

DOI: 10.7667/PSPC160235

基于解析冗余式的风机传动系统故障诊断

王俊年, 钱瞻, 陈茂林, 王磊

(湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了以系统有序的方法对风机的具体元件参数进行故障诊断, 给出一种基于键合图模型的故障诊断方法。键合图模型是一种跨能域的元件级模型, 因此能够定位到具体的故障元件。同时键合图模型能够清晰地表明各元件之间的关系, 因此适用于推导解析冗余式。通过解析冗余式可以对系统进行故障检测和隔离。为了能够系统地得到尽量多的解析冗余式, 提高故障的可隔离性, 该方法首先建立风机的键合图模型, 然后由键合图模型导出时间因果图, 由时间因果图导出变量关系图, 最后由变量关系图消除键合图中结点方程的未知变量得到解析冗余式。实验结果验证了采用该方法推导的解析冗余式能够用于风机参数故障的诊断。

关键词: 风机; 键合图; 解析冗余式; 时间因果图; 基于模型的故障诊断

Fault diagnosis of driven train system of wind turbine based on analytical redundancy relations

WANG Junnian, QIAN Zhan, CHEN Maolin, WANG Lei

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: A diagnosis method based on bond graph model is proposed for fault detection and isolation (FDI) of wind turbine components. Bond graph model can be used to locate fault components for it is a multidisciplinary component-level model, and to derive analytical redundancy relations (ARRs) for it can represent clearly the relationships between components. ARRs are often used to fault detection and isolation. In order to obtain as much ARRs as possible to improve the isolability, first of all, this paper builds the bond graph model of wind turbine, then uses the model to obtain temporal causal graph (TCG), according to TCG to obtain relations graph of variables. Finally, it eliminates unknown variables of junction functions of bond graph by relations graph of variables. The simulation results show the ARRs of this method can be used to parameter fault diagnosis of the wind turbine system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60974048), Open Fund Project of Hunan Universities Innovation Platform (No.11K027), and Postgraduate Innovation Fund of Hunan University of Science and Technology (No. S140022).

Key words: wind turbine; bond graph; analytical redundancy relations (ARRs); temporal causal graph (TCG); model-based fault diagnosis

0 引言

风能是当前最重要的清洁能源, 截至 2014 年, 全球总装机容量达 370 GW^[1]。风机的发展趋势越来越大型化, 而大型风机价格昂贵, 运行维护成本高, 因此风机的可靠运行越来越受到重视。为了提高风机的运行可靠性, 降低维护费用, 减少故障停机时间, 人们对于风机的状态监测方法^[2-4]、故障诊断和隔离方法^[5-8]、故障保护方法^[9-11]做了大量研究。状

态监测系统多用于风机的旋转部分^[12], 并通过基于数据的方法对系统进行检测和故障诊断。由于大型风机的复杂性, 很多研究只是针对某一种容易出现故障或故障代价高的部件, 如齿轮箱^[13]、轴承^[14]、电气系统^[15]。

为了测试各种不同的故障检测隔离方法以及调整方案, 文献[12, 16]描述了两种三叶片水平变速风机的基准模型, 基于这两种风机模型可以测试各种针对传感器、执行器和系统故障的不同故障诊断方法^[12, 17-18], 从而比较不同方法的优劣。不过, 这两种模型都是系统级模型, 子系统所使用的模型是简化模型, 因此并不能很好地定位到具体的系统元件。为了能够检测和定位具体的故障元件, 需要建立包

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60974048); 湖南省高校创新平台开放基金项目 (11K027); 湖南科技大学研究生创新基金 (S140022)

含系统结构和元件信息的元件级模型,而键合图模型能够满足这个要求,并且键合图作为一种各能域统一的建模方法,尤其适用于跨能域的复杂系统建模^[19]。本文采用键合图方法对风力发电系统中的风能-机械能转化系统进行建模和故障诊断。该方法根据键合图模型推导出解析冗余式(ARRs),根据所得ARRs可以得到理论故障特征矩阵,再将测量信号代入ARRs得到实际故障特征,最后将在线检测到的故障特征与理论故障特征进行匹配完成故障诊断。与其他方法相比,该方法能够充分利用变量之间的关系推导出更多的ARRs,且推导步骤简单,更具系统性和通用性。

1 风机的键合图建模

1.1 风轮功率转换模型

风轮功率转换模型的作用是将风能转化为作用于风力发电机组传动链上的机械能。从风能中得到的机械能可以表示为

$$P_w = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \pi R^2}{2} V_{wind}^3 \quad (1)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 h - C_3 \beta - C_4) e^{-C_5 h} + C_6 \lambda \quad (2)$$

$$h = \frac{1}{\lambda + C_7(2.5 + \beta)} - \frac{C_8}{1 + (2.5 + \beta)^3} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_{wind}} \quad (4)$$

式中: P_w 为风轮输出功率(W); $C_p(\lambda, \beta)$ 为风轮的风能利用率,是 λ 和 β 的函数; ρ 为空气密度(kg/m^3),在海平面上,温度为 288 K 时,其值为 $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$; R 为风轮叶片的半径(m); V_{wind} 为风速(m/s); λ 为叶尖速比; β 为叶片桨距角($^\circ$); ω 为叶片旋转角速度(rad/s)。 $C_p(\lambda, \beta)$ 中的常数系数 C_1, \dots, C_8 根据风力发电机组的实测风能利用率来计算,因此不同的风力发电机组有不同的数值。根据表 2 的参数值,由式(1)~式(4)可得 β 为 0 时的风速-叶片角速度-功率曲线图,如图 1 所示。

驱动传动链旋转的风轮转矩 T_b 可以表示为

$$T_b = \frac{P_w}{\omega} \quad (5)$$

1.2 传动链模型

传动链模型的构建通常采用集中质量块-轴模型方法^[20],常用的集中质量块-轴模型有六质量块传动链模型、三质量块传动链模型和二质量块传动链模型。六质量块传动链模型如图 2 所示,其包含六个惯性因子,即叶片惯性因子 J_{B1}, J_{B2}, J_{B3} , 轮毂惯性因子 J_H , 齿轮箱惯性因子 J_{GB} 和发电机惯性因子

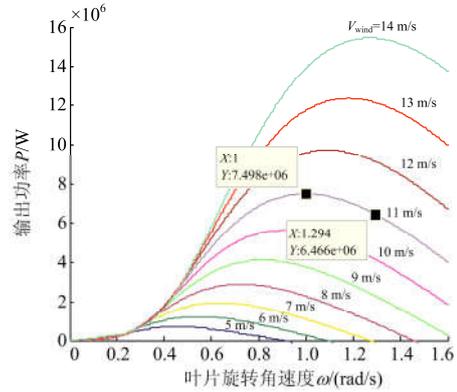


图 1 叶片转速、功率、风速曲线

Fig. 1 Curve of rotor speed, power and wind speed

J_G 。 $\theta_{B1}, \theta_{B2}, \theta_{B3}, \theta_H, \theta_{GB}, \theta_G$ 分别表示叶片、轮毂、齿轮箱和发电机的角位移。 $\omega_{B1}, \omega_{B2}, \omega_{B3}, \omega_H, \omega_{GB}, \omega_G$ 分别表示叶片、轮毂、齿轮箱和发电机的角速度。相邻质量块之间的弹性用弹性系数 $K_{HB1}, K_{HB2}, K_{HB3}, K_{HGB}, K_{GBG}$ 表示。相邻质量块之间的互阻尼用互阻尼系数 $d_{HB1}, d_{HB2}, d_{HB3}, d_{HGB}, d_{GBG}$ 表示。单个质量块上由外界施加的阻尼作用而造成的转矩损失可以用自阻尼系数 $D_{B1}, D_{B2}, D_{B3}, D_H, D_{GB}, D_G$ 表示。发电机产生的电磁转矩表示为 T_e , 空气动力作用于三个叶片的转矩表示为 T_{B1}, T_{B2}, T_{B3} 。若将叶片和轮毂视为一个质量块,则相应的模型变为三质量块模型。三质量块模型可以转化为二质量块模型^[20]。通常,采用二质量块模型就能描述传动链的动态性能。

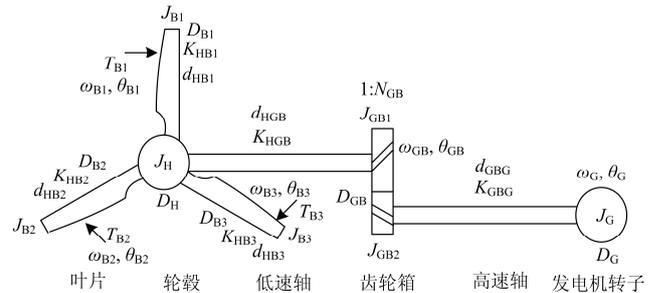


图 2 六质量块传动链模型

Fig. 2 Six-mass drive train model

对于传动链不含齿轮箱的直驱型风力发电机,其低速轴直接与发电机转子相连,相应的二质量块模型如图 3 所示。由于大型风机的转速较慢,自阻尼系数 D_b, D_g 可以忽略不计^[21]。本文根据图 3 模型对风力发电系统建立的传动链键合图模型如图 4 所示,其中, T_g 为机械轴所传递的转矩。根据结点 $1_1, 1_2, 1_3$ 的方程得到风机的数学模型为

$$J_b \frac{d\omega_b}{dt} = T_b - T_g \quad (6)$$

$$T_g = K_m \int (\omega_b - \omega_g) dt + D_m (\omega_b - \omega_g) \quad (7)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_g - T_e \quad (8)$$

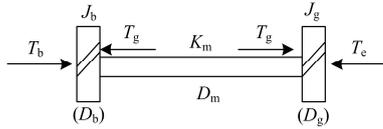


图3 二质量块传动链模型
Fig. 3 Two-mass drive train model

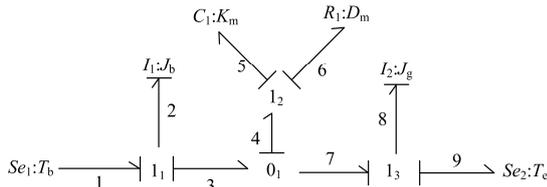


图4 传动链的键合图模型
Fig. 4 Bond graph model of drive train

2 故障诊断方法描述

基于键合图的故障诊断方法的优势在于键合图能够清晰地表示系统的结构、系统各变量之间的因果关系以及系统的已知变量和未知变量, 根据其能够以系统的、简洁的方法推导 ARR。由键合图推导 ARR 的方法有因果路径覆盖法和因果关系逆转法^[19], 不过这些方法在消除未知变量时, 变量关系并没有被充分利用, 所得 ARR 数量不会多于传感器数量。为了获得更多的ARRs, 应当得到未知变量的各种已知变量表示形式。由于时间因果图(TCG)^[22]能够明确反映各变量之间的关系并蕴含了所有因果路径(两变量间有同向箭头相连, 就说这两个变量之间存在因果路径), 因此本文采用基于时间因果图的方法推导 ARR。该方法推导 ARR 分为三个部分: 根据键合图模型推导时间因果图; 由时间因果图得到变量关系图; 根据变量关系图消除键合图结点方程中的位置变量得到 ARR。

2.1 时间因果图的推导

由键合图推导时间因果图的步骤如下。

步骤 1: 列出所有元件的结构方程, 方程式中的因变量作为输入变量置于方程式右边, 果变量作为输出变量置于方程式左边。

步骤 2: 按照步骤 1 所得出的方程连接变量, 箭头由方程右边的输入变量指向方程左边的输出变量(对于结点方程中的连等式, 如 $f_1=f_2=f_3$, 只有最右边的 f_3 是输入变量), 同时根据方程在箭头上标明变量之间的关系。

根据图 4 所示键合图, 可知其包括 6 个一端口元件($Se_1, Se_2, I_1, I_2, R_1, C_1$)和 4 个多端口元件(I_1, I_2, I_3, O_1), 其中源元件(Se_1, Se_2)的势变量和流变量没有直接的关系, 不必列写其方程, 因此只需列出其他 8 个元件的方程, 如式(9)所示。

$$I_1: f_2 = \frac{e_2}{J_b s} \quad (9-a) \quad I_1: \begin{cases} e_2 = e_1 - e_3 \\ f_1 = f_3 = f_2 \end{cases} \quad (9-e)$$

$$C_1: e_5 = \frac{K_m f_5}{s} \quad (9-b) \quad I_2: \begin{cases} e_4 = e_5 - e_6 \\ f_5 = f_6 = f_4 \end{cases} \quad (9-f)$$

$$R_1: e_6 = D_m f_6 \quad (9-c) \quad I_3: \begin{cases} e_8 = e_7 - e_9 \\ f_7 = f_9 = f_8 \end{cases} \quad (9-g)$$

$$I_2: f_8 = \frac{e_8}{J_g s} \quad (9-d) \quad O_1: \begin{cases} f_4 = f_3 - f_7 \\ e_3 = e_7 = e_4 \end{cases} \quad (9-h)$$

按照步骤 2 可得到如图 5 所示的时间因果图, 其中 Df_1 和 Df_2 为置于 I_1, I_3 处的两个测速传感器。

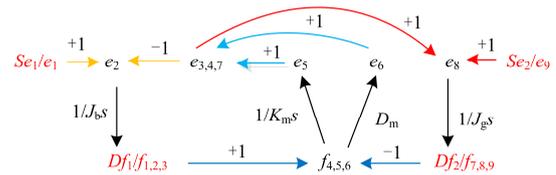


图5 时间因果图
Fig. 5 Temporal causal graph

2.2 变量关系图的推导

为了使未知变量与已知变量之间的关系更直观, 可以将时间因果图根据因果路径展开为变量关系图, 变量关系图将 TCG 的因果路径中的已知变量作为路径的终结点。变量关系图用符号“{”表示求和节点, 一个求和节点对应 TCG 中一个有多个箭头指向其的变量(说明该变量可由指向其的变量的和表示); 用符号“<”表示多路径节点, 一个多路径节点对应 TCG 中一个有多个箭头由其指出的未知变量(已知变量作为终结点, 所以除外)。由于变量关系图的两端为已知变量, 中间为未知变量, 根据因果路径可以很容易地将一个未知变量用已知变量进行表示, 并且由于 TCG 中包含了所有的因果路径, 因此可以得到一个未知变量的所有已知变量表示方式, 从而能够得到更多不同形式的 ARR。构建变量关系图的步骤如下。

步骤 1: 在 TCG 中任选一个变量, 根据其在 TCG 的因果路径进行前向和后向传播, 每一条路径在出现已知变量时终止。所谓传播是指将一个变量用另外的变量表示, 由于键合图中每一个变量(源变量除外)既是输入变量又是输出变量, 因此有前向和

后向传播。

步骤 2: 当一条路径以已知变量结束后再开始另一条路径, 直到所有未知变量都处于以已知变量结束的路径中。

根据上述步骤和图 5 的时间因果图可以得到如图 6 所示的变量关系图, 图中两端皆以已知量(Se_1, Se_2, Df_1, Df_2)作为结束变量。

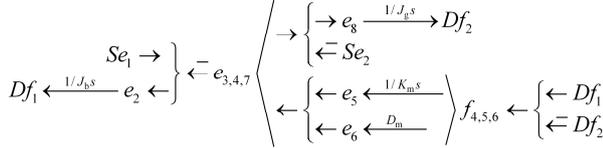


图 6 变量关系图

Fig. 6 Relations graph of variables

2.3 ARR 的推导

根据变量关系图推导 ARR 的步骤如下。

步骤 1: 选择某一结点, 列出结点的方程。

步骤 2: 根据变量关系图的前后向传播路径消去结点方程中的未知量。

步骤 3: 重复步骤 1、2, 直至所有的结点考虑到。

根据变量关系图消除未知变量需注意两点:

1) 用于推导 ARR 的结点方程所构成的路径不能用于消除该结点自身所包含的未知变量, 因为这个方程无论有无故障总是成立的, 会产生 $0=0$ 的形式, 因此在传播中作为禁止通过的路径。

2) 对于有多条路径的变量, 应该考虑所有的路径, 以获得更多的形式。

键合图的因果关系并不是唯一的, 不同的因果关系配置使得键合图有不同的计算结构, 导致不同的时间因果图和变量关系图。不过由于键合图的结构不发生变化, 0 结点、1 结点的功率方向不变, 因此用于推导 ARR 的结构方程不变, 另外元件的势流关系也不会变化, 唯一变化的只是某些元件的输入输出变量, 表现在方程中就是某些元件结构方程中等式左边的变量变换到右边成为输入变量, 而右边的某一变量变换到左边变成输出变量, 但这并不会影响变量之间的关系, 因此根据同一结点推导出来的 ARR 是一致的, 于是有如下定理。

定理 1: 在传感器配置不变(即已知变量不变)的情况下, 根据具有不同因果关系配置的键合图模型推导的 ARR 是一致的。

根据上述步骤, 1_1 结点用于推导 ARR 的方程为 $e_1 - e_2 - e_3 = 0$, 根据上述两个原则, $e_1 - e_2 - e_3 = 0$ 构成的路径不能消除其包含的未知变量, 因此 e_2 只能通

过一条前向路径进行传播, e_3 有一条前向路径和一条后向路径。根据变量关系图可得其未知变量的传播过程为

$$\begin{cases} e_1 = Se_1, & e_2 = J_b s Df_1 \\ e_3 = \begin{cases} e_8 + e_9, & e_8 = J_g s Df_2, & e_9 = Se_2 \\ e_5 + e_6, & e_5 = K_m f_{4,5,6}, & e_6 = D_m f_{4,5,6}, \\ & f_{4,5,6} = Df_1 - Df_2 \end{cases} \end{cases}$$

由此可得下面两个 ARR:

$$\begin{aligned} ARR_1 &= Se_1 - J_b s Df_1 - J_g s Df_2 - Se_2 = \\ &ARR_{11}(Se_1, Se_2, Df_1, Df_2, J_b, J_g) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} ARR_2 &= Se_1 - J_b s Df_1 - K_m \frac{Df_1 - Df_2}{s} - D_m (Df_1 - Df_2) = \\ &ARR_{12}(Se_1, Df_1, Df_2, J_b, K_m, D_m) \end{aligned} \quad (11)$$

同样由 1_2 可得式(12)、式(13)两个 ARR:

$$\begin{aligned} ARR_3 &= Se_2 + J_g s Df_2 - (Df_1 - Df_2) \left(\frac{K_m}{s} + D_m \right) = \\ &ARR_{21}(Se_2, Df_1, Df_2, J_g, K_m, D_m) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} ARR_4 &= Se_1 - J_b s Df_1 - (Df_1 - Df_2) \left(\frac{K_m}{s} + D_m \right) = \\ &ARR_{22}(Se_1, Df_1, Df_2, J_b, K_m, D_m) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)与式(11)所涉及的参数是一致的, 因此不能算作彼此独立的 ARR。另外由结点 1_3 和 0_1 得到的 4 个 ARR 均与式(10)~式(12)有相同的参数, 不是独立的 ARR, 故将式(10)~式(12)作为故障诊断的 ARR。

2.4 故障特征矩阵

由解析冗余式 $ARR_i (i=1, \dots, n)$ 计算所得的数值用残差 r_i 表示。系统每个元件的故障特征对应故障特征矩阵(FSM)中的一行(除去 D_b, I_b 所在列元素), 用一个二进制向量 $C=[c_1, c_2, \dots, c_n]$ 表示, n 为残差数量, c_i 由残差 r_i 和相应的阈值 ε_i 通过式(14)决定。

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{若 } |r_i| > \varepsilon_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

FSM 中的项 S_{ji} 由式(15)决定, 即若 ARR_i 中含有故障元件 j 的参数, 则表明残差 r_i 对元件 j 敏感。FSM 中的 D_b 表示可检测性, I_b 表示可隔离性, 若一个故障的故障特征向量 $C \neq [0, 0, \dots, 0]$, 则该故障可检测, 若该故障的特征向量不同于其余故障的特征向量, 则该故障可隔离。由上述三个 ARR 可得风机的理论 FSM 如表 1 所示, 表中包含 8 种故障, 4 种故障特征, 每一种故障特征分别对应两种故障, 如[110]为 Se_1 和 J_b 的故障特征。

$$S_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{若第}i\text{个残差对第}j\text{个元件的故障敏感} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

表 1 理论故障特征矩阵

Table 1 Fault signature matrix in theory

	r_1	r_2	r_3	D_b	I_b
Se_1	1	1	0	1	0
Se_2	1	0	1	1	0
Df_1	1	1	1	1	0
Df_2	1	1	1	1	0
J_b	1	1	0	1	0
J_g	1	0	1	1	0
K_m	0	1	1	1	0
D_m	0	1	1	1	0

3 实验

3.1 系统仿真

该实验所用风机的额定功率为 10 MW, 额定转速为 1 rad/s, 风机的相关参数值如表 2 所示。

表 2 风机参数表

Table 2 Parameters of the wind turbine

参数	数值	参数	数值
C_1	0.6450	C_8	0.035
C_2	116	R	109.445 m
C_3	0.4	ρ	1.225 kg/m ³
C_4	5	H_b	4.32 s
C_5	21	H_g	0.62 s
C_6	0.009 12	K_m	113.1e7 N·m
C_7	0.08	D_m	1.5e7 N·m

给定 $V_{wind}=11$ m/s, $\beta=0^\circ$ 。图 7 所示为启动过程的转矩和转速动态过程图, 在 40 s 时电磁转矩由 0 跳变到 5 MN·m, 由于转速有变化率, $d\omega/dt$ 不为 0, 即两个质量块有转动惯量, 因此 T_b, T_g 初始不为 0, 转速由 0 趋于 5 MN·m 对应的恒定转速为 1.294 rad/s。若 T_e 在 32.5 s 之前发生跳变, 由于 T_b 达不到 5 MN·m, 电机运行于拖动状态, 转速为负, 相应地, 稳定后 T_b 和 T_g 达不到 T_e 的水平。

系统运行稳定后, $T_b=T_g=T_e=$ 常数, $w_b=w_g=$ 常数。若设系统初始状态为稳定工作状态, 则要根据式 (1)、式(5)来设置转矩和转速的初始值。图 8 所示为风机由一个稳定的初始工作状态跳变到另一个稳定工作状态的波形图, 叶片初始角速度 $\omega_b=\omega_g=1.294$ rad/s, 初始输出功率 $P=6.466$ MW, 初值转矩 $T_b=T_g=T_e=5$ MN·m。在第 20 s 时, 电磁转矩 T_e 由 5 MN·m 跳变到 7.5 MN·m, 经过一个暂态过程 T_g 与 T_b 也变为 7.5 MN·m, 转速则变为 1 rad/s, 相应的输出功

率为 $P=7.5$ MW, 这与图 1 的两个标记点的值一致, 验证了该模型的正确性。

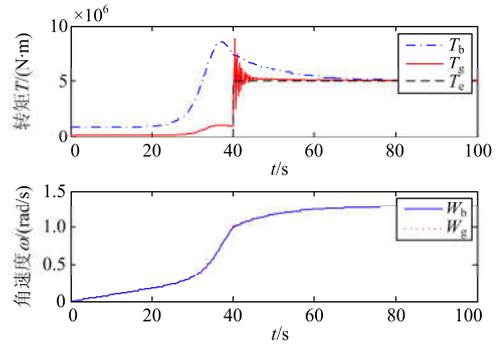


图 7 启动时电磁转矩变化引起的动态过程

Fig. 7 Dynamic process caused by change of electromagnetic torque when start-up

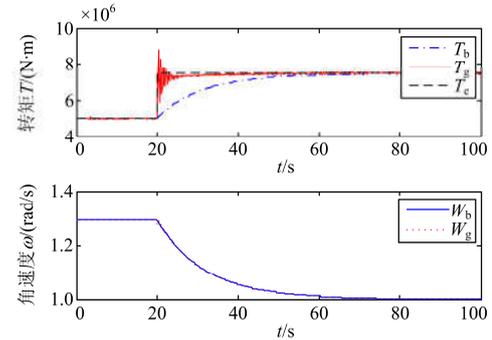


图 8 稳定初始状态下电磁转矩变化引起的动态过程

Fig. 8 Dynamic process caused by change of electromagnetic torque under stable initial condition

3.2 故障诊断

设系统初始运行于风速 11 m/s, $\beta=0^\circ$, 叶片初始角速度 $\omega_b=\omega_g=1.294$ rad/s, 初始转矩 $T_b=T_g=T_e=5$ MN·m 的稳定状态, 第 5 s 时, T_e 由 5 MN·m 突变到 7.5 MN·m。假定不发生结构性故障, 所有的故障都是单一的突变故障, 都在 20 s 发生故障, 因此可以由 20 s 时数值的突变来模拟这些故障。由解析冗余式(10)~式(12)进行故障诊断存在以下几个问题:

- 1) ARR_s 皆为动态方程, 因此在稳定情况下微分项为零;
- 2) 式中含有积分, 因此需要设置初始值, 否则在没有故障时也可能出现残差不为零的情况;
- 3) 含有抵消项, 稳定时 Df_1 与 Df_2 相等, 因此与之相乘的项是不可检测的。

本文通过将故障模型下的残差减去正常模型对应的残差来获得故障特征, 这样可以任意给定初始值, 从而解决积分初始值设置的问题。当风速有扰动时, 另外两个问题可以得到解决。

在风速恒定且没有干扰的情况下, 系统进入稳态后, 速度不再变化且 $\omega_b = \omega_g$, 根据数学模型式(6)~式(8), 即便 J_b, J_g, K_m, D_m 发生变化(故障)也不会对系统产生影响, 因此不会影响 ARR 的残差输出。当 Se_1, Se_2, Df_1, Df_2 发生变化时, 由于 ARR 的静态项包含这些变量, 因此能够产生偏离阈值的残差。相应的故障特征矩阵只有 [110]、[101] 和 [011] 这三种, 且 J_b, J_g, K_m 和 D_m 的故障不可检测。

当风速不是恒定时, 系统的转速不是恒定的, 转速的微分不为零, ω_b 与 ω_g 也不恒等, 因此动态项参数 J_b, J_g, K_m, D_m 发生变化时会引起转速的变化, 即 Df_1, Df_2 发生变化, 从而对 ARR 产生影响, 使其产生偏离阈值的残差, 所得的故障特征可以与表 1 进行对比, 从而检测和定位故障。系统的故障反映为参数的变化, 例如当传动轴发生裂缝或疲劳等故障时, 会导致参数 K_m 或 D_m 的变化。设风速为 11 m/s 的基础上加上一个随机分量, 图 9(a)所示为 K_m 由 $113.1e7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 变为 $85.2e7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 后的残差波形, 其故障特征为 [011], 与表 2 中理论故障特征一致; 图 9(b)~图 9(d)分别为 D_m, J_b 和 J_g 发生变化时所得故障残差波形, 同样与表 1 的理论故障特征一致, 说明该方法也能够对动态项包含的故障参数进行诊断。

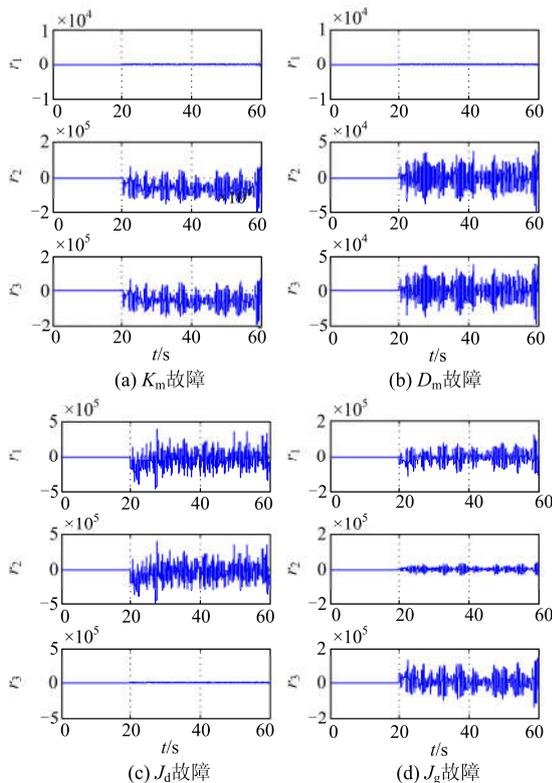


图 9 故障残差波形

Fig. 9 Residuals of faults

4 结论

本文针对风机的二质量块模型给出了一种基于键合图模型的故障诊断方法。该方法能够充分利用变量之间的因果关系得到更多的 ARR, 从而提高故障的可隔离性。采用该方法可得 3 个 ARR, 其皆为动态方程, 当系统处于稳定状态时, 根据动态 ARR 所得的故障特征并不能检测动态项的参数故障, 为此在恒定风速上叠加一个微小的随机分量, 实验证明, 此时所得到的故障特征与理论上的故障特征一致, 说明采用该方法推导的 ARR 能够用于风机参数故障的诊断。

参考文献

- [1] COUNCIL G W E. Global wind report 2014: annual market update[J]. IEA Wind, 2015, 149.
- [2] HAMEED Z, HONG Y S, CHO Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 1-39.
- [3] 魏书荣, 何之倬, 符杨, 等. 海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 145-154.
WEI Shurong, HE Zhizhuo, FU Yang, et al. Research status and prospect of offshore wind turbine fault tolerance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 145-154.
- [4] 叶日新, 董明, 任明, 等. 兆瓦级风力发电机轴压现场测量与分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 97-103.
YE Rixin, DONG Ming, REN Ming, et al. Measurement and analysis on shaft voltage of megawatt wind generation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 97-103.
- [5] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [6] TABATABAEIPOUR S M, ODGAARD P F, BAK T, et al. Fault detection of wind turbines with uncertain parameters: a set-membership approach[J]. Energies, 2012, 5(7): 2424-2448.
- [7] SARDI H E S, ESCOBET T, PUIG V, et al. Fault diagnosis of advanced wind turbine benchmark using interval-based ARR and observers[J]. IEEE Transactions

- on *Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3783-3793.
- [8] 王奇, 张晗, 邓军, 等. 基于状态评价的风力发电设备故障诊断系统的研制[J]. *电网与清洁能源*, 2014, 30(11): 103-108.
WANG Qi, ZHANG Han, DENG Jun, et al. Research on fault diagnosis system for wind power equipment based on condition evaluation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2014, 30(11): 103-108.
- [9] 季凌燕, 沈艳霞, 吴定会. 基于灰色动态预测的风力发电系统容错控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(7): 37-43.
JI Lingyan, SHEN Yanxia, WU Dinghui. Research of fault-tolerant strategy for wind energy conversion system based on grey prediction model[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(7): 37-43.
- [10] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8): 1-10.
- [11] 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 Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, 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.
- [12] ODGAARD P F, STOUSTRUP J, KINNAERT M. Fault-tolerant control of wind turbines: a benchmark model[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1168-1182.
- [13] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Torsional vibration effects on induction machine current and torque signatures in gearbox-based electromechanical system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(11): 4689-4699.
- [14] GONG X, QIAO W. Bearing fault diagnosis for direct-drive wind turbines via current-demodulated signals[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 3419-3428.
- [15] FREIRE N M, ESTIMA J O, MARQUES CARDOSO A J. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3957-3967.
- [16] ODGAARD P F, JOHNSON K E. Wind turbine fault detection and fault tolerant control-an enhanced benchmark challenge[C] // *American Control Conference (ACC)*, 2013. IEEE, 2013: 4447-4452.
- [17] DE BESSA I V, PALHARES R M, D'ANGELO M F S V, et al. Data-driven fault detection and isolation scheme for a wind turbine benchmark[J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 634-645.
- [18] SVÄRD C, NYBERG M. Automated design of an FDI system for the wind turbine benchmark[J]. *Journal of Control Science and Engineering*, 2012.
- [19] WANG D, YU M, LOW C B, et al. Model-based health monitoring of hybrid systems[M]. Springer, 2013.
- [20] MUYEEN S M, ALI M H, TAKAHASHI R, et al. Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models[J]. *Renewable Power Generation, IET*, 2007, 1(2): 131-141.
- [21] 谭勋琼, 唐佶, 吴政球. 10 MW 变速直驱型风力发电机组的建模及 Matlab 仿真[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(24): 8-15.
TAN Xunqiong, TANG Jie, WU Zhengqiu. 10 MW variable speed direct-driven wind turbines modeling and Matlab simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(24): 8-15.
- [22] BREGON A, BISWAS G, PULIDO B, et al. A common framework for compilation techniques applied to diagnosis of linear dynamic systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(7): 863-876.

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2016-06-11

作者简介:

王俊年(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能计算、复杂系统建模和故障诊断的研究。E-mail: jnwang@hnust.edu.cn

(编辑 魏小丽)