

基于电压残差的三相逆变器故障诊断

柯 炎, 樊 波

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对三相逆变器开路故障诊断问题,研究了一种具有动态参考量的电压残差故障诊断方法。利用逆变器闭环控制系统现有的相电压采样信号,将延迟一个周期的相电压波形作为动态参考,与当前的相电压信号进行比较得到电压残差波形,通过设置合理的故障检测阈值,实现逆变器开关管开路故障的准确诊断。仿真结果验证了该方法具有抗不平衡负载和负载突变干扰的能力,且诊断时间小于一个周期,具有容易实现、无需增加硬件的优点。

关键词 三相逆变器;故障诊断;残差;电压闭环控制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.01.005

中图分类号 TM933 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)01-0027-05

A Three-Phase Inverter Fault Diagnosis Based on Voltage Residual

KE Yan, FAN Bo

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract In view of the open circuit fault diagnosis of three-phase inverter, a fault diagnosis method based on residual theory with dynamic reference quantity is proposed. This paper is to utilize the existing phase voltage sampling signal of the inverter closed-loop control system, take the phase voltage waveform with one period delay as a dynamic reference, and obtain the voltage residual waveform by comparing the dynamic reference voltage signal with the current phase voltage signal through setting a reasonable fault detection threshold for realizing the accuracy diagnosis of the open circuit fault of the inverter. The simulation results show that this method has the ability to resist unbalanced load and the load mutation interference, and the diagnosis time is less than one cycle, and has the advantages of low complexity and easy implementation.

Key words three-phase inverter; fault diagnosis; voltage residual; closed-loop control

电力电子设备中,功率开关管由于高频开关、损耗发热,反复承受高压、大电流冲击、驱动信号丢失等因素,易于发生开路 and 短路故障^[1]。实际的调研报告^[2]也指出功率半导体器件是电力电子设备中最易发生故障的环节。因此快速准确地检测出功率开关管故障对于及时采取保护措施、避免更大损失以

及容错驱动具有重要意义。短路故障从发生到产生过电流的时间较短、危害较大,多采用硬件电路进行保护^[3-5]。保护电路对开关管短路故障进行保护后,开关管处于开路状态,因此短路故障也可以归结为开路故障,然后进行诊断定位。

目前,逆变电路的故障诊断理论研究较多,很多

收稿日期: 2019-09-10

作者简介: 柯 炎(1995—),男,湖北襄阳人,硕士生,主要从事储能变流器故障诊断研究。E-mail:kyle1688@foxmail.com

引用格式: 柯炎,樊波.基于电压残差的三相逆变器故障诊断[J].空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(1):27-31.KE Yan,FAN Bo.A Three-Phase Inverter Fault Diagnosis Based on Voltage Residual[J].Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition),2020,21(1):27-31.

理论趋于完善,其相关技术可以分为 3 种基本类型:基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和专家系统法^[6]。基于解析模型的方法利用诊断系统的数学模型和电路状态信息进行故障诊断。这种方法需要对系统建立精确的数学模型,诊断准确性易受模型准确性、系统参数及噪声的影响。专家系统法通过模拟专家的经验对诊断对象的信息进行推理实现故障诊断,但是不能从新的经验数据中学习,较依赖于专家的经验知识的获取,庞大知识库维护复杂。基于信号处理的诊断方法通过小波变换、电流 Park 矢量变换和频谱分析等信号处理方法对系统的幅值、频率等信息进行处理、分析进行故障诊断,再与神经网络^[7]、支持向量机^[8]、深度神经网络^[9]、模糊逻辑^[10]等智能方法相结合识别故障类型。这种方法虽然不需要建立系统的模型,但是其需要较多计算能力,时间较长,复杂性较高。

本文利用逆变器闭环控制系统现有的相电压采样信号结合残差理论进行故障诊断,不需要额外的传感器,而且可以集成到逆变器闭环控制程序中。电压残差法故障诊断是将延迟一个周期的相电压信号作为动态参考,与当前的相电压信号进行比较得到电压残差波形,通过设置合理的故障检测阈值,实现逆变器开关管开路故障的准确诊断。具有实现容易,不增加硬件电路,诊断速度快,对负载变化鲁棒性强等优点。

1 电压残差法故障诊断原理

在电路故障诊断中,残差是指实际测量值与估计值之间的差值^[6]。三相逆变器发生故障后,电路的输出变量相比估计值通常会发生变化,表现为残差显著偏离零点。而正常状态下,残差在零点附近。因此可用电路故障之后残差包含的故障信息进行故障诊断。

三相逆变器的拓扑结构如图 1 所示。相电压作为逆变器闭环控制系统的状态量,通过一定的控制算法可以达到相电压的无静差控制,因此选取三相电压构建状态残差。

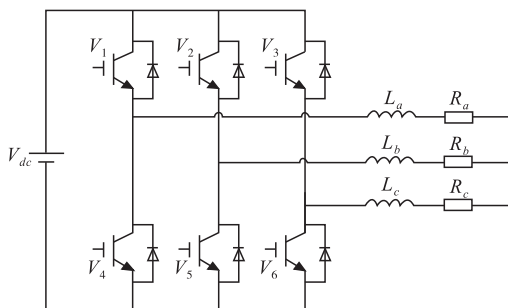


图 1 三相逆变器电路拓扑图

逆变器三相输出电压状态残差 γ_x 表达式如下:

$$\gamma_x = v_{xo}^* - v_{xo} \tag{1}$$

式中: v_{xo}^* 为三相电压参考量; v_{xo} 为三相电压采样量; $x = a, b, c$ 。三相输出电压采样值可以直接从逆变器闭环控制中的电压传感器中得到,三相电压参考量由软件生成或由采样得到,因此残差的构建不需要额外的硬件电路,故障诊断程序可以移植到闭环控制程序中。

相电压参考量 v_{xo}^* 可以采用固定信号,如:

$$v_{xo}^* = \begin{cases} v_{ao}^* = V_m \sin(\omega t) \\ v_{bo}^* = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_{co}^* = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \tag{2}$$

采用固定电压参考量时,如果输出电压幅值跌落,电压残差将不为零。而输出电压幅值跌落剧烈的情况,电压残差也将变大,甚至造成故障的误诊断。针对固定电压参考量生成的状态残差易受负载电压突变影响的问题,采用一种动态电压参考量,将输出电压上一个周期时的采样值作为当前输出电压的参考量。

动态电压参考量如式(3)所示,其中 T 为基波周期。

$$v_{xo}^* = \begin{cases} v_{ao}^* = V_{ao} \sin(\omega(t - T)) \\ v_{bo}^* = V_{bo} \sin(\omega(t - T)) \\ v_{co}^* = V_{co} \sin(\omega(t - T)) \end{cases} \tag{3}$$

图 2(分图横轴单位、数值相同,下同)为 2 种电压参考量下 A 相电压残差,0.1 s 时 A 相电压从 $311\sin(\omega t)$ 跌落为 $300\sin(\omega t)$,而固定电压参考量仍是 $311\sin(\omega t)$,A 相电压残差 γ_a 由 0 变为 $11\sin(\omega t)$,而此时逆变电路仍是无故障运行状态。当采用动态电压参考时,0.1 s 时 A 相电压出现跌落,此时电压参考量仍是上一个周期的值,因此电压残差 γ'_a 不为 0,一个周期之后电压残差又恢复为 0。即对于输出电压跌落的情况,残差跳变仅存在于电压跌落之后的一个周期之内,有利于故障的准确诊断。

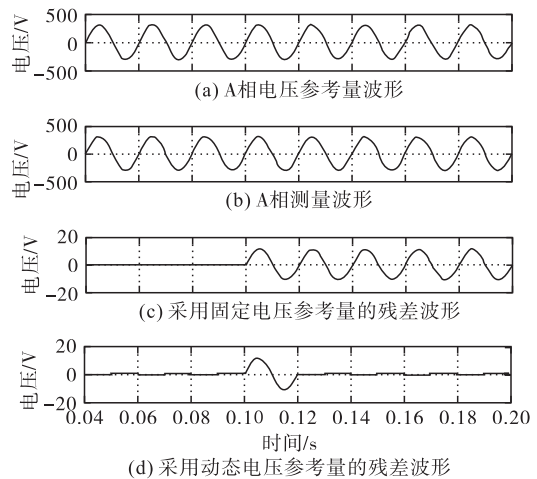


图 2 2 种电压参考下 A 相电压残差示意图

类比可知,对于电路故障后输出电压发生畸变

的情况,残差跳变也只存在于故障之后的一个周期之内。本方法利用故障之后的电压残差突变进行故障诊断,因此故障诊断时间小于一个基波周期。

2 电压残差法的仿真分析及实现

在 Matlab/Simuink 环境建立电压电流双环控制

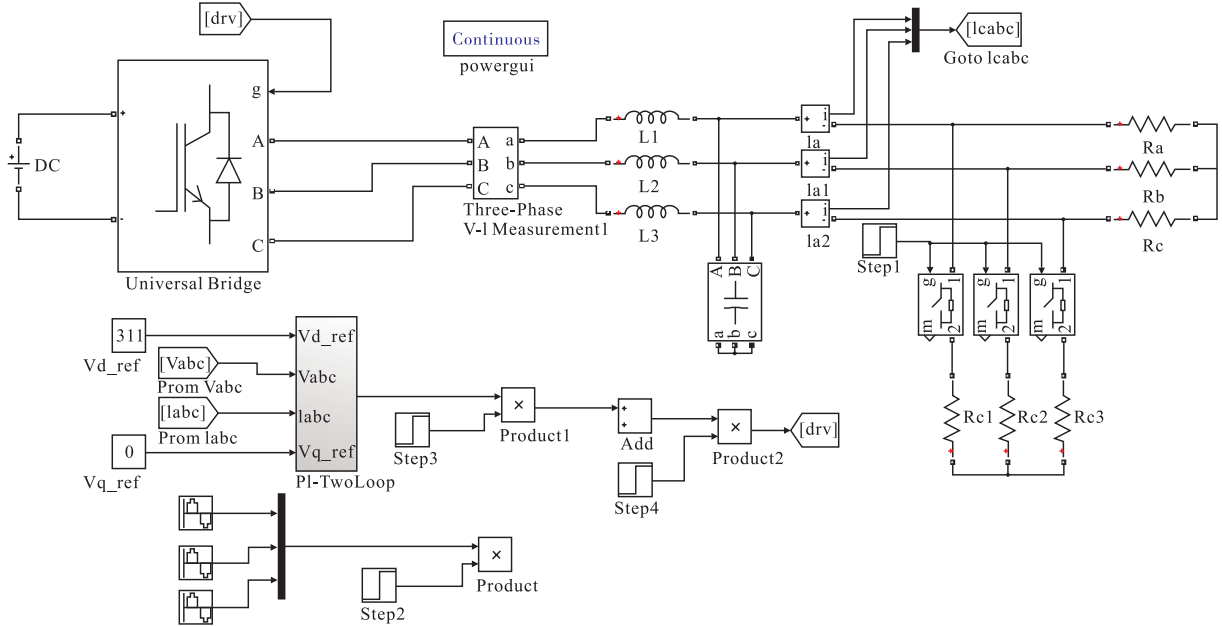


图 3 三相逆变电路仿真模型

图 4 为 A 相上管发生故障前后三相电压输出波形和各相残差波形, A 相波形畸变最严重,上周基本缺失,残差大于 0,残差极值绝对值最大。B、C 相由于没有发生故障,波形虽有变形,仍然呈正负交变状态,且残差绝对值比 A 相小,B 相残差绝对值大于 C 相。通过对单管开路故障进行仿真,得到 6 种故障各相输出电压残差极值,见表 1。

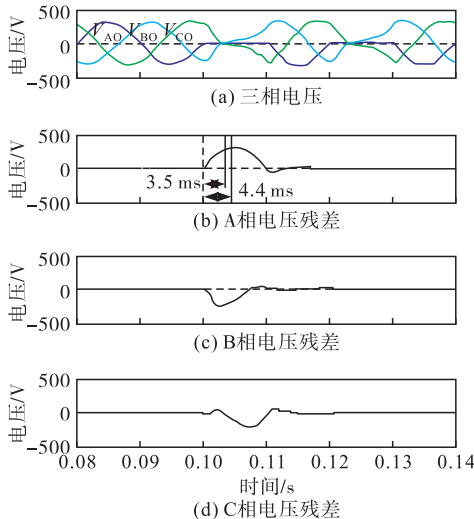


图 4 A 相上管故障前后三相电压及残差图
从表 1 可以看出,故障相的电压残差极值最大,

的三相逆变器仿真模型如图 3 所示。电路相关参数如下。输入直流电压为 800 V,输出三相电压为 220 V, 50 Hz,输出滤波电感为 10 mH,0.5 Ω,输出滤波电容数为 10 μF,开关频率为 10 kHz。电压环比例系数为 0.3,电压环积分系数为 20,电流环比例系数为 0.02,电流环积分系数为 10,电压环限幅值为 ±5,电流环限幅值为 ±0.95,电压残差检测阈值取 ±290 V。

且上管开路故障时,故障相电压残差极值为正,下管故障时,故障相电压残差极值为负。因此可以通过设置合理的检测阈值及残差的极性来判断故障的位置。上管故障电压残差阈值的可选范围为(310, 272),下管故障电压残差阈值的可选范围为(-310, -272)。

表 1 故障后各相电压残差极值

故障类型	A 相电压残差极值/V	B 相电压残差极值/V	C 相电压残差极值/V
A 相上管开路	310	-272	-213
A 相下管开路	-310	272	213
B 相上管开路	-213	310	-272
B 相下管开路	213	-310	272
C 相上管开路	-272	-213	310
C 相下管开路	272	213	-310

残差检测阈值影响故障检测的速度和准确性裕度。例如当 A 相上管发生故障时,B 相电压残差极值相对较大,若将故障检测阈值设置过小,离 B 相电压残差极值较近,易发生误诊断。图 4 所示为 A 相上管发生故障前后三相输出电压波形和各相残差波形。当残差的故障检测阈值设置为 280 时,故障发生后 3.5 ms,A 相电压残差达到检测阈值,故障

检出,故障检测的准确性裕度为 3 V。当残差的故障检测阈值设置为 300 时,故障发生后 4.4 ms,A 相电压残差达到检测阈值,故障检出,故障检测的准确性裕度为 23 V。因此选取较小的故障检测阈值可以更快地检测出故障,但是故障检测的准确性裕度相对变小,反之亦然。综合考虑本文选取故障检测阈值为 300 V。

3 抗干扰性分析

3.1 抗不平衡负载干扰分析

在实际三相逆变电路中会出现三相不平衡负载的情况。为了检验本方法在三相不平衡负载下的故障检测的有效性,分别设置逆变器仿真模型的负载 $R_a、R_b、R_c$ 为 $33\ \Omega、60\ \Omega、100\ \Omega$ 。

图 5 为三相不平衡负载 0.105 s 时,A 相电压波形峰值处上管开路情况下三相电压、电流、残差和故障信号波形。三相电压波形和平衡负载时相比变化不大。由于故障发生在峰值时刻,此时 A 相电压高于阈值,因此故障信号没有跳变。在波形下一个正半周的 0.104 2 s 时刻,A 相电压残差达到阈值时,故障信号跳变,系统检测到故障。故障检测时间为 9.2 ms。

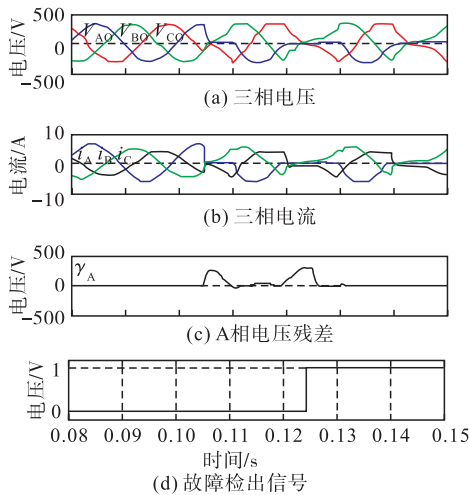


图 5 三相不平衡负载下 A 相峰值时刻上管开路故障

图 6 为三相不平衡负载下,0.095 s A 相电压波谷时刻上管开路故障三相电压、电流及残差波形,故障信号在 0.124 2 s 跳变,指示 A 相上管发生故障,故障诊断时间为 19.2 ms。其他故障情况的分析结果类似,说明本方法能适应不平衡负载情况,有效诊断出开路故障。

3.2 抗负载切换干扰分析

为检验本方法对负载切换的抗干扰能力,考虑极端情况,空载切换满载和满载切换空载。图 7、图 8 分别为 0.1 s 电路空载切换满载和满载切换空载

情况下三相电压和三相残差波形。观察可知在负载切换情况下残差波动较小,远小于诊断阈值,故障诊断准确性不受负载切换影响。

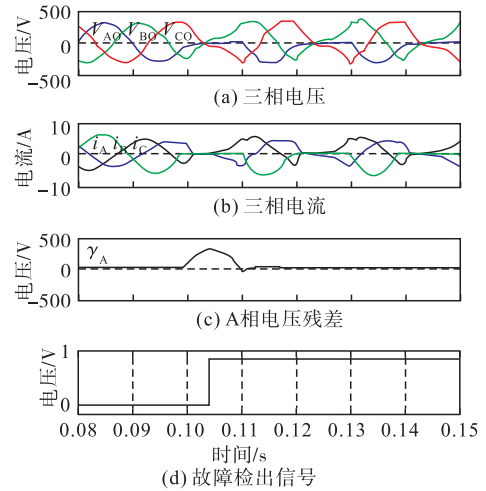


图 6 三相不平衡负载下 A 相波谷时刻上管开路故障

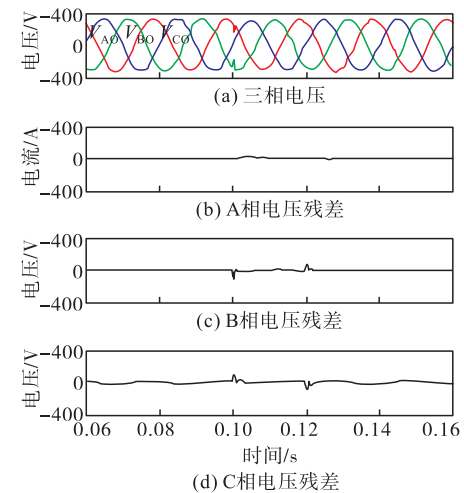


图 7 电路空载切换满载情况

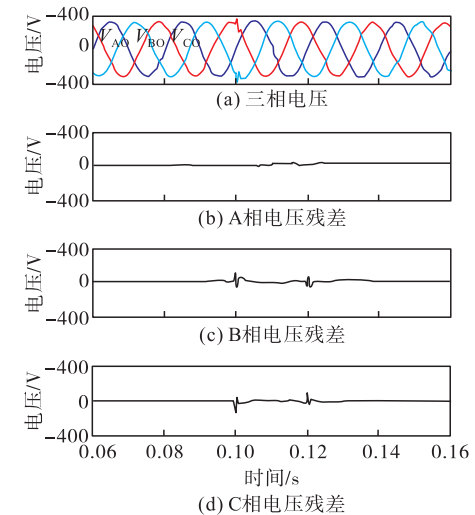


图 8 电路满载切换空载情况

4 结语

基于电压残差的故障诊断方法通过将上一个周

期的电压采样量作为参考量,与当前时刻的采样值比较得到电压残差,利用故障后的电压残差信号突变进行故障诊断。仿真分析结果表明,对于电压闭环控制的三相逆变器系统,该方法有较好的抗三相不平衡负载及负载突变的能力,且诊断时间较快,小于一个周期,诊断所需的电压检测量可以从电压闭环控制系统中得到,不需要额外的传感器,故障诊断程序可以集成到闭环控制系统中。该方法具有成本低、容易实现、诊断时间短、抗干扰性强等优点。

参考文献

[1] CHOI U M, LEE J S, BLAABJERG F, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control for a Grid-Connected NPC Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(10): 1-1.

[2] YANG S, BRYANT A, MAWBY P, et al. An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.

[3] 胡亮灯,孙驰,陈玉林,等. 大功率 IGBT 的短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 194-205.

[4] LI X C, XU D W, ZHU H Y, et al. An Indirect IGBT Over-Current Detection Technique via Gate Voltage Monitoring and Analyzing[J]. IEEE Transactions on

Power Electronics, 2018, 34(4): 3615-3622.

[5] RODRIGUEZ-BLANCO M A, CLAUDIOI-SANCHEZ A, THEILLIOL D, et al. A Failure-Detection Strategy for IGBT Based on Gate-Voltage Behavior Applied to a Motor Drive System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1625-1633.

[6] 王禹玺. 多能源储能系统中三相逆变器故障诊断方法与参数辨识的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[7] 陈丹江, 叶银忠. 基于多神经网络的三电平逆变器器件开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 120-126.

[8] DELPHA C, CHEN H, DIALLO D. SVM Based Diagnosis of Inverter Fed Induction Machine Drive: A New Challenge [C]// 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Canada: IEEE, 2012A: 3931-3936.

[9] 徐继伟, 宋保业, 公茂法. 基于深度神经网络的多电平逆变器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2018, 56(2): 123-128.

[10] YAN H, XU Y, CAI F, et al. PWM-VSI Fault Diagnosis for PMSM Drive Based on Fuzzy Logic Approach [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 759-768.

(编辑: 姚树峰)

(上接第 8 页)

[6] USA Department of Defense. Weapon System Integrity Program [Z]. US: Department of Defense Standard MIL-HDBK-515 (USFA), 2013.

[7] USA Department of Defense. Propulsion System Integrity Program [Z]. US: Department of Defense Standard MIL-STD-3024(USFA), 2008.

[8] YE YT, ZHANG T, MA B L, et al. Structural Integrity Control Technology Based on Structural Damage Monitoring[C]//36th Conference and 30th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity. Poland: [s. n.], 2019.

[9] 何宇廷, 张腾, 马斌麟. 军用飞机结构作战完整性的基本内涵与评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(5): 1-7.

[10] 何宇廷. 飞行器的修复性及其设计方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 1-8.

[11] 张海军. 装备通用质量特性概述[J]. 军民两用技术与产品, 2015, 9(2): 252-253.

[12] 张建华. 飞机战伤抢修工程学[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[13] 姚武文. 战伤飞机安全飞行评估标准与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[14] 张恒喜, 刘晓东, 段宝君等. 现代飞机的效费分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[15] 马绍民, 章国栋. 综合保障工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[16] 何宇廷. 飞行器安全性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[17] 李曙林, 常飞, 何宇廷. 军用飞机作战使用生存力分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

(编辑: 姚树峰)