

风能转换系统执行器故障重构与容错控制

沈艳霞[†], 贺庆楠, 杨雄飞, 赵芝璞

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对风能转换系统中执行器故障, 论文提出了一种新型的主动容错控制策略. 设计滑模故障观测器, 实时动态采集执行器故障前后数据信息, 对执行器故障进行重构, 达到故障诊断的目的. 通过补偿控制, 保证了滑模控制器对风能转换系统的可靠控制输入, 以达到对执行器故障主动容错的功能. 仿真结果表明, 滑模故障观测器模块能够实时精确地重构风能转换系统执行器故障, 主动补偿容错控制器在不影响风能转换系统动态性能的情况下, 仍能够实现系统的最大风能的捕获.

关键词: 风能转换系统; 滑模观测器; 故障重构; 故障诊断; 补偿控制; 容错控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Actuator fault reconstruction and fault-tolerant control of wind energy conversion system

SHEN Yan-xia[†], HE Qing-nan, YANG Xiong-fei, ZHAO Zhi-pu

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: A novel active fault tolerant control strategy is proposed for the actuator fault in wind energy conversion system (WECS). By collecting the real-time status of the actuator faulty and normal conditions, a sliding mode fault observer is designed, then the actuator fault is reconstructed, which realizing the fault detection. Depending on the reconstructed fault, a compensation to the sliding mode controller is provided, so the reliable control to WECS can be guaranteed, therefore, the actuator active fault tolerant function is realized. Some simulation experiments are carried out. The results show that actuator fault for WECS can accurately reconstructed by the sliding mode fault observer, under the condition of not affecting the dynamic performance of WECS, the maximum wind energy capture still can be achieved by active compensation fault-tolerant controller.

Key words: wind energy conversion system; sliding mode observer; fault reconstruction; fault detection; compensation control; fault-tolerant control

1 引言(Introduction)

风能是一种储能巨大、安全、清洁无污染并且分布广泛的可再生能源, 在未来能源领域的重要地位已成为业界的共识^[1]. 风能转换系统(wind energy conversion system, WECS)作为风力发电系统最重要的组成部分, 通常安装在偏远高山或远海孤岛等恶劣的地方, 传感器、执行器故障时有发生. 严重影响系统的性能, 甚至导致系统瘫痪. 因此可靠性问题是促进风力发电系统广泛工程化的关键, 作为提高系统可靠性的有效手段, 容错控制成为WECS研究的一大热点.

容错控制是把被控系统可能发生的故障(执行器和传感器)考虑在控制器设计过程中, 使闭环系统无论部件是否出现故障都能保持渐近稳定性且满足一定

的性能指标. 目前针对风能转换系统的容错控制的研究相对不足, 主要采用的是被动容错控制(passive fault-tolerant control, PFTC)策略^[2-3], 但PFTC策略通常是针对系统可能出现的最坏情况, 设计出具有固定参数控制器, 因此控制器过于保守且只具有有限的容错范围, 对系统未知的故障, 被动容错控制其却无能为力. 主动容错控制(active fault-tolerant control, AFTC)能够利用系统在线辨识的故障信息, 重新进行控制器设计, 从而实现容错控制. AFTC一般是有故障检测和隔离(fault detection and isolation, FDI)和容错控制(fault-tolerant control, FTC)两个部分组成, FDI是实现主动容错控制的最重要故障信息来源. 在过去的几十年里提出了各种各样的基于模型的FDI方法^[4].

收稿日期: 2014-06-17; 录用日期: 2014-11-04.

[†]通信作者. E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn; Tel.: +86 510-85910653.

国家自然科学基金项目(61104183, 61174032), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130093110011)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61104183, 61174032) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130093110011).

其中,采用观测器的FDI是各种方法中最具有实用性的方法之一.该方法的思路是:利用系统的控制输入和可测输出设计观测器,以其观测误差产生一个残差,然后通过合适的评价函数、决策函数或决策逻辑,根据阈值确定故障是否发生.在很多情况下,它只能给出何时出现了故障,而哪个传感器或执行器出现故障,故障偏差值是多大等信息,却无法得到.虽然,可以设计与执行器个数相等的多个观测器,达到故障隔离的目的,但仍不能给出故障值大小信息^[5].1994年Edwards C和Spurgeon S K提出了滑模观测器理论^[6],这是一种非线性观测器理论,此后,Edwards C等又提出了一种特殊的滑模观测器用于FDI,此观测器的新颖之处在于即使在出现故障时系统仍可以维持系统滑模运动,运用“等价输出控制概念”^[7]精确地重构故障信号,以达到故障检测和隔离的目的.

目前,基于滑模观测器的故障重构策略成为了当下研究的热点之一^[8-10].文献[8]针对车辆电子稳定性控制系统横摆角速度传感器和加速度传感器的故障问题给出了基于T-S模糊的滑模观测器设计方法,应用等价输出控制获取故障信息,在较大的车速范围内实现了传感器故障的重构,并取得了满意的检测效果.针对执行器故障文献[9]提出一种新颖的鲁棒模糊滑模观测器设计和执行器故障重构方法.在考虑滑模匹配条件不满足、状态不可测的情况下,提出基于高增益估计器的鲁棒滑模观测器,并可应用等价输出误差介入原理重构出系统执行器故障,并通过双关节机械臂的控制仿真实验,验证了此方法的有效性.与此类似,文献[10]通过设计合适的自适应律及构造恰当的Lyapunov函数消除故障上界未知对观测器状态收敛的影响,利用等效控制输出误差注入原理实现执行器故障的直接估计.采用滑模观测器的故障检测与重构策略,不仅能给出系统哪个执行器何时发生了故障,并且还能给出精确的故障值大小信息,这为系统及时主动容错提供了最重要的信息.

因此,本文将滑模观测器引入到风能转换系统的执行器故障重构中,采用补偿控制的思想,提出了一种新颖的基于滑模重构观测器的主动容错控制策略,设计滑模故障观测器,动态采集执行器故障及正常状态数据,对执行器故障进行实时重构,以实现风能转换系统执行器故障检测和故障隔离.通过补偿控制,实现对系统执行器漂移故障和偏差故障的实时补偿,保证了系统滑模控制器对风能转换系统的可靠输入,以达到容错的功能.

2 风能转换系统动态数学模型(Dynamical mathematical model of wind energy conversion system)

风能转换系统(见图1)主要有风轮机、传动系

统、发电机、变流器以及电网组成^[11].风轮机捕捉风能,将风能转换成机械能,经传动系统带动发电机转子旋转,从而产生电能,经变流器输送到电网中.

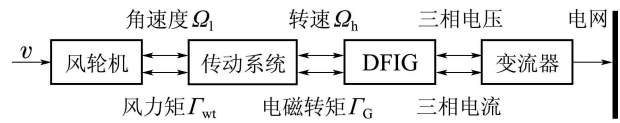


图1 风能转换系统整体框图

Fig. 1 The overall block diagram of WECS

根据Betz理论,假定风轮机是理想的,则从风能中捕获的机械功率为

$$P_{\text{ot}} = 0.5\rho R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta), \quad (1)$$

其中: $C_p(\lambda, \beta)$ 为功率系数, λ 为叶尖速比, β 为桨距角, R 为风轮半径, ρ 为空气密度, v 为风速. 式(1)中, C_p 为风轮机将风能转化为机械能的效率, 为叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数. 其中, 叶尖速比 λ 是风轮机叶尖角速度 Ω_1 与风速 v 的函数, 表示为

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_1}{v}. \quad (2)$$

当风速一定时, 风轮机输出的机械功率只取决于功率系数 C_p . $C_p-\lambda-\beta$ 的关系曲线是风轮机运行的基本特性之一, 如图2所示.

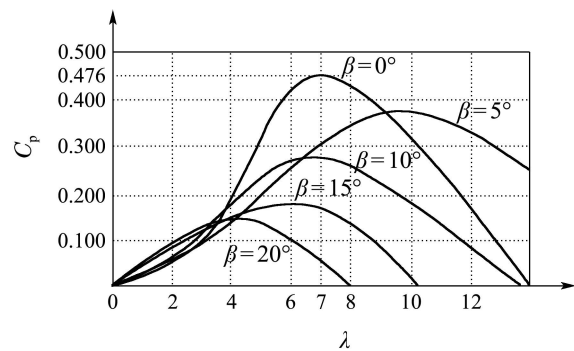


图2 风轮机 $C_p-\lambda-\beta$ 曲线

Fig. 2 The $C_p-\lambda-\beta$ curve of wind turbine

如果保持桨距角 β 不变, 功率系数 C_p 只由叶尖速比 λ 决定. 对于特定的风轮机, 具有唯一的最佳叶尖速比 λ_{opt} , 此时定义 $C_{p\text{opt}}$ 为最大风能捕获系数. 当叶尖速比 λ 偏离最佳叶尖速比 λ_{opt} 时, 功率系数 C_p 值也会偏离最大风能捕获系数 $C_{p\text{opt}}$, 导致风轮机风能转换效率的下降. 在不同的风速条件下, 如果能够保持对最佳叶尖速比 λ_{opt} 的实时跟踪, 实现风轮机最大风能捕获的控制.

额定风速以下采用定桨距控制即 $\beta = 0^\circ$, 当叶尖速比 $C_p(\lambda, \beta) = C_p(\lambda)$ 时, 取得最大值 0.476, 即为最佳叶尖速比.

风轮机输出转矩 Γ_{ot} 为

$$\Gamma_{\text{ot}} = \frac{P_{\text{ot}}}{\Omega_1}. \quad (3)$$

由于电磁时间常数远小于机械时间常数, 在系统建模时忽略发电机电磁响应的动态过程, 风能转换系统动态系统方程^[10]

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_h = \frac{\Gamma_{\text{ot}}(i, \Omega_h, v)}{(i, J_t)} - \frac{\Gamma_G}{J_t}, \\ \dot{\Gamma}_G = -\frac{\Gamma_G}{T_G} + \frac{\Gamma_{\text{ref}}^*}{T_G}, \end{cases} \quad (4)$$

其中: J_t 为高速轴的转动惯量, Γ_{ref}^* 为电磁转矩的参考量. 以 Ω_h, Γ_G 为状态, 则得到风能转换系统的状态方程

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t), \quad (5)$$

其中: $A = [\Gamma_{\text{ot}}(\Omega_1, v)/(i_o J_t \Omega_h) \quad -1/J_t; 0 \quad -1/T_G]$, $B = [0 \quad 1/T_G]^T$, $x = [\Omega_h \quad \Gamma_G]^T$, $u = \Gamma_{\text{ref}}^*$.

从风能转换系统状态方程(5)可知矩阵 A 随着状态变量改变而改变, 风能转换系统具有强非线性特性, 系统的控制输入为参考的电磁转矩 Γ_{ref}^* , 且 $\{A, B\}$ 是可控的.

3 滑模故障观测器的设计与重构 (Design and reconstruction of sliding mode fault observer)

3.1 滑模故障重构观测器理论 (Sliding mode observer theory)

考虑系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ff_u(t), \\ y(t) = Cx(t) + f_o(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $F \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $q \leq m < p < n$, 并且 C, F 是满秩矩阵. $f_u(t), f_o(t)$ 分别代表执行器和传感器故障, 并且是范数有界. 另外, 假定系统的各状态是未知的, 只有信号 $u(t), y(t)$ 是可知的.

滑模观测器设计目标是产生状态估计 \hat{x} 和输出估计 $\hat{y} = C\hat{x}$, 并在滑模运动中, 输出误差 $e_y = \hat{y}(t) - y(t)$ 能在有限时间域内趋近于零. 这种特殊观测器写成如下形式:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - L_1 e_y(t) + L_n v_\rho, \quad (7)$$

其中: L_1, L_n 为滑模观测器待线性反馈矩阵和非线性反馈矩阵; v_ρ 是设计滑模观测器的滑模策略, 以确保滑模运动.

对于执行器故障的检测和重构, 须满足下列的假设条件^[6, 12]:

假设 1 矩阵 B, C, F 满秩;

假设 2 (A, C) 可观测;

假设 3 $\text{rank}(CF) = \text{rank}(F) = q$;

假设 4

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A - \lambda I & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rank}(F).$$

当 $f_o = 0$ 时, 在满足以上假设1-4的条件下, 存在非奇异变换 $x \rightarrow Tx$, 以至于原系统 (A, B, C, F) 在 T 变换作用下, 得到

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & -A_{22} \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \\ \bar{C} &= \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix}^T, \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

此时系统(6)可以写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t), \\ \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t), \\ y(t) = x_2(t), \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x_1 \in \mathbb{R}^{(n-p)}$, $x_2 \in \mathbb{R}^{(p)}$ 且 A_{11} 有稳定的极点. 则以滑模观测器设计原理为基础, 对经过非奇异变换的动态系统(8), 提出如下滑模故障重构观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{x}_2(t) + B_1u(t) - A_{12}e_y(t), \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{x}_2(t) + B_2u(t) - (A_{22} - A_{22}^s)e_y(t) + v_\rho, \\ \dot{y}(t) = \hat{x}_2(t), \end{cases} \quad (9)$$

其中 $A_{22}^s \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为适当维数的任意稳定矩阵. 并且滑模控制策略为

$$v_\rho = \begin{cases} -\rho \|F_2\| \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\|}, & e_y \neq 0, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (10)$$

其中 $P_2 \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为 A_{22}^s 的 Lyapunov 矩阵, 选择标量 ρ , 使得

$$\|f_u(t)\| < \rho. \quad (11)$$

如果状态估计误差被定义为 $e_1(t) = \hat{x}_1 - x_1$, $e_y(t) = \hat{x}_2 - x_2$, 则结合式(6)和式(9)可得状态和输出的偏差方程为

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t), \quad (12)$$

$$\dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}^s e_y(t) + v - Ff_u(t). \quad (13)$$

由文献[6]可知误差系统(12)-(13)是渐进稳定的, 滑模运动可以保持, 且在有限的时间内 $e_y \rightarrow 0$. 相对

于观测器(7),设计的滑模故障重构观测器的线性反馈矩阵和非线性反馈矩阵 L_1, L_n 分别为

$$L_1 = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^S \end{bmatrix}, L_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix},$$

则滑模观测器(9)可以在原坐标下按式(7)的形式进行设计.

3.2 执行器故障检测与重构(Detection and reconstruction of actuator fault)

假设在第3.1节中已经设计滑模观测器,并建立滑模运动.在滑模运动中, $e_y = \dot{e}_y = 0$,则

$$0 = A_{21}e_1(t) + v_{eq} - Ff_u(t), \quad (14)$$

其中 v_{eq} 为等价输出控制信号,代表滑模策略的平均特性以及维持滑模面运动所必要的作用^[13].由于 A_{11} 是稳定的, $e_1 \rightarrow 0$,则

$$v_{eq} \rightarrow F_2 f_u(t). \quad (15)$$

对于恢复等价输出控制信号,一种是通过低通滤波器;另一种是式(10)中非连续作用被连续量进行近似处理.

$$v_{eq} = -\rho \|F_2\| \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\| + \sigma}, \quad (16)$$

其中 σ 选择足够小的正变量,则等价输出控制可以由式(16)近似表示任意精度.则由式(15)可得

$$\hat{f}_u(t) = -\rho \|F_2\| (F_2^T F_2)^{-1} F^T \frac{P_2 e_y}{\|P_2 e_y\| + \sigma}. \quad (17)$$

由式(17)可知,系统中的故障信息可以得到实时的计算重构,并且只依赖于估计输出误差 e_y .系统的故障重构观测器结构如图3所示.

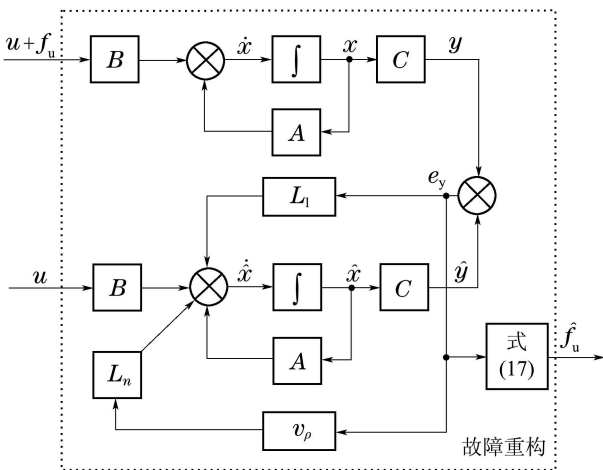


图3 滑模故障重构观测器的整体设计框图

Fig. 3 The overall design diagram of sliding mode fault observer

由图3可知,滑模故障重构观测器可以看成是一个

两输入单输出的子系统模块,风能转换系统中执行器故障状态及正常状态作为滑模故障观测器子系统的输入,输出为重构的风能转换系统执行器故障.通过设计主动补偿容错控制器对风能转换系统执行器进行实时补偿,以达到主动容错控制的目的.

4 主动补偿容错控制器的设计(Design of active compensation fault-tolerant controller)

由式(5)可知风能转换系统滑模控制器的输出 Γ_{ref}^* 的值正反映了执行器的故障信息.针对风能转换系统执行器故障设计补偿容错控制器,在执行器发生故障时仍可以实现最大风能的捕获,达到容错控制的目的.如图4所示,主动补偿容错控制器主要由滑模控制器以及滑模故障重构观测器组成.

4.1 滑模控制器的设计(Design of sliding mode controller)

滑模控制器主要有两个组成部分:等效控制输入部分 u_{eq} 和开关部分 u_N .首先,计算等效输入部分,其表达式为

$$u_{eq} = \Gamma_G - \frac{T_G}{1 + a_2 J_t} (a_1 \cdot J_t \cdot \Omega_h + a_2 \cdot J_t \cdot \Gamma_G) [a_1 - A(\lambda, v)], \quad (18)$$

其中:

$$A(\lambda, v) = \frac{KvR^2}{i^2} \cdot \frac{C_p'(\lambda) \cdot \lambda - C_p(\lambda)}{\lambda^2},$$

$C_p'(\lambda)$ 是功率系数 λ 的微分.参数 a_1 的选取取决于滑模控制的收敛速度,取 $a_1 = -1/T_{sm}$,其中 T_{sm} 是时间常数. a_2 的选取取决于预期的稳定目标,即对应与 λ_{opt} 的最优工作点,由 $\dot{\Omega}_h = a_1 \Omega_{hopt} + a_2 \Gamma_{Gopt}$ 可以得到

$$a_2 = -a_1 \cdot \Omega_{hopt} / \Gamma_{Gopt}.$$

对于开关部分 u_N 可以表示为所得滑模面的Lyapunov函数

$$u_N = -\alpha \cdot \text{sgn}_h(\sigma), \quad (19)$$

其中 $\text{sgn}_h(\sigma)$ 是一个带宽为 h 的滞环函数.

由此,滑模控制的是等效部分 u_{eq} 以及开关部分 u_N 之和,即

$$u_1 = u_{eq} + u_N. \quad (20)$$

另外,对于公式(18)控制器的设计同时需要转速和电磁转矩值,以及滑模控制器稳定性分析证明详细过程见文献[14].

4.2 主动补偿容错控制器的设计(Design of active compensation fault-tolerant controller)

令滑模控制器的故障输出为

$$u'_1 = u_1 + f_u, \quad (21)$$

其中 f_u 为执行器的故障信息. 由图3可知滑模故障重构观测器的输出为重构的执行器故障 \hat{f}_u , 令

$$u_2 = u_1 + \hat{f}_u, \quad (22)$$

则可得风能转换系统的控制输入 Γ_{ref}^* 为

$$\Gamma_{ref}^* = u'_1 - u_2. \quad (23)$$

如式(23)所示, 通过补偿重构的执行器故障, 可以实现执行器故障下滑模控制器的可靠输出. 则采用基于滑模故障重构观测器的主动补偿容错控制的优点如下:

1) 考虑到风能转换系统所处的环境因素, 滑模控制具有算法简单, 动态响应快, 动态品质好以及对于不确定性和未知的外界扰动鲁棒性强等优点^[15].

2) 滑模故障观测器能够精确的估计实际执行器或传感器故障, 并及时反映故障发生时刻, 有效实现了故障的检测和隔离. 对于主动补偿容错控制器中滑模故障观测器子模块的设计见文献[16].

针对风能转换系统执行器故障的主动补偿容错控制器既对外界干扰或不确定因素具有极强的鲁棒性, 又能实现执行器故障的实时容错控制, 保证了系统具有可靠的控制输入.

5 仿真分析(Simulation and analysis)

基于滑模故障重构观测器的风能转换系统主动容错控制整体框图如图4所示, 主要由风能转换系统和主动补偿容错控制器组成.

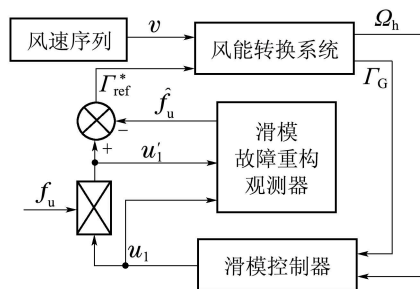


图4 基于滑模观测器的风能转换系统主动容错控制框图
Fig. 4 The active fault-tolerant control diagram of WECS based on sliding mode observer

风速序列如图5所示, 无故障时风能转换系统执行器输出即电磁转矩参考值 Γ_{ref}^* , 叶尖速比以及功率系数如图6-8所示.

常见的执行器故障类型主要有偏差、漂移、彻底失效以及精度下降^[17]. 失效故障在一般情况下都是致命性或者很难弥补的故障, 在此不做考虑; 精度下降的故障一般也不作为特定的故障类型进行考虑. 下面分别针对风能转换系统的执行器漂移和偏差故障, 进行仿真与研究.

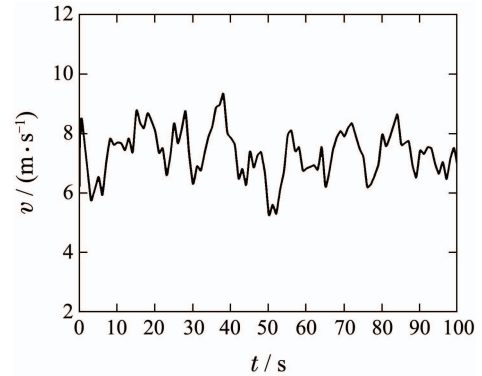


图5 风速波形

Fig. 5 Wind waveform

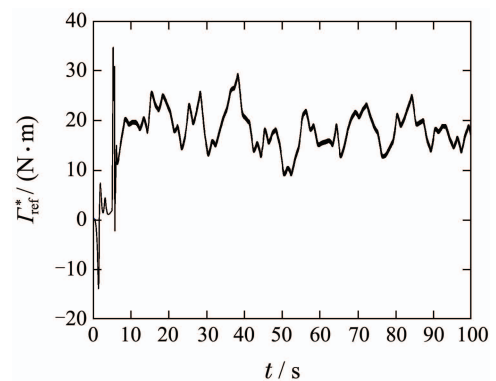


图6 无故障时风能转换系统执行器输出

Fig. 6 The actuator output of WECS without fault

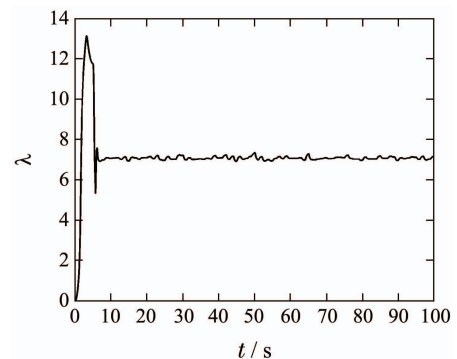


图7 无故障时风能转换系统叶尖速比

Fig. 7 The tip speed ratio of WECS without fault

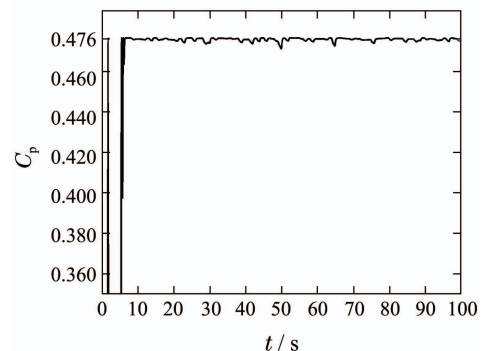


图8 无故障时风能转换系统功率系数

Fig. 8 The power coefficient of WECS without fault

1) 漂移故障选为

$$f_{u1}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 45, \\ 2.5 \sin(2\pi t), & 45 \leq t < 46, \\ 1.5 \sin(2\pi t), & 46 \leq t < 47, \\ 2 \sin(2\pi t), & 47 \leq t < 48, \\ 3 \sin(2\pi t), & 48 \leq t < 49, \\ 2 \sin(2\pi t), & 49 \leq t < 50, \\ 1.5 \sin(2\pi t), & 50 \leq t < 51, \\ \sin(2\pi t), & 51 \leq t < 52, \\ 3 \sin(2\pi t), & 52 \leq t < 53, \\ 2.5 \sin(2\pi t), & 53 \leq t < 54, \\ \sin(2\pi t), & 54 \leq t < 55, \\ 0, & 55 \leq t < 100. \end{cases} \quad (24)$$

由图9可以看出,滑模故障观测器能够准确地重构风能转换系统执行器漂移故障信息.

通过对比如图7-8所示的无故障时风能转换系统叶尖速比和功率系数,由图10-13可知主动补偿容错控制器提高了风能转换系统最大风能捕获效率,达到了容错控制的优化目的.

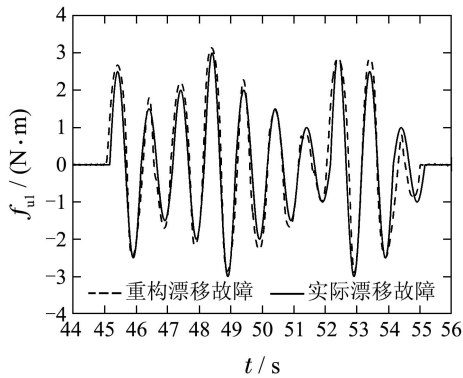


图9 执行器实际和重构漂移故障

Fig. 9 Actual and reconstructed drifting fault of actuator

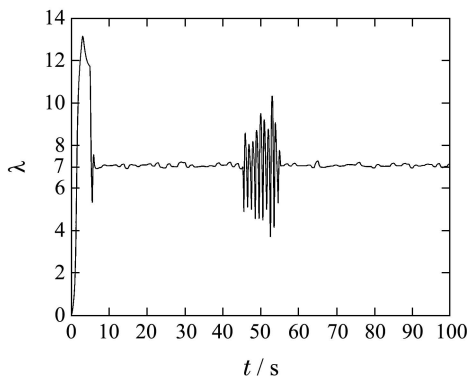


图10 执行器漂移故障时叶尖速比

Fig. 10 The tip speed ratio with drifting fault of actuator

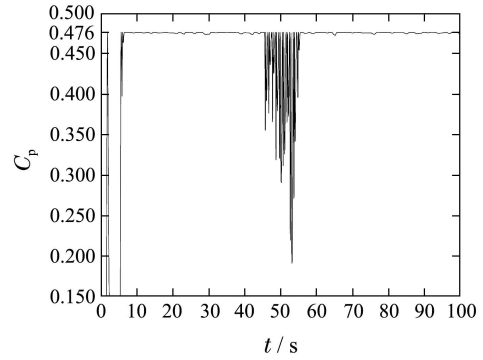


图11 执行器漂移故障时功率系数

Fig. 11 The power coefficient with drifting fault of actuator

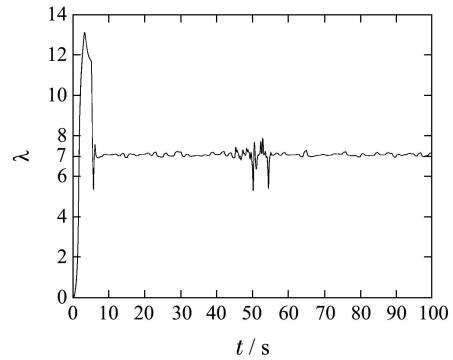


图12 执行器漂移故障时采用主动补偿容错控制的叶尖速比

Fig. 12 The tip speed ratio adopted active compensation fault-tolerant control with drifting fault of actuator

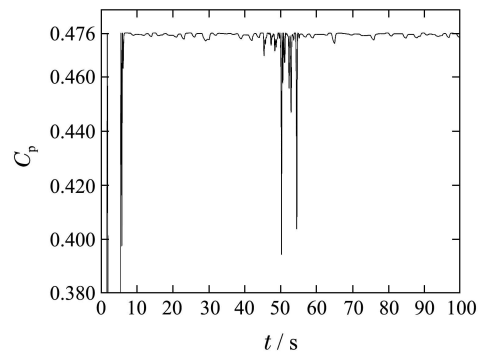


图13 执行器漂移故障时采用主动补偿容错控制的功率系数

Fig. 13 The power coefficient adopted active compensation fault-tolerant control with drifting fault of actuator

2) 偏差故障选为

$$f_{u2}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 30, \\ 3, & 30 \leq t < 70, \\ 0, & 70 \leq t < 100. \end{cases} \quad (25)$$

由图14可以看出,滑模故障重构观测器也能准确的重构风能转换系统执行器偏差故障信息.同样通过对比图15-18与图7-8所示的无故障情况下风能转换系统的叶尖速比和功率系数,主动补偿容错控制器很好地补偿了执行器的故障信息,在执行器发生偏差故障时风能转换系统仍能实现最大风能捕获.

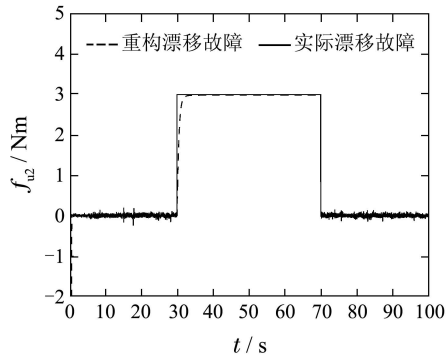


图 14 执行器实际和重构偏差故障

Fig. 14 Actual and reconstructed deviation fault of actuator

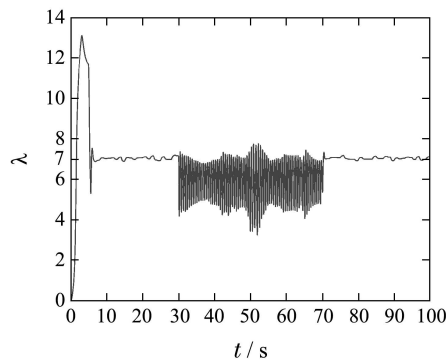


图 15 执行器偏差故障时叶尖速比

Fig. 15 The tip speed ratio with deviation fault of actuator

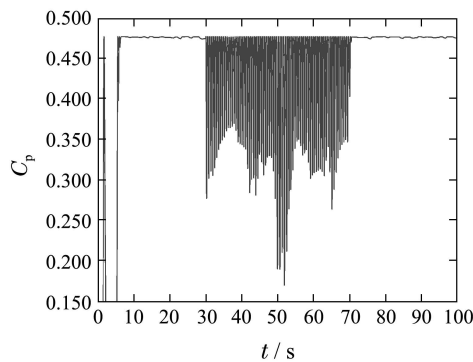


图 16 执行器偏差故障时功率系数

Fig. 16 The power coefficient with deviation fault of actuator

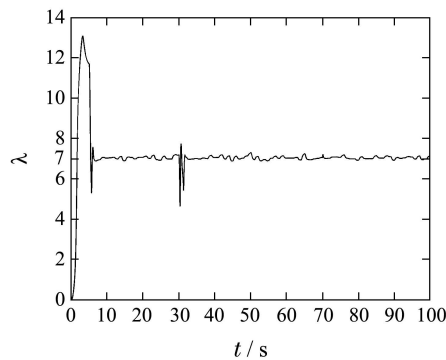


图 17 执行器偏差故障时采用主动补偿容错控制的叶尖速比

Fig. 17 The tip speed ratio adopted active compensation fault-tolerant control with deviation fault of actuator

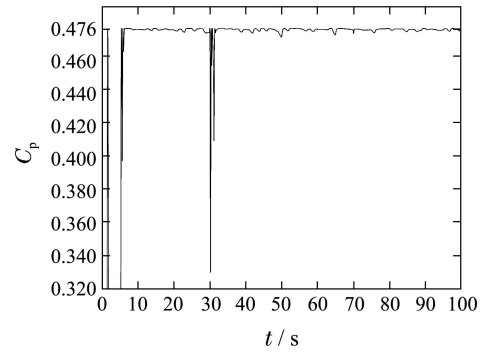


图 18 执行器偏差故障时采用主动补偿容错控制的功率系数

Fig. 18 The power coefficient adopted active compensation fault-tolerant control with deviation fault of actuator

6 结论(Conclusions)

本文针对风能转换系统执行器故障,通过滑模故障重构观测器实时动态采集执行器故障前后数据信息,对执行器故障进行重构,实现对风能转换系统执行器故障实时检测,采用补偿容错控制策略实现了系统执行器故障主动容错功能,保证了滑模控制器对风能转换系统的可靠控制输入,在不影响风能转换系统动态性能的情况下,仍能实现最大风能的捕获。由于执行器故障重构后的数值与实际故障存在偏差,导致通过补偿控制时不能实现最优的风能捕获控制效果,对于如何提高执行器故障重构的准确性进而实现理想的容错控制效果将是接下来研究的主要目标。

参考文献(References):

- [1] SUN X J, HUANG D G. An explosive growth of wind power in china [J]. *International Journal of Green Energy*, 2014, 11(8): 849 – 860.
- [2] WANG X, WANG Y, JI Z C, et al. Design of two-frequency-loop robust fault tolerant controller for wind energy conversion system [C] // *Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronic and Application*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 718 – 723.
- [3] SLOTH C, ESBENSEN T, STOUSTRUP J. Active and passive fault-tolerant LPV control of wind turbines [C] // *Proceedings of 2010 American Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 4640 – 4646.
- [4] CHEN J, PATTON R J. *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems* [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] 朱芳来, 岑峰, 董雪平. 一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法 [J]. *控制与决策*, 2011, 26(2): 258 – 262, 270. (ZHU Fanglai, CEN Feng, DONG Xueping. A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 258 – 262, 270.)
- [6] EDWARDS C, SPURGEON S K. On the development of discontinuous observers [J]. *International Journal of Control*, 1994, 59(6): 1211 – 1229.
- [7] EDWARDS C, SPURGEON S K, PATTON R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. *Automatica*, 2000, 39(4): 541 – 553.

- [8] 于金泳, 刘志远, 陈虹. 基于滑模观测器的车辆电子稳定性控制系统的故障重构 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1057 – 1062.
(YU Jinyong, LIU Zhiyuan, CHEN Hong. Fault reconstruction in the vehicle electronic stability control based on sliding mode observers [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1057 – 1062.)
- [9] 张强, 吴庆宪, 姜长生, 等. 一种新颖的鲁棒模糊滑模观测设计及干扰重构方法 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 186 – 193.
(ZHANG Qiang, WU Qingxian, JIANG Changsheng, et al. A novel robust fuzzy sliding mode observer design and disturbance reconstruction [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(2): 186 – 193.)
- [10] 刘聪, 李颖晖, 朱喜华, 等. 基于自适应滑模观测器的不匹配非线性系统执行器故障重构 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 431 – 437.
(LIU Cong, LI Yinghui, ZHU Xihua, et al. Adaptive sliding-mode observer for actuator fault reconstruction in nonlinear system mismatched uncertainties [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(4): 431 – 437.)
- [11] MUNTEANU I, BRARCU A I, CUTULULIS N A, et al. *Optimal Control of Wind Energy Systems* [M]. London: Springer, 2008: 52 – 57.
- [12] WALCOTT B L, ZAK S H. State observer of nonlinear uncertain dynamical system [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, 32(2): 166 – 170.
- [13] UTKIN V. *Sliding Mode in Control Optimization* [M]. Berlin: Springer, 1992.
- [14] MUNTEANU I, BACHA S, BRATCU A I, et al. Energy-reliability optimization of wind energy conversion systems by sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(3): 975 – 985.
- [15] 祝乃杰, 陈蓓, 牛玉刚. 含有输入时滞不确定T-S模糊系统的滑模控制 [J]. 信息与控制, 2012, 41(5): 622 – 636.
(ZHU Naijie, CHEN Bei, NIU Yugang. Sliding mode control for uncertain T-S fuzzy systems with input delays [J]. *Information and Control*, 2012, 41(5): 622 – 636.)
- [16] 赵瑾, 顾幸生, 申忠宇. 不确定动态系统的执行器故障检测和重构 [J]. 控制与决策, 2007, 22(5): 510 – 514.
(ZHAO Jin, GU Xingsheng, SHEN zhongyu. Actuator fault detection and reconstruction in the uncertain dynamical system [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(5): 510 – 514.)
- [17] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
(ZHOU Donghua, YE Yinzong. *Modern Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)

作者简介:

沈艳霞 (1973–), 女, 博士, 教授, 目前研究方向为电机的非线性控制、风力发电以及参数辨识, E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn;

贺庆楠 (1987–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为风能转换系统的容错控制技术, E-mail: 634974336@qq.com;

杨雄飞 (1989–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为风能转换系统的容错控制, E-mail: 931454258@qq.com;

赵芝璞 (1976–), 女, 硕士, 讲师, 目前研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: zzp0330@jiangnan.edu.cn.