

## 风力发电系统的恒功率非线性 $H_\infty$ 鲁棒控制

秦生升, 胡国文, 顾春雷, 李 杜

(盐城工学院 电气学院, 江苏 盐城, 224051)

**摘要:** 风力发电系统传统控制器的缺点在于, 基于某一工况点的局部线性化方法无法实现全局范围的精确控制, 且传统的控制理论无法应对内外干扰. 本文将精确反馈线性化方法与线性 $H_\infty$ 理论相结合设计非线性 $H_\infty$ 控制器. 首先用微分几何精确线性化方法将非线性风电模型全局线性化, 然后运用线性 $H_\infty$ 控制理论对此线性系统设计控制器, 将两者结合有原风电系统的非线性 $H_\infty$ 变桨距控制器. 最后对12 m/s至24 m/s阶跃风, 12 m/s至22 m/s骤变风, 18 m/s至20 m/s随机风, 以及风力机转动惯量下降10%的情况进行仿真, 能实现风机转速及输出功率的恒定. 验证了该控制器在全风速段的精确控制, 并且具有良好鲁棒性.

**关键词:** 风力发电机组; 变桨距; 恒功率; 状态反馈线性化; 非线性 $H_\infty$ 鲁棒控制

**中图分类号:** TM315 **文献标识码:** A

## Nonlinear H-infinity robust control of constant power for wind power system

QIN Sheng-sheng, HU Guo-wen, GU Chun-lei, LI Du

(School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yangcheng Jiangsu 224051, China)

**Abstract:** The conventional wind turbine controller can not realize the global range control because of its local linearization at specific operating point. It neither provides the rejection of internal and external disturbances. In our approach, the nonlinear model of the wind turbine is converted to a global linear model by using the differential geometry method. For this global linear model, a linear H-infinity variable pitch controller is designed for the existing wind power system. Simulations of the control system are carried out for 12-24 m/s step wind, 12-22 m/s suddenly change wind, 18-20 m/s random wind, and 10% reduction of wind turbine rotary inertia. Results show that the wind turbine speed and the output power are maintained at constant values as desired, showing desirable performances and robustness of the control.

**Key words:** wind turbine; variable pitch; constant power; feedback linearization; nonlinear H-infinity robust control

### 1 引言(Introduction)

风力发电机组控制系统的控制目的是当风速低于额定风速时, 通过对转速的控制来实现最大风能捕获<sup>[1-2]</sup>. 当风速高于额定风速时, 保持系统恒功率输出<sup>[1]</sup>. 额定风速以上系统的恒功率输出一般通过改变风力机的桨叶节距角来实现. 目前变桨距控制主要包括传统PID控制<sup>[3]</sup>、智能控制<sup>[4]</sup>、最优控制<sup>[5]</sup>、自抗扰控制<sup>[6]</sup>等. 文献[7-9]皆是对风电系统在某一工况点局部线性化, 继而设计控制器, 不能很好地适应运行方式的变化. 当系统的运行点远离平衡点时, 所设计的控制器能难达到理想的控制效果. 文献[10-11]首先将模型精确线性化, 得到一个全局线性模型, 对此全局线性模型设计控制器, 效果明显优于局部线性化, 但有扰动时系统的稳定性较差. 本文将精确反馈线性化方法与线性 $H_\infty$ 鲁棒控制方法相

结合, 设计具有强鲁棒性的变桨距控制器, 以提高系统的全局稳定性.

### 2 基本原理(Basic principles)

#### 2.1 基于微分几何的精确反馈线性化(Exact feedback linearization based on differential geometry)

对于一个非线性系统, 若采用一点处近似线性化的数学模型, 按线性系统的设计方法进行设计所得的控制规律, 远不能使得该系统的实际运行状态在远离近似线性化所选的状态点处获得符合要求的稳定性能和动态品质, 尤其对于动态过程较快的系统, 控制效果更差. 若采用非线性状态反馈和恰当的坐标变换, 在一定条件下, 可以将一个仿射非线性系统进行精确线性化, 并且这个状态反馈可保证控制系统的稳定性, 且有好的动态品质.

单输入单输出非线性系统的一般描述形式为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)w + g_2(x)u, \\ y = h(x), \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x \in \mathbb{R}^n$  为状态向量;  $u \in \mathbb{R}^1$  为控制量;  $w \in \mathbb{R}^p$  为外部干扰;  $y \in \mathbb{R}^1$  为输出量;  $f(x)$  及  $g(x)$  为状态空间中  $n$  维向量场;  $h(x)$  为  $x$  的标量函数<sup>[12]</sup>.

选取合适的坐标变换及状态反馈为

$$\begin{cases} \Phi: \xi = \Phi(x), \\ u = \alpha(x) + \beta(x)v, \end{cases} \quad (2)$$

则原非线性仿射系统变成完全可控的线性系统——布鲁诺夫斯基(Brounovsky)标准型

$$\dot{\xi} = A\xi + \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} g_1(x)w + B_2 v. \quad (3)$$

令  $\bar{w} = \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} g_1(x)w$ , 则有

$$\dot{\xi} = A\xi + B_1 \bar{w} + B_2 v. \quad (4)$$

此时, 已将原非线性系统(1)转变成线性系统(4). 其中:  $\xi \in \mathbb{R}^n$  为状态向量,  $v \in \mathbb{R}^1$  为控制量,  $\bar{w} \in \mathbb{R}^p$  为外部干扰,  $A, B_1, B_2$  为精确线性化系数矩阵,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B_1 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $B_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ .

## 2.2 状态反馈 $H_\infty$ 控制(Feedback $H_\infty$ control)

标准的  $H_\infty$  控制问题如图1所示.

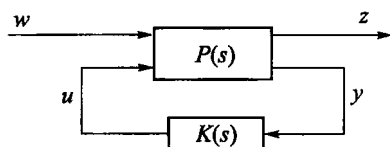


图1 标准  $H_\infty$  控制问题

Fig. 1 Standard  $H_\infty$  control problem

$P(s)$  是一个线性时不变系统, 由以下状态空间描述:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u, \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u, \\ y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u, \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $x \in \mathbb{R}^n$  是状态向量,  $u \in \mathbb{R}^m$  是控制输入,  $y \in \mathbb{R}^p$  是测量输出,  $z \in \mathbb{R}^r$  是被调输出,  $w \in \mathbb{R}^q$  是外部扰动,  $A, B_1, B_2, C_1, D_{11}, D_{12}, C_2, D_{21}, D_{22}$  为常数矩阵,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$ ,  $B_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C_1 \in \mathbb{R}^{r \times n}$ ,  $D_{11} \in \mathbb{R}^{r \times q}$ ,  $D_{12} \in \mathbb{R}^{r \times m}$ ,  $C_2 \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $D_{21} \in \mathbb{R}^{p \times q}$ ,  $D_{22} \in \mathbb{R}^{p \times m}$ . 由输入信号  $w, u$  到输出信号  $z, y$  的传递函数  $K(s)$  所表示的对象称为增广被控对象, 它包括实际被控对象和为了描述指标而设定的加权函数等,  $K(s)$  为控制规律<sup>[13]</sup>.

$H_\infty$  控制问题的目的就是要设计控制器  $u(s) = K(s)y(s)$ , 使如图1所示的闭环系统内部稳定, 并使

从  $w$  到  $z$  的传递函数  $T_{zw}(s)$  的  $H_\infty$  范数, 即  $\|T_{zw}(s)\|_\infty$  最小.

若此系统为状态反馈, 即  $C_2 = I$ ,  $D_{21} = D_{22} = 0$ , 则只要此系统满足以下条件: 1)  $(A, B_2)$  可稳定, 可检测; 2)  $D_{11} = 0$ ; 3)  $D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$ . 此系统必能引入一个状态反馈  $H_\infty$  控制器

$$u = Kx \quad (6)$$

使得此闭环系统渐近稳定的, 并且此闭环系统的传递函数  $T_{zw}(s)$  满足

$$\begin{aligned} \|T_{zw}(s)\|_\infty = \\ \|(C_1 + D_{12}K)[sI - (A + B_2K)]^{-1}B_1 + D_{11}\|_\infty < \\ \gamma. \end{aligned} \quad (7)$$

上式中  $\gamma$  选取尽量小的正数, 以减少扰动对系统的不利影响. 使上式成立的充分必要条件是存在正定矩阵  $P$ , 满足式(8)的黎卡梯矩阵方程

$$\begin{aligned} A^T P + PA - P(B_2 B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T)P + \\ C_1^T C_1 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

从而得出此系统的反馈控制

$$u = Kx = -B_2^T P x. \quad (9)$$

此时, 最坏可能干扰为

$$w = \frac{1}{\lambda^2} B_1^T P x. \quad (10)$$

## 3 风电系统建模(Modelling of wind power system)

### 3.1 风力机模型(Wind turbine model)

风力机模型:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J} (T_{aero} - T_{gen}) + w, \quad (11)$$

其中:  $J$  为风机及发电机总转动惯量,  $\omega_r$  为风机转速,  $T_{gen}$  为发电机的电磁转矩,  $w$  为外部扰动项,  $T_{aero}$  为风机气动转矩, 是整个风电机组的驱动力矩, 其表达式为

$$T_{aero} = \frac{\rho \pi R^3 \nu^2 C_P}{2\lambda}, \quad (12)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮半径;  $\nu$  为风速;  $\lambda$  为叶尖速比;  $\lambda$  的大小可表示为

$$\lambda = \frac{(\omega_r R)}{\nu};$$

$C_P$  为功率系数, 即风能利用率, 本文  $C_P$  的表达式为选用

$$C_P = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i}, \quad (13)$$

其中

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}.$$

### 3.2 桨距角β变化的执行机构(Pitch variation actuator)

假定为一阶惯性环节, 则

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_{\beta}}(\beta_r - \beta), \quad (14)$$

其中:  $T_{\beta}$ 为时间常数,  $\beta_r$ 为桨距角控制量。

### 3.3 测速装置(Speed measurement equipment)

由于存在滞后, 实测的风力机转速用一个惯性环节来表示

$$\dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}), \quad (15)$$

其中:  $\omega_{rm}$ 为速度传感器测得的风力机角速度,  $T_w$ 为时间常数。

以上式(11)(14)–(15)构成了风电机组的非线性模型如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{1}{T_{\beta}}(\beta_r - \beta), \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{J}(T_{aero} - T_{gen}) + w, \\ \dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}). \end{cases} \quad (16)$$

当风速高于额定风速时, 风电机组的控制目标是保持机组恒定的功率输出<sup>[1]</sup>, 恒定功率输出即要求在稳定运行时风机转速和电磁转矩均维持在额定值。本文主要研究变桨距控制器, 故将电磁转矩设为恒值, 则只要风机转速维持在额定值即可, 完整的控制框图如图2所示。此时的恒功率控制问题已转化为恒转速控制。本文所用风机模型基于美国可再生能源实验室试验样机, 其主要参数为: 风机类型为水平轴、上风向; 额定功率为600 kW; 额定风速为11 m/s; 风机额定转速为41.5 r/min(4.35 rad/s); 风轮直径为43.3 m; 风力机的转动惯量为 $2.58 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。本文的控制目标即, 将风机角速度控制在4.35 rad/s附近, 从而实现其输出功率在600 kW左右。

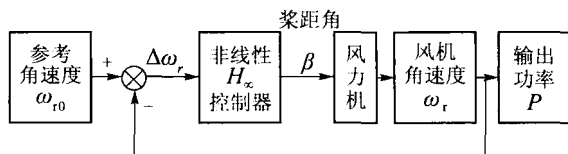


图2 风力发电系统的变桨距控制框图

Fig. 2 Variable pitch control of wind power system

## 4 非线性H<sub>∞</sub>变桨距控制器(Nonlinear H<sub>∞</sub> variable pitch controller)

### 4.1 风电模型精确反馈线性化(Exact feedback linearization of wind power model)

由式(16)可知:

$$x = \begin{bmatrix} \beta \\ \omega_r \\ \omega_{rm} \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\beta}}\beta \\ \mathcal{M} \\ \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{M} = \frac{1}{J}(T_{aero}(\beta, \omega_r) - T_{gen}) + w,$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g_2(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{\beta}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u = \beta_r.$$

首先, 检验此系统是否满足精确线性化的条件。

本系统的控制目的是使 $\omega$ 为零, 即 $\omega_{rm} - \omega_{rm}^*$ 的值为零( $\omega_{rm}^*$ 为风机的额定转速), 故可选定其输出函数 $h(x)$ 为

$$h(x) = \omega_{rm} - \omega_{rm}^*.$$

经计算可知在 $x = x^0$ 处有

$$L_g L_f^0 h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g_2(x) = 0,$$

$$L_g L_f h(x) = \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} g_2(x) = 0,$$

$$L_g L_f^2 h(x) = \frac{\partial (L_f^2 h(x))}{\partial x} g_2(x) \neq 0.$$

所以此系统的关系度为3, 则 $r = n$ , 满足精确线性化的条件。

其次, 选取合适的坐标变换及状态反馈。

令坐标变换为

$$\xi = \Phi(x):$$

$$\begin{cases} \xi_1 = h(x) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm}, \\ \xi_2 = L_f h(x) = -\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}), \\ \xi_3 = L_f^2 h(x) = \\ -\frac{1}{T_w} \cdot \frac{1}{J}(T_{aero}(\beta, \omega_r) - T_{gen}) + \\ \frac{1}{T_w} \cdot \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}), \end{cases} \quad (17)$$

$$\bar{w} = \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} g_1(x) w =$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \xi_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial \xi_1(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial \xi_1(x)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \xi_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial \xi_2(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial \xi_2(x)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \xi_3(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial \xi_3(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial \xi_3(x)}{\partial x_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} w =$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{T_w} \\ \frac{\partial \xi_3(x)}{\partial x_2} \end{pmatrix} w. \quad (18)$$

令状态反馈为

$$u = -\frac{L_f^3 h(x)}{L_g L_f^2 h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} v, \quad (19)$$

则系统(16)的控制被转化为线性系统的标准 $H_\infty$ 控制问题:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi + B_1 \bar{w} + B_2 v, \\ z = C_1 \xi + D_{11} \bar{w} + D_{12} v, \\ y = C_2 \xi + D_{21} \bar{w} + D_{22} v, \end{cases} \quad (20)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

#### 4.2 状态反馈 $H_\infty$ 变桨控制器的设计(Feedback $H_\infty$ variable pitch controller design)

下面根据线性 $H_\infty$ 理论,对系统(20)设计状态反馈 $H_\infty$ 控制器.此时系统的观测量等于系统的状态变量,则有

$$C_2 = I, D_{21} = D_{22} = 0.$$

结合原风电系统输出函数及式(17)坐标变换的选取,可令

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{12} = (0, 0, 1)^T,$$

则此系统满足2.2中的3个条件,取 $\gamma$ 为2,则可解出黎卡梯方程(8)的正定解<sup>[14]</sup>:

$$P = \begin{bmatrix} 58.6553 & 94.3099 & 64.1322 \\ 94.3099 & 153.7493 & 105.3371 \\ 64.1322 & 105.3371 & 73.1472 \end{bmatrix},$$

则其状态反馈控制器 $v$ 为

$$v = -64.1322\xi_1 - 105.3371\xi_2 - 73.1472\xi_3.$$

结合式(19)可得出风电系统的非线性 $H_\infty$ 控制器 $u$ 为

$$\begin{aligned} u = & -\frac{L_f^3 h(x)}{L_g L_f^2 h(x)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} (-64.1322(\omega_{rm}^* - \omega_{rm}) - 105.3371(-\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm})) - \\ & 73.1472(-\frac{1}{JT_w} \cdot (T_{aero} - T_{gen}) + \frac{1}{T_w^2}(\omega_r - \omega_{rm}))). \end{aligned} \quad (21)$$

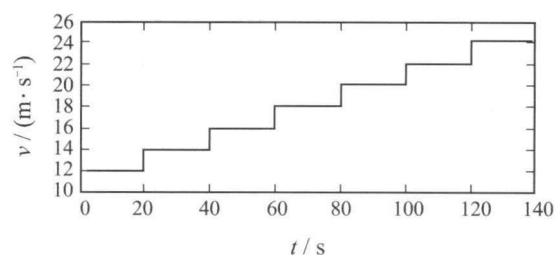
至此,完成了风电机组非线性 $H_\infty$ 变桨距控制器的设计.

#### 5 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

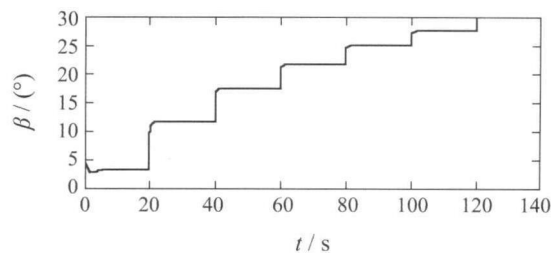
将此控制器代入原风电系统在Simulink中搭建模型并进行仿真得到如下结果.

取风速在12~24 m/s之间阶跃变化时进行仿真,得到如图3仿真结果.

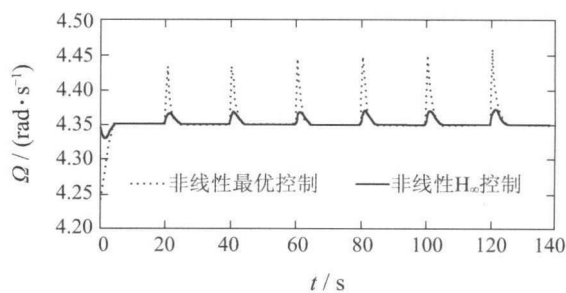
图3为风速从12~24 m/s之间跃变时风电机组的响应曲线.从图中可知,当风速在12~24 m/s之间阶跃增大时,风机桨距角相应阶跃增加,通过桨距角的调节将风机的稳态运行角速度严格控制在4.35 rad/s,从而风机的输出功率维持在额定值600 kW.图3(c)虚线为非线性最优控制下的风机角速度,实线为非线性 $H_\infty$ 的控制结果,图3(d)虚线为非线性最优控制下的风机输出功率,实线为非线性 $H_\infty$ 的控制结果.二者对比可知,后者的控制效果明显优于前者.



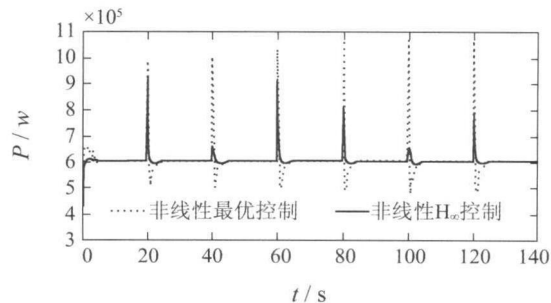
(a) 12~24 m/s阶跃风模型



(b) 阶跃风时的桨距角变化



(c) 阶跃风时的风机角速度

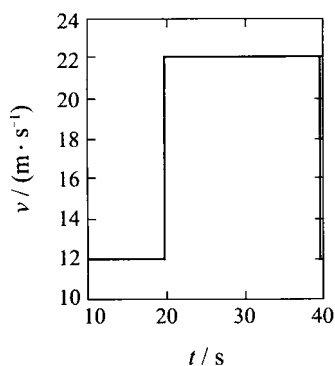


(d) 阶跃风时的风机输出功率

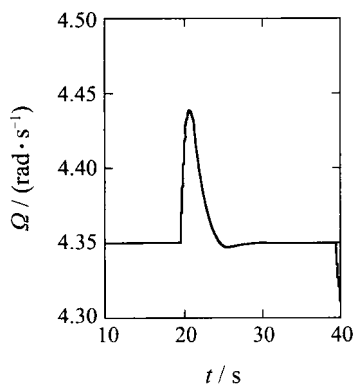
图3 12~24 m/s阶跃风下机组响应

Fig. 3 Dynamic response of wind power system with 12~24 m/s step changing wind

图4为风速急剧变化时, 风机的转速响应. 从图4(b)可知, 经过一定时间的调整, 风力机的角速度仍能在4.35 rad/s稳定运行.



(a) 风速从12 m/s骤变至22 m/s的模型



(b) 风力机角速度响应曲线

图4 风速骤变时风力机角速度

Fig. 4 Wind turbine speed with sudden change wind

图5可知, 当风速在18~20 m/s之间随机变化时, 风机角速度的均值在4.37 rad/s, 其波动在额定角速度的0.45%内, 很好的实现了风机的稳定运行.

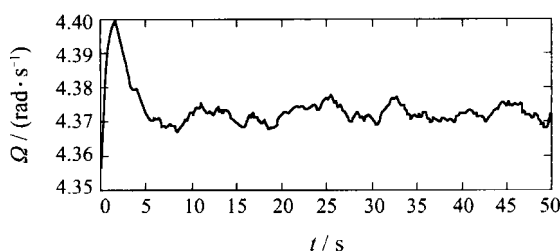


图5 风速在18~20 m/s之间随机变化时的风机角速度

Fig. 5 Speed of wind turbine with 18~20 m/s random wind

图6为风力机转动惯量下降10%时的角速度响应曲线. 由图6可知, 当存在外加干扰时, 系统表现出很强的鲁棒性.

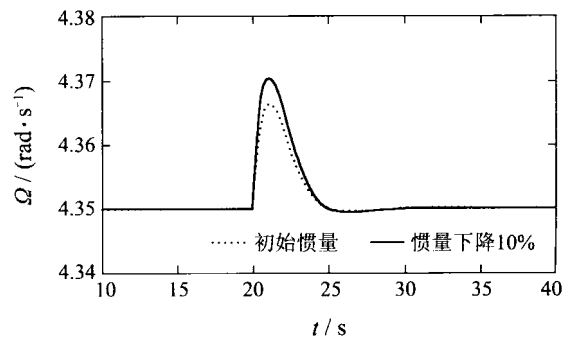


图6 风力机转动惯量下降10%时的风力机角速度

Fig. 6 Speed of wind turbine with 10% reduction of its rotary inertia

## 6 结论(Conclusion)

本文对额定风速以上的风电系统恒定功率问题进行了研究. 首先对三阶风电模型进行了直接反馈线性化, 然后结合线性 $H_\infty$ 控制理论, 设计变桨距控制器. 仿真结果表明, 当风速变化以及风机参数变化时, 该控制器能够实现风机转速以及输出功率的恒定, 从而证明该方法有很好的鲁棒性能.

## 参考文献(References):

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.  
(YE Hangye. *Control Techniques in Wind Energy Conversion System*[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.)
- [2] 刘期辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.  
(LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(20): 62-67.)
- [3] 董树新. PID调节器在风机自动控制中的应用[J]. 风力发电, 2002, 18(3): 37-39.  
(DONG Shuxin. Application of PID regulator in wind turbine automatic control[J]. *Wind Power*, 2002, 18(3): 37-39.)
- [4] 张新房, 徐大平, 吕跃刚. 大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 574-577.  
(ZHANG Xinfang, XU Daping, LV Yuegang. Adaptive fuzzy control for large-scale variable speed wind turbines[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(3): 574-577.)
- [5] 包能胜, 叶枝全. 水平轴失速风力机主动非线性控制[J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 519-524.  
(BAO Nengsheng, YE Zhiquan. Active nonlinear control of the stall horizontal wind turbine system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2004, 25(4): 519-524.)
- [6] 夏长亮, 宋战锋. 双馈风力发电系统转子电流自抗扰控制[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 11-14.  
(XIA Changliang, Song Zhanfeng. Active-Disturbance-Rejection control of rotor current in DFIG[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2007, 26(3): 11-14.)
- [7] 胡中华, 王维庆. 风力发电机的最优控制[J]. 水力发电, 2008, 32(12): 53-55.  
(HU Shenhua, WANG Weiqing. The optimal control for wind turbine[J]. *Water Power*, 2008, 32(12): 53-55.)

- [8] 张先勇, 吴捷, 杨金明. 额定风速以上风力发电机组的恒功率 $H_\infty$ 鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 321–324.  
(ZHANG Xianyong, WU Jie, YANG Jinming. H-infinity robust control of constant power output for the wind energy conversion system above rated wind[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 321–324.)
- [9] LIMA M L, SILVINO J L.  $H_\infty$  control for a variable-speed adjustable-pitch wind energy conversion system[C] // *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Piscataway: IEEE, 1999, 2: 556–561.
- [10] 陈思哲, 吴捷, 姚国兴. 基于微分几何的风力发电机组恒功率控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 336–340.  
(CHEN Sizhe, WU Jie, YAO Guoxing. Power limitation control of wind turbine system based on differential geometry theory[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 336–340.)
- [11] 包能胜, 姜桐, 陈庆新. 变转速风力机额定风速以上的非线性控制——恒功率输出控制问题[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 747–750.  
(BAO Nengsheng, JIANG Tong, CHEN Qingxin. Nonlinear control of a variable speed wt system on ARWS—power limitation problem[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 747–750.)
- [12] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
(LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.)
- [13] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
(YU Li. *Robust Control—Linear Matrix Inequality*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [14] 秦生升. 风力发电系统的控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
(QIN Shengsheng. *Study of variable pitch control strategy of wind power system*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.)

#### 作者简介:

秦生升 (1984—), 女, 研究方向为风力发电的控制与仿真、电力系统的稳定控制, E-mail: qinssheng@126.com;

胡国文 (1957—), 男, 教授, 主要研究方向为电力电子技术与电力系统无功柔性补偿技术与节能技术、新能源技术、建筑电气与智能化技术, E-mail: hugw@ycit.cn;

顾春雷 (1966—), 男, 副教授, 研究方向为电机设计及其控制, E-mail: guclabc@126.com;

李杜 (1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源技术、建筑电气与智能化技术, E-mail: liduchina@163.com.