

风力发电机组的桨距角滑模变结构控制*

杨锡运¹, 刘欣然²

1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206

E-mail: yangxiyun916@sohu.com

2. 北京朗新明环保科技有限公司南京分公司, 南京 210032

E-mail: liukulv@126.com

摘要: 变桨距风机其桨距角控制性能直接影响功率调节的效果。针对变桨距风力发电机组的桨距角控制, 本文提出自适应模糊滑模控制策略。利用反馈线性化方法, 结合自适应策略的模糊控制方法, 设计滑模控制器, 在被控对象数学模型未知的情况下, 也可达到有效控制。仿真结果表明: 自适应模糊滑模控制系统运行平稳, 可有效的抑制风速扰动, 具有良好的稳态和动态特性。

关键词: 风电机组, 桨距角, 模糊, 滑模

A Sliding Mode Control Scheme for Pitch Angle in Variable-Pitch Wind Turbine*

YANG Xiyun¹, LIU Xinran²

1. School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, P. R. China

E-mail: yangxiyun916@sohu.com

2. Beijing Lucency Enviro-tech. Co., Ltd. Nanjing Branch, Nanjing 210032, P. R. China

E-mail: liukulv@126.com

Abstract: The control performance of pitch angle can heavily influences the quality of power regulation for variable-speed adjustable-pitch wind turbine. A sliding mode control with adaptive fuzzy characteristic is proposed for pitch system. Using feedback linearization theory and combining adaptive fuzzy scheme, a sliding mode controller is designed, which can achieve control performance effectively with uncertain model. The simulation demonstrates that control system has high smoothness and can eliminate the wind speed disturbance. Adaptive fuzzy scheme guarantees good stable and dynamic behavior of system.

Key Words: Wind Turbine. Pitch Angle. Fuzzv. Sliding Mode Control

1 引言 (Introduction)

近些年来, 特别是20世纪90年代以后, 随着人们对优化输出功率的不断追求, 变桨距风力机成为风力发电机组的主要发展方向。变桨距风力发电机组的功率调节^[1]不完全依靠叶片的气动性能, 当功率在额定功率以下时, 控制器将叶片节距角置于0度角附近不作变化, 可认为等同于定桨距风力发电机组, 发电机的功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化。当功率超过额定功率时, 变桨距机构开始工作, 调整桨距角, 将发电机的输出功率限制在额定值附近, 从而达到风能的最有效捕捉, 比定桨距风力发电机组拥有更好的运行特性。

但是, 由于存在外界的强干扰和结构的复杂性等不利因素, 建立精确的变桨距风电机组的数学模型是十分困难的, 这就对控制器的特性提出很高要求。滑模控制器自问世以来, 由于其优良的抗扰动特性, 一

直受到广大学者的关注^[2-5]。本文利用反馈线性化方法设计一种滑模控制器, 采用模糊逼近及自适应控制方法, 在被控对象无法精确建立数学模型的情况下, 可以直接利用描述的模糊语言规则完成对给定输入的跟踪, 加速自适应进程, 同时减小跟踪误差。将这种自适应模糊控制器应用到变桨距风电机组的节距角控制策略中, 仿真结果表明: 此方法具有速度响应快、跟踪能力强、控制精度高、自适应能力优的特点。

2 自适应模糊滑模控制器(Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller)

2.1 输入/输出反馈线性化(Input/Output Feedback Linearization)

考虑单输入单输出 (SISO) 非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

*此项工作得到教育部重点项目资助, 项目批准号:109045
中央高校基本科研业务费专项资金资助, 项目批准号:09MG18

其中: $x \in R^n$ 是状态变量; f , g 和 h 是 R^n 上充分光滑的向量场; 且 $f(0) = 0$, $h(0) = 0$ 。

对 y 求导, 可得

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x)u = L_f h(x) + L_g h(x)u \quad (2)$$

式中, $L_f h(x): R^n \rightarrow R$ 和 $L_g h(x): R^n \rightarrow R$ 分别代表 h 对向量场 f 和 g 的李导数。

如果 $L_g h(x)$ 对于所有 $x \in U$ 都有界且不等于 0, 则通过以下状态反馈律

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

则 (2) 式变为线性系统

$$\dot{y} = v \quad (4)$$

设位置指令为 $y_d(t)$ 。取 v 为

$$v = \dot{y}_d - \alpha \cdot e$$

(5)

其中 $\alpha > 0$, $e = y - y_d$, 则式 (5) 可变为

$$\dot{e} + \alpha e = 0 \quad (6)$$

显然, 式 (6) 为误差动态方程, $e(t)$ 以指数形式趋近于 0, 如果 $e(0) = \dot{e}(0) = 0$, 则 $e(t)$ 在所有时间都为 0。

2.2 滑模控制器设计(Sliding Mode Controller Design)

对于 n 阶单输入单输出 (SISO) 非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u(t) \\ y = x \end{cases} \quad (7)$$

式中, $x = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T \in R^n$ 是系统的状态向量, $u \in R, y \in R$ 分别为系统的输入和输出。

位置指令为 x_d , 则跟踪误差向量为

$$\tilde{e} = x_d - x = [e \quad \dot{e} \quad \dots \quad e^{(n-1)}]^T \quad (8)$$

选取滑模面为

$$s(x, t) = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_{n-1} \quad 1] \tilde{e} \quad (9)$$

c_1, c_2, \dots, c_{n-1} 的取值满足多项式

$p^{n-1} + c_{n-1}p^{n-2} + \dots + c_2p + c_1$, 为 Hurwitz 稳定。

根据反馈线性化技术, 假定对象为二阶系统, 将滑模控制律设计为

$$u = \frac{v - f(x, t)}{g(x, t)} \quad (10)$$

$$v = \ddot{x}_d - c_1 \dot{e} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

但是在实际应用中, 由于外界的干扰和系统自身的复杂性, 被控对象的数学模型是很难精确建立的,

即式 (7) 中的 $f(x, t)$ 和 $g(x, t)$ 是未知的, 这给滑模控制器的应用带来困难。

2.3 自适应模糊滑模控制器设计(Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Design)

在 $f(x)$, $g(x)$ 未知的情况下, 利用高木-关野 (T-S) 模糊逻辑系统 $\hat{f}(x|\Theta_f)$, $\hat{g}(x|\Theta_g)$ 来逼近 $f(x)$, $g(x)$ 。

设模糊推理规则为

R^i : 如果 x_1 是 F_1^i 且 x_2 是 $F_2^i \dots$ 且 x_n 是 F_n^i , 则

$$y = B^i \quad (12)$$

采用单点模糊化、乘积推理和中心平均解模糊器, 则模糊系统的输出为

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^m y^j (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i))}{\sum_{j=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i))} \quad (13)$$

其中, $\mu_{F_i^j}(x_i)$ 为 x_i 的隶属函数。

引入向量 $\xi(x)$, 式 (13) 变为

$$y(x) = \Theta^T \xi(x) \quad (14)$$

其中 $\Theta = [y^1 \quad y^2 \quad \dots \quad y^m]^T$,

$$\xi(x) = [\xi^1(x) \quad \xi^2(x) \quad \dots \quad \xi^m(x)]^T。$$

$$\xi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^i}(x_i)}{\sum_{j=1}^m (\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^j}(x_i))} \quad (15)$$

设 $\hat{f}(x|\Theta_f)$, $\hat{g}(x|\Theta_g)$ 分别取形如 (14) 式的模糊逻辑系统, 即

$$\hat{f}(x|\Theta_f) = \Theta_f^T \xi(x), \quad \hat{g}(x|\Theta_g) = \Theta_g^T \xi(x) \quad (16)$$

用 $\hat{f}(x|\Theta_f)$, $\hat{g}(x|\Theta_g)$ 代替 $f(x)$, $g(x)$, 则控制律 (10) 变为

$$u = \frac{v - \hat{f}(x|\Theta_f)}{\hat{g}(x|\Theta_g)} \quad (17)$$

设计自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\Theta}_f = -r_1 s \xi(x) \\ \dot{\Theta}_g = -r_2 s \xi(x)u \end{cases} \quad (18)$$

定义最优参数

$$\Theta_f^* = \arg \min_{\Theta_f \in \Omega_f} [\sup_{x \in R^n} |\hat{f}(x|\Theta_f) - f(x, t)|] \quad (19)$$

$$\Theta_g^* = \arg \min_{\Theta_g \in \Omega_g} [\sup_{x \in R^n} |\hat{g}(x|\Theta_g) - g(x, t)|] \quad (20)$$

最小逼近误差

$$w = f(x, t) - \hat{f}(x | \Theta_f^*) + (g(x, t) - \hat{g}(x | \Theta_g^*))u \quad (21)$$

$$\varphi_f = \Theta_f - \Theta_f^*, \quad \varphi_g = \Theta_g - \Theta_g^*,$$

对于二阶系统, 考虑式 (16)、(17) 和 (21),

同时定义 $\varphi_f = \Theta_f - \Theta_f^*$, $\varphi_g = \Theta_g - \Theta_g^*$

对滑模面函数求导, 得

$$\dot{s} = \varphi_f^T \xi(x) + \varphi_g^T \xi(x)u - k \operatorname{sgn}(s) + w \quad (22)$$

定义Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}(s^2 + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \varphi_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \varphi_g) \quad (23)$$

则

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g$$

$$= s(\varphi_f^T \xi(x) + \varphi_g^T \xi(x)u - k \operatorname{sgn}(s) + w) + \frac{1}{r_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g$$

$$= \frac{1}{r_1} \varphi_f^T (r_1 s \xi(x) + \dot{\varphi}_f) + \frac{1}{r_2} \varphi_g^T (r_2 s \xi(x)u + \dot{\varphi}_g) - k|s| + sw \lambda。$$

(24)

将 (18) 代入式 (24)

$$\dot{V} = -k|s| + sw \leq 0 \quad (25)$$

可通过嵌入足够多规则的模糊系统使逼近误差 w 充分小, 从而使 $\dot{V} < 0$, 证明了控制系统在Lyapunov意义下全局稳定。

3 变桨距风力发电机组数学模型(Mathematic Model of Variable Pitch Wind Turbine)

3.1 风机模型(Wind Turbine Model)

根据贝兹 (Betz) 理论, 风力机从空气中实际得到的功率及风轮的气动转矩为^[6]:

$$P_m(u) = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 u^3 \quad (26)$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T(\lambda, \beta) \rho \pi R^3 u^2 \quad (27)$$

这里, ρ 是空气密度, R 是风轮半径, u 是风速, C_p 是风能利用系数, β 是节距角, λ 是叶尖速比, 定义为:

$$\lambda = \frac{R\omega}{u} \quad (28)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_T(\lambda, \beta) \quad (29)$$

ω 是风轮角速度, $C_T(\lambda, \beta)$ 是转矩系数,

变桨距风电机组的 $C_p(\lambda, \beta)$ 可以近似为叶尖速比 λ 与桨距角 β 的非线性函数。

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (30)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (31)$$

在高于额定风速时, 系统主要采用变桨距即调节, 同时协调控制发电机电磁转矩, 将风机转速及系统输出功率维持在额定值附近, 这是一个复杂的动态过程。本文主要立足于改进变桨距控制器的性能, 因此将发电机电磁转矩设为恒值。风机动态方程为:

$$J\dot{\omega} = T_m - T_g \quad (32)$$

T_g 是发电机电磁转矩; J 是风机与发电机总转动惯量。

3.2 伺服系统模型(Servo System Model)

变桨距执行机构通过液压装置实现, 整个伺服系统可以等效为一阶系统。

$$\tau_\beta \dot{\beta} = \beta_c - \beta \quad (33)$$

这里, τ_β 是时间常数, β_c 是伺服系统系统的输

3.3 模型线性化(Model Linearization)

由于 $C_T(\lambda, \beta) \triangleq \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$, 式 (32) 转化为

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^3 u^2 \quad (34)$$

显然, T_m 是一个含有三个变量的非线性函数

$$T_m = f(\omega, u, \beta) \quad (35)$$

在一个恒功率运行时的工作点

$(\omega_{OP}, u_{OP}, \beta_{OP})$, 将式 (35) 泰勒展开

$$T_m = f(\omega_{OP}, u_{OP}, \beta_{OP}) + \left[\frac{\partial f}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial f}{\partial \beta} \Delta\beta \right]$$

$$+ \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 f}{\partial \omega^2} (\Delta\omega)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} (\Delta u)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2} (\Delta\beta)^2 \right]$$

$$+ \frac{\partial^2 f}{\partial \omega \partial u} \Delta\omega \Delta u + \frac{\partial^2 f}{\partial u \partial \beta} \Delta u \Delta\beta + \frac{\partial^2 f}{\partial \omega \partial \beta} \Delta\omega \Delta\beta + \dots$$

(36)

$\Delta\omega$, Δu , $\Delta\beta$ 分别代表 $(\omega - \omega_{OP})$, $(u - u_{OP})$, $(\beta - \beta_{OP})$

$$T_m - T_{m,OP} = \frac{\partial f}{\partial \omega} \Delta\omega + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial f}{\partial \beta} \Delta\beta \quad (37)$$

忽略高阶项,

$$\alpha = \frac{\partial f}{\partial \omega} \bigg|_{OP}, \quad \xi = \frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{OP}, \quad \gamma = \frac{\partial f}{\partial \beta} \bigg|_{OP} \quad (38)$$

则式(37) 变成

$$\Delta T_m = \alpha \Delta \omega + \xi \Delta u + \gamma \Delta \beta \quad (39)$$

由(32) 及(39) 可得

$$J \Delta \dot{\omega} = \alpha \Delta \omega + \xi \Delta u + \gamma \Delta \beta \quad (40)$$

这里, $\Delta \beta$ 由式(33) 得

$$\Delta \dot{\beta} = \frac{\Delta \beta_c - \Delta \beta}{\tau_\beta} \quad (41)$$

则, 将(41) 进一步转化为

$$\Delta \ddot{\omega} = \frac{\alpha}{J} \Delta \dot{\omega} + \frac{\gamma}{J \tau_\beta} \Delta \beta_c - \frac{\gamma}{J \tau_\beta} \Delta \beta + \frac{\xi}{J} \Delta \dot{u} \quad (42)$$

对于变桨距风力发电机组, 方程(42) 描述的系统模型涵盖了气动能量转换、电气连接及变桨距执行机构, 能够反映变桨控制过程的动态性能。

设计桨距角控制器的目的是, 在一个高于额定风速运行的工作点, 对于风速变化会引起的风轮转速波动 $\Delta \omega$, 控制器能够通过调整桨距角, 使风轮转速保持不变, 即仍能够运行在工作点转速 ω_{OP} 。

变桨距风力发电机组结构复杂, 其模型参数难以精确辨识, 常规的PID控制器很难实现良好的控制效果。本文采用自适应模糊滑模控制器, 对于模型方程

$$(42), \frac{\alpha}{J}, \frac{\gamma}{J \tau_\beta}, \frac{\gamma}{J \tau_\beta} \Delta \beta, \frac{\xi}{J} \Delta \dot{u} \text{ 等参数皆不需}$$

要精确辨识, $\Delta \omega$ 作为控制器的输入, $\Delta \beta_c$ 作为控制器输出, 整个控制系统的结构如下:

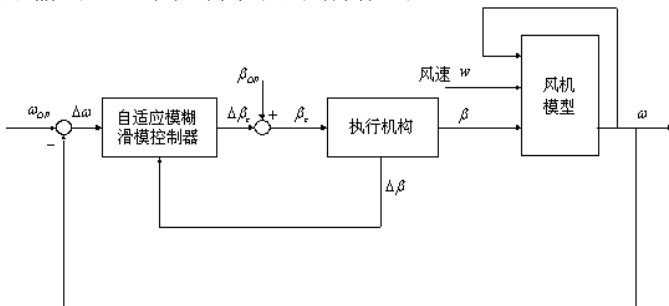


图1 变桨距自适应模糊滑模控制系统结构图

4 仿真研究(Simulation Study)

仿真采用额定功率为600KW的变桨距风力发电机组, 主要参数为:

风轮直径45 m; 桨叶数3; 风机转动惯量 $5 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 发电机转动惯量 $320 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 额定风速 12.5 m/s ; 风机额定转速 3.2 rad/s ; 齿轮箱增速比1:50; 空气密度 1.225 kg/m^3 ; 变桨距电动机位移为 $0 \sim 30^\circ$; 变桨距液压伺服系统运行时间常数为 0.05 s 。

为消除控制器输出的抖振现象, 本文采用一个合适的连续函数 θ_θ 来代替滑模控制律中的符号函数

$\text{sign}(s)$:

$$\begin{cases} \theta_\theta = \frac{s}{|s| + \theta} \\ \theta = \theta_0 + \theta_1 \|e\| \end{cases} \quad (43)$$

这里, θ_0 , θ_1 分别取0.01和10。

本文取式(4-36) 的展开点 OP 参数为:

$$\omega_{op} = 3.2 \text{ rad/s}; \beta_{op} = 13.5^\circ$$

风速的平均值在 16 m/s , 其波动曲线如图2所示时, 风机输出转速曲线及误差曲线如图3, 图4所示, 桨距角输出如图5所示。

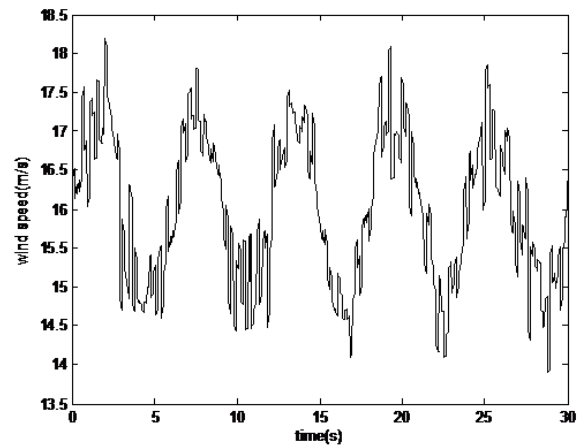


图2 风速波动曲线

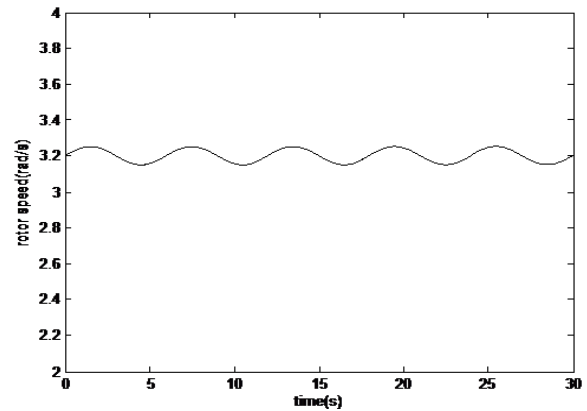


图3 风速波动下的风机转速输出曲线

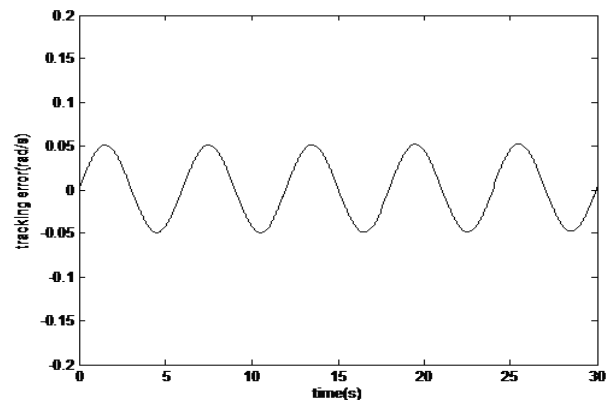


图4 误差曲线

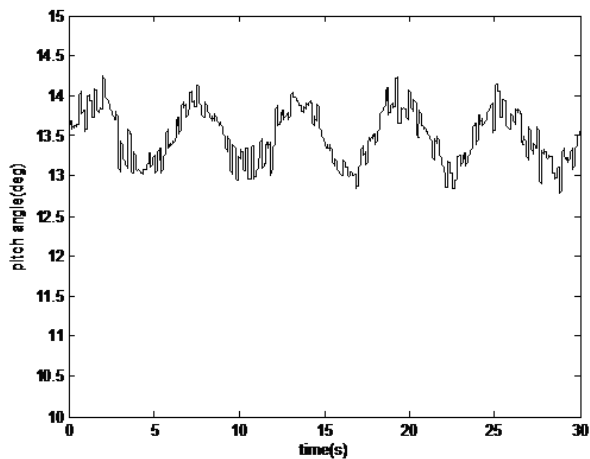


图5 桨距角输出曲线

从图3, 图4可以看出, 当风速发生波动时, 风机转速仍能以较小的误差, 很好的维持工作点转速, 以保证维持恒定功率。该模糊滑模控制系统能够快速的通过桨距角的调节变换来抑制风速的波动, 图5显示控制器输出信号相对平滑、平稳, 有效抑制了扰动, 拥有良好的静、动态特性。整个系统获得了满意的控制效果。

5 结论(Conclusions)

本文结合了自适应控制、模糊控制和滑模控制的特点, 采用反馈线性化的方法, 在被控对象无法精确建立数学模型的情况下, 可以直接利用描述的模糊语言规则完成对给定输入的跟踪, 加速自适应进程, 同时减小跟踪误差。将此控制器应用到变桨距风电机组

的桨距角控制策略中, 较好的抑制风速波动的影响, 改善了风力发电机组的变桨距控制效果, 获得了满意的控制效果。

参考文献(References)

- [1] Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[C]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2006,21(2):467-475.
- [2] Perruquetti W, Barbot J P. Sliding mode control in engineer [M]. New York :Marcel Dekker Inc, 2002.
- [3] 闫茂德, 吴青云, 贺昱耀, 非完整移动机器人的自适应滑模轨迹跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3):579-584.
- [4] Zhou D, Mu C D, Xu W L. Adaptive sliding mode guidance of a homing missile[J]. Jour of guidance, control and dynamics, 1999. 22(4): 589-592.
- [5] Chern T L, Wu Y C. An optimal variable structure control with integral compensation for electrohydraulic position servo control systems [J]. IEEE, transactions on industrial electronics, 1992,39(5): 460-463.
- [6] Novak P, Ekelund T, Jovik J and Schmidtbaner B. Modeling and control of variable-speed wind-hirbine drive-system dynamics[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995,15(4):28-38.