

基于滑模变结构的双馈风力发电机矢量控制

朱耀明, 张兰红[✉], 陈露露

(盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: [目的] 电流环是双馈风力发电机并网过程中的重要控制环节。针对传统 PI 控制时双馈风力发电系统在参数摄动时动态性能不佳以及传统趋近律滑模控制存在抖振问题, 对滑模变结构进行了研究和设计。[方法] 基于滑模变结构的双馈风力发电机矢量控制研究方法主要聚焦于利用滑模变结构控制的优点, 如响应速度快、对参数变化和扰动不敏感等, 结合双馈风力发电机的特性, 实现精确的矢量控制。首先设计滑模面, 确保系统状态在滑模面上滑动, 进而设计滑模控制器以稳定系统状态, 并通过反馈调整使系统跟踪期望轨迹, 从而达到对双馈风力发电机的高效、稳定控制, 并将抗抖振因子与幂次函数相结合设计趋近律函数, 提出一种改进型幂次函数来提高控制器的性能, 构建了基于改进幂次函数的滑模控制器。[结果] 仿真表明, 在风速突变的情况下, 基于改进型幂次函数的滑模控制器控制过程几乎无超调。[结论] 与传统 PI 调节器相比, 基于改进型幂次函数的滑模控制器具有优良的动态性能和精度, 能够在双馈风力发电系统中有效地改善控制效果, 提高稳定性和抗干扰能力。

关键词: 双馈电机; 矢量控制; 幂次函数; 滑模控制; 抗干扰

中图分类号: TK89; TK81

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Vector Control of Doubly Fed Wind Turbine Generator Based on Sliding Mode Variable Structure

ZHU Yaoming, ZHANG Lanhong[✉], CHEN Lulu

(School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] Current loop is an important control link in the grid-connection process of doubly-fed wind turbines. Aiming at the poor dynamic performance of doubly-fed wind turbine system during parameter uptake in traditional PI control and the jitter problem in traditional convergence law sliding film control, the sliding mode variable structure is studied and designed. [Method] The research method of vector control of doubly-fed wind turbine based on sliding mode variable structure mainly focuses on utilizing the advantages of sliding mode variable structure control, such as fast response speed, insensitivity to parameter changes and perturbations, etc., and combining with the characteristics of doubly-fed wind turbine to realize accurate vector control. The method firstly designs the sliding mode surface to ensure that the system state slides on the sliding mode surface, and then designs the sliding mode controller to stabilize the system state and adjusts the system to track the desired trajectory through feedback, so as to achieve efficient and stable control of doubly-fed wind turbine, combines the anti-jitter factor with the power function to design the convergence law function, and puts forward a kind of improved type-type power function to improve the performance of the controller, and constructs a sliding mode variable structure control based on the Sliding mode controller with improved power function. [Result] Simulations show that the control process of the sliding film controller based on a modified power function is almost free of overshooting under sudden wind speed changes. [Conclusion] Compared with the traditional PI regulator, the improved power function based sliding mode controller has excellent dynamic performance and control accuracy, which can effectively improve the control effect, stability and anti-interference ability in the doubly-fed wind power generation system.

Key words: doubly fed machine; vector control; power function; sliding mode control; anti-jamming.

0 引言

为迎接能源危机带来的挑战, 风力发电在新能源发电中比例显著提升。因双馈风力发电机 (Doubly

fed Induction Generator, DFIG) 相对于其他类型的发电系统成本较低,能够实现更高的发电效率,提高了能量转换效率^[1],得到了广泛应用。DFIG 可以通过调节转子回路的功率因数来适应不同的运行工况,从而提高系统的灵活性和稳定性^[2]。文献 [3] 中双闭环 PI 控制在解耦功率方面已经取得了一定的成功,但是对于双馈感应发电机(DFIG)这样一个多变量、高阶、非线性、强耦合的复杂系统而言,在参数摄动等非匹配扰动情况下,仍然存在挑战,传统的 PI 调节器难以捕捉系统动态变化和

耦合效应的细微变化,难以满足系统在这些情况下的控制要求,因此,为了提高双馈风力发电机的稳定性,需要采用更为精准的控制策略,如模糊控制、滑模控制和预测控制等方法,以更好地应对参数摄动和非匹配扰动带来的挑战。模糊控制能够处理系统模型的不确定性和复杂性,滑模控制则通过引入滑模面来抑制系统的不良影响,预测控制则可以利用系统模型对未来的发展趋势进行预测,并相应地调整控制输入,以达到优化控制性能的目的。这些非线性控制理论的引入为 DFIG 控制系统带来了新的可能性,有望进一步提高其在各种工况下的稳定性和鲁棒性^[4-6]。

滑模控制具有快速的响应特性,能够在短时间内对系统的变化做出调整,保持系统的稳定性和快速性,有效地抑制系统的抖振现象。然而,当系统状态变量处于滑动模态时,滑模控制往往会出现明显的抖振现象。这种抖振现象可能会影响系统的稳定性和控制性能,因此需要通过进一步的优化和改进控制策略来解决这个问题。一些常见的方法包括引入滑模面设计中的非线性元素、融入一些新的控制策略,以及优化滑模控制器的参数等手段。文献 [7] 提出了趋近律的概念,在快速趋近目标是同时降低抖振现象。这一概念给滑模控制器提供了一种有效的方法,改善了系统的抗抖振性。另一方面,文献 [8] 则探索了一种幂次变速趋近律,在逆变器的应用,该方法提升了系统动态响应速度,有效抑制环流的影响,实现了更精确的控制。然而,该方法中所选用的趋近律中存在符号函数,其不连续特性仍可能导致系统抖振。文献 [9] 将分数阶微积分应用于 DFIG 控制系统中,构建了分数阶滑模面,并引入了分数阶趋近律,保证了系统的快速性。但由于该方法计算

量大,物理实现比较困难,在工业中的应用仍具有一定挑战性。

为了解决参数摄动对 DFIG 的影响,以及降低滑模控制中的抖振现象。本文提出了一种改进型幂次函数滑模控制,并在幂次函数中引入抗抖振因子函数,将该控制方法应用于 DFIG 系统中,提高了并网发电过程中的稳定性和抗干扰能力。

1 双馈风力发电机数学模型及转子侧控制策略

1.1 双馈风力发电机 (DFIG) 数学模型

双馈风力发电系统如图 1 所示,主要包括风机、齿轮箱、双馈风力发电机、转子侧变流器、网侧变流器、变压器和滤波电感等部分组成。

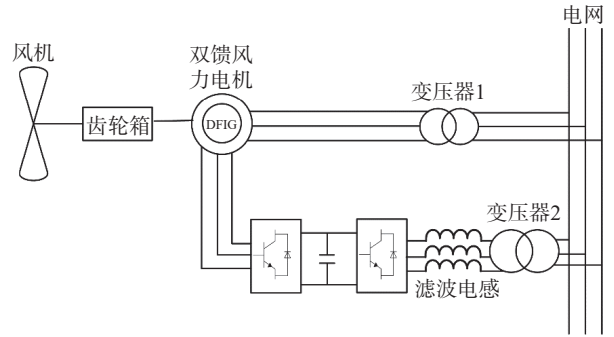


图 1 双馈风力发电系统结构图

Fig. 1 Diagram of Doubly Fed Wind Power Generation System

在 dq 轴旋转坐标下,DFIG 的数学模型^[10]如下式所示

电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_{sl} \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_{sl} \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

u_{sd} ——定子 d 轴电压(V);

u_{sq} ——定子 q 轴电压(V);

u_{rd} ——转子 d 轴电压(V);

u_{rq} ——转子 q 轴电压(V);

i_{sd} ——定子 d 轴电流(A);

i_{sq} ——定子 q 轴电流(A);

i_{rd} —— 转子 d 轴电流(A);
 i_{rq} —— 转子 q 轴电流(A);
 ψ_{sq} —— 定子 d 轴磁链(Wb);
 ψ_{sd} —— 定子 q 轴磁链(Wb);
 ψ_{rd} —— 转子 d 轴磁链(Wb);
 ψ_{rq} —— 转子 q 轴磁链(Wb);
 R_s —— 定子电阻(Ω);
 R_r —— 转子电阻(Ω);
 ω_1 —— 定子磁场的同步电角速度(rad/s);
 ω_{sl} —— 为转差角速度(rad/s);
 ω_r —— 转子电角速度(rad/s)。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中

L_m —— 旋转坐标系下的等效互感(H)。

功率方程

$$\begin{cases} P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \\ Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \\ P_r = u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq} \\ Q_r = u_{rq} i_{rd} - u_{rd} i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

P_s —— 定子有功功率(W);

Q_s —— 定子无功功率(W);

P_r —— 转子有功功率(W);

Q_r —— 转子无功功率(W)。

1.2 转子侧基于定子磁链定向的矢量控制

双馈风力发电机基于磁场定向的矢量控制通过坐标变换, 将三相电机模型等效成 dq 坐标系下的直流电机模型。通过对转子电流的精准控制, 实现了对发电机转矩和功率的精准控制, 从而提升了电机的性能和运行效率。

将定子磁链定向在旋转坐标下的 d 轴, 由式(3)得

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = \psi_s \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

ψ_s —— 定子磁链矢量幅值(Wb)。

将(5)化简得

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{L_s}(\psi_s - L_m i_{rd}) \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

忽略定子电阻影响, 定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} = \frac{d}{dt} \psi_{sd} = 0 \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} = \omega_1 \psi_s = U_s \end{cases} \quad (7)$$

式中:

U_s —— 定子电压矢量幅值(V)。

将式(7)代入(4)得到定子功率表达式为

$$\begin{cases} P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} = U_s i_{sq} = -U_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} = U_s i_{sd} = U_s \frac{(\psi_s - L_m i_{rd})}{L_s} \end{cases} \quad (8)$$

电磁转矩表达式可化简为

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq} i_{rd} - \psi_{sd} i_{rq}) = -n_p \frac{L_m}{L_s} \psi_s i_{rq} \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 转子 dq 轴电流可以对有功和无功功率解耦控制。将(6)代入到式(5)得转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_m \psi_s}{L_s} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (10)$$

σ 为总漏磁系数, 表达式为:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (11)$$

将式(10)代入式(2)得

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \Delta u_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \Delta u_{rq} \\ \Delta u_{rd} = -(\omega_1 - \omega_r) \sigma L_r i_{rq} \\ \Delta u_{rq} = (\omega_1 - \omega_r) \frac{L_s}{L_m} \psi_s + (\omega_1 - \omega_r) \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)的 Δu_{rd} 、 Δu_{rq} 为交叉耦合项, 可通过设置前馈补偿项以提升系统的动稳态性能。

结合上述推导, 本文构建了基于 PI 调节器的转子侧变流器控制框图, 具体结构如图 2 所示。

2 基于幂次函数积分滑模控制器设计

滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是非线性控制, 它通过非连续性的控制来使控制对象运行在滑模面上, 促使系统实现“滑动模态运动”^[11-14]。然

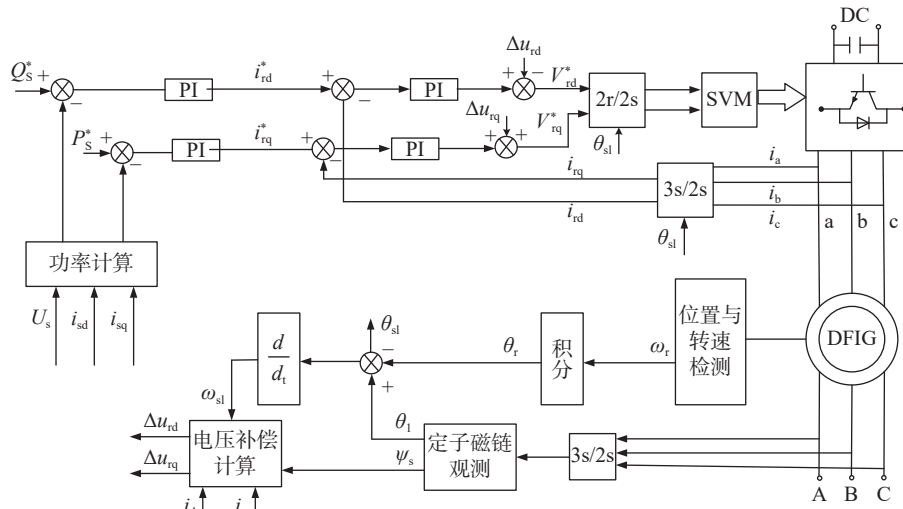


图 2 基于 PI 调节器的转子侧变流器控制框图

Fig. 2 Block diagram of rotor side converter control based on PI regulator

而,其缺点是当控制目标运行到滑模面后,在滑模面来回穿梭,以锯齿状态趋近平衡点。这种运动方式会造成目标抖振,对系统的控制效果造成影响^[15-19]。

因此,降低滑模控制中的抖振性是滑模控制研究的重点。在解决抖振问题方面,应用在自抗扰控制系统中的幂次函数取得了良好的效果,能够使系统实现无抖振、单调的收敛^[20]。

2.1 幂次函数

$$fal(s, a, \delta) = \begin{cases} sgn(s) * |s|^a & |s| \geq \delta \\ \frac{s}{\delta^{(1-a)}} & |s| < \delta \end{cases} \quad (13)$$

s 为输入信号,sgn(s) 为符号函数,定义为

$$sgn(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases} \quad (14)$$

符号函数如下图 3 所示,即 \$s>0\$ 时函数值为 1; \$s<0\$ 时函数值为-1; \$s=0\$ 时函数值为 0。

由于符号函数呈现阶跃特性,在 \$s\$ 小于 0 时取 -1, \$s\$ 大于 0 时取 1,控制器的控制效果也会呈现阶跃特性,其控制器的性能也会受到影响。因此,引进一种抗抖振因子函数来改善传统的幂次函数。改进型幂次函数如下式(15)所示。

$$Gfal(s, a, \delta) = \begin{cases} G(s) * |s|^a & |s| \geq \delta \\ \frac{s}{\delta^{(1-a)}} & |s| < \delta \end{cases} \quad (15)$$

其中:\$G(s)\$ 为抗抖振因子函数,且:

$$G(s) = \frac{s}{|s| + \nu} \quad (16)$$

式中 \$\nu>0\$。抗抖振因子函数 \$G(s)\$ 如下图 4 所示,其在零点两侧无穷远处分别渐近于-1 和 1。

比较图 3 和图 4 两种函数的图像, \$Gfal\$ 函数在零点两侧呈现渐进特性,因此在不同情况下的 \$Gfal\$ 函数的抗抖振性更好。基于这一观察,本文将非线性函数 \$fal\$ 全部替换为 \$Gfal\$。

2.2 滑模控制器设计

转子电流 d、q 轴误差函数定义如下:

$$\begin{bmatrix} e_d(t) \\ e_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dr}^*(t) \\ i_{qr}^*(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{dr}(t) \\ i_{qr}(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

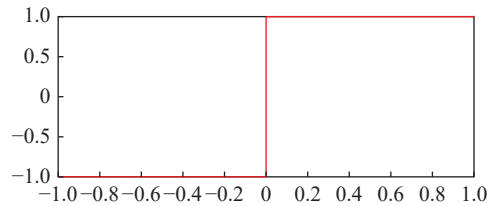


图 3 sgn 函数图像

Fig. 3 The graph of the sign function

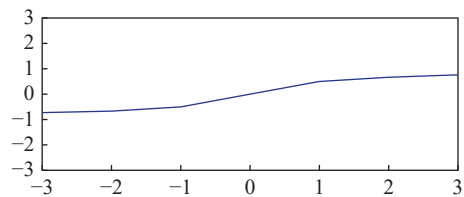


图 4 G(x) 函数图像

Fig. 4 The graph of the G(x) function

为了防止稳态误差的产生,影响系统的性能,设计了积分滑模控制器,积分滑模面函数如下式(18)所示:

$$s_{dq}(t) = e_{dq}(t) + c_{dq} \int_0^t e_{dq}(t) dt \quad (18)$$

其中, $s_{dq}(t) = [s_d(t) s_q(t)]^T$, $e_{dq}(t) = [e_d(t) e_q(t)]^T$, c_d 、 c_q 为积分常数, $t \rightarrow \infty$ 。

改进型幂次滑模控制器趋近律设计为:

$$\frac{ds_{dq}(t)}{dt} = -\varepsilon Gfal(s_{dq}, \alpha, \delta) \quad (19)$$

其中 ε 为滑模增益。

联立式(19)和(18)得

$$\varepsilon Gfal(s_{dq}, \alpha, \delta) + c_{dq} e_{dq}(t) = \frac{di_{dqr}}{dt} \quad (20)$$

为了验证改进型幂次滑模控制的稳定性,定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s_{dq}^2 \quad (21)$$

联立(21)和(18)得

$$\frac{ds_{dq}}{dt} = i_{dqr}^* + c_{dq} e_{dq}(t) + \frac{R_r}{\sigma} i_{dqr} - \frac{u_{dqr}}{\sigma} + \frac{\Delta u_{dqr}}{\sigma} \quad (22)$$

对(22)求导

$$\dot{V} = s_{dq} \left(i_{dqr}^* + c_{dq} e_{dq}(t) + \frac{R_r}{\sigma} i_{dqr} - \frac{u_{dqr}}{\sigma} + \frac{\Delta u_{dqr}}{\sigma} \right) = -s_{dq} \varepsilon Gfal(s_{dq}, \alpha, \delta) \quad (23)$$

当 $\delta > 0, \alpha \in (0, 1)$ 时, Lyapunov 函数 V 正定,且 $V \leq 0$, 满足滑动模态存在不等式条件:

$$\lim_{s_{dq} \rightarrow 0} s_{dq} \dot{s}_{dq} \leq 0 \quad (24)$$

由此可知采用上述滑模控制律时,系统满足 Lyapunov 稳定性条件。

系统采用 1.2 节中的基于定子磁链的矢量控制策略,结合上述基于改进型幂次函数的滑模控制器,引入到传统矢量控制中基于 PI 控制的电流环,具体结构图如下图 5 所示

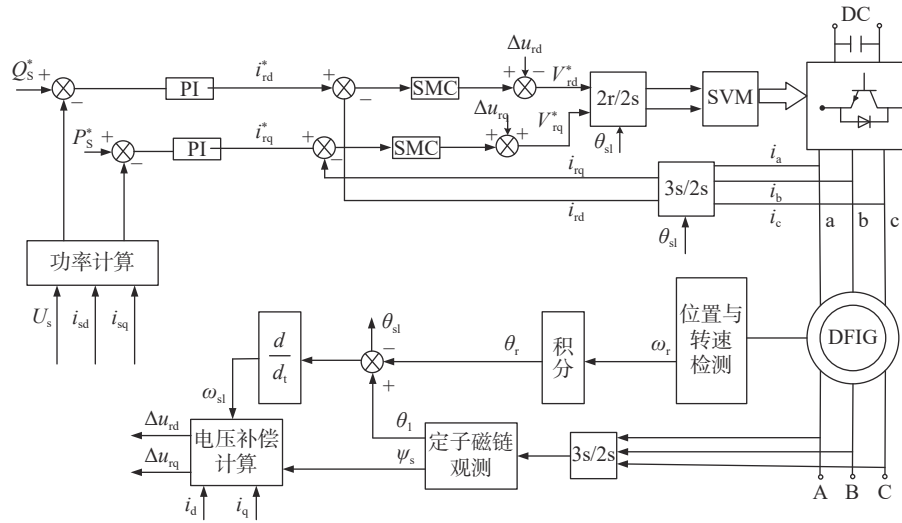


图 5 基于幂次积分函数的滑模控制器

表 1 DFIG 仿真参数

参数	数值
定子侧电阻/ Ω	1.91
转子侧电阻/ Ω	0.0621
定子自感/H	0.0167
转子自感/H	0.0167
定转子间互感/H	0.0165
电网频率/f	50
额定电压/V	380
极对数	2
转动惯量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.2

3 系统仿真分析

在 Matlab 软件上搭建上述两种调节器调节器的双馈风力发电系统仿真模型。仿真参数见表 1 所示

图 6(a)展示了双馈风力发电系统的仿真电路图,图 6(b)展示了机侧滑膜控制模型图,图 6(c)展示了风机模型图

风机模型参数如下:空气密度为 1.2 m/s,风机直径为 66 m,桨距角为 0,最佳叶尖速比为 8.1,齿轮

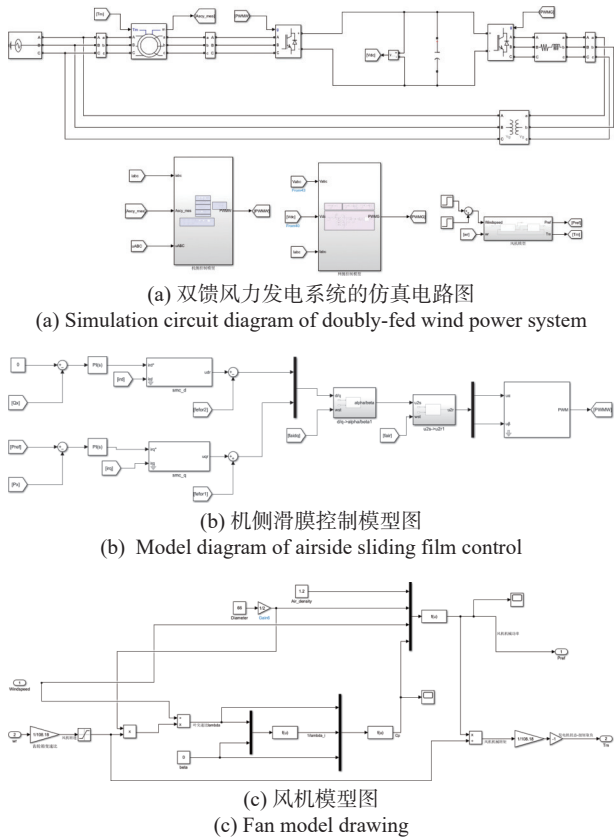


图 6 双馈风力发电系统仿真模型图

Fig. 6 Simulation model diagram of doubly-fed wind turbine system

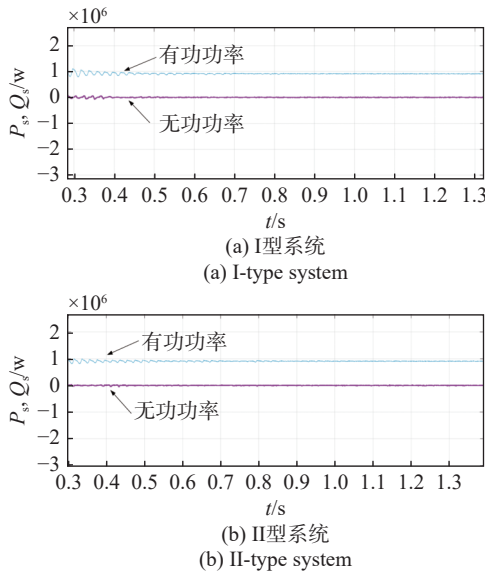


图 7 稳定风速下功率波形图

Fig. 7 Power waveform at steady wind speed.

箱变速比为 108.18。

图 7 展示了风速稳定在 10 m/s 时, 在 PI 控制下

(下面简称 I 型系统), 和改进滑模控制下(下面简称 II 型系统)的功率曲线图。

图 7 在风速稳定情况下的功率曲线图, II 型系统无功功率稳定在 0, 有功功率也保持稳定, 体现了良好的静态性能, 和 I 型系统相比, II 型系统的无功功率更快到达了稳定, 体现了快速性。

图 8 到图 10 展示了在风速突变时候的动态响应, 第一次突变 1 s 时风速由 8 m/s 突变至 10 m/s, 第二次突变风速由 10 m/s 突变至 12 m/s。有功功率跟随参考值的波形图。

相比较而言, I 型系统风速突变情况下, 有功功率的追踪过程波动较大, 并且在第二次风速突变时候, I 型系统约在 1.3 s 时候才在追踪到参考值。II 型系统跟踪过程无超调, 跟踪速度更快。

图 9 展示了风速突变过程中电磁转矩的波形图, 在风速两次突变过程中, II 型系统的过渡过程与 I 型系统相比平滑了许多, 体现了 II 型系统更高的控制精度和优良的动态性能。

图 10 展示了风速突变时候发电机转子转速的波形图, 可见在第二次风速突变的时候, II 型系统几乎无超调, 而 I 型系统波动较大。可见 II 型系统具有更好的跟踪效果。

4 结论

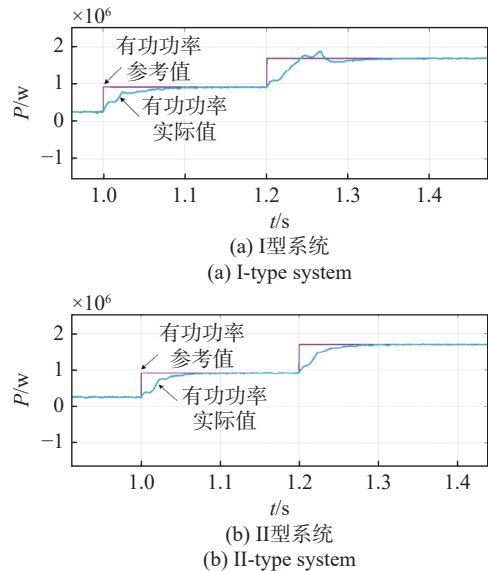


图 8 有功功率跟随参考值的波形图

Fig. 8 The waveform graph of active power following the reference value.

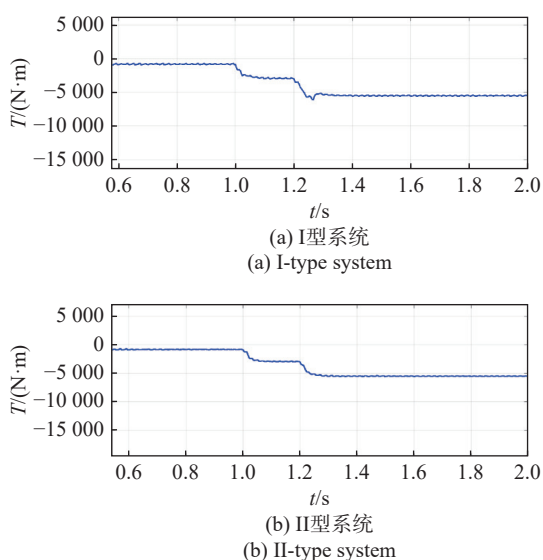


图 9 电磁转矩波形图

Fig. 9 The waveform graph of electromagnetic torque.

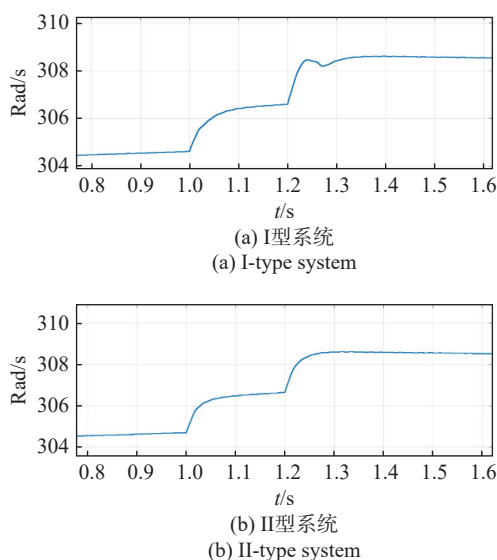


图 10 发电机转子转速的的波形图

Fig. 10 The waveform graph of generator rotor speed.

积分滑模控制器融合了滑模控制的鲁棒性和积分控制的精确性, 改善了系统的抗抖振性能, 能够实现系统的精确跟踪和控制, 提高系统的动态和静态性能。使 DFIG 系统具有较快的响应速度, 能够迅速适应风速和负荷变化, 保持系统稳定运行。

对 DFIG 发电系统中转子侧电流环中的积分滑模控制器进行了研究, 提出了一种结合抗抖振因子的幂次函数 $Gfal$ 函数, 降低了积分滑模控制器的抖振现象。通过仿真分析了双馈风力发电系统的功率、

转速和转矩。与传统的 PI 调节器对比基于幂次函数的积分滑模控制器各项参数动态响应过程无超调, 跟踪效果更好。仿真证明改进型幂次滑模控制器表现出了更好的动静态性能, 有效抑制外界不确定因素对系统的影响, 提高系统的稳定性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 杨博, 束洪春, 邱大林, 等. 变风速下双馈感应发电机非线性鲁棒状态估计反馈控制 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 60-69. DOI: [10.7500/AEPS20180330007](https://doi.org/10.7500/AEPS20180330007).
YANG B, SHU H C, QIU D L, et al. Nonlinear robust state estimation feedback control of doubly-fed induction generator under variable wind speeds [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(4): 60-69. DOI: [10.7500/AEPS20180330007](https://doi.org/10.7500/AEPS20180330007).
- [2] NIAN H, YI X L. Coordinated control strategy for doubly-fed induction generator with DC connection topology [J]. *IET renewable power generation*, 2015, 9(7): 747-756. DOI: [10.1049/iet-rpg.2014.0347](https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0347).
- [3] 黄守道, 谭健, 许琤, 等. 双馈风力发电机有功、无功的解耦控制 [J]. *电气传动*, 2008, 38(9): 7-10. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2095.2008.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2095.2008.09.002).
HUANG S D, TAN J, XU Z, et al. Decoupled control of active and reactive power in a doubly fed induction generator [J]. *Electric drive*, 2008, 38(9): 7-10. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2095.2008.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2095.2008.09.002).
- [4] 杨文焕, 倪凯峰. 基于模糊控制的双馈风力发电最优控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2013, 28(4): 279-284. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2013.04.038](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2013.04.038).
YANG W H, NI K F. Optimal control strategy for the doubly-fed wind power system based on the fuzzy control technique [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2013, 28(4): 279-284. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2013.04.038](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2013.04.038).
- [5] BEN ELGHALI S E, EL HACHEMI BENBOUZID M, AHMED-ALI T, et al. High-order Sliding mode control of a marine current turbine driven doubly-fed induction generator [J]. *IEEE journal of oceanic engineering*, 2010, 35(2): 402-411. DOI: [10.1109/JOE.2010.2040402](https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2040402).
- [6] 李晓明, 牛玉广, 王世林, 等. 双馈风机自适应神经分散协调预测控制 [J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(7): 902-911. DOI: [10.7641/CTA.2015.40972](https://doi.org/10.7641/CTA.2015.40972).
LI X M, NIU Y G, WANG S L, et al. Adaptive neural decentralized-coordinated predictive control of double fed induction generator [J]. *Control theory & applications*, 2015, 32(7): 902-911. DOI: [10.7641/CTA.2015.40972](https://doi.org/10.7641/CTA.2015.40972).
- [7] 周涛. 基于一种新型趋近律的自适应滑模控制 [J]. *控制与决策*, 2016, 31(7): 1335-1338. DOI: [10.13195/j.kzyjc.2015.0518](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0518).

- ZHOU T. Adaptive sliding control based on a new reaching law [J]. *Control and decision*, 2016, 31(7): 1335-1338. DOI: [10.13195/j.kzyjc.2015.0518](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0518).
- [8] 叶佳卓, 邓双喜, 周宁博, 等. 基于幂次变速趋近律的逆变器环流滑模控制 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(8): 56-61. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000707](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000707).
- YE J Z, DENG S X, ZHOU N B, et al. Circulating current sliding-mode control of inverter based on power variable rate reaching law [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(8): 56-61. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000707](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000707).
- [9] XIONG L Y, WANG J, MI X, et al. Fractional order sliding mode based direct power control of grid-connected DFIG [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2018, 33(3): 3087-3096. DOI: [10.1109/TPWRS.2017.2761815](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2761815).
- [10] 王君瑞, 彭飘飘, 刘凡齐. 基于滑模变结构双馈风力发电机直接功率控制 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(12): 85-88, 196. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2015.12.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2015.12.018).
- WANG J R, PENG P P, LIU F Q. Direct power control for doubly fed induction generator based on sliding mode variable [J]. *Computer simulation*, 2015, 32(12): 85-88, 196. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2015.12.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2015.12.018).
- [11] 方馨, 王丽梅, 张康. 基于扰动观测器的永磁直线电机高阶非奇异快速终端滑模控制 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(2): 409-421. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211779](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211779).
- FANG X, WANG L M, ZHANG K. High order nonsingular fast terminal sliding mode control of permanent magnet linear motor based on disturbance observer [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2023, 38(2): 409-421. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211779](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211779).
- [12] 林增健, 刘文泽, 谭炜豪. 基于变指数滑模的双馈水电机组功率控制研究 [J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(6): 81-86. DOI: [10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2021.06.013](https://doi.org/10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2021.06.013).
- LIN Z J, LIU W Z, TAN W H. Research on power control of hydroelectric generating units with doubly fed induction generators based on variable exponential sliding mode control [J]. *Journal of China three gorges university (natural sciences)*, 2021, 43(6): 81-86. DOI: [10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2021.06.013](https://doi.org/10.13393/j.cnki.issn.1672-948x.2021.06.013).
- [13] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1003-8930.2017.08.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8930.2017.08.005).
- LI P Q, QIU S Y, LI X R, 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. DOI: [10.3969/j.issn.1003-8930.2017.08.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-8930.2017.08.005).
- [14] 赵永玮, 董锋斌, 刘昌建. 基于新型幂次趋近律的 DFIG 滑模直接功率控制 [J]. *电工技术*, 2023(8): 24-30. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2023.08.007](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2023.08.007).
- ZHAO Y W, DONG F B, LIU C J. DFIG sliding mode direct power control based on novel power reaching law [J]. *Electric engineering*, 2023(8): 24-30. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2023.08.007](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2023.08.007).
- [15] 缪仲翠, 张文宾, 余现飞, 等. 基于转速估计的 PMSM 分数阶积分滑模控制 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 28-34. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1045](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1045).
- MIAO Z C, ZHANG W B, YU X F, et al. Fractional order integral sliding mode control for PMSM based on speed estimation [J]. *Journal of solar energy*, 2021, 42(3): 28-34. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1045](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2018-1045).
- [16] 张国山, 李现磊. 一种滑模控制新型幂次趋近律的设计与分析 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(11): 1112-1119. DOI: [10.11784/tdxbz201907050](https://doi.org/10.11784/tdxbz201907050).
- ZHANG G S, LI X L. Design and analysis of a new power reaching law for sliding mode control [J]. *Journal of Tianjin university (science and technology)*, 2020, 53(11): 1112-1119. DOI: [10.11784/tdxbz201907050](https://doi.org/10.11784/tdxbz201907050).
- [17] 廖瑛, 杨雅君, 王勇. 滑模控制的新型双幂次组合函数趋近律 [J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(3): 105-110. DOI: [10.11887/j.cn.201703017](https://doi.org/10.11887/j.cn.201703017).
- LIAO Y, YANG Y J, WANG Y. Novel double power combination function reaching law for sliding mode control [J]. *Journal of national university of defense technology*, 2017, 39(3): 105-110. DOI: [10.11887/j.cn.201703017](https://doi.org/10.11887/j.cn.201703017).
- [18] 董锋斌, 刘昌建, 赵永玮, 等. 基于扩张状态观测器的 DFIG 网侧变换器滑模控制 [J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2): 206-214. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.02.024](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.02.024).
- DONG F B, LIU C J, ZHAO Y W, et al. Sliding mode control for DFIG grid-side converter based on extended state observer [J]. *Electric power engineering technology*, 2023, 42(2): 206-214. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.02.024](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.02.024).
- [19] 高日辉, 陈燕, 马春燕, 等. 基于滑模控制的三相 PWM 整流器结构设计与性能仿真 [J]. *太原理工大学学报*, 2018, 49(2): 258-263. DOI: [10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2018.02.013](https://doi.org/10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2018.02.013).
- GAO R H, CHEN Y, MA C Y, et al. Physical design and performance simulation of three-phase PWM rectifier based on sliding-mode control [J]. *Journal of Taiyuan university of technology*, 2018, 49(2): 258-263. DOI: [10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2018.02.013](https://doi.org/10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2018.02.013).
- [20] 张兰红, 李胜, 张卿杰. 永磁同步风电系统转速环自抗扰控制器设计 [J]. *控制工程*, 2022, 29(9): 1645-1651. DOI: [10.14107/j.cnki.kzgc.20200573](https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200573).
- ZHANG L H, LI S, ZHANG Q J. Design of active disturbance rejection controller in speed loop for permanent magnet

synchronous wind power generation system [J]. *Control engineering of China*, 2022, 29(9): 1645-1651. DOI: [10.14107/j.cnki.kzgc.20200573](https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20200573).

陈露露

2002-, 女, 汉族, 本科, 主要研究方向为风力发电控制技术 (e-mail)19851556113@163.com。

作者简介:



朱耀明

朱耀明

1999-, 男, 汉族, 盐城工学院硕士, 主要研究方向为风力发电控制技术 (e-mail)1603100057@qq.com。



张兰红

张兰红(通信作者)

1968-, 女, 教授, 博士, 主要从事从事新能源发电、电力电子与电力传动等方面的教学与科研工作 (e-mail)zlhycit@126.com。

项目简介: 江苏省盐城工学院创新计划项目

项目名称 双馈风力发电机的矢量控制(SJXC23_XZ010)

承担单位 盐城工学院

项目概述 双馈风力发电机矢量控制是一种先进的控制技术, 能够实现高效的风能转换, 提高发电系统的稳定性和响应速度, 从而更好地适应不断变化的风速和负载条件。

主要创新点 (1)采用积分滑模控制器代替双馈风力发电机转子侧电流环的PI调节器提高风力发电机的鲁棒性;(2)将抗抖振因子引入幂次函数,降低滑模控制的抖振。

(编辑 徐嘉铖)