

# 参与电网调频的风电机组线性变参数变桨控制策略

于国强<sup>1</sup>, 谢振华<sup>2</sup>, 张天海<sup>1</sup>, 罗森华<sup>3</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 江苏金风天泽风电有限公司, 江苏 盐城 224100;  
3. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**风电机组参与调频时其输出功率的调整将改变风电机组变桨动作的风速范围,同时由于桨距角调节气动功率的灵敏度随风况变化,使得传统PI变桨控制难以适用于风电机组参与调频时的复杂工况,出现风电机组转速振荡问题。提出一种基于线性变参数(Linear Parameter Varying, LPV)系统的风电机组变桨控制方法,对风电机组模型进行线性化,根据风速和桨距角的变化范围进行凸分解,得到其具有四面体结构的LPV模型,通过求解不同平衡点处的线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)设计出相应的变桨控制器。仿真结果表明:与传统PI变桨控制相比,LPV变桨控制能有效减小转速的波动,降低低速轴载荷以及减小桨距角的波动程度,验证了该控制策略的有效性和先进性。

**关键词:**调频;转速振荡;风电机组的LPV模型;变桨控制器

中图分类号:TM614 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.05.018

[引用本文格式]于国强,谢振华,张天海,等.参与电网调频的风电机组线性变参数变桨控制策略[J].热能动力工程,2021,36(5):119-125. YU Guo-qiang, XIE Zhen-hua, ZHANG Tian-hai, et al. Linear parameter varying-based pitch control strategy for wind turbines participating in power grid frequency regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5): 119-125.

## Linear Parameter Varying-based Pitch Control Strategy for Wind Turbines Participating in Power Grid Frequency Regulation

YU Guo-qiang<sup>1</sup>, XIE Zhen-hua<sup>2</sup>, ZHANG Tian-hai<sup>1</sup>, LUO Sen-hua<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210094;  
2. Jiangsu Goldwind Tianze Wind Power Co. Ltd., Yancheng, China, Post Code: 224100;  
3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094)

**Abstract:** When wind turbine participates in frequency regulation, the adjustment of output power will change the wind speed range in which pitch angle is needed to adjust. Additionally, the sensitivity of pitch angle to aerodynamic power varies with wind condition, which causes difficulty to apply the traditional PI pitch controller for complex conditions as wind turbine participates in frequency regulation, leading to rotor speed oscillation. Therefore, in this paper, a design method of wind turbine pitch controller is proposed based on linear variable parameter system (LPV). This method linearizes the wind turbine model, and the LPV model is obtained by convex decomposition according to the change range of wind speed and pitch angle, then the corresponding pitch controller is obtained by solving the linear matrix inequality (LMI). Compared with the traditional PI pitch controller, the LPV controller can effectively reduce the fluctuation of the rotational speed, reduce the low-speed shaft load and reduce the fluctuation of the pitch angle. The

收稿日期:2019-10-18; 修订日期:2019-11-21

基金项目:国家自然科学基金(51977111,61773214);江苏方天电力技术有限公司科技项目“并网风电机组一次调频控制系统研究及改造应用”

**Fund-supported Project:** National Natural Science Foundation of China(51977111,61773214); Science and Technology Project of Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd. “Research and Application of Primary Frequency Regulation Control System for Grid-connected Wind Turbines”

作者简介:于国强(1979-),男,江苏常熟人,江苏方天电力技术有限公司高级工程师。

effectiveness and advancement of the method are verified by simulation.

**Key words:** frequency regulation, speed oscillation, LPV model, LPV pitch controller

### 引 言

为实现风电机组参与电力系统的频率调节,需要按照电网的功率指令进行有功功率的调整,改变风电机组变桨风速,桨距角调节受风速影响更加剧烈,进而给风电机组的变桨控制及转速调节带来巨大挑战。因此,传统变桨控制器难以满足风电机组在调频模式下对变桨控制性能的要求。

由于 PI 控制具备结构简单、容易实现等优点,传统变桨控制常采取 PI 控制<sup>[1]</sup>。文献[2]以风电机组转速为反馈信号,设计了风电机组 PI 变桨控制器,然而其增益系数的整定缺乏依据。文献[3-5]使用模糊算法自适应整定 PI 控制参数,优化改进了传统 PI 变桨控制。文献[6-7]提出一种基于自抗扰控制理论的风电机组变桨控制器,提升了变桨控制器在不同风速下对转速的调节效果。文献[8]采用人工蜂群算法进一步对自抗扰变桨控制器的参数进行优化,简化了控制器参数的整定过程,转速响应速度有所提高。此外,滑模变结构控制<sup>[9-11]</sup>、鲁棒控制<sup>[12]</sup>、遗传算法<sup>[13]</sup>和径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络<sup>[14-16]</sup>等先进策略及算法的应用进一步提升了变桨控制器的性能。

以上变桨控制器均不同程度地提升了风电机组转速的调节性能,但尚未考虑到参与调频时风电机组因有功功率响应电网而导致变桨动作的风速范围发生改变的问题。为了提升参与电网调频风电机组在复杂湍流风况下的转速调节性能,本文提出了一种基于线性变参数(Linear Parameter Varying, LPV)系统的变桨控制方法。将风电机组模型线性化,根据风速和桨距角的变化范围,结合凸分解原理得到具有凸四面体结构的风电机组 LPV 模型。通过求解线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)设计出相应的变桨控制器,仿真验证了该方法的有效性和先进性。

## 1 风电机组模型及其控制策略

### 1.1 气动模型

风轮从风中捕获的气动功率为:

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \tag{1}$$

式中:  $P_m$ —气动功率, kW;  $\rho$ —空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $R$ —风轮半径, m;  $v$ —风速, m/s;  $C_p$ —风能利用系数;  $\beta$ —桨距角, (°);  $\lambda$ —叶尖速比,  $\lambda = \omega_r R/v$ ;  $\omega_r$ —风轮角速度, rad/s。

风轮的气动转矩为:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \tag{2}$$

式中:  $T_m$ —气动转矩, N·m。

### 1.2 传动链模型

风电机组的传动链可以等效为双质量块模型,考虑高低速轴的齿轮比,其传动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = \omega_r - \omega_g/n_g \\ J_r \dot{\omega}_r = -K_s \theta_s - B_s \omega_r + B_s \omega_g/n_g + T_m \\ J_g \dot{\omega}_g = (K_s \theta_s + B_s \omega_r - B_s \omega_g/n_g)/n_g - T_e \end{cases} \tag{3}$$

式中:  $\omega_g$ —发电机角速度, rad/s;  $\theta_s$ —低速轴和高速轴的偏差角, rad;  $B_s$ —传动链阻尼系数, N·m·s/rad;  $K_s$ —传动链刚度系数, N/m;  $J_r$ —风轮的转动惯量, kg·m<sup>2</sup>;  $J_g$ —发电机的转动惯量, kg·m<sup>2</sup>;  $n_g$ —齿轮箱变速比;  $T_e$ —电磁转矩, N·m。

### 1.3 基于转速调节的功率控制

风电机组的有功功率控制策略常采用基于转速调节的功率控制(Rotor Speed Control, RSC)<sup>[17]</sup>, 优先调节转速以改变捕获风功率。图1为RSC方法下传统变桨原理图,可分为电磁功率调节和桨距角调节两部分。

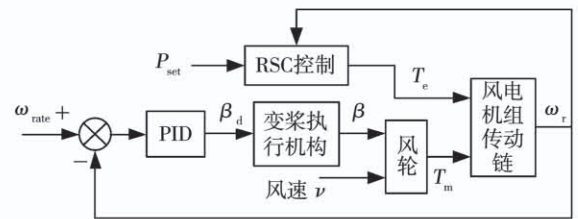


图1 RSC方法下的传统变桨原理结构

Fig.1 Traditional pitch principle structure under RSC method

#### 1.3.1 电磁功率调节

图2为RSC方法运行原理图,当风电机组角速



度低于设定角速度  $\omega_{set}$  时,采用最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 控制,输出功率参考值为  $P_{opt}$ 。当风电机组角速度大于设定角速度  $\omega_{set}$  时,通过变速控制调节风电机组角速度,从而改变风能捕获效率,使风电机组以设定功率  $P_{set}$  输出。此过程中电磁转矩为:

$$T_e = \begin{cases} \frac{P_{opt}}{\omega_g}, \omega_r < \omega_{set} \\ \frac{P_{set}}{\omega_g}, \omega_r \geq \omega_{set} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{opt} = k_{opt} \omega_r^3$ ;  $k_{opt}$  —最优转矩增益,  $N \cdot m \cdot s^2 / rad^2$ 。

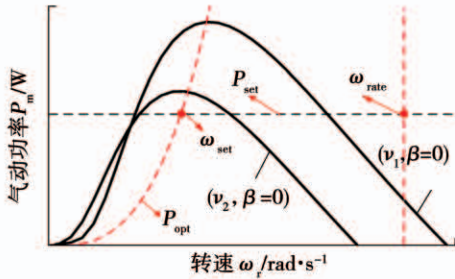


图 2 RSC 方法运行原理图

Fig. 2 The operating principle of the RSC method

### 1.3.2 桨距角调节

当风电机组角速度超过额定角速度时,风电机组通过调节桨距角改变风能捕获效率,将角速度限制在额定角速度附近。此时,电磁功率调节的主要目标是跟踪电网功率指令,而不是调整风电机组机械动态。传统变桨控制主要采用 PI 控制器,通过优化设定其增益系数获得较好的控制效果。图 1 中变桨执行机构描述为一阶惯性环节:

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_d \quad (5)$$

式中:  $\beta$  —桨距角实际值, ( $^\circ$ );  $\beta_d$  —桨距角参考值, ( $^\circ$ );  $\tau$  —变桨执行机构时间常数。

## 2 调频模式下变桨分析

风电机组参与电网调频时,其输出功率需要服务电网调频,不再仅需要在额定功率以上变桨,输出功率将根据功率指令而调整;相比于 MPPT 模式,输出功率降低导致相同风速下风电机组达到额定角速度,使得变桨动作提前,以实现特定功率输出,具体表现为触发风电机组变桨的风速随功率改变。图 3

为不同输出功率下桨距角随风速的变化,相较于传统的最大功率点跟踪运行模式,调整输出功率使风电机组变桨动作风速范围变宽,且输出功率越小,风电机组变桨动作的风速范围越大。

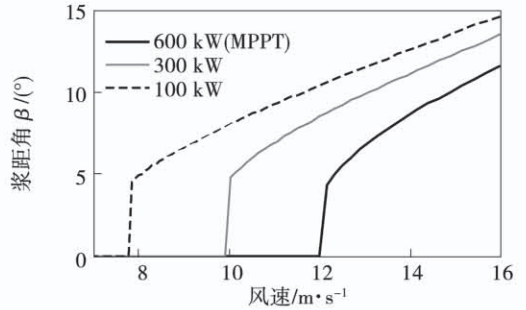


图 3 不同输出功率下桨距角随风速的变化

Fig. 3 Variation of pitch angle with wind speed under different output power

图 4 为同一湍流风速、不同功率下桨距角的变化,风电机组以 300 kW 功率运行时,桨距角变化范围及动作量远大于 MPPT 控制下桨距角变化范围及动作量。输出功率的降低使得风电机组桨距角动作更为频繁,即桨距角的调节受风速变化影响显著。

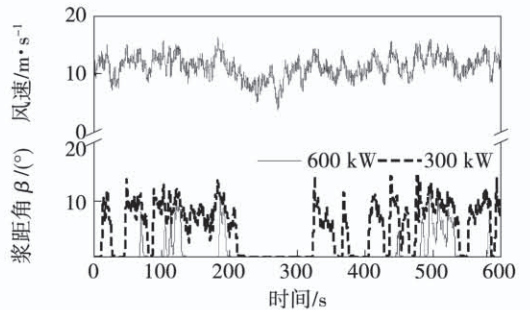


图 4 同一风速、不同功率下桨距角变化

Fig. 4 Pitch angle curve under different power at the same wind speed

此外,桨距角调节气动功率的灵敏度 ( $\Delta P_m / \Delta \beta$ ) 随着风速变化而大幅改变。图 5 为  $\Delta P_m / \Delta \beta$  随风速的变化,风速越高,则桨距角调节气动功率的灵敏度越高。

调整功率及灵敏度使得风电机组的桨距角调节受风速影响更显著,导致针对单一风况设计的 PI 变桨控制器出现角速度收敛缓慢或振荡现象。针对 9 和 14 m/s 风况分别设计了两个 PI 控制器 PI1 和 PI2,图 6 为两个控制器的控制效果对比,从图中可

以看出,PI1 的转速控制效果较好,PI2 的转速波动比较剧烈;PI1 控制下风电机组转速的波动幅度较大,收敛时间较长,转速控制效果不理想,PI2 则相对平缓快速地收敛。因此,传统 PI 变桨控制器鲁棒性较差,很难在不同风况下达到较好的转速调节效果。

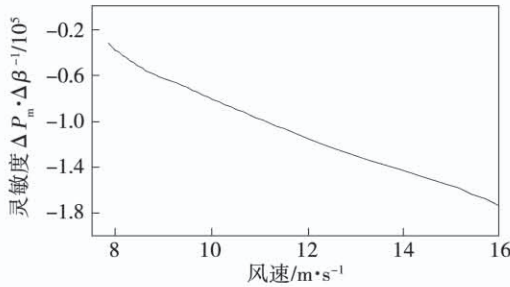


图 5  $\Delta P_m/\Delta\beta$  随风速的变化

Fig. 5 The relationship between  $\Delta P_m/\Delta\beta$  and the wind speed

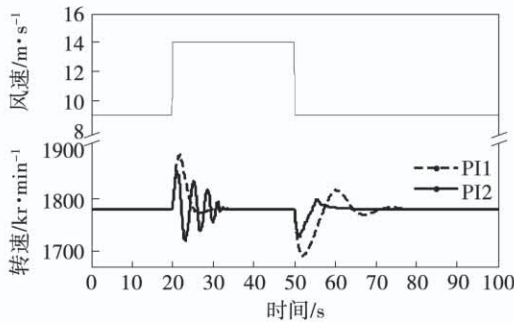


图 6 两种风速 PI 控制器控制效果对比

Fig. 6 Comparison of PI control effects for two wind speed settings

### 3 基于 LPV 的风电机组变桨控制器设计

#### 3.1 风电机组的 LPV 模型

当系统平衡时,气动转矩与电磁转矩平衡,角和桨距角达到稳态,角速度加速度及桨距角变化率为零,根据式(3)和式(5),风电机组传动链及桨距角执行机构满足式(6)。

$$\begin{cases} \omega_{r,0} = \omega_{g,0}/n_g \\ T_{m,0} = K_s\theta_{s,0} + B_s\omega_{r,0} - B_s\omega_{g,0}/n_g \\ T_{e,0} = (K_s\theta_{s,0} + B_s\omega_{e,0} - B_s\omega_{g,0}/n_g)/n_g \\ \beta_0 = \beta_{d,0} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_{m,0}$ 、 $T_{e,0}$ —系统平衡时气动转矩和电磁转

矩,  $N \cdot m$ ;  $\omega_{r,0}$ —系统平衡时风轮角速度,  $rad/s$ ;  $\omega_{g,0}$ —系统平衡时发电机角速度,  $rad/s$ ;  $\theta_{s,0}$ —低速轴和高速轴偏差角,  $rad$ ;  $\beta_0$ —系统平衡时桨距角, ( $^\circ$ );  $\beta_{d,0}$ —系统平衡时桨距角参考值, ( $^\circ$ )。

结合式(3)及式(5),将式(6)代入得到式(7)。

$$\begin{cases} \Delta\dot{\theta}_s = (\omega_r - \omega_{r,0}) = (\omega_g - \omega_{g,0})/n_g \\ J_r\Delta\dot{\omega} = -\Delta T_s + (T_m - T_{m,0}) \\ J_g\Delta\dot{\omega}_g = \Delta T_s/n_g - (T_e - T_{e,0}) \\ \Delta T_s = K_s(\theta_s - \theta_{s,0}) + B_s(\omega_r - \omega_{r,0}) - B_s(\omega_g - \omega_{g,0})/n_g \\ \Delta\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}(\beta - \beta_0) + \frac{1}{\tau}(\beta_d - \beta_{d,0}) \end{cases} \quad (7)$$

由风轮的气动转矩  $T_m$  得到关于风轮角速度  $\omega_r$ 、风速  $v$  和桨距角  $\beta$  的函数,选取平衡点  $O(\omega_{r,0}, v_0, \beta_0)$ ,对式(2)进行泰勒展开并忽略高阶无穷小项,得到其线性化模型:

$$T_m = T_{m,0} + k_\omega\Delta\omega_r + k_v\Delta v + k_\beta\Delta\beta \quad (8)$$

$$\text{其中, } k_\omega = \left. \frac{\partial T_m}{\partial \omega} \right|_O; k_v = \left. \frac{\partial T_m}{\partial v} \right|_O; k_\beta = \left. \frac{\partial T_m}{\partial \beta} \right|_O;$$

$$\Delta\omega_r = (\omega_r - \omega_{r,0}); \Delta v = (v - v_0); \Delta\beta = (\beta - \beta_0)。$$

当风轮角速度大于设定角速度  $\omega_{set}$  时,风电机组以功率指令  $P_{set}$  运行,此时对电磁转矩在平衡点  $O$  处进行线性化:

$$T_e = T_{e,0} - \frac{P_{set}}{\omega_{g,0}^2}\Delta\omega_g \quad (9)$$

式中:  $P_{set}$ —RSC 控制中的输出功率设定值,  $kW$ ;  $\Delta\omega_g = (\omega_g - \omega_{g,0})$ 。

将式(8)、式(9)代入式(7)简化得到式(10)。

$$\begin{cases} \Delta\dot{\theta}_s = \Delta\omega_r - \frac{\Delta\omega_g}{n_g} \\ \Delta\dot{\omega}_r = -\frac{K_s}{J_r}\Delta\theta_s - \frac{B_s - k_\omega}{J_r}\Delta\omega_r + \frac{B_s}{J_r n_g}\Delta\omega_g + \frac{k_\beta}{J_r}\Delta\beta + \frac{k_v}{J_r}\Delta v \\ \Delta\dot{\omega}_g = \frac{K_s}{J_g n_g}\Delta\theta_s + \frac{B_s}{J_g n_g}\Delta\omega_r + \frac{1}{J_g}\left(\frac{P_{set}}{\omega_{g,0}^2} - \frac{B_s}{n_g}\right)\Delta\omega_g \\ \Delta\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\Delta\beta + \frac{1}{\tau}\Delta\beta_d \end{cases} \quad (10)$$



综上,风电机组的 LPV 模型为:

$$G: \begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ y = C_2 x \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -\frac{1}{n_g} & 0 \\ -\frac{K_s}{J_r} & -\frac{B_s - k_\omega}{J_r} & \frac{B_s}{J_r n_g} & \frac{k_\beta}{J_r} \\ \frac{K_s}{J_g n_g} & \frac{B_s}{J_g n_g} & \frac{1}{J_g} \left( \frac{P_{set}}{\omega_{g,0}^2} - \frac{B_s}{n_g^2} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_v}{J_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau} \\ 0 \end{bmatrix}; C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\text{状态量 } x = \begin{bmatrix} \Delta\theta_s \\ \Delta\omega_r \\ \Delta\omega_g \\ \Delta\beta \end{bmatrix}, \text{扰动 } w = [\Delta v], \text{控制输入 } u =$$

$$[\Delta\beta_d], \text{输出 } y = [\Delta\omega_g].$$

### 3.2 控制器设计

文献[18]给出了针对某个 LPV 系统的控制器求解步骤。给定一个如式(11)所示的 LPV 系统,若存在两个对称矩阵  $X, Y$  及 4 个矩阵  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ , 使得矩阵不等式(12)和不等式(13)成立:

$$\begin{bmatrix} M + M^T & K^T & XB_1 & 0 \\ K & N + N^T & B_1 & 0 \\ (XB_1)^T & B_1^T & -\gamma I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

其中,  $\gamma$  为一组正的标量;  $M = XA + \hat{B}C_2; N = AY + B_2\hat{C}; K = (\hat{A}^T + A + B_2\hat{D}C_2)^T$ 。

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \quad (13)$$

则存在如式(14)所示的 LPV 控制器:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_c x + B_c y \\ u = C_c x + D_c y \end{cases} \quad (14)$$

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱求解式(12)和式(13)两个矩阵不等式,得到矩阵  $X, Y$  和  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ , 在此基础上,控制器的系数矩阵可由以下表达式

求出<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} I - XY = NM^T \\ A_c = N^{-1}(\hat{A} - X(A - B_2\hat{D}C_2)Y - \hat{B}C_2Y - XB_2\hat{C})M^{-T} \\ B_c = N^{-1}(\hat{B} - XB_2\hat{C}) \\ C_c = (\hat{C} - \hat{D}C_2Y)M^{-T} \\ D_c = \hat{D} \end{cases} \quad (15)$$

在按上述方法求解控制器过程中,由于 LPV 系统中  $k_\beta, k_v$  随着  $(\omega_{r,0}, v_0, \beta_0)$  变化而改变,即矩阵  $A$  随着平衡点而改变,每一个平衡点对应一组控制器,这表明随着风速的变化,需要不断求解新的 LMI 才能得到相应的控制器,计算量庞大。因此,为了简化控制器的求解过程,采取以下方法进行 LPV 变桨控制器的合成。

根据风速的最大值  $v_{max}$  和最小值  $v_{min}$  及其对应的桨距角最大值  $\beta_{max}$  和最小值  $\beta_{min}$  构成凸四面体的 4 个顶点如图 7 所示:  $\varphi_1 = (v_{min}, \beta_{min}), \varphi_2 = (v_{min}, \beta_{max}), \varphi_3 = (v_{max}, \beta_{min}), \varphi_4 = (v_{max}, \beta_{max})$ , 根据上述控制器的求解步骤可以得到四面体每个顶点对应的控制器,用  $K_1, K_2, K_3$  和  $K_4$  表示,则四面体内部任一点的控制器可由该 4 个顶点得到。因此,对于选定的风速范围,桨距角控制器可表示为:

$$\Delta\beta_d = \sum_{i=1}^4 \rho_i K_i \quad (16)$$

其中,

$$\rho_1 = \frac{(v - v_{min})(\beta - \beta_{min})}{(v_{max} - v_{min})(\beta_{max} - \beta_{min})}$$

$$\rho_2 = \frac{(v - v_{min})(\beta_{max} - \beta)}{(v_{max} - v_{min})(\beta_{max} - \beta_{min})}$$

$$\rho_3 = \frac{(v_{max} - v)(\beta - \beta_{min})}{(v_{max} - v_{min})(\beta_{max} - \beta_{min})}$$

$$\rho_4 = \frac{(v_{max} - v)(\beta_{max} - \beta)}{(v_{max} - v_{min})(\beta_{max} - \beta_{min})}$$

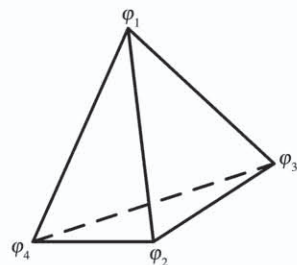


图 7 凸四面体结构型控制器

Fig. 7 Convex tetrahedral structure controller

系统桨距角的参考值为  $\beta_d = \Delta\beta_d + \beta_0$ ，通过 LPV 控制器得到控制输出量  $\Delta\beta_d$ ；对于  $\beta_0$  的求解，因为  $(\omega_0, v_0, \beta_0)$  是一组平衡点，风电机组在额定角速度处运行时，角速度变化不大，所以认为  $\omega_0$  近似不变，通过数据拟合得到  $\beta_0$  和  $v_0$  的关系如图 8 所示。从而根据风速得到  $\beta_0$ 。综合上述工作得到基于 LPV 的风电机组变桨控制器，其原理如图 9 所示。

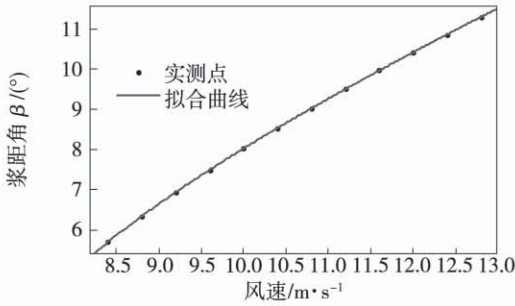


图 8  $\beta_0 - v_0$  关系拟合曲线

Fig. 8 Balance point selection fitting curve

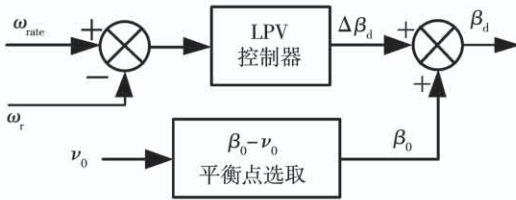


图 9 基于 LPV 的变桨控制原理

Fig. 9 Pitch control principle based on LPV

### 4 仿真验证及分析

采用 NREL 开发的 FAST 软件进行仿真。风电机组模型采用 NREL 的 600 kW CART3 试验机型，其主要参数如表 1 所示。设定风电机组的输出功率  $P_{set}$  为 0.1 MW，对比在高湍流风况下 LPV 变桨控制器与传统 PI 变桨控制器的控制效果。

表 1 CART3 风电机组模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of the CART3 wind turbine

参数	数值
额定功率 $P_N$ /kW	600
额定转速 $n_N$ /r · min <sup>-1</sup>	1 780
额定风速 $v_{in}$ /m · s <sup>-1</sup>	12
风轮半径 $R$ /m	20
齿轮箱传动比 $G$	43.165
最大风能利用系数 $C_{p,max}$	0.460 3
最佳叶尖速比 $\lambda$	5.8

图 10 为高湍流风况下 LPV 变桨控制器与 PI 变桨控制器变桨控制的仿真结果对比，从图中可以看出，相比于传统 PI 控制器，基于 LPV 的风电机组变桨控制器能够有效提升控制性能。在 LPV 变桨控制器下，风电机组转速被有效地维持在额定转速附近，且相较于 PI 控制器，其转速波动较小，转速调节性能得到有效改善。在风况变化较为剧烈时，传统 PI 变桨控制下低速轴转矩发生剧烈振荡，加剧传动链的磨损，影响风电机组的使用寿命，而在 LPV 控制器下风电机组低速轴的转矩变化比较平稳，可有效减小低速轴的载荷。PI 控制器下风电机组桨距角变化幅度较大，而 LPV 控制器下桨距角变化较小，能够减小风电机组变桨系统的动作压力。

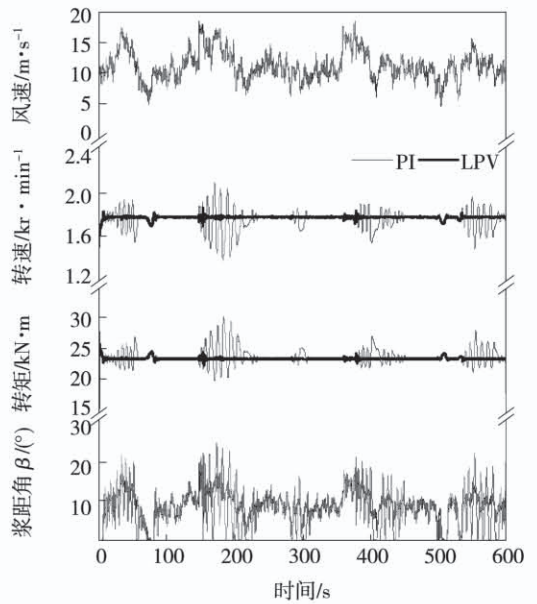


图 10 仿真结果对比

Fig. 10 Comparison of simulation results

### 5 结论

提出一种适用于参与电网调频风电机组的线性变参数变桨控制策略，LPV 变桨控制器的抗干扰性能强，具有良好的控制效果，该变桨控制器具有如下优点：

- (1) 能有效减小调频模式下风电机组转速的波动，将转速平稳地维持在额定转速附近。
- (2) 能够有效减小低速轴转矩波动，减少传动链的磨损。
- (3) 可有效减小桨距角的波动范围，降低风电



机组变桨系统的压力。

### 参考文献:

- [1] 赵微微,张磊,井延伟.变桨风力发电机组控制器优化设计[J].电网技术,2014,38(12):3436-3440.  
ZHAO Wei-wei,ZHANG Lei,JING Yan-wei. Optimization design of controller for pitch wind turbine[J]. Power System Technology, 2014,38(12):3436-3440.
- [2] SLOOTWEG J G, KLING W L. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations[C]//Power Tech Conference Proceedings, Bologna, 2003.
- [3] 宋新甫,梁波.基于模糊自适应PID的风力发电系统变桨距控制[J].电力系统保护与控制,2009,37(16):50-53.  
SONG Xin-fu,LIANG Bo. Wind power system pitch control based on fuzzy self-learning emendation control theory[J]. Power System Protection and Control,2009,37(16):50-53.
- [4] LAKSHMI K V, SRINIVAS P. Fuzzy adaptive PID control of pitch system in variable speed wind turbines[C]//International Conference on Issues & Challenges in Intelligent Computing Techniques. Krishna Inst Engn & Technol, Ghaziabad, 2014.
- [5] YU H, GAO Y, ZHANG H. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system[C]//IEEE International Conference on System Science & Engineering, Shanghai, 2014.
- [6] 夏长亮,宋战锋.变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J].中国电机工程学报,2007,27(14):91-95.  
XIA Chang-liang,SONG Zhan-feng. Pitch control of variable speed control frequency wind turbines base on Active-disturbance-rejection control[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(14):91-95.
- [7] SUN Yao-jie, KONG Long-yun, SHI Wei-xiang, et al. Robust sliding mode control of variable-speed wind power system[C]//4<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, 2004.
- [8] 任丽娜,吕明月,王振臣.改进蜂群算法在风机变桨距控制中的应用[J].机械设计与制造,2015(3):43-46.  
REN Li-na,LYU Ming-yue,WANG Zhen-chen. Improved bee colony algorithm on the wind turbine pitch control[J]. Mechanical Design & Manufacturing,2015(3):43-46.
- [9] 王东风,贾增周,孙剑,等.变桨距风力发电系统的滑模变结构控制[J].华北电力大学学报,2008,35(1):1-3.  
WANG Dong-feng,JIA Zeng-zhou,SUN Jian, et al. Sliding model control and its application to adjustable-pitch wind power system [J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35 (1): 1-3.
- [10] 田勇,张宏立,玛依拉·赛依力.基于滑模变结构的风力机变桨距控制研究[J].华东电力,2011,39(9):1438-1442.  
TIAN Yong,ZHANG Hong-li,MAYILA S. Variable pitch control of wind turbine generator base on sliding mode[J]. East China Electric Power,2011,39(9):1438-1442.
- [11] YINZHU Z, YANG M. The study of variable speed variable pitch controller for wind power generation systems based on sliding mode control[C]//2016 IEEE 11<sup>th</sup> Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Hefei, 2016.
- [12] GUO H, GUO Q.  $H_{\infty}$  control of adjustable-pitch wind turbine adjustable-pitch system[C]//IEEE International Power Electronics & Motion Control Conference, Shanghai, 2007.
- [13] 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,2011,28(1):319-322,335.  
LEI Tao,JIA Li-min. Nonlinear predictive control algorithm for variable pitch control of wind turbine[J]. Computer Simulation, 2011,28(1):319-322,335.
- [14] 秦斌,周浩,杜康,等.基于RBF网络的风电机组变桨距滑模控制[J].电工技术学报,2013,28(5):37-41.  
QIN Bin,ZHOU Hao,DU Kang, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):37-41.
- [15] 张传斌,王学孝,邓正隆.非线性时间序列的RBF神经网络预测方法及其应用[J].热能动力工程,2001,16(3):311-312,342-352.  
ZHANG Chuan-bin,WANG Xue-xiao,DENG Zheng-long. RBF neural network prediction method for nonlinear time series and its application[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2001,16(3):311-312,342-352.
- [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] 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 Zai-yu,SHEN Chun,YIN Ming-hui, 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.
- [18] APKARIAN P, GAHINET P, BECKER G. Self-scheduled  $H_{\infty}$  control of linear parameter-varying systems: a design example [J]. Automatica,1995,31(9):1251-1261.

(王治红 编辑)