

# 无模型控制器在风电变桨控制系统中的应用

黄俊梅<sup>1</sup> 薛永平<sup>2</sup>

(1. 陕西能源职业技术学院电子工程系 咸阳 712000; 2. 中国电信咸阳分公司 咸阳 712000)

**摘要:**由于风速、风向的随机性导致风力发电变桨距系统具有非线性、强耦合、大时滞等特点,难以准确建模。为改善系统动态性能,保证发电机输出功率恒定,将无模型控制器引入到风力发电变桨系统中。采用 MATLAB 软件的 Simulink 工具构建该模型并仿真。结果表明,在高风速段和额定风速附近,发生相同的风速变化值,无模型变桨控制系统通过桨距角的不同调节可以很快实现发电机的恒功率输出。另一方面,本文将该控制系统应用于风力发电机组运行测试,其运行结果与模拟结果一致。因此,本文设计的无模型变桨系统控制效果良好,优化了风电系统的稳定性。

**关键词:**风力发电;无模型控制;变桨

**中图分类号:** TP391.9 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Application of model free controller in wind power pitch systems

Huang Junmei<sup>1</sup> Xue Yongping<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, China;

2. Xianyang Branch of China Telecom, Xianyang 712000, China)

**Abstract:** It is difficult to simulate the wind turbine pitch systems precisely which has the features of time changing, non-linear and disturbing, because of the randomness for speed and wind of wind. In order to improve the dynamic of system and keep the stability of power output, the model free controller is performed in the wind turbine pitch systems. Next, the MATLAB Simulink is applied to build the control system. The simulation results show that the stability of wind power system can be improved through adjusting the angle of turbine pitch with different wind directions, resulting in excellently ability to operate the system. On the other hand, the model free controller is used as decision system in the wind generators, and the operation results consistent with simulation results. Thus, the wind power pitch systems based on model free controller can optimize the stability for wind generators.

**Keywords:** wind power; model free controller; pitch

### 1 引言

由于全球环境形势日益严峻,一场以风电等可再生能源为代表的绿色革命正在全球范围展开。我国是一个风能资源丰富,开发潜力巨大的国家。因此,风电的开发对增加能源供应、调整能源结构具有重要意义,同时,也是应对气候变化、促进节能减排、保护生态环境的有效途径<sup>[1-2]</sup>。

风向、风速的随机性所导致的风电的强非线性、干扰性和大时滞等特点,是制约风力发电应用的重要技术瓶颈之一。因此,如何使风力发电机的输出功率稳定,对并网运行的发电机组具有重要意义。

变桨距功率调节能够自动调节叶片的桨距角,使得风力机的启动性灵敏,能够适应复杂风况下的固定功率输出调节<sup>[3]</sup>。

常规的 PI 控制应用于风电变桨距系统,将具有一定的滞后性,尤其是对强非线性的高风速段,PI 控制效果不佳<sup>[4]</sup>。文献[5]对高风速段桨距角进行了分段 PI 控制,在一定程度上保证了变桨的快速性和稳定性。但由于风速的随机性,该方法不能保证在随机变化的风速下均有良好控制效果。文献[6]提出了风电变桨距模糊自适应控制方法,提高了控制系统的响应速度,但系统动态性能待改善。文献[7]采用了基于 BP 神经网络的变桨距控制,增强了系统的鲁棒性,但稳态误差较大。此外,LQR(线性二次型调

节器)、模糊 PID、SVM(支持向量机)等控制策略在变桨距控制中也有一定的应用<sup>[8-10]</sup>,在一定程度上解决了风电系统高干扰性、强非线性等问题,但控制效果有待改善。

本文拟采用无模型控制 model free controller(简称 MFC)方法,对不同风速段桨距角实现控制,以保证发电机输出功率恒定。无模型控制方法不依赖被控对象的数学模型,具有控制精度高,动态响应好,调节量可控等优点<sup>[11]</sup>。将无模型控制方法应用于非线性、强干扰、大时滞的风电系统,不但可提高风力发电效率,而且能改善桨叶和风机使用寿命,保证风力发电机组的安全可靠运行。

## 2 风力发电变桨控制系统

风力发电变桨系统是指风力机组叶片的攻角可以随风速风向的变化而进行自动调节以实现最大风能捕捉,从而控制风轮转速以保证发电机输出功率趋于稳定。

风力发电变桨系统的工作进程,主要包括以下 4 个阶段<sup>[12]</sup>:

1) 风速小于切入风速时,机组不工作,桨距角保持在 90°;

2) 风速在切入风速和额定风速之间,为能最大限度跟踪风速,只需调整叶片桨距角向最优桨距角 0°方向转动,使风能利用系数最大,风轮获取能量最多,风力机组工作在最大功率点;

3) 风速在额定风速和切出风速之间时,开始变桨距调节。通过变桨调节增大桨距角,以减小风能利用系数和风能捕获率,使风力发电机组输出功率限定在额定值附近,保证向电网输出平稳电能;

4) 风速大于切出风速,风力机组抱闸停机,通过顺桨使桨距角调整到 90°,防止对风力机的损坏。

本文将采用 MFC 无模型控制器对桨距角实现控制。

## 3 MFC 无模型控制原理

无模型控制的设计取决于受控对象输入输出数据得到的泛模型及控制律,可实现对复杂系统的闭环稳定控制。

MFC 无模型控制以“泛模型”为基础,算法如公式(1)所示<sup>[13]</sup>:

$$y(k+1) - y(k) = \varphi^T(k)[u(k) - u(k-1)] \quad (1)$$

式中: $k$  代表离散时间; $u$  代表输入数据; $y$  代表输出数据; $\phi(k)$  称为泛模型的特征参量,是式中唯一可以改变的参数,通过无模型辨识算法在线估计; $\{y(k), u(k+1)\}$  和  $\{y(k-1), u(k)\}$  是系统在相邻时刻的两组输入输出数据。

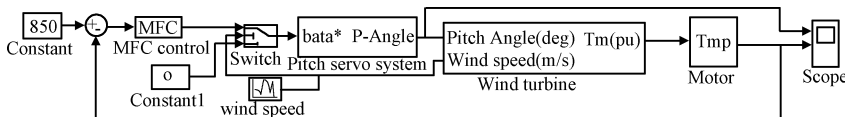


图 2 MFC 无模型变桨距控制系统仿真模型

根据泛模型导出控制律,如式(2)所示:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\lambda_k}{\alpha + \|\varphi'(k)\|^2} \varphi'(k) \{y_0 - y_k\} \quad (2)$$

式中: $y_0$  是控制器的设定值, $\lambda_k$  是控制参数, $\alpha$  是一个适当常数。首先利用估值算法得到  $\phi(k)$  的估计值  $\phi'(k)$ ;其次,设  $\phi(k+1) = \phi(k)$ ,继续寻求  $\phi(k)$  下一时刻的估计值;再把控制律作用于泛模型进行反馈控制,得到一组新的输入输出值  $\{y(k+2), u(k+1)\}$ 。将新数据带入,重复以上步骤,又可得出  $\{y(k+3), u(k+2)\}$ ,往复迭代,使输出  $y(k)$  逐渐逼近于设定值  $y_0$ 。

## 4 MFC 无模型变桨距控制系统仿真

本文采用某风力发电机组风轮参数<sup>[14]</sup>,如表 1 所示。

表 1 风力发电机组参数

CX56/850 kW 风轮参数			
风轮直径/m	60	额定风速/(m/s)	12
扫略面积/m <sup>2</sup>	2 500	切入风速/(m/s)	3
叶片数/片	3	切出风速/(m/s)	24
额定转速/rpm	25	极端风速/(m/s)	53(阵风)

在风速实测值低于额定风速时,系统无需变桨,只需调整叶片桨距角向最优桨距角 0°方向转动,以达到其风能利用系数最大。

当风速实测值大于额定风速时,风力机通过变桨距调节保证发电机输出功率的恒定,因此,MFC 无模型变桨距控制系统采用功率闭环控制方式,如图 1 所示。

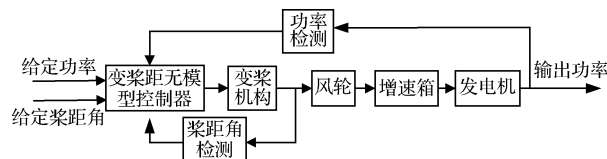


图 1 风电机组无模型变桨距控制系统结构

将发电机额定功率与输出功率的偏差值作用于变桨距控制器,以调整变桨机构桨距角增大,风能利用系数降低,使发电机的输出功率稳定控制在额定值附近。

在 MATLAB 软件的 Simulink 工具箱中搭建 MFC 无模型变桨距控制系统的仿真模型,如图 2 所示<sup>[13-14]</sup>。

本文中风电机组的额定风速值为 12 m/s,额定输出功率为 850 kw。设风速的采样频率为 10 s/次,通过采样风速的变化来观察无模型控制器作用下的变桨距调节和功率输出仿真,以验证所设计的无模型变桨距控制器是否可行及可靠<sup>[15]</sup>。采样风速变化如表 2 所示。

表2 采样风速变化

不同风速段	10 s	20 s
额定风速段	风速由 12 m/s 变为 13 m/s	风速由 13 m/s 变为 14 m/s
高风速段	风速由 18 m/s 变为 19 m/s	风速由 19 m/s 变为 20 m/s

无模型控制器作用下的变桨距调节如图3所示,功率输出仿真如图4所示。

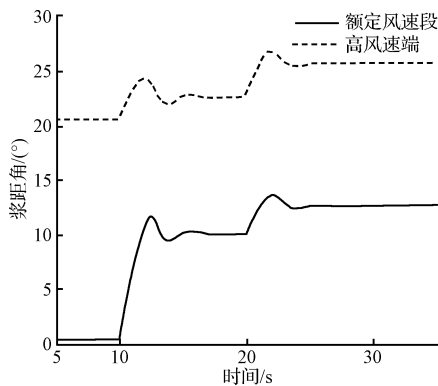


图3 不同风速变化所对应的桨距角调节

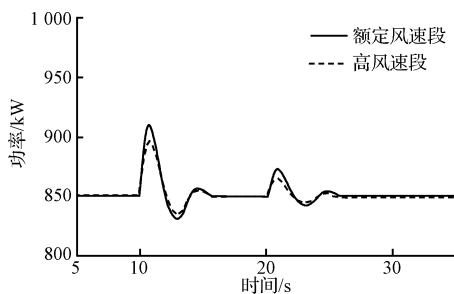


图4 不同风速变化所对应的功率输出

图3和图4中,黑色实线为额定风速段附近,风速变化所对应的桨距角调节和功率输出。当 $t=10\text{ s}$ 时,风速由额定值 $12\text{ m/s}$ 增加至 $13\text{ m/s}$ ,MFC模型通过调整桨距角改变 $9^\circ$ (如图3黑色实线),可保证输出稳定在 $850\text{ kW}$ 的额定功率(如图4黑色实线第一次波动后的稳定输出);当 $t=20\text{ s}$ 时,风速由 $13\text{ m/s}$ 增加至 $14\text{ m/s}$ ,MFC模型通过调整桨距角改变 $3^\circ$ (如图3黑色实线),可保证输出功率恒定(如图4黑色实线第二次波动后 $850\text{ kW}$ 的稳定输出)。

图3和图4中,黑色虚线为高风速段附近,风速变化所对应的桨距角调节和功率输出。 $t=10\text{ s}$ 时,高风速段的风速由 $18\text{ m/s}$ 增加至 $19\text{ m/s}$ ,MFC模型通过调整桨距角改变 $2^\circ$ (如图3黑色虚线),可保证输出稳定为 $850\text{ kW}$ 的额定功率(见图4黑色虚线的第一次波动后的稳定输出);当 $t=20\text{ s}$ 时,风速由 $19\text{ m/s}$ 增加至 $20\text{ m/s}$ ,MFC模型通过调整桨距角改变 $3^\circ$ (如图3黑色虚线),可保证输出

功率恒定(见图4黑色虚线第二次波动后 $850\text{ kW}$ 的稳定输出)。

由上述仿真实验数据可知,由于风电的强非线性,在高风速段和额定风速附近,发生相同的风速变化 $\Delta v$ ,无模型变桨控制系统通过桨距角的不同调节可以很快实现额定功率为 $850\text{ kW}$ 的稳定输出。即在额定风速附近,风速变化 $\Delta v$ 需要一个较大的桨距角调节可保证输出功率恒定;在高风速段附近,相同的风速变化只需一个较小的桨距角调节就可保证输出功率稳定性和快速性。因此,本文设计的无模型变桨距控制系统能够满足控制要求。

## 5 无模型变桨距控制系统运行测试

为进一步验证本变桨控制系统在发电生产中的运行效果,将本无模型变桨距控制系统嵌入至山东长星风力发电实验室 $850\text{ kW}$ 风电项目中,进行上机运行测试,运行结果如图5所示。

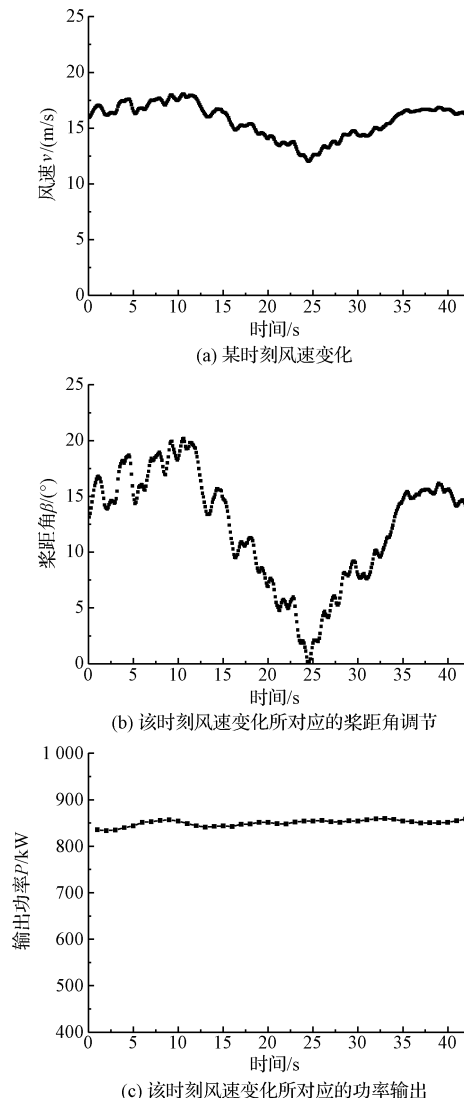


图5 MFC无模型变桨距控制系统实际运行结果

根据图 5(a)和 5(b)所示实验结果可知,在实际运行控制过程中,桨距角随着风速的变化而随之自动调节。验证了 MFC 无模型变桨距控制系统发挥了作用。由图 5(c)可知,机组的输出功率基本恒定于 850 kW,其上下波动属于合理控制范围内。图 5 说明 MFC 无模型变桨距控制系统,能够通过改变叶片攻角而达到机组功率输出恒定的目的,获得理想效果。

## 6 结 论

经仿真和实践运行测试,本文所设计的风力发电 MFC 无模型变桨控制系统控制效果良好,能根据风速测定值调节桨距角,实现在不同风速段对发电机输出功率的恒定控制,具有较好的稳定性和快速收敛性。

### 参 考 文 献

- [1] 邓维,刘方明,金海,等. 云计算数据中心的新能源应用:研究现状与趋势 [J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 582-598.
- [2] 郭源远,董江山,尹京苑. 基于多智能体的居民新能源选择情景模拟 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 69-73,84.
- [3] XIAO C. Optimal control of oscillation wave energy system using velocity premonition [J]. Instrumentation, 2015, 2(2): 28-32.
- [4] 雷涛,贾利民. 风机变桨距非线性预测控制算法 [J]. 计算机仿真, 2011(1): 319-322,335.
- [5] 王斌. 变速变桨距风电机组的高风速变桨距控制 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 81-83.
- [6] 于会群,高扬,张浩,等. 并网双馈异步风电机组模糊自适应控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016(5): 676-683.
- [7] 杨晓红,葛海涛. 基于 BP 神经网络的风力发电机组变桨距控制仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(7): 184-186.
- [8] 张雷,李海东,李建林,等. 基于 LQR 方法的风电机组变桨距控制的动态建模与仿真分析 [J]. 太阳能学报, 2008(7): 781-785.
- [9] 肖成,陈刚,冯登超,等. 基于最优模糊推理的风电机组变桨距二维模糊 PID 控制器设计 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 22-25.
- [10] 秦斌,姜学想,周浩,等. 基于 SVM 的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1525-1531.
- [11] 沈焱鑫,潘丰. 基于大时滞系统的改进无模型控制器研究 [J]. 计算机工程, 2015, 41(6): 300-305.
- [12] 边伟,谢毅. 变桨距风力发电机组输出功率控制方法的应用研究 [J]. 华北电力技术, 2011(5): 26-29.
- [13] 崔双喜,王维庆,张新燕. 无模型控制在大型风电机组独立变桨中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(8): 2132-2135.
- [14] 薛永平,郑恩让. 风力机电动变桨伺服系统 SNPID 仿真研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(2): 194-197.
- [15] 刘平平,马昕,张贝克. 变桨距风电机组仿真模型与控制 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(6): 143-147.

### 作 者 简 介

黄俊梅,1985年8月出生,工学硕士,讲师,主要研究方向为电气自动化及风电系统控制等。  
E-mail:lipengtao\_1985@163.com