

面向最大风能捕获的双馈电机 新型非线性积分滑模控制

刘凌^{1,2}, 马一山^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为解决风力双馈电机在低风速及风速波动较大情况下转速暂态性能差、风能捕获效率低等问题,提出了一种面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模(NNISM)控制策略。设计了一种具有自饱和特性的新型非线性积分滑模控制器,其控制方法具有参数可调节、利用非线性势能函数规避积分超饱和效应等特点,以使整体系统具有更小的抖振;结合风力机风能利用系数和最大叶尖速比运算出风力双馈电机处于最佳叶尖速比下的最佳转速并输入至系统中,以使系统达到最大风能利用状态;构建了一套面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模控制系统,在组合风速变动情况下对 NNISM 控制器进行参数设定,以使系统于低速状态或风速波动较大情况下具有较好的动态性能。仿真结果表明,该新型非线性积分滑模最大风能捕获控制策略的控制性能不会在低速状态或风速波动较大情况时下降,具有转速超调量小、跟随速度快、鲁棒性能强等优点,可以完成最大风能捕获的控制目标,具有广泛的应用前景。

关键词: 双馈电机;滑模控制;叶尖速比;最大风能捕获

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202005013 **文章编号:** 0253-987X(2020)05-0095-07



OSID 码

A Novel Nonlinear Integral Sliding Mode Control for Maximum Wind Energy Capture of Doubly Fed Induction Generators

LIU Ling^{1,2}, MA Yishan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel nonlinear integral sliding mode (NNISM) control strategy for maximum wind energy capture of doubly fed induction generator (DFIG) control is proposed. Some elements such as poor wind speed transient performance or low wind energy capture efficiency under the condition of low wind speed fluctuation can be improved by using the new type of maximum power point tracking method. With self-saturation characteristics, the parameters of nonlinear integral sliding mode controller can be adjustable and the chattering can be avoided with the nonlinear potential energy function that can avoid the effect of integral supersaturating. Considering the wind energy utilization coefficient and the maximum tip speed ratio of the wind turbine, the optimal speed setting value of the DFIG under the optimal tip speed ratio is calculated in order to maintain the maximum wind energy utilization of the system. Simulation

收稿日期: 2019-12-05。 作者简介: 刘凌(1980—),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977173)。

网络出版时间: 2020-02-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200210.1858.004.html>

results show that the control performance of the NNISM control strategy will not degrade in the condition of low wind speed or fluctuated wind speed, and the speed overshoot is small. With fast following speed and strong robust performance, it can achieve the control target of maximum wind energy capture and has broad application prospects.

Keywords: doubly fed induction generator; sliding mode control; tip speed ratio; maximum wind energy capture

双馈风力变速恒频发电系统能够大范围调节转速、最大限度地利用风能,对阵风冲击具有较好的防御能力,能通过控制有功、无功功率改善电能质量,是目前风力发电系统的主流形式^[1-3]。但由于双馈风力发电系统作为空气动力及机电融合的多变量、非线性、强耦合的高阶系统,风速极低或风速强变化的情况下,传统线性算法的瞬态性能不够理想,会产生高频转矩脉动损坏传动机构等问题^[3-6]。因此有很多非线性控制算法运用在双馈风力发电领域,主要有自适应控制、预测控制、遗传算法控制、神经网络控制和滑模控制等算法。近年来,由于响应速度快和对外界干扰及参数摄动具有鲁棒性等特性,滑模控制在控制领域的应用愈发广泛^[7-15]。

文献[16]提出了一种基于指数趋近率的积分滑模变结构控制器,使用有功、无功解耦的方式实现双馈电机最大风能捕获控制,但由于此种控制方式在风速波动下转速抖振较大,可能会产生机械损坏。文献[17]针对变速恒频双馈电机提出了一种将滑模控制和PI控制并联起来的复合滑模控制,实现了发电机有功、无功功率的解耦。文献[18]提出了一种双馈电机的二阶滑模直接转矩控制,对于外界干扰具有较强的鲁棒性能。文献[19]采用了一种耦合双馈电机转矩和转速的非线性滑模面,提高了风能利用效率且提升了抗扰动能力,设计了一种饱和装置来消除滑模控制的 Windup 效应,但由于饱和装置采用分段函数的形式给出,在各个函数分段点连续而不可微,饱和装置的动作可能会导致较大的抖振从而引起系统的机械结构受损。文献[20]提出了一种基于超螺旋滑模控制的变速恒频最大风能捕获控制策略,采用该控制策略的双馈电机具有较高的动态性能,而且抖振较小对整体机械结构有利,但由于其基于双馈电机精确模型进行建模,抗参数摄动能力较差,工程实用性不高。

由于变速恒频风力发电系统的风速具有实时随机波动的特性,在达到启动转速 v_{in} 后,由于低风速陡升和风速随机强烈波动,且双馈电机存在机械摩擦等扰动,导致风能捕获控制的难度增大。由于滑

模控制鲁棒性强且具有自适应能力,采用滑模控制的双馈电机对风速等外部条件变化不敏感,在跟踪风速变化的情况下具有很好的转速实时调节性能,从而能够更大程度地捕获风能。本文通过引入非线性函数的积分滑模面,结合最大叶尖速比下最佳给定转速运算方法,提出了一种新型非线性积分滑模(NNISM)的双馈电机最大风能捕获控制策略。设计了最大风能捕获下电机最佳给定转速运算器和基于电机转速及转子电流的 NNISM 速度控制器,并通过李雅普诺夫函数证明了该控制器的稳定性。仿真实验结果表明,采用新型非线性积分滑模速度控制器的双馈电机在低风速和强风速波动情况下,转速跟随精度高、超调量小、响应迅速,满足最大风能捕获发电系统的要求。

1 双馈风力变速恒频发电系统建模

最高限度的利用风能、提高风能转换的效率是风力发电系统整体设计的关键,双馈风力变速恒频发电系统能够最大限度地吸收风能,是目前兆瓦级风机最常用的技术,在不同风速下系统分成4个不同的阶段。如图1所示,阶段I为空载阶段,当风速达到启动转速 v_{cut-in} 后,叶轮转速 n 逐渐增加,系统满足并网条件后空载阶段结束;阶段II为最大风能捕获阶段,并网操作结束后系统在风速变化时通过调节叶轮转速来保证低风速情况下最佳叶尖速比运行;阶段III为恒转速运行阶段,当风速达到额定风速后系统脱离最大风能捕获控制进入恒转速运行;

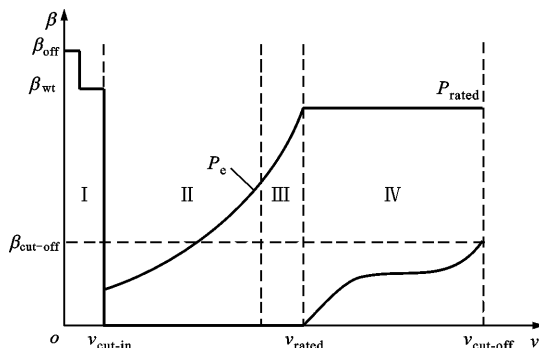


图1 双馈变速恒频发电系统工作阶段

阶段Ⅳ为恒功率运行阶段,受机械强度限制,当风速继续增大,变桨距装置启动,系统对风功率吸收量进行限制,保持恒功率运行。

双馈风力变速恒频发电系统中最核心的控制对象为双馈电机,为简化分析,假设磁路不饱和,三相绕组对称,空间磁场呈正弦分布,不计磁滞损耗和涡流损耗,双馈电机按定子电压定向的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} u_{rd} &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \left(\frac{L_m}{L_s} \frac{U_s}{\omega_1} - \sigma L_r i_{rq} \right) \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{slip} \sigma L_r i_{rd} \\ \dot{\omega}_{rd} &= \frac{T_{windout}}{J} - \frac{T_c}{J} + d_1(t) \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: u_{rd} 、 u_{rq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子 d 轴、转子 q 轴电压、电流; R_r 、 L_r 、 L_m 分别为转子电阻、电感和定转子之间的互感; ω_r 为叶轮角速度; ω_1 为同步旋转角速度; ω_{slip} 为转差角速度; U_s 为定子电压幅值; J 为转动惯量; σ 为双馈电机漏磁系数, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$; $d_1(t)$ 为机电扰动量, $d_1(t) = -B\omega_r/J$, B 为摩擦系数。

2 双馈电机(DFIG)最大风能捕获控制系统设计

2.1 DFIG 最大风能捕获下转速计算

在双馈风力变速恒频发电系统运行的第Ⅱ阶段,桨叶节距角 β 固定取为0,使得变桨距装置不工作,保证最大限度利用风能,双馈电机位于最大风能捕获下的转速可由动力学方程计算

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{\omega_r R}{v} \\ C_p &= 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.5\beta - 5 \right) \exp(-21/h) \\ \frac{1}{h} &= \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ P_{wind} &= 0.5\rho A v^3 C_p \end{aligned} \right\} (2)$$

式中: λ 为叶尖速比; R 为风轮半径; v 为风速; β 为桨叶节距角; P_{wind} 为风力电机输出功率; ρ 为空气密度; A 为风力机叶片扫掠面积; C_p 为风能利用系数,是 ω_r 、 v 、 β 的函数; h 为叶间速比与桨叶节距角的混合参数。在最大风能捕获阶段,对于每个风速 v 存在一个最佳叶尖速比 λ_{opt} 来保证风力电机的风能利用率为最大值,而为保护风力发电系统中齿轮箱等机械结构不受损害,不宜高频切换叶尖速比,对于特定DFIG电机,其最佳叶尖速比为一个固定值。

2.2 基于NNISM的DFIG速度控制器设计

传统积分滑模面(TSMC)由下式表示

$$s = \dot{x} + k_p x + k_i \int x d\tau \quad (3)$$

式中: k_p 、 k_i 为传统积分滑模面参数, $k_p > 0$; $k_i > 0$ 。

传统积分滑模面中积分项 $\int_0^t x d\tau$ 在初始误差较大的情况下,其执行机构超饱和会产生积分Windup效应,造成整体系统产生抖振,出现暂态性能恶化的情况,在系统抖振中产生的转矩脉动情况下,产生传动机构及风力机的损坏风险,为了解决这一问题,本文提出了新型非线性积分滑模面

$$\left. \begin{aligned} s &= \dot{x} + \eta_p x + \eta_i \delta \\ \dot{\delta} &= g(x) \\ g(x) &= \alpha \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \end{aligned} \right\} (4)$$

式中: η_p 、 η_i 、 α 为新型非线性积分滑模面参数, $\eta_p > 0$; $\eta_i > 0$; $\alpha > 0$ 。 $g(x)$ 为一种具有大误差放大、小误差饱和特点的光滑非线性饱和函数。当系统离滑模面收敛点较远时,误差的收敛速度主要由 $g(x)$ 饱和函数的积分 δ 决定,由于非线性势能函数的作用,这种新型非线性积分滑模面很好地消除了积分Windup效应,削弱了抖振,增强了系统的暂态性能。

在拉普拉斯变换的双馈电机机电转换方程为

$$S\omega_r(S) = \frac{T_{windout}}{J} - \frac{n_p L_m U_s}{L_s \omega_1 J} i_{rd}(S) + D_1(S) \quad (5)$$

式中: S 为拉普拉斯算子; $D_1(S) = -\frac{B\omega_r(S)}{J}$ 为机械装置摩擦扰动; n_p 为转子极对数。

双馈电机转子电流PI控制内环特性为

$$u_{rd}(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) (i_{rd}^*(S) - i_{rd}(S)) \quad (6)$$

式中: K_p 、 K_i 为PI控制参数, $K_p > 0$; $K_i > 0$ 。结合式(5)(6)可得

$$S^2 \omega_r(S) = F(S) + U(S) + D(S) \quad (7)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} F(S) &= \left(S + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{T_{windout}}{J} + \frac{n_p L_m U_s}{L_s \omega_1 J} S u_{rd}(S) - \frac{K_i}{K_p} S \omega_r(S) \\ U(S) &= -\frac{n_p L_m U_s}{L_s \omega_1 J} \left(S + \frac{K_i}{K_p} \right) i_{rd}^*(S) \\ D(S) &= -\left(S + \frac{K_i}{K_p} \right) \frac{B\omega_r(S)}{J} \end{aligned} \right\} (8)$$

双馈电机中控制变量为 x_1 、 x_2 ,满足 $x_1 = \omega_r$, $x_2 = \dot{\omega}_r$,结合式(7)(8)和拉普拉斯反变换可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f(x_2, t) + u + d(t) \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $f(x_2, t)$ 为式(7)中 $F(S)$ 的拉普拉斯反变换结果。设 $y=x_1=\omega_r, y^*=\omega_r^*$ ，系统的控制目标为 y 跟随 y^* ，实现转速实时跟随给定值。设 $e=y-y^*=\omega_r-\omega_r^*$ ，为了使系统状态能够快速到达滑模面，按照等速趋近律法设计系统的切换控制 u_{sw} ，即有 $u_{sw}=-\epsilon \operatorname{sgn}(s)$ ，结合滑模面等效控制可得到控制器输出，其表达式为

$$u=-f(x_2, t)-\eta_p \dot{e}-\eta_i g(e)+\dot{y}^*-\epsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (10)$$

为保证系统状态在任意初始条件下都能到达滑模面，定义李雅普诺夫函数为

$$V=\frac{1}{2} s^2 \quad (11)$$

由于 $d(t)$ 为机械装置摩擦扰动，可视为有上界的值，设 $|\epsilon| \geq |d(t)|$ ，对该李雅普诺夫函数求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(\ddot{e}+\eta_p \dot{e}+\eta_i g(e))= \\ & s(f(x_2, t)+u+d(t)-\dot{x}_2^*+\eta_p \dot{e}+\eta_i g(e))= \\ & s(f(x_2, t)+\eta_p \dot{e}+\eta_i g(e)-f(x_2, t)- \\ & \eta_p \dot{e}-\eta_i g(e)+\dot{y}^*+u_{sw}+d(t)-\dot{x}_2^*)= \\ & s(-\epsilon \operatorname{sgn}(s)+d(t)) \end{aligned} \quad (12)$$

当 $s \geq 0$ 时， $\dot{V}=s(-\epsilon+d(t)) \leq 0$ ；当 $s < 0$ 时， $\dot{V}=s(\epsilon+d(t)) < 0$ ，即 $\dot{V} \leq 0$ 在任意初始条件下恒成立。由此稳定性得证，系统将在有限时间内到达滑模面。

3 仿真结果与分析

基于以上理论分析建立 Matlab/Simulink 的双馈电机最大风能捕获控制模型，双馈电机 NNISM 最大风能捕获控制系统拓扑图如图 2 所示。

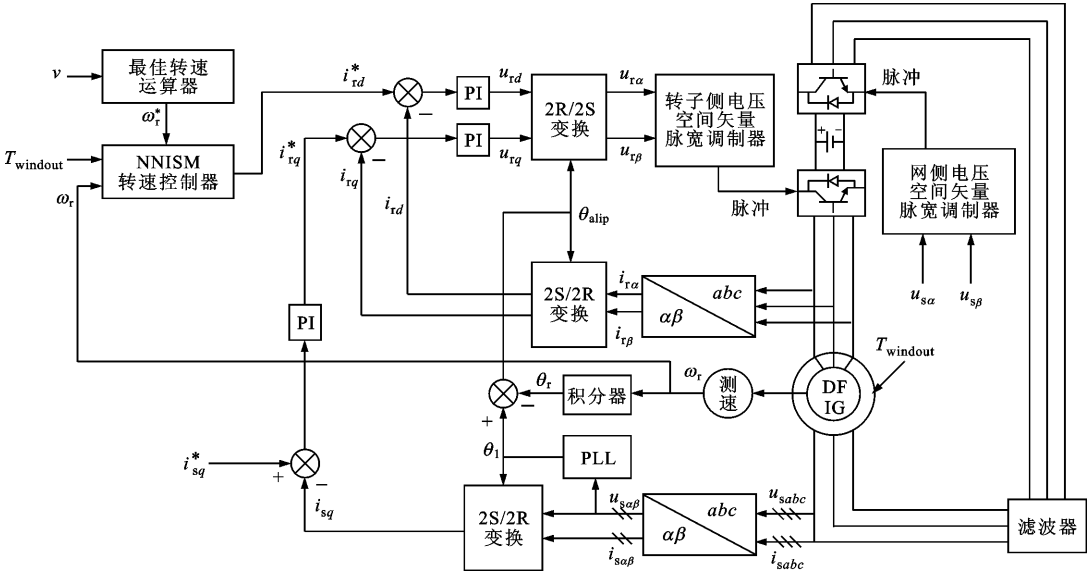


图 2 双馈电机 NNISM 最大风能捕获控制系统拓扑图

双馈电机部分采用按定子电压定向的矢量控制方法，令 $i_{sq}^*=0$ ，通过内、外双环控制器实现对双馈电机电磁转矩的调节，从而实现对双馈电机转速的控制，其中外环控制器为 NNISM 转速控制器，内环控制器为转子 d 轴电流 PI 控制器。表 1 为仿真用风力机额定参数表，表 2 为仿真用双馈电机额定参数表，表 3 为新型非线性积分滑模转速控制器参数表。

仿真验证分为两项。第 1 项为模拟低风速情况下，风速突变仿真结果，如图 3 所示，10 s 时风速从 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 突变到 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，20 s 时风速从 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 突变到 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，对双馈电机 PI 控制和

新型非线性积分滑模控制进行对比仿真。取叶尖速比为 8，低风速下风速突变时运用 PI 控制与 NNISM 控制的双馈电机的控制输出转子 d 轴电流

表 1 仿真用风力机额定参数表

参数	数值
额定输出功率 $P_{\text{wind}}/\text{kW}$	24
风轮半径 R/m	0.8
增速比 N	10
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	1.25
桨叶节距角 β_N	2
额定最佳叶尖速比 λ_{opt}	8

表 2 双馈电机额定参数表

参数	数值
额定功率 P_N/kW	18
额定转子电压 U_r/V	300
额定转子电流 I_r/A	80
额定转速 $\omega_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000
额定磁链 ψ_N/Wb	0.057
转子极对数 η_p	3
转子电阻 R_s/Ω	0.053 2
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	364 600
d 轴电感 L_d/mH	0.216
q 轴电感 L_q/mH	0.299

表 3 新型非线性积分滑模转速控制器参数表

参数	数值
η_p	197
η_i	1.58
α	15
ϵ	7.5×10^2

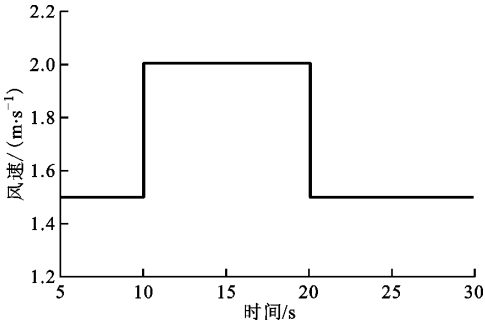


图 3 低风速下风速突变仿真结果

和转速响应对比如图 4、图 5 所示。在低风速、风速产生突变状态下,新型非线性积分滑模控制双馈电机的控制输出量转子 d 轴电流突变量很小,其最大突变电流不超过 41 A;而采用传统 PI 控制双馈电

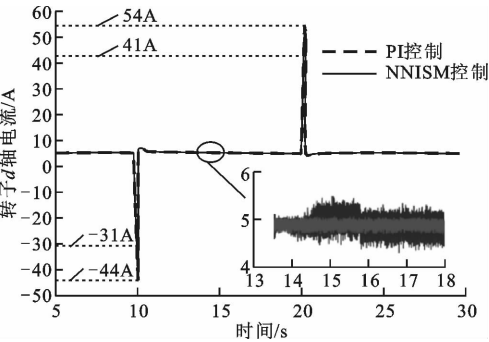


图 4 低风速下风速突变时运用 PI 控制与 NNISM 控制的双馈电机的控制输出转子 d 轴电流对比

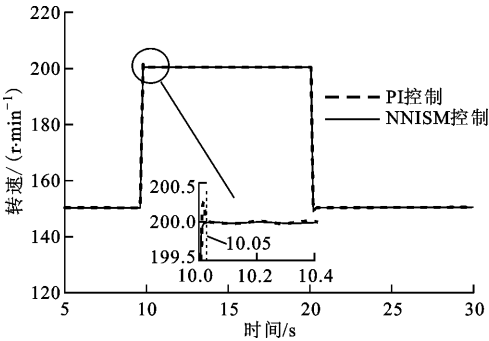


图 5 低风速下风速突变时运用 PI 控制与 NNISM 控制的转速响应对比

机的转子 d 轴最大突变电流达 54 A。新型非线性积分滑模控制双馈电机的转速在 10.05 s 左右达到给定值 150 r/min,且几乎无稳态波形抖振,超调量为 0,稳态误差为 0;而采用传统 PI 控制双馈电机具有 0.15% 的超调量,且具有一定程度的波形抖振,稳态精度不高。仿真结果验证了面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模控制系统具有响应速度快、稳态精度高、超调量小的优点。

第 2 项为模拟风速波动情况下仿真,组合风速产生的波动如图 6 所示,相同条件下风力双馈电机运用 PI 控制和 NNISM 控制的双馈电机的控制输出转子 d 轴电流和转速响应对比如图 7、8 所示。由最大风能捕获转速运算器生成最佳转速给定值输入到双馈电机控制系统,保持风力发电系统处于最大风能捕获状态运行,转速暂态性能的提升增强系统

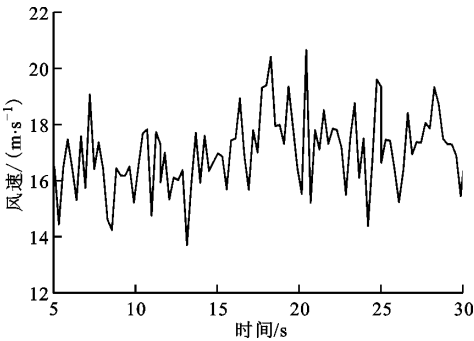


图 6 组合风速波动仿真结果

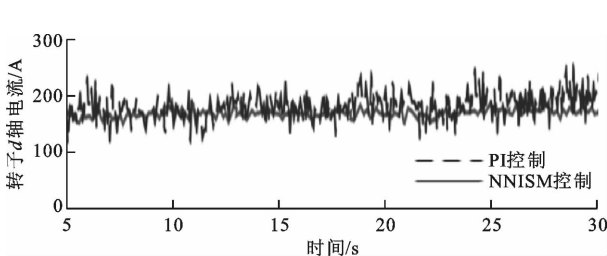


图 7 风速波动时运用 PI 控制与 NNISM 控制的双馈电机的控制输出转子 d 轴电流对比

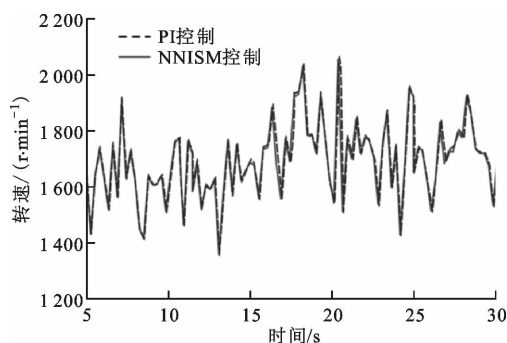


图8 风速波动时运用PI控制与NNISM控制的双馈电机的转速响应对比

对风速变化的适应性,相应地提升系统的风能利用效率。在风速波动情况下,新型非线性积分滑模控制双馈电机的控制输出量转子 d 轴电流只有很小的纹波,电流的最大值和最小值之差不超过10 A,而PI控制双馈电机会产生较大的转子 d 轴电流过冲,电流的最大值和最小值之差达50 A,会对机电结构产生不良影响。与PI控制双馈电机相比,新型非线性积分滑模控制双馈电机能够很好地跟随给定转速,且几乎无超调量,在风速波动情况下具有更强的鲁棒性能和更高的跟随精度,能更好地实现最大风能捕获控制效果。

4 结 论

本文设计了一种面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模控制系统,通过转子 d 轴电流PI控制器和转速NNISM控制器两者的协作实现对双馈电机转速的调节,使转速在风速变化下跟随经计算得出的最佳转速,实现最大风能捕获的控制目标。仿真结果表明,本文提出的面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模控制系统控制具有不会在低速状态或风速波动较大情况时下降、转速超调量小、跟随速度快、鲁棒性能强等优点。综上所述,本文设计的面向双馈电机最大风能捕获的新型非线性积分滑模控制系统性能优良,具有广泛的应用背景。

参考文献:

- [1] TIMBUS A, LISERRE M, TEODORESCU R, et al. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 654-664.
- [2] DIAZ-GONZALEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELL-MUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications [J]. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(7): 2154-2171.

- [3] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势 [J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7-13.
LIU Bo, HE Zhijia, JIN Hao. Wind power status and development trends [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36(2): 7-13.
- [4] CHOWDHURY M A, SHAFIULLAH G M. SSR mitigation of series-compensated DFIG wind farms by a nonlinear damping controller using partial feedback linearization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2528-2538.
- [5] ZHU Donghai, ZOU Xudong, DENG Lu, et al. Inductance-emulating control for DFIG-based wind turbine to ride-through grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(11): 8514-8525.
- [6] ZHU Donghai, ZOU Xudong, ZHOU Shiyang, et al. Feedforward current references control for DFIG-based wind turbine to improve transient control performance during grid faults [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 670-681.
- [7] LI Penghan, XIONG Linyun, WU Fei, et al. Sliding mode controller based on feedback linearization for damping of sub-synchronous control interaction in DFIG-based wind power plants [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 239-250.
- [8] YIN Xiuxing, LIN Yonggang, WU Fei, et al. Fuzzy-logic sliding-mode control strategy for extracting maximum wind power [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1267-1278.
- [9] 郑美茹, 王圣, 王丰, 等. 基于分数阶符号函数的永磁同步电机滑模控制技术 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 56-62.
ZHENG Meiru, WANG Sheng, WANG Feng, et al. The sliding-mode control based on fractional order sign function of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 56-62.
- [10] 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 53-59.
CHANG Xuejian, LIU Ling, CUI Rongxin. A nonsingular fast terminal sliding mode controller with varying boundary layers for permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 53-59.

- [11] 徐凤星, 刘连根, 余岳, 等. 双馈电机无速度传感器控制算法研究 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(8): 95-97.
XU Fengxing, LIU Liangen, SHE Yue, et al. Research on speed sensorless control strategy of doubly fed induction generator under asymmetry grid [J]. Power Electronics, 2017, 51(8): 95-97.
- [12] 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91.
CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91.
- [13] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.
WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.
- [14] LIANG Donglai, LI Jian, QU Ronghai, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(10): 8994-1904
- [15] LEE H, LEE J. Design of iterative sliding mode observer for sensorless PMSM control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1394-1399.
- [16] 秦剑, 王建平, 张崇巍. 变速恒频双馈风力发电系统滑模控制策略研究 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 889-894.
QIN Jian, WANG Jianping, ZHANG Chongwei. Study on sliding mode control of variable speed constant frequency wind-power system with doubly-fed induction generator [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(5): 889-894.
- [17] 杨锡运, 刘英明, 张彬, 等. 变速恒频双馈风力发电机的复合滑模控制 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(11): 1993-1998.
YANG Xiyun, LIU Yingming, ZHANG Bin, et al. Compound sliding model control of variable speed constant frequency doubly-fed wind power generator [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(11): 1993-1998.
- [18] BELTRAN B, BENBOUZID M E, AHMED-ALI T. Second-order sliding mode control of a doubly fed induction generator driven wind turbine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 261-269.
- [19] DE BATTISTA H, PULESTON P F, MANTZ R J, et al. Sliding mode control of wind energy systems with DOIG-power efficiency and torsional dynamics optimization [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 728-734.
- [20] LIU Xiangjie, WANG Chengcheng, HAN Yaozhen. Second-order sliding mode control of DFIG based variable speed wind turbine for maximum power point tracking [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(8): 1434-1442.

[本刊相关文献链接]

- 王江彬, 刘崇新. 4 阶混沌电力系统的协同控制方法. 2020, 54(1): 26-31. [doi:10.7652/xjtuxb2020010044]
- 屠尧, 朱爱斌, 宋纪元, 等. 下肢外骨骼康复机器人人机交互力自适应导纳控制. 2019, 53(6): 9-16. [doi:10.7652/xjtuxb201906002]
- 续丹, 周佳辉, 王斌, 等. 电动汽车混合储能系统的自适应协同控制. 2019, 53(4): 38-43. [doi:10.7652/xjtuxb201904006]
- 姜林, 龙离军, 赵军. 带有时变干扰的变结构近空间飞行器滑模控制. 2019, 53(3): 88-96. [doi:10.7652/xjtuxb201903013]
- 马光亮, 续丹, 王斌, 等. 用于辅助电源 Buck 变换器的切换滑模控制策略. 2018, 52(10): 102-109. [doi:10.7652/xjtuxb201810014]
- 顾万里, 胡云峰, 张森, 等. 有刷直流电机自适应滑模控制器设计与实验. 2017, 51(9): 112-117. [doi:10.7652/xjtuxb201709016]
- 汪建林, 续丹, 周欢, 等. Buck 变换器的自适应终端滑模控制策略. 2017, 51(4): 103-108. [doi:10.7652/xjtuxb201704016]
- 宋金龙, 刘勇智, 周政, 等. 中低速开关磁阻电机转矩优化策略研究. 2016, 50(11): 83-90. [doi:10.7652/xjtuxb201611013]
- 王斌, 徐俊, 曹秉刚, 等. 升压型电池-超级电容复合电源的自适应滑模控制. 2016, 50(10): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb201610006]
- 刘聪, 李颖晖, 刘勇智, 等. 采用高阶终端滑模观测器的执行器未知故障重构. 2015, 49(9): 126-133. [doi:10.7652/xjtuxb201509021]

(编辑 武红江)