

文章编号: 0254-0096(2020)05-0142-08

基于模型的风电机组偏航系统故障检测方法

赵洪山¹, 董叶叶¹, 宋 鹏², 邓 春²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 保定 071003;

2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045)

摘 要: 提出基于模型的风电机组偏航系统故障检测方法。首先以永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)作为偏航驱动电机,建立包含电流环、转速环和位置环的三闭环偏航伺服系统的动态模型;然后将实际偏航系统的传感器采集量与所建模型对应状态量的输出进行比较得到残差,并将相应状态变量的残差作为故障检测变量;接着利用过程统计控制理论定义阈值作为偏航系统故障检测的判定准则;最后通过 Matlab/Simulink 仿真平台模拟3种典型故障:偏航系统传动机构卡死、驱动电机故障和传感器故障。仿真结果验证所提方法的有效性。

关键词: 风电机组; 偏航系统; 残差; 故障检测

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

风电机组长期运行于恶劣的自然环境中,极端气候条件给风电机组各部件造成不可避免的损伤,导致其故障频发^[1-2]。近年来,随着风电机组单机容量的不断增加及结构越来越复杂,故障率明显上升^[3]。据相关数据分析显示^[4-6],风电机组的传动系统、变桨系统、电气系统、偏航系统等均为故障高发部位。一旦发生故障,机组将进行计划外停机检修,轻则降低发电量,重则更换零部件增加维修费用,严重影响风电场的经济效益^[7-8]。故风电机组故障诊断虽引起业界众学者的重视,但现阶段针对风电机组偏航系统故障检测的研究还相对较少。

故障检测方法一般分为2类:基于数据的故障检测方法和基于模型的故障检测方法。目前,对于偏航系统故障检测的研究大多集中在基于数据的故障检测方法方面。运用蚁群算法、神经网络等算法对采集到的数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统数据进行处理,提取故障信息进行故障检测。或是对现有算法加以优化改进,提高对偏航故障检测的有效性和可靠性^[9]。基于数据的故障检测方法虽然避免了复杂耗时的建模过程,能够快速检测出故障,但易受系统运行的影响。在系统发生扰动或

运行状态发生改变时,可能会造成误报警。而基于模型的故障检测方法能充分利用系统内部的深层信息,有效反映物理系统故障的本质特征。基于模型的故障检测方法已在风电机组其他部件的故障检测中得以实现。文献[10]通过建立风电机组液压变桨距系统的状态空间模型及其状态观测器,设计自适应阈值,利用残差均方根进行故障诊断。文献[11]则利用非线性状态估计方法,建立变桨控制系统模型,通过观测向量与正常变桨模型的偏差实现对变桨系统的故障识别。文献[12]设计基于电流的观测器和自适应阈值,对直驱式风电机组变流器进行故障检测,并利用电流均值进行故障定位。文献[13]根据双馈风电系统模型,建立转子电流的状态观测器,并据此实现转子变流器的故障检测。

本文提出一种基于模型的偏航故障检测方法,建立偏航系统的动态模型,将其与实际系统并行运行后得到残差,用残差均值作为故障检测变量,并与阈值进行比较来判断偏航系统是否发生故障。算例分析针对偏航系统经常发生的3种典型故障:偏航系统传动机构卡死、偏航驱动电机故障、传感器故障进行仿真实验,验证该方法的有效性。

1 偏航系统的控制原理

自然界的风包含了风速和风向2个变量。根据空

收稿日期: 2017-11-13

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAA06B03)

通信作者: 赵洪山(1965—),男,博士、教授,主要从事电力系统运行与控制,电力设备的故障诊断与优化检修方面的研究。

zhaohshen@126.com

气动力学中的贝茨理论可知,单位时间内风力机叶片能够捕获的风功率 P_w 及其转化的机械功率 P_m 表达式分别为^[14-15]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (2)$$

式中, ρ ——空气密度; S ——扫掠面积; v ——风速; C_p ——风能利用系数。

上述表达式仅考虑了风速对风功率的影响,并未考虑风向因素,即假定风轮处于迎风状态,此时风轮所捕获的风功率最大。以迎风状态时机舱的位置为起始位置,风向发生改变,风向与机舱位置之间的夹角为 θ ,此时决定风功率大小的有效风速应为此风速在机舱位置方向上的分量,则风电机组实际输出的机械功率为^[16]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p (v \cos \theta)^3 \quad (3)$$

式中, θ ——风向与机舱位置之间的夹角。

当 θ 为 0° ,即风轮处于迎风状态时,风轮捕获的风功率达最大,转换成的机械功率也达最大。随着 θ 的增大,风轮捕获的风功率逐渐减小,当 θ 增大至 $\pm 90^\circ$ 时,风轮处于 90° 侧风状态,捕获的风功率为零,此时风电机组输出功率为零,风力机处于停机状态。由上述分析可知风向与机舱位置之间的夹角即为偏航角 θ 。偏航系统的主要功能就是通过控制机舱旋转,使偏航角 θ 减小为 0° ,风力机处于迎风状态,从而实现最大风能捕获。在不考虑电缆缠绕条件下,偏航角 θ 处于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内时,风力机正向转动 θ ; 当偏航角 θ 处于 $0^\circ \sim -180^\circ$ 时,风力机反向转动 θ 。实际情况中,若风力机一直向同一个方向旋转会造成电缆缠绕,缠绕圈数达到一定阈值时会发生电缆断裂等故障,故偏航系统还需实现自动解缆功能。自动解缆需要通过计算机舱旋转的累计角度,模型难以实现且不易发生故障,因此本文主要研究偏航系统旋转对风过程中发生的故障检测,暂不考虑电缆缠绕问题。

因自然风的随机性,风向处于时刻变化中。由于风轮及偏航机构具有滞后性,偏航系统不能对高频风向做出快速有效的反应。为减小磨损保证风力机寿命,一般设定一个偏航误差角 β 。当风速小于 9 m/s 时 β 约为 8° ,当风速大于 9 m/s 时 β 约为 15° 。当 $\theta < \beta$ 时,即偏航角未超过偏航误差角,控制系统不发送偏航指令,偏航系统不动作;当 $\theta > \beta$ 时,控制系统发出偏航指令,偏航电机启动,输出机械转矩带动传动机构使机舱开始旋转,机舱旋转至迎风位置停止,完成偏航过程。故偏航

系统可视为一个输入量为离散数据的位置伺服系统。

2 偏航系统的动态模型

以永磁同步电机(PMSM)作为偏航系统的驱动电机,构建包含电流环、速度环和位置环的三闭环控制系统来模拟偏航伺服系统,如图1所示。由风向信号和机舱位置信号之间的误差送入位置调节器,输出速度环给定信号,并与机舱转速做差送入速度调节器,输出电流环给定信号,再与电机定子电流做差送入电流调节器,最后通过电流控制器输出三相定子电压来控制偏航电机进行偏航操作。

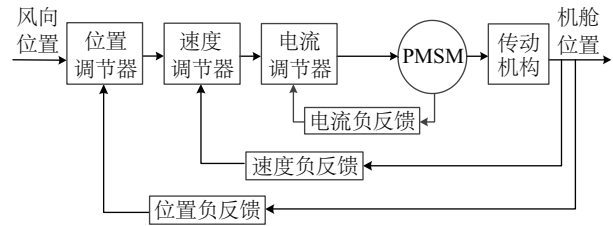


图1 偏航系统控制结构

Fig. 1 Control structure of yaw system

2.1 永磁同步电机动态模型

为方便 PMSM 控制器的设计,选择同步旋转坐标系 $d-q$ 下的数学模型^[17-18],定子电压方程表示为:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q \\ u_q = R i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \psi_d \end{cases} \quad (4)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (6)$$

式中, u_d 、 u_q ——定子电压 $d-q$ 轴分量; R ——定子电阻; i_d 、 i_q ——定子电流 $d-q$ 轴分量; ψ_d 、 ψ_q ——定子磁链 $d-q$ 轴分量; ω ——电角速度; L_d 、 L_q ——定子电感 $d-q$ 轴分量; ψ_f ——永磁体磁链。

此时,电机运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (7)$$

$$\omega_e = p\omega_m \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (9)$$

式中, J ——电机转动惯量; ω_m ——电机机械角速度; ω_e ——电机电角速度; B ——阻尼系数; T_e ——电磁转矩; T_L ——负载转矩; p ——电机极对数。

式(4)~式(9)是针对内置式三相 PMSM 建立的数学模型,对于表贴式三相 PMSM,由于定子电感满足 $L_d = L_q = L_s$ (L_s 为定子电感),式(9)可简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q \psi_f \quad (10)$$

永磁同步电机控制包括转速环和电流环,其中电流环采用滞环电流控制瞬态电流输出的方法,能够快速稳定的调节电机转速,有良好的鲁棒性,而转速环采用传统 PI 控制器对电机进行控制^[19]。

2.2 传动系统动态模型

传动系统的作用是实现偏航电机到机舱的减速转动,一般采用齿轮传动。传动系统的数学模型为^[20]:

$$\begin{cases} J_c \frac{d\omega_c}{dt} = T_c - T_r \\ J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_c' - T_r \\ T_c \omega_c = T_c' \omega_r \\ \omega_c / \omega_r = k \end{cases} \quad (11)$$

式中, J_c ——偏航电机转动惯量; ω_c ——偏航电机角速度; T_c ——电机作用于传动轴的力矩; J_r ——机舱转动惯量; ω_r ——机舱转动角速度; T_c' ——传动轴驱动负载力矩; T_r ——机舱转动时的阻力矩; k ——偏航传动机构的传动比。

实际搭建模型过程中,由于偏航电机转速和机舱转速之间存在传动比的关系,因而可以借助传动比 k ,用 w_c 模拟 w_r 。

2.3 传感器模型

传感器模型一般可视为一个典型的一阶惯性环节,可简化为传递函数模型,即:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (12)$$

式中, K ——传感器反馈系数; τ ——反馈滤波时间常数。

偏航系统模型中采用 3 个传感器,分别模拟风向仪传感器、机舱位置传感器和偏航角速度传感器。

3 基于模型的偏航系统故障检测

基于模型的偏航系统故障检测原理如图 2 所示,图中 $r(t)$ 代表残差。将所建偏航系统模型与实际偏航系统并行运行,得到相应输出变量的残差,通过对残差的

处理分析及阈值的设定,进行故障检测。

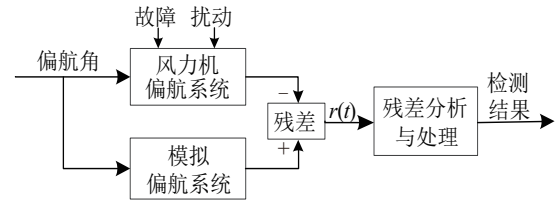


图2 故障检测流程图

Fig. 2 Flow chart of fault detection

3.1 残差的估计函数

残差是数学模型与实际系统之间相应输出变量的差值,反映两者之间的不一致程度。

取偏航角速度残差和偏航驱动电机电流残差分别为:

$$r_\omega(t) = \omega_{\text{mod}}(t) - \omega_{\text{real}}(t) \quad (13)$$

$$r_i(t) = i_{\text{mod}}(t) - i_{\text{real}}(t) \quad (14)$$

式中, $r_\omega(t)$ ——偏航角速度残差; $r_i(t)$ ——偏航电机电流残差; 下标: mod 代表模型输出量; real 代表系统实际输出量。

残差取均值作为故障检测变量:

$$D_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_j(t) \quad (15)$$

式中, D_{mean} ——残差均值; n ——样本数量; $r_j(t)$ ——第 j 个残差值。

显然,当系统无故障时,残差均值 D_{mean} 接近于 0,反之则说明系统存在异常。

3.2 阈值的设计

残差估计的目的是在避免误报警的前提下,判断系统是否发生故障。为实现此目的,引入阈值作为判断故障发生与否的标准。

利用残差的均值和方差构造阈值,定义检测阈值为:

$$D_{\text{th.mean}} = \mu_0 \pm \gamma \sigma_0^2 \quad (16)$$

$$\mu_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{0j} \quad (17)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (r_{0j} - \mu_0)^2 \quad (18)$$

式中, $D_{\text{th.mean}}$ ——检测阈值; μ_0 ——系统正常时的残差均值; γ ——比例系数, γ 一般可取 3~5,文中阈值设定 γ 取 3; σ_0^2 ——系统正常时的残差方差。

由此可进行故障检测:

$$\begin{cases} D_{\text{mean}} \geq D_{\text{th.mean}}, & \text{系统故障} \\ D_{\text{mean}} < D_{\text{th.mean}}, & \text{系统正常} \end{cases} \quad (19)$$

4 仿真分析

本文利用 Matlab/Simulink 仿真平台,搭建偏航伺服系统模型。以 1.5 MW 风电机组参数为例设计偏航系统模型参数,利用永磁同步电机作为偏航驱动电机^[21],参数如表 1 所示。

表 1 偏航系统模型参数

Table 1 Model parameters of yaw system

参数	数值
风力机转动惯量/kg·m ²	258300
风轮质量/t	35.200
机舱质量/t	50.900
偏航轴承直径/m	2.800
偏航轴承摩擦系数	0.010
偏航齿轮箱传动比	1050
大小齿轮传动比	9
制动阻尼力矩/Nm	200000
永磁同步电机额定转速/r·min ⁻¹	1500
永磁同步电机转子惯量/kg·m ²	0.004
永磁同步电机定子阻抗/Ω	0.174
永磁同步电机定子感抗/mH	2.885
永磁同步电机转子磁链/Wb	0.175
永磁同步电机极对数	4

4.1 偏航系统正常运行

大中型风力机偏航角速度在 0.51~1.80(°)/s 之间选择^[22]。偏航系统正常运行时的仿真结果如图 3 所示。图 3a 中,当偏航角为 30°时,偏航系统开始动作,此时偏航角速度最高达到 0.8°/s,对于 1.5 MW 风电机组来说处于正常范围。偏航电机转速未超过额定转速,机舱转过的角度由 0°逐渐增大至 30°后到达迎风位置,约在 100 s 时完成偏航指令,机舱旋转角度不再发生变化,此时偏航角速度和偏航电机转速也逐渐减小至零,偏航执行过程结束。图 3b 中,电流残差均值和偏航角速度残差均值在给定阈值范围内,说明系统未发生故障。

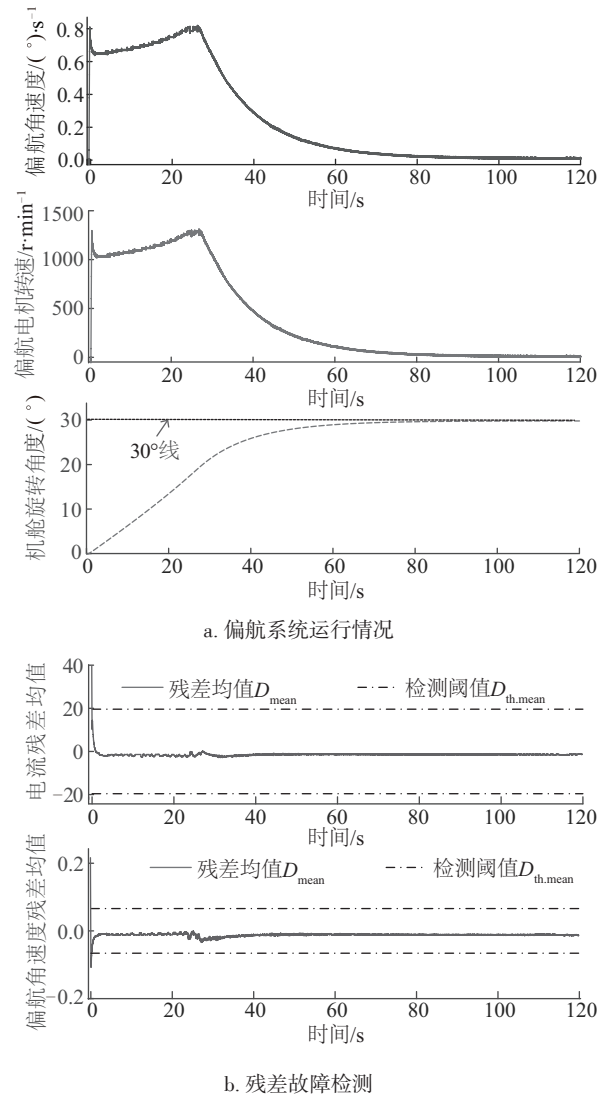


图 3 正常情况下仿真结果图

Fig.3 Simulation results of normal operation

4.2 偏航系统传动机构卡死故障

偏航系统发生传动卡死,即偏航过程中传动机构卡死而导致偏航电机不再转动,仿真结果如图 4 所示。偏航系统发生传动机构卡死故障,由于惯性原因,偏航角速度和偏航电机转速不可能在瞬间变为零,而是经过一段时间逐渐降为零。由于传动部分卡死无法转动,偏航角度不再有大变动。图 4a 中,若偏航系统在仿真时间 $t=30$ s 时发生传动机构卡死故障,偏航角速度和偏航电机转速在故障时发生改变,而后逐渐减小至零。机舱在 $t=30$ s 时旋转了约 20°,故障后旋转角度不会发生较大变化,不能完成旋转至 30°的偏航指令。由于所建立的偏航系统模型处于正常运行状态,故当实际偏航系统发生故障时,在开始阶段,残差会远超过阈值,随着

偏航系统模型的运行,偏航角速度和偏航电机电流不断减小直至偏航过程结束降为零,因而残差也在不断减小。图 4b 中,电流残差均值和偏航角速度残差均值在 $t=30\text{ s}$ 时越过阈值,表明系统发生故障,而后残差会重新回归至阈值范围内,与分析相符。

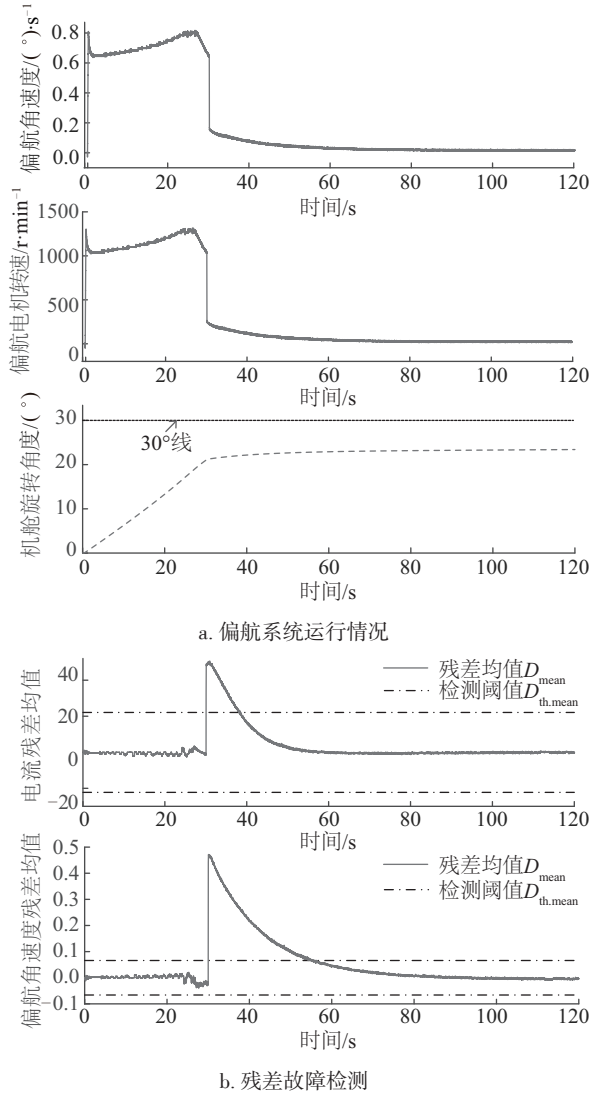


图4 传动卡死故障仿真结果图

Fig. 4 Simulation results of stuck of drive system

4.3 偏航驱动电机故障

偏航驱动电机发生故障,即电机内部出现问题导致电机毁坏停机,进而使偏航系统无法完成偏航指令,仿真结果如图 5 所示。通过偏航电机三相供电电压突变为单相来模拟电机缺相故障。电机缺相运行后,导致电机烧毁而不能正常使用,电机处于停机状态,输出转矩、电流、电压等均为零,故无法带动传动机构进行偏航操

作。图 5a 中,当 $t=30\text{ s}$ 时偏航电机发生故障而停机,偏航角速度,偏航电机转速和偏航电机电流均变为零,机舱旋转角度将保持故障前所转动的角度不再发生变化。由于偏航系统模型正常运行,偏航角速度残差和偏航电机电流残差会突然增大,随着偏航系统模型的运行,偏航角速度和偏航电机电流不断减小直至偏航过程结束降为零,因而残差也在不断减小。图 5b 中,电流残差均值和偏航角速度残差均值在 $t=30\text{ s}$ 时越过阈值,表明系统发生故障,而后残差会重新回归至阈值范围内,与分析相符。

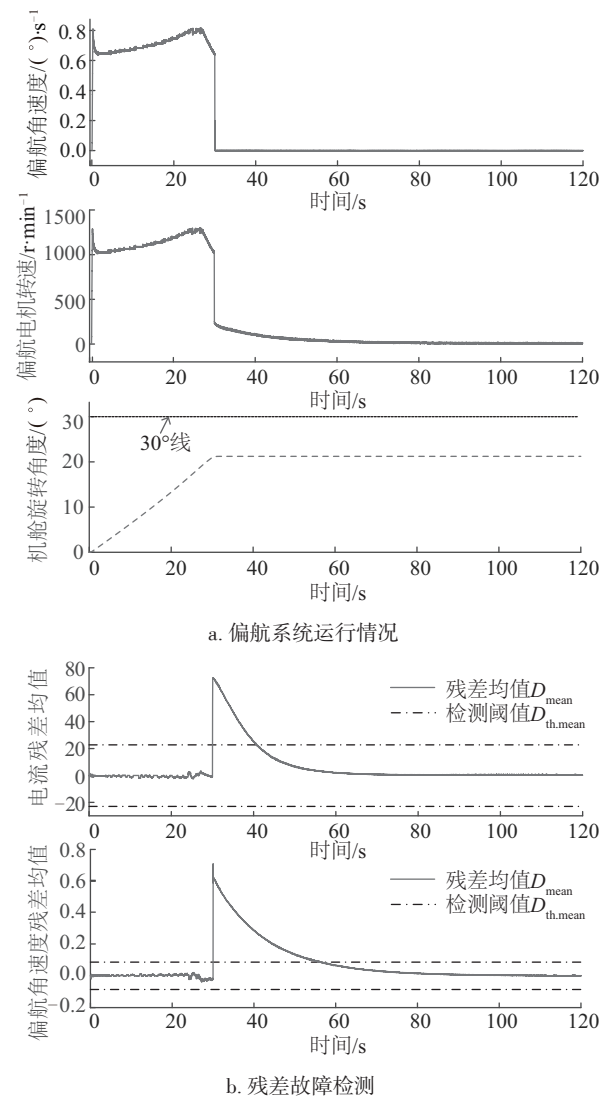


图5 偏航驱动电机故障仿真图

Fig. 5 Simulation results of driven motor damage

4.4 传感器故障

传感器发生故障后,不能准确反馈偏航位置信号,

此时偏航系统不能按照给定的偏航指令进行偏航操作,机舱无法正常旋转至偏航角度,仿真结果如图6所示。通过在机舱位置反馈支路上加入随机干扰信号来模拟传感器故障。传感器发生故障后不能准确反映机舱位置,此时偏航系统根据反馈回来的错误的机舱位置进行偏航操作。图6a中,当 $t=30\text{ s}$ 时传感器发生故障,此时机舱位置反馈信号不再准确反映机舱位置,而是反馈随机乱码信息,从而导致偏航角速度和偏航电机转速受到干扰,不能随偏航过程不断减小,无法正常进行偏航操作,机舱持续旋转而错过迎风位置。由于偏航系统模型处于正常运行状态,残差在故障时发生明显变化。图6b中,电流残差均值和偏航角速度残差均值在 $t=30\text{ s}$ 时开始越过阈值,且随机频繁波动,说明系统发生故障。

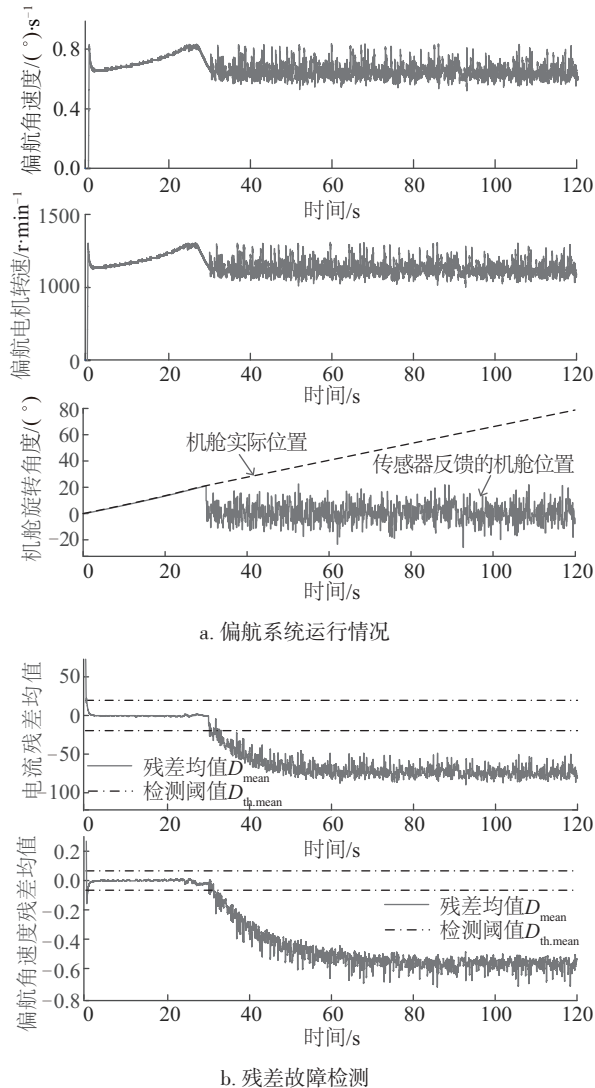


图6 传感器故障仿真图

Fig. 6 Simulation results of sensor failure

5 结 论

本文提出一种基于模型的偏航系统故障检测方法。分别建立偏航伺服系统各部分的数学模型,模拟实际偏航系统。利用所建模型与实际系统并行运行所得的残差均值,确定故障检测阈值,对偏航系统故障进行检测。此外,分别模拟偏航系统传动机构卡死故障、偏航驱动电机故障和传感器故障3种典型故障来验证该方法的有效性。根据仿真实验结果得到以下结论:

1) 基于模型的故障检测方法能够在偏航系统发生故障时,充分利用系统内部的深层信息,反映物理系统故障的本质特征。偏航角速度和偏航电机电流的故障特征明显,便于利用其进行故障检测,及时排查故障,降低风电场的损失。

2) 利用输出变量残差均值作为故障检测变量,用残差均值和方差进行阈值设计,方法简便有效,能够快速检测出故障,避免复杂的识别计算过程。

3) 偏航系统是一个由控制指令确定的复杂动态系统,而且组成结构复杂、涉及环节较多。为了能够实现每个环节的故障和异常检测,下一步需研究建立更加细化的模型,完成多种故障类型的检测。

[参考文献]

- [1] 李辉, 胡姚刚, 杨超, 等. 并网风电机组运行状态的物元评估方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 81-85.
LI H, HU Y G, YANG C, et al. A matter-element assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under on-line operating conditions[J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(6): 81-85.
- [2] KUSIAK A, LI W Y. The prediction and diagnosis of wind turbine faults[J]. Renewable energy, 2010, 36(1): 16-23.
- [3] QIAO W, LU D G. A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis—part I: components and subsystems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2015, 62(10): 6536-6545.
- [4] CHEN Z, GUERRERO J M, BLAABJERG F, et al. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE transactions on power electronics, 2009, 24(8): 1859-1875.
- [5] TAVNER P J, XIANG J, SPINATO F. Reliability

- analysis for wind turbines[J]. Journal of wind energy, 2006, 10(1): 1-18.
- [6] RIBRANT J, BERTLING L. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plant during 1997-2005[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [7] 张镇, 关书强. 风电机组故障统计分析研究[J]. 风能, 2013(8): 68-71.
- ZHANG Z, GUAN S Q. An analysis of wind turbine fault statistics[J]. Wind energy, 2013(8): 68-71.
- [8] RIBRANT J. Reliability performance and maintenance: a survey of failure in wind power systems[D]. Stockholm: Sweden: KTH School of Electrical Engineering, 2006.
- [9] 张海涛, 高锦宏, 吴国新, 等. 蚁群优化算法在风电偏航故障检测中的应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 48—55.
- ZHANG H T, GAO J H, WU G X, et al. Ant colony optimization applied in the fault detection of wind yaw[J]. Renewable energy resources, 2013, 31(11): 48-55.
- [10] 赵洪山, 张健平, 王桂兰, 等. 基于状态估计的风电机组液压变桨距系统故障检测[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 101-104.
- ZHAO H S, ZHANG J P, WANG G L, et al. State estimation based fault detection of hydraulic variable-pitch system for wind turbines[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(22): 101-104.
- [11] 尹诗, 余忠源, 孟凯峰, 等. 基于非线性状态估计的风电机组变桨控制系统故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊): 160-165.
- YIN S, YU Z Y, MENG K F, et al. Fault identification of pitch control system of wind turbine based on nonlinear state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Sup): 160-165.
- [12] 毛永梅, 彭涛, 韩华, 等. 基于观测器的双馈风电机电变流器开关管开路故障检测[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(3): 57-61.
- MAO Y M, PENG T, HAN H, et al. Open-circuited fault detection on switch of convertor in doubled wind power generator set based on state observer[J]. Computer aided engineering, 2015, 24(3): 57-61.
- [13] JLEASSI I, ESTIMA J O, KHIL E, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [14] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.
- LIU Q H, HE Y K, ZHAO R D. The maximal wind-energy tracing control of a variable-speed constant frequency wind power generation system[J]. Automation of electric power systems, 2003, 27(20): 62-67.
- [15] DO H T, DANG T D, ANH TRUONG H-V, et al. Maximum power point tracking and output power control on pressure coupling wind energy conversion system[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(2): 1316-1324.
- [16] 牛山泉. 风能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- NIU S Q. Wind energy technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [17] ERRAMI Y, MAAROUFI M, OUASSAID M. Modelling and control strategy of PMSG based variable speed wind energy conversion system[C]// International Conference on Multimedia Computing and Systems, Ouarzazate, Morocco, 2011.
- [18] MAZOLETTI M A, BOSSIO G R, DE ANGELO C H, et al. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(9): 7218-7228.
- [19] 王伟, 程明, 张邦富, 等. 电流滞环型永磁同步电机驱动系统的相电流传感器容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 59-66.
- WANG W, CHENG M, ZHANG B F, et al. Fault-tolerant control focusing on phase current sensors of permanent magnet synchronous machine drive systems based on hysteresis current control[M]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 59-66.
- [20] YANG G L, LI H G. Modeling instantaneous power control strategies of VAWT-PMSG power generation system[J]. Electric power automation equipment, 2009, 29(5): 39-42.
- [21] 金长生. 风力发电机偏航控制系统的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- JIN C S. The study of yaw control system of wind turbine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [22] JB/T 10425.2—2004, 风力发电机组偏航系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 501-512.
- JB/T 10425.2—2004, Wind turbine yaw system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 501-512.

MODEL-BASED FAULT DETECTION METHOD FOR YAW SYSTEM OF WIND TURBINE

Zhao Hongshan¹, Dong Yeye¹, Song Peng², Deng Chun²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: A model-based method for fault detection of wind turbine yaw system is presented in this paper. Firstly, a dynamic model of three-closed-loop yaw servo system including a current loop, a speed loop and a position loop is established, which uses a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) as the yaw drive motor. Then, comparing sensor signals of the actual yaw system and outputs of corresponding state variables of model obtains their residuals which are taken as fault detection criterion. Next, a threshold based on the statistical process control theory is defined as the criterion to detect faults of the yaw system. Finally, three typical faults in yaw system, such as stuck of drive system, driven motor damage and sensor failure, are simulated by MATLAB/Simulink. The simulation analysis results verify the effectiveness of the proposed fault detection method for yaw system.

Keywords: wind turbines; yaw system; residual; fault detection