

大功率逆变器的键合图模型及故障诊断方法

王俊年^{1,2}, 龚明^{1,2}, 王海乾³

- (1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南省知识处理与网络化制造高校重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 甘肃省金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 大功率逆变器是风力发电机组中主要的变流装置之一,也是故障发生比较多的装置. 提出将键合图与解析冗余方法相结合的故障诊断方法,建立元器件的键合图故障诊断模型、故障解析冗余关系及特征矩阵,通过观测矩阵和特征矩阵的对比,进行系统的故障检测. 在 20-sim 软件中的仿真实验结果表明该方法对于大功率逆变器的故障诊断具有良好的便捷性和有效性.

关键词: 逆变器;键合图;解析冗余;故障特征

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)01-0024-05

Bond graph model and fault diagnosis method for high - power three - phase inverter

WANG Jun - nian^{1,2}, GONG Ming^{1,2}, WANG Hai - qian³

- (1. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Knowledge Processing and Networked Manufacturing Key Laboratory in Universities of Hunan Province, Xiangtan 411201, China;
3. The Power Supply Company of Jinchang, Jinchang 737100, China)

Abstract: High power inverter is one of the most converter devices in wind turbine generator systems, and also has many faults in working. A fault diagnosis method was proposed which combines analytical redundancy with bond graph model for high power inverter. Bond graph model for the system and establishing diagnostic bond graph model were built, with analytical redundancy relationship and its fault characteristic matrix were established at the same time. Fault was detected and isolated quickly through comparing the observed characteristics matrix and fault characteristic matrix. The simulation results in 20-sim demonstrate that the method is convenient and effective for High power inverter fault diagnosis.

Key words: inverter; bond graph; analytical redundancy; fault signature

风力发电作为利用可再生能源的环保型发电技术,在全球快速发展.自2000年开始,风电行业每年的平均增长速度超过了25%.并网逆变器是风力发电机组中主要的变流装置之一,也是故障发生比较多的装置.因此,风力发电机组中变流器的故障检测与诊断对风力发电技术的推广和运行成

本的下降具有重要的意义.电力电子装置的故障诊断一直是研究的热点问题,目前一些新型的故障诊断方法都是针对一般的电力电子电路,如文献[1]中采用5层聚类自适应神经元模糊推理系统识别逆变器开关管开路故障,该方法缩短了神经网络诊断时间且具有较好的鲁棒性.但算法复杂,实现成

收稿日期:2013-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974048);湖南省高校创新平台开放基金资助项目(11K027);湖南省研究生科研创新项目(CX2012B393)

通信作者:王俊年(1968-),男,甘肃金昌人,博士,教授,主要从事智能控制研究. E-mail: jnwang@hnust.edu.cn

本高. 文献[2]利用模糊理论方法对电机的脉宽调速中的逆变器进行了故障诊断,由于尚未建立起有效的方法来分析和设计模糊系统,主要还是依赖专家经验和试凑,这样使得研究难度加大. 文献[3]中利用该方法利用小波在信号特征提取上的优势和神经网络自动分类特点,但存在诊断耗时长、噪声比较大时误诊断率较高的问题.

目前的一些故障分析与诊断方法虽然对于电力电子的故障诊断有较好的效果,但对于复杂的电力电子系统有诊断时间长、隔离不迅速等缺点. 本文结合键合图理论和解析冗余方法对大功率逆变电路进行故障诊断的方法,提出将开关管作为单个的故障检测点,从而避免繁琐的故障分类工作;采用故障特征更为明显的导通电流作为故障检测量,使得故障能更为快速隔离和诊断,避免造成更大损失.

1 风力发电并网逆变器的键合图建模

1.1 键合图理论

键合图理论是面向计算机的自动建模与仿真的理论方法,由麻省理工学院 H. M. Payter 教授于 1959 年提出,并由他的学生 Professor D. Karnopp, Professor D. Margolis 和 Professor R. Rosenberg 将键合图的概念引入到系统建模中. 此后,键合图理论在科学研究和工程领域中蓬勃发展^[4].

键合图理论根据能量守恒原则,将各种类型工程系统涉及的所有物理变量都统一归纳为 4 种广义变量:势变量、流变量、广义动量和广义位移. 键合图建模主要由键合图元和键组成. 键合图元包括:势源(Se)、流源(Sf)、容性元件(C)、惯性元件(I)、阻性元件(R)、调制器(MTF),回转器(GY)以及连接图元的共流节点(1)和共势节点(0)等^[5-6].

1.2 风力发电并网逆变器的键合图建模

功率变流器是风力发电系统中重要部分,在定速风力发电中变流器起到抑制系统启动时的冲击电流和转矩波动,在变速风力发电中,则用来控制系统中发电机的转速和转矩,另外风力发电产生的电能需要通过变流器输送到电网中. 本文以并联电压源变流器为研究对象,其电路如图 1 所示.

键合图建模的动态分析软件有很多种,如 ENPORT, TUTSM, CAMP, 20-sim 等,本文采用的建模软件是由荷兰 Twente 大学研发的 20-sim 软件,该软件自带的元件模型库,并包涵一种特殊语言 SIDOPS,这种特殊的语言主要用来书写方程、建立子模型^[7]. 根据开关管导通时电阻值极小、关断时电阻值极大的结构特性和键合图的建模法则及开关子模型,最终在 20-sim 软件建立大功率逆变电路的键合图模型如图 1 所示.

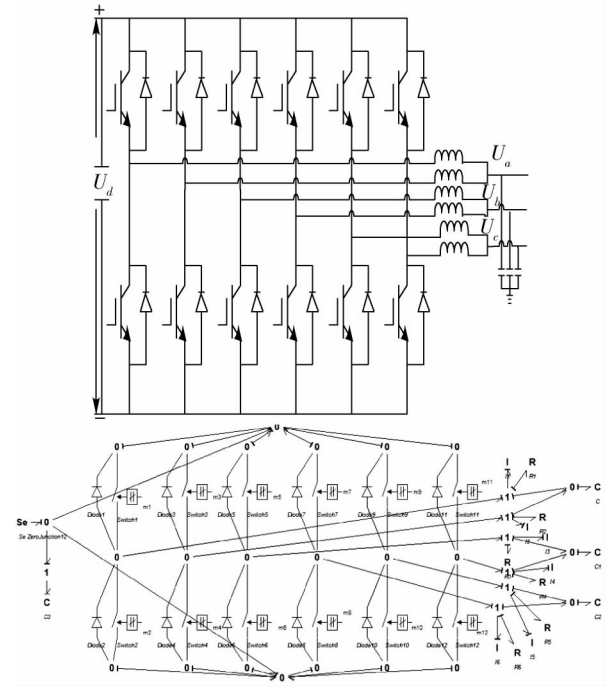


图 1 大功率逆变电路及键合图模型

2 大功率逆变器故障检测与诊断

2.1 解析冗余关系

解析冗余 (Analytical Redundancy Relations, ARR) 故障诊断方法是基于模型故障诊断的重要方法之一. 在模型正常工作条件下,ARRs 数值为 0;出现故障时,ARRs 数值为故障输出值与正常工作值的差值. 但是在实际中由于测量误差、传感器噪声等因素,输出残差结果时允许一定误差出现^[8]. 基于模型的解析冗余故障诊断框架如图 2 所示. 在键合图仿真软件中,根据系统与元件之间的因果关系建立系统诊断键合图模型,并与正常模型下的变量输出建立其解析冗余关系,从而推导出故障发生点并快速隔离故障,以减少故障带来的危害和损失^[9].

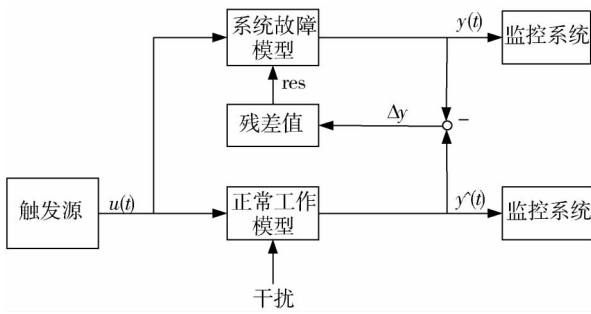


图2 基于模型的解析冗余故障诊断框架

2.2 故障诊断模型

基于键合图建模故障诊断的关键技术是要建立其诊断键合图. 诊断键合图是将势、流传感器加入到键合图模型中, 并通过微分因果关系将势、流传感器转化而得到.

势传感器 De 的转换: 利用键合图中的因果关系, De 转换成一个检测势源 MSe 与相应的流为解析冗余关系的残差. 其流残差观测器为定义一个虚拟流传感器 (Df*).

流传感器的 Df 转换: 流传感器的转化方法与势传感器类似 只是 Df 用 MSf 和 De* 替代.

诊断键合图中虚拟传感器对应系统中实际的传感器, 虚拟传感器都是经过因果关系和键合图建模法则转换得到, 所以残差数目和传感器的数目是相同^[10-11]. 对于虚拟流传感器的转换如图3所示.

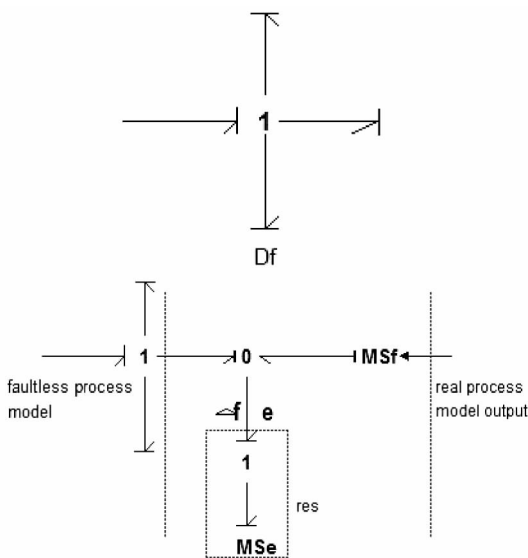


图3 虚拟流传感器因果转换图

根据虚拟流传感器的因果转换关系, 最终得到系统的键合图诊断模型如图4所示. 由于逆变器是

同一相上、下桥臂交替导通, 每相换流情况一样, 故文中选取任意一相开关管绘出其等效诊断键合图并进行因果分析得到系统状态方程. 图中 R_{on1}, R_{on2} 为导通时的等效电阻, m_1, m_1^* 为控制信号.

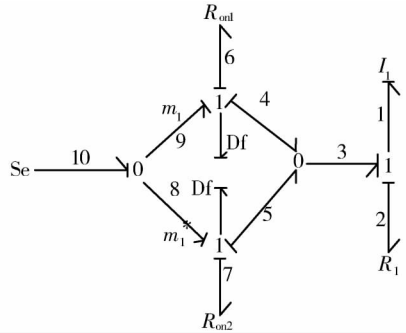


图4 大功率逆变器的单相诊断模型

根据图4中的因果关系, 写出该相的特征方程如公式(1).

$$\dot{P}_1 = - (m_1 R_{on1} + m_1^* R_{on2} + R) P_1 / I_1 + (m_1 + m_1^*) V_e \tag{1}$$

式中, P 为磁通链变量, m 为开关管控制量, R 为每个开关的等效电阻, V_e 表示势变量.

同理可以推出并联变流器的系统状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \dot{p}_3 \\ \dot{p}_4 \\ \dot{p}_5 \\ \dot{p}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1 + m_1^* \\ m_2 + m_2^* \\ m_3 + m_3^* \\ m_4 + m_4^* \\ m_5 + m_5^* \\ m_6 + m_6^* \end{bmatrix} V_e \tag{2}$$

式中, $L_i = 1/I_i (m_i R_{onj} + m_i^* R_{on(j+1)})$, L_i 表示第 i 个开关与 m 信号有关的导通电阻值, $i = 1, 2 \dots 6; j = 1, 2 \dots 11$

2.3 故障特征矩阵

在诊断模型中将每只 IGBT 看作一个检测的点. 电力电子中的故障类型可以分为 IGBT 开路和 IGBT 短路. 开路时流过功率开关管的电流在导通和不导通期间都为 0; 短路时整个周期内都有电流, 那么基本上可以把故障集合归结成 2 类, 开路故障 F_{Ti} 和直通故障 F_{Sj} , 由图4得到部分故障集 $F = \{ F_{T1}, F_{T2}, F_{S1}, F_{S2} \}$.

根据图3、图4可以得到各组解析冗余关系, 以管1为例, 其解析冗余关系如下:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{P_1}{I_1}, \\ e_2 = f_2 R_1, \\ f_9 = f_6 = f_4, \\ e_4 = e_5 = e_3 = e_1 - e_2, \\ f_6 = (m_1 V_e - e_1 + e_2) / R_{on1}, \\ f_7 = (m_2 V_e - e_5) / R_{on2}, \\ r_1 = f_s - f_6. \end{cases}$$

式中, f 为响应键上的流变量, I 为惯性变量, r_1 为残差, f_s 为流入模型的流变量。

根据故障诊断键合图模型中的因果关系, 可知逆变器中残差的产生是由于 IGBT 故障, 即 ARR_1 的因果途径: $R_1 \rightarrow f_6 \rightarrow r_1$; $R_{on1} \rightarrow f_6 \rightarrow r_1$; $I_1 \rightarrow e_1 \rightarrow r_1$ 。根据整流电路中流过 IGBT 的电流特点和解析冗余关系用 $-1, 1, 0$ 表示残差方向。根据 IGBT 的特性, 一只开关管上开路和短路的故障只会有一种状态出现, 所以根据这种特性, 可以将这 2 种情况整理到一个故障观测矩阵中。表中 0 表示为故障未发生, 1 和 -1 分别表示 IGBT 开路和通路的故障状态。

表 1 具有残差方向的故障观测矩阵

故障	残差方向		可检测性	可隔离性
	r_1	r_2	Det	Iso
F_{T1}	1	0	1	1
F_{T2}	0	1	1	1
F_{S1}	-1	0	1	1
F_{S2}	0	-1	1	1

大功率逆变器中 IGBT 的参数相同且都由残差器观测其残差方向, 如果将每个 IGBT 管都记入故障观测矩阵, 数据表容量太多, 不方便查阅。所以对 12 只 IGBT 进行一个 12 位的编码处理, 对 1 号管开始到 12 号管结束, 进行 2 种类型的故障编码都用 0, 1, -1 表示, 这样方便进行记录或对比。如表中 1 号管出现的故障特征完整编码为

$$\begin{aligned} F_{T1} &= [100000, 000000]; \\ F_{T2} &= [010000, 000000]; \\ F_{S1} &= [-100000, 000000]; \\ F_{S2} &= [0 - 10000, 000000]. \end{aligned}$$

3 实验结果

在实验中, 假设逆变器中管 1 正常, 管 1 断开, 管 1 短路, 利用诊断键合图进行诊断得到以下观察

到残差器 1 中的残差输出。

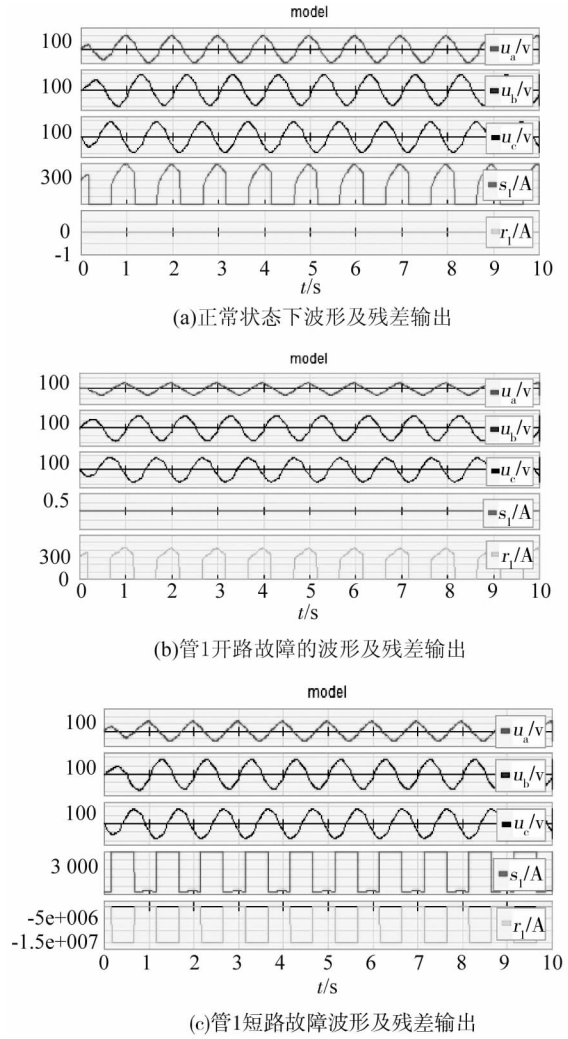


图 5 (a) 正常状态波形图; (b) 管 1 开路故障波形图及残差仿真图; (c) 管 1 短路故障波形图及仿真图

图中从上到下, 第 1、2、3 分别是 u_a, u_b, u_c , 第 4 为开关输出波形, 第 5 为残差输出。通过观察残差器输出波形, 可知图 5 中 (a) 的观测编码为 $[000000, 000000]$, 说明管 1 正常工作; 图 (b) 中观测编码为 $[100000, 000000]$, 与故障观测编码对比可知管 1 为开路; 图 (c) 的输出可知其观测编码为 $[-100000, 000000]$, 根据残差方向的设定可知管 1 为短路故障。

4 结论

利用键合图理论建立模型解决了长期以来基于模型的故障诊断需要精确数学模型的瓶颈和混合系统建模困难的问题, 是一种新的混合系统故障诊断方法。本文将键合图模型和解析冗余关系故障诊断思想相结合并应用到逆变器的故障诊断中, 提

出一种基于模型的电力电子故障诊断方法,仿真实验证明利用键合图理论和解析冗余关系的诊断的思想对电力电子电路的诊断有效可行.

参考文献:

- [1] Park J H, Kim D H, Kim S S, et al. C - ANFIS based fault diagnosis for voltage - fed PWM motor drive systems [C]//Proceedings of the IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information. Alberta, Canada: IEEE, 2004.
- [2] Zidani F, Diallo D, El Hachemi Benbouzid M, et al. A fuzzy - based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage - fed PWM inverter induction motor drive[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2008, 55(2): 586 - 593.
- [3] 张洪涛, 安庆. 基于小波变换和神经网络的逆变电路故障诊断方法[J]. 计算机测量与控制, 2010(6): 1273 - 1276.
- [4] Borutzky W. Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models[M]. London:Springer, 2010.
- [5] Xudong W Y, Biswas G, Weinberg J. MDS: an integrated architecture for associational and model - based diagnosis [J]. Applied Intelligence, 2001, 14(2): 179 - 195.
- [6] Mosterman P J. Hybrid dynamic systems: a hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis [D]. Nashville: Vanderbilt University, 1997.
- [7] Gawthrop P J, Bevan G P. Bond - graph modeling[J]. Control Systems, IEEE, 2007, 27(2): 24 - 45.
- [8] Samantaray A K, Medjaher K, Ould Bouamama B, et al. Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2006, 14(3): 237 - 262.
- [9] Borutzky W. Bond graph model - based fault detection using residual sinks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2009, 223(3): 337 - 352.
- [10] Djeziri M A, Merzouki R, Bouamama B O, et al. Robust fault diagnosis by using bond graph approach [J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2007, 12(6): 599 - 611.
- [11] Low C B, Wang D, Arogeti S, et al. Causality assignment and model approximation for hybrid bond graph: Fault diagnosis perspectives [J]. Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 2010, 7(3): 570 - 580.