

文章编号:0254-0096(2015)01-0001-05

基于无模型控制的风电机组独立变桨距控制

刘颖明¹, 朱江生², 姚兴佳², 马奎超², 王晓东¹, 王士荣², 郭庆鼎^{1,2}

(1. 沈阳工业大学新能源工程学院, 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学风能技术研究所, 沈阳 110023)

摘 要: 针对大型风电机组强外部扰动和无法准确建模等问题, 提出无模型自适应(MFA)独立变桨距控制技术, 控制器设计充分考虑机组模型的非线性问题, 通过优化内部参数使系统克服时变及非线性, 满足系统动态和稳态要求。在额定风速以上时, 通过调节发电机转矩维持额定功率输出稳定, 通过调节桨距角实现减载, 以3 MW风电机组为实验对象, 基于Blade软件对该控制策略和传统PID控制策略进行仿真比较。结果表明, 这种新控制策略可有效稳定风电机组输出功率和降低机组载荷。

关键词: 独立变桨距; 载荷控制; 无模型控制; 坐标变换

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着风电机组大型化的发展, 风轮直径也在不断增大, 叶片、传动系统和塔架等零部件变得柔性大、阻尼小, 机组低频模态越来越密集, 各模态耦合几率加大, 机组承受的动态载荷更加复杂^[1]。尤其是风轮直径增加导致风轮叶片承受来流时变、风切变、塔影效应等影响产生的不平衡载荷更加明显, 引起桨叶产生大范围的挥舞和摆振, 严重影响到风电机组传动机构等部件的机械应力和疲劳寿命。变桨距控制的优点是具有较高的风能利用系数, 能确保高风速段的额定功率, 提高风机的整体柔性度, 减小整机和桨叶的受力状况等。但叶片桨距角的调节主要根据风能利用系数和功率输出, 无法兼顾风轮旋转平面内因风况、风速的不同对桨叶产生的轴向拍打和振动, 尤其大型风电机组, 风切变效应和塔影效应的影响无法避免, 从而使每个桨叶的受力不同, 而且在风轮的连续旋转下, 桨叶受力处于持续的波动之中, 对风机的稳定性和使用寿命产生不良影响^[2]。

独立变桨距控制的每个桨叶都由独立的变桨距执行机构控制, 按照各桨叶所处不同位置 and 不同风速分别进行调节, 不仅能跟踪实现最大风能的捕

获和稳定发电机的输出功率, 而且能有效减小桨叶的拍打震动以及风机的其他扰动影响, 甚至其中一个变桨距执行机构出现故障时, 其他两个桨叶仍能调节桨距角实现功率控制, 从而大幅提高风机的稳定性和耐疲劳寿命^[3]。由此, 独立变桨距控制技术成为当今大型风电机组控制技术研究热点, 也是现代风机控制理论研究的难点。本文针对大型风电机组高风速下风机承受载荷增加, 给出风电机组无模型自适应(MFA)独立变桨距控制方案。旨在使风电机组高风速下输出功率稳定和减小风电机组承受的载荷。

1 叶根载荷反馈原理

风电机组具有非线性的空气动力学, 欲对风电机组控制理论进行研究, 需应用线性控制理论设计控制器。因此, 首先要得到风电机组空气动力学的线性化模型^[4,5]。将应变传感器安装到叶片根部, 测量叶片根部弯矩。本文为建立独立变桨距控制器, 通过测量叶片根部弯矩, 对三叶片的桨距角实时调节, 必须要求在静止坐标系下建立叶根弯矩线性化模型, 描述一个旋转风轮在某固定位置时, 叶片根部气动载荷于风速、桨距角的线性化模型可表示为:

收稿日期: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(51207095); 辽宁省科技创新重大专项(201303005); 辽宁省自然科学基金(201202170); 沈阳市科技计划项目(F13-074-2-00)

通信作者: 姚兴佳(1948—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事风力发电技术方面的研究。xingjia@vip.163.com

$$\begin{cases} \Delta M_1 = k\beta_1 + hw_1 \\ \Delta M_2 = k\beta_2 + hw_2 \\ \Delta M_3 = k\beta_3 + hw_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 ——分别为3个叶片的相对风速变化量; k ——叶根弯矩对桨距角的导数; h ——叶根弯矩对风速的导数; ΔM_1 、 ΔM_2 、 ΔM_3 ——叶根弯矩的变化量。

相对风速 w 是叶片在旋转坐标系下的绝对风速 v 与风轮的前后振动速度叠加,其算法如式(2)所示:

$$w_i = v_i - x_{ia} \quad (2)$$

式中, i ——叶片序数,取 $i=1, 2, 3$; x_{ia} ——轮毂中心的轴向位移。

由于计算分析的复杂性,为了简化计算,只考虑塔架运动的水平位移,对俯仰转动作用的影响忽视。从而可得简化后的模型:

$$\begin{cases} \Delta M_1 = hv_1 + k\beta_1 - hx_{ia} \\ \Delta M_2 = hv_2 + k\beta_2 - hx_{ia} \\ \Delta M_3 = hv_3 + k\beta_3 - hx_{ia} \end{cases} \quad (3)$$

综上所述,机组俯仰弯矩 M_{tilt} 和偏航弯矩 M_{yaw} 的计算式分别为:

$$\begin{aligned} M_{\text{tilt}} &= \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i (\Delta M_i) \\ &= \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i [(k\beta_i + hv_i) - h \frac{dx_{ia}}{dt}] \\ &= \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i (k\beta_i + hv_i) - h \frac{dx_{ia}}{dt} \sum_{i=1}^3 \sin \psi_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{yaw}} &= \sum_{i=1}^3 \cos \psi_i (\Delta M_i) \\ &= \sum_{i=1}^3 \cos \psi_i [(k\beta_i + hv_i) - h \frac{dx_{ia}}{dt}] \\ &= \sum_{i=1}^3 \cos \psi_i (k\beta_i + hv_i) - h \frac{dx_{ia}}{dt} \sum_{i=1}^3 \cos \psi_i \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)为风轮弯矩表达式,但由于风轮旋转,叶片呈周期性变化,虽经部分简化,但仍难以进行计算分析。因此,为了消除周期性变化的时变系数,进行坐标变换。基于对叶片桨距角的测量,若定义第一个叶片方位角为 ψ , 并且 ψ 为 0° , 则第 i 个叶片方位角为:

$$\psi_i = \psi + \frac{2}{3}\pi(i-1) \quad (6)$$

设 q_1 、 q_2 、 q_3 为固有坐标系下的坐标值, Q_1^T , Q_2^T 为坐标变换后的坐标值,令:

$$Q_1^T = \frac{2}{3}q_1 \sin \psi_1(t) + \frac{2}{3}q_2 \sin \psi_2(t) + \frac{2}{3}q_3 \sin \psi_3(t) \quad (7)$$

$$Q_2^T = \frac{2}{3}q_1 \cos \psi_1(t) + \frac{2}{3}q_2 \cos \psi_2(t) + \frac{2}{3}q_3 \cos \psi_3(t) \quad (8)$$

则 Q_1^T 、 Q_2^T 正交,原固有坐标系下的三坐标都变换到直角坐标系下,因而线性解耦。变换矩阵可表示为:

$$P = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \sin \psi_1(t) & \sin \psi_2(t) & \sin \psi_3(t) \\ \cos \psi_1(t) & \cos \psi_2(t) & \cos \psi_3(t) \end{pmatrix} \quad (9)$$

对 P 求逆,可得:

$$Q = \begin{pmatrix} \sin \psi_1(t) & \cos \psi_1(t) \\ \sin \psi_2(t) & \cos \psi_2(t) \\ \sin \psi_3(t) & \cos \psi_3(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

通过上述的坐标变换,可将旋转坐标系下的桨距角和叶片载荷变换为固定坐标系下,便于计算:

$$\begin{bmatrix} \beta_1(t) \\ \beta_2(t) \\ \beta_3(t) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \psi_1(t) & \cos \psi_1(t) \\ \sin \psi_2(t) & \cos \psi_2(t) \\ \sin \psi_3(t) & \cos \psi_3(t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \beta_d^T(t) \\ \beta_q^T(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta M_d^T \\ \Delta M_q^T \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \sin \psi_1(t) & \sin \psi_2(t) & \sin \psi_3(t) \\ \cos \psi_1(t) & \cos \psi_2(t) & \cos \psi_3(t) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_1(t) \\ \Delta M_2(t) \\ \Delta M_3(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, ΔM_q^T ——风轮俯仰弯矩; ΔM_d^T ——风轮偏航方向弯矩。

$$\Delta M_q^T(t) = \frac{2}{3} M_{\text{tilt}} \quad (13)$$

$$\Delta M_d^T(t) = \frac{2}{3} M_{\text{yaw}} \quad (14)$$

2 控制器的设计

2.1 控制器的选取

由于风速、桨距角以及载荷之间存在复杂的非线性关系,而且无法建立准确的数学模型^[6],因此采用 MFA 控制技术对风轮不平衡载荷及风轮推力进行控制。MFA 控制是自动控制领域中一种全新的理论和技术,控制器的设计不包括被控对象的数学模型,仅利用被控对象的输入输出数据进行控制器设计。无模型控制器是一种集建模与反馈控制于一体的结构自适应控制律,无需通过提前训练即可使控制器准确掌握被控对象当前特性,逐渐获得较精确的泛模型,改善控制律的性能,达到获得理想的控制结果^[7,8]。

2.2 无模型控制器的设计

经 Park 变换,解耦后的偏航力矩和俯仰力矩可认为是未知动态模型的非线性系统,可表示为:

$$y(k) = f[Y_{k-1}^{k-n}, u(k-1), U_{k-2}^{k-m}, k] \quad (15)$$

式中, $y(k)$ —— 一维输出; $\{u(k-1), y(k)\}$ —— 系统在 k 时刻的一组观测数据或状态;

$$Y_{k-1}^{k-n} = \{y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)\};$$

$$U_{k-2}^{k-m} = \{u(k-2), u(k-3), \dots, u(k-m)\}.$$

按照输入输出等价线性化的原则可动态线性折线化为式(16)的泛模型形式。

$$y(k) = y(k-1) + \varphi(k)[u(k-1) - u(k-2)] \quad \varphi(k) \in F_\varphi \quad (16)$$

式中, $y(k)$ 、 $u(k)$ 、 $\varphi(k)$ —— 系统输出、控制量和特征参量。

2.3 无模型控制器参数整定

为了使非线性系统能合理进行动态线性化, 必须在控制算法中加入可调参数, 控制输入 $u(k)$ 的变化。因此, 引入控制输入准则函数:

$$J[u(k)] = [y(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda[u(k) - u(k-1)]^2 \quad (17)$$

式中, $\lambda[u(k) - u(k-1)]^2$ 用于控制输入量的变化, 克服稳态跟踪误差; λ 不仅可限制伪偏导数值的变化, 也可限制 $\Delta u(k)$ 的变化, 使非线性系统线性替代的范围控制满足要求, 同时还可使控制算法中分母不为零。

无模型控制规律:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k}{\alpha + \|\hat{\phi}(k)\|^2} \hat{\phi}(k) \{y_0 - y(k)\} \quad (18)$$

式中, α —— 权重系数; ρ_k —— 步长序列; $\hat{\phi}(k)$ —— 被控对象的特征参量。

$\hat{\phi}(k)$ 的估值 $\hat{\phi}(k)$ 是在线实时估计的, 被控对象无论发生参数性变化, 还是结构性变化, 都用 $\hat{\phi}(k)$ 的变化来描述。所以无模型控制律既是参数自适应的, 又是结构自适应的。无模型控制器原理, 如图 1 所示。

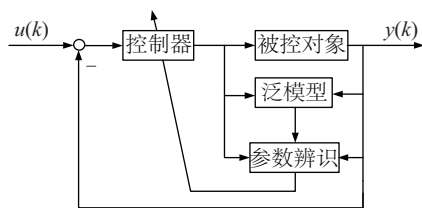


图1 无模型控制原理框图

Fig. 1 Schematic of the MFA controller

3 系统仿真

本文基于沈阳工业大学风能技术研究所 3 MW SUT-3000 风电机组参数变桨距控制系统通过 Blade 软件进行仿真, 主要参数: 风轮半径为 50 m, 额定风速为 12 m/s, 切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s, 发电机额定转速为 1200 r/min, 齿轮箱增速比为 84.21。PID 控制器参数取 $P=200$, $I=0.3$, $D=0.5$ 。变桨距所要解决的关键问题是在额定风速以上, 稳定风电机组输出功率和减小机组承受气动载荷。比较 PID 和 MFA 独立变桨距控制器的效果, 在模拟 14 m/s 湍流风况下, 对 MFA 独立变桨控制策略和 PID 控制策略在 Bladed 中进行仿真试验, 并与 PID 控制策略仿真结果进行比较分析。无模型控制器参数 ρ_k 取 0.65, α 取 0.225, 风速如图 2 所示。

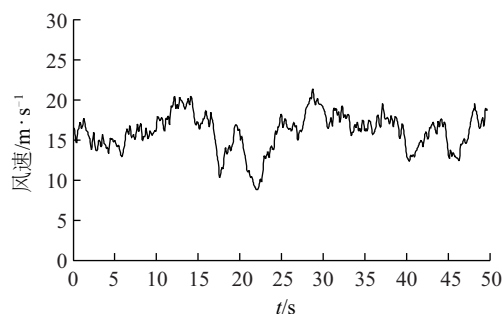
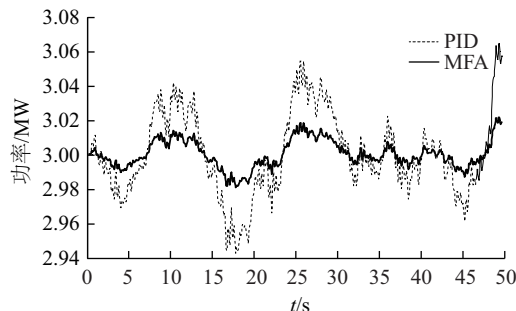


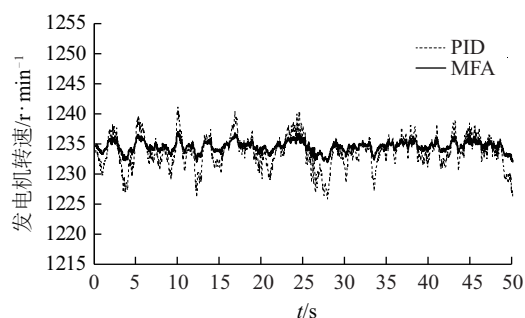
图2 湍流风速模型

Fig. 2 Turbulent flow wind speed model

图 3a 为两种控制器的功率输出对比, 反映了两控制器在相同风速变化下风电机组的输出功率。从图 3a 中可看出, 基于 MFA 独立变桨距控制对功率的稳定输出效果较 PID 控制效果稳定。图 3b 为 MFA 独立变桨距控制器的轮毂转速输出与 PID 控制器对比, 仿真结果显示 MFA 的发电机转速的输出较 PID 控制更稳定于额定转速。



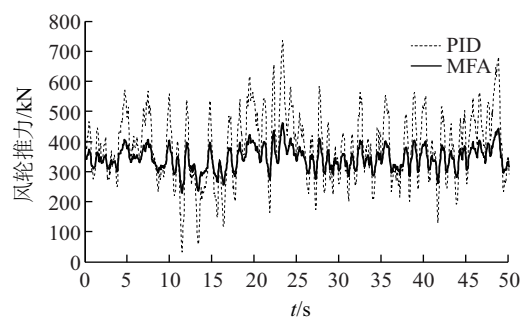
a. 输出功率



b. 发电机转速输出

图3 MFA和PID独立变桨距控制对比

Fig. 3 The MFA and PID independent variable pitch control output power, generator speed output compared

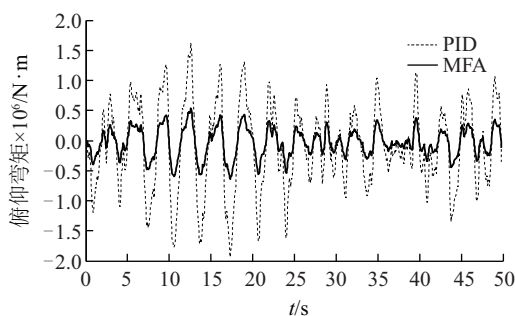


c. 风轮推力

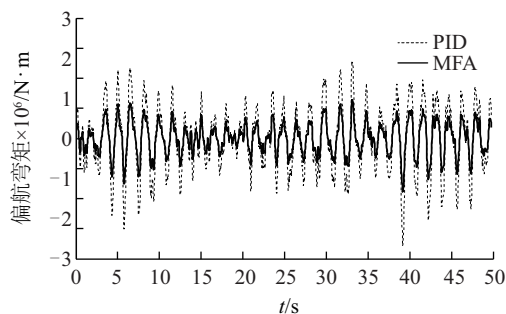
图4 MFA和PID独立变桨距控制的俯仰弯矩、偏航弯矩、风轮推力对比

Fig. 4 MFA and PID independent variable pitch under the control of the pitching, yaw, wind wheel thrust moment compared

图4a、图4b分别为两种控制器风轮轮毂中心处的俯仰弯矩和偏航弯矩对比,基于MFA独立变桨距控制使俯仰弯矩和偏航弯矩减小得较明显,且跟随风速的变化有效减低了所承受的载荷。由两种控制器的风轮推力对比(图4c)可得,采用MFA独立变桨距控制有效减小了风电机组承受的推力,使风电机组运行在更良好的状态,可有效延长风电机组的疲劳寿命。



a. 俯仰弯矩



b. 偏航弯矩

4 结 论

本文设计了无模型独立变桨距控制器,通过优化内部参数,使风电机组克服非线性及时变扰动,满足系统有较好的稳态和动态性能。仿真结果证明,在高于额定风速段,可有效减小桨叶俯仰力矩与偏航力矩,同时减小轴向气动力,使输出功率稳定,改善风电机组的独立变桨距控制效果,增加风电机组使用寿命。

[参考文献]

- [1] Tony B, David S, Nick J, et al. Wind energy handbook [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [2] Sahin A D. Progress and recent trends in wind energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(5): 501—543.
- [3] 李 晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100—105.
- [3] Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 100—105.

- [4] Leithead W E, Connor B. Control of variable speed wind turbines: Dynamic models [J]. International Journal of Control, 2000, 73(13): 1173—1188.
- [5] Petru T, Thiringer T. Modeling of wind turbines for power system studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1132—1139.
- [6] 何玉林, 苏东旭, 黄 帅, 等. 变速变桨风力发电机组的桨距控制及载荷优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 95—100.
- [6] He Yulin, Su Dongxu, Huang Shuai, et al. Pitch control and load optimization of variable speed variable pitch wind turbine [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 95—100.
- [7] 蒋爱平, 李秀英, 巫 红. 无模型控制方法控制功能的分析研究[J]. 控制工程, 2007, 14(1): 14—17.
- [7] Jiang Aiping, Li Xiuying, Wu Hong. Control function analysis of model free control law [J]. Control Engineering of China, 2007, 14(1): 14—17.
- [8] Camblong H. Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds [J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(8): 946—958.

INDIVIDUAL PITCH CONTROL OF WIND TURBINE BASED ON MODEL-FREE ADAPTIVE CONTROL

Liu Yingming¹, Zhu Jiangsheng², Yao Xingjia², Ma Kuichao²,

Wang Xiaodong¹, Wang Shirong², Guo Qingding^{1,2}

(1. School of New Energy Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Wind Energy Technology Institute, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: With the increasing of wind turbine size and rotor diameter. Dynamic unbalance load and output power become a key in large scale wind turbine design. It's approved that the pitch control can impact on the rotor loads. It's difficult to build the exact model and nonlinear character of rotor. The MFA (Model Free Adapt) individual pitch controller was developed in to mitigate the rotor unbalance load for variable speed wind turbine. The controller was simulated based on a 3 MW variable speed wind turbine model. The loads were compared between traditional PID control and MFA control of the individual pitch control. The result showed that the MFA optimal individual pitch control has better effect of reducing loads and making output power stability than traditional PID control.

Keywords: individual pitch control; load control; model-free adaptive control; Park's transformation