

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209220

# 基于单纯形法的风电机组独立变桨控制技术 研究与仿真

雷航<sup>1</sup>, 刘河生<sup>1</sup>, 张瑞刚<sup>1</sup>, 赵剑剑<sup>2</sup>, 张金旗<sup>2</sup>, 芮宁科<sup>2</sup>, 季笑<sup>2</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 华能国际电力江苏能源开发有限公司, 江苏 南京 210015)

**[摘要]** 针对风电机组在风切变、塔影效应的影响下, 如何减缓叶根挥舞弯矩进行了研究。提出了基于单纯形法的独立变桨控制策略, 在保证风电机组功率控制的基础上, 实现减缓叶根挥舞弯矩及其 1P 分量载荷的目的; 分别将该方法和传统 PI 控制的独立变桨控制策略应用于 4.5 MW 风电机组模型, 并在湍流风况下进行仿真, 对比分析叶根挥舞弯矩及其功率谱密度、机组输出功率。通过 4.5 MW 风电机组模型仿真运行数据分析, 表明基于单纯形法的独立变桨控制策略能够有效减缓叶根挥舞弯矩及其 1P 分量, 且能稳定输出功率。

**[关键词]** 单纯形法; 风电机组; 独立变桨控制; PI 控制; 载荷

**[引用本文格式]** 雷航, 刘河生, 张瑞刚, 等. 基于单纯形法的风电机组独立变桨控制技术研究及仿真[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 144-150. LEI Hang, LIU Hesheng, ZHANG Ruigang, et al. Research and simulation of wind turbine individual pitch control technology based on simplex method[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 144-150.

## Research and simulation of wind turbine individual pitch control technology based on simplex method

LEI Hang<sup>1</sup>, LIU Hesheng<sup>1</sup>, ZHANG Ruigang<sup>1</sup>, ZHAO Jianjian<sup>2</sup>, ZHANG Jinqi<sup>2</sup>, RUI Ningke<sup>2</sup>, JI Xiao<sup>2</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Huaneng International Power Jiangsu Energy Development Co., Ltd., Nanjing 210015, China)

**Abstract:** This paper studies how to mitigate the blade root flap-wise moment of wind turbine under the influence of wind shear and tower shadow effect. An individual pitch control strategy based on simplex method is proposed to mitigate the blade root flap-wise moment and its 1p component load on the basis of ensuring the power control of the wind turbine. This method and the individual pitch control strategy of conventional PI control are applied to a 4.5 MW wind turbine model, and simulation is carried out under turbulent wind conditions to compare and analyze the blade root flap-wise moment, its power spectral density and the output power. The analysis of the simulation operation data of the 4.5 MW wind turbine model shows that, the individual pitch control strategy based on the simplex method can effectively mitigate the blade root flap-wise moment and its 1p component, and stabilize the output power.

**Key words:** simplex method; wind turbine unit; individual pitch control; PI control; load

随着我国“碳达峰”和“碳中和”目标逐步推进, 新能源发电装机容量逐渐增多, 风电机组尺寸越来越大。由于风切变以及塔影效应的影响, 叶片在风轮旋转平面最高处和最低处的受力相差巨大, 由此造成了一定程度的叶片在风轮旋转平面外的气动载荷不平衡, 增加了超长叶片风电机组的载荷

控制难度和制造成本。独立变桨控制就是一种降低机组载荷的方案之一, 它是基于集中变桨的控制结构, 为了实现 3 个叶片挥舞弯矩基本一致, 对叶片进行单独的控制调节, 计算得出叶片各自的桨距角附加值, 以减小因风切变以及塔影效应等因素造成的风轮面外不均匀载荷。

收稿日期: 2022-09-14 网络首发日期: 2022-11-30

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H40)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H40)

第一作者简介: 雷航 (1988), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大兆瓦风电机组先进降载技术, leihang@tpri.com.cn.

目前, 基于独立变桨距的风电机组不均匀载荷的控制方法主要是采用传感器对桨叶根部或者主轴端面载荷进行测量, 将旋转坐标系下测量所得弯矩经坐标变换为固定坐标系下的俯仰力矩和偏航力矩, 实现解耦控制<sup>[1-2]</sup>。基于载荷反馈的独立变桨距控制在解耦之后一般采用PI控制器, 然而PI控制器在解决风电机组非线性、强耦合、时滞等问题方面难以取得理想的效果<sup>[3]</sup>, 且机组受到随机风扰动, 传统PI控制器动态减载效果并不理想。将PI控制器、现代控制理论以及智能算法相结合是解决这一问题的有效办法。文献[4]采用模糊PID进行控制, 该策略减缓了叶片挥舞弯矩, 稳定了机组输出功率, 但模糊规则制定较为困难, 主要依赖于专家经验, 且模糊规则适应性较差。文献[5]在PI控制器的基础上对风轮载荷的高次谐波进行了控制, 有效减小了风轮不平衡载荷。文献[6-9]将自适应控制、二自由度PID控制以及模型预测控制应用于独立变桨, 但上述算法存在建模困难、计算复杂、控制实时性和稳定性较差等问题。

本文以4.5 MW风电机组模型为基础, 提出基于单纯形法的独立变桨距控制策略并与传统的PI独立变桨距控制策略作控制效果对比, 以验证基于单纯形法的独立变桨距控制策略的优越性。

$$V(x, y) = \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}\right) V_0, & \theta \in \left(\frac{1\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right] \text{ 或 } \theta \in \left(\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}\right] \\ \left(\left(1 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}\right) (0.5 - \cos\theta) + (0.5 + \cos\theta)\right) V_0, & \theta \in \left(\frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}\right] \\ V_0, & \theta \in \left(0, \frac{1\pi}{3}\right] \text{ 或 } \theta \in \left(\frac{5\pi}{3}, 2\pi\right] \end{cases} \quad (2)$$

针对下风向机组, 可以用式(3)表示距离塔架中心线前方(x,y)处的风速:

$$V(x, y) = \begin{cases} \left(1 - \Delta \cos^2\left(\frac{\pi y}{WD_t}\right)\right) V_0, & \theta \in \left(\frac{1\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right] \text{ 或 } \theta \in \left(\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}\right] \\ \left(\left(1 - \Delta \cos^2\left(\frac{\pi y}{WD_t}\right)\right) (0.5 - \cos\theta) + (0.5 + \cos\theta)\right) V_0, & \theta \in \left(\frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}\right] \\ V_0, & \theta \in \left(0, \frac{1\pi}{3}\right] \text{ 或 } \theta \in \left(\frac{5\pi}{3}, 2\pi\right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: W为塔影的宽度, 由塔筒直径 $D_t$ 乘以一定比例系数得到。

### 1.2 风切变及塔影效应下机组载荷特性研究

基于式(1)可以得出, 风电机组叶片距离叶根为

## 1 风切变及塔影效应下的风电机组载荷特性研究

### 1.1 风切变及塔影效应建模

地表风速会随着高度的增加而呈现出逐渐增大的趋势。这种因地表摩擦力作用导致风速随高度而变化的现象称为风切变。一般多用指数公式表征风速随高度的变化趋势:

$$V(z) = V(z_{ref}) \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $V(z)$ 为某高度处的风速;  $V(z_{ref})$ 为参考高度处的风速;  $z$ 与 $z_{ref}$ 分别为指定高度和参考高度;  $\alpha$ 为地表粗糙度指数。

风电机组机舱、塔筒的存在会导致气流在经过风电机组时形成一定程度的阻碍作用, 这种作用会减弱气流流动, 造成塔架附近的气流偏小。这种现象称为塔影效应。

针对上风向机组, 一般用势流模型来表征风电机组来流方向的塔影效应<sup>[10]</sup>。对于某塔筒直径为 $D_t$ 的上风向机组, 前方未受扰动的气流速度为 $V_0$ , 在直径为 $D = F \cdot D_t$ 的圆柱范围内为不可压缩层流,  $F$ 为修正因子。前方自由流风速 $V_0$ 在距离圆柱中心线(坐标原点)前方(x,y)处的风速可表示为:

$l$ 处的风速 $V_l$ 为:

$$V_l = \left(\frac{l \cos\theta + H_{tower}}{H_{tower}}\right)^\alpha V_{hub} \quad (4)$$

式中:  $H_{tower}$ 为塔架高度,  $m$ ;  $\theta$ 为叶片方位角, 记

叶片处于风轮平面内最上端处为  $0^\circ$  方位角，风轮顺时针旋转方向为正； $V_{hub}$  为轮毂中心处的来流风速，m/s。

风电机组风轮产生的功率和推力分别为：

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_F \quad (6)$$

$$A = \pi R^2 = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (7)$$

式中： $P$  为风轮产生的功率； $F$  为风轮产生的气动推力； $\rho$  为空气密度， $\text{kg/m}^3$ ； $R$  为风轮半径，m； $D$  为风轮直径，m； $A$  为风轮面积， $\text{m}^2$ ； $C_p$  为风轮功率系数； $C_F$  为风轮推力系数。

从式(5)、式(6)可知，对于确定的风电机组，风轮产生的气动推力与来流风速的二次方成正比，风轮产生的气动功率与来流风速的三次方成正比。因此，当流向风轮的风速出现波动时，风轮产生的气

动推力与功率会出现更大幅度的波动<sup>[1]</sup>。

根据式(2)及机组模型参数，当轮毂中心处平均风速为  $10 \text{ m/s}$  时，在风切变及塔影效应作用下，风电机组叶尖风速随叶片方位角的变化趋势如图 1 所示。从图 1 可以看出，风切变及塔影效应会使得叶尖处的风速出现周期性波动，波动周期为叶片围绕轮毂的 1 个旋转周。其中，风切变指数越大，叶片位于风轮平面最高处和最低处的风速差就越大；当叶片方位角在接近  $(2k+1)\pi$ ， $(k=0,1,\dots,n)$  时，叶尖处风速会发生短暂的突降。这种风速的短时剧烈波动会对叶片的气动力造成较大冲击，消耗叶片疲劳寿命，同时也会对机组产生 1 个固定周期的冲击，是造成风电机组载荷波动、机组振动的主要风况因素。为了对理论模型进行验证，分别在考虑风切变、塔影效应以及二者均存在的情况下，对叶根挥舞弯矩  $M_y$ 、轮毂弯矩  $M_x$ （旋转坐标系）进行仿真，结果如图 2 所示。

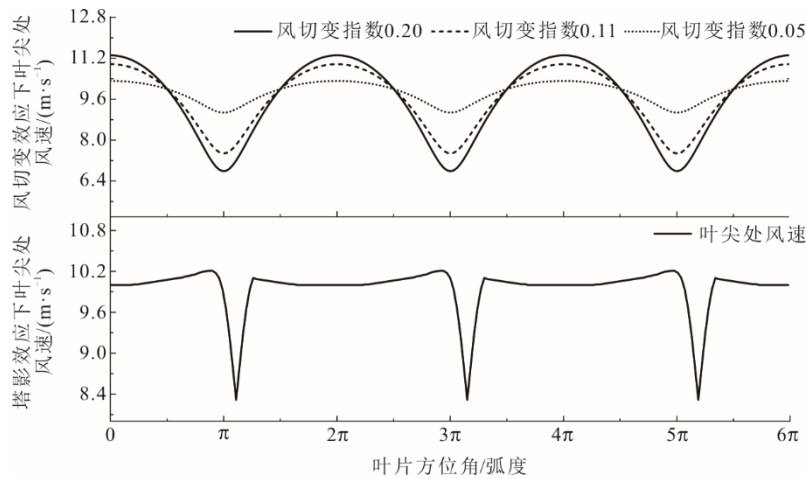


图 1 风剪切及塔影效应下叶尖处风速

Fig.1 Wind speed of blade tip under the influence of wind shear and tower shadow

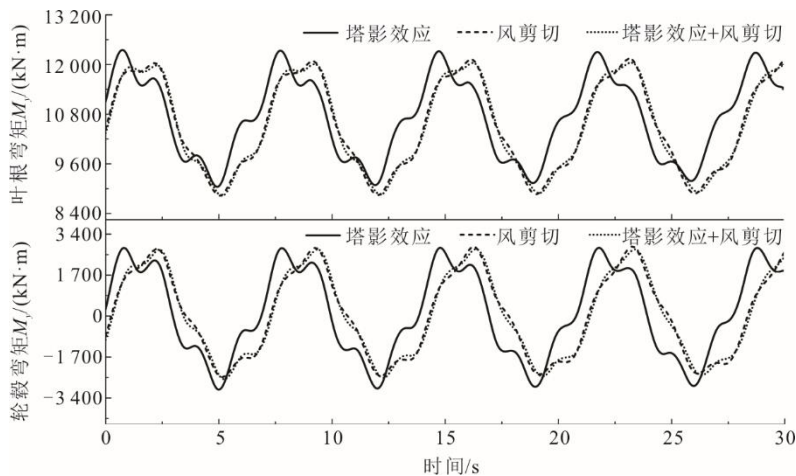


图 2 不同风况下叶根挥舞弯矩与轮毂弯矩

Fig.2 Blade flap-wise moments and hub moments under different wind conditions

从图2可以看出,在风切变和塔影效应作用下,叶根挥舞弯矩(旋转坐标系)会随着时间出现周期性振荡,振荡频率为风轮转频1P(一周期)频率。因此,本文主要通过独立变桨距控制技术减缓叶根挥舞弯矩,进而减弱整个风轮的载荷波动。

## 2 单纯形法研究

单纯形法是一种智能的直接寻优方法,其不需计算目标函数的梯度,尤其用于那些无法列出目标函数的工程控制参数寻优的情况。单纯形法在控制参数寻优中有着广泛的应用。单纯形法的算法思路是:在N维空间中取N+1个点 $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_N, P_{N+1})$ 构成1个单纯形,设目标函数表达式为 $f(x)$ ;计算第1个单纯形中这N+1个点的目标函数值 $f(P_i)$ ,  $(i=1, 2, 3, \dots, N+1)$ ;该目标函数最大值对应的点为最坏点,比如为 $P_1(x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1(N+1)})$ ,将其放弃,使用新的点 $P_j(x_{j1}, x_{j2}, x_{j3}, \dots, x_{j(N+1)})$ 取代,组成新的第2个单纯形 $(P_j, P_2, P_3, \dots, P_N, P_{N+1})$ ,并重新计算第2个单纯形中N+1个点的目标函数值;然后放弃目标函数最大值对应的点,并使用新的点代替。这样反复计算并更新,使函数值逐步下降,逐步接近目标函数最小的点 $P_{min}$ 。若要求一个函数的最大值点或是最小值点,则可先计算初始单纯形的各点的函数值,进行比较,然后依据它们的大小关系确定函数的梯度并作为下一步选择点的参考依据,按该梯度方向更新替换点,直至寻找到该函数最大值或者最小值为止,则最终的最值点就是寻优的最终结果。可见,单纯形法的优点是不需要根据实际控制对象的实际物理模型来预先设置控制参数,而是一种自适应、智能的参数寻优方式,非常适合应用于高阶、非线性控制系统的控制参数自动寻优技术中。

以二元函数为例,说明迭代搜索目标函数极小值点的过程。

图3为单纯形法示意。设单纯形法的目标函数 $f(x)$ ,取 $f(x)=C$ 的一簇等高线。初步设由点1、点2、点3组成的三角形为第1个单纯形,计算该单纯形中3点的目标函数值分别为 $f_1, f_2, f_3$ ;然后比较这3个目标函数值的大小,如 $f_1 > f_2 > f_3$ ,则点1是最坏点,记为 $X_H$ ,点2是次坏点,记为 $X_G$ ,点3是最好点,记为 $X_L$ ,对应的目标函数值分别为 $f_H, f_G, f_L$ 。作点1的对称点4,放弃点1,重新得到由点2、点3、点4组成的新的单纯形。可以得出点2是最坏点,作其对称点5并和点3、点4共同又组成新

的单纯形,比较它们的函数值大小,然后放弃最坏点3,由其对称点6和点4、点5又构成新的单纯形。如此重复计算,不断循环更新,从而使单纯形往目标函数值最小的点的方向移动。

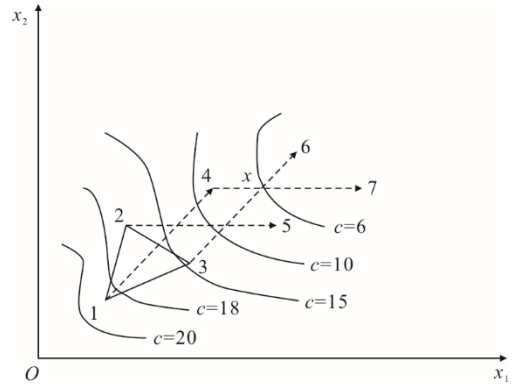


图3 单纯形法示意  
Fig.3 Schematic diagram of simplex method

通常情况下,朝着最坏点方向迭代速度最快,能迅速得到目标函数的极值点。所以,需要计算当前最坏点的对称点。

对于二维的情况: $X_R$ 位于 $X_H, X_C$ 的连线上, $X_C$ 是 $X_G$ 和 $X_L$ 的中点,因此有:

$$X_C = \frac{1}{2}(X_G + X_L) = \frac{1}{2}(X_H + X_R) \quad (8)$$

得:

$$X_R = X_G + X_L - X_H \quad (9)$$

或:

$$x_{iR} = x_{iG} + x_{iL} - x_{iH} = \frac{2}{n}(x_{iG} + x_{iL}) - x_{iH} \quad (10)$$

式中: $n=2$ ;坐标 $i=1, 2$ 。

对于n维的情况有:

$$x_{iR} = \frac{2}{n} \left( \sum_{j=0}^n x_{ij} - x_{iH} \right) - x_{iH} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

对每步的单纯形按下式判定以作为收敛条件:

$$\left| \frac{f_H - f_L}{f_L} \right| < \varepsilon \quad (12)$$

式中: $\varepsilon$ 为控制精度。

当式(12)成立时, $X_L$ 就是最好的点;否则,应求反射点,并继续迭代。

## 3 基于单纯形法的独立变桨控制

### 3.1 基于PI控制的独立变桨控制

根据叶素-动量理论分析,叶根载荷相对于风速、方位角和桨距角呈现非线性特性,取某稳态工

作点对其进行线性化分析,对于稳定的风速、桨距角,叶根弯矩的线性化公式为:

$$\begin{bmatrix} T_g \\ M_{\text{tilt}} \\ M_{\text{yaw}} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^3 \begin{bmatrix} h_{M_x} v_i + k_{M_x} \beta_i \\ -h_{M_z} v_i \sin \varphi_i - k_{M_z} \beta_i \sin \varphi_i \\ h_{M_z} v_i \cos \varphi_i + k_{M_z} \beta_i \cos \varphi_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $h_{M_z}$  和  $k_{M_z}$  分别为某稳定工作点的功率和和推力系数参数;  $\beta_i$  为叶片的桨距角;  $M_{\text{tilt}}$  为倾覆弯矩;  $M_{\text{yaw}}$  为偏航弯矩;  $T_g$  为发电机电磁转矩。

由式(13)可得,把风速  $v_i$ 、方位角  $\varphi_i$  作为干扰量,变桨角度  $\beta_i$  作为控制量,倾覆弯矩  $M_{\text{tilt}}$  和偏航弯矩  $M_{\text{yaw}}$  作为输出量,则该控制系统为多输入多输出 (multi-input multi-output, MIMO) 系统。鉴于风电机组的多体动力学耦合特性和非线性特性,为了便于实现控制,对桨距角、风速和叶根弯矩进行科尔曼坐标变换,从旋转叶片坐标系变换到固定塔架

$$\begin{bmatrix} M_{\text{tilt}} \\ M_{\text{yaw}} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  为桨叶上测得的挥舞力矩;  $\omega$  为风轮角速度。

可以设定 PI 调节器的给定值  $M_{\text{tilt}}$ 、 $M_{\text{yaw}}$ , 基于常规 SISO 的 PI 控制环来控制固定塔架坐标系下的倾覆方向和偏航方向的变桨角度  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ <sup>[13]</sup>; 后经科尔曼反变换转换成各桨叶的微调变桨角度  $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 、 $\Delta\beta_3$ , 如式(16)所示; 最后得到发送给每支叶片的实际需求桨距角为  $(\Delta\beta_1 + \beta_1)$ 、 $(\Delta\beta_2 + \beta_2)$ 、 $(\Delta\beta_3 + \beta_3)$ , 以此来降低风轮力矩的低频成分, 实现独立变桨距控制对叶片载荷的减小。

$$\begin{bmatrix} \Delta\beta_1 \\ \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.2 基于单纯形法的独立变桨控制

文献[14]中提到,基于粒子群算法优化后的 PID 控制系统超调量比较好,但是牺牲了上升时间与调节时间。基于单纯形法优化的 PID 控制系统超调量、上升时间与调节时间都较好但是衰减率不太理想。考虑到大兆瓦风电机组变桨系统的响应模型属于一阶滞后系统,且滞后时间多为 200~300 ms<sup>[15]</sup>,因此选择单纯形法对独立变桨控制进行优化。

坐标系<sup>[12]</sup>。变换之后:

$$\begin{cases} M_{\text{tilt}} = -\frac{3}{2}k_{F_z}\beta_{2,\text{cm}} - \frac{3}{2}h_{F_z}v_{2,\text{cm}} \\ M_{\text{yaw}} = \frac{3}{2}k_{M_z}\beta_{3,\text{cm}} + \frac{3}{2}h_{M_z}v_{3,\text{cm}} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $h_{F_z}$  和  $k_{F_z}$  为某稳定工作点的功率和推力系数。

由式(14)可知,变换过的变桨角  $\beta_{2,\text{cm}}$ 、 $\beta_{3,\text{cm}}$  作为输出,倾覆弯矩  $M_{\text{tilt}}$  和偏航弯矩  $M_{\text{yaw}}$  作为输入,得到 2 个分离的单输入单输出 (SISO) 环,进而可以基于 PI 控制器设计独立变桨控制器,以实现减缓风轮的倾覆力矩和偏航力矩的目的。

其中,旋转叶片坐标系下 3 支叶片叶根测量弯矩到固定塔架坐标系下的偏航弯矩和倾覆弯矩的变化公式如下:

基于单纯形法的独立变桨控制基本思路是首先建立基于单纯形法优化 PID 参数模型,将 PID 的比例、积分和微分 3 个参数组合在一起作为单纯形中三维的点;在进行寻优的过程中,逐步接近最优解,最终得到  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的最佳搭配比例。考虑到风电机组叶根挥舞弯矩主要体现在 1P 分量上,且独立变桨距控制所体现的附加桨距角很有可能在额定风速以下达不到变桨启动的冗余设定值,因此将 3 支叶片的叶根载荷测量值接入带通滤波器,这里选择二阶带通滤波器,滤波器的中心频率选择 1P 频率:

$$H_{\text{BandPass}}(s) = \frac{\xi G_0 \omega_0 s}{s^2 + \xi \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (17)$$

式中:  $G_0$  为带通增益;  $\omega_0$  为中心频率;  $\xi$  为阻尼系数。

基于单纯形法的独立变桨控制系统结构如图 4 所示。

### 3.3 目标函数的选择

优化目标函数在整个算法运行机制中至关重要。在参数最优化问题中一般使用性能指标函数。性能指标函数是被寻参数的函数,称为目标函数。

单纯形法依据目标函数实现对各点的有效更新迭代,所以该目标函数的选择直接影响到算法最终解的品质。选择时间乘绝对值偏差积分准则 (ITAE) 作为该单纯形法优化独立变桨控制参数的目标函数 (式(18))。该函数一方面采用了绝对值,

解决了误差  $e(t)$  随机变化的问题, 另一方面加权时间  $t$ , 解决最终稳态误差的问题。

$$J = ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (18)$$

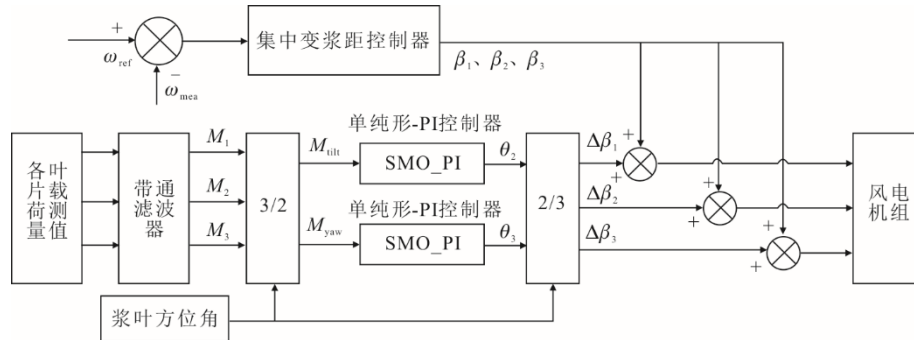


图4 基于单纯形法的独立变桨控制系统结构

Fig.4 Structural diagram of the individual pitch control system based on simplex method

### 4 仿真分析

采用 GH Bladed 搭建 4.5 MW 风力发电机组模型, 机组的主要参数见表 1。

表 1 风电机组模型参数

Tab.1 Parameters of the wind turbine model

项目	数值	项目	数值
机组类型	双馈式	切入风速/(m·s <sup>-1</sup> )	3
额定功率/MW	4.5	切出风速/(m·s <sup>-1</sup> )	20
叶片数量/个	3	额定风速/(m·s <sup>-1</sup> )	9
风轮额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	9.0	塔架高度/m	108
风轮直径/m	185.12	齿轮箱变比	183.3
功率调节	变桨变速		

采用平均风速为 13.5 m/s 的湍流风, 在基于单纯形法的独立变桨控制策略和传统 PI 控制的独立变桨策略下, 桨叶 1 的挥舞弯矩、机组的输出功率对比如图 5 所示, 图 6 为叶片 1 叶根挥舞弯矩功率谱密度, 控制效果统计分析见表 2。

由图 5、图 6、表 2 可得: 相对于传统 PI 控制的独立变桨控制策略, 基于单纯形法的独立变桨控制策略使得叶根挥舞弯矩平均值降低了 11.3%, 叶根挥舞弯矩标准差降低了 14.4%, 叶根挥舞弯矩 1P 处功率谱密度值降低了 59.6%; 发电机功率平均值基本一致, 功率标准差降低了 8.4%。

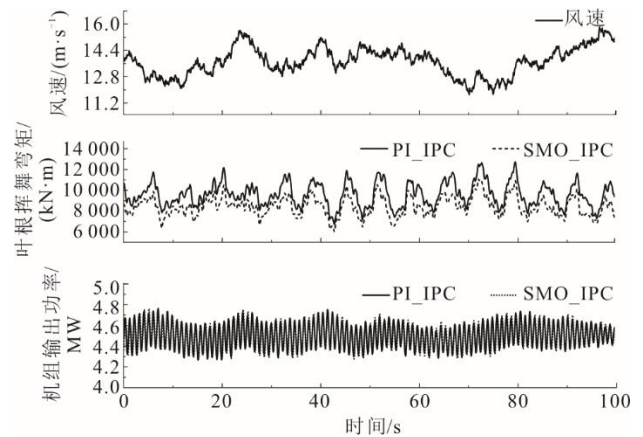


图 5 控制效果对比分析

Fig.5 Comparative analysis of the control effect

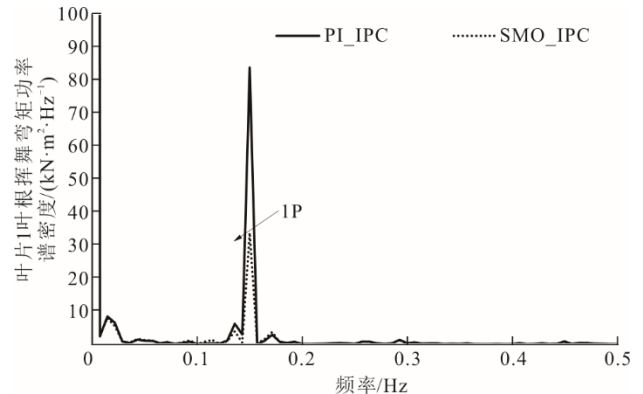


图 6 叶片 1 叶根挥舞弯矩功率谱密度

Fig.6 Flap-wise moments PSD of blade 1 root

表 2 控制效果统计分析

Tab.2 Statistical analysis of control effect

项目	控制算法	弯矩以及输出功率平均值	弯矩以及输出功率标准差	1P 峰值
叶根挥舞弯矩/(kN·m)	PI_IPC	9 665.71	1 968.96	
	SMO_IPC	8 573.56	1 686.02	
叶根挥舞弯矩功率谱密度/(kN·m <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	PI_IPC			83.97
	SMO_IPC			33.84
机组输出功率/MW	PI_IPC	4.500 6	0.142 4	
	SMO_IPC	4.500 5	0.130 5	

综上所述,基于单纯形法的独立变桨控制策略在抑制机组叶根挥舞弯矩方面具有更好的控制效果,机组输出功率更加稳定。

基于单纯形法的独立变桨控制求解相对耗时较长,但高性能控制器能保证控制系统的求解速度,并在有效时间内将控制指令传达。由于控制系统是一个需要反复论证的复杂系统,独立变桨控制在实际运用之前还需要进一步的实验验证。

## 5 结 语

本文分析了风切变以及塔影效应下风电机组叶根挥舞弯矩的波动特性,以 4.5 MW 风电机组模型为例,将单纯形法应用于风电机组独立变桨控制系统,用于叶根挥舞弯矩卸载控制。经过仿真运行数据验证得出,相较于传统 PI 控制的独立变桨控制方法,基于单纯形法的独立变桨控制方法能够有效减缓叶根挥舞弯矩 11.3% 及其 1P 谱密度分量 59.6%,且功率标准差降低了 8.4%,机组输出功率更加稳定。虽然实际运行的风电机组大多采用集中变桨控制,但随着机组的大型化快速发展,独立变桨控制策略将是必然的发展趋势。论文研究结果为超长叶片大型风电机组的卸载提供了新的技术途径。

### [参 考 文 献]

- [1] 龚宇琴. 风电机组独立变桨控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014: 1.  
GONG Yuqin. Research on individual pitch control strategy of wind turbine[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 1.
- [2] 高峰, 郭鹏. 基于粒子群优化的无载荷传感器风电机组独立变桨距控制[J]. 动力工程学报, 2014, 34(10): 784-789.  
GAO Feng, GUO Peng. PSO-based individual pitch control for wind turbines without load sensor[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(10): 784-789.
- [3] 王欣, 陈金林, 秦斌, 等. 基于 BP-PID 的风电机组独立变桨距控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(11): 48-52.  
WANG Xin, CHEN Jinlin, QIN Bin, et al. Research on individual pitch control of wind turbine based on BP-PID[J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 48-52.
- [4] 姚兴佳, 马佳, 郭庆鼎. 基于模糊控制的风电机组独立变桨距控制[J]. 可再生能源, 2011, 29(6): 34-38.  
YAO Xingjia, MA Jia, GUO Qingding. Individual pitch control of wind turbine based on fuzzy control[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(6): 34-38.
- [5] 闫学勤, 王维庆, 王海云. 基于 IQPI-R 的风力机独立

- 变桨距控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 229-235.  
YAN Xueqin, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Research on individual pitch control strategy of wind turbines based on IQPI-R[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(10): 229-235.
- [6] LI J S, WANG S X. Dual multivariable model-free adaptive individual pitch control for load reduction in wind turbines with actuator faults[J]. Renewable Energy, 2021, 174: 293-304.
- [7] TANG S Z, TIAN D, WU X X, et al. Wind turbine load reduction based on 2DoF robust individual pitch control[J]. Renewable Energy, 2022, 183: 28-40.
- [8] AHMED A L, MAHMOUD E. Model predictive individual pitch control using Laguerre filter for load mitigation in wind turbine[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2020, 11(8): 401-406.
- [9] 田德, 方建驹, 刘枫, 等. 大型风电机组模型预测独立变桨控制器设计[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 461-467.  
TIAN De, FANG Jianju, LIU Feng, et al. Design of model predictive individual pitch controller for large-scale wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(4): 461-467.
- [10] DOLAN D S L, LEHN P W. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 717-724.
- [11] 周峰. 基于动力学耦合的风电机组载荷控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.  
ZHOU Feng. Wind turbine load control based on dynamic coupling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [12] 潘庭龙, 马忠鑫, 卢恩超, 等. 风力发电系统独立变桨距载荷优化控制研究[J]. 控制工程, 2014, 21(2): 219-222.  
PAN Tinglong, MA Zhongxin, LU Enchao, et al. Research on individual pitch control of wind power generation system for load reduction[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(2): 219-222.
- [13] 马忠鑫, 潘庭龙. 风电系统独立变桨距控制综述[J]. 微特电机, 2011, 39(12): 61-63.  
MA Zhongxin, PAN Tinglong. Overview for individual pitch control of wind power generation system[J]. Small & Special Electrical Machines, 2011, 39(12): 61-63.
- [14] 洪博, 董泽. PID 参数优化方法对优化效果的影响研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 391-394.  
HONG Bo, DONG Ze. Study of an effect of PID parameter optimization methods on optimization effect[J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 391-394.
- [15] 刘河生. 基于自适应神经模糊推理系统的风电机组塔架振动控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.  
LIU Hesheng. Research on vibration control of tower of wind turbine based on adaptive neural fuzzy inference system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.

(责任编辑 刘永强)