

文章编号:1671-251X(2016)11-0059-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.11.014

张满,王涛,李志新.三相四开关有源电力滤波器故障诊断研究[J].工矿自动化,2016,42(11):59-63.

三相四开关有源电力滤波器故障诊断研究

张满, 王涛, 李志新

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:为解决三相四开关有源电力滤波器系统中 IGBT 开路故障诊断问题,提出了一种基于电压检测的 IGBT 开路故障诊断方法。该方法只需采集一个线电压信号,再结合系统控制器已经检测出的电流和 IGBT 开关信号,便可快速准确地诊断出故障并能确定故障位置。该方法适用于单管和多管的开路故障诊断。仿真和实验结果验证了该方法的有效性和可靠性。

关键词:三相四开关;有源电力滤波器;故障诊断;电压检测

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2016-10-28 16:29

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20161028.1629.014.html>

Study on fault diagnosis of three-phase four-switch active power filters

ZHANG Man, WANG Tao, LI Zhixin

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China)

Abstract:In order to solve problem of fault diagnosis of IGBT open-circuit of three-phase four-switch active power filter system, a fault diagnosis method of IGBT open-circuit based on voltage detection was put forward. This method only need to sample a line voltage signal, and combines with current and IGBT switching signals detected by system controllers, then it can quickly and accurately diagnose failure and determine the fault location. Meanwhile, the diagnosis method is suitable for IGBT open-circuit fault diagnosis of single tube and multi-tube. The simulation and experimental results verify the validity and reliability of the diagnosis method.

Key words:three-phase four-switch; active power filter; fault diagnosis; voltage detection

0 引言

随着电力电子技术的不断发展,电力电子设备得到了广泛的应用,谐波所产生的危害也越来越严重^[1]。现在抑制谐波的一个有效措施是采用有源电力滤波器^[1](Active Power Filter, APF)。与三相六开关 APF 相比,三相四开关 APF 的一个桥臂由一对电容代替,成本和损耗得到了降低,也简化了驱动电路^[2]。因此,三相四开关 APF 有很高的研究价值。IGBT 作为 APF 的开关器件,它的可靠性直接影响到 APF 的正常运行^[3]。IGBT 作为逆变器件,

长时间工作在高温、高频状态,因此,其很容易发生故障。APF 在运行过程中,可能出现 IGBT 开路故障和短路故障,尤其在发生开路故障时,往往会选择不迅速停机,这将有可能会造成更严重的后果^[4]。在开关器件发生开路故障时,如何迅速诊断出故障并判断出故障位置,然后采取有效措施,避免更严重的损坏,得到越来越多学者的关注^[5]。

对于 IGBT 开路故障,国内外已有很多研究,也提出了很多故障诊断的方法。参考文献[6-7]提出了平均电流 Park 矢量法,通过对比正常状态和故障状态时三相平均电流 Park 矢量的幅值和相位确定

收稿日期:2016-05-27;修回日期:2016-07-19;责任编辑:张强。

作者简介:张满(1990—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电网电能质量动态补偿技术,
E-mail:zhangman2809@163.com。

故障位置,但该方法在负载突变时容易出现误诊断。参考文献[8]提出了基于离散傅里叶变换的归一化方法,利用电动机电流平均值对基波分量进行归一化,从而避免负载突变时的误诊断。参考文献[9]提出了直流侧电流频谱分析法,根据直流侧电流频谱的低频部分判断故障,但该方法无法确定故障位置。参考文献[10]提出了一种电流矢量瞬时频率诊断法,根据瞬时频率值判断故障,该方法虽然简单、易实现,但不能判断出故障的具体位置。参考文献[11]提出了一种小波分析法,先对电流信号进行小波变换,然后根据提取的特征信号判断故障,这种方法相对复杂,实现起来比较困难。参考文献[12]提出了基于 IGBT 输出功率的开路故障诊断方法,由于 APF 系统电流中含有大量谐波,导致该方法出现误诊断。参考文献[13]根据变频器故障时与正常状态时电压的不同,通过误差值判断故障,其诊断时间很短。参考文献[3,14]通过增加额外的硬件电路来诊断故障,虽然该方法操作简单,容易实现,诊断时间短,但增加了成本。参考文献[15-16]提出将专家系统法用于故障诊断,该方法的缺点是很难建立完整的知识库。

考虑到 APF 系统中含有大量谐波,上述参考文献中基于电流诊断的方法很容易出现误诊断。为解决三相四开关 APF 系统中 IGBT 开路故障诊断问题,结合三相四开关有源电力滤波器的拓扑结构,本文提出了一种基于电压检测的 IGBT 开路故障诊断方法。该方法只需采集一个线电压信号,结合系统控制器已经使用的信号,便可快速准确地诊断出三相四开关 APF 系统中的 IGBT 开路故障。

1 APF 开关函数模型

三相四开关 APF 主电路拓扑结构如图 1 所示,由图 1 可以看出,与传统三相六开关 APF 主电路拓扑相比,第 3 个桥臂由 2 个电容器 C_1 和 C_2 组成,其中点接 c 相。

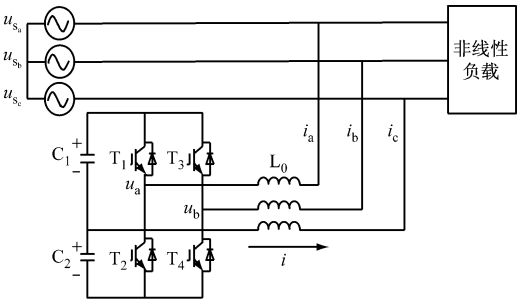


图 1 三相四开关 APF 主电路拓扑结构

S_a 、 S_b 分别表示 a、b 两相桥臂开关管的开关状态, $S_a=1$, 表示 T_1 导通, T_3 关断; $S_a=0$, 表示 T_1 关断, T_3 导通。

由基尔霍夫电压定律可以得到有源电力滤波器输出线电压 u_{ac} 、 u_{bc} 的表达式:

$$\begin{bmatrix} u_{ac} \\ u_{bc} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_a - 1 \\ 2S_b - 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 U_{dc} 为母线电压。

同时也可以得出输出线电压 u_{ab} 与 u_{ac} 、 u_{bc} 的关系:

$$u_{ab} = u_{ac} - u_{bc} \tag{2}$$

由式(1)可以看出,线电压 u_{ac} 、 u_{bc} 与开关状态相关,可以直接通过调节 IGBT 的开关状态来调节线电压。将式(1)代入式(2),可以得到 u_{ab} 瞬时值与开关管状态的关系,见表 1。

表 1 u_{ab} 瞬时值与开关管状态的关系

开关模式	S_a	S_b	u_{ac}	u_{bc}	u_{ab}
0	0	0	$-U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	0
1	0	1	$-U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}$
2	1	0	$U_{dc}/2$	$-U_{dc}/2$	U_{dc}
3	1	1	$U_{dc}/2$	$U_{dc}/2$	0

2 故障诊断原理

当 APF 中的 IGBT 发生开路故障时,APF 输出线电压 u_{ab} 的真实值与正常模式下的理论值存在误差,通过该误差值,再结合电流方向和开关信号来判断故障位置(在电流为零时,不参与故障诊断,不做分析)。由于篇幅限制,只分析 T_1 发生开路故障时 APF 输出线电压的真实值 u_{ab} 与正常模式下的理论值 u_{ab}^* ,见表 2(i_a 、 i_b 为 APF 输出电流,并定义电流流出 APF 方向为正,反之为负)。同理可分析其他单管故障及多管故障情况下,APF 输出线电压的真实值 u_{ab} 与正常模式下的理论值 u_{ab}^* 。

通过对比分析 IGBT 出现单管故障及多管故障时 APF 输出线电压 u_{ab} 的真实值与正常模式下的理论值的关系,总结出电流方向、开关信号、输出线电压 u_{ab} 与故障诊断信号的关系,确定为三相四开关有源电力滤波器 IGBT 开路故障诊断规则,见表 3。表 3 中, Fault 为 1,2,3,4 时,表示 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 故障; Fault 为 5 时,表示 T_1 、 T_4 故障; Fault 为 6 时,表示 T_2 、 T_3 故障。

表 2 T_1 正常和开路故障时的输出线电压

i_a	i_b	S_a	S_b	u_{ab}	u_{ab}
+	+	0	0	0	0
+	+	0	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$
+	+	1	0	U_{dc}	0
+	+	1	1	0	$-U_{dc}$
+	-	0	0	0	0
+	-	0	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$
+	-	1	0	U_{dc}	0
+	-	1	1	0	$-U_{dc}$
-	+	0	0	0	0
-	+	0	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$
-	+	1	0	U_{dc}	U_{dc}
-	+	1	1	0	0
-	-	0	0	0	0
-	-	0	1	$-U_{dc}$	$-U_{dc}$
-	-	1	0	U_{dc}	U_{dc}
-	-	1	1	0	0

表 3 电流方向、开关信号、输出线电压 u_{ab} 与故障诊断信号的关系

i_a	i_b	S_a	S_b	u_{ab}	Fault	故障
+	+	1	0	0	1	T_1
+	+	0	1	0	3	T_3
+	+	1	1	-	1	T_1
+	+	1	1	+	3	T_3
+	-	0	0	-	4	T_4
+	-	1	1	-	1	T_1
+	-	1	0	-	5	T_1, T_4
-	+	0	0	+	2	T_2
-	+	1	1	+	3	T_3
-	+	0	1	+	6	T_2, T_3
-	-	0	0	+	2	T_2
-	-	0	0	-	4	T_4
-	-	1	0	0	4	T_4
-	-	0	1	0	2	T_2

因此,在原有系统的基础上,增加一个电压传感器,检测 APF 输出线电压 u_{ab} ,再配合电流方向和开关信号,便可按照表 3 判断出故障位置。

3 仿真验证

根据故障诊断原理,采用 Matlab 搭建故障诊断仿真模型。仿真参数:电网线电压有效值为 60 V,频率为 50 Hz,APF 输出电感为 1.5 mH,母线电容

$C_1=4.4\text{ mF}, C_2=4.4\text{ mF}$,直流侧电压参考值为 200 V,三相不控整流桥带 $2.67\text{ }\Omega$ 电阻作为公共谐波源。故障诊断仿真模型如图 2 所示,通过封脉冲模拟 IGBT 开路故障。

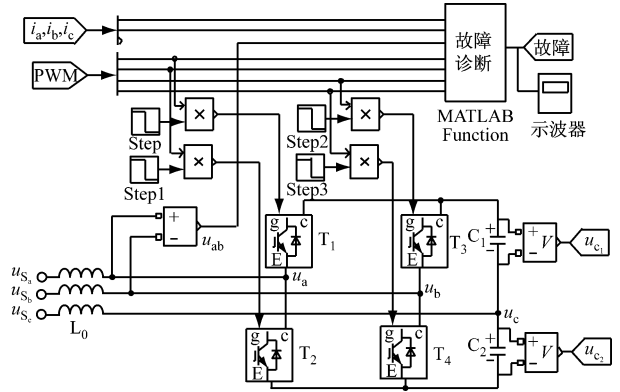


图 2 故障诊断仿真模型

为了防止同一桥臂的上下 2 个管子同时导通,仿真中设定了死区。在故障诊断的过程中,死区时间段内,不对故障进行判断。按照图 2 进行仿真验证,所有 IGBT 均正常工作,但是在仿真进行时,由于 T_1 和 T_3 导通延迟,导致线电压 u_{ab} 在 1.491 35 ms 时未变为 0,出现了误诊断信号,如图 3 所示(S_{a+} 和 S_{a-} 分别为 a 桥臂的上管脉冲和下管脉冲, S_{b+} 和 S_{b-} 分别为 b 桥臂的上管脉冲和下管脉冲)。经过分析,IGBT 关断延时不会影响到故障诊断的准确性。因此,为了防止 IGBT 导通延时导致的误诊断,在图 2 中,对 4 路 PWM 脉冲波进行延迟,再送入 Matlab Function 中进行故障判断。

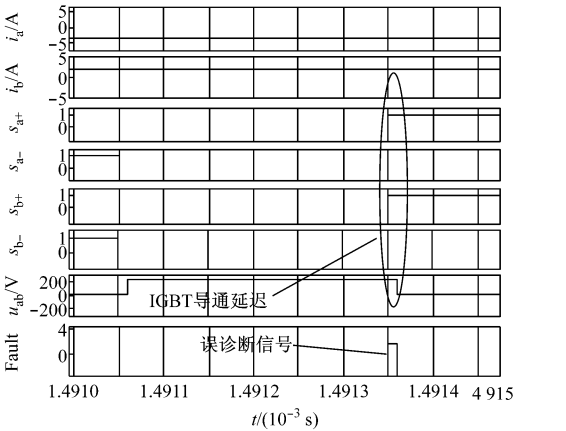


图 3 IGBT 导通延迟导致的误诊断信号

(1) 单管故障。 T_1 开路故障时的仿真波形如图 4 所示,在 APF 运行到 0.001 s 时, T_1 封脉冲。观察仿真波形可知,在 0.001 33 s 时, Fault 为 1,故障信号显示为 T_1 出现开路。

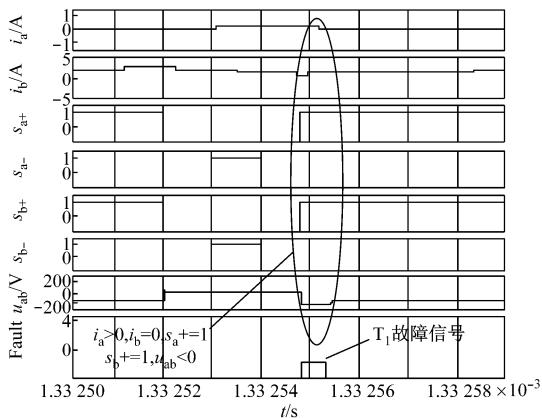


图 4 T₁ 开路故障时的仿真波形

(2) 双管故障。T₁ 和 T₂ 开路故障时的仿真波形如图 5 所示,T₁ 和 T₂ 分别在 0.001 s 和 0.002 s 封脉冲,观察仿真波形可知,在 0.013 s 时,Fault 显示为 1,故障信号显示为 T₁ 开路,在 0.023 s 时,Fault 显示为 2,故障信号显示为 T₂ 开路。

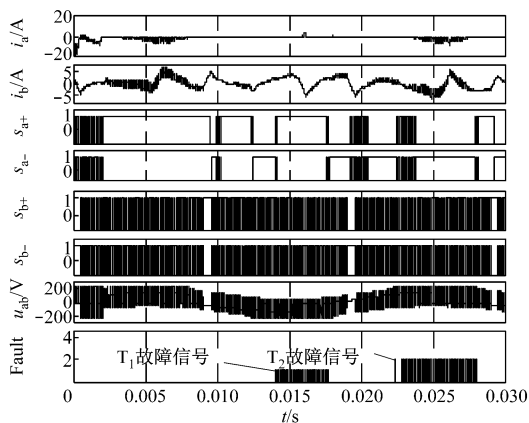


图 5 T₁ 和 T₂ 开路故障时的仿真波形

T₁ 和 T₂ 开路故障时的仿真波形如图 6 所示,T₁ 和 T₃ 分别在 0.001 s 和 0.002 s 封脉冲,在 0.017 s 时,Fault 显示为 1,故障信号显示为 T₁ 开路。在 0.022 s 时,Fault 显示为 3,故障信号显示为 T₃ 开路。

上述仿真结果验证了所提诊断方法在单管和双管故障下的诊断性能。由故障诊断原理可得出,该方法可以诊断出三管故障及 4 个 IGBT 全部发生开路故障。

4 实验结果

搭建三相四开关有源电力滤波器实验平台,实验平台主要参数如下:电网线电压为 60 V,频率为 50 Hz,三相不控整流桥带 2.67 Ω(3 个 8 Ω 电阻并联)电阻作为公共谐波源,直流侧上下电容值均为

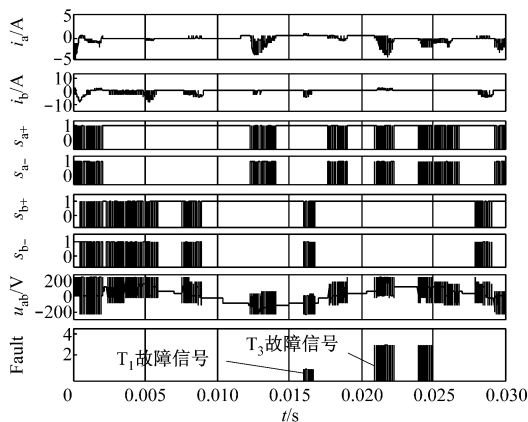


图 6 T₁ 和 T₃ 开路故障时的仿真波形

4.4 mF,直流侧电压参考值为 200 V,输出电感为 1.5 mH,开关频率为 12.5 kHz。

在实验中,通过封脉冲模拟 IGBT 开路故障,实验波形 1 如图 7 所示。当对 T₄ 封脉冲时,APF 发出的补偿谐波出现变化,在 17 ms 后, $u_{ab} < 0, i_a < 0, i_b < 0$,诊断出 T₄ 故障,Fault=4。

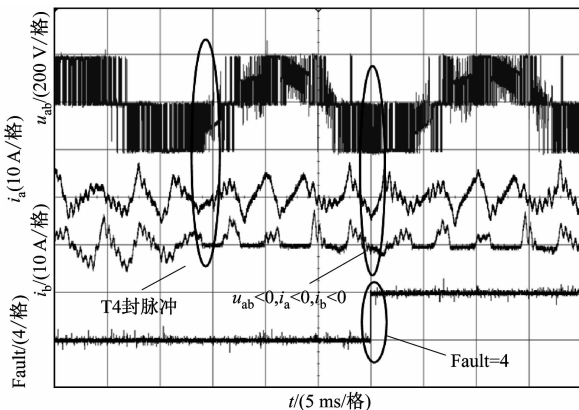


图 7 实验波形 1

实验波形 2 如图 8 所示,当对 T₄ 封脉冲时,IGBT 不能正常导通,APF 无法正常工作,补偿后的电流出现了严重的畸变。在 8 ms 后,诊断出 T₄ 故障,Fault=4。

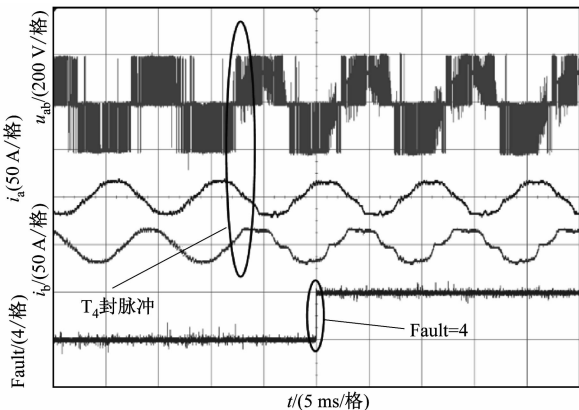


图 8 实验波形 2

5 结语

基于电压检测的 IGBT 开路故障诊断方法根据 APF 的两相电流,4 路 IGBT 脉冲信号,再结合 1 个线电压信号,按照故障诊断规则,便可诊断出故障位置。仿真和实验结果表明,该方法可准确诊断出三相四开关 APF 单管开路故障和多管开路故障,故障诊断简单,易于实现。

参考文献:

[1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] BLAABJERG F, NEACSU D O, PEDERSEN J K. Adaptive SVM to compensate DC-link voltage ripple for four-switch three-phase voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(4):743-752.

[3] 董伟杰,白晓民,朱宁辉,等. 电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究[J]. 中国电机工程学报,2013, 33(18):65-72.

[4] LU B, SHARMA S. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 45(5):1770-1777.

[5] 张晓,孙传达,刘娟,等. 三相四线制有源电力滤波器开路故障诊断[J]. 电网技术,2016,40(2):571-578.

[6] MENDES A M S, MARQUES C A J. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current Park's vector approach[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London,1998:538-543.

[7] CASEIRO J A A, CARDOSO A J M. Fault diagnosis on a PWM rectifier AC drive system with fault tolerance using the average current Park's vector approach[C]// IEEE International Electric Machines

and Drives Conference, Miami, FL, 2009:695-701.

[8] 于泳,蒋生成,杨荣峰,等. 变频器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):30-35.

[9] 杨忠林,吴正国,李辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(27):18-22.

[10] 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.

[11] CHARFI F, SELLAMI F, AL-HADDAD K. Fault diagnostic in power system using wavelet transforms and neural networks[C]// Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006:1143-1148.

[12] 赏吴俊,何正友,胡海涛,等. 基于 IGBT 输出功率的逆变器开路故障诊断方法[J]. 电网技术,2013, 37(4):1140-1145.

[13] RIBEIRO R L A, JACOBINA C B, DA-SILVA E R C, et al. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(2): 587-593.

[14] 安群涛,孙力,赵克,等. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2010, 30(6):1-6.

[15] MASRUR M A, CHEN Zhihang, ZHANG Baifang, et al. Model-based fault diagnosis in electric drive inverters using artificial neural network[C]// Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA,2007:1-7.

[16] PARK J H, KIM D H, KIM S S. C-ANFIS based fault diagnosis for voltage-fed PWM motor drive system fuzzy information[C]// Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, Banff, Alta, Canada,2004:379-383.