

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181480

## 基于超扭曲优化算法的风机最大功率跟踪控制

曹松青<sup>1</sup>, 郝万君<sup>1</sup>, 郝诗源<sup>2</sup>, 陈歆婧<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 孙志辉<sup>1</sup>

(1. 苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

2. 丹麦科技大学电气工程系, 哥本哈根 灵比 999017)

**摘要:** 针对风力发电系统在低风速区采用传统控制方法具有风能转换效率较低、风轮转速跟踪实时风速的性能较差、发电机转矩波动范围较大等问题, 提出了一种将超扭曲算法与最佳转矩法相结合的最大功率跟踪改进控制策略。为进一步改善控制性能, 采用粒子群算法对控制器参数进行优化。最后以风轮角速度、发电机输出功率、发电机转矩、功率系数等为评价指标, 通过 Matlab/Simulink 平台验证所提方法的可行性与有效性。仿真结果表明, 所提控制策略在提高最大风能捕捉能力的同时可有效地抑制发电机转矩的抖振。

**关键词:** 超扭曲算法; 风力发电机组; 最大功率跟踪; 粒子群算法; 抖振

### Maximum power tracking control of wind turbine based on super twisting optimization algorithm

CAO Songqing<sup>1</sup>, HAO Wanjun<sup>1</sup>, HAO Shiyuan<sup>2</sup>, CHEN Xinjing<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, SUN Zhihui<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby 999017, Denmark)

**Abstract:** When traditional control methods are used in low-speed region of wind power generation power systems, there are several problems including low efficiency of wind energy conversion, poor performance of tracking wind speed, and large fluctuation range of generation torque, etc. Against these problems, an improved control strategy, which combines super twisting algorithm with optimal torque method for maximum power point tracking, is proposed. In order to further improve the control performance, the particle swarm algorithm is used to optimize the controller parameters. Finally, the wind rotor angular velocity, generator output power, generator torque and power coefficient are used as evaluation indexes, and the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified on Matlab/Simulink platform. The simulation results show that the proposed control strategy can effectively suppress the chattering of generator torque while improving the capability of capturing the maximum wind energy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477109 and No. 61703296).

**Key words:** super twisting algorithm; wind turbine; maximum power point tracking; particle swarm algorithm; chattering

## 0 引言

风电机组的最大功率跟踪控制(MPPT)旨在控制风轮转速跟踪由实时风速所决定的最佳转速, 进而捕获更多风能<sup>[1]</sup>。由于风速随机变化, 常规的控制方法难以对其进行准确、实时的跟踪, 极易造成风能的浪费, 降低发电效率, 因此采取有效的控制策略显得尤为重要。

最大功率跟踪控制较为经典的控制方法有叶尖速比法、功率曲线法、最佳转矩法等<sup>[2]</sup>。叶尖速比

法的主要思想是使功率系数保持为最大值不变, 从而当风速变化的时候必须使风机转速与风速保持恒定的最佳叶尖速比<sup>[3]</sup>, 但它依赖于对风速的精确测量和叶尖速比曲线的准确度, 在实际应用中很难实现<sup>[3-4]</sup>。功率曲线法只考虑对应于不同风速的多个稳态工作点, 却忽略了多个稳态工作点之间的动态过程<sup>[5]</sup>。在工程实际中应用最为广泛的传统方法是最佳转矩法, 具有简单、易于实现的特点。然而, 该方法具有一定的局限性, 当风速较低或转动惯量较大时, 风轮转速跟踪的响应速度会下降, 导致功率系数  $C_p$  低于最佳功率系数  $C_{pmax}$ <sup>[1]</sup>。滑模控制由于在处理非线性、不确定性扰动等方面具有很大的优

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477109, 61703296)

势, 能够使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹运动, 且结构简单、响应快速, 因而成为研究的热点, 不少学者已将其应用于风机的最大功率跟踪控制。文献[1]在最佳转矩法的基础上设计出一种滑模变结构控制器, 缩短了系统的调节时间, 但是需要额外采取措施来抑制抖振。文献[3,6]将滑模变结构控制的思想引入发电机的控制中, 以实现风力发电机组的最大功率跟踪控制, 但其侧重于电机的电磁特性, 而本文重点研究风电机组的机械特性。文献[7]将积分滑模控制用于低风速区实现最大风能捕获, 以消除稳态误差, 提高鲁棒性, 但未提出具体的抑制抖振的措施。文献[8]采用高阶滑模控制器进行功率控制, 增强了系统的鲁棒性, 但没有强调转速跟踪的效果。文献[9-10]将超扭曲算法用于风机最大风能捕捉, 提高了系统的响应速度, 具有更强的鲁棒性, 但未依据工程要求对参数进一步优化。

针对上述问题, 本文设计了基于超扭曲算法的最佳转矩改进控制策略。为进一步对系统的控制性能进行优化, 采用粒子群优化算法对控制器参数进行迭代寻优。最后在 Matlab/Simulink 平台下进行仿真, 仿真分析结果验证了理论分析的正确性<sup>[11]</sup>。

## 1 风力发电系统模型

风力发电系统主要由空气动力系统、传动系统、发电机系统等部分组成。

### 1.1 空气动力系统模型

空气动力系统的核心设备是风轮, 风轮的叶片捕获风能并将其转化为动能<sup>[12]</sup>。当外部风速为  $v$  时, 风轮捕捉的有效功率为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮的半径;  $v$  为风速;  $C_p$  为风能利用系数, 它与叶尖速比  $\lambda$ 、桨距角  $\beta$  成非线性关系, 特性曲线如图 1 所示。叶尖速比  $\lambda$  的定义为

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \quad (2)$$

式中,  $\omega_r$  为风轮角速度。

由  $P_a = T_a \omega_r$  可知, 风轮所获得的气动转矩为<sup>[13]</sup>

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_Q(\lambda, \beta) \quad (3)$$

其中,

$$C_Q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4)$$

### 1.2 传动系统模型

传动系统由高速轴和低速轴通过齿轮箱相互连

接而组成。在忽略轴系刚度和阻尼系数情况下, 传动系统通常表现成一个等效质量块, 可用如下单质量块模型加以描述<sup>[1,14]</sup>。

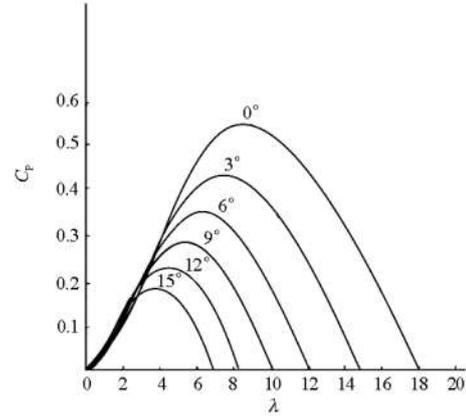


图 1 风力机  $C_p - \lambda$  关系曲线

Fig. 1  $C_p - \lambda$  curve of wind turbine

$$\begin{cases} B\omega_r + J\dot{\omega}_r = T_a - n_g T_g \\ B = B_r + n_g^2 B_g \\ J = J_r + n_g^2 J_g \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $B_r$  和  $B_g$  分别为低速轴和高速轴的阻尼系数;  $J_r$  和  $J_g$  分别为低速轴和高速轴的转动惯量;  $n_g$  为齿轮箱的传动比;  $T_g$  为发电机转矩。

### 1.3 风力发电机模型

本文采用双馈异步发电机, 为简便起见, 可将其电磁部分简化为一个一阶线性模型<sup>[3,6]</sup>。

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{1}{\tau_g} T_g + \frac{1}{\tau_g} T_{g,\text{ref}} \quad (6)$$

式中:  $\tau_g$  为转矩系数;  $T_{g,\text{ref}}$  为发电机转矩的参考值。

发电机的输出功率可表示为

$$P_e = T_g \omega_g \quad (7)$$

式中,  $\omega_g$  为发电机角速度。

由于本控制器设计以转矩的参考值  $T_{g,\text{ref}}$  为主要控制量, 所以可将发电机电磁动态的影响作为扰动  $\psi$  加到风机模型<sup>[1]</sup>, 即

$$T_g = T_{g,\text{ref}} + \psi \quad (8)$$

## 2 控制器设计

### 2.1 控制目标

根据风速的高低, 通常将风电机组的运行区域划分为四个部分<sup>[7]</sup>: 风速低于切入风速的区域、风速介于切入风速与额定风速之间的区域(低风速区)、风速接近额定风速的区域、风速高于额定风速的区域(高风速区), 其中, 高风速区和低风速区为系统运行的典型工作区。高风速区的主要控制目标

是使风机输出功率维持在其额定值, 低风速区的主要控制目标则是使风机输出功率最大化。本文针对低风速区设计控制器, 此时桨距角保持不变(通常在 $0^\circ$ 附近)。由式(1)可见, 当风速给定时, 风轮从风中捕捉的有效功率取决于功率系数。由图 1 和式(2)可知, 风速变化时, 只要调节风轮转速 $\omega_r$ , 使风轮的叶尖速比保持最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$ (本文中选取的风电机组的最佳叶尖速比为 $\lambda_{opt}=9.031$ ), 可使风电机组具有最大功率系数 $C_{Pmax}$ 。此时,  $\omega_r = \omega_{ref} = \lambda_{opt} \hat{v} / R$ ,  $\hat{v}$ 为有效风速的估计值, 由于湍流风具有随机性, 风速在整个风轮扫掠面上不断变化, 难以直接精确测量, 因此需要对有效风速进行估计。

本文基于发电机转矩 $T_g$ 和发电机角速度 $\omega_g$ 的采样数据, 利用卡尔曼滤波算法<sup>[15]</sup>对气动转矩 $T_a$ 和风轮角速度 $\omega_r$ 进行估计, 得到其估计值 $\hat{T}_a$ 和 $\hat{\omega}_r$ , 然后通过牛顿-拉夫逊算法得到有效风速的估计值 $\hat{v}$ 。 $\hat{v}$ 的获取过程涉及如下关系式<sup>[8]</sup>。

$$\begin{cases} \hat{T}_a - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\hat{\lambda}) \hat{v}^2}{\hat{\lambda}} = 0 \\ \hat{\lambda} = \frac{\hat{\omega}_r R}{\hat{v}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $C_p(\hat{\lambda}) = C_p(\hat{\lambda}, \beta_{opt})$ 可用如式(10)方法近似获得数值解。

$$C_p(\hat{\lambda}) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \hat{\lambda}^i \quad (10)$$

式中,  $\alpha_i$ 为近似系数。通常 $n$ 取5时可以取得较高精度, 此时 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 的取值如表1所示<sup>[7]</sup>。

表1 近似系数取值

Table 1 Value of approximate coefficient					
$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
0.166 7	-0.255 8	0.115	$-1.617 \times 10^{-2}$	$9.5 \times 10^{-4}$	$-2.05 \times 10^{-5}$

由式(9)、式(10)可以解得:

$$\hat{v} = \sqrt[3]{2 \hat{\omega}_r \hat{T}_a / (\rho \pi R^2 \sum_{i=0}^n \alpha_i \hat{\lambda}^i)} \quad (11)$$

式中, 参数 $\hat{\lambda}^i$ 通过迭代运算求得。

## 2.2 常规最大功率跟踪控制

### 2.2.1 传统的最佳转矩控制

由于风速测量具有不可靠性, 导致转速与风速之间的对应关系难以建立, 所以传统最佳转矩控制大多采用发电机角速度或风轮角速度代替风速进行反馈调节, 其控制律可表示为<sup>[1,8]</sup>

$$T_{g,ref} = \frac{K_{opt} \omega_g^2}{n_g^3} - \frac{B \omega_g}{n_g^2} \quad (12)$$

式中,  $K_{opt}$ 为转矩最佳控制系数, 与最大功率系数

及最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$ 有关, 其表达式为

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{opt}^3}$$

该方法不依赖于对风速的测量或估计, 简单、易操作, 但是需要依靠风机系统自身的特性进行反馈调节, 具有一定的滞后性, 在一定程度上限制了对发电机转速的调节速度。

### 2.2.2 常规滑模-最佳转矩控制

将滑模变结构控制的思想引入最佳转矩法, 即在式(12)的基础上加上切换项 $k \operatorname{sgn}(s)$ 可得常规滑模-最佳转矩控制<sup>[1]</sup>。

$$T_{g,ref} = \frac{K_{opt} \omega_g^2}{n_g^3} - \frac{B \omega_g}{n_g^2} + k \operatorname{sgn}(s) \quad (13)$$

式中,  $s$ 为滑模面, 其定义见式(14)。该方法由于引入了切换项 $k \operatorname{sgn}(s)$ , 可以确保状态变量收敛到滑模面, 从而可以提高转速跟踪的性能, 但由于切换项是不连续的, 导致控制的不连续性, 所以在高频切换时会产生比较明显的抖振现象。

## 2.3 基于超扭曲算法的最大功率跟踪控制

超扭曲算法是一种高阶滑模算法, 它不仅保留了常规滑模控制的优点, 而且具有鲜明的特点: 可以有效抑制抖振现象<sup>[16]</sup>, 在有界的外部干扰作用下具有较好的跟踪性能和较强的鲁棒性<sup>[17]</sup>。为了在快速跟踪风速变化、提高风能利用率的同时有效抑制发电机转矩的抖振, 从而减轻机组的疲劳载荷, 本文将超扭曲算法引入最佳转矩法。

### 2.3.1 滑模面的定义

滑模控制的基本原理是根据系统当前的状态有目的地改变系统的“结构”, 通过控制律的设计使得系统最终稳定在滑模面附近并做小幅度的高频切换<sup>[18-19]</sup>。

由2.1节内容可知, 要实现风电机组在低风速区的控制目标, 必须使风轮角速度 $\omega_r(t)$ 实时跟踪参考角速度 $\omega_{ref}(t)$ , 为了使风轮角速度与参考角速度的误差以及误差的变化率在有限时间内收敛到0, 可定义滑模面为

$$\begin{aligned} s(t) &= ce(t) + \dot{e}(t) = \\ & c(\omega_r - \omega_{ref}) + (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{ref}) = \\ & \dot{\omega}_r + c\omega_r - c\omega_{ref} - \dot{\omega}_{ref} \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $c > 0$ ;  $e(t)$ 为风轮角速度与参考角速度的误差。

### 2.3.2 基于超扭曲算法的改进最佳转矩(STC-OT)控制器设计

通过设计STC-OT控制器来控制发电机转矩参考值 $T_{g,ref}$ , 使风轮角速度 $\omega_r$ 更快地跟踪目标角速度 $\omega_{ref}$ , 以更好地保持风机最佳叶尖速比<sup>[20]</sup>, 从而确

保更优越的最大功率跟踪性能。整个控制系统的结构如图2所示。

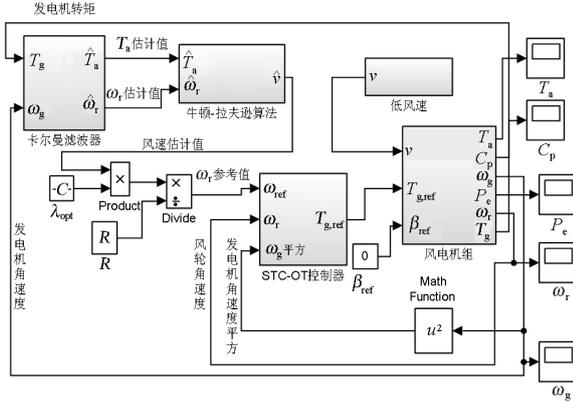


图2 风机控制系统结构图

Fig. 2 Control system structure of wind turbine

利用最佳转矩控制实现对发电机角速度的闭环反馈调节,使发电机角速度自行趋近最佳角速度,为了提高响应速度,考虑引入滑模变结构控制的思想。因高阶滑模控制既保留了常规滑模控制的优点又能有效抑制常规滑模控制普遍具有的抖振现象,其中的超扭曲算法更是得到了广泛应用。为此,在最佳转矩控制的基础上引入超扭曲算法,得到改进最佳转矩控制的控制律:

$$u = T_{g,ref} = u_{eq} + u_{sw} \quad (15)$$

$$u_{eq} = \frac{K_{opt} \omega_g^2}{n_g^3} - \frac{B \omega_g}{n_g^2} = \frac{\rho \pi R^5 C_{p,max}}{2 \lambda_{opt}^3 n_g^3} \omega_g^2 - \frac{B \omega_g}{n_g^2} \quad (16)$$

$$u_{sw} = -\gamma_1 |s|^d \text{sign}(s) - \int_0^t \gamma_2 \text{sign}(s) d\tau \quad (17)$$

上式由等效控制 \$u\_{eq}\$ 和切换控制 \$u\_{sw}\$ 两部分组成,前者对应于原来的最佳转矩控制,用来控制风机系统最基本的行为—转速调节;后者对应于变结构控制,即超扭曲算法,用来解决风电机组模型参数摄动和外部扰动不确定性产生的影响,从而进一步提高转速快速跟踪风速变化的性能。其中, \$u\_{sw}\$ 的第一项为滑模变量的非线性不连续函数,可以使风机系统更好地收敛于滑模面。\$0 < d < 1\$, 当 \$d\$ 接近 0 时,控制器的滑模效果会增强,相当于常规的滑模控制器,虽能提高转速跟踪性能,但抖振比较明显;当 \$d\$ 接近 1 时,控制器接近 PI 调节器,虽能消除抖振但超调会产生得更加频繁,影响转速跟踪效果<sup>[21]</sup>。为了在提高转速跟踪性能的同时有效抑制发电机转矩抖振,本文折衷选取 \$d=1/2\$。\$u\_{sw}\$ 的第二项将不连续的符号函数求积分,成为连续函数,一方面加快了风机系统收敛到滑模面的速度,另一方

面不会产生抖振。\$\gamma\_1\$、\$\gamma\_2\$ 为待选定的控制器参数,可通过以下步骤求取。

考虑式(5)、式(6),可推出式(14)的一阶导数:

$$\dot{s}(t) = c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = c(\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{ref}) + (\ddot{\omega}_r - \ddot{\omega}_{ref}) = \Gamma + \left(\frac{Bn_g}{J^2} - \frac{cn_g}{J}\right)T_{g,ref} \quad (18)$$

其中,

$$\Gamma = \left(\frac{c}{J} - \frac{B}{J^2}\right)T_a + \left(\frac{n_g}{J\tau_g} + \frac{Bn_g}{J^2} - \frac{cn_g}{J}\right)\psi + \left(\frac{B^2}{J^2} - \frac{CB}{J}\right)\omega_r - c\dot{\omega}_{ref} + \frac{1}{J}\dot{T}_a - \ddot{\omega}_{ref}$$

由于本文的控制量是发电机转矩的参考值 \$T\_{g,ref}\$, 可以将 \$\Gamma\$ 视为扰动。进行状态变换, 令

$$y = \Gamma - \frac{cK_{opt}\omega_g^2}{Jn_g^2} + \frac{CB\omega_g}{Jn_g} + \frac{cn_g}{J} \int_0^t \gamma_2 \text{sgn}(s) d\tau$$

并考虑式(15)一式(17), 则由式(18)可得:

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{cn_g}{J} \gamma_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) + y = \\ k\gamma_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) + y \\ \dot{y} = \frac{cn_g\gamma_2}{J} \text{sgn}(s) + \dot{\Gamma} - \frac{2cK_{opt}\omega_g\dot{\omega}_g}{Jn_g^2} + \frac{CB\dot{\omega}_g}{Jn_g} = \\ k\gamma_2 \text{sgn}(s) + \dot{\Gamma}_1 \end{cases} \quad (19)$$

其中,

$$k = \frac{cn_g}{J}, \quad \dot{\Gamma}_1 = \dot{\Gamma} - \frac{2cK_{opt}\omega_g\dot{\omega}_g}{Jn_g^2} + \frac{CB\dot{\omega}_g}{Jn_g}$$

将 \$\Gamma\_1\$ 视为扰动, 由于发电机角速度及其变化率等量均为有界函数, 所以扰动的一阶导数是有界函数, 即

$$|\dot{\Gamma}_1| \leq \Omega, \quad \forall t > 0, \quad \Omega > 0 \quad (20)$$

为了使风机系统在有限时间内收敛到滑模面, 需要确定其稳定域, 从而需要确定控制器参数 \$\gamma\_1\$、\$\gamma\_2\$ 的取值范围, 便于后续参数寻优。为此, 选择 Lyapunov 函数为 \$V(s, y) = \eta^T M \eta\$。

其中, \$\eta = [\eta\_1 \ \eta\_2]^T = [|s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) \ y]^T\$,

$$M = \begin{bmatrix} -2k\gamma_2 + \frac{1}{2}k^2\gamma_1^2 & \frac{1}{2}k\gamma_1 \\ \frac{1}{2}k\gamma_1 & 1 \end{bmatrix} > 0。$$

采用文献[9]类似的证明方法, 选取合适的参数, 使 Lyapunov 函数的导数小于零, 即可保证系统在有限时间内收敛到滑模面。此时 \$\gamma\_1\$ 和 \$\gamma\_2\$ 满足如下条件:

$$\begin{cases} \gamma_1 < -\frac{2}{k} = -\frac{2J}{cn_g} \\ \gamma_2 < \frac{k}{2}\gamma_1^2 + \frac{1}{4}\gamma_1 + \frac{\Omega^2}{k^2\gamma_1} = \\ \frac{cn_g}{2J}\gamma_1^2 + \frac{1}{4}\gamma_1 - \frac{J^2\Omega^2}{c^2n_g^2\gamma_1} \end{cases} \quad (21)$$

只要控制器参数  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  处于上式给出的范围内, 即可保证整个风机控制系统的稳定性和基本的控制性能。若想取得更好的控制性能, 需在式(21)所给定区间内对  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  参数值进一步优化。

### 2.3.3 粒子群算法整定控制器参数

控制性能的优劣很大程度上取决于式(17)中的控制器参数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ , 所以对  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  的合理选取显得尤为重要。式(21)只给出了参数的取值范围, 不能保证性能最优, 为了在实际应用中获得最优的控制性能, 本文拟采用粒子群算法在式(21)给出的范围内依据工程要求对参数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  进行进一步优化, 以提升控制系统的综合性能。

由于本文所提控制策略要实现的目标是使风轮转速快速跟踪参考值, 使发电机输出功率最大化, 同时抑制发电机转矩的抖振, 所以定义如下目标函数作为粒子群算法的适应度函数。

$$J_{\min} = \int_0^{t_1} [-w_1 P_e + w_2 t |e(t)| + w_3 \text{std}(T_g)] dt \quad (22)$$

式中:  $t_1$  为完成单次仿真的时间;  $P_e$  为发电机输出功率;  $e(t)$  为风轮角速度跟踪误差;  $\text{std}(T_g)$  为发电机转矩的标准差;  $w_1 \sim w_3$  为加权系数, 可根据实际情况进行相应调整。第一个积分项用于实现发电机输出功率的最大化, 第二个积分项用于确保风轮转速在最短的时间内实现跟踪误差最小化, 第三个积分项用于实现发电机转矩抖振的最小化。

粒子群算法是一种基于迭代的优化算法, 系统初始化为一组随机解, 通过迭代搜寻最优值。记群体中任意粒子  $i$  的位置为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{im})$ , 速度为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{im})$ , 且该粒子所经历过的最好位置为  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{im})$ , 群体所经历过的最好位置为  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gn})$ , 则粒子的速度与位置由如下的更新方程决定:

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (23)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (24)$$

式中:  $v_{id}(t)$ 、 $x_{id}(t)$  为  $t$  时刻粒子  $i$  第  $d$  维的速度和位置;  $v_{id}(t+1)$ 、 $x_{id}(t+1)$  为  $t+1$  时刻粒子  $i$  第  $d$  维的速度和位置;  $w$  称为惯性权重因子, 其取值范围

为 0.4~0.9<sup>[22]</sup>;  $c_1$  和  $c_2$  分别称为认知学习因子和社会学习因子, 一般取值为 0.5<sup>[22]</sup>;  $r_1$  和  $r_2$  为相互独立的随机数, 它们在 [0,1] 区间内服从均匀分布。

综上所述, 整个控制算法的流程如下:

步骤 1 在式(21)的范围内对控制器参数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  进行初始化赋值。

步骤 2 根据系统的运行特性所确定的  $C_{p\max}$  和  $\lambda_{\text{opt}}$  根据式(16)计算  $u_{\text{eq}}$ 。

步骤 3 利用式(14)计算滑模面  $s$ 。

步骤 4 利用式(17)计算  $u_{\text{sw}}$ 。

步骤 5 结合步骤 2、步骤 4, 利用式(15)可求取总的控制律。

步骤 6 风电控制系统运行仿真, 根据式(22)计算适应度函数值。

步骤 7 粒子群算法按照适应度函数最小的原则在系统的稳定域内对控制器参数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  进行反复迭代寻优。

步骤 8 当达到最大迭代次数或满足最小精度时, 给出最佳控制器参数  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ , 否则返回步骤 1。

## 3 仿真分析

为验证所提方案的有效性与合理性<sup>[23]</sup>, 在 Matlab/Simulink 中搭建风力发电系统的模型, 风力发电机组的主要参数取值如表 2 所示。

表 2 风电机组的主要参数

Table 2 Main parameters of wind turbine

参数	数值
齿轮箱变比 $n_g$	97
风轮转动惯量 $J_r$ /(kg·m <sup>2</sup> )	5.915 7×10 <sup>7</sup>
发电机转动惯量 $J_g$ /(kg·m <sup>2</sup> )	534.116
风轮直径 $D$ /m	129
空气密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	1.225

采用美国国家能源部可再生能源实验室开发的 TURBSIM 软件生成平均风速为 7 m/s、湍流强度为 A 类级别、时长为 400 s 的风速序列, 如图 3(a)所示。利用 2.1 中所述方法进行风速估计, 由图 3(a)可见, 估计风速  $v_{\text{estimate}}$  与实际风速  $v_{\text{real}}$  相比虽具有一定的滞后性, 但估计精度较高, 且均方差只有 0.095 6。

在上述实验条件下进行仿真, 将本文所提方法 (STC-OT) 与传统最佳转矩控制 (OT) 和常规滑模-最佳转矩控制 (SMC-OT) 的效果进行对比, 如图 3 和表 3 所示。

本文选取滑模面参数  $c = 50$ , 选择粒子种群数为 50, 学习因子  $c_1 = c_2 = 0.5$ , 粒子群算法经过 30 余次循环的迭代使得寻优参数趋于稳定, 最终得到最佳的控制器参数值为:  $\gamma_1 = -3.875 \times 10^4$ ;  $\gamma_2 = -605.335$ 。

图 3(b)和图 3(c)分别为风轮角速度曲线和发电机角速度曲线,可见,三种控制策略均能使风轮角速度和发电机角速度跟踪其参考曲线。OT、SMC-OT、STC-OT 的风轮角速度平均跟踪误差(AVG( $e$ ))的数值分别为 0.012 5、0.006 7、-0.002 4,说明 STC-OT 的转速跟踪效果更好。

发电机输出功率曲线和功率系数曲线如图 3(d)和图 3(e)所示,性能对比数据如表 3 所示,OT、SMC-OT、STC-OT 的发电机平均输出功率(AVG( $P_e$ ))分别为  $1.949 1 \times 10^6$ 、 $1.986 2 \times 10^6$ 、 $2.034 9 \times 10^6$ ,可见,采用 STC-OT 时发电机平均功率比采用 OT 时提高了 4.40%,比采用 SMC-OT 时提高了 2.45%,平均功率系数比采用 OT 时提高了 4.39%,比采用 SMC-OT 时提高了 2.12%,说明常规的滑模控制和超扭曲控制均能提高风能利用效率,但超扭曲控制更胜一筹。

图 3(f)为发电机转矩曲线,可见,相对于 SMC-OT 而言,STC-OT 使发电机转矩的标准差 STD( $T_g$ )减小了 10.8%,说明超扭曲滑模控制可有效抑制常规滑模控制普遍具有的抖振现象。

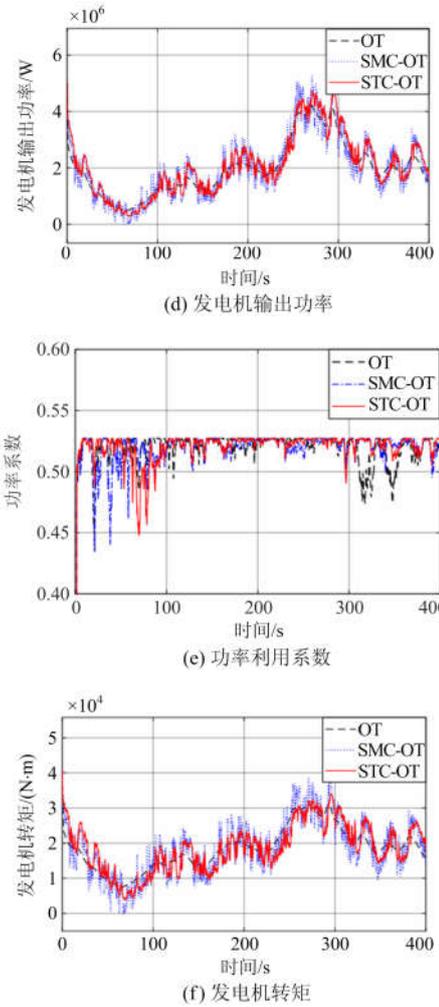
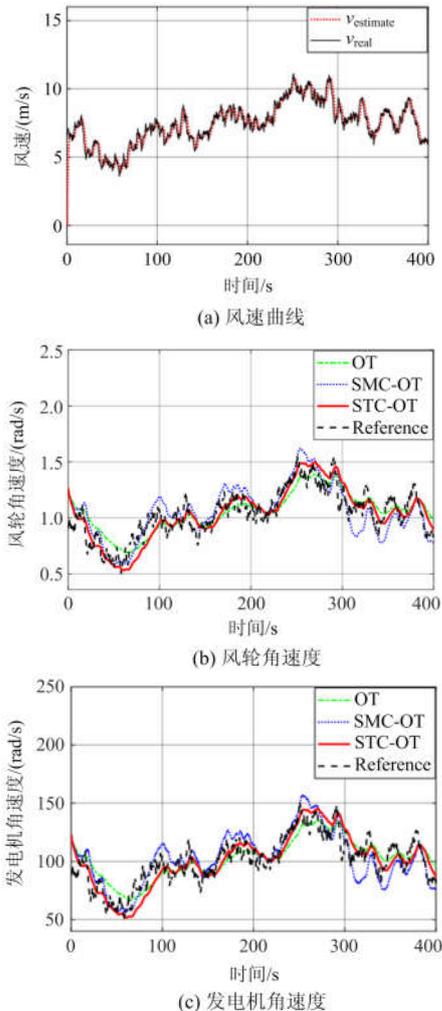


图 3 仿真实验曲线图

Fig. 3 Simulation experiment graph

表 3 三种方法的控制性能对比

Table 3 Comparison of control performance of the three methods

	AVG( $e$ )	AVG( $P_e$ )	AVG( $C_p$ )	STD( $T_g$ )
OT	0.012 5	$1.949 1 \times 10^6$	0.499 1	$5.537 6 \times 10^3$
SMC-OT	0.006 7	$1.986 2 \times 10^6$	0.509 7	$7.175 2 \times 10^3$
STC-OT	-0.002 4	$2.034 9 \times 10^6$	0.521 0	$6.396 2 \times 10^3$

#### 4 结论

本文将超扭曲算法与最佳转矩法相结合,提出了风机最大功率跟踪的改进控制策略,并采用粒子群算法对控制器的参数进行寻优。仿真结果表明,本文所提的方法不但具有常规滑模控制提高风能转换效率的功能,而且改善了常规滑模控制普遍具有的抖振现象,在实际工程中,有利于提高发电质量、减轻机组疲劳载荷、延长风机的使用寿命。

## 参考文献

- [1] 陈载宇, 殷明慧, 蔡晨晓, 等. 一种实现风力机 MPPT 控制的加速最优转矩法[J]. 自动化学报, 2015, 41(12): 2047-2057.  
CHEN Zaiyu, YIN Minghui, CAI Chenxiao, et al. An accelerated optimal torque control of wind turbines for maximum power point tracking[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(12): 2047-2057.
- [2] ABDULLAH M A, YATIM A H M, TAN C W, et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 3220-3227.
- [3] BELTRAN B, BENBOUZID M E H, 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.
- [4] 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.
- [5] 殷明慧, 蒯狄正, 李群, 等. 风机最大功率点跟踪的失效现象[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 40-47.  
YIN Minghui, KUAI Dizheng, LI Qun, et al. A phenomenon of maximum power point tracking invalidity of wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 40-47.
- [6] CHIU C S, CHIANG T S, CHOU M L, et al. Maximum power point tracking of wind power systems via fast terminal sliding mode control[C] // 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), June 18-20, 2014, Taichung, Taiwan: 809-814.
- [7] SARAVANAKUMAR R, JENA D. Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 421-429.
- [8] MÉRIDA J, AGUILAR L T, DÁVILA J. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization[J]. Renewable Energy, 2014, 71(11): 715-728.
- [9] LIU Xiangjie, HAN Yaozhen, WANG Chengcheng. Second-order sliding mode control for power optimization of DFIG-based variable speed wind turbine[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(2): 408-418.
- [10] ZARGHAM F, MAZINAN A H. Super-twisting sliding mode control approach with its application to wind turbine systems[J]. Energy Systems, 2018(3): 1-19.
- [11] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.  
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 84-91.
- [12] 王皓怀, 陈懿, 王坚, 等. 电压跌落故障下的双馈型风力发电机动态响应特性分析[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 14-19.  
WANG Haohuai, CHEN Yi, WANG Jian, et al. Study on dynamic response characteristics of DFIG-based wind turbines under grid voltage drop[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 14-19.
- [13] SOLIMAN M, MALIK O P, WESTWICK D T. Multiple model MIMO predictive control for variable speed variable pitch wind turbines[C] // Proceedings of the 2010 American Control Conference, June 30 - July 2, 2010, Baltimore, MD, USA: 2778-2784.
- [14] 古庭赟, 张羽, 赵阳羊, 等. 适用于电力系统动态分析的双馈式感应风机模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 13-20.  
GU Tingyun, ZHANG Yu, ZHAO Yangyang, et al. Model of doubly-fed induction generator applicable to power system dynamic analysis[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 13-20.
- [15] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 149-162.
- [16] 宋争光, 夏长亮, 王志强, 等. 基于超扭曲算法的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2017,

- 32(15): 89-99.  
SONG Zhengguang, XIA Changliang, WANG Zhiqiang, et al. Direct torque control for permanent magnet synchronous motor using super twisting algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 89-99.
- [17] DERAFA L, BENALLEGUE A, FRIDMAN L. Super twisting control algorithm for the attitude tracking of a four rotors UAV[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(2): 685-699.
- [18] 付兴建, 于士贤. GBF-CMAC 和滑模控制的柔性结构系统控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(5): 791-798.  
FU Xingjian, YU Shixian. Flexible plant system control based on GBF-CMAC and sliding mode control[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(5): 791-798.
- [19] 王年, 陈辉, 丁大为, 等. 基于 RBF 神经网络滑模控制的互联电力系统混沌控制研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(5): 911-920.  
WANG Nian, CHEN Hui, DING Dawei, et al. RBF neural network based sliding mode controller and its application to chaos control in interconnected power system[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2018, 54(5): 911-920.
- [20] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.  
LIU Shihan, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Research on low-voltage ride through capability of permanent magnetic synchronous offshore wind power based on super-capacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15.
- [21] 万东灵, 赵朝会, 王飞宇, 等. 基于 Super-twisting 滑模永磁同步电机驱动的转速和转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 42-47.  
WAN Dongling, ZHAO Chaohui, WANG Feiyu, et al. Super-twisting sliding mode control of speed and torque in permanent magnet synchronous machine drives[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(10): 42-47.
- [22] 彭道刚, 陈跃伟, 钱玉良, 等. 基于粒子群优化-支持向量回归的变压器绕组温度软测量模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1742-1749.  
PENG Daogang, CHEN Yuewei, QIAN Yuliang, et al. Transformer winding temperature soft measurement model based on particle swarm optimization-support vector regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1742-1749.
- [23] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等. 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 34-42.  
WANG Yongqiang, YU Junzhi, FENG Jing'an, et al. Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 34-42.

收稿日期: 2018-11-25; 修回日期: 2019-01-18

作者简介:

曹松青(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电系统建模与控制、光电检测与传感技术; E-mail: 2035784358@qq.com

郝万君(1965—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统的建模、控制与优化, 新能源发电系统自动控制, 无线传感网技术等。E-mail: hao\_wanjun@163.com

(编辑 张爱琴)