

基于无模型自适应控制器的风力发电机载荷控制*

鲁效平 李伟 林勇刚

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】 建立了风力发电机独立变桨距系统的线性化模型。为了便于控制器设计,通过 Park 坐标变换将叶根的弯矩转换到两个固定的直交坐标系,对两个坐标系分别设计无模型自适应控制器进行载荷控制。在 NREL 建立的风力发电机模型 FAST 上对设计好的控制器进行了验证,结果表明基于 MFA 的独立变桨距控制器可以有效消除风力机上的不平衡载荷。与统一变桨距控制相比,叶轮俯仰弯矩最大峰值减小 62.5%,偏转弯矩最大峰值减小 60.1%,独立变桨距技术的采用对功率的输出影响不大。

关键词: 风力发电机 载荷控制 独立变桨距 无模型自适应控制 Park 坐标变换

中图分类号: TK8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0109-06

Load Control of Wind Turbine Based on Model-free Adaptive Controller

Lu Xiaoping Li Wei Lin Yonggang

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

A linear model for individual pitch of wind turbine system was established, and the loads of blade roots were transferred into a mean value and variations on two orthogonal axis using Park's transformation. The model-free adaptive controllers (MFA) were designed to control the loads components of the two orthogonal axes. The wind turbine nonlinear model FAST built by NREL was used to verify the controller. Test results showed that individual pitch based on MFA could eliminate the imbalance loads effectively. Compared to collective pitch control, the for-aft torque was decreased by 62.5%, yaw torque was decreased by 60.1%, and the value of output power changed a little.

Key words Wind turbine, Load control, Individual pitch, Model-free adaptive controller, Park's transformation

引言

随着风力发电机的大型化,叶轮上不平衡载荷更加明显,由其引起的风力机疲劳失效是风电运行维护成本的主要来源^[1]。独立变桨距技术是当前最有应用价值的载荷控制手段。现在的风力机变桨距机构很多已经采用单独的驱动器,不需要改变驱动系统的结构就可以实现独立变桨距的控制^[2]。

当前的独立变桨距技术大多停留在仿真研究阶段^[3-8]。无模型自适应控制(MFA)是一种先进的控制策略,它不依赖于受控对象的数学模型,具有很

强的适应性和鲁棒性^[9],国内外都提出了一些实现 MFA 的方法^[10-13]。本文将韩志刚提出的无模型自适应控制应用到独立变桨距风力发电机的载荷控制中。控制器测量 3 个叶片根部的弯矩,借鉴交流电动机控制中的 Park 坐标变换,将 3 个叶根的载荷映射到直交的固定坐标系 d 轴和 q 轴,分别对两个轴上的载荷进行无模型自适应控制。

1 风力发电机独立变桨距系统建模

与统一变桨距的模型相比,独立变桨距系统需要分别考虑 3 个叶片上的载荷,因此要建立一个多

收稿日期: 2010-03-11 修回日期: 2010-06-30

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2001AA512020)

作者简介: 鲁效平,博士生,主要从事风力发电机控制技术研究,E-mail: lovexp2006@126.com

通讯作者: 林勇刚,副教授,主要从事新能源开发利用研究,E-mail: qgb@zju.edu.cn

输入、多输出的系统模型。为了简化模型,假设叶片和传动轴是刚性的、发电机的力矩可控并且叶根的弯矩是可以准确测量的。

采用叶素理论和动量定理可以得到详细的风力发电机模型,其中包括空气动力学和机械结构的公式^[3]。但是这种方法得到的模型过于复杂,不适于

控制器的设计。因此,为了方便设计控制器,可以采用基于性能系数的风力机建模方式^[2],例如推力和弯矩关于风速、节距角和转速的静态系数。建模时,力和力矩按照 GL 标准坐标系定义,如图 1 所示。由于塔架的柔性远大于桨叶,因此假设塔架是柔性悬臂梁,桨叶是刚性的。

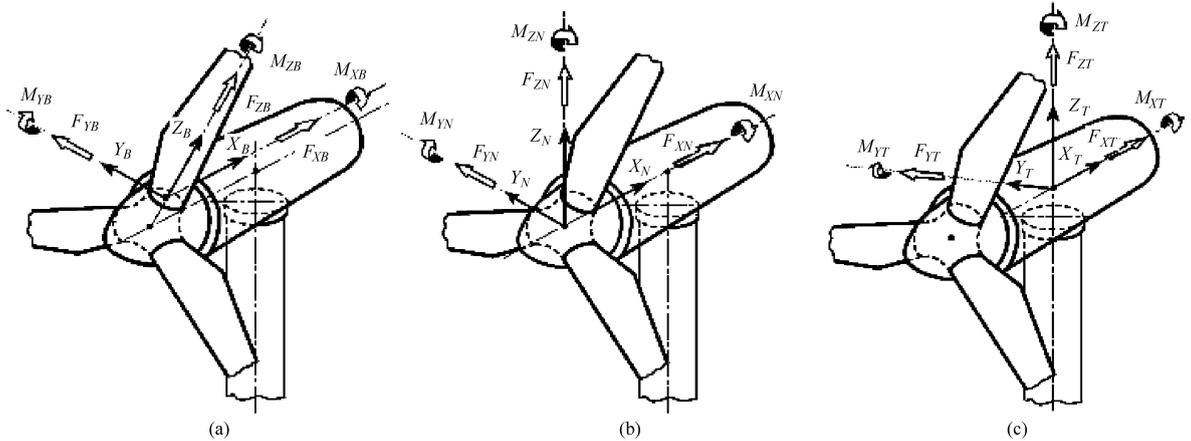


图 1 风力发电机 GL 坐标系

Fig. 1 GL coordinates system of wind turbine

(a) 旋转的桨叶坐标系 (b) 固定的轮毂坐标系 (c) 固定的塔架坐标系

首先需要计算单个桨叶上的受力,这也是整个风力机载荷计算的基础。桨叶上旋转面外的推力可以表示为

$$F_{x,i} = \frac{1}{2} \rho R_r^2 \pi C_{F_x} (v_{w,i}, \beta_i, \omega) v_{w,i}^2 \quad (1)$$

式中 ρ ——空气密度

R_r ——桨叶半径

ω ——风轮角速度

$v_{w,i}$ ——作用在桨叶上的相对风速

β_i ——桨叶节距角

C_{F_x} ——推力系数

$v_{w,i}$ 可以由实际风速 $v_{w0,i}$ 和塔架前后振动 x_{fa} 计算

$$v_{w,i} = v_{w0,i} - \dot{x}_{fa} + \frac{3}{2h_t} \frac{3R_r}{4} \dot{x}_{fa} \cos \Theta_i \quad (2)$$

式中 h_t ——塔架高度

Θ_i ——桨叶方位角

Θ_i 在桨叶处于竖直顶部时为 0° , 假设桨叶半径 $3/4$ 的风速作为有效风速作用位置, 将塔架作为悬臂梁^[14], 其转角和挠度的比值为 $3/(2h_t)$ 。

叶片上另外两个方向的力可以看作空气力、重力和惯性力的合力

$$\begin{cases} F_{y,i} = F_{y,ae,i} + F_{y,gr,i} + F_{y,in,i} \\ F_{z,i} = F_{z,ae,i} + F_{z,gr,i} + F_{z,in,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $F_{y,ae,i}$ 、 $F_{z,ae,i}$ ——作用在桨叶上空气力 Y 向和 Z 向分量

$F_{y,gr,i}$ 、 $F_{z,gr,i}$ ——桨叶重力在 Y 向和 Z 向分量

$F_{y,in,i}$ 、 $F_{z,in,i}$ ——惯性力在 Y 向和 Z 向分量
空气力的分量计算与叶片上面的推力计算类似

$$\begin{cases} F_{y,ae,i} = \frac{1}{2} \rho R_r^2 \pi C_{F_y} (v_{w,i}, \beta_i, \omega) v_{w,i}^2 \\ F_{z,ae,i} = \frac{1}{2} \rho R_r^2 \pi C_{F_z} (v_{w,i}, \beta_i, \omega) v_{w,i}^2 \end{cases} \quad (4)$$

由于空气力 $F_{z,ae,i}$ 比较小, 因此可以忽略。重力总是竖直向下, 设 m_b 为桨叶质量, 则重力分量可以表示为

$$\begin{cases} F_{y,gr,i} = -m_b g \sin \Theta_i \\ F_{z,gr,i} = -m_b g \cos \Theta_i \end{cases} \quad (5)$$

惯性力在 Y 和 Z 轴上差距较大, 因为 $F_{y,in,i}$ 主要是由加速度引起的, $F_{z,in,i}$ 是由离心力引起的

$$\begin{cases} F_{y,in,i} = m_b (R_{hub} + z_{cm,b}) \dot{\omega} \\ F_{z,in,i} = m_b (R_{hub} + z_{cm,b}) \omega^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 R_{hub} ——轮毂半径

$z_{cm,b}$ ——桨叶质心 Z 轴坐标

叶片上力矩的定义如下, $M_{x,i}$ 是引起风轮转动的力矩, 所以不作为结构载荷考虑。另外两个方向的力矩主要是由于空气力引起的, 可以表示为

$$\begin{cases} M_{y,i} = \frac{1}{2} \rho R_r^3 \pi C_{m_y} (v_{w,i}, \beta_i, \omega) v_{w,i}^2 \\ M_{z,i} = \frac{1}{2} \rho R_r^3 \pi C_{m_z} (v_{w,i}, \beta_i, \omega) v_{w,i}^2 \end{cases} \quad (7)$$

得到叶片上的载荷以后就可以计算风力机其他部分的载荷, 为了计算机舱上的载荷, 首先将旋转叶片坐

标系下的载荷转换到固定的轮毂坐标系下

$$\begin{cases} F_{h,\text{hub}} = \sum_{i=1}^3 F_{x,i} \\ F_{y,\text{hub}} = \sum_{i=1}^3 (F_{y,i} \cos \Theta_i - F_{z,i} \sin \Theta_i) \\ F_{z,\text{hub}} = \sum_{i=1}^3 (F_{z,i} \cos \Theta_i + F_{y,i} \sin \Theta_i) - m_{\text{hub}} g \end{cases} \quad (8)$$

式中 m_{hub} ——轮毂质量

设 x_{cm} 是轮毂质量中心的 X 轴坐标, 则轮毂上的弯矩可以用叶片的载荷表示为

$$\begin{cases} M_{y,\text{hub}} = \sum_{i=1}^3 (M_{y,i} + R_{\text{hub}} F_{x,i}) - \sum_{i=1}^3 M_{z,i} \sin \Theta_i - m_{\text{hub}} g x_{cm,\text{hub}} \\ M_{z,\text{hub}} = \sum_{i=1}^3 M_{z,i} \cos \Theta_i + \sum_{i=1}^3 (M_{y,i} + R_{\text{hub}} F_{x,i}) \sin \Theta_i \end{cases} \quad (9)$$

除了要增加发电机和机舱重力 ($m_{\text{gen}} + m_{\text{nac}}$) g 到 Z 轴的载荷以外, 作用在机舱上的载荷与作用在轮毂上的相同

$$\begin{cases} F_{x,\text{nac}} = F_{x,\text{hub}} \\ F_{y,\text{nac}} = F_{y,\text{hub}} \\ F_{z,\text{nac}} = F_{z,\text{hub}} - (m_{\text{gen}} + m_{\text{nac}}) g \end{cases} \quad (10)$$

Y 和 Z 轴的弯矩也被叫做倾斜和偏转力矩, 计算式为

$$\begin{cases} M_{\text{tilt}} = M_{y,\text{hub}} + F_{x,\text{hub}} (h_{\text{hub}} - h_t) + F_{z,\text{hub}} x_{ov} - (m_{\text{nac}} x_{cm,\text{nac}} + m_{\text{gen}} x_{cm,\text{gen}}) g \\ M_{\text{yaw}} = M_{z,\text{hub}} - F_{y,\text{hub}} x_{ov} \end{cases} \quad (11)$$

式中 h_{hub} ——轮毂的中心高度

x_{ov} ——塔顶和风轮中心的距离

根据式(4)和(11)就可以得到风力机的非线性模型。为了设计线性的控制器, 就需要将风力机的非线性模型在几个工作点进行线性化。对水平推力的线性化公式为

$$\Delta F_{x,i} = F'_{x,v} \Delta v_{w,i} + F'_{x,\beta} \Delta \beta_i + F'_{x,\omega} \Delta \omega \quad (12)$$

同样也可以通过同样的线性化手段得到风力机其他载荷的线性化公式。结合应用在交流电机控制中的 Park 变换, 可以得到线性化的倾斜和偏转力矩。 $v_{w,d}$ 和 $v_{w,q}$ 是 3 个叶片的平均风速及其在 $d-q$ 轴上分量的叠加; β_d 和 β_q 是 3 个桨叶节距角在 $d-q$ 轴上的分量, 则

$$\begin{cases} \Delta M_{\text{tilt}} = 3(h_{\text{hub}} - h_t) (F'_{x,v} \Delta v_{w,c} + F'_{x,\beta} \Delta \beta_c + F'_{x,\omega} \Delta \omega) + \frac{3}{2} (M'_{y,v} + R_{\text{hub}} F'_{x,v} + x_{ov} F'_{z,v}) v_{w,d} - \frac{3}{2} (M'_{z,v} - x_{ov} F'_{y,v}) v_{w,q} + \frac{3}{2} (M'_{y,\beta} + R_{\text{hub}} F'_{x,\beta} + x_{ov} F'_{z,\beta}) \beta_d - \frac{3}{2} (M'_{z,\beta} - x_{ov} F'_{y,\beta}) \beta_q \\ \Delta M_{\text{yaw}} = \frac{3}{2} (M'_{z,w} + x_{ov} F'_{y,v}) v_{w,d} + \frac{3}{2} (M'_{y,v} + R_{\text{hub}} F'_{x,v} - x_{ov} F'_{z,v}) v_{w,q} + \frac{3}{2} (M'_{z,\beta} + x_{ov} F'_{y,\beta}) \beta_d + \frac{3}{2} (M'_{y,\beta} + R_{\text{hub}} F'_{x,\beta} - x_{ov} F'_{z,\beta}) \beta_q \end{cases} \quad (13)$$

为了使模型更加完整, 需要对桨叶节距角的驱动单元进行建模。电机驱动的变桨距单元可以认为是二阶系统, 可以表示为

$$G_s(z) = \frac{\Delta \beta_i^*(z)}{\Delta \beta_i(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (14)$$

式中 $\Delta \beta_i$ ——控制器输出的节距角目标值

$\Delta \beta_i^*$ ——实际输出的节距角

a_1, a_2, b_1, b_2 ——传递函数中各阶变量的系数

为了方便编写程序, 可以将 $\Delta \beta_i^*$ 转换到时域

$$\Delta \beta_i^*(k) = a_1 \Delta \beta_i^*(k-1) + a_2 \Delta \beta_i^*(k-2) + b_1 \Delta \beta_i(k-1) + b_2 \Delta \beta_i(k-2) \quad (15)$$

在 Park 变换中, 采用离散的时间 $t = kT$, T 为采样时间。经过 Park 变换可以得到 $d-q$ 坐标系下的变桨距驱动模型

$$\begin{cases} \beta_d^*(z) = G_D(z) \beta_d(z) - G_C(z) \beta_q(z) - G_C^*(z) \beta_q^*(z) \\ \beta_q^*(z) = G_D(z) \beta_q(z) - G_C(z) \beta_d(z) - G_C^*(z) \beta_d^*(z) \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} G_D(z) = \frac{b_1 \cos(\omega T) z^{-1} + b_2 \cos(2\omega T) z^{-2}}{1 - a_1 \cos(\omega T) z^{-1} - a_2 \cos(2\omega T) z^{-2}} \\ G_C(z) = \frac{b_1 \sin(\omega T) z^{-1} + b_2 \sin(2\omega T) z^{-2}}{1 - a_1 \cos(\omega T) z^{-1} - a_2 \cos(2\omega T) z^{-2}} \\ G_C^*(z) = \frac{a_1 \sin(\omega T) z^{-1} + a_2 \sin(2\omega T) z^{-2}}{1 - a_1 \cos(\omega T) z^{-1} - a_2 \cos(2\omega T) z^{-2}} \end{cases} \quad (16)$$

可以看出伺服驱动引入了 $d-q$ 轴的耦合, 而且随着转轮速度和采样时间的增加, 这种耦合会增加。 $d-q$ 轴的耦合是实际的节距角和目标节距角之间延迟的结果。为了抵消这种延迟, 将驱动器延迟引起的转动频率相位延迟 μ 加到风轮的方位角中。因此, 与节距角有关的参数变换改为

$$\Theta_i \rightarrow \Theta_i + \phi_{\text{servo}}(\mu) \quad (17)$$

2 无模型自适应控制器设计

当前普遍采用的变速、变桨距风力机工作时 会 经历 3 个 状态: 停机、低于 额 定 风 速 运 行 和 高 于 额 定 风 速 运 行, 分 别 对 应 图 2 中 的 区 域 1、区 域 2 和 区 域 3。

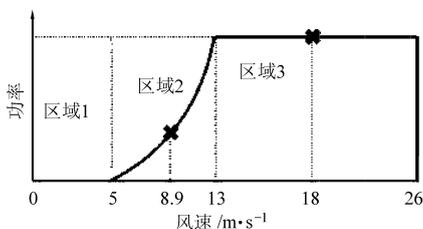


图 2 变速变桨风力发电机运行区间

Fig.2 Operating curve of variable speed pitch wind turbine

当 风 速 在 启 动 风 速 和 额 定 风 速 之 间 时, 风 力 发 电 机 功 能 是 跟 踪 风 速 变 化, 通 过 控 制 电 磁 转 矩 控 制 风 轮 的 转 速, 以 跟 踪 最 佳 功 率 系 数 C_{pmax} , 捕 获 最 大 的 风 能, 其 功 率 曲 线 如 图 3 所 示。

当 风 速 高 于 额 定 风 速 时, 由 于 机 械 和 电 气 结 构 的 限 制, 需 要 通 过 变 桨 距 控 制 卸 载 掉 多 余 的 空 气 动 能, 使 输 出 功 率 维 持 在 额 定 值。

根 据 以 上 控 制 要 求, 在 引 入 独 立 变 桨 距 技 术 以 后, 控 制 器 将 分 为 统 一 变 桨 距 控 制 器 和 独 立 变 桨 距

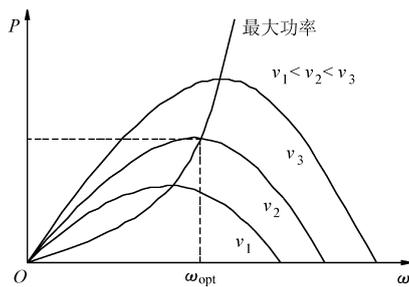


图 3 不同风速下叶轮输出功率与角速度关系曲线

Fig.3 Relationship between power and rotor speed

控 制 器 两 部 分, 分 别 控 制 作 用 在 叶 轮 上 产 生 功 率 的 平 均 负 载 和 导 致 疲 劳 损 害 的 不 平 衡 负 载。在 额 定 风 速 以 上 时, 统 一 变 桨 距 控 制 器 和 独 立 变 桨 距 控 制 器 同 时 投 入 工 作: 统 一 变 桨 距 控 制 器 控 制 3 个 桨 叶 统 一 动 作, 使 功 率 输 出 维 持 在 额 定 值; 独 立 变 桨 距 控 制 器 控 制 根 据 风 轮 上 不 平 衡 载 荷 计 算 出 的 各 个 桨 叶 相 应 的 节 距 角, 最 终 输 出 的 节 距 角 是 两 个 控 制 器 输 出 的 叠 加。

在 具 体 设 计 中, 采 用 传 统 的 PID 控 制 方 法 设 计 风 力 机 的 统 一 变 桨 距 控 制 器, 控 制 框 图 如 图 4 所 示。对 于 独 立 桨 叶 节 距 角 的 控 制, 由 于 节 距 角 的 变 化 对 负 载 的 影 响 是 非 线 性 的, 为 了 快 速 跟 踪 负 载 变 化, 设 计 MFA 独 立 变 桨 距 控 制 器。

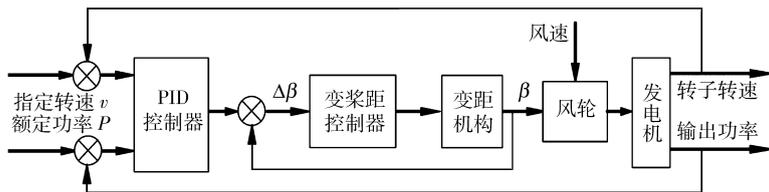


图 4 统一变桨距控制器结构框图

Fig.4 Structure of collective pitch controller

MFA 控 制 器 的 原 理 如 图 5 所 示。其 泛 模 型 为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + \|\phi(k)\|^2} (y^*(k+1) - y(k))$$

式 中 $y(k)$ —— 被 控 系 统 的 输 出

$u(k-1)$ —— 控 制 器 的 输 出

$\phi(k)$ —— 测 量 值 $y(k)$ 对 控 制 器 输 出 值 $u(k-1)$ 梯 度, 即 偏 导 数 形 式 的 向 量

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k-1)}$$

学 习 步 长 ρ_k 和 惩 罚 因 子 λ 是 可 以 设 定 的 参 数,

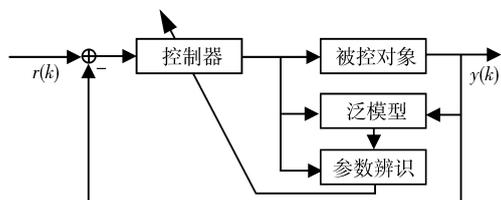


图 5 MFA 控制器原理图

Fig.5 Schematic of the MFA controller

改 变 其 中 任 何 一 个 都 可 以 改 变 受 控 对 象 的 动 态 特 性。

最 终 的 控 制 器 结 构 如 图 6 所 示。测 量 叶 根 的 弯 矩 M_{y1} 、 M_{y2} 、 M_{y3} , 根 据 式 (13) 建 立 的 风 力 机 模 型 计 算 得 到 d-q 坐 标 系 下 的 M_{tilt} 和 M_{yaw} , 经 过 两 个 单 独 的 MFA 控 制 器 的 计 算 得 到 相 应 的 调 节 量 β_d 和 β_q , 然 后 通 过 Park 逆 变 换 计 算 出 3 个 叶 片 的 调 节 量 β_1 、 β_2 、 β_3 。

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ \cos(\psi + 2\pi/3) & \sin(\psi + 2\pi/3) \\ \cos(\psi + 4\pi/3) & \sin(\psi + 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_d \\ \beta_q \end{bmatrix}$$

(18)

最 终 的 节 距 角 输 出 信 号 包 括: 统 一 变 桨 距 控 制 器 根 据 功 率 计 算 出 的 3 个 叶 片 共 同 的 节 距 角 调 节 信 号 $\Delta\beta$ 和 独 立 变 桨 距 控 制 器 根 据 叶 根 载 荷 计 算 出 的 3 个 叶 片 单 独 的 调 节 信 号 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 、 $\Delta\beta_3$ 。两 者 叠 加

后,得到 3 个桨叶的目标信号 $(\Delta\bar{\beta} + \Delta\beta_1)$ 、 $(\Delta\bar{\beta} + \Delta\beta_2)$ 、 $(\Delta\bar{\beta} + \Delta\beta_3)$ 。

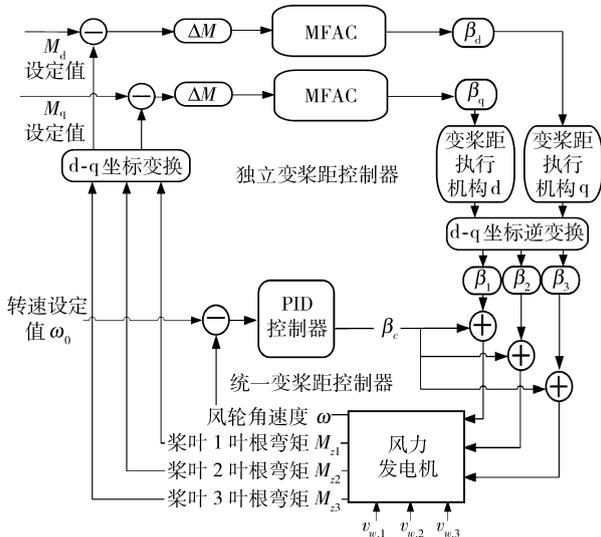


图 6 集成的风力发电机控制器

Fig. 6 Structure of integrated wind turbine controller

3 仿真与讨论

利用第 1 节所建立的风力机模型可以有效地进行控制器设计,但是由于模型进行了简化,因此不能可靠验证控制器的性能。在实际的风力发电机上进行实验的成本过高,因此采用了当前应用较多的风力发电机非线性模型进行仿真。

当前应用较多的风力发电机非线性模型主要有以下几个:美国 Windward Engineering 公司^[15]的 YawDyn 软件,其包含的结构动力学模型比较简单,但是对于空气动力响应的估计和初步分析比较有用;英国 GH 公司的风力发电机设计仿真软件 GH Bladed^[16],其自带的外部控制器可以实现高级控制技术在风力机中的仿真研究;美国 National Wind Technology Center 和 Oregon 大学联合开发的 FAST 软件^[17],该模型将风力机视作几个刚性和柔性结构的耦合,最新版的 FAST 包含 24 个自由度(3 叶片水平轴风力机),可以进行功率控制,载荷控制,刹车偏航控制等的仿真研究。

采用 FAST 软件自带的 Matlab 接口文件,在 Simulink 中编写 MFA 控制器程序进行实时控制仿真^[9]。仿真采用的风速模型按照 IEC 定义的风速模型,需要根据定义分别确定风况和湍流的类型。风力发电机的模型采用 NREL 提供的 1.5 MW 风力发电机数据,其主要参数如表 1 所示,仿真时的 Simulink 框图如图 7 所示。

由于在额定风速以下时,叶轮承受的载荷较小,而且,如果在此时进行载荷控制会增加节距角驱动

机构的动作时间,减少机构的工作寿命,因此只在额定风速以上时进行载荷控制。

表 1 风力机模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of wind turbine model

参数	数值
切入风速/ $m \cdot s^{-1}$	3
额定风速/ $m \cdot s^{-1}$	12
切出风速/ $m \cdot s^{-1}$	25
额定功率/MW	1.5
额定转速/ $r \cdot min^{-1}$	20
塔架高度/m	84
扫略面积/ m^2	3 167

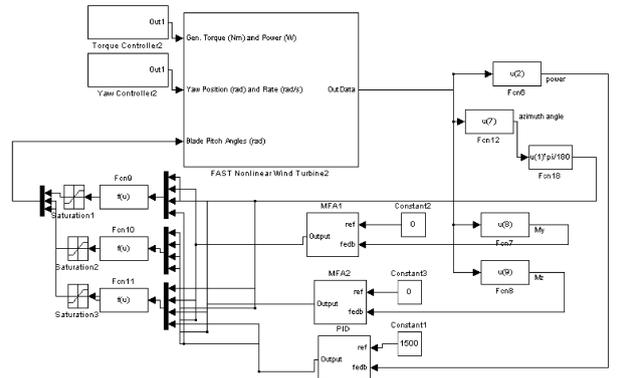


图 7 Simulink 仿真框图

Fig. 7 Schematic of simulation

仿真采用的风速信号如图 8 所示。对比使用和不使用独立变桨距控制器,轮毂处俯仰、偏转弯矩以及输出功率的变化如图 9 所示。仿真实验同时对比了额定风速以上时独立变桨距和统一变桨距节距角的变化率,如图 10 所示。

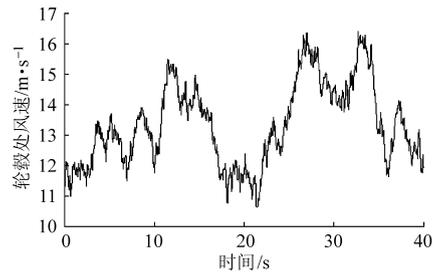


图 8 轮毂处风速变化曲线

Fig. 8 Wind speed at the hub position

由仿真实验结果图可以看出,独立变桨距控制可以显著地减少叶轮上的不平衡载荷。与统一变桨距控制相比,加入独立变桨距控制器后轮毂处的俯仰弯矩最大峰值减少 62.5%,绝对量的平均值减少 57%;偏转弯矩最大峰值减少 60.1%,绝对量平均值减少 50.8%。从功率曲线可以看出采用 MFA 独立变桨距控制器以后,功率输出的变化不大,同时由于独立变桨距控制器的引入,节距角的变化频率和

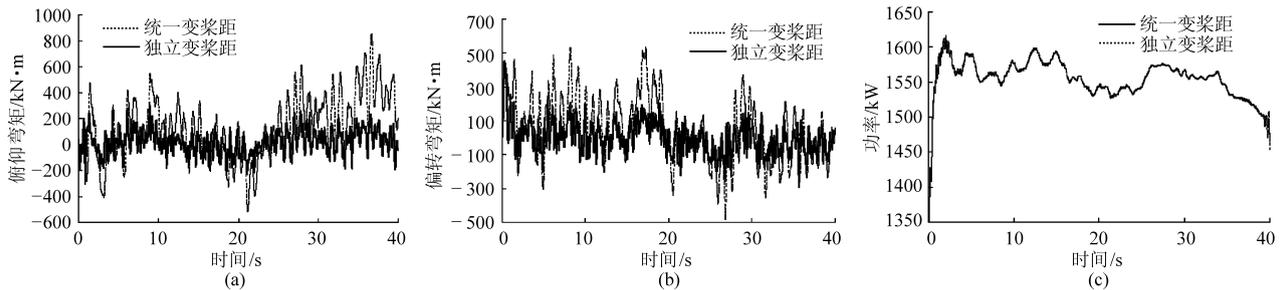


图9 仿真实验结果对比曲线

Fig.9 Comparison of simulation results

(a) 轮毂处俯仰弯矩 (b) 轮毂处偏转弯矩 (c) 输出功率

幅值会相应增加,可能会对变桨距驱动机构的寿命造成影响。

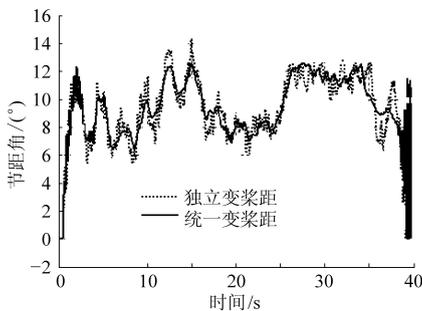


图10 单个桨叶节距角变化曲线

Fig.10 Variation of single pitch angle

4 结束语

研究了基于独立变桨距控制的风力发电机上的载荷消除技术。建立了风力发电机的线性化模型,并利用 Park 坐标变换技术将旋转坐标下的载荷映射到固定的 d-q 坐标系下,对 d 轴和 q 轴设计了无模型自适应控制器进行载荷控制。利用成熟的风力发电机非线性模型对控制器进行了仿真验证。仿真结果显示,与统一变桨距相比,独立变桨距 MFA 控制器可以有效消除风力发电机上的不平衡载荷,俯仰弯矩峰值减小 62.5%,偏转弯矩峰值减小 60.1%,对输出功率的影响不显著。

参 考 文 献

- Ribrant Johan. Reliability performance and maintenance-a survey of failures in wind power systems[D]. Stockholm, Sweden: KTH School of Electrical Engineering, 2006.
- Selvam Kausihan. Individual pitch control for large scale wind turbines[D]. Delft: Delft TU, 2007.
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. Wind energy handbook[M]. Chichester: Jone Wiley & Sons Ltd., 2004.
- van der Hooft E L, van Engelen T G, Schaak P, et al. Wind turbine control algorithm[R]. Petten: ECN, 2003.
- Bossanyi E A. Individual blade pitch control for load reduction[J]. Wind Energy, 2003, 6(2): 119 ~ 128.
- Larsen T J, Madsen H A, Thomsen K. Active load reduction using individual pitch based on local blade flow measurements [J]. Wind Energy, 2005, 8(1): 67 ~ 80.
- 林勇刚, 李伟, 陈晓波, 等. 大型风力发电机组独立桨叶控制系统 [J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 780 ~ 786.
Lin Yonggang, Li Wei, Chen Xiaobo, et al. The research on large scale wind turbine individual pitch control system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(6): 780 ~ 786. (in Chinese)
- Yao Xingjia, Wang Xiaodong, Xing Zuoxia, et al. Individual pitch control for variable speed turbine blade load mitigation[C] //2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008: 769 ~ 772.
- 李传庆, 刘广生. 基于 Matlab Simulink 的 MFA 控制模块开发与仿真[J]. 控制工程, 2008, 15(增刊1): 61 ~ 84.
Li Chuanqing, Liu Guangsheng. Development & simulation of MFA control module based on Matlab-Simulink[J]. Control Engineering of China, 2008, 15(Supp.1): 61 ~ 84. (in Chinese)
- 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 ~ 592.
Hou Zhongsheng. On model-free adaptive control: the state of the are and perspective[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(4): 586 ~ 592. (in Chinese)
- 曾庆国, 邢桂菊, 王仲初. 无模型自适应控制技术的研究和应用[J]. 工业控制计算机, 2009, 22(6): 49 ~ 50.
Zeng Qingguo, Xing Guiju, Wang Zhongchu. Reaserch and application of mode free asdapticve control [J]. Industrial Control Computer, 2009, 22(6): 49 ~ 50. (in Chinese)

- 5 Frank F. Effective freeze-drying: a combination of physics, chemistry, engineering and economics [C] // Proceedings of the Institute of Refrigeration, 1994, 91: 32 ~ 39.
 - 6 Pikal M J. Use of laboratory data in freeze drying process design: heat and mass transfer coefficients and the computer simulation of freeze drying [J]. Journal of Parenteral Science and Technology, 1985, 39(3): 115 ~ 138.
 - 7 Carpenter J F, Pikal M J, Chang B S, et al. Rational design of stable lyophilized protein formulations: some practical advice [J]. Pharmaceutical Research, 1997, 14(8): 969 ~ 975.
 - 8 Duddu S P, Dal Monte P R. Effect of glass transition temperature on the stability of lyophilized formulations containing a chimeric therapeutic monoclonal antibody [J]. Pharmaceutical Research, 1997, 14(5): 591 ~ 595.
 - 9 Hutchinson J M. Studying the glass transition by DSC and TMDSC [J]. J. Therm. Anal. Cal., 2003, 72(2): 619 ~ 629.
 - 10 Zuo J G, Hua T C, Liu B L, et al. Thermal analysis of tertiary butyl alcohol/sucrose/water ternary system [J]. CryoLetters, 2005, 26(5): 289 ~ 296.
 - 11 左建国, 李维仲, 翁林崇. 冷冻干燥中升华界面的临界温度实验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 126 ~ 128.
Zuo Jianguo, Li Weizhong, Weng Lindong. Critical temperature of sublimation interface in freeze-drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 126 ~ 128. (in Chinese)
 - 12 Knopp S A, Chongprasert S, Nail S L. The relationship between the TMDSC curve of frozen sucrose solutions and collapse during freeze-drying [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1998, 54(2): 659 ~ 672.
 - 13 Meister E, Šaišć S, Gieseler H. Freeze-dry microscopy: impact of nucleation temperature and excipient concentration on collapse temperature data [J]. AAPS Pharm Sci. Tech., 2009, 10(2): 582 ~ 588.
-

(上接第 114 页)

- 12 韩志刚. 无模型控制器理论与应用的进展 [J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(2): 1 ~ 6.
Han Zhigang. The progress of theory and application of model free controller [J]. Techniques of Automation and Application, 2004, 23(2): 1 ~ 6. (in Chinese)
- 13 曹荣敏, 侯忠生, 白雪峰, 等. 基于无模型自适应控制方法的直流电机调速系统 [J]. 电气传动, 2008, 38(7): 26 ~ 30.
Cao Rongmin, Hou Zhongsheng, Bai Xuefeng, et al. DC motor speed regularizing control system based on the model-free adaptive control method [J]. Electric Drive, 2008, 38(7): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 14 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- 15 Laino David J, Hansen A Craig. User's guide to the wind turbine dynamics computer program YawDyn [R]. Salt Lake City: Windward Engineering, LC, 2003.
- 16 Bossanyi E A. GH bladed [R]. Bristol: Garrad Hassan and Partners, 2005.
- 17 Jonkman Jason M, Jr Marshall L Buhl. FAST user's guide [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2005.