传动摩擦系数 $B_m = 8 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。

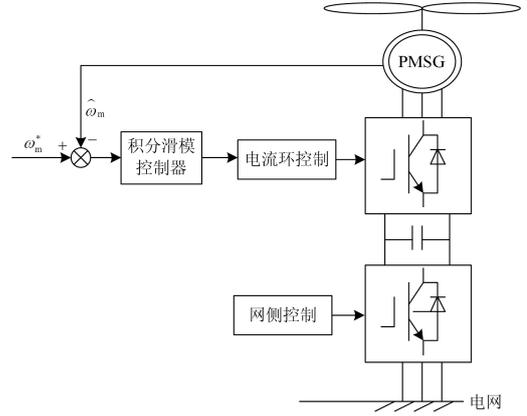


图 4 风力发电系统控制结构示意图

Fig. 4 Wind power control system structure diagram

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 $R = 1.5 \text{ m}$, 空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$, 最大功率利用系数 $C_{p\text{max}} = 0.48$, 最佳叶尖速比为 $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ 。控制器参数: $c_0 = 0.01$, $c_1 = 380$, $c_2 = 30$, $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 0.3$, $\delta_3 = 0.08$ 。

4.1 渐变风仿真分析

渐变风对风速的渐变特性以及阶跃特性进行了描述, 其数学表达式为^[11]

$$v_r = \begin{cases} 0, & t < t_{r1}, t > t_{r2} + T_r \\ R_{\text{max}} \cdot \frac{t - t_{r1}}{t_{r2} - t_{r1}}, & t_{r1} \leq t \leq t_{r2} \\ R_{\text{max}}, & t_{r2} < t \leq t_{r2} + T_r \end{cases} \quad (22)$$

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, 采用基于 NLESO 的 PI 控制和 SMC 控制的发电机转速跟踪对比曲线和风能利用系数曲线如图 5 和图 6 所示。本文中取 $t_{r1} = 0.1 \text{ s}$, $t_{r2} = 0.2 \text{ s}$, $T_r = 0.1 \text{ s}$, $R_{\text{max}} = 8 \text{ m/s}$ 。

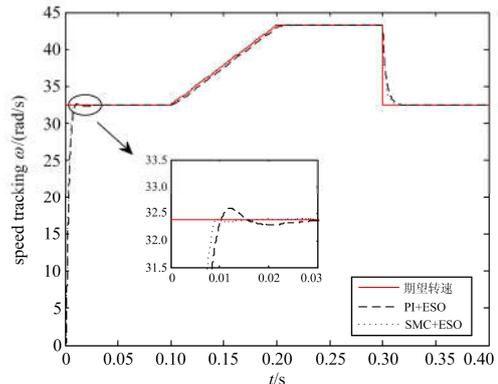


图 5 渐变风作用下发电机转速跟踪曲线

Fig. 5 Generator speed tracking curve under gradient wind

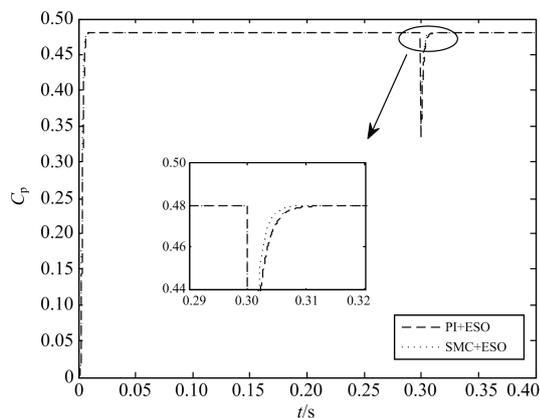


图 6 渐变风作用下风能利用系数

Fig. 6 Wind utilization coefficient curve under gradient wind

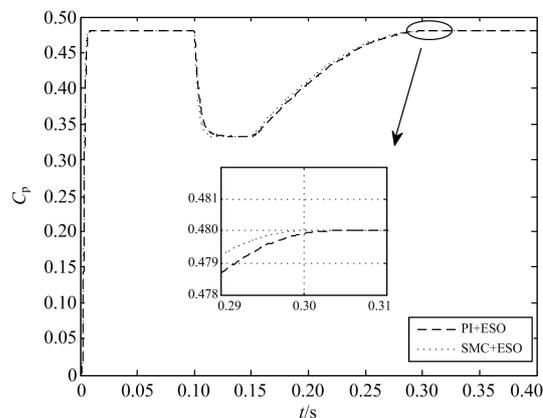


图 8 电压跌落故障下风能利用系数曲线

Fig. 8 Wind utilization coefficient curve under voltage sag

4.2 电压跌落故障仿真分析

当电网电压跌落时, 为保持机侧和网侧的能量平衡, 在不考虑增加硬件方法只针对控制策略进行研究情况下, 发电机转矩指令减小使发电机加速, 将不平衡能量作为动能储存在发电机中, 故障发生过程中, 不考虑最大功率点跟踪。本文对故障恢复后, 为实现最大功率点的快速跟踪控制, 进行仿真验证分析。假定风速保持在基本风速 6 m/s, 电网电压在 0.1 s 时刻发生跌落故障, 0.3 s 时刻电网恢复正常。在电网电压跌落工况下, 采用基于 NLESO 的 PI 控制和 SMC 控制的发电机转速跟踪对比曲线和风能利用系数曲线如图 7 和图 8 所示。

发电机转速跟踪仿真结果表明: 与传统 PI 控制方法相比, 不仅实现完全无超调, 而且响应速度更快, 由图 5 可知, 采用基于 NLESO 的 PI 控制转速跟踪响应时间在 0.02 s 左右, 而采用基于 NLESO 的 SMC 控制响应时间在 0.01 s 左右, 并且在风速发生突变时, 如图 5 所示, 电网故障恢复后, 如图 7 所示, 可以看出调节时间明显更短, 转速跟踪性能

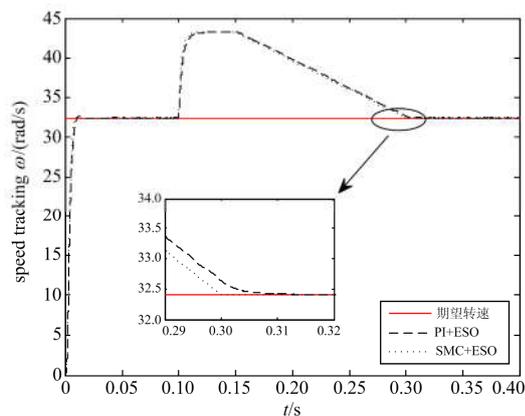


图 7 电压跌落故障下发电机转速跟踪曲线

Fig. 7 Generator speed tracking curve under power grid fault

更好。表明在不同风速作用下和电网电压跌落故障恢复后, 基于 NLESO 的 SMC 控制方法不仅对电机转速跟踪具有更好的效果, 无超调, 无抖振, 而且响应速度更快, 抗扰能力更强。

风能利用系数仿真结果表明: 由图 6 可知, 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, 如图 6 所示, 电网故障恢复后, 如图 8 所示, 采用基于 NLESO 的 PI 控制和 SMC 控制都能使风能利用系数尽快达到最大功率利用系数值, 但是明显采用基于 NLESO 的 SMC 控制所需的调节时间更短。表明采用基于 NLESO 的 SMC 控制方法不但能实现风力发电系统的最大功率跟踪控制, 响应速度更快, 而且具有良好的抗扰能力。

5 结论

针对直驱式永磁同步风力发电系统的内部参数摄动、外部扰动等问题, 提出了一种基于 NLESO 和非线性光滑函数的最大功率跟踪积分滑模控制方法。仿真结果表明: 将 NLESO 应用于风力发电系统的最大功率跟踪控制系统中, 对系统的内外扰动及所有不确定因素进行估计并给予主动补偿, 提高了系统的转速跟踪能力和抗扰能力, 特别是在风速突变以及电网故障恢复的情况下, 对比采用基于 NLESO 的 PI 控制方法, 响应速度更快, 抗扰效果显著; 引入非线性光滑函数并基于 NLESO 设计的积分滑模控制器, 不仅实现了风力发电系统额定风速以下最大功率跟踪, 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] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(29): 54-60.
GUAN Weiya, WU Feng, JU Ping. Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 54-60.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 黄翌, 程江洲, 万钧力. SRG 风力发电系统最大功率跟踪控制研究[J]. 电源技术, 2016, 40(1): 162-165.
HUANG Zhao, CHENG Jiangzhou, WAN Junli. Research on MPPT control for SRG wind power generation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(1): 162-165.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 刘春强, 骆光照, 涂文聪, 等. 基于自抗扰控制的双环伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7032-7039.
- LIU Chunqiang, LUO Guangzhao, TU Wencong, et al. Servo systems with double closed-loops based on active disturbance rejection controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 7032-7039.
- [16] 魏永清, 许江宁, 马恒. 自抗扰控制器在陀螺稳定平台控制系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1): 39-44.
- WEI Yongqing, XU Jiangning, MA Heng. Application of active disturbance rejection controller in gyro-stabilized platform control system[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(1): 39-44.
- [17] 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.
- [18] 王宝华, 蒋力. 基于精确反馈线性化的直流微电网双向直流变换器反步滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 43-49.
- WANG Baohua, JIANG Li. Backstepping sliding mode control based on exact feedback linearization for bi-directional DC converter in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 43-49.
- [19] EVANGELISTA C A, PISANO A, PULESTON P, et al. Receding horizon adaptive second-order sliding mode control for doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(1): 73-84.
- [20] LIU Jizhen, MENG Hongmin, HU Yang, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 101: 738-748.
- [21] 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.
- [22] 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 nonaffine systems[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(7): 980-987.

收稿日期: 2018-07-15; 修回日期: 2018-09-11

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

王可煜(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制。E-mail: 274100667@qq.com

(编辑 周金梅)