

# 基于分数阶滑模的风力发电机直接功率控制\*

管萍, 李军

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

**摘要:** 为了改善双馈风力发电系统的控制性能, 将分数阶滑模控制应用于双馈风力发电机的直接功率控制系统中。将分数阶微积分引入到滑模控制中, 构成分数阶滑模控制器, 利用分数阶的遗传衰减特性削弱滑模控制的抖振。推导了应用于双馈风力发电系统的分数阶滑模控制律, 并用李雅普诺夫稳定性定理证明了系统的稳定性。所提出的分数阶滑模控制系统省略了电流环控制, 简化了控制结构, 实现了有功功率和无功功率的有效控制。仿真与试验结果显示出所用分数阶滑模控制策略的有效性, 同时表明该系统削弱了传统滑模控制中存在的抖振。

**关键词:** 双馈风力发电机; 直接功率控制; 分数阶; 滑模控制

**中图分类号:** TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0097-06

## Direct Power Control Based on Fractional Order Sliding Mode for Wind Generator\*

GUAN Ping, LI Jun

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to improve the control performance of the doubly fed wind generator, the fractional order sliding mode control was used in the direct power control system of the doubly fed wind generator. The fractional order calculus was introduced into the sliding mode control to constitute a fractional order sliding mode controller, which weakened the chattering of the traditional sliding mode control by using the fractional order genetic attenuation characteristics. The fractional order sliding mode control law was derived for doubly fed induction generator, and the stability of the system was proved by Lyapunov stability theorem. The proposed fractional order sliding mode control system saved the current loop control, simplified the control structure, and realized the effective control of active power and reactive power. The simulation and experimental results showed the effectiveness of the proposed fractional order sliding mode control system and the weakening of the chattering in the traditional sliding mode control.

**Key words:** doubly fed induction generator (DFIG); direct power control; fractional order; sliding mode control

## 0 引言

近年来, 双馈感应发电机 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 由于具有变速恒频运行能力, 加之变流器容量小, 在风力发电领域尤其是大功率发电领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

滑模控制因具有较强的鲁棒性、优良的动态响应能力及参数的不敏感性等优点被广泛应用于 DFIG 的运行控制。文献[2]将滑模控制与 PI 控制结合, 构建一种复合滑模控制器实现对 DFIG 的变速恒频控制, 然而其采用矢量控制, 对电机参数过分依赖, 由于电机参数在实际控制中容易发生变

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61573230)

作者简介: 管萍(1968—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制与非线性控制及其在工业和航天领域中的应用。

李军(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电机运行控制。

化,进而导致控制性能变差。直接功率控制(Direct Power Control, DPC)以有功功率和无功功率为控制目标,通过调节转子电压来控制输出的功率,省去了电流内环控制,具有结构简单、动态响应快等优点。文献[3]提出一种基于定子磁链的常规开关表的 DPC 策略,改善了传统矢量控制对电机参数的依赖性问题,然而由于开关频率不固定,会造成较大的功率波动,同时产生电流谐波。文献[4]提出了一种含有滞环比较器的 DPC 策略,使转子电流开关频率随功率变化而变化,但该开关频率需要复杂昂贵的功率变流器作为支撑。文献[5]设计了一种基于 DPC 的滑模变结构控制算法,利用滑模控制的参数不敏感性与空间矢量脉宽调制技术克服传统矢量控制对参数过分依赖的缺点,同时解决传统 DPC 开关频率不固定的问题,结果表明系统静态和动态性能优良,具有较强的鲁棒性;但由于滑模控制器需要在滑模面上进行高频切换,具有较为明显的抖振,控制效果并不理想。

分数阶微积分与传统微积分相比,增加了微分与积分这 2 个自由度的可变性,从而使控制系统的设计更加灵活<sup>[6]</sup>。近年来针对分数阶微积分理论的应用研究成为一个热点。根据分数阶微积分的定义可知分数阶微积分算子具有遗传衰减特性,同时具有记忆信息的能力,使控制器在滑模面的切换过程中缓慢地释放能量,可抑制滑模控制中的抖振。将其引入滑模控制,可以改善滑模控制的性能和控制效果。文献[7]设计了基于模糊控制的分数阶滑模控制器,将其应用于永磁同步电机伺服系统。试验结果显示所设计的控制器不仅削弱了抖振,而且具有全局鲁棒性。但是分数阶滑模鲜见应用于 DFIG 控制系统中。

为了提高 DFIG 的性能,本文综合滑模控制的强鲁棒性和分数阶微积分的记忆衰减特性构成分数阶滑模控制器,将其应用于 DFIG 的 DPC 系统中。首先研究了 DFIG 的数学模型,进而设计了分数阶滑模控制律并利用李雅普诺夫稳定性定理证明了系统的稳定性。最后对 DFIG 的分数阶滑模控制系统做了仿真与试验研究。仿真与试验结果显示出了所提分数阶滑模控制的风力发电系统实现了对有功和无功的动态解耦控制,使风电系统获得更好的静态性能与优越的动态响应速度,同时具有较强的鲁棒性和削弱抖振的能力。

## 1 DFIG 转子侧数学模型

根据 DFIG 的等效电路图,可得其在静止的两相坐标轴下的数学模型为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} u_{s\alpha\beta} = R_s i_{s\alpha\beta} + \frac{d\psi_{s\alpha\beta}}{dt} \\ u_{r\alpha\beta} = R_r i_{r\alpha\beta} + \frac{d\psi_{r\alpha\beta}}{dt} - j\omega_r \psi_{r\alpha\beta} \\ \psi_{s\alpha\beta} = L_s i_{s\alpha\beta} + L_m i_{r\alpha\beta} \\ \psi_{r\alpha\beta} = L_r i_{r\alpha\beta} + L_m i_{s\alpha\beta} \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} u_{s\alpha\beta} &= [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}], u_{r\alpha\beta} = [u_{r\alpha} \quad u_{r\beta}], \\ i_{s\alpha\beta} &= [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}], i_{r\alpha\beta} = [i_{r\alpha} \quad i_{r\beta}], \\ \psi_{s\alpha\beta} &= [\psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta}], \psi_{r\alpha\beta} = [\psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}] \end{aligned}$$

式中:  $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 、 $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 、 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ ——定子电压、转子电压、定子电流、转子电流在  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的分量;

$R_s$ 、 $R_r$ 、 $L_s$ 、 $L_r$ ——定转子绕组电阻和自感;

$\psi$ ——磁链;

$\omega_r$ ——转子旋转角速度;

$L_m$ ——互感。

式(1)中的磁链方程可转化为

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha\beta} = \sigma L_m i_{r\alpha\beta} + \frac{L_s}{L_m} \psi_{r\alpha\beta} \\ \psi_{r\alpha\beta} = \sigma L_m i_{s\alpha\beta} + \frac{L_r}{L_m} \psi_{s\alpha\beta} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma = 1 - \frac{L_s L_r}{L_m^2}$ 。

由式(1)和式(2)可得:

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_m} \left[ (u_{r\alpha\beta} - R_r i_{r\alpha\beta}) - \frac{L_r}{L_m} (u_{s\alpha\beta} - R_s i_{s\alpha\beta}) + j\omega_r \left( \sigma L_m i_{s\alpha\beta} + \frac{L_r}{L_m} \psi_{s\alpha\beta} \right) \right] \\ \frac{di_{r\alpha\beta}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_m} \left[ (u_{s\alpha\beta} - R_s i_{s\alpha\beta}) - \frac{L_s}{L_m} (u_{r\alpha\beta} - R_r i_{r\alpha\beta}) - j\omega_r \left( \sigma L_m i_{r\alpha\beta} + \frac{L_s}{L_m} \psi_{r\alpha\beta} \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

DFIG 定子侧输出的瞬时有功功率、无功功率可以表示为

$$W = [P_s \quad Q_s] = 1.5i_{s\alpha\beta}^* u_{s\alpha\beta} \quad (4)$$

式中：\*——共轭向量。

对式(4)求导,可得:

$$\dot{W} = 1.5(u_{s\alpha\beta} i_{s\alpha\beta}^* + i_{s\alpha\beta}^* u_{s\alpha\beta}) \quad (5)$$

在电网电压条件下,定子电压的导数可表示为

$$\frac{du_{s\alpha\beta}}{dt} = j\omega_1 u_{s\alpha\beta} \quad (6)$$

式中： $\omega_1$ ——同步角速度。

将式(3)、式(6)代入式(5),可得:

$$\begin{aligned} \dot{W} = & \frac{3}{2\sigma L_m} (u_{s\alpha\beta} u_{r\alpha\beta}^* - \frac{L_r}{L_m} \|u_{s\alpha\beta}\|^2 - \\ & j \frac{L_r \omega_r}{L_m} u_{s\alpha\beta} \psi_{s\alpha\beta}^* + \frac{2L_r R_s}{3L_m} W - R_r u_{s\alpha\beta} i_{r\alpha\beta}^*) + \\ & j\omega_{slip} W \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $\|u_{s\alpha\beta}\|$ ——电网电压的幅值；

$\omega_{slip}$ ——转差角速度,  $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r$ 。

定子磁链可表示为

$$\psi_{s\alpha\beta} = \frac{u_{s\alpha\beta}}{j\omega_1} = -j \frac{u_{s\alpha\beta}}{\omega_1} \quad (8)$$

结合式(7)、式(8)即可得到 DFIG 基于功率控制数学模型的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{P} \\ \dot{Q} \end{bmatrix} = f(x) + g \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{aligned} f(x) = & \begin{bmatrix} \frac{L_r R_s}{\sigma L_m^2} & -\omega_{slip} \\ \omega_{slip} & \frac{L_r R_s}{\sigma L_m^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -1.5 \frac{R_r}{\sigma L_m} (u_{s\alpha} i_{r\alpha} + u_{r\alpha} i_{s\alpha}) + \xi - \\ 1.5 \frac{R_r}{\sigma L_m} (u_{s\beta} i_{r\alpha} - u_{s\alpha} i_{r\beta}) \end{bmatrix} \\ & \xi = -1.5 \frac{L_r \omega_{slip}}{\sigma L_m^2 \omega_1} \|u_{s\alpha\beta}\|^2 \\ & g = 1.5 \left( \frac{1}{\sigma L_m} \right) \begin{bmatrix} u_{s\alpha} & u_{s\beta} \\ u_{s\beta} & -u_{s\alpha} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

通过控制转子的电压,实现对有功功率和无功功率的解耦控制。

## 2 分数阶滑模控制策略

### 2.1 分数阶微积分理论

分数阶微积分有 3 种较为常用的定义: Riemann-Liouville、Grünwald-Lletnikov 和 Caputo。由于 Caputo 型分数阶微积分对于初始条件的定义与整数阶微积分保持一致,故其在研究中应用最为广泛。

定义 1:连续可积函数  $f(t)$  的 Caputo 型分数阶微积分统一定义为

$${}_t^{\alpha} D_t^{\alpha} f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_{t_0}^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau, & m-1 < \alpha < m \\ \frac{d^m}{dt^m} f(t), & \alpha = m \end{cases}$$

### 2.2 分数阶滑模控制律

根据式(9),设:

$$x = [P_s \quad Q_s]^T, x_{ref} = [P_{s\_ref} \quad Q_{s\_ref}]^T$$

则可得:

$$\dot{x} = f(x) + gu \quad (10)$$

选取分数阶滑模面函数为

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 + c_1 D^{-\alpha} e_1 \\ e_2 + c_2 D^{-\alpha} e_2 \end{bmatrix}$$

式中： $\alpha$ ——分数阶微积分算子的阶数,  $0 < \alpha < 1$ ；

$c_1, c_2$ ——正定的调整参数。

对  $S$  求导,可得:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 + c_1 D^{1-\alpha} e_1 \\ \dot{e}_2 + c_2 D^{1-\alpha} e_2 \end{bmatrix}$$

其中,  $e$  表示实际值与参考值的误差,  $e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} =$

$x_{ref} - x = \begin{bmatrix} P_{s\_ref} - P_s \\ Q_{s\_ref} - Q_s \end{bmatrix}$ , 并且有:

$$\dot{e} = \dot{x}_{ref} - \dot{x} = \dot{x}_{ref} - f(x) - gu \quad (11)$$

将式(11)代入  $S$  的表达式可得:

$$\dot{S} = cD^{1-\alpha} e + \dot{x} - f(x) - gu \quad (12)$$

令  $\dot{S} = 0$ , 可得等效控制为

$$u_{eq} = g^{-1} [\dot{x}_{ref} + cD^{1-\alpha} e - f(x)] \quad (13)$$

取如下的开关控制:

$$u_s = g^{-1} \eta \text{sign}(S) \quad (14)$$

式中： $\eta$ ——非负常数。

可得最终的分数阶滑模控制律为

$$u = u_{eq} + u_s \quad (15)$$

即:

$$u = g^{-1} [\dot{x}_{ref} + cD^{1-\alpha}e - f(x) + \eta \text{sign}(S)] \quad (16)$$

代入式(9),得:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= cD^{1-\alpha}e + \dot{e} = \\ &= cD^{1-\alpha}e + \dot{x}_{ref} - f(x) - gu = \\ &= cD^{1-\alpha}e + \dot{x}_{ref} - f(x) - [\dot{x}_{ref} - f(x) + \\ &\quad \eta \text{sign}(S)] = -\eta \text{sign}(S) \end{aligned} \quad (17)$$

设李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}S^2 \quad (18)$$

由式(17)可得:

$$\dot{V} = S\dot{S} = S[-\eta \text{sign}(S)] = -\eta|S| \quad (19)$$

其中,  $\eta \geq 0$ , 则有:

$$\dot{V} \leq 0 \quad (20)$$

故系统稳定。

### 3 仿真研究

为验证控制算法的有效性,对所提的分数阶滑模控制风力发电系统进行仿真研究。系统的主要参数:电机额定功率 2 MW,额定频率 50 Hz,定子额定电压 690 V,定子电阻 0.002 6  $\Omega$ ,转子电阻 0.002 9  $\Omega$ ,定子自感 0.002 587 H,转子自感 0.002 587 H,定转子互感 0.002 5 H。控制参数:  $\alpha=0.25, c_1=50, c_2=5, \eta=0.01$ 。

为了与所提算法进行比较,对双馈风力发电系统的传统滑模控制算法也进行了仿真研究,控制律为

$$u = g^{-1} [\dot{x}_{ref} - f(x) + \eta \text{sign}(S)]$$

有功功率参考输入值为 1.8 MW,无功功率参考输入值为 0.1 Mvar。传统滑模控制阶跃响应曲线如图 1 所示。分数阶滑模控制阶跃响应曲线如图 2 所示。

由图 1、图 2 可以看出传统滑模控制在 0.8 s 时才达到稳定输出,有功功率超调量为 12%,且存在较明显的抖振;而分数阶滑模控制算法在 0.15 s 时便达到稳态输出,有功功率超调量为 3%,无明显的抖振。

图 3 所示为传统滑模控制动态仿真波形。图 4 所示为分数阶滑模控制动态仿真波形。在

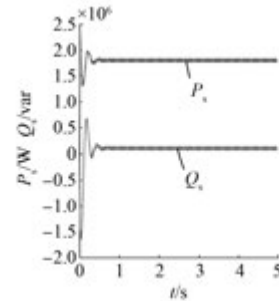


图 1 传统滑模控制阶跃响应曲线

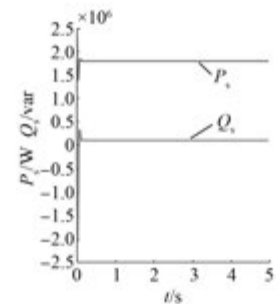


图 2 分数阶滑模控制阶跃响应曲线

1 s 时有功功率的参考值由 1.8 MW 改为 1 MW; 在 3 s 时无功功率的参考值由 0.1 Mvar 改为 0.5 Mvar。

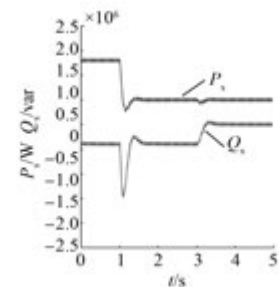


图 3 传统滑模控制动态仿真波形

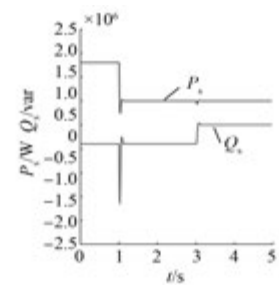


图 4 分数阶滑模控制动态仿真波形

由图 3、图 4 可以看出,当参考值改变时,传

统滑模控制的有功功率、无功功率分别需要0.55 s 和 0.50 s 才能跟踪新的参考设定值;而分数阶滑模控制算法在功率参考值改变时,有功功率和无功功率分别只需 0.20 s 和 0.15 s 便可以跟踪新的参考值,而且在达到新的稳态的过程中没有明显的振荡,动态响应效果优越,同时削弱了传统滑模控制中的抖振。

从以上对仿真波形的分析可以看出,所提出的分数阶滑模控制风力发电系统,实现了对定子侧输出有功无功的解耦控制,具有动态响应快等优良性能,同时减弱了滑模控制的抖振。

#### 4 试验验证

为了进一步验证分数阶滑模控制算法的有效性,在 5 kW 的 DFIG 测试平台上进行试验研究。试验平台主要由控制台、变频器、DFIG、同步电机、整流器及逆变器组成,如图 5 所示。具体参数:绕线型 DFIG 额定功率为 5 kW,额定电压为 380 V,频率为 50 Hz,定子电阻为 1.450 Ω,转子



图 5 风力发电试验平台

电阻为 1.395 Ω,定子漏感 0.005 839 H,转子漏感 0.005 839 H,定转子绕组互感 0.172 2 H。

试验平台系统结构图如图 6 所示。

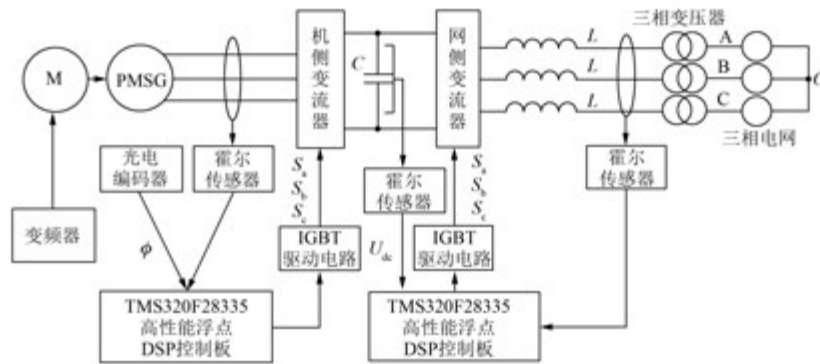


图 6 试验平台系统结构图

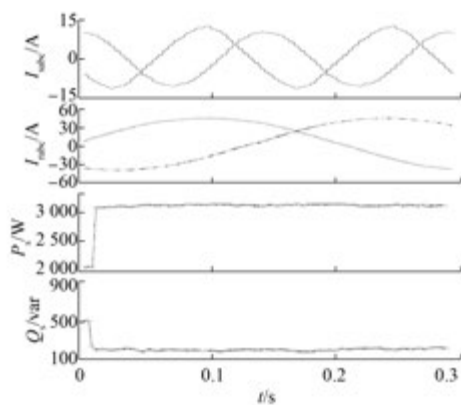


图 7 分数阶滑模控制系统阶跃响应试验波形

图 7 所示为所用试验平台在分数阶滑模控制下的阶跃响应结果。有功功率的参考设定值为 3 kW,无功功率的参考设定值为 0.18 kvar。

由图 7 可看出,所提控制策略实现了对双馈电机的有效控制,在 0.02 s 时达到稳态输出,稳态波形振荡较小。同时定子侧电压电流正弦度较好,不存在振荡失真的情况。转子侧电流输出稳定,正弦。总体控制效果理想,稳态响应良好。

图 8 所示为系统有功功率变化时的试验波形:在 0.2 s 时系统有功功率从 0.5 kW 变为 2.5 kW。

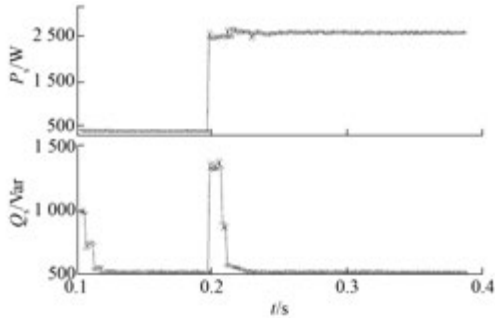


图8 分数阶滑模控制系统有功功率变化时的试验波形

由试验曲线可看出,当有功功率发生改变时,只需 0.03 s 便可跟踪新的功率参考值达到稳态,其间没有产生过大的振荡。此时无功功率基本保持不变。

图 9 所示为系统无功功率变化时的试验波形,在 0.2 s 时系统无功功率从 0.2 kvar 变为 0.4 kvar。

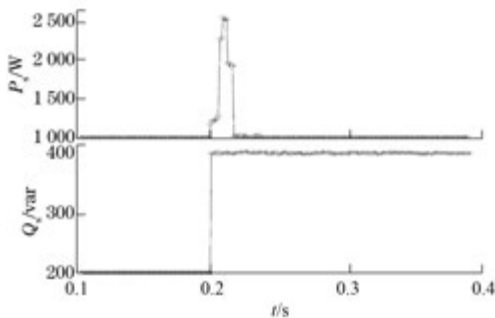


图9 分数阶滑模控制系统无功功率变化时的试验波形

由试验曲线可以看出,当无功功率改变时,在 0.01 s 内便可以达到新的稳态,没有产生振荡,同时有功功率基本保持原值不变,实现了功率的解耦控制。

## 5 结 语

为了提高双馈风力发电系统运行控制效果,将滑模控制与分数阶微积分结合起来应用于双馈风

力发电控制系统中。分数阶滑模控制不仅保存了滑模控制技术的强鲁棒性和参数不敏感性,同时分数阶微积分的引入又有效地减弱了滑模控制的抖振。仿真与试验结果显示,所提的基于分数阶滑模控制的风力发电系统实现了对有功功率和无功功率的解耦控制,能快速跟踪有功、无功功率的期望值,具有优良的动静态性能。同时有效地减弱了传统滑模控制的抖振,从而改善了双馈风力发电系统的运行性能,具有一定的工程应用前景。

## 【参考文献】

- [ 1 ] 年珩,程鹏,贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16): 4184-4197.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] XU L, CARTWRIGHT P. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 750-758.
- [ 4 ] 郭晓明,贺益康,何奔腾.DFIG 风电机组网侧变换器的复开关系直接功率控制[J]. 电力系统自动化,2007,31(21): 67-71.
- [ 5 ] 李生民,何欢欢,张玉坤,等. 基于滑模变结构的双馈风力发电机直接功率控制策略研究[J]. 电网技术,2013,37(7): 2006-2010.
- [ 6 ] 宋申民,邓立为,陈兴林. 分数阶微积分在滑模控制中的应用特性[J]. 中国惯性技术学报,2014(4): 439-444.
- [ 7 ] 张碧陶,皮佑国. 永磁同步电机伺服系统模糊分数阶滑模控制[J]. 控制与决策,2012,27(12): 1776-1780.
- [ 8 ] 胡家兵,迟永宁,汤海燕. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制[M]. 北京: 机械工业出版社,2014.

收稿日期: 2018-04-25

## [ 期刊订阅 ]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至我杂志社发行部补订

地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063 电话: 021-62574990-745 传真: 021-32230809

国内邮发代号: 4-199 每册定价: 12.00 元 全年定价: 144.00 元