

# 四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障检测

韩红彬<sup>1</sup>, 丁丽娜<sup>2</sup>

(1. 中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052;

2. 大连海洋大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 四象限脉冲整流器广泛应用于电力牵引传动系统。IGBT 是脉冲整流器的核心器件, 易发生故障, 对其开路故障检测进行了研究。首先分析了脉冲整流器 IGBT 开路故障下的特征。然后用网侧电流平均值除以电流绝对值的平均值, 设为检测变量, 对各功率等级、各故障下的检测变量进行分析, 总结出设置阈值的方法; 最后通过硬件在环仿真验证了检测方法的有效性。

**关键词:** 故障检测; IGBT; 开路故障; 四象限脉冲整流器

中图分类号: TM 921.45 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0095-04

## IGBT Open-Circuit Fault Detection in Four-Quadrant Pulse Converter

HAN Hongbin<sup>1</sup>, DING Lina<sup>2</sup>

(1. CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116052, China;

2. School of Information Science & Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Four-quadrant pulse converters were widely applied in electric traction drive systems. IGBT was the core device of the four-quadrant pulse converter, which was prone to fail. IGBT open-circuit fault detection for four-quadrant pulse converters was studied. Firstly, the characteristics of the open-circuit faults were analyzed. Then the average value of the grid current was divided by the average value of the current's absolute value as the detection variable. The detection variable under different power level and each fault was analyzed and the threshold was decided by the detection variable with rated power. Finally, the effectiveness of the detection method was verified by hardware-in-the-loop simulation.

**Key words:** fault detection; open-circuit fault; four-quadrant pulse converter

## 0 引言

四象限脉冲整流器能输出稳定的直流电压, 且网侧电流正弦度较高, 能实现近似单位功率因数, 因此被广泛应用于电力牵引传动系统<sup>[1-4]</sup>。牵引传动系统装置运行环境复杂, 腐蚀、湿度、温度等长期存在的因素, 以及电浪涌、静电等不确定因素都会造成故障。其中四象限脉冲整流器功率模块在运行过程中故障率较高<sup>[5]</sup>。因此, 研究其在线故障检测技术显得十分重要。

在 IGBT 故障诊断领域, 对三相逆变器的开路故障研究较多。文献[6]提出用电流矢量轨迹

斜率和电流矢量瞬时频率对开关管开路故障进行诊断。文献[7]利用平均电流 Park 矢量诊断逆变器开路故障。为了克服故障诊断对负载的依赖性, 提出了归一化直流法<sup>[8]</sup>。归一化直流法中分母是傅里叶变换的基波系数, 计算复杂, 因此提出了简单直流法<sup>[8]</sup>和负载电流分析法<sup>[9]</sup>。

本文运用负载电流分析法的思想, 对四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障进行了研究。分析了 IGBT 开路故障下的网侧电流、直流侧电压, 总结出故障特征。分析了检测变量在不同功率下的取值, 得出设定阈值的方法。最后通过硬件在环仿真验证了故障检测的有效性。

## 1 IGBT 开路故障特征分析

四象限脉冲整流器拓扑如图 1 所示。 $u_N$  为网侧电压,  $i_N$  为网侧电流,  $L_N$ 、 $R_N$  分别为牵引绕组的漏电感和电阻, T1~T4 及其反并联二极管组成 H 桥,  $L_2$ 、 $C_2$  为滤波电感、电容,  $C_d$  为中间支撑电容,  $U_d$  为直流侧电压,  $I_d$  为负载电流。

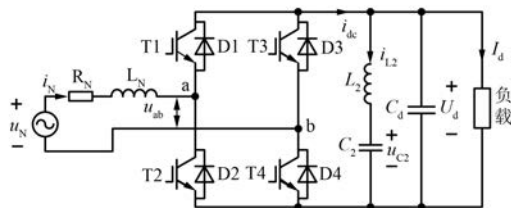


图 1 四象限脉冲整流器拓扑

通过控制 T1~T4 通断, 改变输入端电压  $u_{ab}$  的幅值和相位, 使得四象限脉冲整流器达到以下控制目标:

- (1) 直流侧输出稳定的直流电压;
- (2) 网侧获得有着近似单位功率因数的正弦波电流。

正常运行状态下, 网侧电压、电流和直流侧电压如图 2 所示。直流侧电压输出稳定, 网侧电流与网侧电压同相位, 近似达到单位功率因数。由于载波频率较低, 网侧电流纹波较大, 谐波含量较多。

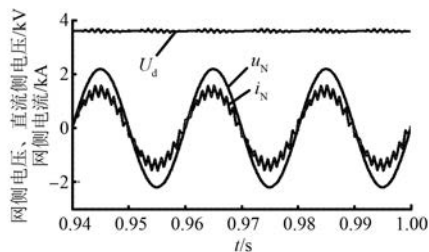


图 2 正常状态下的网侧电压、网侧电流和直流侧电压

### 1.1 T1 和 T4 开路故障分析

T1 发生开路故障后, 如图 3(a) 所示。由于网侧电流为正时流过二极管 D1, T1 故障不影响电路状态。当网侧电流为负, 同时 T1 需要导通时, 电流只能经 D2 流通, 输入端电压应为 0, 结果导致为  $-U_d$ , 电感放电, 电流变小。当需要网侧电压和电感对支撑电容充电时, 由于电感未储能, 导

致直流侧电压下降。

如图 3(b) 所示, T4 故障后, 输入端电压不能得到预期电平, 网侧电流负半部分同样畸变, 直流侧电压降低。原来流过 T4 的路径变为 D3。

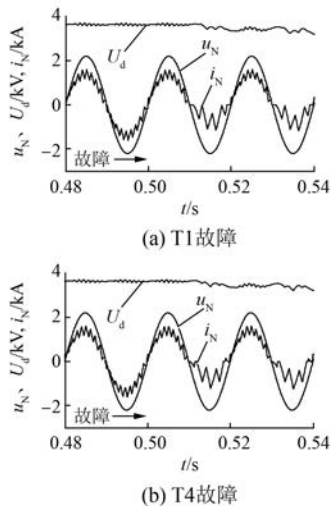


图 3 T1 和 T4 开路故障波形

### 1.2 T2 和 T3 开路故障分析

如图 4(a) 所示, T2 开路故障后, 网侧电流为正, 电流不能流过 T2, 只能流过 D1, 正电流畸变, 直流侧电压减小。在电流为负时, 电流流过 D2, T2 故障不影响电路。

T3 开路故障后, 如图 4(b) 所示, 网侧电流正半部分畸变, 直流侧电压下降, 电流不经 T3 流过 D4。

由以上分析得出, IGBT 发生开路故障后, 直

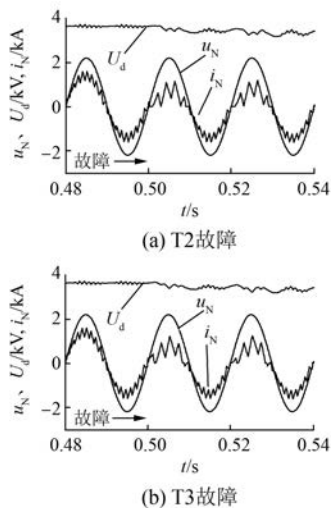


图 4 T2 和 T3 开路故障波形

流侧电流均下降。T1(或 T4)开路故障后的网侧电流相似,都是负半部分畸变。T2(或 T3)开路故障后的网侧电流正半部分畸变。

## 2 IGBT 开路故障检测方法

由 IGBT 开路故障特征分析,T1(或 T4)故障后网侧电流负半部分幅值变小,而 T2(或 T3)故障后网侧电流正半部分幅值变小。一个很自然的想法是通过求平均值来检测故障。正常状态下一个基波周期内的平均值近似为零,T1(或 T4)故障后,电流平均值为正值,T2(或 T3)故障后,电流平均值为负值。设定阈值,通过比较平均值与阈值检测故障。

定义动态窗求平均值:

$$\langle i_N \rangle = f_N \int_0^{1/f_N} i_N(t) dt = \frac{f_N}{f_s} \sum_{k=1}^{f_s/f_N} i_N(k) \quad (1)$$

式中:  $f_N$ ——牵引网频率;

$f_s$ ——采样频率。

为了使  $\langle i_N \rangle$  独立于运行功率变化引起的网侧电流变化,检测变量  $D$  定义为  $\langle i_N \rangle$  除以电流绝对值的平均值:

$$\langle |i_N| \rangle = \frac{f_N}{f_s} \sum_{k=1}^{f_s/f_N} |i_N|(k) \quad (2)$$

$$D = \frac{\langle i_N \rangle}{\langle |i_N| \rangle} \quad (3)$$

不难得知,若 T1(或 T4)开路故障后网侧电流负半周为零,正半周与无故障时一样,检测变量  $D$  为 0.5。T2(或 T3)故障后若电流正半周为零,检测变量  $D$  为 -0.5。事实上,由图 3、图 4 可知,开路故障后网侧电流负半周(或正半周)并不为零。定义正半周平均值为

$$\langle i_a \rangle = \frac{f_N}{f_s} \sum_{k=1}^{f_s/f_N} \delta i_N(k) \quad (4)$$

$$\begin{cases} [\delta = 1] \leftrightarrow [i_N > 0] \\ [\delta = 0] \leftrightarrow [i_N < 0] \end{cases} \quad (5)$$

负半周绝对值的平均值为

$$\langle |i_b| \rangle = \frac{f_N}{f_s} \sum_{k=1}^{f_s/f_N} |\delta i_N(k)| \quad (6)$$

则

$$D = \frac{\langle i_a \rangle - \langle |i_b| \rangle}{\langle i_a \rangle + \langle |i_b| \rangle} = 1 - \frac{2}{1 + \frac{\langle i_a \rangle}{\langle |i_b| \rangle}} \quad (7)$$

经仿真分析,发现不同功率下,检测变量  $D$  的值不同。表 1 列出了不同功率下,检测变量  $D$  的值。

表 1 不同功率下的检测变量

| 功率   | T1(T4)故障                                      |      | T2(T3)故障                                      |       |
|------|-----------------------------------------------|------|-----------------------------------------------|-------|
|      | $\langle i_a \rangle / \langle  i_b  \rangle$ | $D$  | $\langle i_a \rangle / \langle  i_b  \rangle$ | $D$   |
| 10%  | 4.48                                          | 0.64 | 0.22                                          | -0.64 |
| 20%  | 3.42                                          | 0.55 | 0.29                                          | -0.55 |
| 50%  | 2.66                                          | 0.45 | 0.38                                          | -0.45 |
| 80%  | 2.29                                          | 0.39 | 0.44                                          | -0.39 |
| 100% | 2.02                                          | 0.34 | 0.5                                           | -0.33 |

由表 1 可得,功率越大,T1(T4)故障下  $\langle i_a \rangle / \langle |i_b| \rangle$  越小,T2(T3)故障下  $\langle i_a \rangle / \langle |i_b| \rangle$  越大,检测变量越小。额定功率下检测变量最小。因此,根据额定功率下的检测变量确定阈值。故障检测流程如图 5 所示。

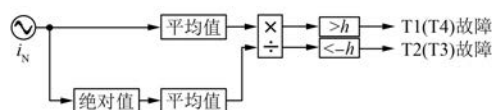


图 5 故障检测框图

## 3 硬件在环仿真验证

本文利用硬件在环仿真平台验证故障检测方法。硬件在环实时仿真器为 Opal-RT 公司的 OP5600,控制器 TMS320F2812 为核心控制芯片的牵引控制单元。脉冲整流器控制采用瞬态直接电流控制,调制为 SPWM,开关频率为 450 Hz。四象限脉冲整流器参数为网侧电压  $U_N = 1\,550\text{ V}$ ,牵引绕组等效电阻  $R_N = 0.068\, \Omega$ ,牵引绕组等效漏感  $L_N = 2.3\text{ mH}$ ,直流侧电容  $C_d = 3\text{ mF}$ 。阈值设为 0.3。

额定功率下,如图 6 所示,直流侧电压稳定,

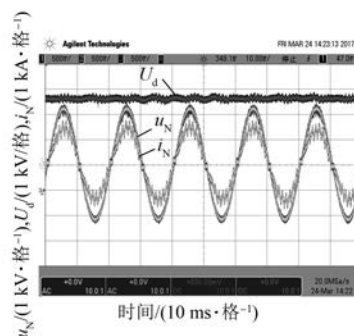


图 6 正常运行下网侧电压、网侧电流和直流侧电压

网侧电流与网侧电压同相位,近似达到单位功率因数。

额定功率下 T1 故障后,如图 7 所示,网侧电流畸变,检测变量超过阈值,故障标志跳变。

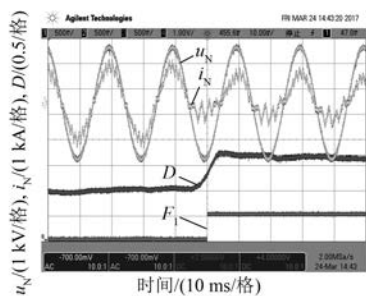


图 7 额定功率下 T1 故障检测结果

50%额定功率下 T1 故障后,如图 8 所示,网侧电流负半周畸变,检测变量同样超过阈值,故障标志跳变。

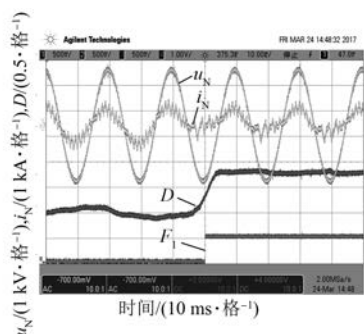


图 8 50%额定功率下 T1 故障检测结果

## 4 结 语

本文对四象限整流器 IGBT 开路故障检测进行了研究。通过网侧电流一个周期平均值比绝对值的平均值构成检测变量,检测变量超过正阈值,判定为 T1(T4)故障,检测变量超过负阈值,判定为 T2(T3)故障。经硬件在环仿真结果得出,在不同的功率下,检测方法有效。

## 【参考文献】

- [1] 崔恒斌,冯晓云,林轩,等.牵引网与交直列车耦合系统谐波谐振特性仿真研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16): 2736-2745.
- [2] 郝琦,葛兴来,宋文胜,等.电力牵引传动系统微秒级硬件在环实时仿真[J].电工技术学报,2016,31(8): 189-198.
- [3] 荀斌,蒲俊楷,葛兴来,等.基于状态观测器的单相整流系统传感器故障诊断与容错控制方法[J].铁道学报,2017,39(2): 44-51.
- [4] SONG W, DENG Z, WANG S, et al. A simple model predictive power control strategy for single-phase PWM converters with modulation function optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5279-5289.
- [5] GOU B, GE X, WANG S, et al. An open-switch fault diagnosis method for single-phase PWM rectifier using a model-based approach in high-speed railway electrical traction drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3816-3826.
- [6] PEUGET R, COURTINE S, ROGNON J P. Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(6): 1318-1326.
- [7] AMS M, AJMARQUES C. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach [C] // 1999 International Conference on Electric Machines and Drives (IEMD 99), 1999: 538-543.
- [8] ROTHENHAGEN K, FUCHS F. Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for AC variable speed drives [C] // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 2005: 2194-26.
- [9] SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, CICHOWSKI A. Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4681-4688.

收稿日期: 2016-11-26