

变速变桨距风力发电系统干扰抑制研究

褚红燕¹, 李蔚玲²

(1. 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 风速的强随机性与风力发电机建模的不确定性给风力发电系统的干扰抑制带来了极大的挑战. 设计了一种新型非线性采样控制器, 以实现风力发电系统的输出功率能抑制干扰信号. 首先, 将系统中的非线性及干扰等效为有界项, 建立系统的近似数学模型, 随后设计连续状态反馈控制器以估计压制增益 L , 并构造能满足稳定性要求及干扰抑制的采样控制器, 便于在计算机中实现. 最后, 基于余弦干扰输入算例验证了采样控制器的稳定性及干扰抑制特性.

[关键词] 干扰抑制, 采样控制, 变桨距风力发电系统

[中图分类号] TP273 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)03-0066-06

Almost Disturbance for Variable-Pitch Wind Turbine System Under Variable Wind Speeds

Chu Hongyan¹, Li Weilin²

(1. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The strong randomness of wind speed and the uncertainty of wind turbine modeling bring about great challenges to the disturbance attenuation of wind turbine system. In this paper, a new type of non-linear sample-data controller is designed to realize the output power to suppress the disturbance signal. Firstly, the non-linearity and disturbance in the system are equivalent to bounded terms, and the approximate mathematical model of the system is established. Secondly, a continuous state feedback controller is designed to estimate the suppression gain. Thirdly, a sampling controller is constructed to meet the stability requirements and disturbance suppression, which is easy to implement in computer. Finally, the stability and disturbance suppression characteristics of the sampled-data controller are verified by a cosine disturbance input example.

Key words: disturbance attenuation, sampled-data control, variable-pitch wind turbine system

风能作为清洁的可再生能源, 日益受到人们的青睐^[1-2], 风能向电网的渗透越来越广泛. 从并网的角度看, 风电机组对频率和电压稳定性有着较高要求, 风电系统的功率控制是当前的研究热点. 由于风速的波动性, 考虑风速时变情况下的风力发电机组功率控制问题更具研究价值^[3].

对于发电系统而言, 双馈感应发电机由于具有独立的无功功率控制能力而获得广泛应用^[4]. 通过控制叶片的桨距角控制风轮的转速, 并协调发电机的电磁转矩, 可以实现功率控制^[5-8]. 变桨距控制中应用最广泛、最成熟的控制策略是 PID 控制技术^[9-10], 目前多数风电场都采用 PID 控制器. 但 PID 控制不能很好地解决风力发电机组控制系统中存在的非线性耦合因素的影响, 也不能较好地抑制动态载荷.

模糊逻辑控制^[11]由于对模型的依赖性小, 也被应用于风机变桨距控制中^[12]. 文献[13]通过固定桨距角, 设计 fuzzy 控制器从而使得转子的转速根据风速而变化, 最终实现输出功率最大化. 文献[14]利用 T-S 模糊模型模拟双馈感应发电机的非线性, 所设计的基于鲁棒 H_∞ 观测器的控制器使得风力系统输出功率最大.

针对本质非线性系统, 文献[15]假设发电机侧的动态响应速度远远快于风轮侧机械的桨距角调整速度,

收稿日期: 2019-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金(61603194, 51706108)、江苏省高校自然科学基金(16KJB120002).

通讯联系人: 褚红燕, 博士, 副教授, 研究方向: 非线性系统、采样控制. E-mail: njnuchuhongyan@163.com

将发电机的电磁转矩视为恒定值,采用三步法设计非线性变桨距控制器,使得输出功率恒定。

上述所有的研究成果均是在连续域中取得的. 随着信息技术及网络技术的快速发展,采样控制由于更易于实现且控制性能优越而获得了更广泛的应用. 因此,将采样控制理论应用于风力发电系统中具有现实意义. 文献[16–18]运用反馈压制法及 Lyapunov 稳定性分析方法解决非线性系统的采样控制器设计问题,通过三步法得出采样时间的最优值. 但针对干扰抑制控制问题,由于干扰项的存在,文献[16]中的分析方法不再适用。

文献[19]从理论上研究了一类本质非线性系统的近似干扰抑制控制问题. 本文将文献[19]的工作进一步推广到风力发电机变桨距控制系统中,设计非线性的变桨距干扰抑制控制器,保证桨距角在允许的范围内最优调整的同时满足风力发电机的输出功率在额定值,并能实时抵制风机受到的变风速的干扰。

1 变桨距控制系统建模

风力发电机组主要由风力机、增速齿轮箱、发电机、变流器及控制系统组成,系统结构如图 1 所示. 本文将设计一个非线性变桨距干扰抑制控制器,调整双馈感应发电机的输出功率在额定值。

由于发电机的输出功率为:

$$P_g = \eta_g T_g \omega_g, \quad (1)$$

假设系统的输出为 ω_g , 其中 η_g 为发电机效率. 又由风轮机的输出转矩

$$T_r = \frac{1}{2\omega_r} \pi \rho R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta), \quad (2)$$

可知调整桨距角可以改变风轮转子的转矩输入,从而调节系统的功率输出. 由此,可得系统模型如式(3)所示:

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_r = T_r - K_s \theta_\varepsilon, \\ J_g \dot{\omega}_g = \eta_{\text{gear}} \frac{T_{\text{ls}}}{n_{\text{gear}}} - T_g, \\ \dot{\theta}_\varepsilon = \omega_r - \frac{\omega_g}{n_{\text{gear}}}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, J_r 等价于转子和低速轴的惯性; J_g 等价于电机轴和发电机的惯性; 叶片、轮毂、主轴和变速箱的刚度被等效为低速轴的总刚度 K_s ; η_{gear} 、 n_{gear} 分别为传动效率和齿数比; θ_ε 为风轮气动侧转子位移与低速轴旋转位移之差 ($\theta_\varepsilon = \theta_r - \theta_{\text{ls}}$); T_r 为风轮转子的气动转矩; T_{ls} 为低速轴的转矩; T_g 为发电机的电子转矩; ω_g 、 ω_r 分别为发电机侧及风轮侧的角速度。

选择状态量为: $x_1 = \omega_g$, $x_2 = \theta_\varepsilon$, $x_3 = \omega_r$, 设计控制输入 u , 根据 $u = C_p(\lambda, \beta)$, 通过设计查表法找到实际输入桨距角 β , 则系统模型(3)可以写成如下形式:

$$\begin{cases} J_g \dot{x}_1 = \frac{\eta_{\text{gear}} K_s}{n_{\text{gear}}} x_2 - T_g, \\ \dot{x}_2 = x_3 - \frac{x_1}{n_{\text{gear}}}, \\ J_r \dot{x}_3 = \frac{1}{2x_3} \pi \rho R^2 v^3 u - K_s x_2. \end{cases} \quad (4)$$

将发电机的角速度 ω_g 作为系统输出, 即 $y(t) = x_1(t)$, 设计控制的目标是使发电机的转速精准输出恒定. 控制系统框图如图 2 所示。

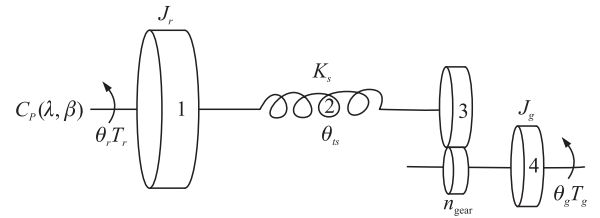


图 1 风力发电系统结构图

Fig. 1 Structure of variable-pitch system via sampled-data controller

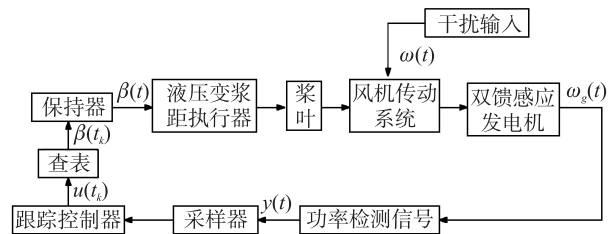


图 2 变桨距采样控制系统框图

Fig. 2 Structure of variable-pitch system via sampled-data controller

2 采样控制器设计

2.1 标称模型

为公式推导方便,采用如下 n 维非线性系统的标准模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_1 x_2(t) + \varphi_1(t, \mathbf{x}(t)) + g_1(t, \mathbf{x}(t)) \omega(t), \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) = a_{n-1} x_n(t) + \varphi_{n-1}(t, \mathbf{x}(t)) + g_{n-1}(t, \mathbf{x}(t)) \omega(t), \\ \dot{x}_n(t) = a_n u(t) + \varphi_n(t, \mathbf{x}(t)) + g_n(t, \mathbf{x}(t)) \omega(t), \\ y(t) = x_1(t), \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathbf{R}^n$ 表示系统状态矢量; $u(t) \in \mathbf{R}, y(t) \in \mathbf{R}, \omega(t) \in \mathbf{R}^s$ 分别为控制输入、系统输出和干扰输入; $\varphi_i(t, \mathbf{x}(t)), g_i(t, \mathbf{x}(t)) (i=1, \dots, n)$ 表示未知的非线性函数.

2.2 干扰抑制问题描述

给定实数 $\gamma > 0$, 假设采样周期为 T , 构造如下形式的采样控制器

$$\begin{aligned} \xi(t_{k+1}) &= M\xi(t_k) + Ny(t_k), \quad M \in \mathbf{R}^{n \times n}, \quad N \in \mathbf{R}^n, \\ u(t) &= u(t_k) = K\xi(t_k), \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}), \quad t_k = kT, \quad k=0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

使得下列两个条件成立:

- (1) 当 $\omega(t) = 0$ 时, 闭环系统在起始点 $(x, \xi) = (0, 0)$ 处全局渐近稳定; 闭环系统(5)~(6)在 $t \in [0, +\infty)$ 范围内全局有界;
- (2) 对于任意干扰项 $\omega(t) \in L_2$, 闭环系统(5)~(6)满足:

$$\int_0^\infty |y(s)|^2 ds \leq \gamma^2 \int_0^\infty \|\omega(s)\|^2 ds.$$

假设 1 存在 $c_1 \geq 0$, 使得:

$$|\varphi_i(t, \mathbf{x}(t))| \leq c_1 (|x_1(t)| + \dots + |x_i(t)|); \quad (7)$$

假设 2 存在已知常数 $G_0 \geq 0$ 使得

$$\|g_i(t, \mathbf{x}(t))\| \leq G_0. \quad (8)$$

2.3 系统变换

为了使用齐次压制法设计干扰抑制器, 引入压制增益 L , 并定义如下坐标变换:

$$\chi_i(t) = \frac{x_i(t)}{L^{i-1}}, \quad i=1, \dots, n, \quad \nu(t) = \frac{u(t)}{L^n}.$$

通过坐标变换, 系统(5)变为如下系统:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1(t) = L\chi_2(t) + \bar{\varphi}_1(t, \boldsymbol{\chi}(t)) + \bar{g}_1(t, \boldsymbol{\chi}(t)) \omega(t), \\ \vdots \\ \dot{\chi}_{n-1}(t) = L\chi_n(t) + \bar{\varphi}_{n-1}(t, \boldsymbol{\chi}(t)) + \bar{g}_{n-1}(t, \boldsymbol{\chi}(t)) \omega(t), \\ \dot{\chi}_n(t) = L\nu(t) + \bar{\varphi}_n(t, \boldsymbol{\chi}(t)) + \bar{g}_n(t, \boldsymbol{\chi}(t)) \omega(t), \\ y(t) = \chi_1(t). \end{cases} \quad (9)$$

且新的非线性项满足:

$$\begin{aligned} |\bar{\varphi}_i(t, \boldsymbol{\chi}(t))| &= |\varphi_i(t, \mathbf{x}(t)) / L^{i-1}| \leq c (|\chi_1(t)| + \dots + |\chi_i(t)|), \\ |\bar{g}_i(t, \boldsymbol{\chi}(t))| &= |g_i(t, \mathbf{x}(t)) / L^{i-1}| \leq G_0 / L^{i-1} \leq G_0. \end{aligned} \quad (10)$$

对矩阵做如下定义:

$$\boldsymbol{\chi}(t) = \begin{bmatrix} \chi_1(t) \\ \chi_2(t) \\ \vdots \\ \chi_n(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \boldsymbol{\Phi}(\cdot) = \begin{bmatrix} \bar{\varphi}_1(\cdot) \\ \bar{\varphi}_2(\cdot) \\ \vdots \\ \bar{\varphi}_n(\cdot) \end{bmatrix}, \mathbf{G}(\cdot) = \begin{bmatrix} \bar{g}_1(\cdot) \\ \bar{g}_2(\cdot) \\ \vdots \\ \bar{g}_n(\cdot) \end{bmatrix},$$

则系统(9)可以简化为:

$$\begin{cases} \dot{\chi}(t) = LA\chi(t) + LBv(t) + \Phi(t, \chi(t)) + G(t, \chi(t))\omega(t), \\ y(t) = C\chi(t). \end{cases} \quad (11)$$

2.4 采样控制器设计及分析

假设采样周期为 T , 设计如下采样控制器:

$$v(t) = v(t_k) = -K\chi(t_k), \quad t \in [t_k, t_{k+1}), \quad t_k = kT, \quad k = 0, 1, \dots \quad (12)$$

将采样控制器(12)代入系统(11)

$$\dot{\chi}(t) = LA\chi(t) - LBK\chi(t_k) + \Phi(t, \chi(t)) + G(t, \chi(t))\omega(t), \quad (13)$$

构造 Lyapunov 函数 $V(\chi(T)) = \chi^T(t)P\chi(t)$, 借助于已知结论, Lyapunov 函数沿着采样系统(11)的轨迹在 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 时间内求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\chi(t)) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \|\omega(t)\|^2 &\leq -L\|\chi(t)\|^2 + 2L\chi^T(t)PBK(\chi(t) - \chi(t_k)) + \\ &2\chi^T(t)P\Phi(\cdot) + 2\chi^T(t)PG(\cdot)\omega(t) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \|\omega(t)\|^2. \end{aligned} \quad (14)$$

假设 $c_1 = c\sqrt{\frac{n(n+1)}{2}} > 0, M = 2n\|P\|^2G_0^2$, 则非线性项和干扰项满足下列放缩条件:

$$2\chi^T(t)P\Phi(\cdot) \leq 2c_1\|P\|\|\chi(t)\|^2, 2\chi^T(t)PG(\cdot)\omega(t) \leq M\|\chi(t)\|^2 + \frac{1}{2}\|\omega(t)\|^2. \quad (15)$$

由输出函数的定义可得

$$\frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 = \frac{1}{\gamma^2} |[\mathbf{C} \quad 0]\chi(t)| \leq \frac{1}{\gamma^2} \|\chi(t)\|^2. \quad (16)$$

将不等式(15)、(16)代入(14)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\chi(t)) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \|\omega(t)\|^2 &\leq -L\|\chi(t)\|^2 + (2c_1\|P\| + M + \frac{1}{\gamma^2})\|\chi(t)\|^2 + \\ &2L\|P\|\|K\|\|\chi(t) - \chi(t_k)\|. \end{aligned} \quad (17)$$

由于系统(13)完全满足参考文献[19]中引理 2.2 的要求, 且 $d_1 = L\|A\| + c_1, d_3 = \sqrt{n}G_0, d_2 = L\|K\|$, 因此将引理 2.2 的结论进一步运用于不等式(17)中, 得到 $\|\chi(t) - \chi(t_k)\|$ 放缩关系如下:

$$\|\chi(t) - \chi(t_k)\| \leq \frac{\delta(T)}{1 - \delta(T)} \|\chi(t)\| + \frac{d_3}{1 - \delta(T)} e^{d_1 T} \int_{t_k}^t \|\omega(s)\| ds, \quad (18)$$

式中, $0 < \delta(T) = \frac{d_1 + d_2}{d_1} (e^{d_1 T} - 1) < 1, T < \frac{1}{d_1} \ln \frac{2d_1 + d_2}{d_1 + d_2}$.

选取 $L = 2 + 2c_1\|P\| + M + \frac{1}{\gamma^2}$, 将不等式(18)代入(17)并对不等式(17)两边取定积分:

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{V}(\chi(t)) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \|\omega(t)\|^2 dt &\leq \int_{t_k}^{t_{k+1}} -2\|\chi(t)\|^2 dt + 2\|P\|d_2 \frac{\delta(T)}{1 - \delta(T)} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\|^2 dt + \\ &2\|P\|d_2 \frac{d_3 e^{d_1 T}}{1 - \delta(T)} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\| \int_{t_k}^t \|\omega(s)\| ds dt - \frac{1}{2} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\omega(t)\|^2 dt. \end{aligned} \quad (19)$$

运用文献[19]中的引理 2.1 对不等式(19)进一步处理:

$$\begin{aligned} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\| \int_{t_k}^t \|\omega(s)\| ds dt &\leq \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\| dt \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\omega(t)\| dt \leq \frac{1}{2} \left(\int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\| dt \right)^2 + \\ &\frac{1}{2} \left(\int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\omega(t)\| dt \right)^2 \leq \frac{1}{2} T \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\chi(t)\|^2 dt + \frac{1}{2} T \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\omega(t)\|^2 dt. \end{aligned} \quad (20)$$

将不等式(20)继续代入(19), 可得

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{V}(\chi(t)) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \|\omega(t)\|^2 dt \leq \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left[-2 + 2\|P\|d_2 \frac{\delta(T)}{1 - \delta(T)} + \|P\|d_2 \frac{d_3 e^{d_1 T}}{1 - \delta(T)} \right] \|\chi(t)\|^2 dt +$$

$$\left[\| P \| d_2 \frac{d_3 e^{d_1 T}}{1-\delta(T)} - \frac{1}{2} \right] \int_{t_k}^{t_{k+1}} \omega(t)^2 dt. \quad (21)$$

选择一个合适的 $\delta(T)$, 满足

$$\begin{cases} -1 + 2 \| P \| d_2 \frac{\delta(T)}{1-\delta(T)} + \| P \| d_2 \frac{d_3 e^{d_1 T}}{1-\delta(T)} < 0, \\ \| P \| d_2 \frac{d_3 e^{d_1 T}}{1-\delta(T)} - \frac{1}{2} < 0. \end{cases} \quad (22)$$

当(22)的两个条件同时满足时,不等式(21)的右边是负定的,即:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} \dot{V}(\mathbf{X}(t)) + \frac{1}{\gamma^2} |y(t)|^2 - \omega(t)^2 dt \leq - \int_{t_k}^{t_{k+1}} \|\mathbf{X}(t)\|^2 dt, \quad (23)$$

则

$$\int_0^\infty |y(s)|^2 ds \leq \gamma^2 \int_0^\infty \omega(s)^2 ds.$$

结论 由此可得,当 $\omega(t) \in L_2$ 时,系统(5)在采样控制器(12)的作用下,能实现近似干扰抑制. 运用到风力发电系统上,也表示风力发电系统的输出功率可稳定于额定值.

说明 1 控制器的设计分为如下几个过程:首先,选择满足 Hurwitz 关系的控制器 K ;接着,基于给定的 γ 和非线性增长条件 c_1 和 G_0 ,根据等式 $L = 2 + 2c_1 \| P \| + M + \frac{1}{\gamma^2}$ 选取合适的 L ;最后,根据不等式(22),选择合适的采样周期 T .

说明 2 证明过程中采用的不等式的放缩,给结论带来了很大的保守性,因此,计算出的采样周期 T 将会较小. 在实际仿真中可以稍微增加采样周期 T 的大小,系统仍能保持稳定. 且随着计算机技术的飞速发展,即使较小的采样周期,在现实采样系统中也可以实现.

3 算例分析

将采样控制器(12)应用于风力发电系统中,以实现干扰抑制,系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) - 1, \\ \dot{x}_2 = u(t) + 0.12 \ln(1+x_2^2) + 0.12 \cos(x_1) \omega(t), \\ y(t) = x_1(t), \end{cases} \quad (24)$$

式中, $0.12 \ln(1+x_2^2)$ 表示在一定范围内变化的非线性项; $0.12 \cos(x_1) \omega(t)$ 表示干扰; $c = 0.12$, $G_0 = 0.12$. 控制器为 $u(t) = -2.4L^2 \chi_1(kT) - 0.8L^2 \chi_2(kT)$, $t \in [kT, (k+1)T)$, 初始状态 $\mathbf{x}(0) = [2, 1]^T$. 图 3 及图 4 的仿真结果表明,采样控制器能快速稳定,且在干扰存在的情况下系统的输出能稳定在一额定值.

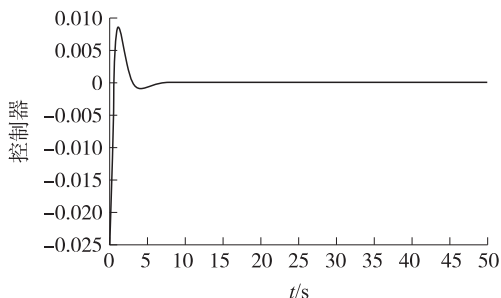


图 3 采样控制器输出图

Fig. 3 Output of sampled-data controller

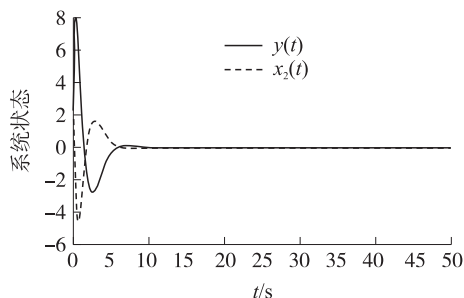


图 4 输出及系统状态图

Fig. 4 Output and system state

4 结论

本文设计了一种基于系统状态可测前提的新型干扰抑制控制器以实现风力发电系统的输出功率稳定,非线性项及干扰项的变化范围可通过模拟极强的风力输入和极弱的风力输入两种情况来确定,控制器

的设计不依赖于精确的数学模型. 仿真算例表明,采样控制器能在干扰存在的情况下实现功率恒定. 未来的研究方向有:

- (1) 当系统状态不可测时,设计输出反馈控制器以解决近似干扰抑制问题;
- (2) 将采样控制器应用于实际小型风力发电系统上以进一步验证其工程可行性.

[参考文献] (References)

- [1] CHEN H, WAN Q L, WANG Y R. Short-term wind power forecast based on fat-tailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(5): 91-98.
- [2] MA Z X, CHEN H, CHAI Y L. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and control of modern power systems, 2017, 2(20): 211-219.
- [3] YANG B, SHU H C, QIU D L, et al. Nonlinear robust state estimation feedback control of doubly-fed induction generator under variable wind speeds[J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(4): 60-69.
- [4] SHU Y B, XUE Y S, CAI B, et al. A review of energy transition analysis: part two uncertainties and approaches[J]. Automation of electric power systems, 2018, 42(10): 1-12.
- [5] SU Y X, DUAN B, JING X L, et al. A variable pitch control strategy for wind turbines under power grid coordination condition[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(9): 7-12.
- [6] ZHAO H S, ZHANG J P, WANG G L, et al. State estimation based fault detection of hydraulic variable-pitch system for wind turbine[J]. Automation of electric power systems, 2019, 40(22): 100-124.
- [7] CHEN J, CHEN R, CHEN Z H, et al. Active stall control of fixed-pitch wind turbines[J]. Automation of electric power systems, 2010(2): 98-103.
- [8] LIU J, HE Y L, LI J, et al. Design and simulation of an improved control strategy for variable-speed pitch controlled wind turbine driven generator system[J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(5): 82-86.
- [9] DU P, LIU F, WANG X, et al. Simulation of wind generating set based on PID[C]//International Conference on Mechanical Engineering and Systems. Yinchuan, China: Atlantis Press, 2015: 1341-1349.
- [10] YU H Q, YANG G, HAO Z. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system[C]//IEEE international conference on system science and engineering. Shanghai, China: IEEE, 2014: 124-127.
- [11] XU O Y, TANG W, CAI Y X, et al. Fuzzy logic based reactive power control strategy for low-voltage distribution network switch high proportion of residential photovoltaic power[J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(23): 89-95.
- [12] TAN L V, NGUYEN T H, LEE D C. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2015, 30(2): 578-587.
- [13] LIU H X, GAO Y B, GENG S J, et al. Nonlinear control of variable speed wind turbines via fuzzy techniques[J]. IEEE Access, 2017, 5: 27-34.
- [14] HODA M, DANYAL B. Wind turbine control using T-S systems with nonlinear consequent parts[J]. Energy, 2019, 172: 922-931.
- [15] 孙玉申. 变速风力发电机非线性控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
SUN Y S. Research on nonlinear control method of variable speed wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University. (in Chinese)
- [16] TSINIAS J. A theorem on global stabilization of nonlinear systems by linear feedback[J]. Systems & control letters, 1991, 17(5): 357-362.
- [17] QIAN C, LIN W. Output feedback control of a class of nonlinear systems: a nonseparation principle paradigm[J]. IEEE transactions on automatic control, 2002, 47(10): 1710-1715.
- [18] QIAN C, DU H. Global output feedback stabilization of a class of nonlinear systems via linear sampled-data control[J]. IEEE transactions on automatic control, 2012, 57(11): 2934-2939.
- [19] CHU H Y, QIAN C J, LIU R J, et al. Almost disturbance decoupling for a class of nonlinear systems via sampled-data output feedback control[J]. International journal of robust and nonlinear control, 2016, 26: 2201-2215.

[责任编辑: 严海琳]