



## 永磁同步风力发电系统的最大功率跟踪模糊分数阶控制

姜礼洁 王晓燕 苏杰 张镇韬

### MPPT Fuzzy Fractional Control of Permanent-magnet Synchronous Wind Power Generation System

JIANG Lijie, WANG Xiaoyan, SU Jie, ZHANG Zhentao

引用本文:

姜礼洁, 王晓燕, 苏杰, 等. 永磁同步风力发电系统的最大功率跟踪模糊分数阶控制[J]. 现代电力, 2024, 41(2): 230–239. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0248

JIANG Lijie, WANG Xiaoyan, SU Jie, et al. MPPT Fuzzy Fractional Control of Permanent-magnet Synchronous Wind Power Generation System[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(2): 230–239. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0248

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2022.0248>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多态蚁群细菌觅食算法实现部分遮蔽下光伏系统最大功率跟踪

Maximum Power Tracking of Photovoltaic System Under Partial Shading Based on PACO–BFOA

现代电力. 2022, 39(1): 1–8 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0082>

#### 基于平抛模型的光伏多峰最大功率点预测跟踪方法

Photovoltaic Multi-peak Maximum Power Point Predictive Tracking Method Based on Flat Parabolic Model

现代电力. 2019, 36(3): 27–33 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/27>

#### 基于虚拟同步发电机的MMC受端换流器控制策略

Control Strategy of MMC Receiving Converter Based on Virtual Synchronous Generator

现代电力. 2020, 37(4): 408–415 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0998>

#### 含并联直驱风电机组并网的风电场多开环模式谐振

Multi Open-Loop Mode Resonance of Wind Farm with Grid-Connected Parallel Permanent Magnet Synchronous Generators

现代电力. 2022, 39(1): 19–25 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0018>

#### 双馈风电系统连接柔直电网电压频率协调控制策略

A Coordinated Control Strategy of Voltage and Frequency for Doubly-fed Wind Power Generation System Connected to Flexible HVDC Grid

现代电力. 2023, 40(4): 427–433 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0370>

#### 一种基于模块化多电平换流器的多端高压直流输电系统协调控制方法

A Coordination Control Method for Multi-terminal High Voltage DC System Based on Modular Multilevel Converter

现代电力. 2023, 40(1): 100–107 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0241>

# 永磁同步风力发电系统的最大功率跟踪模糊分数阶控制

姜礼洁<sup>1,2</sup>, 王晓燕<sup>1,2</sup>, 苏杰<sup>1</sup>, 张镇韬<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北省 保定市 071003; 2. 河北省发电过程仿真与优化控制技术创新中心 (华北电力大学), 河北省 保定市 071003)

## MPPT Fuzzy Fractional Control of Permanent-magnet Synchronous Wind Power Generation System

JIANG Lijie<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoyan<sup>1,2</sup>, SU Jie<sup>1</sup>, ZHANG Zhentao<sup>1,2</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;  
2. Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation(North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China)

**摘要:** 在“双碳”背景下, 风电作为零碳电力和新能源发电的主力军, 在助力社会全面绿色低碳转型方面发挥了关键性作用。在保证发电稳定的前提下实现风能的最大化利用, 提升风力发电系统发电量至为重要。文中针对永磁同步风力发电系统的最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 问题进行研究。首先建立了永磁同步风力发电系统的机理仿真模型, 用两电平双 PWM 全功率换流器连接风力发电机与电网。然后基于以上模型, 分别设计了整数阶 PI 控制器、分数阶 PI<sup>λ</sup> 控制器、模糊分数阶 PI<sup>λ</sup> 控制器以实现 MPPT 控制。最后对以上控制策略进行了仿真研究。结果表明, 无论在阶跃风速还是随机风速下, 模糊分数阶 PI<sup>λ</sup> 控制器相较于其他两种均具有更出色的 MPPT 性能与更强的鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步风力发电系统; 两电平双 PWM 全功率换流器; 模糊分数阶控制器; 最大功率跟踪; 发电稳定

**Abstract:** As the the main force of zero-carbon electricity and renewable energy generation, wind power plays a key role in assisting the comprehensive green and low-carbon transformation of society in the context of "dual carbon". It is crucial to maximize the utilization of wind energy and to increase the wind power generation system output while ensuring stable power generation. The maximum power point tracking (MPPT) problem of permanent-magnet synchronous wind power generation system was investigated. Firstly, a mechanism simulation model of permanent-magnet synchronous wind power genera-

tion system was established and a two-level dual-PWM full-power converter was used to connect the wind turbine to the grid. Secondly, based on the above model, an integer-order PI controller, fractional-order PI<sup>λ</sup> controller and fuzzy fractional-order PI<sup>λ</sup> controller were designed to implement MPPT control. Finally, simulation research was conducted on the above control strategies. The results show that the fuzzy fractional-order PI<sup>λ</sup> controller has better MPPT performance and better robustness than the other two types, regardless of whether it is in step or random wind speed.

**Keywords:** permanent magnet synchronous wind power generation system; two-level dual PWM full rated converter; fuzzy fractional-order controller; MPPT; stable power generation

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0248

## 0 引言

风能作为一种清洁高效的可再生能源, 如何通过合理利用风力发电这一绿色能源方式, 解决日益突出的能源环境问题, 是历年来专家学者们研究的重点。根据定桨矩失速型风机和变速恒频变桨矩风机<sup>[1]</sup>的特点, 可将国内目前装机的电机分为异步型与同步型两类, 其中具有代表性且被广泛使用的电机为绕线式双馈异步发电机<sup>[2]</sup>与永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG)<sup>[3]</sup>。永磁同步发电机因其具有无需外加励磁装置、无齿轮箱、噪音小、效率高、寿命长等优点, 在风力发电领域得到了广泛应用。

目前针对于风力发电系统的控制主要围绕最大

**基金项目:** 河北省自然科学基金项目 (E2018502111); 河北省省级科技计划资助 (22567643H)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Hebei(E2018502111); S&T Program of Hebei(22567643H)。

功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 阶段与恒功率输出阶段两部分展开, 其中 MPPT 阶段的控制又称变速恒频控制, 是实现风能最大化利用的关键。传统整数阶 PID 控制器虽具有结构简单、可靠性高等优点, 但由于线性控制框架的约束且若操作点不断变化将影响控制器动态性能。文献 [4] 将小波神经网络与 PID 控制器相结合, 利用灵敏度信息调整 PID 参数, 虽提升了 MPPT 阶段的控制性能, 但仍存在一定局限。

分数阶微积分理论因其能够为实际的工程以及科学研究提供比整数阶微积分更好的系统过程描述与更优的控制效果 [5], 逐渐成为各工程技术领域学者们研究的重点。Podlubny 教授 [6] 于 1999 年提出的分数阶 PID (fractional-order PID, FOPID) 控制器, 引入分数阶积分阶次  $\lambda$  与分数阶微分阶次  $\mu$  两个额外参数, 将传统的整数阶 PID 控制器扩展为分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器, 增大了系统的动态调节范围, 提高了系统的控制性能。文献 [7] 通过对风能转换系统应用分数阶 PI 控制器, 并利用粒子群优化算法进行参数寻优, 改善了风力发电系统在 MPPT 阶段的瞬态响应特性。

为避免线性控制框架固有缺陷的约束, 文献 [8] 以转速跟踪为目标, 设计了自适应分数阶控制器, 文献 [9] 设计了分数阶非线性控制器, 通过修改积分动作补偿分数阶控制器的缺点, 使其能够根据误差函数在性能偏离参考值时立即实现自适应。以上两种方法均在一定程度上提升了风力发电系统在 MPPT 阶段的控制性能, 但控制器的普适性不高且控制有些保守。开发性能更优、普适性更强的分数阶控制器至关重要。

据此, 本文将模糊控制理论与分数阶控制器相结合, 通过对积分阶次模糊语言变量以及模糊规则的重新制定, 设计模糊分数阶控制器, 使其适应风力发电系统 MPPT 阶段的控制过程, 提升控制性能。

## 1 直驱式永磁同步风力发电系统建模

因 PMSG 缺少励磁绕组, 无法调节输出电压与功率因数, 需装设全功率换流器 (full rated converter, FRC) 后才可连接电网, FRC 的主要控制目标是在维持直流电压稳定的情况下实现最大功率跟踪 [10], 承担着维持风电系统处于变速恒

频状态的关键意义, 将风能最大限度的转化为电能输送给电网。FRC 由机侧换流器与网侧换流器两部分组成, 在本文的设计过程中, 机侧换流器负责控制电磁功率, 实现最大功率跟踪, 网侧换流器负责控制直流电压, 实现输出有功与无功的解耦控制。

两电平双 PWM 全功率换流器具有能够更好地控制电流波形、无需外接 Boost 升压电路, 能够在很宽的风速范围内运行、风能捕获效率高、功率可以双向流动, 灵活性强等优点。据此, 本文的 FRC 选用两电平双 PWM 全功率换流器。其结构图如图 1 所示。

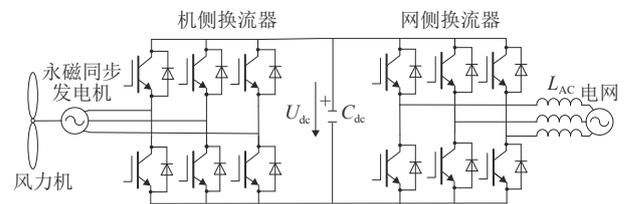


图 1 基于 FRC 的直驱式永磁同步风力发电系统  
Fig. 1 FRC-based direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system

### 1.1 风力机模型与 MPPT

根据风力机的空气动力学原理 [11] 可知, 风力机输入功率计算公式如下

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $A$  为风力机叶片扫略面积;  $v$  为风速。

风力机无法利用全部风能, 存在风能利用系数  $C_P(\lambda, \beta)$ 。风力机实际输出机械功率如下

$$P_m = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta) \rho A v^3 \quad (2)$$

在风能利用系数  $C_P(\lambda, \beta)$  中,  $\lambda$  为叶尖速比 [12],  $\beta$  为桨距角, 相关计算公式如式 (3)~(5) 所示

$$C_P(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_1}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (5)$$

其中,  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$ ,  $\omega_m$  为叶片角速度/风力机转速 (rad/s)。

$C_P(\lambda, \beta)$  是关于  $\lambda$  和  $\beta$  的函数, 由图 2 可知, 当

$\beta = 0$ ,  $\lambda \approx 8.1$ 时,  $C_p(\lambda, \beta) = 0.48$ 为最大值, 此时 $\lambda$ 称为最佳叶尖速比, 记作 $\lambda_{opt}$ , 此时 $C_p(\lambda, \beta)$ 称为最大风能利用系数, 记作 $C_{Pmax}$ 。维持风力机处于 $\beta = 0$ ,  $\lambda = 8.1$ 的工作状态, 可保证 $C_p(\lambda, \beta) = C_{Pmax}$ , 实现最大功率跟踪。

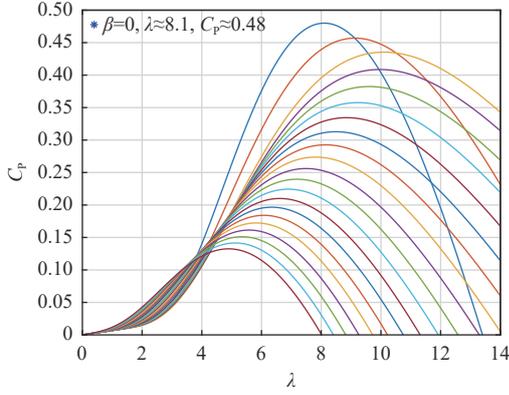


图2  $C_p(\lambda, \beta)$  曲线  
Fig. 2  $C_p(\lambda, \beta)$  curve

根据公式(5)可得出, 由于 $R$ 为风力机叶片半径, 为定值, 故维持 $\lambda$ 值不变, 始终处于最佳叶尖速比状态, 当风速改变时实时调整 $\omega_m$ 值, 即可实现MPPT的目的。

当 $\beta = 0$ 时,  $P_m$ 为关于 $\omega_m$ 和 $v$ 的函数。设定 $\omega_m$ 的变化范围为 $0 \sim 40$  rad/s,  $v$ 的变化范围为 $4 \sim 20$  m/s, 可得如图3所示的风力机特性曲线。其中用“\*”标注的点为每个风速对应下的最大功率点, 连接这些点所形成的曲线称为最大功率曲线。为实现MPPT的目的则需要能够准确捕捉到这条最大功率曲线[13]。

## 1.2 永磁同步发电机模型

忽略电枢电阻和凸极效应, 可得PMSG的输出

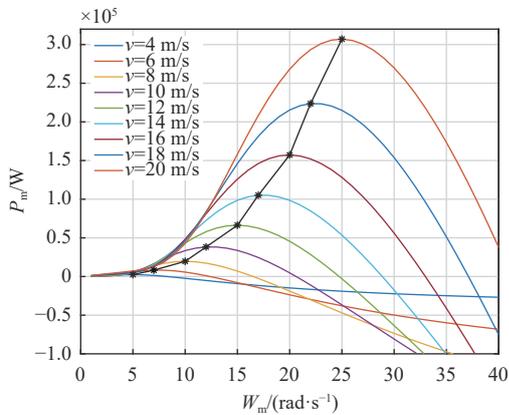


图3 风力机特性曲线  
Fig. 3 Wind turbine characteristic curves

出功率与转矩情况

$$P_s = 3U_s I_s \cos \varphi = \frac{3E_0 U_s}{X_s} \sin \theta \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{3E_0 U_s}{X_s} \cos \theta - \frac{U_s^2}{X_s} \quad (7)$$

$$T_g = \frac{3E_0 U_s}{\omega_m X_s} \sin \theta \quad (8)$$

其中:  $P_s$ 为有功功率;  $Q_s$ 为无功功率;  $T_g$ 为电磁转矩。

将两相旋转坐标系 $d$ 轴定向于转子磁链上, 采用电动机惯例规定正方向, PMSG在两相旋转坐标系 $dq$ 下的电压方程为

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (9)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r (L_{sd} i_{sd} + \psi_f) \quad (10)$$

式中:  $R_s$ 为定子侧电阻;  $\omega_r$ 为转子电角速度;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 为定子 $d$ 轴与 $q$ 轴的电压;  $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$ 为定子 $d$ 轴与 $q$ 轴的电感;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 为定子 $d$ 轴与 $q$ 轴的电流,  $\psi_f$ 为转子永磁体磁链。

PMSG的输出功率与电磁转矩为(适用于不同坐标系定向方式的通用计算公式)

$$P_s = -\frac{3}{2}(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (11)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd}) \quad (12)$$

$$T_g = -\frac{3}{2}p(\psi_f i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (13)$$

## 1.3 机侧换流器控制策略

在转子磁链定向方式下的PMSG $dq$ 坐标系下定子侧电压方程, 如公式(9)与公式(10)所示。为简化控制, 通常令定子直轴电流为零, 即 $i_{sd} = 0$ , 忽略定子电阻, 可将公式(9)与公式(10)简化为

$$u_{sd} = -\omega_r L_{sq} i_{sq} \quad (14)$$

$$u_{sq} = L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r \psi_f \quad (15)$$

其中 $\omega_r = p\omega$ 。令 $i_{sd} = 0$ , 既可保证定子电流全部用来产生电磁转矩, 又能避免由于直轴电枢反应而可能造成的永磁体退磁现象。电磁转矩 $T_g$ 可简化为

$$\begin{aligned} T_s &= -\frac{3}{2}p[(L_{sd} - L_{sq})i_{sd}i_{sq} + \psi_f i_{sq}] \\ &= -\frac{3}{2}p\psi_f i_{sq} \end{aligned} \quad (16)$$



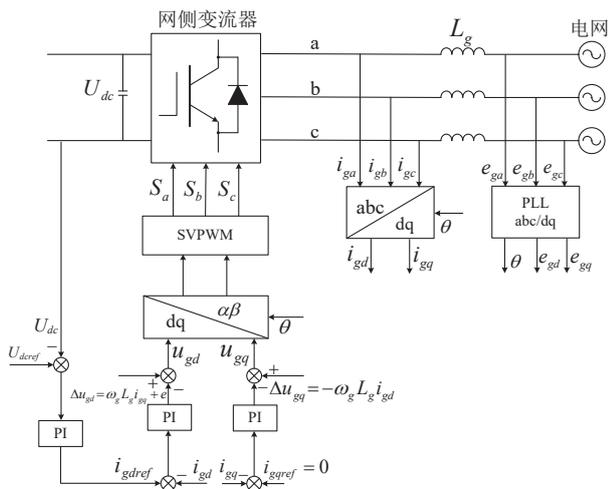


图6 网侧换流器控制原理

Fig. 6 Grid-side converter control schematic

要求很高的响应速度，采用比例环节改善响应速度已足以，且增加微分环节易造成系统出现早期饱和、不稳定等现象，故通常采用PI控制器控制。本节将介绍整数阶PI控制器与分数阶控制器，并设计模糊分数阶控制器。

### 2.1 整数阶PI控制器

整数阶PI控制器由比例、整数阶积分两个部分组成，其时域表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (22)$$

式中  $K_p$ 、 $K_i$  为控制器参数。

将式(22)进行Laplace变换，可得整数阶PI控制器的传递函数  $G_c(s)$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (23)$$

### 2.2 分数阶控制器

Podlubny教授提出的分数阶  $PI^\lambda D^\mu$  控制器<sup>[6]</sup>增加了  $\lambda$  与  $\mu$  两个可调参数，分别为分数阶积分器与微分器的阶次。

去除微分环节后，分数阶  $PI^\lambda$  控制器的时域表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) \quad (24)$$

传递函数  $G_c(s)$  为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (25)$$

其中  $\lambda > 0$ ，当  $\lambda = 1$  时为整数阶PI控制器，可见整数阶PI控制器为分数阶  $PI^\lambda$  控制器的一个特例。

### 2.3 参数寻优范围确定

向系统输入 6 m/s 的恒定风速，设置 3 s 仿真

时间，利用ISE与ITAE性能指标综合考虑，确定  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$  参数的寻优范围。

令  $K_i = 100$ 、 $\lambda = 1$ ，确定  $K_p$  的寻优范围，如表1所示。

表1  $K_p$  寻优范围确定Table 1 Determine the  $K_p$  optimization range

$K_p$	ISE	ITAE
6	$1.9976 \times 10^5$	$2.9089 \times 10^4$
10	$1.8369 \times 10^5$	$2.8714 \times 10^4$
14	$1.7354 \times 10^5$	$2.8216 \times 10^4$
18	$1.6529 \times 10^5$	$2.7801 \times 10^4$
22	$1.5947 \times 10^5$	$2.8120 \times 10^4$
24	$1.5680 \times 10^5$	$2.8194 \times 10^4$
28	$1.5192 \times 10^5$	$2.8653 \times 10^4$
32	$1.4799 \times 10^5$	$2.8878 \times 10^4$

可看出，随着参数  $K_p$  的增大，ISE 逐渐减小，而 ITAE 则呈现先减小后增大的变化趋势，综合考虑，确定  $K_p$  的寻优范围为 [10,28]。

令  $K_p = 10$ 、 $\lambda = 1$ ，确定  $K_i$  的寻优范围，如表2所示。

表2  $K_i$  寻优范围确定Table 2 Determine the  $K_i$  optimization range

$K_i$	ISE	ITAE
50	$2.0843 \times 10^5$	$4.0697 \times 10^4$
100	$1.8369 \times 10^5$	$2.8714 \times 10^4$
150	$1.7808 \times 10^5$	$2.5677 \times 10^4$
200	$1.7793 \times 10^5$	$2.5071 \times 10^4$
250	$1.7849 \times 10^5$	$2.4248 \times 10^4$
300	$1.8123 \times 10^5$	$2.3503 \times 10^4$
350	$1.8349 \times 10^5$	$2.3189 \times 10^4$
400	$1.8660 \times 10^5$	$2.3439 \times 10^4$
450	$1.8914 \times 10^5$	$2.2770 \times 10^4$
500	$1.9097 \times 10^5$	$2.3137 \times 10^4$
550	$1.9274 \times 10^5$	$2.2773 \times 10^4$
600	$1.9586 \times 10^5$	$2.2850 \times 10^4$
650	$1.9770 \times 10^5$	$2.2882 \times 10^4$
700	$2.0010 \times 10^5$	$2.2670 \times 10^4$

可看出，随着参数  $K_i$  的增大，ISE 呈现先减小后增大的变化趋势，ITAE 呈现先减小而后振荡的变化趋势，综合考虑，确定  $K_i$  的寻优范围为 [100,350]。

令  $K_p = 10$ 、 $K_i = 100$ ，确定  $\lambda$  的寻优范围，如

表 3 所示。

可看出， $\lambda$ 值与积分性能息息相关，随着参数 $\lambda$ 的增大，ISE 逐渐增大，而 ITAE 则呈现先减小后增大的变化趋势，综合考虑，确定 $\lambda$ 的寻优范围为 [0.5,1.0]。

表 3  $\lambda$ 寻优范围确定

Table 3 Determine the  $\lambda$  optimization range

$\lambda$	ISE	ITAE
0.1	1.3939×10 <sup>5</sup>	1.0007×10 <sup>5</sup>
0.2	1.4329×10 <sup>5</sup>	8.8736×10 <sup>4</sup>
0.3	1.4797×10 <sup>5</sup>	7.7421×10 <sup>4</sup>
0.4	1.5288×10 <sup>5</sup>	6.6741×10 <sup>4</sup>
0.5	1.5850×10 <sup>5</sup>	5.6564×10 <sup>4</sup>
0.6	1.6330×10 <sup>5</sup>	4.7749×10 <sup>4</sup>
0.7	1.6808×10 <sup>5</sup>	3.9893×10 <sup>4</sup>
0.8	1.7285×10 <sup>5</sup>	3.3867×10 <sup>4</sup>
0.9	1.7740×10 <sup>5</sup>	2.9790×10 <sup>4</sup>
1.0	1.8369×10 <sup>5</sup>	2.8714×10 <sup>4</sup>
1.1	1.9106×10 <sup>5</sup>	3.1296×10 <sup>4</sup>
1.2	1.9920×10 <sup>5</sup>	3.8126×10 <sup>4</sup>
1.4	2.2650×10 <sup>5</sup>	5.7256×10 <sup>4</sup>
1.6	2.8084×10 <sup>5</sup>	1.0457×10 <sup>5</sup>
1.8	4.2389×10 <sup>5</sup>	2.4325×10 <sup>5</sup>
2.0	1.3153×10 <sup>6</sup>	6.2641×10 <sup>5</sup>

### 2.4 模糊分数阶控制器

模糊控制器由模糊化、模糊推理、解模糊 3 个部分组成，其原理框图如图 7 所示。

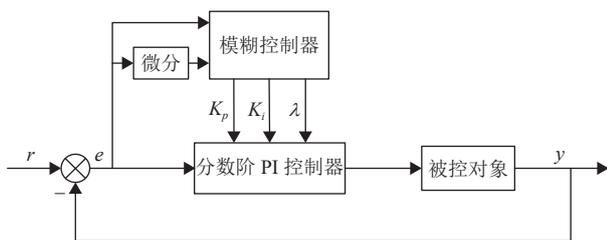


图 7 模糊分数阶PI<sup>λ</sup>控制器原理框图

Fig. 7 Block diagram of fuzzy fractional-order PI<sup>λ</sup> controller

模糊化部分负责将输入的精确量转变为模糊量，设置误差 E 与误差变化率 EC 两个输入变量， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$ 3 个输出变量，设置 E、EC、 $K_p$ 、 $K_i$  的模糊语言变量为 {NB(负大)，NM(负中)，NS(负小)，ZR(零)，PS(正小)，PM(正中)，PB(正大)}，设置 $\lambda$ 的模糊语言变量为 {S(小)，LS(较小)，LB

(较大)，B(大)}。

通过隶属度函数对模糊语言变量进行定量描述<sup>[17]</sup>，两边选用 Z 形隶属度函数，中间选取三角形隶属度函数，设置误差 E 的基本论域为 [-6,6]，误差变化率 EC 的基本论域为 [-6,6]， $K_p$ 的基本论域为 [10,28]， $K_i$ 的基本论域为 [100,350]， $\lambda$ 的基本论域为 [0.5,1.0]。

模糊推理的主要任务是，利用已模糊化的输入量，进行模糊推理，得出控制量的模糊向量。 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$ 的模糊规则表如表 4—6 所示。

根据每一时刻误差 E 与误差变化率 EC 的情况依照模糊规则表，对 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$ 值进行调整。

表 4  $K_p$ 模糊规则

Table 4  $K_p$  fuzzy rule

E/EC	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZR	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZR	NS	NS
ZR	PM	PM	PS	ZR	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZR	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZR	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZR	ZR	NM	NM	NM	NB	NB

表 5  $K_i$ 模糊规则

Table 5  $K_i$  fuzzy rule

E/EC	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZR	ZR
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZR	ZR
NS	NB	NM	NS	NS	ZR	PS	PS
ZR	NM	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZR	PS	PS	PM	PB
PM	ZR	ZR	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZR	ZR	PS	PM	PM	PB	PB

表 6  $\lambda$ 模糊规则

Table 6  $\lambda$  fuzzy rule

E/EC	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	S	S	LS	LS	LB	LB	B
NM	S	LS	LS	LB	LB	B	B
NS	S	LS	LB	LB	B	B	B
ZR	LS	LS	LB	B	B	B	B
PS	LS	LB	B	B	B	B	B
PM	LB	LB	B	B	B	B	B
PB	LB	LB	B	B	B	B	B

解模糊部分负责将经过模糊推理后所得的模糊量转变为精确量,采用重心法(centroid)解模糊,其公式如下

$$v_o = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (26)$$

其中: $\mu_v(v_k)$ 为 $v_k$ 的隶属度值; $v_o$ 为输出精确值。

通过使用FOTF模块集中的分数阶控制器模块,利用S-Function模块采集并记录偏差信息,进而通过执行所建立的模糊推理系统文件计算 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$ 值,将其写入Matlab工作空间,完成变量更新,实现模糊控制的目的。

### 3 仿真研究

直驱式永磁同步风力发电系统参数如表7所示。在此参数下,利用最佳叶尖速比法[18]计算最优转速给定值,在整数阶PI控制器的作用下,已基本达到MPPT状态。为改善风力发电系统MPPT阶段的控制性能,将分数阶控制器与模糊分数阶控制器应用于机侧矢量控制系统的转速环内,分别在阶跃风速与随机风速下对控制器进行性能测试,对比控制效果。

利用TFFV-PSO算法[19]进行控制器参数寻优,

表7 直驱式永磁同步风力发电系统参数

Table 7 Parameters of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system

参数	量值
风力机叶片半径 $R$	6.5 m
最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$	8.1
最大风能利用系数 $C_{p,max}$	0.48
空气密度 $\rho$	1.205 kg/m <sup>3</sup>
转动惯量 $J$	0.4 kg·m <sup>2</sup>
极对数 $p$	20
定子 $d$ 轴电感 $L_{sd}$	0.01 H
定子 $q$ 轴电感 $L_{sq}$	0.01 H
定子电阻 $R_s$	0.275 $\Omega$
定子磁链 $\psi_s$	1.1 Wb
电网频率 $f$	50 Hz
额定功率 $P$	50 kW
网侧电压 $U$	380 V
直流侧电压 $U_{dc}$	800 V
额定风速 $v_{rated}$	14 m/s

为兼顾系统的稳定性与快速性,以ISE与ITAE性能指标之和为粒子的函数适应值,向系统输入6 m/s恒定风速,设置一次仿真时间为3 s,使用Oustaloup滤波器[20]对分数阶微积分算子进行近似整数阶处理,近似拟合的频率段为 $[10^{-5}, 10^3]$ ,阶次为9,寻优结果如表8所示。

表8 控制器参数寻优结果

Table 8 Controller parameter optimization results

控制器	参数	ISE	ITAE
PI	$K_p=16$ $K_i=100$	$1.6842 \times 10^5$	$2.8060 \times 10^4$
FOPI	$K_p=27$ $K_i=150$ $\lambda=0.98$	$1.5036 \times 10^5$	$2.4372 \times 10^4$

#### 3.1 阶跃风速

如图8所示,向系统输入7~10 m/s变化的阶跃风速,该风速模型共经历四次阶跃变化,在 $t=1$  s、2 s时,经历幅度为1 m/s的阶跃变化,在 $t=3$  s时,经历幅度为-2 m/s的阶跃变化,在 $t=4$  s时,经历幅度为3 m/s的阶跃变化。

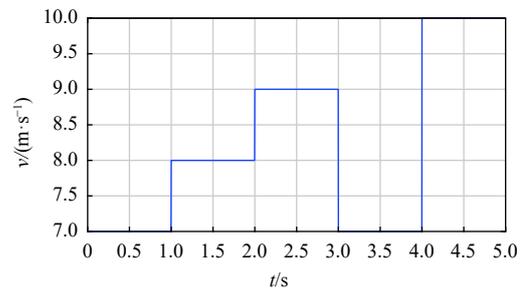


图8 阶跃风速曲线

Fig. 8 Step wind speed curve

由图9—11可看出,Fuzzy-FOPI控制器具有较强的鲁棒性,即便在经历风速大幅度阶跃变化的情况下(从7~10 m/s),仍能保证风力发电系统处于MPPT状态。

以 $t=3\sim 4$  s的控制效果为例,风电系统在 $t=3$  s时经历风速从9 m/s到7 m/s的阶跃变化。在整数阶PI控制器的作用下,发电机转速调节时间为0.5 s;在FOPI控制器的作用下,发电机转速调节时间为0.3 s;在Fuzzy-FOPI控制器的作用下,发电机转速调节时间为0.1 s。叶尖速比与风能利用系数的调节时间与发电机转速调节时间相同。可见,在Fuzzy-FOPI控制器的作用下,发电机转速调节时间最短,叶尖速比与风能利用系数也能够迅速恢复至最佳状态。

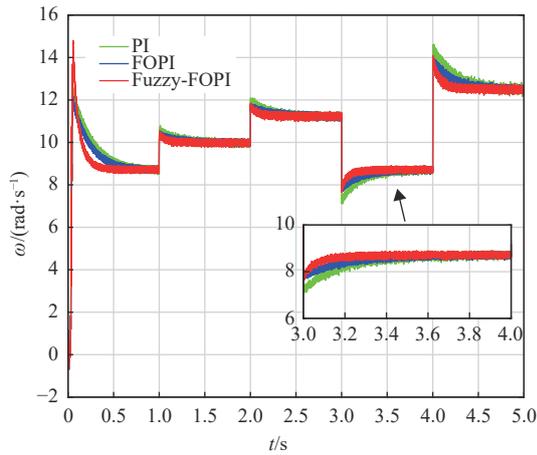


图 9 发电机转速曲线

Fig. 9 Generator speed curve

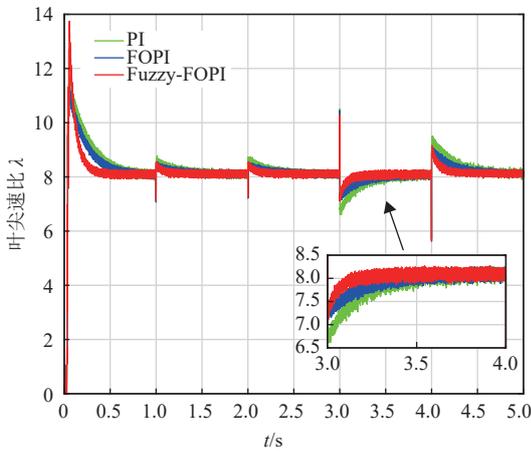


图 10 叶尖速比 λ 曲线

Fig. 10 Tip speed ratio λ curve

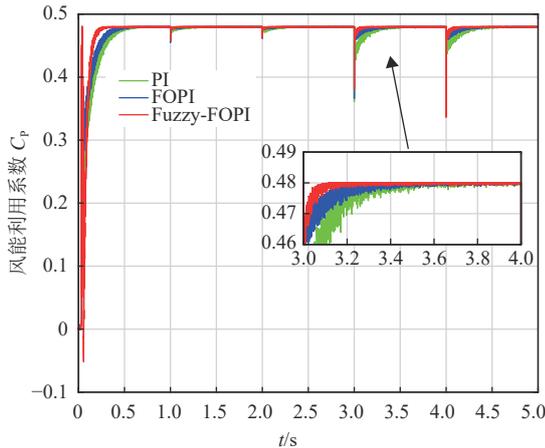


图 11 风能利用系数 Cp 曲线

Fig. 11 Wind turbine airfoils Cp curve

可知，Fuzzy-FOPI 控制器鲁棒性更强，因其能够在不同的运行状态自适应地调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $\lambda$  值，改善控制性能，故具有更快的响应速度、

更短的调节时间以及更强的抗干扰能力。

### 3.2 随机风速

如图 12 所示，向系统输入 7.4~11 m/s 变化的随机风速，模拟一般风速变化，测试控制器在风速随机变化条件下的控制效果。图 13 为发电机转速曲线。图 14 为叶尖速比 λ 曲线。图 15 为风能利用系数  $C_p$  曲线。

以  $t=4\sim 6$  s 的控制效果为例，此阶段风电系统

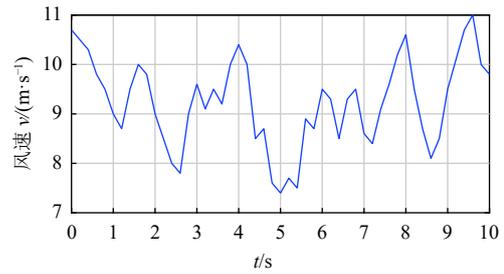


图 12 随机风速曲线

Fig. 12 Random wind speed curve

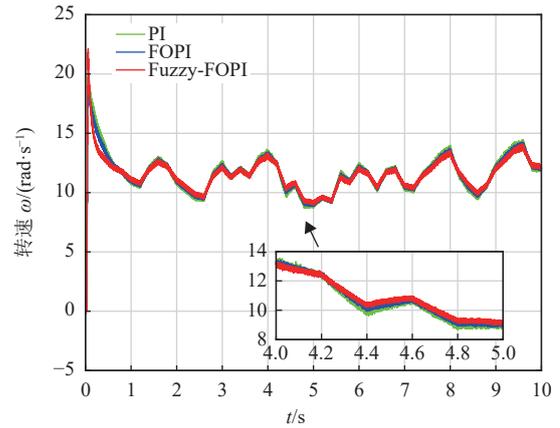


图 13 发电机转速曲线

Fig. 13 Generator speed curve

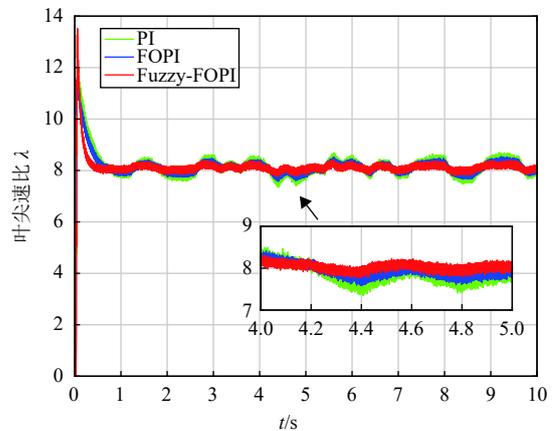
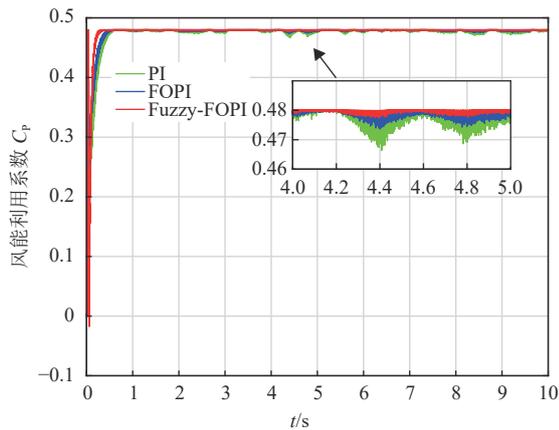


图 14 叶尖速比 λ 曲线

Fig. 14 Tip speed ratio λ curve

图 15 风能利用系数  $C_p$  曲线Fig. 15 Wind turbine airfoils  $C_p$  curve

经历风速先急剧下降, 下降至 7.4 m/s 后, 经小幅度的上升下降后, 再急剧上升的变化过程。在整数阶 PI 控制器的作用下, 叶尖速比与风能利用系数在 4.4 s 与 4.8 s 存在大幅度抖动现象; 在 FOPI 控制器的作用下, 叶尖速比与风能利用系数在 4.4 s 与 4.8 s 的大幅度抖动现象得以减弱; 在 Fuzzy-FOPI 控制器的作用下, 叶尖速比与风能利用系数在 4.4 s 与 4.8 s 的大幅度抖动现象彻底消失。Fuzzy-FOPI 控制器所对应的转速曲线更平稳, 响应速度更快, 振荡更小, 能够控制叶尖速比  $\lambda$  在最佳叶尖速比附近小范围波动, 风能利用系数  $C_p$  基本稳定在最大风能利用系数上, 具有很强的抗干扰能力。

由于最优转速给定值不断变化, 即闭环控制系统的操作点处于不断变化之中, 再加之线性控制框架的固有缺陷, 在复杂运行环境下, FOPI 控制器的动态性能以及控制效果将会不可避免的降低。Fuzzy-FOPI 控制器的引入使 FOPI 控制器脱离线性控制框架的约束, 提升了风力发电系统在最大功率跟踪阶段的控制性能。

## 4 结论

1) 建立直驱式永磁同步风力发电系统 simulink 仿真模型, 选取两电平双 PWM 全功率换流器, 机侧换流器采用转速控制为外环, 电流控制为内环的控制结构, 网侧换流器采用电压控制为外环, 电流控制为内环的控制结构, 通过实验验证其符合实际。

2) FOPI 控制器, 相较于整数阶 PI 控制器,

在一定程度上提升了风力发电系统在 MPPT 阶段的控制性能, 但由于线性控制框架的固有缺陷, FOPI 控制器对系统控制性能的提升范围有限。

3) 系统在 Fuzzy-FOPI 控制器的作用下, 响应速度更快、鲁棒性更强, 显著提升了风力发电系统在 MPPT 阶段的控制性能, 使得风能得以最大化利用, 具有一定的实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 刘青松, 岳晋萍. 基于神经网络的变速恒频风机变桨距控制[C]// 中国自动化学会控制理论专业委员会 D 卷, 2011: 4.
- [2] 王嘉玥. 一种应用于风力发电的绕线式双馈异步风力发电机[P]. 北京: CN205297823U, 2016-06-08.
- [3] EL MOURABIT Y, DEROUICH A, ALLOUHI A, *et al.* Sustainable production of wind energy in the main Morocco's sites using permanent magnet synchronous generators[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(6): e12390.
- [4] 刘杰, 杨海群. 小波神经网络PID在风电系统最大功率点跟踪中的应用研究[J]. *工矿自动化*, 2013, 39(12): 73-76. LIU Jie, YANG Haiqun. Application research of wavelet neural network and PID in maximum power point tracking of wind power system[J]. *Journal of Mine Automation*, 2013, 39(12): 73-76(in Chinese).
- [5] 梁凡. 分数阶PID控制器的设计与实现方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [6] PODLUBNY I. Fractional-order systems and  $PI\lambda D\mu$ -controllers[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(1): 208-214.
- [7] SARIR N, MORSLI S, ALLAOUI T, *et al.* Optimal fractional-order PI control design for a variable speed PMSG-based wind turbine[J]. *Journal European des Systemes Automatises*, 2021, 54(06): 915-922.
- [8] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 永磁同步发电机自适应分数阶PID控制设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 49-58. YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, *et al.* Adaptive fractional-order PID control design of permanent magnetic synchronous generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 49-58(in Chinese).
- [9] PATHAK D, BHATI S, GAUR P. Fractional - order non-linear PID controller based maximum power extraction method for a direct - driven wind energy system[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(12): e12641.

- [10] 张毅威. 直驱式永磁同步风力发电机转速控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [11] SHKARA Y, SCHELENZ R, JACOBS G. The effect of blade-tower interaction on the structure loading of multi megawatt horizontal axis wind turbine[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 1037(7): 072033.
- [12] 张晴晴. 结合叶尖速比法与三点比较法的风力发电机最大功率点跟踪控制策略研究[J]. 电力学报, 2019, 34(06): 585-590.  
ZHANG Qingqing. Research on maximum power point tracking control strategy of wind turbine combing tip speed ratio method and three-point comparison method[J]. *Journal of Electric Power*, 2019, 34(06): 585-590(in Chinese).
- [13] 刘爱军. 风力发电机组最大功率控制方案研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
- [14] 高剑. 直驱永磁风力发电机设计关键技术及应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [15] 龙万利, 黄筱叶. 永磁直驱风力发电系统控制策略仿真研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2020, 30(02): 20-25.  
LONG Wanli, HUANG Xiaoye. Simulation research on control strategy of permanent magnet direct drive wind power generation system[J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering(Natural Science Edition)*, 2020, 30(02): 20-25(in Chinese).
- [16] 熊健, 康勇, 张凯, 等. 电压空间矢量调制与常规SPWM的比较研究[J]. 电力电子技术, 1999, 33(1): 25-28.  
XIONG Jian, KANG Yong, ZHANG Kai, *et al.* Comparison study of voltage space vector PWM and conventional SPWM[J]. *Power Electronical Technology*, 1999, 33(1): 25-28(in Chinese).
- [17] 王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000, 18(4): 348-351.  
WANG Jifang, LU Zhengding. The determine method of membership function in fuzzy control[J]. *Henan Sciences*, 2000, 18(4): 348-351(in Chinese).
- [18] BIBAVE R. Maximum power extraction from wind energy system by using perturbation and observation method[C]//2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS). IEEE, 2018: 105-110.
- [19] 翟兆睿. 分数阶粒子群算法及其在控制优化中的应用[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [20] OUSTALOUP A, LEVRON F, MATHIEU B, *et al.* Frequency-band complex noninteger differentiator: characterization and synthesis[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, 47(1): 25-39.

收稿日期: 2022-07-06

作者简介:

姜礼洁(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为发电系统建模、仿真与优化控制, E-mail: [15133069219@163.com](mailto:15133069219@163.com);

王晓燕(1982), 女, 博士研究生, 讲师, 通信作者, 研究方向为电力生产过程建模、仿真与优化控制, E-mail: [wxyncpeu@126.com](mailto:wxyncpeu@126.com);

苏杰(1967), 女, 硕士研究生, 教授, 研究方向为先进检测技术与控制策略, E-mail: [sjzjn@126.com](mailto:sjzjn@126.com);

张镇韬(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为发电企业信息化与智能化技术, E-mail: [13292995236@163.com](mailto:13292995236@163.com)。