

# 大型风电机组变桨距 ABC-PID 控制研究

苑晨阳<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 陈健云<sup>1,2</sup>, 徐 强<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部, 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

**摘 要:** 基于人工蜂群(ABC)算法对大型风电机组的变桨距控制器参数进行优化研究(ABC-PID)。将待优化的 PID 控制器参数看作蜜源,通过风轮转速误差和超调惩罚项设计适应度函数,利用蜂群觅食行为智能搜索出最优参数组合。运用 FAST 与 Matlab/Simulink 联合仿真,结果表明:与 PI 控制相比,ABC-PID 控制能够有效降低输出功率和风轮转速的波动,可提高恒功率控制精度,并能同时减少传动链疲劳荷载和机组结构反应,增加风电机组的使用寿命。

**关键词:** 风电机组; 智能控制; 桨距角控制; 人工蜂群(ABC)算法; 联合仿真

**中图分类号:** TK8

**文献标识码:** A

## 0 引 言

对于大型风电机组,当风速超过额定风速时,通常采用 PI 变桨距控制调整叶片桨距角来实现恒功率控制<sup>[1]</sup>。但大型风电机组转动惯量大<sup>[2]</sup>,加上风速的不可预期和随机波动等特点,如果变桨距控制器参数选择不当,会导致输出功率产生较大的波动,对电网造成不良影响<sup>[3,4]</sup>。因此对变桨距控制器参数优化研究显得尤为重要。

随着人工智能技术的发展,在风电机组变桨距控制领域得到广泛应用。文献[5,6]将径向基函数(RBF)神经网络引入到风电机组变桨距控制中;文献[7,8]提出基于 BP 神经网络的变桨距控制方法;文献[9~11]运用模糊控制算法与变桨距控制结合实现风电机组的恒功率控制。这些智能控制方法在一定程度上能够改善传统变桨距控制,但是要求对控制规律和被控对象有较为丰富的先验知识,具有一定的局限性。人工蜂群(ABC)算法是 Karaboga<sup>[12]</sup>提出的仿生智能优化算法,具有不易陷入局部最优、易收敛、鲁棒性强等优点<sup>[13,14]</sup>。

基于以上分析,本文提出一种基于 ABC 算法的变桨距优化控制方法(ABC-PID)。通过风轮转速误差和超调惩罚项设计适应度函数,智能搜索出最优

参数组合。运用 FAST<sup>[15]</sup>与 Matlab/Simulink 联合仿真,该方法可提高控制器性能,有效地抑制了发电机转速和输出功率的波动,同时可减小风电机组关键部位的疲劳荷载。

## 1 建立风力发电机组模型

美国国家可再生能源实验室(NREL)开发的 FAST 软件,能够与 Matlab/Simulink 结合,进行联合仿真<sup>[15]</sup>。模型结构组成如图 1 所示。

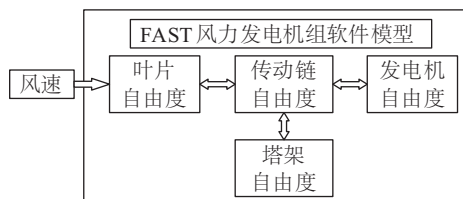


图1 FAST模型结构组成<sup>[16]</sup>

Fig. 1 FAST model structure<sup>[16]</sup>

对应的非线性气动运动方程<sup>[15]</sup>为:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}, \mathbf{u}, t) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}, \mathbf{u}_d, t) = 0 \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{M}$  ——质量矩阵;  $\mathbf{f}$  ——非线性力函数向量;  $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$  ——自由度的位移、速度和加速度向量;  $\mathbf{u}$  ——控制输入向量;  $\mathbf{u}_d$  ——风输入扰动向量;  $t$  ——时间。

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(51179026); 地震行业科研专项(201508005); 辽宁省重点实验室基金(LZ2015022)

通信作者: 陈健云(1968—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源工程结构方面的研究。eerd001@dlut.edu.cn

## 2 ABC-PID控制器设计

本文通过ABC算法与变桨距控制器结合,模仿蜂群觅食行为,智能搜索出最优控制器参数组合,使变桨距控制能够更好地抑制输出功率的波动。整个控制系统结构如图2所示。图中, $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为比例增益、积分增益、微分增益, $w_g$ 、 $w_{gref}$ 分别为发电机转速和参考转速。

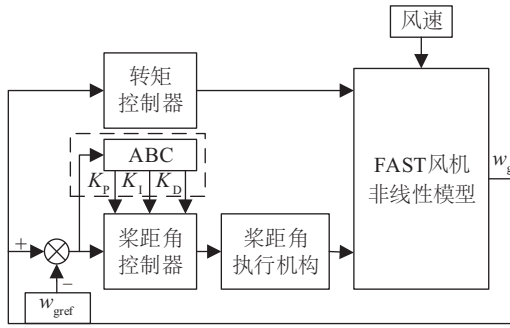


图2 ABC-PID变桨距控制结构

Fig. 2 Diagram of ABC-PID pitch controller

### 2.1 变桨距控制器

假设传动轴为刚性轴,则风轮及传动轴的动力学方程为:

$$\begin{aligned} T_r - N_g T_g &= (J_r + N_g^2 J_g) \frac{d}{dt} (w_{r0} + \Delta w_r) \\ &= (J_r + N_g^2 J_g) \Delta \dot{w}_r \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $T_r$ ——气动转矩; $N_g$ ——齿轮箱传动比; $T_g$ ——发电机转矩; $J_r$ ——风轮的转动惯量; $J_g$ ——发电机的转动惯量; $w_{r0}$ ——风轮额定转速; $\Delta w_r$ ——风轮转速关于额定转速的扰动; $\Delta \dot{w}_r$ ——风轮的角加速度。

对发电机转矩和气动转矩进行1阶泰勒展开:

$$T_g = \frac{P_0}{N_g w_r} \approx \frac{P_0}{N_g w_{r0}} - \frac{P_0}{N_g w_{r0}^2} \Delta w_r \quad (3)$$

$$T_r = \frac{P(\beta, w_{r0})}{N_g w_{r0}} \approx \frac{P_0}{w_{r0}} + \frac{1}{w_{r0}} \left( \frac{\partial P}{\partial \beta} \right) \Delta \beta \quad (4)$$

式中, $P_0$ ——额定输出功率; $P(\beta, w_{r0})$ ——机械功率,其中 $\beta$ 为桨距角; $w_{r0}$ ——发电机额定转速; $\Delta \beta$ ——桨距角关于工作点的扰动。

由此可建立桨距角扰动与风轮转速扰动的控制关系,运用PID控制:

$$\Delta \beta = K_p N_g \Delta w_r + K_i \int_0^t N_g \Delta w_r dt + K_d N_g \Delta \dot{w}_r \quad (5)$$

设 $\dot{\varphi} = \Delta w_r$ ,式(5)结合式(2)~式(4)可得式(6):

$$\begin{aligned} & \left[ I_{Drive} + \frac{1}{w_{r0}} \left( -\frac{\partial P}{\partial \beta} \right) N_g K_d \right] \ddot{\varphi} + \\ & \left[ \frac{1}{w_{r0}} \left( -\frac{\partial P}{\partial \beta} \right) N_g K_p - \frac{P_0}{w_{r0}^2} \right] \dot{\varphi} + \left[ \frac{1}{w_{r0}} \left( -\frac{\partial P}{\partial \beta} \right) N_g K_i \right] \varphi = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial P}{\partial \beta}$ ——桨距角灵敏度; $I_{Drive}$ ——传动系统的惯性矩; $\varphi$ ——等效参数。

由式(6)可得出此2阶系统的频率 $\omega_\varphi$ 和阻尼比 $\zeta_\varphi$ :

$$\begin{cases} \omega_\varphi = \sqrt{\frac{K_\varphi}{M_\varphi}} \\ \zeta_\varphi = \frac{C_\varphi}{2\sqrt{K_\varphi M_\varphi}} = \frac{C_\varphi}{2M_\varphi \omega_\varphi} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $M_\varphi$ 、 $K_\varphi$ 、 $C_\varphi$ ——等效质量、等效刚度、等效阻尼。

对于桨距角控制器设计,Hansen等<sup>[17]</sup>建议忽略负阻尼和微分增益,分别取 $\omega_\varphi = 0.6 \text{ rad/s}$ , $\zeta_\varphi = 0.6 \sim 0.7$ ,则控制器参数如式(8)所示:

$$\begin{cases} K_p = \frac{2I_{Drive} w_{r0} \zeta_\varphi \omega_\varphi}{N_g \left( -\frac{\partial P}{\partial \beta} \right)} \\ K_i = \frac{I_{Drive} w_{r0} \omega_\varphi^2}{N_g \left( -\frac{\partial P}{\partial \beta} \right)} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\omega_\varphi$ ——等效系统基频。

通过式(8)计算的PI增益是在桨距角为 $0^\circ$ 条件下得到的。由于在风速高于额定风速时,桨距角灵敏度变化范围很大,所以需要考虑桨距角灵敏度对PI增益的影响。由文献[18]可知,桨距角灵敏度对于桨距角近似呈直线关系,如式(9)所示,其中桨距角敏感系数 $\beta_k$ 对应的关系如式(10)所示:

$$\frac{\partial P}{\partial \beta} = \left[ \frac{\frac{\partial P}{\partial \beta}(\beta=0)}{\beta_k} \right] \beta + \left[ \frac{\partial P}{\partial \beta}(\beta=0) \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \beta}(\beta=\beta_k) = 2 \left[ \frac{\partial P}{\partial \beta}(\beta=0) \right] \quad (10)$$

这样,得出考虑桨距角灵敏度之后PI增益如式(11)

所示:

$$\begin{cases} K_p(\beta) = K_p(0)GK(\beta) \\ K_i(\beta) = K_i(0)GK(\beta) \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $GK(\beta)$  ——无量纲增益校正因子, 表达式为  $GK(\beta) = \frac{1}{1 + \beta/\beta_k}$ 。

本文研究时, 同样考虑桨距角灵敏度对控制器增益的影响, 但最优控制器参数通过 ABC 算法在合理取值范围内搜索得出。其中, 变桨机构变桨速率范围为  $(-8 \sim 8)^\circ/\text{s}$ , 变桨范围  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

## 2.2 人工蜂群算法

ABC 算法是模拟蜜蜂觅食行为的一种智能优化算法, 包含蜜源、雇佣蜂和非雇佣蜂 3 个主要部分。蜜源为所求问题的可行解空间, 用适应度值表示解的优劣, 适应度值越大蜜源质量越好。解的数量 ( $N$ ) 等于雇佣蜂的数量, 蜜蜂总数为  $2N$ 。可以通过随机方法生成包含  $N$  个解的初始蜜源  $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$ , 待优化问题参数有  $D$  个, 则生成的每个解是一个  $D$  维向量  $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ , 最大循环次数为  $Cyc$ 。

初始化蜜源:

$$x_{ij} = L_j + \text{rand}(0, 1)(U_j - L_j) \quad (12)$$

式中,  $x$  ——蜜源;  $j$  ——优化参数分量,  $j = 1, 2, \dots, D$ ;  $U_j, L_j$  ——第  $j$  个参数取值的上限和下限。

然后, 对计算蜜源的适应度值 ( $f_i$ ), 确定初始最优参数。此时蜂群进入觅食循环过程, 雇佣蜂对蜜源按照式 (13) 进行邻域搜索:

$$x_{ij}' = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (13)$$

式中,  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $j$  和  $k$  都随机产生, 且  $k \neq i$ ;  $\varphi_{ij}$  ——  $[-1, 1]$  的随机数。

再计算其适应度值, 采用贪婪选择法, 选出适应度较高的蜜源。完成搜索之后, 把蜜源信息递给跟随蜂。跟随蜂按照概率进行选择蜜源, 蜜源被选择的概率  $p_i$  如式 (14) 所示:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (14)$$

跟随蜂确定蜜源之后, 按照式 (13) 进行邻域搜索, 并计算适应度值, 采用贪懒选择法, 选出适应度较高的蜜源, 可得出当前最优参数。

当搜索次数达到一定的阈值  $Lim$  仍未找到更

优解, 则放弃该蜜源, 这时雇佣蜂就变成侦查蜂, 同时应更新该雇佣蜂对应的蜜源:

$$x_{ij} = x_{\min,j} + \text{rand}(0, 1)(x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (15)$$

式中,  $x_{\min,j}$  和  $x_{\max,j}$  ——目前得到的第  $j$  维上的最小值和最大值。

按照这样的过程进行搜索, 当循环次数达到最大次数  $Cyc$  时, 输出最优参数。

## 2.3 适应度函数确定

通过适应度函数将 ABC 算法与 PID 控制器结合起来。将  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的每参数组合看成一个蜜源, 将这 3 个参数的合理取值区间看成蜂群的搜索范围。针对变桨距控制器, 评价参数是否最优依据在该参数下风轮转速响应情况来确定。本文选取时间乘以误差绝对值积分 ( $ITAE$ ) 和超调惩罚项作为目标函数:

$$f_{\text{obj}} = a \int_0^\infty |e(t)| dt + b R_{\text{over}} \quad (16)$$

式中,  $f_{\text{obj}}$  ——目标函数;  $a$  —— $ITAE$  权值系数;  $e(t)$  ——风轮转速误差;  $b$  ——超调量权值系数;  $R_{\text{over}}$  ——超调量。

优化参数的目的是使目标函数取得最小值, 但 ABC 算法在搜索时总会选择更大的适应度值, 因此取目标函数的倒数作为适应度函数:

$$f(x) = \frac{1}{f_{\text{obj}}} = \frac{1}{a \int_0^\infty |e(t)| dt + b R_{\text{over}}} \quad (17)$$

## 2.4 算法实现流程

运用 ABC 算法具体步骤如下:

- 1) 确定蜜蜂数量  $2N$ , 搜索阈值  $Lim$ , 最大循环次数  $Cyc$ , 权值系数  $a$  和  $b$ , 设定  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的取值范围, 通过式 (12) 初始化蜜源;
- 2) 计算适应度值, 确定初始最优解;
- 3) 雇佣蜂按照式 (13) 进行邻域搜索, 并计算适应度值, 运用贪婪选择法选出较好解;
- 4) 按照式 (14) 计算得到的解被选择的概率;
- 5) 跟随蜂根据概率选择蜜源, 成为雇佣蜂, 并利用式 (13) 进行邻域搜索和计算适应度值, 运用贪婪选择法选出较好解;
- 6) 如果雇佣蜂搜索次数达到阈值  $Lim$  仍未搜索到适应度更高的解, 则放弃该蜜源, 雇佣蜂转变为侦查蜂, 同时按照式 (15) 更新蜜源;
- 7) 记录当前最优解和对应适应度值, 转到第 3) 步进入下一个循环, 直到最大循环次数  $Cyc$ ;

8)输出最优解。

### 3 仿真结果分析

本文利用 FAST 与 Matlab/Simulink 联合仿真。在 Simulink 中设计控制器,通过 Matlab 编程实现 ABC-PID 控制。选用的 5 MW NREL 风电机组特性参数<sup>[18]</sup>如表 1 所示。

表1 5 MW NREL 风电机组特性参数	
Table 1 Properties of 5 MW NREL wind turbine	
类型	水平轴风力发电机
额定功率/MW	5
轮转结构	3叶片,上风向
控制系统	变速变桨距控制
切入、额定、切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3、11.4、25
切入、额定风轮转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	6.9、12.1
齿轮箱传动比	97

对于 ABC 算法,设定蜜蜂数量为 100,则雇佣蜂数量为 50,蜜源数量为 50,  $Lim$  为 50,  $D$  为 3,  $Cyc$  为 50,  $a$  和  $b$  分别为 5 和 1,  $K_p$  取值范围为  $[0.001, 1]$ ,  $K_i$  取值范围为  $[0.001, 0.3]$ ,  $K_d$  取值范围为  $[0.0001, 0.2]$ 。在额定转速情况下,给定 20 m/s 的风速进行动态仿真,经过 50 次循环迭代之后,ABC 算法收敛并得到  $K_p=0.628102$ ,  $K_i=0.203961$ ,  $K_d=0.199701$ 。ABC 进化曲线如图 3 所示,可看出人工蜂群算法能够很快收敛。

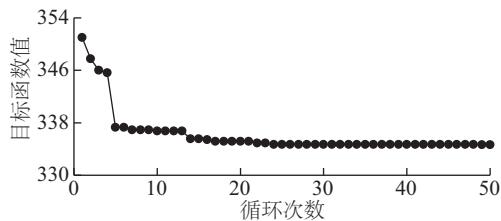


图3 ABC进化曲线  
Fig. 3 Evaluation curve of ABC

选取 10 min 内平均风速为 20 m/s 的风速时程进行分析(如图 4 所示),并与 Jonkman 等<sup>[18]</sup>提出的变增益 PI 控制进行对比。

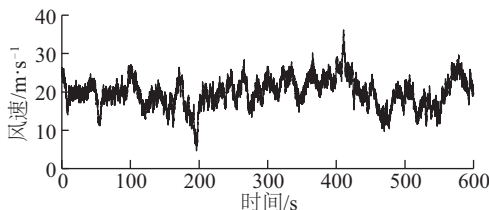


图4 风速时程  
Fig. 4 Wind velocity time histories

选取风轮转速( $RS$ )、输出功率( $GP$ )、发电机转矩( $GT$ )、塔架顶部前后位移( $FA$ )和塔架底部弯矩( $MY$ )进行分析,如图 5 所示。从图 5 可看出 ABC-PID 控制效果明显优于 PI 控制,使风轮转速、发电机转矩和输出功率波动性降低,同时在一定程度上抑制了塔架顶部位移和塔架底部弯矩的波动。

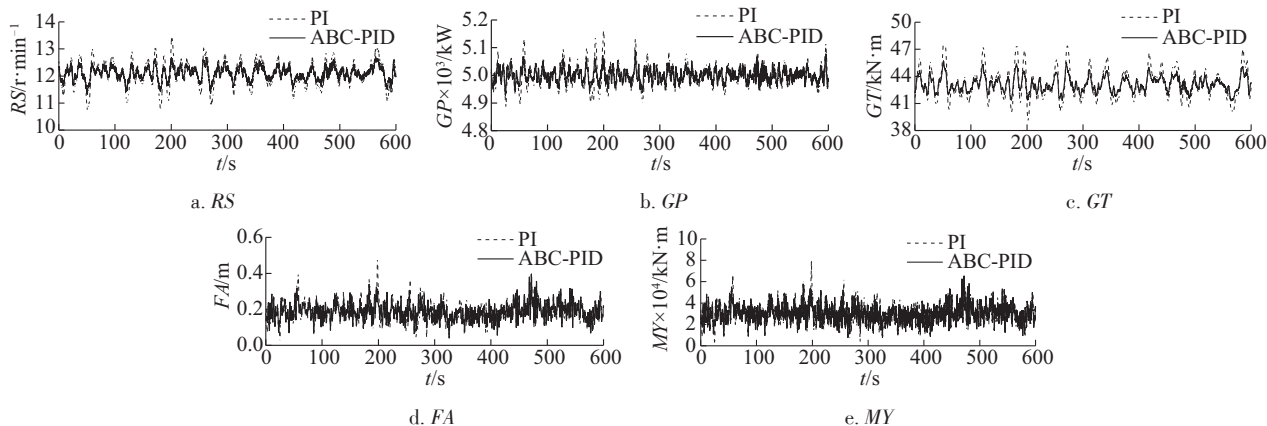


图5 PI与ABC-PID结果对比  
Fig. 5 Comparison of results between PI and ABC-PID

概率密度函数( $PDF$ )能够清晰地反映出数据的变化情况。ABC-PID 控制与 PI 控制仿真结果的  $PDF$  如图 6 所示。从图 6 可看出,各参数的数据分

布近似呈正态分布,与 PI 控制方法相比,本文提出的 ABC-PID 控制仿真结果离散性更小、更加稳定,其中  $RS$ 、 $GP$ 、 $GT$  这 3 个参数尤为明显。



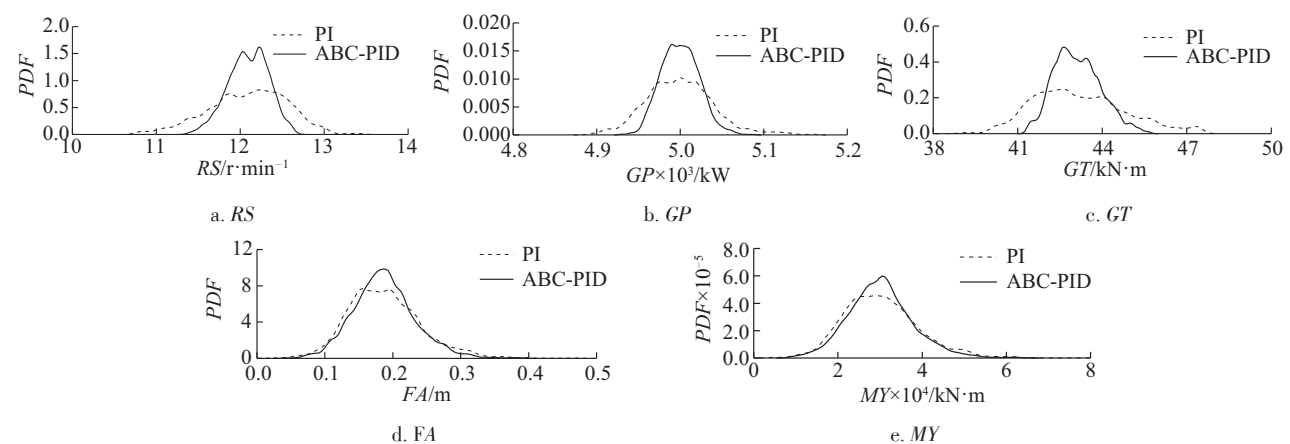


图6 PI与ABC-PID概率密度函数(PDF)对比  
Fig. 6 Comparison of PDF between PI and ABC-PID

为进一步分析 ABC-PID 控制效果,分析以上 5 个参数对应的平均值、标准差和最大值,同时分析 68%、95%、99%这 3 种概率所对应的区间范围(均值±指定倍数的标准差),如表 2~表 4 所示。

表 2 PI和ABC-PID结果的平均值和理论最优值			
Table 2 Mean of results for PI and ABC-PID and theoretical optimal values			
参数	PI	ABC-PID	理论最优值
$RS/r \cdot \min^{-1}$	12.09	12.10	12.10
$GP/kW$	4999.53	5000.00	5000.00
$GT/kNm$	43.17	43.12	43.10
$FA/m$	0.19	0.19	0.19
$MY/kNm$	30278.08	30184.06	30267.61

表 3 PI和ABC-PID结果的标准差和最大值				
Table 3 Standard deviation and maximum of results for PI and ABC-PID				
参数	PI	ABC-PID	优于/%	
标准差	$RS/r \cdot \min^{-1}$	0.47	0.24	48.94
	$GP/kW$	40.43	22.77	43.68
	$GT/kN \cdot m$	1.64	0.83	49.39
	$FA/m$	0.06	0.05	16.67
	$MY/kN \cdot m$	90797.15	77453.16	14.70
最大值	$RS/r \cdot \min^{-1}$	13.43	12.70	5.44
	$GP/kW$	5160.92	5088.74	1.40
	$GT/kN \cdot m$	47.40	45.70	3.59
	$FA/m$	0.48	0.40	16.67
	$MY/kN \cdot m$	80402.80	65282.06	18.81

从表 3 可看出,ABC-PID 控制结果的标准差和最大值均优于 PI 控制,其中发电机转矩对应的标准差优于 PI 控制接近 50%,塔架底部弯矩

对应的最大值优于 PI 控制接近 20%。从表 4 可看出,在 3 种不同概率下,ABC-PID 控制结果较 PI 控制均具有更小的区间范围,表明 ABC-PID 控制方法使变桨距控制器性能得到明显的提升。表 2 给出了理论最优值,在表 3 和表 4 中求出了 ABC-PID 控制较 PI 控制的优于百分比。从表 2 可看出 ABC-PID 控制结果的平均值与 PI 控制非常接近,并且与理论最优值几乎一致,这说明 2 种控制器都达到了恒功率控制的目的。

表 4 PI和ABC-PID结果不同概率下的区间范围				
Table 4 Interval range of results under different probability for PI and ABC-PID				
概率/%	参数	PI	ABC-PID	优于/%
68	$RS/r \cdot \min^{-1}$	0.95	0.49	48.42
	$GP/kW$	77.62	46.46	40.14
	$GT/kN \cdot m$	3.35	1.71	48.96
	$FA/m$	0.10	0.08	20.00
	$MY/kN \cdot m$	17251.46	14716.10	14.70
95	$RS/r \cdot \min^{-1}$	1.83	0.94	48.63
	$GP/kW$	160.09	88.81	44.52
	$GT/kN \cdot m$	6.36	3.20	49.69
	$FA/m$	0.22	0.18	18.18
	$MY/kN \cdot m$	35955.67	30671.45	14.70
99	$RS/r \cdot \min^{-1}$	2.48	1.20	51.61
	$GP/kW$	242.56	120.69	50.24
	$GT/kN \cdot m$	8.36	4.21	49.64
	$FA/m$	0.33	0.26	21.21
	$MY/kN \cdot m$	54478.29	43373.77	20.38

以上分析结果表明,与 Jonkman<sup>[18]</sup>提出的变增益 PI 控制相比,本文提出的基于人工蜂群算法的 ABC-PID 控制方法对与大型风电机组能够更有效地进行恒功率控制,并且降低了关键部位的疲劳荷载,在一定程度上增加了风电机组的使用寿命。

## 4 结 论

本文针对大型风力发电机组变桨距控制器参数对发电机输出功率稳定性有很大影响这一特点,提出了一种基于人工蜂群算法的变桨距优化控制方法(ABC-PID)。该方法将待优化的控制器参数看作蜜源,运用风轮转速误差和超调惩罚项设计适应度函数,通过 ABC 算法智能搜索出最优参数。仿真结果表明,在风速高于额定风速时,该方法能够有效抑制输出功率的波动,并同时可增加风电机组的寿命。

### [参考文献]

- [1] Boukhezzer B, Siguerdidjane H. Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(12): 1357—1368.
- [2] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等.变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制[J].*中国电机工程学报*, 2008, 28(11): 133—138.
- [2] Zhao Yongxiang, Xia Changliang, Song Zhanfeng, et al. Nonlinear PID rotating speed control of variable speed constant frequency wind turbine system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(11): 133—138.
- [3] 廖 勇,何金波,姚 骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].*中国电机工程学报*, 2009, 29(18): 71—77.
- [3] Liao Yong, He Jinbo, Yao Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(18): 71—77.
- [4] 何玉林,罗 敏,谢双义,等.风力发电机组优化变桨距控制研究[J].*中国电力*, 2013, 46(3): 19—23.
- [4] He Yulin, Luo Min, Xie Shuangyi, et al. Optimum pitch control of wind turbines[J]. *Electric Power*, 2013, 46(3): 19—23.
- [5] 王 哲,田艳丰,陈 雷,等.基于RBF神经网络的桨距角控制策略[J].*太阳能学报*, 2011, 32(5): 623—626.
- [5] Wang Zhe, Tian Yanfeng, Chen Lei, et al. Pitch angle control strategy based on RBF neural network[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011, 32(5): 623—626.
- [6] Yilmaz A S, Özer Z. Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(6): 9767—9775.
- [7] 邢作霞,郑琼林,姚兴佳,等.基于BP神经网络的PID变桨距风电机组控制[J].*沈阳工业大学学报*, 2006, 28(6): 681—686.
- [7] Xing Zuoxia, Zheng Qionglin, Yao Xingjia, et al. PID control in adjustable-pitch wind turbine system based on BP neural network[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2006, 28(6): 681—686.
- [8] 杨晓红,葛海涛.基于BP神经网络的风力发电机组变桨距控制仿真研究[J].*机械设计与制造*, 2010, (7): 184—186.
- [8] Yang Xiaohong, Ge Haitao. Simulation research on variable-pitch control of wind power generation based on BP neural network[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010, (7): 184—186.
- [9] 韦 微,陈 冉,陈家伟,等.基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J].*中国电机工程学报*, 2011, 31(17): 121—126.
- [9] Wei Zheng, Chen Ran, Chen Jiawei, et al. Wind turbine-generator unit variable-speed pitch control based on judgment of power changes and fuzzy control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(17): 121—126.
- [10] Yu Huiqun, Gao Yang, Zhang Hao. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system[A]. 2014 IEEE International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)[C], Shanghai, China, 2014: 124—127.
- [11] Lakshmi K V, Srinivas P. Fuzzy adaptive PID control of pitch system in variable speed wind turbines[A]. 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), IEEE[C], Ghaziabad, India, 2014.
- [12] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Technical Report-tr06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [13] 蔡 超,周武能.基于人工蜂群PID的永磁同步电机调速系统[J].*电气传动*, 2015, 45(10): 47—50.

- [13] Cai Chao, Zhou Wuneng. Speed control system of PMSM based on artificial bee colony PID [J]. Electric Drive, 2015, 45(10): 47—50.
- [14] 张冬丽. 人工蜂群算法的改进及相关应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [14] Zhang Dongli. Improved artificial bee colony algorithm and its applications[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014
- [15] Jonkman J M, Buhl Jr. M L. FAST user's guide [R]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., Technical Report No. NREL/EL-500-38230, 2005.
- [16] 刘颖明, 朱江生, 姚兴佳, 等. 基于  $H_2/H_\infty$  混合优化的大型风电机组变桨距鲁棒控制技术研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(3): 714—719.
- [16] Liu Yingming, Zhu Jiangsheng, Yao Xingjia, et al. LMI-based  $H_2/H_\infty$  robust pitch control technology for wind turbine[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(3): 714—719.
- [17] Hansen M H, Hansen A, Larsen T J, et al. Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine [M/OL]. Risø National Laboratory, 2005.
- [18] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5- MW reference wind turbine for offshore system development[M/OL]. Golden, CO, National Renewable Energy Laboratory, 2009.

## RESEARCH ON ABC-PID PITCH CONTROL OF LARGE-SCALE WIND TURBINES

Yuan Chenyang<sup>1</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Chen Jianyun<sup>1,2</sup>, Xu Qiang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The parameters of pitch controller for large-scale wind turbines are optimized based on artificial bee colony (ABC) algorithm (ABC-PID). The parameters of PID controller to be optimized are regarded as the honey source. The fitness function is designed by the rotor speed error and overshoot penalty. The optimized parameter combination is searched by using the foraging behavior of the colony. The combined simulation between FAST and Matlab/Simulink is used. The simulation results show that compared with the traditional PI controller, the ABC-PID controller can effectively reduce the fluctuation of output power and rotor speed, which improves the precision of constant power control. At the same time, it can reduce the fatigue load of drive chain and structural response of wind turbine, which improves the service life of wind turbine system.

**Keywords:** wind turbines; intelligent control; pitch control; artificial bee colony (ABC) algorithm; co-simulation