

# 基于中点电流的 ANPC 逆变器故障诊断策略与容错控制

高光辉<sup>1</sup>, 雷晓霖<sup>1</sup>, 田景志<sup>2</sup>, 俞铭宏<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 32207 部队, 陕西榆林, 719000)

**摘要** 有源中点箝位型(ANPC)逆变器具有输出波形畸变率低、传输效率高等优点, 获得了广泛的应用, 但大量的开关器件降低了逆变器的可靠性。分析了三电平 ANPC 逆变器在不同开关器件开路故障下的电流通路, 得到不同故障下输出电平及输出电压空间矢量的变化情况。结合各矢量作用下中点电流与输出电流的关系, 提出了一种基于中点电流的故障诊断方法。根据 ANPC 逆变器电路特点, 对其桥臂器件和箝位器件提出了不同的容错模式, 并提出了一种具有不降额容错能力的容错电路结构。通过搭建仿真模型及实验平台对提出的故障诊断及容错策略进行验证, 仿真和实验结果验证了该故障诊断及容错策略的有效性。

**关键词** ANPC 逆变器; 中点电流; 故障诊断; 容错控制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.04.012

**中图分类号** TM464 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)04-0078-07

## Fault Diagnosis Strategy and Fault-Tolerant Control of ANPC Inverter Based on Midpoint Current

GAO Guanghui<sup>1</sup>, LEI Xiaoben<sup>1</sup>, TIAN Jingzhi<sup>2</sup>, YU Minghong<sup>2</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Unit 32207, Yulin 719000, Shaanxi, China)

**Abstract** Active neutral point clamped (ANPC) inverters are characterized by low output waveform distortion rate and high transmission efficiency, and have been wide use, but a large numbers of switching devices reduce the reliability of the inverter. The current path of a three-level ANPC inverter under different open-circuit faults of switching devices is analyzed, and the output level and output voltage space vector changes under different faults are obtained. Combining the relationship between the midpoint current and the output current under the action of each vector, a fault diagnosis method based on the midpoint current is proposed. According to the characteristics of the ANPC inverter circuit, different fault-tolerant modes are proposed for its bridge arm devices and clamp devices, and a fault-tolerant circuit structure with non-derating fault tolerance is proposed. The proposed fault diagnosis method and fault-tolerant strategy are verified by building a simulation model and experimental platform. The simulation and experimental re-

收稿日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61871396)

作者简介: 高光辉(1996—), 男, 河南太康人, 硕士生, 研究方向: 航空电气工程。E-mail: 1147923320@qq.com

通信作者: 雷晓霖(1972—), 男, 陕西华阴人, 教授, 研究方向: 航空电气工程。E-mail: leixiaoben@aliyun.com

**引用格式:** 高光辉, 雷晓霖, 田景志, 等. 基于中点电流的 ANPC 逆变器故障诊断策略与容错控制[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(4): 78-84. LEI Xiaoben, GAO Guanghui, TIAN Jingzhi, et al. Fault Diagnosis Strategy and Fault-Tolerant Control of ANPC Inverter Based on Midpoint Current[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(4): 78-84.

sults show that the fault diagnosis method and fault-tolerant strategy are feasible.

**Key words** ANPC inverter; midpoint current; fault diagnosis; fault-tolerant control

三电平有源中点箝位型(ANPC)逆变器以其输出电压畸变率低、转换效率高优点,在航空电气领域获得了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。但是,随着输出电平的增加,电路中开关器件的数量也随之增大,任何一个开关器件发生故障都会影响逆变器的输出性能。因此,通过故障诊断和容错控制技术提高变换器的使用可靠性具有重要意义。

目前,开关器件开路故障诊断方法主要分为基于模型和基于知识两类<sup>[3]</sup>,前者通过数学模型获取估计的系统输出,将估计值与系统实际输出比较得到残差,通过分析残差实现诊断功能<sup>[4-8]</sup>,但这种诊断方法需要对系统进行较为精确地建模。基于知识的故障诊断技术将专家系统<sup>[9-10]</sup>、神经网络<sup>[11-13]</sup>、支持向量机<sup>[14-15]</sup>等智能算法与诊断技术相结合。这种诊断方式需要利用大量的样本对诊断系统进行学习训练,同时对于负载变化较为敏感。逆变器的容错控制主要有软件容错和硬件容错两种<sup>[16-17]</sup>。在部分故障类型下,软件容错利用 ANPC 逆变器较多的电平以及冗余开关状态,通过软件设计降低空间电压矢量调制,使逆变器工作于降额运行状态<sup>[18-19]</sup>。硬件容错是指通过增加硬件改变电路结构,使逆变器具有较强的容错能力。文献[20]采用了斯科特连接方法,将两个单相逆变电路的输出通过两组变压器合成三相交流电,实现了单桥臂、多桥臂故障的容错,但系统中包含两组变压器,极大增加了逆变器的体积。文献[21]通过新增第四桥臂实现了中点电压平衡控制,当逆变器其中一相发生故障时冗余桥臂可以替代故障桥臂实现容错功能。这种容错方式增加了较多的开关器件,大大增加了控制难度。

本文提出了一种基于中点电流的开路故障诊断方法,通过增加一个电流传感器用于中点电流的测量,将中点电流的参考值与测量值进行对比,从而判断出故障器件具体位置。同时,文章提出了一种新的容错拓扑,通过增加一个前级桥臂,使得逆变器具有两电平不降额容错能力。

### 1 三电平 ANPC 逆变器故障分析

三电平 ANPC 逆变器主电路如图 1 所示。定义每相开关器件  $S_{x5}$ 、 $S_{x6}$  为箝位开关器件; $S_{x1}$ 、 $S_{x2}$  为上桥臂开关器件; $S_{x3}$ 、 $S_{x4}$  为下桥臂开关器件( $x=a, b, c$ )。逆变器输出电平与开关状态对应关系如表 1

所示,本文以 A 相为例进行分析。

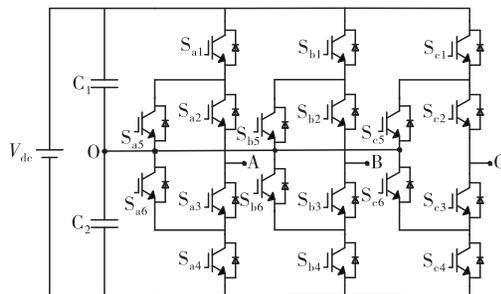


图 1 三电平 ANPC 逆变器电路

表 1 三电平 ANPC 逆变器开关状态表

电平	$S_{x1}$	$S_{x2}$	$S_{x3}$	$S_{x4}$	$S_{x5}$	$S_{x6}$	$V_o$
P	1	1	0	0	0	1	$V_{dc}/2$
OU <sub>1</sub>	0	1	0	0	1	0	0
OU <sub>2</sub>	0	1	0	1	1	0	0
OL <sub>1</sub>	0	0	1	0	0	1	0
OL <sub>2</sub>	1	0	1	0	0	1	0
N	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}/2$

图 2(a)为开关器件  $S_{a1}$  故障后,逆变器 A 相 P 状态下电流流通路径(图中蓝色为负向负载电流流通路径,红色为正向负载电流流通路径)。当电流为负时,逆变器输出电压为  $+V_{dc}/2$ ;当负载电流为正时,逆变器输出电压为 0,即实际输出为状态 O。图 2(b)为开关器件  $S_{a5}$  故障后,逆变器 A 相 OU<sub>1</sub> 或 OU<sub>2</sub> 状态下的电流流通路径。当电流为正时,逆变器实际输出电压为 0;当电流为负时,逆变器实际输出电压为  $V_{dc}/2$ ,即实际输出为状态 P。

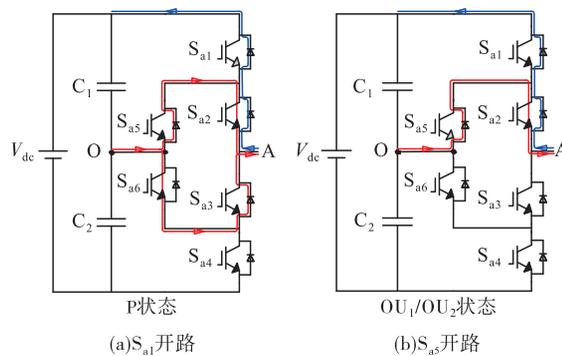


图 2 开路故障下电流流通路径

图 3 为开关器件  $S_{a2}$  故障后,逆变器 A 相 P 状态、OU<sub>1</sub> 或 OU<sub>2</sub> 状态下电流流通路径。在 P 状态下,负向负载电流对应的实际输出的电压为  $V_{dc}/2$ ,负载电流为正时,逆变器实际输出电压为 0,即实际输出为状态 O。在 OU<sub>1</sub> 或 OU<sub>2</sub> 状态下,负向电流对应的实际输出为 0,而正向电流对应实际输出电压为  $-V_{dc}/2$ ,即实际输出为状态 N。

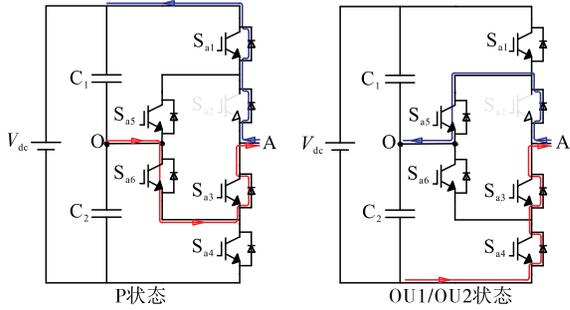


图3  $S_{a2}$  开路故障下电流通路

定义 ANPC 逆变器的 4 种故障特征: ①  $P \rightarrow O$ : P 状态对应开关序列作用下, 逆变器实际输出为 0 (O 状态); ②  $N \rightarrow O$ : N 状态对应开关序列作用下, 逆变器实际输出为 0 (O 状态); ③  $O \rightarrow P$ : O 状态对应开关序列作用下, 逆变器实际输出为  $V_{dc}/2$  (P 状态); ④  $O \rightarrow N$ : O 状态对应开关序列作用下, 逆变器实际输出为  $-V_{dc}/2$  (N 状态)。

## 2 基于中点电流的故障诊断方法

### 2.1 三电平 ANPC 逆变器中点电流分析

对于三电平 ANPC 逆变器, 中点电流与三相开关状态、输出电流之间的关系可表示为:

$$i_0 = -( |S_a| i_a + |S_b| i_b + |S_c| i_c ) \quad (1)$$

式中:  $i_0$  为中点电流;  $i_a, i_b, i_c$  分别为逆变器 A、B、C 三相输出电流;  $S_x$  ( $x=a, b, c$ ) 为逆变器开关状态, 逆变器输出高电平时  $S_x=1$ , 输出低电平时  $S_x=-1$ , 输出 0 电平时  $S_x=0$ 。

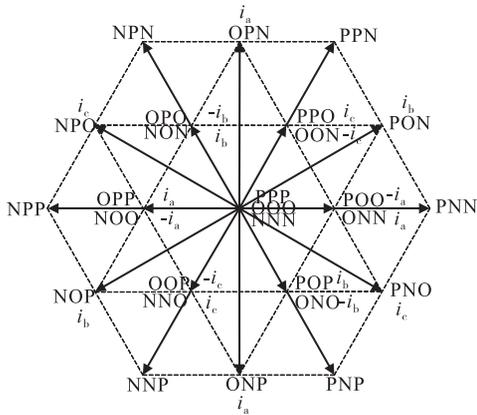


图4 三电平空间电压矢量分布

三电平 ANPC 逆变器中点电流与空间电压分布如图 4 所示。从图中可以看到, 大矢量、零矢量作用下逆变器不形成中点电流, 小矢量及中矢量作用下形成的中点电流等于逆变器某相的输出电流。

### 2.2 基于中点电流的故障诊断方法

定义无故障情况下逆变器的输出电压为参考输出电压, 逆变器的中点电流称为参考中点电流。根

据前文分析可以得到: ① 逆变器某个开关器件故障后会引引起实际输出电平与参考输出电平不一致的现象; ② 逆变器大矢量、零矢量作用下中点电流为 0; ③ 逆变器中矢量作用下的中点电流为开关状态为 O 的相的输出相电流。

定义矢量集合如表 2 所示:

表 2 矢量集定义及其描述

矢量集	包含的矢量	描述
$V_h$	$V_{PNN}, V_{PPN}, V_{NPN}, V_{NPP}, V_{NNP}, V_{PNP}$	所有大矢量
$V_m$	$V_{PON}, V_{OPN}, V_{NPO}, V_{NOP}, V_{ONP}, V_{PNO}$	所有中矢量
$V_0$	$V_{PPP}, V_{OOO}, V_{NNN}$	所有零矢量
$V_{ap}$	$V_{PNN}, V_{PPN}, V_{PNP}$	A 相状态为 P 的大矢量
$V_{an}$	$V_{NPN}, V_{NPP}, V_{NNP}$	A 相状态为 N 的大矢量
$V_{bp}$	$V_{PPN}, V_{NPN}, V_{NPP}$	B 相状态为 P 的大矢量
$V_{bn}$	$V_{NNP}, V_{PNP}, V_{PNN}$	B 相状态为 N 的大矢量
$V_{cp}$	$V_{NPP}, V_{NNP}, V_{PNP}$	C 相状态为 P 的大矢量
$V_{cn}$	$V_{PNN}, V_{NPN}, V_{PPN}$	C 相状态为 N 的大矢量
$V_{ao}$	$V_{OPN}, V_{ONP}$	A 相状态为 O 的中矢量
$V_{bo}$	$V_{PON}, V_{NOP}$	B 相状态为 O 的中矢量
$V_{co}$	$V_{PNO}, V_{NPO}$	C 相状态为 O 的中矢量

以 A 相为例, 在正常情况下矢量集  $V_{ap}, V_{an}$  中各矢量作用下的中点电流为 0; 矢量集  $V_{ao}$  作用下的中点电流为  $i_a$ 。逆变器发生开路故障后, 会出现实际输出电压与参考输出电压不一致的现象, 输出电压矢量也会发生变化, 中点电流随之改变。A 相单器件故障下各矢量集合对应的中点电流变化情况如表 3 所示。

表 3 A 相故障下矢量集合与中点电流对应关系

矢量集合	故障器件						
	无	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	$S_{a5}$	$S_{a6}$
$V_{ap}$	0	$i_a$	$i_a$	0	0	0	0
$V_{an}$	0	0	0	$i_a$	$i_a$	0	0
$V_{ao}$	$i_a$	$i_a$	0	0	$i_a$	$i_a$	$i_a$
$V_{PPP}$	0	$i_a$	$i_a$	0	0	0	0
$V_{OOO}$	0	0	$-i_a$	$-i_a$	0	$-i_a$	$-i_a$
$V_{NNN}$	0	0	0	$-i_a$	$-i_a$	0	0

由表 3 可知, 通过对比中矢量、大矢量、零矢量作用下的实际中点电流与参考中点电流, 就可以判断出具体故障器件。在 SVPWM 调制策略下, 当调制比  $k \leq 0.577$  时, 根据最近三矢量合成原则, 需要用到的矢量包括零矢量、小矢量, 不包含中矢量、大矢量, 只需要根据零矢量作用下的中点电流判断故障器件。对于调制比  $k > 0.577$  时, 逆变器需要输出的电压矢量包括小矢量、中矢量、大矢量, 不包含零矢量, 只需要根据中矢量、大矢量作用下的中点电流判断故障器件。图 5(a) 为调

制比  $k > 0.577$  时,基于中点电流的故障诊断过程;图 5(b)为调制比  $k \leq 0.577$  时,基于中点电流的故障诊断过程。根据诊断结果,结合表 4 可以推断出具体故障器件。

表 4 诊断结果与故障器件关系

X:P→O	X:N→O	X:O→P	X:O→N	故障器件
1	0	0	0	$S_{x1}$
1	0	0	1	$S_{x2}$
0	1	1	0	$S_{x3}$
0	1	0	0	$S_{x4}$
0	0	1	0	$S_{x5}$
0	0	0	1	$S_{x6}$

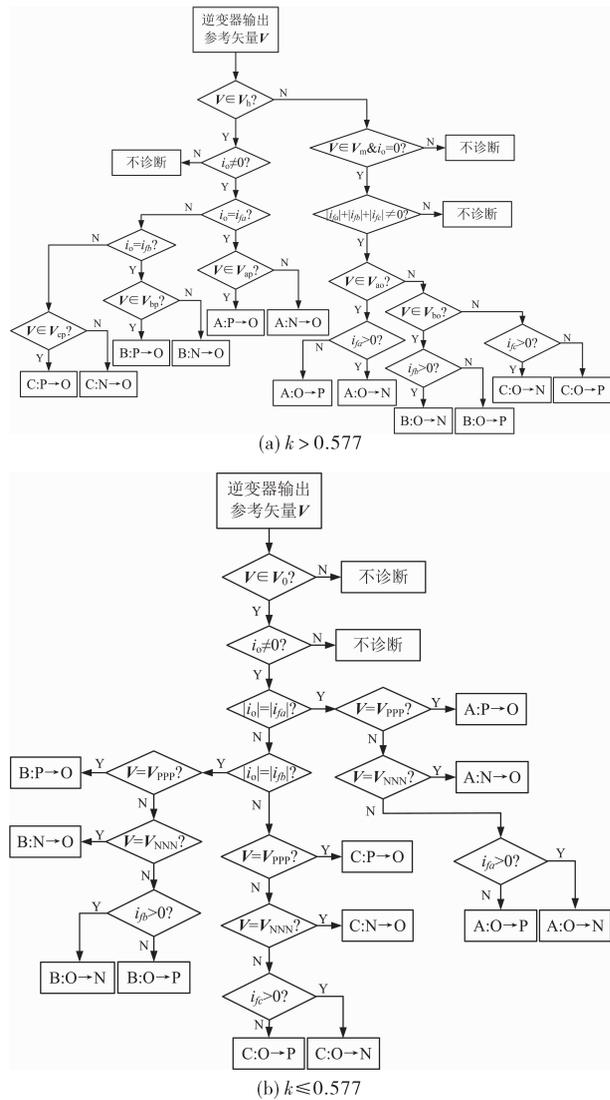


图 5 基于中点电流的故障诊断流程

### 3 三电平 ANPC 逆变器容错控制

#### 3.1 箝位开关器件开路故障

由于 ANPC 逆变器特殊的电路结构,即便同一桥臂 2 个箝位器件同时发生故障,也可以将逆变器故障相视为 NPC 型电路结构。通过调整故障相开

关序列,使逆变器故障相工作于三电平状态,逆变器输出空间电压矢量图不变。

#### 3.2 桥臂开关器件开路故障

当桥臂器件  $S_{x1}$ 、 $S_{x2}$ 、 $S_{x3}$ 、 $S_{x4}$  发生开路故障后,逆变器故障相仅具备输出一个 0 电平和一个高电平或低电平的能力,此时逆变器输出空间电压矢量部分丢失,如图 6 所示。

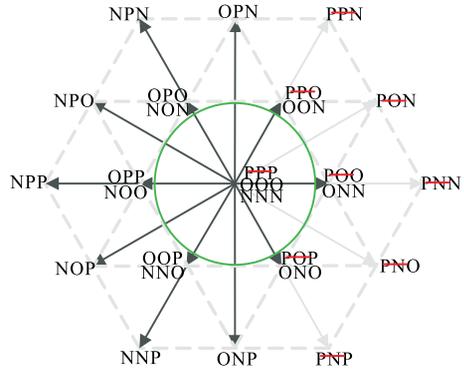


图 6  $S_{a1}/S_{a2}$ 故障下逆变器输出电压空间矢量分布

可以看出,当逆变器某相桥臂器件发生开路故障后,逆变器最大调制比缩减为 0.577。针对这种情况,可以选择降额容错策略。图 7 为提出的容错电路结构,与 ANPC 逆变器相比增加了一个前级桥臂。前级桥臂共包含 3 个开关器件,当逆变器正常运行时, $S_1$ 、 $S_2$  关断  $S_3$  导通,逆变器中点 O 与中点  $O^*$  等电位。当诊断出某上侧桥臂器件开路故障后, $S_2$  保持关断状态,关断  $S_3$ ,将  $S_1$  导通,中点 O 的电位与直流电源正极相等。当诊断出某下侧桥臂器件开路故障后, $S_1$  保持关断状态,关断  $S_3$ ,将  $S_2$  导通,中点 O 的电位与直流电源负极相等。如图 8 所示,此时逆变器工作于两电平模式,共包含 8 个输出电压矢量,最大调制比为 1.15,可保证逆变器在容错模式下输出电压幅值不变,提高了容错模式下的直流电压利用率。

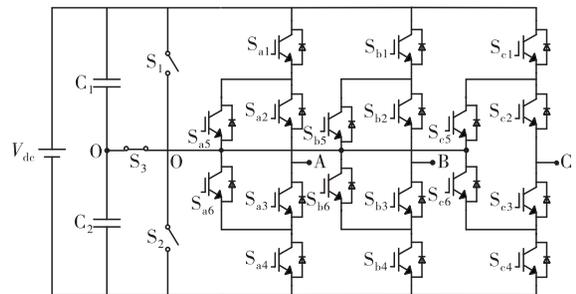
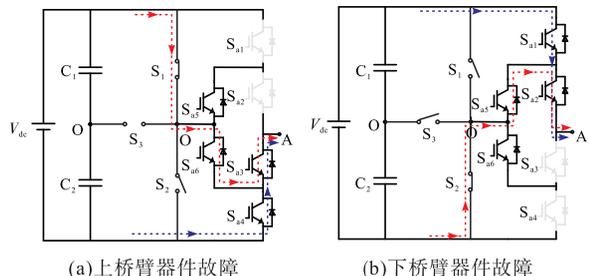


图 7 三电平 ANPC 逆变器容错电路结构



(a)上桥臂器件故障

(b)下桥臂器件故障

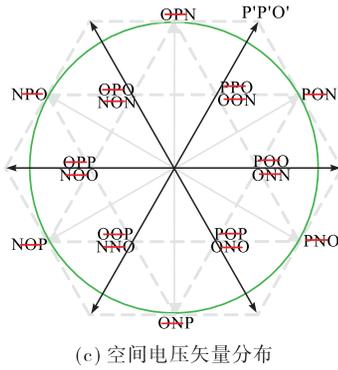


图 8 两电平容错模式电流路径及空间电压矢量分布

### 4 仿真与实验

#### 4.1 故障诊断与容错控制仿真

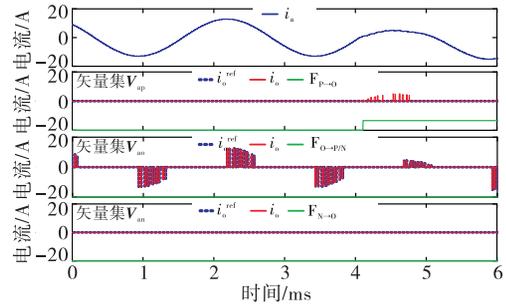
通过 MATLAB 对本文提出的容错型三电平 ANPC 逆变器电路进行仿真,主要参数如下:直流电源 360 V,直流母线电容 820  $\mu$ F,滤波电感 2 mH,滤波电容 20  $\mu$ F,负载电阻阻值 10  $\Omega$ ,开关器件开关频率 20 kHz,输出电压频率 400 Hz。

图 9 为 A 相不同开关器件故障下的故障诊断过程。图中  $i_a$  表示 A 相输出电流;  $i_o^{ref}$  表示某个矢量集作用下对应的中点电流参考值;  $i_o$  表示某个矢量集作用下对应的实际中点电流;  $F_{P \rightarrow O}$ 、 $F_{N \rightarrow O}$ 、 $F_{O \rightarrow P}$ 、 $F_{O \rightarrow N}$  代表诊断结果。故障时刻为  $t=3$  ms。

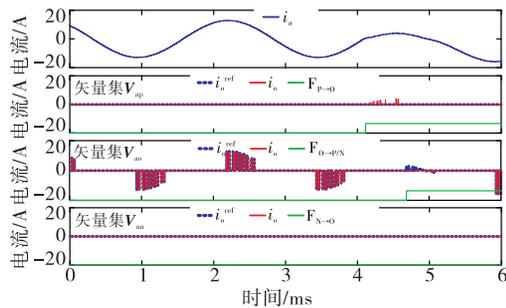
从图 9(a)可以看出,  $S_{a1}$  开路后, 矢量集  $V_{ap}$  作用下的中点电流出现了大于参考值 0 的情况, 诊断结果显示  $F_{P \rightarrow O}$ 。矢量集  $V_{ao}$ 、 $V_{an}$  作用下的中点电流与参考电流一致。根据表 4 可以判断出故障器件为  $S_{a1}$ 。从图 10(b)可以看出,  $S_{a2}$  开路后, 矢量集  $V_{ap}$ 、 $V_{ao}$  作用下的中点电流均出现了与参考值不一致的现象, 诊断结果显示  $F_{P \rightarrow O}$ 、 $F_{O \rightarrow N}$ 。矢量集  $V_{an}$  作用下的中点电流与参考电流一致。根据表 4 可以判断出故障器件为  $S_{a2}$ 。从图 9(c)可以看出,  $S_{a5}$  开路后, 矢量集  $V_{ao}$  作用下的中点电流出现了与参考值不一致的现象, 诊断结果显示  $F_{O \rightarrow P}$ 。矢量集  $V_{ap}$ 、 $V_{an}$  作用下的中点电流与参考电流一致。根据表 5 可以判断出故障器件为  $S_{a5}$ 。诊断结果表明了基于中点电流的故障诊断方法能够迅速准确地诊断出故障所在位置。由于同一时刻逆变器输出电压矢量只有一个, 因此诊断出  $F_{P \rightarrow O}$  和  $F_{O \rightarrow N}$  之间存在一定的时间差, 但这个时间差被限制在一个电压周期之内, 诊断过程仍具有快速性。

图 10、图 11 分别为两电平容错和三电平容错模式下的输出电压波形, 图中  $u_{AB}$  为输出线电压;  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  分别为 A、B、C 三相滤波输出电压。故障时刻为  $t=5$  ms, 容错时刻为  $t=10$  ms。由于  $S_{a1}$  与  $S_{a2}$  故

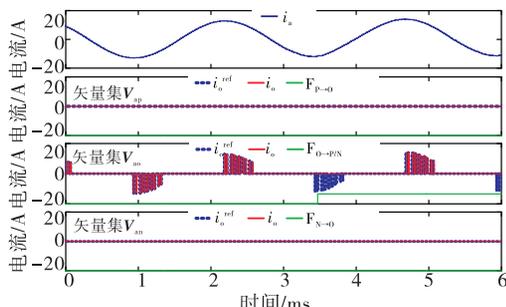
障下的容错电路及开关状态配置是相同的, 本文对  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  同时故障进行了仿真。



(a)  $S_{a1}$  开路故障



(b)  $S_{a2}$  开路故障



(c)  $S_{a5}$  开路故障

图 9 不同开关器件开路故障特征及诊断结果

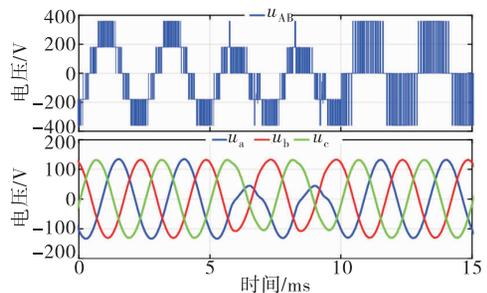


图 10 两电平容错仿真 ( $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  故障)

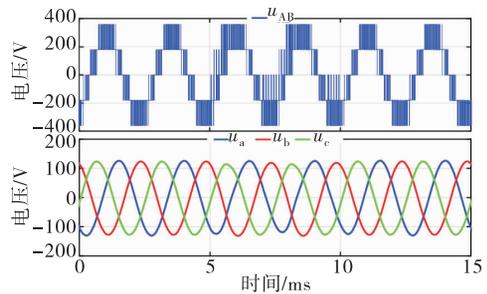


图 11 三电平容错仿真 ( $S_{a5}$  故障)

从图 11 可以看出,  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  故障后, 输出电压平等

级降低,滤波输出电压严重畸变。进入容错模式后,逆变器工作于两电平模式,滤波输出电压恢复三相正弦波,且幅值不变,验证了两电平容错模式的有效性。从图 12 可以看出, $S_{a5}$  故障后,输出线电压部分变形,但仍具有一定的对称性,滤波输出电压发生较小的畸变。进入容错模式后,故障相避免输出 OU1、OU2 两种状态,逆变器恢复正常运行。

### 4.2 实验验证

为进一步验证提出的故障诊断方法和容错电路的有效性,搭建三电平 ANPC 逆变器的实验平台,如图 12 所示。

图 12 实验平台

图 13 为开关器件  $S_{a1}$  故障时刻的中点电流及输出电流波形。根据表 3 可知,矢量集  $V_{ap}$  中的矢量作用下的中点电流参考值为 0。从图中可以看到,虚线椭圆内, $V_{ap}$  集合中某个矢量作用下的中点电流与  $i_a$  相等,因此,诊断结果为  $F_{p \rightarrow o}$ 。根据表 4 可以判断出故障器件为  $S_{a1}$ 。

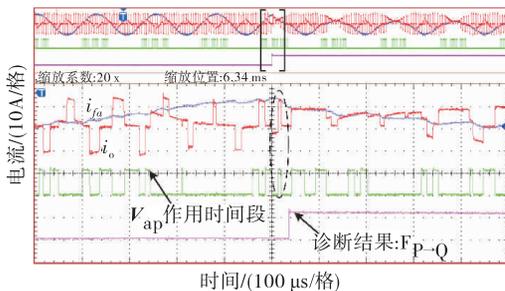
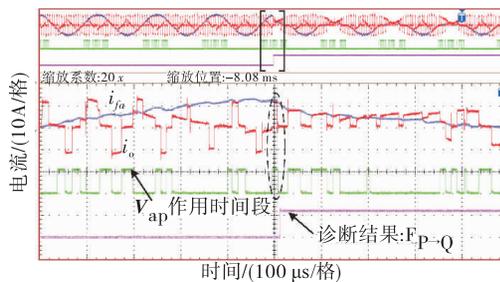
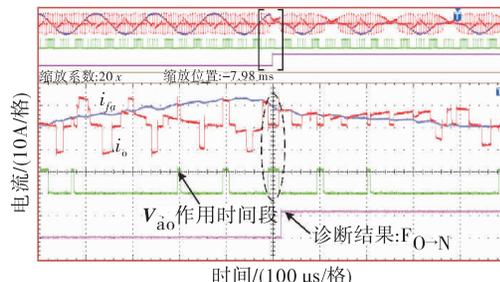


图 13  $S_{a1}$  故障诊断实验结果

图 14 为开关器件  $S_{a2}$  故障后的中点电流和输出电流波形。图 14(a)中的高电平脉冲表示  $V_{ap}$  中的矢量作用时段,其对应的中点电流参考值为 0。故障后,图中虚线椭圆内的中点电流与  $i_a$  相等,因此,诊断结果为  $F_{p \rightarrow o}$ 。图 14(b)中的高电平脉冲表示  $V_{ao}$  中的矢量作用时段,其对应的中点电流参考值为  $i_a$ 。故障后,图中虚线椭圆内的中点电流为 0,且此时  $i_a$  大于 0,因此,诊断结果为  $F_{o \rightarrow N}$ 。根据表 4 可以最终判断出故障器件为  $S_{a2}$ 。



(a)  $V_{ap}$  作用下中点电流与输出电流



(b)  $V_{ao}$  作用下中点电流与输出电流

图 14  $S_{a2}$  故障诊断实验结果

图 15 为开关器件  $S_{a5}$  故障下的中点电流及输出电流波形。图中高电平脉冲表示  $V_{ap}$  中的矢量作用时段,其对应的中点电流参考值为  $i_a$ 。故障后,图中虚线椭圆内的中点电流为 0,此时  $i_a$  小于零,因此,诊断结果为  $F_{o \rightarrow p}$ 。根据表 4 可以最终判断出故障器件为  $S_{a5}$ 。

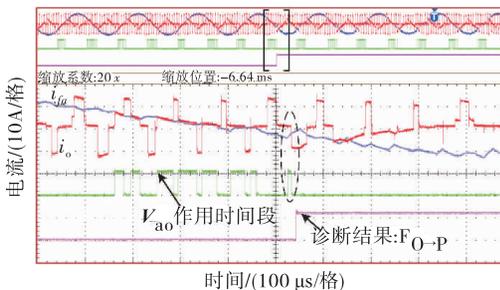


图 15  $S_{a5}$  故障诊断实验结果

图 16 为开关器件  $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  故障后逆变器进入两电平容错模式的输出电压波形,故障后 A 相滤波输出电压波形严重畸变,进入两电平容错模式后三相滤波输出电压波形恢复三相正弦波形,且逆变器滤波输出电压幅值不变。实验结果与仿真一致,验证了两电平容错电路的有效性。

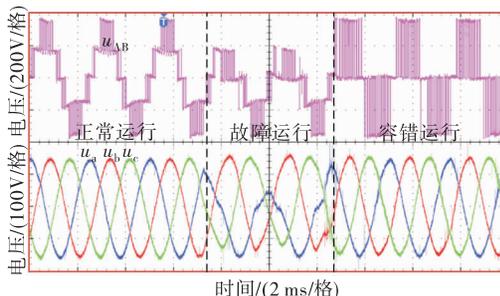


图 16 两电平容错实验( $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  故障)

图 17 为开关器件  $S_{a5}$  故障下的电压波形及其容错后的电压波形。图中  $S_{a5}$  故障期间,线电压  $u_{AB}$  存

在从 0 电平切换至  $-V_{dc}$  电平的现象,逆变器输出线电压波形具有一定的对称性,滤波输出电压波形变化较小。实验波形与仿真波形一致。

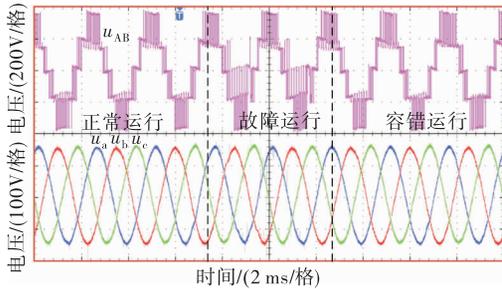


图 17 三电平容错实验( $S_{55}$ 故障)

## 5 结论

本文首先分析了三电平 ANPC 逆变器各器件开路故障下的电流路径,总结出了各器件故障对中点电流的影响。在此基础上,提出了基于中点电流的三电平 ANPC 逆变器故障诊断方法,该方法能在线诊断出具体故障器件。针对故障器件所处的不同位置,将其分为上桥臂器件、下桥臂器件、箝位器件,利用冗余 O 状态实现桥臂器件的容错运行,通过前级桥臂改变中性点的电位并重新配置开关器件的开关状态实现桥臂器件故障的容错运行。提出的容错电路只需增加 4 个开关器件,这 4 个开关器件处于长期导通或长期关断状态,损耗低,可靠性高。提出的容错电路不会降低逆变器输出容量,最大调制比不变。

## 参考文献

- [1] XU S Z, WANG C J, WANG Y. An Improved Fault-Tolerant Control Strategy for High-Power ANPC Three-Level Inverter under Short-Circuit Fault of Power Devices[J]. IEEE Access, 2019, 7: 55443-55457.
- [2] 韩建定,俞铭宏,曾家齐,等. 三电平 ANPC 逆变器改进 SVPWM 控制策略[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2020,21(4):43-48.
- [3] 朱晓莹. ANPC 三电平逆变器控制策略与故障诊断研究[D]. 德州:中国矿业大学,2018.
- [4] 张科,朱永利,郑艳艳,等. 基于冗余度参数估计的多分支混合线路故障定位方法[J]. 电网技术,2019,43(3):1034-1040.
- [5] 孙蓉,刘胜,张玉芳. 基于参数估计的一类非线性系统故障诊断算法[J]. 控制与决策,2014,29(3):506-510.
- [6] LI H, GUO Y, XIA J, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis for a Fault-Tolerant Three-Level Neutral-Point-Clamped STATCOM [J]. IET Power Electronics, 2019, 12(4): 810-816.
- [7] 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.
- [8] 李兵,崔介兵,何怡刚,等. 基于能量谱熵及小波神经网络的有源中性点钳位三电平逆变器故障诊断[J]. 电工技术学报,2020,35(10):2216-2225.
- [9] 卞玉涛,李志华. 基于专家系统的故障诊断方法的研究与改进[J]. 电子设计工程,2013,21(16):83-89.
- [10] HAN P, HE X, REN H, et al. Fault Diagnosis and System Reconfiguration Strategy of a Single-Phase Three-Level Neutral-Point-Clamped Cascaded Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3863-3876.
- [11] 于生宝,何建龙,王睿家,等. 基于小波包分析和概率神经网络的电磁法三电平逆变器故障诊断方法[J]. 电工技术学报,2016,31(17):102-112.
- [12] 陈丹江,叶银忠. 基于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.
- [13] 肖蕾,李颖晖,赵鹤,等. 基于小波变换的飞机电力传动系统故障诊断[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)2009,10(5):55-58.
- [14] 陶洪峰,周超超,杨慧中. 三电平逆变器的决策树 SVM 故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(2):238-244.
- [15] HUANG Z, WANG Z, ZHANG H. A Diagnosis Algorithm for Multiple Open-Circuited Faults of Microgrid Inverters Based on Main Fault Component Analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 925-937.
- [16] 张建忠,耿治,徐帅. 基于 T 型逆变器的 APF 故障诊断与容错控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):245-255,339.
- [17] AZER P, OUNI S, NARIMANI M. A Novel Fault-tolerant Technique For Active-Neutral-Point-Clamped Inverter Using Carrier-Based Pwm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(3): 1792-1803.
- [18] 汤旻安,许希元,王茜茜,等. 基于 SAADR-PI 的 NPC 三电平容错光伏并网逆变器 FCS-MPC 策略[J]. 高压技术,2020,46(10):3541-3551.
- [19] 杨国润,肖飞,范学鑫,等. 中压大容量三重化三电平直流变换器冗余容错控制[J]. 电工技术学报,2017,32(S1):186-195.
- [20] 林茂,李颖晖,李宁,等. 三电平容错拓扑分析及预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):60-66.
- [21] CEBALLOS S, POU J, ZARAGOZA J, et al. Fault-Tolerant Neutral-Point Clamped Converter Solutions Based on Including a Fourth Resonant Leg [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2293-2303.

(编辑:徐楠楠)