

教与学优化算法在风力机变桨自抗扰控制中的应用*

田黄田, 谢源, 施铃丽, 刘浩
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘要: 随着风力机的发展越来越智能化,除了要求风力机的运行可靠性,还要求其有稳定的输出功率。为了使风力机变桨控制器在运行过程中具有优良的动态品质,提出了一种自抗扰控制(ADRC)的变桨距控制方案,但ADRC也存在参数多、整定难度大这一明显缺点。为此,将教与学算法应用到ADRC的整定过程中,实现了参数的自动整定。仿真结果验证了通过教与学算法自动整定ADRC参数的可行性,与传统PID控制器相比,整定后的ADRC能较好地满足风力机变桨距控制要求,有效维持了风力机输出功率的稳定性。

关键词: 风力发电; 变桨控制; 自抗扰控制; 教与学优化算法; 永磁同步电机

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0120-06

Application of Teaching-Learning Based Optimization Algorithm in Active Disturbance Rejection Control of Variable Pitch of Wind Turbines*

TIAN Huangtian, XIE Yuan, SHI Lingli, LIU Hao

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the more and more intelligent development of wind turbine, in addition to requiring the reliability of wind turbine operation, it was also required that the wind turbine should have a stable output power curve in different environments. In order to make the variable pitch controller of wind turbines have good dynamic performance during operation, a variable pitch control scheme of active disturbance rejection control (ADRC) was proposed. But the ADRC also had the obvious disadvantage that many parameters were difficult to set. Therefore, the teaching-learning based algorithm were applied to the ADRC tuning process, and the parameters were automatically set. The simulation results verified the feasibility of auto-setting ADRC parameters by teaching-learning based algorithm. Compared with traditional PID controller, the set ADRC could better meet the requirements of variable pitch control of wind turbine and effectively maintain the stability of wind turbine output power.

Key words: wind power generation; variable pitch control; active disturbance rejection control (ADRC); teaching-learning based optimization algorithm; permanent magnet synchronous motor (PMSM)

0 引言

目前在风力机变桨领域中传统PID控制器仍占主导地位,其针对精确的线性系统控制效果显

著,广泛应用于当前的工业领域^[1]。风力机是一个大惯性、强耦合的非线性系统,风速的波动会导致风力机的功率产生变化而无法稳定于额定功率处。针对传统的PID控制在扰动过大时控制效果

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61374136;11304200);上海市科学技术委员会科研项目(17DZ1201200)

作者简介: 田黄田(1987—),男,硕士研究生,研究方向为风力发电变桨技术。

谢源(1978—),男,博士,副教授,研究方向为风力发电。

施铃丽(1992—),女,硕士研究生,研究方向为电机控制。

刘浩(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制。

不理想的问题,模糊自适应 PID、神经网络、 H_∞ 等控制方法相继引入,但都具有各自的局限性^[2-10]。

自抗扰控制(ADRC)是最新提出的一种新型非线性控制方法,其不依赖于被控系统精确的模型,且动态性能良好、抗扰动能力强,已成功应用于风电变桨领域^[11]。但由于其参数过多难以整定,实际应用难度较大。为此,粒子群、蜂群等算法相继被提出并对其进行参数整定,成功应用于双馈异步风力机变桨系统中^[12-15]。

为了进一步提高参数整定性能,有效克服收敛速度慢以及局部收敛等问题,本文利用教与学算法(TLBO)对 ADRC 进行参数整定,并在随机风的情况下应用于 2 MW 永磁同步风力发电机组变桨距控制系统中。通过仿真得出,该方法有着较为理想的抗干扰表现,在保持 ADRC 良好的抗扰控制特性的同时,解决了 ADRC 的参数整定问题,提高了实用性。

1 风力发电机组建模

风力发电机组是将风能转换为电能的装置。风力发电机组所能吸收的风能与空气动力学密切相关。依据叶素理论研究风力发电系统的电气特性,其简化的空气动力学模型为

$$\begin{cases} T_{\text{aero}} = \frac{\rho \pi R^3 v_w^2 C_p(\lambda, \theta)}{2\lambda} \\ \lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_w} \\ C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) \cdot e^{-12.5/\lambda_i} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{aero} ——风力机转矩;

ρ ——空气密度;

R ——风轮半径;

v_w ——风速;

C_p ——功率系数;

λ ——叶尖速比;

θ ——叶片桨距角;

ω ——风力机转速。

当实际风速高于额定风速时,控制系统将进行变桨调节,并动态地调节风力发电机的电磁转

矩,尽量使风力机的转速和系统的功率稳定在额定值附近。本文的主要研究目标是改善变桨控制器的动态抗扰能力,因此将电磁转矩设定为固定值。其动态方程为

$$J\dot{\omega} = T_{\text{aero}} - T_{\text{gen}} \quad (2)$$

式中: J ——总的风力机转动惯量;

T_{gen} ——风力机电磁转矩。

风力发电机组变桨系统主要通过变桨电机来实现,可以将其执行机构等效成如下的一阶惯性环节:

$$\theta = \frac{1}{\tau s + 1} \theta_r \quad (3)$$

式中: θ ——桨距角的实际值;

θ_r ——桨距角的设定值;

τ ——变桨执行机构的时间常数。

2 变桨距 ADRC 设计

2.1 ADRC 的结构及组成

ADRC 是来源于 PID 控制器的一种新型非线性控制器,是一种基于状态观测及扰动补偿的新型控制方法。

ADRC 的 3 个重要组成部分及其作用分别为:跟踪微分器(TD)利用广义的微分理论提取相关的微分信号,并安排合理的过渡过程;扩张状态观测器(ESO)用于估计内外部扰动并予以补偿;非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)的作用是部署非线性系统,并提供被控系统对应的控制信号。

ADRC 通过其非线性前馈补偿功能,来实现动态被控系统的线性化反馈,从而增强其降低内外部扰动影响的性能。

非线性不确定对象表示为

$$x^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu \quad (4)$$

式中: $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ ——未知函数;

x ——测量输入;

$w(t)$ ——未知扰动;

b ——控制系数;

u ——控制输入。

ADRC 结构如图 1 所示。

图 1 中,TD 可以按照被控系统的接受能力来给予恰当的过渡,且通过提取出广义的微分信号来避免因最初的误差过大而可能造成的超调。该方法解决了实际的工程应用中信号离散、误差信

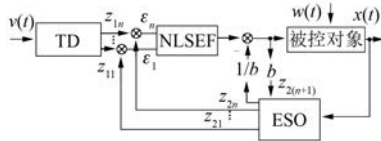


图1 ADRC 结构图

号不可微、微分信号敏感等现实问题。

ESO 将系统状态、建模问题和未知扰动作用都归结成系统总扰动, 并进行估计从而予以补偿。鉴于此, 在实际的应用当中, 无须建立精确的被控系统的数学模型, 并且其补偿功能能够进行无静差调节, 去除了传统 PID 控制器中对被控对象快速性和稳定性有负面影响的积分项。

NLSEF 通过配置系统非线性结构的策略来抑制被控对象的状态误差, 从而增强被控对象的动态控制性能。

ADRC 不依赖于被控对象的精确数学模型以及外部扰动的形式。如何整定出合适的参数, 将会直接影响 ADRC 的鲁棒性和动态适应性。其简化方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = -R_1 \text{sat}[z_{11} - v(t) + z_{12} \cdot |z_{12}| / (2R_1), \delta] \\ \varepsilon_0 = z_{21} - x \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{01} \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha_1, \delta) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{02} \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha_2, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{03} \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha_3, \delta) \\ \varepsilon_1 = z_{11} - z_{21} \\ \varepsilon_2 = z_{12} - z_{22} \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_{01}, \delta) + \beta_2 \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_{02}, \delta) \\ u = u_0 - z_{23} / b_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_1, \beta_{01}, \alpha_1, \beta_{02}, \alpha_2, \beta_{03}, \alpha_3, \beta_1, \alpha_{01}, \beta_2, \alpha_{02}, \delta$ ——ADRC 的参数;

b_0 ——控制输入的系数。

本文将非线性函数取:

$$\text{sat}(A, \delta) = \begin{cases} \text{sgn}(A), & |A| > \delta \\ A/\delta, & |A| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \varepsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

2.2 变桨距 ADRC 的设计

为设计风力机变桨 ADRC, 现从风力发电系

统恒功率运行状态中随机选取一个平衡点 A , 则其相应的参数分别为 $T_{\text{aero-0}}, w_0, \beta_0$, 将 A 作为参考点对式(1)进行泰勒级数展开^[10]:

$$T_{\text{aero}} = T_{\text{aero-0}} + \alpha \cdot \Delta\omega\xi + \Delta\beta + \gamma \cdot \Delta v_w + h \quad (8)$$

其中: $\alpha = \partial T_{\text{aero}} / \partial \omega |_A; \xi = \partial T_{\text{aero}} / \partial \beta |_A; \gamma = \partial T_{\text{aero}} / \partial v_w |_A; h$ 为展开高次项。

由式(2)和式(8)得:

$$J\Delta\dot{\omega} = \alpha\Delta\omega + \xi(\beta - \beta_0) + \gamma\Delta v_w + h \quad (9)$$

计及变桨距执行机构动态特性, 有:

$$\beta - \beta_0 = \beta_r \frac{1}{\tau s + 1} - \beta_0 = \frac{1}{\tau s + 1} \Delta\beta_r \quad (10)$$

因此, 式(9)可转化为

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{\tau\alpha - J}{J\tau} \Delta\omega + \frac{\alpha}{J\tau} \Delta\omega + \frac{\xi}{J\tau} \Delta\beta_r + \frac{\tau s + 1}{J\tau} (\gamma\Delta v_w + h) \quad (11)$$

式中: $\Delta\beta_r$ ——桨距角偏移给定值。

式(10)中与 $\Delta\beta_r$ 相对应的系数 b 会随着风力机变桨系统的工况连续发生变化, 难以得出其确定值。鉴于此, 取其估计值 b_0 , 并且将误差归到系统扰动。据式(1), b_0 取:

$$b_0 = \left. \frac{1}{J\tau} \frac{\partial T_{\text{aero}}}{\partial \beta} \right|_A \quad (12)$$

系统的扰动分量 d 表示为

$$d = \frac{\tau s + 1}{J\tau} (\gamma\Delta v_w + h) + (b - b_0) \Delta\beta_r \quad (13)$$

式(11)化为

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{\tau\alpha - J}{J\tau} \Delta\omega + \frac{\alpha}{J\tau} \Delta\omega + b_0 \Delta\beta_r + d \quad (14)$$

式(14)描述的变桨系统模型包含电气连接、能量转换和执行机构, 可以准确地体现变桨系统的动态控制性能。因此, 依据此设计的 ADRC 能较好地进行风力机变桨控制。现采用 Δw 为测量输入来创建对应的扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{01} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_1, \delta) \\ \dot{z}_{22} = z_{23} - \beta_{02} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_2, \delta) + b_0 \cdot \Delta\beta_r \\ \dot{z}_{23} = -\beta_{03} \text{fal}(z_{21} - \Delta\omega, \alpha_3, \delta) \end{cases} \quad (15)$$

式中: z_{21}, z_{22} ——变桨系统的状态变量;

z_{23} ——变桨系统的扰动。

鉴于 ADRC 可以补偿变桨系统建模中各种问

题带来的影响,故本文中对参考点 A 的随机选取并不会影响所设计的控制器实际控制效果。

ADRC 的控制目的是改善变桨控制效果、抑制风速的波动,因此给定的输入 Δw_{ref} 和 $\Delta \dot{w}_{ref}$ 都可以忽略。通过转速的反馈来算出状态误差,从而得出非线性控制律的控制量:

$$\begin{aligned} \Delta \beta_r &= \beta_1 \text{fal}(-z_{21}, \alpha_{01}, \delta) + \\ &\beta_2 \text{fal}(-z_{22}, \alpha_{02}, \delta) - z_{23}/b_0 \end{aligned} \quad (16)$$

3 教与学算法 ADRC 参数整定

ADRC 3 个组成部分分别具有各自的功能及控制参数,需要整定的参数比较多,目前其参数整定过程和效果很大程度上依赖于专家的经验,整定过程繁琐、耗时且具有较大不确定性。针对该问题,采用教与学算法对 ADRC 的参数进行整定,实现控制器参数的自动化整定。

本文使用的教与学优化算法 (TLBO) 是一种新的群智能优化算法,算法模拟教师和学生之间教学和学习的过程,并通过教师和学生以及学生和学生之间的相互学习,提高学生的学习成绩^[16]。基于 TLBO 的 ADRC 结构图如图 2 所示。

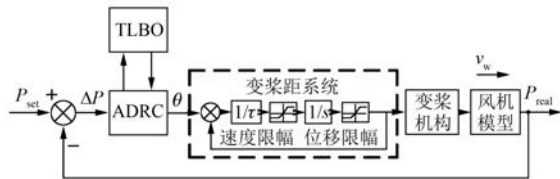


图 2 TLBO 的 ADRC 结构图

图 2 中, P_{set} 为设定功率, P_{real} 为实际功率, θ 为桨距角, v_w 为风速。

3.1 TLBO 原理

TLBO 算法的原理是通过种群智能寻优获得全局最优解。算法的种群即一个班级的学生,设计变量即学习科目,其适应度值即为学生成绩。定义教师为整个班级适应度值最高者。具体的定义如下。

设 $f(X)$ 为目标函数,优化问题: $z = \min_{X \in S} f(X)$ 。搜索空间 $S = \{X | x_i^l \leq x_i \leq x_i^u, i = 1, 2, \dots, D\}$, D 表示维空间的维数,搜索点 $X = (x_1, x_2, \dots, x_D)$, x_i^l 和 x_i^u 分别表示空间中各维的上、下界。设班级中学生的个数为 NP , 学生为班级集合中的一个元素,即 $X^j = (x_1^j, x_2^j, \dots, x_D^j) (j = 1, 2, \dots, NP)$, 此时

D 表示学习的科目数,教师用 X^t 表示,为学习成绩最高者。

算法可以通过两个阶段来表示:教学阶段及学习阶段。教学阶段即学生向教师学习,学习阶段即学生之间相互学习,两个阶段的目的是为了提提高学习成绩。

3.1.1 教学阶段

在教学阶段中,每个学生都要向教师学习,学习的途径是寻找教师 X^t 和学生 X^i 的平均值之间的差异性。采用的教学过程如下:

$$\text{Difference} = r_i \times \left[X^t - TF_i \times \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} X^i \right] \quad (17)$$

$$X_{new}^i = X_{old}^i + \text{Difference} \quad (18)$$

式中: r_i ——0~1 的随机数(模拟随机因素导致的差异);

X_{old}^i 和 X_{new}^i ——第 i 个学员学习前和学习后的值;

TF_i ——教学因子, $TF_i = \text{round}[1 + \text{rand}(0, 1)]$ 。

3.1.2 学习阶段

学生的学习过程除了向教师学习外,也可以向比他成绩更好的学生学习,比如小组讨论、课堂沟通等方式。对于一个学生 X^i , 随机选取另一个学生 $X^j (j = 1, 2, \dots, NP, i \neq j)$, 通过两者之间的差异采用如下方式进行学习。

当 $f(X^j) < f(X^i)$ 时,有:

$$X_{new}^i = X_{old}^i + r_i \times (X^j - X^i) \quad (19)$$

当 $f(X^j) > f(X^i)$ 时,有:

$$X_{new}^i = X_{old}^i + r_i \times (X^i - X^j) \quad (20)$$

3.2 ADRC 参数整定

本文中学生的学习科目为 ADRC 需要整定的参数,其中 ESO 需要整定的参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$, NLSEF 需要整定的参数 β_1, β_2 , 即科目数为 $D = 5$ 。由于学生的个数为 NP , 可用一个 $NP \times D$ 的矩阵 P 表示:

$$P(NP \times D) = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & x_3^1 & x_4^1 & x_5^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & x_3^2 & x_4^2 & x_5^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{NP} & x_2^{NP} & x_3^{NP} & x_4^{NP} & x_5^{NP} \end{bmatrix} \quad (21)$$

由于实际的控制系统存在着多样性, 实际应用中需要根据不同的情况设置各个参数的寻优范围。

在本文使用 TLBO 对 ADRC 参数开展搜索进化的过程中, 采用了最终的适应度值来评价解的优劣, 并将这一代的初始解作为下一代学习的依据产生更优的教师, 使得解的结果逐代向最优解进化。常用的适应度函数有积分绝对值误差、积分平方误差、积分时间平方误差、积分时间绝对值误差等。其中积分时间绝对值误差系统具有快速、平稳、超调量小的特点, 相对具有较好的系统性能, 因此本文采用积分时间绝对值误差作为最小目标函数, 即:

$$F = \int_0^{\infty} te(t) dt \quad (22)$$

TLBD ADRC 参数整定的步骤如下:

(1) 初始化班级。确定优化问题并初始化参数, 即学生人数 NP 、变量数 D 、迭代次数 G 及各变量上下限, 从而得到适应度函数 $f(X)$ 。

(2) 初始化班级矩阵 P 。根据步骤(1)设置的参数及 ADRC 需要整定的 5 个参数, 生成班级矩阵 P 。

(3) 教学阶段。通过计算班级中学生的成绩, 得到老师 X^i , 并同时计算出矩阵中每一列的平均值, 根据式(17)、式(18)计算得到差异值 Difference 和 X_{new}^i , 若 X_{new}^i 适应度值增大则接受, 否则拒绝。

(4) 学习阶段。任意选一个学生 X^i 和另一学生 $X^j = (x_1^j, x_2^j, \dots, x_D^j)$ ($j = 1, 2, \dots, NP$), 根据两者之间的差异及式(19)、式(20)进行他们之间的相互学习, 得到 X_{new}^i , 若 X_{new}^i 适应度值增大则接受, 否则拒绝。

(5) 终止条件。判断是否达到要求的精度, 满足则结束, 否则返回步骤(3)。

4 仿 真

通过 MATLAB/Simulink 平台搭建了风轮模型、永磁发电机模型、传动轴模型以及变桨执行机构模型。在搭建的数学模型基础上, 实现了基于 ADRC 的变桨控制仿真。其中, 永磁同步风力机参数如表 1 所示。

TLBO 相关参数分别设置为: $NP = 100$, $G = 100$, β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 β_1 、 β_2 的整定范围分别设置为

表 1 永磁同步风力机系统参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
风轮半径/m	45	发电机极对数	30
桨叶数	3	额定轴转矩/(kN·m)	940
风轮转动惯量/(kg·m ²)	411 185	发电机额定转速/(r·min ⁻¹)	9~22.5
电机转动惯量/(kg·m ²)	18 905.7	发电机最大转速/(r·min ⁻¹)	29
额定功率/kW	2 000	额定风速/(m·s ⁻¹)	11
定子电阻/ Ω	6.7	切入风速/(m·s ⁻¹)	3
d, q 轴电感/mH	2.7	切出风速/(m·s ⁻¹)	25
定子额定电压/V	660	空气密度/(kg·m ⁻³)	1.25

[0, 80]、[0, 1800]、[0, 4500]、[-21, 0]、[-10, 0]。利用本文设计的 TLBO 进行 ADRC 参数整定, 整定结果如表 2 所示。

表 2 TLBO ADRC 参数整定结果

阶段	参数名称	参数值
过渡过程	r	5
	h	0.001
	b_0	1
扩张状态观测器	β_{01}	71.5
	β_{02}	943.1
	β_{03}	1 538.5
	δ	0.5
非线性状态误差反馈控制律	β_1	-5.8
	β_2	-6.1
	α	0.5

令风力机在如图 3 所示的随机风作用下, 对传统 PID 控制器与 TLBO 自动整定的 ADRC 分别进行仿真。传统 PID 控制器及本文设计的 TLBO 整定后的控制器仿真结果如图 4、图 5 所示。

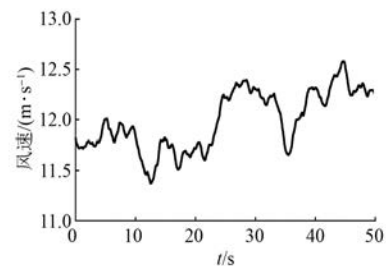


图 3 风速波形图

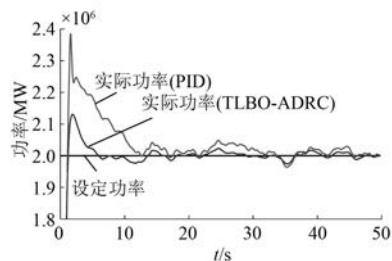


图4 PID控制器及自抗扰控制器功率响应

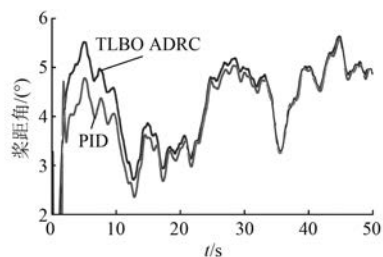


图5 PID控制器及ADRC桨距角响应

由仿真结果可以看出,通过 TLBO 整定出的 ADRC 参数选取合理,与传统 PID 控制器相比,在控制速度、精度、准确度及抗干扰能力等方面具有更优越的性能,且极大地减少了整定工作的难度及耗时,提高了 ADRC 的适用性及可实现性。

5 结 语

本文对风电变桨距系统及 ADRC 技术进行了详细介绍,设计了风电变桨距 ADRC,针对 ADRC 参数多且难以整定的问题,利用 TLBO 进行参数整定,通过与传统 PID 控制器仿真对比,验证了设计的 TLBO 能较好地完成 ADRC 参数整定工作,为 ADRC 的广泛应用提供了保障。

【参 考 文 献】

[1] LIU X L, WANG R, ZHANG X G, et al. Gain scheduling PD controller for variable pitch wind turbines [C] // Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012, 3: 2162.

- [2] GENG H, YANG G. Linear and nonlinear schemes applied to pitch control of wind turbines [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 406382.
- [3] 李潘, 陈林. 基于变增益的风力机变桨距控制研究 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (16) : 141.
- [4] 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.
- [5] 邢作霞, 肖泽亮, 王雅光, 等. 基于改进共轭梯度优化 BP 神经网络的风电机组变桨距控制 [J]. 可再生能源, 2014, 32 (6) : 798.
- [6] 胡文胜, 丁艳军. 新型风力发电机组变桨距控制算法研究 [J]. 电力电子研究, 2013, 47 (2) : 53.
- [7] 秦生升, 胡国文, 顾春雷, 等. 风力发电系统的恒功率非线性 H_{∞} 鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (5) : 617.
- [8] 金鹏飞, 谢源. 风速前馈与变论域模糊结合的变桨距控制 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45 (2) : 128.
- [9] 赵正黎. 兆瓦级永磁直驱风力发电机组变桨距控制策略研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [10] 罗佳宝. 基于模糊 PID 算法的风电机组变桨距控制器设计 [D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [11] 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.
- [12] 张金芳, 姚恩利, 许曼. 风力发电机组变桨距线性自抗扰控制 [J]. 华东电力, 2013, 41 (2) : 371.
- [13] 孙凌燕. 自抗扰控制技术在风电变桨距系统中的应用研究 [D]. 保定: 河北大学, 2015.
- [14] 戴媛媛. 风力机变桨距自抗扰控制技术的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [15] 吕明月. 风力发电变桨距自抗扰控制技术研究及其参数整定 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [16] 何学明, 苗燕楠, 罗再磊. 基于教与学优化算法的 PID 控制器参数寻优 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (8) : 313.

收稿日期: 2018-09-17

携手节能减排 悠享生活空间
让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣