

DOI: 10.7667/PSPC180298

基于 RBF 神经网络滑模变结构独立变桨控制研究

田 猛¹, 张波文¹, 周腊吾², 杨宏智¹, 龙 燕¹

(1. 贵州电网公司铜仁供电局, 贵州 铜仁 554300; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为降低大型风电机组由风剪切、风切变和塔影效应在叶片上产生的不平衡载荷, 根据风力机气动力学、风剪切、风切变和塔影效应, 提出一种基于 RBF 神经网络滑膜变结构独立变桨控制策略。滑模变结构控制抗干扰强、鲁棒性强和响应速度快, 缺点是滑模变结构控制易产生抖动。利用 RBF 神经网络的在线学习能力, 实时调整滑膜变结构控制器增益, 使滑模函数趋于切换面, 有效降低滑模变结构控制的抖动, 提高独立变桨控制系统的动态性能。利用 Matlab/Simulink 和 GH-blade 软件搭建了 5 MW 风电机组的联合仿真模型。仿真实验表明采用所提出的独立变桨控制方案能有效降低桨叶根部不平衡载荷, 还能提高风电机组运行在额定风速以下的功率性能。通过试验平台的测试, 也验证了所提出的独立变桨控制策略的合理性。

关键词: 风电机组; 不平衡载荷; 滑膜变结构控制; 鲁棒性

Study of individual variable pitch control based on RBF neural networks-sliding mode control

TIAN Meng¹, ZHANG Bowen¹, ZHOU Lawu², YANG Hongzhi¹, LONG Yan¹

(1. Tongren Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Company, Tongren 554300, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to reduce the unbalanced load of large wind turbines produced by the blade of wind shear and tower shadow effects, according to the wind turbine gas dynamics, wind shear and tower shadow effects, this paper proposes an independent variable pitch control strategy based on RBF neural network sliding mode. The ability of sliding mode to control of anti-interference and robustness is strong and it has quick response speed, the disadvantage is that the control of sliding mode jitters easily. By the online learning ability of RBF neural network, it adjusts the gaining of sliding mode controller in real time, leading the synovial function on switching surface, reducing the jitter of the sliding mode control effectively, and improving the dynamic performance of independent variable propeller control system. A joint simulation mode joint for 5 MW wind turbine blade is set up by Matlab/Simulink and GH-blade software. Simulation results show that the independent variable pitch control scheme can effectively reduce the unbalanced load in blade root and improve the power of wind turbines run below the rated wind speed in performance. Through the test platform, it also verifies the rationality of the independent variable pitch control strategy proposed in this paper.

This work is supported by International S & T Cooperation Program of China (No. 2011DFA62890).

Key words: wind turbines; unbalanced load; sliding mode control; robustness

0 引言

随着全球对能源需求的增加和对环境保护的重视, 新能源发电技术得到了快速发展。2014 年中国光伏发电和风力发电并网装机容量达到 1.2 亿 kW, 预计 2050 年中国光伏发电和风力发电将占总发电量的 70%, 其中风力发电技术是最为成熟的^[1-5]。风

电机组向着大型化发展, 风电机组中最为关键的技术是独立变桨控制技术^[6]。变桨控制分统一变桨控制和独立变桨控制, 其中独立变桨控制能有效减小由风切变、风剪切和塔影效应在桨叶根部引起的不平衡载荷, 从而有效降低桨叶疲劳载荷, 提高风电机组的性能和使用寿命, 其还能有效控制风电机组的功率输出, 因此独立变桨控制比统一变桨控制更具有优势^[7-10]。

目前, 国内外学者对独立变桨控制进行了大量

基金项目: 国家国际科技合作专项资助(2011DFA62890)

的研究,文献[11-12]提出了基于模糊控制的独立变桨控制方案,把功率变化情况作为变桨控制系统的判断依据,使控制系统不依赖精确的数学模型,稳定风电机组的输出功率;文献[13-14]提出了自适应独立变桨控制方案,由于风电机组运行时参数变化导致统一桨距角不是最优值,通过自适应控制得到最优统一桨距角,但缺点是不能对每个桨叶的桨距角进行独立的调节,对不平衡载荷达不到很好的控制效果。文献[15-16]提出了基于RBF神经网络的独立变桨控制方案,利用RBF神经网络的离线自学习特性得到变桨桨距角,进行变桨控制,明显缺点是RBF神经网络权值和中心不能在线调整,使得系统动态性能较差。文献[17]提出了单神经网络PID独立变桨控制方案,通过直接控制桨叶上的摆振力矩,从而降低风力机转矩波动,也减少了桨叶上的不平衡载荷。文献[18]提出桨距角循环控制的独立变桨控制策略,通过桨叶上气动力矩的周期性变化来补偿由风剪切、风切变和塔影效应在桨叶上引起的不平衡载荷,缺点是该控制策略在复杂风况下容易产生附加的不平衡载荷。文献[19]提出对桨叶方位角系数进行前馈补偿的分程独立变桨控制策略,此方法分别对桨叶方位角的分配来对每个桨叶进行变桨角的调节,通过前馈补偿控制对每个桨叶桨距角进行控制,达到独立变桨控制的目的。文献[20]提出的独立变桨控制策略克服风湍流效应对载荷的影响,缺点是忽略风剪切、风切变和塔影效应对风电机组输出功率和桨叶振动幅度的影响。

综上所述,变桨控制方案都具有一定的局限,在强干扰和参数多变的情况下,不能很好地通过变桨控制来优化桨叶根部不平衡载荷和优化风电机组输出功率特性。本文提出了基于RBF神经网络的滑模变结构(RBF-SMC)独立变桨控制方案,在额定风速以下,系统采用转矩控制,额定风速以上,系统采用变桨控制。RBF-SMC独立变桨控制具有很强的抗干扰、鲁棒性强特性,而且通过RBF神经网络的万能逼近特性,防止了滑模变结构控制的抖动,从而在独立变桨控制中减少了由风剪切、风切变和塔影效应在桨叶根部产生的不平衡载荷的抖动,优化了风电机组的功率特性,而且也减少了桨距角的抖动。

1 风力机气动力学特性

根据风机气动理论知,运行在不同风速条件下的风电机组,存在一个最大功率输出点,该点对应的 C_p 称为最佳风能利用系数, C_p 是关于桨距角 β 和叶尖速比 λ 的函数。设风轮处的风速为 V ,风机转速为 ω ,则叶尖速比可表示为

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (1)$$

C_p 可用下面函数拟合

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \times \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \times e^{-\frac{12.5}{\lambda_1}} \quad (2)$$

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

根据上面的拟合函数,得到 C_p 曲面如图1所示,由贝兹理论知 C_p 的最大值为0.593,该值说明风机不能把风能全部转化为桨叶的动能,而是只能利用部分的风能。

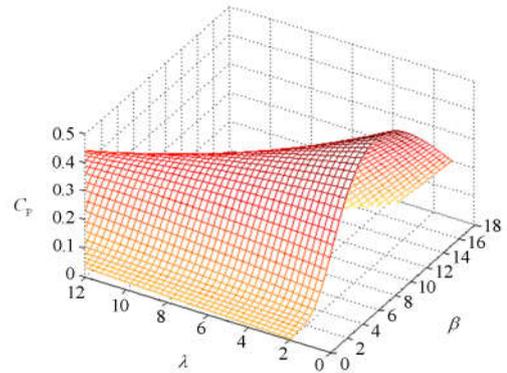


图1 C_p 曲面

Fig. 1 C_p surfaces

设桨叶扫略面积为 A ,桨叶半径为 R ,空气密度为 ρ 时,风机捕获的风能为

$$P_M = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A V^3 \quad (4)$$

2 基于RBF神经网络的滑模变桨控制

2.1 理论分析

设风力机转轴是刚性连接,风力机转轴上的运动方程为

$$J \cdot \dot{\Omega} = T - T_g \quad (5)$$

式中: J 是风力机转轴上的转动惯量; $\dot{\Omega}$ 是风轮的转速; T 是风轮上的气动力矩; T_g 是风力机转轴上的阻力矩。通过对转矩的调节,能实现对风轮转速的控制,从而有效跟踪最佳风能利用系数。

风切变、风剪切和塔影效应在桨叶根部引起的不平衡载荷^[21-23]是风电机组进行独立变桨控制的主要控制目标,且该桨叶根部不平衡载荷跟随桨叶的转动做周期性变化。利用傅里叶级数对每个桨叶上的不平衡载荷进行展开

$$M_1(\varphi_1) = M_{10} + \sum_{i=1}^n M_{1i} \cos(i\varphi_1 + \theta_i) \quad (6)$$

$$M_2(\varphi_2) = M_{20} + \sum_{i=1}^n M_{2i} \cos(i\varphi_2 + \theta_i) \quad (7)$$

$$M_3(\varphi_3) = M_{30} + \sum_{i=1}^n M_{3i} \cos(i\varphi_3 + \theta_i) \quad (8)$$

式中: M_i 、 M_{i0} 为作用在桨叶根部的不平衡载荷及其直流分量; M_{1i} 、 M_{2i} 、 M_{3i} 分别为桨叶 1、2、3 的 i 阶分量; φ_i 为桨叶 i 方位角, 桨叶角依次相差 $\frac{2}{3}\pi$, 令 $\varphi_1 = \omega t$ (ω 为桨叶转速), 则 $\varphi_2 = \omega t + \frac{2}{3}\pi$, $\varphi_3 = \omega t + \frac{4}{3}\pi$; θ_i 为 i 阶分量的初相位。

为了简化分析, 本文忽略桨叶不平衡载荷中的高次分量, 用直流分量和基频分量来表示桨叶的不平衡载荷, 即为

$$M_1(\varphi_1) = M_{10} + M_{11} \cos(\varphi_1 + \theta_1) \quad (9)$$

$$M_2(\varphi_2) = M_{20} + M_{21} \cos(\varphi_2 + \theta_1) \quad (10)$$

$$M_3(\varphi_3) = M_{30} + M_{31} \cos(\varphi_3 + \theta_1) \quad (11)$$

根据风力机气动力学可知, 桨叶根部不平衡载荷在水平方向和竖直方向上产生轮毂偏航力矩 M_{yaw} 和倾覆力矩 M_{tilt} , 其表达式为

$$M_{\text{yaw}} = \sum_{i=1}^3 M_i(\varphi_i) \sin \varphi_i \quad (12)$$

$$M_{\text{tilt}} = \sum_{i=1}^3 M_i(\varphi_i) \cos \varphi_i \quad (13)$$

根据概率论知, 桨叶根部不平衡载荷的直流分量的方差为

$$S^2(M_0) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(M_{i0} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 M_{i0} \right)^2 \quad (14)$$

由式(11)一式(13)得偏航力矩和俯仰力矩的表达式为

$$M_{\text{yaw}} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{S^2(M_0)} \sin(\varphi_1 + \psi) - \frac{3}{2} M_1 \sin \theta_1 \quad (15)$$

$$M_{\text{tilt}} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{S^2(M_0)} \cos(\varphi_1 + \psi) + \frac{3}{2} M_1 \cos \theta_1 \quad (16)$$

式中, ψ 为常量, 其表达式为

$$\psi = \arctan \frac{\sqrt{3}(M_{20} - M_{30})}{2M_{10} - M_{20} - M_{30}} \quad (17)$$

以上分析表明, 为了对作用在桨叶上的不平衡载荷进行有效控制, 可以间接控制偏航力矩和俯仰力矩来控制桨叶上的不平衡载荷, 从而提高了风电机组的性能和稳定性, 保证风电机组运行在不同风速条件下的输出功率为恒功率。

2.2 RBF 神经网络-滑模变结构独立变桨控制器

设非线性不确定控制系统的状态方程为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u(x) + d(t) \quad (18)$$

式中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为控制系统的状态变量; $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别为不确定有界连续函数; $u(x)$ 为系统控制输入, 滑模变结构控制的目标是使非线性系统的初始点 $x(0)$ 不论位于滑模面的什么位置, 在允许的时间内系统的运行状态都会逼近滑模切换面。

根据风速的状态, 风电机组变桨过程有风力机启动、额定风速以下和大于额定风速三个阶段, 变桨过程如图 2 所示。本文对运行在额定风速以下的风电机组采用转矩控制方式, 调整转矩来控制风力机转速, 从而对最大风能利用系数进行有效跟踪, 保证输出最大功率。额定风速以上的风电机组采用独立变桨控制, 通过对桨距角的调整来控制桨叶上的不平衡载荷, 降低桨叶上的疲劳负荷, 从而保证风电机组输出功率保持在额定功率值附近。设置控制系统的追踪对象为风机转速, 通过风机转速反馈求出系统状态量的变化误差, 选取滑模面函数为

$$s = \dot{e} + ce \quad (19)$$

式中, 误差 $e = \omega^* - \omega$, 参数 $c > 0$ 。根据滑膜运动轨迹, 满足滑膜到达条件且滑膜存在的控制器, 使系统运动轨迹在滑膜面上, 系统需满足 Lyapunov 稳定性, 即 $s\dot{s} < 0$ 。

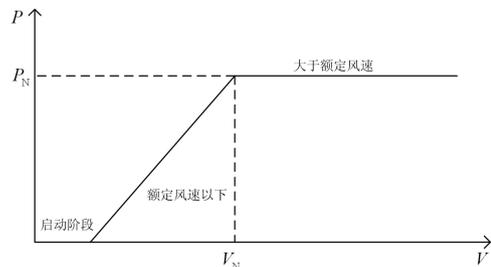


图 2 变桨过程状态图

Fig. 2 Pitch process state diagram

为了降低由风切变、风剪切和塔影效应在桨叶根部产生的不平衡载荷, 由于滑模变结构控制对系统中不确定因素具有较强的抗干扰性和鲁棒性, 但是滑模变结构控制的缺点是在状态轨迹位于滑模面附近时, 会在滑模面两侧左右穿越而产生抖动。为了克服滑模变结构控制的缺点, 本文提出了 RBF-SMC 独立变桨控制, 控制框图如图 3 所示。通过 RBF 神经网络的万能逼近特性, 使得滑模误差趋向为 0, 使得系统回到滑模面上。

本文 RBF 神经网络采用高斯函数形式, 设径向

基向量为 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ ，则 h_j 的高斯函数为

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (20)$$

式中， b_j 为方差， c_j 为基宽参数， $j = 1, 2, \dots, m$ 。

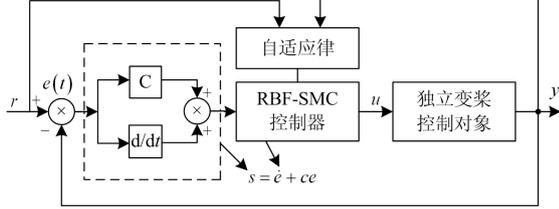


图 3 RBF-SMC 控制器结构框图

Fig. 3 RBF-SMC block diagram

图 4 为两点 RBF 神经网络结构图，把 RBF 神经网络的输出作为控制输入量，即

$$u(k) = h_1\omega_1 + h_2\omega_2 + \dots + h_j\omega_j + \dots + h_m\omega_m \quad (21)$$

式中： m 为神经网络隐含层节点数； ω_j 为神经网络权值。

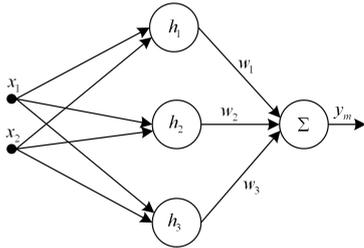


图 4 两点 RBF 神经网络

Fig. 4 A two-point RBFNN

为了设计稳定的 RBF 神经网络-滑模变结构独立变桨控制器，定义 Lyapunov 函数为

$$V = s\dot{s} \quad (22)$$

Lyapunov 函数即为 RBF 神经网络的权值进行在线调节的目标，即 RBF 神经网络权值调节指标为： $V = s\dot{s}$ ，采用梯度下降法，则 RBF 神经网络权值算法为

$$\Delta\omega_j = -\frac{\partial V}{\partial\omega_j} = -s \frac{\partial V}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial\omega_j} = -\gamma \cdot h_j(s) \cdot s \quad (23)$$

$$\omega_j(k) = \omega_j(k-1) + \eta\Delta\omega_j(k) + \alpha\omega_j(k) + \alpha(\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)) \quad (24)$$

式中： γ 为自适应参数； $\eta(0 \leq \eta \leq 1)$ 为神经网络学习速率； $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 为动量因子。

同理，采用梯度下降法可得方差和基宽参数的算法为

$$\Delta b_j(k) = -\frac{\partial V}{\partial b_j} = -s \frac{\partial V}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial b_j} = -\gamma s \omega_j h_j \frac{\|x - c_{ij}\|^2}{b_j^3} \quad (25)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta\Delta b_j(k) + \alpha(b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (26)$$

$$\Delta c_{ij}(k) = -s \frac{\partial V}{\partial c_{ij}} = -s \frac{\partial V}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial c_{ij}} = -\gamma s \omega_j \cdot \frac{x_i - c_{ij}}{b_j^2} \quad (27)$$

$$c_{ij}(k) = c_{ij}(k-1) + \eta\Delta c_{ij}(k) + \alpha(c_{ij}(k-1) - c_{ij}(k-2)) \quad (28)$$

通过 RBF 神经网络的在线自学习，对神经网络的权值、方差和基宽参数的修正量 $\Delta\omega_j$ 、 Δb_j 和 Δc_{ij} 进行反复训练，使得变桨控制系统稳定性满足滑模变结构控制的要求： $\lim_{x \rightarrow 0} s\dot{s} = 0$ ，从而克服滑模控制的抖动。

根据以上分析，提出了基于 RBF-SMC 独立变桨控制系统，系统控制框图如图 5 所示。具体过程是：通过测量桨叶根部不平衡载荷 $M_i (i=1, 2, 3)$ ，经过科尔曼坐标变换把 $M_i (i=1, 2, 3)$ 变换为固定坐标系下的 M_{tilt} 、 M_{yaw} ，把 M_{tilt} 、 M_{yaw} 与初始值 (M_{tilt} 、 M_{yaw} 的初始给定值为 0) 比较后经 RBF-SMC 控制器得到固定坐标系下偏差桨距角 β_d^* 、 β_q^* ，经科尔曼坐标逆变换把 β_d^* 、 β_q^* 变换为每个叶片的偏差桨距角 $\Delta\beta_1^*$ 、 $\Delta\beta_2^*$ 、 $\Delta\beta_3^*$ ，再把统一变桨角 β^* 分别与 $\Delta\beta_1^*$ 、 $\Delta\beta_2^*$ 、 $\Delta\beta_3^*$ 求和得到每个叶片的变桨桨距角 β_1^* 、 β_2^* 、 β_3^* ，最后， β_1^* 、 β_2^* 、 β_3^* 经变桨驱动系统后得到每个叶片的实际变桨桨距角 β_1 、 β_2 、 β_3 。

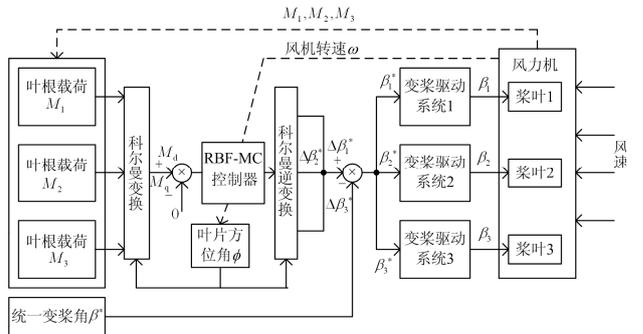


图 5 RBF-SMC 独立变桨控制框图

Fig. 5 RBF-SMC individual variable pitch control block diagram

3 实验及结果分析

3.1 仿真实验及结果分析

为了验证本文提出的变桨控制方法的正确性, 在 Matlab/Simulink 与 GH-blade 中搭建了 5 MW 风电机组的联合仿真模型, 在额定风速以下和额定风速以上对 PID 独立变桨控制与 RBF-SMC 独立变桨控制进行仿真实验, 风电机组参数如表 1 所示。

表 1 风电机组参数

Table 1 Wind power generation unit parameter	
Rating	5 MW
Control	Variable Pitch
Rotor orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 13 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rotor Mass	110,000 kg
Optimal Tip-Speed-Ratio	7.55
Rated Generator Torque	43,100 N·m
Maximum Generator	47,400 N·m
Rated Generator	1 174 rpm

在仿真实验中, 设置 RBF-SMC 独立变桨控制的参数, 自适应参数 $\gamma=1.0$, 滑模面参数 $C=5.0$, 神经网络的学习速率 $\eta=0.1$, 动量因子 $\alpha=0.05$; 设置 PID 独立变桨控制的参数, 比例、积分和微分系数分别为 $k_p=43.0$, $k_i=22.1$, $k_d=11.5$ 。

1) 轮毂处的平均风速低于额定风速

设置轮毂处的平均风速为 10 m/s, 如图 6 所示; 图 7 为风电机组输出功率仿真波形图, 图 8、图 9 分别为转矩控制下轮毂俯仰力矩和偏航力矩仿真波形图。

在风电机组运行于额定风速以下时, 变桨控制采用转矩控制, 独立变桨控制系统对最佳风能利用系数进行跟踪, 使得输出的电功率最大化。通过图 7 知, RBF-SMC 独立变桨控制方案能比 PID 独立变桨控制方案更好地跟踪最佳风能利用系数, 使输出功率高于 PID 独立变桨控制方案下的输出功率。

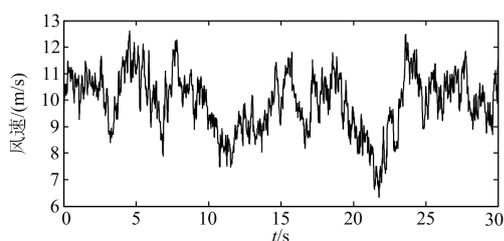


图 6 轮毂处风速

Fig. 6 Wind speed at hub

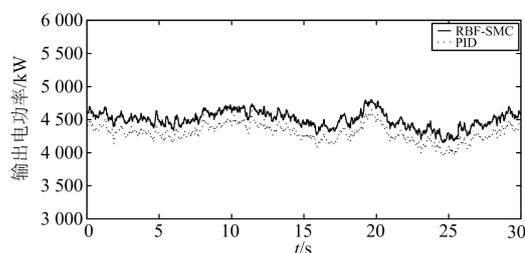


图 7 输出功率

Fig. 7 Electrical output power

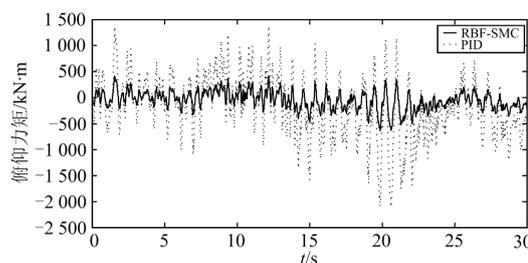


图 8 俯仰力矩

Fig. 8 Tilt moment of the hub

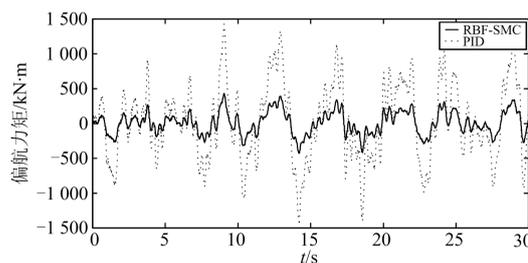


图 9 偏航力矩

Fig. 9 Yaw moment of the hub

通过图 8、图 9 可知, 在本文提出的控制方案下, 轮毂上的俯仰力矩和偏航力矩比 PID 独立变桨控制方案波动小、幅值低。

2) 轮毂处的平均风速高于额定风速

设置轮毂处的平均风速为 17 m/s, 如图 10 所示; 图 11、图 12 分别为独立变桨控制下轮毂处的俯仰力矩和偏航力矩的仿真波形图, 图 13 为独立变桨控制桨距角的仿真波形图。

在风电机组运行于额定风速以上时, 采用独立变桨控制, 通过对俯仰力矩和偏航力矩的有效控制, 间接降低了桨叶不平衡载荷。通过图 13 可知, 采用本文提出的独立变桨控制方案, 桨距角变化比 PID 独立变桨控制方案更加平稳, 变化波动明显也小很多。通过图 11、图 12 可知, 本文提出的独立变桨控制方案比 PID 独立变桨控制方案更能有效减少俯仰力矩和偏航力矩, 从而间接地对桨叶上的不平衡载荷进行有效控制。

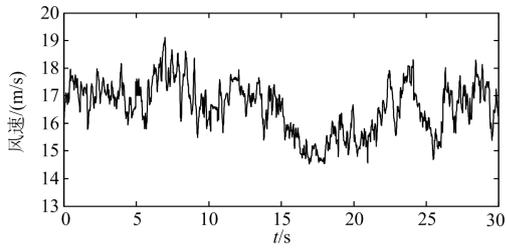


图 10 轮毂处风速
Fig. 10 Wind speed at hub

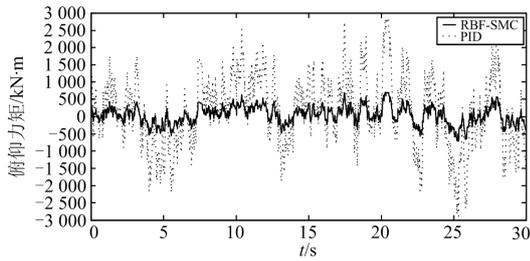


图 11 俯仰力矩
Fig. 11 Tilt moment of the hub

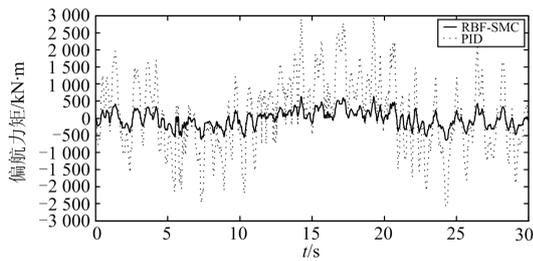


图 12 偏航力矩
Fig. 12 Yaw moment of the hub

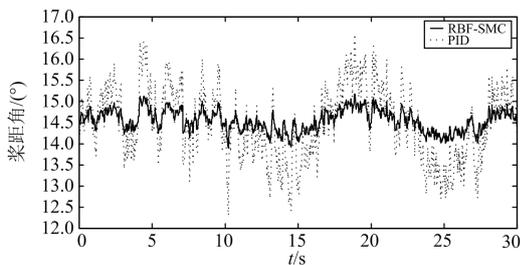


图 13 桨距角
Fig. 13 Pitch angle

3.2 现场实验及结果分析

为了验证 RBF-SMC 独立变桨控制方案的优越性,搭建了 5 MW 的风电机组独立变桨控制试验平台,试验平台主要由变桨控制柜、上位机、对拖平台、变桨电机、速度与力矩传感器等组成,如图 14 所示。

现场试验收集了 5 min 的测试结果,测试分别在 RBF-SMC 独立变桨控制和 PID 独立变桨控制下

进行,试验风速从 3 m/s 逐渐变化到额定风速以上,试验风速如图 15 所示。



图 14 试验平台
Fig. 14 Test platform

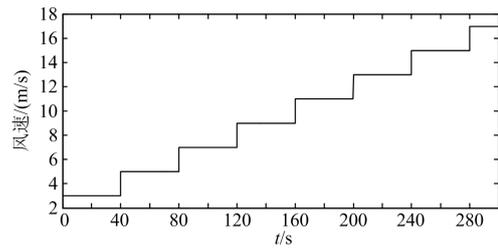


图 15 实验风速
Fig. 15 Experimental wind speed

图 16、图 17 为桨距角和电机转矩现场试验波形,从图可以看出,采用 RBF-SMC 独立变桨控制方案的桨距角和电机转矩,其波动性明显比 PID 独立变桨方案的要小,这说明了本文提出的独立变桨控制方案的正确性。

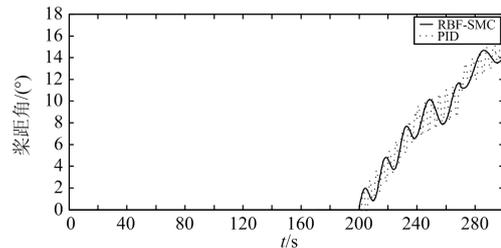


图 16 桨距角
Fig. 16 Pitch angle

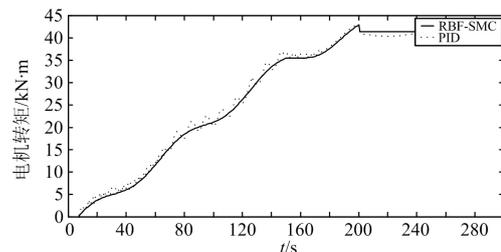


图 17 电机转矩
Fig. 17 Generator torque

4 结论

为了验证本文提出的基于 RBF 神经网络滑模变结构独立变桨控制在大型风电机组独立变桨控制中的有效性, 在 GH-blade 和 Matlab/Simulink 中搭建了 5 MW 风电机组联合仿真模型。通过 RBF-SMC 独立变桨控制与 PID 独立变桨控制方案下的仿真实验, 对仿真波形分析比较得出本文提出的独立变桨控制方案能有效降低俯仰力矩和偏航力矩, 从而降低桨叶上的不平衡载荷, 而且当风电机组运行在额定风速以下时, 能使风电机组最大化地输出电功率。通过现场试验结果分析, 采用 RBF-SMC 独立变桨控制方案能有效降低桨距角的波动, 使桨距角平滑变化, 同时电机转矩也更加平稳的变化, 验证了本文提出的独立变桨控制方案的正确性。

参考文献

- [1] 叶燕飞, 王琦, 陈宁, 等. 考虑时空分布特性的风速预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 115-119.
YE Yanfei, WANG Qi, CHEN Ning, et al. Wind forecast model considering the characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 115-119.
- [2] 龚裕仲, 江全元, 汪海蛟. 考虑电网频率偏差的风电功率爬坡限制指标动态优化[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2378-2384.
GONG Yuzhong, JIANG Quanyuan, WANG Haijiao. Dynamic optimization of wind power ramp limitation based on power system frequency deviation[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2378-2384.
- [3] 陈载宇, 沈春, 殷明慧, 等. 面向 AGC 的变速变桨风电机组有功功率控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 9-14.
CHEN Zaiyu, SHEN Chun, YIN Minghui, et al. Review of active power control strategy for variable-speed variable-pitch wind turbine participating in AGC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 9-14.
- [4] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [5] 郑明, 李保宏, 陆莹, 等. 海上风电场集群输电电网可靠性分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 49-54.
ZHENG Ming, LI Baohong, LU Ying, et al. Reliability analysis of offshore wind farm transmission network cluster[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 49-54.
- [6] 周腊吾, 邓宁峰, 陈浩, 等. 基于 ACA-PID 算法的风机独立变桨控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 100-105.
ZHOU Lawu, DENG Ningfeng, CHEN Hao, et al. Individual pitch control strategy based on ACA-PID controller in wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 100-105.
- [7] GENG Hua, YANG Geng. Output power control for variable-speed variable-pitch wind generation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 494-503.
- [8] 许昌, 魏媛, 李涛, 等. 大型风电机组机组层 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 70-74.
XU Chang, WEI Yuan, LI Tao, et al. Research on automatic generation turbine control strategy of large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 70-74.
- [9] YUAN Xibo, LI Yongdong. Control of variable pitch and variable speed direct-drive wind turbines in weak grid systems with active power balance[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 8(2): 119-131.
- [10] 邢作霞, 陈雷, 孙宏利, 等. 独立变桨距控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 131-138.
XING Zuoxia, CHEN Lei, SUN Hongli, et al. Strategies study of individual variable pitch control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(26): 131-138.
- [11] VAN T L, NGUYEN T H, LEE D C. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 578-587.
- [12] 韦徵, 陈冉, 陈家伟, 等. 基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 121-126.
WEI Zheng, CHEN Ran, CHEN Jiawei, et al. Wind turbine-generator unit variable-speed pitch control based on judgment of power changes and fuzzy control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 121-126.
- [13] 杜静, 文薄程, 谢双义, 等. 变速变桨风力机的自适应变桨及转矩控制[J]. 电源技术, 2014, 38(10): 1904-1906.
DU Jing, WEN Bochong, XIE Shuangyi, et al. Adaptive pitch and torque control of wind turbines[J]. Power Technology, 2014, 38(10): 1904-1906.
- [14] LUO Qingshun, YANG Qinmin, HAN Chao, et al. Pitch

- angle controller of variable-speed wind turbine based on L1 adaptive control theory[C] // International Conference on Mechatronics and Control, 2014: 955-960.
- [15] 王哲, 田艳丰, 陈雷, 等. 基于RBF神经网络的桨距角控制策略[J]. 太阳能学报, 2011, 32(5): 623-626.
WANG Zhe, TIAN Yanfeng, CHEN Lei, et al. Pitch angle control strategy based on RBF neural network[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(5): 623-626.
- [16] JAFARNEJADSANI H, PIEPER J, EHLERS J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using radial-basis function neural network[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2264-2272.
- [17] 窦真兰, 施刚, 曹云峰, 等. 减少风力机转矩波动的异步变桨控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 237-245.
DOU Zhenlan, SHI Gang, CAO Yunfeng, et al. Individual pitch control for reducing wind turbine torque fluctuation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 237-245.
- [18] ZHANG Yunqian, CHEN Zhe, CHENG Ming. Proportional resonant individual pitch control for mitigation of wind turbines loads[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(3): 191-200.
- [19] 姚兴佳, 刘玥, 郭庆鼎. 基于前馈补偿方位角权系数的分程独立变桨控制研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(11): 532-539.
YAO Xingjia, LIU Yue, GUO Qingding. A control method for split range individual pitch based on feed-forward azimuth angle weight number assignment[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(11): 532-539.
- [20] YAO X, WANG X, XING Z, et al. Individual pitch control for variable speed turbine blade load mitigation[C] // International Conference on Sustainable Energy Technologies, November 24-27, 2008, Singapore, Singapore: 769-772.
- [21] 崔双喜, 王维庆, 张新燕. 大型风力发电机组无模型独立变桨载荷控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 55-59.
CUI Shuangxi, WANG Weiqing, ZHANG Xinyan. Model free and individual pitch load control for large-scale wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 55-59.
- [22] 鲁效平, 顾海港, 林勇刚, 等. 基于独立变桨距技术的风力发电机组载荷控制研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(11): 1592-1598.
LU Xiaoping, GU Haigang, LIN Yonggang, et al. Research on the load control of wind turbines based on individual pitch technology[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2011, 32(11): 1592-1598.
- [23] 王晓东, 姚兴佳. 基于泛模型的风轮不平衡载荷控制[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 1592-1598.
WANG Xiaodong, YAO Xingjia. Rotor unbalance load control of wind turbine based on universal model[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(2): 1592-1598.

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-22

作者简介:

田 猛(1989—), 男, 硕士, 研究方向为风电场风速与风电功率预测。E-mail: 1285155455@qq.com

(编辑 葛艳娜)