

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604021



三相正弦波逆变器容错控制

洪雪梅, 金福江, 李扬森, 李平

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对变频器逆变模块故障率高的问题,建立三相正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变模块中的绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 发生短路故障后逆变模块的数学模型. 根据这个故障模型,实现对系统故障的有效诊断,同时结合硬件冗余的容错控制策略对电路拓扑进行重构,使得三相逆变器在短路故障情况下仍能正常工作,从而提高系统硬件层的容错能力和可靠性. 在 MATLAB/Simulink 环境下实施系统仿真,验证了三相正弦波逆变器容错控制的有效性和可行性.

关键词: 三相正弦波逆变器; 绝缘栅双极型晶体管; 短路故障; 容错控制; 硬件冗余

中图分类号: TM 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0497-06

Fault Tolerant Control of Three-Phase Sine Wave Inverter

HONG Xuemei, JIN Fujiang, LI Yangsen, LI Ping

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Regard to the high failure rate of inverter module for the inverter, the mathematical model of the inverter module has been established after the short-circuit fault of the IGBT was occurred in the three-phase SPWM inverter module. Based on the fault model, the effective diagnosis of system failure was achieved, simultaneously the circuit topology was restructured by hardware redundancy in the proposed fault-tolerant control strategy, so that the three-phase inverter still worked well when short-circuit was occurred and the fault tolerance and reliability of the system hardware layer was improved. Based on the MATLAB/Simulink circumstance, the result of system simulation demonstrated the effectiveness and feasibility of fault-tolerant control for the three-phase sine-wave inverter.

Keywords: three-phase sine-wave inverter; insulated gate bipolar transistor; shorted fault; fault-tolerant control; hardware redundancy

随着工业化程度的不断提高和节能环保的推广,作为工业控制系统执行器的变频器在各行各业中有着广泛应用,但一旦发生故障将会影响整个系统的正常运行,甚至造成严重的经济损失. 架构变频器逆变模块的基础元件绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 非常脆弱,故障率高,发生过压或者过流是导致逆变模块故障的主要原因. 三相逆变器作为大功率的逆变电源,其应用更为广泛,如何降低逆变器故障对生产设备的影响已经成为国内外研究的热点问题^[1-3]. 单纯基于硬件冗余的容错控制方法需要在原来系统的基础上安装很多控制开关,无形中增加了设备的运行成本,并且控制开关的硬件性能好坏直接影响到容错控制的效果. 本文探讨了一种基于三相逆变器短路故障数学模型的硬件冗余系统容错控制方法,并通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了其容错控制效果.

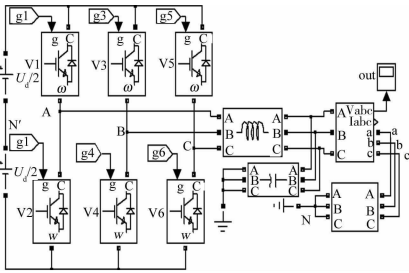
收稿日期: 2014-10-23

通信作者: 洪雪梅(1974-),女,实验师,主要从事智能控制技术和电力电子技术的研究. E-mail: hxmei@hqu.edu.cn.

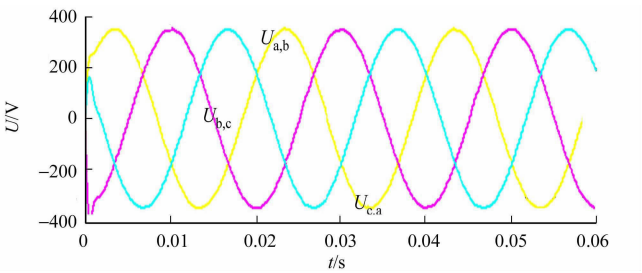
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273069); 中央高校基本科研业务费资助项目(JB-ZR1204)

1 三相逆变器模型分析

三相正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器是将直流电转换为三相交流电的一种装置,其基本工作原理是把直流电通过 SPWM 脉宽调制技术转换成三相正弦交流电,如图 1(a)所示. 在无故障状态下,带输出滤波的三相逆变电路输出线电压的稳定波形为正弦波,如图 1(b)所示.



(a) 三相逆变电路



(b) 逆变电路输出线电压

图 1 三相 SPWM 逆变电路及其输出波形

Fig. 1 Three-phase SPWM inverter and output waveform

对于输出带 LC 滤波的三相 SPWM 逆变电路,负载为纯电阻负载,阻值为 R ,直流侧电压大小为 U_d . 调制波频率为 ω_c ,调制波相角 φ_c ,调制比为 M . 利用状态空间取平均,可得三相逆变桥及 SPWM 过程的等效状态空间平均模型^[4]为

$$\left. \begin{aligned} u_{A,N'} &= \frac{U_d M}{2} \sin(\omega_c t), \\ u_{B,N'} &= \frac{U_d M}{2} \sin(\omega_c t - 2\pi/3), \\ u_{C,N'} &= \frac{U_d M}{2} \sin(\omega_c t + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

设逆变输出电压与负载电压之间的传递函数用 $G_f(s)$ 表示,输入输出关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{a,N} &= G_f(s) \cdot u_{A,N'}, \\ u_{b,N} &= G_f(s) \cdot u_{B,N'}, \\ u_{c,N} &= G_f(s) \cdot u_{C,N'}. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

$$\text{式(2)中: } G_f(s) = \frac{R_L}{LCR_L s^2 + (RR_L C + L)s + R + R_L}.$$

进而可以推导出三相负载相电压数学表达式^[5],即

$$\left. \begin{aligned} u_{a,N} &= K_p \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} u_{c,a} = K_p A(\omega_c) \sin(\omega_c t + \phi(\omega_c)), \\ u_{b,N} &= K_p \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} u_{c,b} = K_p A(\omega_c) \sin(\omega_c t + \phi(\omega_c) - 2\pi/3), \\ u_{c,N} &= K_p \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} u_{c,c} = K_p A(\omega_c) \sin(\omega_c t + \phi(\omega_c) + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$$\text{式(3)中: } K_p = \frac{U_d M R_L}{2(R + R_L)}; A(\omega_c) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2})^2 + 4\xi^2 \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}}}; \omega_n = \sqrt{\frac{(r+R)}{LCR}}; \xi = \frac{(rRC + L)}{(2LCR\omega_n)}; \phi(\omega_c) =$$

$$-\arctan\left(\frac{2\xi\frac{\omega_c}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}}\right) = \begin{cases} -\arctan\frac{2\xi\frac{\omega_c}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}}, & \omega_c \leq \omega_n, \\ -\left[180^\circ - \arctan\frac{2\xi\frac{\omega_c}{\omega_n}}{1 - \frac{\omega_c^2}{\omega_n^2}}\right], & \omega_c > \omega_n. \end{cases}$$

线电压与相电压的关系为

$$\left. \begin{aligned} u_{a,b} &= u_{a,N'} - u_{b,N'} = G_f(s) \cdot (u_{A,N'} - u_{B,N'}), \\ u_{b,c} &= u_{b,N'} - u_{c,N'} = G_f(s) \cdot (u_{B,N'} - u_{C,N'}), \\ u_{c,a} &= u_{c,N'} - u_{a,N'} = G_f(s) \cdot (u_{C,N'} - u_{A,N'}). \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

进而推导出三相 SPWM 逆变输出线电压数学模型, 即

$$\left. \begin{aligned} u_{a,b} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,a})) \\ -\sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,b}) - 2\pi/3) \end{bmatrix}, \\ u_{b,c} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,b}) - 2\pi/3) \\ -\sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,c}) + 2\pi/3) \end{bmatrix}, \\ u_{c,a} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,c}) + 2\pi/3) \\ -\sin(\omega_c t + \phi(\omega_{c,a})) \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

2 三相逆变器故障建模

当 IGBT 发生故障后, 将会严重影响逆变器的输出. 通过 MATLAB/Simulink 的仿真分析, 在各个 IGBT 发生短路情况下, V1, V3, V5 发生短输出线电压波形, 如图 2 所示.

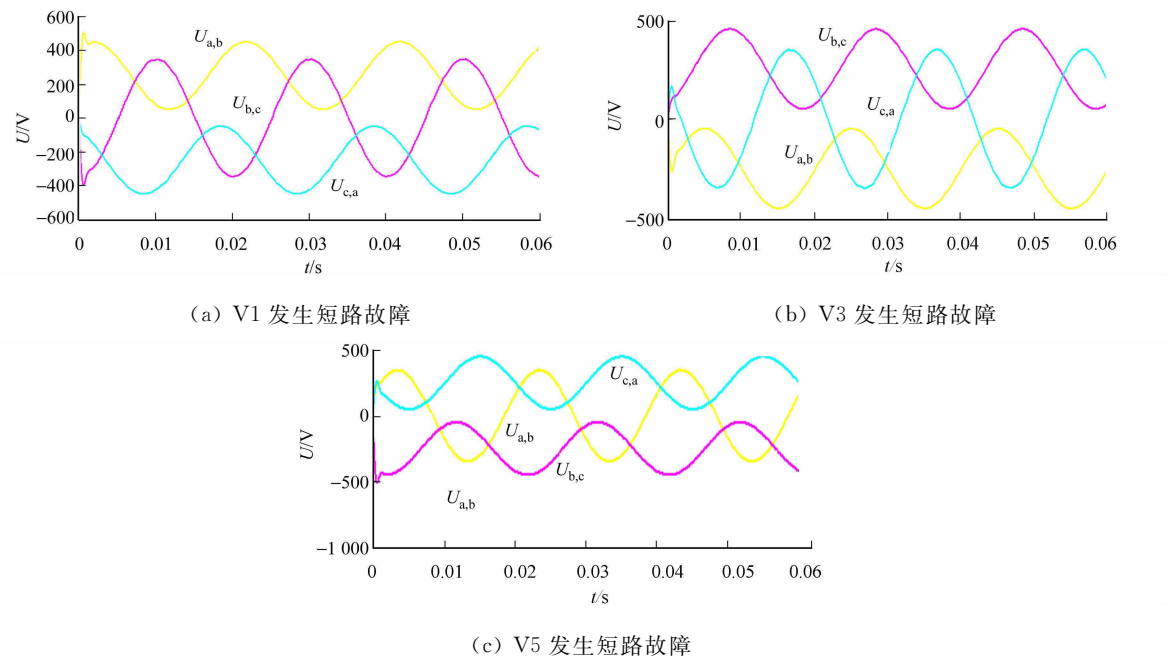


图 2 V1, V3, V5 发生短路故障时的线电压波形

Fig. 2 Line voltage waveforms of V1, V3, V5 with short circuit fault

目前, 提出的多种故障诊断方法, 如专家系统、基于神经网络的算法、基于小波变换或者因子分析的算法, 虽然诊断效果基本能达到要求, 但是实施都较为繁琐, 且发生误诊断的概率相对较高. 通过分析三相逆变桥路以及发生短路故障后的输出波形, 可以推导出当 V1, V3, V5 发生短路故障后, $U_{A,N'}$ 恒等于 $U_d/2$. 同理, 当 V2, V4, V6 发生短路故障后, $U_{A,N'}$ 恒等于 $-U_d/2$. 进而可以推导出三相 SPWM 逆变器的任意一个 IGBT 发生短路故障后的数学模型. V1, V3, V5 故障数学模型输出, 如图 3 所示.

V1 短路表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_{a,b} &= A(\omega_c) \left(\frac{U_d}{2} - K_p \sin(\omega_c t + \phi_b + \phi(\omega_c)) \right), \\ U_{b,c} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi_b + \phi(\omega_c)) \\ -\sin(\omega_c t + \phi_c + \phi(\omega_c)) \end{bmatrix}, \\ U_{c,a} &= A(\omega_c) \left(K_p \sin(\omega_c t + \phi_c + \phi(\omega_c)) - \frac{U_d}{2} \right). \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

V3 短路表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_{a,b} &= A(\omega_c)(K_p \sin(\omega_c t + \phi_b + \phi(\omega_c)) - \frac{U_d}{2}), \\ U_{b,c} &= A(\omega_c)(\frac{U_d}{2} - K_p \sin(\omega_c t + \phi_c + \phi(\omega_c))), \\ U_{c,a} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi_c + \phi(\omega_c)) \\ -\sin(\omega_c t + \phi_a + \phi(\omega_c)) \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

V5 短路表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_{a,b} &= K_p A(\omega_c) \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t + \phi_c + \phi(\omega_c)) \\ -\sin(\omega_c t + \phi_b + \phi(\omega_c)) \end{bmatrix}, \\ U_{b,c} &= A(\omega_c)(K_p \sin(\omega_c t + \phi_b + \phi(\omega_c)) - \frac{U_d}{2}), \\ U_{c,a} &= A(\omega_c)(\frac{U_d}{2} - K_p \sin(\omega_c t + \phi_a + \phi(\omega_c))). \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

对比图 2,3 可以验证:建立的故障模型是正确的. 同理,可推导出 V2,V4,V6 发生短路故障后逆变系统的数学模型.

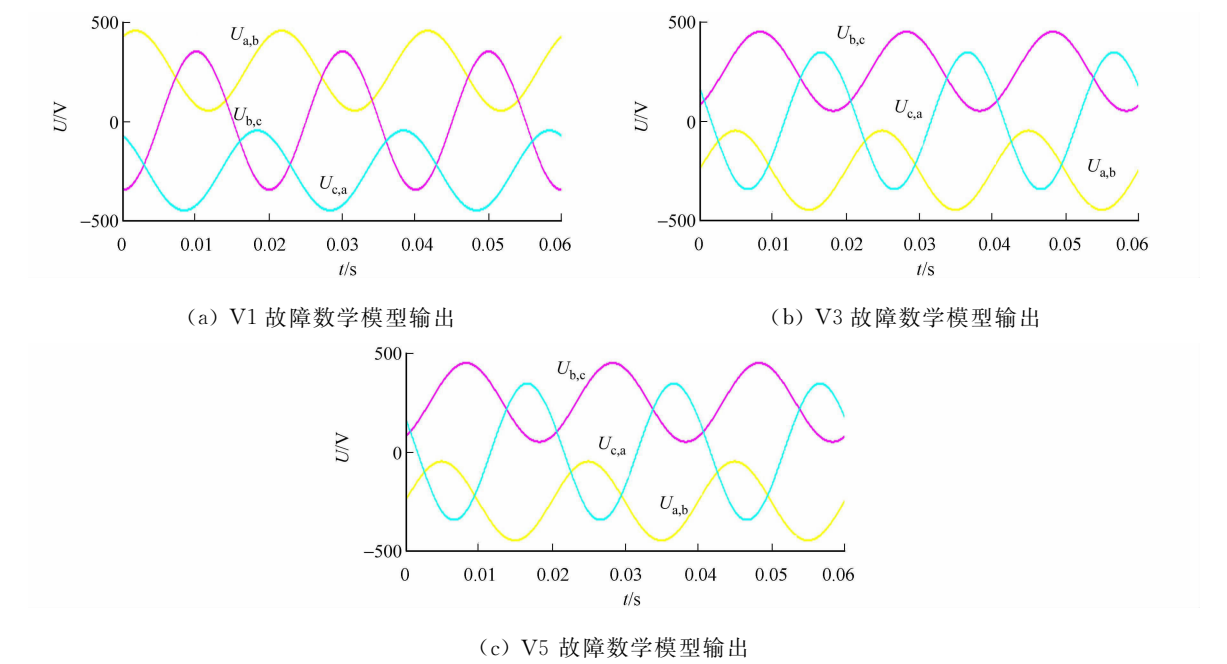


图 3 V1,V3,V5 故障数学模型输出

Fig. 3 Fault mathematic output models of V1, V3, V5

3 容错控制策略

容错控制系统^[6-10]是具有冗余能力的控制系统,即在某些部位发生故障的情况下,经过容错控制,系统的原定目标性能能够保持在可接受范围内. 目前容错控制方法主要分为两大类^[11]:基于硬件冗余的方法和基于功能冗余的方法. 功能冗余指系统中诸部件间在功能上有重叠,其中一个部件的部分或全部功能可由其他部件的功能来代替. 基于硬件冗余的容错控制方法,就是通过设置备份元件或组件,在元器件发生故障后,利用备份元件或组件替换故障的元器件.

三相桥式逆变电路^[12]有 3 个桥臂,由 6 个带续流二极管的 IGBT 组成,编号为 $V_j(j=1,2,3,4,5,6)$. 目前,人们提出了一种基于硬件冗余的容错控制方法^[13],即多加了一个桥臂,由 V_7, V_8 构成. 无故障情况下,开关 $FW_i(i=1,2,3)$ 组处于打开状态,开关 $NFW_k(k=1,2,3)$ 处于闭合状态. 当 V_j 中的某个开关发生故障后,协调控制 FW_i 和 NFW_k 两组开关的关断,用冗余桥臂代替故障桥臂,从而保证三相电压正常输出.

在逆变系统的运行过程当中,实时比较三相逆变输出值与故障模型输出值的大小关系,当实际输出大小等于某一个 IGBT 短路的故障模型,或者两者的误差在可接受范围时(仿真时,设定误差可接受范围在 $2\times U_d/100$ 内),就可以判断哪个 IGBT 发生了短路故障从而实施相应的控制策略,使得逆变输出迅速恢复正常^[14]. 例如,当第一桥臂中的某个管子发生故障后,如果线电压输出大小等于故障模型式 5 的输出,或者两者输出的差在可接受范围内,就可以判断 V1 发生了短路故障,则打开 NFW₁ 开关,闭合 FW1 开关,同时将 V1,V2 的门控信号切换至 V7,V8,从而实现了系统的正常性能输出,提高了系统的可靠性. 具有硬件冗余结构的三相桥式逆变电路以及第一、三桥臂发生短路故障后进行电路重构的等效电路,如图 4 所示,第二桥臂短路故障重构电路图与此类似.

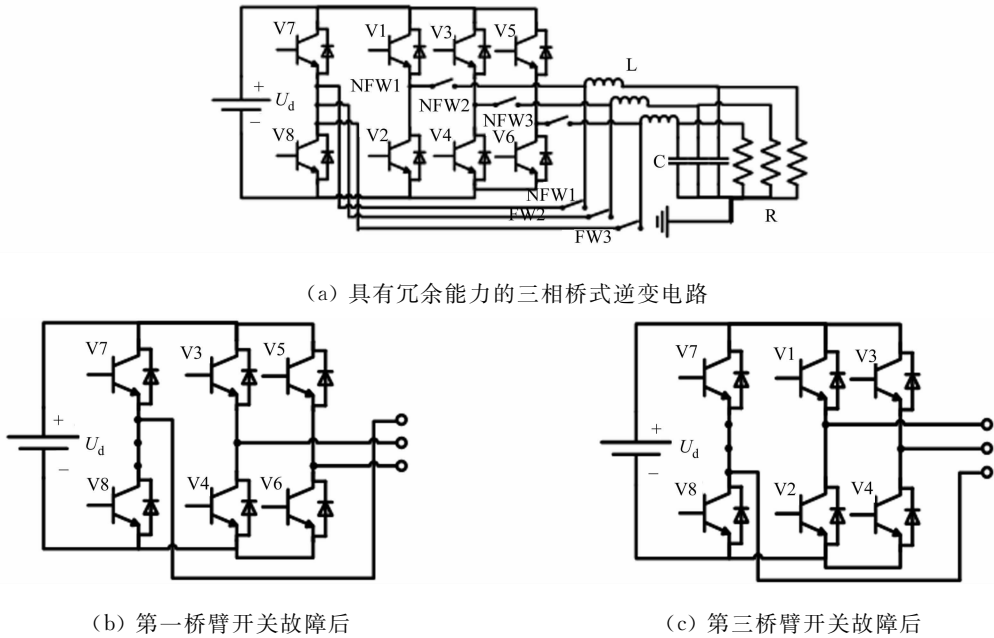


图 4 电路拓扑及重构的等效电路图

Fig. 4 Circuit topology and the restructured equivalent circuit diagram

4 仿真研究

Simulink 容错控制仿真模块主界面,如图 5 所示. 其中,逆变模块采用开环控制策略. 三相逆变桥路中 6 个 IGBT/Diode 分别并联一个理想开关 $S_{i,k}(k=1,2,3,4,5,6)$,用于模拟逆变系统发生短路故障. 例如,当 $S_{1,1}$ 开关闭合时,即表示 V1 发生了短路故障. 逆变系统正常工作时, $S_{i,k}$ 处于打开状态. 子系统 FaultDiagnosis 用于诊断系统故障,当故障发生后,输出故障信号; SFV 信号用于控制故障信号的发生时间; Fault_g1 和 Fault_g2 是根据诊断出的故障发生位置,选择出备份桥路的门控信号.

设负载为纯电阻负载,阻值大小为 $50\ \Omega$;载波频率为 $12\ \text{kHz}$;调制波为 $50\ \text{Hz}$ 正弦波;直流侧输入电压 $U_d=400\ \text{V}$;逆变输出采用 LC 滤波. 根据三相 SPWM 逆变器的最低次谐波特性,结合电路的其他参数设计巴特沃斯低通滤波器,计算得 $L=9.4\ \text{mH}$, $C=3.8\ \mu\text{F}$.

利用 Matlab 图形用户界面设计(GUI)功能,可以很方便地设计仿真控制界面^[15]. 仿真界面输出波

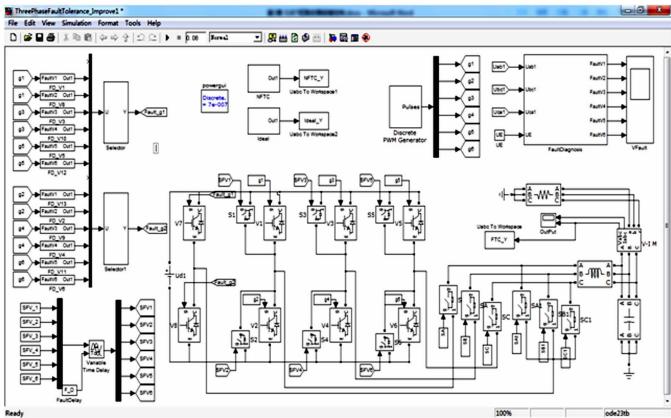
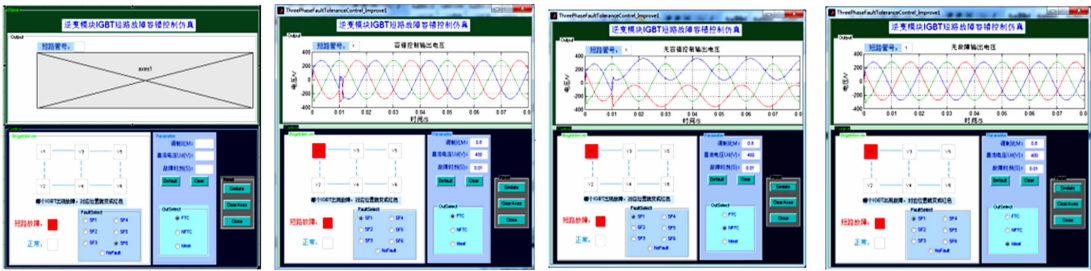


图 5 Simulink 仿真程序

Fig. 5 Simulink simulation procedures

形模式有 3 种,分别为容错控制模式(FTC)、无容错控制模式(NFTC)、无故障理想输出模式(Ideal). 为了方便的分析容错控制的效果,现假设 V1 出现了短路故障,故障发生时刻设定在 0.01 s,仿真显示 3 种输出模式下的三相逆变电路线电压输出波形,如图 6 所示.



(a) GUI 仿真界面 (b) V1 短路 FTC 模式 (c) V1 短路 NFTC 模式 (d) V1 短路 Ideal 模式

图 6 仿真界面输出波形对比

Fig. 6 Comparison of simulation output waveforms

由图 6(b)可知:由于采取了基于数学模型的故障诊断方法,三相输出电压大约经过 0.012 s 便恢复了正常,恢复正常后的波形与图 6(d)理想输出波形基本一致,达到了较为理想的控制效果. 图 6(c)为 V1 故障发生后,不采取容错控制策略的线电压输出波形,可以看出:其中两个线电压的相位和幅值都发生了变化,如果不采取容错控制策略,将会对负载产生严重的影响.

5 结束语

建立三相 SPWM 逆变模块 IGBT 发生短路故障后逆变模块的数学模型,根据这个故障模型,实现对系统故障的有效诊断,同时结合基于硬件冗余的容错控制方法,实现三相逆变系统短路故障的容错控制. 在 MATLAB/Simulink 环境下,系统仿真实验一定程度上验证了该容错控制方法的有效性与可行性. 这种基于功能冗余的容错控制方法在很大程度上克服了单纯采用硬件冗余方法所带来的缺陷,对于提高系统的可靠性能、安全性能和经济性能具有十分重要的意义.

参考文献:

[1] 曲景阳,方质彬. 变频器 IGBT 开路故障诊断及容错控制[J]. 变频器世界,2013,12(11):61-64.
[2] 王功胜. 变频器逆变模块损坏原因分析[J]. 自动化应用,2010,12(2):36-38.
[3] 王瑞. 三相电压源型逆变器故障容错综述[J]. 变频器世界,2013,12(12):35-40.
[4] 孔雪娟. 数字控制 PWM 逆变电源关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005:20-55.
[5] 吴麒. 自动控制原理(上)[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2006:78-79.
[6] 周东华. 容错控制理论及其应用 [J]. 自动化学报,2000,26(6):789-792.
[7] 周玉国. 线性系统的容错控制 [J]. 信息与控制,2001,30(7):626-627.
[8] 苗启. 容错控制理论的新进展 [J]. 电气自动化,2007,29(6):3-4.
[9] 张华强,王新生,李鑫. 基于小波变换的 TWERD 变频器故障诊断研究 [J]. 微电机,2011,44(3):53-62.
[10] 李平,金福江. 未知仿射非线性系统的执行器容错控制设计 [J]. 控制工程,2014,6(1):107-110.
[11] 陈跃鹏. 广义系统的鲁棒控制与容错控制[M]. 北京:科学出版社,2010:9-11.
[12] 王兆安. 电力电子技术[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2011:163-167.
[13] 杜维南. 逆变器故障诊断与容错控制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011:43-53.
[14] 陈永真. IGBT 短路保护的策略分析[J]. 电气传动,2010,40(8):38-41.
[15] 郑阿奇,曹戈. MATLAB 实用教程[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2011:115-165.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)