

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240635

基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器 开路故障诊断方法研究

陈怡薇, 徐永海, 袁 敞, 宋昕一, 孙曙光

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于开关器件故障是有源中性点箝位(active neutral point clamped, ANPC)三电平逆变器故障的主要类型, 快速定位故障器件对提升 ANPC 三电平逆变器的可靠性具有重要意义。针对 ANPC 三电平逆变器开关器件开路故障, 从传播路径的角度分析了不同调制算法下开关器件故障对输出电流的影响以及输出电流与负载侧电压的相位差对故障电流波形的影响。以三相输出电流作为故障特征量, 提出一种基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器开路故障诊断方法。首先采用电流平均值法先对故障开关器件的大致范围进行判定, 然后切换调制策略以实现故障器件的精确定位。最后, 通过仿真与实验验证了该方法可以在 1 个基波周期内实现故障定位, 具有检测速度快、抗干扰能力强的优点, 且无需额外增加用于故障检测的传感器。

关键词: ANPC 三电平逆变器; 切换调制策略; 开路故障; 故障诊断

Research on open-circuit fault diagnosis method of ANPC three-level inverter based on switching modulation strategy

CHEN Yiwei, XU Yonghai, YUAN Chang, SONG Xinyi, SUN Shuguang

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Since switching device faults are the main type of faults in active neutral point clamped (ANPC) three-level inverters, quickly locating the faulty devices is of great significance to improve the reliability of ANPC three-level inverters. For open-circuit faults of switching devices in ANPC three-level inverters, the impact of switching device faults on output current under different modulation algorithms and the influence of the phase difference between output current and load-side voltage on fault current waveform are analyzed from the perspective of propagation paths. Using the three-phase output current as the fault characteristic quantity, an open-circuit fault diagnosis method for ANPC three-level inverters based on switching modulation strategy is proposed. The current averaging method is used to initially determine the approximate range of the faulty switching device, and then the switching modulation strategy is used to precisely locate the faulty device. Finally, simulations and experiments verify that the method can locate faults within one fundamental waveform cycle, with advantages of fast detection speed, strong anti-interference ability, and no need for additional sensors for fault detection.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2601403).

Key words: ANPC three-level inverter; switching modulation strategy; open-circuit fault; fault diagnosis

0 引言

为了解决传统中性点箝位(neutral point clamped, NPC)型拓扑结构存在的器件损耗不均, 受压不均的问题^[1-2], 并且达到提高变换器容量的目的, 文献[3]

于 2001 年首次提出有源中性点箝位(active neutral point clamped, ANPC)型三电平拓扑结构。与 NPC 型结构相比, 该结构中增加的两只反并联于箝位二极管两端的 IGBT 将换流方式由原来的 8 种扩展至 32 种, 这些新的换流方式可通过控制箝位 IGBT 来加以选择, 这为调节功率器件的损耗分布提供了新的自由度, 且输出电压畸变率也有所降低^[4-8]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2021YFB2601403)

然而逆变器的可靠性远低于机电装置其他部分，其中开关器件故障是逆变器故障的主要类型，占比约为 38%^[9]，IGBT 开关器件数量的增加意味着故障发生概率的增加，因此研究 ANPC 三电平逆变器开关器件故障诊断具有重要意义。

逆变器开关器件的故障类型有开路故障和短路故障两种。由于开关器件的短路故障演变速度快、危险程度大，往往通过在逆变器电路中植入快速熔丝使其变成开路故障进行研究^[10-11]，而由于发生开路故障时一般没有明显的过流现象，且持续运行下会导致中点电压的偏移，易造成自身或其他开关器件的二次损坏，因此国内外学者主要针对逆变器功率器件的开路故障诊断进行了多方面研究，诊断方法主要分为基于数据驱动的方法和基于电路的分析方法两类。

文献[12-13]基于数据驱动进行故障诊断。文献[12]采用小波包变换对 NPC 逆变器故障相电流进行分解、重构并作为支持向量机的输入量。文献[13]利用卷积神经网络实现逆变器的故障诊断。

文献[14-15]基于电路分析进行故障诊断。文献[14]对逆变器输出电压进行采样，通过诊断函数对正常情况和各种开路故障进行区分，实现故障诊断。文献[15]对逆变器桥臂电压进行采样，通过求解桥臂电压平均值与正常工作时的差值实现单双管故障诊断。与基于数据驱动的方法相比，基于电路分析的方法具有快速性和实用性的特点，目前得到了广泛的研究。大多数诊断方法需采集变流器触发脉冲作为诊断变量，这对于投入运行的变流系统难以实现。文献[16-17]采用实用性较高的非侵入式故障诊断方法。

上述大多数诊断方法仅针对普通两电平或 NPC 逆变器，无法具体定位 ANPC 三电平逆变器的故障器件。文献[18-23]提出了针对 ANPC 三电平逆变器的故障诊断方法。文献[18]利用电流预测模型检测开路故障。文献[19]提取桥臂电压后利用小波神经网络实现故障诊断，然而该方法需要外加电压传感器且需要大量数据训练网络。文献[20]通过在 6 个箝位分支中增加罗氏线圈来检测电流判断故障。文献[21]通过分析 ANPC 三电平逆变器故障瞬时功率实现故障诊断。文献[22]通过桥臂到中点的电压、驱动脉冲信号和电流波形进行故障诊断，需要外加传感器并采集触发脉冲。文献[23]通过比较输出电流在不同相位范围是否与正常情况一致来判断故障器件位置，鲁棒性较差。在单一调制算法下特定开关器件间开路故障电流波形及相位无明显区别，难以精准定位。因此针对 ANPC 三电平逆变器的故障

诊断方法仍需进一步的研究。

本文以 ANPC 三电平逆变器为研究对象，深入研究其正常与故障情况下的调制方式与换流路径，提出了一种功率开关器件开路故障诊断方法，首先使用电流平均值法对故障及故障器件范围进行初步判定，然后利用不同调制方式换流路径不同的特点，通过切换调制策略后检测负载侧电流变化情况实现故障诊断。最后，通过仿真与实验验证了该方法的可行性。

1 ANPC 三电平逆变器故障状态分析

1.1 两种典型调制算法

ANPC 三电平逆变器拓扑结构如图 1 所示，可以输出 P、O 和 N 三种状态，对应三电平 $+U_{dc}/2$ 、0 和 $-U_{dc}/2$ 。由于基于 SPWM 调制时 ANPC 三电平逆变器操作简单且开关损耗小，本文采用 SPWM 控制 ANPC 三电平逆变器，通过改变开关器件的开关状态以改变输出电压，其中 O 状态存在 4 种输出方式：OU1、OU2、OL1 与 OL2。3 种状态的开关序列如表 1 所示^[23]。

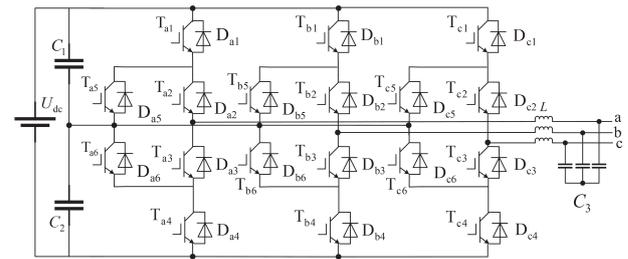


图 1 ANPC 三电平逆变器拓扑

Fig. 1 ANPC three-level inverter topology

表 1 3 种状态对应的开关序列

Table 1 Switch sequences corresponding to three states

状态	T _{x1}	T _{x2}	T _{x3}	T _{x4}	T _{x5}	T _{x6}	输出电压
P	1	1	0	0	0	1	$+U_{dc}/2$
OU1	0	1	0	1	1	0	0
OU2	0	1	0	0	1	0	0
OL1	1	0	1	0	0	1	0
OL2	0	0	1	0	0	1	0
N	0	0	1	1	1	0	$-U_{dc}/2$

典型的调制算法有两种，调制算法 1 的脉冲生成原理为：在正半调制周期，桥臂输出状态在 P 与 OU1 之间切换；在负半调制周期，桥臂输出状态在 N 与 OL1 之间切换。而调制算法 2 的脉冲生成原理为：在正半调制周期，桥臂输出状态于 P 与 OL2 之间切换；在负半调制周期，桥臂输出状态在 N 与 OU2 之间切换。比较两调制算法原理可知，调制算

法 1 与调制算法 2 的区别在于桥臂输出零电平时的开关状态不同。

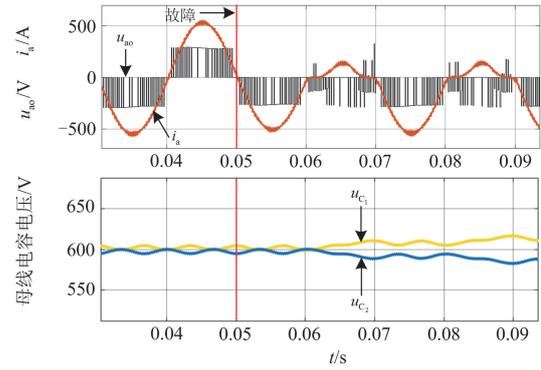
1.2 开关器件故障时的电流与母线电容电压分析

针对不同开关器件故障对输出状态的影响进行逐一分析, 故障时通过特定流电路径改变输出状态, 结果如表 2 所示。

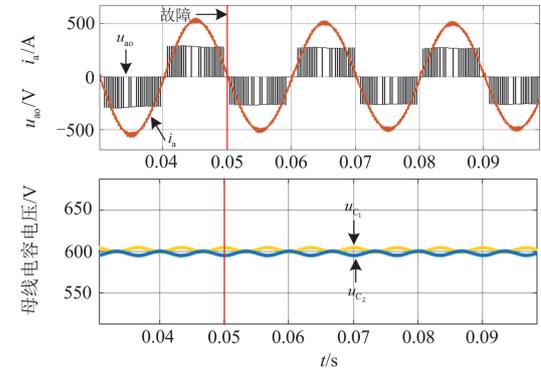
表 2 开关器件开路故障特征表
Table 2 Characteristics of open circuit faults in switch transistors

故障器件	输出状态	电流方向	故障特征	
			流电路径	故障后输出状态
T_{x1}	P	+	$D_{x5} \rightarrow T_{x2} / T_{x6} \rightarrow D_{x3}$	O
T_{x2}	P	+	$T_{x6} \rightarrow D_{x3}$	O
	OU1/OU2	+	$D_{x3} \rightarrow D_{x4}$	N
T_{x3}	N	-	$T_{x5} \rightarrow D_{x2}$	O
	OL1/OL2	-	$D_{x1} \rightarrow D_{x2}$	P
T_{x4}	N	-	$D_{x6} \rightarrow T_{x3} / T_{x5} \rightarrow D_{x2}$	O
T_{x5}	OU1/OU2	-	$D_{x1} \rightarrow D_{x2}$	P
T_{x6}	OL1/OL2	+	$D_{x3} \rightarrow D_{x4}$	N

由 ANPC 三电平逆变器对称结构可知, 分析故障电流波形可以上半桥臂开关器件 T_{a1} 、 T_{a2} 与 T_{a5} 故障为例。假设逆变器带阻性负载, 采用调制算法 1 时, a 相上半桥臂发生开路故障的故障电流 i_a 、输出电压 u_{a0} 与母线电容电压如图 2 所示。器件 T_{a1} 或 T_{a2} 开路时, 由 T_{a1} 与 T_{a2} 组成的正电平回路无法导通, 桥臂无法输出 P 状态, P 状态被迫转为 O 状态, 因此电流正半周期趋于零, 由于电流流经中点, 两母线电容电压差逐渐增大。且 T_{a2} 开路时, 电流正向流通时的 O 状态也被迫转为 N 状态, 因此两母线电容电压差缓慢增大。器件 T_{a5} 开路时, O 状态仍可以通过 D_{a5} 与 T_{a2} 或 T_{a6} 与 D_{a3} 回路续流, 变换器转为 NPC 正常运行, 因此电流波形和母线电容电压波形都与正常状态相同。



(b) T_{a2} 开路故障

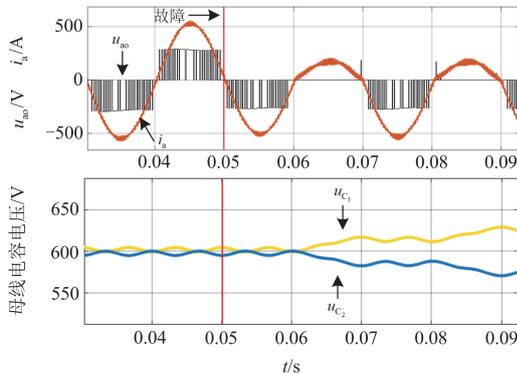


(c) T_{a5} 开路故障

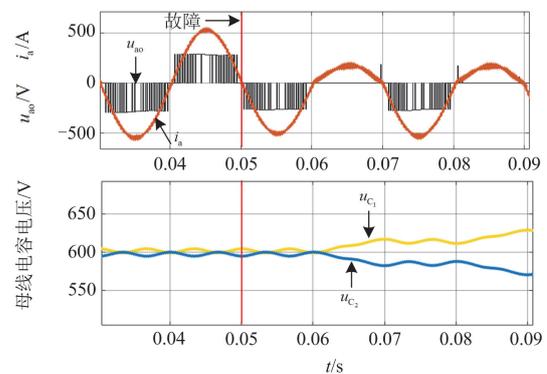
图 2 调制算法 1 下 a 相上半桥臂故障电流、输出电压及母线电容电压波形

Fig. 2 Fault current, output voltage and bus capacitor voltage waveforms of a-phase upper half bridge arm under modulation algorithm 1

采用调制算法 2 时, a 相上半桥臂发生开路故障的故障电流、输出电压与母线电容电压如图 3 所示。器件 T_{a1} 或 T_{a2} 开路时, 原理与调制算法 1 相同, P 状态被迫转为 O 状态, 电流正半周期趋于零, 两母线电容电压差逐渐增大, 但 T_{a2} 故障不再影响 O 状态的输出。而在器件 T_{a5} 开路时, 电流负半周的 O



(a) T_{a1} 开路故障



(a) T_{a1} 开路故障

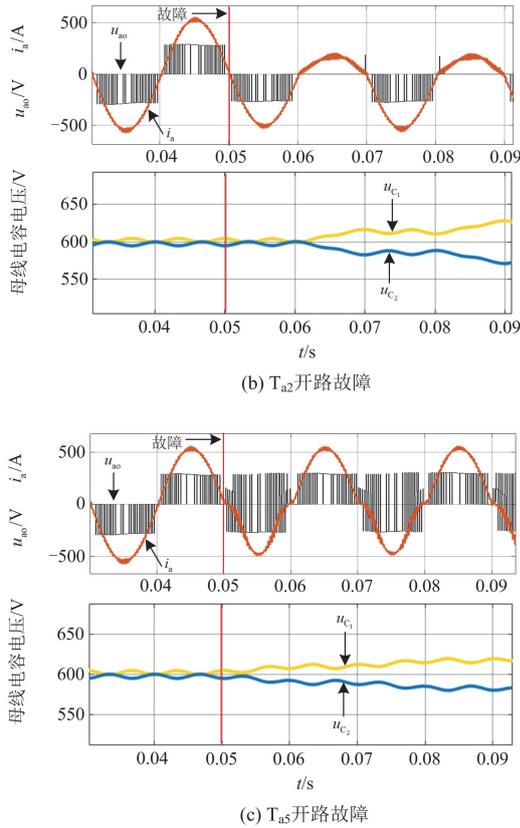


图3 调制算法2下a相上半桥臂故障电流、输出电压及母线电容电压波形

Fig. 3 Fault current, output voltage and bus capacitor voltage waveforms of a-phase upper half bridge arm under modulation algorithm 2

状态回路 T_{a2} 与 T_{a5} 断开，O状态被迫转为P状态，相当于电流流出中点，因此电流于过零点附近发生较明显畸变，两母线电容电压差缓慢增大。

在母线电容电压发生直流偏移时，会使逆变器输出谐波含量升高，严重时会导致功率器件电压应力大幅上升，可能使器件发生过压损坏^[24]。因此，如何快速检测并定位故障功率器件对于维护其他器件的正常运行有至关重要的意义^[25]。

在相位差较小的情况下，由调制算法1进行调制时， T_{x1} 与 T_{x2} 、 T_{x3} 与 T_{x4} 故障电流波形不同，而 T_{x5} 与 T_{x6} 故障电流波形几乎与正常状态一致。若采用调制算法2， T_{x1} 与 T_{x2} 、 T_{x3} 与 T_{x4} 故障电流波形相同，而 T_{x5} 与 T_{x6} 故障电流波形区别于正常波形。即调制算法1可用来诊断 T_{x1} 与 T_{x2} 、 T_{x3} 与 T_{x4} 故障，调制算法2可用来诊断 T_{x5} 与 T_{x6} 故障，可以考虑通过切换两种调制算法实现故障诊断。但无论是单纯采用电流矢量法还是平均电流法，故障特征采集时间都需要至少两个基波周期，不具有快速性，且故

障特征量易受负载影响，鲁棒性弱。

由表2可以看出，故障电流的波形与电流方向和输出状态有关，即与输出电流同负载侧电压的相位差有关。当相位差较小时，故障特征电流与上述一致，而当相位差增大时，故障电流将会产生变化。以 T_{a5} 故障为例，图4给出了在仿真环境下采用调制算法1且带感性负载时 T_{a5} 故障下的电流与输出电压波形。此时电流滞后于调制电压，当调制电压为正，而电流方向为负时，ANPC三电平逆变器输出由O状态转为P状态，因此出现不同于正常电流波形的故障波形。

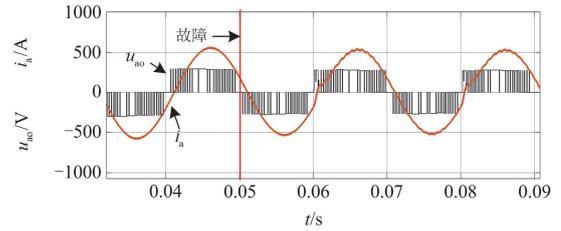


图4 调制算法1下 T_{a5} 故障时带感性负载的a相电流与输出电压波形

Fig. 4 The a-phase current and output voltage waveform with inductive load under T_{a5} fault under modulation algorithm 1

当ANPC三电平逆变器接入感性负载时，相位差将会增大，此时故障波形与接入阻性负载时的波形有所不同，故障诊断也会因此受到影响。

2 基于切换调制策略的故障诊断方法

基于采用不同调制波与调制算法时故障电流波形的不同，提出了一种ANPC三电平逆变器故障诊断方法：采集三相负载侧输出电流波形，首先采用电流平均值法进行初步的故障判定，然后通过切换调制策略实现故障开关器件的精确定位。该方法无需采集逆变器装置内部信息，无需外加传感器，鲁棒性好，且诊断时间小于一个基波周期，具有快速性。

2.1 电流平均值法

为了快速判定出开关器件发生故障，首先采用电流平均值法进行初步的故障判定。

定义ANPC三电平逆变器三相负载侧电流分别为 i_a 、 i_b 和 i_c ，一个周期内的三相电流平均值 I_{aave} 、 I_{bave} 和 I_{cave} 计算式如式(1)所示。

$$\begin{cases} I_{aave} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_a(k) \\ I_{bave} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_b(k) \\ I_{cave} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_c(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_a(k)$ 、 $i_b(k)$ 、 $i_c(k)$ 分别为第 k 个采样点的 a、b、c 相电流值; N 为一个基波周期的采样点数。

可由式(1)得平均电流 Park 矢量的模值 μ_{Park} , 如式(2)所示。

$$\mu_{\text{Park}} = \frac{1}{2}(|I_{\text{aave}}| + |I_{\text{bave}}| + |I_{\text{cave}}|) \quad (2)$$

在正常工作情况下, μ_{Park} 的值为 0; 而当某个开关器件发生开路故障后, 负载侧电流会出现直流分量, 三相电流产生畸变, 该畸变在平均电流 Park 矢量上反映为 μ_{Park} 的增大, 即 μ_{Park} 不再为 0。因此可以利用平均电流 Park 矢量的模值进行开路故障是否发生的初步判断。然而 μ_{Park} 易受负载突变的影响, 为提高诊断的鲁棒性, 引入傅里叶变换的归一化方法^[16], 通过离散傅里叶变换计算每一个电流周期中的直流分量和基波幅值, 然后用基波幅值将直流分量归一化。

$$\begin{cases} a_{j,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_j(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (j = \text{a,b,c}) \\ b_{j,k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_j(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (j = \text{a,b,c}) \end{cases} \quad (3)$$

$$h_j = \frac{a_{j,0}}{\sqrt{a_{j,1}^2 + b_{j,1}^2}} \quad (j = \text{a,b,c}) \quad (4)$$

式中: $a_{j,k}$ 为 j 相 k 倍频电流余弦量; $b_{j,k}$ 为 j 相 k 倍频电流正弦量; $i_j(n)$ 为第 n 个 j 相电流采样值; h_j 为 j 相故障诊断特征量。

当满足式(5)时, 初步认定 ANPC 三电平逆变器发生开路故障。

$$\max(|h_j|) > 0.5 \quad (5)$$

当发生开路故障时, 三相电流平均值存在进一步的关系。a 相发生开路故障时, 三相电流平均值存在式(6)所示的关系。

$$I_{\text{cave}} = I_{\text{bave}} = -\frac{I_{\text{aave}}}{2} \quad (6)$$

由式(6)可知, 故障相电流平均值与其他两相电流平均值异号。

由 1.2 节的分析可知, 若 T_{x1} 或 T_{x2} 发生故障, 调制波正半周的正电平输出受到影响, 使得电流转为零电平输出。当采用调制算法 2 进行调制时, 若 T_{x6} 发生故障, 在调制波正半周的零电平输出受到影响, 使得电流转为负电平输出。以上 3 种开关器件故障电流正半周的平均值较正常情况都有所降低, 而电流负半周期不受影响, 即负半周期电流平均值不变, 因此故障相 1 周期内的电流平均值不再为 0, 符号变为负。而当采用在调制算法 1 进行调

制时, 若 T_{x6} 发生故障, 逆变器转为 NPC 型逆变器继续正常运行, 电流仍与正常工作时的电流波形一致, 因此无法通过电流平均值法检测出来。 T_{x3} 、 T_{x4} 与 T_{x5} 的分析方法相同, 其中 T_{x5} 故障时, 使用调制算法 2 可以检测出特征电流, 但使用调制算法 1 无法检测出特征电流。

因此, 在正常工作时, 考虑使用调制算法 2 进行调制, 以实现所有开关器件故障的快速诊断。不同开关器件开路时三相电流平均值符号如表 3 所示。

表 3 故障开关器件与三相电流平均值符号的关系

Table 3 Relationship between the fault switching transistor and the symbol of the average three-phase current

I_{aave}	I_{bave}	I_{cave}	故障开关器件
-	+	+	T_{a1}, T_{a2}, T_{a6}
+	-	-	T_{a3}, T_{a4}, T_{a5}
+	-	+	T_{b1}, T_{b2}, T_{b6}
-	+	-	T_{b3}, T_{b4}, T_{b5}
+	+	-	T_{c1}, T_{c2}, T_{c6}
-	-	+	T_{c3}, T_{c4}, T_{c5}

根据三相电流平均值符号对故障器件的大致范围进行判定, 可以简化下一步故障器件的精确定位流程。该判定方法无需根据负载大小修改阈值, 具有抗干扰的能力。

2.2 调制策略切换的原理

由 1.2 节分析可知, 在使用电流平均值法进行初步的故障判定后, 若要实现 ANPC 三电平逆变器的故障定位, 需要找到不同开关器件故障时的故障特征量。本文针对 ANPC 三电平逆变器故障诊断缺少故障特征量的问题, 提出了基于调制策略切换的故障定位方法, 该方法原理如下所述。

在调制算法 1 下, 将调制波幅值缩小至原来的一半, 并向上平移至整个调制波的值均为正, 此时在整个基波周期内桥臂电压仅输出 P、O 两种状态。图 5 为调制算法 1 策略下且调制波正移的 T_{a5} 、 T_{a1} 故障时电流截止原理图。如图 5(a)所示, 当电流 $i_a < 0$ 时, 若 T_{a5} 开路故障, 则 a 相无法输出 O 状态, 在 $i_a < 0$ 的区域无法正常调制, 此时桥臂输出将断流, 负向电流 i_{an} 保持为零。如图 5(b)所示, 当电流 $i_a > 0$ 时, 若 T_{a1} 或 T_{a2} 开路故障, 则 a 相无法输出 P 状态, 在 $i_a > 0$ 的区域无法正常调制, 此时桥臂输出断流, 正向电流 i_{ap} 保持为 0。若 T_{a1} 、 T_{a2} 、 T_{a5} 正常工作, 则电流波形正常。因此 i_{an} 仅与 T_{a5} 故障与否有关; i_{ap} 仅与 T_{a1} 、 T_{a2} 故障与否有关。

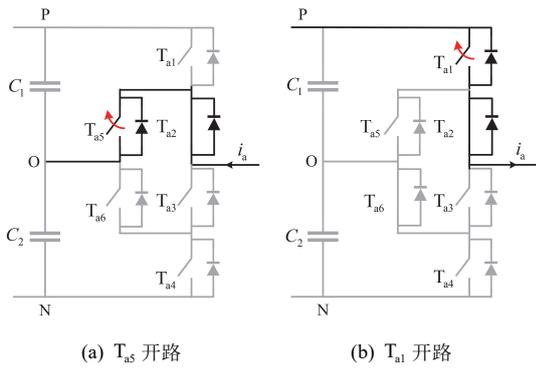


图 5 调制波正移且调制算法 1 下的电流截止原理图

Fig. 5 Current cut-off schematic diagram of modulating wave with positive shift and modulation algorithm 1

而在调制算法 2 下, 调制波同样移动至正半轴, 同理可分析, i_{an} 仅与 T_{a3} 故障与否有关, i_{ap} 仅与 T_{a1} 、 T_{a2} 故障与否有关。

同样采用调制算法 1, 将调制波幅值缩小至原来的一半, 并向下平移至整个调制波的值均为负, 此时桥臂电压仅输出 N、O 两种状态。图 6 为调制算法 1 策略下且调制波负移的 T_{a6} 、 T_{a3} 故障时电流截止原理图。如图 6(a)所示, 当电流 $i_a > 0$ 时, 若 T_{a6} 开路, 则 a 相无法输出 O 状态, 在 $i_a > 0$ 的区域无法正常调制, 此时 i_{ap} 将保持为 0。如图 6(b)所示, 当电流 $i_a < 0$ 时, 若 T_{a3} 或 T_{a4} 开路故障, 则 a 相无法输出 N 状态, 在 $i_a < 0$ 的区域无法正常调制, 此时桥臂输出断流, i_{an} 保持为 0。若 T_{a3} 、 T_{a4} 、 T_{a6} 正常工作, 则电流波形正常, i_{ap} 仅与 T_{a6} 故障与否有关; i_{an} 仅与 T_{a3} 、 T_{a4} 故障与否有关。

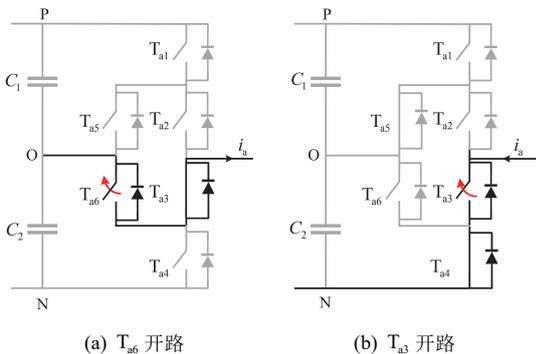


图 6 调制波负移且调制算法 1 下的电流截止原理图

Fig. 6 Current cutoff schematic diagram of modulating wave with negative shift and modulation algorithm 1

而采用调制算法 2 时, 调制波同样移动至负半轴, 同理可分析, i_{an} 仅与 T_{a2} 故障与否有关, i_{ap} 仅

与 T_{a3} 、 T_{a4} 故障与否有关。

因此可得故障器件的特征电流如表 4 所示。基于切换调制策略, 当逆变器发生开路故障时, 切换至对应的调制策略时, 可以通过检测输出电流确定故障开关器件的具体位置。由表 4 可知, 检测 T_{x2} 与 T_{x6} 开路故障具有相同的调制波移动方向与特征电流, 即仅需将调制波负向平移, 然后切换调制算法, 通过正向电流的值确认故障开关器件的具体位置。 T_{x3} 、 T_{x4} 与 T_{x5} 的故障检测原理同上。

表 4 基于切换调制策略的故障特征电流

Table 4 Fault characteristic current based on switching modulation strategy

故障开关器件	调制算法	调制波移动方向	特征电流
T_{x2}	2	负向	i_{ip}
T_{x3}	2	正向	i_{in}
T_{x5}	1	正向	i_{in}
T_{x6}	1	负向	i_{ip}

为抵消相位差对故障诊断的干扰, 在切换调制波时改变其初始相位至接入时位于正弦波峰值处, 图 7 为调制波负移的原理图, 还可使故障特征电流截止现象更明显。

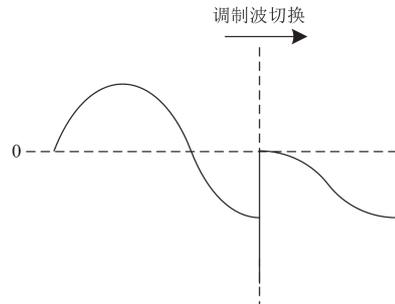


图 7 调制波负移原理图

Fig. 7 Modulating wave negative shift schematic

2.3 故障诊断流程

可先根据电流平均值法得到故障开关器件大致范围, 再利用排除法将可能故障的开关器件逐一排除, 最后得以实现故障诊断。

以 A 相发生故障为例, 在式(5)成立时, 确定发生开关器件开路故障。若此时由电流平均值法得到的三相电流平均值符号分别为“-”、“+”和“+”, 可知故障开关器件范围为 T_{a1} 、 T_{a2} 与 T_{a6} 。使用调制算法 1, 三相调制波幅值缩小至原来的一半, 并向下平移至整个调制波的值均为负, 将故障相调制波相位调至 $\pi/2$, 为了消除电流由导通到截止过程的影响, 只计算后半周期负载侧正向电流平均值 I_{ap1} , 如式(7)所示。

$$I_{ap1} = \frac{\sum_{k=\frac{N}{2}+1}^N I_{ap}(k)}{\frac{N}{2}} \quad (7)$$

式中, $I_{ap}(k)$ 为切换调制策略期间的第 k 个 a 相正向电流采样点。

在 2 ms 后切换调制算法 2, 并计算这期间后一开关周期负载侧正向电流平均值 I_{ap2} , 如式(8)所示。

$$I_{ap2} = \frac{\sum_{k=\frac{3N}{2}+1}^{2N} I_{ap}(k)}{\frac{N}{2}} \quad (8)$$

在 2 ms 后调制波与调制算法均切换为正常工作状态。

I_{pth} 为所设阈值, 若 I_{ap1} 满足式(9), 则可以定位为器件 T_{a6} 故障, 否则继续判断 I_{ap2} 是否满足式(10), 若满足则可以定位为器件 T_{a2} 故障, 不满足则可以由排除法定位为器件 T_{a1} 故障。

$$I_{ap1} < I_{pth} \quad (9)$$

$$I_{ap2} < I_{pth} \quad (10)$$

其余开关器件故障定位原理同上, 具体流程如图 8 所示。

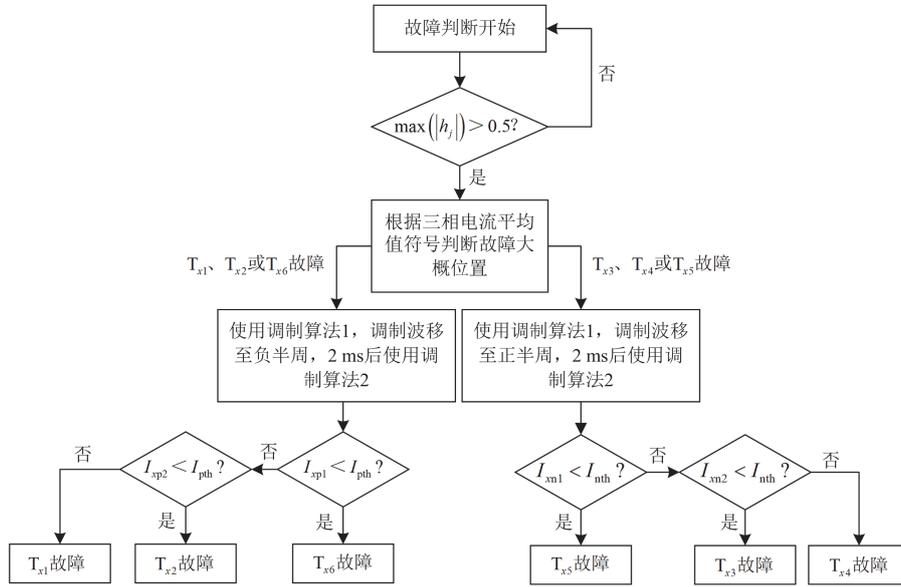


图 8 基于切换调制策略的故障诊断流程图

Fig. 8 Fault diagnosis flowchart based on switching modulation strategy

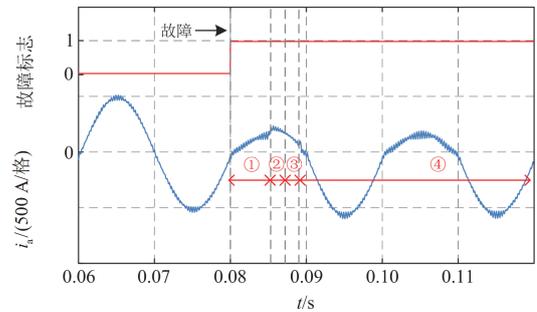
3 仿真和实验验证

3.1 仿真实验

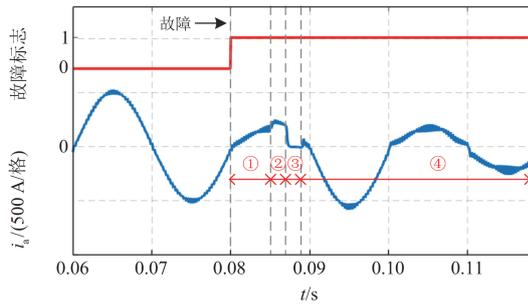
利用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建三电平 ANPC 逆变器, 仿真条件如下: 直流侧电压为 1200 V, 直流侧电容 C_1 、 C_2 为 33 mF, 滤波电感 L 为 80 μ H, 基波频率和三角载波频率分别设定为 50 Hz 和 2000 Hz, 在 0.08 s 发生开路故障。带 1000 kW 阻性负载时的故障仿真诊断过程如图 9 所示。

图 9 为 T_{a1} 、 T_{a2} 和 T_{a6} 开路时的故障诊断波形。分析图 9(b)可知: 故障发生后, 首先通过电流平均值法在①段实现逆变器的故障判定, 然后在②段切换为调制算法 1, 并将调制波移动至负半轴, 观察可知其正向电流平均值大于 0, 故排除 T_{a6} 故障, 而

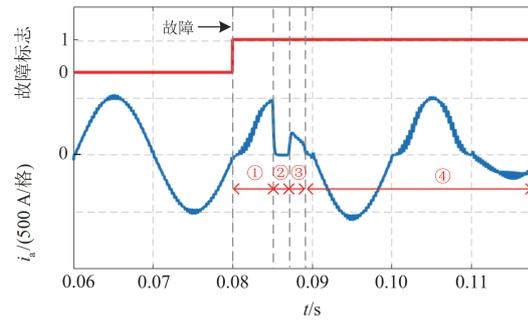
在③段切换为调制算法 2, 其后半段电流截止于 0, 因此可以诊断出是 T_{a2} 发生开路故障。最后在④段切换回正常模式的调制策略, 对逆变器进行容错操作。图 9(c)的故障诊断过程同理, 而图 9(a)中由于 T_{a1} 开



(a) T_{a1} 开路故障



(b) T_{a2} 开路故障



(c) T_{a6} 开路故障

图 9 开关器件开路故障仿真诊断过程

Fig. 9 Simulation diagnosis process of open circuit fault of switching device

路后，②、③段电流为正弦波，不发生电流截止现象，排除 T_{a2} 和 T_{a6} 器件故障后可诊断出是 T_{a1} 发生开路故障。

图 10 为 ANPC 三电平逆变器带感性负载时的故障诊断波形，其中③段电流截止速率明显降低，但仍能在切换调制策略后半周期实现截止，故本故障诊断方法同样适用于带感性负载的情况。

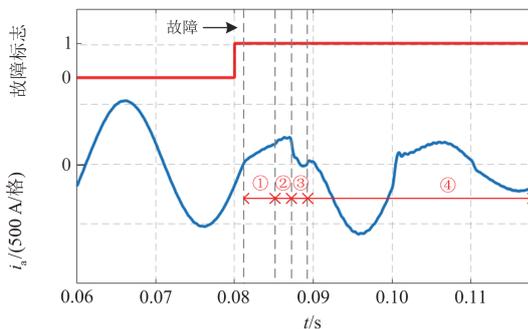


图 10 带感性负载时的 T_{a2} 开路故障仿真诊断过程

Fig. 10 Simulation diagnosis process of T_{a2} open circuit fault with inductive load

3. 2 实验验证

为了进一步验证基于切换调制策略的 ANPC 三

电平逆变器开关器件故障诊断方法的可行性，本文选用 RT-BOX3 搭建了如图 11 所示的硬件在环实验平台。其中采用基于 PLECS 平台的 RT-BOX3 模拟逆变器主电路，采用 TMS320F28069M 芯片实现调制策略及其切换，通过数字接口的连接实现信息的交互，实验参数与上述仿真参数一致。

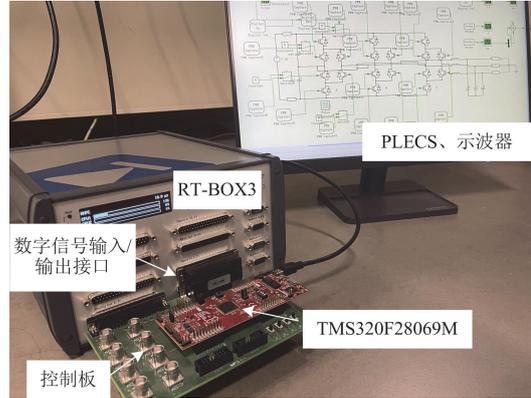
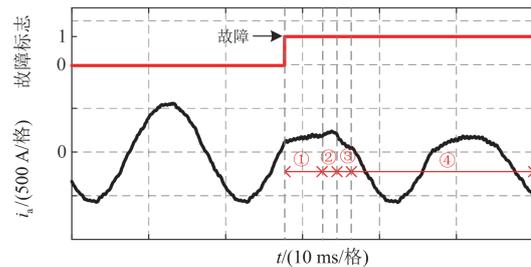


图 11 RT-BOX3 硬件在环实验平台

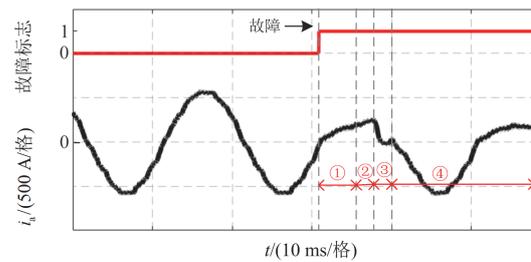
Fig. 11 RT-BOX3 hardware-in-the-loop experiment platform

图 12 为 ANPC 三电平逆变器带阻性负载时 a 相开关器件开路故障的故障诊断波形。

1) 图 12(a)、图 12(b)和图 12(c)分别为开关器件 T_{a1} 、 T_{a2} 、 T_{a6} 开路故障时的故障诊断电流波形。其中图 12(b)的①段使用电流平均值法检测出逆变器发生故障；②、③段进入故障定位阶段，②段为调制算法 1 下调制波负移时的特征电流，可知其电流平均值大于 0，故排除 T_{a6} 故障；③段切换为调制算法 2，其后半段电流截止于 0，因此可以诊断出 T_{a2} 开



(a) T_{a1} 开路故障



(b) T_{a2} 开路故障

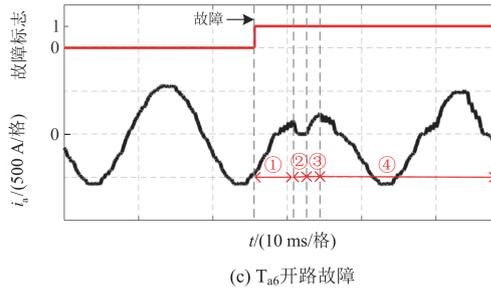


图 12 开关器件开路故障实验诊断过程

Fig. 12 Procedure of experimental diagnosis of open-circuit fault of switching transistors

路故障；④段为返回正常情况下的调制策略的电流波形，后续进行容错操作。图 12(c)的故障诊断过程同理，而图 12(a)则是在①段检测出发生故障，②、③段由于不发生电流截止现象可以排除是 T_{a2} 或 T_{a6} 开路，故利用排除法诊断出 T_{a1} 开路故障。

2) 实验表明在基于切换调制策略的故障诊断方法下特征电流能够在故障情况下迅速作出反应，从而实现故障开关器件的快速定位。

图 13 为逆变器带感性负载时开关器件开路故障诊断波形，与带阻性负载时相比电流截止速率略微变慢但变化不显著，诊断电流在切换期间的后半周期依旧维持截止现象，因此只计算后半段的平均电流就可以实现感性电路下故障开关器件的精确定位。

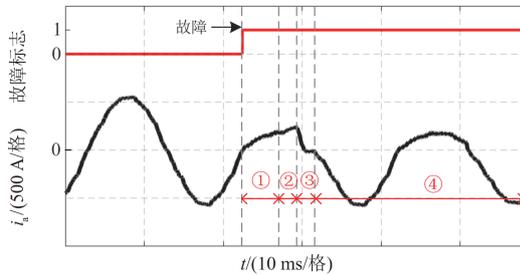


图 13 带感性负载时的 T_{a2} 开路故障诊断过程

Fig. 13 Diagnosis process of T_{a2} open circuit fault with inductive load

图 14、图 15 分别为 ANPC 三电平逆变器正常运行、输出侧突加 500 kW 负载故障诊断波形图，可以看出负载突变不会影响故障判定与电流截止现象，即该故障诊断方法不受负载突变的影响，具有强鲁棒性。

3.3 现有方法对比

表 5 对比了本文方法与现有 ANPC 三电平逆变器故障诊断方法在硬件需求、诊断时间、鲁棒性与实用性方面的性能差异。分析表 5 可知，基于神经网络的故障诊断方法具有快速性，但由于文献[19]

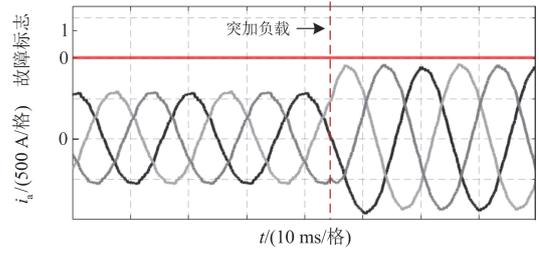


图 14 突加负载时的正常运行波形图

Fig. 14 Normal operation waveform during sudden load application

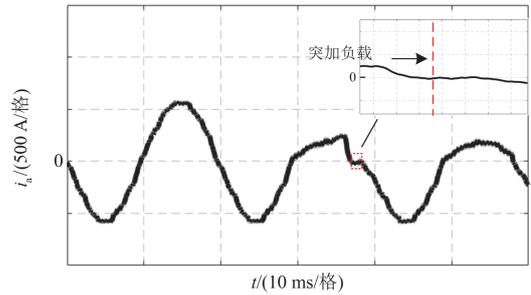


图 15 突加负载时的 T_{a2} 开路故障诊断过程

Fig. 15 Diagnosis process of T_{a2} open circuit fault during sudden load application

表 5 现有诊断方法的比较

Table 5 Comparison of existing diagnostic methods

诊断方法	硬件需求	诊断时间	鲁棒性	实用性
瞬时功率检测 ^[21]	增设三相输出电压传感器	<20 ms	弱	中
电流差异模型预测 ^[18]	无	<60 ms	强	中
神经网络 ^[19]	增设三相上中下桥臂电压传感器	<2 ms	中	弱
本文方法	无	<20 ms	强	强

需要额外添加三相桥臂电压传感器，且需大量数据进行训练，因此很难运用到实际工程中。而文献[21]由于其弱鲁棒性及额外添加传感器的需求较难投入使用。文献[18]所提方法无需额外增加硬件，且具有强鲁棒性，但其诊断时间较长。综上所述，本文所提的基于切换调制策略的故障诊断方法具有强鲁棒性，无需增加额外硬件，且在诊断时间方面也有较大优势，其中在 4 ms 以内即可实现故障器件的精确定位。

4 结论

本文提出了一种基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器开路故障诊断方法，具有计算量小，抗

干扰、诊断速度快、实用性强的优点。

1) 通过分析不同开关器件开路故障的电流特征, 得到其故障特征与输出电流同负载侧电压的相位差有关, 即带不同性质的负载所产生的故障电流会有不同的结论。

2) 采用电流平均值法进行故障初步判断, 可将故障范围缩小至 3 个器件。

3) 通过切换调制策略得到故障特征电流, 可在 4 ms 内实现故障开关器件的快速定位。

4) 对所提方法进行仿真与实验验证, 结果表明在阻性与感性负载条件下该方法可以在 1 个基波周期内实现故障开关器件定位。

5) 本文提出的方法无需采集逆变器装置内部信息, 无需外加传感器, 具有重要的实用价值。

参考文献

- [1] 周思邈, 马伏军, 许明春, 等. 基于 T 型三电平变换器的优化损耗分布控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 66-76.
ZHOU Simiao, MA Fujun, XU Mingchun, et al. Optimal loss distribution control strategy based on a T-type three-level converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 66-76.
- [2] HOSSEINKHANI V, SARVI M. A new five-level inverter with reduced leakage current for photovoltaic system applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 287-299.
- [3] BRUCKNER T, BERNET S. Loss balancing in three-level voltage source inverters applying active NPC switches[C]// IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2001, Vancouver, Canada: 1135-1140.
- [4] WOLDEGIORGIS D, MANTOOTH H A. Precise electro-thermal power loss model of a three-level ANPC inverter with hybrid Si/SiC switches[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 8(3): 76-89.
- [5] 王超, 何英杰, 宋志顺, 等. 有源中点钳位多电平逆变器空间矢量调制与三角载波调制统一理论[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 106-115.
WANG Chao, HE Yingjie, SONG Zhishun, et al. Unified theory between the space vector and the triangular carrier-based PWM strategies in active neutral-point-clamped multilevel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 106-115.
- [6] LI J, HUANG A Q, LIANG Z, et al. Analysis and design of active NPC (ANPC) inverters for fault-tolerant operation of high-power electrical drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 519-533.
- [7] 陈果, 龚春阳, 朱丽华, 等. 基于 I-DPWM 的三电平中点钳位光伏逆变器漏电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 119-130.
CHEN Guo, GONG Chunyang, ZHU Lihua, et al. Leakage current suppression method of a three-level neutral point clamp photovoltaic inverter based on I-DPWM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 119-130.
- [8] 岳舟, 刘小荻, 姚绍华, 等. 一种基于开关电容的单电源升压型六电平逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 119-130.
YUE Zhou, LIU Xiaodi, YAO Shaohua, et al. A single supply boost six-level inverter based on a switched-capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 119-130.
- [9] 卫炜, 高瞻, 赵牧天, 等. 基于切换调制波的三电平有源中点钳位逆变器优化容错技术研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3818-3833.
WEI Wei, GAO Zhan, ZHAO Mutian, et al. Research on optimal fault-tolerant technique for three-level active-neutral-point-clamped inverter based on switching modulation wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3818-3833.
- [10] 李江伟, 石瑞才, 王愚, 等. UPS 系统中电压型逆变器开路故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 148-153.
LI Jiangwei, SHI Ruicai, WANG Yu, et al. Open-circuit fault diagnosis of a voltage-source inverter in a UPS system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 148-153.
- [11] 李辉, 杨甜, 谭宏涛, 等. 基于电压和电流特征的双馈风电变流器功率器件开路故障综合诊断[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3433-3445.
LI Hui, YANG Tian, TAN Hongtao, et al. Comprehensive diagnosis of open-circuit fault for power devices of doubly-fed wind power converter based on the features of voltage and current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3433-3445.
- [12] 时维国, 吴宁. 基于小波包变换和 SVM 的三电平逆变器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 91-95, 100.
SHI Weiguo, WU Ning. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet packet transform and support vector machine[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 91-95, 100.
- [13] 于海, 邓钧君, 王震坡, 等. 基于卷积神经网络的逆变器故障诊断方法[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 142-151.
YU Hai, DENG Junjun, WANG Zhenpo, et al. Inverter fault diagnosis method based on convolutional neural network[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 142-151.

- [14] 陈高华, 成庶, 向超群. 非侵入式逆变器功率管开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3854-3862.
CHEN Gaohua, CHENG Shu, XIANG Chaoqun. A non-intrusive diagnostic technique for open-circuited faults of inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3854-3862.
- [15] 李战. 非侵入式逆变器功率开关管故障和电流传感器故障诊断方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
LI Zhan. Research on diagnostic methods for power switch tube faults and current sensor faults in non-invasive inverters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [16] 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.
YU Yong, JIANG Shengcheng, YANG Rongfeng, et al. Diagnosis method for IGBT open circuit faults in frequency converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 30-35.
- [17] KOU L, LIU C, CAI G, et al. Fault diagnosis for open-circuit faults in NPC inverter base on knowledge-driven and data-driven approaches[J]. IET Power Electronics, 2020, 13: 1236-1245.
- [18] LI G, XU S, YAO C, et al. Open-circuit fault diagnosis for three-level ANPC inverter fed PMSM drives with model predictive control[C]// 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), October 28-31, 2022, Haining, China: 1-6.
- [19] 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.
LI Bing, CUI Jiebing, HE Yigang, et al. Fault diagnosis of active neutral point clamped three-level inverter based on energy spectrum entropy and wavelet neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2216-2225.
- [20] FAZIO P, MARCHESONI M, PARODI G. Fault detection and reconfiguration strategy for ANPC converters[C]// 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, September 4-6, 2012, Novi Sad, Serbia: 1-5.
- [21] 张波, 葛琼璇, 王晓新, 等. 基于瞬时功率的三电平 ANPC 变流器开路故障检测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4070-4078.
ZHANG Bo, GE Qiongxuan, WANG Xiaoxin, et al. Fault diagnosis for open circuit switch based on instantaneous power for three-level ANPC converter[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4070-4078.
- [22] HE J, DEMERDASH N A O. Diagnosis of open-circuit switch faults in multilevel active-NPC (ANPC) inverters[C]// 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), June 15-18, 2014, Dearborn, MI, USA: 1-6.
- [23] KIM Y J, KIM S H, KIM S M, et al. Open fault diagnosis and tolerance control for grid-connected hybrid active neutral-point-clamped inverters with optimized carrier-based pulse width modulation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 145542-145551.
- [24] 姜卫东, 李来保, 王金平, 等. 改进的中点钳位型三电平逆变器非连续脉宽调制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 127-134.
JIANG Weidong, LI Laibao, WANG Jinping, et al. Improved discontinuous pulse width modulation strategy for neutral point clamped three-level inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 127-134.
- [25] 马呈瑶, 赵鲁, 范恩泽, 等. 应用于高频辅助变流器的 DBSRC 变换器 IGBT 开路故障分析及容错运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 67-80.
MA Chengyao, ZHAO Lu, FAN Enze, et al. IGBT open-circuit fault analysis and fault-tolerant operation research of DBSRC converter applied to high-frequency auxiliary converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 67-80.

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-08-28

作者简介:

陈怡薇(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为变流器故障诊断; E-mail: chen_yiwei2000@163.com

徐永海(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统。E-mail: yonghaixu@263.net

(编辑 张颖)