

1-2-2019

## A MPPT Control Method of Wind Turbines with Nonsingular and Fast Terminal Sliding Mode

Dazhong Li

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Wu Feng

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## A MPPT Control Method of Wind Turbines with Nonsingular and Fast Terminal Sliding Mode

### Abstract

**Abstract:** In order to improve the energy capture efficiency of doubly-fed induction generator (DFIG), a control method is designed based on direct speed control (DSC) to achieve maximum power point tracking (MPPT). *An effective wind speed estimator based on high-degree cubature Kalman filter (HCKF) and Newton-Raphson method (NR) is proposed for solving the difficulty in obtaining effective wind speed using traditional control strategy. A speed controller based on nonsingular fast terminal sliding mode surface is designed to obtain a faster speed response for the speed loop.* The numerical simulation research of the 2.4MW wind turbine under rapidly variable wind conditions is carried out. The simulation results show that the improved control method can estimate the effective wind speed accurately and achieve better MPPT compared with the traditional control strategy.

### Keywords

wind turbine, MPPT, high-degree cubature Kalman filter, nonsingular fast terminal sliding mode control

### Recommended Citation

Li Dazhong, Wu Feng. A MPPT Control Method of Wind Turbines with Nonsingular and Fast Terminal Sliding Mode[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1109-1117.

## 一种风电机组非奇异快速终端滑模 MPPT 控制方法

李大中, 邬峰

(华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为提高双馈风力发电机组的风能捕获效率, 设计了一种基于直接速度控制(DSC)的MPPT控制方法。针对传统直接速度控制策略中有效风速难以获得的问题, 该方法采用高阶容积卡尔曼滤波(HCKF)和牛顿拉夫逊方法(NR)设计了有效风速估计器; 针对转速环响应速度慢的问题设计了以非奇异快速终端滑模面为基础的转速控制器。以2.4 MW风电机组作为研究对象, 在快速变化风况激励下, 对风电机组的动态响应进行了仿真研究, 结果表明改进的控制方法可以准确估计有效风速, 与传统控制策略相比可以更好的实现最大功率跟踪。

**关键词:** 风电机组; MPPT; 高阶容积卡尔曼滤波; 非奇异快速终端滑模

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1109-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803043

## A MPPT Control Method of Wind Turbines with Nonsingular and Fast Terminal Sliding Mode

Li Dazhong, Wu Feng

(Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to improve the energy capture efficiency of doubly-fed induction generator (DFIG), a control method is designed based on direct speed control (DSC) to achieve maximum power point tracking (MPPT). An effective wind speed estimator based on high-degree cubature Kalman filter (HCKF) and Newton-Raphson method (NR) is proposed for solving the difficulty in obtaining effective wind speed using traditional control strategy. A speed controller based on nonsingular fast terminal sliding mode surface is designed to obtain a faster speed response for the speed loop. The numerical simulation research of the 2.4MW wind turbine under rapidly variable wind conditions is carried out. The simulation results show that the improved control method can estimate the effective wind speed accurately and achieve better MPPT compared with the traditional control strategy.

**Keywords:** wind turbine; MPPT; high-degree cubature Kalman filter; nonsingular fast terminal sliding mode control

### 引言

风能的捕获效率不仅与风力发电机组有关, 还

与所采用的控制策略有关, 良好的控制策略可以使叶桨系统始终运行在最佳叶尖速比附近。实现最大功率跟踪(MPPT)的常用方法有: 1) 间接速度控制(ISC): 将每个风速值对应最大风能跟踪曲线上的电磁转矩值作为电磁转矩指令值, 并且利用变速风机在这条曲线附近的动态稳定的自然特性实现最大风能跟踪; 2) 直接速度控制(DSC): 根据叶尖速



收稿日期: 2016-03-07

修回日期: 2016-05-06;

作者简介: 李大中(1961-), 男, 内蒙包头, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电技术; 邬峰(1991-), 男, 山西忻州, 硕士, 研究方向为风电机组控制优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 1109 •

比的定义,叶浆系统最优旋转速度可以根据有效风速获得,将其作为转速设定值,即可实现最大风能跟踪。

ISC 由于其不需要准确的风速检测,且在任意运行点处都是动态稳定的,因此在工作点处受到干扰偏离工作点时,ISC 都会使其回到原来的运行点,因此其抗干扰能力很强。基于以上优势,ISC 被广泛应用于商业风机。然而基于 ISC 的控制并没有考虑到风速的动态特性,只有在稳态时,电磁转矩和转速的行为才是一致的,因此,该控制系统会有固定的软响应,使得其最大风能追踪存在一定滞后。

DSC 控制将风速的动态过程考虑进去,其动态调节速度要快于 ISC,但有效风速的值在实际中是很难获得的,因为在实际应用中,叶轮的面积较大,在整个叶轮面积内,并不是每一位置的风速都是一致的,风速检测的误差较大,实时性也不能保证,用来计算转速指令会有很大误差<sup>[1]</sup>。

为了实现 DSC 控制,文献[2]提出了一种控制策略,基于状态观测器原理,根据可以测量的变量,估算出叶浆系统气动转矩的大小,继而计算出有效风速。如何估算出气动转矩是该方法的关键,国内外学者对其进行了大量的研究,文献[3]采用支持向量机对有效风速进行观测。文献[4]使用扩张状态观测器对气动转矩进行观测。文献[5]使用极大似然估计法对有效风速进行估计。文献[6]使用扩展卡尔曼滤波器对气动转矩进行估计。文献[7]使用自适应模糊神经网络对有效风速进行软测量。文献[8]应用 BP 神经网络对有效风速进行估计。

扩展卡尔曼滤波(EKF)是目前应用比较广泛的一种非线性滤波方法,该方法将非线性系统在滤波值处展开成 Taylor 级数并忽略二阶以上项,得到近似线性化模型,然后应用线性卡尔曼进行估计。但对于不确定性较大的非线性系统,该方法不能保证收敛,且在计算过程中,需要计算状态方程的雅克比矩阵,增加了计算难度。为了提高 EKF 的估计性能,无迹卡尔曼滤波<sup>[9]</sup>(UKF)和容积卡尔曼滤波<sup>[10]</sup>(CKF)相继被提出。文献[11]将 UKF 和滑模观

测器相结合,并应用于农用履带机器人的控制中。文献[12]将 CKF 和强跟踪滤波算法相结合,并应用于目标跟踪中,取得了较好的效果。但是,有学者指出,UKF 和 CKF 均为三阶滤波方法,所以估计精度有限<sup>[13]</sup>。基于上述问题,Jia 等<sup>[14]</sup>基于 Genz 积分方法和距匹配法提出了高阶容积卡尔曼滤波方法(HCKF),并将其应用到三维空间中的目标跟踪系统中,结果表明 HCKF 方法能够以较小的计算代价得到更高的计算精度。文献[13]将 HCKF 与强跟踪算法相结合,并应用于具有未知机动的目标跟踪问题中。文献[15]将 Segal-Husa 估计器用于估计未知测量噪声的方差,并将其与 HCKF 算法结合用于二维平面目标的跟踪问题中。

滑模变结构控制(SMC)对模型精度要求不高,对系统内部参数的变化及外部扰动具有强鲁棒性等优点,成为国内外学者研究的热点领域。传统的线性滑模控制的误差是渐进收敛且抖振严重,适合控制精度要求不高的场合。为了进一步提高滑模控制的精度和收敛速度,Venkataraman 提出了终端滑模控制概念<sup>[16]</sup>,但是其存在奇异性的问题。针对这种问题,冯勇等人提出了非奇异终端滑模,有效解决了奇异问题<sup>[17]</sup>,然而这种控制方法存在远离平衡点的区域收敛速度较慢的问题。因此,近年来,非奇异快速终端滑模(NFTSMC)逐渐被大家所重视,李升波等人于文献[18]中对传统非奇异终端滑模面进行了改进,引入指数项函数,加快了远离平衡点区域的收敛速度。文献[19-20]将非奇异快速终端滑模用于永磁同步电机转速控制。文献[21]将自适应边界层与非奇异快速终端滑模相结合,并用于航天器姿态控制。

为了提高双馈风力发电系统的风能吸收效率,本文在前人工作成果的基础上,将双馈风机模型与 HCKF 相结合,对叶浆系统气动转矩进行了实时估计,进而应用 NR 方法得到了有效风速的估计值,可以在不进行风速测量的情况下,实现 DSC 控制。同时基于 NFTSMC 设计了转速控制器,可使转速在有限时间内收敛。为了验证其控制效果,建立了

双馈风力发电机组模型, 通过与传统控制策略的对比, 验证了本文方法在最大风能跟踪上的有效性。

## 1 双馈风力发电机组数学模型

双馈风力发电系统主要包括叶桨系统、传动轴、齿轮箱和双馈感应发电机。叶桨系统将风能转换为机械能, 并通过传动系统将能量传递到发电机, 发电机将接收到的能量转化为电能输出。

### 1.1 双馈感应发电机数学模型

为了简便起见, 直接给出双馈感应电机矢量控制系统在两相同步旋转坐标系下的状态方程<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hv(t) \\ y(t) = Cx(t) + \omega(t) \end{cases}$$

式中:  $x(t)$  为状态向量  $x(t) = [i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]^T$ , 控制向量  $u(t) = [u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}]^T$ , 系数矩阵定义为:

$$A = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \alpha & R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ -\alpha & -R_s L_r & -\omega_m L_m L_r & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_m L_s & -R_r L_s & \beta \\ \omega_m L_m L_s & R_s L_m & -\beta & -R_r L_s \end{bmatrix};$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix}。$$

式中:  $\alpha = \omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r$ ,  $\beta = -\omega_m L_s L_r + \omega_s \sigma L_s L_r$ ;  $\omega_m$  为发电机电角速度;  $\omega_s$  为发电机同步角速度;  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ , 为发电机漏感系数。

电磁转矩计算公式为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (1)$$

### 1.2 叶桨系统数学模型

叶桨系统从风能中捕获的气动功率  $p_m$  为<sup>[3]</sup>:

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

式中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为叶桨系统扫略面等效半径;  $\hat{v}$  为作用在叶桨系统上的有效风速;  $C_p$  为风能

利用系数, 是叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的非线性函数; 叶尖速比  $\lambda$  是叶尖速度与风速之比, 其表达式如下:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{\hat{v}}$$

式中:  $\omega_r$  为叶桨系统旋转机械角速度。

根据功率与转矩的关系, 可得叶桨系统所产生的气动转矩为:

$$T_m = \frac{p_m}{\omega_r} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) \hat{v}^2 \quad (2)$$

式中:  $C_T(\lambda, \beta)$  为转矩系数, 计算公式如下:

$$C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda}。$$

叶桨系统通过传动系统将能量传递到发电机, 其运动方程如下:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_{ls} - B\omega_r \quad (3)$$

式中:  $J$  为叶桨系统转动惯量;  $B$  为传动链阻尼系数;  $T_{ls}$  为低速轴反转矩, 其值为:

$$T_{ls} = k_v T_e \quad (4)$$

式中:  $k_v$  为齿轮箱传动比。

## 2 有效风速估计

根据 DSC 控制原理, 只要控制叶桨系统转速使其跟踪最优转速运行, 即可实现最大风能捕获, 根据前文可知, 如何实时获取有效风速估计值是 DSC 控制的难点。

针对上述问题, 本文采用高阶容积卡尔曼滤波算法对气动转矩进行实时估计, 同时应用牛顿-拉夫逊公式解非线性方程组以获得有效风速的观测值, 在不增加风速检测设备的前提下, 实现有效风速的检测。

### 2.1 高阶卡尔曼滤波算法

作为一类基于点的高斯近似滤波器, HCKF 与 UKF、CKF 等均采用 Kalman 线性滤波框架, 其区别主要在于采样点的选择规则以及对应的权系数的取值, 本文所采用的 HCKF 为 5 阶 CKF, 其 Sigma 点集为<sup>[14]</sup>:

$$\xi_i = \begin{cases} [0, 0, \dots, 0]^T & i=0 \\ \sqrt{n+2}s_i^+ & i=1, \dots, \frac{n(n-1)}{2} \\ -\sqrt{n+2}s_i^+ & i=\frac{n(n-1)}{2}+1, \dots, n(n-1) \\ \sqrt{n+2}s_{i-n(n-1)}^- & i=n(n-1)+1, \dots, \frac{3n(n-1)}{2} \\ -\sqrt{n+2}s_{i-\frac{3n(n-1)}{2}}^- & i=\frac{3n(n-1)}{2}+1, \dots, 2n(n-1) \\ \sqrt{n+2}e_{i-2n(n-1)} & i=2n(n-1)+1, \dots, n(2n-1) \\ -\sqrt{n+2}e_{i-n(2n-1)} & i=n(2n-1)+1, \dots, 2n^2 \end{cases}$$

其中  $s_i^+$  和  $s_i^-$  计算公式如下:

$$\begin{cases} s_i^+ = \sqrt{1/2}(e_p + e_q) & p < q, p, q = 1, \dots, n \\ s_i^- = \sqrt{1/2}(e_p - e_q) & q < p, p, q = 1, \dots, n \end{cases}$$

对应的权系数为:

$$\omega^{(i)} = \begin{cases} 2/(n+2) & i=0 \\ 1/(n+2)^2 & i=1, \dots, 2n(n-1) \\ (4-n)/(2(n+2)^2) & i=2n(n-1)+1, \dots, 2n^2 \end{cases}$$

HCKF 算法流程如下:

1) 计算容积点

$$x_{k,k}^{(i)} = \hat{x}_{k,k} + \xi_i S_{k,k} \quad i=0, 1, \dots, 2n^2$$

其中,  $S_{k,k}$  为  $P_{k,k}$  矩阵的 Cholesky 分解, 即

$$P_{k,k} = S_{k,k} (S_{k,k})^T$$

2) 计算经过状态转移矩阵传递后的容积点

$$x_{k+1,k}^{(i)} = f(x_{k,k}^{(i)})$$

3) 计算  $k+1$  时刻的状态估计值  $\hat{x}_{k+1,k}$

$$\hat{x}_{k+1,k} = \sum_{i=0}^{2n^2} \omega^{(i)} x_{k+1,k}^{(i)}$$

4) 计算  $k+1$  时刻的预测协方差阵  $p_{k+1,k}$

$$P_{k+1,k} = \sum_{i=0}^{2n^2} \omega^{(i)} (\hat{x}_{k+1,k} - x_{k+1,k}^{(i)}) (\hat{x}_{k+1,k} - x_{k+1,k}^{(i)})^T + Q$$

5) 根据一步预测值, 更新容积点

$$x_{k+1,k}^{(i)} = \hat{x}_{k+1,k} + \xi_i S_{k+1,k} \quad i=0, 1, \dots, 2n^2$$

其中,  $S_{k+1,k}$  为  $p_{k+1,k}$  的 Cholesky 分解。

6) 将上一步生成的容积点代入观测方程, 得

到观测量

$$Z_{k+1,k}^{(i)} = h[x_{k+1,k}^{(i)}]$$

7) 通过加权求和得到测量预测量及其误差协方差

$$\hat{Z}_{k+1,k} = \sum_{i=0}^{2n^2} \omega^{(i)} Z_{k+1,k}^{(i)}$$

$$P_{zz} = \sum_{i=0}^{2n^2} \omega^{(i)} (Z_{k+1,k}^{(i)} - \hat{Z}_{k+1,k}) (Z_{k+1,k}^{(i)} - \hat{Z}_{k+1,k})^T + R$$

8) 计算互协方差及卡尔曼增益矩阵

$$P_{xz} = \sum_{i=0}^{2n^2} \omega^{(i)} (x_{k+1,k}^{(i)} - \hat{x}_{k+1,k}) (Z_{k+1,k}^{(i)} - \hat{Z}_{k+1,k})^T$$

$$K = P_{xz} (P_{zz})^{-1}$$

9) 最后, 更新系统状态和协方差

$$\hat{x}_{k+1,k+1} = \hat{x}_{k+1,k} + K [Z_{k+1,k} - \hat{Z}_{k+1,k}]$$

$$P_{k+1,k+1} = P_{k+1,k} - K P_{zz} K^T$$

## 2.2 HCKF 估计气动转矩

由于采样周期足够短, 假设在采样周期内气动转矩不发生变化, 即:  $\frac{dT_m}{dt} = 0$ 。

结合电磁转矩计算公式(1)和叶桨系统运动方程式(3), 将机械转速和气动转矩扩充为状态变量, 扩充后的状态方程为:

$$A' =$$

$$\frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \alpha & R_r L_m & \omega_m L_m L_r & 0 & 0 \\ -\alpha & -R_s L_r & -\omega_m L_m L_r & R_r L_m & 0 & 0 \\ R_s L_m & -\omega_m L_m L_s & -R_r L_s & \beta & 0 & 0 \\ \omega_m L_m L_s & R_s L_m & -\beta & -R_r L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} n_p L_m i_{qs} / J & \frac{3}{2} n_p L_m i_{ds} / J & 0 & 1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B' = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中:  $n_p$  为双馈发电机极对数。

将  $A'$ ,  $B'$  离散化并忽略二次项以上部分即可

得到系统的状态转移矩阵, 将状态转移矩阵代入 HCKF 中, 并将  $i_{dqs}, i_{dqr}$  作为观测信号,  $u_{dqs}, u_{dqr}$  作为输入信号, 即可对气动转矩和机械转速进行估计。

### 2.3 牛顿拉夫逊方法估计有效风速

通过 HCKF 获得气动转矩和叶桨系统机械转速的估计值  $\hat{T}_m$  和  $\hat{\omega}_r$  以后, 结合有效风速和气动转矩的关系式(2), 求解有效风速  $\hat{v}$  的问题可以转化为解如下非线性方程组:

$$\hat{T}_m - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_T \left( \frac{\hat{\omega}_r R}{\hat{v}}, \beta \right) \hat{v}^2 = 0。$$

本文使用牛顿-拉夫逊方法对该非线性方程组进行求解, 其计算步骤如下<sup>[23]</sup>:

估计风速递推公式为:

$$\hat{v}(k+1) = \hat{v}(k) - H_n^{-1} g_n$$

式中,  $H_n$  和  $g_n$  的表达式如下:

$$\begin{cases} H_n = -\rho \pi R^3 C_T(\lambda_n) v_n + \frac{1}{2} \rho \pi R^4 \hat{\omega}_r \frac{\partial C_T(\lambda_n)}{\partial \lambda} \\ g_n = \hat{T}_m - \frac{1}{2} \pi \rho R^3 v^2 C_T(\lambda_n) \end{cases}。$$

式中:  $\lambda_n = \frac{\hat{\omega}_r R}{\hat{v}}$ 。

根据以上公式可以对有效风速进行估计, 避免了实际风速测量装置的局限性。

### 3 基于 NFTSMC 的转速控制器设计

获得有效风速的估计值以后, 可以获得当前时刻叶桨系统旋转的最佳角速度, 但风力发电机组是一个非线性、多变量、强耦合的系统, 同时由于风速的随机性, 使得常规 PID 控制很难满足控制要求。为解决上述问题, 本文基于非奇异快速终端滑模设计了转速控制器, 使得转速能够全局快速收敛。

首先定义最佳机械角速度的跟踪误差及其导数为状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_r^* - \omega_r \\ x_2 = \dot{\omega}_r^* - \dot{\omega}_r \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega_r^*$  为转速给定值;  $\omega_r$  为实际转速。

将式(3)和式(4)代入式(5)中可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\omega}_r^* - \frac{T_m}{J} + \frac{k_v T_e}{J} + \frac{B}{J} \omega_r \\ \dot{x}_2 = \ddot{\omega}_r^* - \frac{\dot{T}_m}{J} + \frac{k_v \dot{T}_e}{J} + \frac{B}{J} \dot{\omega}_r \end{cases}$$

选取滑模面为非奇异快速终端滑模面<sup>[18]</sup>:

$$S = x_1 + \frac{1}{\alpha} x_1^{g/h} + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} \quad (6)$$

式中:  $\alpha, \beta$  均为大于 0 的常数;  $p, q, g, h$  均为正奇数, 且满足  $1 < p/q < 2, s$ 。

选取滑模趋近律为:

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - kS \quad (7)$$

式中:  $k, \varepsilon$  均为大于 0 的常数。

通过设计合适的滑模控制律可使式(6)有限时间内收敛为 0。

**定理** 对于转速误差系统式(5)如果选取非奇异快速终端滑模面式(6), 取滑模趋近律式(7), 以发电机电磁转矩  $T_e$  为控制量, 设计如下控制律, 可使转速在有限时间内收敛。

等效控制律为:

$$T_{e_{eq}} = -\frac{1}{k_v} (\dot{\omega}_r^* + \frac{B}{J} \omega_r) \quad (8)$$

切换控制律为:

$$T_{en} = \frac{1}{k_v} \int_0^t \left\{ -J[\varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks] - J \left[ \beta \frac{q}{p} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} - \frac{\beta g q}{\alpha h p} x_1^{g-1} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} \right] \right\} d\tau \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon > |\dot{T}_m / J|, \eta > 0$ 。

发电机电磁转矩设定值为:

$$T_e^* = T_{e_{eq}} + T_{en} \quad (10)$$

证明: 选取李雅普诺夫函数为:

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

对滑模面式(6)进行求导得:

$$\dot{S} = \dot{x}_1 + \frac{1}{\alpha} \frac{g}{h} x_1^{g-1} \dot{x}_1 + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{x}_1^{p-1} \dot{x}_2 \quad (12)$$

将式(11)对时间求导并将式(12)代入得:

$$\dot{V} = S \dot{S} = S \left[ \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{x}_1^{p-1} \left[ \dot{x}_1 + \beta \frac{q}{p} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} + \frac{\beta g q}{\alpha h p} x_1^{g-1} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} \right] \right] \quad (13)$$

其中:

$$\ddot{x}_1 = \ddot{\omega}_r^* - \ddot{\omega}_r = \ddot{\omega}_r^* - \frac{\dot{T}_m}{J} + \frac{k_v \dot{T}_e}{J} + \frac{B}{J} \dot{\omega}_r \quad (14)$$

将式(8)、式(9)代入式(10)并对其求导可得:

$$\dot{T}_e = -\frac{J}{k_v} \left( \ddot{\omega}_r^* + \frac{B}{J} \dot{\omega}_r \right) - \frac{J}{k_v} \left[ \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks \right] - \frac{J}{k_v} \left[ \beta \frac{q}{p} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} - \frac{\beta g}{\alpha h p} x_1^{h-1} \dot{x}_1^{2-\frac{p}{q}} \right] \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)后再代入式(13)中, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -S \frac{1}{\beta q} \dot{x}_1^{q-1} \left( \left[ \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks \right] + \frac{\dot{T}_m}{J} \right) = \\ &= -\frac{1}{\beta q} \dot{x}_1^{q-1} \left( \varepsilon |s| + ks^2 + \frac{\dot{T}_m}{J} s \right) \leq \\ &= -\frac{1}{\beta q} \dot{x}_1^{q-1} (ks^2) < 0 \quad \forall |s| \neq 0 \end{aligned}$$

当  $S=0$  时  $\omega_r^* = \omega_r$ , 也可在有限时间内收敛。

### 4 仿真实验

双馈感应电机参数: 额定功率 2.4 MW, 发电机极对数  $n_p=2$ , 定子电压  $U_s=690$  V, 定子电感  $L_s=2.587$  mH, 转子电感  $L_r=2.587$  mH, 定子电阻  $R_s=2.6$  mΩ, 转子电阻  $R_r=2.9$  mΩ。

叶桨系统参数: 叶桨半径  $R=42$  m, 最大风能利用系数  $C_{pmax}=0.48$ , 最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}=8.1$ , 低速轴转动惯量  $J=6.516e^5$  kg·m<sup>2</sup>, 额定转矩  $T_{en}=12403$  N·m 分别在阶跃风速和连续自然风模拟两种情况下, 对双馈风力发电系统 MPPT 动态特性进行分析, 其控制框图如图 1 所示。

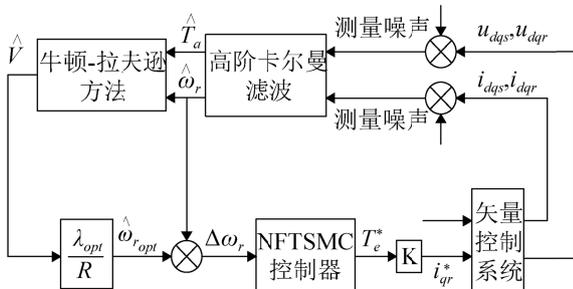


图 1 NFTSMC-DSC 控制框图  
Fig. 1 Control block of NFTSMC-DSC

由图 2 可以看出, 对于阶跃变化的风速, 三种控制方法都可以达到稳态无静差, 但是 PID-DSC 控制产生了 16% 的超调; ISC 控制虽然无超调, 但是其动态响应过程较为缓慢; 而 NFTSMC-DSC 控制可以达到快速无超调的跟踪。

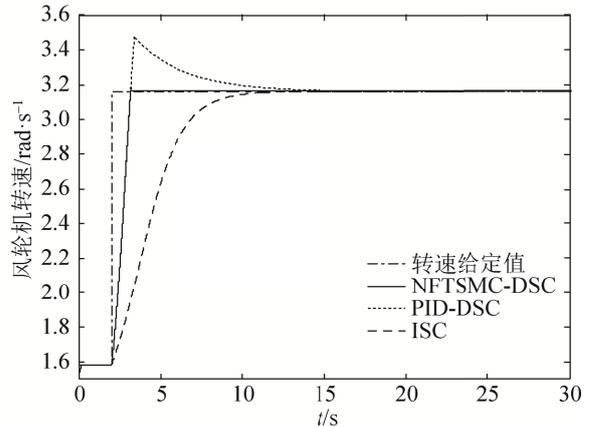


图 2 阶跃风速作用下叶桨系统转速响应对比  
Fig. 2 Comparison of rotational speed under step wind conditions

设作用在叶桨系统上的有效风速如图 3 所示, 四种方法对气动转矩(折合到高速轴端)估计的均方根误差如图 4 所示。可以看出, 当采样时间为  $1e^{-3}$  s 时, EKF 的估计误差已经较大, UKF 方法和 CKF 方法估计误差相当, 而 HCKF 估计误差要明显小于其他 3 种方法。

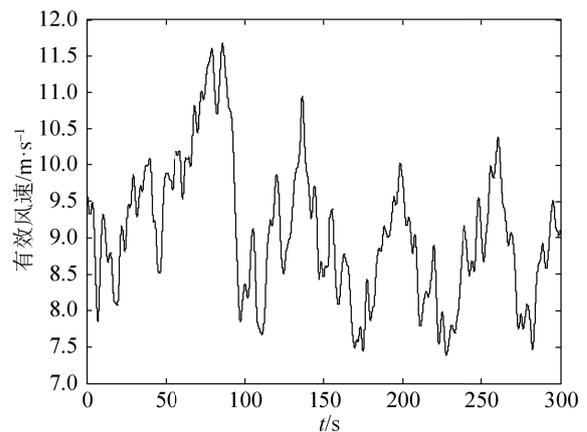


图 3 有效风速设定值  
Fig. 3 Set points of effective wind speed

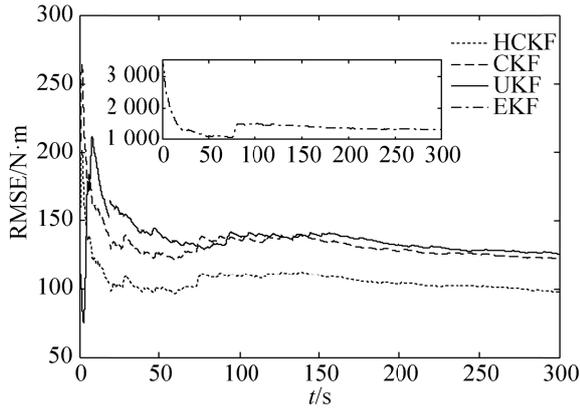


图 4 气动转矩估计均方根误差

Fig. 4 RMSE of aerodynamic torque estimation

有效风速估计器所估计瞬时风速为图 5 中虚线所示, 图 6 表示估计误差, 最大误差绝对值为 0.179 m/s, 误差绝对值均值为 0.037 7 m/s, 误差在实际风速的 2%以内, 可见本文设计的有效风速估计器所估计到的有效风速较为接近真实值。

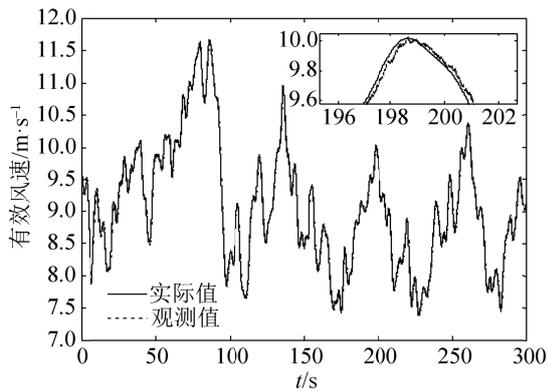


图 5 实际风速和估计风速

Fig. 5 Comparison between actual wind speed and estimated wind speed

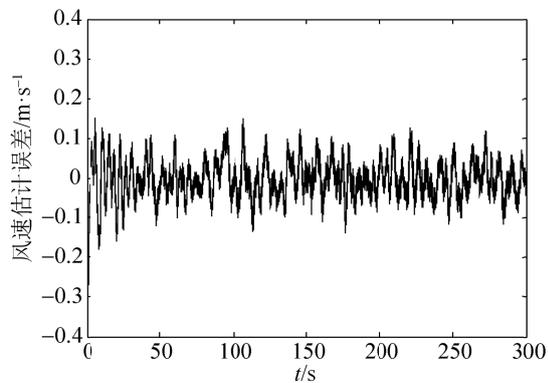
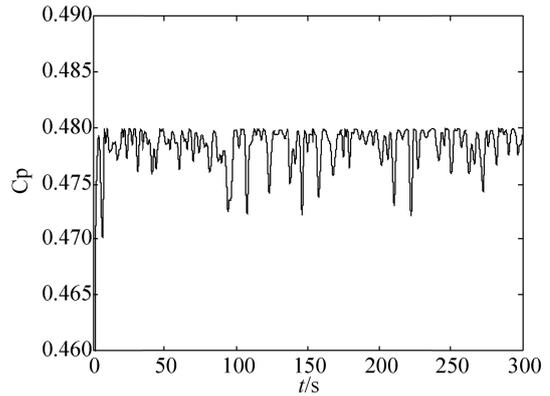


图 6 风速估计误差

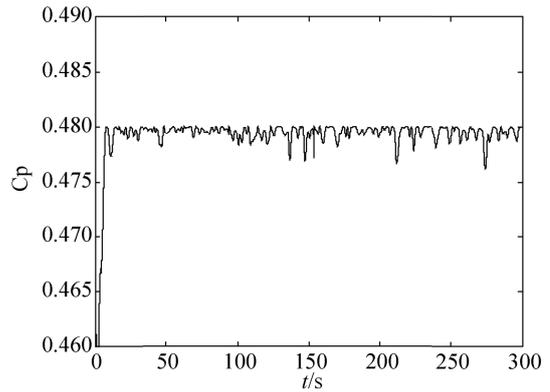
Fig. 6 Error of wind speed estimation

由于测量噪声的影响, 估计风速会在真实风速附近小范围波动, 为使控制器输出信号更加平滑, 可以对估计风速进行低通滤波后再用于转速控制。

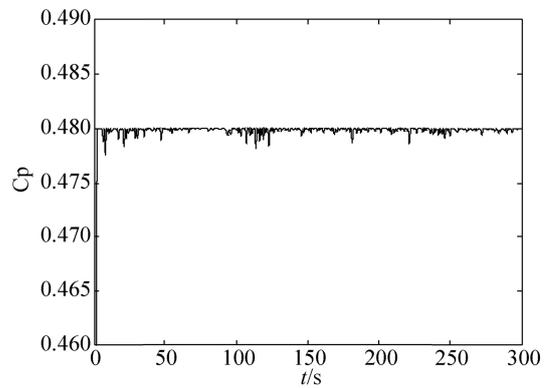
图 7 为模拟连续自然风条件下, 3 种控制器在实现 MPPT 跟踪的动态过程中风能利用系数  $C_p$  的变化曲线。



(a) ISC 控制下  $C_p$  曲线



(b) PID-DSC 控制下  $C_p$  曲线



(c) NFTSMC-DSC 控制下  $C_p$  曲线

图 7 不同控制策略下  $C_p$  曲线

Fig. 7  $C_p$  curves under different control strategies

由图7中可以看出ISC由于其动态响应较慢,在风速快速变化时, $C_p$ 出现了较大幅度的跌落现象;PID-DSC控制效果要好于ISC,但由于其动态过程中的超调现象, $C_p$ 很难稳定在最佳值附近;NFTSMC-DSC可以使风能利用系数保持在 $C_{pmax}$ 附近,且在受到风速扰动时,能迅速回到最佳值附近,在3种控制方案中,效果最好。

## 5 结论

(1) 本文在双馈风力发电机组数学模型的基础上,基于HCKF对作用在叶桨系统上的气动转矩进行了估计,并通过NR方法得到有效风速的估计值。仿真结果表明,本文设计的有效风速估计器可以准确地对有效风速进行估计,避免了由于风速测量不准确给风机控制带来的误差。

(2) 根据有效风速估计值,进一步计算出叶桨系统最佳转速设定值,并采用非奇异快速终端滑模方法设计了一种双馈风电机组转速控制器。仿真结果表明,该控制策略在风速大范围变化的情况下能够使机组的风能利用系数 $C_p$ 保持在最佳值附近。对提高风能利用率具有参考意义。

## 参考文献:

- [1] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.  
ZHAO Ren-de, WANG Yong-jun, ZHANG Jia-sheng. Maximum Power Point Tracking Control of the Wind Energy Generation System With Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 92-94.  
YE Hang-ye. Control Technology of Wind Power Generation System[M]. Beijing: CHINA MACHINE PRESS, 2015: 92-94.
- [3] 王秋瑾,张新房. 基于WLS-SVM的变速风力机有效风速估计[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1590-1593.  
WANG Qiu-jing, ZHANG Xin-fang. Effective Wind Speed Estimation for Variable Speed Wind Turbines Based on WLS-SVM[J]. Journal of system simulation, 2005, 17(7): 1590-1593.
- [4] 茅靖峰. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统MPPT自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-65.  
MAO Jing-feng. Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state observer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 58-65.
- [5] K Mok. Wind speed estimation algorithm in the presence of observation noise[J]. Journal of Solar Energy Engineering(S0199-6231), 2009, 132(1): 937-937.
- [6] 范晓旭. 大型风力发电机组线性二次型高斯最优控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(20): 100-105.  
FAN Xiao-xu. Linear Quadratic Gaussian Optimal Control Strategy for Large Wind Turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(20): 100-105.
- [7] 董海鹰. 基于自适应模糊神经网络的风速软测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 60-65.  
DONG Hai-ying. Wind Speed Soft Sensor Based on Adaptive Fuzzy Neural Network[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2013, 25(1): 60-65.
- [8] 童亦斌. MW级风电机组最大功率追踪复合控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 129-132.  
DONG Yi-bing. Maximum Power Point Tracking Compound Control Strategy of MW Level Wind Turbines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 129-132.
- [9] Simon Julier. A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators[J]. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL(S0018-9286), 2000, 45(3): 477-482.
- [10] I Arasaratnam, S Haykin. Cubature Kalman Filters[J]. IEEE Transactions on automatic control (S0018-9286), 2009, 54(6): 1254-1269.
- [11] 焦俊,孔文,辜丽川,等. 基于UKF和SMO农用履带机器人滑动参数设计[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1577-1583.  
Jiao Jun, Kong Wen, Gu Lichuan, et al. Sliding Parameters Calculation of Agricultural Tracked Robot Based on UKF and SMO[J]. Journal of system simulation, 2015, 27(7): 1577-1583..
- [12] 刘万利,张秋昭. 基于Cubature卡尔曼滤波的强跟踪滤波算法[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(5): 1102-1107.  
LIU Wan-li, ZHANG Qiu-zhao. New Strong Tracking Filter Based on Cubature Kalman Filter[J]. Journal of system simulation, 2014, 26(5): 1102-1107.
- [13] 崔乃刚,张龙,王小刚,等. 自适应高阶容积卡尔曼滤

- 波在目标跟踪中的应用[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3885-3895.
- CUI Nai-gang, ZHANG Long, WANG Xiao-gang, et al. Application of adaptive high-degree cubature Kalman filter in target tracking[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3885-3895.
- [14] Jia Bin, Xin Ming. High-degree cubature Kalman filter[J]. Automatica(S0005-1098), 2013, 49(2): 510-518.
- [15] 管冰蕾, 汤显波, 葛泉波. 未知测量噪声方差的平方根高阶容积 Kalman 滤波[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(9): 2626-2629.
- GUAN Bing-lei, TANG Xian-bo, GE Quan-bo. Square-root high-degree cubature Kalman filter with unknown measurement noise covariance[J]. Application Research Of Computers, 2015, 32(9): 2626-2629.
- [16] S T Venkataraman. Terminal sliding modes: a new approach to nonlinear control synthesis[R]. Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on: 443-448.
- [17] Yong Feng, Xinghuo Yu, Zhihong Man. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica(S0005-1098), 2002, 38(12): 2159-2167.
- [18] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法[J]. 信息与控制, 2009, 38(1): 1-8.
- LI Sheng-bo, LI Ke-qiang, WANG Jian-qiang, et al. Nonsingular and Fast Terminal Sliding Mode Control Method[J]. Information and Control | Inf Control, 2009, 38(1): 1-8.
- [19] 周硕, 王大志, 高忠庆. 永磁同步电机的非奇异快速终端滑模控制[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 51-54.
- ZHOU Shuo, WANG Da-zhi, GAO Zhong-qing. Nonsingular Fast Terminal-sliding-mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. Electric Drive, 2014, 44(11): 51-54.
- [20] 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 Xue-jian, LIU Ling, CUI Rong-xin. 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.
- [21] Lu Kunfeng, Xia Yuanqing. Adaptive attitude tracking control for rigid spacecraft with finite-time convergence [J]. Automatica(S0005-1098), 2013, 49(12): 3591-3599.
- [22] 郭春岭, 田涛, 刘永昌. 基于 LabVIEW 的双馈风力发电机仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(增 1): 331-335.
- GUO Chun-ling, TIAN Tao, LIU Yong-chang. Simulation of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power on LabVIEW[J]. Journal of system simulation, 2011, 23(S1): 331-335.
- [23] 何玉林, 黄帅. 基于前馈的风力发电机组变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 15-20.
- HE Yu-lin, HUANG Shuai. Variable pitch control of wind turbine based on feed forward[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 15-20.