

基于灰色动态预测的风力发电系统容错控制策略研究

季凌燕, 沈艳霞, 吴定会

(江南大学电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 提出了一种新型的风力发电系统的主动容错控制策略。引入灰色动态预测模型, 对传感器故障进行预测。基于风力发电系统模糊模型, 设计容错控制器, 利用邻近两状态反馈回路补偿失效回路的系统重构方法, 重新确定系统反馈控制律。仿真结果表明在额定风速以下, 传感器发生故障时系统的功率系数和叶尖速比均能保持在最优值, 从而实现额定风速以下的最大风能捕获。

关键词: 灰色预测模型; 传感器故障诊断; 容错控制; 系统重构

Research of fault-tolerant strategy for wind energy conversion system based on grey prediction model

Ji Ling-yan, Shen Yan-xia, Wu Ding-hui

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

Abstract: A novel fault-tolerant control strategy for wind energy conversion system is proposed. Grey prediction model is introduced to diagnose the sensor fault. The Takagi-Sugeno (T-S) is adopted for modeling the wind energy conversion system and establishing fuzzy state feedback controller. When one of the sensors is failed, control action of the failed circuit is averagely shared by the remaining state feedback circuits, thus state feedback control-law is reconfigured. Experimental results show that when a sensor is failed, the system power coefficient and tip speed ratio can be still maintained at the optimal value under the rated wind speed, and the maximum wind energy capture could be realized.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61104183).

Key words: grey prediction model; fault diagnosis of sensor; fault tolerant control; system reconfiguration

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0037-07

0 引言

随着社会经济的发展, 传统能源已远远不能满足需求, 因此, 为促进人类发展, 开发新能源势在必行。无论从技术方面还是经济方面考虑, 风能凭借其取之不尽用之不竭的优势, 都是新能源开发的首选对象。风能转换系统(Wind Energy Conversion System, WECS)的可靠性问题受到越来越广泛的关注, 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^[1-6]。

由于风力发电系统是高阶、多变量、参数时变的复杂强非线性系统, 并长期处于沿海高原等复杂多变的工作环境中, 大功率、高负荷连续运行, 其传感器和执行器等部件都是容易发生故障的环节,

这些部件故障会引起生产过程停顿, 甚至可能造成严重灾难。目前, 针对风能转换系统的容错控制方法主要有两种: 被动容错控制和主动容错控制。被动容错控制系统中没有故障检测装置, 控制器除考虑正常工作状态的参数值外, 还要考虑在故障情况下的参数值, 无论控制部件正常运行还是发生执行器、传感器故障, 均能保障系统的稳定性。由于被动控制策略通常是根据系统可能出现的最坏情况, 设计出具有固定参数的控制器, 这往往使设计出来的控制器过于保守且只具有有限的容错范围, 主动容错控制克服了被动容错控制器不能达到最优控制的缺点, 是一种基于故障检测、故障隔离以及故障系统重组技术的容错控制方法。文献[7]考虑了一类非线性系统, 针对所有可能发生的执行机构和传感器故障, 研究了基于滑模观测器的故障诊断与容错控制, 在线检测故障, 并且对其进行重构, 提高了系统的性能。文献[8]提出了一种动态非线性系统主动容错控制方法, 设计了 CMAC 神经网络故障观测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104183); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP31106); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(博导类)(20130093110011)

器,并给出了容错控制律在线重构的滑模控制算法。文献[9]利用神经网络逼近执行器未知故障函数,实现执行器故障状态下的跟踪控制,设计容错控制律保证闭环系统稳定,状态有界。

灰色动态预测^[10]所要求的信息量小,并且不需要系统的模型支持,可以很好地解决传感器故障诊断中样本数据少、随机性强和实时性要求高的问题。文献[11-12]采用灰色预测算法,通过数据处理寻找数据间的规律,适合短期和长期预测,在装备故障预测应用中具有很强的现实意义。文献[13-15]将灰色预测原理引入到传感器的故障诊断中,通过分析模型输出信号与实际输出之间误差,实现对传感器故障的实时检测。本文将灰色预测算法引入到风力发电系统中,对传感器故障进行预测,并通过效果评价指标衡量诊断效果,针对风力发电系统的强非线性,建立 T-S 模糊模型,采用并行分布补偿(Parallel Distributed Compensation, PDC)^[16]设计状态反馈控制器,利用未发生故障的状态反馈回路平均分担故障回路的控制作用,推导出控制律重构算法,实现容错控制。

1 风力发电系统模型

建立风速模型,空气动力学模型,驱动链模型,塔架模型,变桨系统以及电力系统模型,并忽略这些模型中的一些动态特性^[17],系统模型如图 1 所示。风机捕获风能并转换成机械能,通过驱动链带动发电机转子旋转,由发电机将机械能转换为电能,经过转换器整流逆变后输送到电网。

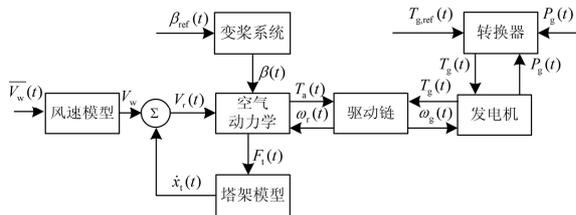


图 1 风能转换系统的基本结构
Fig. 1 Basic structure of wind energy conversion system

根据贝兹理论,风轮机产生的机械功率^[18]为

$$P_{wr}(t) = 0.5\pi\rho v^3(t)R_l^2 C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (1)$$

其中: ρ 为空气密度; R_l 为风轮机风轮半径, $v(t)$ 为风速; $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ 为风能功率系数(Power Coefficient), $\lambda(t)$ 是叶尖速比(Tip Speed Ratio)和桨叶节距角的函数 $\beta(t)$ 。

风轮机产生的风力矩为

$$\Gamma_{wr}(t) = \frac{P_{wr}(t)}{\Omega_l(t)} = 0.5\pi\rho v^2(t)R_l^3 C_r(\lambda(t), \beta(t)) \quad (2)$$

其中, $C_r(\lambda(t), \beta(t))$ 为转矩系数。

$$C_r(\lambda(t), \beta(t)) = C_p(\lambda(t), \beta(t))/\lambda(t)$$

在额定风速以下时,调节发电机的电磁转矩跟随风速变化,使 $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ 达到最大值,实现风能的最大捕获。在额定风速以下时, $\beta(t) = 0$,则 $C_p(\lambda(t), \beta(t)) = C_p(\lambda(t))$ 。此时功率系数 $C_p(\lambda(t))$ 由以下多项式形式给出^[19]。

$$C_p(\lambda(t)) = -4.54 \times 10^{-7} \lambda^7 + 1.3027 \times 10^{-5} \lambda^6 - 6.5416 \times 10^{-5} \lambda^5 - 9.7477 \times 10^{-4} \lambda^4 + 0.0081 \lambda^3 - 0.0013 \lambda^2 + 0.0061 \lambda$$

如图 2 所示为 $C_p - \lambda$ 曲线,当叶尖速比 $\lambda = 7$ 时, C_p 取得最大值 0.476,则 $\lambda = 7$ 为最佳叶尖速比。

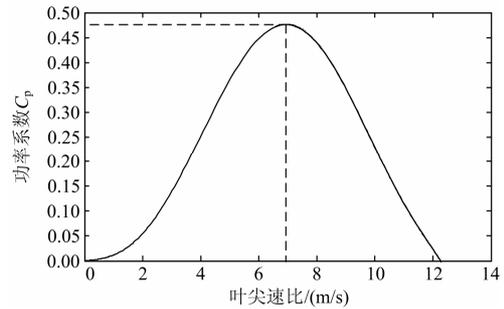


图 2 $C_p - \lambda$ 曲线

Fig. 2 Curve of $C_p - \lambda$

在系统建模时忽略发电机的电磁响应的动态过程,风能转换系统动态状态方程表示为^[20]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3)$$

$$y = Cx(t)$$

其中: $x(t) = \begin{bmatrix} \Omega_h \\ \Gamma_G \end{bmatrix}$; $u(t) = \Gamma_{ref}^*$;

$$A(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{\Gamma_{wr}(\Omega_h/i_o, v)}{i_o \cdot J_t \cdot \Omega_h} & -\frac{1}{J_t} \\ 0 & -\frac{1}{T_G} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_G} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \Gamma_G \text{ 表示发电机电磁转矩; } \Gamma_{wr} \text{ 表示风力矩; } \Gamma_{ref}^* \text{ 表示电磁转矩的参考值; } \Omega_h \text{ 表示发电机转子转速; } J_t \text{ 表示高速轴端的转动惯量; } J_g \text{ 表示发电机转子的转动惯量。}$$

从风能转换系统状态方程(3)可知系统的控制输入为参考的电磁转矩 Γ_{ref}^* , $\{A, B\}$ 是可控的,且矩阵 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。

从风能转换系统状态方程(3)可知系统的控制输入为参考的电磁转矩 Γ_{ref}^* , $\{A, B\}$ 是可控的,且矩阵 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。

2 动态等维新信息灰色故障预测算法

当风力发电系统未发生传感器故障时, 其数据信息是已知的、可靠的, 而故障后的数据信息是不真实的, 未知的, 因而可以看作是一个灰色系统。利用灰色动态预测进行风力发电系统传感器故障诊断就是利用可靠的已知信息去预测未知的信息, 将预测信息与实际采样数据进行比较、判断、决策来诊断传感器的状态。

2.1 GM(1,1)灰色预测模型

灰色模型 GM(1,1) 建立过程^[15]: 对原始输入序列 $\{x^{(0)}\}$ 作一次累加生成数列 $\{x^{(1)}\}$, 其生成规律可以通过求解一阶线性微分方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 得到。

设待定参数向量 $\theta = [a, b]^T$, 利用最小二乘法求解得到 $\theta: \theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y$ 。估计出参数 a 、 b 之后, 求得时间响应函数为

$$\hat{x}^{(1)}(t) = \left(x^{(1)}(t_0) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(t-t_0)} + \frac{b}{a} \quad (4)$$

2.2 动态等维新信息灰色预测模型

将灰色预测模型应用于故障诊断中, 将产生以下问题, 即随着时间的推移, 未来时刻越远, 预测值的灰色区间越大, 可这些增加的维数对计算参数向量 θ 是毫无必要的。真正有实际意义且精度较高的预测值是最近的数据。

针对这些问题, 本文对灰色预测模型进行改进, 提出了动态等维新信息灰色预测模型。其主要思想: 利用现有少量数据建立灰色预测模型预测下一个值, 再将预测值补充到已知数列中, 并将已知数列中最早的一个数据剔除, 保持数列维数不变, 这样逐步预测, 达到自我更新的效果, 提高预测精确性。

假设 i 时刻 $\Phi(i)$ 和 $Y(i)$ 均为维数是 k 的矩阵, 动态等维新信息灰色预测模型的预测算法如下。

$$\Phi(i) = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(i), 1 \\ -z^{(1)}(i+1), 1 \\ \vdots \\ -z^{(1)}(i+k-1), 1 \end{bmatrix}$$

$$Y(i) = \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ x^{(0)}(i+1) \\ \vdots \\ x^{(0)}(i+k-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$z^{(1)}(j) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(j) + x^{(1)}(j-1))$$

$$j = i, i+1, \dots, i+k-1$$

参数向量 θ 为

$$\theta(i) = (\Phi^T(i)\Phi(i))^{-1} \Phi^T(i)Y(i) \quad (6)$$

微分方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(i+k) = \left(x^{(1)}(i) - \frac{\hat{b}(i)}{\hat{a}(i)} \right) e^{-\hat{a}(i)(k)} + \frac{\hat{b}(i)}{\hat{a}(i)} \quad (7)$$

对预测累加值再作累减还原, 得预测值

$$\hat{x}^{(0)}(i+k) = \hat{x}^{(1)}(i+k) - \hat{x}^{(1)}(i+k-1) \quad (8)$$

动态等维新信息灰色预测算法流程如图3所示。

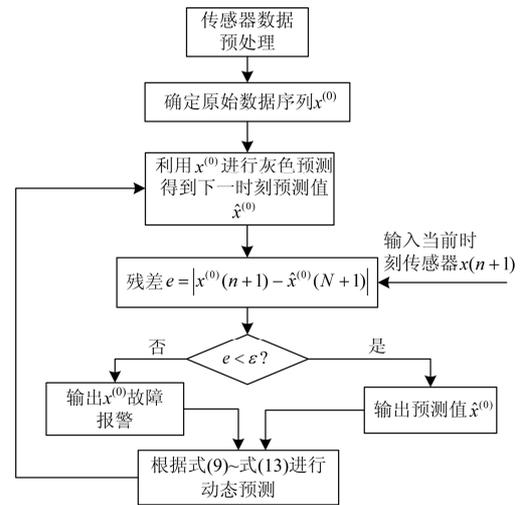


图 3 动态等维新信息灰色算法流程图

Fig. 3 Flow chart of dynamic reform grey algorithm

(1) 采集风力发电系统传感器前 n 个时刻值, 构成预测值数列 $\{x^{(0)}\}$ 。 $\{x^{(0)}\}$ 可以通过检索历史数据库获得传感器的 n 个历史采样数据, 或者在进行故障诊断前预先进行 n 个采样。

(2) 对原始数列 $\{x^{(0)}\}$ 累加生成数列 $\{x^{(1)}\}$, 通过式(5)~式(8)得出下一个时刻传感器输出的预测值 $\left\{ \hat{x}^{(0)} \right\}$ 。

(3) 采样时间到达后取得传感器输出的实际值, 计算实际值和预测值之间的误差 e 是否在规定的阈值 ε 之内, 具体采用多大的数值, 视情况而定, 若超过阈值时, 系统输出风力发电系统故障警报, 进行控制律重构容错控制。

3 容错控制策略的设计

3.1 风力发电系统T-S模糊模型

对风能转换系统(3), 参数不确定 T-S 模糊模型的模糊规则表示为^[21]

R^i : If $z_1(t)$ is M_{i1} and, ..., and $z_p(t)$ is M_{ip} ,
Then

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) &= C_i x(t) \quad i=1,2,\dots,r \end{aligned} \quad (9)$$

对于系统(4), 采用 PDC 策略, 建立系统的模糊无记忆状态反馈控制律, 控制器输入的第 i 条规则为

R^i : If $z_1(t)$ is M_{i1} and, ..., and $z_p(t)$ is M_{ip} ,
Then

$$u_i(t) = r(t) - K_i x(t) \quad i=1,2,\dots,r \quad (10)$$

其中: K_i 是第 i 个子系统待解反馈增益矩阵; $r(t)$ 是参考输入信号。则清晰化后可以得到总的非线性状态反馈控制器为

$$u(t) = r(t) - \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i x(t) \quad (11)$$

则 T-S 建模的风力发电系统可以等效为如图 4 所示的系统框图。

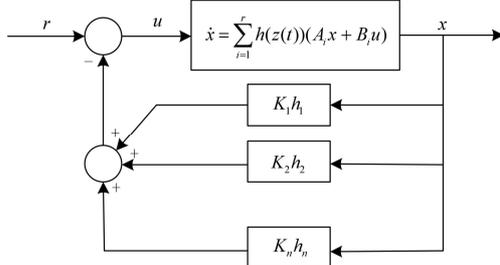


图 4 T-S 建模的风力发电系统框图

Fig. 4 System block diagram of wind energy conversion system based on T-S fuzzy model

考虑系统某传感器发生失效故障的情况, 引入传感器的故障模型矩阵 L_i 为

$$L_i = \begin{cases} I & \text{传感器正常} \\ 0 & \text{传感器失效} \end{cases}; \quad i=1,2,\dots,n \quad (12)$$

其中, I 为单位矩阵。此时非线性状态反馈控制器为

$$u_f(t) = r(t) - \sum_{i=1}^r L_i (h_i K_i)' x(t) \quad (13)$$

其中, $(h_i K_i)'$ 是重构控制律。对于故障系统, 希望通过适当的控制, 使系统性能尽可能地与原系统性能一致, 即

$$u_f(t) = u(t) \quad (14)$$

或

$$r(t) - \sum_{i=1}^r L_i (h_i K_i)' x(t) = r(t) - \sum_{i=1}^r h_i K_i x(t)$$

由式(14)得, 可以寻求状态反馈控制律的重构实现与原系统控制律一致, 并满足系统稳定运行。

3.2 状态反馈容错控制律

定理 1 对于 T-S 建模的非线性控制系统, 当任一 PDC 状态反馈传感器 K_i 失效时, 故障系统重组反馈控制律公式为^[22]

$$\begin{aligned} (h_1 K_1)' &= h_1 K_1 + \frac{h_i K_i}{n-1} \\ &\vdots \\ (h_{i-1} K_{i-1})' &= h_{i-1} K_{i-1} + \frac{h_i K_i}{n-1} \\ (h_i K_i)' &= 0 \\ (h_{i+1} K_{i+1})' &= h_{i+1} K_{i+1} + \frac{h_i K_i}{n-1} \\ &\vdots \\ (h_n K_n)' &= h_n K_n + \frac{h_i K_i}{n-1} \end{aligned} \quad (15)$$

按照式(15)进行控制律重组可以保证非线性控制系统在任一传感器失效时控制作用与原系统一致, 并保证系统稳定运行。

4 实验设计与仿真研究

4.1 整体设计思想

为了检验基于动态等维信息灰色预测的故障诊断和状态反馈容错控制律的适用性, 对风力发电系统进行了仿真, 系统仿真数据如表1所示。为方便研究, 假设(1)系统不存在扰动不确定性; (2)失效故障不可逆, 一旦故障发生即为永久失效。假设风力发电系统最初运行在稳定状态, $t = 60$ s后, 出现传感器断相故障。

风能转换系统的容错控制闭环结构如图5所示, 利用动态等维新信息灰色预测模型 GM(1,1) 系统对传感器失效故障诊断和检测, 在准确获取系统故障信息的基础上实现系统状态反馈控制律的自动重构。

基于对风能转换系统的理论分析, 以 Matlab7.1 为仿真平台, 在 Simulink 中构建风能转换系统的非线性仿真模型, 为基于灰色动态 GM(1,1) 预测模型的故障诊断提供数据。

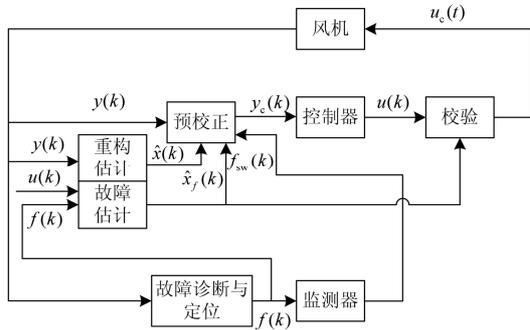


图 5 风能转换系统的容错控制闭环结构示意图

Fig. 5 Closed loop structure diagram of fault-tolerant control of wind energy conversion system

表 1 仿真数据

Table 1 Simulation data

参数	参数值	参数	参数值
R	2.5 m	ρ	1.25 kg/m ³
i_0	6.25	η	0.95
J_1	3.6 kg · m ²	C_{pmax}	0.476
L_t	150 m	λ_{opt}	7

4.2 基于GM(1, 1)传感器故障预测

利用正常运行状态下的预处理数据验证灰色动态预测的效果。仿真中, 用于灰色动态预测的原始数据的个数 $L = 6$, 即利用每前6个时刻的样本数据预测下一时刻的数据。

在特征数据中按照故障模型化方法, 在时间 $t = 60$ s 注入传感器断相故障, 通过灰色动态预测来诊断故障。在没有容错控制器情况下, 断开任何一相传感器, 实际输出和故障输出差值如图6所示, 差值变化范围1%~30%, 为保证传感器故障发生时, 能及时进行控制律重构, 因此选取2%为阈值。

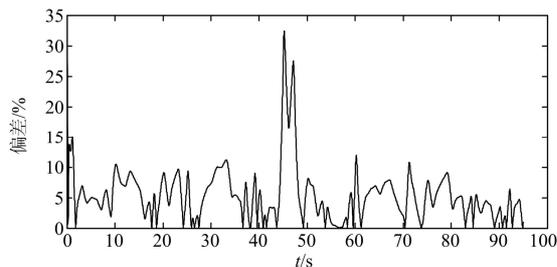


图 6 实际输出与故障输出偏差值曲线

Fig. 6 Curve of the actual output and fault output deviation

发电机电磁转矩 Γ_G 实际值、故障值及故障预测值的变化曲线如图7所示。

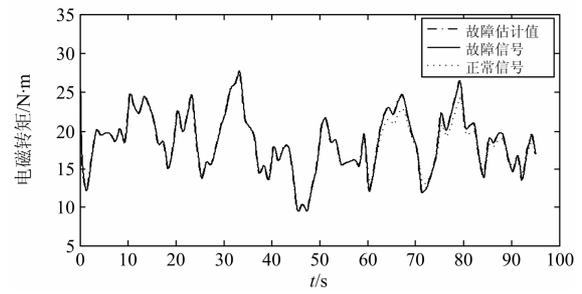


图 7 正常和故障状态电磁转矩对比

Fig. 7 Comparison of electromagnetic torque between normal and fault condition

从图7可以看出, 系统根据灰色预测算法, 可以很好地预测信号。当发生严重故障导致系统结构变化时, 诊断残差曲线开始超过2%的限定阈值, 即灰色预测模型能及时准确地检测出故障, 准确地判断系统已经发生故障, 进行控制律重构。

4.3 基于状态反馈容错控制

对于 T-S 建模的风力发电系统控制器, 当任一 PDC 状态反馈传感器 K_i 失效时, 对电磁转矩 Γ_G 的影响相同, 所以在故障诊断的基础上, 设 A 相发生断相故障, 并对此传感器断相故障进行状态反馈容错控制。

根据定理1的重构方法设计系统容错控制器。系统的状态反馈控制增益分别为

$$K_1 = [-1.3347 \quad 3.9199]$$

$$K_2 = [-1.3347 \quad 3.9199]$$

$$K_3 = [0.2373 \quad -1.0655]$$

$$K_4 = [0.2373 \quad -1.0655]$$

如图8为风速波形 v , 风能转换系统在 $t = 60$ s 后发生传感器 K_1 失效, 控制律重组前后的功率系数 C_p 和叶尖速比 λ 波形如图9和图10所示, 从图中可以看出在故障发生时刻 $t = 60$ s, 未进行容错控制之前, 风能转换系统性能严重恶化, 偏离了正常工作点。当检测到传感器 K_1 失效后, 系统通过故障

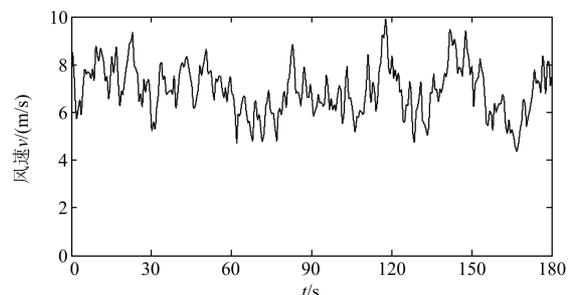
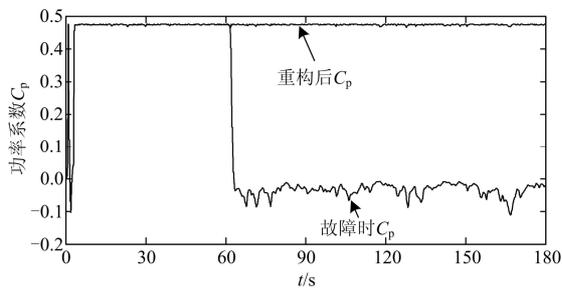
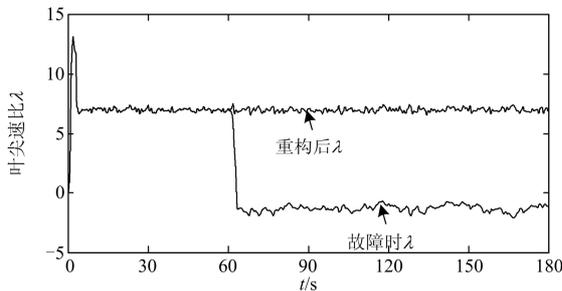


图 8 风速

Fig. 8 Wind speed

图9 功率系数 C_p Fig. 9 Power coefficient C_p 图10 叶尖速比 λ Fig. 10 Tip speed ratio λ

检测自动进行控制律重构后的功率系数 C_p 在 0.466~0.476 之间波动, 并保持在 0.476 左右, 叶尖速比 λ 仍保持在 7 m/s 左右波动, 实现系统最大风能捕获, 并稳定运行。

以上得到的是状态反馈控制系统在 K_1 传感器失效时进行重组情况, 同样也适用于 K_2 , K_3 , K_4 传感器失效的情况, 这里不再一一列举。

5 结语

在本文中, 利用 T-S 模糊模型建模的方法, 建立风力发电系统的 T-S 模糊模型, 提出了一种基于动态等维新信息灰色预测的传感器故障检测方法, 同时设计状态反馈容错控制律。通过对风力发电系统传感器断相故障诊断仿真分析, 表明该故障诊断和容错控制方法具有预测精度高, 预测误差小等优点。状态反馈容错控制系统能够自动诊断传感器断相故障, 实现从正常系统的控制到故障系统控制的无扰动切换, 使系统在传感器故障的情况下依然具有良好的容错控制性能和动态性能, 保证了传感器失效时, 风能转换系统仍能实现最大风能捕获, 并稳定运行, 进而实现了对传感器故障的容错控制, 具有广阔的应用前景和价值。

参考文献

[1] 尹明, 王成山, 葛旭波, 等. 中德风电发展的比较与分

析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 157-162, 182.

YIN Ming, WANG Cheng-shan, GE Xu-bo, et al. Comparison and analysis of wind energy China and Germany[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 157-162, 182.

[2] 聂倩雯, 高玮. 基于关联规则数据挖掘技术的电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9): 8-14.

NIE Qian-wen, GAO Wei. A power network fault diagnosis method based on data mining association rules[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 8-14.

[3] 李江, 李国庆. 容错控制在电力系统中的应用研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 140-146.

LI Jiang, LI Guo-qing. A survey on application of fault tolerant control in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 140-146.

[4] 杨之俊, 吴红斌, 丁明, 等. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.

YANG Zhi-jun, WU Hong-bin, DING Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.

[5] HANG Jun, ZHANG Jian-zhong, CHENG Ming, et al. An overview of condition monitoring and fault diagnostic for wind energy conversion system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 261-271.

[6] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.

HAN Ao-yang, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.

[7] 张柯. 基于滑模观测器控制系统的故障诊断与容错控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHANG Ke. Fault diagnosis and fault-tolerant control for control system based on sliding mode integral observers[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[8] 朱大奇, 孔敏. 基于平衡学习的CMAC神经网络非线性滑模容错控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 81-86.

- ZHU Da-qi, KONG Min. Fault tolerant control of nonlinear system based on balanced learning CMAC neural network[J]. *Control Theory & Application*, 2008, 25(1): 81-86.
- [9] 张绍杰, 刘春生, 胡寿松, 等. 一类 MISO 最小相位系统的执行器故障自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(7): 1084-1087.
- ZHANG Shao-jie, LIU Chun-sheng, HU Shou-song, et al. Adaptive fault tolerant control for a class of MISO minimum phase systems with actuator failures[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(7): 1084-1087.
- [10] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- DENG Ju-long. The basic methodology gray system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [11] 黄大荣, 黄丽芬. 灰色系统理论在故障预测中的应用现状及其发展趋势[J]. *火炮发射与控制学报*, 2009, 33(3): 88-92.
- HUANG Da-rong, HUANG Li-fen. Present situation and development tendency of grey system theory in fault forecast application[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2009, 33(3): 88-92.
- [12] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2008.
- LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, et al. Gray system theory and its application[M]. Third Edition. Beijing: Science Press, 2008.
- [13] 严浙平, 陈涛, 秦政, 等. 灰色动态预测在 AUV 传感器故障诊断中的应用[J]. *传感器技术学报*, 2008, 32(6): 1002-1006.
- YAN Zhe-ping, CHEN Tao, QIN Zheng, et al. Present situation and development tendency of grey system theory in fault forecast application[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2008, 32(6): 1002-1006.
- [14] 吴金广, 史金龙. 基于灰色预测模型的传感器的故障诊断方法[J]. *电气自动化*, 2005, 27(4): 74-76.
- WU Jin-guang, SHI Jin-long. The fault diagnosis method of the sensor based on grey predictive model[J]. *Electrical Automation*, 2005, 27(4): 74-76.
- [15] 周媛, 朱大奇. 水下机器人传感器故障诊断的灰色预测模型[J]. *中国造船*, 2011, 52(1): 137-144.
- ZHOU Yuan, ZHU Da-qi. A sensor fault diagnosis method for underwater vehicles based on GM(1,1)[J]. *Shipbuilding of China*, 2011, 52(1): 137-144.
- [16] TANAKA K, WANG H O. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [17] ESBENSEN T, SLOTH C. Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines[D]. Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2009.
- [18] MUNTEANU I, BRARCU A I, CUTULULIS N A, et al. Optimal control of wind energy systems[M]. London: Springer, 2008: 28-135, 150-158.
- [19] 孟涛, 沈艳霞, 纪志成. 基于风能转换系统的 T-S 模糊建模与控制[J]. *微特电机*, 2011, 39(10): 68-72.
- MENG Tao, SHEN Yan-xia, JI Zhi-cheng. Wind energy conversion systems using T-S fuzzy modeling[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2011, 39(10): 68-72.
- [20] 孙金生, 王执铨, 李军. 状态反馈控制系统的容错控制又一策略[J]. *控制理论与应用*, 1995, 12(4): 519-523.
- SUN Jin-sheng, WANG Zhi-quan, LI Jun. A new algorithm of fault-tolerant control with state feedback control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 1995, 12(4): 519-523.
- [21] 巩长忠. 基于 T-S 模糊模型的控制方法及稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- GONG Chang-zhong. Control method and stability analysis based on T-S fuzzy model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [22] HE Qing-nan, SHEN Yan-xia, JI Ling-yan. Fault tolerant control strategy for nonlinear system based on feedback control[C] // *Proceedings of the American Control Conference, 2013 American Control Conference (ACC 2013)*, June 17-19, 2013, Washington, DC, United States. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2013: 4897-4902.

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-11-25

作者简介:

季凌燕(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程;

沈艳霞(1973-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电机非线性控制, 风力发电等方面的教学与科研工作; E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn

吴定会(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为故障诊断与容错控制。